

T.C.
MİMAR SİNAN GÜZEL SANATLAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MİMARLIK ANABİLİM DALI
YAPI FİZİĞİ VE MALZEME PROGRAMI

**DEPREM HASARLARININ BİR BİLEŞENİ OLARAK
ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİNNAZ BAYHAN

TEZ YÖNETİCİSİ
Prof. Dr. KEMAL ÇORAPÇIOĞLU

İSTANBUL- 2006

Binnaz Bayhan tarafından hazırlanan “**Deprem Hasarlarının Bir Bileşeni Olarak Alkali-Silika Reaksiyonları**” adlı araştırmanın Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Kemal ÇORAPÇIOPLU

Bu çalışma, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Fiziği ve Malzeme Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman : **Prof. Dr. Kemal ÇORAPÇIOPLU (MSGSÜ)**

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Halit Yaşa ERSOY (MSGSÜ)**

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. Ahmet GÜLEÇ (İ.Ü)**

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
SUMMARY	II
TEŞEKKÜR	III
ŞEKİL LİSTESİ	IV
RESİM LİSTESİ	VI
TABLO LİSTESİ	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	IX
AMAÇ VE KAPSAM	X
GİRİŞ	1
1. BÖLÜM: ALKALİ-SİLİS REAKSİYONUNA YOL AÇAN BETON BİLEŞENLERİ	3
1.1. Agrega Tanım ve Özellikleri	4
1.2. Çimento Tanım ve Özellikleri	18
2. BÖLÜM: ALKALİ-SİLİS REAKSİYONU	31
2.1. Alkali-Silika Reaksiyonunun Tanımı	34
2.2. Alkali-Silika Reaksiyonunun Mekanizması	39
2.3. Alkali-Silika Reaksiyonunu Etkileyen Faktörler	46
2.3.1. Karışım Oranlarının Etkisi	47
2.3.2. Reaktif Agreganın Cinsinin ve Tane Büyüklüğünün Etkisi	49
2.3.3. Alkalilerin Etkisi	53
2.3.4. Rutubetin Etkisi	55
2.3.5. Sıcaklığın Etkisi	55
2.3.6. Sürüklenmiş Havanın Etkisi	56
2.3.7. Mineral Ve Kimyasal Katkıların ASR'na Etkisi	57

2.3.8. Uçucu Külün Etkisi	62
2.3.9. Yüksek Fırın Cürufunun Etkisi	64
2.3.10. Silis Dumanının Etkisi	65
2.3.11. Doğal Puzolanların Etkisi	66
2.4. Alkali-Silis Reaksiyonunun Belirtileri	67
2.5. Alkali-Silis Reaksiyonunun Betona Etkileri ve Teşhisi	68
2.6. Alkali-Silis Reaksiyonunu Kontrol Altına Alma Yöntemleri	69
2.7. Alkali-Silika Reaksiyonuna Örnekler	71
3. BÖLÜM: ALKALİ-SİLİS REAKTİVİTESİNİN TESPİTİ İÇİN TEST METODLARI	79
3.1. Agregaların Reaktivitesini Ölçmekte Kullanılan Deney Metodları	81
3.1.1. Kimyasal Metot (ASTM C 289)	81
3.1.2. Harç Çubuğu Metodu (ASTM C227)	83
3.1.3. Mineral Katkıların Veya Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliklerini Ölçen Deney Metodu (ASTM C441)	84
3.1.4. Beton Prizma Metodu (ASTM C1293)	85
3.1.5. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Metodu (ASTM C1260)	86
3.1.6. Jel Pat Metodu	88
3.1.7. Alman Çözünme Metodu	88
3.1.8. Ozmotik Hücre Metodu	88
3.1.9. Cornell Üniversitesi Leke Metodu ve Jel Floresan Testi	89
3.1.10. Los Alamos Milli Laboratuvarı Leke Metodu	90
3.1.11. Boyama Metodlarının Uygun Şekilde Kullanılması	90
3.1.12. Kireçli Harçlardaki Alkali-Silis Tepkimelerine Bağlı Gerilimi Ölçme Metodu	91

3.1.13. Otoklav Metotları	92
---------------------------	----

4. BÖLÜM: DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Giriş	95
------------	----

4.2. Deneyde Kullanılan Agregaların Özellikleri	95
-------------------------------------------------	----

4.2.1. Deneyde Kullanılan Agregaların Alındığı Bölgenin Jeoloji Araştırması	95
-----------------------------------------------------------------------------	----

4.2.2. Deneyde Kullanılan Agregaların Petrografik ve Mineralojik İncelemesi	98
-----------------------------------------------------------------------------	----

4.3. Deneyde Kullanılan Çimentonun Özellikleri	100
------------------------------------------------	-----

4.4. Alkali-Silika Reaksiyonunun Tespiti	103
------------------------------------------	-----

4.5. Ses Hızı Tayini	106
----------------------	-----

4.6. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	110
-------------------------------------------	-----

5. BÖLÜM: SONUÇ VE ÖNERİLER	113
-----------------------------	-----

KAYNAKLAR

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Bu çalışmada deprem hasarlarının yoğun olduğu bölgelerde hasar analizi yapabilmek amacıyla, Melen çayının Düzce Akçakoca yöresinden geçen bazı alanlardan temin edilen agregaların alkali-silika reaksiyonu yönünden reaktivitesi araştırılmıştır. Bu reaktiviteyi ölçmek amacıyla , bu agregalarla birlikte puzolanik ve portland çimentoları kullanılarak, çimento alkalilerinin agrega ile reaksiyonu sonucu genişmelerinin olup olmadığı deneylerle araştırılmıştır. Deneysel çalışmada Hızlandırılmış Harç Çubuğu Yöntemi (ASTM C1260) uygulanmıştır ve numuneler üzerinde çeşitli mekanik deneyler yapılmıştır.

Birinci bölümde; genel olarak agrega ve çimento çeşitleri ve tanımlamalarına yer verilmiştir. Agreg-a-çimento ara yüzeyindeki etkileşimler açıklanmaya çalışılmıştır.

İkinci bölümde; alkali-silis reaksiyonunun (ASR) tanımlaması yapılmış ve mekanizması açıklanmıştır. ASR'nun belirtileri ve betonu ne şekilde etkilediği irdelenmiş ve teşhisle birlikte kontrol altına alma yöntemlerine yer verilmiştir. ASR'nu etkileyen faktörler incelenerek, ana bileşenlerden agrega ve çimentonun da özelliklerinin reaksiyonu nasıl etkilediği açıklanmış ve bölümün sonunda ASR tanımlaması örneklerle desteklenmiştir.

Üçüncü bölümde; alkali-silis reaksiyonunun tespit yöntemleri ve konu ile ilgili mevcut standartlar açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde; reaktivitesi araştırılacak olan agregaların ve birlikte kullanıldıkları çimentoların özellikleri anlatılarak , deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuştur.

Sonuç olarak, araştırma kapsamında yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiş ve ileride bu konuyla ilgili yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Alkali-silis reaksiyonu, çimento-agrega ilişkisi, reaktif silis

SUMMARY

In this thesis, the reactivity of aggregates, , with respect to alkali-silica reaction (ASR) was investigated. The aggregates taken from some locations of Düzce Akçakoca zone where Melen stream is running for this study. To measure this reactivity, whether cement alkalis expand due to their reaction with aggregates was investigated experimentally using pozzolonic and portland cement binders. During the experiments Accelerated Mortar Tube Method (ASTM C1260) was applied and several mechanic experiments were carried on samples.

In the first chapter; types of aggregates and cement were described. The interactions at the aggregate-cement interface were explained.

In the second chapter; alkali-silica reaction (ASR) was defined and the mechanism was explained. The signs of ASR and how it affects the concrete were explicated and the methods to limit these effects were stated. The properties aggregate and cement, effect on the reaction were explained by investigating the facts that affect ASR and at the end of the chapter, the definition of ASR was supported with examples.

In the third chapter; the detection methods on alkali-silica reaction and the present standards related to this subject were explained.

In the fourth chapter; the reactivity properties of cement was used as binder were explained and the results of the experiments were discussed.

In the last chapter; the data obtained as a result of the experiments within the context of the research were evaluated and a proposal for future work was proposed.

Keywords : Alkali-silica reaction, cement-aggregate relation, active silica

TEŞEKKÜR

Çalıőmama öneri ve yorumlarıyla yön veren, görüşlerinden yararlandığım, Yüksek Lisans Tez Danıőmanım Sayın Prof. Dr. Kemal Çorapçioğlu'na katkılarından dolayı teşekkür ederim. Akademisyenlik yolunda atmış olduğum ilk adımdan itibaren desteğini, yol göstericiliğini hep hissettiğim Prof. Dr. Halit Yaşa Ersoy'a teőekkürlerimi sunarım. Tez çalıőmam sırasında değerli görüş ve önerilerini esirgemeyen Doç. Dr. Ahmet Güleç'e, tüm çalıőmam boyunca her anlamda yardımlarıyla beni destekleyen Yard. Doç. Dr. Oğuz Erataç'a, Yard. Doç. Dr. Cüneyt Diri'ye, Yard. Doç. Dr. Sedat Kurugöl'e, Araő. Gör. Dilek Dilhan Hatipoğlu'na, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Mimarlık Bölümü Yapı Fiziği ve Malzemesi kürsüsünün değerli elemanlarına, yardımlarından dolayı değerli arkadaşlarıma, her zaman beni destekleyen ve yanımda olan sevgili aileme ve tüm zorlukları aőmamda bana güç veren Ertunç Vural'a sonsuz teőekkürlerimle...

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Silis Çözünürlük Sınırları	38
Şekil 2.2.: Tipik Bir Pesimum Reaktif Agregası İçeriği Grafiği	39
Şekil 2.3: Alkali Silis Reaksiyonunun Şematik Gösterimi	43
Şekil 2.4: Çimentonun Alkali İçeriğinin Genişlemeye Olan Etkisi	48
Şekil 2.5: Silisin Farklı Formlarının Basitleştirilmiş Bir Örneği	49
Şekil 2.6: Reaktif Silis/Alkali Oranına Göre Genleşme Miktarları	56
Şekil 3.7: Alkalinitedeki Azalma-Çözünmüş Silis Grafiği	83
Şekil 4.8: Bolu ve Yakın Civarının Kayatürü Haritası	96
Şekil 4.9: Batı Karadeniz Bölgesi Jeoloji Ana Materyal Haritası	97
Şekil 4.10: Deney Numunelerinin Zaman Bağlı Boyca Genleşmeleri	104
Şekil 4.11: Puzolanik ve Portland Çimentolu Numunelerin Zamana Bağlı Boyca Genleşmeleri	105
Şekil 4.12: Tüm Deney Numunelerinin Zamana Bağlı Boyca Genleşmeleri	105
Şekil 4.13: Portland Çimentolu, %10 Silis Katkılı ve %50 Silis Katkılı Numunelerin Zamana Bağlı Boyca Genleşmeleri	106

Şekil 4.14: Puzolanik Çimentolu ve Portland Çimentolu Numunelerin Zamana Bağlı Ses Hızı Grafikleri	107
Şekil 4.15: Portland Çimentolu, %10 Silis Katkılı ve %50 Silis Katkılı Numunelerin Zamana Bağlı Ses Hızı Grafikleri	107
Şekil 4.16: Tüm Deney Numunelerin Zamana Bağlı Ses Hızı Grafikleri	108
Şekil 4.17: Puzolanik Çimentolu ve Portland Çimentolu Numunelerin Zamana Bağlı Dinamik Elastisite Modülü Grafikleri	108
Şekil 4.18: Portland Çimentolu, %10 Silis Katkılı ve %50 Silis Katkılı Numunelerin Zamana Bağlı Dinamik Elastisite Modülü Grafikleri	109
Şekil 4.19: Tüm Deney Numunelerin Zamana Bağlı Dinamik Elastisite Modülü Grafikleri	109

RESİM LİSTESİ

Resim 2.1: Reaktif Olmayan Kuvars	50
Resim 2.2: Reaktif Veya Yorulmuş Kuvars	51
Resim 2.3: Betondaki Çok İnce Damarlı Bir (Kriptokristalli) Kalsedon Agregasının Mikroskop Fotoğrafı	51
Resim 2.4: Agregada Patlama	71
Resim 2.5: ASR'den Etkilenmiş Bir Agregada Parçacığında Açık Bir İç Çatlak	71
Resim 2.6: Çatlaklardan Jel Sızması	71
Resim 2.7: Bir Havaalanı Kaplamasından Alınan Bir Beton Gövdesinin Açık Işık Altındaki Kesiti	72
Resim 2.8: Boya İşleminde Sonra Aynı Kesit UV Işığı Altında Görüntülediğinde Çatlaklar Boyunca Ve Agregada Çevresinde ASR Jelini Göstermektedir.	73
Resim 2.9: Bir Agregada Parçacığının Etrafındaki ASR Nedeniyle Oluşan Reaksiyon Çemberi	73
Resim 2.10: Opale Benzer Kireçtaşı Agregada Parçacığının (A) Çevresel Renk Değiştirmesi	74
Resim 2.11: ASR Nedeniyle Şiddetli Şekilde Çatlamış Opale Benzer Silisli Bir İnce Agregada	74

Resim 2.12: Hamur Fazından Ve Reaktif Bir İnce Agregada Parçacığından Kristallerin Çaprazlamasına Geçen Çatlaklar	75
Resim 2.13: Reaktif Agregada (A) ve Çimento Hamuru (B) Arasındaki Arayüzdeki Enlemesine Çatlaklarla Jelin Varlığı	75
Resim 2.14: Bir Hava Boşluğunun Dış Kenarında Jel	76
Resim 2.15: Reaktif Bir Agregada İçinde Enlemesine Çatlaklı ASR Jeli	76
Resim 2.16: Gül Şeklinde Rozet Gibi Kristalli ASR Jel Ürününün SEM Görüntüsü	77
Resim 2.17: Agreganın Yüzeyinde Kristalli Katmanlı Jel	77
Resim 2.18: Masif Tipte Amorf ASR Jelinin SEM Görüntüsü	78

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Çeşitli Kil Minerallerinin Kimyasal Bileşimleri	8
Tablo 1.2: Magmatik Kayaç Sınıflaması	13
Tablo 1.3: Başlıca Tortul Kayaçlar	14
Tablo 1.4: Çimento Ana Hammaddelerinin CaCO ₃ Oranına Göre Sınıflandırılması	21
Tablo 2.5: Periyodik Element Tablosu	53
Tablo 4.6: X-Işını Floresan Spektrometre Cihazı İle Yapılan Yarı Kantitatif Element Analizi	99
Tablo 4.7. Puzolanik Çimentonun Kimyasal Özellikleri	100
Tablo 4.8: Puzolanik Çimentonun Fiziksel Özellikleri	101
Tablo 4.9: Portland Çimentosunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	102
Tablo 4.10 : Harç Çubuklarının Genleşme Oranları	103
Tablo 4.11: Ses Hızı ve Dinamik Elastisite Modülü	106

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ASR : Alkali-Silis Reaksiyonu

AAR: Alkali-Agrega Reaksiyonu

ACR: Alkali Karbonat Reaksiyonu

DEF : Delayed Ettringite Formation (Gecikmiş Etrenjit Oluşumu)

UK : Uçucu Kül

YFC : Yüksek Fırın Cürufu

Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada, deprem hasarlarının bir bileşeni olarak alkali silis reaksiyonu açıklanmaya çalışılmış ve bu içerik doğrultusunda da çalışma alanı olarak Düzce Melen Çayı seçilmiştir. Bu amaçla bölgeden alınan çeşitli agregalarla, reaktiviteye etkisi açısından farklılık gösteren puzolanik ve portland çimentoları, ayrıca granülometri bileşenini etkileyen faktörlerden biri olan ince madde olarak saf kuvars kumu kullanılmış ve bu doğrultuda çeşitli deneyler yapılmıştır.

Beton; agrega çimento hamuru ve agrega-çimento hamuru temas yüzeyinden oluşan bir malzeme olarak düşünülürse en zayıf halkanın ara yüzeyler olduğu ortaya çıkar. Beton teknolojisindeki gelişmenin anahtarı çimento hamuru ile agrega arasındaki ara yüzeylerin güçlendirilmesidir.

Günümüzde beton malzeme üzerinde çalışmalar gittikçe hız kazanmıştır. Eski yapılardaki beton hasarları teşhis edilmeye çalışılıp yeni yapılanmalarda bu çalışmalar ışığında tavsiyelerde bulunulmaya devam edilmektedir. Bilindiği gibi beton üzerinde birçok hasar çeşidi, bunların tesbiti ve iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Durabilite açısından bakıldığında birçok nedenler arasında yer alan alkali silis reaksiyonu açısından beton hasarları açıklanmaya çalışılmıştır.

Birinci derece deprem kuşağında yer alan Düzce ili, 17 Ağustos ve 12 Kasım 1999 tarihlerinde meydana gelen iki depremden de etkilenmiş ve bunun sonucunda ağır maddi ve manevi kayıplar vermiştir. Bu depremler sonunda Düzce ilinde toplam 980 kişi hayatını kaybederken, 3836 kişi de yaralanmıştır . En fazla can kaybı ve yapısal hasar, deprem kırığı üzerinde bulunan yerleşmeler ile Düzce Kentinde meydana gelmiştir. Gölyaka-Kaynaşlı hattındaki yapı hasarlarının çoğunluğu deprem fayının parçalaması sonucunda, Düzce kentindeki hasar ise, zayıf zemin özelliklerine bağlı olarak gerçekleşmiştir¹³

Yapılan kısa süreli gözlemlerde kentteki binaların yarısından fazlasında yıkılma ve ağır hasar olduğu gözlenmiştir. Yıkılan binaların çoğunluğunun üç ve daha fazla katlı yapılar olduğu dikkati çekmiştir. Kısa süreli gözlemlerde zemin davranışları hakkında detaylı bilgi toplanamamıştır. ¹⁴

Meydana gelen her yeni deprem, yapıların projelendirilmesi, uygulanması ile zemin nitelikleri arasında gerekli teknik bağlantının kurulamadığı veya denetimlerin yeteri kadar yapılamadığı gerçeğini de ortaya koymaktadır. Depremlerin yarattığı can ve mal kaybının yüksek oluşunun başlıca nedenleri arasında ildeki plansız kentleşme ve arazi kullanımı ile imar uygulamalarındaki yanlışlıklar da sıralanabilir. Düzce’de geçmişte yapıların tasarım ve üretim sürecinde gerekli mimarlık ve mühendislik hizmetlerinin göz ardı edilmesi ve denetiminin gereğince yapılmaması depremin tahrip edici etkisini artırmıştır. ¹³

Düzce depremi sonrasındaki yapılardaki ağır hasarların nedenlerinin arasında yukarıda bahsedilenlerden başka birçok neden ileri sürmek de mümkündür. Yapıların inşaatında kullanılan malzemelerin özellikleri, kullanılış şekilleri, izlenen yöntemler, vb . Bu tez kapsamında da Düzce yöresi yapılarında kullanılmış olan bazı agrega tipleri ve bunların birlikte kullanıldığı çimentolar üzerinde birtakım deneyler yapılmış, bunların arasındaki etkileşimler incelenmiş ve alkali silis reaksiyonu açısından ele alınmış ve bunun mekanik etkileri araştırılmıştır. Melen çayı eteklerinden, Akçakoca köprüsünün doğu ve batı kısımlarındaki çeşitli lokasyonlardan alınmış olan agregalarla, puzolanik ve portland çimentoları kullanılarak numuneler hazırlanmış ve Hızlandırılmış Harç Çubuğu Metodu esas alınarak birtakım deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre , deprem sonrası yıkımların sebepleri arasında, kullanılan agregaların alkali-silika yönünden reaktifliğinin etkisi değerlendirilmiştir.

GİRİŞ

Betonarme yapılarda mekanik etkiler dışında bozulma süreçlerini kontrol eden ana faktör, ortamda su veya nemin bulunmasıdır. Su çözdüğü zararlı maddeleri betonun içine taşır, kimyasal reaksiyonların başlamasına ve sürmesine neden olur. Örneğin betonun boşluk çözeltisindeki OH⁻ iyonları, agregalardaki reaktif silis ile reaksiyona girer, bir jel oluşur, oluşan jelin hacmi su emdikçe arttığından, suya maruz yapılarda olay daha belirgin ve zararlıdır. Suyun beton içine taşınımı, boşlukların türüne, çapına, miktarına, dağılımına, mikro veya makro boyuttaki çatlakların varlığına bağlıdır. Bu nedenle, kalıcılık için beton bünyesinde boşlukların dağılımının kontrol edilmesi ve çatlak oluşumunun engellenmesi gerekir.

Betonda çatlamlara neden olan alkali-agrega reaksiyonu (AAR) sonucu oluşan alkali-silis hidrate jeli, nemi absorbe ettiği zaman genişir ve sonunda betondaki çimento hamurunda ve agrega parçacıklarında çatlaklar oluşturur. Betonun su emmesi artar, artan jel oluşumu çatlakları büyütür, özellikle agrega çimento arayüz bağının çekim gücünü zedeleyerek betonun parçalanmasına yol açar. Bu nedenle alkali-silis reaksiyonu konusundaki araştırmalar hem kimyasal hem de yapısal açıdan ele alınmaktadır.²

1930'lu yıllarda, Kaliforniya'da bazı yapılardaki betonlarda beklenmedik genişleme ve çatlakların görülmesi kaygı yaratmıştır. 1930'ların sonlarına doğru, bu alanda çalışmalar yapan Stanton, genişmelerin ve çatlamların çimentonun alkali içeriğine bağlı olduğunu ve sözü edilen yapılardaki hasarın alkali-silis reaksiyonu sonucu meydana geldiğini saptamıştır. Reaksiyona giren silisli bileşenin opalin silis olduğunu belirten Stanton, daha sonra 600 kg/m³ üzerinde çimento içeren harç numuneleri üzerinde yaptığı çalışmalar sonucu, çimentonun asitte çözülebilir alkali içeriği; -eşdeğer sodyum oksit içeriği- kütlece %0.60'dan az olduğu hallerde alkali-silis reaksiyonunun oluşmadığı sonucuna varmıştır. Stanton'un çalışmasının sonucu olarak, önemli yapılarda, çimentonun alkali içeriğinin kütlece %0.60 ile sınırlandırılması şartı getirilmiştir. Çimentonun alkali içeriğinin sınırlandırılması, reaktif agrega kullanılması halinde hala kullanılan bir yöntemdir. 25 yıl öncesine

kadar alkali-silis reaksiyonunun dünyanın bazı bölgelerinde (örneğin, Amerika, Kanada ve Danimarka) yaygın olarak görüldüğü, fakat diğer ülkeleri (örneğin pek çok Avrupa ülkesi, Japonya ve Çin) etkilemediği hakkındaki yaygın bir görüş hakimdi. Ancak 1980'lerde birçok başka ülkede alkali-silis reaksiyonuna maruz kalan beton yapıların bulunduğu görüldü; bu da alkali-silis reaksiyonunun dünya çapında yaygın olduğunu kanıtlamıştır. Japonya'da yakın zamana kadar betonda alkali silis reaksiyonunun çok nadir olduğu sanılırdı, ancak 1982 yılından beri Osaka ve Kobe bölgelerinde alkali silis reaksiyonu sonucu hasar görmüş betonarme yapılar tespit edildiğinden bunun önemli bir sorun olduğu görülmüş, kullanılan kayaçların reaktivitesinin araştırılması öncelik kazanmıştır. ¹

Son yıllarda ülkemizde de Alkali Silika Reaksiyonu ile ilgili çalışmalar oldukça hız kazanmıştır. Kullanılmakta olan yapılarda, köprülerde,vs. ASR' den kaynaklanan sorun olduğu şüphesi beliriyorsa, o bölgelerde çeşitli etüd çalışmaları yapılmakta, kullanılan malzemeler ASR' ye etkisi yönünden değerlendirilmektedir.

**BÖLÜM 1: ALKALİ-SİLİS REAKSİYONUNA YOL
AÇAN BETON BİLEŞENLERİ**

1. ALKALİ-SİLİS REAKSİYONUNA YOL AÇAN BETON BİLEŞENLERİ

1.1 Agreganın Tanımı ve Özellikleri

Yeryuvarının kabuğu kayalardan meydana gelmektedir. Kayaların jeomorfolojilerinin incelenmesi, birçok açıdan önemlidir. Yer şekillerinin meydana gelişi ve evrimleri üzerinde kayaların mekanik (direnc, geçirimsizlik ve su tutma, genişleme katsayısı v.b.) ve kimyasal özellikleri (bileşimleri, çözünme dereceleri, unsurlar arasındaki bağın kolayca çözülüp çözülmemesi v.b.) doğrudan veya dolaylı olarak derin etkiler yapar. Diğer taraftan, çeşitli kayaların oluşum şartları, bulunuş durumları ve diğer kayalarla ilişkileri topografya ile ilgili problemlerin çözülmesine yardım eden önemli unsurlardır.⁴⁵

Mineraller

Minerallerin Özellikleri

Mineraller karakteristik özellikleri olan ve bileşimleri belirli bir kimyasal formül ile açıklanabilen maddelerdir. Minerallerin çoğu birden fazla elementten meydana gelir. Ancak altın, gümüş, elmas ve kömür gibi bazı mineraller tek bir elementten oluşmaktadır. Mineraller, belirgin özelliklerine göre açıklanır ve sınıflandırılırlar. Bunların başında kimyasal bileşim gelir. Bununla birlikte, bileşimi sabit olan mineral azdır. Çoğunluğunun bileşimi belirli sınırlar içerisinde değişir. Fakat buna rağmen, yine de belirgin bir formülle ifade edilebilirler.

Minerallerin Sınıflaması

Bugün için bilinen minerallerin sayısı 2000' den fazladır. Fakat bunların çok azı, 35 kadarı, kayaçların yapısında yer alır. Kayaçları meydana getiren mineraller kimyasal bileşimlerine göre bazı gruplar altında toplanmışlardır.

Kil , tabiatta bol miktarda bulunan minerallerdendir. Fakat, saf kil bulmak oldukça zordur. Kilin içerisinde en çok kalker, silis, mika, demir oksit bulunur. Genellikle 0,002 mm'den daha küçük taneli malzemeye kil adı verilmektedir. Kil sarımtırak, kırmızımtırak, esmer gibi renklerde bulunur. Kili meydana getiren maddeler sulu alüminyum silikatlarıdır. $m \text{ Al}_2\text{O}_3$. $n \text{ SiO}_2$. $p \text{ H}_2\text{O}$ genel kimyasal bileşim formülü ile ifade edilen kil, çok saf olduğu zaman hidrate alümin silikat (kaolinit) adını alır.

Mikalar, alüminyum ve alkali silikatların karmaşık bir grubudur. Demir, magnezyum, lityum ve flor elementlerinin çoğunu veya birini çoğu mika kapsar. Bu elementlerin dışında bütün mikalar hidroksil kapsar. Mika grubu birkaç tane mineral içerir. Koyu renkli, demir, magnezyumlu çeşidi biyotittir, kayalarda çok yaygın bulunur.

Mika kimyevi bakımdan genel olarak potasyum - alüminyumlu mika, magnezyumlu mika, florlu ve lityumlu mikalara ayrılabilir :

1. Potasyum - alüminyumlu mikalar:

Muskovit, $\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$

Paragonit, $\text{H}_2\text{NaAl}_3(\text{SiO}_4)_3$

2. Magnezyumlu mikalar:

Biyotit, $(\text{H}, \text{K})_2(\text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Al}, \text{Fe})_2(\text{SiO}_4)_3$

Flogopit, $\text{H}_2\text{KMg}_3\text{Al}(\text{SiO}_4)_3$

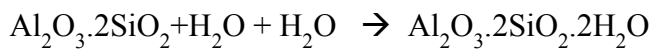
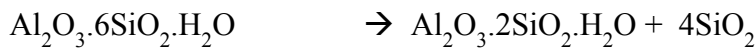
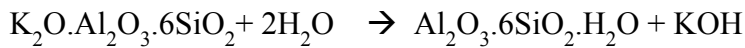
3. Flor ve lityumlu mikalar:

Lepidolit, $(\text{F}, \text{OH})_2(\text{Li}, \text{K})_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_9$

Zinvaldit, $(\text{F}, \text{OH})_2(\text{Li}, \text{K})_2\text{Al}_3\text{FeSi}_5\text{O}_{16}$

Kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), kaolin hammaddesini oluşturan en önemli mineral olup alüminyum hidro silikat bileşimli bir kil mineralidir.

Oluşum itibariyle, feldspat içeren granitik veya volkanik kayaçların feldspatlarının altere olarak kaolinit mineraline dönüşmesi sonucu kaolinler oluşmaktadır. Ana kayaç içindeki alkali ve toprak alkali iyonların, çözünür tuzlar şeklinde ortamdan uzaklaşması sonucu Al_2O_3 içerikli sulu silikatça zenginleşen kayaç kaoliniti oluşturur.



Kaolinit

İdeal kaolin bileşimi: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ olup bileşim oranları aşağıdaki gibidir;

SiO ₂ (Silika)	% 46.54
Al ₂ O ₃ (Alüminyum Oksit)	% 39.50
H ₂ O (Su)	<u>% 13.96</u>

Feldspatlar, yeryüzünü oluşturan minerallerden en önemlilerinden biri olup, bir mineral grubunun genel adıdır. Feldspatlar, izomorf karışımları ve oluşum özellikleri bakımından 2 gruba ayrılırlar.

1- Alkali Feldspatlar

2- Kalko-sodik feldspatlar (plajiokloslar)

1-Alkali Feldspatlar

Ortoklaz	K AlSi ₃ O ₈
Sonidin	"
Mikroklin	"
Anortoz	NaAlSi ₃ O ₈
Albit	"

2- Plajoklaslar

Albit	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Oligoklas	"
Andezin	"
Labrador	"
Bitovnit	"
Anortit	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

Bazı feldspat minerallerinin kimyasal bileşimi aşağıdaki gibidir:

	Na_2O	K_2O	CaO	Al_2O_3	SiO_2
Albit	11.0	-	-	19.4	68.8
Ortoklas	-	10.9	-	18.4	69.7
Anortit	-	-	20.1	28.6	43.3

Killer, sulu alüminyum silikatlar olup mineral sınıflaması aşağıda verilmiştir; ⁵⁴

Kil Minerallerinin Sınıflaması

A- Kaolinit Grubu

- 1- Kaolinit - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- 2- Dikit - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- 3- Nakrit - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- 4- Anaksit - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- 5- Halloysit - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- 6- Endellit - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

B- Smektit Grubu

- 1- Montmorillonit - $\text{Mg}_2\text{Al}_10\text{Si}_{24}(\text{OH})_{12}(\text{Na},\text{Ca})$
- 2- Nontronit - $\text{FeSi}_22\text{Al}_2\text{O}_{60}(\text{OH})_{12}(\text{Na}_2)$

3- Saponit - $Mg_{18}Si_2Al_2O_{60}(OH)_{12}(Na_2)$

4- Beidellit - $Al_{13}Si_{19}Al_5O_{60}(OH)_{12}(Na)$

5- Hektorit - $Li_2(Al,Fe,Mg)(Si_2Al_2)O_5OH$

C- İllit Grubu

$(Al_4Fe_4Mg_6)O_{20}(OH)_4Ky(Si_8-yAl_y)$

D- Klorit Grubu

1- Atapulgit - $Mg_5Si_8O_{20}(OH)_2 \cdot 4H_2O$

2- Sepiyolit - $Mg_6Si_8O_{20}(OH)_4 \cdot n H_2O$

3- Allofan - $Al+SiO_2+H_2O$

Tablo 1.1: Çeşitli Kil Minerallerinin Kimyasal Bileşimleri

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	H ₂ O
Kaolinit	46.90	37.40	0.66	0.27	0.29	0.84	0.44	0.18	12.95
Nakrit	44.75	39.48	0.53	0.19	0.13	0.34	0.22	-	14.40
Dikit	46.86	37.12	1.43	0.09	0.22	0.60	0.07	0.51	12.99
Halloysit	44.75	36.94	0.31	-	0.11	0.60	-	-	17.42
Anauxit	54.32	29.96	2.00	0.14	0.32	-	0.37	-	12.64
Nontronit	40.54	5.19	31.63	0.06	1.92	0.24	0.14	-	20.75
Klorit	31.44	17.62	-	37.64	-	-	-	-	13.19
Proklorit	23.69	21.26	26.52	17.60	3.22	-	-	-	7.63
Sepiyolit	52.50	0.60	2.99	21.31	0.47	-	-	-	21.27
Atapulgit	57.85	7.89	2.82	13.44	0.30	0.53	-	-	16.95

Alkali-Silis Reaksiyonu Açısından Silis Minerallerinin Reaktivitedeki Azalmaya Göre Sıralanması

Amorf silis; sedimanter veya volkanik cam

Opal

Kararlı olmayan kristalin silis (tridimit ve kristobalit)

Çört

Kalsedon

Silisin diğer kriptokristalin formları

Metamorfik olarak ayrılmış ve bozulmuş kuvars

Deforme olmuş kuvars

Yarı kristalleşmiş kuvars

Saf kuvars ¹

Kayaçlar

Kayaçlar su, gaz ve organik varlıkların dışında yerkabuğunu meydana getiren unsurlardır. Yol yarmaları, maden ocakları ve taş ocakları gibi yerlerle, toprak veya enkaz örtüsünden yoksun topografya yüzeylerinde mostralalarına rastlanılan kayaçlar, yer şekillerinin oluşum ve gelişimlerinde rol oynayan önemli etmenlerden biridir. Onların fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki farklılıklar yer şekillerinin de farklı olmalarına sebep olur. Çünkü bu özellikler, kayaçların, aşındırma etmen ve süreçlerine karşı dayanıklı veya dayanıksız olmalarını tayin eder. Örneğin kalker ve jips gibi çözülebilen kayaçların bulunduğu sahalarda lapyra, dolin, uvala gibi özel yer şekilleri oluşmaktadır. Genel olarak, tektonik hareketlerle ters durumlar meydana gelmemişse, aşınmaya karşı dayanıklı kayaçlar yüksek yer şekillerini, kolay aşınan ve parçalanan kayaçlar ise alçak yer şekillerini meydana getirirler. Granitlerden oluşmuş sahalarda granit topografyası adı verilen özel bir topografya tipi oluşur. Benzer şekillere siyenit, diorit, andezit, bazalt ve gnays gibi heterojen kayaçlar üzerinde de rastlanır.

Kayaçlar kökenlerine göre üç ana grup altında toplanırlar:

1. Magmatik kayaçlar
2. Tortul kayaçlar
3. Metamorfik kayaçlar

Bütün bu gruptaki kayaçlar, değişik minerallerin bir araya gelmesi ile oluşmuşlardır. Ancak saf kalker, mermer, peridotit, piroksenit ve hornblendit gibi kayaçlar yalnız bir çeşit mineralden oluşmuşlardır ve bu bakımdan bir ayrıcalık oluştururlar.⁴⁵

Magmatik kayaçlar

Bu kayaçlar, magmanın soğuyarak katılaşması sonucu meydana gelirler. Yer kabuğunun yaklaşık olarak % 65' ini oluştururlar. Kökenlerini magma teşkil ettiğinden bunlara magmatik kayaç veya kısaca magmatit ismi verilir.

Magma bazen yeryüzüne kadar yükselir ve orada soğuyup katılaşır. Bu yolla meydana gelen kayaçlara *dış püskürük kayaçlar* ismi verilir. Aynı kayaçları ifade için *volkanik kayaçlar* (volkanit'ler) veya *yüzey kayaçları* terimleri de kullanılır.

Magmanın soğuması bazen yerin iç kısmında, belirli bir derinlikte gerçekleşir. Böyle bir soğumayla meydana gelen kayaçlara ise *iç püskürük kayaçlar* ismi verilir. Bunların bir kısmı yeryüzüne yakın kısımlarda, diğer bir kısmı ise, büyük derinliklerde oluşmuşlardır. Bunlardan birincilere *subvolkanik kayaçlar*, ikincilere de *plütonik kayaçlar* (plütonit'ler) veya *derinlik kayaçları* denir.

Kimyasal bileşim kayacı teşkil eden minerallerin cinsine ve bulunuş oranına bağlıdır. Katılaşma kayaçlarının bünyesinde yer alan başlıca minerallerin bulunuş oranları ise şöyledir:

Feldspatlar % 59

Piroksen ve amfiboller % 17

Kuvars % 12

Mika % 4

Diğer mineraller % 8

Bu duruma göre silisyum ve alüminyum katılaşma kayaçlarının başlıca unsurlarını teşkil eder. Özellikle silisyum en önemli unsurdur ve katılaşma kayaçları içerisindeki silisyum oranına göre 4 gruba ayrılır.

Bunlar:

1 — *Asit kayaçlar* : Silisyum oranı % 65 - 66 dan çok, açık renkli nisbeten hafif.

2 — *Nötr kayaçlar* : Silisyum oranı % 52-65 arasında.

3 — *Bazik kayaçlar* : Silisyum oranı % 52 den az, koyu renkli nisbeten ağır.

4 — *Ultrabazik (ultramafik) kayaçlar* : Silisyum oranı % 40, çok yoğun ve koyu renkli.

Katılaşma kayaçlarının başlıca türleri:

Kayaçları kolayca tanımaya yarayan ve arazi sınıflandırması olarak da bilinen pratik bir sınıflandırmadaki başlıca gruplar granit grubu, siyenit grubu, diorit grubu, gabro grubu ve ultrabazik (ultramafik) kayaçlar grubu gibi gruplardır. Bu grupların dışında herhangi iki grubun özelliğini taşıyan geçiş tipi kayaçlarının oluşturduğu alt gruplar da vardır. Bunların en önemlileri granodiorit grubu ve monzonit grubudur.

Granit grubu :

Grubun derinlik kayacını granit meydana getirir. Granitler açık renkte granüler dokuda kayaçlardır. Esas minerallerini kuvars, feldspat ve mika teşkil eder. Az miktarda bulunabilen diğer mineraller amfibol (hornblend) ve piroksenlerdir. Bileşiminde bulunan minerallerden , özellikle kuvarstan dolayı asit karakterdedirler. Kristalleri iri ve hemen hepsi aynı büyüklüktedir. Yavaş soğuma sonucu hepsi gelişme imkanı bulmuşlardır. Hakim feldspat tipini ortoklaz cinsi feldspatlar meydana getirir. Bununla beraber plajiyoklaz tipi feldspatların hakim olduğu granitler de vardır. Granitlerde hem biotit (siyah mika) hem de muskovit (beyaz

mika) bulunabilir. Her iki mikayı birden ihtiva eden granitlere *iki mikalı granit* adı verilir.

Granitlerin renkleri, genellikle açık olmakla birlikte, içindeki feldspatların ve diğer minerallerin cins ve miktarına göre gri, pembe, kırmızımsı olabilir.

Granitlerde kuvars, genellikle hacmen % 20' nin üzerindedir. Derinlik külteleri arasında hacmen % 40' tan fazla kuvars ihtiva eden türe rastlanmaz. Kuvars ve ağır silikatlar bakımından zengin olan kayaçlar gabro sınıfına girer.

Bol miktarda biotit ve plajyoklaz tipi feldspat minerali içeren granitler bu minerallerin asitlerden kolay etkilenmeleri ve kimyasal ayrışmaya uğramaları nedeniyle çözülürler.

.Siyenit grubu :

Bu grupta yer alan kayaçlarda serbest kuvars yoktur. Bu özellik onları granit grubu kayaçlarından ayıran başlıca özelliktir. Bununla beraber bazı türleri % 5 den az kuvars içerebilir. Bunlara *kuvarşlı siyenit* veya *kuvarşlı trakit adları* verilir.

Siyenitlerin ayrışma ve parçalanması sonucu granit topografyasındaki benzer şekiller oluşur. Beyaz, açık gri, yeşil olmak üzere çeşitli renklerde bulunurlar.

Ultrabazik (ultramafik) kayaçlar grubu :

Genellikle granüler dokuda olan bu kayaçlar esas olarak ferromagnezyumlu minerallerden oluşurlar, renkleri koyudur; içlerinde feldspat bulunmaz. Başlıca türlerini *hornblendit*, *piroksenit* ve *peridotit* meydana getirir. Bunlar hidrasyon olayı sonucu yeşil renkli serpentine dönüştüklerinden *yeşil kayaçlar* olarak da isimlendirilirler.

Katılma kayaçları, yukarıda açıklanan pratik sınıflandırmanın yanısıra içlerinde yer alan minerallerin hacim olarak katılma oranları (% cinsinden) gözönünde bulundurulmak suretiyle de sınıflandırılmaktadırlar.⁴⁵

Tablo 1.2: Magmatik Kayaç Sınıflaması⁵⁰

Magmatik Kayaç Sınıflaması								
Açık Renkli Kayaçlar				Orta Renkli Kayaçlar			Koyu Renkli Kayaçlar	
	Ortoklas Çoğunlukta Albit Azınlıkta		Ortoklas & Albit		Plajiyoklas Çoğunlukta		Plajiyoklas Çoğunlukta	Feldspatsız
	B H P (4)		B HP		B HP	HBP	P HO	OP HB
	Kuvarslı	Kuvarssız	Kuvarslı	Kuvarssız	Kuvarslı	Kuvarssız	Kuvarslı	Kuvarssız
Faneritik ⁽¹⁾ (Fenokristali) Ve Tümü Kris.	Granit Pegmatit Aplit	Siyenit	Kuvars Monzonit Granodiyo	Monzonit	Kuvars Diyorit	Diyorit	Gabro Diyabaz	Peridotit Hornblendit Piroksenit
Porfiritik ⁽²⁾	Granit porfir	Siyenit porfir	Kuvars monz. Porf. Granod. Porf.	Monzonit porfir	Kuvars diyorit	Diyorit porfir	Gabro porfir	
Afanitik ⁽³⁾ (Mikrokrist)	Riyolit	Trakit Fonolit	Riyodasit	Trakiand Latit	Dasit	Andezit	Bazalt	
Camsı	Vitrofir (Fenokristal Bulunur.) Opsidiyen Ve Pekştayn, Pumıs (Fenokristal Bulunmaz.)							
	←					→		
	Asidik		Bazik			Ultra Bazik		

(1) Faneritik: Çıplak gözle görülebilen her boy kristalli

(2) Porfiritik: Daha iri kristallerin bir camsı ve/veya bir afanitik kristalli hamur içinde bulunması.

(3) Afanitik: Çıplak gözle görülemeyen kristalli

(4) B=Biyotit, H=Hornblend, P=Piroksen, O= Olivin. Bu minerallerden bir ya da daha çok bulunabilir.⁵⁰

Tortul kayaçlar

Tortul kayaçlar yeryüzünde çok görülen kayaçlardır. Yer yüzeyinin yaklaşık olarak % 75'i tortul kayaçlardan müteşekkildir. Yerkabuğunun ise % 8 kadarını oluştururlar. Bunlar genellikle tabakalı olarak bulunurlar ve içerlerinde organizma kalıntıları (fosil) ihtiva ederler.

Tablo 1.3: Başlıca Tortul Kayaçlar ⁴⁵

Detritik (Kırıntılı) Tortul Kayaçlar		Organik Tortul Kayaçlar			Kimyasal Tortul Kayaçlar		
Çimentosuz Tortul Kayaçlar	Çimentolu Tortul Kayaçlar	Silisli Organik Kayaçlar	Karbonatlı Organik Kayaçlar	Bitümlü Organik Kayaçlar	Karbonatlı Kimyasal Kayaçlar	Evaporitler	Silisli Kimyasal Kayaçlar
Bloklar ve Çakıllar	Konglomera Kumtaşı	Diatomit	Tebeşir	Turba	Kalker	Jips	Sileks
Kumlar	Silttaşı	Radyolarit	Resif Kalkeri	Linyit	Dolomit	Anhidrit	Gayzerit
Siltler	Kiltaşı	Spongolit	Foraminiferli	Taş	Marn	Kaya Tuzu	Çört
Killer	Çamurtaşı		Kalker	Kömürü	Traverten		Filint
Lös	Arjilit		Lümaşelli	Antrasit	Oolitik		Jasp
	Şeyl		Kalker	Asfaltit	Kalker		
	Arkoz						
	Grovak						
	Detritik						
	Kalker						

Metamorfik kayaçlar

Başkalaşım kayaçları veya *metamorfitle* olarak da adlandırılan ve yerkabuğunun yaklaşık % 27'sini oluşturan metamorfik kayaçlar, önceden mevcut kayaçların,

sıcaklık, basınç ve kimyasal olayların etkisi altında metamorfizmaya (başkalaşma olayı) uğraması sonucu meydana gelirler ve metamorfizma derecesi ile oluştukları kayacın kimyasal bileşimine göre çeşitli tip ve özellikte bulunurlar.

Metamorfik kayalar ender görülen istisnaların dışında fosil ihtiva etmezler. Çünkü asli kayada bulunan fosiller metamorfizma olayı sırasında değişikliğe uğrar veya yok olurlar. Metamorfik kayalar katılma kayaları gibi kristallidirler. Aynı zamanda tabakalı bir yapı gösterirler ve bu bakımdan tortul kayalara benzerler.

Başlıca metamorfik kayalar şunlardır:

Metamorfik şistler (kristalen şistler) : İnce foliasyonlu veya dilinimli (şisti) yapıdadırlar ve tamamen kristallerden meydana gelirler. Metamorfik şistlerin çeşitli tipleri vardır. Başlıcalarını mika şist, klorit şist, hornblend şist, biotit şist, kuvars şist, kalk şist ve talk şist'ler meydana getirir. Bunlardan mikaşistlerin esas minerallerini mika ve kuvars teşkil eder. İçlerinde feldspat bulunmaz. Klorit şistler yeşil renkli klorit minerallerinden oluşurlar. Talk şistler ise talk levhacıklarından oluşmuşlardır, yumuşaktırlar.

Gnays : Yüksek dereceli metamorfizma sonucu oluşan orta ile iri kristalli bir metamorfik kayadır. Şeritli görünümüyle kolayca tanınır. Esas minerallerini kuvars, feldspat ve mika teşkil eder.

Kuvarsit : Kuvars bakımından zengin (%80' den fazla) kumtaşlarının metamorfizmaya uğramaları sonucu meydana gelmişlerdir. Kumtaşını meydana getiren kuvars taneleri, aralarındaki boşlukların silisyum dioksitle dolmasıyla birbirine sıkı bir şekilde bağlanmışlardır. Kuvarsit iki yönden kumtaşından ayrılır; 1- Kuvarsitte boşluk yoktur; 2- Kayacın kendisini meydana getiren kuvars tanelerinin çevrelerinden değil, bu tanelerden kırılır. Saf kuvarsit beyazdır. Demir veya diğer katışık maddeler kayaca kırmızı veya koyu bir renk verir. Kuvarsit içinde ikinci derecede mineraller olarak feldspat, muskovit, klorit, zirkon, turmalin, grenat, biotit, epidot, hornblend, silimanit bulunabilir.

Alkali-Silis Reaksiyonu Açısından Kayaçların Reaktivitedeki Azalmaya Göre Sıralanması

Tüfler dahil volkanik camlar (özellikle fazlaca silis içerenler)

Metakuvarsit metamorfize kumtaşları

Ayrılmış granitik gnayslar

Deforme olmuş granitik gnayslar

Diğer silis içeren metamorfik kayaçlar

Silisli ve mikalı şist ve filitler

İyi kristalize olmuş volkanik kayaçlar

Pegmatitik (kabaca kristalize) volkanik kayaçlar

Silis içermeyen kayaçlar ¹

Agrega Özelliklerinin Alkali-Silis Reaksiyonu ile İlişkisi

Agregaların silis bileşenlerinin dokusu genellikle amorf, kriptokristalli, mikrokristalli ve kristalli olarak tanımlanır. Silis/silis mineralleri, büyük oranda, normal hava sıcaklığında kararlı olmayan polimorfik oluşumlara sahiptir. Bileşiminde silis/silis bulunan ve en yaygın olan mineraller kuvars, tridimit, kristobalit, opal ve kalsedon gruplarıdır. Farklı agregaların reaktiviteleri içerdikleri kristal yapıdaki silis minerali miktarına bağlıdır. Opalin kristal yapısı düzensizdir. Bu nedenle alkalitesi yüksek çözeltilerden diğer silis içeren agregalara göre daha fazla etkileneceğinden en yüksek reaktiviteye sahip agrega türü olarak tanımlanır. Diğer taraftan doğal halde (dengede-gerilmesiz) bulunan kuvars, çok düzenli bir kristal yapısına sahiptir ve normal olarak alkali reaktif değildir. Volkan camları, mikro ve kriptokristalin kuvars, kalsedon, tridimit ve kristobalit ise orta derecede reaktif mineral olarak tanımlanmıştır. Andezitte ise reaktif özelliğe sahip volkan camı bulunmaktadır. Genelde bazaltlar silisçe doygun (Toleyit veya toleyitik bazalt) ve silisçe doygun olmayan (Alkali bazalt) bazaltlar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Toleyitik bazaltların hamuru çoğunlukla volkancamından oluşması nedeni ile literatürde reaktif agrega olarak tanımlanmaktadır. Bozunmuş bazaltlarda, klorit ve kil mineralleri (simektit grubu), alkali silis reaksiyonu sonucu alkali silis jeli dönüşmektedir. Bunun sonucu olarak bazalt içeren harçlarda ve betonlarda çatlak gelişimleri meydana gelebilmektedir. Alkali silis reaksiyonunun ürünü, yüksek oranda su tutabilen alkali silis jeldir. Alkali silis jelin çevrenin nemini içine alması ile betonda, hacimce %2-3 seviyesine kadar genişleme meydana gelebilmektedir. Genleşme sonucu, donatısız kütle betonlarında, kaplama betonlarında çekme dayanımının aşılması sonucu beton içinde ve yüzeyinde kırıklar ve çatlaklar gelişebilmektedir. ¹

1.2 Çimento Tanım ve Özellikleri

Su ile tepkimesinde sertleşerek etrafındaki maddeleri birbirine yapıştırma özelliğine sahip malzemelere "*hidrolik bağlayıcı*" adı verilmektedir. Çimentolar, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve az miktardaki MgO içeren uygun hammaddelerin, sinterleşme sıcaklığına (~ 1400 °C) kadar kızdırıldıktan ve uygun bir soğutma işleminden sonra elde edilen klinkerlerin alçı ve gereğinde yapay (uçucu kül, cüruf) ya da doğal (tras) puzolan maddelerle beraber belirli boyuta kadar öğütülmesiyle meydana gelen *hidrolik bağlayıcı* dır.^{15,43}

Çimentoyu oluşturan karma oksit bileşenleri genel olarak dört grupta toplanabilir:

- 1- Fırına verilen farinde önce nispeten düşük ısılarda bileşimindeki tüm Fe₂O₃ bir miktar Al₂O₃ alarak, C₄AF [(CaO)₄ Al₂O₃ Fe₂O₃] Tetra kalsiyum alumino ferriti,
- 2- Kalan Al₂O₃ ve C₃A [(CaO)₃ Al₂O₃] ile birleşerek Tri kalsiyum aluminatı ,
- 3- Isı arttıkça C₂S [(CaO)₂ SiO₂] Dikalsiyum silisti,
- 4- Yeterli CaO ve ısıda (~1400 C) C₃S [(CaO)₃ SiO₂] Trikalsiyum Silisti oluşturur

Karma oksitlerin çimentoya kazandırdıkları önemli özellikleri şunlardır:

- 1- Çimentonun en önemli bileşiği C₃S 'dir. Çimentoya ilk dayanımını veren ve basınç dayanımı yüksek bir çimento olmasını sağlayan C₃S' dir.
- 2- C₂S' nin dayanıma katkısı ileriki zamanda kendini gösterecek ilk günlerde pek yoktur, ancak ötektik oluşturucu bir özelliği vardır.
- 3- C₃A ve C₄AF' in de çimentoya olumlu ve olumsuz katkıları vardır. Bu bileşik maddelerin oranlarına, kristal şekillerine ve bu kristaller içerisinde kalan minör elemanlara bağlı olarak çimentonun özellikleri değişir.

Çimentoda adı geçen maddelerin dışında billuri alçı taşı (CaSO₄. 2H₂O) ve serbest halde CaO ile MgO ve alkali oksitler (Na₂O, K₂O, Cl) bulunur. Çimentoyu oluşturan bütün bu maddelerin beton yapısı üzerine olumlu ve olumsuz etkileri vardır.

1- C_3S ve C_2S su ile birleştğinde hızla sertleşir, dayanım kazanır. C_3S nin hidratasyonu daha çabuktur, oran arttıkça özellikle ilk günlerde dayanım kazandırır. C_3S ve C_2S hidratasyonu sırasında oluşan $Ca(OH)_2$, demir çelik donatıların paslanmasını geciktirir. Bu bakımdan yararlı ise de zamanla yıkanarak akar, beton geçirimli hale gelir.

2- C_3A ilk dayanımlarda olumlu rol oynarsa da ancak C_3S ile kıyaslanamaz. C_3A 'nın hidratasyonu sırasında büyük ısı çıkar ve sülfat iyonları ile büyük hacimli etrengite mineralini (Candlot tuzu) oluşturur. Bu iki olay betonu olumsuz etkiler. Kütle betonu (baraj vs.) ve agresif sularla temastaki betonlarda (kuyu, rıhtım, iskele, köprü ayağı gibi) genleşme ve çatlaklara neden olur. Bu tür yerlerde kullanılacak betonların çimentolarında C_3A oranının düşük olması istenir. Veya puzolonik çimentolar tercih edilmelidir.

3- C_4AF çimento içerisinde en az etkinliği olan bileşendir. Bu az etki de C_3A 'nın etkisine benzer. Yararı; klinkerin pişme süresince yumuşamasını, pişme yetkinliği kazanmasını sağlar.⁴³

Serbest CaO ve MgO fazla oranlarda olduğu zaman betona olumsuz etkiler yapar. Su ile $Ca(OH)_2$ ve $Mg(OH)_2$ olur. Zamanla havadan CO_2 alır, $CaCO_3$, $MgCO_3$ oluşur. Böylece ince yüzey çatlaklarının genişlemesine, derinleşmesine neden olurlar.

Klinkerin soğuması sırasında hızlı soğutma ile cam faz oranı artırılır. MgO cam fazda kalırsa etkinliği az olur. Kristal fazda kalan MgO 'ın reaksiyonlar zinciri hızla devam eder. Alkalilerin (Na_2O , K_2O) alkali agrega reaktivitesi nedeniyle betona olumsuz etkileri vardır. Opal, riyolit gibi aktif silis içeren agregalarla reaksiyona girerler, hacim artışlarına, betonda genleşmelere neden olurlar. Alkali agrega reaktivitesi uzun yıllar sonra dahi ortaya çıkabilir ve önemli hasarlara neden olur.

Katkılı çimentolarda durum farklıdır. Kendileri bağlayıcı özellik taşımayan yapay ve doğal puzolonik maddeler çimento ile birleştğinde, su ortamında hidrolik bağlayıcı

özelliği kazanırlar. Pişme olayına girmediğinden bu tür maddelerin klinkere katılmasıyla büyük ekonomi sağlanır.

Çelik sanayi atık maddesi curufun ani soğutulması ile elde edilen yüksek fırın curufu ile ülkemizde bol bulunan puzolonik maddeler (çeşitli traslar) çimento üreticileri tarafından çok kullanılmaktadır.

Puzolanik maddeler kendi aktif silislerinin, hidrasyon ürünü Ca(OH)_2 ile birleşmesi sonucu sertleşir ve dayanım kazanırlar. Bu özellikleri betonun geçirimsizliğini olumlu yönde etkilerse de kirecin demir aksamı koruyuculuğunu azaltır. Puzolanik maddeler ülkemizde bol miktarda bulunurlar ve çok çeşitlidirler. Bazaltik, riyolit vs. gibi türleri, aynı türün ince, kaba kristal yapıları ve farklı aktif silis oranları vardır. Farklı özelliklerin çimentoların dayanım ve değişik ortamlarda değişik davranışlarına olumlu ya da olumsuz katkıları olur.³³

Çimento üretiminde kullanılan hammaddeler:

Çimento üretiminde kullanılan ana hammaddeler kireçtaşı, kil ve mardır. Klinker üretiminin ana bileşenleri olan CaO için kalker ya da kireçtaşı; SiO_2 , Al_2O_3 , ve Fe_2O_3 için de kil mineralleri temel kaynaklardır. Marn gibi bu dört oksiti bünyesinde bulduran diğer malzemeler de çimento hammaddesi olarak kullanılmaktadır. Çimento üretiminde kullanılacak hammaddelerin uygunluk dereceleri onların kimyasal bileşimleri ile orantılıdır. Kireçtaşı bileşeni için kireç standardı bir kriter olarak kullanılmaktadır. Bu değer SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 gibi bileşenler hakkında ve aynı zamanda CaO içeriği konusunda bilgi vermektedir. Kil minerali olarak kullanılacak kayalarda silist ve alümina oranı dikkate alınarak değerlendirilmektedir.

Ana hammaddeler dışında, klinker üretimi için gerekli katkı maddeleri ise, ham karışımın kimyasal bileşimini düzeltici yönde etkiye sahip; Fe, SiO_2 ya da Al_2O_3 içerikli malzemelerdir. Bunlara örnek olarak fırınlanmış pirit, düşük tenörlü demir cevheri, laterit, kuvarslı kum ya da metamorfik kayaların ayrışmasıyla oluşan

kuvarslı materyaller ve boksitler verilebilir. Ülkemizde beyaz çimento üretimi için büyük miktarlarda kaolin kullanılmaktadır. ⁴⁴

Tablo 1.4: Çimento Ana Hammaddelerinin CaCO₃ Oranına Göre Sınıflandırılması ⁴⁴

Hammadde adı	% CaCO ₃
Mermer	99-100
Kireçtaşı (Kalker)	90-98
Kalkerli Marn	75-90
Marn	40-75
Killi Marn	10-40
Marnlı Kil	2-10
Kil	0-2

Ayrıca klinkerin öğütülmesi esnasında alçı taşı, yapay ve doğal puzolanik maddeler, yüksek fırın cürufu, silisli ve kalkerli uçucu küller, silis fume ve son yıllarda belirli oranlarda kalker de değişik tip çimento üretimlerinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

Kireçtaşı

Kimyasal bileşiminde en az % 90 CaCO₃ bulunan kayalara kalker yada kireçtaşı adı verilmektedir. Ayrıca kireçtaşı ifadesi, kimyasal bileşiminde % 90'a kadar CaCO₃, minerolojik bileşiminde ise % 90'a kadar kalsit içeren kayalar için de yerbilimciler tarafından kullanılmaktadır.

Kalsit, aragonit, vaterik kalsiyum karbonatın üç ayrı kristal şeklidir. Ancak doğada hiçbir zaman saf olarak bulunmaz. İkincil derecede değişik madde ve bileşiklerin içinde yer alması nedeniyle orijinal halde sarı renkli olup, kahverengi ve siyah renklerde de görülebilmektedir. Kayacın tüm kimyasal bileşimindeki CaCO₃ miktarı % 90'dan fazla olduğundan kalker olarak adlandırılan kalker taşının sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı 2.5-2.7 gr/cm³ arasındadır.

Bütün bu safsızlıklar ile gerek mineralojik gerekse kimyasal bileşim açısından görülen değişiklikler yanında yapı ve dokularına ilişkin kalkerlerin gösterdikleri ayrıcalıklar özelliklerini oluşturur. İçerdikleri maddelere göre oluşan kalkerlerin özellikleri esas alınıp pek çok sınıflamalar yapılarak verilen adlandırmalarla çeşitlere ayrılmıştır. Kalkerlerin en çok içerdikleri ve teknolojik özelliklerini çimento sanayiinde yansıtan kil, kalsiyum ve magnezyum karbonat % miktarlarına göre yapılan ayırım ve sınıflama olarak birçok ülkede kullanılan isimlendirme ülkemizde de kullanılmaktadır.⁴⁴

Kil

Kil terimi endüstriyel alanda kesin sınırlarla saptanarak tanımlanmasına rağmen, hammadde olarak çeşitli alanlarda çok geniş kullanımı vardır. Kil, yerbilimciler tarafından killi kayaç ve killer olarak iki anlamda kullanılmaktadır. Bu açıdan kil minerallerinden oluşmuş kayaçlar olarak tanımlandığı gibi bazı kaynaklarda tane boyutları 2 mikrondan daha küçük parçacıklardan oluşmuş kayaçlar veya çökeller olarak da tanımlanmaktadır. Gerçek anlamda kil tanımı, mineralojik bileşiminde %90'a kadar kil mineralleri bulunan kayaç olarak yapılmaktadır. Kil minerallerinin temel özelliği kimyasal bileşimlerinde Al_2O_3 bulunması ve sulu alüminyum silistlerden meydana gelmiş olmasıdır($nAl_2O_3 \cdot mSiO_2 \cdot xH_2O$). Demir, alkaliler ve alkali topraklarda değişik miktarlarda yer almaktadır.

Çimento hammaddesi olarak kullanılacak killerde mineralojik ve kimyasal özelliklerin yanı sıra homojenliği de çok önemlidir. Killerin kimyasal analizinde Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , SO_3 ve kızdırma kaybı % miktarlarının tespit edilmesi gerekir. Mineralojik analizlerinde ise kil minerallerinin dışında bulunan safsızlıkları oluşturan unsurlar ve bunların % miktarları saptanır. Çimento yapımında kullanılacak kilin kimyasal bileşiminde Al_2O_3 / Fe_2O_3 oranı 2/1 civarında olması, SiO_2 % miktarının belirli bir üst sınırdan kalması ve alkali oksitlerin miktarının %1'in altında olması istenir. Beyaz çimento yapımında kullanılan kaolin kil minerali olarak çimento sanayiinde ayrı bir önem taşımaktadır.

Killer genellikle mineralojik bakımdan plastik olan ve olmayan unsurları içerirler. Killerin plastisite özellikleri, mineraller içerisindeki ayırt edici en önemli özelliklerden birisi olup, su ile şekillendirilme özelliğini tanımlamaktadır. Bu özellik kil minerallerinin yapısında bulunan kolloid yüzdesine, killerin tane inceliğine doğrudan bağlıdır. Çimento sanayiinde kullanılan killerin plastisite sayıları %15-20 arasında olmalıdır. Ayrıca çimento sanayiinde kullanılacak killerde 900-1050 ° C 'de sinterleşme olması tercih edilir.

Marn

Kalker ve kilin doğada, %50-70 oranında kalker ve %30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayaca marn denilmektedir. Çimento klinkeri ortalama %70 kalker ve %30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilmektedir. Marn doğal olarak bu bileşimi taşıdığından veya bu bileşime çok yakın özellikte bulunduğundan ideal çimento hammaddesidir. Ayrıca kalkere göre daha yumuşak olması nedeniyle kolay öğütülebilmekte, kırma-öğütme işlemleri sırasında enerji tüketimi düşük olmaktadır.⁴⁴

Çimento katkı maddeleri

Puzolanik maddeler

Puzolonik maddeler, kendi başlarına hidrolik bağlayıcı özelliğine sahip olmadıkları halde ince olarak öğütüldüklerinde nemli ortamda ve normal sıcaklıkta Ca(OH)_2 tepkimeye girerek bağlayıcı özellikte bileşikler oluşturan doğal veya yapay maddelerdir. Puzolonik maddelerin özelliği yüksek miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 içermeleridir. Bu nedenle Ca(OH)_2 ile tepkimeleri kolaydır ve bu özellikleri nedeniyle hidrolik bağlayıcı özellik gösterirler.

Ülkemizde çimento sanayiinde doğal puzolanik katkı maddesi olarak, tras ve bazik nitelikli volkanik aktivitelerin bir ürünü olarak oluşan doğal cüruflar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ayrıca yapay olarak elde edilen yüksek fırın cürufu ve uçucu küller de puzolanik özelliğe sahip olup katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Çimento maliyetlerinin düşürülmesi açısından katkı maddelerinin yüksek oranda katılabilir kalitede olmaları önemlidir. Puzolanik aktivite değerleri ile çözünmüş kalıntı oranları, katılabilirlik oranını belirleyen faktörler olup, katılım oranı genellikle %10-40 arasında değişmektedir.⁴⁴

Uçucu küller

Uçucu küller ya da pulverize yakıt külleri, özellikle elektrik üretim tesislerinin pulverize kömür ile işleyen fırınlarının toz tutma ünitelerinden sağlanan malzemelerdir. Bu küller küresel biçimde olup, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içerirler. Diğer puzolanik maddeler gibi, Ca(OH)₂ ile tepkimelerinde hidrolik bağlayıcı nitelik kazanırlar. Diğer taraftan yanmış karbon kalıntılarını da içermesi olasıdır. Bu da çimento ve beton mukavemetlerine olumsuz yönde etki etmektedirler. Uçucu küllerin spesifik yüzeyi ne kadar büyükse reaktivitesi de o kadar yüksektir.

Uçucu küllerin spesifik yüzey alanı değerleri 1000-4000 cm²/gr arasında değişmektedir. Kül partiküllerinin tane boyu ise 0.5-200 mikron arasındadır. İri taneli uçucu küllerden istenen çimentoyu üretmek için jips ve klinker ile öğütmeye tabi tutulması gerekmektedir. Kül kalitesi ve özelliklerine bağlı olarak uçucu küllü çimento üretiminde %10-30 oranında, katkılı çimento üretiminde de diğer katkı maddeleri ile birlikte toplam %19 oranında çimentoya katılabilmektedir.⁴⁴

Alçıtaşı

Alçıtaşı, kimyasal bileşimi kalsiyum sülfat olan bir mineraldir. Bileşiminde iki molekül kristalizasyon suyu bulunan türüne *jips* (CaSO₄. 2H₂O) denir. Susuz

kalsiyum sülfat ise anhidrit (CaSO_4) olarak adlandırılır. Çimento sanayi alanında genellikle jips kullanılmaktadır. Gerek jips gerekse anhidrit hiçbir zaman saf halde bulunmazlar. Bu iki mineralden her biri yarı dengeli olup biri diğerine dönüşebilmektedir. Ayrıca alçıtaşı yataklarına oluşum sırasında veya sonradan yabancı maddeler karışmış olabilir. Bunun sonucu olarak alçıtaşı ancak % 85-95 saflıkta bulunmaktadır. Çimento sanayiinde genellikle maden ocağından çıktığı kalitesi ile hiçbir işleme tabi tutulmaksızın kullanılmaktadır.

Jips ya da jips-anhidrit karışımını içeren hammaddeler son öğütme prosesinde karışıma % 3 -5 oranında katılarak klinker ve/veya diğer katkı maddeleriyle birlikte öğütülerek değişik tür çimentolar üretilmektedir. Alçıtaşı gibi sülfat içerikli maddelerin katılması çimentonun katılma süresinin ayarlanmasında etkili rol oynamaktadır.⁴⁴

Demir cevheri

Demir cevherleri içinde çimento sanayiinde kullanılanlar, hematit-olijist, götit ve limonittir. Demir yanında alümina kaynağı olarak da çimento sanayiinde şamozit ve turingit kullanılabilir

Demir cevherinin içinde demirle birlikte aynı parajeneze giren metalik cevherler ile tali derecede krom, bakır, nikel, kurşun, manganez ve kobalt elementlerinin çeşitli bileşikleri ve bu bileşiklerin mineralleri de bulunabilir. Bunların varlıkları çimento rengine etki eder ve % 1'i geçmeleri istenmez.⁴⁴

Çimentonun Önemli Bazı Fiziksel Özellikleri ve Kontrol Sistemleri

Prizlenme Olayı

Çimentonun jel halden katı hale geçmesidir. Normal prizlenme dışında ani prizlenme ve yalancı prizlenme olarak tanımlanan durumlar da vardır. Ani prizlenme C_3A bileşeninin alçı ile denetlenememesi sonucu olur. C_3A , ortamdaki tüm suyu aniden

çektığı için silistların hidratasyonunu önler. Bu reaksiyon sonucunda sertleşen çimento normal prizlenme reaksiyonlarını tamamlayamadığı için işlenebilirliği çok az , düşük dayanımlı sert bir kütle oluşur. Çimento öğütme sırasında alçı oranının ayarlanması olayı önler. Yalancı priz ise değirmende öğütme sırasında yükselen ısı nedeniyle kristalize alçı taşı ½ mol kristal suyunu kaybederek hemihidrata dönüşür. Su ile karşılaşınca alçı kaybettiği suyu alarak sertleşirken çimentonun reaksiyona girmesini engellemiş olur.

Priz olayı, priz başlama ve sonu ile belirlenir. Normal Standartlarda genellikle priz başlangıcı 1 saatten az, sonu 10 saatten fazla olmayacak şekilde priz olayı sınırlanmıştır.

Çimentonun yoğunluğu (litre ağırlığı); Doğal akışı sağlanan çimentonun bir litresinin (kaba) ağırlığıdır. Katkılı çimentolarda bu değer 850 gr/lt ye kadar düşer, Portland çimentolarında 1200 gr/lt' ye kadar yükselebilir. ⁴³

İncelik

Çimento inceliği önemli bir husustur. İncelik arttırılarak, yani ince taneciklerin oranı arttırılarak çimentoya aktivite kazandırılır. Yüzey alanı ne kadar artarsa reaksiyona giriş hızı o oranda hızlanır. Ancak kalitesi düşük normal portland çimentosuna boyutlarını küçülterek büyük ölçüde dayanım kazandırılmaz. Aynı çimentonun inceliği daha düşük olanına göre bir ölçüde dayanımı artar. Bu konu Portland çimentolarında da geçerlidir. Puzolanik aktivitesi yüksek katkı maddeleri katılmış çimentolarda durum farklıdır. Katkısız çimentolarda ince parçacıkları klinker oluşturur. Bu ince klinker hidratlanırken sıcaklığı yükselir.

Katkılı çimentolarda , özellikle tras katkılılarda ince parçacıkları tras oluşturur. Bu da hidratasyon ısısının azalmasına neden olur.

İncelik önceleri 90 ve 200µ elek kalıntıları ile ifade ediliyordu. Genellikle 200µ üstü %1'i geçmemesi isteniyordu. Özgül yüzey (Blaine) elek inceliğinin yerini aldı .

Blaine, özgül yüzey tayini belirli bir porozitede (0.5 gibi) sıkıştırılmış çimento pastilinin hava geçirgenliği ölçülerek yapılır. 1gr ağırlığındaki çimento tanelerinin yüzey toplamıdır, cm^2/gr . olarak ifade edilir. Şimdilerde ise granülometri deneyi önem kazanmıştır. Çimento taneciklerinin incelik dağılımı ölçülerek daha hassas bir yaklaşım elde edilmektedir.⁴³

Hidratasyon Isısı;

Çimentonun sertleşmesi görünüşte fiziksel bir olay gibi nitelenirse de, aslı kimyasal bir reaksiyona dayanır. Bu bir ekzotermikhidratasyon olayıdır. Isı çıkışı olur. Çimentoyu oluşturan bileşik maddelerin her birinin su ile kimyasal olarak reaksiyona girmesine hidratasyon olayı, bu olay sonucu açığa çıkan ısı toplamına da “Hidratasyon ısısı” adı verilir.

Beton dökümlerinde sıcaklık yükseldikçe iç sıcaklık artar. Baraj vs. gibi kütle betonu dökümlerinde, dökümden sonra ilerleyen zaman içinde soğuma ile birlikte betonda hacim küçülmesi olur. Beton katılaştır ama yeterince dayanım kazanmaz (Yeşil beton). Ayrıca yüksek ısı ile hava kabarcıkları çıkar. Termik rötire ismi verilen bu olaylar çatlamalara neden olur. Hidratasyon ısısı çimentonun kimyasal yapısı kadar inceliğine, su/çimento oranına da bağlıdır. C_3A , C_3S oranı yüksek portland çimentolarında hidratasyon ısısı da yüksektir.

Çeşitli Çimentoları Kapsayan Değişik Türk Standartları:

Portland Çimentoları (TS 19) : PÇ 32.5 , PÇ 42.5, PÇ 52.5

Katkılı Portland Çimentosu (TS 10156) : KPÇ 32.5

Traslı Çimento (TS 26) : TÇ 32.5

Beyaz Portland Çimentosu (TS 21) : BPÇ 32.5, BPÇ 42.5

Uçucu Küllü Çimento (TS 640) : UÇK 32.5

Yüksek Fırın Curuf Çimentoları (TS 20) : CÇ 32.5, CÇ 42.5

Süper Sülfat Çimentosu (TS 809) : SCC 32.5

Sülfatlara Dayanıklı Çimento (TS 10157) : SDÇ 32.5

Erken Dayanımı Yüksek Çimento : EYÇ 52.5

Rakamlar 28 gün sonraki dayanım değerlerinin asgari miktarını N/mm^2 (MPa) cinsinden ifade etmektedir. Diğer kimyasal ve fiziksel özelliklerin sınırları standartlarda ayrıca belirtilmiştir.

1- *Portland Çimentoları (PÇ)* : Klinkerin %3-5 alçı taşı ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen katkısız çimentolardır. Klinker kompozisyonu ve çimento inceliği üzerinde durarak PÇ 42.5 ve PÇ 52.5 üretilir.

2- *Katkılı Portland Çimentosu (KÇ) 32.5*: Klinkere alçı taşı ve en fazla %19 oranında puzolonik madde katılarak üretilen çimentodur.

3- *Traslı çimento (TÇ) 32.5* : Klinkere alçı taşı ve %20-40 arasında tras (TS 25 'e göre) katılarak öğütülen çimentodur.

4- *Beyaz Portland Çimentosu (BPC)*: Kil yerine Fe_2O_3 oranı çok düşük kaolin (arı kil) kullanılarak üretilmiş olan özel klinkerin alçı taşı ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen beyaz renkli bir portland çimentosudur.

5- *Uçucu küllü Çimento(UÇK)*: Ağırlıkça karşılıklı olarak %10-30 uçucu kül (TS 639'a uygun), %90-70 oranda klinker ve alçı taşı ile öğütülerek elde edilir.

6- *Yüksek Fırın Curuf Çimentoları (CÇ)*: Bu çimentolarda ani soğutularak granüle hale getirilmiş bazik yüksek fırın curufu kullanılır. %85-31 kısım curuf karşılıklı %15-69 kısım klinker ve alçı taşı ile öğütülerek elde edilen curufllu çimentolardır.

7- *Süper Sülfat Çimentosu (SCÇ)* : Ani soğutulmuş bazik granüle yüksek fırın curufu ile içinde en az %5 SO_3 bulunacak şekilde kalsiyum sülfatın katalizör olarak da az miktarda portland klinkeri ya da portland çimentosu ile öğütülmesi ile elde edilen çimentodur.

8- *Sülfatlara Dayanıklı Çimento (SDÇ)*: C₃A miktarı en çok %5 olan klinkerin alçı taşı ile öğütülmesi ile elde edilen çimentodur.

9- *Erken Dayanımı Yüksek Çimento (EYÇ)*: Özel olarak üretilmiş klinkerin alçı taşı ile birlikte ince öğütülmesi ile elde edilen çimentolardır.

10- *Yüksek Performanslı Çimento (YPÇ)*: Ani soğutulmuş bazik granüle yüksek fırın curufu, mikrosilis alçı ve klinkerin beraber öğütülmesi ile elde edilen çimentolardır.⁴³

Çimento Özelliklerinin Alkali-Silis Reaksiyonu ile İlişkisi

Hemen hemen bütün kil mineralleri içinde alkali oksitlerine ve klorür tuzlarına rastlanır. Bu bileşenlerin çimento içinde belli değerlerden fazla bulunması istenilmez. Hatta normal değerlerde bulunması halinde bile, özellikle ön ısıtmalı klinker üretim sistemlerinde büyük sorun yaratırlar. En uygun hammadde kullanımı halinde bile alkali oksit ve klorür etkilerinden tam olarak kurtulmak sözkonusu olmadığına göre, bu bileşenlerin zararlı etkilerinden kurtulmak için özel önlemlerin alınması gerekir. Pratikte çimento içinde bulunan alkali oksit yüzdesi büyük önem taşımaktadır. Ülkemiz standartlarında herhangi bir sınır değer bulunmamakla beraber, ASTM standartlarında çimento içindeki toplam alkalinite yüzdesinin % (Na₂O + 0,658 K₂O) 0,6 'dan fazla olmaması şartı bulunmaktadır.

2. BÖLÜM: ALKALİ-SİLİS REAKSİYONU

2. ALKALİ-SİLİS REAKSİYONU

Betonarme veya beton yapı elemanlarının zamanla bozulup işlevlerini beklenen servis ömürlerine ulaşmadan yitirmelerine birçok faktör sebep olabilir. Yapı elemanının durabilitesini belirleyen etkenler arasında beton bileşimini oluşturan malzemelerin fiziksel ve kimyasal yapısından kaynaklanan iç etkiler ve çevreden kaynaklanan dış etkiler sayılabilir. Bazı durumlarda, beton bileşimini oluşturan malzemelerin kendi aralarında veya çevreden gelen zararlı maddelerle kimyasal reaksiyonlar yapabildiği, böylece yapının ya da yapı elemanının hacim sabitliğinin bozulması nedeniyle zarar görebildiği bilinmektedir. ASR, bu tür kimyasal bozulma nedenlerinden biridir.

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

A.FERNANDEZ - Jimenez, F. PUERTAS, reaktif agrega kullanarak , yüksek fırın cürüf çimentolu harçların genişmesini araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarını normal portlant çimentolu harçlarla yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırmışlar ve elde edilen sonuçlara göre yüksek fırın cürüflü çimentolu harçların alkali silis reaksiyonu nedeniyle genişmeye uğradığını, ama benzer koşullar altında normal portlant çimentolu harçlardaki genişmeden daha düşük hızda genişmenin olduğu sonucuna ulaşmışlardır.¹⁰

L. TURANLI, F. BEKTAŞ, P. J. M. MONTEIRO, alkali silis reaksiyonu yayılımını minimize etmek için puzolonik madde özellikleri taşıması amacıyla kil tuğla kullanmışlardır. Bu amaçla yaptıkları deneyler sonucunda kil tuğlanın ; çimento ile kısmi yer değiştirdiğinde ve ASR'den dolayı oluşan genişmeyi durdurma amaçlı kullanıldığı zaman puzolanik malzeme olarak bir potansiyele sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.¹¹

A. MLADENOVİĆ, J. S. SUPUT, V. DUCMAN, A. S. SKAPIN, hafif agregaların harçlar ve sıvalar için kullanıldığında alkali silis reaksiyonu hakkında önemli verilere

ulaşılacağını düşünerek, dört hafif agrega (şişen vermiculite, şişen killer, şişen cam ve perlit) üzerinde alkali silis reaksiyonuna bağlı olarak çalışmalar yapmışlardır. Hafif agregalar kullanılarak yapılan çimento kompozitlerinin içindeki alkali silis reaksiyonunun olası tehlikesinin çalışmasının sonuçları ; şişen vermiculite ve kilin alkali silis reaksiyonu için bir potansiyel tehlike sergilemediğini göstermiştir. Diğer taraftan , diğer iki camsı agregalar (şişen cam ve perlit) , yüksek reaktiflik göstermişlerdir. Hızlandırılmış testten sonra camsı agregaların yapısında (dokusunda) ciddi bir bozulma olduğu gözlenmiştir. Ayrıca ,bu hafif agregaları içeren çimento kompozitleri üzerinde uzun dönemli bir negatif etki oluştuğunu gözlemişlerdir.¹²

VİGGO JENSEN, 1949-1951 yılları arasındaki periotta Norveç'te inşa edilen Elgester köprüsünde gözlenen beton ve çatlak genişlemesinin modelini ASR tarafından açıklamaya çalışmıştır. Özellikle köprünün batı yüzünde ASR reaksiyonlarının oluşumundan dolayı hasar oluşturduğu gözlenmiş ve bunun üzerine yapılan kolon testlerinde monosilane emdirmesi ile çok ümit verici sonuçlar elde edilmiştir. Krema kıvamında olan bu ürün, önemli bir derecede ASR' unu azaltmıştır. Bu çalışmada yaklaşık zeminden 1,5 m kolon horizontal olarak delinmiştir. Mikroyapısal analizlerde cilanmış beton parçaları uygulanmış ve ince bölümlere floresan boyalar edilmiştir. Beyaz jel çökmesi hava boşlukları ve çatlakları , koyu kenarlar kaba agregalar bütün korlarda gözlenmiştir. Gözlenen yarık ve genişlemelerin çoğunlukla ASR nedeniyle olduğu sonucuna varılmış ve reaksiyon ürünleri içindeki kumtaşının aşırı bir şekilde kristallere benzer kriptokristaline kumtaşlarından oluştuğu gözlenmiştir.¹⁷

RAMI H.HADDAD, MOHAMMED M. SMADI, alkali-silis reaksiyonuna uğramış portland çimentolu betondaki aşırı genişleme ve çatlamanın engellenmesi amacıyla fiberin kullanımını araştırmışlar ve bu amaçla yaptıkları deneysel çalışmada, alkali-silis reaksiyonuna göre portland çimentolu betonun aktif alkali-silis reaksiyonunun genişleme kontrolündeki geciktirmeye fiberin katkıda bulunduğunu ve fiber kullanımının çatlaklardaki büyüklüğü sınırlandığını saptamışlardır. Polypropylene fiberlerin, düşük modüllü elastik ve yüksek oranlı olanının, çatlama yüksek

modüllü elastik pirinç kaplama çelik fiberlerden daha iyi karşı koyduğu sonucuna varmışlardır.²²

Son yıllarda ülkemizde de bu konu üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalardan bazıları şöyledir:

Özgür ÇAKIR ve Fevziye AKÖZ üç farklı agrega için çimentoya %0, %30, %60 oranlarında yüksek fırın cürufu katılmış harçlarda, hızlandırılmış deneyler yaparak, sıcaklık, basınç ve nem artışının alkali-agrega reaksiyonunu hızlandırdığı, cürufun ise yavaşlattığını görmüşlerdir.³

İlker Bekir TOPÇU, üç farklı renkte ve dört farklı miktarda atık camla harç çubukları üreterek, alkali-silis reaksiyonuna camların etkisini araştırmıştır. Beyaz, yeşil ve kahverengi camlardan beyaz camın en fazla genişmeye neden olduğunu ve cam agregaların tane çapının küçülmesiyle alkali-silis reaksiyonunun hızlandığını gözlemiştir.⁴

Ali TOPAL ve Burak ŞENGÖZ, reaktif agrega boyutunun ve yüzey köşeliliğinin alkali-silis reaksiyonu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, reaktif olduğu bilinen Gediz nehri yatağı doğal agregasından aldıkları örnekler üzerinde çeşitli deneyler yapmışlardır. Deney sonuçları tek boyutlu agrega kullanımının alkali-silis reaksiyonu genişmelerini arttırdığını göstermiştir. Köşeliliğin alkali-silis reaksiyonu genişmeleri üzerindeki etkisi ise seçilen her agrega grubunda tam olarak belirlenememiştir.⁵

Aydın SAĞLIK, M. Fatih KOCABEYLER, Yalçın ORKUN, Metin HALICI ve Ergin TUNÇ, Deriner Barajı ve Hes İnşaatı kütle betonunda kullanılması planlanan agregalarda alkali-silis reaksiyonundan dolayı oluşacak hasarları azaltma ve önlemeye yönelik bir deneysel çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmada biri yaklaşık %20, diğeri ise %30' un üzerinde reaktif silis içermekte olan agregalar, çimento yerine farklı yüzdelerde ikame edilen F sınıfı uçucu kül ile hazırlanan harç çubukları üzerinde yürütülen deneysel çalışma sonucunda kırmataş ince agrega ile en

az %25 ve doğal şekillenmiş ince agrega ile en az %35 civarında uçucu kül kullanımı ile alkali-silis reaksiyonunun büyük ölçüde önlendiği tespit edilmiştir.²

Mustafa KORKANÇ ve Atiye TUĞRUL, farklı bileşim ve dokusal özelliklere sahip Orta Anadolu'da yaygın olarak kullanılan Niğde yöresi bazaltlarını reaktivite açısından değerlendirilmişlerdir. Bazalt agregaları ile yapılan alkali-silis reaksiyon deneylerinde, asit-ortaç karakter sunan bazaltlar ile matriksinin tamamı volkan camından oluşan bazaltik andezitler, yapılan araştırma ve gözlemlere göre, potansiyel olarak düşük reaktivite gösteren agregalardır. Bu tür bazaltların beton agregası olarak kullanılması durumunda, düşük alkaliniteye sahip çimentoların veya beton içerisine puzzolanik maddelerin katılmasının uygun olacağı önerilmiştir.⁶

İ. Halil ZARİF, Atiye TUĞRUL ve Göksel DURSUN, İstanbul'daki dolomitik kireçtaşları üzerinde bir inceleme yapmışlar ve dolomitik kireçtaşlarının zararsız agregalar oldukları ve çimento alkalinitesi fazla olan çimentolar kullanılsa bile bu agregaların beton üretiminde kullanılabilceği sonucuna varmışlardır.⁷

Adil BİNAL, harçlarda en fazla genişmeye neden olan ve literatürde pesimum oranı olarak adlandırılan tüm agrega içindeki reaktif agrega oranını araştırmak için çeşitli deneyler yapmış, opal yumrusu, çört, kalsedon yumrusu, andezit ve bazalt türü beş farklı reaktif agreganın alkali reaktivitelerini araştırmıştır. Opal türü agregalar çevresinde haleler şeklinde alkali silis jel gelişirken, çörtte kılcal çatlaklar boyunca, kalsedonda ise lif lif ayrılmalar şeklinde alkali silis jel gelişimlerini saptamıştır.⁸

2.1.Tanım

Alkali-silis reaksiyonu, harçlarda veya betonda meydana gelmektedir. Çimentoda veya diğer kaynaklarda mevcut alkalilerle ilişkili hidroksil (OH⁻) iyonları ve büyük veya küçük boyutlu agregalarda var olabilen belirli reaktif silisli bileşenler arasındaki zararlı kimyasal reaksiyon bir jel meydana getirir. Bu alkali-silis jeli, nemi absorbe ettiği zaman genişir ve sonunda betondaki çimento hamurunda ve agrega parçacıklarında çatlaklar oluşturur.²

Gerek ülkemizde gerekse diğer ülkelerde birçok betonarme yapıda hasarlar meydana getiren ASR, oldukça kompleks kimyasal bir reaksiyondur. Bazı çimentoların içinde fazla miktarda bulunan sodyum oksit (Na_2O) ve potasyum oksit (K_2O) gibi alkali oksitler beton gözenek suyunda çözülerek sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) oluştururlar. Oluşan bu ürünler, aktif silis içeren agregalarla reaksiyona girerek, zamanla betonu çatlatan bir jel oluşumuna sebep olurlar. Bu reaksiyonun neden olduğu genleşme belli bir sınırı aştığında beton için potansiyel bir tehlike oluşturur.²⁶

Genleşme olayı, osmosis olayı sonucunda oluşan hidrolik basınç ve aynı zamanda alkali-silis jelinin meydana getirdiği şişme basıncı ile açıklanabilir. Bu nedenle sert agregaların şişmesinin betonda daha fazla zararlı etki yarattığı düşünülür. Reaktif silis içeren agregaların büyüklükleri reaksiyonun hızını etkilemektedir. Küçük tanelerin reaksiyonu sonucunda genleşme 1 veya 2 ay içerisinde oluşmakta iken daha büyük tanelerin reaksiyonunda oluşan genleşme yıllar sonra ortaya çıkmaktadır.²

ASR'nun görünür etkisi dış çatlak oluşumudur. Ancak, betonun bazı fiziksel ve mikroyapısal özelliklerinin de ASR'ndan etkilendiği petrografik incelemelerle ortaya konulmuştur. Bu etkiler agregaların yüzeyince reaksiyon bölgeleri oluşumu, reaksiyon ürünleri ile doldurulmuş boşluklar, agregaların çatlakları ve agregaların çimento hamuru arasındaki bağ kaybı şeklinde ortaya çıkar. Bazı özel durumlarda, alkali silis jeli hafif lekeler, patlamalar şeklinde, çatlaklardan dışarı sıvı akışı ve beton yüzeyinde sızma şeklinde görülebilir. Betondaki fazla kireç ile reaksiyona girerek beyaz ve opak renge beton yüzeyinde belirginleşir. Dışarıya jel çıkışının olmadığı durumlara da rastlanabilir. Bu nedenle, beton yüzeyinde herhangi bir belirtinin görülmemesi, ASR nedeniyle beton içinde çatlak meydana gelme ihtimalini ortadan kaldırmaz.²⁶

Bu reaksiyon sonucu betonda çatlaklar oluşmakta, betonun çekme ve eğilmede çekme dayanımı düşmektedir. Uzun zaman içinde oluşan bu reaksiyonun önceden

belirlenebilmesi için araştırmacılar ve çeşitli kurumlar tarafından farklı deney metotları geliştirilmiştir.

Araştırmacıların çoğu ASR' nun temel formunun agregalarda bulunan belirli türde silis ile betonun gözenek suyundaki hidroksit iyonları(OH⁻) arasında olduğunda hemfikirdir. Portland çimentosunun sulandırılmasından gelen hidroksit iyonları ortamın pH' ını 12,5 yaparlar. Gözenek suyunda bulunan alkalilerin miktarı, çimentodaki çözülebilen alkalilerin miktarı ile ilgilidir. Hidroksit iyonları silis yüzeyinde açıkta olan birçok tepkimeye açık yörelere atak edebilir. Silis, iyi kristalleştirilmiş ise tepkimeye açık yöreler azdır; fakat yetersiz kristalleştirilme veya amorf silis durumunda silis yapısında birçok tepkimeye açık kısım bulunur. İkinci durumda alkali atağı, silisin kalsiyum ve alkali silis jele tamamlanmiş dönüşümüne sebep olabilir. Nötr yük dengesini sağlamak için, katyonlar Na⁺ ve K⁺ hidroksit iyonlarına doğru difüze olur ve jelimsi bir malzeme oluşur.

Sodyum ve potasyum sülfatları betonun pH' ını etkilemez fakat alkali silisli reaksiyonlar sırasında bu bileşenler zararlı su emici ve geniş sodyum veya silisli jelleri üretmek için iyonlara katkıda bulunurlar. Sodyum ve potasyum iyonları tüketildikten sonra kalsiyum ayrıca genellikle silisli jelin şeklini alır. Kalsiyum –silis jeli su ile daha az tepkime gösterir. Ve betonda kırılmaya neden olması olası değildir. Silisli jelden oluşan sodyum veya potasyum iyonları çimentodan meydana gelmez. Ayrıca bu iyonlar, beton ilavelerinden, kaya tuzundan , deniz suyundan türetilir. Bu kaynaklar çözülmemiş sodyum veya potasyum klorürleri içerir. Bazı kaya tipleri ayrıca beton gözenekli akışkanların içinde serbest kalan sodyum ve potasyum iyonları kısmen çözünmemiş fosfatlar içerebilir.⁴⁵

Alkali-silis reaksiyonu ile bu reaksiyon sonucu oluşan genleşme arasındaki ayırım yapılmalıdır. Alkali silis reaksiyonu sonucunda genleşme oluşabilir, ancak oluşan bu genleşme betonda her zaman hasar yaratabilecek düzeyde gerilime neden olmaz. Alkali silis reaksiyonu ve ardından betonda oluşan genleşme bazı şartlar aynı anda oluştuğunda meydana gelir; 1) Beton yeterince suya doğgun ise (20 °C sıcaklıkta, yaklaşık %75-85 bağıl nem) , 2) betonda kullanılan agrega içerisinde yeterince

reaktif silis varsa , 3) betonda kullanılan çimentoda veya mineral katkı içerisinde yüksek oranda alkali (sodyum, potasyum) iyonu varsa boşluk suyunda pH' ı artırır. Hidroksil iyonlarının konsantrasyonu yükselir. Çözeltinin pH'nın artması ile reaktif silis içeren agrega içerisinde silis çözünürlüğü artar ve alkali silis jelinin oluşumu meydana gelir.

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

1. Ortamdaki rutubeti kontrol altına almak,
2. Reaktif silis içeren beton veya agreganın tipini veya miktarını kontrol altına almak,
3. Boşluk suyunun pH' ını agrega içindeki silisi çözemeyecek kadar düşük seviyede tutmak (çimentodan ve mineral katkıdan gelecek olan alkali miktarını azaltmakla),
4. Yukarıdaki koşullar sağlanamıyorsa betonda çimentoya ilaveten düşük alkali içeren bir mineral katkı (puzolan) kullanmak,

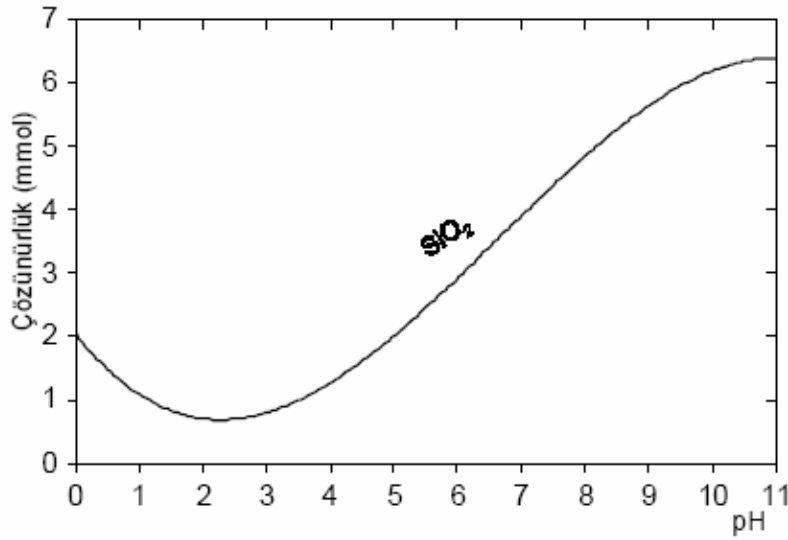
ASTM C 150 Portland çimentoları için $(Na_2O)_e$ alkali içeriğini %0.6 ile ASTM C 618 ise mineral katkılar (uçucu kül ve tras) için aynı parametreyi %1,5 ile sınırlandırmıştır. Alkali içeriği çimento ve mineral katkılar için elde edildikleri hammadde ile belirlenmektedir. Mineral katkının etkinliği kimyasal ve fiziksel özelliklerine, agreganın reaktifliğine ve portland çimentosunun alkali içeriğine bağlıdır. Genelde yüksek miktarda ve oldukça reaktif silis içeren agregalar ile daha yüksek oranda puzolan kullanılması durumu ortaya çıkmaktadır.

Uçucu külün (sınıf F) alkali silis reaksiyonunu azaltması ve hatta önlemesi aşağıdaki mekanizmalarla açıklanabilmektedir;

1. Çimento-uçucu kül reaksiyon ürünü, sadece portland çimentosunun reaksiyonu sonucunda oluşan kalsiyum-silis ürününden daha düşük CaO: SiO₂ (C/S) oranına sahiptir. Bunun yanında kalsiyum silis hidrat (CSH)

jelinin alkalileri bağlama kapasitesi daha yüksektir ve sonuçta beton boşluk suyunun pH' ı azaltılmış olacağından alkali silis reaksiyonu önlenir.

2. Uçucu külün puzolanik reaksiyonu ortamdaki (kalsiyum hidroksit) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reaksiyona girip çimento pastasında daha fazla CSH meydana getireceğinden daha sıkı bir mikro yapı oluşacak ve alkali iyonlarının difüzyonu ve dolayısıyla reaksiyona girmeleri zorlaşacaktır. Bunun diğer bir faydası ise betonun daha az geçirgen olması nedeniyle ortama rutubet girişinin önlenmesidir.

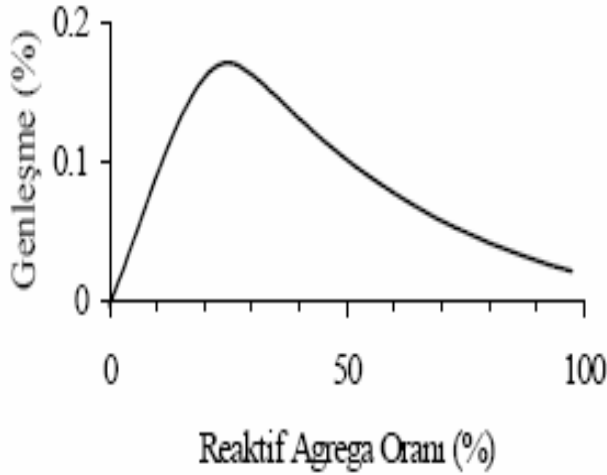


Şekil 2.1: Silis çözünürlük sınırları ¹

Pesimum Kavramı

Reaksiyon sonucu betonda en fazla genişmeye ve hasara neden olan reaktif agrega oranına “Pesimum oranı” denilmektedir. ²⁸

Pesimum oranının, alkali silis reaksiyonu sonucu betondaki genişme üzerine etkisini gösteren tipik bir eğri Şekil 2.2 'de verilmiştir.



Şekil 2.2.: Tipik bir pesimum reaktif agrega içeriği grafiği ¹

Bu grafikte düşey eksen betonda meydana gelen genleşmeyi ve yatay eksen ise betonda kullanılan agrega içinde reaktif agrega oranını göstermektedir. Eğrinin pik yaptığı nokta, betonda alkali silis reaksiyonu sonucu en yüksek genleşmeye neden olan pesimum reaktif agrega içeriğine karşılık gelmektedir. Şekil 2.4'de verilen grafikte pesimum için reaktif agrega oranı %25'dir. Pesimum oranından sonra neden genleşmenin azaldığı, agregaların bozunmasına neden olan alkali çözeltilerinin beton içindeki tüm reaktif agregayı tamamen bozmaya yetmemesi ve betonda daha az oranda genleşmeye neden olması ile açıklanmaktadır. Pesimum oranını gösteren eğrinin şekli çimento çeşidinden, kompozisyonundan, oranından, agrega özelliklerinden ve aynı zamanda alkali miktarından da etkilenmektedir. ¹

2.2 Alkali-Silis Reaksiyonunun Mekanizması

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

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

Reaksiyonun oluşabilmesi için çimento alkali içeriğinin “eşdeğer Na₂O” değeri olarak % 0,6 değerini aşması gerekir. Portland çimentosunun toplam alkali içeriği sodyum oksit eşdeğeri olarak şu ifade ile hesaplanmaktadır;

$$(Na_2O)_e = Na_2O + 0,658 K_2O$$

Çimentoda bulunan sodyum ve potasyum oksitler çimentonun hammaddelerinden (kil, kireçtaşı, şeyl vb) kaynaklanır. Ayrıca alkaliler, çimento dışında; agrega, karışım suyu, beton katkı maddeleri, buz çözücü tuzlar, zemin suyu, beton kür suyu ve endüstriyel atık suları aracılığıyla beton bünyesine girebilirler.²⁶

Genelde sadece çimento ve çimentolanma özelliği olan malzemelerin alkalinitesi göz önüne alınmaktadır. Ancak, betona katılan kimyasal yada mineral katkıları alkali içeriyorsa gelen ilave alkali miktarı da gözönüne alınır. Beton içine alkali girişi sadece çimentodan kaynaklanıyorsa alkali içeriği şu ifade ile hesaplanabilir;³⁰

$$[\text{Çimentonun alkali \%}] \times [\text{Çimento dozajı (kg/m}^3\text{)}] = \text{Betondaki alkali miktarı (kg/m}^3\text{)}$$

Betonun alkalinitesi arttıkça ASR potansiyeli de artar. Alkali hidroksit çözeltisi, reaktif agregalarla kolayca reaksiyona girer. Yüksek konsantrasyonlu alkali çözeltide, silisin kararlı formları bile güçlü silikon bağlarının kırılması nedeniyle reaksiyona girebilir. Agreganın reaktifliği arttıkça daha düşük alkalili çözeltilerde bile jel reaksiyonu oluşabilir. Silis mineralleri reaktiflikleri açısından opal, kalsedon, kristobalit, kriptokristal kuartz olarak sıralanabilir. Bu minerallerden bir veya birkaçının birarada bulunduğu kayalar arasında, opal, kalsedon, kuartz çörtleri, silisli kireçtaşları, silisli dolomitler, riyolit ve tüfleri, dazit ve tüfleri, silisli şeyller, filitler, opalli oluşumlar, çatlamış ve boşlukları dolmuş kuartzlar sayılabilir.

ASR’ nun genel mekanizması bilinmekle birlikte, beton üzerine yapmış olduğu etkiler henüz tam olarak açıklığa kavuşmamıştır. Örneğin çimento alkalinitesi belli bir değere erişince betonda şişme görülmekte, fakat alkalinite ile doğru orantılı

olarak artmamaktadır. Buna karşılık çimento dozajının artışı, şişmenin de artmasına neden olmaktadır. ASR için mutlaka suya ihtiyaç olduğu halde, su içinde bekletilen betonlarda şişme meydana gelmemektedir. Maksimum şişme betonun doygun rutubetli atmosferde tutulması halinde görülmektedir.

Reaktif agreganın inceliği reaksiyon hızını arttırmakla beraber, yüksek incelikte olan mineraller her zaman aynı derecede şişmeye neden olmamaktadır. Beton yapının poröz olması halinde, oluşan alkali silis jeli beton boşlukları içine dolarak betonda herhangi bir şişme meydana getirmemektedir.³¹

ASR' nun oluşumuna neden olan bir diğer koşul olan nem, bozulmanın ve hacim değişikliğinin şiddeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. ASR, yalnızca nem varlığında gerçekleşir. Nem, alkali iyonlarının yayılmasına, oluşan jel ise su emerek şişip genişlemeye ve betonda içsel çekme gerilmelerinin doğmasına böylece agrega ile onu çevreleyen çimento harcının çatlamasına neden olur.

Çatlamadan sonra ortama giren su, jelin emebileceğinden fazla olursa bir miktar jel dışarı sızar, bu durum ileri düzeyde bir hasarın kanıtıdır. Su, ASR'nda iki rol üstlenmiştir, taşıyıcılığın yanısıra jelin büyümesini de sağlar. Betonun kurutulması ve ileride su ile temasının önlenmesi reaksiyonun durdurulması için etkilidir. Aksine, tekrarlı ıslanma ve kuruma, alkali iyonlarının göçünü hızlandırarak reaksiyonun şiddetini artırır.

Yapılan deneyler sonucunda andezit, bazalt , dasit, riyolit gibi volkanik kayalar ile kumtaşı ve tüflerin hasar verici kayalar olduğu belirtilmiştir. Bunlardan silisli agregalarda alkali silis reaksiyonu, kalsitik dolomitlerde ve dolomitik kireçtaşlarında alkali karbonat reaksiyonu olmak üzere iki tip reaksiyondan bahsedilir. ACR (alkali karbonat reaksiyonu)' da oluşan genleşme , genellikle ASR' nda oluşan genleşmeden çok daha azdır. ASR sonucu meydana gelen genleşme agrega boyutu ile de ilgilidir ve reaktif parçacığın boyutu küçüldükçe genleşme artar ancak parçacık boyutu 20 µm den daha küçük olduğunda bu artış sürekli değildir. Örneğin, sadece reaktif ince

agrega içeren betonlarda meydana gelen genişleme erken dönemde artar, daha ileri dönemlerde sabit kalır.

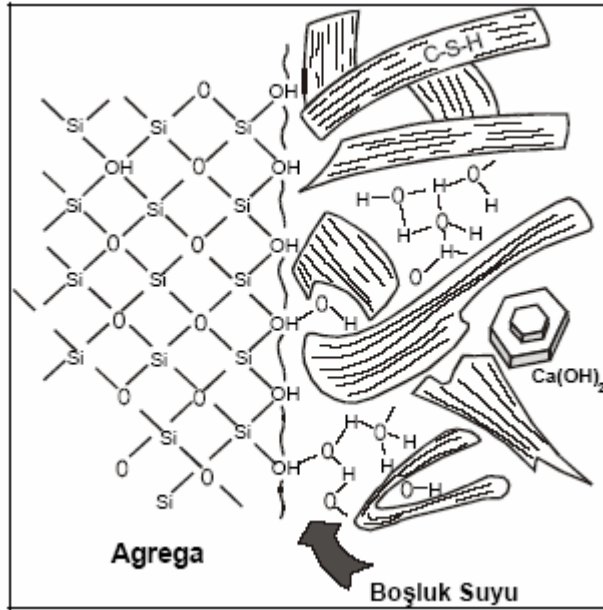
Sadece reaktif iri agrega kullanılarak üretilen betonlarda oluşan genişleme yavaş gelişir ancak uzun süre devam eder. Agregadaki silis mineralleri kristalleşmiş ise kararlı, amorf ise reaktiftir, ancak kristalleşmiş olmalarına karşın SiO_2 ' in, tridimit ve kristobalit formları reaktiftir, ancak kristalleşmiş, geniş yüzeyli, zayıf kristal dokulu, amorf, camsı ve mikrogözenekli agregaların ASR eğilimi fazladır. Betonun alkalitesi arttıkça ASR potansiyeli de artar, çünkü alkali hidroksit çözeltisi, reaktif agregalarla kolayca reaksiyona girer. Yüksek konsantrasyonlu alkali çözeltisinin etkisinde silisin kararlı formları bile güçlü silis bağlarının kopması nedeni ile reaksiyona girebilir. İçinde aktif silis bulunan ve ASR' na yol açan agregaların kullanılması zorunlu ise , bağlayıcı maddeye bir miktar puzolan madde ilave edilerek reaksiyon hızı azaltılabilir.

Oluşan jelin karakteristik bileşimi henüz tam belirlenememiş olmakla beraber silisyum , sodyum, potasyum, kalsiyum ve magnezyum içerdiği sanılmaktadır. Bazı kaynaklarda XRD analizinde bu ürünün zeolite benzediği ve kimyasal bileşiminin $(\text{NaAlSiO}_4)_{12} \cdot 27 \text{H}_2\text{O}$ veya $\text{Ca}(\text{Al-SiO}_4)_{12} \cdot 27 \text{H}_2\text{O}$ olduğu, jel ve kristal ürünlerinin agrega harç arayüzünde ve hava boşluklarında meydana geldiği belirtilmiştir. ASR, yüksek pH değerlerinde ortaya çıkar, çünkü reaktif silis ancak pH' ı yüksek çözültide çözünür.

Alkali Silis Reaksiyonunun Kimyası

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

Silis + Alkali → Alkali Silis Jeli + Su (Genleşme)



Şekil 2.3: Alkali silis reaksiyonunun şematik gösterimi (1.Aşama) ¹

C-S-H: Çimento, OH: Beton boşluk suyunda bulunan OH iyonları

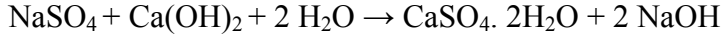
Si-O: Reaktif agrega, Ca(OH)₂: Çimento hidratasyonu sonucu artan kireç (Glasser, 1992).

Alkali Silis Reaksiyonu ve Etrenjit

Sertleşmiş betonların sülfat içeren sularla karşılaşması durumunda meydana gelen hasar, betonların durabilitesi konusunda çok bilinen bir sorundur. Hasar sürecinde ilk aşama sudaki sülfatın kalsiyum sülfata yani alçıya dönüşmesi ve bu alçının hidrate olarak beton boşluklarında genişmesi ve betona hasar vermesidir. Ancak bu hasar ihmal edilebilir düzeydedir. İkinci aşamada alçıtaşı çimentonun trikalsiyum aluminat hidrati ile kimyasal reaksiyona girer ve kalsiyum monosülfoaluminata dönüşür. Ortamda SO₃, su ve kirecin varlığı ile bu monosülfoaluminat, 32 molekül su içeren ve büyük hacme sahip olan ve bu yüzden betonu çatlatıp döken kalsiyum trisülfoaluminat hidrateyi oluşturur. Etrenjit veya Candlot tuzu adı verilen bu tuzun zararlı etkisi sülfat etkisi olarak isimlendirilir.

Aşağıda sülfat etkisinin oluşumundaki kimyasal aşamalar gösterilmiştir.

1. aşama herhangi bir sülfatın (örneğin Na_2SO_4) hydrate kalsiyum sülfata (alçıtaşına) dönüşümü:

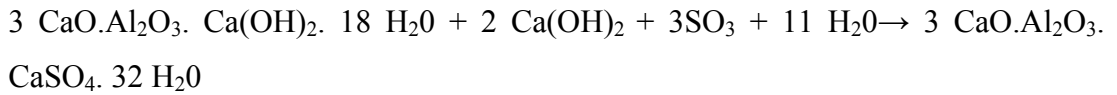
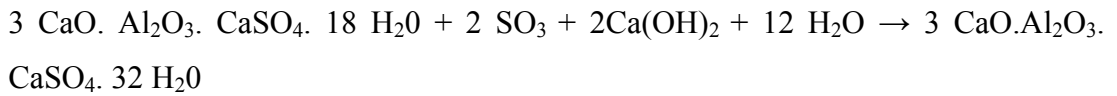


2. aşama kalsiyum monosülfo aluminat oluşumu:



(Çimentoda $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ %6' dan daha fazla olması durumunda ikincil bir ürün, $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ daha oluşabilir.)

3. aşama etrenjitin oluşumu:



Bu reaksiyonlarda ve özellikle üçüncü aşamada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (kirecin) gerekliliği dikkati çekmektedir. Sertleşmiş betonun sülfatlı sularla etkilenmesi sonucunda oluşan etrenjit taze betonların priz sırasında da oluşur ve priz ayarlanması bakımından gerekli bir üründür. Çimentonun kontrollü bir biçimde priz yapması için üretim sırasında klinkere alçıtaşı katılması zorunludur. Burada amaç çimento hamurunda çok hızlı priz yapan $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 'ın yüzeyine çökecek etrenjitin oluşmasını sağlamaktır. Priz sırasında jel kıvamda olan beton oluşan bu etrenjitten zarar görmez.

1980 yılında Almanya'da ısıl işlem uygulanan öngerilmeli demiryolu traverslerinde çatlama hasarları gözlenmiş, sorun incelenince bunun betonda oluşan etrenjitten kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Bu traversler sülfatlı bir ortamın etkisinde olmadıkları halde etrenjitin oluşumu doğal olarak büyük ilgi çekmiş ve yirmi yılı aşkın bir süre çok sayıda ekspertiz ve araştırma yapılarak olayın nedeni, hasarın derecesi ve önlenmesi konuları ele alınmıştır.

DEF (Delayed Ettringite Formation-Gecikmiş Etrenjit Oluşumu) oluşumunda arayer sıvısının düşük pH değerine sahip olması olayı kolaylaştıran bir etkidir. Betonların pH değerini düşüren karbonatlaşma ve alkali silis reaksiyonları DEF' i destekleyen olaylar sayılmaktadır.

DEF oluşumunun çimento kimyasal yapısı dışındaki bir diğer nedeni çatlaklar, betondaki boşluklardır. Etrenjit kristalleri ancak bu boşlukların içinde nüvelenecek yer bulmaktadır. Bu boşluklar, rötreler (plastik,kuruma,vd.), donma-çözülme, ASR, yerel gerilmeler (ön germe) gibi nedenler sonucunda oluşmuşlardır. Ayrıca boşluklu agregalar da etrenjit yuvalanmasına imkan verebilmektedir. Genellikle mikroçatlaklar agrega hamur ara yüzlerinde, betonun dışa açık bölümlerinde olur.

Traversler üzerinde yapılan incelemelerde, bazı traverslerde reaktif silisli agrega kullanılmış olması sonucu ASR hasarları ile karşılaşmıştır. Tipik ağ çatlakları ve dışarı taşan alkali silis jelleri, hasarın ASR hasarı olduğunu kanıtlamaktadır. Jeller 25.000 büyütme SEM'de incelendiğinde ve X-ışını element analizi yapıldığında etrenjit varlığı da saptanabilmiştir. Bu iki hasar türünün optik mikroskopla yapılacak bir analizle birbirine karıştırılması büyük olasılıktır. Önce ASR hasarının olduğu, meydana gelen çatlaklar içinde etrenjitin nüvelendiği hipotezine varılmıştır. Daha sonraki ASR' ndan bağımsız gelişen DEF lerde de oluşumun gene bir jel içinde meydana geldiği görülmüştür. Etrenjit kristalleri bu jel içinde katı süspansiyon halinde bulunmaktadır.

DEF' in ASR jellerinden ayırt edilmesi, ancak oldukça duyarlı bir çalışmayla yapılabilmektedir; kesilmiş fakat parlatılmamış yüzeylerin çok yüksek büyütme SEM ile incelenmesi ve X-ışını analizi ile element tespiti yapılması gereklidir. Jel maddelerin genişlemesi suyun osmotik yolla alınması ile gerçekleşmekte; çimento

hamur matriksindeki CSH bir tür osmotik membran fonksiyonu görmektedir. DEF damarları ASR damarlarından daha geniş olmakta; ASR jel damarları $1 \approx 2 \mu\text{m}$ iken, etrenjit damarları $5 \approx 25 \mu\text{m}$ mertebesinde olmaktadır.

Traverslerde önce öngerme kabloları yönünde yatay çatlamlara rastlanmakta, olay gelişince tüm yüzeyde damar şeklinde çatlama belirmektedir.

DEF hasarının oluşması etrenjitin genişlemesine bağlıdır; ancak bu genişleme serbest olarak meydana gelirse hasar yani çatlama olmamakta, etrenjit yeterli serbest genişleme hacmi bulmadığı takdirde betonu tahrip etmektedir.^{21,36}

2.3 Alkali Silis Reaksiyonunu Etkileyen Faktörler

ASR 'na bağlı beton hasarı ilk defa Kuzey Amerika' da 1940 da Stanton tarafından fark edilen bir olgudur. Sonraları birçok diğer ülkelerde gözlenmiştir. Stanton' un ilk makalesinden sonra birçok çalışma yayınlanmış, fakat ASR mekanizması halen tam olarak anlaşılamamıştır. Yine de, başlıca etkenler tanımlanmıştır. Su varlığında gözenek çözeltisindeki alkaliler belirli agregalarda bulunan reaktif silis ile etkileşir. Önemli rol oynayabilecek ilgili etkenler; çevresel bağıl nem, betonun gözenekliliği ve betondaki mineral katkıdır.¹⁸

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

Genleşen ASR'nin oluşması için üç şartın sağlanması gerekmektedir:

1. Agregada silisin reaktif bir formu bulunmalıdır.
2. Esas olarak çimentodan gelen yeterli miktarda alkali -sodyum (Na^+) ve/veya potasyum (K^+) bulunmalıdır.

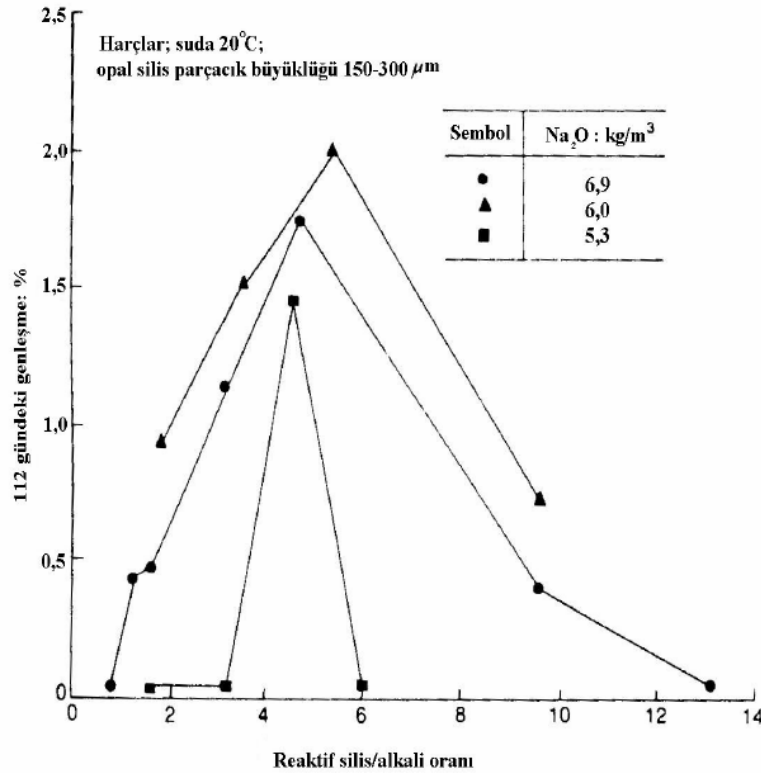
3. Betonun veya harcın gözenek yapısında % 85' ten az olmayan yeterli miktarda nem olması gereklidir.

Yukarıdaki koşullardan herhangi biri eksikse, ASR'den dolayı oluşan zararlı genleşme meydana gelemez.

Agrega bileşiminin yanısıra alkali-silis reaksiyonunun meydana gelmesinde çevre şartlarının da önemli etkileri bulunmaktadır. Zararlı alkali-silis reaksiyonu, sıcaklığın yaklaşık +10 °C ile +60 °C arasında bulunması halinde meydana gelmektedir. Bunun dışında, ortamın porozitesi ve yeterli nemin bulunması halinde alkali-silis reaksiyonundan dolayı hasar meydana gelebilmektedir.

2.3.1 Karışım Oranlarının Etkisi:

Reaktif agrega içeren bir betonun karışım oranlarını değiştirerek betonun reaktif agrega içeriği, alkali içeriği ve hidroksil iyonu konsantrasyonu değiştirilebilir. Bu değişim aynı zamanda betonun sonuçtaki genleşme miktarını da etkiler. Genleşmenin reaktif silis/alkali oranına bağlı olduğu Şekil 2.4'te görülmektedir. Maksimum genleşme, reaktif silis/alkali oranının 3.5 ile 5.5 olması durumunda meydana gelmektedir. Harç ve betonların bu davranışı pratikte önemlidir .



Şekil 2.4: Çimentonun alkali içeriğinin genişlemeye olan etkisi ¹

Betondaki tüm alkalilerin sadece portland çimentosundan ileri geldiği düşünülürse İngiliz agregaları ile yapılan araştırmalarda, 3 kg/m³'ün koruyucu bir limit olduğu sonucuna varılmıştır. Bugüne kadar yapılmış araştırmalara göre, 3.5 ve 4.0 kg/m³ gibi düşük alkali seviyelerinde bile bazı İngiliz agregaları ile dökülen betonlarda alkali silis reaksiyonu oluşabilmektedir. Bu sebeple, İngiltere'de 3.0 kg/m³ eşdeğer alkali içeriğinin betonda alkali silis reaksiyonunu önlemek için bir sınır kabul edilmesi tamamen koruyucu değildir. Bu değer, pek çok diğer ülkede daha düşük alkali seviyelerinde alkali silis reaksiyonu sebebiyle problem yaşandığından çelişkilidir. ¹

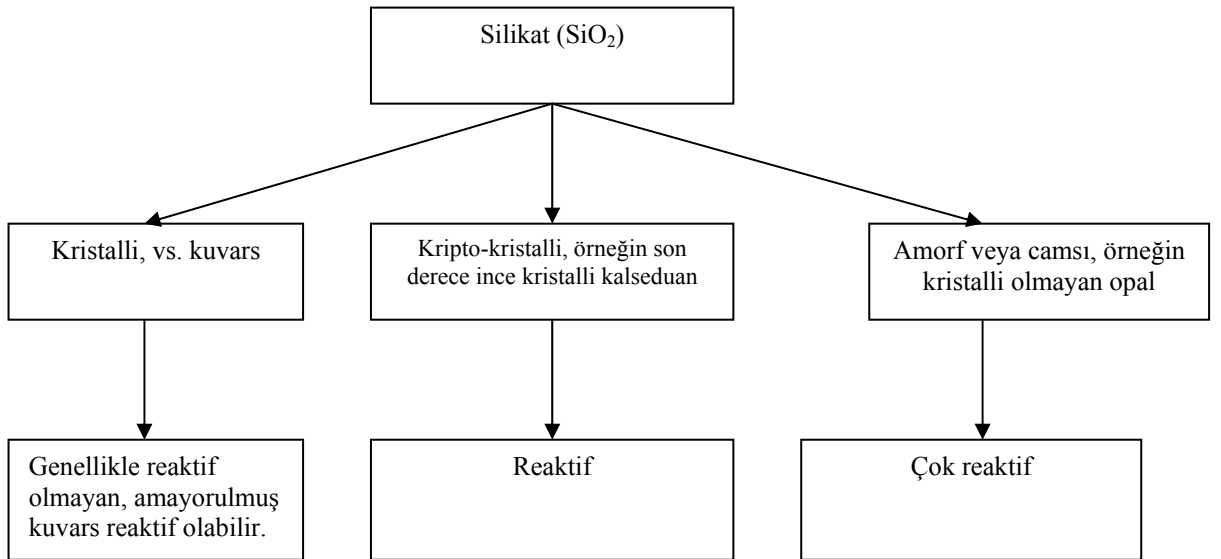
Çimento alkalilerinin yanısıra bazı agregaların da betonun boşluk çözeltisinin alkalinitesine katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Betonun boşluk çözeltisinde hesaplanandan fazla miktarda alkali bulunmasının sebebinin kireçtaşı agregasındaki kil mineralleri olduğu belirlenmiştir. Özellikle alkali silis reaksiyonu sebebiyle

oluşan genleşmeleri zararsız seviyelere düşürmek için betonun toplam alkali miktarını kısıtlama çözümüne gidildiğinde, dış kaynaklardan gelen alkaliler ile agrega alkalilerinin de göz önünde bulundurulması gerektiği belirtilmiştir. Su/çimento oranı ile ince agrega miktarı yüksek karışımlarda bazı bazaltların betonun boşluk çözeltisinin alkalinitesini hayli arttırdığı gözlemlenmiştir.¹

2.3.2 Reaktif Agreganın Cinsinin Ve Tane Büyüklüğünün Etkisi:

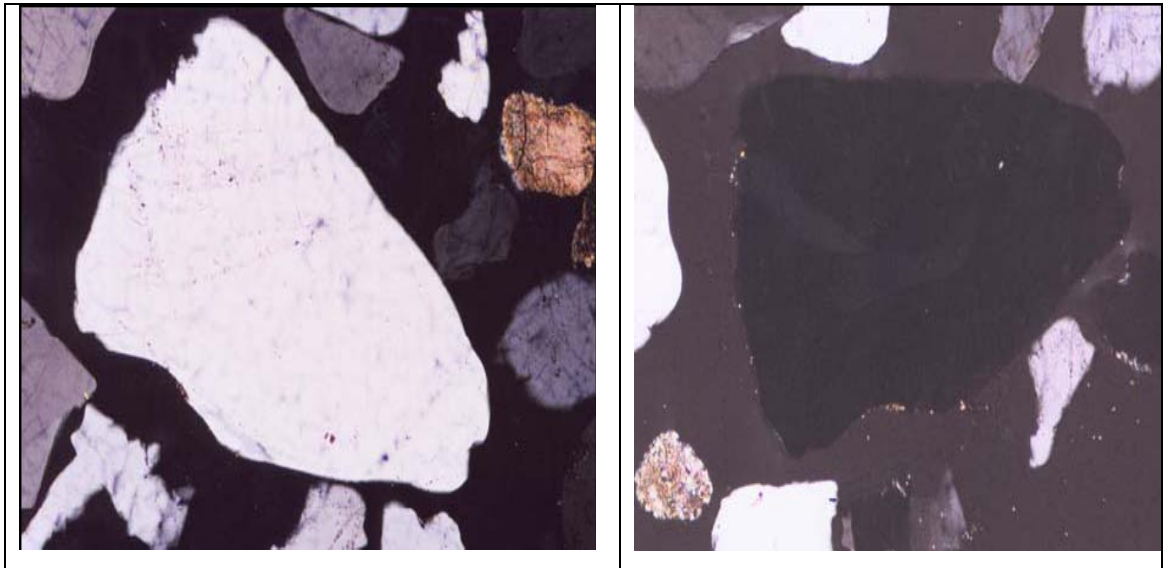
Betonda alkali silis reaksiyonunun oluşabilmesi için herhangi bir formda “reaktif silis”in bulunması gerekmektedir. Reaktif silis oldukça farklı doku ve kristal yapısı sergiler. Silisin doku farklılığı, kayaçlaşma sürecinde azalan soğuma hızına bağlıdır. Agregadaki silisli mineraller kayaç oluşum sürecinde soğuma hızına bağlı olarak amorf veya camsı (kristalleşmemiş) yapıdan kriptokristal, mikrokristal ve kristal yapıya kadar geniş bir aralığa dağılırlar. Kimi durumlarda kuvars kristallerinin oluşumu sırasında içsel gerilmeler oluşur. Bu tür kuvars mineralleri içeren agregalar reaktiftir.

Reaktif Agregada:



Şekil 2.5: Silisin farklı formlarının basitleştirilmiş bir örneği ²⁹

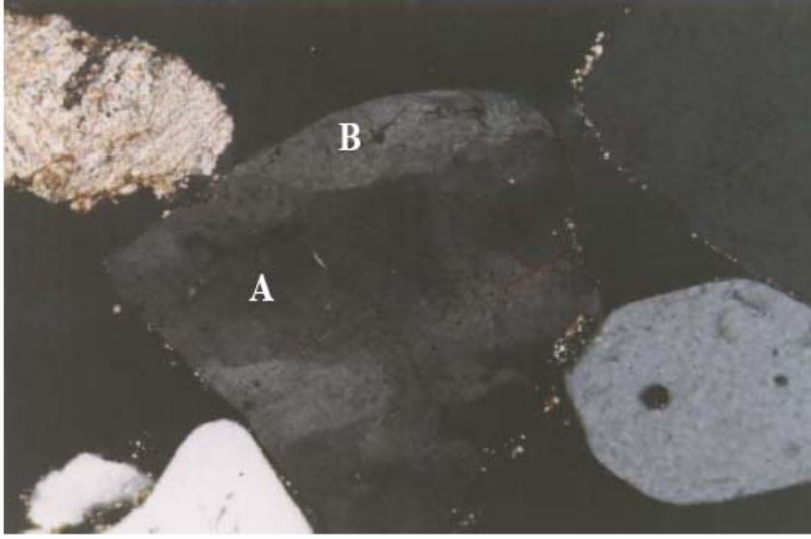
Silisli bir agreganın reaktif olup olmadığını belirleyen silisin formudur. Belirli reaktif agregalar kritik alanda bulunmadıkça maksimum genişleme göstermezler. Belirli bir alkali içeriği için maksimum genişleme meydana getiren reaktif agrega parçacıklarının ve betondaki su/çimento (S/Ç) oranının birbirine oranı pesimum (en az uygun) oran olarak bilinmektedir. Örneğin, agregadaki % 3 opal maksimum genişleme gösterir. Sabit olan alkali içeriği, S/Ç, vs. gibi parametrelerle, potansiyel olarak reaktif olan farklı agregaların genişlemedeki fark, esas olarak (I) oluşturan mineral fazlarının veya kaya tiplerinin doğasında var olan reaktivitesine, (II) reaktif parçacığın tane boyutuna ve (III) reaktif agreganın içindeki bu reaktif fazların oranlarına bağlıdır. ASR'na yatkın olan agregaların tümü, her nasılsa, pesimum etki göstermez. Bu pesimum etkisi olmayan agregalar, agregada bulunan reaktif parçacık miktarının bir fonksiyonu olarak artan bir genişleme sergilerler. İnce agrega daha fazla olan yüzey alanından dolayı ASR'na daha yatkındır. ²



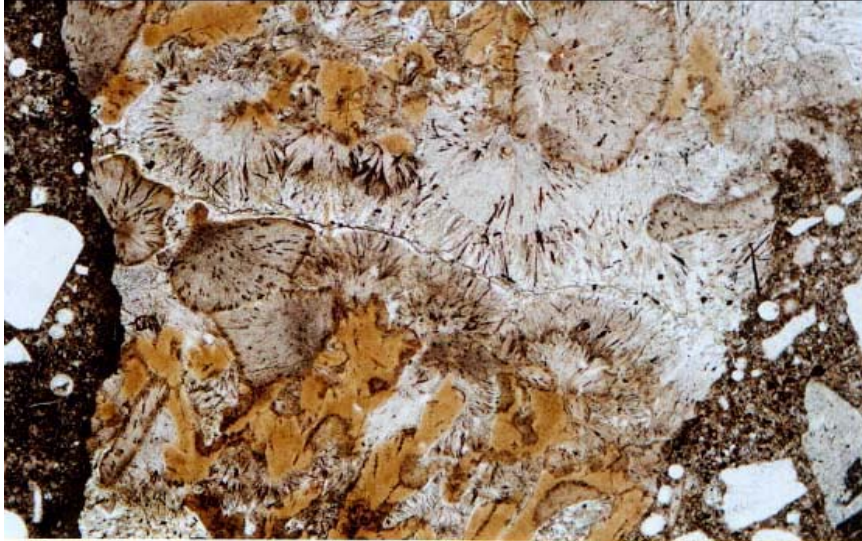
(A)

(B)

Resim 2.1: Reaktif olmayan kuvars. (Mikroskop düzlemi 360 derece döndürüldüğünde, çapraz ışığa tutulmuş bütün kuvars tanecikleri tamamen parlak (A) ya da tamamen karanlık (B) kalmaktadır.) ²⁹



Resim 2.2: Reaktif ya da yorulmuş kuvars (tek bir damar üzerinde açık (B) ve koyu (A) renkli şeritler oluşturur) ²⁹



Resim 2.3: Betondaki çok ince damarlı bir (kriptokristalli) kalsedon agregasının mikroskop fotoğrafı ²⁹

Reaktif agreganın tane büyüklüğü de alkali silis reaksiyonu sebebiyle oluşabilecek zararlar üzerinde etkilidir. Büyüklüğü 75 µm ile 1 mm arasında değişen, hatta bazen 5 mm'ye kadar çıkabilen kum boyutundaki reaktif agreganın kullanılması durumunda genişlemenin maksimum olduğu görülmektedir. Ancak, 75 µm altındaki boyutlarda reaktif agreganın fazla miktarda bulunması halinde genişleme oluşmadığı halde reaksiyon delillerinin ortaya çıktığı gözlenmiştir. Reaktif agreganın boyutunun etkisi, reaktif agreganın fiziksel ve mineralojik karakterine de bağlıdır. Reaktif agreganın gözenekliliği de alkali silis reaksiyonu bakımından önem taşımaktadır, gözenekliliği fazla olan agreganın içine boşluk çözeltisinin girişi daha kolay olmakta ve reaksiyon alanı artmaktadır.

Agreganın tane boyutunun ve gradasyonunun genişlemeye olan etkisi üzerindeki araştırmalar sınırlıdır. Bazı araştırmacılar, reaktif silis içeren agregaların reaktif parçacık boyutu azaldıkça harç çubuğu genişlemelerini arttırdığını, ancak parçacık boyutu 20 µm'nin altına düştüğünde genişlemenin aynı şekilde artmadığını belirlemişlerdir. Büyük agreganın parçacıkları kullanıldığında genişlemelerin ertelendiğini belirtmişlerdir. Sadece reaktif ince agreganın kullanıldığı takdirde betonun genişmesinin ilk aşamalarda oluştuğunu ve ileriki zamanda sabit kaldığını belirlemişlerdir. Diğer taraftan, reaktif agreganın sadece kaba agreganın kullanıldığı takdirde ise genişmeler yavaş ve daha uzun sürede meydana gelmektedir. Silisli agreganın için agreganın boyutu 0.15 ile 10 µm arasında iken agreganın boyutu küçüldükçe genişmelerin arttığını belirlenmiştir. Agreganın boyutu arttıkça maksimum genişmeyi veren çimento/agreganın oranı azalmaktadır. Agreganın boyutu büyüdüğünde genişmeler yavaş ilerlediğinden tek-boyutlu agreganın gradasyonunun kullanımının ASR genişmelerini azaltmak açısından daha avantajlı olduğu söylenebilir.¹

çimentoyu tayin ederken standart seçenek % 0.6'dır. Ancak, bu değerin bile reaktif agrega ile birlikte kullanıldığında yüksek olabileceği belirtilmektedir.

2. Çözünen tuzlardan gelen alkaliler: Bu tuzlar, çözünen tuzların kullanıldığı alanlarda alkalilerin yaygın bir kaynağıdır. Betona zarar verebilecek tüm kimyasalların deneylere tabi tutulması için özenli çabalar gerekmektedir.

3. Tamamlayıcı bağlayıcı malzemeler: Örneğin, yüksek alkali içeriği ile uçucu kül alkali meydana getirebilir.

4. Agregalar: Bazı agregaların kendisi alkaliler için potansiyel olabilir. Tipik olarak, agreganın kafes sistemi ASR sırasında bozulmaya başladığı zaman, alkaliler yayılmaktadır. Bu alkaliler, sonradan daha ileri ASR için ilave bir kaynak hazırlamaktadır.²⁹

Kar mücadelesinde kullanılan tuz (NaCl), deniz suyu, beton kür suyu ve endüstriyel atık suları aracılığıyla beton bünyesine dışarıdan giren alkaliler, dış alkaliler olarak adlandırılır. Özellikle geçirimli betonlarda ve/veya çatlaklar oluşmuş betonlarda dış alkaliler ASR'nun neden olduğu genişmeleri artırır. Deniz suyunun betona olan etkisini incelemek üzere yapılan araştırmada 500 kg/m^3 normal portland çimentosu içeren reaktif andezit agrega ile dökülen betonlarda reaksiyon sonucu oluşan genişmenin yarısına kadar deniz suyuna batırılmış betonlarda tamamen deniz suyuna batırılmış betonlara nazaran daha hızlı olduğu görülmüştür. Deniz suyunun sertleşmiş betonda oluşan ASR genişmelerini arttırıcı etkisi, içeriğindeki hidrate C_3A ve portlandit bileşenlerinin NaCl ile oluşan reaksiyonu sonucu OH^- miktarının artması sebebiyledir.

Özellikle İngiltere'de betonun alkali miktarını $3\text{-}4 \text{ kg/m}^3$ gibi bir değerle kısıtlamak koruyucu olarak kabul edilmesine karşın araştırmalarında bu alkali içeriğinde ve yavaş reaktif agrega ile yapılan betonlarda bile NaCl etkisi ile fazla miktarda genişmeler oluştuğu belirlenmiştir.

2.3.4 Rutubetin Etkisi:

Rutubet, silisin çözünmesine, alkali iyonların yayılmasına ve reaksiyon bölgesinde jel oluşumuna sebep olur. Oluşan jel ise su emerek şişip genişler ve betonda içsel çekme gerilmeleri oluşmasına yol açar. Araştırmalar, bağıl nem oranı %80' in üstünde olan betonlarda alkali silis reaksiyonunun oluştuğunu göstermektedir. Düşük su/çimento oranlı beton, ilave çimento, mineral katkı veya herhangi başka bir 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 rekristalize tuzlar alkali taşınmasının kolaylaşmasına ve alkalilerin kuruma bölgelerinde yoğunlaşmasına neden olduğundan bu bölgelerde reaksiyonun hızlı gelişimine yol açtığı bilinmektedir.

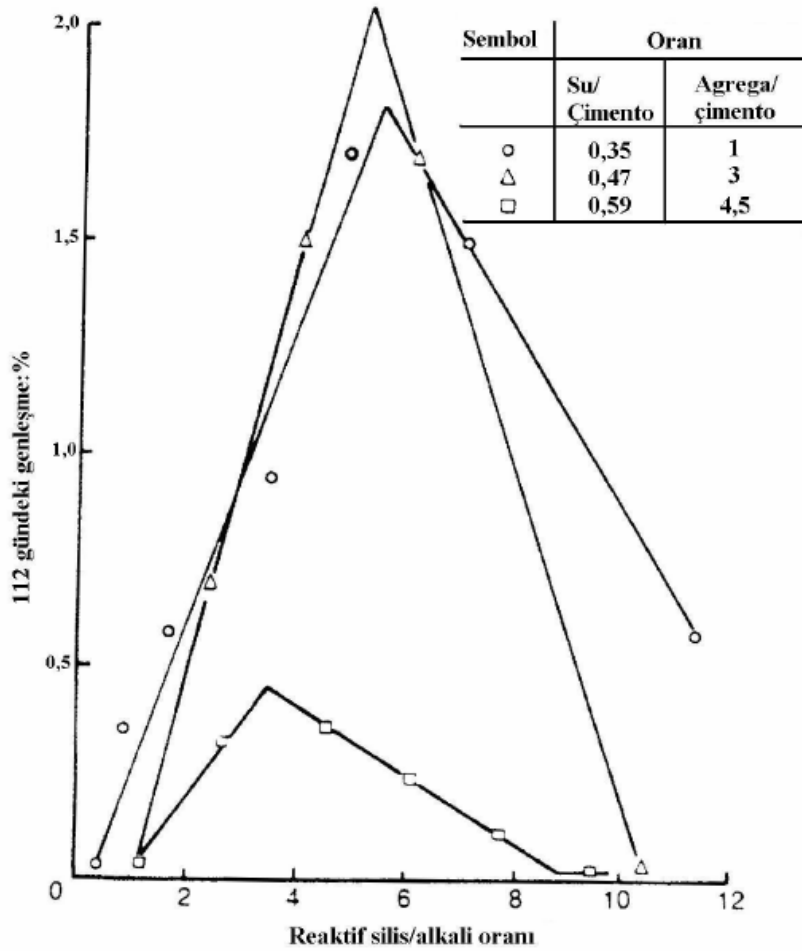
Nem, ASR için zaruri elemanlardan biridir; bu tepkime nem yokluğunda gerçekleşemez. ASR jel higroskopiktir; nemi emer. Bu yüzden, daha yüksek rutubet, nem emilimini artırır ve böylelikle betonda daha fazla genişlemeye sebep olur.²⁹

2.3.5 Sıcaklığın Etkisi:

Sıcak iklim koşullarındaki yapılar, soğuk iklim koşullarındakilere göre alkali silis reaksiyonuna karşı daha duyarlıdır. Çünkü reaksiyonun hızı sıcaklık arttıkça artar. Sıcaklık artışı, agregaların büyük çoğunluğunda aşırı termal gerilmelere sebep olur. Bazı agregalarla yapılan araştırmalar, 13-20 °C aralığındaki ölçümlerinin 38 °C' dekinden farklı olduğunu göstermiştir. Yüksek ve düşük sıcaklıkların genişlemeye etkisi agregaya bağlıdır. Agregaların büyük çoğunluğu daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla reaktiflik göstermektedir. ASR gelişimi derecesi artan sıcaklıkla artar²⁹

2.3.6 Sürüklenmiş Havanın Etkisi:

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



Şekil 2.6: Reaktif Silis/Alkali Oranına Göre Genleşme Miktarları ¹

Su altında saklanan numunelerin genişmesi S/Ç oranına bağlı iken su altında saklanmayan numunelerde reaksiyon, su buharının difüzyon hızına bağlı olarak kontrol edilmektedir.¹

2.3.7 Mineral ve Kimyasal Katkıların ASR'na Etkisi:

Mineral Katkıların ASR'na Etkisi

Mineral katkıları, tek başına bağlayıcı olarak tanımlanmayan, ince öğütüldüğünde ve nemli ortamda çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özeliğine sahip bileşenler oluşturan silisli veya silisli-alüminli malzemelerdir.

Puzolanik veya mineral katkıların kullanılmasının betonun durabilitesini ve ASR etkilerine karşı direncini arttırması bakımından avantajlara sahip olduğu düşünülmektedir.

Mineral katkıların ASR genişmesini azaltmasında hangi mekanizmanın baskın olduğu konusunda tam bir fikir birliğine varılamamıştır. Fakat bazı ana teoriler gözden geçirilmiştir:

a) 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 bu 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.

b) Mineral katkıları, boşluk ve agrega-çimento arayeri iyileştirmesi yaparak daha düşük geçirimsizliğe yol açmaktadır. Bu sayede, alkalilerin reaktif agregaya göçü yavaşlamaktadır.

c) Katkı maddeleri, çimento hamurundaki Ca(OH)_2 içeriğini azaltarak pH'ını düşürmektedir. Ancak Glasser, pH'ın Ca(OH)_2 , C-S-H ve boşluk çözeltisi arasındaki denge ile belirlendiğini ve bunların tek bağlarına miktarlarından bağımsız olduğunu belirtmiştir.

d) 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; Ca/Si oranı yüksek olduğu takdirde C-S-H'nin yüzey yükü pozitif olmakta ve C-S-H liflerinde anyonlar emilmektedir. Bu durumda, Na^+ ve K^+ gibi katyonlar boşluk suyunda kalırlar. Ca/Si oranı 1.2-1.3'den düşük olduğu durumlarda C-S-H'nin yüzey yükü negatif olur ve C-S-H ile alkali katyonları birleşir. Fakat hamur yapısının değişimi ve boşluk çözeltisi konsantrasyonu ile açıklanamayan bazı deneysel veriler de mevcuttur. Örneğin, Kollek vd. (1986) ve Canham vd. (1987); hamurun boşluk çözeltisindeki Na, K ve OH iyon konsantrasyonlarındaki değişim ile harcın genişmesinin uyumlu olmadığını görmüşlerdir. Ayrıca, cüruf ve uçucu külün çimentonun bir kısmı yerine kullanılması durumunda, seyreltme etkisine ek olarak, boşluk çözeltisindeki Na, K ve OH iyonları konsantrasyonundaki düşüş kısıtlı miktarda olmasına rağmen harçlardaki genişmenin önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, uçucu kül ve cürufun harç çubuklarındaki genişmeyi erken yaşlarda (örneğin, 28 günde) azalttığını gözlemlemişlerdir. Bu durumda, çimento hamurunun puzolanik reaksiyon sonucu yoğunlaşmış olması sebebiyle genişmeyi azaltmış olması ihtimali yüksek değildir, çünkü, uçucu külün ve cürufun hidratasyon hızı çimentonunkinden düşüktür.¹

Mineral katkıların alkali içerikleri önem taşımaktadır ve yüksek miktarda alkali içeren mineral katkıların etkili olabilmeleri için betonda yüksek oranda kullanılmaları gerektiği araştırmalarla kanıtlanmıştır. Dahası, mineral katkının aşırı miktarda alkali içermesi halinde çok yüksek oranlarda kullanılsa bile etkili olamadığı bilinmektedir. Betondaki toplam alkali içeriği, betonun dış alkalilere maruz

kalmadığı durumda, (agregalardan, mineral ve kimyasal katkılardan ve karışım suyundan gelen alkalilerle birlikte) 3 kg/m^3 değeri ile sınırlandırılmıştır.

Mineral katkıların alkalileri çözeltiye zamanla salıverilir, ancak bunun bir kısmı ASR için mevcut olarak kalmaya devam ederken, alkalilerin çoğu çimentonun hidratasyonu ve puzolanik reaksiyon gibi kimyasal reaksiyonlara katılırlar. ASR için mevcut kalan alkalilerin miktarı aşağıdaki metodlarla bulunabilir.¹

Kimyasal Katkıların ASR'na Etkisi

Kimyasal katkıları potansiyel olarak;

- a. Silisin çözünmesini durdurabilir veya azaltabilirler,
- b. Alkali-silis jelinin oluşmasına engel olur ve karakterini değiştirebilirler,
- c. Jelin genleşmesini azaltabilirler (Abit, 1998).

Mc Joy ve Caldwell (1951), araştırmalarında, pireks camı ve eşdeğer Na_2O içeriği %0.57 ve %1.15 olan iki tip çimento kullanarak ASTM C227 harç çubuğu metodunu uygulamışlardır. Bazı bakır ve amonyum tuzlarının etkili olduğu, ancak en iyi sonucu lityum tuzlarının verdiği görmüşlerdir.

Sakaguchi vd. (1989), normal portland çimentosu ve andezit reaktif agrega kullanarak çimento alkali içeriğini %1.2 eşdeğer Na_2O değerine ayarlamış ve kontrol numunelerinde yüksek genleşmeler gözlemlemiştir. Lityum iyonlarının, sodyum ve potasyum iyonlarına oranının %0.9 değerinin üzerinde olması halinde ASR sebebiyle oluşan genleşmelerin tamamen durdurduğunu belirtmiştir.

Stark (1993), Strategic Highway Research Program (SHRP) çerçevesinde yürüttüğü araştırmada eşdeğer Na_2O içeriği %1 olan çimento kullanarak reaktif agrega ile ASTM C227 harç çubuğu metodunu uygulamış ve 36 aylık genleşme değerlerini ölçmüştür. LiF ve Li_2CO_3 tuzları çimentonun kütlece %0.25, %0.50 ve %1.00

oranlarında kullanılmıştır. Stark, araştırmasının devamında LiOH tuzunun etkisini harç çubuklarını 80°C’de beklettiği çözeltinin içine farklı oranlarda LiOH ve NaOH ekleyerek sürdürmüştür. ASR genleşmelerini zararsız seviyelere düşüren Na:Li oranının 1:0.67 ile 1:1 seviyelerinde olması gerektiğini bildirmiştir. Lumley (1996), beton numunelerin eşdeğer Na₂O içeriğini 3.44 kg/m³’de sabitleyerek hazırladığı prizma örnekleri 20°C sıcaklıkta 6 yıl bekleterek lityum karbonat, lityum florit ve lityum hidroksit’in etkinliğini ölçmüştür. Deneyler sonucunda eşdeğer Li₂O/Na₂O oranının kütlece 0.33/1 olması durumunda genleşmelerin tamamen durduğunu belirlemiştir. Gereken miktarın yarısı kadar lityum tuzu kullanılması halinde ASR genleşmesine herhangi bir etki yaratmadığını belirtmiştir.

Ohama (1989), lityumun karbonat, florit ve hidroksil tuzlarının göreceli etkilerini %0.5, %0.7 ve %1.0 oranlarında kullanarak araştırmıştır. Bu oranlarda kullanılan tuzların etkili olduğunu, ancak LiF ve LiOH.H₂O tuzlarının %0.7 değerinin üzerinde kullanılması durumunda etkisinin azaldığını, yine de tüm bu dozajlarda kullanımın harçların basınç dayanımını benzer seviyelerde tuttuğunu belirtmiştir. LiOH ilk bakışta ASR etkilerini azaltmada kullanışsız bir seçim gibi gözükmemektedir. LiOH’in yüksek alkalın yapısı ve suda tümüyle iyonize olabilen yüksek çözünürlüğü ile NaOH ve KOH ile benzer etkileri göstermesi beklenir. Gerçekten de, betonda kullanıldığında normalde yüksek olan OH⁻ iyon konsantrasyonunu daha da yükseltmektedir. LiOH’ in ASR genleşmelerini azaltıcı etkisinin ortaya çıkabilmesi için ASR jelinin genleşme potansiyelini azaltan Li⁺ iyonlarının jel ile yeterince birleşebilmesi ve bu ters etkinin hakkından gelebilmesi, gerekmektedir. Bunun için de LiOH dozunun, oluşan ASR jelinin yapısına katılan ve zararlı genleşmeleri önleyen lityum miktarının pH’daki yükselme sebebiyle oluşan zararlı etkiyi yenebilmesine imkan verecek düzeyde ayarlanması gerekir. Ayrıca, çimento hidratasyonu esnasında lityum iyonlarının bir kısmı hidratasyon ürünlerinin bünyesine katılmaktadır. Bu iki sebepten dolayı yeterli miktardan az kullanılan LiOH, tam tersine genleşmeleri arttırmaktadır. Lityum florit tuzu suda neredeyse çözünmez, lityum karbonat ise az çözünürlüktedir. Bu tuzlar karışım suyuna toz halinde katılmalı ve betonda homojen dağılmalıdır. Bu tuzlar, betonun boşluk çözeltisinde çözünür ve bunların anyonları Ca⁺² ile reaksiyona girerek CaCO₃ veya

CaF_2 olarak çökelirler. Boşluk çözeltisinde denge oluşması için ortama OH^- salıverilir ve sonuç olarak ortamın alkalitesi artar .Bu durum, LiOH 'un gösterdiği etkiye benzerdir. Aynı şekilde, bu tuzların da gerekli dozajdan az kullanılması genleşmeleri durdurmak yerine arttırmaktadır. Bazı araştırmacılar, benzer etki göstermeleri sebebiyle betonda homojen dağılım sağlayabilmek açısından suda tamamen çözünebilen LiOH 'in kullanımının daha avantajlı olacağını savunmaktadır.

Lityumun hidroksit, florit ve klorür tuzlarının pH'ı arttırıcı zararlı etkisinin üstesinden gelebilmek için nötral tuzların kullanılması gerektiği Diamond (1999) tarafından öne sürülmüştür. Yakın zamanda nötral bir tuz olan lityum nitratın beton için yararlı bir katkı olabileceği üzerine yoğunlaşmıştır. Diamond, araştırmasında bir tip düşük alkalın (% 0.46 eşdeğer Na_2O) çimento ile su/çimento oranı 0.49 olan hamur numunelerinin boşluk çözeltilerini incelemiştir. Çimento hamuruna lityum nitrat olarak katılan lityum iyonu çözeltide lityum nitrat olarak kalmaya devam eder ve çözeltinin OH^- iyon konsantrasyonunu yükseltmez. Lityum nitrat kullanımı sırasında, diğer lityum tuzlarında olduğu gibi lityum iyonlarının bir kısmı çimento hidratasyon ürünlerinin bünyesine katılmaktadır. Bu sebeple, lityum nitrat kullanımı esnasında da dozaj ayarlaması itinayla yapılmalıdır.

Prezzi vd. (1998), NaOH , LiOH , NaCl , KCl , LiCl , CaCl_2 , MgCl_2 ve AlCl_3 tuzlarının ASR üzerindeki etkisini araştırmıştır. Uyguladıkları ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuğu deneyi genleşme sonuçlarına göre monovalent (tek yüklü) katyon içeren kimyasal katkıların divalent (çift yüklü) katyonlu kimyasal katılara göre daha fazla zararlı genleşme gösterdiğini, en iyi sonucu ise trivalent (üç yüklü) katyon içeren kimyasal katkıların verdiğini belirlemişlerdir. Bu davranış, Prezzi vd. (1997) tarafından öne sürülen çift tabaka teorisi ile uyum içerisindedir. Ancak, Prezzi vd.'nin (1998) araştırmalarının literatürle uyumlu olmadığı bir nokta da bulunmaktadır. Kawamura ve Ichise (1990) ile Wang ve Gillot (1989), araştırmalarında NaCl ve CaCl_2 'in tüm kullanım oranların ASR etkisini arttırdığını belirlemişlerdir. Oysa, Prezzi vd. (1998), bu kimyasalların ASR etkisini yavaşlattığını belirlemişlerdir. Araştırma sonuçlarındaki tezatın, kullanılan deney yöntemlerinin ve malzeme özelliklerinin farklı olmasından kaynaklandığı

düşünülmektedir. Bu nedenle özellikle buz çözücü tuz olarak kullanılan CaCl_2 'in ASR üzerindeki etkisinin saha performansı ile incelenmesi gerekmektedir.¹

2.3.8 Uçucu Külün ASR'na Etkisi

Uçucu küllerin ana kimyasal bileşenleri; silis (SiO_2), alümin (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3)'tür. Uçucu küller, santralin yakma kabiliyeti ve kullanılan yakıta göre farklı miktarlarda kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO), kükürttrioksit (SO_3) ve yanmamış kömür parçacıkları (karbon, (C)) içerirler. Uçucu kül puzolanik özellik gösterir. Yüksek oranda (%10'dan fazla) CaO içeren uçucu kül puzolanik özelliğın yanı sıra bağlayıcı özellik de gösterir.

UK, katkılı çimento üretiminde kullanıldığı gibi betonda belirli oranlarda çimento veya ince agrega yerine de kullanılmaktadır. UK, 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 özeliği sayesinde oluşturduğu ikincil C-S-H'larla yapıyı daha yoğun hale getirir, agrega-harç arayerini iyileştirir ve bu sayede betonun geçirimsizliğini azaltır. Bu sebeple, çeşitli kimyasal ve fiziksel etkilere karşı betonun durabilitesi artar. Uçucu küllerin çeşitliliği sebebiyle araştırmacılar ASR'ye olan etkileri hakkında çoğu zaman çelişkili görüşler öne sürmüşlerdir. Çelişkilerin sebebi, araştırmalarda kullanılan uçucu küllerin ve çimentoların kimyasal ve mineralojik özelliklerinin ve agregaların reaktivitelerinin farklı olmasıdır. Örneğın, Nixon ve Gaze (1983), Nixon vd. (1986) ve Stark (1978) yavaş reaksiyona giren agregalar için çimentonun kütlege %20-30 oranında uçucu külle yer değiştirmesi halinde ASR sebebiyle betonda oluşabilecek genleşmelerin azaldığını belirlemişlerdir. Ancak, Hobbs (1989), laboratuarda yaptığı deneysel çalışmada yüksek reaktiviteye sahip opali, agrega olarak kullanmış ve çimento ile en yüksek genleşmeyi veren kombinasyonu sağlamıştır, ki bu pratikte imkansızdır. Böyle durumlarda, en etkili uçucu küller bile genleşmeyi zararsız seviyelere düşürememiş, buna rağmen yine de genleşmelerde kayda değer düşüşler görülmüştür. Bu tür deneylerin sonuçları pratikte uygulanamamaktadır.

Hızlandırılmış harç çubuğu metodu diğer genişleme deneylerine alternatif olmaktadır. Bu deney yardımı ile mineral katkıların etkililiği hakkında ilk araştırma NBRI tarafından rapor edilmiştir (Davies ve Oberholster, 1987). Araştırmacılar çalışmalarında uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanmışlardır. Bu deneyle belli bir agrega için kullanılacak maksimum mineral katkı miktarı bulunmaktadır.

Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi (1 M NaOH, 80°C), uçucu külün ASR üzerindeki uzun süreli etkisini tahmininde kullanılabilir. Bu tahmin, boşluk çözeltisi alkali içeriği 1M NaOH veya altında değerlerde olan betonlara uygulanabilir. Genellikle saha betonlarının alkali içeriği 7.0 kg eşdeğer Na₂O/m³ olduğundan pratikte bu metod kullanılabilir (Shayan, 1995). Stark vd. (1993), NBRI hızlandırılmış harç çubuğu deneyine tabi tuttıkları üç farklı uçucu kül ve bir çeşit yüksek fırın cürufunu üç farklı agrega için buldukları sonuçları ve yorumları yayımlamışlardır.

Kullanılan agregalar şunlardır; AL (reaktif volkanik), RQ (kuvars, çört) ve PR (granit gnays). Cüruf sadece AL agregası ile deneye tabi tutulmuştur. Alkali içeriği %0.18 eşdeğer Na₂O olan çimento ile yapılan harç numuneleri 1 N NaOH solüsyonuna batırılmıştır. Kullanılan kombinasyonlara ek olarak her uçucu kül ayrıca %20 oranında çimento yerine kullanılarak reaktif olmayan kireçtaşı ile deneye tabi tutulmuştur.

Deney sonuçlarından da görülmüştür ki, kullanılan uçucu kül oranı arttıkça genişlemedeki azalma da artmaktadır. Bu deneyde hangi katkı oranında kritik genişleme değeri olan %0.08'in altında genişlemeler elde edildiği araştırılmıştır.

ASTM F sınıfı uçucu kül olan B ve J uçucu külleri için tavsiye edilen minimum kullanım yüzdeleri, 15 ile 25 arasında değişmektedir ki bu değerler pratikte uygulamada kullanılan değerlere yakındır. ASTM C sınıfı uçucu kül olan L uçucu külü için ise %60'ın üzerinde kullanım gerekmektedir. Bu değer üzerinde kullanılması halinde de ASR sebebi ile oluşan genişmeleri önleyebileceğine dair

kesin bir gösterge yoktur. Örnekteki L sınıfı uçucu kül yüksek oranda (%27) kireç içermekte ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oranı düşük (%58)'dir. Ayrıca, toplam eşdeğer Na_2O miktarı da diğer küllere nazaran yüksektir. Bu araştırma sonucunda hızlandırılmış deney metodunun ASR hasarlarını minimuma indirmede kullanılacak mineral katkıların miktarını belirlemede güvenilir ve hızlı bir metod olduğu, farklı kaynaklardan alınan agregalarla, farklı kimyasal ve mineralojik özelliklere sahip çimento ve mineral katkıların davranışlarının bu metodla saptanabildiği söylenebilir.

Portland çimentosu kullanıldığında uçucu külün çimento ile kısmi yer değişimi toplam hidroksil iyon konsantrasyonunu azaltmada etkisiz olmaktadır. Ancak, yüksek alkalin çimento kullanıldığında toplam hidroksil iyon içeriği azalmaktadır ve bu azalma miktarı, yüksek fırın cürufu sebebiyle oluşan azalma miktarından fazladır (Hobbs, 1988).¹

2.3.9 Yüksek Fırın Cürufunun ASR'na Etkisi

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

Kanada Standardı CSA 23.1 Ek B, ASR'nin kontrolü için %50 oranında çimento yerine kullanıma izin vermektedir. Ancak yapılan araştırmalar az reaktif agregalarda daha az miktarda yüksek fırın cürufunun etkili olabildiğini göstermektedir. Thomas ve Innis (1998) reaktif silisli kireçtaşı ile beton prizma deneyi (CSA A23.2-14A) uygulamış ve %50 oranında cüruf kullanımının standarttaki 24 aylık genleşme sınır değeri olan %0.04'ün altında kaldığını belirtmiştir. Daha az reaktif agrega olan grovak içeren çakıl ile %35 oranında yüksek fırın cürufu kullanımı halinde genleşme kritik sınırın altına düşmektedir. Her iki agrega için de kullanılan çimentonun

eşdeğer Na_2O miktarı kütlece %1.25'tir. 1989'da Ontario'da Magpie Nehri'nde yapılan çalışmalarda bazı baraj ve elektrik santrallerinin yapımında yavaş genişleyen kaba agreganın kontrol altına alınması için çimento yerine %50 oranında yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. 1996 yılında ise bu yapıların yakınındaki normal portland çimentosu ile yapılmış aynı yaştaki karayolu köprüsünde çatlaklar görülürken sözü geçen yapılarda ASR sonucu oluşanlara benzer çatlakların görülmediği gözlenmiştir (Hooton vd., 2000).

Yüksek fırın cürufundaki alkaliler camsı fazlarda bağlı bulunmakta ve portland çimentosuna nazaran daha yavaş bir şekilde ortama salıverilmektedir. Yüksek fırın cürufunun toplam alkali içeriği (asitte çözünebilir alkali) kütlece %0.3 ile %2.6 eşdeğer sodyum oksit değerleri arasında değişmektedir. Barlow ve Jackson (1988), üç adet yüksek fırın cürufu üzerinde yaptıkları çalışmada yüksek fırın cürufu mevcut alkali içeriklerinin toplam (asitte çözünebilir) alkali içeriklerinin kütlece %39'u ile %63'ü arasında olduğunu bulmuşlardır. Betonlar için efektif alkali içeriği sınır değeri 4 kg/m^3 olarak belirlenmiştir.¹

2.3.10 Silis Dumanının ASR'na Etkisi

Bu malzemenin silis içeriği %85 ile %98 arasında değişmektedir. Kimyasal yapısındaki ikincil bileşenler, karbon, (yanmamış kömür artığı), demir oksit (Fe_2O_3), alümina (Al_2O_3), magnezyum oksit (MgO) ve alkaliler (Na_2O ve K_2O)'dir. Yapısında fazla miktarda SiO_2 bulundurması ve çok ince partiküller halinde olması sebebiyle üstün puzolanik özelliklere sahiptir. Silis dumanının amorf halde bulunan silis içeriği, çimento yerine kullanıldığında beton henüz taze haldeyken çimentonun alkalileriyle reaksiyona girer. Bu reaksiyonun beton taze iken hızla oluşmasının sebebi, silis dumanının inceliğinin çok yüksek olmasıdır. Yeterli miktarda silis dumanı kullanıldığında, beton gerekli dayanımı kazanmadan önce çimento ve silis dumanı tarafından ortama salıverilen sodyum ve potasyum iyonlarının büyük kısmı reaksiyon esnasında tükenir. Betonun dayanım kazanmasından önce gelişen bu reaksiyon zararlı genleşmeler ve çatlaklara yol açmaz. Silis dumanının ASR üzerindeki etkisi, kimyasal kompozisyonuna (SiO_2 ve alkali içeriğine), kullanım yüzdesine,

çimentonun tipi, alkali içeriği ve inceliğine bağlıdır. Olafsson (1981), ASTM C227'nin modifiye versiyonunu uyguladığı araştırmalarında pireksi ince agrega olarak kullanmış ve silis dumanı gibi yüksek yüzey alanına sahip puzolanlarda düşük oranlarda kullanımı yararlı olabildiğini gözlemlemiştir. Silis dumanı, İzlanda'da 20 yılı aşkın süredir çimentoda katkı olarak kullanılmaktadır. 1981-1983 arasında yapılmış binalardan alınan karotlar incelendiğinde %5 oranda silis dumanı ve reaktif agrega ile yapılmış bu betonlarda jel oluşumunun çatlamaya yol açmayacak kadar az miktarda olduğu belirlenmiştir.

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.¹

2.3.11 Doğal Puzolanların ASR'na Etkisi

Puzolanların, genleşme yaratan reaksiyonlara karşı etkili oldukları bilinmektedir. Kireç-puzolan reaksiyonunda boşluk çözeltisi pH'ının düşmesi sonucu puzolanların etkili olduğu öne sürülmüştür. Ayrıca, reaktif puzolanların alkalilerle reaksiyona girerek alkalileri tükettikleri ve genleşme yaratmayan ürünler oluşturdukları da belirtilmektedir.

Mielenz vd.(1950), pişirilmiş kil ve şeyllerin 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'nu azaltmada etkili sonuç vermediği belirlenmiştir. Aynı şekilde, 1032 °C'de pişirilen illit ve vermiküllit tipi killer de ASR üzerinde etkili olamamıştır .

Gruber vd. (1996) ile De Silva vd. (1992)'ya göre, yüksek reaktiviteli metakaolin (YRM), saflaştırılmış kaolinit kilinin 650-800°C sıcaklık aralığında kontrollü bir

prosesle termal aktifleştirilmesi ile oluşur. Meydana gelen susuz alumino silist, yüksek reaktif yapay bir puzolan özeliği taşıyan amorf bir malzemedir. Normal Portland çimentosunun bir kısmı yerine kullanıldığında portlandit ile reaksiyona girerek bileşimi ve yapısı normal portland çimentosunun oluşturduğuna benzeyen ilave kalsiyum silist hidrat oluşturur. Kostuch vd. (1993), Çin kilinden yapılan metakaolinin puzolanik reaksiyon sonucu oluşan ilave kalsiyum silist hidratlarının Ca/Si oranının düşük olduğu (0.8-1.5 arasında) ve bu sayede boşluk çözültisindeki alkali iyonlarını bünyesine alabildiğini belirtmiştir. Bu da puzolanların ASR üzerindeki genel etkisidir.¹

2.4 Alkali-Silis Reaksiyonunun Belirtileri

Betonda ASR ürünleri oluşmadıkça ASR hasarından bahsedilemez. Yapılacak dikkatli incelemelerle tespit edilebilecek ASR belirtileri; genleşme, betonda çatlaklar, yüzey birikintileri, yüzey parçalanmaları-patlamaları ve renk değişimleridir.³²

ASR varlığının en tipik göstergesi, genleşmelerle ortaya çıkan harita çatlağı tipindeki çatlak desenleridir. Yapılabilecek göz muayenesi ile; çatlakların konumu ve deseni, uzunlukları, genişlikleri, görünür derinlikleri, çatlakların agrega kesitinden mi yoksa çimento hamurundan mı geçtiği saptanabilir. ASR'nun 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'ndan kaynaklanan çekme gerilmeleri nedeni ile 3 veya 4 kollu yıldız şeklinde çatlaklar. ASR jelinin su emerek şişmesi sonucu beton içinde yarattığı baskı potansiyel enerji, bu çatlaklar ile boşalır.³³

Beton çatlakları boyunca beyazdan griye kadar değişen renklerde ASR jeli ya da 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.¹⁸

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 artırır.

Yüzeyde renk kaybı veya renklenmeler, genellikle harita çatlağı ile birlikte görülür. Koyu renkli veya kararmış bölgeler genellikle ASR'ndan kaynaklanmaktadır. Çatlak boyunca olan bölgelerde 2-3 mm genişlikte renk açılması, beyazlaşma, pembeleşme ya da kahverengileşme görülebilir.¹⁸

2.5 Alkali Silis Reaksiyonunun Betona Etkileri ve Teşhisi

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.

Laboratuvar deneylerinin bazılarında reaksiyon, anormal yüksek çimento içeriği, alkali ekleme veya yüksek sıcaklıklarda test edilerek hızlandırılmaktadır. Test metotları, bu sebeple iki ana faktör göz önüne alınarak değerlendirilmelidir. Birincisi, bu tür anormal koşullarda bazı silisli bileşenler normal koşullarda olduğundan çok farklı hızlarda reaksiyona girebilirler. İkincisi, reaksiyonun fiziksel etkileri çok farklı olabilir. Bu deneyler ancak, şantiye koşullarıyla veya normal şartlarda kürlenmiş numuneler üzerinde yapılan deneylerle karşılaştırıldığında anlamlı sonuçlara götürebilir.

Alkali silis reaksiyonunun meydana geldiğinin tipik göstergeleri daha önceden de belirtildiği gibi harita çatlaklarıdır. İleri safhada kapanmış derzler, kapak atmalar ve yapının çeşitli bölgelerinde deplasmanlar oluşabilir. Alkali silis reaksiyonu sebebiyle hasar görme yavaş olduğundan dehşetli bir yıkıntı olma riski çok düşüktür. Alkali silis reaksiyonu çatlakları, donma-çözünme, sülfat etkisi, donatı korozyonu gibi durabilite problemlerinin etkisini arttırmaktadır. Hidroelektrik santrallerindeki yüksek hızda dönen ekipmanların yerleştiği ve genleşme toleransının çok hassas olduğu yapılarda kullanım problemlerine yol açabilir.

Çatlakların yanısıra alkali silis reaksiyonunu jelinin dışarıya akması sonucu oluşan yüzey birikintileri ve renk değişimleri; parçalanmış agreganın çimento hamurunu dışarıya atması sonucu meydana gelen “pop-out” adı verilen yüzey patlamaları ve parçalanmaları da alkali silis reaksiyonunun tipik belirtileridir. Yapılardaki çatlamlar ve deplasmanlar farklı durabilite problemlerinin eseri olabilirler. Bunların alkali silis reaksiyonu sebebiyle meydana gelip gelmediğini anlamak için çeşitli incelemeler yapılmaktadır. ASR teşhisi için farklı metotlar mevcuttur. Hasarlı yapıda dışarıya sızan jel benzeri akıntıların analizi bunlardan biridir. Yapının dışında bir akıntı yoksa alınan karotlar üzerinde petrografik inceleme yapılarak bir sonuca varılabilir. Hasarsız inceleme yöntemlerinden biri ise uranil-asetat metodudur. Bu yöntemle, beton yüzeyi uranil-asetat çözeltisi ile spreylenebilir, suyla yıkanır ve ultraviyole ışığı altında incelenir. Ultraviyole ışık altında reaksiyona uğramış parçacıklar ve jel açık sarı veya yeşil gözükmektedir.²⁹

2.6 Alkali Silis Reaksiyonunu Kontrol Altına Alma Yöntemleri

Alkali silis reaksiyonunu önlemenin en iyi yolu beton dökülmeden önce gerekli önlemleri almaktır. Bunun için de bağlayıcı malzemelerin ve agregaların dikkatlice analiz edilmesi ve malzeme seçiminin verimliliğini ve ekonomikliğini optimize eden bir kontrol stratejisinin seçilmesi gerekir. Alkali silis reaksiyonunu önlemek için malzeme seçiminde aşağıdakilere dikkat edilmelidir:

1. Aktif silis içermeyen agregaların tercih edilmesi,
2. Betonun alkali içeriğini sınırlamak,
3. Ortamın nemini kontrol altında tutmak,
4. Katkı maddesi kullanımı .

En sık belirtilen stratejilerden bir tanesi reaktif agreların potansiyelinin sınırlamasıdır. Birkaç ASTM laboratuvar testleri, etkililiğin ve güvenilirliğin derecesi değişmesine rağmen, agregaların tepkimesi ölçülür.

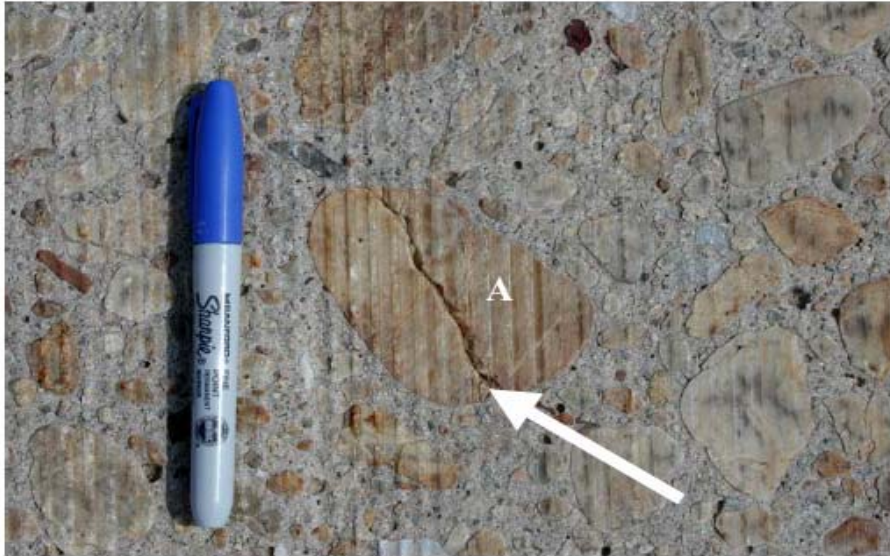
ASTMC 295' de belirlenen prosedürleri izleyen petrografik analizler, reaktif silisli minerallerin hacmini tanımlayabilir ve ölçebilir. Fakat genişleme potansiyeli göstergesini veya belirli bir sayıyı alıcıya vermek çoğu zaman başarısızlıkla sonuçlanır. Geniş bir biçimde kullanılan diğer methodlar örneğin bazı kimyasal test (ASTM C 286) ve harç ile sıva bar testi (ASTM C 227), yavaş reaktif agregalar ile güvensiz olmalarından ötürü şüphe uyandırmaktadır. Bu testler sadece silisli şist veya diğer hızlı reaktif agregalar hususunda güvenilirdir.¹⁹

ASR'na uğramış yapılarda çoğu rijid tamirler (onarımlar) başarısızlığa uğrar. Çünkü, devam eden alkali silis reaksiyonu genişlemeye neden olabilir. Bu durumda yapılan onarımlar başarısızlığa uğrar. Alkali silis reaksiyonundan dolayı çatlamış beton su geçirir. Eğer su, yapıyı delip geçerse , alkali silis reaksiyonunun zarar verdiği yapıların tamirinin bir yolu yapı güçlendirme ile kozmetik kaplamaların kombinasyonudur. Yapı önce çökme olmasın diye güçlendirilir. Sonra kozmetik tamirler yapılır.¹⁹

2.7 Alkali Silis Reaksiyonuna Örnekler



Resim 2.4: Agregada patlama ²⁹



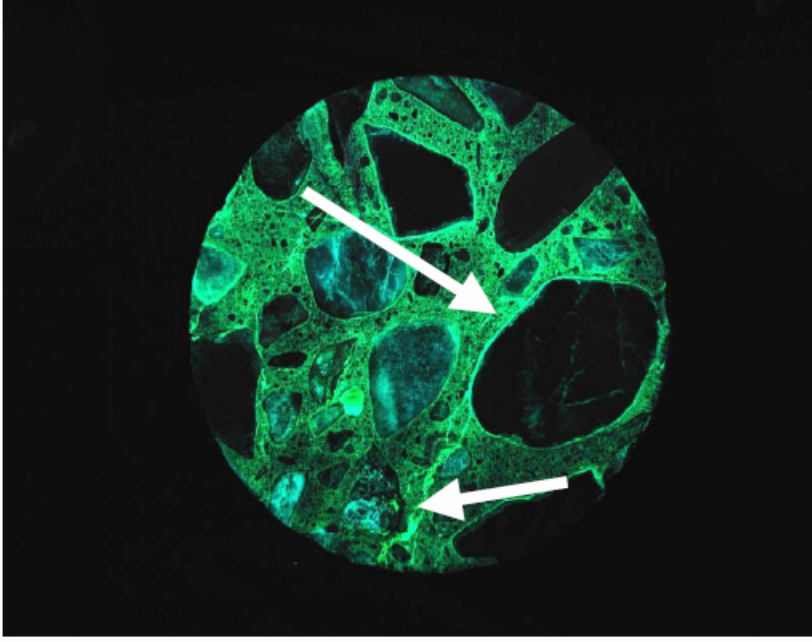
Resim 2.5: ASR'den etkilenmiş bir agrega parçasığında açık bir iç çatlak (A) ²⁹



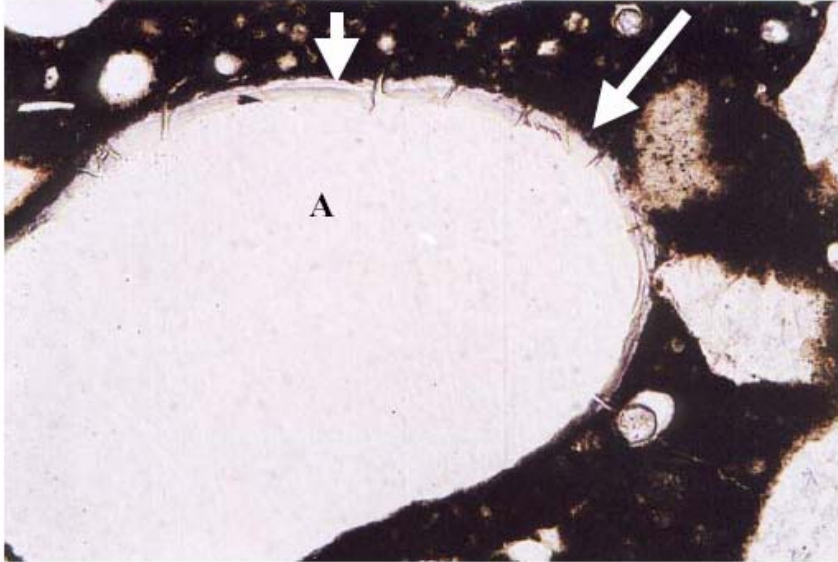
Resim 2.6: Çatlaklardan jel sızması²⁹



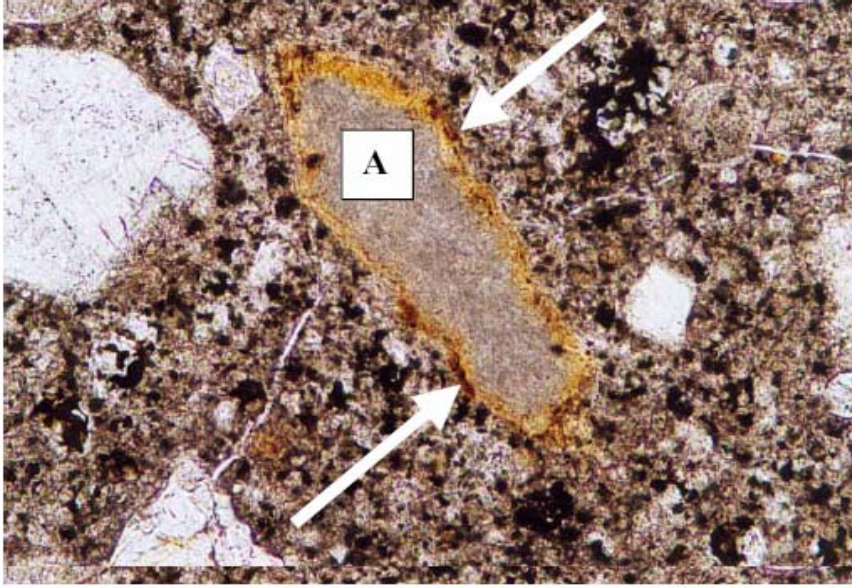
Resim 2.7: Bir havaalanı kaplamasından alınan bir beton gövdesinin açık ışık altındaki kesiti²⁹



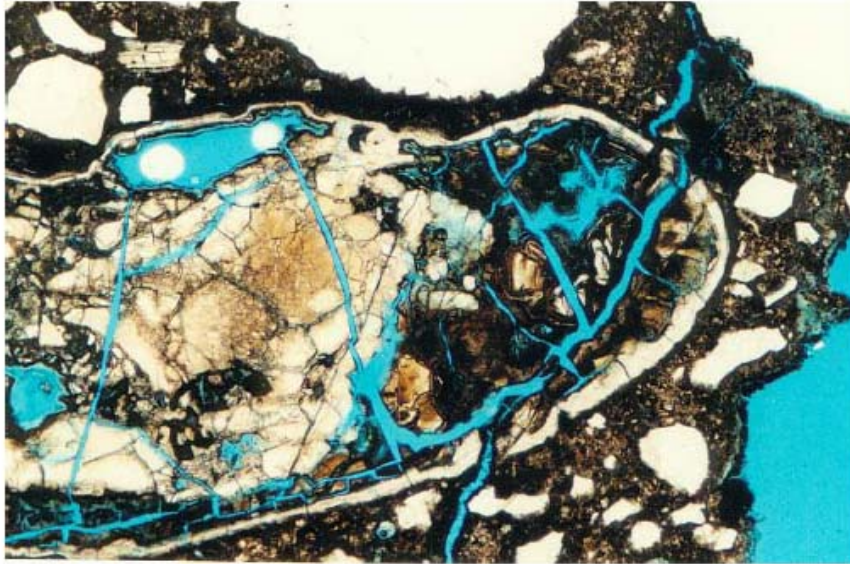
Resim 2.8: Boya işleminden sonra aynı kesit UV ışığı altında görüntülediğinde çatlaklar boyunca ve agregaya çevresinde ASR jelini göstermektedir. ²⁹



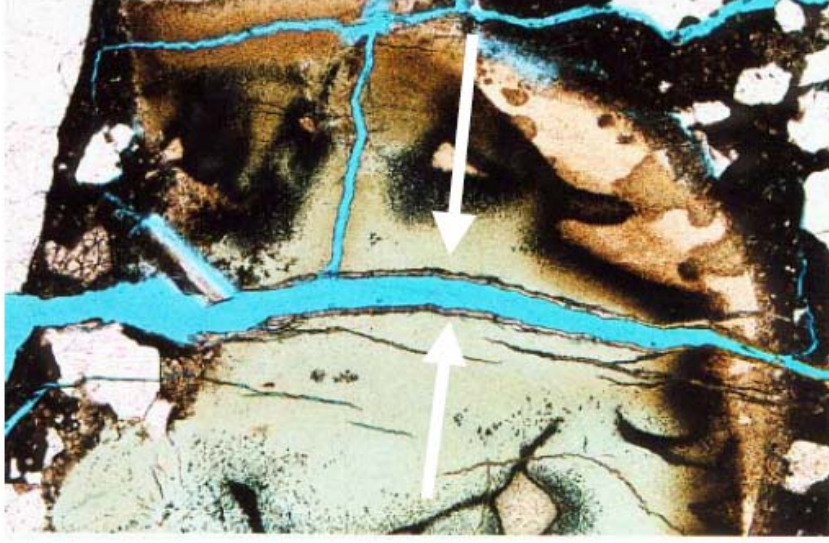
Resim 2.9: Bir agregaya parçacığının etrafındaki ASR nedeniyle oluşan reaksiyon çemberi ²⁹



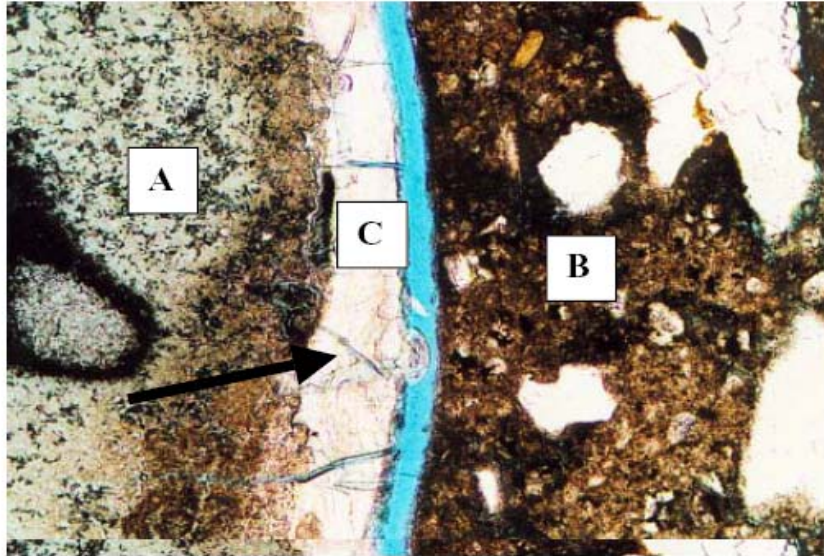
Resim 2.10: Opale benzer kireçtaşı agrega parçacığının (A) çevresel renk değiştirmesi ²⁹



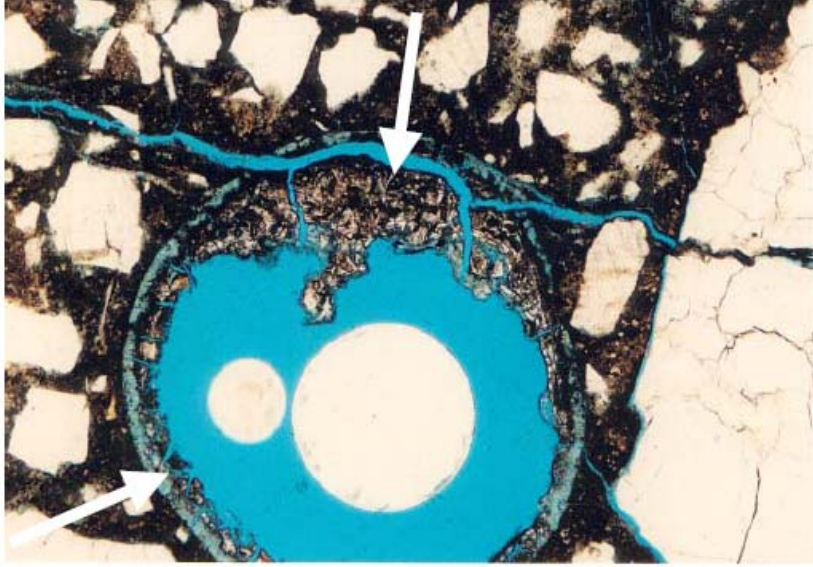
Resim 2.11: ASR nedeniyle şiddetli şekilde çatlamış opale benzer silisli bir ince agrega ²⁹



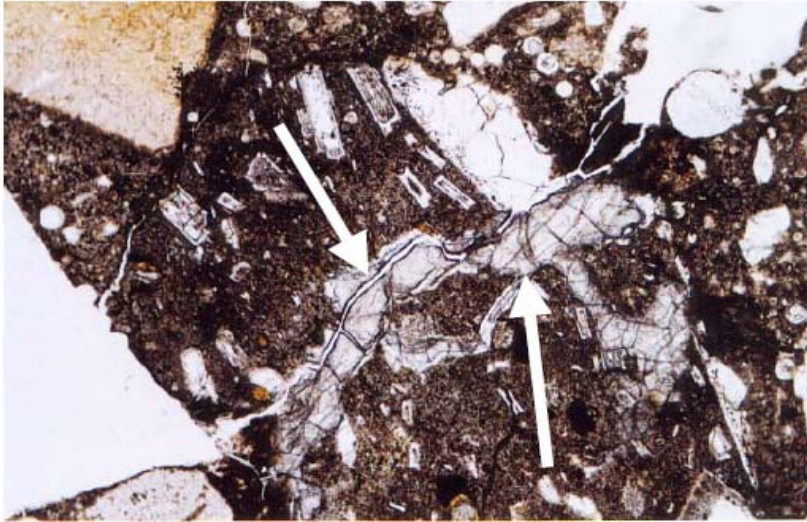
Resim 2.12: Hamur fazından ve reaktif bir ince agrega parçacığından kristallerin çaprazlamasına geçen çatlaklar ²⁹



Resim 2.13: Reaktif agrega (A) ve çimento hamuru (B) arasındaki arayüzdeki enlemesine çatlaklarla jelin varlığı ²⁹



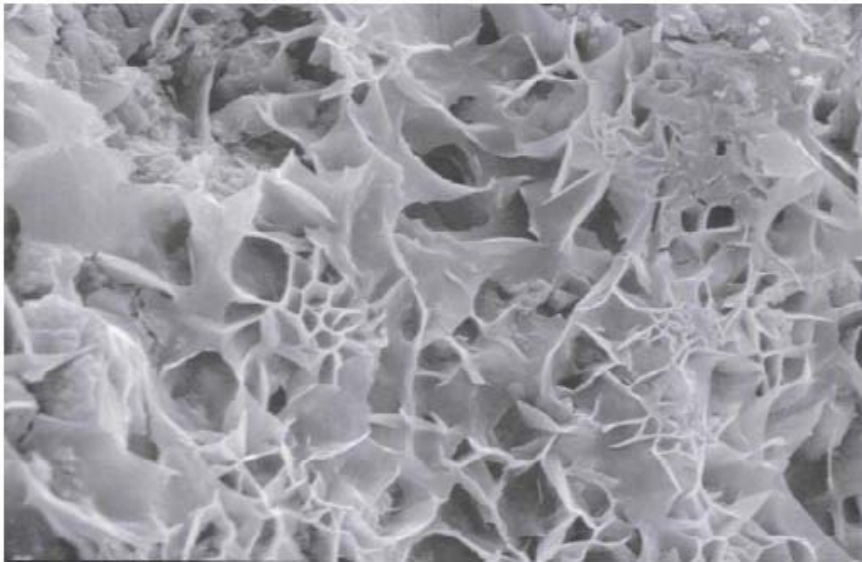
Resim 2.14: Bir hava boşluğunun dış kenarında jel²⁹



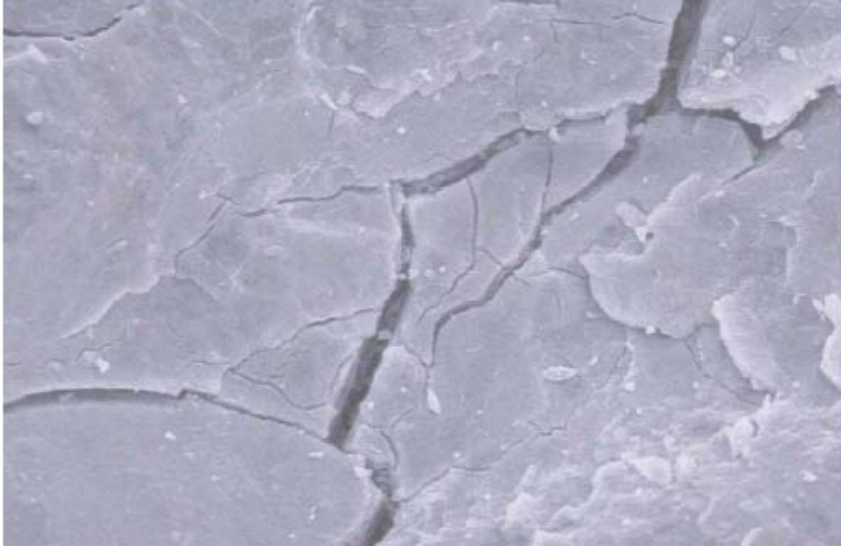
Resim 2.15: Reaktif bir agregada içinde enlemesine çatlaklı ASR jeli²⁹



Resim 2.16: Gül şeklinde rozet gibi kristalli ASR jel ürününün SEM görüntüsü ²⁹



Resim 2.17: Agreganın yüzeyinde kristalli katmanlı jel ²⁹



Resim 2.18: Masif tipte amorf ASR jelinin SEM görüntüsü ²⁹

3. BÖLÜM: ALKALİ-SİLİS REAKTİVİTESİNİN TESPİTİ İÇİN TEST METODLARI

3. ALKALİ-SİLİS REAKTİVİTESİNİN TESPİTİ İÇİN TEST METODLARI

Tüm dünyada agregaların ASR yönünden değerlendirilmesi için tek bir metot bulunmadığından çeşitli ülkelerde uygulanan metotları incelemekte fayda vardır. Öncelikle ASTM (Amerikan Standartları) tarafından kabul görmüş metotlara daha sonra literatüre girmiş bazı diğer metotlara değinilecektir.

Laboratuvar deneylerin bazılarında reaksiyon, anormal yüksek çimento miktarı, alkali ekleme veya yüksek sıcaklıklarda test edilerek hızlandırılmaktadır. Bu sebeple test metotları, iki ana faktör göz önüne alınarak değerlendirilmelidir. Birincisi, bu tür anormal koşullarda bazı silisli bileşenler normal koşullarda olduğundan çok farklı hızlarda reaksiyona girebilirler. İkincisi, reaksiyonun fiziksel etkileri çok farklı olabilir. Bu deneyler ancak, şantiye koşullarıyla veya normal şartlarda kürlenmiş numuneler üzerinde yapılan deneylerle karşılaştırıldığında anlamlı sonuçlar verebilir.

ASR belirlenmesine yönelik olarak çeşitli araştırmacılar tarafından farklı deney yöntemleri önerilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları; ASTM C 1260, ASTM C 1293, ASTM C 227, ASTM 289, AASHTO T 303, CSA A23.2-25A ve CSA A23.2- 14A şeklinde sıralanabilir.

Agregaların Petrografik Analizi

Petrografik inceleme, minerallerin cins ve yüzdelere göre kayacın adlandırılması işlemidir. Agregalardan alınan ince kesitlerin polarizan mikroskop yardımıyla incelenmesi sonucu içeriklerinde bulunan potansiyel reaktif mineral fazların (reaktif silis) teşhisi mümkündür. X ışını yayılımı(XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi yöntemler de reaktif silisin saptanmasında faydalıdır. Agregaların yanı sıra, zarar gören beton ve harç numunelerden alınan ince kesitler üzerindeki çalışmalar sonucu meydana gelen etkinin ASR sebebi ile olup olmadığını tanımlayabilmek mümkündür. Petrografik incelemeyi uygulayan kişinin bu konudaki deneyimi önemli bir faktördür. Grattan-Bellew (1990), belirli bir agrega çimento kombinasyonunun reaktifliği hakkında petrografik analizin tek başına sonuç

veremeyeceğini; ancak deneyimli petrografların agregaların davranışı hakkında bir fikir öne sürebileceklerini belirtmiştir. Agregaların geçmiş performansları ile ilgili veriler bulunduğu takdirde bunların kullanımı veya reddi konusunda deneyimli petrografların karar vermesi mümkün olabilmektedir. ASR üzerinde kimyasal metotlar, beton veya harç numuneleri ile testler uygulanmadan önce petrografik analizin uygulanması hem zaman kazandırmak açısından hem de uygulanacak metodun agrega tipine göre seçimini kolaylaştırmak açısından önerilmektedir.¹

Betonun Petrografik deneyi (ASTM C856, Sertleştirilmiş Betonun petrografik testi için Standart Uygulama) ASR jelin dağılımı ve genişlemeden dolayı oluşan hasarın açıklanması için kullanılır. Bir beton petrografisi değişik mikroskoplar kullanarak sahadan gelen numuneleri test eder. Numunelerin kalitesi ve saha incelemesinden gelen bilgiler petrografik sonuçların yorumlanmasında hayati önem taşır.

Alkali-silis reaksiyonun ürünü olan jelin tanımlanması yıllanmış ve taze jelin fiziksel, mikroskopik optik ayırteci ve görsel özellikleri ile yapılır. Petrograf analizi uzmanı betonun içindeki ASR' nun etkisini belirtmek için jelin değişik taş tiplerinde (kum) etkisini araştırır ve jelin lokasyonuna ve dağılımına da dikkat etmelidir. Petrograf analizi uzmanı ASR jele bazı agregaların az jel üretmesinden dolayı her zaman fazla miktarda rastlamayabilir. Aynı zamanda ASR' nun ötesinde farklı mekanizmalara da bakmalıdır.

Maliyet ve süre, incelenen numune sayısını sınırlayabilir. Bu tür sorunlar beton petrografisi kullanımı gibi gibi alternatif hızlı yöntemlerin geliştirilmesinin temel sebebidir.²⁹

3.1.Agregaların Reaktivitesini Ölçmekte Kullanılan Deney Metotları

3.1.1 Kimyasal Metot (ASTM C 289)

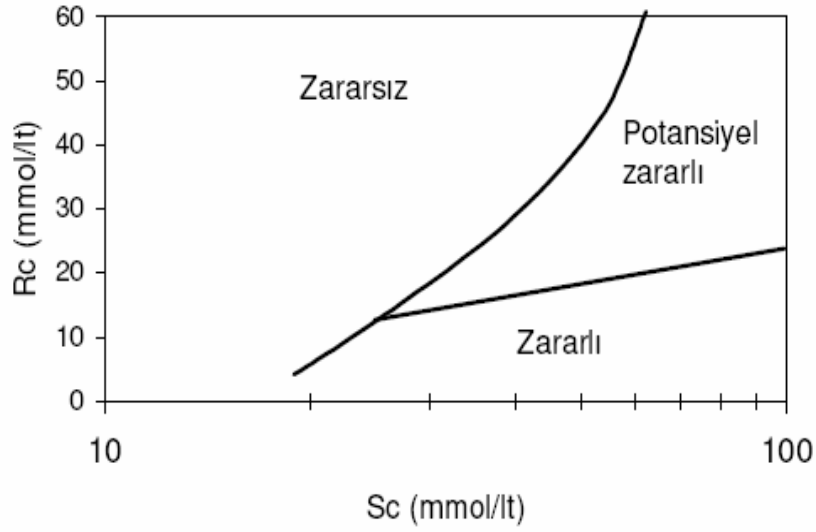
Bu yöntemde, agregayı temsil eden 25g ağırlığında 150-300 mm'ye kırılmış numune, 25 ml 1M sodyum hidroksit çözeltisinde 80° C'de 24 saat boyunca bekletilir. Bu

çözelti daha sonra filtre edilir ve asitte titre yöntemiyle çözülmüş silis ile alkalinitedeki azalma analiz edilir. Deney üç kere tekrar edilir. Sonuçlar daha sonra şekil 3.7'daki eğride işaretlenerek kontrol edilir. Bu eğri, yüksek alkali içerikli harç çubuğu genleşmeleri, agregaların petrografik analizi ve betonda kullanılan agregaların saha performansları dikkate alınarak çizilmiştir. Bu şekilde, Rc alkalinitedeki azalmayı, Sc ise çözülmüş silisi simgelemektedir. Eğer tüm sonuçlar eğrinin sol tarafındaki bölgede ise agrega zararsız olarak adlandırılabilir. Eğer sonuçlardan bir tanesi bile eğrinin sağındaki bölgede yer alırsa agreganın yüksek alkali içerikli betonda kullanımının zararlı genleşmelere yol açabileceği söylenebilir.

Bu deney sonucunda reaktif olduğu saptanan agreganın, şantiye koşullarında veya ASTM C-227 harç çubuğu yöntemi ile aksi bir sonuç alınmadıysa reaktif olduğu söylenebilir.

Deney sonuçları, kalsit, dolomit, magnezit, siderit gibi kalsiyum, magnezyum veya demirli karbonatlar ile antigorit (serpentin) gibi magnezyum silistler içeren agregalar için doğru sonuçlar vermeyebilir.

Bu deney, zorlanmış veya mikro-granüle kuvars içeren veya meta-grovak, metasilttağı, metakuvars ve benzeri kayalardan oluşan 27 yavaş ve geç silis-silist reaktivitesi olan agregaların davranışlarını belirlemede kullanılamaz.³⁸



Şekil 3.7: Alkalinitedeki Azalma-Çözülmüş Silis Grafiği

3.1.2 Harç Çubuğu Metodu (ASTM C227)

Belirli şartlarda kürlenmiş harç numunelerinin belirtilen süre sonucundaki boy değişimlerinin (genleşme yüzdesi) ölçülerek çimento-agrega kombinasyonlarının reaktivitesinin belirlenmesi esasına dayanır. 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.

Deneyde, belirtilen gradasyonda agregalar elenerek agregalar/çimento oranı 2.25 ve akma değeri %105-120 arasında olacak şekilde bir harç karışımı hazırlanarak 25×25×285 mm boyutundaki prizmatik kalıplara dökülür. Genellikle, alkali içeriği kütlece %1.0 ile %1.2 eşdeğer Na_2O 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.

Genleşme limitleri, üç numunenin ortalaması alınarak, 6 ay için %0.10 veya 3 ay için %0.05'tir. 6 aylık sonuçların bulunmaması halinde 3 aylık genleşme limitleri esas alınabilmektedir. 6 aylık genleşme ölçümlerinin sınır değeri aşması halinde, oluşan genleşmenin ASR sebebiyle olduğunun kesin değerlendirilmesinin yapılabilmesi için ek deneyler yapılması önerilmektedir. Grattan-Bellew (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 (1986), 12 aylık genleşme limitini %0.05 gibi çok konservatif bir değerle sınırlandırmaktadır.

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 kütlece %1.25 eşdeğer Na_2O seviyesine çıkarılması, su/çimento oranının kırılmış agrega için 0.50, doğal agrega için 0.44 seviyesinde tutulması önerilmektedir .

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.^{1,37}

3.1.3 Mineral Katkıların Veya Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliklerini Ölçen Standart Deney Metodu (ASTM C441)

Bu metot, mineral katkıların 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.

Öncelikle, 400g yüksek alkalin çimento ile belirli gradasyondaki 900g pireks camı agrega kullanılarak kontrol karışımı hazırlanır. Bu karışımın 14 günlük minimum genişmesi %0.250 olmalıdır. Cüruf dışındaki mineral katkılarda 300g yüksek alkalin çimento ile mutlak hacmi 100g çimentoya eşit miktarda ($100 \times \text{mineral katkıının yoğunluğu} / 3.15$) mineral katkı kullanılır. Kullanılan katkı cüruf ise mutlak hacmi 200g çimentoya eşit miktarda ($100 \times \text{cürufun yoğunluğu} / 3.15$) kullanılır. Belirli durumlar için şantiyede kullanılacak oranlarda çimento-katkı karışımları ile şantiyede kullanılacak alkalinite de çimento kullanılabilir. Numunelerin döküm, kütleme ve ölçüm işlemleri ASTM C227'deki gibidir. Deney süresi sonunda kontrol numunesi ile katkı içeren numuneler arasındaki genişme miktarındaki azalma değeri yüzde cinsinden hesaplanır. ASTM'ye göre, genişme miktarındaki azalma değerinin %75 veya daha fazla olması halinde kullanılan mineral katkı miktarı uygundur. Belirli bir çimento-agrega kombinasyonunun kullanılması halinde ise 14 günlük maksimum genişme değeri %0.02 olarak belirlenmiştir.

Bu metot, pek çok açıdan eleştirilmektedir. Özellikle, pireks camı gibi çok yüksek reaktivitedeki bir malzemenin doğal agrega gibi davranmadığı ve bu sebeple gerçekçi sonuçlar alınamayacağı belirtilmektedir. Ayrıca, pireks camının değişken kompozisyona sahip, ortama alkali veren bir malzeme olması sebebiyle alkali katkısının deney sonuçlarını etkileyebileceği öne sürülmüştür (Struble ve Brockman, 1989). Pireks agregası farklı şekillerde olabileceğinden harcın işlenebilirliği, dolayısıyla porozitesi ve sabit akma değeriyle çalışıldığından su/çimento oranı değişken olmaktadır. Ayrıca, deney 30 sonuçlarının yorumlanmasında 14 günlük değerler kullanılması halinde değişkenliğin fazla olduğu görülmüş ve daha sağlıklı değerlere ulaşılması için deney süresinin 2 ay veya daha uzun bir süreye uzatılmasının uygun olacağı görüşüne varılmıştır.^{1,41}

3.1.4 Beton Prizma Metodu (ASTM C1293)

Bu deneyin amacı, beton prizmaların boy değişimi ile agregaların alkali reaktivitesi hakkında fikir edinmektir. Bu deneyin uygulanmasından önce agregaların petrografisi ile ilgili bilgi edinilmesi önerilir.

Deney uygulanacak agrega ince agrega ise reaktif olmayan kaba agrega ile karıştırılarak kullanılır. Kaba agreganın reaktivitesi ölçülecek ise reaktif olmayan ince agrega ile karıştırılıp belli gradasyona getirilen malzeme 75×75×285 mm kalıplara dökülür. Numunelerin çimento içeriği 420 kg/m³ olup su/çimento oranı 0.42 ile 0.45 arasında işlenebilirliği sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Kullanılan çimentonun eşdeğer Na₂O içeriği, karışım suyuna NaOH eklenerek çimentonun kütlece %1.25'ine yükseltir. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numunelerin ilk boy ölçümleri alındıktan sonra 38°C sıcaklıkta, su üzerinde (nemli ortamda) standartta belirtilen şekilde saklanır ve periyodik olarak ölçümleri alınır. Saklama kabında fitil kullanımı bu yöntemde de mevcuttur. Genleşme limitleri üç numunenin ortalaması alınarak, 1 yıllık periyot sonunda %0.04 olarak belirlenmiştir. Bu metot, genelde diğer test metotlarına ek olarak uygulanmaktadır.

Bu metot, beton üzerinde uygulandığından gerçeğe daha yakın sonuçlar vermekte ve bu sebeple diğer deney metotları yetersiz kaldığında kullanılmaktadır. Ancak, deneyin uzun sürmesi dezavantajdır.

Bu metot, mineral ve kimyasal katkıların ASR genleşmelerine etkisi hakkında en gerçekçi sonuçları vermektedir. Mineral katkıların etkinliği değerlendirilirken, 2 yıllık genleşme değerinin %0.04 olarak alınması ve karışımın alkali içeriğinin çimentonun kütlece %1.25'i değerine artırılması önerilmektedir. Virginia'da halen devam etmekte olan bir çalışmada, özellikle yavaş reaktivite veren agregalarda lityum tuzlarının etkinliğini saptamada hızlandırılmış metotlara kıyasla beton prizma metodunun daha uygun olduğu belirtilmiştir.^{1,41}

3.1.5 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Metodu (ASTM C1260)

Kür şartlarını reaksiyonu hızlandıracak şekilde hazırlayarak, agregaların reaktivitesinin 16 gün içinde tespitine olanak vermektedir.

Bu metodda da uygulamadan önce agregaların petrografik analizinin yapılması ve limitlerin üzerinde genleşme görüldüğü takdirde önceki metotlarda belirtildiği

şekilde reaktivitenin ASR sebebiyle oluşup oluşmadığının incelenmesi önerilmektedir. Standartta belirtilen gradasyondaki agrega, kütlece çimentonun 2.25 katı kadar kullanılarak su/çimento oranı 0.47 olan harç karışımı hazırlanır. 25×25×285 mm boyutlarındaki kalıplara dökülen harç numuneleri 24 saat sonra kalıplardan alınarak ilk boyları ölçülür. Dikkat edilecek noktalardan biri standart kalıp yağları yerine teflon sprej gibi artık bırakmayan tipte kayganlaştırıcı materyal kullanılması gerekliliğidir.

Kalıp sökümünden itibaren 1 gün süreyle 80°C suda bekletilerek boy ölçümleri alınan numuneler, takip eden 14 gün boyunca 80°C 1 N NaOH çözeltisinde bekletilir ve periyodik ölçümleri alınır. Toplam 16 gün süren deney sonucunda, genleşme yüzdeleri aşağıdaki şekilde değerlendirilir:

- 16 gün sonundaki genleşmeler, %0.10 değerinin altındaysa 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 koşullarında hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilirler. Bu sebeple, agregalar hakkında karara varmadan önce ek deneyler yardımıyla genleşmelerin sebebinin araştırılması ve ölçümlerin 28 güne kadar uzatılması önerilmektedir.

Bu deney yönteminin kür koşulları oldukça ağır olduğundan tatmin edici şantiye performansı gösteren bazı agregaların da reaktif olarak tanımlanabilmesi gibi bir probleme yol açabilmektedir. Bu sebeple agregaların reddine karar verirken bu olasılığın göz önünde tutulmasında fayda vardır. Yine de, deneyin süresinin oldukça kısa olması ve pratikliği sebebiyle araştırmalarda kullanılması tercih sebebi olmaktadır.⁴⁰

3.1.6 Jel Pat Metodu

Jel pat metodunda agrega örneği koyu kıvamda çimento hamurunun içine gömülür ve yüzeyi bilenerек agrega parçalarının açığa çıkması sağlanır. Alkalın 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 içerisinde jel oluşumu gözlenebilir.

Bu metot, petrografik mikroskop altında incelenemeyecek kadar ince dağılımlı reaktif silisin ortaya çıkarılmasına imkan vermektedir. Bu deney sonucunda reaktif olabileceği izlenimi veren agrega hakkında yeterli saha performansı olmadığı takdirde beton veya harç prizma metotlarından birinin uygulanması önerilmektedir. Bu deneyin, polimitik agrega tipinde reaksiyonu gözlemlemeye imkan tanımadığı belirtilmektedir.¹

3.1.7 Alman Çözünme Metodu

Bu metot, opal ve flint içeren yıkanmış agregaların potansiyel alkali reaktivitesini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Seçilen tanecik boyutundaki agregalar (1-2 veya 2-4 mm) 90°C'de 4 M NaOH çözeltisinde 1 saat boyunca bekletilir, birkaç kez saf suyla yıkanarak kurutulup tartılan agregalardaki kütlece kayıp, "alkalide çözünebilir" olarak adlandırılmaktadır.

Bu metot, agreganın alkalın ortamdaki kimyasal kararsızlığını ortaya koymakta ve çeşitli çimento kombinasyonlarıyla birlikte davranışını, genleşme yaratıp yaratmayacağını belirleyememektedir. Ayrıca, 1mm boyutunun altındaki agreganın potansiyel reaktiviteye katkısını göz önüne almamaktadır.¹

3.1.8 Ozmotik Hücre Metodu

Stark (1983)'a göre, ozmotik hücre, agrega parçacığı ile çimento arayüzeyinin modellemesidir. 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 µm boyutlarında 12.40 g ağırlığında agrega parçacıkları bulunmaktadır. ASR reaksiyonu 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 olanak 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 ise 2-3 günde sonuç vermektedir. Bu metot, reaktivitenin hızlı değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Genleşme deneyleri ile birlikte kullanımı faydalıdır.¹

3.1.9 Cornell Üniversitesi Leke Metodu ve Jel Floresan Testi

Cornell Metodu, alkali-silis jelin beton içinde belirlenmesi ve dağılımının bulunması için hızlı prosedür olarak geliştirilmiştir. Cornell metodu ASTM C 856’ de standart olarak girmiştir. Stratejik Karayolları Araştırma Programı, çatlayan betonun belirlenmesi için saha prosedürü olarak kullanılmaktadır. Metod için Uranil Asetat çözeltisi bozulmuş veya kötüleştirmiş beton yüzeylere su ile uygulanır. Birkaç dakika sonra solüsyon yüzeye nüfuz eder ve UV ışık altında izlenebilir. Jel floresanlı bölgeler parlak sarı-yeşildir. Bu durum iyi tanımlanmalıdır, aksi halde betonda ASR ile ilgili olmayan farklı materyaller deneyimli olmayan kullanıcıları yanlış yönlendirebilir. Olabilecek bu tür ilgisiz materyaller Uranil asetat uygulanmadan önce UV ışık ile kontrol edilerek fark bulunabilir. Karbonatlı alanlar bazen zayıf sarı-yeşil floresan olarak görünebilir.

Opal ve bazı diğer agregaları içeren oluşumlar ASR jel gibi görünebilir. Pratik yapılarak floresanın yoğunluğu ve spesifik agregalar ve jel dağılımının bağlantısı değerlendirilebilir. Deneyim ve tecrübe olmadan ASR’ nun yanlış belirlenmesi söz konusu olabilir. ASTM C 856’ e göre bu test diğer testlerin ve petrografik deneylerin daha iyi sonuç vermesine yardımcı olur.

Uranil asetatın toksiklik ve radyoaktifliği bu metodun dezavantajlarıdır. Solüsyonun uygun olarak hazırlanması, kullanımı ve atılması sağlanmalıdır. UV ışık kaynağının kullanımına da olabilecek göz hasarlarının olmaması için dikkat edilmesi gerekir. Gün ışığı floresan ışığını etkilediği için kapalı bir ışık kutusu kullanmak gereklidir. Bu metodun kullanılması için laboratuvar ortamı çok uygundur. Prosedürü uygulayan kullanıcılar Uranil asetatı toz olarak satın almalı ve UV ışık kaynağı ya da benzer yaklaşık bir dalgada boyu ışık elde etmeleri gerekir.²⁹

3.1.10 Los Alamos Milli Laboratuvarı Leke Metodu

Jelin laboratuvar ya da sahada tespitinde kullanılan Los Alamos Laboratuvarı tarafından geliştirilen Los Alamos Metodunda kullanılan kimyasal maddeler kullanıcı ve çevre için zararlı değildir. Modifiye edilmiş leke metodu agregalar içindeki potasyum feldsparın sodyum kobalt nitrit kullanılarak tespit edilmesine dayanmaktadır. Bu metotla kimyasal ayıraç / belirteç taze betonun yüzeyine uygulanır ve potasyum içeren jelin sarı potasyum feldspar lekesi görülebilir. Bu test çok yeni olduğundan ASTM standartlarında değildir bu yüzden sınırları ve diğer etkileri hakkında yeterince bilgi yoktur. Bu metodun ASR etkilerinin derecesini doğru belirtebilmesi, hatalı sonuçların en aza indirilebilmesi ve kullanılabilirliğini arttırmak için daha fazla araştırma yapmak gereklidir.²⁹

3.1.11 Boyama Metotları

Sık sık ASR'nun betona zarar vermeden de jel üretebileceğinin farkına varılmaz. Diğer yıkıcı olaylarda da ASR jel bulunabilir. Bazen kullanıcılar leke metoduyla sülfat atağını ve diğer zararlı mekanizmaları gözden kaçırabilirler.

ASR jel bulunduğu yerden yüzeye hareket ettiği için yapıdaki ASR' nun seviyesini yüzey leke testi sonucu abartabilir. ASR jel leke olarak hiç belli değil ise ve leke prosedürü tam olarak yapılmış ise, ASR test alanında bulunmuyordur. ASR jel belirlenmesi için leke metodu, petrografi ve diğer testler uygulanmalıdır.

Kullanıcılar leke testini tüm test programının bir parçası olarak yapmalıdırlar.

- Seçilen alanlardaki jeli görmek için,
- Varsa jelin dağılımını bulmak için,
- Petrografik yada diğer deneylerin gerekli olup olmadığına karar vermek için yapılmalıdır.

ASR' nun durumunun tespiti için hızlı metodlar, sınırları anlaşıldığı sürece sahada ve laboratuarda kullanılmaları uygundur. Her ikisi de eğitim, ekipman ve malzeme yatırımı gerektirir. Hem sahada hem laboratuarda yapılan testler ile gerçek sebepler tespit edilebilir, rehabilite ve onarım için gerekenler önerilebilir.²⁹

3.1.12 Kireçli Harçlardaki Alkali-Silis Tepkimelerine Bağlı Gerilimi Ölçme Metodu

Bugün, kireçli harçlar ve betonlardaki ASR teşhisi için kullanılan metodların çoğu numunedeki genişlemenin ölçülmesine dayanır. Uzunluk değişimi yerine geriliminin ölçülmesinin temel avantajı, sonuçların ASR genişlemesine direnen bir beton tasarımı için kullanılabilme olasılığıdır. Karma tasarım ve test etme koşulu testlere göre değişir. Şu anda kullanılan üç ASTM testi vardır. ASTM C1260, ASTM C227 ve ASTM C441. Literatürde anlatılan diğer testler, genellikle bu testlerin modifikasyonlarıdır. ASR sonucu üretilen gerilimi ölçmek için geliştirilen testin verileri sınırlıdır. Yeni bir metoda da yüksek performanslı betonu, düşük geçirgenlik, düşük su/çimento oranı ve yüksek çimento içeriği ile modelleyen karma bir tasarım kullanılmıştır.

Gerilim Ölçümleri

Kireçli harçlarda ASR sonucu üretilen gerilimi ölçmek için yeni ve farklı bir test tasarlanmıştır. Numune bir kireçli harç veya beton silindir, paslanmaz çelik çerçeve içine yerleştirilir ve bir yükleme hücresine bağlanır. Bir bilgisayara bağlı yükleme hücresi, düzenli aralıklarla, ASR jel oluşumu ve numune genişlemesi sonucu üretilen

kuvveti gözler. Yükleme hücresi tepkisinin (voltage) tek, numune tarafından üretilen kuvvet ile ilgili olduğunu garantilemek için , hücre ölü bir ağırlık set-up kullanılarak, deney sırasında kullanıldığı aynı konfigürasyona kalibre edilir.

Numuneyi tutan çerçeve , ASTM C 1260' da kullanılan test çözeltisi olan 1N NaOH sulu çözeltisi içeren bir kaba daldırılır. Bu kap daha sonra 50 °C kontrollü sıcaklığı olan bir su banyosuna yerleştirilir. Numune silindiri ve çerçevenin çelik bacakları arasındaki diferansiyel termal genişlemenin etkisinin önemsiz olduğu bulunmuştur. Deney sabit sıcaklıkta yürütüldüğünden , başlangıç termal genişleme kolaylıkla göz önüne alınabilmiştir.

Gerilim gevşemesinin rolü netleştirildikten sonra, ASR ile kullanılan önemli kuvvetler yeni cihaz kullanılarak ölçülebilir. Artık karışım tasarımı ve gerçek yapılarda ASR'den dolayı zoraki genişlemenin hesaplanması için data sağlamak amacıyla değişik malzemeler ve karışım özellikleri için kuvvetleri etkileyen faktörleri çalışmak mümkün olacaktır.²⁹

3.1.13 Otoklav Metotları

Bazı araştırmacılar, harç veya beton numuneleri yüksek sıcaklık ve basınç altında alkali çözeltisinde veya suda kaynatarak veya buhar küreğine tabi tutarak agregaların reaktivitesini ölçmek için metotlar öne sürmüşlerdir. Bu konuda standart bir deney yöntemi numune boyutlarından kullanılan malzeme miktarına ve kür koşullarına kadar pek çok faktör değişiklik göstermektedir. Esasen, tüm bu yöntemlerin amacı, boy değişimi ve/veya çatlakların incelenmesi ile agregaların reaktivitelerinin belirlenmesidir. Bu metotlar, belli sayıda ve cinsten agregalarla uygulandığında güvenilir sonuçlar vermiştir. Bu yöntemler aynı zamanda mineral katkıların etkisini araştırmada da kullanılmaktadır.

Bu yöntemler dışında araştırmalara konu olan pek çok farklı deney metodu bulunmaktadır. Kimyasal büzülme metodu, Duggan genişleme 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.

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 uğrağlardan 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 verdiği için 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.¹

4.BÖLÜM: DENEYSEL ÇALIŞMA

4- DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1.Giriş

Melen Çayı agregalarında bulunan silisin ASR yönünden zararlı etkisi olup olmadığını ortaya koymak amacıyla, ASTM C-1260(22) ve CSA A23.2-94(23)'deki yöntemlere göre hızlandırılmış harç çubuğu deney metodu uygulanmıştır. Deneyde agregalarının çimento hamuruyla oluşturduğu reaksiyon sonucu, genişlemesine bağlı olarak boy uzamaları belirlenmiştir. Bu çalışmada Düzce Melen Çayının bazı lokasyonlarından alınan agregalarla, puzolanik çimento , portland çimentosu ve çeşitli oranlarda kuvars katkısı kullanılmıştır. Bu bileşenlerle hazırlanan harç çubukları üzerinde alkali silis reaktivitesi tespiti için genişleme tayini, fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır.

4.2. Deneyde Kullanılan Agregaların Özellikleri

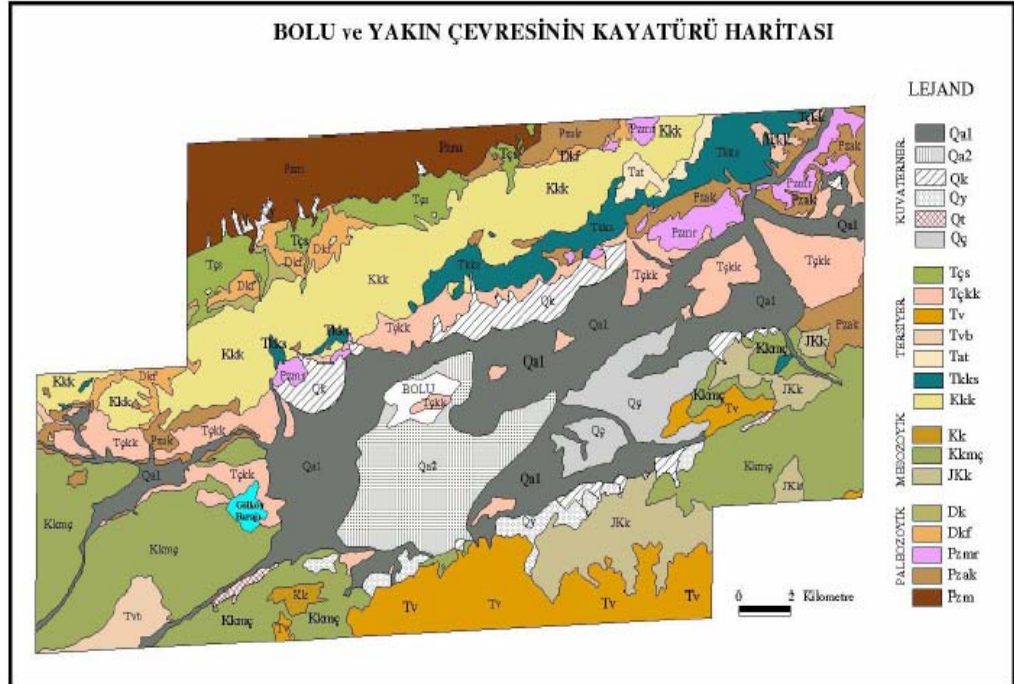
4.2.1 Deneyde Kullanılan Agregaların Alındığı Bölgenin Jeoloji Araştırması

Düzce ve Kaynaşlı'nın jeolojisi

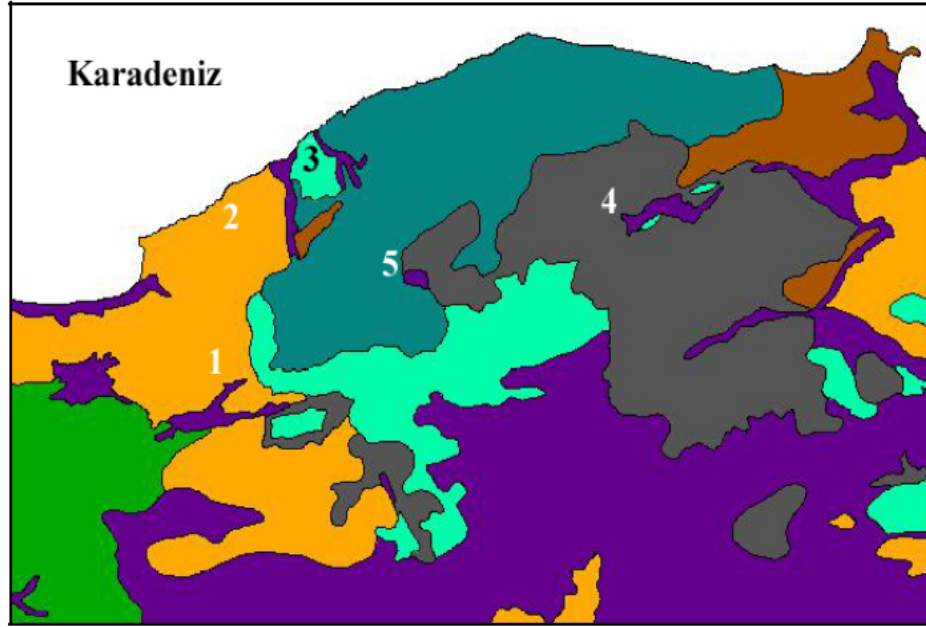
Düzce ve yakın civarını içine alan ve jeoloji haritasında verilen bölgenin önemli bir bölümünü Düzce ovası ve bu ovayı kaplayan nehir alüvyonları ile ova göl çökelleri oluşturmaktadır. Düzce Bölgesi'nin orta kesiminde genç çökeller yer alırken, kenarlardaki yükseltilerde daha yaşlı kayaç birimler mostra vermektedir. Kayaç birimler yaşlıdan gence doğru; güneyde Paleozoyik yaşlı Dingini Granotoidleri ile şeyl, kumtaşı ve silt taşıyla temsil edilen Ereğli Formasyonu ovanın temelini oluşturmaktadır . Kuvaterner çökelleri , Büyükmelen, Küçükmelen ve Uğursuyu gibi ovanın önemli akarsularının yatakları boyunca gözlenen alüvyonlar ve geniş yayılıma sahip ova göl çökelleriyle temsil edilmektedir. Alüvyonlar ince çakıl, kum, silt ve ince kil araldanmalı malzemedен oluşurken, ova göl çökelleri ise, iki gruba ayrılmaktadır. Düzce'nin de üzerinde kurulu olduğu birinci grup ova göl çökelleri, killi-siltli kum ve çakıl düzeylerinden oluşmaktadır.

Bu çökellerde yanal geçişler nedeniyle kalınlığı 5 m'ye ulaşan killi seviyeler de bulunmaktadır. Diğer gruptaki ova göl çökelleri ise, ovanın merkezi kısmında yer almakta ve yumuşak-orta kıvamlı kil, siltli kil ve killi silt düzeylerini içermektedir.

Düzce civarındaki en yaşlı birim Düzce ovasının güney batısında Efteni Gölü ile Çapayakbey köyü arasında yüzeylenen Prekambriyen yaşlı metagranotoyitlerdir. Düzce Fayı, bu birimler ile Kuvaterner çökelleri arasındaki sınırı oluşturur.



Şekil 4.8: Bolu ve Yakın Çevresinin Kayatürü Haritası ⁴⁶



	Birleşmiş-parçalanır-çökelmiş kayalar
	Birleşmiş-parçalanır-çökelmiş kayalar/volkanik kayalar/metamorfik kayalar
	Metamorfik kayalar
	Birleşmiş-parçalanır-çökelmiş kayalar/çökelmiş kayalar
	Birleşmiş-parçalanır-çökelmiş kayalar/birleşmemiş tortular
	Çökelmiş kayalar
	Birleşmemiş tortular

Şekil 4.9: Batı Karadeniz Bölgesi Jeoloji Ana Materyal Haritası. 1.Bolu, 2.Zonguldak, 3. Bartın, 4. Kastamonu, 5. Karabük ⁴⁶

4.2.2 Deneyde Kullanılan Agregaların Petrografik ve Mineralojik İncelemesi

Deneyde kullanılan agregaların petrografik analizleri, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Malzeme Laboratuvarında ve Tubitak M.A.M Malzeme Laboratuvarında yapılmıştır.

İnce Kesit Deskripsiyonu Sonuçları:

Agrega numunesinde Plajiyoklas, Kuvars, Amfibol , Klorit-Montmorillonit ,Ortoklas ve Biotit mineralleri mevcuttur. Kataklastik deformasyon geçirmiştir. Magmatik kökenli granodiyorit bileşimlidir. Kısmen gnays dokusu mevcuttur. Metagranodiyorit ve granitik gnays olarak adlandırılabilir.

XRD Analizi Sonuçları:

Kuvars > Plajiyoklas > Amfibol > Klorit-Montmorillonit> Ortoklas > Biotit
(Klorit-Montmorillonit, ikisi çok yakın miktarda veya aynı miktarda)

Tablo 4.6: X-Işını Floresan Spektrometre cihazı ile yapılan yarı kantitatif element analiz sonuçları (Tubitak M.A.M, 15.08.2006)

% ELEMENT	% OKSİT
Al: 10.679	Al₂O₃: 20.178
Ba: 0.031	BaO: 0.034
Ca: 2.611	CaO: 3.653
Cl: 0.009	Cl: 0.009
Cr: 0.007	Cr₂O₃: 0.010
Cu: 0.012	CuO: 0.015
Fe: 2.116	Fe₂O₃: 3.025
Ga: 0.001	Ga₂O₃: 0.001
K: 2.112	K₂O: 2.545
Mg: 1.962	MgO: 3.253
Mn: 0.056	MnO₂: 0.088
Na: 2.223	Na₂O: 2.996
Ni: 0.004	NiO: 0.005
O: 48.077	-
P: 0.087	P₂O₅: 0.200
Rb: 0.003	Rb: 0.003
S: 0.019	SO₃: 0.047
Si: 29.613	SiO₂: 63.352
Sr: 0.012	SrO: 0.015
Ti: 0.266	TiO₂: 0.443
Y: 0.001	Y₂O₃: 0.001
Zn: 0.093	ZnO: 0.116
Zr: 0.008	ZrO₂: 0.011

Kullanılan Cihaz: Philips PW-2404 Model Dalgaboyu Dağılımlı X-Işını Floresan Spektrometresi

4.3 Deneyde Kullanılan Çimentoların Özellikleri

Cinsi: Puzolanik Çimento CEM IV/ B (P) 32,5 R

Standardı: TS EN 197-1

Puzolanik Çimento (PZC/B-32,5 R) (CEM IV/B 32,5 R):

Katkılı çimentoların kullanıldığı genel amaçlı inşaatlarda kullanılan puzolanik çimentodur. Kütlece 36-55 kısım puzolanik maddenin ve karşılıklı olarak 64-45 kısım portland çimento klinkerinin (TS 3441) bir miktar alçı taşı ile ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) birlikte öğütülmesi sonucu, TS 12144 standardına uygun olarak üretilmiştir.

Tablo 4.7 : Puzolanik Çimentonun Kimyasal Özellikleri ⁵²

Toplam SiO ₂	32,47
Al ₂ O ₃	9,06
Fe ₂ O ₃	4,13
CaO	46,39
MgO	1,24
SO ₃	2,18
Na ₂ O	0,71
K ₂ O	0,98
Cl	0,0071
Katkı Miktarı	39,34
Kızdırma Kaybı	2,67
S.CaO	0,19

Tablo 4.8 : Puzolanik Çimentonun Fiziksel Özellikleri ⁵²

Özgül Ağırlık		g/cm ³	2,92
Priz Süresi	Başlangıç	Saat	03:25
	Sonu	Saat	04:10
İncelik	Özgül Yüzey		cm ² /g
	Elek	90μ	%
	Üstü	45μ	%
			4796
			0,13
			3,51

Mekanik Testler	Prizma = 40 x 40 x 160 mm	
	Karışım = 1/3 ; Su/Çimento = 0,5	
	Basınç Dayanımı; Eğilme aletinde kırılan prizmaların iki parçası üzerinden yapılmıştır.	
	GÜN	Basınç Dayanımı N/mm ²
	2	14,1
	28	42,2

Tablo 4.9: Portland Çimentosunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri⁵³**Portland Çimentosu PC-42.5 CEM I 42,5 R**

No:TS-19

KİMYASAL ÖZELLİKLER		Elde Edilen Değerler	PORTLAND ÇİMENTO	
			En Az (Min)	En Çok (Max)
Kızdırma Kaybı	%	3,06	-	4,0
Çözünmeyen Kalıntı	%	0,25	-	1,5
Magnezyum Oksit (MgO)	%	2,00	-	5,0
Kükürt Trioksit (SO₃)	%	3,13	-	3,5
Klorür (Cl)	%	0,01	-	0,1
FİZİKSEL ÖZELLİKLER				
2 Günlük Basınç Dayanımı	N/mm ²	29,5	20,0	-
7 Günlük Basınç Dayanımı	N/mm ²	44,0	31,5	-
28 Günlük Basınç Dayanımı	N/mm ²	54,4	42,5	-
Piriz Başlangıcı	hh:mm	3:30	01:00	-
Piriz Sonu	hh:mm	4:30	-	10:00
Hacim Genleşmesi	mm	1	-	10
Özgül Yüzey	cm ² /gr	3681	2800	-

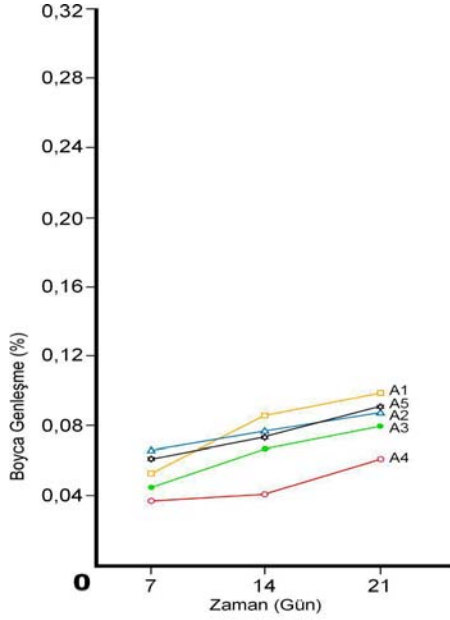
4.4. Alkali-Silis Reaksiyonunun Tespiti

Hızlandırılmış Harç Çubuğu Yöntemi ile 20 örnek üzerinde tespit edilen ASR sonuçları Tablo 4.10' da verilmiştir.

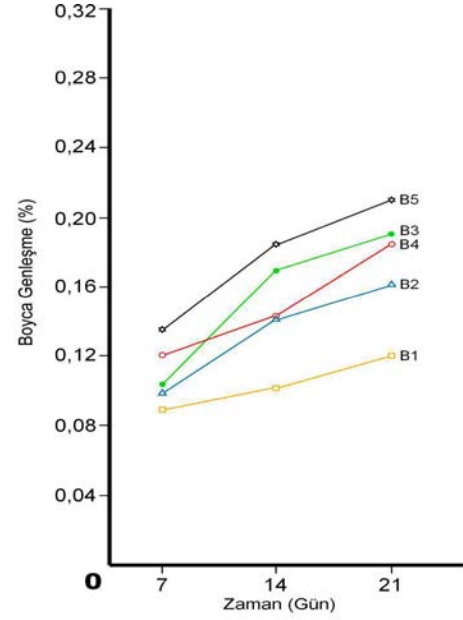
Agregaların Genleşme Oranları

Tablo 4.10 : Harç Çubuklarının Genleşme Oranları

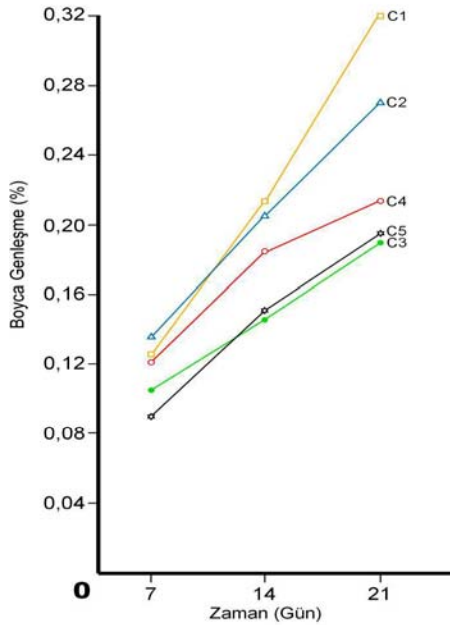
Numune	Numune Kodu	7 Günlük Genleşme E ₇ (%)	14 Günlük Genleşme E ₁₄ (%)	21 Günlük Genleşme E ₂₁ (%)
Puzolonik Çimentolu Numuneler	A ₁	0,053	0,087	0,099
	A ₂	0,067	0,078	0,089
	A ₃	0,045	0,068	0,080
	A ₄	0,038	0,041	0,062
	A ₅	0,062	0,075	0,092
Portland Çimentolu Numuneler	B ₁	0,089	0,102	0,120
	B ₂	0,098	0,141	0,162
	B ₃	0,103	0,169	0,192
	B ₄	0,121	0,142	0,185
	B ₅	0,135	0,185	0,210
%10 SiO ₂ katkı ve portland çimentolu numuneler	C ₁	0,126	0,213	0,321
	C ₂	0,135	0,205	0,270
	C ₃	0,105	0,145	0,190
	C ₄	0,121	0,185	0,213
	C ₅	0,090	0,151	0,195
%50 SiO ₂ katkı ve portland çimentolu numuneler	D ₁	0,085	0,150	0,198
	D ₂	0,151	0,213	0,224
	D ₃	0,175	0,205	0,231
	D ₄	0,180	0,223	0,228
	D ₅	0,110	0,140	0,208



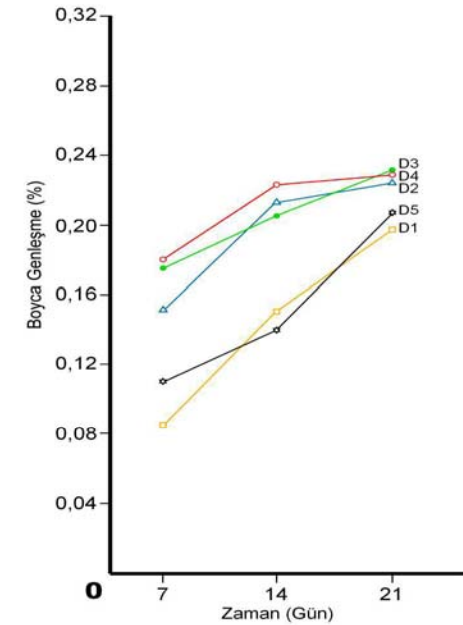
Puzolanik çimentolu numunelerin zamana bağlı boyca genleşme (%) grafiği



Portland çimentolu numunelerin zamana bağlı boyca genleşme (%) grafiği

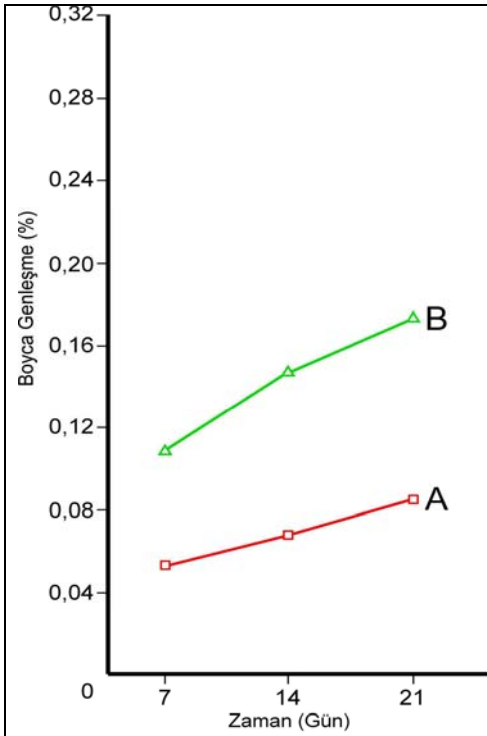


%10 SiO₂ ve Portland çimentolu numunelerin zamana bağlı boyca genleşme (%) grafiği

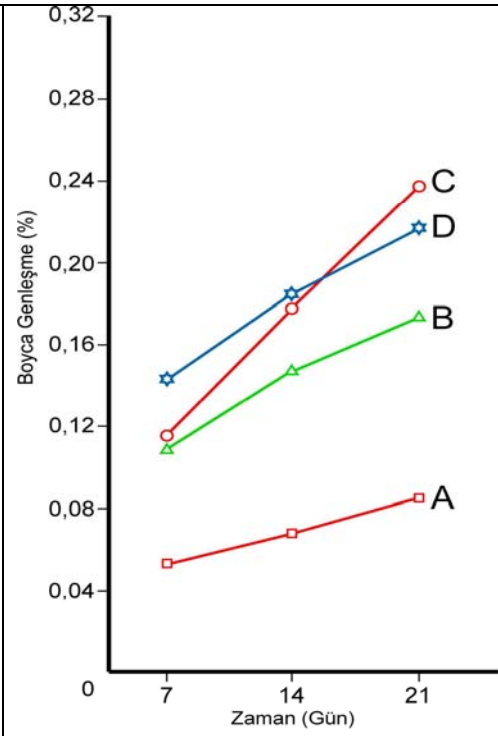


%50 SiO₂ ve Portland çimentolu numunelerin zamana bağlı boyca genleşme (%) grafiği

Şekil 4.10: Denei Numunelerinin Zamana Bağlı Boyca Genleşmeleri



Puzolanik ve Portland çimentolu numunelerin zamana bağlı 'boyca genişleme (%)' ortalamaları grafiği



Tüm numunelerin zamana bağlı 'boyca genişleme (%)' ortalamaları grafiği

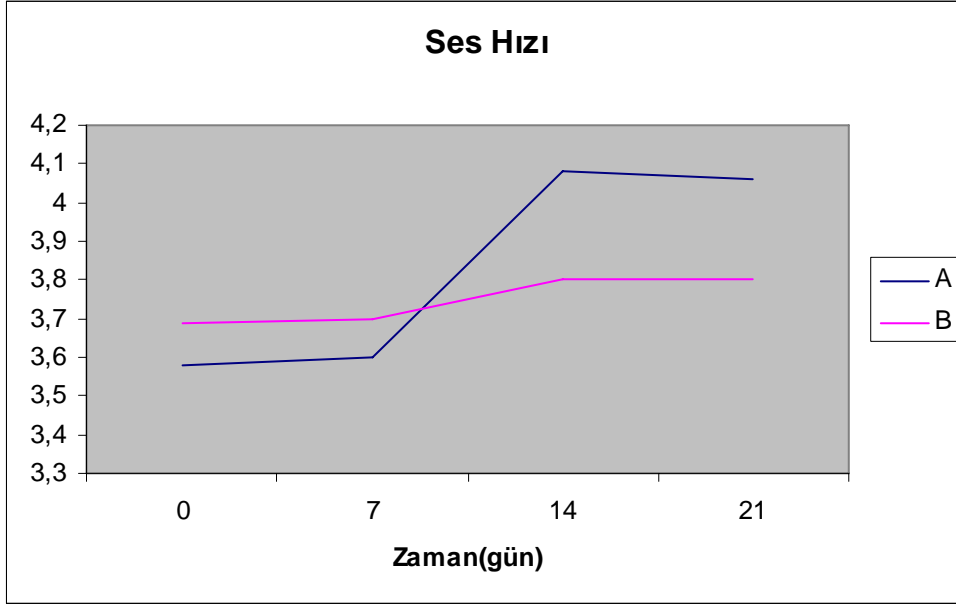
Şekil 4.11: Pozzolanik ve Portland Çimentolu Numunelerin Zamana Bağlı Boyca Genişmeleri (A: Pozzolanik çimentolu numunelerin ortalama genişleme değerleri, B: Portland çimentolu numunelerin ortalama genişleme değerleri)

Şekil 4.12: Tüm Deney Numunelerinin Zamana Bağlı Boyca Genişmeleri (A: Pozzolanik çimentolu numunelerin ortalama genişleme değerleri, B: Portland çimentolu numunelerin ortalama genişleme değerleri, C: %10 Silis katkıli numunelerin ortalama genişleme değerleri, D: %50 Silis katkıli numunelerin ortalama genişleme değerleri)

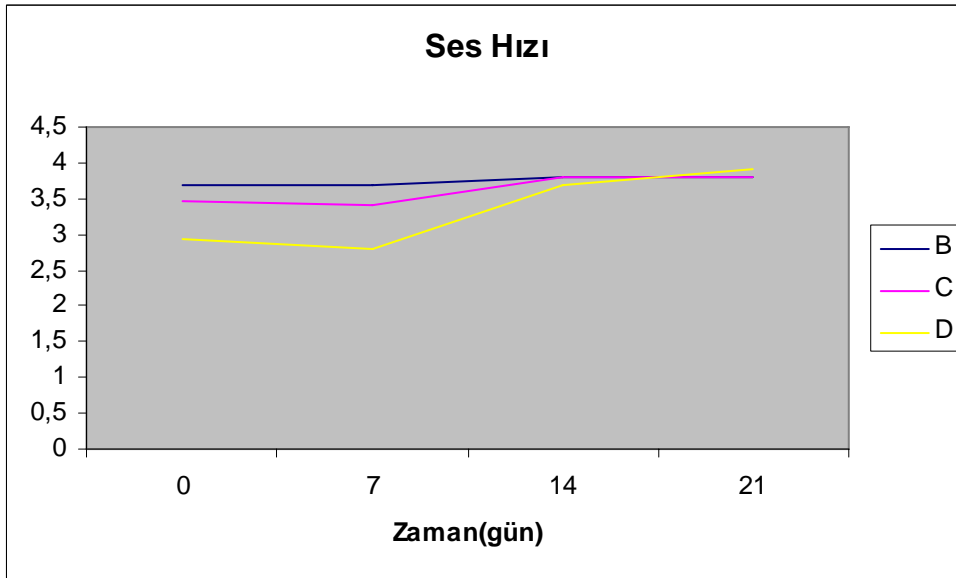
4.5. Ses Hızı Tayini

Tablo 4.11: Ses Hızı ve Dinamik Elastisite Modülü

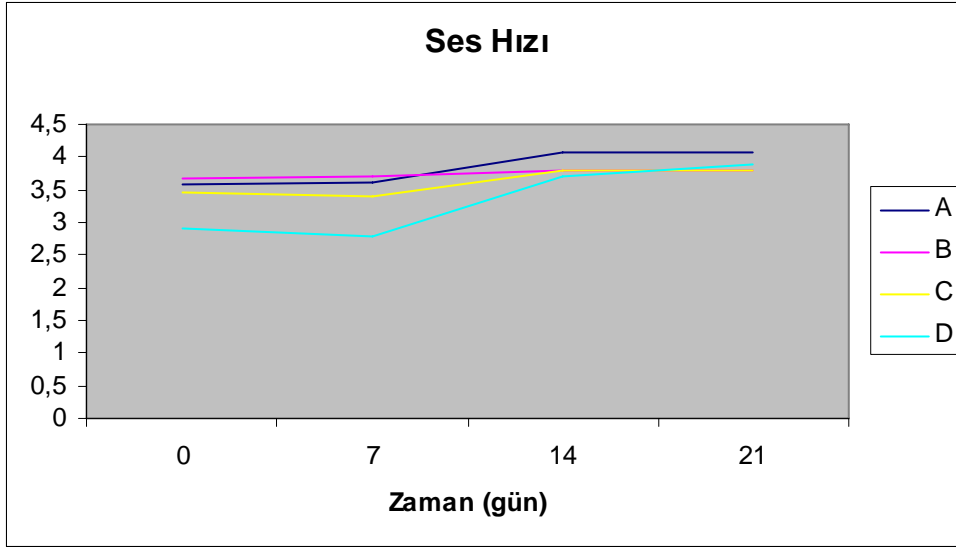
Numune	Birim Ağırlık (g/cm ³)	Ses Hızı (km/s)				Dinamik Elastisite Modülü (N/mm ²)			
		0 Gün	7 Gün	14 Gün	21 Gün	0 Gün	7 Gün	14 Gün	21 Gün
A1	2,055	3,8	3,96	3,95	3,95	30248,9	32849,8	32684,1	32684,1
A2	2,131	3,9	4,01	4,03	4,01	33040,2	34930,3	35279,6	34930,3
A3	2,042	3,9	4,02	4,02	4,01	31660,3	33638,6	33638,6	33471,5
A4	2,158	3,16	4,24	4,22	4,2	21966,2	39547,0	39174,8	38804,4
A5	2,023	3,13	4,2	4,2	4,14	20202,9	36376,8	36376,8	35344,9
B1	2,145	3,64	4,04	3,93	3,69	28970,8	35687,9	33770,9	29772,2
B2	2,16	3,63	4	3,89	3,94	29013,3	35229,3	33318,3	34180,4
B3	2,136	3,76	4,05	3,94	3,81	30782,7	35714,3	33800,6	31606,9
B4	2,132	3,69	3,8	3,74	3,73	29591,7	31382,3	30399,1	30236,8
B5	2,14	3,72	3,86	3,84	3,76	30187,7	32502,6	32166,7	30840,4
C1	2,168	3,43	3,95	3,87	3,94	26000,3	34481,3	33098,7	34306,9
C2	2,111	3,47	4,07	3,92	3,89	25910,6	35645,7	33066,7	32562,5
C3	2,12	3,6	3,79	3,64	3,59	28007,3	31041,6	28633,1	27851,9
C4	2,134	3,33	3,8	3,69	3,63	24122,0	31411,7	29619,5	28664,1
C5	2,14	3,5	3,83	3,75	3,87	26722,7	31999,4	30676,6	32671,3
D1	2,077	2,89	3,95	4,05	4,11	17683,2	33034,0	34727,8	35764,4
D2	2,086	2,87	3,98	4,11	4,04	17514,9	33683,0	35919,3	34706,2
D3	2,041	2,98	3,74	3,89	3,84	18475,9	29101,6	31482,7	30678,6
D4	2,076	2,86	3,5	3,55	3,5	17309,7	25923,5	26669,5	25923,5
D5	2,077	3,01	3,89	3,89	3,82	19182,2	32038,0	32038,0	30895,4



Şekil 4.14: Pozolanik Çimentolu ve Portland Çimentolu Numunelerin Zamana Bağlı Ses Hızı Grafikleri (A: Pozolanik Çimentolu numunelerin ses hızı değerleri, B: Portland Çimentolu numunelerin ses hızı değerleri)

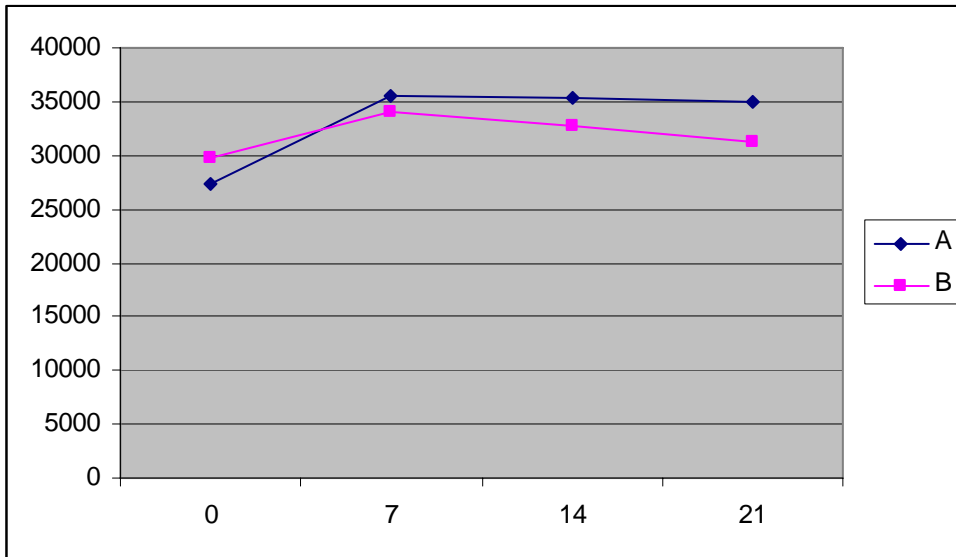


Şekil 4.15: Portland Çimentolu, %10 Silis Katkılı ve %50 Silis Katkılı Numunelerin Zamana Bağlı Ses Hızı Grafikleri (B: Portland Çimentolu numunelerin ses hızı değerleri, C: %10 Silis katkıli numunelerin ses hızı değerleri, D: %50 Silis katkıli numunelerin ses hızı değerleri)

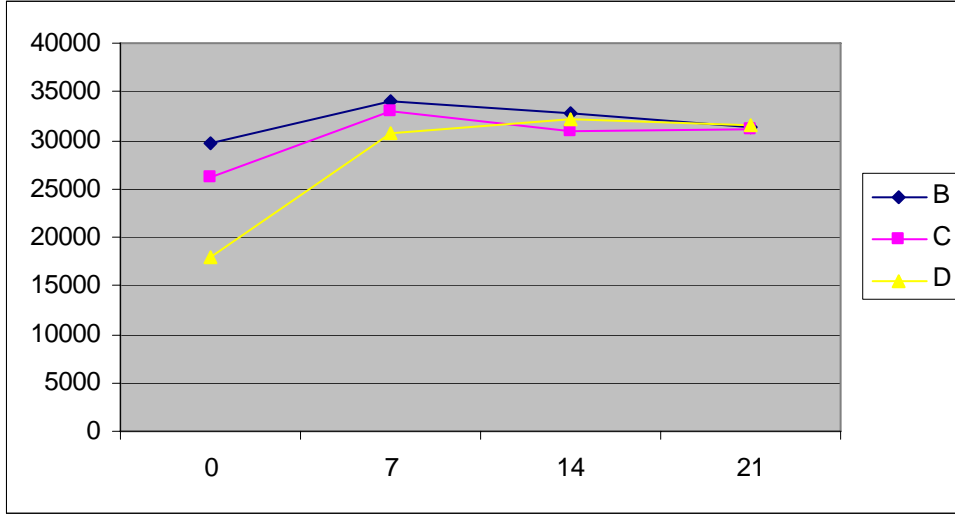


Şekil 4.16: Tüm Deney Numunelerinin Zamana Bağlı Ses Hızı Grafikleri

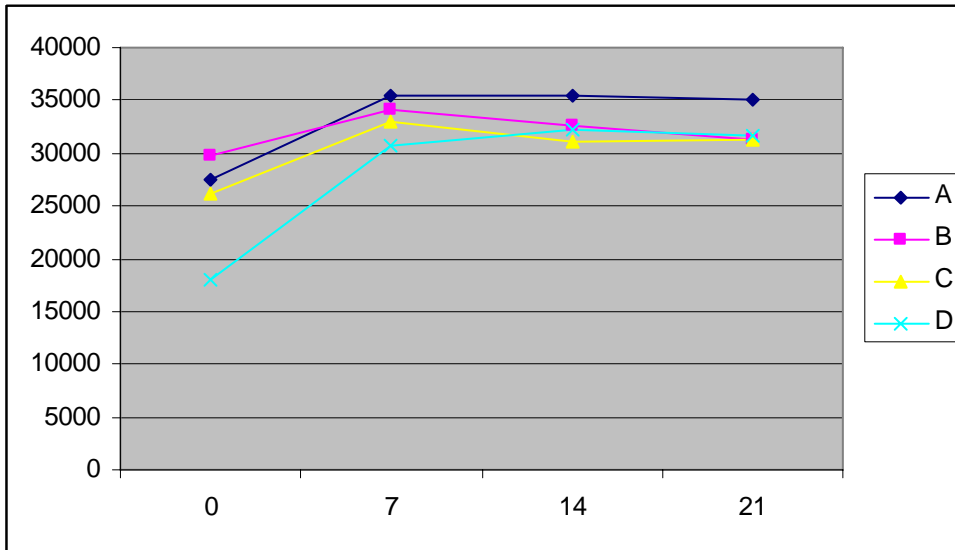
(A: Puzolanik Çimentolu numunelerin ses hızı değerleri, B: Portland Çimentolu numunelerin ses hızı değerleri , C: %10 Silis katkıli numunelerin ses hızı değerleri, D: %50 Silis katkıli numunelerin ses hızı değerleri)



Şekil 4.17: Puzolanik Çimentolu ve Portland Çimentolu Numunelerinin Zamana Bağlı Dinamik Elastisite Modülü Grafikleri (A: Puzolanik Çimentolu numunelerin ses hızı değerleri, B: Portland Çimentolu numunelerin ses hızı değerleri)



Şekil 4.18: Portland Çimentolu, %10 Silis Katkılı ve %50 Silis Katkılı Numunelerin Zamana Bağlı Dinamik Elastisite Modülü Grafikleri (B: Portland Çimentolu numunelerin dinamik elastisite modülü değerleri, C: %10 Silis katkı numunelerin dinamik elastisite modülü değerleri, D: %50 Silis katkı numunelerin dinamik elastisite modülü değerleri)



Şekil 4.19: Tüm Deney Numunelerin Zamana Bağlı Dinamik Elastisite Modülü Grafikleri (A: Puzolanik çimentolu numunelerin zamana bağlı dinamik elastisite modülü değerleri, B: Portland çimentolu numunelerin zamana bağlı dinamik elastisite modülü değerleri, C: %10 Silis katkı numunelerin zamana bağlı dinamik elastisite modülü değerleri, D: %50 Silis katkı numunelerin zamana bağlı dinamik elastisite modülü değerleri)

4.6. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi:

Düzce Akçakoca yöresi Melen Çayı eteklerindeki lokasyonlardan alınan agregalarla, alkali-silis reaktivitesini araştırmak amacıyla hızlandırılmış harç çubuğu metodu kullanılarak yapılan deneylerde iki farklı tür çimento kullanılmıştır.

Metodda belirtilen karışım oranlarıyla hazırlanan numuneler üzerinde 7, 14, 21 günlük boy değişimleri gözlenmiş ve ASR genleşmeleri % olarak değerlendirilmiştir.

ASTM C 1260 standardında belirtilen genleşme limitleri şöyledir:

Genleşme;

% 0,1 den az ise genleşme-zararsız agreg

% 0,1-0,2 arasında ise saha performansında zararlı ve zararsız agreg

% 0,2 den fazla ise zararlı agreg olarak verilmiştir.

Bu limit değerler doğrultusunda ve yapılan deney sonuçlarına göre puzolanik çimento kullanılarak hazırlanan karışımlarda ASR genleşmesi gözlenmemiş, % değerleri 0,1' in altında seyretmiştir.

Portland çimentosuyla hazırlanan numunelerde ise genel olarak %0,1-0,2 aralığında değerler kaydedilmiş olup, bu durumda bu agregaların saha performansında zararlı ve zararsız agreg olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca, alkali-silis reaktivitesinde saf kuvars kullanımının etkisini gözlemek amacıyla %10 ve %50 oranlarında % 95'lik saf kuvars portland çimentosuyla birlikte kullanılmış ve beklenildiği üzere ASR reaktivitesi gözlenmiştir. %50 SiO₂ katkılı numunelerde genleşme %10 SiO₂ katkılı olanlara göre daha yüksek bir değerde başlamış fakat daha düşük bir hızda devam etmiştir. Deney sonuçları tabloda ve değerlendirilmesinin daha net görülebilmesi açısından grafiklerle sunulmuştur.

4 farklı içeriğe sahip numuneler üzerinde genleşmelerle birlikte 7, 14 ve 21 gün sonunda ses hızı tayinleri de yapılmıştır. Ses hızlarında kalıptan çıkarıldıktan

sonraki, solüsyona konulmamış numuneler üzerinde yapılan ölçümlere göre artış gözlenmiştir. 0. gün ve 7. gün arasında betonun sertleşme sürecinde ses hızı giderek artmıştır. 7. günden sonra ASR 'nun ses hızına olan etkisi de ortaya çıktığı için grafiklerde 7. günden sonra ses hızı artışında bir düşme olduğu görülmüştür. Bu dönemde ASR etkisi de düşünülecek olursa en düşük değerler % 10 SiO₂ katkılı numunelerde olduğu görülmüştür. Bu durum da genişleme grafiklerini desteklemektedir. En yüksek ses hızı değeri puzolanik çimentolu numunelerde olup bu da genişlemenin en düşük olduğu değere karşılık gelmektedir.

5. BÖLÜM: SONUÇ VE ÖNERİLER

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmada elde edilen veriler, ASR üzerinde özellikle puzolanların (PZÇ/32.5) yavaşlatıcı bir etkisi olduğunu, eğer agrega reaktifse bu reaktivitenin portland çimentosuyla daha net bir şekilde açığa çıkabileceğini göstermiştir.

Beton dayanımı açısından agregaların seçimi ve özellikleri büyük önem taşımaktadır. Agregaların kullanım aşamasından önce çeşitli analizlerinin yapılması ve birçok açıdan değerlendirilmesi gerektiği gibi, ASR açısından da reaktifliği mutlaka araştırılmalıdır. Reaktivitenin varlığı durumunda, ama bu tür agregaların kullanılmasının zaruri olduğu durumlarda da ASR' nünü engellemek veya yavaşlatmak amacıyla çeşitli katkıları kullanılmalıdır.

Son yıllarda önemi daha çok anlaşılan ve ciddi çalışmalara açık olan ASR konusunda birçok bölge agregaları üzerinde etüd çalışmaları yapılabilir ve reaktivitenin olduğu agrega türlerinde değişik katkıları kullanılarak yeni yorumlar yapılabilmekle beraber, beton yapımında ve sonrasında agrega etkilerine ışık tutulabilir.

Ayrıca etrenjit oluşumu ile ASR oluşumunun ayırt edilebilmesi çok dikkat ve ayrıntılı araştırmalar gerektirdiğinden , bu iki konu ile ilgili çeşitli parametreler değiştirilerek farklı çalışma alanları yaratılabilecektir.

KAYNAKÇA

1. ANDIÇ, Ö. **Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması**, Y.Lisans Tezi, 2002
2. SAĞLIK, A., KOCABEYLER, M., ORKUN, Y., HALICI, M., TUNÇ, Ergin., **Deriner Barajı ve Hes İnşaatı Kütle Betonunda Kullanılması Planlanan Agregalarda Alkali-Silis Reaksiyonu Riski ve Önlenmesine Yönelik Yürütülen Çalışmalar**, Makale
3. ÇAKIR, Ö. ve AKÖZ, F., **Alkali Agrega Reaksiyonunun Hızlandırılmış Deney Yöntemleriyle Araştırılması**
4. TOPÇU, İ. B., **Atık Camlı Harçlarda Alkali Silis Reaksiyonu**
5. TOPAL, A. ve ŞENGÖZ, B., **Agrega Boyutu ve Köşeliliğinin Alkali-Silis Reaksiyonu Üzerine Etkisi**
6. KORKANÇ, TUĞRUL, A., **Beton Agregası Olarak Kullanılacak Bazaltların Alkali-Silis Reaksiyonu Yönünden İncelenmesi**, İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, C.17, S.2, S.161-169, 2004
7. ZARİF, İ. H. , TUĞRUL, A. ve DURSUN, G. **İstanbul'daki Kireçtaşlarının Agrega Kalitesi Yönünden Değerlendirilmesi**
8. BİNAL, A., **Pesimum Reaktif Agrega İçeriğinin Alkali-Silis Reaksiyonuna Etkisinin Deneysel Yöntemlerle Araştırılması**, İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, C.17, S.2, S.119-128, 2004

9. FERNANDEZ, A., JIMENEZ, PUERTAS, F., **The Alkali-Silica Reaction in Alkali-Activated Granulated Slag Mortars with Reactive Aggregate**, Cement and Concrete Research, 32, 1019-1024, 2002
10. TURANLI, L., F.BEKTAŞ, MONTEIRO, P.J.M., **Use of Grand Clay Brick as A Pozzolanic Material to Reduce The Alkali-Silica Reaction**, Cement And Concrete Research, 33, 1539-1542, 2003
11. MLADENOVIC, A., SUPUT, J.S., DUCMAN, V., SKAPIN, A.S., **Alkali-Silis Reactivity of Some Frequently Used Lightweight Aggregates**, Cement And Concrete Research, 34, 1809-1816, 2004
12. ÖZASLAN, M., ERŞAHİN, G., AKKAHVE, Deniz, SABUNCU, A., Dpt,Yayın No: 2578, **Düzce İli Raporu**, Bölgesel Gelişme ve Yapısal Uyum Genel Müdürlüğü, Nisan 2001
13. EMRE, Ö., DOĞAN, A. T. Y., ATEŞ, Ş., KEÇER, M., ERKAL, T., ÖZALP, S., YILDIRIM, N., GÜNER, N., **12 Kasım 1999 Düzce Depremi Saha Gözlemleri ve Ön Değerlendirme Raporu**, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 16 Kasım 1999
14. **Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Taş ve Toprağa Dayalı Ürünler Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Raporu**, Çimento ve Hazır Beton, Ankara 2000, Dpt: 2505 – ÖİK: 525
15. LEA, M.F., **The Chemistry of Cement and Concrete**, Edward Arnold Lt. Glaskow, 1970, S.1
16. JENSEN V., **Alkali-Silica Reaction Damage To Elgester Bridge**, Trondheim, Norway; A Review of Construction, Research and Repair up to 2003, Elsevier, Materials Characterization 53 155-170, , 2004

17. FERRARIS, C. F., CLIFTON, J.R., GARBOCZI, E. J., DAVIS, F. L., **Stress Due To Alkali-Silica Reactions in Mortars**, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, M.D,U.S.A
18. STONE PRODUCTS CONSULTANTS & STOKOWSKI, Steven J., **Alkali-Silica Reactivity in Concrete**, U.S.A, 1999, 2003
19. TAŞDEMİR, M., İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı Başkanı, İstanbul Bülten, 5.Ulusal Beton Kongresinin Ardından
20. AKMAN, M. S., **Gecikmiş Etrenjit Oluşumu (Def)**, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, Emekli Öğretim Üyesi
21. HADDAD, R. H., SMADI, M. M., **Role of Fibers in Controlling Unrestrained Expansion and Arresting Cracking in Portland Cement Concrete Undergoing Alkali-Silica Reaction**, Civil Engineering Department, Jordon University of Science and Technology, Cement And Concrete Research 34(2004) 103-108
22. LAURA J., **Developments in Alkali-Silica Gel Detection**, Senior Microscopist, Construction Technology Laboratories Inc.
23. ÖZASLAN, M., ERŞAHİN, G., AKKAHVE, D., SABUNCU, A., **Düzce İli Raporu**, Yayın No. Dpt: 2578, Bölgesel Gelişme Ve Yapısal Uyum Genel Müdürlüğü, Nisan 2002
24. BEKTAŞ, F., **“Preventive Measures Against Alkali-Silis Reaction”**
25. NEVILLE, A. M, **Properties of Concrete**
26. UĞUR, L., **Alkali-Silis Reaksiyonu**, T.C. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara, Aralık 2002

27. STANTON, D. E., **The Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement And Aggregate**, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., 66, S.1781-1811, 1940
28. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration Advisory Circular Subject: **Handbook For Identification of Alkali-Silica Reactivity In Airfield Pavements**, Şubat, 2004, Initiated By: AAS-100 AC No: 150/5380-8
29. KALMIŞ, M., GÜNGÖR, N., ERİBOL, S., **Betonda Alkali-Agrega Reaksiyonunun Teşhis ve Kontrolü**, T.C. Karayolları Kurs Programı
30. ŞENSÖZ, B., YALÇIN, S., **Çimento Fırınlarında Alkali Klorür Sirkülasyonunun Kemer Oluşumu Üzerine Etkileri**
31. ARSLAN M., **Beton - Dökümü, Kalıpları, Kusurları ve Dayamlıklığı**
32. **Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri Çalışma Grubu Raporu** 1996, Ankara, DPT. TP884.A3 M33 1996
33. STOKOWSKI, Jr., STEVEN J., & SARSON, J., **Alkali-Silica Reactivity In Concrete**, Stone Products Consultants, Massachusetts, U.S.A.
34. United Nations, **Classification of Commodities by Industrial Origin**, New York, 1991
35. ÇORAPÇIOĞLU, K., **Doğal Taş Yapılarda Taş Ayrışmasının Nedenleri ve Maktralı Kalkerler Üzerinde Korumaya Yönelik Bir Araştırma**, Doktora Tezi, M.S.Ü,1983, İstanbul
36. ASTM C227 **Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Cement-Aggregate Combinations** (Mortar-Bar Method)

- 37. ASTM C289 Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)**
- 38. ASTM C295 Practice for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete**
- 39. ASTM C1260 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)**
- 40. ASTM C1293 Standard Test Method for Length Change of Concrete due to Alkali-Silica Reaction.**
- 41. ASTM C441 Standard Test Method for Effectiveness of Mineral Admixtures or Ground Blast Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction CAN/CSA A23.2-25A, Test Method for Detection of Alkali-Silica Reactive Aggregate by Accelerated Expansion of Mortar Bars.**

İnternet Kaynakları

- 43.** http://e-egitim.teknolojikarastirmalar.com/yapi_malzemesi/beton/Kay11.htm
- 44.** <http://ekutup.dpt.gov.tr/iller/duzce/2001.pdf>
- 45.** <http://www.deu.edu.tr/deuweb/icerik/icerik.php?kod=2183>
- 46.** www.e-cografya.com
- 47.** <http://www.mta.gov.tr/muze/mineraloji/evaporit.asp>
- 49.** http://Members.Aol.Com/Crushstone/Fly_Asr.Htm. 44.
- 50.** <http://www.yeryuzu.com/kayaclar.htm>
- 51.** <http://ekutup.dpt.gov.tr/madencil/sanayiha/oik625.pdf>
- 52.** www.bolucimento.com.tr
- 53.** <http://www.tema.org.tr>
- 54.** <http://ekutup.dpt.gov.tr/madencil/sanayiha/oik622>.

ÖZGEÇMİŞ

30 Ağustos 1977 tarihinde Malatya’da doğdu. Ortaöğretimini Pertevniyal Lisesi’nde tamamladı. Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Kimya Mühendisliği (1998) ve Matematik Mühendisliği (2002) bölümlerinde çift lisans öğrenimini tamamlamıştır. 2002 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Yüksek Lisans programından mezun olmuştur. 2002 yılında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladığı Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü Yapı Fiziği ve Malzemesi Bilim Dalı’ndaki görevine halen devam etmektedir.

bbinnaz@hotmail.com

