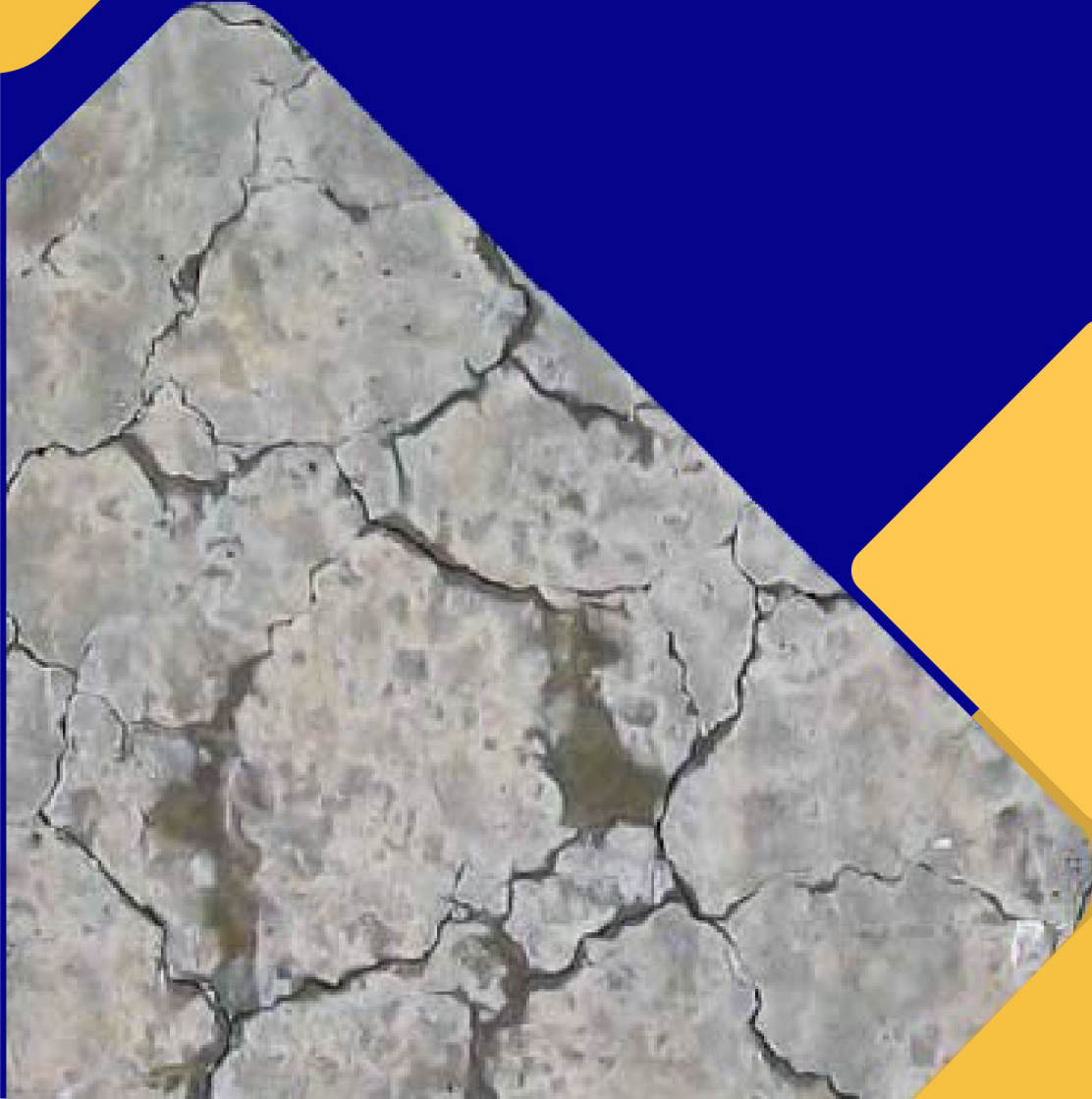


PORTLAND
ÇİMENTOSU ESASLI
MALZEMELERDE
ALKALİ-AGREGA
REAKSİYONU



TÜRKÇİMENTO

Hazırlayanlar:

Serkan Türk, TÜRKÇİMENTO AR-GE Enstitüsü Müdürü

Yasin Engin, TÜRKÇİMENTO Danışmanı

TÜRKÇİMENTO, 2025

Bu raporun yayın ve dağıtım hakkı TÜRKÇİMENTO'ya aittir. Tamamı veya herhangi bir bölümü TÜRKÇİMENTO'nun yazılı izni olmadan fotokopi dahil mekanik ve elektronik ortamda transfer edilemez, çoğaltılamaz ve dağıtılamaz.

1. GİRİŞ	2
2. ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONU NEDİR?	2
3. ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONUNU ETKİLEYEN FAKTÖRLER	3
3.1 Reaktif Silis Mineralleri ve Kayaçlar	4
3.2 Reaktif Agregalar	6
3.3 Çimentonun Alkali İçeriği	9
3.4 Nem	10
4. ALKALİ-AGREGA REAKSİYONU TÜRLERİ	11
4.1 Alkali-Silika Reaksiyonu Kimyası ve Oluşum Mekanizması	11
4.2 Alkali-Silikat Reaksiyonu	13
4.3 Alkali-Karbonat Reaksiyonu	13
5. AAR İÇİN TEST YÖNTEMLERİ	16
6. MİNERAL VE KİMYASAL KATKILARIN ASR'YE ETKİSİ	17
6.1 Mineral Katkılar	17
6.2 Kimyasal Katkılar	19
KAYNAKLAR	20

1. GİRİŞ

Beton; agrega, çimento, su, kimyasal ve mineral katkılardan oluşan; 2000 yıldan uzun süredir kullanılmakta olan ve artık modern toplumda günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelen dünyada en yaygın kullanılan inşaat malzemesi olarak kabul edilmektedir [1,4]. Betonun yapı malzemesi olarak seçilmesinde dayanıklılığı, yeterli basınç dayanımı, yangına direnci, düşük maliyeti ve yaygın üretim potansiyeli öne çıkmaktadır. Buna karşılık, agresif ortamlar betonun erken bozulmasına ve betonarmenin yapısal bütünlüğünün kaybına yol açabilmektedir. Beton özelliklerinin bozulması karmaşık bir süreçtir ve betonun fiziko-kimyasal özellikleri ve betonun maruz kaldığı ortam olmak üzere çeşitli faktörlerin birleşiminden kaynaklanmaktadır. Betonarmenin ana bozulma süreçleri arasında karbonatlaşma, alkali-silika reaksiyonu (ASR), klorür iyonlarının girişi ve çelik korozyonu yer almaktadır. [11-15].

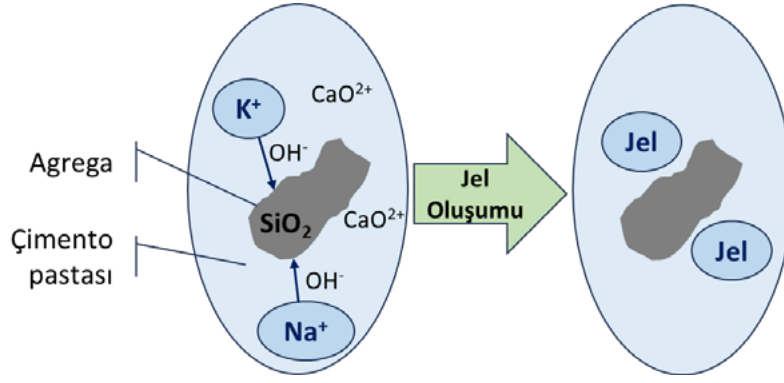
Son birkaç on yılda, alkali-agrega reaksiyonu (AAR), yüksek bakım ve yeniden inşaat maliyetlerine yol açan dayanıklılıkla ilgili en önemli beton sorunlarından biri olarak bildirilmiştir. Dünyanın dört bir yanındaki çok sayıda betonarme altyapısında AAR'nin görülmesi, yeni ve mevcut yapılarda reaksiyonun erken aşamada tespiti için önlemler alınmasına ve bununla ilgili araştırmalar yapılmasına işaret etmektedir. Ayrıca, AAR için kimyasal ve fiziksel mekanizmalar hala yeterince anlaşılmamıştır. Bu bilgi eksikliği, donatılı ya da donatısız beton yapılarda AAR'ye bağlı bozulma sürecini etkin bir şekilde azaltma, hizmet ömrünü uygun maliyetle tahmin etme ve riski değerlendirme yetersizliğine yol açmaktadır.



Şekil 1. ASR sonucunda yapıda oluşan hasarlar

2. ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONU NEDİR?

ASR, dünyadaki beton yapıların dayanıklılığını ve hizmet ömrünü etkileyen, fiziko-kimyasal reaksiyonları içeren en zararlı bozulma mekanizmalarından bir tanesidir [5-6]. Agreganın bünyesinde bulunan reaktif silis ile beton boşluk çözeltisi ve çimentodaki alkaliler arasında oluşan reaksiyona alkali-silika reaksiyonu (ASR) denilmektedir. Şekil 2'de görüleceği üzere bu reaksiyon sonucu alkali-silika jeli ortaya çıkmakta ve oluşan bu jelin sınırsız su emebilme özelliği bulunmaktadır.



Şekil 2. ASR sonucunda jel oluşumu

ASR hakkında ilk önemli makale, Stanton tarafından 1940 yılında yayımlanmıştır ve deneysel çalışmalar ışığında şu sonuca varılmıştır [7-8]:

“Aşırı genleşmeye neden olan kimyasal reaksiyon, görünüşe göre yalnızca Portland çimento bileşeni sodyum ve potasyum oksitler şeklinde önemli bir alkali yüzdesi içerdiğinde meydana geliyor. Bu tür oksitlerin yüzdesine orantılı bir yoğunluktadır ve görünüşe göre alkali içeriği %0,6'dan az olduğunda ihmal edilebilir düzeyde düşük bir seviyededir.”

3. ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONUNU ETKİLEYEN FAKTÖRLER

ASR jeli doğrudan betonun bozulmasına neden olmaz, ancak çevredeki nemi emerek genişir ve iç gerilmelere neden olmaktadır. Bu tür gerilmeler betonun çekme dayanımını aşabilmekte ve kademeli çatlama ve bozulmaya neden olabilmektedir. Beton malzemelerde ASR için yaygın olarak gerekli kabul edilen üç ana bileşen şunlardır [2]:

- Agregalarda (hem iri hem de ince fraksiyonlarda) reaktif silisli bileşenlerin varlığı
- Çimento esaslı malzemelerde yeterli alkali içeriği ve
- Sıcaklık ve katkı maddeleri gibi diğer faktörlerle birlikte nem varlığı.



Şekil 3. ASR için gerekli koşullar

3.1 Reaktif Silis Mineralleri ve Kayaçlar

Beton hamuru içerisinde yeterli nem bulunması halinde, reaktif silis içeren agregalar Portland çimentosundan gelen alkalilerle potansiyel olarak reaktif olmaktadır. Silikat minerallerinin, %80-90 kadar yüksek olduğu tahmin edilen dünya kabuğunun en büyük bölümünü oluşturduğu ve alkali reaktif bileşenlerin çoğunun silikat içeren kayaçlarda tespit edildiği bilinmektedir. Bu silikat içeren kayaçlarda bulunan potansiyel reaktif minerallerden bazıları aşağıda belirtilmektedir:

1. Opal (Hidratlı Silika Cam): Opal, belirgin bir kristal yapıya sahip olmayan hidratlı silisyum dioksittir. %5-10 veya daha fazla su içermektedir. Genellikle çeşitli volkanik kayalarda, çörtlerde ve kum taşlarında bulunan beyaz veya renksiz bir mineral olarak bulunmaktadır. Kayalardaki çatlaklarda ve kırıklarda görülme eğilimindedir. Beton üretimi için agrega olarak kullanılacak kayalarda az miktarda bulunması bile tüm silika minerallerinin en reaktifi olduğu için ciddi bir hasara yol açabilmektedir.



Şekil 4. Opal (süs taşı)

2. Kalsedon: Kalsedon, kuvarşın mikrokristalin formu olup, opale göre daha sert ve daha kristal olan bir diğer silika mineralidir. Temelde çeşitli renklere ve beyaz çizgilere sahip hegzagonal yapıda bulunmaktadır. Opalden daha az parlaktır. Hemen hemen tüm silika kaya türlerinde az miktarda da olsa bulunmaktadır.



Şekil 5. Kalsedon

3. Volkanik Cam (Obsidiyen): Volkanik cam, bir başka amorf (camsı) silika mineralidir. Bünyesinde bulunan demir veya magnezyumdan dolayı opal veya kalsedona göre daha koyu renklidir. Bu minerali içeren agregalar, silika bileşimine bağlı olarak reaktif olabilmektedir. Silika içeriği %55'in üzerinde olan volkanik cam genellikle reaktif, silika içeriği

%55'in altında olanlar daha az reaktif olarak kabul edilmektedirler. Adından da anlaşılacağı gibi, volkanik cam, volkanik aktivitenin bir sonucunda oluşmaktadır. Bu nedenle, volkanik kökenli kaya yataklarından (magmatik kayalar) çıkarılan agregalara özellikle dikkat etmek gerekmektedir.



Şekil 6. Obsidiyen

4. Tridimit ve Kristobalit: Genellikle beyaz veya renksiz olan silikat minerallerinin kristal formlarıdır. Camsıdırlar ve tetragonal veya hekzagonal kristal yapıdadırlar. Çoğunlukla volkanik kayalardaki boşluklarda bulunmaktadır. Bu nedenle, volkanik cam gibi, magmatik kaya kökenli agregalar, bu reaktif minerallerden önemli miktarda içeriyorsa araştırılmaları gerekmektedir.



Şekil 7. Tridimit (sol) ve kristobalit (sağ)

5. Kuvars: Kuvars, hemen hemen her tür kayada bulunabilen en bol mineraldir. Metamorfizma ile ilgili olarak, tridimit ve kristobalit, reaktif olabilen iyi kristallenmiş bir kuvars kademeli olarak dönüşebilmektedir. Bu nedenle, magmatik kayaların metamorfizması sonucu oluşan kayalardan elde edilen agregaların bu reaktif minerali içerdiğinden şüphe edilmesi gerekmektedir.



Şekil 8. Kuvars

6. Silikatlar: Silikatlar, kil veya mika içeren tortul veya metamorfik kaya kökenli minerallerdir. Alkalilerle yavaş reaksiyona girdikleri gözlemlenmiştir ve bazen, reaksiyonları sıradan testlerle tespit edilemeyebilir. Esas olarak gri kayalar, argilitler, fillitler, silttaşları vb. gibi kaya türlerinde oluşmaktadır. Kullanılacak agrega bu tür kaya türlerinden önemli miktarda içeriyorsa, mümkünse düşük alkali içeriğine sahip çimento kullanılması şiddetle tavsiye edilmektedir [1, 9-18].



Şekil 9. Arjilit (sol), fillit (orta) ve silt taşı (sağ)

3.2 Reaktif Agregalar

Beton bir yapının dayanıklılığı ve kimyasal kararlılığı, beton hacminin yaklaşık %60-75'ini oluşturan agregaların kalitesiyle belirlenmektedir [2,19,20]. Agregalar (kaba ve ince) ASR'nin gelişimini ve ASR'den etkilenen beton özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. ABD Federal Karayolları İdaresi (The Federal Highway Administration, FHWA) tarafından hazırlanan rapora göre, son derece reaktif silika içeriğine sahip olan agrega kaynağının, yüksek alkali özelliğine sahip bir çözeltiye maruz kaldığında yüksek ASR potansiyeli sergilediği bildirilmektedir [21]. Agregaların kimyasal bileşimi, kristalinitesi, amorf yapısı ve amorf silikatin alkali gözenek çözeltisindeki çözünürlük derecesi, agreganın ASR'ye duyarlılığını etkilemektedir [22,23]. Literatüre göre, beton üretiminde kullanılan iyi bilinen agregaların çoğunun ASR'ye duyarlı olduğu bildirilmiş ve Tablo 1'de özetlenmiştir. Buna karşılık, dolomit, kireç taşı, kalsedon, kriptokristalin kuvars ve gergin kuvars kayalarının ASR sonucu genişlemeye değil, alkali-karbonat reaksiyonu ACR sonucu genişlemeye eğilimli olduğu bulunmuştur [24]. Sonraki bölümlerde ACR hakkında detaylı bilgi verilmektedir.

Agregaların kaynağı olarak, kristal yapı farklılıklarına göre iki farklı kaya grubu bulunmaktadır. Birinci kaya grubu, amorf silika içeren ve kristal yapıya sahip minerallerden yoksun olan "aşırı reaktif kayalar"dır (örneğin, opal, tridimit, kristobalit, asit volkanik cam ve bazalt cam vb.). Bu reaktif agregalar, mikrokristalin silika veya metastabil kristaller içermektedir. Bu yapının düzensiz olduğu, iç kısımda mikro çatlaklar içerdiği ve gözenek çözeltisinden alkalilerin kolayca nüfuz etmesi için kanallar oluşturan birçok kafes kusuru olduğu bulunmaktadır [25]. Sonuç olarak, reaktif silika daha geniş bir yüzey alanına kolayca transfer olarak daha fazla ASR oluşmasına neden olabilmektedir. Diğer kaya grubu, kristal yapıya sahip minerallerden (örneğin, kalsedon, kriptokristalin kuvars ve kuvars vb.) oluşan "hafif veya reaktif olmayan kayalar"dır [24,26]. Kuvarsın (reaktif olmayan bir agrega türü) yapısı ile opalin (reaktif bir agrega türü) yapısı karşılaştırılmıştır [27]. Kuvars yapısı, silikanın tamamen kristalin olması ve her bir silikonun oksijen iyonlarıyla bağlı olmasıyla oluşmaktadır. Her bir oksijen iyonu, elektriksel nötrlüğe ulaşmak için iki silikon ile bağlanmaktadır. Opal yapısı ise kriptokristalin ve amorf silikaya sahip olup her bir silikon bağlı değildir ve oksijen iyonları çözülmüştür, bu da onları kararsız hale getirmektedir. ASR'de, gözenek çözeltilerinden gelen hidroksil iyonları silisli parçacıklara nüfuz ederek

kafes yapıyı gevşetmektedir. Bu nedenle, kripto-kristalin veya amorf silika (opal gibi) kafes yapısı, hidroksil iyonlarının girişiyle kolayca parçalanmakta ve bu durum agregaları ASR'ye karşı duyarlı hale getirmektedir. Buna karşılık, iyi kristalleşmiş silika, düzenli kafes yapısı ve alkali iyonların nüfuz edemediği her bir silisyumla bağlı oksijen iyonları nedeniyle ASR saldırısına karşı hassas değildir [22,27,28].

Tablo 1. ASR testi yapılmış olan önemli agregalar [2]

Agrega Tipi	ASR Reaktifliği
Bazalt	Reaktif
Opal	Reaktif
Dolomitik Kireçtaşı	Reaktif
Çört	Reaktif
Spratt	Reaktif
Camsı Agregası	Reaktif
Kireçtaşı	Reaktif değil
Andezit	Reaktif
Dolomit	Reaktif değil
Dasit	Reaktif
Kuvars Kumunu	Reaktif değil
Riyolit	Reaktif

Agrega parçacıklarının gözeneklilik derecesi de ASR genleşme oranında önemli bir rol oynamaktadır. Daha yüksek gözeneklilik ASR duyarlılığını ve oranını artırmaktadır [22,29,30]. Tipik olarak, oldukça gözenekli agregası ve beton, ASR'yi aktive etmek için çevreden gelen nemin kolayca içeri girmesine izin vermektedir. Yapılan bir araştırmaya göre, oldukça gözenekli agregaların daha düşük gözenekli agregalara kıyasla daha fazla ASR genleşmesi yaşadığı bildirilmiştir. Alkali iyonların daha az gözenekli agregalara göre gözenekli agregası parçacıklarında kolayca yayıldığı ve bunun da agregaların çözünmesini başlatarak ASR'ye yol açtığı bulunmuştur [31].

Agregası boyutu veya derecelendirmesi ile ASR genleşmesi arasındaki ilişki önemli bir faktör olarak bildirilmiştir. Tablo 2, ASR'ye karşı oldukça hassas olduğu bildirilen bazı agregaları ve boyut fraksiyonlarını göstermektedir. Genel olarak, daha ince agregası fraksiyonlarının, daha iri agregası fraksiyonlarına göre ASR'ye karşı daha hassas olduğu bildirilmiştir [29,32,33]. Bunun nedeni, daha ince malzemelerin büyük agregalara kıyasla daha düşük derecede yapısal düzene ve kararsız silika minerallerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır [29,34]. Ayrıca, daha küçük ebatlı agregaların özgül yüzey alanının daha fazla olması, alkaliye saldırma olasılığını artırmaktadır [29,35]. Bu nedenle, ASR genleşmesi parçacık boyutunun azalmasıyla birlikte artmaktadır [31,36,37].

Tablo 2. ASR'ye yüksek oranda eğilimli agregalar ve boyutları

ASR için değerlendirilen agregalar	ASR'ye eğilimli agregaların boyutu
Opal ve kalsedonlu silisli magnezyum kireç taşı	0,17-0,6 mm
Opal agregaları	0,02-0,125 mm
Opalin agrega parçacıkları	0,07-0,85 mm
Çeşitli silisli agregalar	0,15 mm
Reaktif silisli agregalar	0,15-0,30 mm
Silisli kireç taşı	1,25-3,25 mm
Alpin klorit şist agregası	2-4 mm
Soda kireç cam agregaları	1,18-2,36 mm
Harç çubuğu numuneleri kullanılarak küresel cam parçacıkları	2-3 mm

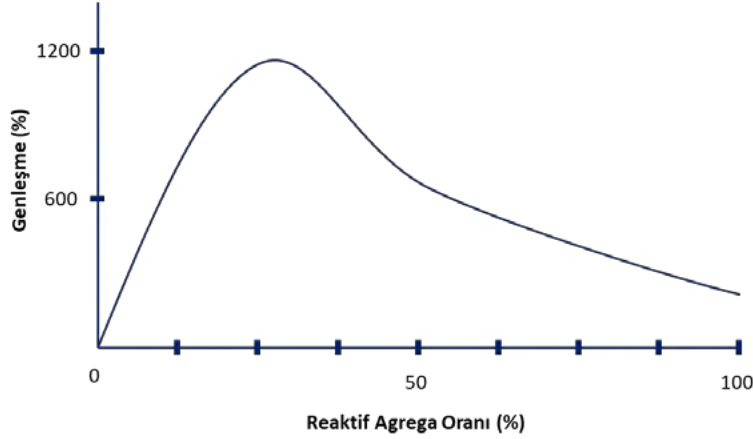
Buna karşılık, bazı araştırmacılar daha ince agrega boyutlarının ASR'yi azaltabileceğini bildirmiştir [33,38-41]. Örneğin, Poyet vd., daha büyük iri agregalara kıyasla küçük boyutlu agregalarda bir ASR azaltma etkisi olduğunu tespit etmişlerdir [38]. Benzer şekilde, Wigum ve Lindgård, iri agrega fraksiyonlarının ince agregalara kıyasla ASR'ye daha duyarlı olduğunu belirtmiştir [41]. Bunun nedeni, çok ince reaktif agrega parçacıklarının puzolanik reaksiyona erken aşamalarda katılabilmeleridir. Bu nedenle, alkali-silikat jel hızla kalsiyum-silikat-hidrata dönüşerek gözenek çözeltisinin alkali değerini azaltmaktadır [42]. Bunlar, alkali-silika ve çok ince agregaların puzolanik reaksiyonları arasında zıt etkiler ve denge olduğunu göstermektedir.

DeneySEL çalışmalar ve saha gözlemleri, gözlenen en büyük genleşmenin agrega boyutu ve oranına göre monoton olmayan bir şekilde değiştiğini bildirmiştir. Bu, en yüksek genleşme belirli bir boyut ve oran aralığında meydana gelmektedir. Bu aralığın üstünde veya altında genleşme azalmaktadır. Yapılan son araştırmalarda makaleler, bir gözenek çözeltisinin alkali hidroksit konsantrasyonu ile agreganın reaktivitesi arasındaki dengeyi tanımlayan ASR üzerindeki pesimum etkiye (pessimum effect) odaklanmıştır [36,39,43-45]. Stanton'ın çalışmasına göre, belirli oranda reaktif agrega daha yüksek ASR genleşmesine neden olmuştur; ancak betondaki reaktif agregaların miktarı arttıkça veya azaldıkça genleşme azalmıştır [36]. Benzer şekilde, tane boyutu artırıldığında veya azaltıldığında beton genleşmesinin azaldığı bulunmuştur. French, çalışmasında bu pesimum etkiyi sahada gözlemlenmiş ve 4 ila 10 mm arasında değişen tane boyutu kesirlerine sahip agregaların ASR genleşmesine eğilimli olduğunu belirtmiştir [46]. Diğer araştırmacılar, çeşitli agregalar için pesimum etkisini göstermiştir ve pesimum değerlerinin geniş bir parçacık boyutu aralığında meydana geldiği tespit edilmiştir [32,33,47-49]. Farklı parçacık boyutlarının reaktivitesindeki bu fark, OH⁻'yi agregaların iç kısmında olabilecek reaktif bölgelere yaymak için gereken zamandan kaynaklanmaktadır [33]. Bu nedenle, agrega boyutunun ASR üzerindeki etkisiyle ilişkili çok sayıda faktöre dayanarak, ASR'ye duyarlı belirli bir boyut fraksiyonu sonucuna varmak zordur.

Pesimum Oranı

Betondaki potansiyel reaktif bileşenler ile genleşme arasında doğrusal bir ilişki yoktur. Reaksiyon sonucu betonda maksimum genleşmeye ve hasara neden olan reaktif malzeme oranına "Pesimum oranı" denilmektedir. Bu oranın altındaki veya üstündeki değerler için

genleşme daha az olmaktadır. Pesimum oranının, alkali silika reaksiyonu sonucu betondaki genleşme üzerine etkisini gösteren tipik bir eğri Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Pesimum oranının genleşmeye etkisi

Pesimum etkisinin yanı sıra, çeşitli agregaların alkali içeriği, betondaki ASR genleşmesini etkileyen bir diğer teoridir. Agregalar ayrıca betondaki bağlayıcı matrise alkali sağlayabilmekte ve bu da ASR'yi yükseltmektedir. Tek tek agregat parçacıkları için alkali hidroksitlerin indirgenmesi, ASR nedeniyle genleşmeyi azaltmaktadır [50]. Agregat parçacıklarından salınan alkali miktarı, mineral yapısına bağlı olmaktadır. Agregadan betona alkali çözünmesi, gözenek çözeltisinin kalsiyum hidroksiti ile katyon değişimine atfedilmektedir [42,50,51]. ASR genleşmesini başlatabilen bir agregadan salınan alkali içeriği, iyi kristalin ve amorf agregatlar için %0,1 ila %1 Na₂O arasında değişmektedir [52].

Genel olarak, agregat ile ASR arasındaki etkiye dayanarak şu sonuca varılabilir:

1. Agregatların ASR'ye duyarlılığı boyuta bağlıdır ve bu bağımlılığın eğilimi tahmin edilebilir olmayabilir,
2. Reaktivitenin boyuta bağımlılığı farklı agregatlar için farklı nedenlerden kaynaklanabilir, örneğin pesimum etkisi ve alkali eşik sınırı (yani gözenek çözeltisinin alkali içeriği seviyesi) [27, 53-55] ve
3. Boyuta bağlılığa dayanarak agregatların nihai olarak amaçlanan beton üretimi için kullanılacak boyutta test edilmesi gerekmektedir.

3.3 Çimentonun Alkali İçeriği

Çimento içerisindeki alkali miktarının ASR'ye sebep olabilmesi nedeni ile yaklaşık 80 yıl boyunca "düşük alkali çimento" kavramı tanımlanmıştır. Yakın zamana kadar, Portland Çimentosu için ASTM C150 Spesifikasyonunda, %0,6 veya daha az eşdeğer alkali (Na₂O_e) içeriğine sahip düşük alkali çimento isteğe bağlı bir gerekliliğe sahipti. Dünya çapındaki birçok spesifikasyon, reaktif agregatlar kullanıldığında ASR'yi önlemek için bir seçenek olarak bu gerekliliği benimsemiştir.

Çimentonun alkali içeriğini azaltmak şüphesiz ASR riskini azaltırken, artık genel olarak Portland çimento betonunda çimentosu malzemeleri (SCM) içermeyen betonun toplam alkali yükünün kontrol edici faktör olduğu kabul edilmektedir. Yapılan çalışmalar ile birlikte,

betonun çimento içeriğinin çimentonun alkali içeriğiyle çarpılmasıyla hesaplanan beton alkali içeriğinin bir fonksiyonu olduğu tespit edilmiştir [7].

Harici alkaliler

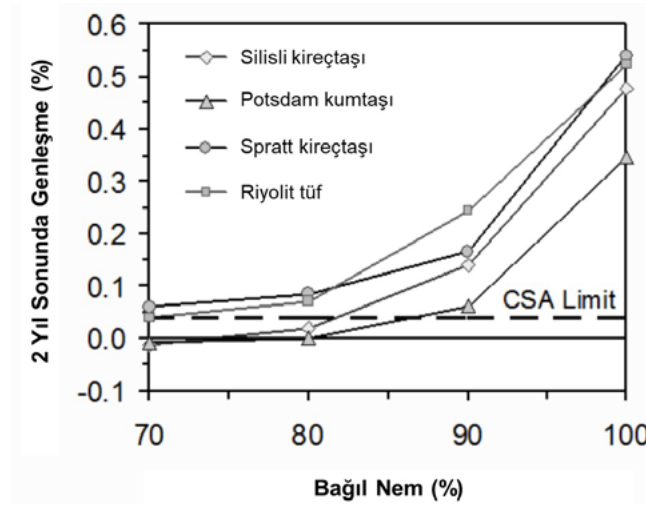
Beton, kullanım sırasında alkali tuzlara maruz kalabilmektedir. Bunlara örnek olarak, ağırlıklı olarak sodyum klorür (NaCl) içeren deniz suyu, potasyum asetat (CH_3COOK) veya sodyum asetat (CH_3COONa) veya sodyum format (HCOONa) içerebilen buz çözücü ve/veya buz önleyici tuzlara maruz kalan yapılar verilebilmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığı zaman, buz çözücü tuzlardan veya deniz suyundan gelen sodyum klorürün, reaktif agregalar içeren betonda ASR riskini artabileceğini gösteren çok sayıda yayına rastlanmaktadır [24,56-61]. Ancak, NaCl maruziyetinin sahada hasar verici ASR riskini ne ölçüde artırdığı açık değildir ve kaliteli bir betonda, herhangi bir etkinin betonun maruz kalan yüzeye yakın bölgesiyle sınırlı olması muhtemel olarak görülmektedir.

Son yıllarda, buz önleyici veya buz çözücü olarak kullanılan potasyum asetatın (ve diğer asetat/format çözeltilerinin) havaalanı döşemelerinde ve daha az ölçüde otomatik buz önleyici sistemlerle donatılmış köprü güvertelerinde etkisine dair çok fazla ilgi duyulmaktadır. Ortaya çıkan endişeler, havaalanı döşemelerinde çatlamların gözlemlendiği çeşitli vakalar ve hızlandırılmış testler altında potasyum asetatın yıkıcı doğasını vurgulayan laboratuvar çalışmaları tarafından teşvik edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda (örn. $38^\circ\text{C}/100^\circ\text{F}$ veya $80^\circ\text{C}/178^\circ\text{F}$) konsantre (%50) potasyum asetat çözeltilerine maruz kalan harç veya betonda, kalsiyum asetat oluşumu nedeniyle pH'ta bir artış olduğunu ve ardından agrega içindeki reaktif silikaya olan saldırıyı şiddetlendiren KOH konsantrasyonunda bir artış olduğunu göstermektedir. Genleşme, reaktif agregalar olmadan betonda da meydana gelebilmektedir ve bu, kalsiyum sülfat- alüminat fazlarından potasyum sülfat oluşumuyla ilişkilendirilmektedir [62-65]. Ancak, bu alkali içeren bileşiklerin donma noktasında veya donmaya yakın sıcaklıklarda uygulandığı saha koşullarında beton üzerindeki etkisini araştırmak için çok az çalışma yapılmış bulunmaktadır. Bu koşullar altında, tuzların betona nüfuz etme derinliğinin sınırlı olması muhtemeldir.

3.4 Nem

ASR reaksiyonlarında hem kimyasal reaksiyonun devam etmesi hem de jelin genişlemesi için yeterli neme ihtiyaç bulunmaktadır. Genellikle, betonun içerisindeki iç bağıl nem %80'in altına düşerse kimyasal reaksiyonun duracağı düşünülmektedir (Şekil 11). Aynı yapı içindeki nem durumunun bölgesel olarak farklılık gösterebilmesi nedeni ile yapı içinde çok farklı seviyelerde ASR hasarı oluşabilmektedir. Özellikle, yapının sabit bir nem kaynağına maruz kalan kısımları (örneğin, zayıf drenaj veya zayıf detaylandırma sonucu) önemli ASR kaynaklı hasar meydana gelebilirken, esasen kuru kalan yapının diğer kısımlarında çok az hasar meydana gelebilmekte veya hiç hasar oluşmamaktadır [7].



Şekil 11. . Bağıl nemin ASR genleşmesi üzerindeki etkisi [7]i

4. ALKALİ-AGREGA REAKSİYONU TIPLERİ

Betonda, agrega tanelerindeki reaktif bileşenlerle çimento hidratasyonu sonucu ortaya çıkan alkali hidroksitler arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucunda alkali-agrega reaksiyonu nedeniyle hasar (çatlak) oluşmaktadır. Alkali agrega reaksiyonunun bilinen 3 oluşum şekli tanımlanmaktadır:

- Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR),
- Alkali-Silikat Reaksiyonu ve
- Alkali-Karbonat Kaya Reaksiyonu (ACR) [66].

4.1 Alkali-Silika Reaksiyonu

Çimento hidratasyonunun başlangıç aşamalarında, katı faz sıvı faza oranla daha az miktarda bulunur ve sıvı faz katı fazın etrafını sarmaktadır. Başka bir ifadeyle, katı fazdaki parçacıklar sıvı faz tarafından ıslatılmaktadır. Ancak hidratasyon ilerledikçe sıvı faz miktarı azalır ve yerini jelsi yapıda hidratasyon ürünleri olan C-S-H jeli ve C-H almaktadır. Bu süreç sıvı fazın sürekliliğinin azalmasına yol açmaktadır. Çimento hamuru ise doğası gereği boşluklu bir yapıya sahiptir ve bu boşluklarda "boşluk çözeltisi" olarak adlandırılan sıvı faz bulunmaktadır. Düşük su/çimento oranına sahip ve içerisinde hava sürüklenmemiş çimento hamuru daha az boşluk içerir ve bu boşlukların çapı genellikle 1-2 µm arasında değişmektedir [25].

Hidratasyon sonucunda oluşan betonun boşluk çözeltisi içerisinde sodyum (Na⁺), potasyum (K⁺), kalsiyum (Ca⁺²) ve hidroksil (OH⁻) iyonları bulunmaktadır. Bu iyonların konsantrasyonu, kullanılan çimento içerisindeki miktarlarına bağlıdır. Düşük alkalili çimentodan yapılan betonlarda boşluk çözeltisinin pH'ı genellikle 12,7 ile 13,1 arasında değişirken, yüksek alkalili çimentodan yapılan betonlarda bu değer 13,5 ile 13,9 arasında olabilir. Yüksek alkalili çimentodan üretilen betonun boşluk çözeltisindeki hidroksil iyonu konsantrasyonu, düşük alkalili çimentodan yapılan betonun yaklaşık 10 katına ulaşabilir. Betonun boşluk çözeltisinde bulunan yüksek hidroksil iyonu konsantrasyonu, reaktif agregalar üzerinde zararlı etkiler oluşturarak betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkiler [68].

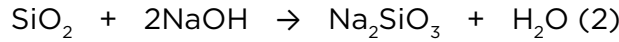
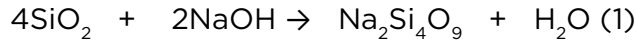
Çimentonun katı hidratasyon ürünlerinden olan C-H tabakalar halinde ve C-S-H jeli lif desteleri ya da çubuk benzeri yapılardaki oluşumlarından meydana gelmektedir. Beton içerisinde mezo ve mikro boşluklar olmak üzere önemli miktarda boşluk hacmi bulunmakta olup, bu boşluklar oluşan bu hidratasyon ürünleri tamamen doldurulamamaktadır [25].

Suyla temas eden bir silis taneciğinin yüzeyi, artan yüzey alanı ve düzensizlik nedeniyle zayıf bir asidik karakter sergiler. Silisin temel yapısı, bir silisyum atomuna bağlı dört oksijen atomundan oluşan bir silis tetrahedronudur. Bu tetrahedron yapısındaki oksijen atomları, bir valanslarıyla silisyuma bağlıdır ve diğer valansları serbesttir; bu nedenle tetrahedron, dört serbest negatif bağ içerir. Genellikle saf suda bile silisin yüzeyindeki oksijenler hidroksil grupları halinde bulunur. Yüzey çalışmaları, bu kompleks yüzey yapısının birkaç atom ya da bazen onlarca atom derinliğe kadar uzandığını göstermektedir.

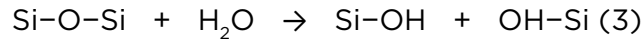
Silisli agregalar, hidroksilce zengin bir ortamda bulduklarında hidroksil olma eğilimleri artar. Bu durum, iyi kristalize olmuş kuvars için de geçerlidir; ancak, kuvarsın hidroksilasyon hızı son derece yavaştır ve inşaat mühendisliğinde gözlemlenebilir süre aralığında genellikle etkisiz kalır. Buna karşılık, sıcaklık reaksiyon hızını belirgin şekilde artırır. Özellikle hidrotermal koşullarda ince öğütülmüş kristalin kuvars oldukça reaktif hale gelir. Normal çevre koşullarında bile reaktif agregalar, kristalin kuvarsa kıyasla çok daha hızlı şekilde hidroksil gruplarına dönüşebilir [25].

ASR, diğer reaksiyonlardan temel farkı, sonucunda hidrofilik özellikte alkali silis jelinin oluşmasıdır. Bu jel su emerek genişir ve betonun yapısına zarar vererek tahribata neden olmaktadır.

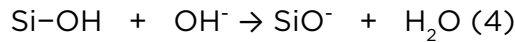
Reaksiyonun Denklem 1 ve 2'deki gibi oluştuğu varsayılır:



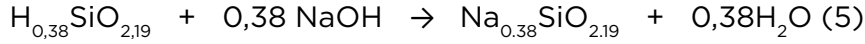
ASR jeline ait kimyasal bileşim, oldukça değişken bir yapıya sahiptir. Ancak yapılan bir araştırma, hidroksil iyonu konsantrasyonunun bu reaksiyonun gerçekleşmesinde asıl belirleyici faktörün olduğunu ortaya koymuştur. Alkali metal katyonlarının ise yalnızca jelin yapısına katıldığı durumlarda önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir [69]. Normal çevre koşullarında, reaksiyonun nasıl ilerlediği konusunda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yüksek pH seviyesine sahip boşluk çözeltisi, reaksiyonun başlangıç aşamasında agregadaki Si-O-Si bağları ile etkileşime girerek silanol bağlarının oluşumuna neden olur. (Denklem 3) [70,71].



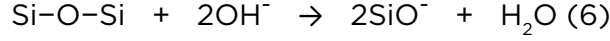
Yapılarında bol miktarda silanol bağı barındıran opal gibi su içeren silisli agregalar bulunmaktadır. Asidik bir karaktere sahip olan bu silanol grupları ile bazik olan boşluk çözeltisi reaksiyona girmeye hazır durumdadır. Hidroksil iyonlarının ikinci saldırısı ile silanol grupları çözünmeye devam eder; bu süreçte ortamda H₂O molekülleri açığa çıkar ve silanol grupları =Si-O- formuna dönüşerek sulu ortamda çözünür. (Denklem 4).



Negatif yüklü SiO⁻ grupları, pozitif yüklü sodyum, potasyum ve kalsiyum iyonlarını kendine çekerek oluşan jelin içine dahil eder ve bu şekilde yük dengesini sağlamaya çalışır. Bu olayın kimyasal açılımı Denklem 5'te görüldüğü şekildedir.



Denklem 5'deki reaksiyonda ortamın iyon dengesi Na_2O yardımıyla kurulmuştur. Diğer katyonlar da bu reaksiyona katılır. Denklem 6'da görülen üçüncü aşamada daha fazla siloksan Si-O-Si köprüsü hasara uğrar [25].



Son aşamada, jel, su emerek hacminde artış meydana getirir. Bu hacim artışı, reaksiyon bölgesinin yakınlarında mikro çatlakların oluşmasına neden olur. Zamanla bu çatlaklar birleşerek yayılır ve betonun yapısını zayıflatarak yapısal elemanlarda hasara yol açar. Bazı durumlarda, bu çatlaklar aracılığıyla betona nüfuz eden diğer zararlı maddeler de hasarın şiddetini artırabilir. Örneğin, betonun içinden akan suyun etkisiyle süzülme (leaching) ve yüzeyde kalsiyum karbonat birikimi görülebilir. Çatlaklardaki jel, etrenjit ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) oluşumuna dönüşürken, çevredeki çimento hamurunda ikincil kaba kristalin etrenjit ve ikincil portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) oluşumu gözlemlenir. Bu tür oluşumların görüldüğü betonlarda sülfat seviyelerinin genellikle normal olması, etrenjit oluşumunun dış kaynaklı sülfat etkisinden kaynaklanmadığını gösterir. Bunun yerine, etrenjit oluşumu için gerekli sülfatın betonun içinden sağlandığı düşünülmektedir. Hidrate alkali silis jeline doğru taşınan suyun, beraberinde getirdiği sülfat iyonlarıyla etrenjit kristallerinin oluşumunu ve büyümesini tetiklediği anlaşılmaktadır. [72].

4.2 Alkali-Silikat Reaksiyonu

Alkali-silikat reaksiyonu; fillitler, argilitler, grovak ve fillosilikatlar (örneğin vermikülit, klorit ve mika) içeren bazı gri kayaçlar gibi kayaçlardan gelen alkalice zengin betonlarda görülmektedir [73]. Bu durumda, reaksiyon serbest silikadan ziyade fillosilikatların birleşik formundaki silika ile gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlar karmaşıktır ve karakterize edilmesi zordur ancak bu agregaların içerisindeki silikat mineralleri genişlererek betonda hasar meydana getirmektedir. Bu kayaçlardaki genişleme kayaçlardaki ince bölünmüş silikanın varlığından kaynaklanıyorsa, daha kesin bir şekilde alkali-silikat reaksiyonudur. Her bir kayaç parçasının genişmesi, bu kayaçların mikrokristalin kısımlarının içerisinde yer alan ve önceden kuru olan alüminosilikat yüzeylerinin su alması ile meydana gelmektedir. Genişleme ile mikrokristalin malzemenin miktarı ve porozite arasında doğru orantı bulunmaktadır [74]. Bu reaksiyon alkali karbonat ve alkali silis reaksiyonlarına kıyasla daha nadir görülmektedir [68].

4.3 Alkali-Karbonat Reaksiyonu

Bazı dolomitik kayaçların çimento alkalileri ile oluşturduğu reaksiyonlara ACR adı verilmektedir. Reaktif kayaçlar çoğunlukla ince taneli kalsit ve kil matrisi içinde dağılmış daha büyük rombik (eşkenar dörtgen) dolomit kristalleri içermektedir. Kalsit, kalsiyum karbonatın mineral formlarından biridir; dolomit ise kalsiyum-magnezyum karbonatın genel adıdır. Reaktif kayacın matrisinde bulunan dolomit kristalleri seyrek olarak dağılmış veya birbirine daha yakın veya değmekte olan daha kalabalık halde yer alabilmektedir. Seyrek halde bulunan kristallerin çoğu düzgün kristal şekline sahip olup diğerleri genellikle daha düzensiz kristal geometriye sahiptir. Bu kristallerin ortalama boyutu 25-30µm olup en büyükleri yaklaşık 50-75µm kadardır. Dolomit kristallerinin yer aldığı matriste, kalsitin boyutu yaklaşık 2-6µm arasında olup kil parçacıkları daha küçüktür. Bu matriste çoğu zaman silt boyutunda kuvars taneleri de dağılmış olarak yer almaktadır. Bu karakteristiğe

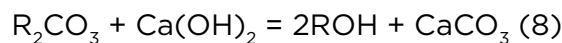
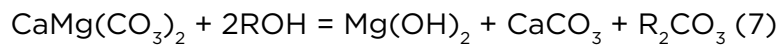
sahip karbonat kayacı bir kireçtaşı yatağında önemli miktarda olabildiği gibi az miktarda da bulunabilmektedir. Bazı durumlarda bir kireçtaşı yatağında bahsedilen karakteristikte damarlar bulunabilir [72,75,76].

1. Kaba agreganın boyutunun artması,
2. Ortamda nemin bulunması,
3. Ortam sıcaklığının artışı,
4. Beton alkali içeriğinin ve boşluk çözeltisi pH'ının yüksek olması
5. Kaba agregada içerisinde reaktif faz miktarının yüksek olması,
6. Beton dayanımının düşük olması.

ACR oluşumu, ASR kadar sıklıkla görülmemektedir. Bunun bir sebebi bu reaksiyona yatkın agregaların betonda dayanım gibi diğer faktörler sebebiyle çok fazla kullanılmamasıdır. Diğer bir sebebi ise ACR'ye yol açabilecek karakteristikteki kayaçların jeolojik olarak yaygın olmamasıdır. Alkali karbonat reaksiyonu ilk olarak 1957 yılında Swenson tarafından tarif edilmiştir [77]. Ontario'da bazı beton kaldırımlarda yapımından altı ay sonra fazla miktarda genleşme sebebiyle derzlerde kapanma ve çatlamlar gözlemlenmiştir. Oluşan reaksiyonun ASR'den farklı olarak killi kalsitik dolomit agregası ile çimento alkalileri arasında meydana geldiğini fark etmiştir. Bu orijinal araştırmadan sonra dünyanın farklı ülkelerinde de benzer sorunların yaşandığı bildirilmiştir. Alkali-karbonat reaksiyonunun farklı çeşitleri olup bunların hepsi zararlı değildir. Reaksiyon halkasının ve oluşan ürünlerin çeşidine göre bunlar üç ana grupta toplanabilir:

- a) Kalsitik kireçtaşları ile karbonat reaksiyonları. Kireçtaşı agregası parçalarının etrafında koyu renkte reaksiyon halkası oluşur. Bu halkalar parçacığın içine kıyasla hidroklorik asitte daha hızlı çözünür.
- b) Agregada belirgin reaksiyon halkası oluşumu ile karakterize edilebilen dolomitik kireçtaşı reaksiyonları.
- c) İç yapısında kalsit ve kil barındıran ince taneli dolomitik kireçtaşlarının reaksiyonları. Alkalilerle reaksiyon, belirgin bir dolomitsizleşme halkası oluşturur. Reaksiyona uğrayan ürünlerin sulandırılmış hidroklorik asit ile yıkanması sonucunda çoğunlukla silisçe zengin belirgin reaksiyon halkası açığa çıkar.

Sadece üçüncü tip reaksiyon (c) sonucunda önemli genleşme ve hasar belirlenmiştir. Tam olarak açıklanamamış olsa da agregası parçacıklarının içindeki kristallerin dolomitsizleşmesinin kanalları açtığını ve bu sayede önceden kuru olan kilin nemi emerek şişmesinin genleşmeye yol açtığını öne sürmüştür [78]. Reaksiyon, dolomitsizleşme ile brusitin $[Mg(OH)_2]$ oluşması ve devamında alkali hidroksit oluşması şeklinde Denklem 7 ve 8'deki gibi iki aşamada devam eder;



Burada R, sodyum, potasyum veya lityumu temsil etmektedir.

Aşağıdaki karaktere sahip agregaların ACR potansiyeline sahip olabileceği belirtilmektedir [29,75]:

- Kil içeriği veya çözünmeyen kalıntı miktarı %5 ile %25 arasında olan,
- Kalsit/dolomit oranı yaklaşık 1:1 olan,
- Dolomit hacmi, doku kenetlenmesini engelleyici bir faktör haline gelene kadar artmış olan,
- Kil matris içerisinde dağınık halde küçük boyutlu dolomit kristalleri bulunanlar.

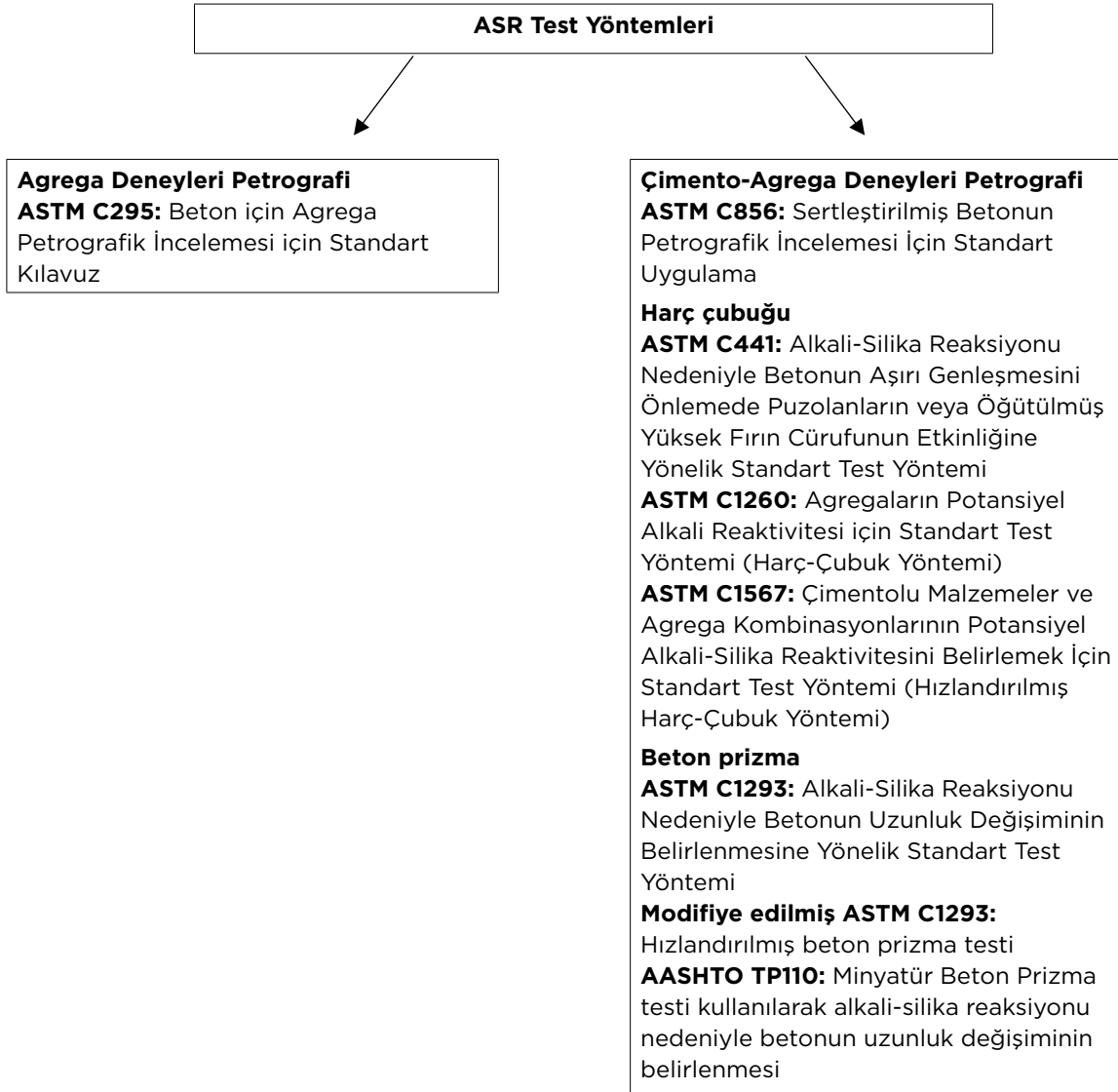
ASR ve ACR çatlakları kıyaslandığında, betonda oluşan ASR çatlakları yapıya iki şekilde hasar vermektedir:

- a) Agregalar parçalarının içsel çatlama ve bu çatlakların harç ve hamura doğru uzanması,
 - b) ASR jelinin göçü ve devamında genişmesi sonucunda mevcut çatlakların uzamaları.
- ACR hasarının asıl sebebi ise reaktif kaba agregada içinde oluşan çatlakların harç ve hamura doğru ilerlemesidir [75].

Yapıda genişleme meydana geldikten sonra ACR'nin durdurulması mümkün olmadığından önceden önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu amaçla, agreganın ocaktan çıkarılırken reaktif kısmının seçilerek ayrılması veya reaktif olmayan bir kısım agregada ile karıştırılarak kullanılması mümkündür. Agreganın maksimum tane boyutunun pratik sınırlarda mümkün olduğunca küçük tutulması da ACR genişmelerini azaltacaktır. Her üç durumda da beton prizma deneyi ile genişmelerin limitlerin altında olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Standartlar eşdeğer Na_2O içeriğinin %0,4'ün altında olan düşük alkali çimento kullanımı ile ACR genişmelerini önleyecek düşük alkali beton boşluk suyu oluşacağını belirtmektedir. Buna rağmen, reaksiyonun kimyası sebebiyle alkaliler tükenmemekte, aksine tekrar meydana gelmektedir. Çimento alkalileri agregalarla bir seri reaksiyona girerek tekrar açığa çıkmakta ve ortamdaki agregayla tekrar reaksiyona girebilmektedir. ACR söz konusu olduğunda çimento alkalitesi yerine beton alkalitesinin sınırlandırılması ve beton alkalitesinin mümkün oldukça düşük tutulması önerilmektedir. Mineral katkıların kullanımı, ACR kontrolünde çok etkili bir yöntem değildir. Puzolanlar alkalilerle reaksiyona girerek onları bağlar, ancak ACR çok düşük alkali seviyelerinde bile başlayabildiği için puzolanlar, alkali miktarını reaksiyonu durduracak seviyeye düşüremez. Puzolanlar, betonun gözenekliliğini de düşürerek reaksiyon için gerekli olan nemin beton içerisine girişini sınırlar. Bu nedenle ACR'yi önlemek için gerekli puzolan miktarı çok fazla olacaktır, dolayısıyla ACR kontrolü için puzolan kullanımı pratik değildir [29].

5. AAR İÇİNTİ TEST YÖNTEMLERİ

AAR ile ilgili olası reaksiyonların tespit edilmesi için agregalarda ve çimento agrega ile birlikte kullanılan test yöntemleri bulunmaktadır. Bu testler petrografik, harç ve betonda kullanılan test yöntemleridir.



6. MİNERAL VE KİMYASAL KATKI KULLANIMININ ASR'YE ETKİSİ

6.1 Mineral Katkılar

Hem ASR hem de ACR'nin oluşmasını önlemek için **“beton içerisindeki alkalinin sınırlandırılması, betonun nem almasının önlenmesi ve reaktif olmayan agregaların kullanımı”** gibi tedbirlerin alınması önemli olmaktadır. Bununla birlikte alınacak bu tedbirler her zaman ASR oluşumunu engelleyememektedir. ASR oluşumunu kontrol edebilmenin en etkili yollarından bir tanesi mineral katkı kullanımı olmaktadır.

Mineral katkıların (çimentosu malzemeler) ASR'yi önleme veya azaltma mekanizmaları hakkında bugüne kadar tam bir fikir birliği sağlanamamıştır. Yapılan çalışmalara bakıldığı zaman bununla ilgili olarak farklı görüşler olduğu görülmektedir [79]. Bunlar:

- Mineral katkıların çimentoya göre daha az reaktif olmaları nedeni ile Portland çimentosuna göre daha az alkali salımı gerçekleşmektedir. Bundan dolayı mineral katkıların alkali miktarı konusunda azaltıcı bir etkisi olmaktadır.
- Katkılı çimentoların hidrasyon reaksiyonları, katkısız çimentoya göre farklı olarak gelişmektedir. Bu reaksiyonlar sonucunda oluşan hidrasyon ürünlerin alkaliler ile reaksiyon verme eğilimleri daha fazladır. Mineral katkıların kullanılması ile birlikte C-S-H jelinin Ca/Si oranı azalmaktadır. Böylece yüzey yükü negatife doğru dönen C-S-H jeli pozitif yüke sahip olan alkaliler ile reaksiyona girerek alkalileri bağlamaktadırlar
- Beton geçirimsizliği katkılı çimentoların daha iyi olması nedeni ile ekstra nem bulunamayacağı için ASR'nin oluşması bir miktar da olsa önlenmiş olmaktadır.
- Ca(OH)_2 içeriği katkı kullanımı ile azalmaktadır ve bu da pH'ın azalmasına neden olmaktadır.
- ASR oluşmasına karşılık katkı kullanımı ile birlikte betonun dayanım artışı oluşan büyümenin üzerinden gelebilmektedir [79].

Çimento veya beton içerisinde kullanılan mineral katkıların ASR ile ilgili olarak etkileri birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve bununla ilgili olarak birçok yayında görüşler oluşturulmuştur. Çimento ve beton standartları içerisinde tanımlanan mineral katkıların kullanımlarına ilişkin oluşturulan görüşler aşağıda verilmiştir [80]:

Uçucu Kül

Uçucu küllerin ASR hasarlarını aşağıda verilen üç mekanizmadan biri veya daha fazlası ile azaltmaktadır [81]:

1. Uçucu külün çimentonun hidrasyonu ile üretilen kalsiyum hidroksit ile puzolanik reaksiyonu nedeniyle beton geçirgenliğinin ve difüzyonunun azaltılması
2. Alkalilerin bir kısmının gözenek çözeltisinden düşük CaO/SiO_2 oranı nedeni ile hidrasyon ürünlerine bağlanarak uzaklaştırılması
3. Daha düşük alkali içeriğine sahip veya en azından daha düşük kullanılabilir alkali içeriğine sahip bir uçucu kül tarafından çimento alkalilerinin seyreltilmesi

Uçucu kül türü, alkali içeriği, kimyasal bileşimi ve dozajı, genişlemenin ne kadar etkili bir şekilde kontrol edileceğini belirlemektedir. Genel olarak, F tipi uçucu küller (silissi) C tipi C küllerden (kalkersi) daha iyi çalışmaktadır. F tipi küller daha yüksek silisyum dioksit içeriğine ve daha düşük kireç içeriğine sahiptir. Bu özellikler genişleme reaktivitesini kontrol etme

yeteneğini artırmaktadır. Genel olarak, ASR genleşmesi kül içeriği arttıkça azalmaktadır. Uçucu küller, kimyasal bileşimlerine, betonun alkali içeriğine ve agreganın reaktifliğine bağlı olarak farklı dozajlar gerektirmektedir. Laboratuvar sonuçları, belirli yüksek alkali/ yüksek kalsiyumlu uçucu küllerin normal dozajlarda ASR'yi kontrol etmede etkili olmadığını göstermektedir. Bu malzemelerden bazıları, daha düşük miktarlarda kullanıldığında ASR genleşmesini daha da kötüleştirebilmektedir (pesimum etkisi) [82,83]. Genel olarak, ASR'yi kontrol etmek için gereken uçucu kül miktarı, aşağıdaki parametrelerden herhangi biri arttıkça artmaktadır:

1. Uçucu külün kireç veya alkali içeriği,
2. Agreganın reaktifliği veya
3. Reaksiyon için betonda bulunan alkali miktarı [84].

Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC)

ÖYFC, ASR'ye karşı etkili olması için genellikle uçucu külden daha yüksek dozajlarda (%25 ila %50) kullanılmaktadır [85]. Örneğin, bir beton karışımında, yüksek reaktif agrega içeren betonda genleşmeyi kontrol etmek için yaklaşık %50 ÖYFC gerekebilirken, orta derecede reaktif agrega içeren betonda genleşmeyi kontrol etmek için yalnızca %25 ila %35 ÖYFC gerekebilmektedir. Genellikle, genleşmeyi kontrol etmek için gereken ÖYFC miktarı, agreganın reaktivitesi ve karışımdaki alkali miktarı arttıkça artmaktadır [86].

Silis Dumanı

Silis dumanı, ASR'yi kontrol etmek için etkili bir çimentomsu malzemedir. Uçucu kül ve ÖYFC ile karşılaştırıldığında, sadece küçük dozlarda silika dumanı yeterli olabilmektedir [85]. Ancak, oldukça reaktif bir agrega ile genleşmeyi kontrol etmek için gereken silika dumanı miktarı yaklaşık %10 veya daha fazla olmaktadır. Bu silika dumanı miktarı, betonda tipik olarak kullanılan miktardan daha yüksektir. Bu nedenle yerleştirme ve bitirme ile ilgili sorunlara yol açabilmektedir. Silika dumanının kullanımı, belki de üçlü bir sistemin parçası olarak kullanıldığında en faydalı ve pratik olmaktadır.

Doğal Puzolanlar

Hamveyakalsine edilmiş doğal puzolanlar bazen ASR'yi kontrol etmek için kullanılmaktadırlar [87]. Oldukça reaktif bir kalsine kil olan metakaolin, ASR'yi kontrol etmede silika dumanı kadar etkili olabilmektedir. Genleşmeyi kontrol etmek için genellikle %10 ila %15 arasında bir ikame seviyesi gerektirmektedir.

Üçlü sistemler

Laboratuvar verileri [88], ASR'yi kontrol etmek için silika dumanının uçucu kül veya ÖYFC ile birlikte kullanılmasının yararlı etkisini göstermektedir. Ayrıca, iki veya daha fazla tamamlayıcı çimentomsu malzemenin birleştirilmesi, malzemeleri tek tek kullanmaya kıyasla ASR'yi kontrol etmek için gereken miktarları azaltabilmektedir. Örneğin, %4 ila %6 silis dumanının orta düzeyde ÖYFC (%20 ila %35) veya uçucu kül (F tipi veya C tipi) ile birleştirilmesinin, yüksek oranda reaktif agregaların genleşmesini kontrol etmede çok etkili olduğu bulunmuştur [89].

6.2 Kimyasal Katkılar

Lityum Tuzları

Mc Joy ve Caldwell, yapmış oldukları çalışmalar ile Lityumun harç ve betonda ASR sonucu hasara sebep olan genleşmeyi kontrol etme kapasitesini ilk olarak göstermişlerdir. Lityumun çeşitli tuzlarının (örneğin, LiCl, Li₂CO₃, LiF, Li₂SiO₃, LiNO₃ ve Li₂SO₄) en umut verici olanlar olduğunu ve yeterli oranda kullanıldıklarında reaktif silis içeren harcın genleşmesini neredeyse ortadan kaldırabileceğini göstermişlerdir [90-91].

Lityum, sodyum ve potasyum gibi bir alkali metal olduğundan lityum bileşiklerinin ASR'yi etkili bir şekilde bastırması biraz paradoksal bir durum olmakla birlikte; Lityumun ASR'yi kontrol ettiği mekanizma kesin bilinmemektedir. Ancak bu konuda birçok teori öne sürülmektedir [92]. En basit ve en yaygın kullanılan teori, lityum tuzlarının reaktif silika ile sodyum ve potasyum tuzlarına benzer şekilde reaksiyona girdiği, ancak reaksiyon ürününün su emme ve şişme eğilimi düşük, çözünmeyen bir lityum-silikat olduğudur. Lityum-silikat, reaktif agrega parçacıklarının etrafında oluşmakta ve alttaki reaktif silikayı alkali hidroksitlerin "saldırısından" korumaktadır.

Lityumun etkinliği aşırı derecede agrega bağımlı görüldüğünden, ASR'yi kontrol etmek için tek bir doz reçete etmek mümkün değildir ve minimum dozun, kullanım için belirli reaktif agrega dikkate alınarak lityumun test edilmesiyle belirlenmesi gerekmektedir. Şu anda, doğru lityum dozunu belirlemek için hızlandırılmış testlerin uygunluğu konusunda bir fikir birliği bulunmamaktadır ve bu amaçla beton prizma testinin kullanılması önerilmektedir.

Diğer Kimyasal Katkılar

Yapılan bir çalışmada, %4 oranında sürüklenmiş hava ile ASR genleşmelerinin %40 azaldığını belirlemiştir. Genleşen ASR jeline donma-çözülme etkisinde olduğu gibi sürüklenmiş hava boşluklarının kaçış alanı yaratması ile bu azalma meydana gelmektedir. Beton içerisine fazladan hava sürüklenmesinin ASR etkisini azalttığına dair bilinen bir örnek bulunmamaktadır [93].

Yapılan çalışmalarda, bazı su azaltıcı ve geciktirici katkıların ASR genleşmelerini azalttığı belirtilmiştir. Klorür ve sülfat tuzları genleşmeleri arttırabilir. Yüksek oranda su azaltıcılar opal reaktif agregasıyla kullanıldığında ASR genleşmelerini arttırıcı etki gösterebilmektedir [94].

Alkali silika reaksiyonu (ASR) ile oluşan harç veya beton genleşmesinin belirli puzolanlar, hava sürükleyici, bazı priz geciktiriciler ve malzemenin alkali içeriğindeki azalma ile azaldığı bilinmektedir. Genleşmeyi kontrol etme yöntemleri, %2 yüksek genleşmeli opal ile yapılan harç çubuklarında ayrı ayrı ve kombinasyon halinde kullanılmıştır. Etkileri, bu harç çubuklarının genleşmesinin birbirleriyle ve opal içeren ancak mineral veya kimyasal katkı maddesi içermeyen kontrollerle karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir. Hem priz geciktirici hem de silika dumanı içeren çubuklar, yalnızca silika dumanı içeren çubuklarla esasen aynı genleşme azalmasını göstermiştir. Priz geciktirici ve hava sürükleyici madde kombinasyonunu içeren çubuklar, ayrı ayrı kullanıldığında, priz geciktirici veya hava sürükleyici madde içeren çubuklardan daha fazla genleşme azalması göstermiştir. Kombine katkı maddelerinin birbirini tamamladığı ve yalnızca her durumda genleşmedeki azalmanın farklı bir mekanizmaya bağlı olduğu durumlarda performansı önemli ölçüde iyileştirme şansının en yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Priz geciktiricinin etkisi, boşluk çözeltisindeki Ca/Si oranını düşürmesi ve ortamdaki Ca(OH)₂ oluşumunu engellemesidir [95].

Betonun içindeki donatıyı karbonatlaşma ve klorür korozyonundan korumak için kullanılan kalsiyum nitrat (CN) çözeltilisinin uçucu kül ve silis dumanı içeren betonlardaki ASR genleşmelerine etkisi incelemiştir. Metreküpte 20 litre kadar CN çözeltisi, reaktif agrega ile kullanıldığında 1 yıllık genleşme değerini kontrol örneğine kıyasla %28 azaltmaktadır. CN çözeltisi, çimentonun %25'i kadar uçucu kül ve %5'i kadar silis dumanına aynı miktarda eklendiğinde genleşmeleri %35 oranında düşürmektedir. Ayrıca CN çözeltilisinin eklenmesiyle XRD incelemesinde daha az kalsiyum hidroksite rastlanmış ve daha fazla kimyasal olarak bağlanmış su ölçülmüştür [96].

Mikrolifler

Çimento matrisinin içerisinde dağınık olarak bulunan kısa lifler (mikrolifler) matrisin yoğunluğunu (tokluğunu) arttırarak çatlakların başlamasını, ilerlemesini ve yayılmasını engelleyebilmektedirler [97]. Son yıllarda beton içerisinde karbon, polivinilalkol (PVA), polipropilen (PP) ve çelik mikroliflerin kullanımı önem kazanmaya başlamıştır. Bu tip lifler, mikroçatlakların kritik çatlak seviyesine ulaşarak makroçatlaklar haline gelmesini engelleyebilmektedir. Bu liflerin boyutları itibariyle geleneksel çelik liflere kıyasla özgül lif aralığı daha düşük olmaktadır. Bundan dolayı da çimento matrisi içerisinde birbirlerine daha yakın yerleştirilmeleri gerekmektedir [67].

KAYNAKLAR

1. Dinku, A., Bogale, B., Alkali Aggregate Reactions in Concrete: A Review of the Ethiopian Situation, *Journal of EEA* 21 (2004) 47-58.
2. Fanijo, E. O., Kolawole, J. T., Almakrab, A., Alkali-Silica Reaction (ASR) in Concrete Structures: Mechanisms, Effects and Evaluation Test Methods Adopted in the United States, *Case Studies in Construction Materials* 15 (2021), 1-17.
3. Naik, T.R., Sustainability of concrete construction, *Pract. Period. Struct. Des. Constr.* 13 (2008) 98-103.
4. Kolawole, J.T., Babafemi, A.J., Paul, S.C., A. du Plessis, Performance of concrete containing Nigerian electric arc furnace steel slag aggregate towards sustainable production, *Sustain. Mater. Technol.* 25 (2020).
5. Frare, A., Langaro, E., de Souza, D. J., Medeiros, M. H. F., Systematic Review on Alkali-Aggregate Reactions: Comparative Overview of Studies Carried Out in Canada and Brazil, *Revista ALCONPAT* 13 (1) (2023), 1-27.
6. Leemann, A., Góra, M., Lothenbach, B., Heuberger, M., Alkali Silica Reaction in Concrete-Revealing the Expansion Mechanism by Surface Force Measurements, *Cement and Concrete Research* 176 (2024), 1-13.
7. Appendix A of NCHRP Research Report 1083: Alkali-Silica Reactivity Potential and Mitigation: Test Methods and State of Practice (NCHRP Project 10-103).
8. Stanton, T.E., "Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate", *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 66 (10) 1940, 1781-1811.
9. Sidney Mindess, Francis YOWlg J. Arid David Darwin, *Concrete*, SecopdEdition, Prentice Hall, USA, 2003.
10. Cement Association of Canada - Alkali Silica Reactivity. <http://www.cement.ca/cement.nsf>

11. Moskvina V., Concrete and Reinforced Concrete Deterioration and Protection, Mir Publishers, Moscow, 1983.
12. Lea F. M., The Chemistry of Cement and Concrete, Third Edition, Edward Arnold Publishers Ltd., Glasgow, 1970.
13. Bensted J. and Barnes P., Structure and Performance of Cements, Second Edition, Edmundsbury Press, Suffolk, Great Britain, 2002.
14. Concrete Durability. [http://www.ceoberkeley .edul-paulmonUCE6ONew/chapter5.txf](http://www.ceoberkeley.edu/~paulmon/UCES6ONew/chapter5.txf)
15. Building Research Establishment Digest, Garston, Watford WD2 7JR, England, February 1982.
16. Neville A. M. and Brooks I I,'Concrete Technology, Third Indian Reprint, Replika Press Pvt. Ltd., India, 2003.
17. Thermo-Chemo-Mechanics of ASR. Expansion in Concrete Structures. <http://eist.mit.edu/researchandprojects/expansivereactions/papers/asrexpansion.pdf>
18. Standard Practice for Concrete for Civil Works Structures, Appendix D, Alkali-Silica Aggregate Reactions. <http://www.usace.army.mil/ineUusacedocs/eng-manuals/em1110-2-2000/a-d.txf>
19. Fanijo, E., Babafemi, A.J., Arowojolu, O., Performance of laterized concrete made with palm kernel shell as replacement for coarse aggregate, Constr. Build. Mater. 250 2020, 118829.
20. Kolawole, J.T., Combrinck, R., Boshoff, W.P., Rheo-viscoelastic behaviour of fresh cement-based materials: cement paste, mortar and concrete, Constr. Build. Mater. 248 2020, 118667.
21. Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K.J., Resendez, Y., Alkali-Silica Reactivity Field Identification Handbook, Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology, United States, 2011.
22. Islam, M.S., Akhtar, S., A critical assessment to the performance of alkali-silica reaction (ASR) in concrete, Can. Chem. Trans. 1 2013, 253-266.
23. Léger, P., Côté, P., Tinawi, R., Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dams, Comput. Struct. 60 1996, 601-611.
24. Bérubé M.-A., J. Frenette, Testing concrete for AAR in NaOH and NaCl solutions at 38°C and 80°C, Cem. Concr. Compos. 16 (1994) 189-198.
25. Glasser, F.P., Chemistry of the alkali-aggregate reaction, Alkali-Silica React. Concr. 1992, 30-53.
26. Monteiro, P.J.M., Shomglin, K., Wenk, H.R., Hasparyk, N.P., Effect of aggregate deformation on alkali-silica reaction, Mater. J. 98 2001, 179-183.
27. Thomas, M. D.A., Fournier, B., Folliard, K.J., Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book, Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology, United States, 2013.
28. Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K.J., Selecting Measures to Prevent Deleterious Alkali-Silica Reaction in Concrete: Rationale for the AASHTO PP65 Prescriptive Approach, Federal Highway Administration, United States, 2012.
29. Farny, J.A., Kosmatka, S.H., Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Portland Cement Association Skokie, IL, 1997.

30. Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K.J., Ideker, J.H., Resendez, Y., The Use of Lithium to Prevent or Mitigate Alkali-Silica Reaction in Concrete Pavements and Structures, Turner-Fairbank Highway Research Center, 2007.
31. Haha, M. B., Gallucci, E., Guidoum, A., Scrivener, K.L., Relation of expansion due to alkali silica reaction to the degree of reaction measured by SEM image analysis, *Cem. Concr. Res.* 37 2007, 1206-1214.
32. Multon, S., Cyr, M., Sellier, A., Diederich, P., Petit, L., Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion, *Cem. Concr. Res.* 40 2010, 508-516.
33. Multon, S., Cyr, M., Sellier, A., Leklou, N., Petit, L., Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion, *Cem. Concr. Res.* 38 2008, 350-359.
34. Xu, H., On the alkali content of cement in AAR, *Concr. Alkali-Aggregate React. Proc. 7th Int. Conf. Ed. by Grattan-Bellew, Patrick E., Noyes Publ. Park Ridge, New Jersey (1987)* 451-455.
35. Hobbs, D.W., *Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Thomas Telford, London, 1988.
36. Stanton, T.E., *Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate*, 2008.
37. T. Kuroda, S. Inoue, A. Yoshino, S. Nishibayashi, Effects of particle size grading and content of reactive aggregate on ASR expansion of mortars subjected to autoclave method, *Proc. 12th Int. Conf. Alkali-Aggregate React. Concr. Beijing, China 2004*.
38. Poyet, S., Sellier, A., Capra, B., Foray, G., Torrenti, J.-M., Cognon, H., Bourdarot, E., Chemical modelling of alkali silica reaction: influence of the reactive aggregate size distribution, *Mater. Struct.* 40 2007, 229-239.
39. Zhang, X., Groves, G.W., The Alkali-silica reaction in OPC/silica glass mortar with particular reference to pessimum effects, *Adv. Cem. Res.* 3 1990, 9-13.
40. Kawamura, M., Takemoto, K., Hasaba, S., Application of quantitative EDXA analyses and microhardness measurements to the study of alkali-silica reaction mechanisms, *6th Int. Conf. Alkaline Concr. Copenhagen, Denmark 1983*, 167-174.
41. Wigum, B.J., Lindgård, J., AAR: TESTING, MITIGATION & RECOMMENDATIONS. THE NORWEGIAN APPROACH DURING TWO DECADES OF RESEARCH, *13th ICAAR—International Conf. Alkali-Aggregate React. Trondheim 2008*, 1299-1309.
42. Saha, A.K., Khan, M.N.N., Sarker, P.K., Shaikh, F.A., Pramanik, A., The ASR mechanism of reactive aggregates in concrete and its mitigation by fly ash: a critical review, *Constr. Build. Mater.* 171 2018, 743-758.
43. Kawabata, Y., Yamada, K., The mechanism of limited inhibition by fly ash on expansion due to alkali-silica reaction at the pessimum proportion, *Cem. Concr. Res.* 92 2017, 1-15.
44. Ichikawa, T., Alkali-silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect, *Cem. Concr. Res.* 39 2009, 716-726.
45. Gao, X.X., Multon, S., Cyr, M., Sellier, A., Alkali-silica reaction (ASR) expansion: pessimum effect versus scale effect, *Cem. Concr. Res.* 44 2013, 25-33.
46. French, W.J., Avoiding concrete aggregate problems, *Improv. Civ. Eng. Struct. New.* 1995, 65-95.
47. Dunant, C.F., Scrivener, K.L., Effects of aggregate size on alkali-silica-reaction induced expansion, *Cem. Concr. Res.* 42 2012, 745-751.

48. Ramyar, K., Topal, A., Andiç, Ö., Effects of aggregate size and angularity on alkali-silica reaction, *Cem. Concr. Res.* 35 2005, 2165-2169.
49. Xie, Z., Xiang, W., Xi, Y., ASR potentials of glass aggregates in water-glass activated fly ash and portland cement mortars, *J. Mater. Civ. Eng.* 15 2003, 67-74.
50. Grattan-Bellew, P.E., Laboratory evaluation of alkali-silica reaction in concrete from Saunders Generating Station, *Mater. J.* 92 1995, 126-134.
51. Grattan-Bellew, P.E., Mitchell, L.D., Margeson, J., Min, D., Is alkali-carbonate reaction just a variant of alkali-silica reaction ACR= ASR? *Cem. Concr. Res.* 40 2010, 556-562.
52. Goguel, R., Alkali release by volcanic aggregates in concrete, *Cem. Concr. Res.* 25 1995, 841-852.
53. Berra, M., Mangialardi, T., Paolini, A.E., Alkali-silica reactivity criteria for concrete aggregates, *Mater. Struct.* 38 2005, 373-380.
54. Hester, D., McNally, C., Richardson, M., A study of the influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete, *Constr. Build. Mater.* 19 2005, 661-665.
55. Diamond, S., *Proc. 6th Int. Conf. on AAR in Concrete*, Copenhagen, Denmark, 1983, 155.
56. Chatterji, S., Thaulow, N., Jensen A.D., "Studies of ASR: Part 4." *Cement and Concrete Research*, Vol. 17 1987, 777-783.
57. Nixon, P.J., Page, C.L., Canham, I., and Bollinghaus, R., "Influence of sodium chloride on the ASR." *Advances in Cement Research*, Vol. 1 1988, 99-105.
58. Kawamura, M. and Ichise, M., "Characteristics of ASR in Presence of Sodium and Calcium Chloride." *Cement and Concrete Research*, Vol. 20 1990, No.5, 757-766.
59. Kawamura, M., Takeuchi, K., and Sugiyama, A., "Mechanisms of expansion of mortars containing reactive aggregates in NaCl solution." *Cement and Concrete Research*, Vol. 24 1994, 621-632.
60. Duchesne, J., and Berube, M.A., "Effect of Deicing Salt and Sea Water on ASR: New Considerations Based on Experimental Data." *Proceedings of 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions*, Melbourne, Australia, 1996, 19-23.
61. Sibbick, R.G. and Page C.L. "Effects of Sodium Chloride in Alkali Silica Reactions in Hardened Concretes." *Proceedings of 10th International Conference on Alkali Aggregate Reactions*, Melbourne, Australia, 1996, 822-829.
62. Rangaraju, P.R. and Olek, J. "Potential for acceleration of ASR in the presence of pavement deicing chemicals." *Report IPRF-01-G-002-03-9*, Innovative Pavement Research Foundation, Skokie, IL., 2007.
63. Rangaraju, P.R., Sompura, K.R. and Olek, J.. "Modified ASTM C 1293 test method to investigate potential of potassium acetate deicer solution to cause alkali-silica reaction." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2020, 2007, 50-60.
64. Thomas, M.D.A., "The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review." *Cement and Concrete Research*, Vol. 41 2011, 1224-1231.
65. Hayman, S., Drimalas, T., Thomas, M.D.A. and Folliard, K., "Potassium acetate and ASR." *Proceedings 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions*, Austin, TX, May 2012.
66. *Alkali-Aggregate Reaction and Structural Damage to Concrete; Engineering assessment, repair and management*, Blight, G. E., Alexander, M. G., CRC Press, 2011.

67. Alkali-Agrega Reaktivitesinin Tespitinde Kullanılan Deney Metotlarının İncelenmesi, ANDIÇ ÇAKIR, Ö., Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
68. Hobbs, D. W., Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thomas Telford, London, 1988, s. 183.
69. Vivian, H.E, 1951, Studies in cement aggregate reaction. XVI. The Effect of hydroxyl ions on the reaction of opal, Australian Journal of Applied Sciences, 2: 108-113.
70. Dent-Glasser, L.S., Osmotic pressure and swelling of gels, Cement and Concrete Research, 9 1979, 515-517
71. Dent-Glasser, L.S., Kataoka, N, , The chemistry of alkali-aggregate reactions, 1-7, Proceedings of the Fifth International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, S 252/23, 1981, 66.
72. Swamy, R. N., Testing for Alkali Silica Reaction, 54-95, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, R. N. Swamy (Ed), Van Nostrand Reinhold, New York, 1992, 333 p.
73. Oberholster, RE 2001, 'Alkali-silica reaction', in Fulton's concrete technology, eds BJ Addis & G Owens, 8th edn, Cement and Concrete Institute, Midrand, South Africa.
74. Grattan-Bellew, P.E., Study of expansivity of a suite of quartzwackes, argillites and quartz arenites, Proceeding of the Fourth International Conference on the Effects of Alkalis in Cement and Concrete 1978, pp 113-140.
75. Ozol, M.A., Alkali-carbonate rock reaction, 372-387, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials, Klieger, P., Lamond, J.F. (Eds.), ASTM Publications, STP 169C, 1994, 623 p.
76. ACI Committee, State of the art report on alkali aggr. reactivity, ACI 221.1R-98, p. 31.
77. Swenson, E.G., A reactive aggregate undetected by ASTM tests, ASTM Bulletin No. 226: 1957, 48-57.
78. Gillot, J.E., Alkali-aggregate reactions in concrete, Engineering Geology, 9 1975, 303-326.
79. Alkali-Silika Reaksiyonu, Uğur, L. O., Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı, 2002.
80. Farny, J.A., Kerkhoff, B., Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Concrete Technology, PCA R&D Serial No. 2071b, 2007.
81. Detwiler, R. J., Substitution of Fly Ash for Cement or Aggregate in Concrete: Strength Development and Suppression of ASR, RD127, PCA, 2002.
82. Chen, H.; Soles, J.A.; and Malhotra, V.M., "Investigations of Supplementary Cementing Materials for Reducing Alkali-Aggregate Reactions," Cement & Concrete Composites, No. 1-2 (15), 1993.
83. Carrasquillo, R. L., Farbiarz, J., Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Containing Fly Ash: Final Report, Research Report 450-3F, Center for Transportation Research, University of Texas, 1989.
84. Shehata, M.H. and Thomas, M.D. A. "The Effect of Fly Ash Composition on the Expansion of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction." Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000.
85. Buck, A., "Use of Cementitious Materials Other Than Portland Cement," Concrete Durability, Katharine and Bryant Mather International Conference, SP100, American Concrete Institute, 1987.

86. Thomas, M. D. A., Innis. F. A., "Use of the Accelerated Mortar Bar Test for Evaluating the Efficacy of Mineral Admixtures for Controlling Expansion due to Alkali Silica Reaction," Cement, Concrete, and Aggregates, Vol. 21, No. 2, 1999.
87. Lerch, W., Studies of Some Methods of Avoiding the Expansion and Pattern Cracking Associated with the Alkali-Aggregate Reaction, Research Department Bulletin RX031, PCAs, 1950.
88. Fournier, B.; Nkinamubanzi, P. C.; Ferro, A.; Chevier, R., Feasibility of Ternary Blends with Class C Fly Ash for High Performance Concrete, EPRI, Palo Alto, CA, ICON/CANMET, Ottawa, ON, Canada, the International Center for Aggregate Research (ICAR), Minnesota Department of Transportation, Maplewood, MN, and PCA, 2004.
89. Folliard, K. J.; Thomas, M. D. A.; and Kurtis, K. E., Interim Recommendations for the Use of Lithium to Mitigate or Prevent Alkali-Silica Reaction (ASR), FHWA-HRT-06-073, Federal Highway Administration, McLean, 2006.
90. Sims, I., Poole, A.B., Alkali-Aggregate Reaction in Concrete A World Review-CRC Press, 2017.
91. McCoy, W.J. & Caldwell, A.G. New approach to inhibiting alkali-aggregate expansion. Journal of American Concrete Institute, 22 (9), 1951.
92. Feng, X., Thomas, M.D.A., Bremner, T.W., Balcom, B.J., Folliard, K.J., Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: A critical review. Cement Concrete Res., 35, 2005.
93. Jensen A.D., Chatterji, S., Christensen, P., Thaulow, N., Studies of alkali silica reactions, Part II: Effect of air entrainment on expansion, Cement and Concrete Research, 14, 1984.
94. Wang H, Gillott J.E., 1989, The effect of superplasticisers on alkali silica reactivity, 187-192, Proc. 8th International Conference on Alkali Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, 886 p.
95. Gillott, J.E., Wang H, Improved control of alkali-silica reaction by combined use of admixtures, Cement and Concrete Research, Volume 23 (4), 1993.
96. Li, Z., Mu, B., Peng, J., Alkali-silica reaction of concrete with admixtures, Journal of Engineering Materials, Vol.126 (3), 2000.
97. Bentur, A., Mindess, S., Fibre Reinforced Cementitious Composites, Elsevier, UK, 1990.



TÜRKCİMENTO

Tepe Prime A Blok Kat: 18-19
Eskişehir Devlet Yolu
(Dumlupınar Bulvarı) 9. km
No: 266 06800 Ankara
T : 444 50 57 - F : 0 (312) 265 09 06-05
www.turkcimento.org.tr - info@turkcimento.org.tr