

Betonda Alkali-Silis Reaksiyonu: Bir Derleme*

Kambiz Ramyar¹

Özet

Agregalarda bulunan reaktif silis ile beton boşluk çözeltisinde yer alan ve ağırlıklı olarak çimento kaynaklı olan alkaliler arasında oluşan reaksiyona alkali-silis reaksiyonu denilmektedir. Reaksiyonun 1940'ların başında tanımlanmasından bu yana, konu ile ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır. Araştırmalar sonucunda kayda değer bilgi birikimi oluşmasına rağmen, halen, konu ile ilgili tam anlaşılmayan ve daha fazla araştırma gerektiren hususlar mevcuttur. Bu bildiride reaksiyonun oluşma ve genleşme mekanizması, ortaya çıkan ürünler ve bunların özellikleri ile reaksiyonu etkileyen faktörler ve hasarın teşhisi ile ilgili literatür taraması sunulmuştur.

1. GİRİŞ VE TARİHÇE

Alkali silis reaksiyonu (ASR), beton agregalarında bulunan reaktif silis ile betonun boşluk çözeltisinde bulunan hidroksil ve alkali iyonlarının reaksiyonudur. Bu reaksiyon, betonda nem etkisiyle genleşen alkali-silis jelinin oluşmasına neden olur. Betonda genleşme sonucu meydana gelen çekme gerilmeleri çatlamaya yol açar.

Betonda ASR kaynaklı hasar ilk olarak yaklaşık 70 yıl önce Stanton tarafından kanıtlanmıştır. Türkiye'de, ASR ile ilgili ilk doküman 1975 yılında basılmıştır [1]. Yazıda ülkemizdeki bazı barajlarda kullanılan agregaların %30'unun kimyasal deney yöntemine göre (ASTM C289) reaktif olduğu bildirilmiştir.

Herhangi bir hasar belirtisi görülmeyen söz konusu barajların betonlarında, bu agregalar ile düşük alkali içerikli çimento ve uçucu kül kullanıldığı rapor edilmiştir. Bahis konusu yıllarda Türkiye'de üretilen çimentoların %85'inin düşük alkali içerikli olduğu bilinmektedir. Ancak çimento fabrikalarının ıslak üretim yönteminden kuru yönteme geçmesiyle, çimentoların alkali içeriğinde kayda değer artış oluşmuştur. Şöyle ki 1996 yılında üretilen çimentoların eşdeğer alkali içeriğinin %0.81-%0.97 arasında olduğu ve günümüzde de bu rakamın kayda değer mertebede değişmediği açıklanmıştır [2].

Ülkemizde ASR sonucu ilk hasar, 1995 yılında İzmir yöresindeki bazı karayolu köprülerinde yaygın çatlakların gözlemlenmesi ile ortaya çıkmıştır. Yapılan inceleme sonucunda, beton üretiminde kullanılan Gediz ve Nif nehri yatak ve teraslarındaki doğal iri ve ince agregaların içerdiği %3'un üzerindeki reaktif camı riolitinin ASR'ye yol açtığı anlaşılmıştır [3]. Daha sonraki çalışma ve incelemeler, reaksiyonun İzmir (1) yöresine has olmadığı, Ülkenin, Aliağa (2) [4],

Niğde (3) [5], Afyon (4) [6], Sivas (5) [7], Fırat havzası (6) [8], Deriner Çoruh havzası (7) [9], Ankara (8) [10] ve Sakarya (9) [11] gibi diğer bölgelerinde de bulunan bazı agregaların ASR oluşturacak özellikte olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 1).

Bu bildiride reaksiyonun oluşma ve genleşme mekanizması, ortaya çıkan ürünler ve bunların özellikleri ile reaksiyonu etkileyen faktörler irdelenmiştir.

Alkali-Silica Reaction In Concrete: A Review

The reaction between reactive silica in aggregate and alkalis of the concrete pore solution, coming mainly from cement, is called alkali-silica reaction. Since the recognition of the reaction in early 1940s, a great amount of research was carried out, resulting in a considerable accumulation of knowledge. In spite of this, there are still some aspects of the reaction which are not well understood and need further investigation. In this paper, a literature survey on the mechanisms of reaction formation and its expansion and the reaction products thus formed as well as the factors influencing the reaction and diagnosis of the ASR damage are presented.

* Beton 2013 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

⁽¹⁾ Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, kambiz.ramyar@ege.edu.tr



Şekil 1. Türkiye’de ASR’ye neden olabileceği tespit edilmiş agregaların konumları

2. ÇİMENTO HAMURU BOŞLUK ÇÖZELTİSİ

Reaktif agrega içeren betonda alkali silis reaksiyonu oluşum potansiyeli büyük ölçüde boşluk çözeltisinin kompozisyonuna bağlıdır. Çözelti, reaktif silisin reaksiyon ortağı ve rutubet sağlayıcı olarak rol almaktadır. Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan betonun boşluk çözeltisi, sodyum, potasyum, kalsiyum ve hidroksil iyonları içermektedir. Bu iyonların boşluk çözeltisindeki derişimi, ağırlıklı olarak, çimentonun kompozisyonuna bağlıdır. Düşük alkali içerikli çimentodan üretilen betonun, boşluk çözeltisi pH’ı 12.7 ile 13.1 arasında değişirken, yüksek alkali içerikli çimentodan üretilen betonlarda bu değer 13.5 ile 13.9 arasında değişebilmektedir. Başka bir deyişle, çimentonun alkali içeriğinin yükselmesiyle betonun boşluk çözeltisindeki hidroksil iyonu derişimi 10 kat artabilir.

Boşluk çözeltisindeki sodyum ve potasyum iyonlarının fazlalığı, bir taraftan yük dengesinin sağlanması için, kalsiyum hidroksitten daha fazla hidroksil iyonunun çözülmesine neden olur. 20°C sıcaklıkta yüksek pH’a sahip çimento hamuru çözeltisinde, ilk 24 saatten sonra, diğer katyonların yetersizliğinden, $[Na^+]+[K^+][OH^-]$ olur [12,13]. Diğer taraftan, artan boşluk çözeltisi pH’ı agregadan daha fazla reaktif silisin çözülmesine yol açar. Jel oluşumu, alkaliler (ve kalsiyum) ile çözülen silisin reaksiyonu ile gerçekleşir [14]. Kısaca, reaktif agrega üzerinde zararlı etki yaratan, betonun boşluk çözeltisindeki yüksek hidroksil iyonu derişimi olduğu Hobbs [15] tarafından bildirilmiştir. Ayrıca, boşluk çözeltisinin alkali silis reaksiyonundaki önemi, hem hidrate hamurla hem de agrega taneleriyle yakın temas halinde olması ve iyon taşınmasında ana etmen olarak yer almasıdır [16].

Bazı araştırmacılar, reaksiyon hızı dışında, ASR’nin puzolanik reaksiyona benzer olduğunu öne sürmektedir [17,18,19]. İnce tanelerden oluşan mineral katkıda bulunan reaktif silisin, boşluk çözeltisindeki alkali hidroksitler ile hızlı reaksiyonu sonucu, az miktarda kalsiyum içeren, alkali-silis jeli oluşur. Zamanla kalsiyumun alkaliler ile yer değiştirmesi sonucu, jelin görece Ca/Si oranı (katkısız çimentodaki jele kıyasla) azalır. Ancak, puzolanik reaksiyon ile ASR’nin iki önemli farkı

unutulmamalıdır: 1) Puzolanik reaksiyonun ürünü olan C-S-H oldukça rijitken, ASR jeli su emerek genişleyen karakterdedir. 2) Mineral katkının inceliğine bağlı olarak, bağlayıcı hamurda puzolanik reaksiyon ürünleri daha homojen dağılırken ASR ürünleri agrega-hamur geçiş bölgesi (ITZ) veya agregadaki çatlaklarda yer almaktadır [20].

3. ASR OLUŞMA MEKANİZMASI

Çimentonun hidratasyonu sonucu, tabakalar halinde CH ve lifli veya çubuksu yapıda C-S-H gibi katı ürünlere ilaveten önemli miktarda ve farklı boyutta boşluk oluşur. Öte yandan, suya batırılmış bir silis taneciğinin yüzeyi, artan yüzey alanı ve düzensizliğine bağlı olarak artış gösteren, zayıf bir asidik karakterdedir. Silisin özü silisyum atomuna bağlı 4 oksijen atomundan oluşan silis dörtyüzlüsüdür. Oksijen atomları bir valansları ile silisyuma bağlı olup diğer valansları serbest olduğundan, silis dörtyüzlüsünün serbest dört negatif bağı mevcuttur. Normalde, saf suda bile yüzey oksijenleri hidroksile haldedir. Yüzey araştırmaları bu karışık yüzeyin bir kaç atom, bazen onlarca atom derinliğinde olduğunu ortaya koymuştur. Agregaların alkaline ortamda hidroksile olma potansiyelleri artar. İyi kristalize olmuş kuvars için de böyle bir potansiyel söz konusudur, fakat, hidroksile olma hızı oldukça yavaştır. Sıcaklık, reaksiyonu belirgin şekilde artırır, hidrotermal koşullarda ince öğütülmüş kristalin kuvars oldukça reaktiftir. Ancak, amorf silis içeren agregalar normal ortam koşullarında bile kristalin kuvarsa kıyasla oldukça hızlı hidroksile olur [16].

ASR jelinin kimyasal kompozisyonu oldukça değişkendir. Normal ortam koşullarında reaksiyonun gelişimi ile ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır. Dent-Glasser vd’ne [21,22] göre, reaksiyonun ilk aşamasında yüksek pH’a sahip boşluk çözeltisi, agreganın siloksan (Si-O-Si) bağlarını silanol (Si-OH) bağlarına dönüştürür. Opal gibi boşluklu ve su içeren silisli agregaların yapısında fazlaca silanol bağı bulunmaktadır. Asidik karakterde olan bu silanol grupları bazik olan boşluk çözeltisi ile reaksiyona girmeye yatkındır. Silanol grupları, hidroksil iyonlarının ikinci saldırısı ile SiO^- formuna dönüşerek su içinde dağılır. Negatif yüklü SiO^- , pozitif yüklü sodyum, potasyum ve kalsiyum iyonlarını, oluşan jelin içine çekerek aşağıda gösterildiği gibi denge sağlamaya çalışır:



Yukarıdaki reaksiyonda ortamın iyon dengesi Na_2O yardımıyla kurulmuştur. Diğer katyonlar da bu reaksiyona katılır. Üçüncü aşamada daha fazla siloksan köprüsü hidroksil iyonlarının etkisinde SiO^- formuna dönüşerek hasara uğrar [16]. Son aşama, jelin su emerek genişmesi ve reaksiyon bölgesi yakınlarında mikro-çatlakların oluşmasıdır. Zaman-

la bu çatlaklar birleşir, çoğalır ve betonun yapısını tahrip ederek elemanda hasar meydana getirir. Bazı durumlarda bu çatlaklardan betona sızan diğer zararlı maddeler oluşan hasarı arttırabilir. Betonun içinden akan su etkisiyle süzülme ve yüzeyde çiçeklenme görülebilir. Çatlakların etraftaki çimento hamurunda ikincil kaba kristalin etrenjitin ve ikincil portlanditin oluşumu da gözlemlenmiştir. Bu tür oluşumların gözlemlendiği betonların çoğunda sülfat seviyesi normaldir. Bu durum, etrenjit oluşumunun dış kaynaklı sülfat etkisiyle olmadığını, gerekli sülfatın ise betonun içinden sağlandığını göstermektedir. Betonda alkali silis jeline doğru taşınan boşluk çözültüsüyle gelen sülfat iyonlarının etrenjit oluşumunu sağladığı öne sürülmektedir [23].

4. PESİMUM ORAN

Betondaki potansiyel reaktif bileşenler ile genleşme arasında doğrusal bir ilişki yoktur. En yüksek genleşmeyi sağlayan reaktif bileşenler oranına "pesimum oran" denilmektedir. Reaktif bileşenler oranı bunun altında veya üstünde olduğunda, genleşme azalmaktadır. Pesimum oran agregadaki reaktif malzemede olduğu gibi betonun alkali içeriği için de söz konusudur [15,24,25,26,27]. Pesimum oran farklı reaktivite potansiyeli olan bileşenler için farklı olabilir. Opal içerenler gibi hızlı reaktif agregada maksimum genleşme, genelde %10'un altındaki gibi düşük reaktif silis içeriklerinde oluşmaktadır. Ancak, yavaş reaktif agregada pesimum oran, %100'e varan değerlerde, yüksek olabilir. Başka deyişle bu agregalar pesimum oran göstermeyebilir [28,29].

Reaktif agregaların olası pesimum oranlarının bilinmesi farklı reaktif bileşen oranlarında hazırlanan deneme karışımlarıyla belirlenebilmektedir. Genelde pesimum oranındaki betonlarda ASR genleşmesini azaltmak için, çimentonun yeterli bir bölümü yerine, mineral katkı kullanılması etkin olduğu bilinmektedir. Ancak, bazı uçucu küllerin, çok düşük oranda özellikle düşük alkali içerikli çimento yerine, kullanıldığında daha fazla genleşmeye yol açabileceği belirtilmiştir [20,30]. Bunun uçucu kül tarafından sisteme ilave edilen suda çözülen alkalilerden kaynaklandığı açıklanmıştır [20].

5. ASR ÜRÜNLERİNİN KOMPOZİSYONU

ASR ürünlerinin kompozisyonu ve dokusu boşluk çözültüsünün kompozisyonuna, reaktif silisin tipine, reaksiyon sıcaklığına ve reaksiyona giren ürünlerin yoğunluğuna bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Ayrıca, bu ürünlerin bahis konusu özeliği zamanla ve betondaki konumu ile değiştiği bilinmektedir [31,32]. Reaksiyona uğramış betonun çatlaklarında yer alan jel, genelde transparan ve reçinemsidir. Jel örneklerinin viskoziteleri arasında da kayda değer fark bulunabilmektedir. Bazı jeller yeterince sıvı olup çatlaklar arasından akarak be-

ton boşluklarını tamamen veya kısmen doldurabilmektedir. Genelde, jeller havayla temas sonucu zamanla karbonatlaşarak, beyaz ve kuru bir hal almaktadır [25].

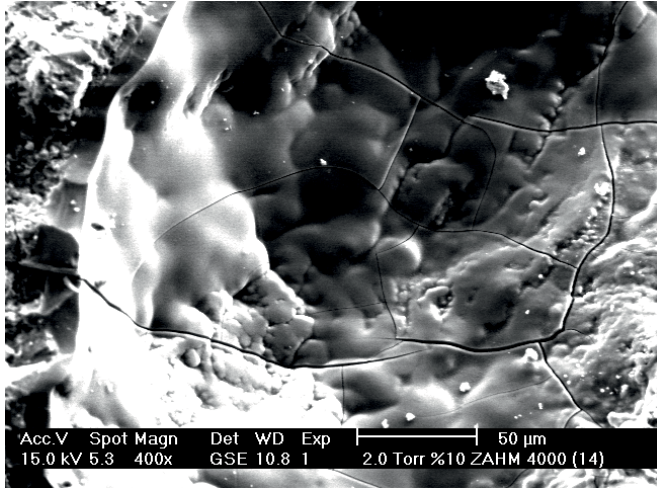
ASR ürünlerinin kompozisyonu ve morfolojisi ile ilgili bilgi birikimi tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) kullanımı ile artış göstermiştir. Bu araştırmaların sonucunda jelin, farklı oranlarda silis, daha az fakat yine farklı oranlarda kalsiyum ve alkali içerdiği anlaşılmıştır (Çizelge 1). Çok düşük alkali içerenler hariç, çoğu zaman klinkerin K_2O/Na_2O oranının 1 ile 3 arasında değiştiği ve bunun jel kompozisyonuna yansıdığı bilinmektedir. Reaksiyonu hızlandırmak amacıyla beton karışımına eklenen Na_2O veya K_2O 'ya, veya buz çözücü tuzlar, deniz suyu ve laboratuvar deney ortamı gibi dış alkalilerin etkisine maruz betonlarda bu oran ile birlikte kalsiyum ve alkalilerin görece miktarının da değiştiği açıklanmıştır [20,33].

ASR ürünleri oluşumunun, agreganın petrografik özeliği, yapısı ve dokusu ile birlikte [34] yavaş veya hızlı reaktif oluşuna ve pesimum oran göstermesine bağlı olduğu bilinmektedir [35]. Fakat bu konuda agregada özelliklerinin tek etken olmadığı da bildirilmektedir. Aynı numunenin farklı, fakat, eşdeğer yerlerinde kalsiyum içeriği bakımından oldukça farklı jeller tespit edilmiştir [20,36,37]. Jelin, kalsiyum içeriğinin çimento hamurundaki çatlaklarda, silis içeriğinin ise bunun tersine hamurdan uzaklaştıkça artan şekilde ve agregada içinde daha fazla olduğu ölçülmüştür. Alkalilerin kalsiyum ile yer değiştirmesi sonucu, kalsiyum içeriği yüksek jel iri agregadan uzakta çatlaklarda bulunmuştur. Genleşmenin, reaksiyonun mertebesi veya oluşan jelin miktarından ziyade, jelin kalsiyum içeriğine bağlı olduğu belirlenmiştir [20,32,38].

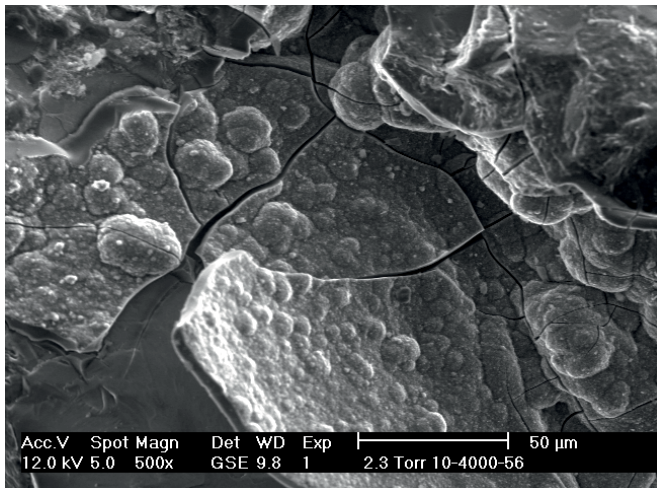
ASR jelinin görsel incelemesine dayalı bir çalışmada [31] çimento hamurundaki çatlaklar ve hava boşluklarında amorf jelle rastlanırken iri agregada taneleri içinde gülsü kristal yapıda ASR ürünleri belirlenmiştir. Moranville-Regourd [39], reaksiyon ürünlerini jeller ve kristaller olmak üzere iki şekilde sınıflandırmıştır. Jelleri masif (yoğun) veya süngersi görünümülü olarak tanımlamıştır. Jelin görünümündeki değişkenlik, SEM'de kuruma esnasındaki büzülmenin tipi veya miktarına bağlı olabileceği gibi, farklı kompozisyonlardaki jellerden de kaynaklanabileceği bildirilmiştir. Kristal yapıdaki ürünlerin tabakalı veya gülsü, dikensi veya çubuksu ve yapraklı olmak üzere tipik morfolojileri olduğu görülmüştür [40]. Farklı morfoloji ve yapıda olan ASR ürünleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonucu oluşan reaksiyon ürünleri ile gerçek yapılarda görülen ASR ürünlerinin morfolojik ve kimyasal açıdan benzer olduğu açıklanmıştır.

Genel olarak, amorf jelin zamanla kristalize olduğu kabul edilmektedir. Jelin kristalize olmasını açıklayan aşağıdaki mekanizmalar öne sürülmüştür. Bazı araştırmacılar jelin, kuruma sonucu kristalize olduğunu belirtmiştir [41]. Thordal Andersen ve

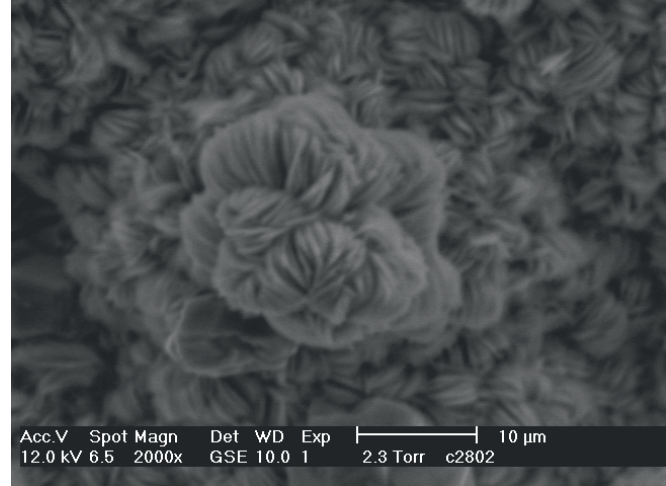
Thaulow [42] ile Thaulow vd [31], kristalize olmuş jellere genellikle agrega içinde rastlandığını, çimento hamurundaki çatlaklarda ise daha az rastlandığını açıklamıştır. Kristalize ürünler ile amorf yapıda olanlar arasındaki kimyasal kompozisyon farkının çimento hamuru boşluk çözeltisi ile agrega boşluklarında yer alan suyun kimyasal farkından kaynaklandığı öne sürülmüştür. Kurtis vd [43,44] alkali silis jelinin kalsiyum ve sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde kristalize olduğunu, betonda oluşan ASR ürünlerinin genelde amorf yapıda olduğunu ve kristalize jelle daha seyrek rastlandığını belirtmiştir. Peterson vd [36], çalışmalarında 1890'larda inşa edilen bir yapının beton örneklerinde fazla miktarda kristalize ASR ürününe rastlamıştır. İncelemeler sonucunda, kristalize ürüne kıyasla, amorf jelde sodyum ve potasyum iyon yoğunluğunun daha az olduğu buna karşın kalsiyum iyon yoğunluğunun daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, amorf jellerin, kristal ürünlere kıyasla, daha değişken kompozisyona sahip olduğu vurgulanmıştır. İncelenen betonun yaşı ve içerdiği kristal ürünün fazlalığı, kristalleşmenin zamanla meydana gelen bir oluşum olduğunu düşündürmektedir.



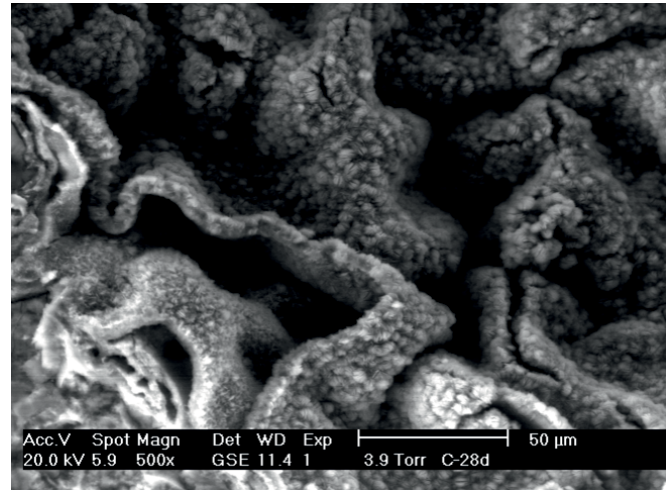
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2. a) 400x büyütülmüş masif ASR ürünü; b) 500x büyütülmüş yarı kristalin çatlaklı ASR ürünü c) 2000x büyütülmüş gülsü ASR ürünü d) 500x büyütülmüş tabakalar halinde oluşan gülsü ASR ürünü [40].

Çoğunlukla, tamamen kurutulmuş örnekler üzerinde elektron sonda mikro-analizleyici (EDS) kullanılarak yapılan incelemeler, jel kompozisyonunun çok geniş bir aralıkta değiştiğini göstermiştir. Bu fark, bazı jel örneklerinin incelenmeden önce karbonatlaşmaya maruz kalmasından kaynaklandığına bağlanmıştır. Buna ilaveten modern bilgisayarlarla düzeltilen mikro-analizlerde belirlenen elementlerin %100'e normalize edilmesinin ve bu mikro-analizlerde çoğu zaman atom numarası 11'in altında olan elementlerin belirlenememesinin bahis konusu farkın diğer nedeni olabileceği vurgulanmıştır [25]. Çizelge 1'de farklı kaynaklardan elde edilen jel analiz sonuçları görülmektedir [40].

ASR ürünlerinin kimyasal kompozisyonu değişken olmasına rağmen basitçe üç kategoride toplanabilir:

1. kısmen reaksiyona uğramış ve şişmiş silis,
2. nispeten saf alkali-silikat çözeltileri veya çeşitli alkali ve su içeriklerinde jeller,
3. neredeyse sabit kompozisyonda (su içerikleri hariç) iki bileşenli basit karışımlar.

Kirkpatrick'in [45] araştırmaları bu olasılığı doğrulamaktadır. Yazar, alkali silis jelinin alkali-silikat-hidrat ve kalsiyum-silikat-hidrat fazlarının bir karışımı olduğunu söylemiştir. Ayrıca, Gutteridge ve Hobbs [46], Beltane opal taneciklerinin etrafındaki reaksiyon bölgesinin sodyum silikat ile sodyum-kalsiyum silikattan oluştuğunu vurgulamıştır.

Çizelge 1. Alkali silis jeli kimyasal analiz sonuçları (kütlece %) [40]

Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	CaO	MgO	%100'e göre fark	Referans
12.9	---	53.9	2.9	0.6	29.8	Stanton (1942)
12.9	---	53.4	2.6	0.8	30.2	
14.9	5.2	61.7	0.6	---	17.6	Idorn (1961)
13.4	5.1	65.5	0.5	0.2	15.3	
12.4	4.9	69.9	0.3	0.5	12.0	
17.9	8.2	73.7	1.1	0.1	0.0	
9.4	4.1	72.8	1.3	0.2	15.3	
14.6	6.2	61.9	---	0.1	12.0	
16.2	5.7	56.8	---	---	21.3	
8.2	4.1	56.1	17.4	0.2	14.0	
8.3	5.0	28.5	22.4	0.2	35.6	
1.2	0.4	51.4	29.9	10.0	17.1	Poole (1975)
7.4	0.7	53.0	22.1	10.0	16.7	
1.5	13.9	38.9	27.3	---	17.4	Gutteridge ve Hobbs (1980)
0.4	4.7	51.1	21.5	---	22.3	Regourd (1983)
---	0.6	27.9	35.2	---	36.2	
1.0	6.9	61.5	9.2	---	21.3	Oberholster (1983)
1.0	6.2	53.8	8.2	---	30.7	
1.8	5.5	49.9	12.8	---	29.9	
1.0	5.2	50.4	12.0	---	30.7	
1.4	9.0	62.9	12.5	---	13.8	
0.8	7.4	53.2	10.0	---	28.4	
1.2	4.1	66.5	6.5	---	21.7	
3.7	12.9	43.3	21.8	0.8	14.0	Mullick ve Samuel (1986)
3.9	11.7	49.4	15.9	0.5	16.7	
2.65	9.37	40.0	18.6	0.2	29.18	Baillemont vd. (2000)
12.94	1.01	60.4	20.3	---	5.35	Andiç-Çakır (2007)
9.45	1.08	45.61	34.41	---	9.45	Andiç-Çakır (2007)

Tabloda koyu ile belirtilen değerler, en az ve en çok değerlerdir.

6. ASR ÜRÜNLERİNİN GENLEŞME MEKANİZMASI

Genleşme sonucu oluşan gerilme betonun çekme dayanımını aştığında çatlak meydana gelir. Başka bir ifade ile betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının %7'si ile %11'i arasında olduğundan, %0.04-0.05 gibi genleşme birim deformasyonu betonu çatlatmaya yeterlidir [47]. Alkali-silis jelinin hasara yol açan özeliği su emerek genleşme olduğundan, genleşmeye yol açan mekanizmalar incelenmelidir. Bu konuda farklı teoriler mevcuttur.

Absorblanma teorisine göre ASR genleşmesi, jelin yoğunluğuna, gelişme hızına ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Jelin gelişme hızı yavaş olduğunda, beton içinde yayılması sonucu içsel gerilmelerin oluşması önlenir. Jelin hızlı gelişmesi durumunda ise, içsel gerilmeler betonu genişletirip çatlatacak kadar yüksek olur [15].

Ozmotik basınç teorisine göre çimento hamuru, silikat iyonlarına karşı geçirimsiz bir membran gibi davranır [48]. Bu membran, su, hidroksil iyonları ve alkali iyonlarının difüzyonuna izin verirken, silikat iyonlarının difüzyonuna engel olur. Bu durumda, reaksiyon oluşan her bölge, bu membran tarafından sarılmış çimento hamurunda artan bir basınç oluşturur. Hansen'e göre [48], beton boşluk çözeltilisinin bu membrandan geçmesi reaksiyonu hızlandırır. Vivian [49], reaksiyondan sonra da çatılmanın devam etmesi ve çimento hamurunun geçirimsiz bir membran gibi davranmasının olanaksız olduğunu belirterek bu teoriyi eleştirmiştir [15].

Prezzi vd. [50], genleşmeyi kolloid kimyasındaki Guoy-Chapman **elektriksel çift tabaka** teorisine modellemiştir. Sıvı içindeki katı yüzeylerde, izomorf iyon yer değişimi, kimyasal reaksiyonlar veya iyon adsorpsiyonu sonucu elektriksel yük birikimleri oluşur. Katıyla temasta olan ilk iyon tabakası sabittir ve katı yüzeydeki negatif yüklerin tutabildiği pozitif iyonlardan oluşur. İkinci tabaka ise arta kalan pozitif yüklerle boşluk çözeltilisindeki negatif yüklerden meydana gelir. İkinci tabaka daha geniştir ve katıdan uzaklaştıkça elektriksel potansiyel azalır. Her iki tabakadaki yüklerin cebri toplamı sıfırdır. İkinci tabakanın yük durumuna bağlı olarak genişliği arttıkça katı çevresinde bir genişleme meydana gelir. Tabakanın genişlemesi, buraya geçen alkali katyonların artmasıyla belirginleşir. Katyonların yer alabilme yeteneği, valansları, yoğunlukları ve iyon çaplarının fonksiyonudur. Örneğin; potasyum katyonları önce silisle bağlanmamış olan oksijenler bölgesinde, doyunluğa varınca da silisle bağlanmış oksijen bölgesinde, yani siloksan bölgesinde tutulur. Ancak, lityum iyonu daha başlangıçta her iki bölge tarafından tutulmaktadır. Bu nitelik lityum katyonlarına önemli bir ayrıcalık sağlamaktadır.

Çift tabakadaki karşıt iyonların değerlikleri ne kadar büyükse veya bu iyonların yoğunluğu ne kadar fazlaysa çift tabaka kalınlığı ve suyun varlığında oluşan itki kuvvetleri o kadar küçük olmaktadır. Dolayısıyla, doğal puzolan, uçucu kül ve cüruf içeren harç çubuklarında yüksek miktarda Na_2O_{esd} ve düşük miktarda CaO/Na_2O_{esd} oranına sahip ASR ürünleri daha yüksek genleşmeler meydana getirmektedir.

Daha önce belirtildiği gibi, Diamond'a göre [51], betondaki ASR ürününün kompozisyonu zamanla çimento hamurundan kalsiyum iyonu toplamasıyla değişime uğramaktadır. ASR ürününün kalsiyum içeriği, ürünün betondaki yeri ve yaşına bağlı olarak değişmektedir. Powers ve Steinour'a [52] göre, beton boşluk çözeltilisindeki kalsiyum iyonu/alkali iyonu yoğunluk oranı jel genleşmesini kontrol etmektedir. Bu oran yüksekse "şişmeyen" (veya şişmesi sınırlı) tipte karmaşık bir kalsiyum-alkali-silis-hidrat ürünü oluşması beklenir. Ters durumda "şişen" tipte alkali-silikat-hidrattan oluşan ve az miktarda kalsiyum içeren jel ortaya çıkar. Wang ve Gillot [53], kalsiyum-alkali-silis jelinin şişmeyen özeliğe olduğunda hem fikir olmakla birlikte, ortamda aşırı miktarda kalsiyum hidroksit bulunmasının reaksiyonu ilerleteceğini belirtmektedir. Araştırmacılar, kalsiyum iyonlarının ASR ürünlerindeki alkalinin yerine geçerek bunların ortama salıverilmesine neden olduğunu, açığa çıkan alkalilerin ise ortamdaki reaktif silisle reaksiyona girerek genleşmeleri arttırdığını belirtmiştir.

Chatterji vd'ne göre [54,55,56] kalsiyum hidroksit; sodyum, kalsiyum ve hidroksil iyonlarıyla su moleküllerinin reaktif taneciğinin içine girişini hızlandırmaktadır. Yüksek kalsiyum iyonu yoğunluğu, silikat iyonlarının reaktif tanelerden dışarı sızmasını da azaltmaktadır. Sonuçta, reaktif tanelerin içine, dışarıya sızan silikat iyonlarından daha fazla sodyum, kalsiyum ve hidroksil gibi iyonların girmesiyle genleşme oluştuğunu, kalsiyum hidroksit ve sodyum klorürün bulunduğu karışık bir elektrolit ortamında, sodyum iyonları gibi daha küçük iyonlar daha büyük olan kalsiyum iyonlarına kıyasla içeriye giren hidroksil iyonlarını daha rahat izlediği belirtilmiştir. Helmuth ve Stark [57], ASR ürünlerinin alkali silikat hidrat jeli ile farklı miktarda su ve alkali içeren zayıf kristalin kalsiyum silikat hidratların karışımı olduğu sonucuna varmıştır.

7. ASR'Yİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Aşağıda ASR'yi etkileyen agrega özellikleri, betonun alkali içeriği, nem durumu ve ortam sıcaklığı ve dış alkaliler gibi diğer bazı faktörler ele alınmıştır.

7.1. Agrega Özellikleri

Silisli agreganın alkali reaktivitesi mineral yapısına bağlıdır.

Kayacın oluşumu esnasında soğuma hızına bağlı olarak, silis, farklı doku ve kristal yapıda bulunabilir. Agregalardaki silisli mineraller, soğuma hızına bağlı olarak, amorf fazdan kristalin faza kadar değişik yapıda bulunabilir. Silisin kuvvetli asit veya alkali ortamında çözünür olduğu, fakat, nötr pH seviyelerinde çözünürlüğünün azaldığı bilinmektedir. Silisli agreganın reaktivitesi kuvarsın serbest enerjisine bağlıdır. Kafes yapısındaki kusurlar ve kristalleşme mertebesine bağlı olan bu enerji kuvarsın çözünürlüğünü belirlemektedir [20,26]. Amorf ve ince yapıda olan silisin, yüksek pH'a sahip çözücü ortamında, kristal yapıdaki kuvarstan daha kolay çözüldüğü bilinmektedir. Alkali reaktivite, silisin kalitesi ve jeolojik özelliklerine bağlı olarak diğer bir takım faktörlere de bağlıdır. Örneğin, kuvars kristalleri, oluşumu sırasında zorlanmışsa reaktif olabilir. Yapısında değişken miktarda su bulunduran ve amorf formda silis içeren opal oldukça reaktiftir. Hızlı soğuma sonucu oluşan kristobalit ve tridimit, normal sıcaklıklarda stabil olmadığından reaktiftir [23,58]. Ayrıca, bazı volkanik camlar, çört, camsıdan kriptokristalin faza kadar asit volkanik kayalar, bazı argilitler, filitler, metamorfik grovaklar ile grovak, filit, şist, gnays, gnays granit, damar kuvarsi, kuvarsit ve kumtaşı içeren yüksek metamorfik kayalar reaktif silis içerebilmektedir. Silisin ince dokulu olması, alkaliler ile temas yüzey alanını yükselttiğinden, reaktiviteyi artırabilmektedir.

Doğal olarak bulunan bu agregalara ilaveten, silis tuğlası, sentetik camlar ve bazı yüzey kaplamaları gibi bir takım silisli sentetik malzemenin de reaktif olabileceği bilinmektedir [14].

Reaktif agreganın tane büyüklüğünün ASR genişmesinde etkisi Stanton'dan beri araştırılmaktadır. Bu konuda iki önemli etki göz önüne alınmalıdır: 1) ince tanelerden oluşan reaktif agreganın reaksiyon hızı daha yüksektir, 2) uzun süreli genişmeler dikkate alındığında kaba agreganın genişmesi daha fazla olabilir.

Bu konuda harç numunelerde yapılan çok sayıda araştırma, tane boyutunun belli bir sınıra (~0.02-0.07 mm'ye) kadar düşürülmesinin genişleme hızı ve miktarını arttırdığını, bu limitin altındaki tanelerin ise daha az genişmeye neden olduğunu göstermiştir [35,49,59,60,61,62,63]. Mehta ve Monteiro [64], 1 ile 5 mm arasındaki reaktif agregada kullanıldığında genişlemelerin maksimum mertebede olduğunu vurgulamıştır. Helmuth ve Stark [57], iri tanelerin ince olana kıyasla reaksiyondan aynı miktarda etkilenmediği için daha az genişmeye yol açtığını belirtmiştir. Nishibayashi ve Yamura [65], sadece reaktif ince agregada kullanıldığında beton genişmesinin ilk aşamalarda oluştuğunu ve ileriki zamanda sabit kaldığını,

ancak, sadece reaktif iri agregada kullanıldığı takdirde genişmenin yavaş ve daha uzun sürede meydana geldiğini rapor etmiştir. Zhang vd [66], 0.15-10 mm arası silisli agregada tane boyutu küçüldükçe ASR genişmelerinin arttığını, agregada boyutu arttıkça maksimum genişmeyi veren çimento/agrega oranının azaldığını ve genişmenin yavaş ilerlediğini öne sürmüştür.

Ramyar vd [67] bir tip doğal yuvarlak reaktif agregada ile aynı agreganın kaba tanelerinin kırılması ile elde edilen kırma agregayı kullanarak, tane boyutu ve köşeliliğinin ASR genişmesine etkisini incelemiştir. Agregada gradasyonu, ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuğu deneyinde olduğu gibi seçilmiştir. Sonuçta, %25 reaktif agregada içeren orta büyüklükte kırma ve doğal agregada genişme sonuçlarının birbirinden oldukça farklı olduğu, reaktif tane boyut etkisinin kırma agregada daha belirgin olduğu, daha küçük ve büyük agregada tanelerinde köşelilik etkili olmazken orta boy tanelerde köşeliliğin genişmeye etkili olduğu açıklanmıştır. Ayrıca, reaktif tane boyutları ayrı ayrı deneye tabi tutulan örneklerin toplam genişmesi, tümü reaktif agregadan oluşan kontrol örneğine kıyasla daha fazla olduğu, Shayan'a [28] göre bunun çok fazla reaksiyon bölgesinin birbirlerini etkileyen bir bariyer meydana getirmesinden kaynaklanabileceği belirtilmiştir.

Agregaların reaktivitesi ile ilgili çelişkili sonuçların, agregaların reaktiviteleri arasındaki farktan meydana gelebileceği gibi farklı çimento/agrega oranları veya farklı alkali içeriği gibi karışım parametrelerinden ve farklı deney koşullarından da kaynaklanabileceği unutulmamalıdır [40].

Genel olarak, reaksiyon için geniş bir yüzey alanına sahip, kötü kristalize, fazlaca kafes kusuruna sahip, amorf, camsı, mikro-gözenekli agregaların reaksiyona daha yatkın olduğu söylenebilir [58]. Bu bağlamda, agregada tanelerinin inceliği, agreganın yapısında bulunan mikro-çatlak veya mikro-gözenekler reaksiyona elverişli yüzey alanını arttırdığından önem taşımaktadır [40,68]. Ortamdaki alkali varlığı ve miktarının da agreganın reaktivitesi ve reaksiyonun oluşmasını etkileyen önemli faktörler olduğu kanıtlanmıştır. Daha fazla alkali bulunması, boşluk çözeltilisindeki hidroksil iyonu yoğunluğunu arttıracığından daha fazla silisin çözülmesine zemin hazırlayabilir. Buna göre, alkalisi yüksek bir ortamda belli bir agregada daha fazla genişmeye yol açabilir [20]. Fournier vd. [69] reaktif olmayan kumlardaki bazı bileşenlerin yüksek alkaline ortamda reaktif hale geldiğini göstermiştir.

Agregada ile ilgili önemli başka bir konu da agregada tarafından betonda salıverilen alkalilerdir. Bu konuya aşağıda değinilmiştir.

7.2. Betonun Alkali İçeriği

Klinkerde alkaliler, klinker tanelerinin yüzeyinde serbest halde veya klinker minerallerine bağlı olarak bulunabilir. Klinkerdeki tüm mineraller alkali tutabilme özeliğine sahiptir. Ancak, sodyumun çoğu C_3A 'da, potasyum ise genelde belit ile camı fazda bulunmaktadır. Alkali içeren klinker hidrate olduğunda, yüzeyindeki ve yapısındaki alkaliler farklı hızda boşluk çözeltisine salıverilir. Suda çözünebilir sülfatlar halinde bulunan alkaliler kısa sürede çözeltiye geçerken minerallere bağlı olan alkaliler buldukları bileşenlerin hidratasyon hızına bağlı olarak zamanla salıverilir [23].

ASR hasarı gören betonların çoğunun yüksek alkali içerikli çimento ile üretildiği bilinmektedir. Normal portland çimentosunda diğer oksitlere kıyasla az miktarda sodyum ve potasyum oksit bulunmaktadır. Çimentonun alkali içeriği, hammaddenin doğal özelliklerine bağlı olduğundan bazı yörelerde düşük alkali içerikli çimento üretmek mümkün değildir. Ayrıca, çevre koruma ile ilgili yönetmelikler ve enerji tasarrufu amacıyla uygulanan kuru üretim ve ön ısıtma tekniği düşük alkali içerikli çimento üretimini kısıtlamaktadır.

ASR potansiyelinin olabileceği durumlarda bazı Avrupa ülkeleri ile Kanada betonun toplam alkali içeriğini 3 kg/m^3 ile sınırlandırmaktadır. İngiltere'de toplam alkali içeriğine mineral ve kimyasal katkıları, bazı agregalar ve karışım suyundan gelen alkaliler de dahil edilmektedir. Kanada'da Na_2O_{esd} uçucu külden %4.5, cürufu ise %1 değerini aşmadığı sürece bu malzemelerin alkali içerikleri hesaba katılmamaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde betonun toplam alkali içeriğini sınırlandırmak yerine Na_2O_{esd} içeriği %0.6 değerinin altında olan çimentonun kullanılması önerilmektedir. Ancak, düşük alkali içerikli çimento ile yapılan betonlarda; alkali göçü, yüksek reaktiviteli agreganın kullanımı, mineral ve kimyasal katılardan, karma suyundan veya agregadan gelen alkaliler gibi sebeplerden dolayı ASR oluşma riski olduğu bildirilmiştir [58,70]. Betona çimento dışındaki diğer kaynaklardan gelen alkali miktarı 0.2 kg/m^3 'ün üzerinde ise toplam reaktif alkalinin hesabında dikkate alınması gerekmektedir [40]. Ayrıca, farklı agregalar için 'güvenli alkali içeriği' belirlenmesi gerekir.

Betonu oluşturan malzemeden gelen alkalilere ilaveten sertleşmiş betonun, deniz suyu, bazı yeraltı suları ve buz çözücü tuzlarla teması sonucunda bünyesine aldığı alkalilerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu gibi kaynaklardan emilen alkali miktarı, betonun geçirimsizliğine, alkali içeren su ile temas ettiği süreye ve alkali kaynağının tipine bağlıdır [23].

Çimento alkalilerinin yanı sıra bazı volkanik camlar, yıkanmamış

deniz kumu, altere feldspat, mika, kil ve zeolit gibi mineraller içeren agregaların da betonun boşluk çözeltisi alkali seviyesine katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Grattan-Bellew [71], kireçtaşı agregasındaki kil mineralleri, Berube vd. [72] ve Constantin ile Daimond [73] feldspatça zengin agregaların, Goguel [74] ise su/çimento oranı ile ince agreganın içeriği yüksek olan karışımlarda bazı bazaltların boşluk çözeltisi alkali seviyesini arttırdığını vurgulamıştır. Lu vd. [75], sıcaklığın bu bağlamda etkili olduğu sonucuna varmıştır. Agregadan salıverilen alkaninin, alkali minerali türü, boşluk çözeltisi/agrega oranı, agreganın kaynaklı olmayan boşluk çözeltisindeki diğer alkalilerin türü ve pH değerine bağlı olduğu bildirilmiştir [20]. Berube vd [76] 17 farklı agregadan salıverilen alkali miktarını belirlemiştir. Agreganın türüne bağlı olarak bu değerlerin bir m^3 betonda 0.1 ile 1.6 kg eşdeğer Na_2O arasında değiştiği, ağırlıklı olarak ise 0.45 ile 0.70 kg eşdeğer Na_2O arasında olduğu açıklanmıştır.

Beton içinde nemin hareketi ve ıslanma-kuruma döngüleri çözünen alkalilerin beton yüzeyinde birikmesine neden olur [58]. Daimond [77], ıslanma-kuruma tekrarında alkalilerin bir kısmının kalıcı olarak sabitlendiğini ve tekrar ıslanma ile çözünemez hale geldiğini belirtmiştir.

Mineral katılardan, F sınıfı uçucu küllerde bulunan alkalilerin çoğu potansiyel olarak ortama salıverilmek için hazırdır. Alkali içeriğinin büyük bir bölümünü camı fazda çözünür halde bulduran cürufuflar da ortama kolaylıkla alkali salabilir. Buna ilaveten mineral katıların ile ilgili aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır: a) Mineral katkıda, özellikle uçucu küllerde, alkaliler homojen dağılmayıp çoğu zaman tanelerin yüzeyinde yer almaktadır. b) Katkının çimento ile yavaş reaksiyona girdiği unutulmamalıdır, örneğin cürufu çimento içeren betonlarda yıllar sonra hidrate olmamış cürufu bulunabilir. Ancak, ASR yavaş ilerleyen bir reaksiyon olduğundan, kaynağından bağımsız olarak ortama salıverilen alkalilerin zamanla reaksiyona katılma potansiyeli bulunmaktadır [23].

7.3. Nem Durumu

Betonda bulunan nem, alkali iyonlarının reaksiyon bölgelerine göçünü kolaylaştırma ve oluşan ASR jelinin genişlemesine sağlama bakımından önemlidir. Buna göre, nemin ve alkali içeren çözeltilerin beton içerisine ilerleyişini önlemek için, en basit yol olarak su/çimento oranını düşürmek ve yeterli sürede uygun bir kür rejimi uygulayarak, beton geçirimsizliğinin azaltılması düşünülebilir. Ancak, geçirimsizliğin bu şekilde azaltılması ASR açısından avantajlı olmayabilir. Düşük su içeriği, boşluk çözeltisi pH'nın yüksek olmasına neden olur. Ayrıca, boşluk oranı düşük olan bir betonda oluşan ASR genişlemesi daha fazla gerilme yaratır. Yukarıda söz edilen negatif etkilerle karşılaşmamak için, en iyi yaklaşım mineral

katkı kullanarak geçirimsizliğin azaltılmasıdır [14]. ASR'den etkilenen yapıların su içeriği genelde, boşluk çözeltisinin termodinamik durumunu yansıtan, bağıl nem (BN) ile ifade edilmektedir. Bu değer yapılar da ölçülmesinin zor ve sonuçların çok güvenilir olmadığı bilinmektedir. Buna rağmen, çok sayıda başka faktörle beraber, betonda ASR oluşması için kritik BN'nin %80-90 arasında olduğu açıklanmıştır [78]. Nemli ortamla temasta bulunan beton elemanın kaplanması ASR gelişmesini azaltabilir [79]. Yüzey kaplamaları, reaksiyon hasarı başladıktan sonra ilerleyişini durdurmak için tamir amaçlı olarak da uygulanmaktadır.

7.4. Ortam Sıcaklığı

Çoğu kimyasal reaksiyonda olduğu gibi alkali silis reaksiyonu da artan sıcaklıkla hızlanır. Ayrıca, flint gibi normal sıcaklıkta az reaktif olan bazı agregaların yüksek sıcaklıklarda jel oluşumuna neden olduğu bilinmektedir. Sıcaklık aynı zamanda reaksiyonun ikinci aşaması olan jelin su emmesi, oluşan gelişmenin mikro-çatlaklara yol açması ve devamında betonda hasar meydana getirmesini de etkilemektedir. Diamond [80], yüksek sıcaklıklarda reaksiyon ve gelişmenin daha erken başlayarak daha hızlı devam ettiğini, zaman geçtikçe hem reaksiyonun hem de gelişme hızının azaldığını, tersi olarak, düşük sıcaklıklarda reaksiyonun yavaş ilerlediğini ve gelişmenin zamanla yüksek sıcaklıklarda görülen seviyeye yaklaştığını veya onu geçtiğini gözlemlemiştir.

Bu gözlemler için farklı açıklamalar getirilmiştir. Düşük sıcaklıkta daha yavaş gelişme, reaksiyonun daha yavaş oluşuna ve alkalilerin reaksiyon alanına daha yavaş göçüne başlamıştır. Ayrıca, maksimum gelişme basıncının jelin belli bir su içeriğine sahip olduğunda oluştuğu bilinmektedir. Bu seviyeden sonra jelin giderek sıvılaştığı, çatlaklara sızdığı ve oluşturduğu basıncın azaldığı açıklanmıştır. Düşük sıcaklıklarda, jelin maksimum gelişme basıncına ulaşacağı süre uzadığından daha fazla gelişme oluşabilmektedir. Alternatif bir hipotez ise farklı sıcaklıklarda farklı yapıya veya kompozisyona sahip jel oluştuğudur. Düşük sıcaklıklarda daha fazla gelişme basıncı oluşturan tipte jelin oluştuğu düşünülmektedir [23].

7.5. Diğer Faktörler

Betonun geçirimsizliği, dış alkaliler, buz çözücü tuzlar ve buhar kürü uygulaması gibi faktörler de ASR'yi etkilemektedir.

Düşük su/çimento oranı, mineral katkı kullanımı vb. önlemlerle geçirimsizliği azaltılan betonlarda nem ve alkalilerin hareketinin zorlaştığı, dolayısıyla, ASR gelişmelerinin azaldığı vurgulanmıştır [58,81].

Buz çözücü tuzlar, deniz suyu, yeraltı suyu ve endüstri atığı sularda bulunan alkaliler, özellikle çatlamış veya geçirimli betonlar da ASR gelişmelerini arttırabilir. Bu alkalilerden korunmak için betonun geçirimsizliğini azaltmak ve/veya koruyucu kaplamalarla alkali girişine engel olmak gerekmektedir [58].

Sibbick ve Page [71], tuzlu su ile temasta olan betonda oluşabilecek ASR hasarının beklenenden fazla olduğunu, böyle bir durumda betonun toplam alkali içeriğinin $3 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}_{\text{esd}}$ limitinde olmasının koruyucu olmadığını öne sürmüştür. Shayan ve Ivanusec [82], reaktif agregaya içeren, fazladan alkali ve alçı katılan buhar kürü uygulanan harçlarda, alçı katılmamış olanlara kıyasla daha fazla gelişme gözlemlemiştir. Araştırmacılar, bu etkinin gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) sonucunda meydana geldiğini belirtmiştir. Aynı deney, reaktif olmayan agregaya kullanılarak yapıldığında, tek başına DEF oluşumunun aynı hasarı yaratmadığını göstermiştir. Buhar kürü uygulandığında oluşan ASR gelişmesi DEF gelişmesine eklenerek daha büyük hasara yol açtığı vurgulanmıştır.

8. ASR HASARININ TEŞHİSİ

Beton yapılar da ASR gelişmesi sonucunda oluşan çatlakların yapısal ve kullanım açısından sorunlar yarattığı bilinmektedir. Geleneksel teşhis yöntemleri, yüzeyde görülen çatlakların belirlenmesi ve hasarlı betondan alınan karot dayanımının belirlenmesine dayalıdır. Ancak, betonda ASR sonucu oluşan hasarın beton basınç dayanımından ziyade elastisite modülünü ve çekme dayanımını etkilediği bilinmektedir [83]. ASR hasarı betonun petrografik analiziyle de tespit edilebilir. Bu amaçla, beton kesitlerinin mikroskop altında incelenmesiyle reaktif agregaya ve ASR ürünleri belirlenebilir. Ancak bu yöntemle hasarın ne mertebede olduğu belirlenemez. Şekil 3'te görüldüğü gibi ASR jeli agregaya içerisinde veya çevresinde bulunabilir. ASR hasarlarının tespitinde, betonda oluşan gelişmeler, çatlaklar, yüzeysel tortular, parça atmalar ve renk değişimleri de dikkate alınabilir.

ASR sonucu oluşan ve teşhis amacıyla de değerlendirilen, gelişme ve çatlama, yüzeysel tortular, parça atma ve yer değiştirme gibi etkilere aşağıda değinilmiştir.

8.1. Gelişme ve Çatlama

ASR gelişmesi, reaktif agreganın içinde veya yüzeyinde jel oluşumu ve jelin su emmesi ile başlar. Su emen jel, her yönde yaklaşık 10 MPa basınç gerilmesi oluşturur. Basınç sonucu agregayı saran çimento hamurunda oluşan hacim artışını karşılayan minimum çatlak sayısı üçtür ve genelde bu çatlaklar birbiri ile 120° açı yapar. Bu çatlaklar üç-dört kollu yıldız şeklinde agregaya etrafından başlayarak yayılır.

Çatlakların birleşmesi sonucunda zorlanmamış ve donatısız betonda klasik harita çatlakları oluşur [84]. Zorlanma bulunan yapılarda ise çatlaklar gerilme doğrultusunda yönelir [25]. Donatılar ana gerilmeye paralel olduğundan ASR çatlakları da bu yönde oluşur. Ancak, korozyon çatlaklarından farklı olarak bunlar donatı üzerinde değil, donatılar arasında meydana gelir. Şekil 4'te bir köprü kolonunda yük ve ASR etkisiyle oluşan doğrusal çatlaklar görülmektedir. Bu kolon daha sonra köprüden ayrılarak parçalara ayrılmış ve reaksiyonun devam etmesi sağlanmıştır. Yük kaldırıldıktan sonra kolon yüzeyinde tipik harita çatlakları oluşmuştur. Donatının her iki yönde eşit olarak dağıldığı döşeme gibi elemanlarda ise genellikle dikdörtgen biçimli harita çatlakları görülmüştür (Şekil 5) [23,84].



Şekil 3. Agregadan çimento hamuruna sızan ASR ürünü, ince kesit analizi (alan 0.5x0.7mm²) [40]



Şekil 4. Bir karayolu köprüsü kolonunda oluşan ASR çatlakları [23,40]



Şekil 5. İzmir Adnan Menderes Havalimanı pist ve taksi yolu betonunda oluşan ASR çatlakları [40]

ASR oluşmuş beton elemanlarının yüzeyinde 0.1 mm ile 10 mm arasında genişlikte ve 25-50 mm derinlikte makro-çatlaklar oluştuğu bildirilmiştir [15]. ASR hasarının ileri aşamalarında, derzlerin kapanması, kapak atmaları ve beton elemanın bazı bölümlerinin bölgesel olarak yer değiştirmesi de gözlemlenmiştir.

8.2. Yüzeysel Tortular, Parça Atma ve Yer Değiştirmeler

ASR jeli düşük viskozitede ise beton yüzeyindeki boşluklarda birikir ve nem durumuna bağlı olarak sulu bir bölge oluşturup yavaşça karbonatlaşarak beyaz bir görünüm kazanır. Nem lekeleri ve salyangoz şeklinde gözlenen izleri ASR teşhisinde kullanılabilir belirtileridir [85]. Diğer durumlarda ise, çatlaklarda ASR jeli veya kalsiyum karbonat görülebilir. Bunlar ardında beyazdan koyu griye kadar farklı renklerde tortular bırakır. Bu tortular ASR teşhisi için kullanılabilir [58].

Parça atma, beton yüzeyine yakın agrega parçasının veya jelin genişmesi sonucunda yüzeyden koni biçimindeki parçanın sökülerek atılması olayıdır [25,86]. Parça atmanın genellikle aşırı reaktif agrega içeren betonda veya buhar kuru uygulanan elemanlarda görüldüğü belirtilmiştir [84].

ASR bazen yapının her yerinde aynı şiddette oluşmaz. Bunun sonucu, yapıdaki bazı elemanlar diğerine göre yer değiştirebilir. Örneğin, bir baraj parapetinde beton elemanlardan birinin diğerlerine göre 50 mm kadar yer değiştirdiği Şekil 6'da görülmektedir [25].



Şekil 6. Parapet elemanı, Val de Mare Barajı, Jersey [25,40]

9. SONUÇ

Bu bildiride betonda oluşan alkali-silis reaksiyonunun kısa tarihçesi, reaksiyonun oluşma ve genişleme mekanizması, ortaya çıkan ürünlerin kompozisyonları ve bunların genişlemeye olan etkisi ele alınmıştır. Ayrıca agrega özellikleri, betonun alkali içeriği, nem durumu, ortam sıcaklığı ve su/çimento oranı gibi faktörlerin alkali-silis reaksiyonuna etkisi tartışılmıştır.

Kaynaklar

1. Kocaçıtak, S., "A Note of Information Regarding to Alkali-Aggregate Reaction in Turkey", **Symposium on Alkali-Aggregate Reaction**, Reyjavik, Iceland, pp. 259-262, 1975.
2. Andiç-Çakır, Ö., Çopuroğlu, O., Katayama, T., "A Review of Alkali-Silica Reactivity in Turkey: A Case Study from Izmir, West Anatolia", **Proc. 14th International Conference on Alkali Aggregate Reaction**, TX, Austin, 10 p, 2012.
3. Katayama, T., "Alkali Aggregate Reaction in the Vicinity of Izmir, Western Turkey", In: Berube, M.A., Fournier, B., Durand, B., (editors): **Alkali Aggregate Reaction in Concrete**, **Proc. 11th International Conference**, Quebec, Canada, pp. 365-374, 2000.
4. Çopuroğlu, O., Andiç-Çakır, Ö., Broekmans, M.A.T.M., Kühnel, R. "Mineralogy, Geochemistry and Expansion Testing of an Alkali-Reactive Basalt from Western Anatolia, Turkey", In: I. Fernandes et al (editors), **Proceedings of 11th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials**, Porto, Portugal, 2007.
5. Korkanç, M., Tuğrul, A., "Evaluation of Selected Basalts from Niğde, Turkey, as Source of Concrete Aggregate", **Engineering Geology**, (75), pp. 291-307, 2004.
6. Ramyar, K., Kişisel Tecrübe.
7. Erik, D., Mutlutürk, M., "Alkali-Silica Reactivity Features of Gravel-Sand Aggregates in Koç River (Hafik-Sivas)", **ROCKMEC 2004 - VIIth Regional Rock Mechanics Symposium**, Sivas, Turkey, 2004.
8. Aşık, İ., Şen, H., Ergintav, Y., Ünsal, A., Şentürk, E., Bayrak, E. "Alkali Agregata Reaksiyonu Yönünden Zararlı Olan Bir Ocağın İyileştirilmesi", **Beton 2004**, İstanbul, 2004.

9. Saçılık, A., Kocabeyler, M.F., Orkun, Y., Halıcı, M., Tunç, E., "Deriner Barajı ve HES İnşaatı Kütle Betonunda Kullanılması Planlanan Agregalarda Alkali-Silika Reaksiyonu Riski ve Önlenmesine Yönelik Yürütülen Çalışmalar", **5. Ulusal Beton Kongresi**, 205-224, 2003.

10. Bektaş, F., Topal, T., Göncüoğlu, M.C., Turanlı, L., "Evaluation of the Alkali Reactivity of Cherts from Turkey", **Construction and Building Materials**, (22), pp. 1183-1190, 2008.

11. Yıldırım, K., Sümer, M., Uysal, M., "Uçucu Külün Alkali-Silis Reaksiyonuna Etkisinin Araştırılması", **8. Ulusal Beton Kongresi**, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İzmir, 99-107, 2011.

12. Thomas, M.D.A., Bleszynski, R.F., "The Use of Silica Fume to Control Expansion due to Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete- a Review" In: J. Skaney, S. Mindess (editors), **Materials Science of Concrete VI American Ceramic Society**, pp. 377-433, 2000.

13. Duchesne, J., Berube, M.A., "Long-Term Effectiveness of Supplementary Cementing Materials against Alkali-Silica Reaction", **Cement and Concrete Research**, 31, pp. 1057-1063, 2001.

14. ACI, "State of the Art Report on Alkali Aggregate Reactivity", ACI Committee 221, ACI 221.1R-98, 31 p, 1998.

15. Hobbs, D.W., **Alkali-Silica Reaction in Concrete**, Thomas Telford Ltd, London, 1988.

16. Glasser, F.P., "Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction", pp. 30-53, **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**, R.N. Swamy (editor), Van Nostrand Reinhold, New York, 333 p., 1992.

17. Thomas, M.D.A., "The Effect of Supplementary Cementing Materials on Alkali-Silica Reaction: a Review", **Cement and Concrete Research**, 41, pp. 1224-1231, 2011.

18. Taylor, H.F.W., **Cement Chemistry**, Academic Pres, London, 1990.

19. Hou, X., Struble, L.J., Kirkpatrick, R.J., "Formation of ASR Gel and the Roles of C-S-H and Portlandite", **Cement and Concrete Research**, 34, pp. 1683-1696, 2004.

20. Lindgard, J., Andiç-Çakır, Ö., Fernandes, I., Ronning, T.F., Thomas, M.D.A., "Alkali-Silica Reactions (ASR): Literature Review on Parameters Influencing Laboratory Performance Testing", **Cement and Concrete Research**, 42, pp. 223-243, 2012.

21. Dent-Glasser, L.S., "Osmotic Pressure and Swelling of Gels", **Cement and Concrete Research**, 9, pp. 515-517, 1979.

22. 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, 66 p., 1981.

23. Swamy, R.N., "Testing for Alkali Silica Reaction", pp. 54-95, **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**, R. N. Swamy (editor), Van Nostrand Reinhold, New York, 333 p., 1992.

24. Ozol, M.A. "The Pessimum Proportion as a Reference Point in Modulating Alkali-Silica Reaction", **Proc. Symposium on Alkali-Aggregate Reaction, Preventive Measures**, pp. 113-130, 1975.

25. Poole, A.B., "Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete", pp. 30-53, **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**, R. N. Swamy (editor), Van Nostrand Reinhold, New York, 333 p., 1992.

26. Grattan-Bellew, P.E., "Petrographic and Technological Methods for Evaluation of Concrete Aggregates", In: V.S. Ramachandran, J.J. Beaudoin (editors), **Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology Principles, Techniques and Applications**, Noyes Publication, pp. 63-98, 2001.

27. RILEM TC106-AAR, "Alkali Aggregate Reaction", A. TC 106-2-Detection of Potential Alkali-Reactivity of Aggregates-the Ultra-Accelerated Mortar Bar Test, B. TC 106-3-Detection of Potential Alkali-Reactivity of Aggregates- Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms, **Materials and Structures**, 336, pp. 283-293, 2000.
28. Shayan, A., "The Pesimum Effect in an Accelerated Mortar Bar Test Using 1M NaOH Solution at 80°C", **Cement and Concrete Research**, 14, pp. 249-255, 1992.
29. Bektaş, F., Turanlı, L., Topal, T., Göncüoğlu, M.C., "Alkali Reactivity of Mortars Containing Chert and Incorporating Moderate-Calcium Fly Ash", **Cement and Concrete Research**, 34, pp. 2209-2214, 2004.
30. Buck, A.D., Mather, K., **Methods for Controlling Effects of Alkali-Silica Reaction in Concrete**, Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Structures Lab., Accession no ADA178479, 69 p., 1987.
31. Thaulow, N., Hjorth Jakobsen, U., Clark, B., "Composition of Alkali Silica Gel and Ettringite in Concrete Railroad Ties: SEM-EDX and X-Ray Diffraction Analyses", **Cement and Concrete Research**, 26, 4, pp. 309-318, 1996.
32. Kawamura, M., Arano, N., Terashima, T., "Composition of ASR Gels and Expansion of Mortars", In: M. Cohen, S. Mindess, J. Skalny (editors), **Materials Science of Concrete: Special Volume-The Sidney Diamond Symposium**, American Ceramic Society, Westerville, OH, pp. 261-276, 1998.
33. Brouxel, M., "The Alkali-Aggregate Reaction Rim: Na₂O, SiO₂, K₂O and CaO Chemical Distribution", **Cement and Concrete Research**, 23, pp. 309-320, 1993.
34. Lu, D., Fournier, B., Grattan Bellew, P.E., "Evaluation of Accelerated Test Methods for Determining Alkali-Silica Reactivity of Concrete Aggregates", **Cement and Concrete Research**, 28, pp. 546-554, 2006.
35. Diamond, S., Thaulow, N., "A Study of Expansion due to Alkali-Silica Reaction as Conditioned by the Grain Size of the Reactive Aggregate", **Cement and Concrete Research**, 4, pp. 591-607, 1974.
36. Peterson, K., Gress, D., Van Dam, T., Sutter, I., "Crystallized Alkali-Silica Gel in Concrete from the Late 1890s", **Cement and Concrete Research**, 36, pp. 1523-1532, 2006.
37. Fernandes, I., "Composition of Alkali-Silica Reaction Products at Different Locations within Concrete Structures", **Materials Characterization**, 60, pp. 655-668, 2009.
38. Kundsén, T., Thaulow, N., "Quantitative Microanalyses of Alkali-Silica Gel in Concrete", **Cement and Concrete Research**, 5, pp. 443-454, 1975.
39. Moranville-Regourd, M., "Products of Reaction and Petrographic Examination", **Proc. 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction**, K. Okada, S. Nishibayashi, M. Kawamura, (editors) Kyoto, Japan, pp. 445-456, 1989.
40. Andiç-Çakır, Ö., "Alkali-Agrega Reaktivitesinin Tespitinde Kullanılan Deney Metotlarının İncelenmesi", Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 252 sayfa, 2007.
41. Cole, W.F., Lancucki, C.J., "Products Formed in an Aged Concrete: the Occurrence of Okenite", **Cement and Concrete Research**, 13, pp. 611-618, 1983.
42. Thordal Andersen, K., Thaulow, N., "The Study of Alkali Silica Reactions in Concrete by the Use of Fluorescent Thin-Sections", **Petrography Applied to Concrete and Aggregates**, B. Erlin, D. Stark (editors), ASTM STP 1061, ASTM, Philadelphia, USA, pp. 71-89, 1990.
43. Kurtis, K.E., Monteiro, P.J.M., Brown, J.T., Meyer-Ilse, W., 1997, **In Situ Alkali Silica Reaction Observed by X-Ray Microscopy**, The center for x-ray optics, Lawrence Berkeley National Laboratory, Advanced Light Source: Compendium of User Abstracts and Technical Reports, LBNL-39981/UC-411: 1993-1996.
44. Kurtis, K.E., Monteiro, P.J.M., Brown, J.T., Meyer-Ilse, W., "Expansive Reactions in Concrete Observed by Soft X-Ray Transmission Microscopy", **Materials Research Society Symposium Proceedings**, v. 524, pp. 3-9, 1998.
45. Kirkpatrick, R.J., **MAS Nuclear Resonance Spectroscopy of Cement Systems**, ACBM Seminar, Northwestern University, Evanston, IL, 1991.
46. Gutteridge, W.A., Hobbs, D.W., "Some Chemical and Physical Properties of Beltane Opal Rock and its Gelatinous Alkali-Silica Reaction", **Cement and Concrete Research**, 10, pp. 183-194, 1980.
47. Swamy, R.N., **Alkali Aggregate Reaction - the Bogeyman of Concrete**, American Concrete Institute Special Report 144, Mehta, P.K. (editor), ACI, Farmington Hills, MI, 683 p., 1994.
48. Hansen, W.C., "Studies Relating to the Mechanism by which Alkali-Aggregate Reaction Produces Expansion in Concrete", **Journal of ACI**, 40 (3), pp. 213-227, 1944.
49. Vivian, H.E., **Studies in Cement Aggregate Reaction**, Bulletin No.256, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia, Melbourne, Part X, pp. 13-20, 1950.
50. Prezzi, M., Monteiro, P.J.M., Sposito, G., "Alkali-Silica Reaction-Part I: Use of Double Layer Theory to Explain the Behaviour of Reaction Product Gels", **ACI Materials Journal**, 94 (1), pp. 10-17, 1997.
51. Diamond, S., "Chemistry and Other Characteristics of ASR Gels", pp. 31-40, **Proceedings 11th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction**, Ed. Berube, M.A., Fournier, B., Durand, B., Quebec, QC, Canada, 1406 p., 2000.
52. Powers, T.C., Steinour, H.H., "An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction Part II-a Hypothesis Concerning Safe and Unsafe Reactions with Reactive Silica in Concrete", **Journal of ACI**, 51 (4), pp. 785-812, 1955.
53. Wang, H., Gillott, J.E., "The Effect of Superplasticisers on Alkali Silica Reactivity", **Proc. 8th International Conference on Alkali Aggregate Reaction**, Kyoto, Japan, pp. 187-192, 1989.
54. Chatterji, S., Jensen, A.D., Thaulow, N., Christensen, P., "Studies of Alkali-Silica Reaction Part 3 Mechanism by which NaCl and Ca(OH)₂ Affect the Reaction", **Cement and Concrete Research**, 16, pp. 246-254, 1986.
55. Chatterji S., "Mechanism of Alkali-Silica Reaction and Expansion", **Proc. 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction**, K. Okada, S. Nishibayashi, M. Kawamura, (editors), Kyoto, Japan, pp. 101-106, 1989.
56. Chatterji, S., Thaulow, N., "Some Fundamental Aspects of Alkali-Silica Reaction", **Proc. 11th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction**, M.A. Berube, B. Fournier, B. Durand, (editors) Quebec, Canada, pp. 21-30, 2000.

57. Helmuth, R., Stark, D., "Alkali-Silica Reactivity Mechanisms", F. Skalny (editor), **Materials Science of Concrete III, The American Ceramic Society**, Westerville, OH, pp. 131-138, 1992.
58. Farny, J.A., Kosmatka, S.H., "Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete", **Concrete Information**, Portland Cement Association, 23 p., 1997.
59. Hobbs, D.W., Gutteridge, W.A., "Particle Size of Aggregate and its Influence upon the Expansion Caused by the Alkali Silica Reaction", **Magazine of Concrete Research**, 31 (109), pp. 235-242, 1979.
60. Han, S., Fang, M., "Alkali-Aggregate Reaction under High Temperature, High Pressure and High Alkali Content", **Journal of Nanjing Institute of Chemical Technology**, pp. 1-10, 1984.
61. Kawamura, M., Takamoto, K., Hasaba, S., "Application of Quantitative EDXA Analysis and Micro-Hardness Measurements to the Study of Alkali-Silica Reaction Mechanisms", **Proc. 6th International Conference on Alkali in Concrete**, Danish Concrete Association, Idorn, G.M., Rostom, S. (editor), Copenhagen, pp. 167-174, 1983.
62. Poyet, S., Sellier, A., Capra, B., Foray, G., Torrenti, J.M., Cognon, H., Bourdarot, E., "Chemical Modelling of Alkali Silica Reaction: Influence of Reactive Aggregate Size Distribution", **Materials and Structures**, 40 (2), pp. 419-428, 2007.
63. Multon, S., Cyr, M., Sellier, A., Diederich, P., Petit, L., "Effects of Aggregate Size and Alkali Content on ASR Expansion", **Cement and Concrete Research**, 40 (4), pp. 508-516, 2010.
64. Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., **Concrete Microstructure, Properties and Materials**, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 659 p., 1993.
65. Nishibayashi, S., Yamura, K., "Effect of Reactive Fine Aggregate on Expansion Characteristics of Concrete due to Alkali Aggregate Reaction", **Proc. 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, London, pp. 723-730, 1992.
66. Zhang, C., Wang, A., Tang, M., Wu, B., Zhang, N., "Influence of Aggregate Size and Aggregate Size Grading on ASR Expansion", **Cement and Concrete Research**, 29, pp. 1393-1396, 1999.
67. Ramyar, K., Topal, A., Andiç, Ö., "Effects of Aggregate Size and Angularity on Alkali-Silica Reaction", **Cement and Concrete Research**, 35 (11), pp. 2165-2169, 2005.
68. Meriaux, K., Lecomte, A., Degeimbre, R., Darimont, A., "Alkali Silica Reactivity with Pessimism Content on Devonian Aggregates from the Belgian Arden Massive", **Magazine of Concrete Research**, 55 (5), pp. 429-437, 2003.
69. Fournier, B., Chevier, R., De Grosbois, M., Lisella, R., Folliard, K., Idekar, J., Shehata, M., Thomas, M., Baxer, S., "The Accelerated Concrete Prism Test (60°C): Variability of the Test Method and Proposed Expansion Limits" In: M. Tang, M. Deng (editors), **12th Int. Conf. On Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, International academic Publishers- World Publishing corporation, Beijing, China, pp. 314-323, 2004.
70. Sibbick, R.G., Page, C.L., "Threshold Alkali Contents for Expansion of Concrete Containing British Aggregates", **Cement and Concrete Research**, 22, pp. 990-994, 1991.
71. Grattan-Bellew, P.E., "Alkali Contribution from Limestone Aggregate to Pore Solution of Old Concrete", **ACI Materials Journal**, V.91, No.2, pp. 173-177, 1994.
72. Berube, M.A., Frenette, J., Pedneault, A., Rivest, M., "Laboratory Assessment of the Potential Rate of ASR Expansion of Field Concrete", **Cement, Concrete and Aggregates**, 24 (1), pp. 13-19, 2002.
73. Constantiner, D., Diamond, S., "Alkali Release from Feldspars into Pore Solutions", **Cement and Concrete Research**, 33, pp. 549-554, 2003.
74. Gougel, R., "Alkali Release by Volcanic Aggregates in Concrete", **Cement and Concrete Research**, 25 (4), pp. 841-852, 1995.
75. Lu, D., Zhou, X., Xu, Z., Lan, X., Tang, M., Fournier, B., "Evaluation of Laboratory Test Method for Determining the Potential Alkali Contribution from Aggregates and the ASR Safety of the Three-Gorges Dam Concrete", **Cement and Concrete Research**, 36, pp. 1157-1165, 2006.
76. Berube, M. A., Dorion, J.F., Rivest, M., "Distribution of Alkalis in Concrete Structures Affected by Alkali-Silica Reactivity and Contribution by the Aggregates", In: M.A. Berube, B. Fournier, B. Durand (editors), **11th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, Canada, pp. 139-148, 2000.
77. Diamond, S., "Alkali Silica Reactions- Some Paradoxes", **Cement and Concrete Composites**, 19, pp. 391-401, 1997.
78. Larive, C., Laplaud, A., Couusy, O., "The Role of Water in Alkali-Silica Reaction" In: M.A. Berube, B. Fournier, B. Durand (editors), **11th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, Canada, pp. 61-69, 2000.
79. Stark, D., Morgan, B., Okamoto, P., **Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity**, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 266 p., 1993.
80. Diamond, S., Barneyback, R.S Jr, Struble, L.J., "On the Physics and Chemistry of Alkali Silica Reactions", pp. 1-11, **Proceedings of the Fifth Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, S252/22, 66 p., 1981.
81. Stark, D., **Effects of Water Cement Ratio on Expansion due to ASR**, 3-5, Concrete Technology Today, PL951, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, March, 1995.
82. Shayan A., Ivanusec, I., "An Experimental Clarification of the Association of Delayed Ettringite Formation with Alkali-Aggregate Reaction", **Cement and Concrete Composites**, 18, pp. 161-170, 1996.
83. Swamy, R.N., Al-Asali, M.M., Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali Silica Reaction, **ACI Materials Journal**, Vol. 85, pp. 367-374, 1988.
84. Figg, J., "ASR-Inside Phenomena and Outside Effects (Crack Origin and Pattern)", pp. 152-156, P.E. Grattan-Bellew (Ed.), **Concrete Aggregate Reaction**, Noyes Publications, New Jersey, 509 p., 1987.
85. Palmer, D., **Alkali-Aggregate (Silica) Reaction in Concrete**, Cement & Concrete Association, Advisory Note ref. 45.003, Wexham Springs, Slough, UK, 9p., 1977.
86. Palmer, D., **The Diagnosis of Alkali-Silica Reaction**, Report of a Working Party, British Cement Association, 44p., 1988.