



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy
2010, Volume: 5, Number: 3, Article Number: 1A0103

ENGINEERING SCIENCES

Received: May 2010
Accepted: July 2010
Series : 1A
ISSN : 1308-7231
© 2010 www.newwsa.com

Mustafa Çullu¹
Serkan Subaşı²
Hakan Bolat¹
Hacettepe University¹
Düzce University²
subasi.serkan@gmail.com
Ankara-Turkey

BETON KANSERİ-ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU

ÖZET

Alkali silika reaksiyonu (ASR) geçmişten günümüze beton yapıların dayanıklılığını etkileyen önemli bir faktördür. Gerek ülkemizde gerekse diğer ülkelerde birçok betonarme yapıda hasarlar meydana getiren (ASR), oldukça kompleks kimyasal bir reaksiyondur. Uzun ömürlü beton elemanların tasarımında ve beton elemanlarda ASR'den kaynaklı oluşabilecek zararın azaltılması açısından bu alanda yapılacak çalışmalar önem arz etmektedir. Özellikle yüksek alkali içerikli çimento ve reaktif agrega kullanılan beton elemanlarda ASR'nin tespiti ve önlenmesine yönelik çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, ASR'nin tespit edilmesi, ASR'den kaynaklı betonda oluşacak zararlar ve önleme yöntemleri ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton, Çimento, Alkali Silika Reaksiyonu, Agrega, Dayanıklılık

CONCRETE CANCER-ALKALI SILICA REACTION

ABSTRACT

ASR is an important factor which affects the durability of concrete structures from past to present. Both in our country and other countries, ASR is rather a complex chemical reaction causing damage in a lot of concrete structures. Making researches about this case is very important to decrease the damage that may be caused by ASR in long lasting concrete parts designs and concrete parts. Especially for cements with high-alkali content and concrete parts which reactive agrega is used in, studies about detecting and preventing ASR must be done. In this study, detecting ASR, damages caused by ASR and methods to prevent damages are discussed.

Keywords: Concrete, Cement, Alkali Silica Reaction, Aggregate, Durability

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1920'li ve 1930'lu yıllarda ABD'de, Kaliforniya'daki beton yapılarında nedeni belirsiz çatlak oluşumlarına bağlı yıkımlar rapor edilmiştir. Bu raporlarda beton malzemelerin standartlara uygun olmasına rağmen, yapım yılını takiben birkaç yıl içinde çatlaklar olduğu açıklanmıştır. Ayrıca, genellikle harita çatlağı şeklinde görülen çatlaklardan jel çıkışı, betonda patlamalar gibi belirtiler de işaret edilmiştir. Stanton, 1940 yılında bu tür çatlakların (daha sonra Alkali-Silika Reaksiyonu olarak adlandırılan) kimyasal bir reaksiyonun sonucu olduğunu açıklamıştır [1].

Alkali-silika reaksiyonu (ASR) Portland çimentosundaki alkali hidroksitlerle, agregada mevcut bazı mineraller (opal, çört, kalsedon, trimit, kristobalit ve kuartz gibi) arasında oluşan bir reaksiyondur [2]. Reaksiyon sonucu oluşan alkali-silika jeli bünyesinde fazla miktarda su absorbe ederek genişler, bu suretle de betonun şişmesine ve çatlamasına yol açar [3].

ASR'nin oluşumu için, agrega bünyesinde reaktif silis, alkalitesi yüksek por çözeltisi ve ortamda yeterli rutubet bulunmalıdır. Bu koşullardan herhangi biri olmazsa ASR nedeniyle bir genleşme de olmayacaktır. Betonda oluşan yumuşak dokunun (jel) miktarı; silikanın türü, miktarı ve alkali hidroksit konsantrasyonuna bağlıdır. ASR'nin oluşturduğu reaksiyon iki aşamada gerçekleşir [3].

Alkali + Reaktif Silika → Alkali Silika Jel Ürünleri

Alkali Silika Jel Ürünleri + Rutubet → Genleşme

Betonda içsel çekme gerilmelerinin oluşumu 1.aşamadaki jel oluşumu ile eş zamanlı değildir. Bu nedenle jelin varlığı mutlaka ciddi boyutta ASR tahribatı oluşacağı anlamını taşımayabilir [3].

Rutubet, alkali iyonlarının yayılmasına, bu yayılma reaksiyonlarında jel oluşumuna, oluşan jel de su emerek şişip genleşmeye ve betonda içsel çekme gerilmelerinin doğmasına neden olur. Servis ömrü boyunca kuru kalan bir betonda ASR ciddi bir tehlike olmayabilir. Araştırmalar başlı nem oranı %80'in üstünde olan betonlarda ASR'nin oluştuğunu göstermektedir [3].

Sıcaklık artışı reaksiyon hızını arttırmaktadır. Agregaların büyük çoğunluğu daha yüksek sıcaklıklarda fazla reaktiflik göstermektedir. Ayrıca sık kuruma-ıslanma tekrarı betonda alkali taşınmasını kolaylaştırmakta ve alkalilerin kuruma bölgelerinde yoğunlaşmasına neden olmaktadır [3].

Beton ya da çimento için kullanılan toplam alkali içeriği terimi "sodyum oksit eşdeğeri" olarak ifade edilir ve aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır [5].

$$Na_2O = Na_2O + 0,658 KO \quad (1)$$

Alkali-silika reaksiyonu; reaktif silikanın çözülmesi, kalsiyum-sodyum-potasyum jelinin oluşması ve su absorpsiyonu ile jelin genişlemesi olarak üç aşamada meydana gelir. Silisin çözülmesi hidroksit iyonlarının OH⁻ atağı neticesinde iki aşamada olur. Hidroksit iyonlarının mevcudiyeti betonda sadece Ca(OH)₂ tarafından değil aynı zamanda NaOH ve KOH tarafından da sağlanır. Silikanın çözünme hızı katı parçacıklar içindeki çatlaklarda mevcut olan alkali sıvının difüzyonundan etkilenir. İyonların türü ve iyonik konsantrasyon bu hızı kontrol eder. Çünkü tanecikler içine giren sıvı aynı zamanda hidroksit iyonlu katyonları sürükler ve bu katyonların iyonik yarıçapları difüzyonu sınırlayabilir. Bu yüzden daha küçük iyonik yarıçapa sahip potasyum katyonları daha yüksek difüzyon hızına sebep olabilir. Aynı nedenle lityum tuzları ASR'yi önleyici karışım olarak kullanılır. Çünkü daha büyük iyonik yarıçapa sahip olan lityumhidroksit difüzyonun bazı bölgelerde oluşumuna engel olur [6].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Bu çalışmada Alkali Silika Reaksiyonu hakkında literatür taraması yapılmıştır. Alkali Silika Reaksiyonunun tespit edilmesi ve betonda oluşacak zararlar ve önleme yöntemleri ele alınmıştır. Bu alanda çalışma yapan araştırmacılara yardımcı olacağı düşünülmektedir.

3. ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNUN BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF ALKALI SILICA REACTION)

Belli bir agreganın, Alkali Silika Reaksiyonu sebebiyle genişlemeye 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 [7].

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 [8].

3.1. Harç Çubuğu Metodu-Astm C227 (Mortar Bar Method-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 [9].

Numuneler, %100 bağıl nem ortamında 37,8°C (100°F)'de kenarlarında ortamı nemli tutan fitil bulunduran kurutma kâğıdının 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 Na₂O seviyesine çıkarılması, su/çimento oranının kırılmış agrega için 0,50, doğal agrega için 0,44 seviyesinde tutulması önerilmektedir [10 ve 11].

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 [8].

3.2. Kimyasal Metot-Astm C289 (Chemical Method-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 alkalinitedeki azalma ölçülür. Sonuçlar eğride işaretlenerek kontrol edilir. Rc alkalinitedeki azalmayı, Sc ise çözülmüş silisi ifade eder. Agregaya 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 [12].

3.3. Agregaların Petrografik Analizi-ASTM C295 (Petrographic Examination of Aggregates-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 [10].

ASTM C295 yöntemi, agrega numunesinin analizinde kullanılan megaskopik ve mikroskobik 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. Mikroskobik 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 spektroskopi gibi analitik teknikler de agrega parçacıkları içindeki silisin formu ve kristal formunun saptanmasında kullanılmaktadır [7 ve 13].

3.4. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Metodu-ASTM C1260 (Accelerated Mortar Bar Method-ASTM C1260)

Bu metot, numune agregalar kullanılarak elde edilen harç çubuklarının yüksek alkaliniteli çözeltide yüksek sıcaklıkta saklanması ve uzunluk değişimlerinin ölçülmesinden ibarettir. 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. 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 etkin bilgiler vermektedir [14 ve 15].

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 genleşme değeri vermesini şart koşmaktadır. Buna göre, deney süresi sonunda kontrol numunesi genleşmelerini %0,1'in altına düşüren minimum katkı miktarı, kullanılabilir "emniyetli miktar" olmaktadır [16].

ASTM C1260'ın ağır deney koşulları yavaş reaksiyon gösteren ve C227 ile saptanamayan agregaların saptanmasında yararlıdır [7].

3.5. Beton Prizma Metodu-ASTM C1293 (Concrete Prism Method-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 kütlegece %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 yılsonundaki genleşme %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 [10 ve 17].

Bu metot, mineral ve kimyasal katkıların ASR genleşmelerine etkisi hakkında en gerçekçi sonuçları vermektedir. Mineral katkıların etkinliği değerlendirilirken, 2 yıllık genleşme değerinin %0,04 olarak alınması ve karışımın alkali içeriğinin çimentonun kütlegece %1,25'i değerine arttırılması önerilmektedir. ASTM C1293 ile ASTM C227 arasında her ikisinde de çimento agrega bileşimi söz konusu olması açısından benzerlik mevcuttur. Her ikisinde de anlamlı sonuçlar elde edilmesi bir yılı bulabilir; ASTM C1293 testi, ASTM C227, ASTM C295, ASTM C289 veya ASTM C1260 testlerinden elde edilen sonuçları desteklemek amacıyla kullanılmalıdır [7].

3.6. Kullanılan Diğer Deney Yöntemleri (Other Experimental Methods Used)

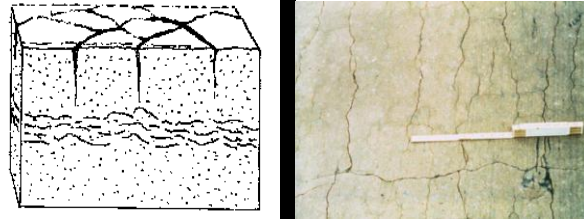
Jel-Pat metodu, İngiltere'de ortaya çıkmış olup, petrografik mikroskop altında incelenemeyecek kadar ince dağılımlı reaktif silisin ortaya çıkarılmasına imkan vermektedir. Bu yöntemde, test edilen agregalardan oluşmuş düzgün yüzeyli harç örnekleri üç gün alkalin çözeltide bekletilir, yüzeydeki jel oluşumu mikroskopla incelenir. Bu yöntem ile reaktivite belirlenirse, beton veya harç prizma metotlarıyla doğrulanmalıdır [18].

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 [7].

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 kütlegece kayıp, "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 [10]. 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.

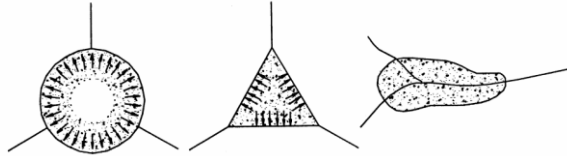
4. ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNUN BELİRTİLERİ (SYMPTOMS OF ALKALİ SİLİKA REACTION)

Betonda ASR ürünleri oluşmadıkça ASR hasarından bahsedilemez. Yapılacak dikkatli incelemelerle tespit edilebilecek ASR belirtileri; genleşme, betonda çatlaklar, yüzey birikintileri, yüzey parçalanmaları-patlama ve renk değişimleridir. ASR varlığının en tipik göstergesi, genleşmelerle ortaya çıkan harita çatlakları tipindeki çatlak desenleridir (Şekil 1). ASR çatlaklarının deseni, yapılarda oluşan zemin ve muhtelif yüklerin neden olduğu çatlak düzenlerinden oldukça farklıdır [19].



Şekil 1. ASR'nin neden olduğu harita çatlakları [21]
(Figure 1. Map cracks caused by ASR [21])

Göz muayenesi ile çatlakların konumu ve deseni, uzunlukları, genişlikleri, görünür derinlikleri, çatlakların agrega kesitinden mi yoksa çimento hamurundan mı geçtiği saptanabilir. ASR'nin oluşturduğu jelleşme, agrega taneciği içinde veya agrega taneciği çevresinde reaksiyon halkası biçiminde gelişebilir. Bulabildiği ölçüde su emerek enerjisini boşaltan bu jel, su emdikçe hacimsel olarak büyüyerek ASR'den kaynaklanan çekme gerilmeleri nedeni ile 3 veya 4 kollu yıldız şeklinde çatlak (Şekil 2) [19].



Şekil 2. ASR'den kaynaklanan çatlaklara ilişkin örnek görünüşler [19]
(Figure 2. Examples views of cracks caused by ASR [19])

ASR jelinin su emerek şişmesi sonucu beton içinde depolanan potansiyel enerji, bu çatlama ile boşalır [19]. Reaksiyona giren tanecik sayısı arttıkça bu yıldızlar birleşerek harita çatlakları biçiminde çatlak deseni oluştururlar [22].

Harita çatlakları biçiminde çatlak deseni oluşturan tek mekanizma ASR değildir. Tekrarlı donma-çözülme ve benzeri büzülme-şişme olayına neden olan mekanizmalar da harita çatlakları deseninde çatlak oluştururlar [19].



Şekil 3. ASR'den kaynaklanan çatlaklara ilişkin görünüşler [19]
(Figure 3. Examples views of cracks caused by ASR [19])

Beton çatlakları boyunca beyazdan griye kadar değişen renklerde ASR jeli ya da kalsiyum karbonat tortuları görülebilir. Bu birikintilere bazen yüzey tortuları veya salgıları da denir. Çatlaklardan dışarı sızan bu maddeler, beyaz sarımtırak veya renksiz, viskoz, akışkan, mumsu, elastik yapışkan ya da sert olabilirler [19].

Yüzeyde veya yüzeye çok yakın bölgelerdeki parçalanmalar, tipik bir mısır patlaması gibi davranarak beton yüzeylerinde küçük çukurlar oluşturur. İleri yaşlarda, ASR kopmalarının kaplama betonlarında daha çok görülür. Özellikle rutubetli, ıslak kohezif zeminler üzerinde olan beton kaplamalarda, rutubet yoğunlaşması patlama türü parçalanmaları arttırır. Yüzeyde renk kaybı veya renklenmeler, genellikle harita çatlağı ile birlikte görülür. Koyu renkli veya kararmış bölgeler genellikle ASR'den kaynaklanmaktadır. Çatlak boyunca olan bölgelerde 2-3 mm genişlikte renk açılması, beyazlaşma, pembeleşme ya da kahverengileşme görülebilir [19].

4.1. Genleşme (Expansion)

Beton ve betonarme yapılarda ASR varlığının en tipik göstergesi harita çatlağı (map cracking) türünde bir çatlak desendir. ASR çatlaklarının deseni, yapı ya da yapı elemanlarında zemin ve/veya yük etkileri ile oluşmuş çatlak düzeninden çok farklıdır. Basınç, çekme, kesme, oturma vb. nedenlerle oluşmuş çatlaklardan kolayca ayırt edilebilir. ASR çatlakları ileri yaşlarda veya ileri safhalarda kapalı eklem yerleri, pullanmış beton yüzeyler, kapak atma veya yapı elemanının farklı kısımlarının birbirlerine göre konumlarında kayma şeklinde kendini gösterir [21].

ASR'nin betonda yarattığı bozulmalar çok yavaş seyrettiği için ileri boyuttaki bozuklukların, ani göçmelerin oluşma riski azdır. ASR, yapının servis hizmetinde problemlere yol açabilir. Ayrıca tuzlu su, sülfat etkileri, tabii don ve donma çözülmenin etkilerinin hızlanmasını ve artmasını sağlar. Örneğin beton kaplamalarda ASR nedeniyle oluşan harita çatlağı biçimindeki çatlaklardan içeri giren su veya tahripkâr tuzlu suların donma çözülme etkisi ile parçalanma hızlanır ve artar. Benzer şekilde ASR dışında başka nedenlerle oluşan çatlaklardan içeri giren tahripkar tuzlu sular veya su, ASR'nin oluşumuna ve/veya hızlanmasına ve oluşturacağı hasarların artmasına neden olabilirler. Hidrolik barajlarda ASR daha ciddi bir öneme sahiptir. Özellikle yüksek hızlarda dönen güçlü ekipmanların ankraji ve ASR ilişkisi çok önemlidir [23].

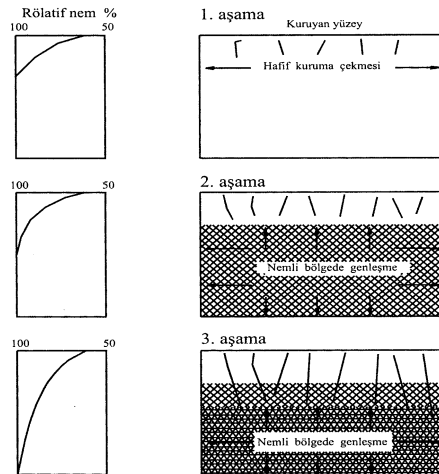
4.2. Çatlaklar (Cracks)

ASR'nin betondaki en tipik görülebilir etkisi harita çatlağı şeklindeki çatlak ağıdır. Çatlakların doğru tanımlanabilmesi için, donatı durumu, gerilme doğrultusu, mesnet koşulları ve diğer sınır koşulları ile renk değişimleri ve yüzey koşullarının çok iyi ve doğru saptanması gerekir. Geniş çatlaklar kolay fark edilebilir. İnce çatlaklar her zaman kolay görünmezler. Ancak yüzey ısıtılıp bir süre kurumaya bırakıldığında, yüzeyde çatlak olmayan yerlerdeki suyun, çatlaklardaki sudan daha çabuk buharlaşması nedeniyle kılcal çatlaklarda kolayca fark edilebilirler. Bu nedenle beton yüzeylerin yağmur sonrasında izlenmesi iyi bir zamanlamadır [24].

ASR'nin oluşturduğu jelleşme, agrega taneciği içinde veya agrega taneciği çevresinde reaksiyon halkası biçiminde gelişebilir. Bulabildiği ölçüde su emerek enerjisini boşaltan bu jel, su emdikçe hacimsel olarak büyür. Hacim artışı beton içerisinde 10 MPa veya daha büyük çekme gerilmelerinin doğmasına neden olur [25]. İyi bir yapı malzemesi olan betonun, gerçekte basınç yükü taşıyan malzeme olması, çekme dayanımının iyi olmaması ve çekme dayanımının, basıncın yaklaşık 1/8, 1/10'u kadar olduğu göz önüne alınırsa, ASR'nin BS 40 olan betonları bile kolayca çatlatabileceği açıktır [20].

Beton kaplamalarda ve bordürlerde ASR'nin neden olduğu genişlemeden dolayı oluşan çatlamlar, önce rutubetin fazla olduğu serbest uçlarda ve birleşme yerlerinde oluşur [25].

ASR çatlakları genelde enine birleşimlere dik ve serbest yol kenar uçlarına paralel ve asfalt kaplamaya karşı yöndedirler. Bu çatlaklar genellikle harita çatlağı şeklinde gelişim gösterirler. Sürekli donatılı kaplamalarda ASR çatlakları donatıya paralel gelişir. Trafikten ileri gelen statik ve dinamik yüklenmeler, ASR'nin neden olduğu çatlakların genişlik ve oluşum hızını arttırır. Şekil 4'de beton kaplamalarda ASR çatlaklarının gelişim hızı ve aşamaları verilmektedir. İlk aşamada kuruma büzülmesinden kaynaklanan kılcal çatlaklar oluşur. İkinci safhada beton içinde oluşan ASR'nin neden olduğu genişleme ve çatlamlar gelişir. Üçüncü aşamada, yüzeyde sürekli kuruma, içe giren suyun reaksiyon hızını ve arttırışı gözlenir. Bu model özel olarak beton kaplamalar için oluşturulmuş olmasına karşın, olayların sırası diğer yapılarda da buna benzerdir [26].



Şekil 4. Zemin üzerinde yanıl basınca maruz kalmayan beton kaplamalarda ASR çatlakları için model [26]
(Figure 4. Lateral pressure on the ground in concrete pavement not exposed for ASR cracks model [26])

ASR çatlakları, beton bünyesine giren suyun donup-çözülmesi sonucu oluşan çatlaklardan ayırt edilmelidir. Donma-çözülme çatlakları genellikle enine birleşim derzlerine ve serbest kenarlara paraleldirler. ASR ve donma-çözülmenin neden olduğu çatlaklar arasındaki farklılıklar şu şekildedir;

- İlk aşamada kaplama yüzeyindeki hızlı buharlaşma nedeniyle yüzeyde su kaybının neden olduğu büzülmeden dolayı çok kılcal çatlaklar oluşur. Bu aşamada ASR'nin neden olduğu çatlaklar gözlenemez. Beton bu aşamada stabildir ve bu halini uzunca bir süre korur [27].
- ASR'de ikinci aşama betonun yapıdaki yerine yerleştirilmesinden aylar hatta yıllar sonra başlayabilir. Reaktif agreganın fazlalığı ve PH değeri yüksek por çözeltileri bu aşamaya geçişi ve bu aşama süresini kısaltır. İkinci aşamada jel oluşumu ve gelişmenin neden olduğu çatlaklar oluşur ve gelişir. Jel hem agrega taneciği çatlaklarının içinde hem de agrega dış yüzeyinde oluşabilir. Jel oluşumu ilk aşamada hacimsel küçülmeye de neden olabilir. Ancak rutubet nedeniyle suyu emen jel şişerek hacimsel olarak genişlerken beton içinde çekme gerilmeleri doğmasına neden olur. Serbestçe genişemeyen, yük ya da herhangi bir nedenle genişmesi sınırlandırılmış beton yüzeyler, şişmeye karşı koyamaz ve yüzey çatlakları ayrılmaya başlar. Genişleyen yüzey çatlakları, ASR'nin oluştuğunun bir göstergesidir. Genişleyen çatlaklar, yüzey sularının beton içine girişini kolaylaştırır. Bu ise oluşan jelin artmasına ve daha çok şişmesine neden olur. Bu aşamada genişleyen çatlaklardan jelin dışarı çıkışı söz konusu olur [27].
- Üçüncü aşamada ise, sürekli kuruyan yüzeye yakın bölgelerde reaksiyon hızı yavaşlar. Ancak rutubetin fazla olduğu iç kısımlarda reaksiyon hızla devam ederek jel oluşumu, artışı ve şişme basıncında artış devam eder. Böylece çatlaklar giderek genişler. ASR, reaksiyona giren silika tükeninceye veya por çözeltili PH'ı yeterli miktarda azalınca ya da jelin oluşumu ve genişmesini tamamen durduracak boyutta kuruma gerçekleşinceye kadar devam edecektir. Bu üç aşamalı olarak açıklanan süreç, tamamen kesilebildiği gibi, süreli ya da sürekli olarak devam edebilir de. Örneğin yapı servis ömrü boyunca rutubete karşı korur veya rutubet söz konusu olmazsa, reaksiyon bir noktadan sonra tamamen durabilir. Ancak ortam koşulları reaksiyona olanak sağladığında ASR yeniden başlayacaktır [27].

Beton kaplamalar ve bordürlerin dışındaki yapılarda gözlenen ASR çatlaklar, genellikle yapı betonlarının sürekli veya tekrarlanan su etkilerinin (rutubetin) söz konusu olduğu kısımlarda daha çok, daha geniş ve daha tahripkardır. Örneğin iskelelerin suya yakın bölgeleri, köprü, menfez, alt geçit, üst geçit ve viyadük kanat duvarlarında, beton bordürlerin alt kısımlarında, liman mendireklerinde, ve kolon tipi düşey elemanlarda (kılcallık nedeniyle su girişinin etkisiyle) ASR çok daha fazla tahripkardır [28].

Herhangi bir yönde basınç etkisi söz konusu olmadığında, betondaki ASR çatlakları rastgele yönlerdedir. Ancak kolon tipi düşey yük etkisinin fazla olduğu elemanlarda basınç yükü (düşey yük) etkisi nedeniyle, düşey doğrultuda beton serbestçe genişleyip deforme olmadığından, ASR çatlakları düşey yük doğrultusunda daha geniş ve düşey çatlaklar çıplak gözle bile oldukça net bir şekilde görülebilirler [29]. Çünkü yanal doğrultularda beton genişleme ve deforme olmasını engelleyen herhangi bir yanal bir basınç söz konusu değildir. Ancak düşey basınç yüküne dik, yani yere paralel doğrultudaki çatlaklar çoğu kez gözle fark edilemeyecek kadar kılcal

boyutta ve azdır. Boyuna donatılar basınç gerilmelerine paralel olduğundan, doğrusal ASR çatlakları, kabaca donatıya paraleldirler. Çeliğin korozyonu nedeniyle oluşan çatlaklar hemen tam donatı üstünde gelişirken, ASR çatlakları donatılar arasında ve donatılara paralel olarak oluşup gelişir. Donatı iki yönde de eşit aralıklarda ise, kabaca dikdörtgen desenli çatlaklar gelişir [25].

Donatısız beton yapılarda ise çatlak desenini daha çok yapının serbestçe genişleyip deforme olmasını engelleyen sınır koşulları belirler. Donatısız beton barajlarda, yatay doğrultuda betonun serbestçe genişleyip genişlemeyi ve deformasyonunu sınırladığından çatlaklar düşey doğrultulu değildir, tersine düşey doğrultuda deformasyonu sınırlayan koşullar olmadığından çatlaklar yatay doğrultuludur [27].

4.3. Yüzey Birikintileri (Accumulation of Surface)

Beton çatlakları boyunca beyazdan griye kadar değişen renklerde ASR jeli ya da kalsiyum karbonat tortuları görülebilir. Bu birikintilere bazen yüzey tortuları veya salgıları da denir. Çatlaklardan dışarı sızan bu maddeler beyaz sarımtırak ya da renksiz, viskoz, akışkan, mumsu, elastik yapışkan veya sert olabilirler [20].

Yüzey birikintileri ASR jelinin genişmesi veya başka suların çimentodaki kireci çözmesi sonucu yüzeyde beyaz veya farklı renkte birikintiler görülebilir. Bu yüzey birikintileri ASR ürünü olmasa bile, saha etütleri, gözlemleri ve incelemeleri sırasında renklenmeler, yüzeydeki doku özellikleri, rutubetlilik durumu, yüzey sertliği vb. farkı gözlemlerin desen ve bölgelerinin kaydının tutulması son derece önemlidir. Yüzey tortuları içinde ASR jelinin bulunup bulunmadığına ilişkin yapılacak kimyasal analizler oldukça önemli ve yararlıdır [19].

4.4. Yüzey Patlamaları, Parçalanmaları (Popout)

Yüzeydeki veya yüzeye çok yakın bölgelerdeki fragmentler, tipik bir mısır patlaması (patlamış mısır) gibi davranarak beton yüzeylerinde boyutu genellikle 25-50 mm. arasında değişen oyuklar, çukurlar oluştururlar. Kum taneciği boyutundaki parçacıkların neden olduğu pop-out türü patlama ve parçalanmalar daha küçük boyutlu çukurlar oluştururlar. Çukurda genellikle, oyuk tabanında parçalanmış çatlamaş bir agrega parçacığı bulunur [20].

Beton yüzeyindeki bu tür çukurların varlığı ve durumları, betonda kullanılan agreganın kalitesi hakkında önemli ip uçları, bilgiler verirler. ASR'nin neden olduğu genişmeden kaynaklanan pop-out'lar, beton yüzeyinin hemen altındaki ASR jelinin potansiyel enerjisinin boşaltılması, basınç fazlasının giderilmesi isteğinin bir sonucudur. Pop-out bölgesinde jel bulunması ise, ASR varlığının çok önemli bir kanıtıdır [20].

İleri yaşlarda ASR kopmalarının gelişmesi, artması kaplama betonlarında daha çok görülür. Özellikle rutubetli, ıslak kohezif zeminler üzerinde olan beton kaplamalarda rutubet yoğunlaşması pop-out türü parçalanmaları arttırır. Pop-out sonrası oluşan çukur yüzeydeki agregaların incelenmesi ile parçalanmaların nedeni açıklanabilir [20].

Bu tür kopma veya parçalanmalar, genellikle bir yüzey düzgünlük sorunudur. Çok yüksek hızların söz konusu olduğu havaalanı pistleri dışında, diğer kaplama veya başka yapılarda pop-out kopmaları çok ciddi bir sorun yaratmaz. Ancak yinede pop-out parçalanmalarını önleme yolları mevcuttur. Bunlar;

- Zorunlu ve gerekli olmadıkça, düzgün çelik master ya da mala ile kaymaklanmış çok düzgün pürüzsüz yüzeyler oluşturulmamalıdır.

- Kür metodu olarak, zorunlu olmadıkça kür maddeleri poliflimler, kür kaplama elemanları (kağıt) yerine ıslak kür maddeleri, su ile sisleme veya pülverize su püskürtme gibi ıslak kür metotları tercih edilmelidir.
- Katkılı çimento tipleri (katkılı çimento, cürufli çimento, uçucu küllü çimento, vb.) ve/veya çimentolanma özelliği olan puzolanlar kullanılmalıdır [20].

ASR kaynaklı pop-out'ların varlığı, beton yapıda mutlaka genleşme ve harita desenli çatlakların oluşacağı veya ASR'nin neden olacağı diğer etkilerinde mutlaka oluşacağı anlamına gelmez. Ancak önemsenmesi de gerekir. Pop-out türü patlama ve parçalanmalar bazen yüzeyde veya yüzeye yakın bölgede bulunan poröz bir çakmak taşının su emmesi ve suyun donması sonucu genleşme ile parçalanabilir, kopmalara neden olabilir [20].

4.5. Renk Değişimi (Change Color)

Yüzeyde renk kaybı ve/veya renklemeler, genellikle harita çatlakları ile birlikte görülür [22]. Koyu renkli veya kararmış bölgeler genellikle ASR'den kaynaklanır. Çatlak boyunca olan bölgelerde 2-3 mm. genişlikte renk açılması, beyazlaşma, pembeleşme, kahverengileşme görülebilir [20].

5. ALKALİ SİLİKA REAKSİYONUNA KARŞI ALINACAK ÖNLEMLER (ALKALI SILICA REACTION AGAINST MEASURES)

ASR'yi betonda zararlı etkilerini gösterebilmesi için temel olarak ortamda üç şartın varlığı gerekmektedir [29];

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

ASR'yi 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 (Determination of Reactive Aggregates and the Aggregate Selection)

Tüm agregası türleri ASR açısından zararlı değildir. Bu nedenle genelde sorun agreganın temin edilebilirliğidir. Birçok yerde reaktif agregayı beton yapımında kullanmamak ekonomik olmamaktadır [30].

Yeni bir agregası 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 [31].

- Kuşkuolu agregayı, reaktif olmayan başka bir agregasıyla 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.
- Kuşkuolu agreganın tas ocağındaiken üretimi esnasında ayrılması mümkündür. Fakat bu işlemin çoğu zaman başarıyla uygulanması zordur.
- Ağır ortamda ayırma yöntemi reaktif bileşenin opal çörtlerindeki gibi düşük yoğunlukta olması durumunda başarılı bir yöntemdir fakat agreganın maliyetini çok arttırır.

- 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.
- Agreganın kimyasal tedavisi ile potansiyel reaktivitesi azalabilir. Bu yöntem astar (kaplama) tekniğiyle veya yüzeyin nötrale edilmesiyle uygulanmakta ve yeni bir araştırma alanı olarak görülmektedir. Örneğin, agreganın alkalın kalsiyum fosfat çözeltisiyle ıslatılmasıyla genleşmelerin azaldığı ifade edilmiştir [32].
Alınacak önleme karar verilirken, reaktif maddenin türü, üretim yöntemi, yöntemin ekonomikliği göz önüne alınmalıdır.

5.2. Alkalilerin Azaltılması ve Çimento Seçimi (Reduction of Alkali and Cement Selection)

ASR'nin potansiyel hasarını en aza indirmek için beton bileşenlerin alkali içeriğinin sınırlandırılması (böylece betonun hidroksil iyon konsantrasyonunun ve pH'nın düşürülmesi) uygulanabilir. Bazı reaktif silikalar diğerlerine göre ASR açısından daha hassastır. Bu nedenle hidroksil iyon konsantrasyonunun düşürülmesi için gereken seviye değişken olmaktadır [30].

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 arttırır. Bazı kimyasal katkıları (sodyum içeren su azaltıcılar); ve karışım suyu (özellikle tuzlu sular) alkali içeriğini arttırır [7].

Betonun servis ömrü boyunca maruz kalacağı denizden veya buz çözücü tuzlardan kaynaklanan dış alkalilerin de dikkate alınması gerekmektedir [30].

Yapılan çalışmalar ile olgun çimento harcının boşluk suyu alkalinitesi veya hidroksil iyon konsantrasyonunun Portland çimentosunun alkali içeriğine ve su/çimento oranına göre değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir [7].

5.3. Rutubet ve Geçirimsizliğin Azaltılması (Moisture and Permeability Reduction)

Yüksek nem, ASR'nin 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 [8]. ASR genleşmesinin 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 genleşmelerine 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 [7].

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, genleşme etkisinin hasara

yol açmadan geçirme etkisini azaltır. Bu nedenle betonda puzolanların kullanımıyla geçirimsizliğin arttırılması sadece su miktarını azaltarak elde edilen geçirimsizliğe kıyasla tercih edilmektedir [7].

5.4. Mineral Katkı Maddesi Kullanılması (Using Mineral Additive)

Betonun kullanım amacı ve maruz kalacağı çevre şartları göz önünde bulundurularak çimento tipi ve mineral katkı kullanımına dair karar verilmesi gerekmektedir [33]. Mineral katkılar, kendi basına 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 [10].

Mineral katkılarının ASR sebebiyle oluşabilecek zararlı genleşmeleri önlemek için kullanılması, betonun dayanımı ve durabilitesini arttırması açısından da önemlidir. Mineral katkı kullanımı ekonomik olmasının yanı sıra teknik olarak, enerji tasarrufu, çevrenin korunması açısından da avantajlıdır [11].

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 [34]. Jel yapısında daima CaO mevcuttur. CaO oluşmaması, jelin oluşmayacağını gösterir. Puzolanların CaO'ü bağlayarak da jel oluşumunu önledikleri söylenebilir [8]. ASR genleşmelerini kontrol eden mineral katkı maddelerinin etki mekanizmaları konusunda aşağıdaki teoriler öne sürülmüştür [7, 35, 30].

- Mineral katkı maddeleri ile çimento arasında oluşan puzolanik reaksiyon ile daha yoğun bir yapıya sahip olan çimento harcının geçirimsizliği azalır.
- Mineral katkı maddeleri ile daha yüksek değerlere ulaşan betonun dayanımı, ASR genleşmesi nedeniyle oluşan gerilmelere karşı mukavemetin artmasını sağlar.
- Puzolanik reaksiyon çimento harcındaki $Ca(OH)_2$ içeriğini azaltır. ASR jelinde bu oranda azalan miktarlarda $Ca(OH)_2$ içereceği için daha az şişme özelliği gösterir.
- Mineral katkılar boşluk suyunun alkalinitesini azaltır. Çimento ile puzolanik 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.

6. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Dayanım ve dayanıklılığın sürdürülebilirliği betonda kaliteyi sağlamada olmazsa olmaz koşuldur. ASR betonda büyük genleşmelere yol açarak betonun çatlayıp kısa sürede bozulmasına yol açmakta ve betonarme veya beton yapı elemanlarının zamanla bozulup, işlevlerini beklenen servis ömürlerine ulaşmadan yitirmelerine neden olmaktadır. ASR'den kaynaklı bozulmaların tespit edilmesi ve önlenmesine yönelik çalışmalar yapı ve yapı elemanlarının sürdürülebilirliği açısından önem arz etmektedir. Bunun yanında bütün bileşenleri doğadan elde edilen betonun uzun ömürlü olması ile doğaya verilen zarar en aza indirilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bektaş, F., (2002). "Preventive Measures Against Alkali-Silika Reaction", MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Page:1-87.

2. Malvar, L.J., Cline G.D., Burke D.F., Rollings R., Sherman T.W., and Greene J.L., (2002). "Alkali- Silica Reaction Mitigation: State of the art and Recommendations", ACI Materials Journal, Vol:99, Page:480-489.
3. D.S.İ, (1974). "Betonlarda Alkali-Agrega Reaksiyonu ve Türkiye Çimentolarının Alkalinite Değerleri", Y.N.Kİ-551, Ankara.
4. Neville, A.M., (1993). "Properties of concrete 3rd Edition", Longman Scientific & Technical, New York, USA, Page:360-367.
5. TS EN 196-2, (2010), "Çimento Deney Metodları-Bölüm 2- Çimentoların Kimyasal Analizi", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, ss:1-43.
6. Akman, M.S., (2000). "Effects of the content and kind of soluble alkalis in cements on different properties of concrete", Proceeding,. 2nd Symp. TCMB Cement and Concrete Technology in 2000's, İstanbul, Turkey, ss:103-116.
7. Tosun, K., (2001). "Uçucu Kül ve Silika Dumanının Alkali Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, ss:1-122.
8. Gürkan, A., (2006), "Pomza ve Zeolitin Alkali Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi" Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, ss:1-95.
9. ASTM C-227-97, (1994). "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)", Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Philadelphia, PA, USA, American Society for Testing and Materials, Vol:4, No:2, Page:126-130.
10. Andiç, Ö., (2002). "Alkali Silika Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkıları Kullanılarak Kontrol Altına Alınması", Yüksek Lisans Tezi, EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, ss:1-121.
11. Swamy, R.N., (1992). "The Alkali-Silica Reaction in Concrete", New York: Van Nostrand Reinhold, Page:1-336.
12. ASTM C-289-94, (1994). "Standard Test Method for Potential Reactivity of Aggregates (Chemical Method)", Annual Book of ASTM Standards, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Philadelphia, PA, USA, American Society for Testing and Materials, Vol:4, No:2, Page:157-163.
13. ASTM C295-98, (1994). "Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete", Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Philadelphia, PA, USA, American Society for Testing and Materials, Vol:4, No:2, Page:1-9.
14. Barringer, W.L., (1999). "Using Accelerated Test Methods to Specify Admixtures to Mitigate Alkali-Silica Reactivity ASR", Cement, Concrete and Aggregates, Vol:21, No:2, Page:165-172.
15. ASTM C-1260-94, (1994). "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)", Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Philadelphia, PA, USA, American Society for Testing and Materials, Vol:4, No:2, Page:650-653.
16. Ramlochan, T., Thomas, M., and Gruber, K., (2000). "The effect of metakaolin on alkali- silica reaction in concrete", Cement and Concrete Research, No:30, Page:339-344.
17. ASTM C-1293-01, (2001). "Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction", Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Philadelphia, PA, USA, American Society for Testing and Materials, Vol:4, No:2, Page:1-6.
18. Hobbs, D.W., (1998). "Alkali-Silica Reaction in Concrete", London: Thomas Telford Ltd., Page:1-183.

19. Arslan, M., (2001). "BETON (Dökümü, Kalıpları, Kusurları, Dayanıklılığı)", İstanbul, Atlas yayınevi, ss:167-216.
20. Farny, J.A., Kosmatka, S.H., (1998). "Betonda Alkali Agregata Reaksiyonunun Teşhis ve Kontrolü", Çeviren: Kalmış, M., Güngör, N., Eribol, S., American Concrete Pavement Association (ACPA), Page:1-26.
21. ACI 221.1R, (2000). "Guide for Use of Normal Normal Weight and Heavy Weight Aggregates in Concrete", America Concrete Institute ACI Manual Concrete Practice, Page:1-46.
22. Poole, A.B., (1992). "Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete", In The Alkali-Silica Reaction in Concrete, Edited by Swamy, R.N., New York, Van Nostrand Reinhold, Page:1-66.
23. Danay, A., (1994). "Structural Mechanics Methodology in Diagnosing and Assessing Long-Term Effects of Alkali-Aggregate Reactivity in Reinforced Concrete Structures", Detroit, ACI Materials Journal, American Concrete Institute, Page:54-62.
24. Natesaiyer, K. and Hover, K., (1992). "Cornell's Gel Fluorescence Test Identifies ASR Products in Concrete", Concrete Technology Today, Skokie, Illinois Portland Cement Association, No:922, Page:22-45.
25. Figg, J., (1987). "ASR-Inside Phenomena and Outside Effects (Crack Origin and Pattern)", In Concrete Alkali Aggregate Reactions, edited by Bellew, G., Patrick, E., Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, Proceedings of the 7th International Conference, Page:152-156.
26. Helmuth, R., (1993). "Alkali-Silica Reactivity:An Overview of Research , SHRP-C-342", Washington, D.C., Strategic Highway Research Program, No:177, Page:66-78.
27. Stark, D., (1991). "Handbook for the Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures, SHRP-C/FR-91-101", Washington, D.C., Strategic Highway Research Program, No:165, Page:10-33.
28. Liu, T.C., (1981). "Causes of Deterioration", Lesson 201, Maintenance and Repair of Concrete Structures, Vicksburg, Miss., U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 1-66.
29. Neville, A.M., (1993). "Properties of concrete 3rd Edition", Longman Scientific & Technical , New York, USA, Page:360-367.
30. Forster, S.W., (1998), "State of the art report on alkali-aggregate reactivity", American Concrete Institute, ACI 221.1R-98, Farmington Hills, MI., Page:1-23.
31. Kostmatka, S.H. and Fiorato A.E., (1991). "Detecting and Avoiding Alkali-Aggregate Reactivity", Concrete Technology Today, Vol:12, No:3, Page 1-6.
32. Hudec, P.P. and Larbi, R.E., (1989). "Chemical Treatments and Additives to Minimize Alkali Reactivity", Proceedings, Eight International Conference on Alkali Aggregate Reaction, Kyoto, page:193-198.
33. Subaşı, S., (2009). "Portland Kompoze Çimentolu Betonlarda Uçucu Kül İkamesinin Donma-Çözülme Dayanıklılığına Olan Etkisi" NWSA (www.newwsa.com), Cilt:4, sayı:1, ss:67-76.
34. Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., (2002). "Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)", Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Yayınları, İzmir, ss:1-265.
35. Xu, G.J.Z., Watt, D.F., and Hudec, P., (1995). "Effectiveness of mineral admixtures in reducing ASR expansion", Cement and Concrete Research, Vol:25, No:6, Page:1225-1236.