

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POMZA VE ZEOLİTİN ALKALİ SİLİKA
REAKSİYONU ÜZERİNE ETKİSİ

Ash GÜRKAN

Eylül, 2006
İZMİR

POMZA VE ZEOLİTİN ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU ÜZERİNE ETKİSİ

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı**

Ash GÜRKAN

**Eylül, 2006
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

Aslı GÜRKAN, tarafından **Prof. Dr. Bülent BARADAN** yönetiminde hazırlanan **“POMZA VE ZEOLİTİN ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU ÜZERİNE ETKİSİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Bülent BARADAN

Yönetici

.....
Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Jüri Üyesi

.....
Doç. Dr. Akın ALTUN

Jüri Üyesi

.....
Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca, araştırma konusunun belirlenmesi, çalışmanın yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında, değerli bilgileri, tecrübeleri ve hoşgörüsüyle beni yönlendiren hiçbir konuda yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Bülent BARADAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma süresince malzemelerin teminindeki yardımlarından ötürü, Dere Madencilik A.Ş.'ye, Pomza Export A.Ş.'ye, Teknomin A.Ş.'ye; ayrıca literatür aşamasında ve deneysel çalışmaların yürütülmesi aşamasındaki değerli katkılarından dolayı İnş. Yük. Müh.'i Kamile TOSUN'a; maddi ve manevi desteklerinden ötürü değerli dostlarım İnş. Yük. Müh. Gülcan KARAGÜL, Zeynep ÇINAR, İnş. Müh. Ahmet Hilmi AYTAÇ, İnş. Müh. Anıl Şinasi KARABULUT, İnş. Yük. Müh. Taner UÇAR, İnş. Yük. Müh.'i Nazlı İkbâl AYALP ve Mehmet Sait AYALP'e teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek şevkle çalışmamı sağlayan çok değerli ailem, Gürol GÜRKAN, Fatma GÜRKAN, Gülsüm GÜRKAN'a ve tüm çalışmam süresince bana her türlü desteği göstererek teşvik eden İnş. Müh. Ahmet YERLİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Aslı GÜRKAN

POMZA VE ZEOLİTİN ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU ÜZERİNE ETKİSİ

ÖZ

Alkali silika reaksiyonu, betonda kullanılan çimentodan veya dış kaynaklardan gelen alkali hidroksitlerle, beton içindeki agregaların içerdiği reaktif bileşenler arasında, nem varlığında meydana gelen ve zamanla betonun genleşmesi sonucu betona zarar veren bir kimyasal reaksiyondur. Aktif silis içeren reaktif karakterli agregalar opal, kalsedon, kristobalit gibi mineraller içermektedir.

Bu çalışmanın ilk aşamasında, mineral katkı olarak kullanılacak malzemeler ve bu malzemenin en uygun kullanım oranları belirlenmiştir. ASR' nin zararlı etkilerini azaltmak amacıyla mineral katkı olarak çimento yerine pomza, perlit ve zeolit farklı oranlarda kullanılarak, ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuğu metodu ile çimento-agrega-mineral katkı bileşiminin reaktivitesi belirlenmiştir. Harç örnekleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda, perlitin, genleşmeleri azaltmada pomza ve zeolit kadar etkili olmadığı görülmüştür. Bu nedenle çalışmanın sonraki aşamasında, reaksiyonun zararlı etkilerini azaltan ve belli bir orandan sonra harç örneklerinin genleşme değerlerini, standarttaki genleşme limitinin altına düşürebilen pomza ve zeolit kullanılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ASR'nin zararlı etkilerini azaltmak için mineral katkı olarak kullanılan pomza ve zeolitın betonun durabilitesine etkisi, yapılan deneylerle incelenmiştir.

Anahtar sözcükler : Alkali Silika Reaksiyonu, Zeolit, Pomza.

THE EFFECT OF PUMICE AND ZEOLITE ON ALKALI SILICA REACTION

ABSTRACT

Alkali-silica reaction (ASR) is a chemical reaction that takes place among the cement used in the concrete or alkali hydroxides coming from external sources and aggregates in concrete containing reactive silica components. By time, in the presence of moisture the reaction products cause expansion in concrete. Some of the mineral types that may contain reactive forms of silica are opal, chalcedony, cristobalite.

In the first stage of this study, the most suitable of the selected mineral admixture were determined. In order to reduce the harmful effects of ASR, in place of cement various proportions of pumice, perlite and zeolite were used as complementary materials and the reactivity of the combinations of aggregate and the resultant cementitious material was determined in accordance with ASTM C1260 Accelerated Mortar Bar Method. At the end of the tests, it was found that perlite was not as effective as pumice and zeolite in the process of reducing ASR expansion. For this reason, in the later stages of the study pumice and zeolite were used which reduce the harmful effects of the reaction and after a certain rate that may decrease the expansion values of the mortar samples below the expansion limit stated in the standard. In the last stage of the study, in order to reduce the harmful effects of ASR, the influence of mineral admixtures, pumice and zeolite, on the durability of concrete was investigated.

Keywords: Alkali Silica Reaction, Zeolite, Pumice.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ- ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU (GENEL TANITIM)	3
2.1 Tanım.....	3
2.2 Tarihsel Perspektif.....	3
2.3 Betonda ASR.....	7
2.4 ASR Mekanizması ve Pesimum Davranış.....	7
2.4.1 ASR Mekanizması	7
2.4.1.1 Reaktif Silisin Çözünmesi.....	8
2.4.1.2 Alkali Silika Jelinin Oluşumu.....	10
2.4.1.3 Alkali Silika Jelinin Genleşmesi.....	11
2.4.2 Pesimum Davranış.....	13
BÖLÜM ÜÇ – ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNU ETKİLEYEN	
FAKTÖRLER	15
3.1 Alkali İçeriğinin Etkisi	15
3.2 Rutubet ve Sıcaklık Etkisi	20
3.3 Reaktif Agreg Cinsinin ve Boyutunun Etkisi.....	22
3.4 Karışım Oranlarının Etkisi	24
3.5 Kalsiyum Hidroksitin (Ca(OH) ₂) Etkisi	25

**BÖLÜM DÖRT – ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNUN BETONA
ETKİSİ VE REAKSİYONUN TESPİTİ..... 27**

4.1 Alkali Silika Reaksiyonunun Gözle Görülür Etkileri ve Çatlaklar	27
4.2 Alkali Silika Reaksiyonunun Tespiti İçin Kullanılan Deney Yöntemleri	29
4.2.1 Harç Çubuğu Metodu (ASTM C227).....	29
4.2.2 Kimyasal Metot (ASTM C289).....	30
4.2.3 Agregaların Petrografik Analizi (ASTM C295).....	31
4.2.4 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Metodu (ASTM C1260).....	32
4.2.5 Beton Prizma Metodu (ASTM C1293).....	33
4.2.6 Kullanılan Diğer Deney Yöntemleri.....	34

**BÖLÜM BEŞ – ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA KARŞI ALINACAK
ÖNLEMLER, ONARIM VE İLGİLİ STANDARTLAR 36**

5.1 Reaktif Agreganın Saptanması ve Agregası Seçimi	36
5.2 Alkalilerin Azaltılması ve Çimento Seçimi.....	37
5.3 Rutubet ve Geçirimsizliğin Azaltılması	38
5.4 Mineral Katkı Maddesi Kullanılması.....	39
5.4.1 Uçucu Kül.....	41
5.4.2 Yüksek Fırın Cürufu.....	44
5.4.3 Silis Dumanı	46
5.4.4 Metakaolin	48
5.4.5 Doğal Puzolanlar	49
5.4.6 Zeolit.....	52
5.5 Kimyasal Katkı Maddesi Kullanılması	55
5.6 Onarım ve Kullanılan Standartlar.....	56
5.6.1 Onarım	56
5.6.2 Kullanılan Standartlar ve Şartnameler.....	58
5.6.2.1 California Ulaştırma Bölümü.....	58

5.6.2.2 Amerikan Eyalet Karayolları ve Ulaşım Birliği	58
5.6.2.3 New Mexico Devlet Karayolları ve Ulaşım Bölümü.....	59
5.6.2.4 Washington Eyalet Ulaşım Bölümü.....	60
5.6.2.5 Portland Çimento Birliği.....	60
5.6.2.6 Birleşik Havacılık İdaresi	60
5.6.2.7 Amerikan Beton Enstitüsü	61
5.6.2.8 Uluslararası Agrega Araştırma Merkezi	61
5.6.2.9 Kanada Standartlar Birliği	61
5.6.2.10Yapı Malzemeleri ve İnşaatlar Uluslararası Birliği	62
BÖLÜM ALTI – DENEYSEL ÇALIŞMA	63
6.1 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Yöntemi (ASTM C1260).....	63
6.2 Malzeme Özellikleri.....	65
6.2.1 Çimento.....	65
6.2.2 Agrega.....	66
6.2.3 Pomza	67
6.2.4 Zeolit.....	68
6.2.5 Perlit.....	68
6.3 Deney Akış Şeması	70
6.4 Karışımların Hazırlanması ve Kürü	71
6.4.1 Çimento Yerine Zeolit Kullanımı.....	72
6.4.2 Çimento Yerine Pomza Kullanımı.....	74
6.4.3 Çimento Yerine Pomza ve Zeolit Birlikte Kullanımı.....	75
6.5 Çimento Yerine Pomza veya Zeolit Kullanımının Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	77
6.6 Çimento Yerine Pomza veya Zeolit Kullanımının Kapilariteye Etkisi	82
BÖLÜM YEDİ – SONUÇ VE ÖNERİLER.....	84
KAYNAKLAR.....	88

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Alkali agrega reaksiyonu, betonda kullanılan çimentodan veya dış kaynaklardan gelen alkali hidroksitlerle, beton içindeki agregaların içerdiği reaktif bileşenler arasında meydana gelen bir reaksiyondur (Swamy, 1990). Günümüzde alkali agrega reaksiyonunun bilinen üç oluşum şekli vardır: Alkali-karbonat reaksiyonu, alkali-silikat reaksiyonu ve alkali-silika reaksiyonu. Alkali-karbonat reaksiyonu, dolomitik kireç taşları ile betonun boşluk çözeltisindeki metal hidroksitlerin reaksiyonudur (Andiç, 2002). Alkali silikat reaksiyonu, fillosilikat grubu minerallerden oluşmuş agregaların betonun boşluk çözeltisindeki metal hidroksitleri ile reaksiyonudur (West, 1996). Bu reaksiyonlar içinde en yaygın görüleni Alkali Silika Reaksiyonudur.

Alkali Silika Reaksiyonu, kalsiyum ve alkalilerle birleşebilme yeteneğine sahip, reaktif karakterli silika mineralleri içeren agregalar ile alkali oksitlerin (Na_2O , K_2O) çözünmesiyle betonun boşluk suyunda yer alan alkali hidroksitler (NaOH , KOH) arasında nem varlığında oluşur ve betonda nem etkisiyle genişleyen bir jelin oluşmasına neden olur.

ASR'nin betonda zararlı etkilerini gösterebilmesi için ortamda üç şartın varlığı gerekmektedir; yeterli nem, yeterli miktarda reaktif silika, yeterli miktarda alkali. Farklı agregaların reaktiviteleri içerdikleri kristal yapıdaki silis minerali miktarına bağlıdır. Reaktif silika minerallerinden opal, kalsedon, kristobalit, tridimit, kriptonkristalin kuvars en yaygın görülen türdendir (Tosun, 2001). Alkali oksitler çimentodan gelmekle birlikte, bir kısım alkali; agrega, uçucu kül veya cüruf gibi diğer bileşenlerden de gelebilir. Buna ek olarak, betona alkali girişi buz çözücü kimyasallar veya deniz suyu, beton kür suyu, zemin suyu ve endüstriyel atık suları aracılığı ile olabilir.

ASR ortamda yeterli miktarda nem olduğunda meydana gelebilir. Nem, alkali iyonlarının yayılmasına, bu yayılmada reaksiyon bölgelerinde jel oluşumuna neden olur.

Oluşan jel ise su emerek şişip genleşme ve betonda içsel çekme gerilmelerinin doğmasına böylece agrega ile onu çevreleyen çimento harcının çatlamasına neden olur (Tosun, 2001).

Alkali Silika Reaksiyonunda oluşan genleşme sonucu, donatısız kütle betonlarında, kaplama betonlarında çekme dayanımının aşılması sonucu beton içinde ve yüzeyinde kırıklar ve çatlaklar gelişebilmektedir. ASR'nin görünür dış belirtisi haritaya benzer çatlaklardır (Wen, 1998). Gözlenen diğer belirtiler; genleşme, kapak atmalar, çatlaklardan jel sızması, yapısal elemanlarda deformasyonlar şeklindedir (Tosun, 2001).

ASR'nin önlenmesi için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Öncelikle reaksiyonun oluşmasına sebep olan faktörler; nem, reaktif silika ve alkalinin bir ya da daha fazlasının ortadan kaldırılması bir önlem olarak düşünülebilir. Mineral ve kimyasal katkı maddeleri ile doğal puzolanlar kullanılarak da reaksiyonun zararları azaltılabilir.(Tosun, 2001).

Son yıllarda, puzolonik özellikleri nedeniyle zeolit ve pomzada ASR genleşmelerini azaltmak amacıyla yapılan araştırmalarda yerlerini almışlardır. Zeolit, puzolonik reaktivite, iyon yer değiştirmesi ve adsorpsiyonu ile betonun boşluk suyunun alkalinitesini düşürmektedir. Bu sayede alkali silikat jelinin oluşumu da önlenmektedir. Doğal bir puzolan olan pomza ise, çimento harcının kirecini tutarak ortamın pH derecesini indirger, silikanın çözünürlüğünü azaltarak alkali silika reaksiyonunu ve jel yapısında varolan CaO'i bağladığı için jel oluşumunu engeller. Sahip olduğu özellikler açısından pomza ve zeolit doğru oranlarda kullanıldığında ASR oluşumunun ve ilerlemesinin önlenmesi bakımından yararlıdır (Andiç, 2002).

Bu çalışmada çimento yerine farklı oranlarda pomza ve zeolit kullanımının ASR nedeniyle oluşan genleşmelerin kontrol altına alınması üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Araştırmada kullanılan agreganın reaktivitesinin ve mineral katkıların etkinliğinin saptanmasında ASTM C1260 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Yöntemi kullanılmıştır.

BÖLÜM İKİ

ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU

2.1. Tanım

Alkali Silika Reaksiyonu (ASR), genellikle çimentodan kaynaklanan alkali oksitlerle (Na_2O , K_2O) reaktif silika formları içeren agregalar arasında oluşan ve betonda genleşme etkisi yaratan kimyasal bir reaksiyondur. Bu reaksiyon, betonda nem etkisiyle genleşen bir jelin oluşmasına neden olur. Beton içerisinde şişme sebebiyle meydana gelen bu hacim artışı çekme gerilmelerinin doğmasına sebep olarak çatlamlara yol açar. Bu nedenle ASR konusundaki araştırmalar hem kimyasal hem de yapısal açıdan ele alınmaktadır (Andiç, 2002).

2.2 Tarihsel Perspektif

Alkali silika reaksiyonu ilk olarak 1940 yılında tartışılmaya başlanmıştır. Amerikalı mühendis Stanton Kaliforniya’da bazı betonlarda oluşan bozulmaları, çimentodan gelen sodyum ve potasyum hidroksitlerin agrega içerisindeki reaktif silis ile reaksiyonu sonucu oluştuğunu açıklamıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, yüksek alkalili çimento ve çatlak görülen yapılarda kullanılan agrega tipiyle (opal), üretilen harç çubuğu örnekleri yüksek bağıl neme sahip ortamlarda bekletilmiş ve örneklerde genleşme ve çatlamlar tespit edilmiştir. Stanton çimento içeriği 600 kg/m^3 ün üstünde olan harç çubuklarıyla yaptığı deneylerde, çimentonun asitte çözülebilir alkali içeriği (eşdeğer sodyum oksit içeriği) kütlece % 0.6 ‘nın altında ise, ASR nedeniyle bir genleşme ve çatlamanın ortaya çıkmadığı sonucuna varmıştır (Türker ve diğer., 1998; Hobbs, 1988; Swamy, 1992; Forster ve diğer., 1998).

Stanton’un çalışması esas alınarak, The U.S. Bureau of Reclamation, beton barajlarda oluşan anormal çatlakları incelemiştir (Meissner, 1941).

Meissner'in bulguları, genellikle Stanton'un bulgularını doğrulamış ve çimento-alkali seviyesi, agrega bileşimi ve çevresel koşulların ASR'ye bağlı oluşan genleşmeleri etkilediğini eklemiştir.

Stanton (1941), ilk periyotlardaki ihmal edilebilir miktardaki genleşmeyi azaltmak için çimento yerine %25 oranında pomza kullanımının etkili olduğunu görüldüğünü açıklamıştır.

Portland Çimento Birliğinden Hansen (1944), reaksiyon ürünü olan jelin su alarak şişmesi sırasında oluşan ozmotik basınçların gözlenen genleşmeden sorumlu olduğunu açıklamıştır.

ASR'den dolayı oluşan genleşmeleri engellemek için puzolan kullanma önerisi ilk defa Hanna (1947) tarafından ileri sürülmüştür.

1950'li yılların başındaki diğer çalışmalar, genleşme mekanizmaları üzerine yoğunlaşmıştır. Yine aynı yıllarda İngiltere'de Alkali Silika Reaksiyonu üzerine araştırmalar Building Research Station tarafından yapılmaya başlanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda normal sıcaklıklarda ve yüksek alkalili çimento ile birlikte test edilen İngiliz agregalarının reaktif olmadığı görülmüştür. Ancak 1976'da yapılan çalışmalar sonucunda 1931 ile 1975 yılları arasında inşa edilen 200'ün üstünde yapıda ASR varlığına rastlanmıştır. Bu yapılar arasında köprüler, elektrik trafolarındaki temel blokları, kanalizasyon arıtma tesisleri, su depoları, dalgakıran, hastane, çok katlı otopark, havalandırma bacası ve yarış pisti yer almaktaydı (Hobbs,1984).

Rogers (1987), Montreal Nehri üzerindeki Lower Notch barajında %20 oranında uçucu kül eklenmesinin kil ve gri bazalt içeren betondaki çatlakların önlenmesinde başarılı olduğunu belirtmiştir.

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 (Andiç, 2002; Hooton ve diğer, 2000).

Mather (1993), ASR'ye bağlı olan genişmeleri engellemek için, katkı kullanımını tekrar incelemiştir.

1974 yılından beri dünya çapında ASR ile ilgili, sonuncusu 2004 yılında Pekin'de düzenlenen 12 uluslararası konferans gerçekleştirilmiş ve bu konu hakkında ayrıntılı bilgi veren üç adet kitap yayınlanmıştır.

25 yıl öncesine kadar Alkali Silika 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 ASR'ye maruz kalan beton yapıların bulunduğu görüldü; bu da ASR'nin dünya çapında yaygın olduğunu kanıtlamıştır (Hobbs, 1988; Swamy, 1992; West, 1996).

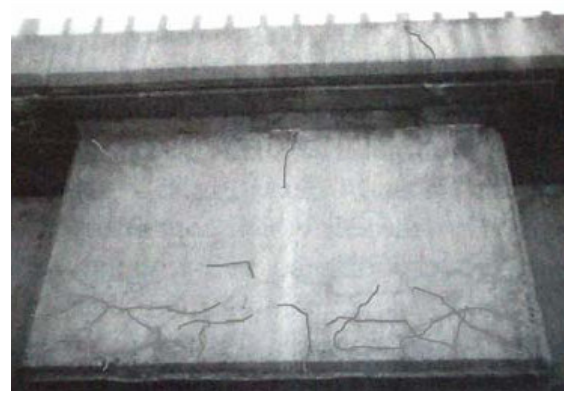
Ülkemizde, ASR'nin ilk hasarları, Karayolları 2. Bölge Müdürlüğü'nün ön incelemeleri sırasında İzmir yöresindeki bazı karayolu köprülerinde (Hilal1, Hilal2, Turan, Zafer Payzın Üstgeçitleri, İzmir-Aydın, İzmir-Çeşme Otoyollarındaki bazı sanat yapıları) geniş çatlakların gözlenmesi sırasında ortaya çıkmıştır. 1995 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü ile Japon JICA firması arasında imzalanan Türk Japon Teknik İşbirliği Protokolü kapsamında İzmir yöresinde hasar gören beş köprünün (Naldöken, Turgutlu, Buca, Hilal2, Turan) inceleme çalışmaları JICA firması tarafından yürütülmüştür. Köprülerden alınan karot örnekleri ile civardaki agrega ve çimento kaynakları incelemeye alınmıştır. Kum örnekleri üzerinde petrografik analiz ve hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri uygulanmış, karotlar ise hızlandırılmış karot

genleşme deneyine tabi tutulmuştur. Bu çalışmalar sonucunda, özellikle Gediz ve Nif nehri yatak ve teraslarındaki doğal kumların içerdiği reaktif silislerin (camsı riyolit, camsı riyolitik tuf ve kalkerli çört) ASR'ye yol açtığı anlaşılmıştır. Bu durumda, Gediz ve Nif yatak ve teraslarındaki doğal kumun kullanılmaması prensibi benimsenmiştir (Andıç,2002; Katayama,1996).

Türk Standardında yer alan ve ASTM C289'un benzeri olan TS 2517 "Alkali Agregat Reaktivitesinin Kimyasal Yolla Tayini" isimli standarda göre yapılan incelemeler bu kumların reaktivitesini belirlemede yetersiz kalmaktaydı. Ancak, Alkali Silis Reaksiyonunu belirlemede etkin olan ve harç ile beton örnekleri genleşmelerinin ölçülmesine dayanan deney metotları ülkemizde henüz standartlaşmamıştır. Şekil 2.1'de İzmir yöresindeki köprü ayaklarındaki ASR çatlakları görülmektedir.



Şekil 2.1 ASR hasarına uğramış köprü ayağı
(Baradan, 2002).



Şekil 2.2 İzmir-Hilal Köprüsü (Katayama, 2000).

Katayama, 2000 yılındaki uluslararası alkali agregat reaksiyonu kongresine Türkiye'de yaptıkları çalışmaları derlediği bir yayımla katıldı. Bu çalışmasında, 1980'lerden bu yana sıklıkla kullanılan Gediz ve Nif nehir sistemlerindeki kum-çakıl ile yapılan bazı köprülerde çatlakların görüldüğünü ve yaşları 1 ile 10 yıl arasında değişen 5 adet köprüden karot örneklerinin ve bu köprülerde kullanılan agregat ve çimento örneklerinin alındığını belirtmiştir. Agregatın petrografik analizleri sonucunda

içerdikleri camsı riyolit ve dasitlerle reaktif çörtler sebebiyle reaksiyona yatkın oldukları belirlenmiştir. Betonların hemen hemen hepsinde Gediz ve Nif teraslarındakini andıran doğal agrega ile kireçtaşı birlikte kullanılmıştı. Kireçtaşının alkali-karbonat reaksiyonuna yatkınlığının olmadığı belirtilmiştir. Bu durumda beton karotlarda görülen çatlaklar ve içlerindeki jel akıntısının varlığı bu çatlakların Alkali Silis Reaksiyonu sonucunda oluştuğunu göstermektedir (Andiç ,2002).

2.3 Betonda ASR

Alkali silika reaksiyonu, yapı sanayinde yaygın olarak bilinmemesine rağmen beton yapılarıdaki etkisi oldukça önemlidir. Betonda reaksiyonun oluştuğunu gösteren en önemli belirti yüzeyde görülen harita çatlaklarıdır. İleri derecede kapanmış derzler, kapak atmalar ve yapının çeşitli bölgelerinde deplasmanlar da ASR'nin beton elemandaki görünür etkileridir. Oluşan çatlaklar zaman zaman yapının güvenliğini tehlikeye sokabilmektedir. Yüzeydeki çatlakların yanında, reaksiyon betonun basınç ve eğilme dayanımını olumsuz etkilemekte ve esnekliğini azaltmaktadır. ASR sebebiyle hasar görme yavaş olduğundan ani bir yıkıntı olma riski çok düşüktür. Ancak, oluşan çatlaklar donma-çözünme, sülfat etkisi, donatı korozyonu gibi durabilite problemlerinin etkisini arttırmaktadır. Ayrıca hidroelektrik santrallerindeki yüksek hızda dönen ekipmanların yerleştiği ve genişleme toleransının çok hassas olduğu yapılarda kullanım problemlerine yol açmaktadır (Andiç, 2002; Farny ve Kosmatka, 1997).

2.4 ASR Mekanizması ve Pesimum Davranış

2.4.1 ASR Mekanizması

Beton, çimento hamuru içinde bulunan yapay ve/veya doğal ince ve iri agregadan oluşur. Çimento hamuru içinde birbiri ile bağlantılı olan ve içlerinde su veya iyon çözeltilsinin girebileceği boşluklar vardır. Bu gözeneklerde bazik özelliğe çözeltiler yer

alır. Taze betonun pH değeri yaklaşık 12,5 olup, bu değer betonun alkali miktarı arttıkça artar. Betondaki alkaliler (Na, K); çimento klinkerinden, betonda kullanılan mineral ve kimyasal katkılardan, agregalardan ve karma suyundan kaynaklanmaktadır (Andiç, 1999).

ASR, yalnızca yüksek hidroksil iyonu konsantrasyonunda yani boşluk suyunun yüksek pH değerlerinde ortaya çıkar, çünkü reaktif silika yüksek pH'lı çözeltide çözünür (Baradan, 2002).

Çözünen silika, kalsiyum ve alkaliler ile reaksiyona girerek alkali-silikat-hidrat jeli oluşturur. Bu jel, çimento hamurundan su emerek şişer ve çimento hamurunda ilk olarak mikro çatlaklar oluşturur. Bu mikro çatlaklarda yayılan jel giderek artar ve su emerek şişer. Bu sayede çatlakların genişleyip çoğalmasına ve betonun çatlamasına neden olur (Andiç, 1999).

Jelin karakteristik bileşimi henüz tam olarak bilinmemekle birlikte silisyum, sodyum, potasyum, kalsiyum ve magnezyum içerdiği sanılmaktadır (Baradan ve diğ., 2002).

ASR üç aşamada gerçekleşmektedir.

- 1- Reaktif silisin çözünmesi
- 2- Alkali-silika jelinin oluşumu
- 3- Alkali silika jelinin su emerek genişmesi

2.4.1.1 Reaktif Silisin Çözünmesi

Silikanın farklı türlerinin temel yapı birimi silikon-oksijen tetrahedronudur. Kristal yapıya sahip kuvars türü silikalar, silikon-oksijen bağlarının bozulduğu küçük bölgeler içerse de, düzenli bir ağ yapısı oluşturacak şekilde birbirine bağlıdır. Buna karşın daha zayıf kristal yapıya sahip olan opal ve cam gibi silika türlerinde çok sayıda silikon-

oksijen bağı bozulmuştur ve tetrahedral yapı rasgele dizilmiş düzensiz bir ağ ile bağlıdır (Tosun, 2002).

Silisin ana maddesi Si atomuna bağlı dört oksijen atomundan oluşan silis tetrahedridir. Oksijen atomları bir valansları ile silisyuma bağlı kaldıklarından diğer valansları serbesttir, böylece silis tetrahedrinin serbest dört negatif bağı mevcuttur. $(\text{SiO}_4)^{4-}$ tetrahedrinin su içinde $(\text{OH})^-$ etkisiyle çözünmesi iki aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada silisin hidrolizi sonucu uçları OH'a dönüşerek çözünür hale gelir, bu süreçte silisin yapısı değişmiş ve Si'ler birbirine OH' lar vasıtası ile bağlanmıştır. Bu yapıya silanol ($\equiv\text{Si-OH}$) adı verilir. Silanol grupları OH^- hidroksillerinin ikinci saldırısı ile yeni bir çözülmeye maruz kalır; ortama H_2O molekülleri vererek $\equiv\text{Si-O}^-$ formuna dönüşür ve su içinde dağılır.

$(\text{OH})^-$ iyonu bu reaksiyonda katalizör görevi görmektedir. $(\text{OH})^-$ iyonları çimentonun hidrotasyonu sonucu ortaya çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sayesinde meydana gelirler. Sadece kirecin etkisi arayer boşluk sıvılarındaki pH değerini 13,5-14,0 değerine yükseltmeye yetmez. NaOH ve KOH gibi alkali hidroksitlerin varlığı da bu yüksek alkaliniteyi sağlamakta etkin olmaktadır (Akman, 1998; Wilson ve diğer.,1994).

Silisin çözünmesinde bir diğer problem, bu çözünmenin hangi hızla geliştiğini saptamaktır. Hızı etkileyen birinci faktör sıvının agrega taneciği içine olan difüzyonudur. Difüzyon hızları agreganın boşluk yapısı ve sıvının iyon konsantrasyonuna bağlı olarak değişir. Difüzyon başlangıçta zamanın karekökü ile orantılı gelişir, çökelen veya yıkanma sonucu arta kalan tıkaçıcı tuzlar difüzyonu yavaşlatır. Yavaş gelişen çözünme uzun zaman alır. Daha sonra çözünme sıvı-katı fazlar arasında bir yüzey reaksiyonuna dönüşür ve zamanla lineer artar, hızlanır (Akman, 1998).

Burada katyonların efektif (hidrat) yarıçapları etkinlik taşır, en küçük efektif iyon yarıçapı potasyum alkali metalinindir. Bu yüzden potasyum içeriği fazla olan çimentonun sodyum içerikli çimentoya göre genişleme süresi daha kısadır (Akman, 1998).

Çözünme hızını etkileyen diğer iki faktör ortamın pH derecesi ve sıcaklığıdır. $pH > 5$ durumundan itibaren hız artmakta, artış $pH > 10$ dan sonra anlamlılık kazanmaktadır. Bazı araştırmalarda, bu arada çözünenin bir minimumdan geçtiği de gözlemlenmiştir. Çözünürlük $45^{\circ}C$ ve $55^{\circ}C$ arasında da artmaktadır. Bu durum hidrasyon ısısı kolaylıkla düşmeyen kütsel baraj betonlarında önem taşımaktadır (Abit, 1998).

2.4.1.2 Alkali Silika Jelinin Oluşumu

Alkali silika jelinin bileşimi alkali boşluk suyunun bileşimine, silikanın reaktivitesine, reaksiyona giren maddelerin konsantrasyonuna ve reaksiyon sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir (Tosun, 2001).

Silanol gruplarının oluşmasından sonraki kimyasal reaksiyon safhaları aşağıdaki şekildedir (Wang ve Gillott, 1991).

1. Alkalice zengin arayer sıvısında akışkan jelinin oluşumu



2. Agrega tanelerinde oluşan akışkan jelin genişlererek çevredeki çimento hamuruna doğru akması ve burada giderek daha rijit kalsiyumca zengin bir jele dönüşmeye başlaması,

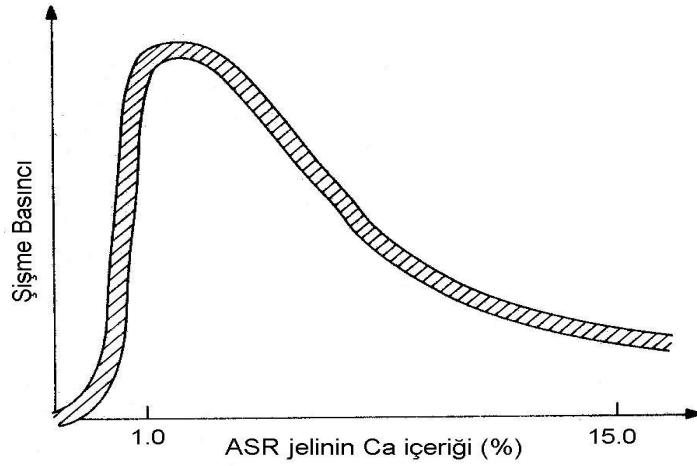


Bu reaksiyon mekanizması süresince, reaktif silis içeren agrega yüzeyinden çimento hamuruna doğru kalsiyum içeriği artmaktadır. Jeldeki SiO_2 ve CaO miktarlarının eşit olduğu durumda alkali içeriği maksimumdur (Andiç, 1999; Wang ve Gillot, 1991).

CaO varlığının silis jeli oluşumundaki etkisi Dent Glasser ve Kataoka (1982) tarafından değerlendirilmiştir. Ca^{+2} iyonları silisle birleşerek silikat hidrata (CSH) dönüşmekte ve jel yüzeyinde birikmektedir. Eğer arayer sıvısında Ca^{+2} iyon konsantrasyonu sınırlıysa, Ca^{+2} çabuk tükenir ve reaksiyon durur. Betonlarda bilindiği gibi, hidratasyon başında Ca(OH)_2 kristalleri tekrar çözünmeye başlar ve arayer sıvısındaki dengeyi kurar. $\text{CaO/Na}_2\text{O}$ oranı jelin oluşmasında, bileşiminde ve genişmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu oran arttıkça karakteri değişen jel daha az genişme yapan bir türe dönüşmektedir (Akman, 1998).

2.4.1.3 Alkali Silika Jelinin Genleşmesi

Alkali-silika jelinin betona zarar verme nedeni su emerek genişmesidir. Oluşan jelin genişme mekanizmasının bilinmesi ASR nedeniyle oluşan hasarların önlenmesi açısından önemlidir. Betonun boşluk suyunda bulunan Na^+ , K^+ , Ca^{+2} iyonlarının varlığı jelin genişmesini etkilemektedir. Eğer kalsiyum konsantrasyonu düşükse; reaksiyonun ilerlemesi ve genişmenin oluşabilmesi için öncelikle kalsiyum miktarının artması gerekmektedir. Düşük viskoziteli (düşük kalsiyum içerikli) ASR ürünleri çimento harcı içinde şişme basıncı yaratmadan yayılmaktadırlar. ASR jelinin Ca içeriği ile şişme basıncı arasındaki ilişki Şekil 2.3'de görülmektedir.



Şekil 2.3 ASR jelinin Ca içeriği ile şişme basıncı arasındaki ilişki (Wilson, 1994).

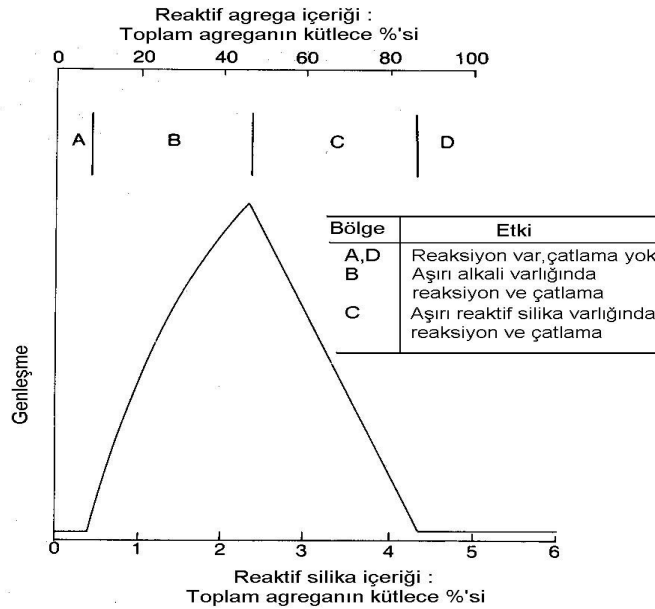
Alkali silis jelinin genişmesini açıklayan farklı teoriler geliştirilmiştir (Wilson, 1994). Ozmotik basınç teorisine göre, çimento hamuru, silikat iyonlarına karşı geçirimsiz bir membran gibi davranır (Hansen, 1944). Bu membran, içinden su, hidroksil iyonları ve alkali metal iyonlarının difüzyonuna izin verirken, silikat iyonlarının difüzyonuna izin vermez. Bu durumda oluşumuna devam eden reaksiyon alanı sınırlanmış çimento hamuruna artan bir basınç oluşturur (Andiç, 2002; Hobbs, 1988).

Prezzi ve diğer. (1997), genişmeyi kolloid kimyasındaki çift elektriksel tabaka teorisine modellemiştir: Sıvı içindeki katı yüzeylerde iyon izomorf yer değişimi, kimyasal reaksiyonlar veya iyon adsorpsiyonu sonucu elektriksel yük birikimleri oluşmaktadır. Çimento harcına değen ilk iyon tabakası sabittir ve katı yüzeydeki negatif yüklerin tutabildiği pozitif iyonlardan oluşur. İkinci tabaka ise arta kalan pozitif ve boşluk suyundaki negatif yüklerden meydana gelir. İkinci tabaka daha geniştir ve çimento harcından uzaklaştıkça çift elektriksel potansiyel azalır. Her iki tabakadaki yüklerin cebrik toplamı sıfırdır. İkinci tabakanın yük durumuna bağlı olarak genişliği arttıkça katı kısım çevresinde şişme meydana gelir. Tabakanın genişlemesi buraya intikal eden alkali katyonların artmasıyla belirginleşir (Akman, 1998).

Genleşme mekanizmasını açıklayan bir diğer teori de absorblanma teorisidir. Absorblanma teorisinde genleşme, jelin hacimsel konsantrasyonuna, gelişme hızına ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Jelin genleşme hızı yavaş olduğunda, jelin beton içerisinde yayılması sebebi ile içsel gerilmelerin oluşması önlenir. Jelin hızlı gelişmesi durumunda ise, içsel gerilmeler betonu genişletirip çatlatacak kadar yüksektir (Andiç,2002).

2.4.2 Pesimum Davranış

Alkali silika reaksiyonu sonucu betonda en fazla genişlemeye ve hasara neden olan reaktif agrega oranına “pesimum oran” denilmektedir. Betonda hızlı reaksiyona giren türde silis içeren agrega kullanıldığında belli oranda reaktif silis içeren agrega maksimum genleşme göstermektedir. Ancak ASR oluşumlarının hepsinde pesimum davranış görülmez. Şekil 2.4’de reaktif madde olarak %5 oranında opal içeren agreganın pesimum davranışı görülmektedir.



Şekil 2.4 ASR’de gözlenen pesimum davranış (Hobbs, 1988)

Şekildeki grafikte pesimum davranış A'dan D'ye dört bölgeye ayrılarak açıklanmıştır. A bölgesinde reaktif silis miktarı düşük olduğundan jel betonu çatlatacak kadar güçlü değildir. B bölgesinde reaksiyon beton sertleştikten sonra devam etmektedir ve jelin yoğunluğu betonu çatlatacak seviyededir. Genleşme reaktif silikanın tümü tüketildiğinde ve reaksiyon seviyesi yeteri kadar düştüğünde durur. Bu bölgede fazla miktarda alkali bulunmaktadır ve reaksiyon ürünlerinin birleşimi muhtemelen alkali/reaktif silika oranından bağımsızdır. C bölgesinde, reaksiyon beton sertleştikten sonra da devam eder, çatlama oluşur. Genleşme, boşluk suyundaki alkaliler bir eşik değer altına düştüğünde veya alkaliler tükendiğinde durur. Bu bölgede reaktif silika miktarı fazladır. Reaksiyon ürününün alkali/silis oranı ile su emme miktarı azalan alkali/reaktif silis oranı ile azalma gösterir. D bölgesinde, reaktif silika miktarı çok fazladır ve reaksiyon o kadar hızlıdır ki beton sertleştikten sonra oluşan jel miktarı çatlama yaratamaz. Betona zarar vermeyen fazla miktarda jel oluşur.

Maksimum genleşmenin olduğu kısımda, reaktif silika miktarı, hidroksil iyonu veya alkali konsantrasyonunu önemsiz seviyelere kadar indirebilir veya tüm sodyum ve potasyum alkalilerini tüketebilir (Tosun, 2001).

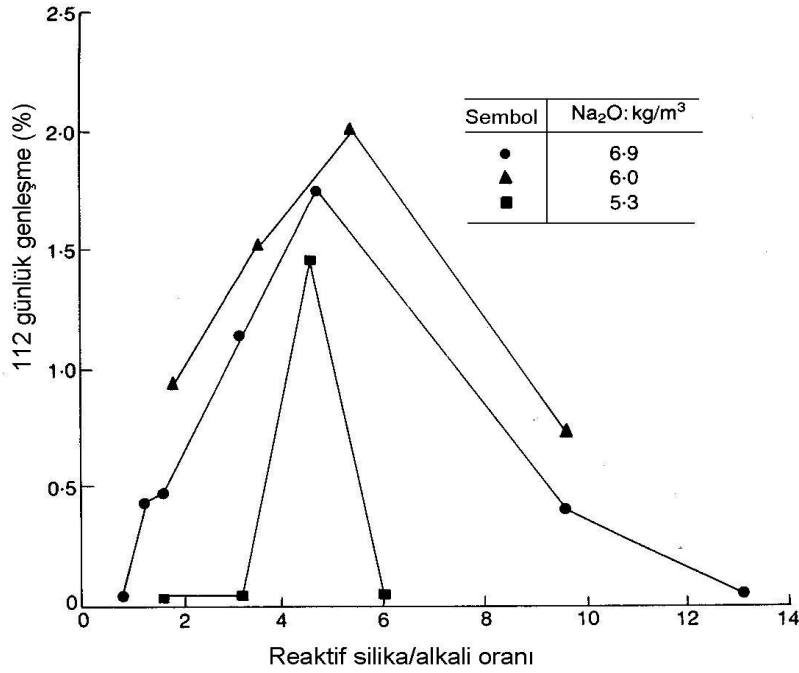
Pesimum oranı gösteren eğrinin şekli çimento çeşidinden, kompozisyonundan, oranından, agrega özelliklerinden ve aynı zamanda alkali miktarından da etkilenmektedir (Binal, 2004).

BÖLÜM ÜÇ

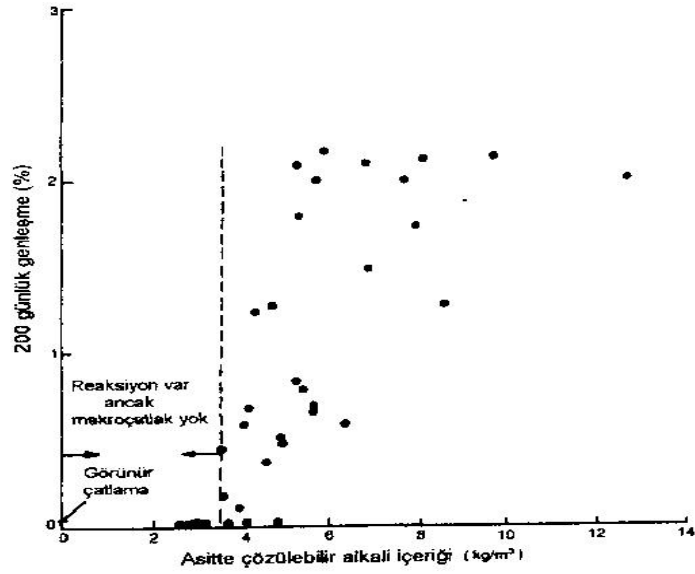
ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNU ETKİLEYEN FAKTÖRLER

3.1 Alkali İçeriğinin Etkisi

Betondaki çimentonun alkali içeriği, betonun hidroksil iyon konsantrasyonunun, betonun alkali içeriğinin, reaktif silis/alkali oranının değişmesinde etkilidir. Şekil 3.1 de suda beklemiş harç çubuklarının alkali içeriğinin genişlemeye etkisi gösterilmiştir. Kullanılan harç örneklerinin çimento içeriği 670 kg/m^3 , su/çimento oranı 0,4, agrega/çimento oranı 2'dir. Çimentonun alkali miktarı arttıkça pesimum davranış eğrisi genişler, maksimum genişme reaktif silis/ alkali oranı 4,5-5 arasında iken oluşmaktadır (Hobbs, 1988).



Şekil 3.1 Reaktif silika/alkali oranı ile genişme arasındaki ilişki(Hobbs,1988).



Şekil 3.2 Çimentonun alkali içeriği ile genleşme arasındaki ilişki(Hobbs, 1988).

Şekil 3.2’de en kritik reaktif silis/alkali oranlarına sahip harç örneklerinin 200 günlük genleşme-alkali içeriği (kg/m^3) grafiği görülmektedir. Farklı seviyelerde alkali içeriğine sahip çimentoların potasyum/sodyum oranları yüksektir ve harçlardaki çimento içerikleri $340\text{-}1250 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. Yapılan deneyler 5 yıl sürmüş olup deneylerde kullanılan harç çubuklarında alkali içeriği $3,5 \text{ kg/m}^3$ ‘ün altında olanlarda bu süre içinde çatlama ve genleşme görülmemiştir. Alkali içeriği $3,5 \text{ kg/m}^3$ ‘ün üzerinde olan harç çubuklarında uzun süreli genleşmelerde ani bir çıkış gözlenmiştir. Maksimum genleşme % 2,5 civarındadır.

Benzer alkali içeriklerinde farklı genleşme miktarlarına rastlanmıştır. Bunun nedenleri; çimentolardan farklı oranlarda alkali açığa çıkması, çimentoların sodyum/potasyum oranının farklı olması ve farklı hızlarda dayanım kazanımıdır (Hobbs, 1988; Tosun, 2001).

Beton yapılarda reaksiyonun olduğu durumların çoğunda kullanılan çimento yüksek alkalili çimentodur. Çimento içindeki sodyum ve potasyum oksitler çimentonun hammaddelerinden (kil, kireçtaşı, şeyl), özellikle kilden kaynaklanır. Klinkerdeki alkaliler, alkali sülfat, alkali alüminat, alkali silikat ve alüminoferrit formundadır. Alkaliler özellikle klinkerdeki SO₃ ile birleşirler. Çimento su ile karıştırılınca alkali sülfatlar hızla sıvı fazına geçip, hidroksit yoğunluğunu arttırlar. Alkali konsantrasyonu hızla yükselir ve 28 günde alkalilerin büyük kısmı çözeltiliye karışır (Baradan ve diğer., 2002).

Çimentonun üretim yöntemi de çimentonun alkali içeriğini etkiler. Çimento üretiminde son yıllarda enerji tasarrufu nedeniyle kuru yöntem tercih edilmektedir. Ancak bu yöntemde hammaddelerin ön ısıtılması sırasında kullanılan gazlar ve elektrofiltrelerde tutulan çok ince parçacıkların çimentoya tekrar katılması, çimentonun alkali miktarını arttırır (Hobbs, 1988; Farny&Kosmatka, 1997; Neville, 1997; Swamy, 1992).

Stanton, 1940'lı yıllarda çimento içeriği 600 kg/m³ 'ün üzerinde harç çubukları ile yaptığı deneyler sonucunda, çimentonun alkali içeriğinin kütlece % 0,6 'nın altında olması durumunda çatlama olmayacağı sonucuna varmıştır. Reaksiyonun oluşabilmesi için çimento alkali içeriğinin “eşdeğer Na₂O” değeri olarak % 0,6 değerini aşması gerekmektedir. Portland çimentosunun toplam alkali içeriği sodyum oksit eşdeğeri olarak aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Andiç, 2002).

$$(Na_2O)_e = Na_2O + 0.658 K_2O \quad 3.1$$

Potansiyel bir ASR tehlikesi söz konusu olduğunda Kanada ve Avrupa ülkelerinde betondaki alkali miktarı 3 kg/m³ ile sınırlanmaktadır. Genel olarak ASR nedeniyle oluşan genleşmelerin azaltılması veya önlenmesi için düşük alkalili çimento kullanımı başarılı bir çözüm olmaktadır (Baradan ve diğer., 2002).

Beton içine alkali girişinin sadece çimentodan kaynaklanması durumunda alkali içeriği aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Farny&Kosmatka,1997).

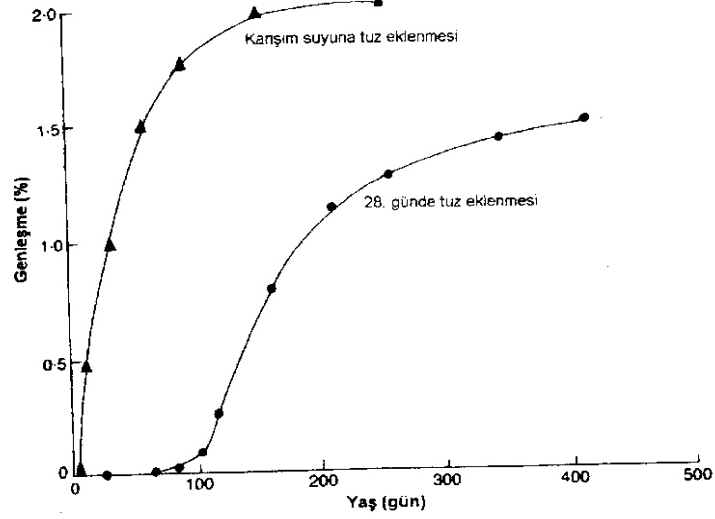
$$\text{Betonun Alkali İçeriği (kg/m}^3\text{)} = [\text{Alkali İçeriği (\%)}] * [\text{Çimento Dozajı (kg/m}^3\text{)}]$$

Çimento alkalilerinin yanı sıra bazı agregaların da betonun boşluk çözeltilerinin alkalinitesine katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Grattan-Bellew (1994), betonun boşluk çözeltilisinde hesaplanandan fazla miktarda alkali bulunmasının sebebinin kireçtaşı agregasındaki kil mineralleri olduğunu belirlemiştir.

Goguel (1995), su/çimento oranı ile ince agrega miktarı yüksek karışımlarda bazı bazaltların betonun boşluk suyunun alkalinitesini arttırdığının gözlemlemiştir.

Betonda alkalilerin asıl kaynağı çimento olmasına rağmen, başka kaynaklardan da alkali girişinin olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Buz çözücü tuzlar, deniz suyu, betonun kür suyu ve endüstriyel atık suları aracılığıyla betona dışarıdan giren alkaliler dış alkaliler olarak adlandırılır. Özellikle geçirimli betonlarda veya çatlama betonlarda dış alkalilerin ASR'ye neden olması kaçınılmaz olup, agregalardan da boşluk suyuna alkali geçişi olduğu belirlenmiştir (Andiç,2002).

Kar mücadelesinde kullanılan buz çözücü tuzlar, alkali kaynağı olmakla birlikte, diğer beton malzemelerden beton içine alkali göçüne olanak sağlamaktadır. Prizini almış betona buz çözücü tuzların uygulanması hidroksil iyon konsantrasyonunu dolayısıyla ASR'den etkilenmiş olan betondaki genleşme seviyesini veya çatlama riskini arttırabilir. Tuzun genleşme üzerindeki etkisi betonun farklı yaşları içinde incelendiğinde, 28 günlük harç örneklerine uygulandığında, tuzun karışım suyuna eklenmesine göre daha yavaş fakat oldukça büyük bir genleşme görülmüştür.



Şekil 3.3 Sodyum Kloridin ASR genleşmeleri üzerine etkisi
(Hobbs,1988).

Şekil 3.3'te NaCl'nin ASR nedeniyle harcın genleşmesi üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Harç örneklerinin su/çimento oranı 0,41, agrega/çimento oranı 2,75'tir ve sodyum klorid eklenmesi ile eşdeğer sodyum oksit seviyesi $5,2 \text{ kg/m}^3$ 'e ulaşmıştır. 20 ayda, pesimum oranda veya daha yüksek oranlarda opal içeren, çatlamış betonda genleşmede büyük artışa neden olmuştur. 15 yıllık betona tuz uygulandığında ise zaten ASR nedeniyle çatlamış betonda kayda değer bir artış gözlenmemiştir (Hobbs,1988).

Beton içerisindeki alkali metal tuzlarının sulu ortamda alkali hidroksitlere dönüşmesi, alkali agrega reaksiyonlarının oluşması için ilk basamaktır. Bu nedenlerden dolayı agrega içerisindeki alkalinin bağlı bulunduğu mineral önem taşımaktadır. Alkali içeren bazı minerallerin farklı sıcaklıkta 100 gr. su içerisindeki çözünübilirlikleri Tablo 3.1'de verilmiştir (Perry ve Green,1985).

Tablo 3.1 Alkali içeren bazı minerallerin 0 ve 100 °C sıcaklıkta suda çözünülebilirlikleri (Perry ve Green,1985).

MİNERAL	0°C	100°C
Arcanite(K_2SO_4)	7,35	24,1
Thenardite(Na_2SO_4)	5	42
Muscovite($3Al_2O_3.K_2O.6H_2O.2H_2O$)	Çözünmez	Çözünmez
Orthoclase($Al_2O_3.K_2O.6SiO_2$)	Çözünmez	Çözünmez
Albite($Al_2O_3.Na_2O.6SiO_2$)	Çözünmez	Çözünmez

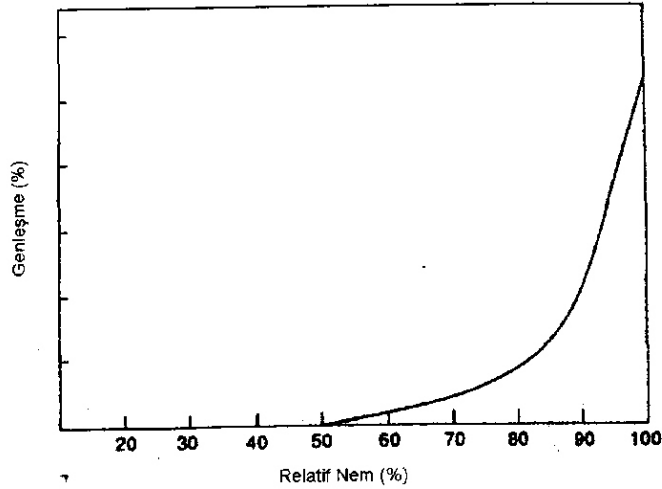
Yukarıdaki tablodan da görüldüğü gibi agrega içerisinde, tuz formunda olmayan alkali bileşikler alkali-agrega reaksiyonu yönünden zararsız sayılabilmektedir (Perry ve Green,1985).

3.2 Rutubet ve Sıcaklık Etkisi

Mevsim şartları ASR'yi olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ortamda bulunan nem ve sıcaklık artışı reaksiyonun hızlanmasına sebep olur. Sıcak iklim koşullarındaki yapılar, soğuk iklim koşullarındakilere göre ASR'ye karşı daha duyarlıdır.

Reaksiyonun başlaması ve devam etmesi için ortamda yeterli miktarda su bulunması gerekir. Su, silisin çözünmesine, alkali iyonlarının yayılmasına ve jelin büyümesine neden olur. Jel kuru hava şartlarında da oluşabilmektedir, ancak betonun genleşmesi ve sonuçta bozunmaya uğraması için ilave su gereklidir. Araştırmalar bağıl nem oranı %80 'in üzerinde olan betonlarda ASR genleşmelerinin oluştuğunu göstermiştir (Gillot ve Rogers, 1994).

Şekil 3.4'te relatif nem ile genleşme arasındaki ilişki gösterilmektedir. % 70 relatif nemin altındaki durumlarda genleşme ihmal edilebilir seviyededir ancak %80'in üstüne çıkıldığında genleşmede belirgin bir artış görülmektedir (Tosun, 2001).



Şekil 3.4 Relatif nemin ASR nedeniyle betonda oluşan genleşme üzerindeki etkisi (Tosun,2001).

ASR genleşmesini hızlandıran nemli ortamların yanı sıra kuruma-ıslanma tekrarı da betonda alkali taşınmasının kolaylaşmasına ve alkalilerin kuruma bölgelerinde yoğunlaşmasına neden olduğundan reaksiyonu hızlandırır.

Beton kuru ortamda bulunsa dahi boşluk suyu içerir ve kuruyan 10-20 cm üst tabakanın dışında beton içinde bağıl nem % 80-90 'dır. Yaklaşık % 80 'in altındaki relatif nem değerlerinde reaksiyon durmaktadır. Normal betonlarda bir miktar karışım suyu kuru ortamda bile uzun bir süre genellikle yüksek nem değerlerini sağlar. Bununla birlikte, düşük su/çimento oranlarına sahip karışımlarda su çimentonun hidratasyonu sırasında tüketilir. Bu durumda eğer dış kaynaklı bir su girişi varsa, reaksiyona giren maddelerden herhangi biri tükenene kadar reaksiyon sürecektir (Forster ve diğer.,1998; Swamy,1992; Tosun, 2001).

Nemin betona girişini ve reaksiyonu hızlandırmasını engellemek için düşük su/çimento kullanımı ve mineral katkı kullanımı yardımıyla geçirimsizliğin azaltılması yoluna gidilebilir.

Sıcaklık artışı, ASR'yi hızlandırır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte alkalilerin reaksiyon sahasına göçü ve jelin genişmesi hızlanır. Bu hızlanma sonuç genişleme değerini değiştirmez.

Jelin akışkanlığının artmasıyla birlikte çatlaklardan önemli bir basınç yaratmadan geçmesinden sonra, jelin su içeriğinin maksimum şişme basıncını veren bir seviyeye ulaştığı bir safha vardır. Düşük sıcaklıklarda bu periyot daha uzundur ve bu yüzden bir miktar daha fazla genişleme görülebilir (Poole,1992).

Sıcaklık artışı, agregaların büyük çoğunluğunda aşırı termal gerilmelere sebep olur. Bazı agregalarla yapılan araştırmalar, aynı koşullardaki harç örneklerinin 13-20 °C aralığındaki boy değişimleri ölçümlerinin 38 °C'dekinden farklı olduğunu göstermiştir.

Yüksek ve düşük sıcaklıkların genişleme etkisi agregaya bağlıdır. Agregaların büyük çoğunluğu daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla reaktiflik göstermektedir (Andiç, 2002).

Sıcaklığın 35-40 °C'nin üzerine çıkması ile agregaların reaktifliği artmaktadır. Larbi ve Hudec'in yaptıkları çalışmada farklı sıcaklıklarda (oda sıcaklığı ve 80 °C) reaksiyon sonucundaki genişmeler incelenmiş olup, oda sıcaklığında maksimum genişleme % 0,30 olurken yüksek sıcaklıkta % 0,50 'ye kadar çıkmıştır (Sahayan, 1998).

3.3 Reaktif Agregaların Cinsinin ve Boyutunun Etkisi

Alkali silika reaksiyonunun oluşumu için ortamda herhangi bir formda reaktif silis bulunması gerekir. Betona zarar verebilmesi için %2 gibi az bir miktar yeterlidir.

Reaksiyonun derecesini etkileyen en önemli parametre, agregada içindeki silisin formudur. Reaktif silis oldukça farklı doku ve kristal yapı sergiler. Silisin doku farklılığı, kayaçlaşma sürecinde azalan soğuma hızına bağlıdır. Agregadaki silisli mineral kayaçlar oluşum sürecinde soğuma hızına bağlı olarak amorf veya camsı (kristalleşmemiş) yapıdan kriptokristal, mikrokristal ve kristal yapıya kadar geniş bir yelpazeye dağılırlar. Bazı durumlarda kuvars kristallerinin oluşumu sırasında içsel gerilmeler oluşur, bu tür kuvars mineralleri içeren agregalar reaktiftir (Farny & Kosmatka, 1997; Swamy, 1992).

İri kristalli kuvarsın yüzeyi alkali hidroksitler tarafından çok az etkilenir. Bununla birlikte eğer kuvars flint veya çörtte olduğu gibi veya grovak gibi ağır metamorfizma geçirmiş ise reaktivite gösterebilir. Kumtaşları içerisindeki tridimit, kristobalit ve amorf silis iri kristalli kuvarslara göre oldukça reaktiftir (Johansen ve diğer.,1995; Sprung ve diğer., 1998).

Reaktivitedeki azalmaya göre silis mineralleri şu şekildedir: Amorf silis, opal, stabil olmayan kristalin silis, çört, kalsedon, silisin diğer kriptokristalin formları, metamorfik olarak ayrılmış ve bozunmuş kuvars, deforme olmuş kuvars, yarı kristalleşmiş kuvars, saf kuvars.

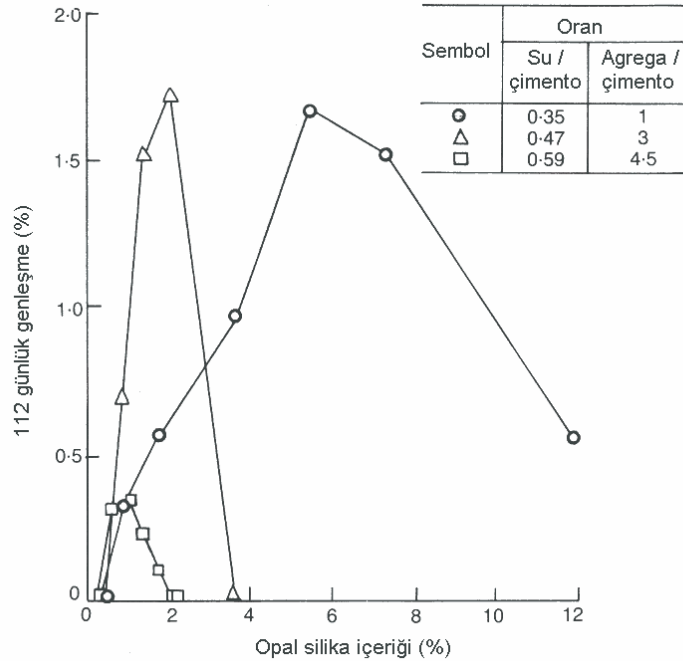
Reaktivitedeki azalmaya göre kayaçlar ise şöyledir: Tüfler dahil volkanik camlar, metakuvarsit metamorfize kumtaşları, ayrılmış granitik gnayslar, deforme olmuş granitik gnayslar, diğer silis içeren metamorfik kayaçlar, silisli ve mikalı şist ve filitler, iyi kristalize olmuş volkanik kayaçlar, pegmatitik (kabaca kristalize) volkanik kayaçlar, silis içermeyen kayaçlar (Andiç,2002).

Reaktif agreganın tane büyüklüğü de ASR sebebiyle oluşabilecek zararlar üzerinde etkilidir. Reaktif agreganın boyutunun etkisi, reaktif agreganın fiziksel ve mineralojik karakterine bağlıdır. Reaktif agreganın gözenekliliği de ASR bakımından önemlidir, gözenekliliği fazla olan agreganın içine boşluk çözeltisinin girişi daha kolay olmakta ve reaksiyon alanı artmaktadır (Andiç, 2002; Hobbs, 1988).

Agrega boyutu arttıkça maksimum genleşmeyi veren çimento/agrega oranı azalmaktadır. Agregada boyutu büyüdüğünde genleşmeler yavaş ilerlediğinden tek boyutlu agregada gradasyonunun kullanımının ASR genleşmelerini azaltmak açısından daha avantajlı olduğu söylenebilir (Andiç, 2002).

3.4 Karışım Oranlarının Etkisi

Betonu oluşturan bileşenlerin oranları ASR genleşmelerinin gelişimini etkiler. Reaktif agregada içeren bir betonun karışım oranları değiştirilerek betonun reaktif agregada içeriği, alkali içeriği, hidroksil iyonu konsantrasyonu değiştirilebilir. Bu değişim ASR genleşmelerini etkilemektedir. Düşük su/çimento oranları ve artan çimento dozajları geçirimsizliğin azalmasını sağlar. Böylece dışarıdan beton içine alkali ve su girişi, $(OH)^-$ iyonlarının beton içindeki hareketi kısıtlanarak ASR'nin gelişimi engellenebilir. Buna karşın dayanım kazanma hızının artması ile beton taze iken alkalilerin reaksiyona girip tükenmesi için gereken süre kısalsabilir (Baradan ve diğer., 2002; Hobbs, 1988).

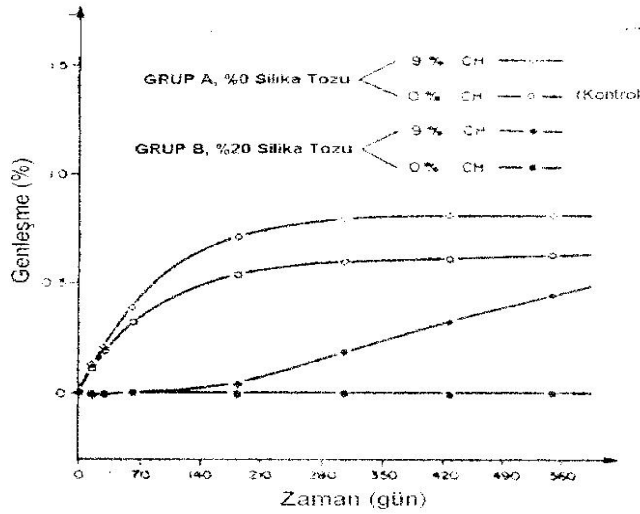


Şekil 3.5 Karışım oranlarının genleşme değerleri üzerindeki etkisi (Hobbs,1988).

Şekil 3.5’de farklı su/çimento ve agrega/çimento oranlarında 112 günlük genişleme değerleri incelenmiştir. Maksimum genişleme, reaktif silika/alkali oranının 3,5 ile 5,5 olması durumunda meydana gelmektedir. Düşük su/çimento ve agrega/çimento oranlarının seçilmesi ASR genişmelerini bir miktar azaltmaktadır (Hobbs, 1988).

3.5 Kalsiyum Hidroksit($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Etkisi

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ‘nin alkali silika reaksiyonu üzerindeki iki önemli etkisi, OH^- iyonlarının sağlanması ve Ca^{++} iyonlarına kaynak oluşturmasıdır.



Şekil 3.6 Kalsiyum hidroksit ASR nedeniyle harç çubuklarının genişmesine etkisi (Tosun, 2001).

Şekil 3.6’da $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ‘nin %2 opal içeren harç çubuklarının genişmesi üzerindeki etkisi görülmektedir. Harç çubukları dört takım içeren iki grup halinde dökülmüştür. Her iki grupta da $\text{Ca}(\text{OH})_2$ eklenmesi genişmelerin artmasına neden olmuştur (Wang ve Gillot, 1991).

Alkali iyonlarının silikaya saldırısı, silika taneciğindeki Si-O-Si bağlarına (OH^-) iyonlarının saldırısı ile sonuçlanır. Bu yüzden, (OH^-) konsantrasyonu ASR’de çok önemlidir. Doymun kalsiyum hidroksit çözeltisinin pH değeri 12,5’tir. Portland

imentosu betonunda boşluk suyunun pH değeri 12,5 değerinden büyüktür. Yüksek pH değeri de silikaya daha şiddetli bir saldırıya yol amaktadırdır. Reaktif silika içeren betonlarda hidroksil iyonları, siloksan ($\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$) gruplarının etkileşimi ile tüketilir (Tosun, 2001).

BÖLÜM DÖRT

ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNUN BETONA ETKİSİ VE REAKSİYONUN TESPİTİ

4.1 Alkali Silika Reaksiyonunun Gözle Görülür Etkileri ve Çatlaklar

Alkali silika reaksiyonundan etkilenmiş yapılarda genellikle şu belirtiler görülmektedir: çatlaklar, genleşme, yapısal elemanlarda deformasyonlar, çatlaklardan jel sızması ve kapak atmalar. ASR genleşmeleri ile ilgili en yaygın saha gözlemi beton yüzeyindeki çatlakların gelişimidir.



Şekil 4.1 Harita Çatlakları



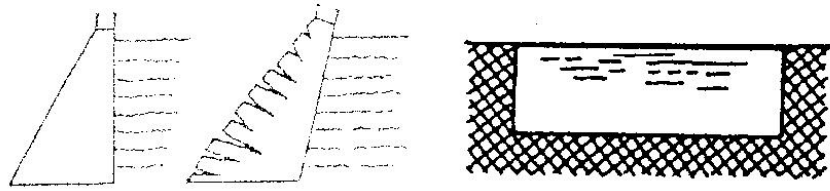
Şekil 4.2 Çatlaklar

ASR'nin yol açtığı çatlaklar Şekil 4.1 ve 4.2'de görülmektedir. Beton eleman eksenel bir gerilmeye maruz kalmadıysa, çatlak deseni ASR'nin karakteristik özelliği olan "harita çatlağı" şeklinde olmaktadır. Çatlama % 0,05 'lik bir genleşme ile başlamaktadır. Beton elemanda ASR'den dolayı oluşan çatlak genişliği genellikle 1mm 'den daha az ve 20–40 mm derinliğindedir. Bununla birlikte daha geniş ve derin çatlaklarda gözlemlenmiştir. Alkalinin sadece çimentodan geldiği durumlarda gözle görülür çatlakların oluşması 1–10 yılı bulmaktadır ve genelde çatlak genişliklerinin artması 8–20 yıl sonra durmaktadır. Betona başka kaynaklardan da alkali girişi olması durumunda bu süre artmaktadır (Baradan, 2002; Hobbs, 1990).

ASR'nin ürünü olan ve su emerek şişen jelin hacimsel artışı, beton içerisinde 10 MPa veya daha büyük çekme gerilmeleri doğmasına neden olmaktadır. Betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının yaklaşık 1/8-1/10'u kadar olduğu için ASR

genleşmeleri C40 sınıfında olan betonları bile kolayca çatlatabilmektedir. Jelin içinde depolanan potansiyel enerji bu çatlama ile boşalmaktadır (Farny ve Kosmatka, 1997; Tosun, 2001).

Düşey yük etkisinin fazla olduğu düşey elemanlarda basınç etkisi nedeniyle düşey doğrultuda beton serbestçe genişleyip deforme olmadığından, ASR çatlakları düşey yük doğrultusunda daha geniştirler. Geniş donatısız betonlar, bir yönde diğerine göre hareketin kısıtlanması daha fazla ise farklı davranış gösterir. Kütle barajlarında Şekil 4.3’de görüldüğü gibi çatlaklar yatay doğrultuda olma eğilimindedir (Tosun, 2002).



Şekil 4.3 Kütle barajlarında ASR genişmelerinden kaynaklanan çatlak oluşumu (Tosun,2001).

Betonarme yapılarda ASR çatlakları, kiriş ve kolonlarda boyuna donatılara paralel, doğrusal biçimde oluşur. Öngerilmeli betonlarda benzer şekilde fakat daha az geniş çatlaklar meydana gelmektedir (Figg, 1987; Tosun, 2002).

Çatlakların nedeni reaksiyon sonucu genişleyen alkali-silikat-hidrate jelin oluşumudur. Bu jel çimento hamurundan su emerek şişer ve mikro çatlaklara doğru yayılır. Buralarda da su emerek büyüyen jel oluşumları çatlakları büyütüp, özellikle agrega çimento ara yüzey bağını zedeleyerek betonun parçalanmasına yol açmaktadır (Baradan, 2002).

ASR’nin diğer bir göstergesi olan ‘pop-out’ kapak atma, beton yüzeyinden küçük konik parçaların kopması şeklinde olmaktadır. ASR’nin neden olduğu genişlemelerden kaynaklanan pop-out’lar yüzeyin hemen altındaki jelin potansiyel enerjisinin boşaltılması, gerilme fazlasının atılması isteğinin bir sonucudur (Tosun, 2001).

4.2 Alkali Silika Reaksiyonu'nun Tespiti İçin Kullanılan Deney Yöntemleri

Belli bir agreganın, Alkali Silika Reaksiyonu sebebiyle genişmeye yol açıp açmadığını belirlemek için genelde mevcut agreganın nitelikleriyle ilgili tecrübelerin dikkate alınması gerekmektedir. Bununla birlikte, agregadaki reaktif bileşenlerin %0.5 gibi küçük bir oranın dahi zarara yol açabileceği unutulmamalıdır (Tosun,2001).

Agreganın ya da agrega çimento birleşiminin reaktifliğinin tespiti için kullanılan pek çok deney metodu vardır. En sık kullanılan yöntemler, agrega-çimento karışımında uygulanan ASTM C227 ve ASTM C 1260 Hızlandırılmış harç çubuğu metotlarıdır.

4.2.1 Harç Çubuğu Metodu(ASTM C227)

Bu metot ile belirli şartlarda kürlenmiş harç numunelerinin, belirtilen süre sonundaki boy değişimleri (genleşme yüzdeleri) ölçülür. Kullanılan agrega standart sınıflandırmalara uygun olmalıdır. Agregaların petrografik incelemeleri ve kimyasal metot uygulanarak bu deney verilerinin değerlendirilmesi ve yorumlanması, çimento agrega kombinasyonlarının reaktivitesinin belirlenmesinde daha sağlıklı sonuçlar vermektedir. Kullanılan çimentonun alkali içeriği kütlece en az %0,6 Na₂O eşdeğeri olmalıdır. Genelde alkali içeriği % 1,0 - % 1,2 Na₂O eşdeğeri olan çimento kullanılır. Bu deneyde, agrega/ çimento oranı 2,25 ve akma değeri % 105-%120 arasında olacak şekilde 25*25*285 mm boyutlarında prizmatik kalıplarda en az 4 adet harç karışımı hazırlanır.

Numuneler, % 100 bağıl nem ortamında 37,8 °C (100 °F)'de kenarlarında ortamı nemli tutan fitil görevi gören kurutma kağıdının bulunduğu kapalı kaplarda su üzerinde saklanır ve periyodik olarak boy ölçümleri yapılır. ASTM C33 'e göre agregada potansiyel reaktivite olmadığı kabul edilen en yüksek genleşme altı ayda %0,10 ya da uzun test süreleri uygun olmadığı takdirde üç ayda %0,05 olmalıdır.

Deneyin sonuçları, çimentonun alkali içeriğinden, fitillerin bulunup bulunmamasından ve su/çimento oranından etkilenmemektedir. Bu deneylerin uygulanışında fitil kullanıldığında fitiller suyun çubuklar üzerinde yoğunlaşmasına sebep olur ve böylece alkaliler harçtan uzaklaşır. Deneylerde, 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 (Berube ve Fournier, 1992; Swamy, 1992).

Bu metodun bir diğer avantajı da çimento-agrega bileşimlerinin ASR'ye uygun ortam sağlayıp sağlamadıklarını ölçmesidir. Bunun yanı sıra, bazı yavaş reaktif agregaların reaktivitelerinin saptanamaması deneyin dezavantajıdır.

4.2.2 Kimyasal Metot (ASTM C289)

Bu test yöntemi etkin bir eleme testi niteliğindedir, silisli agregaların reaktivitesini ölçmede kullanılır. Bu yöntemde 25g.lık, 150–300 μm 'ye kırılmış üç adet agrega numunesi alkali çözeltide (1 N sodyum hidroksit) 80 °C'de bir gün bekletilir. 24 saat sonra çözelti filtre edilir ve asitte titre yöntemiyle çözülmüş silis miktarı ile alkalitedeki azalma ölçülür. Sonuçlar egride işaretlenerek kontrol edilir. Rc alkalitedeki azalmayı, Sc ise çözülmüş silisi ifade eder. Agrega üç aralıktan birine düşer: zararsız, zararlı ya da potansiyel zararlı.

ASTM C289 test metodu yavaş reaksiyona giren agregaların ölçümünde başarısızdır. Ayrıca magnezyum silikat içeren agregalar için doğru sonuçlar veremeyebilir.

Söz konusu test yararlı bir araştırma yöntemidir fakat hangi agregalarda reaktivite potansiyeli olduğunu saptamakta yetersiz olduğundan başka güvenilir testlere ihtiyaç duyulmaktadır.

4.2.3 Agregaların Petrografik Analizi (ASTM C295)

Petrografik inceleme, minerallerin cins ve yüzdelerine göre kayacın adlandırılması işlemidir. Agregalardan alınan ince kesitlerin optik mikroskop yardımıyla incelenmesi sonucu içeriklerinde bulunan potansiyel reaktif mineral fazların (reaktif silis) teşhisi mümkündür. X ışını yayılımı ve tarayıcı elektron mikroskobu gibi yöntemler de silisin saptanmasında faydalı olmaktadır (Andiç, 2002).

ASTM C295 yöntemi, agrega numunesinin analizinde kullanılan megaskopik ve mikroskopik yöntemler hakkında rehberlik görevi görür. Megaskopik analizde agrega numunesi benzer kaya türlerinden oluşan gruplara ayrılır. Potansiyel reaktif kaya türlerinin nicel analizi toplam agrega numunesi baz alınarak gerçekleştirilir. Mikroskopik analizde genelde petrografik mikroskop kullanılır ve ince agrega kesitleri polarize ışık altında incelenir. Kırılma indisi ve toz haline getirilmiş agrega numunelerinin özgül ağırlığı da ayrıca değerlendirilir. Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi elektron mikroskopları da agreganın mineral yapısını saptamada kullanılır. Röntgen ışını saptırma ve infrared spektroskopisi gibi analitik teknikler de agrega parçacıkları içindeki silisin formu ve kristal formunun saptanmasında kullanılmaktadır (Tosun, 2001).

Belirli bir agrega-çimento bileşiminin reaktifliği hakkında petrografik analiz tek başına sonuç vermemekle birlikte, agregalar üzerinde kimyasal metotlar, beton veya harç numuneleri ile testler uygulamadan önce petrografik analizin uygulanması, hem zaman kazandırmak açısından hem de uygulanacak metodun agrega tipine göre seçimini kolaylaştırmak açısından önerilmektedir (Berube ve Fournier, 1992; Hobbs, 1988).

4.2.4 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Metodu (ASTM C1260)

Bu metot, numune agregalar kullanılarak elde edilen harç çubuklarının yüksek alkaliniteli çözeltide yüksek sıcaklıkta saklanması ve uzunluk değişimlerinin ölçülmesinden ibarettir (Tosun, 2001).

İlk olarak Güney Afrika Ulusal Araştırma Bürosu (NBRI) tarafından uygulamaya konan bu yöntem daha uzun test sürelerine gereksinimi ortadan kaldıran nispeten daha hızlı bir test metodudur (Davies ve Oberholster, 1987).

Standartta belirtilen gradasyondaki agrega, kütlece çimentonun 2,25 katı kadar kullanılarak su/çimento oranı 0,47 olan harç karışımı hazırlanır. 25x25x285 mm. boyutlarındaki kalıplara dökülen harç numuneleri 24 saat sonra kalıplarından alınarak ilk boylar ölçülür. Kalıp sökümünden itibaren 1 gün süreyle 80° C 1 M NaOH çözeltisinde bekletilir ve periyodik ölçümleri alınır. Standart, çimentonun alkali miktarı hakkında bir değer vermez, çünkü kür koşullarından dolayı numunelerin boşluk çözeltisi alkalinitesi artmaktadır (Andiç, 2002).

14 gün sonunda % 0,1 gibi bir değer baz alındığında, hızlandırılmış harç çubuğu metodunun mineral katkıların etkinliği konusunda beton prizma metodu ile benzer sonuçlar verdiği farklı araştırmacılar tarafından belirlenmiştir. Bu sebeple, 2 yıl gibi bir bekleme süresinin olmadığı durumlarda bu metodun kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu deney mineral katkıların kullanım oranları hakkında daha koruyucu bilgiler vermektedir (Fournier ve Malhatra, 1999; Barringer, 1999).

Kanada Standardı, CAN/CSA A23.5 Kanada yöntemi olarak bilinen metotta, mineral katkıların etkinliğinin belirlenmesi amacıyla hızlandırılmış harç çubuğu metodu modifiye edilmiş şekilde kullanılmaktadır. Bu standart, mineral katkı konmayan kontrol numunesindeki agreganın minimum %0,30 gibi bir genişleme değeri vermesini şart koşmaktadır. Buna göre, deney süresi sonunda kontrol numunesi genişlemelerini %0,1 'in altına düşüren minimum katkı miktarı, kullanılabilir "emniyetli miktar" olmaktadır (Ramlochan ve diğer., 2000).

ASTM C1260'ın ağır deney koşulları yavaş reaksiyon gösteren ve C227 ile saptanamayan agregaların saptanmasında yararlıdır (Tosun, 2001).

4.2.5 Beton Prizma Metodu (ASTM C1293)

Bu metot, ASR nedeniyle betonda oluşan boy değişimi ile agregaların reaktivitesi hakkında fikir vermektedir. 75x75x285 mm ölçülerde hazırlanan numuneler sızdırmaz kap içinde su üzerinde %100 bağıl nemde 37,8°C 'de (100 °F) saklanır. Kullanılan numunelerin su/çimento oranı 0,42 ile 0,45 arasındadır. Bu oranda betonun alkali içeriği 5,25 kg/m³ değerindedir. Kullanılan çimentonun eşdeğer Na₂O içeriği, karışım suyuna NaOH eklenerek çimentonun kütlece %1,25'ine yükselir. Belirli koşullarda saklanan numunelerin boy değişimleri birinci gün alınan ölçümlerle karşılaştırılır ve %0,001'lik hata payıyla ölçümleri yapılır. Ölçümler 7,28 ve 56 gün sonra, ardından 3, 6, 9 ve 12 ay sonra alınır. Bir yıl sonundaki genişleme %0,04 veya daha fazla ise potansiyel tehlikeli davranış söz konusudur.

Bu metot, beton üzerinde uygulandığından, gerçeğe daha yakın sonuçlar vermekte ve bu sebeple diğer deney metotları yetersiz kaldığında kullanılmaktadır. Ancak, deneyin uzun sürmesi dezavantajdır (Andiç, 2002).

Bu metot, mineral ve kimyasal katkıların ASR genleşmelerine etkisi hakkında en gerçekçi sonuçları vermektedir. Mineral katkıların etkinliği değerlendirilirken, 2 yıllık genişleme değerinin %0,04 olarak alınması ve karışımın alkali içeriğinin çimentonun kütlece %1,25'i değerine arttırılması önerilmektedir (Lane ve Özyıldırım, 1999).

C1293 ile C227 arasında her ikisinde de çimento agrega bileşimi söz konusu olması açısından benzerlik mevcuttur ve her ikisinde de anlamlı sonuçlar elde edilmesi bir yılı bulabilir; C1293 testi, C227, C295, C289 veya C1260 testlerinden elde edilen sonuçları desteklemek amacıyla kullanılmalıdır (Tosun, 2001).

4.2.6 Kullanılan Diğer Deney Yöntemleri

Jel-Pat metodu, İngiltere’de ortaya çıkmış olup, petrografik mikroskop altında incelenemeyecek kadar ince dağılımlı reaktif silisin ortaya çıkarılmasına imkan vermektedir. Bu yöntemde, test edilen agregalardan oluşmuş düzgün yüzeyli harç örnekleri üç gün alkalin çözeltide bekletilir, yüzeydeki jel oluşumu mikroskopla incelenir. Bu yöntem ile reaktivite belirlenirse, beton veya harç prizma metotlarıyla doğrulanmalıdır (Hobbs, 1988).

Nordtest hızlandırılmış alkali silika reaktivitesi testi, 1978’de Chatterji tarafından geliştirilmiş olup, Danimarka’da uygulanmaktadır. Hazırlanan harç örnekleri 4-5 hafta suda, sonra 50 °C’de NaCl çözeltisinde saklanır. Periyodik olarak boy ölçümleri 8 hafta veya daha uzun bir süre ile alınır. ASTM C227’ye kıyasla deney süresini kısalttığı için önemlidir, ancak kullanımı yaygın değildir (Forster ve diğer., 1998; Tosun, 2001).

Alman Çözünme Metodu, opal ve flint içeren 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, kurutulup tartılan agregadaki kütle kaybı, “alkalide çözünebilir” olarak adlandırılır. Bu metot, agreganın alkalin ortamdaki kimyasal kararsızlığını ortaya koymakta ve çeşitli çimento kombinasyonlarıyla birlikte davranışını, genleşme yaratıp yaratmayacağını belirleyememektedir. Ayrıca, 1mm boyutunun altındaki agreganın potansiyel reaktiviteye katkısını gözönüne almamaktadır (Berube ve Fournier, 1992 ; Andıç, 2002).

Agregaların reaktivitesinin tespitinde ilk önce petrografik analiz yapılmalıdır. Böylece hem agregaların seçimi ve reddine karar verilirken hem de işlemin devamında kullanılacak deney yönteminin seçimi hakkında fikir vererek zaman kaybı önlenir. Hızlı deney yöntemleri arasında istatistiksel olarak en güvenilir ve rutin bir test olarak ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuğu metodu tavsiye edilir. Bu yöntem, şiddetli şartlar içermesi sebebiyle bazı zararsız agregalarda negatif

sonuçlar verdiğinden malzemeyi reddetmede kullanılmalıdır. Ancak, zararlı agregaların çok az bir miktarında yanlış değerlendirmeye yol aması sebebiyle emniyetli tarafta kalmayı sağlar (Andiç, 2002; Berube ve Fournier, 1992).

BÖLÜM BEŞ

ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA KARŞI ALINACAK ÖNLEMLER, ONARIM VE İLGİLİ STANDARTLAR

ASR'nu betonda zararlı etkilerini gösterebilmesi için temel olarak ortamda üç şartın varlığı gerekmektedir (Neville, 1995);

- 1- Yeterli nem,
- 2- Yeterince yüksek miktarda alkali hidroksit (Alkaliler),
- 3- Agregada kritik miktarda reaktif silika.

ASR'nu önlemek için çeşitli yöntemler mevcuttur, ancak öncelikle bu faktörlerden bir veya daha fazlasının ortadan kaldırılması bir önlem olarak ele alınmalıdır.

5.1 Reaktif Agreganın Saptanması ve Agregası Seçimi

Tüm agrega türleri ASR açısından zararlı değildir. Bu nedenle genelde sorun agreganın temin edilebilirliğidir. Birçok yerde reaktif agregayı beton yapımında kullanmamak ekonomik olmamaktadır. Agreganın kullanıldığı yerde yapılan gözlemler potansiyel bir tehlike olup olmadığı konusunda bilgi verebilir. Ancak değerlendirirken yapıların malzeme özellikleri (çimento alkalitesi dahil), karışım oranları, servis koşulları benzer olmalı ve serviste en az 10 yıl geçirmiş olmaları gerekmektedir (Forster ve diğer., 1998).

Yeni bir agrega kaynağı kullanılacağı zaman, petrografik inceleme ASTM C295'e göre yapılır. Analiz sonuçlarının genleşmeyi ölçmeye dayanan test yöntemleriyle doğrulanması gerekir.

Potansiyel reaktif agreganın kullanımının zorunlu olduğu durumlarda alınabilecek birkaç önlem vardır (Kosmatra ve Fiorato, 1991).

1-Kuşkulu agregayı, reaktif olmayan başka bir agregayla karıştırarak reaktif silika yoğunluğu azaltılabilir. Bu yöntem ABD'nin bazı bölgelerinde uygulanmaktadır.

Ancak opal gibi hızlı reaksiyona giren bileşen içeren agregalarda bu yöntem uygulandığında pesimum oranı nedeniyle durum daha da kötüleşebilir.

2-Kuşkulu agreganın taş ocağında üretilmesi esnasında ayrılması. Bu işlemin çoğu zaman başarıyla uygulanması zordur.

3-Ağır ortamda ayırma yöntemi reaktif bileşenin opal çörtlerindeki gibi düşük yoğunlukta olması durumunda başarılı bir yöntemdir fakat agreganın maliyetini çok artırır.

4-Yıkama ve fırçalama agreganın reaktif bileşenlerini azaltmak açısından faydalı olabilir. Agreganın denizden sağlanması durumunda yıkama sodyum ve potasyum tuzlarının uzaklaşmasını sağlar. Agreganın içindeki bazı çok ince reaktif parçaların puzolan gibi davranıp genleşmeleri azaltıcı etkisi olabilir. Ancak bu durumun deneylerle tespit edilmesi gerekebilir.

5-Agrecanın kimyasal tedavisi ile potansiyel reaktivitesi azalabilir. Bu yöntem astar (kaplama) tekniğiyle veya yüzeyin nötralize edilmesiyle uygulanmakta ve yeni bir araştırma alanı olarak görülmektedir. Örneğin, agreganın alkalın kalsiyum fosfat çözeltisiyle ıslatılmasıyla genleşmelerin azaldığı ifade edilmiştir (Hudec ve Larbi, 1989).

Alınacak önleme karar verilirken, reaktif maddenin türü, üretim yöntemi, yöntemin ekonomikliği göz önüne alınmalıdır. Özel bir agrega türü için veya özel bir bölge için tek bir çözüm mevcut olabilir.

5.2 Alkalilerin Azaltılması ve Çimento Seçimi

ASR'nun potansiyel hasarını en aza indirmek için beton bileşenlerin alkali içeriğinin sınırlandırılması (böylece betonun hidroksil iyon konsantrasyonunun ve pH'ının düşürülmesi) uygulanabilir. Bazı reaktif silikalar diğerlerine göre ASR

açısından daha hassastır. Bu nedenle hidroksil iyon konsantrasyonunun düşürülmesi için gereken seviye değişken olmaktadır (Forster ve diğer., 1998).

Betondaki alkalinin ana kaynağı çimentodur. Az miktarda alkali puzolanlardan veya cüruftan kaynaklanabilir. Bununla birlikte alkali içeriği %5'ten fazla olan uçucu kül de, beton boşluk çözeltisindeki alkali seviyesini artırır. Bazı kimyasal katkıları (sodyum içeren su azaltıcılar); ve karışım suyu (özellikle tuzlu sular) alkali içeriğini artırır (Tosun,2001).

Betonun servis ömrü boyunca maruz kalacağı denizden veya buz çözücü tuzlardan kaynaklanan dış alkalilerin de dikkate alınması gerekmektedir (Forster ve diğer.,1998).

Yapılan çalışmalar ile, olgun çimento harcının boşluk suyu alkalitesi veya hidroksil iyon konsantrasyonunun Portland çimentosunun alkali içeriğine ve su/çimento oranına göre değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir(Tosun,2001).

Harç çubuğu ve beton prizma deneylerinde yüksek alkalili çimentolar, yüksek genleşme değerleri vermişlerdir. ASTM C150 reaktif agregalar ile düşük alkalili çimentoların (eşdeğer sodyum oksit oranı %0,6 veya daha az olan) kullanılmasını önermektedir. Bununla birlikte, bu oranlarda alkali içeren çimentolar da bazen betonda ASR genleşmesi oluşturmuşlardır (Ozol ve Dusenberry,1992).

5.3 Rutubet ve Geçirimsizliğin Azaltılması

Yüksek nem, ASR'nun devamı için mutlaka gereken bir şarttır. Betonun boşluk suyu, alkalilerin ve hidroksil iyonlarının reaktif agregaların olduğu yere taşınmasını sağlar. Bununla birlikte reaksiyon sonucu oluşan jel su emerek şişer ve beton kütlelerinin genleşmesine yol açar. Betonu kuru tutmak ve su ile temas etmesini önlemek, reaksiyonun durdurulması açısından etkin bir yoldur.

ASR genişmesinin oluşabilmesi için betonun reaktif neminin %80'i aşması gerekmektedir. Atmosfere açık ve suyla temasta olan yapıların (yol kaplamaları, köprüler, su tutma yapıları, sualtı yapıları) ASR genişmelerine maruz kalma olasılıkları yüksektir. Kurak bölgelerdeki betonların dış kabuk bölgesi (yaklaşık 50mm) kuruyarak kritik reaktif nem değerinin altına düşer. Fakat bu durumda yüzeydeki alkali yoğunluğu artarak reaksiyonun başlamasına neden olur (Tosun, 2001).

Betonda geçirimsizliğin azaltılması, iyon hareketini kısıtlayacağından reaksiyon oluşumunu geciktirir. Ancak betonun geçirimsiz olmasının bazen olumsuz etkileri de vardır. Düşük su içerikleri boşluk suyu içindeki alkali yoğunluğunun artmasına neden olur, düşük su/çimento oranı nedeniyle boşluk hacminde meydana gelen düşme oluşan jelin hareketini kısıtlayarak, genişleme etkisinin hasara yol açmadan geçirme etkisini azaltır. Bu nedenle betonda puzolanların kullanımıyla geçirimsizliğin artırılması sadece su miktarını azaltarak elde edilen geçirimsizliğe kıyasla tercih edilmektedir (Tosun, 2001).

5.4 Mineral Katkı Maddesi Kullanılması

Mineral katkıları, kendi başına bağlayıcı özellik taşımayan ince öğütüldüğünde ve nemli ortamda çimento hidrotasyonu sonucu açığa çıkan kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğine sahip bileşenler oluşturan silisli veya silisli-alüminli malzemelerdir. Mineral katkı olarak uçucu kül, silika tozu, yüksek fırın cürufu, doğal puzolanlar, zeolit, metakaolin kullanılan maddelerdir (Andiç, 2002).

Mineral katkıların ASR sebebiyle oluşabilecek zararlı genişmeleri önlemek için kullanılması, betonun dayanımı ve durabilitesini artırması açısından da önemlidir. Mineral katkı kullanımı ekonomik olmasının yanı sıra teknik olarak, enerji tasarrufu, çevrenin korunması açısından da avantajlıdır (Swamy, 1992).

Betona mineral katkı olarak ilave edilen uçucu kül ve silis dumanı iyonları genellikle alkali ve OH^- iyonları konsantrasyonunu azaltır. Hatta uçucu külün,

kendisini oluşturan camsı yapısının içinde, nispeten yüksek konsantrasyonda alkali iyonları içermektedir. Silis dumanındaki hızlı reaksiyon camsı yapıdaki nispeten az alkali içeriğini serbest bırakır, fakat geriye kalan silis dumanı çimento hidrasyonu sonucu oluşan alkali iyonlarını (ve OH^- iyonlarını) uzaklaştırır ve daha sonraki ASR için gerekli olan konsantrasyonu azaltır (Abit, 1998).

Puzolanlar, çimento harcının kirecini tutarak ortamın pH derecesini indirger ve silisin çözünürlüğünü azaltarak ASR genleşmelerini ve jel oluşumunu engeller. Puzolanların bir diğer faydası da sağladıkları geçirimsizliktir (Baradan, 2002).

Jel yapısında daima CaO mevcuttur. CaO oluşmaması, jelin oluşmayacağını gösterir. Puzolanların CaO'ı bağlayarak da jel oluşumunu önledikleri söylenebilir (Akman, 1992).

ASR genleşmelerini kontrol eden mineral katkı maddelerinin etki mekanizmaları konusunda aşağıdaki teoriler öne sürülmüştür (Tosun,2001; Xu, ve diğer., 1995; Forster ve diğer., 1998; Glasser, 1992):

- a) Mineral katkı maddeleri ile çimento arasında oluşan puzolanik reaksiyon ile daha yoğun bir yapıya sahip olan çimento harcının geçirimsizliği azalır. Bu nedenle beton içinde iyonların hareketliliği ve dışarıdan alkali ve nemin girişi de azaltılmış olur dolayısıyla reaksiyonun oluşum hızı büyük oranda azaltılmış olur.
- b) Mineral katkı maddeleri ile daha yüksek değerlere ulaşan betonun dayanımı, ASR genleşmesi nedeniyle oluşan gerilmelere karşı mukavemetin artmasını sağlar.
- c) Puzolanik reaksiyon çimento harcındaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içeriğini azaltır. ASR jeli de bu oranda azalan miktarlarda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içereceği için daha az şişme özelliği gösterir.

- d) Mineral katkıları boşluk suyunun alkalinitesini azaltır. Çimento ile puzolonik reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin CaO/SiO_2 (C/S) oranı düşüktür. Oluşan C-S-H jeli daha fazla alkaliyi bünyesinde tutabilme özelliğine sahiptir ve daha az alkali açığa çıkar. Ayrıca katkı içeren karışımlar sadece çimento içeren karışımlara kıyasla daha yüksek efektif su/çimento oranına sahiptirler, bu da alkali içeriğinin daha çok azalmasını sağlar.

Mineral katkıların etkileri incelenirken uygulanan deney yöntemleri de önem taşımaktadır. Hızlandırılmış harç çubuğu metodu mineral katkıların etkinliğini karşılıklı olarak belirlemede uygun ve hızlı bir metottur (Andiç, 2002).

ASR genleşmelerini önlemek için kullanılan başlıca mineral katkıları aşağıda ayrı ayrı ele alınmıştır.

5.4.1 Uçucu Kül

Düşük kalorili olmaları nedeniyle başka yerlerde kullanılmayan kömür ve artıkları, öğütülüp pulvarize halde yakılarak termik yoldan elektrik enerjisi elde etmek için kullanılır. Uçucu kül, termik santrallerde toz halindeki kömürün yanmasından sonra baca filtrelerinde tutularak elde edilir. Enerji ihtiyacının artmasıyla birlikte termik santrallerdeki uçucu kül birikimi de çok büyük miktarları bulmaktadır. Uçucu küller önemli yer işgal etmekte ve çevreyi kirletmektedirler. İnşaat sektöründe uçucu kül, kontrollü olarak kullanımı ile ekonomik bir şekilde değerlendirilebilmektedir (Baradan, 2000).

Uçucu küller, bileşimlerine bağlı olarak ASTM C618'e göre C sınıfı ve F sınıfı olmak üzere iki gruba ayrılırlar. F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürden veya antrasitten üretilir.

Puzolonik özelliklere sahip, düşük kalsiyum içerikli (CaO kütlece %5 den azdır) F sınıfı uçucu küllerin $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ içerikleri %70'den fazladır. C sınıfı uçucu küllerin $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ içerikleri %50'den fazla olup, linyit veya yarı bitümlü

kömürden elde edilir. Kalsiyum içeriği yüksek olup (kütlece %10 ile %40 arasındadır), puzolonik ve bağlayıcılık özellikleri taşımaktadır.

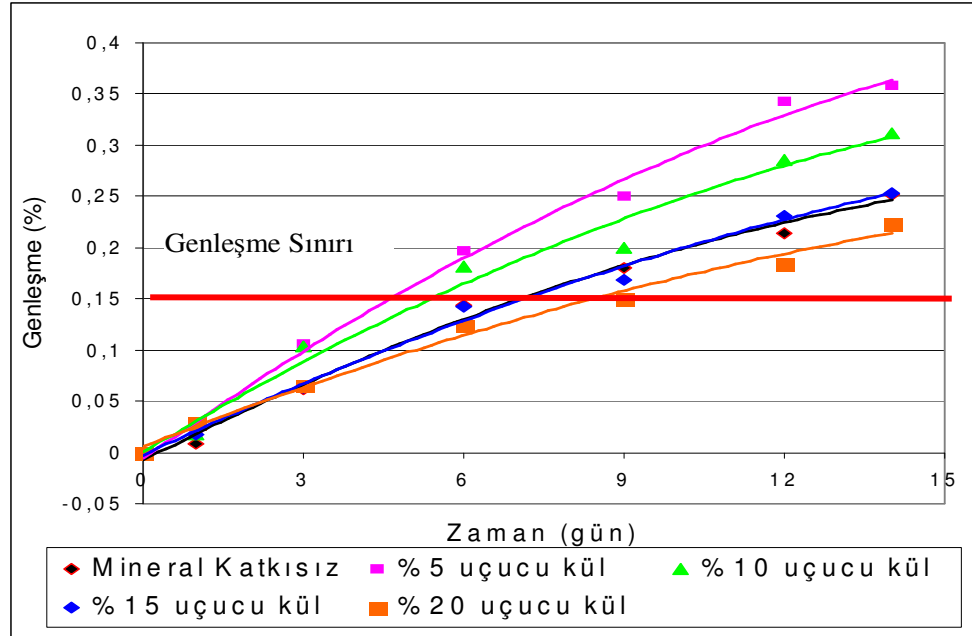
Uçucu külün kullanımı, ASR nedeniyle oluşan genleşmelerin engellenmesinde ya da azaltılmasında kullanılan bir yöntemdir. Uçucu kül ilavesinin ASR'nun sebep olduğu genleşmeyi azaltmasının mekanizması aşağıdaki şekilde açıklanmaktadır (Tosun, 2001):

- 1) Uçucu kül ilavesiyle, betondaki suda çözülebilir alkali konsantrasyonu azalır.
- 2) Uçucu kül ile Ca(OH)_2 'in reaksiyonu, boşluk çözeltisinin pH'ını düşürür. Bu da agregadaki silis ile alkali arasındaki reaktiviteyi azaltmaktadır.
- 3) Uçucu külün oldukça reaktif olan amorf fazı, genleşmeyen bir jel oluşturarak çimentodaki alkalinin tükenmesini sağlayabilmektedir.
- 4) Nemin betonun içine doğru hareketi uçucu külün betonun geçirgenliğini azaltması sonucunda kısıtlanmaktadır.

Uçucu kül, katkılı çimento üretiminde kullanıldığı gibi betonda belli oranlarda çimento veya ince agrega yerine de kullanılmaktadır. Uçucu kül, taze betonda sabit su/çimento oranında işlenebilirliği arttırmaktadır. Sertleşmiş betonda ise dayanım kazanma hızını yavaşlattığı için erken yaşlardaki dayanımı düşürürken, ileri yaşlardaki dayanımı arttırmaktadır. Ayrıca uçucu külün puzolonik özelliği nedeniyle oluşturduğu ikincil C-S-H'larla yapıyı daha yoğun hale getirerek, agrega-harç arayerini iyileştirir ve bunun sonucunda geçirimsizlik azalır. Bu nedenle çeşitli kimyasal ve fiziksel etkilere karşı betonun durabilitesi artmaktadır (Andiç, 2002).

Tosun (2001), C sınıfı uçucu külün belirli oranlarda çimento yerine kullanımının ASR nedeniyle oluşan genleşmelerin kontrol altına alınması üzerindeki etkinliğini incelemiştir. Çalışmaları sonucunda, uçucu külün %5, 10, 15 oranlarında çimento yerine kullanımının, genleşmeleri kontrol karışımına kıyasla arttırdığını, %20 ve

%25 oranlarında uçucu kül kullanımının genleşmeleri azalttığını ancak sınır genleşme değerinin aşıldığını, %30 ve daha fazla uçucu kül içeren örneklerin genleşme değerlerinin ise sınır genleşme değerinin altında kaldığını tespit etmiştir. Şekil 5.2 'de çimento yerine belirli oranlarda uçucu kül içeren harç çubuğu örneklerinin zamana bağlı genleşme davranışı görülmektedir.



Şekil 5.2 Uçucu kül içeren harç çubuğu örneklerinin zamana bağlı genleşme davranışı (Tosun, 2001).

Mehta ve arkadaşlarının bir çalışmasında, çimentonun düşük orandaki uçucu kül ile ikamesinin ASR genleşmelerini azaltmadığını saptamıştır. Bununla birlikte, %25 ve daha fazla miktardaki uçucu kül ikamesi, ASR genleşmelerini azaltmada oldukça etkili olmuştur (Prezzi ve diğer., 1997).

Yapılan araştırmaların sonucunda, F sınıfı uçucu külün %15-30 oranlarında ikamesi sonucu ASR genleşmelerini azaltıcı etkisi olduğu kabul edilmiştir. C sınıfı uçucu külün en az %30 oranında kullanımının etkili olduğu saptanmıştır. Uçucu külün daha az miktarlarda kullanımı ASR genleşmelerini arttırabilmektedir (Forster ve diğer, 1998; Abit, 1998).

Uçucu küllerin çeşitliliği sebebiyle araştırmacılar, ASR genleşmeleri üzerindeki etkileri hakkında çoğu zaman çelişkili görüşler öne sürmektedir. Bu çelişkilerin sebebi, araştırmalarda kullanılan uçucu küllerin ve çimentoların kimyasal ve minerolojik özelliklerinin ve agregaların reaktivitelerinin farklı olmasıdır (Andiç, 2002).

5.4.2 Yüksek Fırın Cürufu

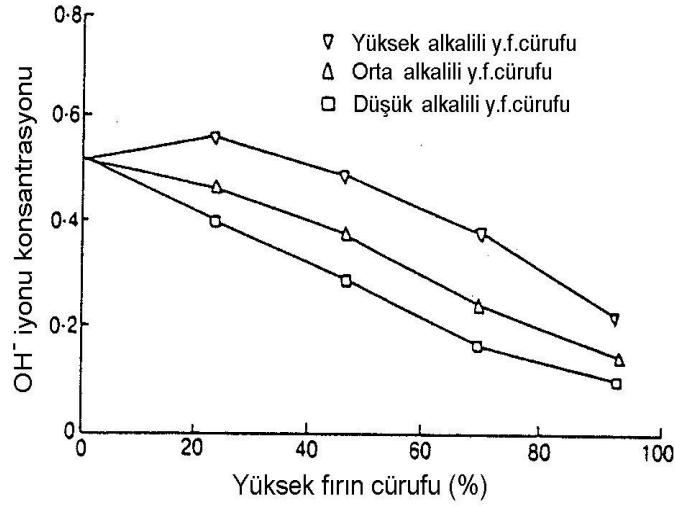
Demir cevherinden demir üretimi sırasında yüksek fırında demir alındıktan sonra kalan kireçtaşı veya dolomit varlığında erimiş maddeye cüruf denmektedir. 1500-1600 °C sıcaklığındaki eriyik halde bulunan cüruf yaklaşık olarak, %30-%40 oranında SiO₂ ve %40 oranında CaO içerir. Bu bileşim Portland çimentosunun kompozisyonuna benzemektedir. Cüruf çimento üretiminde özel işlemlerle kil yerine, beton üretiminde agrega yerine ve bağlayıcı maddelerle (Portland çimentosu, kireç, alçı) karıştırılarak da kullanılabilir (Baradan, 2000; Forster ve diğer., 1998; Hooton ve diğer., 2000).

Cürüflü çimentolar, C-S-H jelinin, yapısında Na⁺ ve K⁺ iyonlarını tutması nedeniyle, ASR genleşmelerini azaltmaktadır. Portland çimentolarında, bu alkali iyonları, Portland çimentosu hidratlarının yüksek Ca/Si oranlı C-S-H jeli vermesiyle beton boşluk suyu çözeltisinde çözünürler (Türker ve diğer., 1998).

Yüksek fırın cürufunun inceliği, priz süresi, kötü sıkıştırma sebebiyle hapsolan hava miktarı, dayanım artışı ve permabilite gibi parametreler de cüruf kullanılan betonlarda ASR genleşmelerini etkilemektedir. Ancak yüksek fırın cürufunun en önemli etkisi hidroksil iyonu içeriğini azaltma özelliğine sahip olmasıdır (Hobbs, 1988).

Yüksek fırın cürufunda bulunan alkaliler camsı fazda olup, Portland çimentosundaki alkalilere nazaran daha yavaş bir hızla açığa çıkarlar. Yüksek fırın cürufunun toplam alkali içeriği (asitte çözünebilir alkali) kütlece %0,3 ile %2,6 eşdeğer sodyum oksit değerleri arasında değişmektedir.

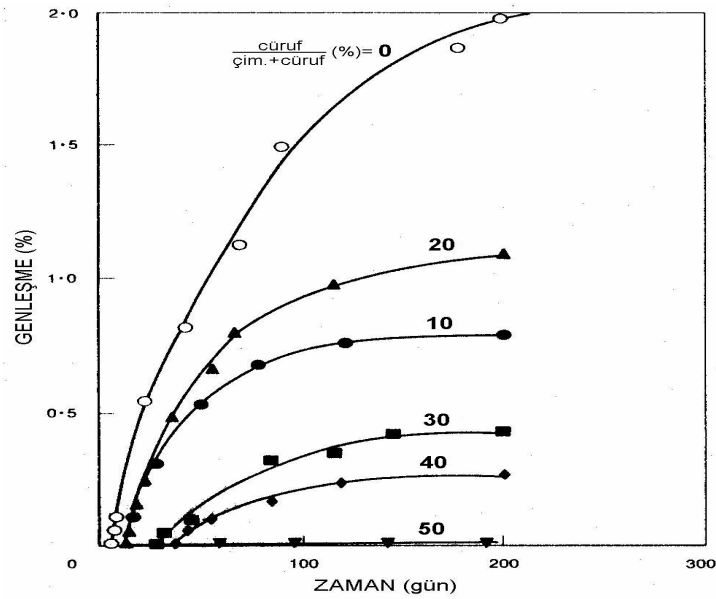
Şekil 5.3'de üç farklı alkali içeriğine sahip değişik oranlarda yüksek fırın cürufunun, hidroksil iyonu konsantrasyonu üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 5.3 Yüksek fırın cürufunun (OH⁻) konsantrasyonu üzerindeki etkisi (Hobbs,1988).

Şekil 5.4'de farklı oranlarda yüksek fırın cürufunun zamana bağlı genleşme davranışı görülmektedir. Örneklerde,

$$\left\{ \frac{\text{su}}{\text{çimento+cüruf}} \right\} = 0,4 / \left\{ \frac{\text{agrega}}{\text{çimento+cüruf}} \right\} = 2,75 \text{ dir.}$$



Şekil 5.4 Farklı oranlarda yüksek fırın cürufunun zamana bağlı genleşmesi (Hobbs,1982).

Yüksek fırın cürufunun ASR genleşmeleri üzerinde etkisini gösterebilmesi için %25-50 oranlarında kullanılması gerekmektedir (Forster ve diğer., 1998).

5.4.3 Silis Dumanı

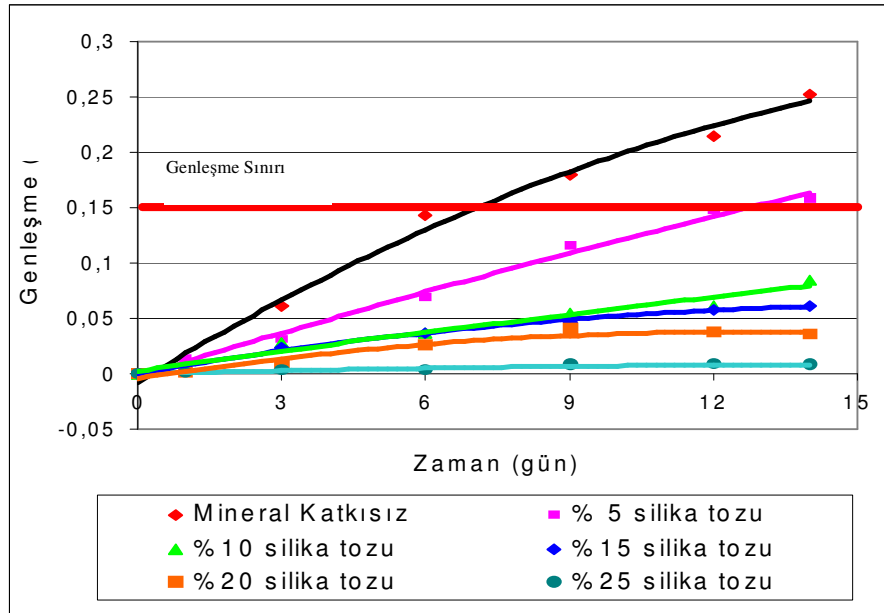
Silis dumanı, ferrosilikon ve silikonlu metal elektrik ark fırınlarında hammadde olarak kullanılan saf kuvarsın kömürle redüklenmesi sonucu elde edilir. Hava kirlenmesini önlemek açısından elektrofiltrelerde toplanan çok ince, duman niteliğinde olan bu artık yüksek oranda (%85-%99) amorf silis içermektedir. Silis dumanı, Portland çimentosunun taneciklerinden yaklaşık 100 kat daha küçük olup, ortalama tanecik çapı $0,1 \mu\text{m}$ 'dir. Ayrıca, özgül alanı $300\text{--}500\text{m}^2/\text{kg}$ olan Portland çimentosuyla karşılaştırıldığında, silis dumanı çok yüksek yüzey alanına ($2000 \text{m}^2/\text{kg}$) sahiptir. Silis dumanı yüksek puzolonik aktiviteye sahiptir (Baradan, 2000).

Silis dumanı, yoğun ve geçirimsiz bir yapı oluşturarak su ve alkalilerin hareketini önler, geniş özgül yüzeyi ile alkalileri bağlayarak boşluk çözeltisinin alkali konsantrasyonunu düşürür. Ayrıca silis dumanının amorf halde bulunan silis içeriği, çimento yerine kullanıldığında, beton henüz tazeyken çimentonun alkalileri ile 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 sırasında tükenir. Betonun dayanım kazanmasından önce gelişen bu reaksiyon zararlı genleşmeler ve çatlaklara yol açmaz (Andiç, 2002).

Silis dumanının ASR genleşmeleri üzerindeki etkisi kullanılan silis dumanı miktarının yanı sıra kimyasal kompozisyonuna (SiO_2 ve alkali içeriğine), çimentonun tipine, alkali içeriğine ve inceliğine bağlıdır (Andiç, 2002).

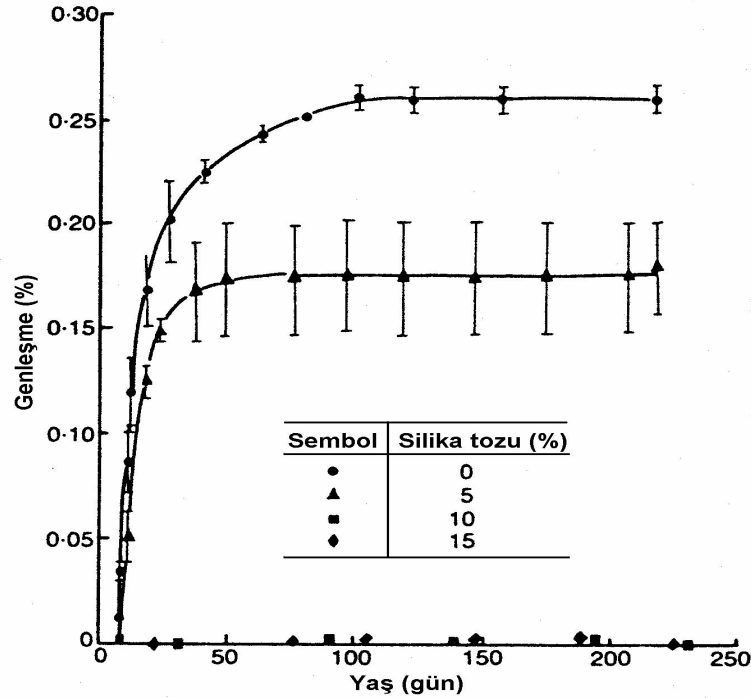
Tosun (2001), silis dumanının belirli oranlarda çimento yerine kullanımının ASR nedeniyle oluşan genleşmelerin kontrol altına alınması üzerindeki etkinliğini incelemiştir. Çalışmaları sonucunda, silis dumanının %5 oranında çimento yerine

kullanımının, genleşmeleri kontrol karışımına kıyasla azalttığını fakat sınır genleşme değerinin aşıldığını, %10 ve daha yüksek oranlarda kullanımının genleşmeleri oldukça azaltarak sınır genleşme değerinin çok altında kaldığını belirlemiştir. Şekil 5.5 'de çimento yerine belirli oranlarda silis dumanı içeren harç çubuğu örneklerinin zamana bağlı genleşme davranışı görülmektedir.



Şekil 5.5 Çimento yerine % 5-25 oranlarda silis dumanı içeren harç çubuğu örneklerinin zamana bağlı genleşme davranışı (Tosun,2001).

Şekil 5.6'da toplam agreganın kütlece %1,0'i kadar opal silika içeren 20 °C'de suda kür edilen beton örneklerinin zamana bağlı olarak genleşme davranışı görülmektedir. Örneklerin su/(çimento+silis dumanı) = 0,41, agrega/(çimento+silis dumanı) oranı=3, (Na₂O)_e alkali içeriği ≤ 5 kg/m³'tür. (Forster ve diğer., 1998; Hobbs, 1988).



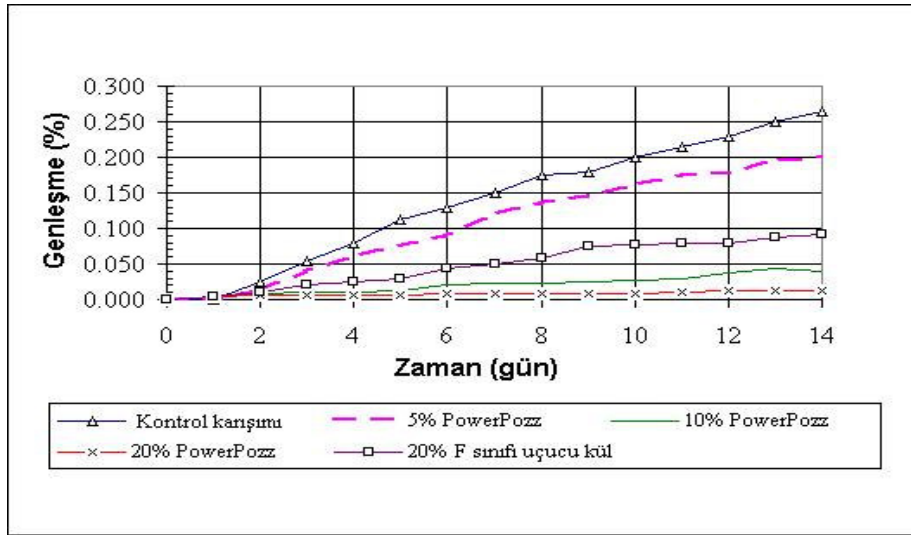
Şekil 5.6 Silis dumanının farklı oranlarının ASR genleşmeleri üzerindeki etkisi (Hobbs,1988).

Sertleşmemiş betondaki silis dumanının bir kısmı topaklaşarak kalmaktadır. Yoğunlaştırılmış silis dumanı topakları reaktif agrega taneciği gibi davranarak ASR genleşmelerini artırabilir. Silis dumanının çimento içine homojen olarak yayılmasını sağlamak için çimentoyla birlikte öğütülmesi mümkündür (Diamond, 1997; Forster ve diğer.,1998; Gudmundsson ve Olafsson, 1999).

5.4.4 Metakaolin

Yüksek reaktiviteli metakaolin, silika tozu ve uçucu kül gibi bir yan ürün olmayıp, termal aktiviteye sahip, saflaştırılmış kaolinit kilinin 650-800 °C sıcaklıkları arasında işlem görmesi ile elde edilen su içermeyen alümina-silikattan ($Al_2Si_2O_7$) oluşan ve yüksek reaktivite gösteren amorf bir malzemedir. Metakaolin portland çimentosunun kısmi yer değiştirmesiyle, $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum-silikat-hidratenin yapısına

benzer ürünler oluşturur. Çimento yerine etkin miktarda kullanıldığında betonun boşluk suyunda $(OH)^-$, $(Na)^+$, $(K)^+$ iyonlarının konsantrasyonlarını azaltarak pH değerini düşürür ve permabiliteyi azaltır. Bu özellikleri nedeni ile son yıllarda ASR genleşmelerini engelleyen mineral katkılarına alternatif olarak düşünölmeye başlanmıştır. Şekil 5.7 'de Power Pozz olarak adlandırılan bir yüksek reaktiviteli metakaolinin genleşmeyi azaltıcı etkisi F sınıfı uçucu külle karşılaştırılmalı olarak görölmektedir (Tosun, 2001).



Şekil 5.7 %5-10-20 oranlarında, çimento yerine kullanılan PowerPozz metakaolinin zamana bağılı olarak genleşme üzerindeki etkisi(Tosun, 2001).

5.4.5 Doğal Puzolanlar

Doğal puzolanlar, doğal olarak oluşan amorf yapıda silika içerir veya, ASTM C618'e göre N sınıfı olarak tanımlanan, amorf silikayı elde etmek üzere işlem görmüş malzemelerdir. Doğal puzolanlar, volkanik küller, tüfler (traslar), kil, şeyl ve pomza taşıdır (Baradan, 2000).

Puzolanlar, çimento harcının kirecini tutarak, ortamın pH derecesini indirger ve silisin çözünürlüğünü azaltarak ASR'yi ve jel oluşumunu engeller. Puzolanların bir diğfer faydası da sağladıkları geçirimsizliğidir (Baradan ve diğfer.,2002).

Doğal bir puzolan olan pomza da son yıllarda ASR ye karşı alınacak önlemler için yapılan araştırmalarda yer almaktadır. Pomza, volkanizma faaliyetleri esnasında ani soğuma ve gazların bünyeyi ani terketmesi sonucu oluşan, oldukça gözenekli bir yapı içeren camsı yapıda volkanik bir kayaç türüdür. Ülkemizde süngertaşı, topuktaşı, hışırtası, kisir, köpüktaşı olarak da bilinmektedir.

Pomza, Hıristiyanlıktan çok önceleri ilk olarak Yunanlılar ve daha sonra da Romalılar tarafından kullanılmıştır. Roma duvarlarının inşaatında, su kanallarında, ve diğer tarihi eserlerde kullanılmıştır. Bu dönemlere ait en belirgin örnekler, Roma Pantheonu ve İstanbul'daki Ayasofya Müzesidir. Almanya'da pomza ilk olarak 1800'lü yıllarda Rheinland bölgesinde kullanılmaya başlanmıştır. Avrupa genelinde ise, yakın döneme dek pomza taşına ilgi gösterilmemiştir. ABD'de pomzanın yapı malzemesi olarak kullanılması 18. yüzyılın ortalarında Kaliforniya'da başlamıştır. Bu tarihten 1963 yılına kadar ABD'de pomza endüstrisi 15 eyalette 103 işletmeye kadar genişlemiştir. San Francisco yakınlarındaki Mercet Gölü'nden aşındırıcı pomza olarak kullanılmak üzere 1983'te 70 bin ton üretilmiştir. Pomza, çimento ile karıştırılarak Los Angeles su kemerinin yapımında 1908'den 1918'e kadar kullanılmıştır. Puzolonik aktivitesinin yüksek oluşu sebebiyle, puzolan ve Portland çimentosu ile karıştırılarak Kaliforniya'daki Friant ve Pardee barajlarında, su kanallarında, Oklahama'daki Altus Barajının gövde inşaatında kullanılmıştır. Son 30 yıl içinde ise teknolojinin gelişmesi ve çevre bilincinin artması pomza kullanımını arttırmıştır (Gündüz ve diğer., 1998).

Pomza, çok ani soğumasından dolayı kristalize olmamış bir kayaç türüdür. Katılaştığında içinde çözünen buhar aniden salınır ve püskürerek gözenekli yapıyı oluşturur. Volkanik faaliyetler neticesinde iki tür pomza oluşur, asidik ve bazik pomza. Yeryüzünde en yaygın olarak bulunan ve kullanılan türü asidik pomzadır. Bazik pomza daha koyu renkli olup, birim hacim ağırlığı asidik pomzaya göre oldukça fazladır. Bazik pomzanın yoğunluğu 1-2 g/cm³ iken, asidik pomzanın yoğunluğu 0,5-1 g/cm³ arasındadır. Pomzanın sertliği Mohs skalasına göre 5-6'dır. Bünyesinde kristal suyu yoktur. Asidik ve bazik pomzada kimyasal olarak tesirsiz ve %75'e varan silisyum oksit muhtevasına sahiptir. Kayacın içerdiği SiO₂ oranı kayaca

abrasif özellik kazandırmaktadır. Bu yüzden çeliği rahatlıkla aşındırabilecek bir kimyasal yapı sergileyebilmektedir. Al_2O_3 bileşimi ise ateşe ve ısıya yüksek dayanım özelliği kazandırır. (Gündüz ve diğer., 1998).

Pomzanın gözenekli yapısı, kristal suyu ihtiva etmemesi ve hiçbir işlem görmeden doğal olarak kullanılabilmesi pomza taşına oldukça fazla avantaj sağlamaktadır. Bu özelliklerinin yanı sıra, boşluklu olmasına karşın düşük permabiliteye sahip olması, hafifliği, yüksek izolasyon özellikleri, atmosferik şartlara karşı direnci ve yüksek puzolonik aktivitesi sebebiyle başta inşaat ve yapı endüstrisinde olmak üzere tarım, kimya, tekstil, kozmetik, metal ve plastik sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Teknolojik özellikleri ve birçok endüstriyel hammadde türüne göre değişik avantajlara sahip olan pomza farklı endüstri dallarında yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Ülkemiz pomza rezervleri bakımından oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. Araştırılmış alanlarda yaklaşık 3 milyar m^3 pomza rezervi olduğu tahmin edilmektedir. Pomza rezervleri İç Anadolu Bölgesinde yoğunlaşmış olmasına karşın, Akdeniz ve Doğu Anadolu Bölgelerinde de pomza oluşumlarına ve üretim faaliyetlerine rastlanmaktadır. Türkiye’de pomza madenciliği, açık ocak işletmeciliği şeklinde yürütülmektedir. Üretilen cevherin %80’i yurtiçinde, genelde hafif yapı elemanı, briket ve izolasyon malzemesi olarak tüketilmekte, kalan %20’sinin büyük bir bölümü tekstil sektöründe tekstil pomzası olarak ihraç edilmektedir. Pomza taşının kullanım kriterleri ve karakteristikleri endüstri alanlarındaki uygulanabilirliği gibi konular üzerinde, ülkemizde deneysel ve gözlemsel incelemeler pomza ile ilgilenen kuruluşlar tarafından henüz yeterli düzeye ulaşmamıştır (Gündüz ve diğer., 1998).

Son yıllarda hafif yapı malzemelerine verilen önemin giderek artmasına paralel olarak, düşük birim hacim ağırlığına sahip olması, puzolonik özellikte olması, yüksek ısı ve ses izolasyonu, alternatiflerine göre daha ekonomik olması nedeni ile, pomzanın inşaat sektörüne geniş kullanım alanları bulunmaktadır(Gündüz ve diğer.,1998).

Pomza normal agreganın 1/3 ile 2/3 'ü kadar yoğunluğa sahiptir. Pomza kullanılarak üretilen taşıyıcı olmayan betonda maliyet ve işçilikten tasarruf sağlanmaktadır. Pomzanın ısı geçirgenlik kat sayısı betondan 5-7 kat fazla olup bu özelliğinden dolayı ısı ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Ayrıca, yangına dayanıklılık açısından da normal betona kıyasla %20'ye varan oranlarda daha emniyetli olduğu kabul edilmektedir (Gündüz ve diğer, 1998).

5.4.6 Zeolit

1756 yılında Cronstedt tarafından, ısıtıldığında yapılarında bulunan suyu çıkartırken köpürmesinden dolayı "kaynayan taş" olarak isimlendirilen zeolitler, alkali ve toprak alkali metallerin bünyesinde su içeren alüminosilikatları olarak tanımlanmaktadır. Zeolitler, düşük ağırlıklı, yüksek gözenekli, homojen sıkı ve sağlam yapıdadırlar. Sahip olduğu, puzolanik reaktivite, iyon değişikliği yapabilme, adsorbsiyon özellikleri nedeniyle inşaat sektörü de dahil olmak üzere pek çok endüstriyel alanda tercih edilmektedir (Kibaroglu, 2006).

Doğada kırk çeşit doğal zeolit ve yüzelliden fazla sentetik zeolit varlığı bilinmektedir. Bunlardan en önemlileri klinoptilolit, şabazit ve analsimdir. Endüstride tarım, hayvancılık, kirlilik kontrolü, enerji, madencilik ve metalurji, sağlık ve inşaat sektörü gibi geniş kullanım alanlarının oluşması ve doğada zeolitlerin volkanik kayaçların boşluk ve çatlakların bünyesinde bulunması üzerine yapılan araştırmalar zeolitin sentetik imali yönüne kaymıştır. 1948'de Union Carbide Corporation tarafından başlatılan çalışmalar sonucunda doğal zeolitlerden çok daha iyi olan yapay zeolit kristali (Linda a) sentetik olarak üretilmiştir.

Zeolitler, geniş uygulama alanları için spesifik kullanımı sağlayan, karakteristik yapısal özelliklere sahiptir. Bu özellikler kabaca şöyledir:

- 1- Yüksek hidrotasyon enerjisi,
- 2- Hidrate oldukları zaman sahip oldukları düşük yoğunluk ve boşluk hacmi,
- 3- Katyon değişimi özellikleri,

- 4- Dehidrate olmuş kristaller içerisindeki düzgün moleküler boyutlu kanal sistemlerine sahip olması,
- 5- Elektriksel iletkenlik,
- 6- Gaz ve su buharı absorpsiyonu, ve
- 7- Katalitik davranışlar.

Doğal zeolitlerin ticari uygulamalarında, bu mineralin bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinden yararlanılmaktadır. Radyoaktif atıkların depolanması ve saklanması, atık suların ve petrol sızıntılarının temizlenmesi, baca gazlarının tutulması, doğal gazların saflaştırılması, oksijen üretimi, kömürün gazlaştırılması, gübre ve toprakların hazırlanması, toprak kirliliğinin kontrolü, zirai mücadele, deterjan üretimi, kağıt üretimi gibi alanlarda ve inşaat, sağlık, kimya ve metalurji sektörlerinde kullanılmaktadır (Kıbaroğlu; 2006).

Yapay zeolitlerin birden bire bu kadar geniş ve teknolojik olarak önemli kullanım alanlarının ortaya çıkmasına karşın, yapay zeolitlerin üretim maliyetlerinin fazla olması doğal zeolit aramalarını hızlandırmıştır. 1958 yılında Union Carbide Corporation tarafından x-ışınları tekniğinin görsel ve denizsel Volcano-Sedimanter kayalara uygulanması ile Japonya, İtalya, Yeni Zelanda ve Amerika'da büyük rezervli zeolit yatakları bulunmuştur.

2000 yıl önce İtalya'da yapı taşı olarak kullanılan zeolitler, 1750 yılından bu yana bilinmelerine rağmen ülkemizde varlığı 1971 yılında tespit edilmiştir. Ülkemizde ilk defa 1971 yılında Gölpazarı-Göynük civarında G. Ataman ve P. Beseme tarafından analimsel oluşumları saptanmıştır.

Türkiye'de tespit edilen başlıca zeolit yatakları Balıkesir-Bigadiç, Kütahya, Gördes, İzmir-Urla, Kapadokya'dır. Bu tespit edilen yataklardan sadece Balıkesir-Bigadiç yöresindeki sahada yapılan çalışmalar sonucunda kolaylıkla işlenebilir nitelikte ve yaklaşık 500 milyon tonluk bir potansiyeli olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada kullanılan zeolit, Manisa Gördes'ten temin edilmiştir.

Zeolitin çok yönlü kullanım alanına sahip olması onun her alandaki kullanımını her geçen gün arttırmaktadır. Türkiye'deki yatakların büyüklüğü, kalitesi, işlenebilirliği ve kullanım alanları üzerindeki bilgilerin azlığı zeolit kaynaklarının değerlendirilmesine engel olmaktadır. Dünyada zeolit kullanımı ve üretimi hızla gelişmekte ise de ülkemizde yeterli zeolit üretimi yapılamamaktadır. Bunun en büyük nedeni zeolit üretiminin ve pazarlanmasının çok uluslu büyük şirketlerce yapılmasıdır. Büyük rezervi Bigadiç'te bulunan zeolit üretimi Etibank Zeolit Kolomanit İşletmesinde ve rodövens karşılığı verilen bir sahada özel sektör tarafından yürütülmektedir. Etibank tarafından üretilen zeolitler yurtiçi ve yurtdışına, müteahhit tarafından yapılan üretim ise Balıkesir Çimento Fabrikasına pazarlanmaktadır. Zeolit, inşaat sektöründe puzolonik çimento ve beton üretiminde, hafif agrega üretiminde ve yapı taşı üretiminde kullanılmaktadır.

Zeolitik tüf yatakları, birçok ülkede puzolonik hammadde olarak kullanılmaktadır. Zeolitlerin sulu altyapılarda kullanılacak çimento üretiminde kullanılması, yüksek silis içermeleri nedeniyle betonun katılaşma sürecinde açığa çıkan serbest kirecin bağlanmasını dolayısıyla beton elemanların geçirimsiz olmasını sağlayabilmektedir.

Genleştirilmiş zeolitlerin sıkışma ve aşınmaya karşı dayanımı daha yüksek olduğundan hafif agrega üretiminde kullanılmaktadır.

Son yıllarda, zeolitin ASR genleşmelerini azaltıcı etkisi nedeniyle betonda mineral katkı olarak kullanılması için araştırmalar yapılmaktadır. Andiç ve Ramyar (2002), doğal zeolit tozunun inceliğinin ve çimento yerine kullanım oranının ASR genleşmeleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Beş farklı Blaine özgül yüzeyinde (200, 400, 600, 800, 1000 m²/kg) hazırlanan zeolit tozu içeren numunelerin, ASR genleşmelerini belirlemek amacıyla ASTM C 1260 deney yöntemini kullanmışlardır. Yapılan araştırmaların sonucunda 400, 600, 800, 1000 m²/kg Blaine özgül yüzeyine sahip zeolit tozunun, kütlece çimento yerine %20 ve üstündeki oranlarda kullanıldığında, ASR genleşmelerini azalttığı belirlenmiştir. 200 m²/kg inceliğindeki zeolit tozu ise, kullanılan tüm oranlarda genleşmeleri azaltmıştır. %5 ve %10 oranlarında kullanımda incelik arttıkça genleşme değeri de artarken, daha yüksek

oranlar için benzer etkinin görülmeyeceği, kullanım oranları arttıkça inceliğin etkisinin kaybolduğu sonucuna varılmıştır. Genel olarak zeolitin çimento yerine kütlece kullanım oranının artması ASR genleşmelerini azaltmaktadır. Genleşmelerin azaltılmasında, yüksek kullanım oranlarında katkının puzolanik özelliğinin, düşük kullanım oranlarında ise gözenekli yapısından dolayı iyon absorplama yeteneğinin daha baskın olduğu düşünülmektedir.

Doğal zeolit tozunun inceliği arttıkça ortamın pH'ı azalmaktadır. Kullanılan zeolit tozunun miktarı arttıkça alkali iyon konsantrasyonları azalmakta, bu sayede alkali silikat jelinin oluşumunu önlemektedir. Alkali iyon konsantrasyonunun azalma nedenleri; iyon değişimi, absorblanma ve puzolanik reaksiyondur. İyon değişimine ek olarak doğal zeolit tozunun gözenekli olması da alkalitenin azalmasında etkili olmaktadır (Naiqian ve diğer., 1998; Andiç, 2002).

5.5 Kimyasal Katkı Maddesi Kullanılması

Bazı tip kimyasal katkı maddeleri potansiyel olarak;

- 1- Silisin çözünmesini durdurabilir veya azaltabilirler.
- 2- Silis jelinin oluşmasına ve karakterine engel olabilirler.
- 3- Jelin genleşmesini azaltabilirler (Abit, 1998).

ASR'nu önleyici kimyasal katkılarla ilgili ilk çalışmalar, 1951 yılında McCoy ve Caldwell tarafından başlatılmıştır. Kurşun, laktik asit, çinko, demir klorid, lityum tuzları ve bitkisel yağlar dahil olmak üzere, birçok ürün ile reaktif agrega olarak pyrex camı kullanılarak ASTM C441 standartına göre genleşme deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonunda en iyi genleşme azalmasının lityum tuzlarından elde edildiği belirlenmiştir (Abit, 1998).

Hudec (1990), harç çubukları genleşme testini kullanarak fosfat, nitrat, borat, lityum, kalsiyum vb. bileşenlerinin ASR üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma

sonuçlarına göre, bazı bileşenler iyi potansiyel göstermekle birlikte, etkinlikleri dozajlarına ve kullanılan reaktif agrega tipine bağlı olmaktadır.

Kimyasal katkıların etkilerini açıklayan mekanizmalar; Alkali iyonlarının basit kimyasal azaltımı, silis çözeltisi ile etkileşim veya ASR'den dolayı meydana gelen jelin alkali iyonlarıyla etkileşimidir (Hudec ve Labri, 1989).

Ohama ve arkadaşları %1 dozajında sodyum silikoflorid, alkil alkoksi silan, lityum karbonat, florit, hidroksit ile andezit ve opal agregaları ile yapılmış harç çubuklarının genişlemesini azalttığını belirlemişlerdir (Abit, 1998).

LiOH betonda kullanıldığında, normalde yüksek olan $(OH)^-$ iyon konsantrasyonunu yükseltmektedir. LiOH'in ASR genişmelerini azaltıcı etkisinin ortaya çıkarılabilmesi için, ASR jelinin genişleme potansiyelini azaltan, Li^+ iyonlarının jel ile yeterince birleşebilmesi ve bu ters etkinin karşılanması gerekmektedir. Bunun için de LiOH dozunun, oluşan ASR jelinin yapısına katılan ve zararlı genişmeleri önleyen lityum miktarının, pH'daki yükselme sebebiyle oluşan zararlı etkiyi yenebilmesine imkan verecek düzeyde ayarlanması gerekmektedir. Ayrıca, çimento hidrasyonu esnasında lityum iyonlarının bir kısmı hidrasyon ürünlerinin bünyesine katılmaktadır. Bu iki sebepten dolayı yeterli miktardan az kullanılan LiOH, tam tersine genişmeleri arttırmaktadır (Andiç, 2002; Diamond, 1999).

Diamond (1999), lityum hidroksit, florit, klorür tuzlarının pH'ı azaltıcı zararlı etkisini azaltmak için nötral tuzların kullanılması gerektiğini öne sürmüştür.

5.6 Onarım ve Kullanılan Standartlar

5.6.1 Onarım

Alkali Silika Reaksiyonunu engellemek için, ASR hasarlarına neden olan ve aynı anda bulunması gereken üç koşuldan (yeterli alkali, kritik seviyenin üstünde reaktif

silika, yeterli nem) herhangi birinin kaldırılması ASR'yi engellemek için bir önlem olarak düşünülebilir. Hasar görmüş bir yapının onarımında, reaktif silika, alkali ve nem uzaklaştırılmalıdır ve beton içine tekrar girişlerine karşı önlemler alınmalıdır. Ancak reaktif silika ve alkalinin bulunması durumunda nem başarılı bir şekilde kontrol edilebilecek tek faktördür (Tosun,2001).

ASR'ye karşı henüz kesinleşmiş bir durabilite dizaynı geliştirilmemiştir. Ancak genleşmenin kontrolü için, sertleşmiş betonun su içeriğini, örneğin betonun kütlece %0,4'ü gibi bir değerle sınırlamak bir çözüm olabilir (Hobbs 1988, Miyagawa 1991).

Alınacak önlemler ASR'den etkilenen yapıların tümünü kapsamalıdır. Genellikle genleşme durduğu zaman onarım, gereken yerlerde makro çatlakların çimento enjeksiyonu veya epoksi reçinesi ile kapatılması ve yüzey görünümünün iyileştirilmesi suretiyle yapılmaktadır. Beton içine nemin girişi bu şekilde azaltılmış olur ve yapı güvenliği sağlanmış olur (Hobbs 1988, Tosun 2001).

Genellikle, ASR genleşmeleri onarım yapıldıktan sonra da devam etmektedir. Bu nedenle ASR çatlaklarının onarımı, normal çatlak onarımından daha farklıdır. ASR'den dolayı oluşan çatlakların onarımında ve ASR'den dolayı hasar görmüş yapıların güçlendirilmesinde en önemli konu, onarım ve güçlendirme yapıldıktan sonra yeniden ASR genleşmelerinin oluşumunun engellenmesidir. Beton bünyesinde bulunan ve dışarıdan beton içine giren genleşmeye sebep olan maddeler kontrol edilmelidir (Miyagawa 1991).

Bu tür hasarların onarımında seçilen yöntemler genellikle yüzeye belirli işlemler uygulanması şeklinde olmaktadır. Betona dışarıdan suyun nüfuzunu önleyen ve suyun içeriden difüzyonunu sınırlandıran su geçirmez kaplamaları veya daha az etkili olan "su uzaklaştırıcı" yöntemi kullanılarak yüzey kaplamaları ile nem kontrol edilebilmektedir (Miyagawa 1991).

İngiltere'de ASR etkisinin görüldüğü 10 yıllık iki yapıda küçük bir dış alana, yüzey kaplaması uygulanarak onarım yapılmıştır. Bu kaplamalar uygulandığında

muhtemelen genleşme büyük oranda tamamlandıği için, onarımdan sonraki 6 yıl yapı oldukça iyi performans göstermiştir (Hobbs 1988).

5.6.2 Kullanılan Standartlar ve Şartnameler

5.6.2.1 California Ulaştırma Bölümü

California Ulaştırma Bölümü, son yıllarda ASR'den dolayı oluşan zararları azaltmak için mineral katkıların kullanımı üzerinde çalışmıştır. Konuya ilişkin çalışma sonuçları ve önerileri aşağıdaki gibidir (Forster ve diğer, 1998):

- ASTM C150 standartında çimentonun, %0,6 olarak sınırlandırılan alkali içeriği daha düşük kabul edilmelidir.
- Mineral katkılardaki yüksek kalsiyum oksit (CaO veya kireç) içeriği Alkali Silika Reaksiyonu'nun zararlı etkilerini arttırmaktadır.
- F sınıf uçucu kül ve N sınıfı puzolanların (ASTM C618), ASR genleşmelerini azaltmada etkili olabilmesi için çimento yerine kütlece en az %30 oranında kullanılması gerekmektedir.
- Mineral katkı olarak kullanılacak uçucu külün CaO oranı en fazla %10 olmalıdır.
- Düşük kireç içerikli (< %2) doğal puzolanlar, ASR'den dolayı oluşan zararları azaltmak için çimento yerine kütlece en az % 15 oranında kullanılmalıdır.

5.6.2.2 Amerikan Eyalet Karayolları ve Ulaşım Birliği

1995'den 2000 yılına kadar ASR için, Amerikan Eyalet Karayolları ve Ulaşım Memurları Birliği (AASHTO) tarafından kurulan Öncü Eyaletler Takımı (New Mexico, Kuzey Carolina, Pennsylvania, Güney Dakota, Virginia ve üniversitelerden, sanayiden ve ABD Karayolları İdaresi'nden ortaklar) tarafından, ASR'nin iyileştirilmesi ve önlemi için teknoloji ve standartlar geliştirilmiştir. Karayolu inşaatı

için AASHTO tarafından 2001'de yayınlanmak üzere taslak şartnamesi hazırlanmıştır.

ASR'na dayanıklı beton hakkındaki taslak şartnamesi agregalar için aşağıdaki testleri önermektedir: AASTHO T303 (Metamorfik agregalar için 14. günde harç çubuklarının genleşme sınır değeri %0,08, diğerleri için %0,1) ve ASTM C1293 (Beton prizmaların 1 yıl sonundaki sınır genleşme değeri %0,04'tür). Taze betondaki ASR'nin zararlarını azaltmaya yönelik yöntemler aşağıdakilerin kullanımını içermektedir:

1. Düşük alkali oranlı ve/veya katkıli çimentolar,
2. Mineral katkı olarak en az %15 oranında F sınıfı uçucu kül veya en az %25 oranında yüksek fırın cürufu,
3. Kimyasal katkı olarak lityum tuzları.

AASTHO M295'e göre mineral katkı olarak uçucu kül kullanılacaksa, uçucu külün MgO içeriği en fazla %5 olmalıdır, fakat bu gereksinim düşürülmüştür.

5.6.2.3 New Mexico Devlet Karayolları ve Ulaşım Bölümü

New Mexico Devlet Karayolları ve Ulaşım Bölümünde yayınlanan Portland çimento lu beton hakkındaki Bölüm 510; Agregaların %0,1 ve %0,04 genleşme sınır değerlerindeki AASTHO T303 ve ASTM C1293 ile deneye tabi tutulmalarını gerektirir. Daha az genleşen agregalar zararsız kabul edilir. Agregat reaktif ise aşağıdaki en az katkı miktarları karışıma eklenmelidir.

1. Çimento yerine %20 oranında F sınıfı uçucu kül kullanılmalıdır.
2. En az %25 ile en çok %50 oranında yüksek fırın cürufu mineral katkı olarak kullanılmalıdır.
3. Çimento sodyumuna eşit solüsyonun her kg değerine 4,6 L/m³ lityum nitrat kullanılmalıdır. Katkının etkisi %0,1 genleşme sınır değeri ile AASHTO T303 kullanılarak belirlenir.

5.6.2.4 Washington Eyalet Ulaşım Bölümü

Washington Eyaletinde, ASTM C1260 (veya AASHTO T303) gibi agreganın reaktifliğini belirlemeye yönelik deney yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir. Kurum, ASR'nin zararlı etkilerini azaltmak için, ASTM C295 'e ait agregalardaki zararlı malzemelerin sınır değerlerini baz almaktadır. Azaltma işlemleri, düşük alkalili çimento, uçucu kül ve lityum tuzu kullanımını içerir.

1. Şekli bozulmuş küçük kırıklı veya mikro kristalin kuvars maksimum %5
2. Kuvarslı kaya veya kalsedon maksimum %3
3. Tridimit veya kristobalit maksimum %1
4. Opal maksimum %0,5 ve
5. Doğal volkanik cam maksimum %3 oranında bulunmalıdır.

5.6.2.5 Portland Çimento Birliği

Portland Çimento Birliği, ASTM C1260 (sınır %0,1) ve ASTM C295'e ihtiyaç duyulan, ASR'nin azaltılması için gerekli şartnameye sahiptir. Kurum, reaktif agreganın tespitinde, ASTM C1293 (sınır değer %0,04) deney yöntemini tercih etmektedir. Reaktiflik gösteren agregalar, betonda 3 şekilde kullanılmaktadır:

1. Mineral katkı maddesi kullanılması(doğal puzolan, yüksek fırın cürufu)
2. Düşük alkalili çimento kullanımı

5.6.2.6 Birleşik Havacılık İdaresi

Birleşik Havacılık İdaresi (FAA), agregaların reaktivitesini belirlemek için ASTM C1260, C295, C289, C227 deney yöntemlerini kullanmaktadır. Kurum, ASR'nin zararlı etkilerini azaltmak amacıyla mineral katkı olarak kullanılacak yüksek fırın cürufunun %25 ile %50 oranları arasında, uçucu külün %10-%20 oranları arasında kullanılmasını önermektedir.

5.6.2.7 Amerikan Beton Enstitüsü

ACI 221 Komisyonunun, ASR'nun azaltmaya yönelik çalışma raporu aşağıdaki gibidir:

1. Çimento için belirlenen maksimum alkali içeriği olan %0,6 sodyum eşdeğerinin %0,4 olması gerekmektedir.
2. Mineral katkı olarak kullanılması düşünülen uçucu külün CaO içeriği, %5'ten az olmalıdır.
3. Mineral katkı olarak silika dumanı kullanılacaksa, silika dumanının yoğunlaşmış taneleri karıştırma sırasında iyi yayılmalıdır aksi takdirde, reaktif agrega gibi davranabilir ve ASR'na neden olurlar.
4. ASTM C1260 Hızlandırılmış harç çubuğu yönteminde %0,1 olan sınır genleşme değeri %0,08 olmalıdır.
5. Daha düşük tanecik boyutlu agregalar daha az genleşme oluştururlar.

5.6.2.8 Uluslararası Agregası Araştırma Merkezi

Austin'deki, Texas Üniversitesindeki, Uluslararası Agregası Araştırma Merkezi ASR'nin zararlı etkilerini azaltmak için kullanılması gereken minimum katkı oranları hakkında bir rapor hazırlamıştır. Rapora göre katkıların etkili olabilmesi için, çimento yerine en az;

1. %55 cüruf
2. %25 F sınıfı uçucu kül
3. %35 C sınıfı uçucu kül
4. %10 silika dumanı kullanılmalıdır.

5.6.2.9 Kanada Standartlar Birliği

Kanada Standartlar Birliği, ASTM C1260 ve C1293'e benzer CSA A 23,2 – 25A ve CSA A 23,2 – 14A'yı oluşturmuştur. CSA A 23,2 – 25A'daki sınır genleşme

değeri %0,15'tir. Mineral katkı olarak kullanılacak uçucu külün maksimum kireç içeriğini %8 olarak belirlemiştir. Ayrıca ASR genleşmelerine karşı etkili olabilmeleri için, mineral katkı olarak en az % 30 oranında uçucu külün veya en az %50 oranında yüksek fırın cürufunun çimento yerine kullanılmasını önermektedir.

5.6.2.10 Yapı Malzemeleri ve İnşaatlar Uluslararası Birliği

RILEM(Yapı Malzemeleri ve İnşaatlar Uluslararası Birliği) Teknik Komitesi TC 106-AAR, Alkali Silika Reaksiyonu hakkında agrega reaktivitesini saptamak için iki öneri yayınlamıştır:

1. RILEM TC 106-2 (2000) (Aşırı Hızlandırılmış Harç Çubuğu Testi) : ASTM C1260 deney yöntemine benzemektedir.
2. RILEM TC 106-3 (2000) (Beton Prizmalar Kullanılan Agrega Karışımları İçin Test) : ASTM C1293 deney yöntemine benzemektedir.

BÖLÜM ALTI

DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma kapsamında çimento yerine mineral katkı olarak farklı oranlarda zeolit ve pomzanın ayrı ayrı ve birlikte kullanımının, ASR genleşmelerinin kontrol altına alınması üzerindeki etkinliği, ayrıca zeolit ve pomza ikamesinin basınç dayanımı ve kapilarite üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın başında, pomza ve zeolitın yanı sıra perlitin de mineral katkı olarak kullanılması düşünülmüştür. Ancak yapılan ön deneylerde perlit, ASR genleşmelerini azaltmada pomza ve zeolit kadar etkili olmamış ve kullanılan standarttaki sınır genleşme değerini aşmıştır. Bu nedenle çalışmanın sonraki aşamalarında kullanılmamıştır. Agreg-a-çimento-puzolan karışımlarının reaktifliğinin belirlenmesi için ASTM C1260 (hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi) kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri, deney yöntemi, deney programı bu bölümde verilmiştir.

6.1 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Yöntemi (ASTM C1260)

Bu deney yönteminde, 80 °C sıcaklıkta NaOH çözeltisinde saklanan harç çubuklarının boy değişimleri ölçülerek, alkalilerle reaksiyona girmesi muhtemel olan agregaların hızlı bir şekilde tespiti yapılmaktadır. Bu yöntem, Bölüm 4.2.1’de sözü edilen klasik harç çubuğu yöntemine alternatif bir yöntem olup, yavaş reaksiyon gösteren veya geç genleşen granit, riyolit, andezit, volkanik tüf, gnays, kuvars, fillit, kumtaşı, grovak, şeyl gibi agregalar için uygundur.

Test edilen agreg-a ile hazırlanan harç çubukları, döküldükten 24 ± 2 saat sonra kalıptan alınır ve ilk boyları (L_i) ölçülür. Su içine yerleştirilen örnekler, 24 saat $80^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki kür dolabında saklanır.

24 saat sonra sudan alınan örneklerin boy değişimleri (L_o) ölçülür ve örnekler 1N NaOH çözeltisine konularak, $80^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ’deki kür dolabında bekletilir. Boy ölçümleri periyodik olarak yapılır. NaOH çözeltisi hazırlanırken, 900 ml saf su içinde 40 g

NaOH çözülür. Çözelti su ilavesi ile 1 litreye tamamlanır. Çözelti hacmi/örneklerin hacmi oranı $4 \pm 0,5$ olmalıdır.

Deneylerde kullanılan çimento Na_2O eşdeğeri ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ olarak) $\%0,90 \pm 0,10$ 'den fazla ve özgül yüzeyi $450 \text{ m}^2/\text{kg}$ 'dan büyük olan Portland çimentosu veya ASTM Tip I 'e uygun bir çimentodur.

Örneklerin döküldüğü odanın sıcaklığı $18-22 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında, karışım suyunun ve kür dolabının bulunduğu odanın sıcaklığı $20 \pm 1.5^\circ\text{C}$ olmalıdır. Dökümün yapıldığı odanın bağıl nemi $\%50$ 'den, kür dolabının bağıl nemi $\%90$ 'dan az olmamalıdır.

$25*25*285 \text{ mm}$ boyutlu, agrega/çimento oranı, kütlece 2,25 ve su/çimento oranı 0,47 olan harç çubuğu örnekleri hazırlanır. Hazırlanan harcın işlenebilirliğini tespit etmek için yayılma tablası kullanılır. İki eşit tabakada ve 20'şer kez tokmaklanarak doldurulur, dakikada 10 kez sarsılarak yayılma ölçülür. Bu değer $\%105-120$ arasında olmalıdır.

Örnekler NaOH'a koyulduktan sonra 3., 6., 9., 12. ve 14. gün okumaları yapılarak ölçümler tamamlanır, 14. gün yapılan okuma son ölçümdür (L_n). Örneklerin boy değişimleri 0,002 hassasiyetindeki komparatörle ölçülür. Genleşme sınırı $\%0,10$ 'dur. Bu değer aşılması durumunda agreganın reaktif olması muhtemeldir, sonucun diğer yöntemlerle kontrol edilmesi önerilmektedir. Genleşme hesabı şöyledir;

$$\{\text{genleşme (\%)}=100*(L_n-L_o)/(\text{harç çubuğu boyu})\}$$

Şekil 6.1 'de deneyde kullanılan aparatlar görülmektedir.



Şekil 6.1 Deneide kullanılan aparatlar

6.2 Malzeme Özellikleri

Çalışmada kullanılan malzemelerin karakteristik özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

6.2.1 Çimento

Deneilerde, Çimentaş Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42,5 çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1 Çimentonun mekanik, fiziksel, kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
SiO ₂ (%)	19,3	Özgül Ağırlık	3,15
Al ₂ O ₃ (%)	5,57	Özgül Yüzey(Blaine) (m ² /kg)	352
Fe ₂ O ₃ (%)	3,46	Priz Başlangıcı(dak.)	145
CaO (%)	63,56	Priz Sonu(dak.)	275
MgO (%)	0,86	Hacim Genleşmesi(mm)	1
Na ₂ O (%)	0,13	Serbest CaO(%)	1,22
K ₂ O (%)	0,80		
SO ₃ (%)	2,91		
Cl (%)	0,013		
Kızdırma kaybı (%)	2,78		
Çözülme kalıntısı(%)	0,41		
		Basınç Dayanımı	
		2 günlük (MPa)	27,2
		7 günlük (MPa)	42,4
		28 günlük (MPa)	52,7

6.2.2 Agregat

Bu çalışmada kullanılmak üzere, Dere Madencilik Firması'ndan 4 mm ve altı gradasyona sahip bazalt temin edilmiştir. Deneylerde agregat yerine kullanılan bazalt Tablo 6.2'de gösterilen ASTM C1260 standartına uygun olarak elenmiştir.

Tablo 6.2 ASTM C1260'a göre bazaltın granüler dağılımı

ELEK BOYUTU		
Geçen	Kalan	Ağırlık(%)
4,75 mm(No.4)	2,36 mm(No.8)	10
2,36 mm(No.8)	1,18 mm(No.16)	25
1,18 mm(No.16)	600 µm(No.30)	25
600 µm(No.30)	300 µm(No.50)	25
300 µm(No.50)	150 µm(No.100)	15

6.2.3 Pomza

Çalışmada, Cumaovası Bölgesinden temin edilen asidik karakterli perlitik pomza kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 6.3'te, fiziksel özellikleri Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.3 Pomzanın Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Özellikler	
SiO ₂ (%)	75,51
Fe ₂ O ₃ (%)	1,1
Al ₂ O ₃ (%)	9,94
CaO (%)	0,25
MgO (%)	0,04
Na ₂ O (%)	2,04
K ₂ O (%)	5,12
TiO ₂ (%)	<0,01
P ₂ O ₅ (%)	<0,001
SO ₃ (%)	0
Serbest CaO (%)	0
Kızdırma kaybı (1000 °C)	4,27

Tablo 6.4 Pomzanın fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	
Özgül ağırlık	2,03
Su Emme(%)	6,38
Birim hacim ağırlık(kg/m ³)	850

6.2.4 Zeolit

Çalışmada, Manisa Gördes yöresinden temin edilen doğal zeolit kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 6.5’de, fiziksel özellikleri Tablo 6.6’da verilmiştir.

Tablo 6.5 Zeolitin kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	
SiO ₂ (%)	70,9
Fe ₂ O ₃ (%)	1,21
Al ₂ O ₃ (%)	12,4
CaO (%)	2,54
MgO (%)	0,83
Na ₂ O (%)	2,04
K ₂ O (%)	4,46
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	84,51
SO ₃ (%)	0
Serbest CaO (%)	0
Kızdırma kaybı (1000 ⁰ C)	7,25

Tablo 6.6 Zeolitin Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler	
Su Emme(%)	9,45
Yoğunluk (kg/m ³)	1100

6.2.5 Perlit

Çalışmada, Erzincan ilinden temin edilen riyolitik öğütülmüş perlit kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 6.7 de, fiziksel özellikleri ise Tablo 6.8’de verilmiştir. Malzeme özellikleri, malzemeyi temin eden firma olan ER-PER şirketinden alınmıştır.

Tablo 6.7 Perlitin Kimyasal Özellikleri

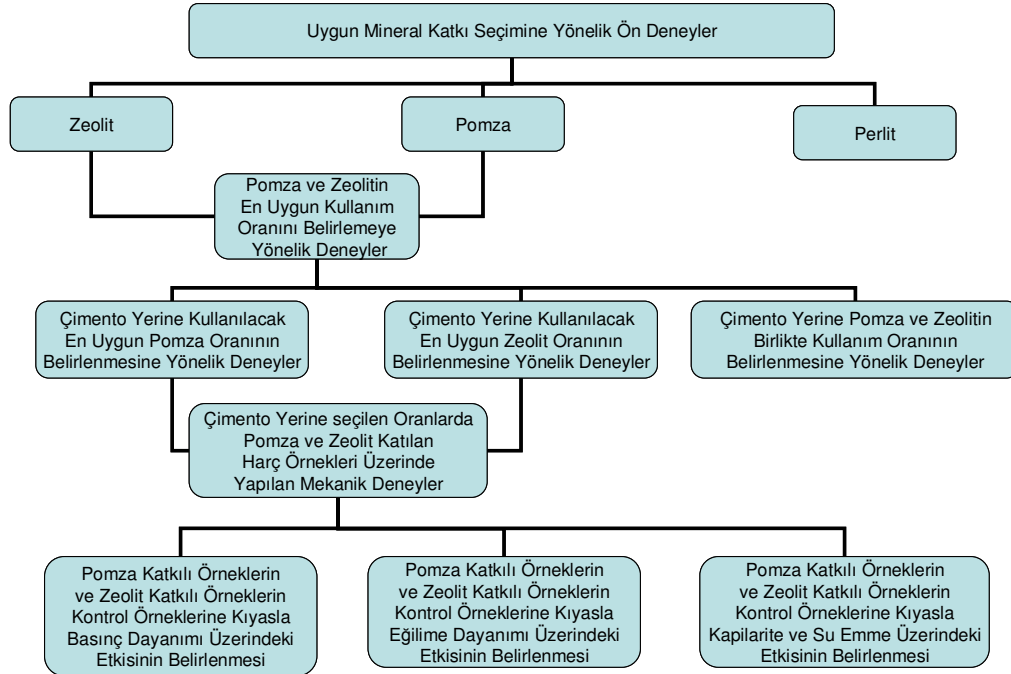
Kimyasal Özellikler	
SiO ₂ (%)	73,79
Fe ₂ O ₃ (%)	1,02
Al ₂ O ₃ (%)	12,9
CaO (%)	0,76
MgO (%)	0,04
Na ₂ O (%)	3,93
K ₂ O (%)	4,21
TiO ₂ (%)	0,03
P ₂ O ₅ (%)	0,003
SO ₃ (%)	0
Serbest CaO (%)	0
Kızdırma kaybı (1000 °C)	2,5

Tablo 6.8 Perlitin Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler	
Su Emme (%)	20
Özgül ağırlık (kg/m ³)	2200

6.3 Deney Akış Şeması

Tez çalışması süresince gerçekleştirilen deneylere ait akış şeması Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2 Deney akış şeması

6.4 Karışımların Hazırlanması ve Kürü

Karışımlarda agrega olarak kullanılan bazaltın granüler dağılımı ASTM standartına göre ayarlanmıştır. ASTM C1260 standartında belirtilen gradasyondaki bazalt, 25*25*285 mm boyutlu harç çubukları kullanılarak, su/çimento oranı 0,47 ve agrega/çimento oranı 2,25 olacak şekilde hazırlanmıştır. Çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında zeolit, yine ağırlıkça çimento yerine %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında pomza ve toplam %25 oranında pomza ve zeolit ağırlıkça çimento yerine kullanılarak harç numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin karışım oranları Tablo 6.9’da verilmiştir.

Tablo 6.9 Örneklerin karışım oranları

Örnek No	Çimento(%)	Zeolit(%)	Pomza(%)	Agrega(%)
K	100	0	0	100
Z5	95	5	0	100
Z10	90	10	0	100
Z15	85	15	0	100
Z20	80	20	0	100
Z25	75	25	0	100
P5	95	0	5	100
P10	90	0	10	100
P15	85	0	15	100
P20	80	0	20	100
P25	75	0	25	100
P30	70	0	30	100
P5Z20	75	20	5	100
P10Z15	75	15	10	100
P12,5Z12,5	75	12,5	12,5	100
P15Z10	75	10	15	100
P20Z5	75	5	20	100

Hazırlanan numuneler dökümden 24 ± 2 saat sonra kalıptan çıkartılıp, ilk boy ölçümü yapılarak (L_0), $80 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki saf suya yerleştirilmiştir. Suda 24 ± 2 saat bekletilen örneklerin boy ölçümleri tekrar yapılarak (L_i), bu aşamadan sonra, örnekler hazırlanan $80 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki 1 N NaOH (Sodyum Hidroksit) çözeltisi içinde 14 gün bekletilmiştir. NaOH çözeltisi içinde 1, 3, 6, 9, 12 nci günlerde boy ölçümleri alınmıştır. 14. gün son boy ölçümü (L_s) alınarak genleşme değerleri hesaplanmıştır. Aynı ayrı pomza ve zeolitin çimento yerine ve birlikte çimento yerine ağırlıkça belirli oranlarda kullanılarak hazırlanan numuneler ile sadece çimento kullanılarak hazırlanan kontrol numunelerinin genleşme değerleri karşılaştırılarak pomza ve zeolitin ASR genleşmeleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tablo 6.10'da bazalt ve CEM I 42,5 çimentonun %100 oranlarda kullanılmasıyla elde edilen kontrol numunesinin zamana bağlı genleşme değerleri görülmektedir.

Tablo 6.10 Kontrol numunesinin zamana bağlı genleşme değerleri

Zaman(gün)	0	1	3	6	9	12	14
Genleşme(%)	0	0.0182	0.4252	0.5621	0.6842	0.8340	0.9140

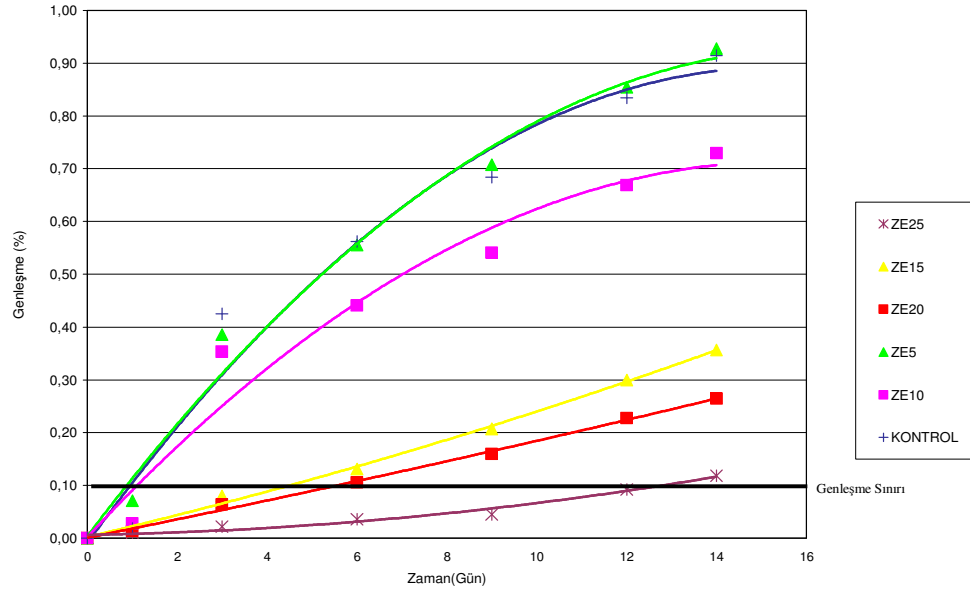
6.4.1 Çimento Yerine Zeolit Kullanımı

Zeolit, çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında kullanılarak harç çubukları dökülmüştür ve NaOH çözeltisinde 14 gün boyunca belirli aralıklarla boy değişimleri ölçülmüştür. Tablo 6.11'de harç çubuklarında oluşan genleşme değerleri verilmektedir.

Tablo 6.11Çimento yerine %0-25 oranlarında zeolit içeren harç örneklerinin zamana bağlı genişleme değerleri

Zaman (Gün)	Genleşme(%)					
	Z0	Z5	Z10	Z15	Z20	Z25
0	0	0	0	0	0	0
1	0,0182	0,0708	0,0284	0,0178	0,0133	0,0105
3	0,4252	0,3856	0,3533	0,08	0,0638	0,0221
6	0,5621	0,5550	0,4407	0,1312	0,1059	0,0354
9	0,6842	0,7077	0,541	0,207	0,1592	0,0449
12	0,8340	0,8543	0,6684	0,3	0,2273	0,0919
14	0,9140	0,9277	0,7294	0,3564	0,2645	0,1186

Yapılan deneyler sonucunda, en az %25 oranında zeolitin çimento yerine kullanımının ASTM C1260 deney metoduna göre, tehlikeli sınır genişleme değeri olan %0,1'e yakın genişleme değerleri verdiği tespit edilmiştir. Şekil 6.3'de %5-%25 oranlarında zeolitin çimento yerine kullanımının ASR nedeniyle oluşan genişlemeler üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 6.3 Çimento yerine %5 - %25 oranlarında zeolit içeren örneklerin zamana bağlı genişleme davranışı

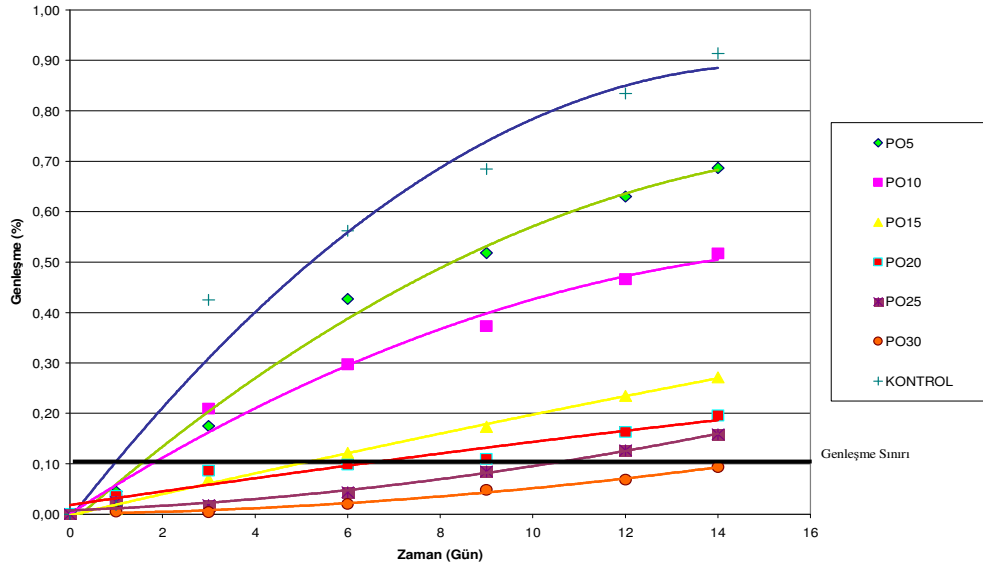
6.4.2 Çimento Yerine Pomza Kullanımı

Pomza, çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında kullanılarak harç çubukları dökülmüştür ve NaOH çözeltisinde bekletilen örneklerin 14 gün boyunca belirli aralıklarla boy değişimleri ölçülmüştür. Tablo 6.12’de harç çubuklarında oluşan genleşme değerleri verilmektedir.

Tablo 6.12 Çimento yerine %0–30 oranında pomza içeren harç örneklerinin zamana bağlı genleşme değerleri

Zaman (Gün)	Genleşme(%)						
	P0	P5	P10	P15	P20	P25	P30
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,0182	0,0445	0,028	0,0098	0,0357	0,0245	0,0049
3	0,4252	0,1750	0,2094	0,0701	0,0859	0,0182	0,0042
6	0,5621	0,4270	0,2971	0,1217	0,0982	0,0438	0,0203
9	0,6842	0,5178	0,3729	0,1733	0,1098	0,0849	0,048
12	0,8340	0,6301	0,4659	0,2343	0,1631	0,127	0,0684
14	0,9140	0,687	0,5171	0,2712	0,1957	0,1582	0,0933

Yapılan deneyler sonucunda en az %30 oranında pomzanın çimento yerine kullanımının ASTM C1260 deney metoduna göre tehlikeli sınır genleşme değeri olan %0,1’in altında genleşme değerleri verdiği tespit edilmiştir. Şekil 6.4’de %5-%30 oranlarında pomzanın çimento yerine kullanımının ASR nedeniyle oluşan genleşmeler üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 6.4 Çimento yerine %5 - %30 oranlarında pomza içeren harç örneklerinin zamana bağlı genleşme davranışı

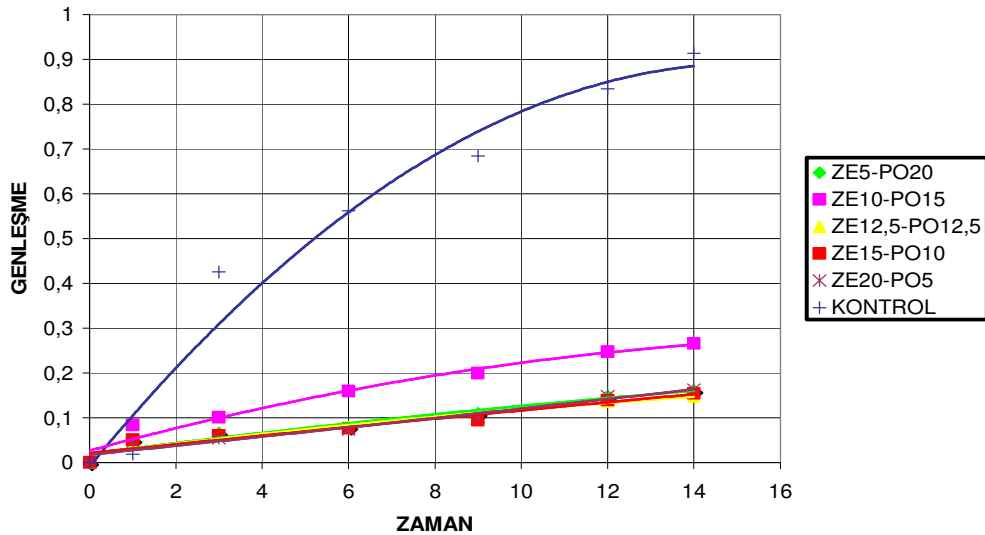
6.4.3 Çimento Yerine Pomza ve Zeolitin Birlikte Kullanımı

Pomza ve zeolitin çimento yerine kütlece belirli oranlarda kullanımının ASR genleşmelerini azaltmadaki etkisini incelemek amacıyla çimento yerine kütlece %25 oranında beş set numune hazırlanmıştır (%5 pomza-%20 zeolit, %10 pomza-%15 zeolit, %12,5 pomza-%12,5 zeolit, %15 pomza-%10 zeolit, %20 pomza-%5 zeolit). Hazırlanan harç örnekleri, %100 oranında çimento kullanılarak hazırlanan kontrol numunesi ile birlikte dökülmüştür ve NaOH çözeltisinde 14 gün bekletilerek belirli aralıklarla boy ölçümleri alınmıştır. Harç çubuklarında oluşan genleşme değerleri Tablo 6.13'de verilmiştir.

Tablo 6.13 Harç numunelerinin zamana bağlı genişleme değerleri

Zaman (Gün)	Genleşme(%)				
	ZE5-PO20	ZE10-PO15	ZE12,5-PO12,5	ZE15-PO10	ZE20-PO5
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0502	0,0839	0,0491	0,0505	0,0456
3	0,0656	0,1004	0,0604	0,0604	0,0544
6	0,0796	0,1593	0,0789	0,0758	0,0730
9	0,1095	0,1996	0,1028	0,0947	0,1018
12	0,1481	0,2470	0,1365	0,1389	0,1477
14	0,1607	0,2656	0,1481	0,1544	0,1625

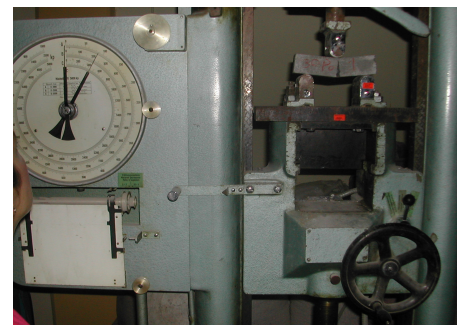
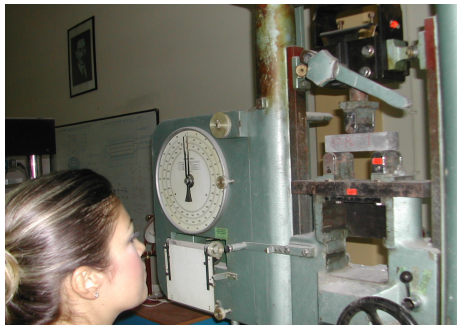
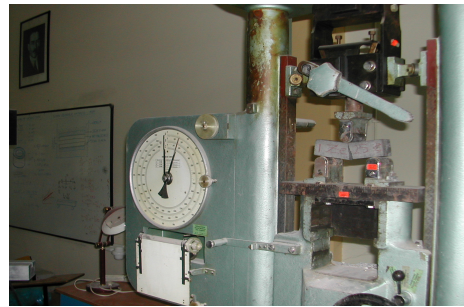
Yapılan deneyler sonucunda pomza ve zeolitin çimento yerine %25 oranında birlikte kullanımının ASTM C1260 deney metoduna göre tehlikeli sınır genişleme değeri olan %0,1 değerinin üstünde değerler verdiği görülmüştür. ASR genişlemelerinin azaltılmasında pomza ve zeolitin ayrı ayrı kullanılması, birlikte kullanılmalarından daha etkili olmuştur. Şekil 6.5’de pomza ve zeolitin birlikte çimento yerine kullanılmasının ASR nedeniyle oluşan genişlemeler üzerine etkisi görülmektedir.



Şekil 6.5 Çimento yerine %25 oranında pomza ve zeolit içeren harç örneklerinin zamana bağlı genişleme davranışı

6.5 Çimento Yerine Pomza ve Zeolit Kullanımının Basınç ve Eğilme Dayanımı Üzerindeki Etkisi

ASR den dolayı oluşan genleşmeleri önlemek amacıyla kullanılan pomza ve zeolitın basınç dayanımı ve eğilme dayanımı üzerindeki etkisi 4*4*16 cm ayrıtlı prizma harç örnekleri dökülerek incelenmiştir. Eğilme deneyleri, eğilme deneyi presinde ASTM C348'e göre 120 mm mesnet açıklığı kullanılarak ve tek noktadan yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.6'da eğilme deneyi presi ve örneklerin kırılma şekilleri görülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda zeolitın kütlece %25 oranında çimento yerine kullanımının, pomzanın %30 oranında kullanımının ASR genleşmelerini azaltmada etkili olduğu görülmüştür. Bu nedenle çimento yerine pomza %30, zeolit %25 oranında kullanılmıştır.



Şekil 6.6 Eğilme deneyi presi

Eğilme deneyi sonrası Şekil 6.7'de ve Şekil 6.8'de görüldüğü üzere oluşan iki parça üzerinde basınç presi vasıtası ile örneklerin 2, 7, 28 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür.



Şekil 6.7 Eğilme deneyi sonrasında kırılan örnekler



Şekil 6.8 Basınç deneyi presi

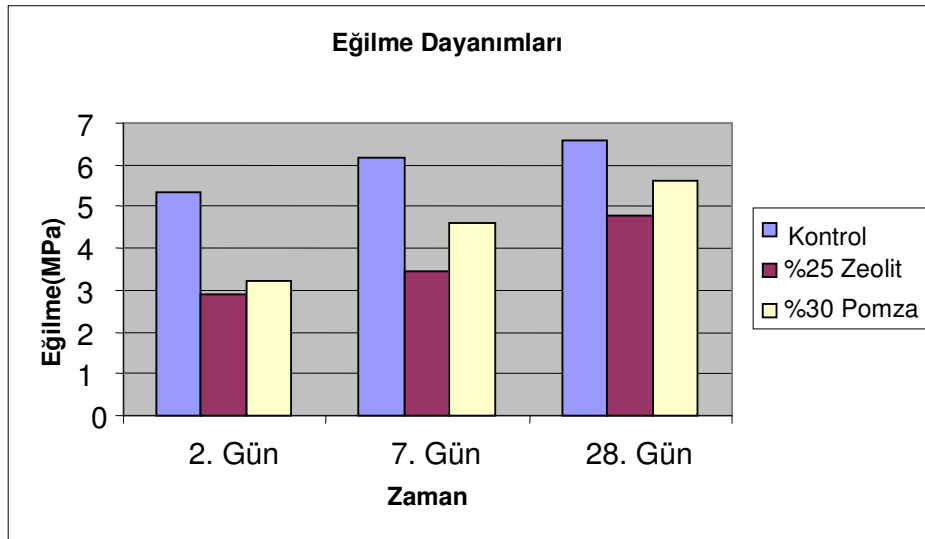
Tablo 6.14’de pomza ve zeolit kullanımı sonucu elde edilen eğilme dayanımı değerleri, Tablo 6.15’de basınç dayanımı değerleri verilmektedir. Şekil 6.9’da harç örneklerinin eğilme dayanımları, Şekil 6.10’da harç örneklerinin basınç dayanım değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 6.14 Numunelerin eğilme dayanım değerleri

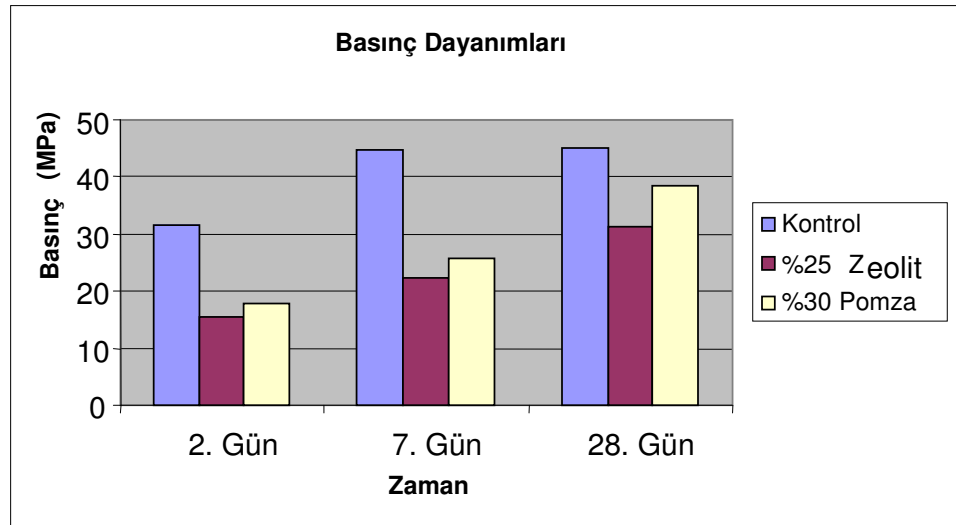
Örnek	EĞİLME DAYANIMLARI(MPa)					
	2.Gün		7.Gün		28.Gün	
	Değerler	Ortalama	Değerler	Ortalama	Değerler	Ortalama
Kontrol	5,1	5,3	5,6	6,2	5,8	6,6
	5,6		6,5		5,6	
	5,3		6,4		8,3	
Pomza (%30)	3,2	3,2	3,9	4,5	5,3	5,6
	3,1		5,2		5,9	
	3,1		4,6		5,7	
Zeolit (%25)	3,5	2,9	3,6	3,4	4,5	4,7
	2,8		3,2		4,5	
	2,4		3,4		5,1	

Tablo 6.15 Numunelerin basınç dayanım değerleri

Örnek	BASINÇ DAYANIMLARI(Mpa)					
	2.Gün		7.Gün		28.Gün	
	Değerler	Ortalama	Değerler	Ortalama	Değerler	Ortalama
Kontrol	31,57	31,50	46,30	44,62	45,68	44,95
	29,97		43,20		42,91	
	32,99		42,30		46,37	
	32,97		46,40		43,44	
	29,90		44,60		43,98	
	31,58		44,90		47,31	
Pomza (%30)	15,90	17,92	23,70	25,63	36,88	38,45
	18,50		24,80		34,62	
	17,90		26,20		40,72	
	18,30		27,70		41,44	
	18,00		25,10		37,83	
	18,90		26,30		39,21	
Zeolit (%25)	17,72	15,57	25,30	22,52	26,52	31,10
	16,44		23,20		29,59	
	15,68		22,70		27,80	
	15,15		18,90		32,40	
	14,84		23,80		32,96	
	13,59		21,20		37,33	



Şekil 6.9 Çimento yerine farklı oranlarda pomza ve zeolit kullanımının 2, 7 ve 28. günlerdeki eğilme dayanımları üzerindeki etkisi



Şekil 6.10 Çimento yerine farklı oranlarda pomza ve zeolit kullanımının 2, 7 ve 28. günlerdeki basınç dayanımları üzerindeki etkisi

6.6 Çimento Yerine Pomza ve Zeolit Kullanımının Kapilariteye Etkisi

Pomza ve zeolitın basınç dayanımı üzerindeki etkilerini belirlemek üzere dökülen harç çubuklarına, ayrıca durabiliteyi etkileyen en önemli faktör olan geçirimsizliği belirlemek üzere 28.günde su emme deneyleri yapılmıştır. Örnekler etüvde kurutulduktan sonra örneklerin 4*4 cm taban alanı 1 mm su içine girecek şekilde bekletilerek 1. ve 24. saatteki su emmeye bağlı ağırlık artışları ölçülmüştür. Şekil 6.11’de yapılan deneyin düzeneği görülmektedir.



Şekil 6.11 Kapilarite deney düzeneği

Tablo 6.16’da örneklerin 1 saat suda bekletildikten sonraki ve bir gün(24 saat) suda bekletildikten sonraki su emme yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 6.16 %25 zeolit içeren ve %30 pomza içeren harç örneklerinin kapilariteye etkisi

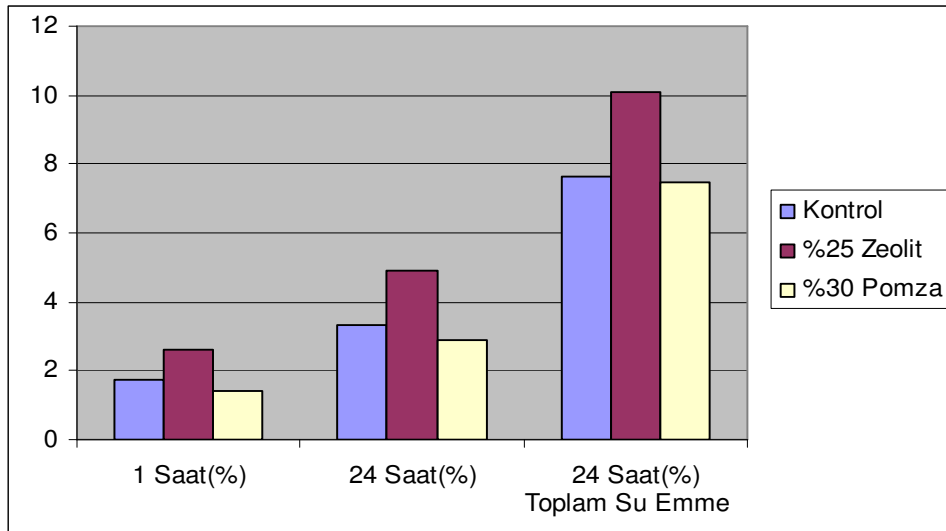
Örnekler	Kapilarite		Toplam Su
	1 Saat(%)	24 Saat(%)	Emme
			24 Saat(%)
Kontrol	1,77	3,35	7,63
%25 Zeolit	2,6	4,9	10,1
%30 Pomza	1,44	2,87	7,5

Zeolitin su emme yüzdesi değerleri, pomza ve kontrol karışımının değerlerine kıyasla daha yüksektir. Şekil 6.12’de bir gün suda beklemiş olan örnekler görülmektedir.



Şekil 6.12 Bir gün suda bekleyen harç örneklerinin görünümü

Şekil 6.13’deki grafikte harç örneklerinin su emme yüzdesi değerleri görülmektedir.



Şekil 6.13 Çimento yerine farklı oranlarda pomza ve zeolit kullanımının 2, 7 ve 28. günlerdeki kapilerite üzerindeki etkisi

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deneysel çalışma, perlit, pomza ve zeolitin mineral katkı olarak farklı oranlarda çimento yerine kullanılarak Alkali Silika Reaksiyonunun(ASR) gelişimini azaltmadaki etkilerini belirlemeye yöneliktir. Bu amaçla ilk aşamada, öğütülmüş perlit, pomza ve zeolit çimento yerine belirli oranlarda kullanılarak, hangi katkının/katkıların ASR genleşmeleri üzerinde iyileştirici etkisi olduğuna karar verilmiştir. Deneysel çalışmada, %30'a varan oranlarda perlit kullanılarak hazırlanan harç örnekleri, kontrol örneklerine kıyasla genleşmeleri azaltmasına rağmen, genleşme sınır değerini aştığı için çalışmanın sonraki aşamalarında kullanılmamıştır.

İkinci aşamada, mineral katkı olarak kullanılmasına karar verilen zeolitin %5, 10, 15, 20, 25 oranlarında, pomzanın ise %5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında kullanılarak genleşme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen genleşme verilerine göre, mineral katkı olarak kullanılacak pomza ve zeolitin hangi oranlarının ASR genleşmelerini azaltmada etkili olduğuna karar verilmiştir. Ayrıca pomza ve zeolitin birlikte kullanımının ASR'dan dolayı oluşan genleşmeleri azaltmada ne kadar etkili olduğu belirlenmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda Alkali Silika Reaksiyonu'nun zararlarını azaltmak için çimento yerine pomzanın ve zeolitin ayrı ayrı kullanımının bir arada kullanımından daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın son aşamasında, pomza katkılı harç örneklerinin ve zeolit katkılı harç örneklerinin basınç dayanımına, eğilme dayanımına etkisi ile kapilarite ve su emme özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Perlitin, çimento yerine ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında kullanımı, genleşmeleri kontrol karışımına kıyasla azaltmada az da olsa etkili olmuştur. Karışımdaki perlit oranı arttıkça ASR genleşmelerini azaltmadaki etkisinin arttığı görülmüştür, ancak perlitin %30 oranında kullanımı dahi genleşmeleri sınır değerinin altına düşürememiştir. Bu oranda mekanik

- özelliklerin çok düşmesinin beklenmesi nedeni ile perlit kullanımından vazgeçilmiştir.
- Zeolitin, çimento yerine ağırlıkça %5 oranında kullanımı ASR genleşmelerinde azalmaya değil, tam tersine, az miktarda artmaya sebep olmuştur. Bunun nedeni yüksek su emme kapasitesine sahip ve porozitesi yüksek olan zeolitin alkali yoğunluğuna sebep olması genleşmelerin artışına sebep olmuş olabilir. Buna karşılık %10, 15, 20 oranlarında zeolit kullanımıyla genleşmelerin kontrol karışımına kıyasla azaldığı, ancak sınır genleşme değerinin aşıldığı, %25 oranında kullanımıyla genleşmelerin sınır değerinin altında kaldığı görülmüştür.
- Pomzanın, çimento yerine ağırlıkça % 5, 10, 15, 20, 25 oranlarında kullanımı, kontrol karışımına kıyasla, ASR genleşmelerini azalmıştır. Karışımındaki pomza oranı arttıkça ASR genleşmelerini azaltmadaki etkisi artmıştır. Fakat sınır genleşme değeri aşılmıştır, ancak, pomzanın % 30 oranında kullanımı ile genleşmelerin sınır genleşme değerinin altında kaldığı görülmüştür.
- Pomza ve zeolitin birlikte kullanıldığı örneklerde, %10 zeolit + %15 pomza oranında kullanımı, kontrol karışımına kıyasla ASR genleşmelerini azaltmada etkili olmuştur. Deneylerde, %5 zeolit +%20 pomza, % 12,5 pomza+%12,5 zeolit , %15 zeolit + %10 pomza kullanılan üç karışım genleşmeleri azaltmada hemen hemen aynı oranda etkili olmuşlardır. Pomza ve zeolitin bir arada kullanıldığı harç örnekleri genleşmeleri azaltmada etkili olmasına karşın sınır genleşme değerini aşmışlardır.
- Kontrol karışımının genleşmesiyle, mineral katkı içeren harç çubuklarının 14 günlük genleşme değerleri karşılaştırıldığında; %5 zeolit, genleşmeleri %2 oranında arttırmış, %25 zeolit ise genleşmeleri %92 oranında azaltmıştır. %5 pomza, genleşmeleri %25 oranında azaltırken, pomzanın oranı %30'a çıkartıldığında genleşmelerde %89 oranında azalma görülmektedir. Zeolit ve

pomzanın birlikte %25 (%12,5+%12,5) oranında kullanılması ile genleşmelerde %84 oranında azalma sağlanmıştır.

- Çimento yerine %25 oranında zeolit kullanılması örneklerin 28 günlük basınç dayanımlarını %31 oranında, eğilme dayanımlarını ise %28 oranında düşürmüştür.
- Çimento yerine %30 oranında pomza kullanılması örneklerin 28 günlük basınç dayanımlarını %14 oranında, eğilme dayanımlarını ise %14 oranında düşürmüştür.
- %25 zeolit içeren karışımın toplam su emme yüzdesi, kontrol karışımının toplam su emme yüzdesinden %32 oranında fazladır. Zeolit içeren karışımın fazla su emmesi, zeolitin gözenekli yapısından kaynaklanmıştır. %30 pomza içeren karışımın toplam su emme yüzdesi kontrol karışımının su emme yüzdesinden %2 oranında daha azdır. Pomza içeren örneklerin su emme yüzdelерinin daha düşük olması, pomzanın puzolonik karakterinden ve sağladığı geçirimsizlikten ileri gelmektedir. Geçirimsizlik açısından değerlendirildiğinde, pomzanın, nem varlığında gerçekleşen alkali silika reaksiyonunu önlemede zeolite göre daha etkili olduğu söylenebilir.
- Sonuçlar topluca değerlendirildiğinde; çimento yerine ağırlıkça en az % 30 oranında pomzanın veya en az %25 oranında zeolitin mineral katkı olarak kullanılmasının, ASR' den dolayı oluşan genleşmeleri standartta belirtilen sınır genleşme değerinin altına düşürdüğü görülmüştür. Ancak zeolit ve pomza kullanımı ASR genleşmelerini azaltırken, dayanım özelliklerini düşürmüştür. Bu nedenle ileride bu konuda yapılacak çalışmalarda, pomza ve zeolitin dayanım kaybına karşı önlemler alınarak kullanımının ASR nedeniyle oluşan genleşmeler üzerindeki etkilerinin araştırılması uygun olacaktır.

- Zorunluluk olmadığı sürece şüpheli agregalar kullanılmamalıdır. Ancak, çimento ve agreganın değiştirilmesinin mümkün olmadığı durumlarda ve çok masraflı olduğu durumlarda veya betona alkali saldırısı ve nemin girişinin kolayca önlenemediği durumlarda; beton dizaynlarında belli oranlarda mineral katkı kullanımı, ASR nedeniyle oluşan genleşmeleri azaltmada bir çözüm olarak düşünülebilir. Dünya’da ve Türkiye’de sürekli büyümekte olan inşaat sektörü artık ASR’yi, betonun durabilitesini etkileyen ve önlenmesi gereken bir problem olarak kabul etmiştir. Bu nedenle diğer endüstriyel atık malzemelere nazaran, temin edilebilirliği daha kolay, maliyeti daha düşük, çevre sağlığına daha duyarlı olan pomza ve zeolit, mineral katkı kullanımına yönelik artan talebin karşılanabilmesi için yaygın olarak kullanılan, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atık malzemelere alternatif olarak düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- Abit, Ö. (1998). Alkali Silis Reaksiyonunun Kimyasal Katkılar ile Önlenmesi, Azaltılması veya Onarılması. *T.C. Karayolları Kurs Programı*. Ankara.
- Akman, S.M. (1998). Betonda Alkali Silis Reaksiyonunun Oluşumu, Hasar Düzeyi, Önlem ve Onarım Süreçleri. *T.C. Karayolları Kurs Programı*. Ankara.
- Alasali, M.M. ve Malhotra, V.M. (1991). Role of concrete incorporation high volumes of fly ash in controlling expansion due to alkali, aggregate reaction. *ACI Materials Journal*, V. 88, No.2, 159-163.
- American Society for Testing and Materials, 1981. Annual Book of ASTM standarts, Philadelphia.
- Andiç, Ö. (2002). *Alkali Silika Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Kullanılarak Kontrol Altına Alınması*, Yüksek Lisans Tezi, EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Andiç, Ö. (1999). *Alkali Silika Reaksiyonu ve Potansiyel Reaktif Agregaların İncelenmesi*, Lisans Tezi, EÜ Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- Baradan, B. (2000). *Yapı Malzemesi II*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No.207.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilitesi)*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Barringer, W. L., (1995). Using Accelerated Test Methods to Specifity Admixtures to Mitiagate Alkali-Silica Reactivity ASR . *Cement, Concrete and Aggregates*, V.21, No.2, 165-172.

Berube, M.A., Fournier, K. (1992). *Accelerated Test Methods for Alkali Aggregate Reactivity*. Canada: Advances in Concrete Technology.

Bigadiç Kaymakamlığı, 15 Ekim 2002.

<http://bigadic.gov.tr/haberler/indeks.htm>

Binal, A. (2004). Pesimum reaktif agregâ içeriğinin alkali-silika reaksiyonuna etkisinin deneysel yöntemlerle araştırılması. *İstanbul Üniversitesi Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, 17, No.2, 119-128.

Boddy, A.M., Hooton, R.D. ve Thomas, M.D.A. (2000). The effect of product form of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 30, 1139-1150.

CEB (Comite Euro-International du Beton) Design Guide. (1992). *Durable Concrete Structures*. Lausanne, Thomas Telford Ltd.

Chatterji, S. (1978). The role of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the breakdown of portland cement concrete due to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, V. 9, No.2.

Davies, G., Oberholster, R.E., (1987). Use of the NBRI accelerated test to evaluate the effectiveness of mineral admixtures in preventing the alkali silica reaction. *Cement and Concrete Research*, V. 17, 97-107.

Designing For Durable Concrete. (1988). *ACI Seminar Course Manual*. Detroit, Michigan.

Diamond, S. (1997). Alkali silica reactions- Some paradox. *Cement and Concrete Composites*, 19, 391-401.

Diamond, S. (1999). Unique response of LiNO_3 as an alkali silica reaction-preventive admixture. *Cement and Concrete Research*, 29, 1271-1275.

- Farny, J.A. and Kosmatka, S.H. (1997). Diagnosis and Control of Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Concrete Information.
- Forster ve diğeri. (1998). State of the art report on alkali-aggregate reactivity. *ACI 221.1R-98*.
- Gaze, N. ve Nixon, P.J. (1983). The effect of pfa on alkali-aggregate reaction. *Magazine of Concrete Research*, V.35, No.123, 107-110.
- Gillott, J.E. ve Rogers, C.A. (1994). Alkali-aggregate reaction and internal release of alkalis. *Magazine of Concrete Research*, 46, No.167, 99-102.
- Gougel, R., (1995). Alkali release by volcanic aggregates in concrete. *Cement and Concrete Research*, V.25, No.4, 841-852.
- Grattan-Bellew, P.A. (1987). *Concrete Alkali Aggregate Reactions*. Canada: National Research Council of Canada.
- Gudmundsson, G. ve Olafson, H. (1999). Alkali silica reaction and silica fume 20 years of experience in Iceland. *Cement and Concrete Research*, 29, 1289-1297.
- Gündüz, L. (Ed.). (1998). *Pomza Teknolojisi*. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları. No:1
- Handbook for the identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures. (1994). *SHRP-AASHTO Innovative Highway Technologies*. USA.
- Hansen, W.C., (1944). Studies relating to the mechanism by which alkali aggregate reaction produces expansion in concrete. *Journal of American Concrete Institute Proceedings*, 40, No.3, 213-227.

- Hobbs, D. W. (1988). *Alkali-Silica Reaction in Concrete*. London: Thomas Telford Ltd.
- Hobbs, D. W. (1981). The alkali-silica reaction- a model for predicting expansion in mortar. *Magazine of Concrete Research*, V.33, No.117, 208-219.
- Hobbs, D. W. (1993). The effectiveness of PFA in reducing the risk of cracking due to ASR in concretes containing cristalite. *Magazine of Concrete Research*, 26, No.168, 167-175.
- Hobbs, D. W. ve Gutteridge, W. A. (1979). Partical size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction. *Magazine of Concrete Research*, V.31, No.109, 235-242.
- Hooton, R. D. (2000). Canadian use of ground granulated blast furnace slag as a supplement any cementing material for enhanced performance of concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Canada.
- Hudec, P. P. And Larbi, R.E., (1989). Chemical Treatments and Additives to Minimize Alkali Reactivity. *Proceedings, Eight International Conference on Alkali Aggregate Reaction*, 193-197.
- Jackson, N. ve Dhir, R. K. (1988). *Structural Engineering Materials*. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Japan International Cooperation Agency (JICA). (1996). The Study On The Maintenance and Rehabilitation of Highway Bridges in The Republic of Turkey. *Final Report*.

- Johansen, V., Thaulow, N. ve Skalny, J. (1993). Simultaneous presence of alkali-silica gel and ettringite in concrete. *Advances in Cement Research*, 5, No.17, 23-29.
- Katayama, T. (1996). Characteristics of alkali aggregate reaction. *The Study on The Maintenance and Rehabilitation of Highway Bridges in the Republic of Turkey*. Unpublished.
- Kibaroglu, U. 20 Ağustos 2006,
<http://us.geosities.com/ukibaroglu/calismalar/zeolit.htm>
- Kosmatka, S. H., and Fiorato, A. E. (1991). Detecting and Avoiding Alkali Aggregate Reactivity. *Concrete Technology Today, Portland Cement Association*, V.12, No.3.
- Lane, D.S. ve Özyıldırım, C. (1999). Preventive measures for alkali silica reactions. *Cement and Concrete Research*, 29, 1281-1288.
- Malvar, L. J., Cline, G. D., Burke, D. F., Rollings, R., Sherman, T. W. ve Greene, J. L. (2002). Alkali-silica reaction mitigation: state of the art and recommendations. *ACI Materials Journal*, V.99, No.5, 480-489.
- Meissner, H. S.(1941). Cracking in Concrete Due to Expansive Reaction between Aggregate and High-Alkali Cement as Evidenced in Parker Dam. *ACI Journal*, V.37, April, 549-568.
- Miyagawa, T. (1991). Durability design and repair of concrete structures: chloride corrosion of reinforcing steel and alkali-aggregate reaction. *Magazine of Concrete Research*, 43, No.156, 155-170.

- Naiqian, F. ve Tingyu, H. (1998). Mechanism of natural zeolite powder in preventing alkali- silica reaction in concrete. *Advances in Cement Research*, 10, No.3, 101-108.
- Naiqian, F., Hongwei, J. ve Enyi, C. (1998). Study on the suppression effect of natural zeolite on expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction. *Magazine of Concrete Research*, 50, No.1, 17-24.
- Neville, A. M. (1997). *Properties of Concrete*. England: Longman Limited.
- Nixon, P. J., Page, C. L., Bollinghaus, R. ve Canham, I. (1986). The effect of a pfa with a high total alkali content on pore solution composition and alkali silica reaction. *Magazine of Concrete Research*, V.138, No.134, 30-35.
- Ozol, M.A. ve Dusenberry, D. O., (Ed.) (1992). *Deterioration of Precast Panels with Crushed Quartz Coarse Aggregate Due to Alkali Silica Reaction*. Mishigan:Farmington Hills.
- Perry, R.H. ve Green, D. (Ed.) (1985). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Mc Graw Hill , (6).
- Prezzi, M., Monteiro, J., M., P. ve Sposito, G. (1998). Alkali silica reaction- Part 2: The effect of chemical admixtures. *ACI Materials Journal*, V.95, No.1.
- Prezzi, M., Monteiro, J., M., P. ve Sposito, G. (1997). Alkali silica reaction- Part 1: Use of double layer theory to explain the behaviour of reaction product gel. *ACI Materials Journal*, V.94, No.1, 10-17.
- Poole, A. B., (1992). *Introduction to Alkali Aggregate Reaction in Concrete*. New York: Van Nostrand Reinhold.

- Ramlochan, T., Thomas, M. ve Gruber, K. (2000). The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 339-344.
- Shayan, A., Diggins, R. ve Ivanusec, I. (1996). Effectiveness of fly ash in preventing deleterious expansion due to alkali-aggregate reaction in normal and steam-cured concrete. *Cement and Concrete Research*, V.26, No.1, 153-164.
- Shayan, A., (1998). Effects of NaOH and NaCl solutions and temperature on the behavior of specimens subjected to accelerated AAR tests. *Cement and Concrete Research*, V.28, No.1, 25-31.
- Swamy, R. N. (1992). *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Swamy, R. N. (1990). *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Scotland,UK: Thomson Litho Ltd.
- Tosun, K. (2001). *Uçucu Kül ve Silika Dumanının Alkali Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Türkel, S., Yazıcı, H. ve Baradan, B. (2000). An investigation on the alkali-silica reactivity of Izmir region aggregates. *Cement and Concrete Technology in the 2000 s*, Second International Symposium, Istanbul.
- Türker, P. ve Erdoğan, B. (1998). Alkali-silika reaksiyonu. *Çimento ve Beton Dünyası*, 13.
- Wang, H. ve Gillott, J. E. (1991). Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide. *Cement and Concrete Research*, V.21, 647-654.

- Wang, H. ve Gillott, J. E. (1991). Effect of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ on alkali-silica reaction. *Magazine of Concrete Research*, 43, No. 156, 215-218.
- Wang, H. ve Gillott, J. E. (1992). Competitive nature of alkali-silica fume and alkali-aggregate (silica) reaction. *Magazine of Concrete Research*, 44, No. 161, 235-239.
- West, G. (1996). *Alkali Aggregate Reaction in Concrete Roads and Bridges*, UK: Thomas Telford, 163 s.
- Wilson, M., Cabrera, J. G. ve Zou, Y. (1994). The process and mechanism of alkali-silica reaction using fused silica as the reactive aggregate. *Advances in Cement Research*, 6, No.23, 117-125.
- Xu, G. J. Z., Watt, D.F. ve Hudec, P. (1995). Effectiveness of mineral admixtures in reducing ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, V.25, No.6, 1225-1236.