

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONUNUN İYİLEŞTİRİLMESİNDE MİNERAL VE
KİMYASAL KATKILARIN KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. İlker DİNÇDEMİR

**ARALIK 2015
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmalarım süresince ilgisini ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, tez çalışması için gerekli cihaz ve malzemelerin temininde, karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında bana yol gösterici benim için çok değerli olan saygıdeğer hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ'ye sonsuz teşekkür ederim.

Değerli zamanını benimle paylaşmaktan çekinmeyen, bilgisi ve tecrübesiyle çalışmaya ışık tutan sayın Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU hocama teşekkürlerimi borç bilirim.

Bütün hayatım boyunca her durumda yanımda olan, her zaman varlıklarını ve desteklerini hissettiğim canımdan çok sevdiğim aileme çok teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarım sırasında sürekli bana yardımcı olan başta Arş. Gör. Safa NAYIR olmak üzere Arş. Gör. Memduh NAS ve öğrenci arkadaşlarım Mehmet Türker, Fazıl Türk ve İbrahim Usta'ya teşekkür ederim.

İlker DİNÇDEMİR
Trabzon 2015

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Mineral ve Kimyasal Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonu Üzerinde Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ'nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 08.12.2015

İlker DİNÇDEMİR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Alkali-Silika Reaksiyonu	2
1.2.1 ASR Kimyası	5
1.2.2. ASR Ürünleri.....	6
1.2.3. ASR'yi Etkileyen Faktörler.....	8
1.2.3.1. Betonun Alkali İçeriği	8
1.2.3.2. Agregadaki Reaktif Silis	11
1.2.3.3. Agreganın Tane Büyüklüğü	14
1.2.3.4. Ortam Sıcaklığı	16
1.2.3.5. Yeterli Nem	17
1.2.3.6. Su/Çimento Oranı	18
1.3. Mineral Katkıların Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi	19
1.3.1. Uçucu Külün Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi	20
1.3.2. Silis Dumanının Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi	21
1.3.3. Yüksek Fırın Cürufunun Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi	23
1.3.4. Doğal Puzolanların Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi	24
1.3.4.1 Metakaolinin Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi	24
1.4. Kimyasal Katkıların Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi	26

1.4.1.	Lityum Karbonatın Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi	27
1.5.	Alkali Silika Reaksiyonunu Belirlemek Amacıyla Kullanılan Yöntemler	29
1.5.1.	Harç Çubuk Deneyi(ASTM C 227)	31
1.5.2.	Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi(ASTM C 1260)	32
1.5.3.	Beton Prizma Deneyi(ASTM C 1293).....	34
1.5.4.	Kimyasal Yöntem(ASTM C 289, TS 2517)	35
1.5.5.	Jel Pat Metodu	36
1.5.6	Nordtest Hızlandırılmış Alkali Silika Testi	37
1.5.7.	Alman Çözünme Metodu	37
1.5.8.	Ozmotik Hücre Metodu	37
1.6.	Literatür Taraması	38
1.7.	Amaç ve Kapsam	42
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	43
2.1.	Deney Programı	43
2.2.	Kullanılan Malzemeler ve Malzemelerin Özellikleri.....	43
2.2.1.	Agrega.....	43
2.2.2.	Çimento.....	44
2.2.3.	Uçucu Kül	45
2.2.4.	Silis Dumanı.....	45
2.2.5.	Metakaolin.....	46
2.2.6.	Yüksek Fırın Cürufu	46
2.2.7.	Lityum Karbonatın Özellikleri.....	46
2.3.	Hızlandırılmış Harç Çubuklarının Üretimi ve Deneyin Gerçekleştirilmesi.....	47
3.	BULGULAR VE İRDELEME	51
3.1.	Agrega Reaktifliğinin Belirlenmesi Amaçlı Ön Deney	51
3.2.	Uçucu Kül İkame Edilen Numunelere Ait Bulgular ve İrdeleme	51
3.3.	Silis Dumanı İkame Edilen Numunelere Ait Bulgular ve İrdeleme	53
3.4.	Metakaolin İkame Edilen Numunelere Ait Bulgular ve İrdeleme	54
3.5.	Yüksek Fırın Cürufu İkame Edilen Numunelere Ait Bulgular ve İrdeleme	55
3.6.	Lityum Karbonat İkame Edilen Numunelere Ait Bulgular ve İrdeleme	57
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
5.	KAYNAKLAR	61

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ALKALİ-SİLİKA REAKSIYONUN İYİLEŞTİRİLMESİNDE MİNERAL VE KİMYASAL KATKILARIN KULLANIMI

İlker DİNÇDEMİR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ
2015, 63 Sayfa

Alkali silika reaksiyonu (ASR) , betonun dayanıklılığını ve beton ömrünü olumsuz yönde etkileyen, oldukça karmaşık bir yapıya sahip, kimyasal bir reaksiyondur. Beton üzerinde çatlaklar oluşturarak betonarme yapılarda büyük sorunlara yol açmaktadır.

Bu çalışmada mineral ve kimyasal katkıların alkali silika reaksiyonu üzerinde etkileri araştırılmıştır. Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan Harşit Vadisinden, alkali silika reaksiyonu açısından potansiyel tehlike arz eden agregalar üzerinde ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk deneyi yapılmıştır. Bu deney neticesinde agregaların alkali silika reaksiyonu açısından zararlı olduğu tespit edilmiştir. Alkali silika reaksiyonunun meydana getirdiği olumsuz sonuçların önlenmesi amacıyla çimento ile birlikte farklı oranlarda uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve lityum karbonat olmak üzere 5 farklı mineral ve kimyasal katkı ikamesi uygulanmıştır. İkame oranları sırasıyla uçucu kül için %15, %30 ve %45; silis dumanı ve metakaolin için %5, %10 ve %15, yüksek fırın cürufu için %20, %40 ve %60 ve lityum karbonat için %1, %2 ve %3 olarak gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak kullanılan mineral ve kimyasal katkı maddelerinin alkali silika reaksiyonun oluşturduğu olumsuz sonuçlar üzerinde etkili olduğu ve bu maddelerin ikame oranı arttıkça alkali silika reaksiyonunun zararlarının giderek azaldığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alkali-Silika Reaksiyonu, Agregat, ASTM C1260 Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi, Mineral ve Kimyasal Katkılar

**Master Thesis
SUMMARY**

**USAGE OF MINERAL AND CHEMICAL ADMIXTURES TO MITIGATE ALKALI-
SILIKA REACTION**

İlker DİNÇDEMİR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ
2015, 63 Pages

Alkali Silica Reaction (ASR) is a chemical reaction that affects strength and duration of concrete negatively having very complex substance. It causes serious problems in reinforced concrete by creating cracks on concrete.

In this study, effects of mineral and chemical admixture on ASR are explored. ASTM C 1260 accelerated mortar bar test is done on aggregates taken from Harşit Valley located in east blacksea region which may cause ASR.

Test results indicate that aggregates are dangerous in terms of ASR. In order to prevent negative outcomes of ASR 5 different minerals and chemical admixtures (fly ash, silica fume, blast furnace slag, metakaolin and lithium carbonate) are applied together with cement in different ratios.

Keywords: Alkali-Silica Reaction, Aggregate, ASTM C1260 Accelerated Mortar Bar Test, Mineral and Chemical Admixture

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. ASR jelinin beton içinde oluşumu	2
Şekil 2. ASR'nin neden olduğu harita çatlakları	4
Şekil 3. ASR'nin neden olduğu harita çatlakları	4
Şekil 4. Zemin üzerinde yanal basınca maruz kalmayan beton kaplamalarda ASR çatlakları için model	5
Şekil 5. Çimentodaki alkali miktarının alkali silika genişlemesine etkisi	9
Şekil 6. Çimento dozajı ve çimentonun sodyum oksit (Na ₂ O) eşdeğeri %'sine bağlı olarak 1 m ³ betondaki alkali miktarı.	10
Şekil 7. 24 günlük genişleme ile agregadaki reaktif silika miktarı arasındaki bağıntı ...	13
Şekil 8. Agregadaki reaktif silika bileşeni boyutunun, alkali agrega genişlemesine etkisi	14
Şekil 9. Farklı reaktif agrega tane boylarına sahip harç prizmalarının boyca genişmesi	15
Şekil 10. Farklı reaktif agrega tane boylarına sahip harç prizmalarının boyca genişmesi	16
Şekil 11. Sıcaklığın, genişleme ve reaksiyon ile ilişkisi a) Sıcaklık - toplam genişleme ilişkisi, b) Sıcaklık - reaksiyon oranı ilişkisi (Locher, 1973)	17
Şekil 12. Ortam bağıl neminin ASR genişlemelerine etkisi (Swamy, 1992)	18
Şekil 13. Su/Çimento Oranı-Genişleme Yüzdesi Grafiği	19
Şekil 14. Silis dumanı katkısının ASTM C 441 deneyine göre harç çubuklarının genişlemesine etkisi.	22
Şekil 15. %5-10-20 oranlarında çimento yerine kullanılan power pozz metakaolinin zamana bağlı olarak genişleme üzerindeki etkisi	25
Şekil 16. Kalıba dökülmüş harç çubuk numuneleri	33
Şekil 17. Alkalinitedeki azalma- çözünmüş silis grafiği	36
Şekil 18. Üretimi Yapılan Harç Çubuklarının Kalıp İçerisindeki Görünümü	48
Şekil 19. Üretimden 1 gün sonra kalıplardan çıkarılan numuneler	49
Şekil 20. Kalıptan Çıkarılan Harç Çubuğunun Ölçüm Ünitesinde Ölçüm Yapılması	49
Şekil 21. Deney Tankı	50
Şekil 22. Uçucu kül ikameli numunelerin zamana bağlı boy değişimi	52
Şekil 23. Silis Dumanı ikameli numunelerin zamana bağlı boy değişimi	54

Şekil 24.	Metakaolin ikameli numunelerin zamana bağlı boy değişimi	55
Şekil 25.	Yüksek Fırın Cürufu ikameli numunelerin zamana bağlı boy değişimi	57
Şekil 26.	Lityum Karbonat ikameli numunelerin zamana bağlı boy değişimi	58

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Alkali Silis jeli kimyasal analiz sonuçları	7
Tablo 2. Reaktivite seviyelerine göre mineral ve kayaçlar	12
Tablo 3. Yüksek fırın cürufu alkali ve efektif alkali içerikleri	23
Tablo 4. Bazı kimyasal katkıların ASR üzerindeki etkileri	27
Tablo 5. ASR için kullanılan test metotları	30
Tablo 6. Harç çubuğu ve hızlandırılmış harç çubuğu yöntemleri için agrega elek analizi ve karışım oranları.	31
Tablo 7. Agrega elek analizi.....	34
Tablo 8. Agrega özellikleri	43
Tablo 9. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri	44
Tablo 10. Uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal özellikler	45
Tablo 11. Silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal özellikler	45
Tablo 12. Metakaoline ait fiziksel ve kimyasal özellikler	46
Tablo 13. Yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler	46
Tablo 14. Lityum karbonatın fiziksel ve kimyasal özellikleri	47
Tablo 15. ASTM C1260'a göre granülometrik dağılım	47
Tablo 16. Üretimlerde kullanılan malzeme miktarları	48
Tablo 17. Katkısız numunelerin genleşmeleri	51
Tablo 18. Uçucu kül ikameli numunelere ait deney sonuçları	52
Tablo 19. Silis Dumanı ikameli numunelere ait deney sonuçları	53
Tablo 20. Metakaolin ikameli numunelere ait deney sonuçları	55
Tablo 21. Yüksek Fırın Cürufu ikameli numunelere ait deney sonuçları	56
Tablo 22. Lityum Karbonat ikameli numunelere ait deney sonuçları	57

SEMBOLLER DİZİNİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AAR	: Alkali-Agrega Reaksiyonu
ACR	: Alkali-Karbonat Reaksiyonu
ASR	: Alkali-Silika Reaksiyonu
ASTM	: Amerikan standart
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
GEO	: Gecikmiş Etrenjit Oluşumu
(Na ₂ O) _e	: Sodyum oksit eşdeğeri
PÇ	: Portland çimentosu
R _c	: Alkali azalması
S _c	: Çözünmüş silis
S/Ç	: Su/Çimento Oranı

1.GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

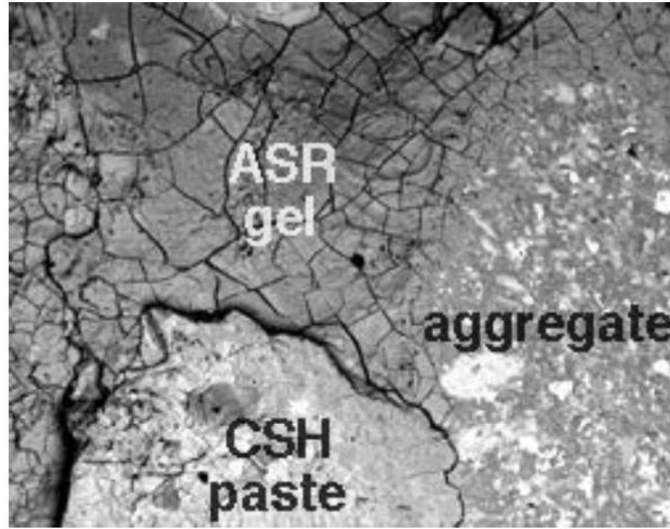
Betonarme veya beton yapı elemanlarından zamanla bozulup işlevlerini kaybetmeden gereken servis ömürlerine ulaşmaları beklenir. Ancak yapının beklenen servis ömrünü tamamlamadan işlevini kaybetmesine birçok faktör sebep olabilir. Yapı elemanının durabilitesini belirleyen etkenler arasında beton bileşimindeki malzemelerin fiziksel ve kimyasal yapısından kaynaklanan iç etkiler ve çevreden doğan dış etkiler gösterilebilir. Bazı durumlarda, beton bileşimini oluşturan malzemelerin kendi aralarında veya çevreden gelen zararlı maddelerle kimyasal reaksiyonlara girebildiği, böylece beton hacim sabitliğinin bozulması nedeniyle yapı elemanının zarar gördüğü bilinmektedir. Alkali-Silika Reaksiyonu bu tür kimyasal bozulma reaksiyonlarından biridir.

1920’li ve 1930’lu yıllarda ABD, Kaliforniya’daki beton yapılarda nedeni belirsiz çatlak oluşumları rapor edilmiştir. Beton malzemelerinin standartlara uygun olmasına rağmen, yapım yılını takiben birkaç yıl içinde çatlaklar oluşmuştur. Genellikle harita çatlağı şeklinde görülen sorun bazen de çatlaklardan jel çıkışı, betonun parça atması gibi belirtiler de göstermiştir. Stanton, 1940 yılında çatlamanın (daha sonra Alkali-Silis Reaksiyonu olarak adlandırılan) kimyasal bir reaksiyonun sonucu olduğunu açıklamıştır. Stanton’un çalışmasının yayınlanmasından kısa süre sonra 1941 yılında Parker Barajı’nın betonunda oluşan çatlak ve bozulmaları incelenmiştir. Araştırmacılar, betonda alkali silis reaksiyonu ürünü bulunduğunu ve reaktif bileşenlerin toplam agreganın % 2’sini oluşturan altere andezit ve riyolit parçaları olduğunu belirtmiştir (Bektaş, 2002).

Alkali-agrega reaksiyonu, betondaki agreganın çeşitli bileşenlerinin çimento alkalileri ile reaksiyonu olarak tanımlanabilir. Bu reaksiyon beton agregalarında bulunan reaktif silis ile betonun boşluklarında eriyik halde bulunan hidroksil iyonlarının reaksiyonudur. Bu reaksiyonun sonucunda su emerek genleşen ve betonda hasarlara yol açabilecek düzeyde çekme gerilmeleri meydana getirebilen ürünler oluşmaktadır. Reaksiyonun bu özelliği nedeniyle beton bünyesinde 0.1-11 MPa’a varan çekme gerilmeleri yarattığı belirlenmiştir (Struble, 1981). Beton içerisinde şişme sebebiyle meydana gelen bu hacim artışı çekme gerilmelerinin doğmasına sebep olarak betonda

çatlamlara yol açar. Betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının %7'si ile %11'i arasında olduğundan, % 0.04-0.05 gibi genişleme birim deformasyonu betonu çatlatmaya yeterli olacaktır (Swamy, 1994). Haritamsı çatlaklar reaktif agregayı çevreleyen matriste başlayıp agregadan harç matrisine doğru yayılır (Şekil 1).

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



Şekil 1. ASR jelinin beton içinde oluşumu (Uğur, 2002).

1.2. Alkali-Silika Reaksiyonu

Alkali silika reaksiyonu betonarme yapılarda hasar oluşturan, beton ve durabilitesi için büyük tehdit olarak bilinen kimyasal ve kompleks bir reaksiyondur. Bu reaksiyon beton agregalarında bulunan reaktif silis ile beton içinde eriyik halde bulunan alkalilerin reaksiyonudur, betonda nem etkisiyle genişleyen bir jelin oluşmasına neden olur. Oluşan jel, dışarıdan nem alarak şişmeye baslar (hacim artışı) ve bu genişlemenin sonunda beton

içerisinde bir takım çekme gerilmelerinin doğmasına sebep olarak betonda çatlamalara yol açar.

ASR'nin oluşabilmesi için agregada reaktif silika formları, yeterli miktarda alkali ve ortamda nem bulunmalıdır. Yeterli alkali miktarı ifadesi de çimento alkali içeriğinin eşdeğer Na₂O değeri olarak % 0,6 değerini aşması demektir. Ayrıca portlant çimentosunun alkali içeriği sodyum oksit eşdeğeri olarak aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$(Na_2O)_e = Na_2O + 0,658 K_2O \quad (1.1)$$

Bu koşullardan herhangi biri olmazsa ASR nedeniyle bir genişleme de olmayacaktır. ASR basitçe iki aşamada görülebilir;

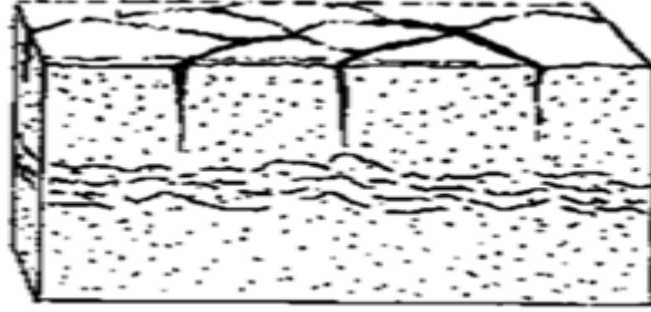
- Alkali + Reaktif Silika → Alkali- Silika jel ürünleri
- Alkali-Silika jeli + Nem → Genleşme

Çimentoda bulunan sodyum ve potasyum oksitler çimentonun hammaddelerinden (kil, kireçtaşı, şeyl vb.) kaynaklanır. Ayrıca alkaliler, çimento dışında; agrega, karışım suyu, beton katkı maddeleri, buz çözücü tuzlar, zemin suyu, beton kür suyu ve endüstriyel atık suları aracılığıyla beton bünyesine girebilirler. Genelde sadece çimento ve çimentolanma özelliği olan malzemelerin alkalinitesi göz önüne alınmaktadır. Ancak betona katılan kimyasal ya da mineral katkıları alkali içeriyorsa gelen ilave alkali miktarı göz önüne alınır. Beton içine alkali girişi sadece çimentodan kaynaklanıyorsa alkali içeriği şu ifade ile hesaplanır:

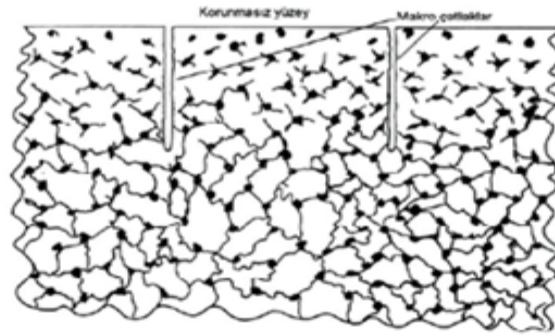
$$\begin{aligned} [\text{Çimentonun alkali } \%] \times [\text{Çimento dozajı (kg/m}^3)] &= \text{Betondaki alkali miktarı} \\ \text{Miktarı} & \quad \quad \quad (\text{kg/m}^3) \end{aligned}$$

ASR'nin betondaki en tipik görülebilir etkisi harita çatlağı şeklindeki çatlak ağdır. Bu çatlak biçimleri Şekil 2 ve Şekil 3'te görülmektedir. Çatlakların doğru tanımlanabilmesi için, donatı durumu, gerilme doğrultusu, mesnet koşulları ve diğer sınır koşulları ile renk değişimleri ve yüzey koşullarının çok iyi ve doğru saptanması gerekir. Geniş çatlaklar kolay fark edilebilir. İnce çatlaklar her zaman kolay görünmezler. Ancak yüzey ısıtılıp bir süre kurumaya bırakıldığında, yüzeyde çatlak olmayan yerlerdeki suyun, çatlaklardaki

sudan daha çabuk buharlaşması nedeniyle kılcal çatlaklar da kolayca fark edilebilirler. Bu nedenle beton yüzeylerin yağmur sonrasında izlenmesi iyi bir zamanlamadır (Çullu vd. 2010).

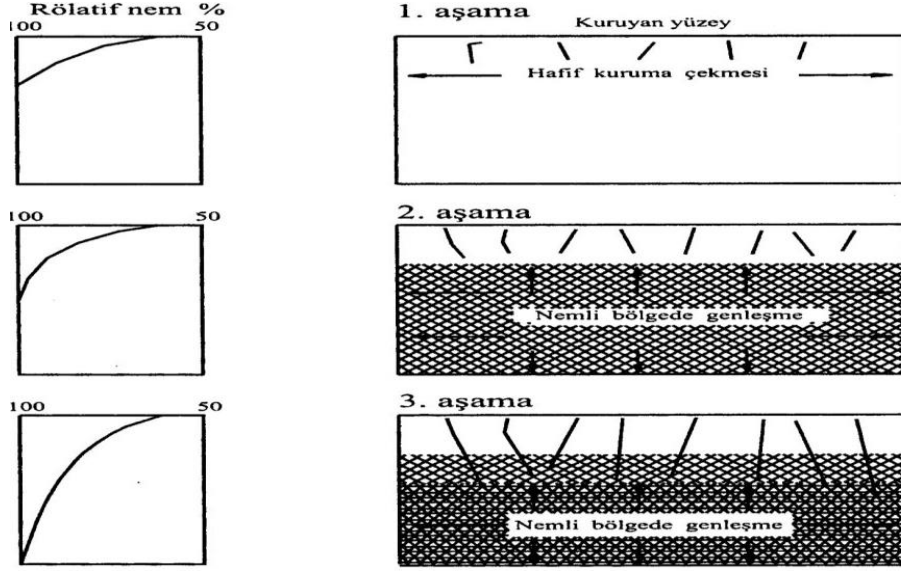


Şekil 2. ASR'nin neden olduğu harita çatlakları (Çullu vd. 2010).



Şekil 3. ASR'nin neden olduğu harita çatlakları (Çullu vd. 2010).

ASR çatlakları genelde enine birleşimlere dik ve serbest yol kenar uçlarına paralel ve asfalt kaplamaya karşı yöndedirler. Bu çatlaklar genellikle harita çatlakları şeklinde gelişim gösterirler. Sürekli donatılı kaplamalarda ASR çatlakları donatıya paralel gelişir. Trafikten ileri gelen statik ve dinamik yüklenmeler, ASR'nin neden olduğu çatlakların genişlik ve oluşum hızını artırır. İlk aşamada kuruma büzülmesinden kaynaklanan kılcal çatlaklar oluşur. İkinci safhada beton içinde oluşan ASR'nin neden olduğu genleşme ve çatlama gelişir. Üçüncü aşamada, yüzeyde sürekli kuruma, içe giren suyun reaksiyon hızını ve arttırışı gözlenir. Şekil 4'te gösterilen bu model özel olarak beton kaplamalar için oluşturulmuş olmasına karşın, olayların sırası diğer yapılarda da buna benzerdir (Çullu vd. 2010).



Şekil 4. Zemin üzerinde yanal basınca maruz kalmayan beton kaplamalarda ASR çatlakları için model (Çullu vd. 2010).

1.2.1. ASR Kimyası

Alkali-silika reaksiyonunun kimyası detaylı incelendiğinde alkali-silika reaksiyonunun üç aşamada meydana geldiği görülür; reaktif silikanın çözülmesi, kalsiyum-sodyum-potasyum jelinin oluşması ve su absorpsiyonu ile jelin genişlemesi. Silisin çözülmesi hidroksil iyonlarının (OH^-) atağı neticesinde iki aşamada olur. Hidroksil iyonlarının mevcudiyeti betonda sadece $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tarafından değil aynı zamanda NaOH ve KOH tarafından da sağlanır. Silikanın çözünme hızı katı parçacıklar içindeki çatlaklarda mevcut olan alkali sıvının difüzyonundan etkilenir. İyonların türü ve iyonik konsantrasyon bu hızı kontrol eder. Çünkü tanecikler içine giren sıvı aynı zamanda hidroksit iyonlu katyonları sürükler ve bu katyonların iyonik yarıçapları difüzyonu sınırlayabilir. Bu yüzden daha küçük iyonik yarıçapa sahip potasyum katyonları daha yüksek difüzyon hızına sebep olabilir.

Çimento hidratasyonu ilk aşamalarında sıvı faz katı faza göre daha baskındır. Fakat hidratasyon devam ettikçe sıvı faz azalmakta ve yerini C-S-H ve C-H gibi hidratasyon ürünlerine bırakmaktadır. Böylece sıvı fazın devamlılığı azalır. Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu gerçekleşen betonun boşluk çözeltisi, sodyum (Na^+), potasyum (K^+), kalsiyum (Ca^+) ve hidroksil (OH^-) iyonları içermektedir. Hidrate olmamış portland çimentosunun miktarı sodyum, potasyum ve hidroksil iyonlarının boşluk suyundaki

konsantrasyonunu etkiler. Düşük alkalili çimentodan üretilen betonun, boşluk suyu pH'ı 12.7 ile 13.1 arasında değişirken, yüksek alkalili çimentodan üretilen betonlarda boşluk suyunun pH'ı 13.5 ile 1.9 arasında değişebilmektedir. Aradaki bu fark da yüksek alkalili çimentodan üretilen betonun boşluk suyundaki hidroksil iyonu konsantrasyonu düşük alkalili çimentodan üretilen betonun 10 katı olduğu sonucunu çıkarmaktadır. Reaktif agrega üzerinde zararlı etki gösteren, betonun boşluk suyundaki yüksek hidroksil iyonu konsantrasyonudur (Hobbs, 1988). Boşluk çözeltisinin alkali silis reaksiyonundaki önemi, hem hidratasyon ürünleri ile hem de agrega parçacıkları ile yakın temas halinde olması ve iyon taşınmasında ana etmen olarak yer almasıdır (Glasser, 1992).

1.2.2.ASR Ürünleri

Alkali silis reaksiyon ürünleri, reaktif silisin tipi, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyona giren ürünlerin konsantrasyonu ve boşluk çözeltisinin kompozisyonuna bağlı olarak çeşitlilik gösterir.

ASR ürünleri ile ilgili çalışmalarda bulunan Moranville reaksiyon ürünlerini jeller ve kristaller olmak üzere iki şekilde sınıflandırır. Jeller masif (yoğun) veya süngersi (dokulu ve taneli) görünümlü olarak tanımlanmaktadır. Jelin görünümündeki bu farklılıklar, kuruma esnasındaki büzülmenin tipi veya miktarına bağlı olabileceği gibi, farklı kompozisyonlardaki jellere de bağlı olabilir. Kristalin ürünlerin ise tabakalı veya gülsü, dikensi veya çubuksu ve yapraksı olmak üzere tipik morfolojileri vardır. Hızlandırılmış harç çubuğu metoduna göre kürlenmiş harçların reaksiyon ürünleri ile gerçek yapılarda meydana gelen ASR ürünleri hem morfolojik hem de kimyasal açıdan benzerlik göstermektedir (Moranville 1989).

Birçok bilim insanı tarafından kabul gören teori, amorf jelin zamanla kristalize hale geldiğidir. Kristalize ürünler ile amorf yapıda olanlar arasındaki kimyasal kompozisyon farklılığının çimento hamuru boşluk suyunun kimyası ile agrega boşluklarında yer alan suyun kimyasının farkından ileri geldiğini öne sürülmüştür. 1898'lerde inşa edilmiş olan Farnsworth Battery yapısındaki beton örneklerinde fazla miktarda kristalize olmuş ASR ürününe rastlanmıştır. EDS incelemeleri sonucunda, amorf jellerin kristalize jelle kıyasla sodyum ve potasyum iyon konsantrasyonunun daha az olduğu buna karşın kalsiyum iyon konsantrasyonunun daha fazla olduğu belirlenmiştir. Kristalize jelle yakın bulunan amorf

yapıdaki jellerin ise sodyum ve potasyum iyon konsantrasyonları daha fazla olup kalsiyum iyon konsantrasyonları daha azdır (Poole 1992).

ASR jellerinin kimyasal kompozisyonu değişken olmasına rağmen basitçe üç kategoride toplanabilir (Kirkpatrick, 1991):

- Kısmen reaksiyona uğramış ve şişmiş silis
- Nispeten saf alkali-silikat çözeltileri veya çeşitli alkali ve su içeriklerinde jeller
- Neredeyse sabit kompozisyonda (su içerikleri hariç) iki komponentli basit karışımlar.

Jel kompozisyonunun analiz sonuçları çok değişken bir aralıktadır. Tablo 1’de farklı kaynaklardan elde edilen jel analiz sonuçları görülmektedir.

Tablo 1. Alkali Silis jeli kimyasal analiz sonuçları (Poole, 1992).

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)

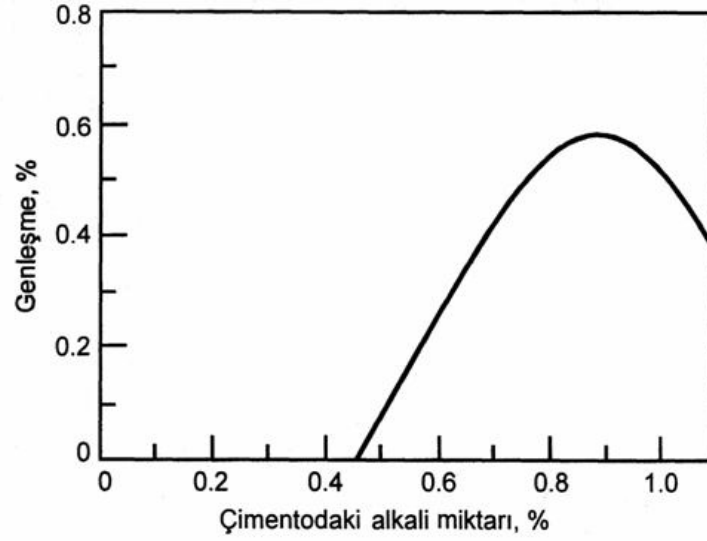
1.2.3. ASR'yi Etkileyen Faktörler

1.2.3.1. Betonun Alkali İçeriği

ASR ile ilgili olarak alkali terimi genellikle, portland çimentosu bünyesinde bulunan sodyum ve potasyum alkalileri ifade etmek için kullanılır. Portland çimentosu, beton bünyesinde mevcut alkalilerin önemli bir kaynağıdır, ancak betona, karışım suyu veya agrega gibi diğer bileşenler yoluyla da alkaliler girebilir. Gerçekte alkali taşıyan agregalar ASR ye neden olan alkaliler için önemli diğer bir kaynak olabilir ve yüksek alkaliye sahip çimento kullanılan betonda, agregadan gelenle birlikte çok daha yüksek alkali seviyeleri meydana gelir. Düşük alkaliye sahip çimento kullanılmış bazı döşeme betonlarında da ASR nedeniyle hasar meydana gelme nedeni olarak agregada mevcut alkalinin katkısıyla reaksiyon sonucunda hasara neden olacak miktarda jelin meydana gelmesi olarak gösterilmektedir (Shrp, 2003).

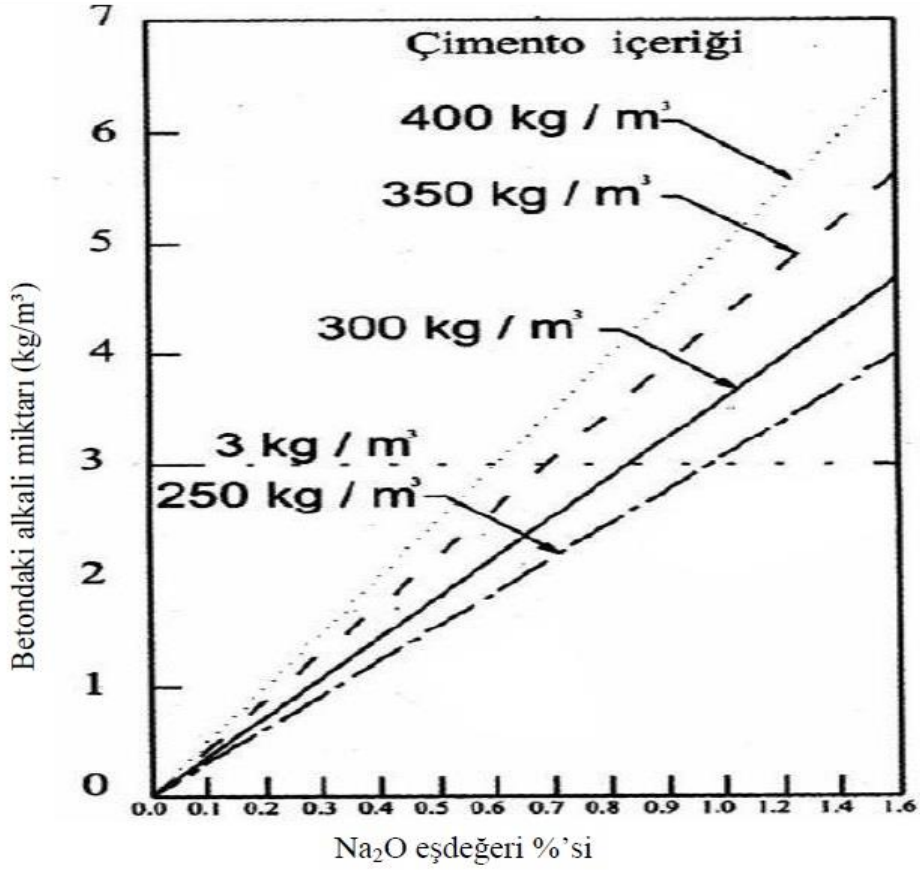
Alkaliler betonun işlenebilme, dayanıklılık ve dayanımı üzerinde oldukça etkilidir. Bu etkilerin ortaya çıkmasında en önemli faktör alkalilerin hidrasyon sürecinde meydana getirdikleri değişimlerdir. Alkali içeriğini belirli sınırlarda tutmak gerekir. Sınırlama genellikle sadece maksimum sınır değeri saptanarak gerçekleştirilir ve alkali içeriği yüzde olarak $Na_2O+0.658K_2O$ ile ifade edilen büyüklük ile sayısallaştırılır.

Hidrolik bağlayıcıların büyük çoğunluğunun hammaddeleri içinde saf olmayan alkaline mineraller bulunmaktadır. Bu, çimentolar içinde sodyum ve potasyum elementlerinin alt bileşenlerinin çoğu zaman bulunacağı anlamındadır. Bunların çimento içindeki oranları %1,3'ü pek aşmadığı halde çimento ve beton özelliklerini genellikle olumsuz yönde etkilerler. Bu maddeleri çimento üretim süreçlerinde bertaraf etmek güç ve ekonomik açıdan imkânsız görülmektedir. Bu nedenle beton üreticilerin zararlı etkileri iyice bilmeleri ve önlem almaları zorunludur. Şekil 5'de görüldüğü gibi çimentodaki alkali miktarının yaklaşık % 0,5'den başlayarak % 0,9'a kadar yükselmesi durumunda, genleşme miktarında artma olmaktadır (Woods, 1968).



Şekil 5. Çimentodaki alkali miktarının alkali silika genişlemesine etkisi (Woods, 1968).

Beton alkalinitesi arttıkça ASR potansiyeli de artar. Kanada ve Avrupa'da beton alkalinitesi bir kavram olarak ele alınmakta, ASR kontrolü için beton alkalinitesi ile ilgili sınırlamalar oluşturulmaktadır. Bu kriter ana bağlayıcı olarak portland çimentosu kullanılan betonlar için iyi bir kriterdir ve mineral katkıların kullanıldığı betonlar için de uygulanabilir. Beton alkalinitesinin kriter olarak kullanımı halinde en doğru yaklaşım, betonu oluşturan tüm bileşenlerin alkalinitesi göz önüne alınarak beton alkalinitesinin belirlenmesidir. Ancak genelde sadece çimento ve çimentolanma özelliği olan malzemelerin alkalinitesi gözönüne alınmaktadır. Çünkü diğer beton bileşenlerinin etkisi azdır. Sadece portland çimentosu içeren karışımlar için betonun toplam alkali içeriği aşağıdaki denklemde gösterildiği gibidir. Eğer betona katılan ve çimentolanma özelliği olan malzemeler veya kimyasal katkıları ile mineral katkıları varsa, bunlardan ileri gelen ilave alkali miktarı da göz önüne alınıp yukarıdaki eşitlikte belirlenen beton alkalinitesine eklenmelidir. Potansiyel bir alkali silika reaksiyonu (ASR) tehlikesi söz konusu olduğunda Kanada ve Avrupa ülkelerinde betondaki alkali miktarı 3 kg/m^3 ile sınırlanmaktadır (Farny vd. 1998). Şekil 6'da çimento dozajı ve çimentonun sodyum oksit (Na_2O) eşdeğeri %'sine bağlı olarak 1 m^3 betondaki alkali miktarı gösterilmiştir.



Şekil 6. Çimento dozajı ve çimentonun sodyum oksit (Na₂O) eşdeğeri %'sine bağlı olarak 1 m³ betondaki alkali miktarı (Hawkins, 1983).

Betonda kullanılan çimentonun alkali içeriğinin değişmesi, betonun hidroksil iyon konsantrasyonunu, betonun alkali içeriğini ve reaktif silis/alkali oranını değiştirir. ASR'nin neden olduğu genleşmenin azaltılması için düşük alkalili çimento kullanımı genelde kabul gören ve başarılı olan bir methodudur. ASTM C 150'de düşük alkalili çimento olarak Na₂O eşdeğeri % 0.60'dan az olan çimentolar kabul edilir. Düşük alkalili çimento kullanılsa bile;

- Betonda su veya bağıl nemin hareketi sonunda belli noktalarda alkali konsantrasyonu oluşursa,
- Agregası aşırı derecede reaktif ise,
- Betonda kullanılan mineral ve kimyasal katkılardan, karma suyu ve agregadan yeterli miktarda alkali ilavesi söz konusu oluyorsa,
- Çimento dozajının çok yüksek olması nedeniyle beton alkalitesi çok yükseliyorsa, ASR tehlikesi söz konusu olabilir (Farny vd. 1998).

1.2.3.2. Agregadaki Reaktif Silis

Betonda ASR'nin oluşabilmesi için herhangi bir formda reaktif silisin bulunması gerekmektedir. Reaktif silis, oldukça farklı doku ve kristal yapısı sergiler. Silisin doku farklılığı, kayaçlaşma sürecinde azalan soğuma hızına bağlıdır. Agregadaki silisli mineraller kayaç oluşum sürecinde soğuma hızına bağlı olarak camsı (kristalleşmemiş) yapıdan kripto kristal, mikro kristal ve kristal yapıya kadar geniş bir aralığa dağılırlar. Kimi durumlarda kuvars kristallerinin oluşumu sırasında içsel gerilmeler oluşur. Bu tür kuvars mineralleri içeren agregalar reaktiftir. Günümüzde, reaktif agregaları ve mineralleri tespit etmek petrografik incelemelerle mümkün olmaktadır. Tablo 2'de reaktivite seviyelerine göre mineral ve kayaçlar verilmiştir.

Silis mineralleri, büyük oranda, normal hava sıcaklığında kararlı olmayan polimorfik oluşumlara sahiptir. Bileşiminde silis bulunan ve en yaygın olan mineraller kuvars, tridimit, kristobalit, opal ve kalsedon gruplarıdır. Farklı agregaların reaktiviteleri, içerdikleri kristal yapıdaki silis minerali miktarına bağlıdır. Opalin kristal yapısı düzensizdir. Bu nedenle alkalinitesi yüksek çözeltilerden diğer silis içeren agregalara göre daha fazla etkileneceğinden en yüksek reaktiviteye sahip agrega türü olarak tanımlanır. Diğer taraftan doğal halde bulunan kuvars, çok düzenli bir kristal yapısına sahiptir ve normal olarak alkali reaktif değildir. Volkan camları, mikro ve kriptokristalin kuvars, kalsedon, tridimit ve kristobalit ise orta derecede reaktif mineral olarak tanımlanmıştır. Andezitte ise reaktif özelliğe sahip volkan camı bulunmaktadır. Genelde bazaltlar silisçe doymuş (Toleyit veya toleyitik bazalt) ve silisçe doymuş olmayan (Alkali bazalt) bazaltlar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Tablo 2. Reaktivite seviyelerine göre mineral ve kayaçlar (Ramyar ve ark. 2002).

Reaktivitedeki azalmaya göre silis mineralleri	Reaktivitedeki azalmaya göre kayaçlar
Amorf silis	Tüfler dahil volkanik camlar
Opal	Metakuvarsit metamorfize kumtaşları
Stabil olmayan kristalin silis	Granit gnayslar
Çört	Deforme olmuş granit gnayslar
Kalsedon	Diğer silis içeren metamorfik kayaçlar
Silisin diğer kriptokristalin formları	Silisli ve mikalı şist ve filitler
Metamorfik olarak ayrılmış ve bozulmuş kuvars	İyi kristalize olmuş volkanik kayaçlar
Deforme olmuş kuvars	Pegmatik volkanik kayaçlar
Yarı kristalleşmiş kuvars	Silis içermeyen kayaçlar
Saf kuvars	

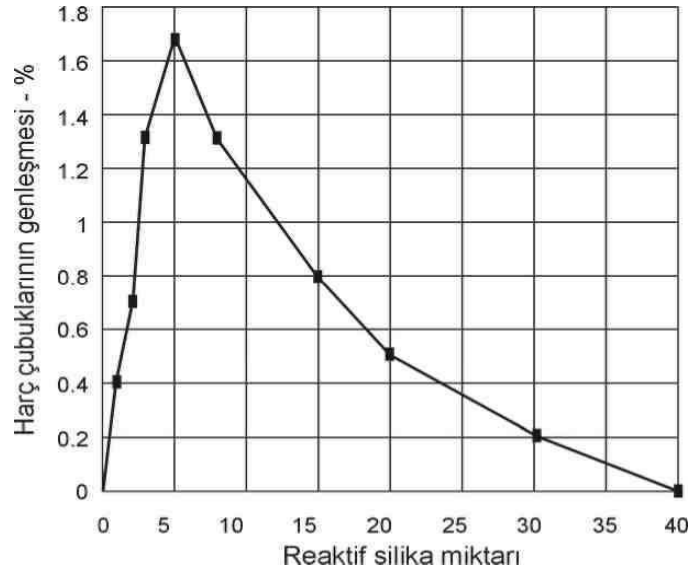
Toleyitik bazaltların hamuru çoğunlukla volkan camından oluşması nedeni ile literatürde reaktif agrega olarak tanımlanmaktadır. Bozunmuş bazaltlarda, klorit ve kil mineralleri (simektit grubu), alkali silis reaksiyonu sonucu alkali silis jele dönüşmektedir. Bunun sonucu olarak bazalt içeren harçlarda ve betonlarda çatlak gelişimleri meydana gelebilmektedir. Alkali silis reaksiyonunun ürünü, yüksek oranda su tutabilen alkali silis jelidir. Alkali silis jelin çevrenin nemini içine alması ile betonda, hacimce % 2-3 seviyesine kadar genişleme meydana gelebilmektedir. Genleşme sonucu, donatısız kütle betonlarında, kaplama betonlarında çekme dayanımının aşılması sonucu beton içinde ve yüzeyinde kırıklar ve çatlaklar gelişebilmektedir (Andıç, 2002).

Alkali-silika reaksiyonu açısından kayaçların reaktivitedeki azalmaya göre sıralanması:

- Tüfler dâhil volkanik camlar (özellikle fazlaca silis içerenler)
- Metakuvarsit metamorfize kumtaşları
- Ayrılmış granitik gnayslar
- Deforme olmuş granitik gnayslar
- Diğer silis içeren metamorfik kayaçlar
- Silisli ve mikalı şist ve filitler
- İyi kristalize olmuş volkanik kayaçlar
- Pegmatitik (kabaca kristalize) volkanik kayaçlar
- Silis içermeyen kayaçlar

Bazı durumlarda ASR'nin sebep olduğu beton genişmesinin miktarı, agregadaki reaktif bileşenin artışı ile artmaktadır. Buna karşılık, diğer pek çok durumda, maksimum genişme oluşması, diğer şartlar aynı kalmak kaydıyla, agregada bulunan reaktif bileşen miktarının belirli bir değeri içindir. Agregadaki reaktif bileşenin bu sınır değerinden az ya da çok olması genişme miktarını azaltır. Bu durum literatürde “Sınır Değer Davranışı” olarak tanımlanmaktadır.

Herhangi bir agreganın en yüksek genişmeyi veren reaktif madde içeriği değeri, daha düşük su-çimento oranında ve daha yüksek çimento dozajlarında artar. Sekil 7’de 24 günlük genişme ile agregadaki reaktif silika miktarı arasındaki bağıntı gösterilmiştir.

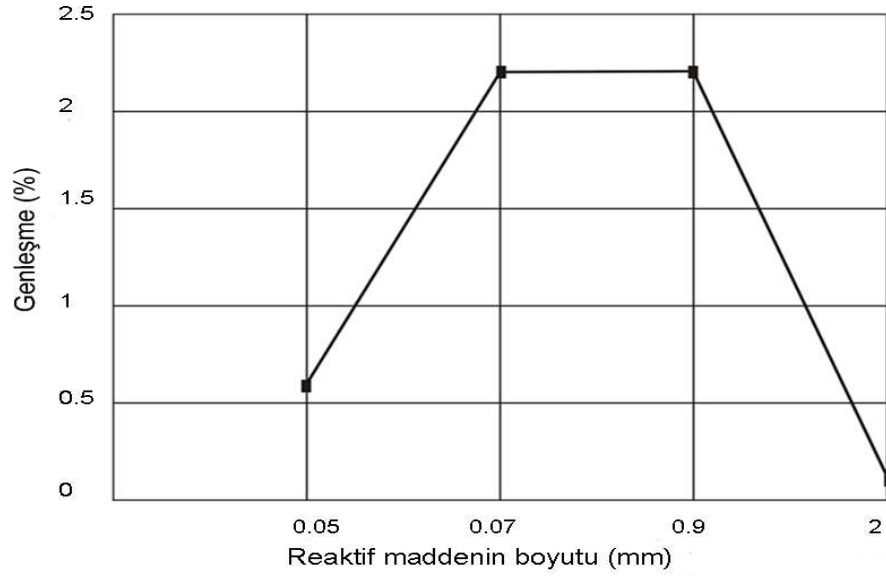


Sekil 7. 24 günlük genişme ile agregadaki reaktif silika miktarı arasındaki bağıntı (Vivian, 1950).

Şekilden görüleceği gibi reaktif silika miktarı % 5 oranına doğru arttıkça alkali agrega genişmesinde de artma olmaktadır. Ancak % 5 üzerindeki artma daha düşük genişmelere yol açmaktadır. Yüksek miktarlarda silika içeren ortamdaki alkali silika genişmesinin az olması, şu şekilde açıklanmaktadır. Ortamda mevcut olan alkali, fazla miktarda yer alan silisin tümü ile alkali silika reaksiyonu yapmaya yetmemektedir. O nedenle reaksiyonlar tam olarak gerçekleşmemektedir.

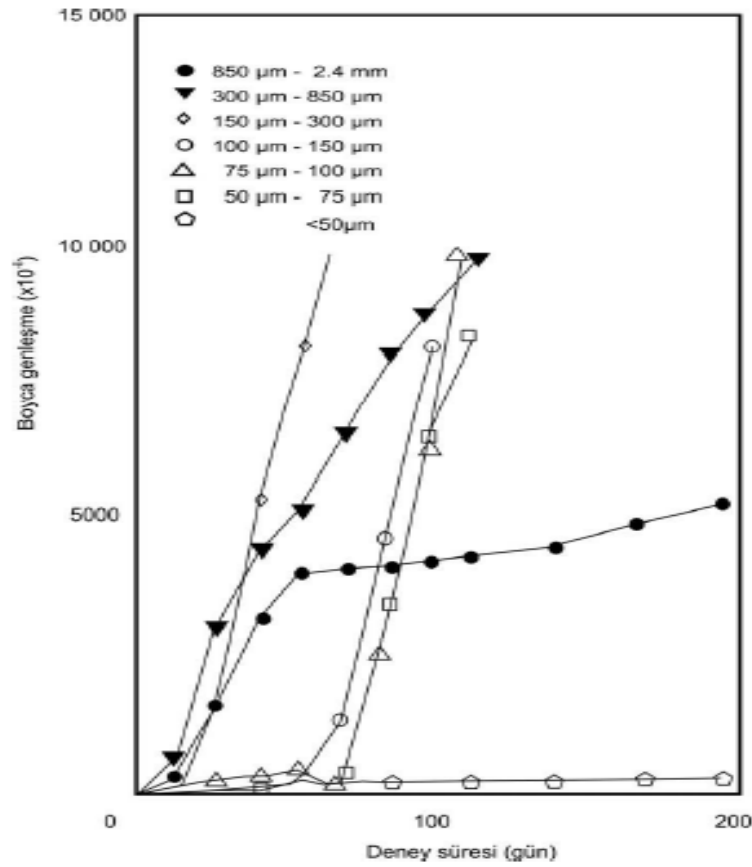
1.2.3.3. Agreganın Tane Büyüklüğü

Reaktif agreganın tane büyüklüğü de ASR sebebiyle oluşabilecek zararlar üzerinde etkilidir. Sınır değer davranışına benzer olarak, reaktif agregaların betonda maksimum genleşme verebilmesi için ideal boyutta olmaları gerekmektedir. Şekil 8’de agregadaki reaktif silika bileşeni boyutunun, alkali agreganın genleşmesine etkisi gösterilmiştir (Mindess ve Young, 1981). Büyüklüğü 75 μm ile 1 mm arasında değişen, hatta bazen 5 mm’ye kadar çıkabilen boyuttaki reaktif agreganın kullanılması durumunda genleşmenin maksimum olduğu görülmektedir. Ancak, 75 μm altındaki boyutlarda reaktif agreganın fazla miktarda bulunması halinde genleşme oluşmadığı halde reaksiyon delillerinin ortaya çıktığı gözlenmiştir. Reaktif agreganın boyutunun etkisi, reaktif agreganın fiziksel ve mineralojik karakterine de bağlıdır. Gözenekliliği fazla olan agreganın içine boşluk çözeltisinin girişi daha kolay olmakta ve reaksiyon alanı artmaktadır.



Şekil 8. Agregadaki reaktif silika bileşeni boyutunun, alkali agreganın genleşmesine etkisi (Mindess ve Young, 1981).

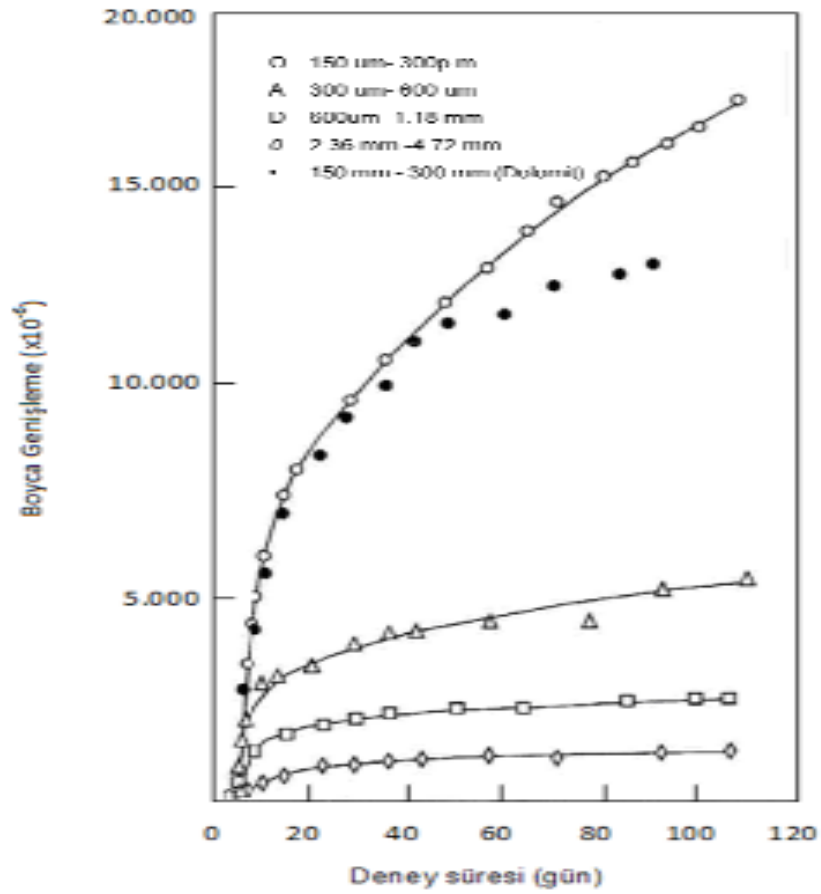
Reaktif agreganın opal yumrusu içeren harç prizmalarında yaptıkları deneylerde, en fazla boyca genleşmeyi 150-300 μm arasında tane boyuna sahip harç prizmalarında ölçmüşlerdir (Vivian 1951).



Şekil 9. Farklı reaktif agrega tane boylarına sahip harç prizmalarının boyca genişmesi (Vivian, 1951).

Diamond ve Thaulow (1974) reaktif agregaların tane boyunun, reaksiyon sonucu harç prizmalarının genişmesi üzerine etkisini incelemek amacıyla yaptıkları deneylerde, tane boyları 20-30 µm ve 53-74 µm aralıklarında değişen reaktif agregalar kullanmışlar ve en fazla boyca genişmenin, 20-30 µm arasında tane boyuna sahip harç prizmalarında meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Hobbs ve Gutteridge (1979) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise reaktif agrega olarak opal-A minerali içeren Beltane opalini kullanmışlardır. Deneylerde kullandıkları çimentonun Na₂O eşdeğeri %1.15'dir. 25x25x250 mm boyutlarındaki harç prizmalarında yaptıkları boyca genişme ölçümlerinde, en fazla genişmenin 150-300 µm arasında tane boyuna sahip harç prizmalarında meydana geldiğini belirlemişlerdir (Şekil 10).



Şekil 10. Farklı reaktif agrega tane boylarına sahip harç prizmalarının boyca genişlemesi (Hobbs ve Gutteridge, 1979).

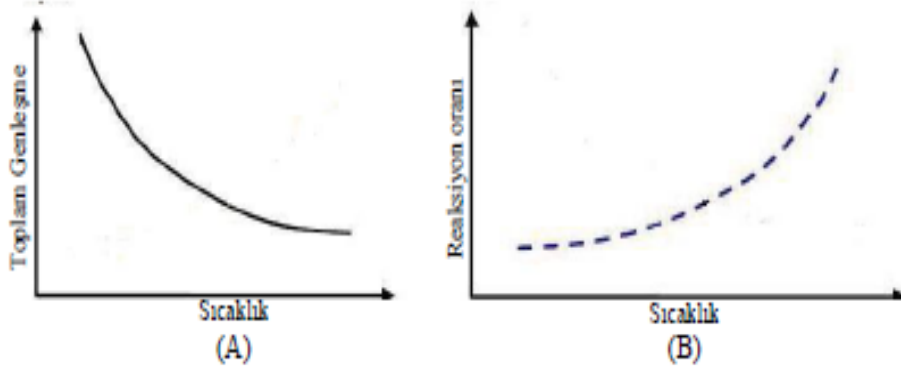
1.2.3.4. Ortam Sıcaklığı

ASR reaksiyonu diğer kimyasal reaksiyonlar gibi sıcaklık değişimlerine karşı oldukça duyarlıdır. ASR reaksiyon hızı sıcaklıkla artar. Sıcaklık etkisi agregaların büyük çoğunluğunda aşırı termal genişlemelere neden olur. Bazı agregalarla 13-20°C aralığında yapılan ASR genişleme ölçümleri sonuçlarının, 38°C'de yapılan ASR genişleme ölçümlerinden daha küçük genişleme değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Yüksek ve düşük sıcaklıkların genişlemeye etkisi agreganın yapısına da bağlıdır. Agreganın büyük çoğunluğu daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla reaktiflik göstermektedir.

Diamond ve ark. (1981) yaptıkları çalışmada, sıcaklığın ASR'ye etkisini 200°C ve 400°C'de kapalı ortamda incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek sıcaklıklarda kürlenmiş betonlar ve harçlarda oluşan reaksiyon ve genişleme daha erken başlayarak daha hızlı devam etmiştir. Zaman ilerledikçe, hem reaksiyonun hem de genişlemenin hızı

azalmıştır. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda kürlenmiş numuneler daha yavaş reaksiyona girmekte ve zamanla yüksek sıcaklıklarda kürlenmiş numunelerin gösterdiği genleşmelere yaklaşmakta ya da aşmaktadır.

Locher (1973) yaptığı bir çalışmada, sabit alkali içeriği kullanarak sıcaklığın genleşmeye etkisini belirlemiştir. Sıcaklık belli bir aralıkta (38°C - 40°C) olduğu halde ASR genleşmelerinin yüksek oranda geliştiği görülmüştür. Yapılan bir diğer çalışma ile birlikte Şekil 11'de a ve b'de sıcaklık ile toplam genleşmenin ve reaksiyon oranı ilişkisi gösterilmektedir. Sıcaklık arttıkça toplam genleşmenin azaldığı ve reaksiyon oranının arttığı görülmektedir.

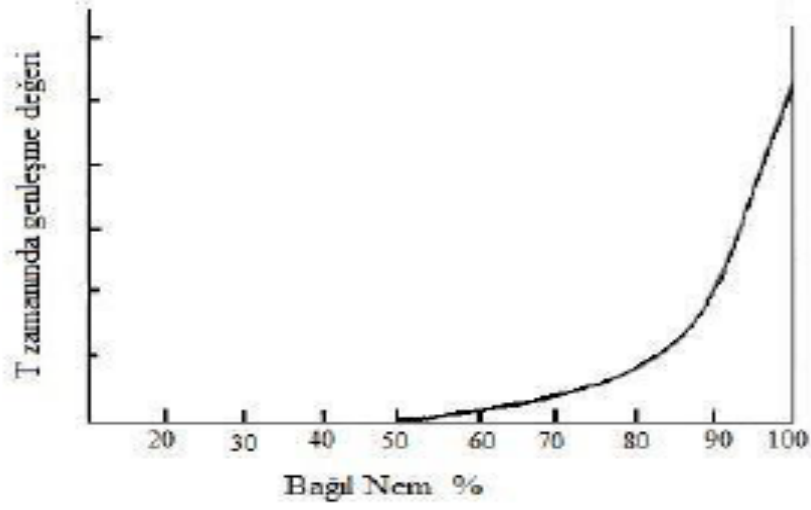


Şekil 11. Sıcaklığın, genleşme ve reaksiyon ile ilişkisi a) Sıcaklık - toplam genleşme ilişkisi b) Sıcaklık - reaksiyon oranı ilişkisi (Locher, 1973).

1.2.3.5. Yeterli Nem

ASR'nun oluşmasında alkali ve silis olmak üzere iki ana faktörün bulunmasının yanı sıra, oluşan jelin genleşmesi için yeterli nemin bulunması gerekmektedir. Nem, alkali iyonlarının reaksiyon bölgelerine göçünü kolaylaştırır ve oluşan jel ürünü nem alarak genleşir. Servis ömrü boyunca nem etkisinde kalmayan yapılarda zararlı ASR çatlakları görülmemiştir. Araştırmalar, genleşen ASR'nun 21-24°C sıcaklık aralığında, bağıl nemin %80 üzerinde olduğu durumda oluştuğunu göstermiştir.

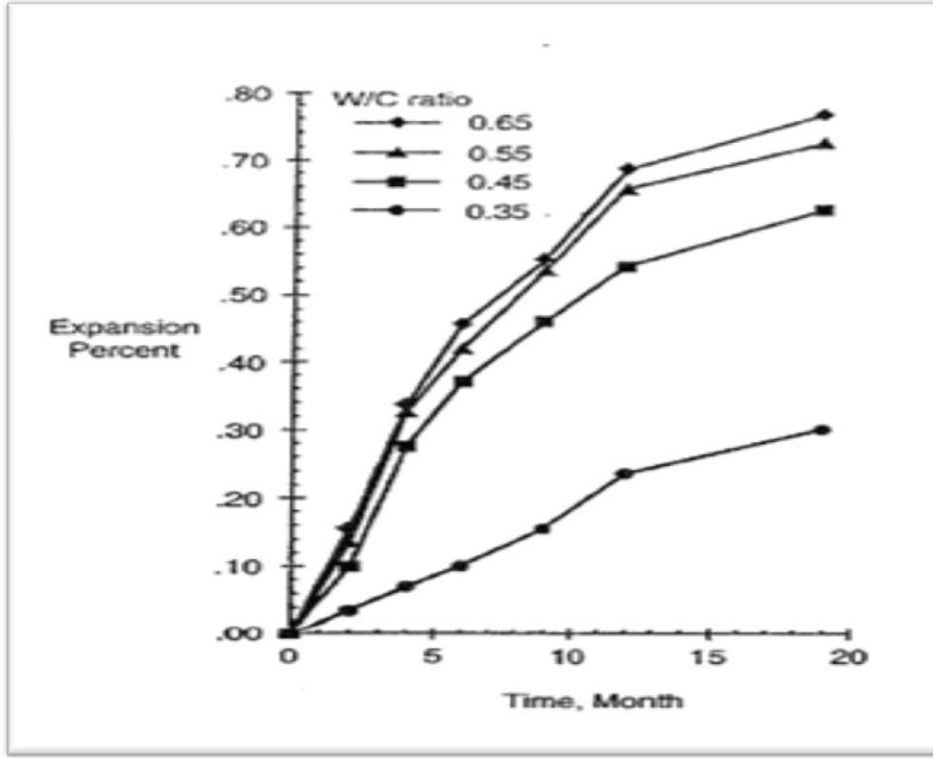
Şekil 12'de alkali silis reaksiyonunun etkisiyle oluşan genleşmenin ortamın bağıl nemine göre değişimi görülmektedir. Düşük nem yüzdelerinde ASR genleşmeleri görülmemektedir. Ancak nem yüzdesi %80'den fazla olduğunda genleşmelerin hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir (Swamy, 1992).



Şekil 12. Ortam bağıl neminin ASR genleşmelerine etkisi (Swamy,1992).

1.2.3.6. Su/Çimento Oranı

Düşük su/çimento oranı beton üzerinde olumlu etkilere sahiptir. Düşük su/çimento oranı sayesinde beton geçirimsiz ve daha boşluksuz bir yapı kazanmaktadır. Su/çimento oranının beton üzerinde bu olumlu etkilerinin yanı sıra ASR üzerinde de olumlu etkileri bulunmaktadır. Düşük su/çimento ve agrega/çimento oranlarının seçilmesi ASR genleşmelerini bir miktar azaltmaktadır. Bu durum Şekil 13’ de görülmektedir.



Şekil 13. Su/Çimento Oranı-Genleşme Yüzdesi Grafiği

1.3. Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Betonun kullanım amacı ve maruz kalacağı çevre şartları göz önünde bulundurularak çimento tipi ve mineral katkı kullanımına dair karar verilmesi gerekmektedir. Mineral katkıları, kendi başına bağlayıcı özellik taşımayan, ince öğütüldüğünde ve nemli ortamda çimento hidrasyonu sonucu açığa çıkan kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliğine sahip bileşenler oluşturan silisli veya silisli-alüminli malzemelerdir. Mineral katkı olarak uçucu kül, silika tozu, yüksek fırın cürufu, doğal puzolanlar, zeolit, metakaolin kullanılan maddelerdir.

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

Puzolanlar, çimento harcının kirecini tutarak ortamın pH derecesini indirger ve silisin çözünürlüğünü azaltarak ASR genleşmelerini ve jel oluşumunu engeller. Puzolanların bir diğer faydası da sağladıkları geçirimsizliktir. Jel yapısında daima CaO mevcuttur. CaO

oluşmaması, jelin oluşmayacağını gösterir. Puzolanların CaO'ü bağlayarak da jel oluşumunu önledikleri söylenebilir. ASR genleşmelerini kontrol eden mineral katkı maddelerinin etki mekanizmaları konusunda aşağıdaki teoriler öne sürülmüştür.

- Çimentodan daha az reaktif olan katkı, ortama hızlı alkali veren portland çimentosu yerine kullanıldığında seyreltici olarak görev yapar. Örneğin, çimentonun yerine % 50 oranında cüruf kullanıldığında, cürufun bünyesindeki alkalilerin ancak yarısı bir yıl içerisinde reaksiyona girer. Dolayısıyla, su/çimento oranı aynı olan sadece çimentodan üretilmiş bir kontrol numunesine kıyasla cürufllu karışımın boşluk çözeltisindeki alkali miktarı da daha düşük olur.
- Katkılı çimento içeren sistemlerin hidratasyon ürünleri de normal çimentolu sistemlere göre farklılık gösterir. Bu tür karışımlardaki hidratasyon ürünleri, alkalileri bağlamada daha etkindir. Portland çimentosu içeren karışımların hidratasyon ürünü olan C-S-H'nin tipik Ca/Si oranı 1.8'dir. Cüruf, uçucu kül, silis dumanı gibi katkılar ortama girdiklerinde, C-S-H'nin Ca/Si oranını düşürür. Ca/Si oranı düştükçe, C-S-H ürününün yüzey şarjı pozitiften negatife doğru değişim gösterir ve alkaliler gibi katyonları bağlama yeteneği kazanır.
- Katkılı çimentolu karışımlardan elde edilen betonların geçirimsizliği düşük olduğundan alkalilerin reaktif agregaya ulaşması bir miktar önlenmiş olur.
- Katkılar, çimento hamurunun Ca(OH)₂ içeriğini azaltır ve dolayısıyla pH'ını düşürür.
- Katkılı sistemlerdeki dayanım artışı, oluşan ASR gerilmelerine karşı betona direnç kazandırır.

1.3.1. Uçucu Külün Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Elektrik enerjisi üreten termik santrallerde kullanılan taşkömürünün %10-15'i, linyit kömürünün ise %20-50'si kül olarak ortaya çıkmaktadır. Yanma sonucu ortaya çıkan külün %75-85'i baca gazları ile kazandan çıkar ve bu atıklar "uçucu kül" olarak tanımlanırlar.

Boyutları genellikle 0.5 ile 200 mikron arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır. Spesifik yüzeyleri 1800-5000 cm²/gr arasında değişmekle birlikte, ortalama 2800-3800 cm²/gr dolayındadır. Uçucu külün yoğunluğu;

inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu $2.2 - 2.7 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır.

Uçucu külün ASR reaksiyonu üzerinde etkisi, uçucu külün ve kullanılan çimentonun kimyasal ve mineralojik özellikleri ile agreganın reaktivite derecesine bağlı olarak değişiklik gösterir. Yavaş reaksiyona giren agregalar için kullanılan çimentonun kütleye %20-%30'u oranında uçucu küle yer değiştirmesi halinde betonda ASR nedeniyle ortaya çıkabilecek genleşmelerin azaldığı görülmüştür.

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

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

1.3.2. Silis Dumanının Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

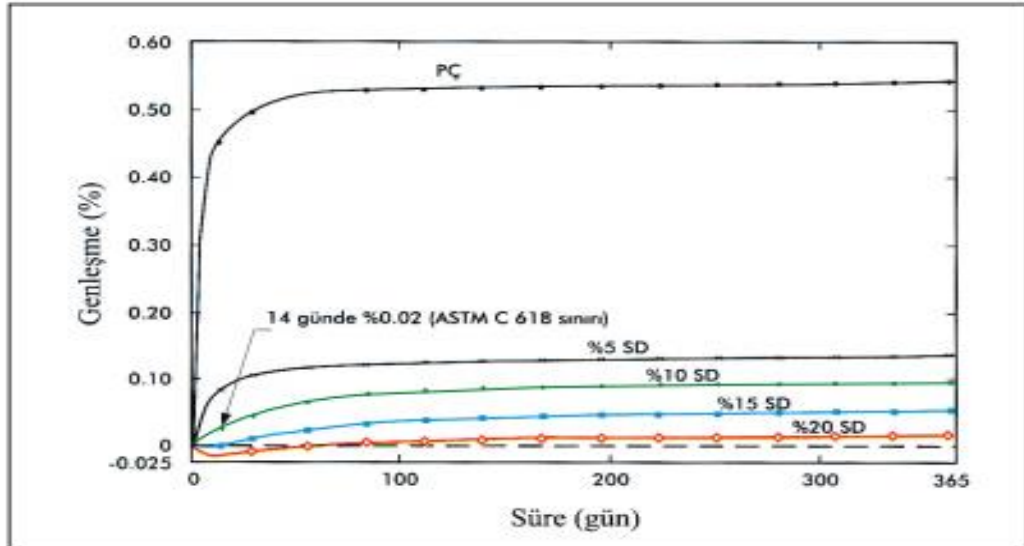
Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen, ana bileşeni $1 \mu\text{m}$ 'den küçük, küresel, amorf, camsı silis (SiO_2) partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür.

Silis dumanı çok ince öğütülmüş parçalar içermektedir. Parçaların büyük çoğunluğunun boyu $0.1-0.2 \mu\text{m}$ arasındadır. Nitrojen emme yöntemi ile ölçülen özgül yüzeyi çoğunlukla $130000-280000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ arasında değişmektedir. Betonda kullanılan silis dumanı özgül yüzeyi $200000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ civarındadır. Beton için uygun olan silis dumanlarının özgül ağırlıkları $2.2-2.3$ arasındadır. (Portland çimentosunun özgül ağırlığı 3.1 civarındadır).

Silis dumanı, yoğun ve geçirimsiz bir yapı oluşturarak su ve alkalilerin hareketini önler. Geniş özgül yüzeyi ile alkalileri bağlayarak boşluk çözeltisinin alkali

konsantrasyonunu düşürür. Ayrıca silis dumanının amorf halde bulunan silis içeriği, çimento yerine kullanıldığında, beton henüz tazeyken çimentonun alkalileri ile reaksiyona girer. Bu reaksiyonun beton taze iken hızla oluşmasının sebebi, silis dumanının inceliğinin çok yüksek olmasıdır. Yeterli miktarda silis dumanı kullanıldığında, beton gerekli dayanımı kazanmadan önce çimento ve silis dumanı tarafından ortama salıverilen sodyum ve potasyum iyonlarının büyük kısmı reaksiyon sırasında tükenir. Betonun dayanım kazanmasından önce gelişen bu reaksiyon zararlı genleşmeler ve çatlaklara yol açmaz (Andıç, 2002).

Perry ve Gillott'a göre opal türü bir agrega ile kullanıldığında silis dumanı çimentonun %20'si gibi yüksek bir oranda katılması halinde genleşmeyi kontrol altına almakta, %5 gibi az miktarda katıldığında ise genleşmeyi arttırarak daha zararlı olmaktadır. Silis dumanının yeterli miktarda katılması kadar uygun bileşimde olması da önemlidir ve puzolanik aktivitesi ile bu reaksiyonu önlemedeki etkinliği arasında güvenilir bir korelasyon bulunmamaktadır. Farklı mineral katkıları ve deney yöntemleri ile yapılan çalışmalarda çimentonun en az %10'u yerine katılan silis dumanı, alkali-silika reaksiyonunu kontrolde en etkili olmuştur. Hooton'a göre de ASTM C 441 deneyi uygulanan yüksek alkalili bir çimentonun en az %10'u yerine silis dumanı katıldığında genleşme 14 günde %0.02'nin altına çekilebilmiştir (Şekil 14).



Şekil 14. Silis dumanı katkısının ASTM C 441 deneyine göre harç çubuklarının genleşmesine etkisi (R.D. Hooton, 1993).

Özet olarak, silis dumanı çimentonun yeterli bir bölümü yerine katılması halinde alkali-silika reaksiyonunun kontrolünde genellikle diğer puzolanlardan daha etkili olabilmektedir. Ancak, kullanılacak silis dumanı ile agreganın önceden birlikte denenmesi önerilmektedir.

1.3.3. Yüksek Fırın Cürufunun Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Yüksek fırın cürufu (YFC), demir-çelik tesislerindeki yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında açığa çıkan bir yan üründür. Demir cevherinden demir üretimi esnasında, yüksek fırında kireçtaşı veya dolomit varlığında erimiş cüruf oluşur. Bu cüruf, erimiş haldeki demirin üzerinden akar ve ayrık halde depolanabilir. 1500-1600°C sıcaklığındaki eriyik cüruf yaklaşık olarak, %30-40 oranında SiO₂ ve %40 oranında CaO içerir, bu portland çimentosu kompozisyonuna benzemektedir. Çukurlarda yavaşça soğutulursa kristalleşerek melilit veya mervinit minerallerini oluştururlar. Bu mineraller çok az hidrolik değer taşıdığından beton agregası veya yol temel tabakası olarak kullanılabilir. Suda granüle edilerek (peletleme yöntemi ile) hızlıca soğutulduğunda camsı bir yapı oluşturur. Bu camsı yapı kurutularak öğütüldüğünde hidrolik özellik kazanır.

En kritik silis/alkali oranında ASR sebebiyle oluşabilecek genleşmeler, betonun birim hacminde bulunan toplam hidroksil iyonu konsantrasyonuna bağlıdır. Bu sebeple yüksek alkalin portland çimentosunun bir kısmının yüksek fırın cürufu ile yer değişimi sonucu betonda mevcut alkali iyon konsantrasyonundaki değişimler genleşmeleri de etkilemektedir. Yüksek fırın cürufunun inceliği, priz süresi, kötü sıkıştırılma sebebiyle hapis olan hava miktarı ve dayanım artışı gibi diğer parametreler de YFC kullanılan betonlarda ASR genleşmelerini etkiler. YFC'nun toplam alkali içeriği (asitte çözünebilir alkali) Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 3. Yüksek fırın cürufu alkali ve efektif alkali içerikleri (Hobbs,1988).

Tablo YFC	Asitte çözünebilir Na ₂ O: %	Asitte çözünebilir K ₂ O: %	Eşdeğer Na ₂ O içeriği: %	Efektif eşdeğer Na ₂ O içeriği: %
A	0,31	0,40	0,57	0,25
B	0,27	0,44	0,56	0,30
C	0,28	0,54	0,64	0,40-0,45
D	0,52	0,68	0,97	0,50

1.3.4. Doğal Puzolanların Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi

Puzolanların genişleme yaratan reaksiyonlara karşı etkili oldukları bilinmektedir. Kireç-puzolan reaksiyonunda boşluk çözeltisi pH'nın düşmesi sonucu puzolanlar etkili olur. Ayrıca, reaktif puzolanlar alkalilerle reaksiyona girerek alkalileri tüketirler ve genişleme yaratmayan ürünler oluştururlar. Puzolanların ASR'ünü azaltmadaki etkisi, puzolanların reaktivitesine bağlıdır ve bu etki çimento yerine kullanılabilen miktarı belirler.

Bir portland çimentosu ve puzolan karışımı reaksiyona girdiği zaman, bu reaksiyon, sönmüş kirecin ve alkalilerin, ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) oksitleri ile asit-baz reaksiyonu biçiminde tepkimeye girmesiyle meydana gelir. Bu bağlamda iki olay gerçekleşir: birincisinde, serbest sönmüş kireç miktarı zamanla azalır, ikincisinde de, portland çimentosunun hidratasyonu esnasında ortaya çıkanlara benzer biçimde, C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) ve kalsiyum-alumino-silikat miktarlarında artış olur. Çimento hamurunda gözenek yapısındaki iyileşme (azalma) biçiminde fiziksel olarak kendini gösteren puzolanik reaksiyonun, kimyasal dayanıklılık ve mekanik dayanımdaki artışın nedeni olduğu belirtilmektedir. Doğal puzolanlar, ekonomik kazanç sağlamak veya erken hidratasyon ısısını azaltmak, ileri yaşlardaki dayanımı arttırmak, alkali agrega reaksiyonu tahribatına veya sülfat tahribatına direnci arttırmak, su sızdırmasını azaltmak ve zararlı çözeltilerin beton içine sızmasına karşı direnci arttırmak amaçları için portland çimentosuna veya katkılı portland çimentosuna belirli oranlarda karıştırılabilirler.

Son yıllarda harç ve betonda puzolanik malzeme olarak metakaolin formunda kalsine kilin kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır. Bunun yaygınlaşmasının nedeni, atık ve endüstriyel yan ürünlerin kullanımının, portland çimentosu tüketimini minimize etmesi ve çevresel zararları azaltmasından kaynaklanmaktadır. Diğer bir neden ise, puzolanik malzeme içeren harç ve betonun durabilite özelliklerinde önemli derecede gelişme görülmesidir.

1.3.4.1. Metakaolinin Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi

Metakaolin saf haldeki kilin yaklaşık 700°C sıcaklıkta 30-60 dk tutulması ve bağlı suyunun tamamen buharlaştırılması ile elde edilir.

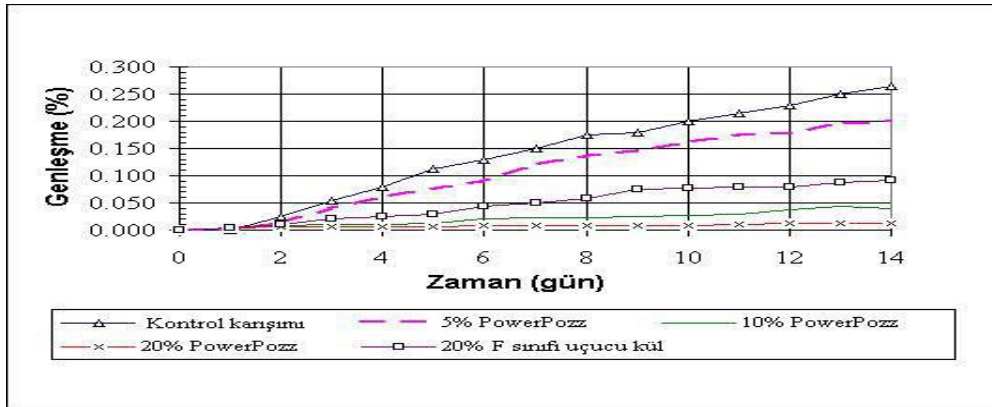
Özellikle beyaz çimentolu sistemlerin dayanıklılık yönünden gelişmesine büyük katkıları olan metakaolin'in temel özellikleri;

- Yüksek miktarda amorf silis içermesi
- Beyaz renkli olması
- Alkali-silika reaksiyonu, sülfat saldırısı ve çiçeklenme gibi durabilite sorunlarını önlemesi
- Beton elemanlara geçirimsizlik özelliği katmasıdır.

Metakaolin'in Temel Özellikleri: %50-55'i SiO_2 %45-50'si Al_2O_3 'den oluşmaktadır. Yüzey alanı çimentoya benzer $1500-2500 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 'dir. Yoğunluğu yaklaşık 2.5 gr/cm^3 'tür. Ortalama Tane Boyutu 2 mikronun altındadır.

Agregada yer alan reaktif silis ile çimentoda bulunan alkalilerin reaksiyonu sonucu zararlı genleşme potansiyeline sahip alkali-silika jeli oluşur. Metakaolin hem çimentoyu seyreltmesi hem de reaksiyonda kullanılan CH 'ı yok etmesi sebebiyle söz konusu reaksiyon ihtimalini azaltmaktadır.

Çimento yerine etkin miktarda kullanıldığında betonun boşluk suyunda $(\text{OH})^-$, $(\text{Na})^+$, $(\text{K})^+$ iyonlarının konsantrasyonlarını azaltarak pH değerini düşürür ve permabiliteyi azaltır. Bu özellikleri nedeni ile son yıllarda ASR genleşmelerini engelleyen mineral katkılarına alternatif olarak düşünölmeye başlanmıştır. Şekil 15'de Power Pozz olarak adlandırılan bir yüksek reaktiviteli metakaolinin genleşmeyi azaltıcı etkisi F sınıfı uçucu külle karşılaştırmalı olarak görölmektedir (Tosun, 2001).



Şekil.15 %5-10-20 oranlarında çimento yerine kullanılan power pozz metakaolinin zamana bağlı olarak genleşme üzerindeki etkisi (Tosun, 2001).

1.4. Kimyasal Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Alkali silika reaksiyonunun zararlı etkisini azaltmak için kullanılan katkılardan biri de lityum tuzlarıdır. Betonda LiOH kullanıldığında, normalde yüksek olan (OH)⁻ iyon konsantrasyonunu yükseltmektedir. LiOH'in ASR genleşmelerini azaltıcı etkisinin ortaya çıkarılabilmesi için, ASR jelinin genleşme potansiyelini azaltan, Li⁺ iyonlarının jel ile yeterince birleşebilmesi ve bu ters etkinin karşılanması gerekmektedir. Bunun için de LiOH dozunun, oluşan ASR jelinin yapısına katılan ve zararlı genleşmeleri önleyen lityum miktarının, pH'daki yükselme sebebiyle oluşan zararlı etkiyi yenebilmesine imkân verecek düzeyde ayarlanması gerekmektedir. Ayrıca, çimento hidrasyonu esnasında lityum iyonlarının bir kısmı hidrasyon ürünlerinin bünyesine katılmaktadır. Bu iki sebepten dolayı yeterli miktardan az kullanılan LiOH, tam tersine genleşmeleri arttırmaktadır (Andiç, 2002, Diamond, 1999).

Mc Joy ve Caldwell (1951), çeşitli kimyasal katkıların ASR üzerindeki etkilerini inceleyen ilk araştırmacılarıdır. Araştırmada, pıreks camı ile Na₂O eşdeğer içeriği %0.57 ve %1.15 olan iki tip çimento kullanarak ASTM C227 harç çubuğu metodu uygulanmıştır. Tablo 4'de yüksek alkalın çimento ve farklı oranlarda çeşitli kimyasal katkıları içeren karışımların 8 haftalık periyot sonunda kontrol numunesine kıyasla genleşmelerdeki azalmaları verilmiştir. Bazı bakır ve amonyum tuzlarının etkili olduğu, ancak en iyi sonucu lityum tuzlarının verdiği görülmektedir.

Tablo 4. Bazı kimyasal katkıların ASR üzerindeki etkileri (Mc Joy ve Caldwell, 1951).

Kullanılan Kimyasal Katkı	8 Haftalık Genleşmedeki Azalma (%)
Aleminyum tuzu	75
Ba karbonat	3
Ca karbonat	-6
Cr fosfat	9
Cu klorür	29
Cu sülfat	46
Li klorür	34
Li klorür	88
Li karbonat	62
Li karbonat	91
Li florid	82
Li nitrat	20
Li sülfat	48
Na klorür	15
Na karbonat	44
NH ₄ karbonat	38
Zn karbonat	34

1.4.1. Lityum Karbonatın Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi

Lityum karbonat doğal olarak zabuyelit mineralinde bulunur, 1987 yılında Tibet gölü olan Zabuye'de bulunmuştur, ancak son derece nadirdir. Şili ve Arjantin'deki mineral püskürükleri ve göllerde bulunan lityum klorür gibi maddelerden eldesi oldukça kolaydır.

Lityum karbonatın kullanımı, iyi bilinmeyen bir madde için şaşırtıcı derecede çoktur. Yapı kimyasalları, cam, seramik ve emaye endüstrileri için hammadde olarak kullanılır. Diğer lityum bileşiklerinin üretiminde kullanılan ana maddedir. Kaynak elektrotları imalatı, alüminyum elektrolizinde de katkı olarak kullanılır. Ayrıca betonda alkali silika reaksiyonu sebebiyle oluşacak zararların engellenmesi için kullanılmaktadır.

Sakaguchi vd. (1989), normal portland çimentosu, pireks camı ve andezit reaktif agrega kullanarak çimento alkali içeriğini %1.2 Na₂O eşdeğerine ayarlamış ve kontrol numunelerinde yüksek genleşmeler gözlemlemiştir. Araştırmacı, karışımlara farklı oranlarda LiOH, LiNO₃, ve Li₂CO₃ eklediğinde lityum iyonlarının, alkali iyonlarına oranının 0.9'un üzerinde olması halinde ASR sebebiyle oluşan genleşmelerin tamamen durdurduğunu belirlemiştir. Ayrıca araştırmacılar, LiNO₃ kullandığı harç örneklerinin

boşluk çözeltisini incelediğinde zamanla lityum iyon konsantrasyonunda azalma olduğunu, fakat sodyum ve potasyum iyon konsantrasyonlarının sabit kaldığını gözlemlemiştir.

Feng vd (2005), çalışmasında lityum tuzlarının etkinliği ile ilgili bazı araştırmaların sonuçlarını derlemiştir;

- Araştırılan 11 çeşit lityum tuzu, LiF, LiCl, LiBr, LiOH, LiOH.H₂O, LiNO₃, LiNO₂, Li₂CO₃, Li₂SO₄, Li₂HPO₄ ve Li₂SiO₃ betonda oluşabilecek ASR genleşmelerini azaltma yönünde etkilidir.
- Lityum tuzunun ASR genleşmelerini azaltıcı etkisi, agreganın tipine ve reaktivitesine, kullanılan lityum tuzu miktarına, lityum tuzunun tipine ve ortamın alkalinitesine bağlıdır.

Ortama eklenen lityum tuzunun yaklaşık yarısı hidrate olan çimento tarafından emilir. Lityum iyonunun C-S-H tarafından tutulması, sodyum ve potasyumdan daha fazladır. Dolayısıyla, eklenen lityumun sadece yarısı ASR genleşmelerini azaltmada etki göstermektedir.

- ASR hasarını önlemede gerekli minimum lityum/alkali molar oranı lityum tuzlarının çoğu için 0.67 ile 1.20 arasındadır. LiNO₃ için bu değer, 0.72-0.93 aralığındadır.
- Lityum hidroksit ve lityum nitrat, yüksek reaktif agregalarla kullanıldığında, yavaş genleşen agregalarla kullanımına kıyasla, genleşmeleri azaltmada daha etkin olmuştur.
- Lityum nitrat tuzlarının diğer lityum tuzlarına göre üstün yanı, betonun boşluk çözeltisinin hidroksil iyon konsantrasyonunu arttırmamasıdır. Bu sebeple, diğer lityum tuzlarında görülen kötümser oran, lityum nitrat için geçerli değildir.

Lityum tuzlarının ASR genleşmelerini azaltma mekanizması ile ilgili pek çok farklı görüş ve teori öne sürülmüştür. Bu teorilerden hangisinin etkili olduğu kesinlik kazanmamıştır.

1.5. Alkali-Silika Reaksiyonunu Belirlemek Amacıyla Kullanılan Deneysel Yöntemler

ASR'nun belirlenebilmesi için birden fazla değişik deney metodu uygulanmaktadır. Bu deney metodları ASR'nun kimyasal özelliğinden faydalanılarak yapılan deneyler ve ASR'nun genleşme özelliğinden faydalanılarak yapılan deneyler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. ASR'nun tespiti için kullanılan deney metodları, deney metodlarının süreleri ve amaçları hakkında bilgiler Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5'de harç çubuk yöntemi (ASTM C 227), hızlı harç çubuk yöntemi (ASTM C 1260), kimyasal yöntem (ASTM C 289) ve beton prizma testi olmak üzere en çok kullanılan test metotları görülmektedir. Tüm bu metotlar incelendiğinde hızlı deney metotları arasında istatistiksel olarak en güvenilir test metodu hızlandırılmış harç çubuğu metodudur. Ayrıca uzun süreli metotlar arasında en gerçekçi sonuçları veren ise beton prizma metodudur.

Tablo 5. ASR için kullanılan test metotları

Test adı	Amaç	Test özelliği	Örnek türü	Test süreci	Ölçüm	Yorum
Harç çubuk yöntemi (ASTM C 227)	Çimento-agrega bileşenlerinin alkali kaynaklı genleşmelere açık olup olmadığını belirlemek	37.8 °C de su üzerinde yüksek bağıl nemde saklanan harç çubukları	En az 4 adet harç çubuğu (25x25x285 mm)	İlk ölçüm 14 gün sonra 1, 2, 3,4,5,6,9,12. aylar ve daha sonra gerekirse her 6 ayda bir	Uzunluk değişimi	Süre uzun genleşme ASR formunda olur
Hızlı harç çubuk testi (ASTM C 1293)	Agregada alkali-silis reaksiyon potansiyelini belirlemek	Harç çubuklarının 80 °C de alkali çözeltiye daldırılması	En az 3 adet harç çubuğu (25x25x285 mm)	16 gün	Uzunluk değişimi	Yavaş reaksiyon veren agregalarda kullanılır
Beton prizma testi (ASTM C 1293)	Çimento agregası bileşenlerinin potansiyel ASR genleşmesini belirlemek	37.8 °C de su üzerinde yüksek bağıl nemde saklanan harç çubukları	Çimento agregası karışımı 3 adet prizma (75x75x285 mm)	İlk ölçüm 7. gün sonra 28 ve 56 gün daha sonra 3.6.9. ve 12. aylar ve gerekirse her 6 ayda bir	Uzunluk değişimi	Uzun süre gerektiriyor
Kimyasal yöntem (ASTM C 289)	Silisel agregaların potansiyel reaktivitesini belirlemek	Alkali çözelti ile 80 °C de reaksiyona sokulur	3 adet 25 kg lık örnek, ufanmış ve elenmiş agregası	24 saat	Alkalilikte azalma ve çözülen silis miktarı	Çabuk sonuç, yüksek silisli bazı agregalar düşük genleşme verebiliyor
Çimento-agrega birleşimlerinin potansiyel hacim değişimi (ASTM C 342)	Çimento-agrega bileşenlerinin potansiyel ASR genleşmesini belirlemek	Su içerisinde 23 °C de saklanan harç çubukları	Çimento-agrega karışımı 3 adet prizma (25x25x285 mm)	52 hafta	Uzunluk değişimi	Uzun süre çoğunlukla Oklahama Kansasdaki agregalar için kullanılıyor
Alkali-silis reaksiyon kaynaklı aşırı beton genleşmelerinde mineral katkı etkisi (ASTM C 441)	ASR genleşmesi kontrolünde mineral katkıların etkinliğinin belirlenmesi	Pyrex camının agregası olarak kullanıldığı harç çubuklarının su üzerinde 37.8 °C de yüksek bağıl nemde tutulması	3 adet harç çubuk, 3 adet kontrol çubuğu (25x25x285 mm)	İlk ölçüm 14 gün sonra 1.2.3. 4.6.9. ve 12. aylar ve gerekirse her 6 ayda bir	Uzunluk değişimi	Yüksek reaktiviteli yapay agregası asıl agregaya benzemeyebilir
Doğal mineral agregaların bileşenleri (ASTM C 294)	Sık rastlanan ve önemli olan mineraller hakkında bilgi elde etmek	Görsel tanımlama	Farklı fakat kaynağı temsil edilebilir nitelikte	Kısa süreli örneğin gözle incelenebilecek kadar	Minerallerin tanımı ve miktarları	Açıklamalar bilinen agregası kaynaklarını meydana getiren doğal mineralleri tanımlar

1.5.1. Harç Çubuk Deneyi (ASTM C 227)

Harç çubuk deney yöntemi söz konusu agrega ile üretilen harç çubukları genleşmelerinin ölçülmesi esasına dayanır. Bu metot belirli şartlarda kürlenmiş 25x25x285 mm boyutlarında hazırlanan harç çubuklarının belirtilen süre sonucundaki boy değişimlerinin (genleşme yüzdesi) ölçülerek çimento-agrega kombinasyonlarının alkali kaynaklı genleşmelere açık olup olmadığını belirlemek için yapılır. Harç çubuk yöntemi (ASTM C 227) ile hızlandırılmış harç çubuk yöntemlerinde (ASTM C 1260) kullanılan harç çubukları aynı şekilde hazırlanmaktadır.

Harç çubuk yönteminde kullanılacak agregalar 8 -16, 16-30, 30-50 ve 50-100' nolu elek serilerinden elenerek Tablo 6'da verilen karışım oranlarında ve miktarlarında kullanılır.

Tablo 6. Harç çubuğu ve hızlandırılmış harç çubuğu yöntemleri için agrega elek analizi ve karışım oranları

Elek göz açıklığı (mm)		Ağırlıkça (%)
GEÇEN	KALAN	
4,75 (No.4)	2.36 (No.8)	10
2.36 (No.8)	1.18 (No.16)	25
1.18 (No.16)	0.6 (No.30)	25
0.60 (No.30)	0.3 (No.50)	25
0.30 (No.50)	0.150 (No.100)	15

Karışım su/çimento oranları, ASTM C 109 'Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars' da belirtilen esaslara uygun olarak belirlenir. Kırmataş ile harç çubuğu dökümü için gerekli malzeme karışım miktarları Tablo 7'de verilmiştir.

Harç çubuklarının üretiminde kullanılan çimentonun alkali içeriği en az %0.6 Na₂O eşdeğeri olmalıdır. Harç çubuklarının boy değişimlerini ölçmek için 7 mm çapında ve 32 mm boyundaki pirinçten üretilmiş pimler kalıplarda açılan deliklere yerleştirilmektedir.

En az 4 tane numune hazırlanır ve harç kalıplara yerleştirilirken iyice şişlenerek sıkıştırılmalıdır. Harç çubukları su üzerinde, % 100 bağıl nemde, 37.8°C’de kürlenir. 14 günden başlanarak belirli periyotlarla 12 ay veya daha uzun süre boy ölçümleri yapılır. ASTM C 33 standardına göre, reaktif olmayan agrega için genleşmeler altı ayda %0.10 ve üç ayda %0.5’in altında olmalıdır. Reaktif agregada farklılıkların anlaşılabilmesi için daha uzun süreli genleşmeler de kaydedilmelidir.

Harç çubuk deney metodu çimento-agrega kombinasyonunun alkali reaktivitesini ölçmede kullanılır bu metodun en büyük dezavantajı deney süresinin oldukça uzun olmasıdır ve ayrıca deney yönteminin koşullarının yeterince şiddetli olmamasıdır.

1.5.2. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C 1260)

İlk olarak Güney Afrika Ulusal Araştırma Bürosu (NBRI) tarafından uygulamaya başlanan bu metot numune agregalar kullanılarak elde edilen harç çubuklarının yüksek alkaliniteli çözeltide yüksek sıcaklıkta saklanması ve uzunluk değişimlerinin ölçülmesine dayanır. Bu yöntem daha uzun test sürelerine ihtiyacı ortadan kaldıran hızlı bir test metodudur.

Standartlara göre belirlenen agrega, kütlece çimentonun 2.25 katı kadar kullanılarak su/çimento oranı 0.47 olan harç karışımı hazırlanır. 25x25x285 mm boyutlarındaki kalıplara dökülen harç numuneleri 24 saat sonar kalıplardan alınarak ilk boyları ölçülür. Kalıp sökümünden itibaren 1 gün süreyle 80°C suda bekletilerek boy ölçümleri alınır. Daha sonra harç çubuklarının koyulacak olduğu alkali çözeltisi, 1 N NaOH çözeltisi, 900 ml saf suya 40 g sodyum hidroksit konularak hazırlanır. Bu çözeltiliye sodyum hidroksit çözeltisi denir. Bu çözelti 80°C de sabit sıcaklıkta tutulur ve hazır olan harç çubukları bu çözeltiliye konur.



Şekil 16. Kalıba dökülmüş harç çubuk numuneleri

Bu işlemten sonra devam eden 3, 7 ve 14. günlerde boy ölçümleri alınır. Birim boy değişim yüzdeleri belirlemek amacıyla aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

- $%L = (\Delta L : L) \times 100$
- Eşitlikte;
- % L = Boy Değişim Yüzdesi
- ΔL = Örneğin Boy Değişimi (mm)
- L = Örneğin ilk uzunluğu (mm)

ASTM C 1260' a göre boy yüzdelerindeki değişim aşağıdaki değerlendirmeye göre yapılmaktadır.

- 14 gün sonra ölçülen boy değişimi %0.1' den küçükse “Agrega zararsız bölgededir”
- 14 gün sonra ölçülen boy değişimi %0.1- % 0.2 arasında ise deney süresi uzatılarak örneklerin 28 günlük boy değişimleri ölçülür.
- 14 gün sonra ölçülen boy değişimi %0.2'den büyükse “Agrega potansiyel olarak zararlıdır.”

Çok fazla bir deneme ve bekleme süresinin olmadığı durumlarda hızlı harç çubuk metodu kullanılması tavsiye edilir. ASR geçmişi bulunmayan agregaların bazen bu test metodunda sert koşullara maruz kaldıktan sonra test sonuçlarında reaktif oldukları ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle diğer testlerle birlikte kullanılmalıdır.

1.5.3.Beton Prizma Deneyi (ASTM C 1293)

Beton prizma deneyi ASR'dan dolayı betonda meydana gelen uzunluk değişimlerini belirleyen standart deney metodudur. Bu testte 75x75x285 mm boyutlarında hazırlanan prizmaların zamana bağlı olarak genişmesinin ölçülmesi ile çimento-agrega bileşimlerinin alkaliden kaynaklanan genişmelere açık olup olmadığı belirlenir. Bu deney metodunda harç çubuk boyutları ve prizmaların hazırlanması sırasında karışım suyuna NaOH eklenerek karışımın alkali miktarı artırılır. Deney uygulanacak agregaya, ince agregaya ise reaktif olmayan kaba agregaya ile karıştırılarak kullanılır. Kaba agreganın reaktivitesi ölçülecek ise, reaktif olmayan ince agregaya ile karıştırılıp belli gradasyona getirilen malzeme kalıplara dökülür. Betonda kullanılan agreganın granülometrisi Tablo 7'de verildiği gibi olmalıdır.

Tablo 7. Agregaya elek analizi

Elek göz açıklığı, mm		Ağırlıkça %
Üzerinden geçen elek	Üzerinde kalan elek	
19,0-mm	12,5-mm	33
12,5-mm	9,5-mm	33
9,5-mm	4,75-mm (No. 4)	33

Numunelerin çimento içeriği $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ olup su/çimento oranı 0.42 ile 0.45 arasında değişebilir. Toplam alkali içeriği % 0.9 Na_2O eşdeğerinde olmalıdır. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numunelerin ilk boy ölçümleri alındıktan sonra 38°C sıcaklıkta ve nemli ortamda standartta belirtilen şekilde saklanır.

Örneklerin boy ölçümleri alınmadan 16 saat önce saklama kapları kapalı kalacak bir şekilde $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 'de kür odasına koyularak soğumaya bırakılmalıdır. Bu işlemin ardından dijital kompatörle harç çubukları üzerindeki ölçümler ilk olarak 7, 28 ve 56. günlerde ve 3, 6, 9, 12. aylarda yapılır ve daha sonra gerekirse her 6 ayda bir uzunluk değişimi ölçülür.

Bu metod mineral ve kimyasal katkıların ASR genişmelerine etkisi hakkında en gerçekçi sonuçları vermektedir. Mineral katkıların etkinliği değerlendirilirken, 2 yıllık genişleme değerinin %0.04 olarak alınması ve karışımın alkali içeriğinin çimentonun kütlece % 1.25'i değerine artırılması önerilmektedir.

Standartta göre harç çubuklarındaki genişleme bir yıl sonra % 0.04 veya daha fazla ise agregaya potansiyel tehlikeli davranış söz konusudur.

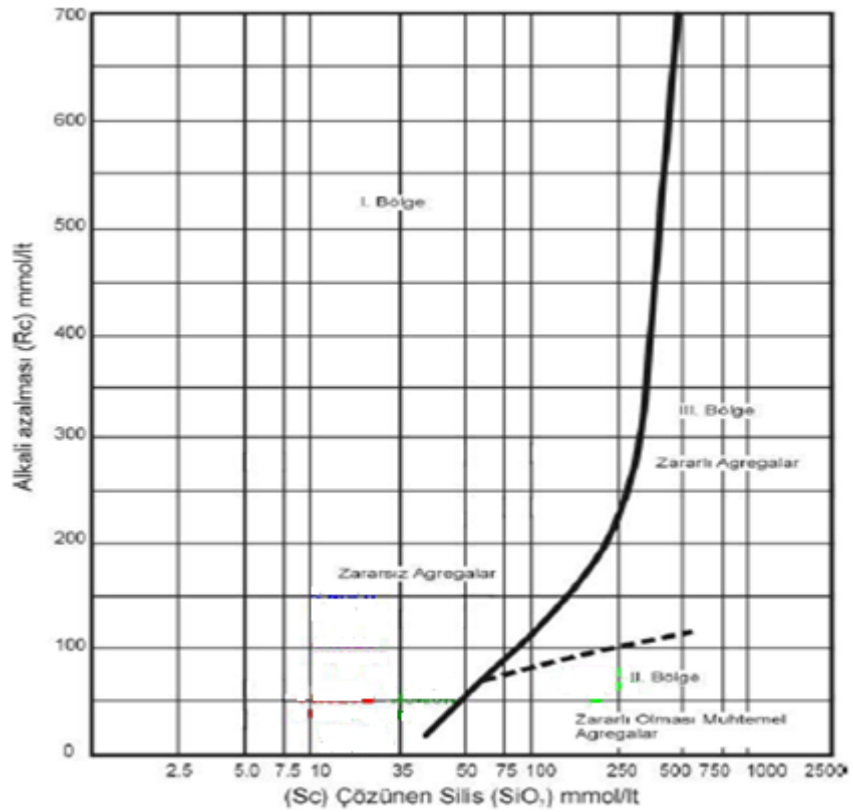
Bu yöntemde ölçülen genleşmeleri etkileyen çimento içeriği, su/çimento oranı, sıcaklık ve saklama kaplarının nem durumudur.

1.5.4. Kimyasal Yöntem (ASTM C 289, TS 2517)

Kimyasal yöntem metodu hızlı harç çubuk metodu ile benzerlik gösterir. Deney için hazırlanan alkali ortam aynıdır. Farkı ise kimyasal yöntemde, agreganın reaktivitesini ölçmek için harç çubuğu yapılmaz ve direk olarak agrega alkali ortama maruz bırakılır.

Numune 150 µm elek üzerinde yıkanarak elenir, toz ve ince parçalardan arınması sağlanır. Yıkanan malzeme 24 saat süreyle 105±5°C sıcaklıkta etüvde kurutulur. Elenen, yıkanan ve kurutulan örneklerden elektronik tartı ile 25 gr'lık 3 adet örnek alınarak reaksiyon kabı içerisine konur. Bu kapların her birine 25 ml 1N NaOH çözeltisi ilavesi yapılır. Bunun yanında içerisine örnek konulmayan dördüncü kaba sadece 25 ml 1 N NaOH çözelti konarak bu kap referans kabı olarak kullanılır.

Hazırlanan kaplar 80°C sıcaklıkta sabit tutulan su banyosuna konarak 24 saat bekletilir. 24 saatin sonunda sonunda örnekler su banyosundan çıkarılarak 30°C sıcaklığa kadar soğutulup kuru bir kap içerisine süzülür. Homojenliğin sağlanabilmesi için karıştırıldıktan sonra bir pipet yardımıyla 10 ml. çekilerek 200 ml'lik balon jöjeye alınır ve üzeri damıtık su ile 200 ml'ye tamamlanır. Bu çözelti çözünmüş silisin ve alkali azalmasının tayini için kullanılır. Bu çözelti daha sonra filtre edilir ve çözünmüş silis ile alkalideki azalma analiz edilir. Deney üç kere tekrarlanır ve şekil 17'deki eğride işaretlenerek çıkarım yapılır. Sonuçların tümü eğrinin sol tarafındaki bölgede ise zararsız olarak söylenebilir. Fakat sonuçlardan bir tanesi bile eğrinin sağındaki bölgede yer alırsa agreganın yüksek alkali içerikli betonda kullanımının zararlı genleşmelere yol açabileceği söylenebilir.



Şekil 17. Alkalinitedeki azalma- çözülmüş silis grafiği

Bazı agregalarda çözünebilir silis oldukça fazla olabilir ancak bu kullanım sırasında küçük miktarlarda genişlemeye sebep olabilir. Bu yüzden bu yöntem çok güvenilir sonuçlar sunmamaktadır. Ayrıca bu yöntem karbonatlı agregaların test edilmesi ve yavaş reaksiyona giren agregaların reaktivitesinin saptanması için uygun değildir. Kimyasal yöntem agreganın ilk aşamada teşhisi için yararlı ve kullanışlı bir araştırma metodudur.

1.5.5. Jel pat Metodu

Jel pat metodu, İngiltere’de ortaya çıkmış olup petrografik mikroskop altında incelenemeyecek kadar ince dağılımlı reaktif silisin ortaya çıkarılmasına imkan vermektedir. Bu yöntemde alkalın çözeltiye batırılan hamur, stereoskopik mikroskop ile periyodik aralıklarla incelenir. Deney, 20°C sıcaklıkta veya yükseltilmiş sıcaklıklarda uygulanabilmektedir. Bu yöntem ile reaktivite belirlenirse, beton veya harç prizma metodlarıyla doğrulanmalıdır.

1.5.6. Nordtest Hızlandırılmış Alkali Silika Testi

1978’de Chatterji tarafından geliştirilmiş bu yöntem Danimarka’da uygulanmaktadır. Hazırlanan harç örnekleri 4-5 hafta suda, sonra 50°C de NaCl çözeltisinde saklanır. Periyodik olarak boy ölçümleri 8 hafta veya daha uzun bir süre ile alınır. ASTM C 227’ye kıyasla deney süresini kısaltmasından dolayı önemli bir yöntemdir ancak kullanımı yaygın değildir.

1.5.7. Alman Çözünme Metodu

Bu yöntem, opal ve flint içeren agregaların potansiyel alkali reaktivitesini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Seçilen tanecik boyutundaki agregalar (1-2 mm veya 2-4 mm) 90°C de 4N NaOH çözeltisinde 1 saat boyunca bekletilir. Daha sonra kurutulup tartılan agregadaki kütle kaybı ‘alkalide çözünebilir’ olarak adlandırılır. Böylece agreganın alkaline ortamdaki kimyasal kararsızlığını ortaya koymakta fakat çeşitli çimento kombinasyonlarıyla birlikte davranışını ve genleşme oluşturup oluşturmayacağını belirleyememektedir. Dahası 1 mm’nin altındaki agreganın potansiyel reaktivite katkısını göz önüne almamaktadır (Berube ve Fournier. 1992; Andiç,2002).

1.5.8. Ozmotik Hücre Metodu

Ozmotik hücre, agrega parçacığı ile çimento ara yüzeyinin modellenmesidir. Ozmotik hücre, her biri 1 N NaOH çözeltisi içeren iki adet odacıktan oluşmaktadır. Odacıklar, su/çimento oranı 0.55 olan çimento hamuru zarı ile birbirlerinden ayrılır. Reaksiyon odası adı verilen odacıkta 150-300 mm boyutlarında 12.40 gr ağırlığında agrega parçacıkları bulunmaktadır. ASR oluştuğunda çözelti, çimento hamuru membranının içinden “havza odacığından”, “reaksiyon odacığına” doğru akar. Her odacığın üst kısmındaki ince borucuklardaki çözelti miktarındaki değişim, bu akışın miktarını ve hızını ölçmeye imkan tanımaktadır. Günde 1.5-2.0 mm gibi bir akış hızı, agreganın potansiyel olarak reaktif olduğunun göstergesidir. Ters bir akış gözlemi, agreganın reaktif olmadığını işaretidir. Bu deney normal reaktif bir agregada 30-40 gün devam ederken hızlı reaktif agregada 2-3

günde sonuç vermektedir. Bu metot, reaktivitenin hızlı değerlendirilmesine imkan vermektedir. Gelişme deneyleri ile birlikte kullanılması faydalıdır (Ramyar ve ark., 2002).

1.6. Literatür Taraması

Ülkemizde, ASR'nun ilk hasarları, Karayolları 2. Bölge Müdürlüğü köprü mühendislerinin ön incelemeleri sırasında İzmir yöresindeki birçok köprüde geniş çatlakların gözlenmesi ile ortaya çıkmıştır. 1995 yılında, TC Karayolu Köprülerinin Korunması ve İyileştirilmesi Çalışmaları projesi kapsamında, İzmir yöresinde hasar gören 5 köprünün (Naldöken, Turgutlu, Buca, Hilal II, Turan) inceleme çalışmaları Japon Jica firmasınınca üstlenilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, beton üretiminde kullanılan özellikle Gediz ve Nif nehri yatak ve teraslarındaki doğal kumların içerdiği reaktif silislerin (camsı riyolit, camsı riyolitik tüf, çört) ASR'na yol açtığı anlaşılmıştır. Bu durumda, Gediz ve Nif nehirleri yatak ve teraslarındaki doğal kumun kullanılmaması prensibi benimsenmiştir (Katayama, 1996).

Kılınç vd. yaptıkları çalışmada alkali silika üzerinde farklı mineral katkıları ve reaktif ve reaktif olmayan agregalar içeren agregaların kombinasyonların etkisini incelemişlerdir. Çimento tipi olarak CEM I 42,5 R ve farklı oranlarda (%0, %20, %30, %40 ve %50) uçucu kül ve yüksek fırın cürufu çimento ile ikame edilerek kullanılmıştır. Karşında ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemine göre reaktif bir agrega seçilmiştir. Bunun yanında CEM II B-M 32,5 R tipi çimento kullanılarak %50 reaktif ve %50 reaktif olmayan agrega kombinasyonları içeren harç prizma numuneleri hazırlanmıştır. Reaktif agrega kullanılarak yapılan deneyler sonucunda %20 ve üzerinde uçucu kül ve %30 ve üzerinde yüksek fırın cürufu kullanımını alkali-silika reaksiyonunu önleyebileceği belirtilmiştir. Reaktif ve reaktif olmayan agrega karşımı ve CEM II 32,5 R tipi çimento ile üretilen numunelerden elde edilen verilere göre alkali-silika reaksiyonunun azaltılmış olduğu ifade edilmektedir. Kullanılan reaktif agrega için mineral katkı kullanımının ASR'yi azalttığı belirtilmektedir. Uçucu külün reaksiyon üzerindeki etkisinin yüksek fırın cürufuna göre daha etkin olduğu ifade edilmektedir (Kılınç vd. 2011).

Aşık vd. alkali-silika yönünden zararlı çıkan bir agregaya dört farklı puzolanı farklı yüzdelerde kullanarak alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Hızlandırılmış harç çubuk deneyi yapılarak araştırılan çalışma sonucu, 14 günlük uzama sonucunda %10 uçucu kül ve pomza kullanımı ASR'yi azaltıcı yönde etki göstermiş ve

uzama değerlerini sınır değerin altına dūřurmuş olduğu sonucuna varmışlar. Cüruf ve trasın %20-30 arasında kullanılmasının faydalı sonuçlar vereceği kanısına varılmıştır. Mineral katkı kullanımını durumunda kullanım yüzdesinin artmasının alkali-silika reaksiyonunu olumlu yönde etkileyeceği belirtilmiştir. Katkılı çimentoların tek başına kullanılmasının uzama değerini sınır değerin altına çekmek için yeterli olmadığı belirtilmiştir (Aşık vd. 2004).

Ramlochan vd. doğal bir puzolan olan metakaolinin betondaki alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çimentonun yerine %0, %10 ve %20 oranında metakaolin kullanmışlardır. %20 oranında yüksek reaktiviteli metakaolin kullanımının boşluk suyundaki alkali konsantrasyonunu önemli derecede dūřürdüęü belirtilmiştir. Kullanılan agregaya da bağlı olarak %10 ve %15 metakaolin kullanımının boşluk suyundaki pH değerini dūřürerek alkali-silika reaksiyonundan kaynaklanan zararlı genleşmeleri kontrol altına alabileceği ifade edilmiştir (Ramlochan vd. 2000).

Ramyar vd. uçucu kül kullanım oranının ve inceliğinin ASR genleşmeleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. ASR üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla bir tip agrega, iki tip uçucu kül ve bir tip çimento kullanarak harç çubukları hazırlamışlardır. Uçucu külür üç farklı Blaine inceliğinde üretilmiş ve çimento ile beş farklı oranda ikame edilmişlerdir. Hazırlanan harç numuneleri ASTM C 1260' a göre yorumlanmıştır. Uçucu külün kullanım oranı arttıkça genleşmelerin azaldığı belirtilmiştir. Genleşmelerin, uçucu külün kullanım oranı %20 ve daha fazla olduğunda önemli derecede azaldığı ve standart limitin altına indiği ifade edilmiştir. Uçucu külün %5 ve %10 oranında kullanıldığı zaman standart limit değerinin üzerinde genleşmeler olduğu belirtilmiştir. Özellikle inceliği düşük olan numunelerde %5 oranında kullanımında, kontrol numunesinin üzerinde genleşmeler olduğu belirtilmiştir. İncelik arttıkça genleşmelerin azaldığı, inceliğinin etkisinin %20'nin altındaki kullanım oranlarında önemli derecede göze çarptığı ifade edilmektedir (Ramyar vd. 2004).

Moser vd. yaptıkları çalışmada metakaolin ve C sınıfı uçucu kül kullanarak hazırlanan ikili ve üçlü karışımların alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu araştırma yapılırken ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk metodu ve ASTM C 1293 beton prizma metodu kullanılmıştır. Metakaolin kullanımının C sınıfı uçucu kül kullanımından daha etkili olduğu belirtilmiştir. Metakaolinin etkinliği kimyasal bileşimi ve ince tane yapılı olması ile ilgilidir. Metakaolin ve C sınıfı uçucu kül ile hazırlanan ikili karışımların genleşmeyi %55 oranlarında azalttığı belirtilmiştir.

Metakaolinin %8 oranında kullanımının genleşmeyi sınır değerinin altına indirmek için yeterli olmadığı belirtilmiştir. Hazırlanan üçlü karışımların hiçbiri sınır limit değer olan %0,1'in altında değildir. Beton prizma deneyinde hazırlanan üçlü karışımlar genleşmeyi önemli ölçüde azaltmıştır (Moser vd. 2010).

Aköz ve Andıç, üç farklı agrega için çimentoya %0, %30, %60 oranlarında yüksek fırın cürufu katılmış harçlarda, hızlandırılmış deneyler yaparak, sıcaklık, basınç ve nem artışının alkali-silika reaksiyonunu hızlandırdığı, cürufun ise yavaşlattığını görmüşlerdir (Aköz ve Andıç 2002).

Korkanç ve Tuğrul Orta Anadolu'da yaygın olarak kullanılan farklı bileşim ve dokusal özelliklere sahip Niğde yöresi bazaltlarını reaktivite açısından değerlendirmişlerdir. Bazalt agregaları ile yapılan alkali-silis reaksiyon deneylerinde, asit karakter sunan bazaltlar ile matriksinin tamamı volkan camından oluşan bazaltik andezitler, yapılan araştırma ve gözlemlere göre, potansiyel olarak düşük reaktivite gösteren agregalardır. Bu tür bazaltların beton agregası olarak kullanılması durumunda, düşük alkaniliteye sahip çimentoların veya beton içerisine puzolanik maddelerin katılmasının uygun olacağı önerilmiştir (Korkanç ve Tuğrul, 2004).

Demir, yaptığı çalışmada çimento yerine aynı oranlarda silis dumanı ve uçucu kül içeren harçların alkali-silika reaksiyonu üzerindeki etkisini araştırmıştır. ASR nedeniyle oluşan genleşmenin kontrol altına alınabilmesi için kullanılan silis dumanı ve uçucu külün genleşme ve mekanik etkileri üzerine etkisi belirlenmiştir. Yapılan deneylerde uçucu kül ve silis dumanı %0, %5, %10, %15 ve %20 oralarında çimento yerine ikame edilmiştir. Çalışmada ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk deneyi kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, ASR etkisinde bırakılan örneklerin morfolojisi ve kimyasal kompozisyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji yayıcı X-ışını analizörü (EDX) kullanılarak inceleme yapıldığı belirtilmiştir. %10 oranında uçucu kül ve silis dumanı kullanımının genleşmeleri sınır değerinin altına düşürdüğü belirtilmiştir. En düşük boy uzamasının %20 oranında silis dumanı kullanımında olduğu ifade edilmiştir. ASR etkisinde %20'ye kadar silis dumanı ikame oranı arttırılmasının harçların mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir. Silis dumanının ve uçucu külün oranı arttıkça boy uzamalarının azaldığı ifade edilmiştir. ASR çatlaklarının yoğun ve geniş çatlakları olduğu bölgelerde kalsiyum oranının yüksek silis oranının düşük olduğu belirtilmiştir. ASR için optimum ikame miktarı sadece boy uzamasına göre değil mekanik dayanımların da göz önüne alınması gerektiği ifade edilmektedir (Demir. vd 2010).

İpek vd. Sakarya bölgesindeki bazı agrega taş ocaklarından alınan kırmataş ve kırmakum agregalarının alkali-silika reaktivitesine ilişkin özelliklerini belirlemişlerdir. Bu ocaklardan alınan agregalar üzerinde ASTM C 1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemi, ASTM C 227 harç çubuk deneyi, ASTM C 1293 beton prizma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Ocaklardan alınan numuneler ile yapılan deneyler sonucunda agregaların alkali-silika reaktivitesi açısından sakıncalı olmadığı belirtilmektedir. Kimyasal metoda göre zararsız olması muhtemel sonucu elde edilen ve diğer iki yönteme göre zararsız çıkan agrega tiplerinden biri yoğun alkalili ortamda kullanılacaksa ortamın alkalitesine göre test edilmeli ve zararsız olduğu görüldüğü takdirde kullanılması gerektiği ifade edilmiştir. Bu agrega kullanılmak isteniyorsa da beton içerisindeki alkali miktarının uçucu kül, silis dumanı ve puzolan katkılı çimentolar kullanılarak azaltılması gerektiği belirtilmiştir (İpek vd 2009).

Katayama (2000), İzmir ve yöresindeki hasar görmüş köprülerden alınan karotlar ve bu betonda kullanılan agrega ile yaptığı araştırmasını 2000 yılındaki 11. Uluslararası Alkali Agregası Reaksiyonu konferansında sunmuştur. Bu çalışma, İzmir yöresinde konu ile ilgilenen diğer araştırmacılara ışık tutan ilk örnek niteliğindedir. Şekil 2’de Katayama’nın hızlandırılmış harç çubuğu metodu uyguladığı agrega örneklerinin genişleme-zaman grafikleri görülmektedir. Bu örnekler arasında en reaktif olanı Gediz Nehri, Ahmetli yöresine ait %10 camısı riyolit ve dasit içeren agregadır. ASTM C 289 kimyasal metod, bu agregaların reaktivitesini belirlemede yetersiz kalmıştır. Hasarlı karayolu köprülerinden (Buca, Turan, Turgutlu, Naldöken, Hilal 2) alınan karot örnekleri önce 2 saat boyunca 80 °C fırında tutularak termal genişmeleri belirlenmiştir. Devamında 80°C, 1N NaOH çözeltisinde 28 gün boyunca kürlenmiştir. Karot örneklerinin genişleme-zaman grafikleri ise Şekil 3’de görülmektedir. Söz konusu betonların toplam alkali içeriği, agregadan gelen alkali ile birlikte 2.6-3.1 kg/m³ arasında hesaplanmıştır. Katayama bildirisinin sonucunda hızlandırılmış harç çubuğu metodu ile petrografik analiz yönteminin birlikte kullanılmasının bölgedeki agreganın reaktivitesini belirlemede etkili olduğunu belirtmiştir.

Sağlık vd. (2002), Deriner Barajı ve Hes İnşaatı kütle betonunda kullanılması planlanan agregalarda alkali-silis reaksiyonundan dolayı oluşacak hasarları azaltma ve önlemeye yönelik bir deneysel çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmada biri yaklaşık % 20, diğeri ise % 30’un üzerinde reaktif silis içermekte olan agregalar, çimento yerine farklı yüzdelerde ikame edilen F sınıfı uçucu kül ile hazırlanan harç çubukları üzerinde yürütülen deneysel çalışma sonucunda kırmataş ince agrega ile en az % 25 ve doğal şekillenmiş ince

agrega ile en az % 35 civarında uçucu kül kullanımı ile alkali-silis reaksiyonunun ölçüde önlendiği tespit edilmiştir.

1.7. Amaç ve Kapsam

Betonu oluşturan malzemeler kimyasal, mekanik ve fiziksel olarak betonun ömrü üzerinde direkt etkiye sahiptir. Söz konusu malzemeler betonun bulunduğu ortamda belirli dış etkenler ile de birleşerek betonun ömrünü kısaltabilir, performansını etkileyebilir. Betonun servis ömrünü kısaltan parametrelerden biri de alkali silika reaksiyonudur. ASR betonun servis ömrünün ilk yıllarında kılcal çatlaklar biçiminde kendini göstermekte, betonda önemli sorunlara yol açmaktadır.

Doğu Karadeniz bölgesinde çok sayıda agrega ocağı bulunan Harşit vadisi agregalarının alkali silika reaksiyonu açısından potansiyel tehlike içerdiği bilinmektedir (Kurbetci ve Karakaş 2015). Bu çalışma kapsamında aynı bölgeden temin edilen bir agrega üzerinde önce hızlandırılmış harç çubuğu deneyi yapılmış ve alkali silika reaksiyonu bakımından zararlı olduğu tespit edilmiştir. ASR'nun oluşturduğu zararlı miktardaki genleşmenin azaltılabilmesi için çimento ile birlikte belirli oranlarda uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve lityum karbonat ikamesi yapılarak bu maddelerin alkali silika reaksiyonu üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Deney Programı

Deneysel çalışmada Harşit Vadisi Tirebolu yöresi'nden getirilen agregada üzerinde hızlı harç çubuk deneyi uygulanmış ve bu agreganın alkali silika reaksiyonu açısından tehlikeli olduğu tespit edilmiştir. Bunun sonucunda agregada üzerinde iyileştirme çalışmaları için uçucu kül, silis dumanı, metakaolin, yüksek fırın cürufu ve lityum karbonat olmak üzere 5 farklı katkı malzemesi farklı oranlarda çimento ile ikame edilerek deneyler yapılmıştır.

Deneysel çalışmada kimyasal ve mineral katkıları çimento ile ikame edilerek kullanılmıştır. İkame oranları uçucu kül için %15, %30 ve %45; silis dumanı ve metakaolin için %5, %10 ve %15, yüksek fırın cürufu için %20, %40 ve %60 ve lityum karbonat için %1, %2 ve %3 olarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerinde 3, 7. ve 14. günlerde ölçüm yapılarak genleşme yüzdeleri hesaplanmış ve alkali silika reaksiyonu açısından iyileşme durumu incelenmiştir.

2.2. Kullanılan Malzemeler ve Malzemelerin Özellikleri

2.2.1. Agregada

Bu araştırmada kullanılan agregada Harşit Vadisi Tirebolu yöresi'nden elde edilmiştir. Agregada için özellikler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Agregada özellikleri

Kuru özgül ağırlık (gr/cm^3)	2.38
Doygun kuru yüzey özgül ağırlık (gr/cm^3)	2.47
Görünen özgül ağırlık (gr/cm^3)	2.63
Ağırlıkça su emme (%)	4.08

2.2.2. Çimento

Araştırmamızda kullanılan çimento Trabzon Aşkale Çimento fabrikasından temin edilmiştir. Kullanılan çimentonun tipi CEM I 42,5 R' dir. Çimentonun özellikleri Tablo 9' da gösterilmiştir.

Tablo 9. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşenler	(%)	45 mikron elek üstünde kalan (%)		9.8
SiO ₂	19.46	90 mikron elek üstünde kalan (%)		1
Al ₂ O ₃	5.11	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)		4126
Fe ₂ O ₃	3.31	Özgül Ağırlık (g/cm ³)		3.12
CaO	60.23	Priz Süresi (Vicat) (dak)	Başlangıç	140
MgO	2.08		Bitiş	200
SO ₃	3.05	Su İhtiyacı (%)		29.2
Na ₂ O	0.27	Hacim Genleşmesi (mm)		1
K ₂ O	0.69	Basınç Dayanımı (MPa)	2 gün	28
Cl ⁻	0.02		7 gün	40.4
Kızdırma Kaybı	3.00		28 gün	51.5

2.2.3. Uçucu Kül

Uçucu kül Zonguldak-Çatalağzı termik santralinden temin edilmiştir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 10'da görülmektedir.

Tablo 10. Uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal özellikler

SiO ₂ (%)	61.57
Al ₂ O ₃ (%)	20.25
Fe ₂ O ₃ (%)	7.30
CaO (%)	1.54
Yoğunluk, gr/cm ³	2.34
45 µ elek üstü kalan, %	16.5

2.2.4. Silis Dumanı

Silis dumanı İksa İnşaat Katkıları Sanayi Ticaret Limited Şirketinden temin edilmiştir. Silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal özellikler

SiO ₂ (%)	93.0
Al ₂ O ₃	0.58
Fe ₂ O ₃ (%)	2.79
CaO (%)	0.6
MgO (%)	1.0
SO ₃ (%)	0.5
Kızdırma kaybı	0.5
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.2

2.2.5. Metakaolin

Metakaolin Aryum Makine Kimya ve Ticaret Limited Şirketinden sağlanmıştır. Kullanmış olduğumuz metakaoline ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 12’de belirtilmiştir.

Tablo 12. Metakaoline ait fiziksel ve kimyasal özellikler

SiO ₂ (%)	52.0
Al ₂ O ₃ (%)	45.0
Beyazlık(%)	94.5
Rutubet(%)	0.95
pH	6.5

2.2.6. Yüksek Fırın Cürufu

Deneysel çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu Çatalağzı Termik Santrali’nden temin edilmiştir. Yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 13’de görülmektedir.

Tablo 13. Yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler

SiO ₂ (%)	39.18
Al ₂ O ₃ (%)	9.81
Fe ₂ O ₃ (%)	1.90
CaO (%)	32.52
MgO (%)	9.94
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.53

2.2.7. Lityum Karbonatın Özellikleri

Deneysel çalışmada kullanılan lityum karbonata ait özellikler Tablo 14’de verilmiştir.

Tablo 14. Lityum karbonatın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Cl(%)	0.01
K(%)	0.0003
Na(%)	0.06
Mg(%)	0.004
Ergime noktası	732°C
Spesifik ağırlık	2.11 gr/cm ³

2.3. Hızlandırılmış Harç Çubuk Numunelerinin Üretimi ve Deneyin Gerçekleştirilmesi

Harç çubuklarının üretimi için Harşit bölgesinden getirilen kum 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm ve 0.125 mm eleklerden elenmiştir. ASTM C 1260 standardına uygun granülometrik dağılım Tablo 15’de verilmiştir. Harç çubukları için 25x25x285 mm boyutlarındaki kalıplar ve boy değişimini ölçebilmek için kalıpların uçlarında pimler kullanılmıştır. Puzolanik malzeme kullanılmayan ilk üretimde 990 gr agrega, 440 gr çimento ve 206.8 gr su kullanılmıştır. Daha sonraki üretimlerde ise alkali silika reaksiyonunu iyileştirici etkileri araştırılan mineral katkıları belirli oranlarda çimento ile ikame edilmiştir. Kullanılan malzeme miktarları Tablo 16’da verilmiştir. Harç karışımları ASTM C 305’e göre uygun karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Bu işlemler 20±1°C’deki klimatize odada gerçekleştirilmiştir. Şekil 18’de henüz hazırlanan prizmaların kalıptaki görüntüleri verilmiştir.

Tablo 15. ASTM C1260’a göre granülometrik dağılım

Elek Boyutu		Ağırlık (%)
Geçen	Kalan	
4 mm	2 mm	10
2 mm	1 mm	25
1 mm	500 µm	25
500 µm	250 µm	25
250 µm	125 µm	15

Tablo 16. Üretimlerde kullanılan malzeme miktarları

Üretim No	Katkı %	UK (g)	SD (g)	MK (g)	YFC (g)	LiK (g)	Ç (g)	S (g)	A (g)
1	-	-	-	-	-	-	440	206.8	990
2	15	66	-	-	-	-	374		
3	30	32	-	-	-	-	308		
4	45	98	-	-	-	-	242		
5	5	-	22	-	-	-	418		
6	10	-	44	-	-	-	396		
7	15	-	66	-	-	-	374		
8	5	-	-	22	-	-	418		
9	10	-	-	44	-	-	396		
10	15	-	-	66	-	-	374		
11	20	-	-	-	88	-	352		
12	40	-	-	-	176	-	264		
13	60	-	-	-	264	-	176		
14	1	-	-	-	-	4.4	440		
15	2	-	-	-	-	8.8	440		
16	3	-	-	-	-	13.2	440		



Şekil 18. Üretimi yapılan harç çubuklarının kalıp içerisindeki görünümü

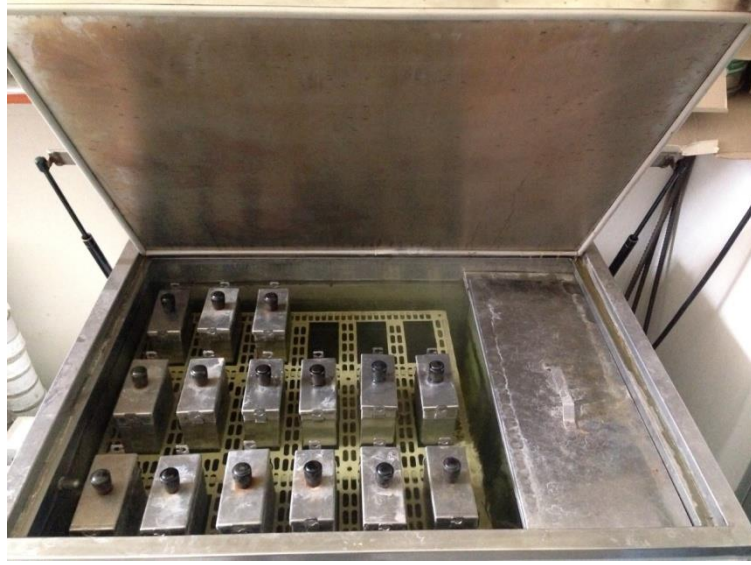


Şekil 19. Üretimden 1 gün sonra kalıplardan çıkarılan numuneler

Kalıplara yerleştirilen harç numuneleri klimatize odada 24 saat bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmış, numaralanmış ve kompatörle ilk boy ölçümleri alınarak 80°C sıcaklıkta suya yerleştirilmiştir. Su banyosunda 24 saat bekletilen örneklerin boy ölçümleri tekrar yapıldıktan sonra, örnekler kapaklı metal kutular içinde sodyum hidroksit çözeltisine koyulmuş ve kutular 80°C sıcaklıktaki su tankına yerleştirilmişlerdir. Şekil 20’de çubuk boy ölçüm ünitesi, Şekil 21’de de alkali silika deney tankı görülmektedir.



Şekil 20. Kalıptan çıkarılan harç çubuğunun ölçüm ünitesinde ölçüm Yapılması



Şekil 21. Deney tankı

Harç çubuklarının 3, 7 ve 14. Günlerde tanktan çıkarılıp boy ölçümleri yapılarak genleşme yüzdeleri hesaplanmıştır. Birim boy değişim yüzdelerini belirlemek amacıyla aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

- $%L = (\Delta L : L) \times 100$
- Eşitlikte;
- $% L = \text{Boy Değişim Yüzdesi}$
- $\Delta L = \text{Örneğin Boy Değişimi (mm)}$
- $L = \text{Örneğin ilk uzunluğu (mm)}$

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Agrega Reaktifliğinin Belirlenmesi Amaçlı Ön Deney

Yapılan ilk üretimin amacı agreganın alkali-silika bakımından reaktif olup olmadığını belirlemektir. Bu üretime ait deney sonuçları Tablo 17’de verilmiştir. Numunelerin 14 gün sonundaki ortalama boy değişimi 0.2281 olmuştur. ASTM C1260 standardında 14 gün sonra ölçülen boy değişimi % 0.2 den büyükse agrega potansiyel olarak zararlıdır değerlendirilmesini yapılmaktadır. Dolayısıyla kullanılan agrega alkali silika reaksiyonu bakımından “potansiyel olarak zararlı” sınıfına girmektedir.

Tablo 17. Katkısız numunelerin genleşmeleri

Numune No	Genleşme (%)		
	3.Gün	7.Gün	14.Gün
1	0.0302	0.1277	0.2309
2	0.0281	0.1277	0.2295
3	0.0295	0.1287	0.2238
Ortalama	0.0293	0.1280	0.2281

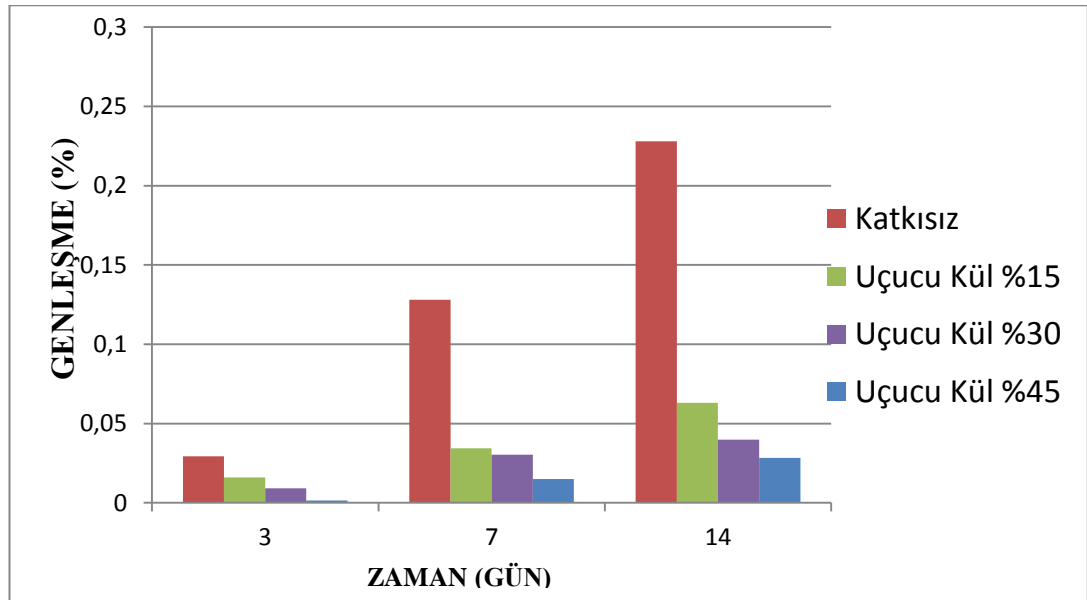
3.2. Uçucu Kül İkame Edilen Numunelere Ait Bulgular ve İrdeleme

Tablo 18’de %15, %30 ve %45 uçucu kül ikame edilen numunelere ait deney sonuçları verilmiştir. Uçucu kül ile yapılan deney sırasında %15 ve %30 uçucu kül ikameli örneklerden birer tanesinin numunenin kalıptan çıkarılma aşamasında kırılması nedeniyle bu numunelere ait ölçüm yapılamamıştır.

Tablo 18. Uçucu kül ikameli numunelere ait deney sonuçları

İkame Oranı	Genleşme (%)								
	%15			%30			%45		
Numune No	3.Gün	7.Gün	14.Gün	3.Gün	7.Gün	14.Gün	3.Gün	7.Gün	14.Gün
1	0.0154	0.0337	0.0600	0.0032	0.0396	0.0466	0.0010	0.0361	0.0410
2	0.0165	0.0354	0.0660	0.0151	0.0210	0.0333	0.0032	0.0042	0.0249
3	-	-	-	-	-	-	0.0004	0.0046	0.0189
Ortalama	0.0160	0.0345	0.0630	0.0092	0.0303	0.0399	0.0015	0.0150	0.0283

Şekil 22’de uçucu kül ikame oranına bağlı olarak harç çubuklarının genleşme yüzdelerinin zamana bağlı değişimi görülmektedir. 14 gün sonunda oluşan boy değişimleri %15, %30 ve %45 uçucu kül ikamesi için sırasıyla 0.063, 0.0399 ve 0.0283 olmuştur. Her üç ikame oranı için de genleşmeler zararsız bölgede kalmıştır. İkame edilen uçucu kül miktarı arttıkça daha az genleşme oluşmuştur.



Şekil 22. Uçucu kül ikameli numunelerin zamana bağlı boy değişimi

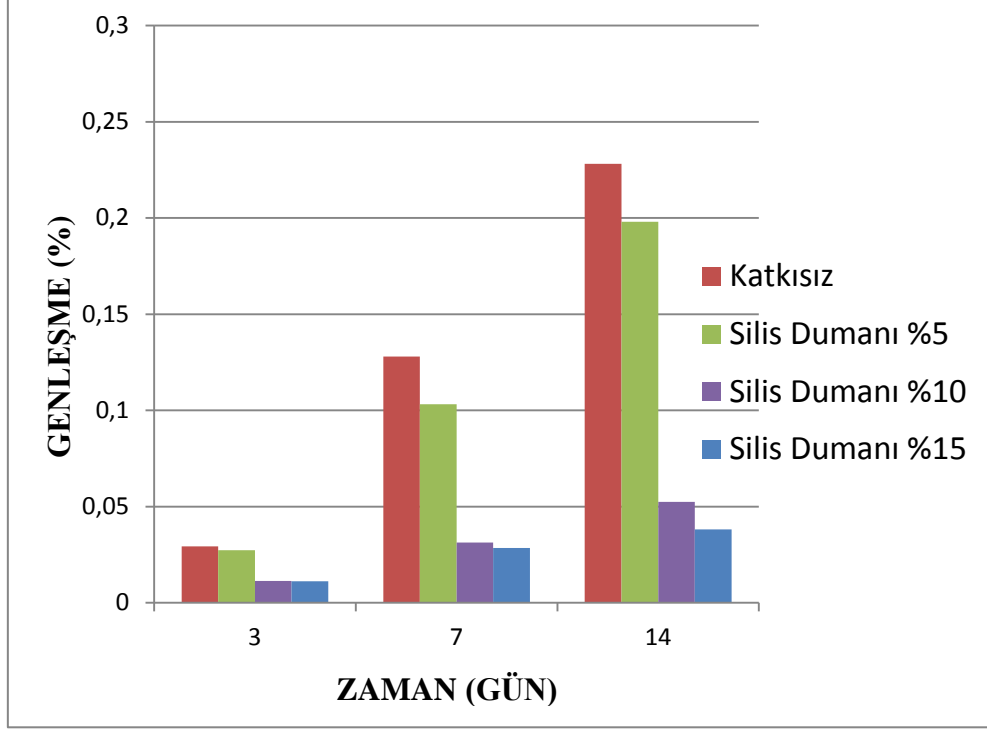
3.3. Silis Dumanı İkame Edilen Numunelere Ait Bulgular ve İrdeleme

Tablo 19’da %5, %10 ve %15 silis dumanı ikame edilen numunelere ait deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 19. Silis Dumanı ikameli numunelere ait deney sonuçları

İkame Oranı	Genleşme (%)								
	%5			%10			%15		
Numune No	3.Gün	7.Gün	14.Gün	3.Gün	7.Gün	14.Gün	3.Gün	7.Gün	14.Gün
1	0.0274	0.1017	0.1926	0.0168	0.0298	0.0505	0.0119	0.0410	0.0449
2	0.0288	0.1046	0.1979	0.0042	0.0322	0.0365	0.0119	0.0217	0.0347
3	0.0259	0.1032	0.2036	0.0129	0.0323	0.0705	0.0102	0.0228	0.0347
Ortalama	0.0274	0.1032	0.1980	0.0114	0.0314	0.0525	0.0113	0.0285	0.0381

Şekil 23’de silis dumanı ikame oranına bağlı olarak harç çubuklarının genleşme yüzdelerinin zamana bağlı değişimi görülmektedir. %5 silis dumanı ikameli harç çubuklarının 14 gün sonunda ölçülen genleşme yüzdesi yaklaşık % 0.1980 olmuş, ASTM C 1260 standardına göre zararsız agrega sınıfı sınır değeri olan %0.1 in üzerinde kalmıştır. Bu durum literatürde yer alan Perry vd. (1986)’nın %5 silis dumanının alkali silika reaksiyonunu önlemede yetersiz kalacağı şeklindeki tespitleriyle de uyumludur. Ancak %10 ve %15 silis dumanı ikameli numunelerde genleşme yüzdeleri sırasıyla %0.0525 ve %0.0381 olarak ölçülmüş ve ASTM C 1260 standardına göre agrega alkali silika reaksiyonu bakımından zararsız bölgede kalmıştır. En yüksek oranda genleşme azalmasını %15 silis dumanı ikamesi sağlamıştır.



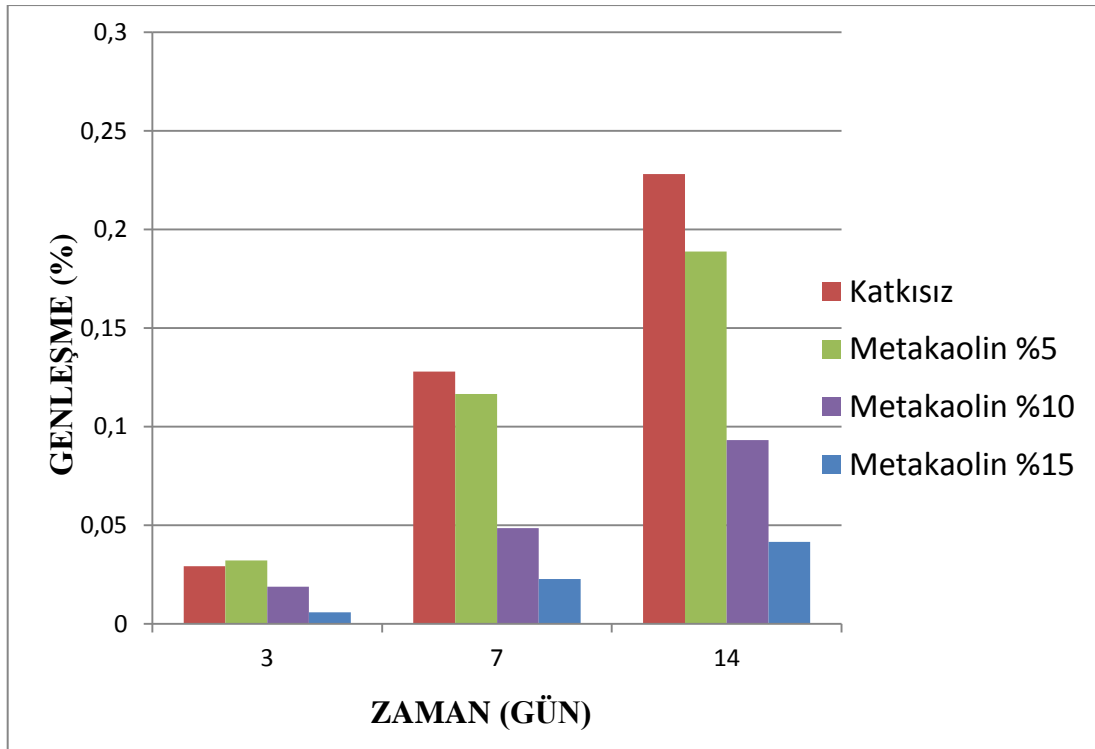
Şekil 23. Silis Dumanı ikameli numunelerin zamana bağlı boy değişimi

3.4. Metakaolin İkame Edilen Numunelere Ait Bulgular ve İrdeleme

Tablo 20’de %5, %10 ve %15 metakaolin ikame edilen numunelere ait deney sonuçları verilmiştir. Şekil 24’de ise metakaolin ikame oranına bağlı olarak harç çubuklarının boy değişim yüzdeleri verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere %5 metakaolin ikameli numunelerin 14 gün sonunda ölçülen genleşme yüzdesi ortalamaları yaklaşık olarak %0.1888 olup hızlandırılmış harç çubuk deneyi standartına göre zararsız bölge sınır değeri olan %0.1 değerinin üzerinde kalmıştır. %10 metakaolin ikameli numuneler ise % 0.0932 ile sınır değerinin çok yakınında genleşme oluşturmuşlardır. Metakaolinin %15 ikamesi durumunda ise genleşme %0.0416 olup zararsız bölgede kalmışlardır.

Tablo 20. Metakaolin ikameli numunelere ait deney sonuçları

İkame Oranı	Genleşme (%)								
	%5			%10			%15		
Numune No	3.Gün	7.Gün	14.Gün	3.Gün	7.Gün	14.Gün	3.Gün	7.Gün	14.Gün
1	0.0396	0.1249	0.1814	0.0263	0.0537	0.0951	0.0028	0.0225	0.0389
2	0.0298	0.1151	0.1972	0.0144	0.0498	0.0961	0.0063	0.0238	0.0428
3	0.0270	0.1098	0.1846	0.0161	0.0421	0.0884	0.0084	0.0221	0.0432
Ortalama	0.0321	0.1166	0.1888	0.0189	0.0485	0.0932	0.0058	0.0228	0.0416



Şekil 24. Metakaolin ikameli numunelerin zamana bağlı boy değişimi

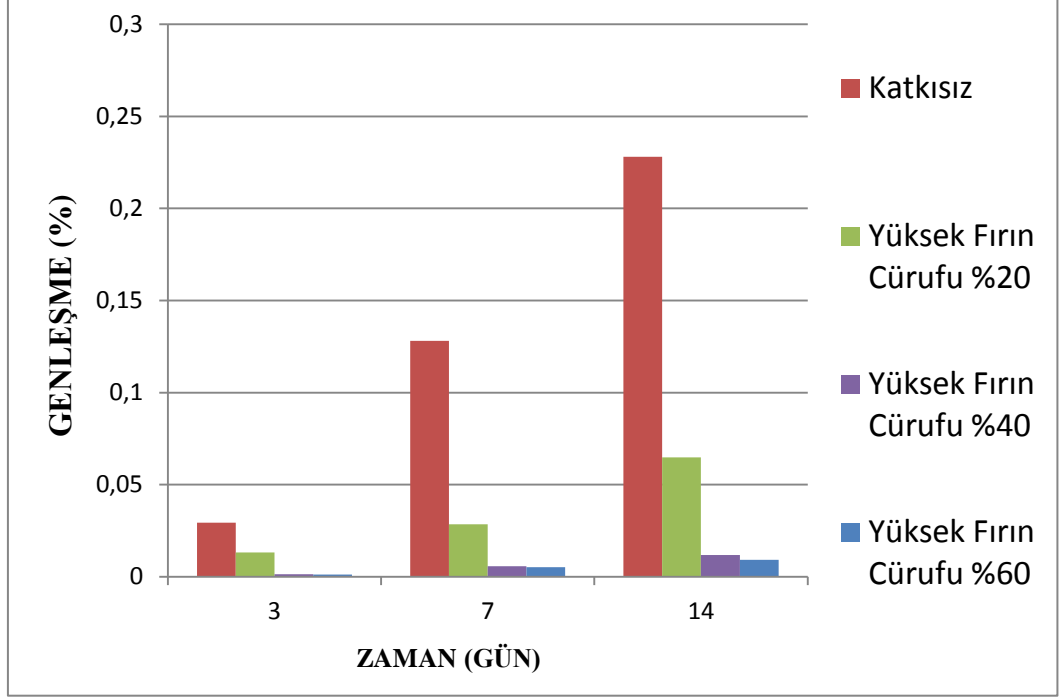
3.5. Yüksek Fırın Cürufu İkame Edilen Numunelere Ait Bulgular ve İrdeleme

Tablo 21 %20, %40 ve %60 yüksek fırın cürufu ikame edilen numunelere ait deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 21. Yüksek Fırın Cürufu ikameli numunelere ait deney sonuçları

İkame Oranı	Genleşme (%)								
	%20			%40			%60		
Numune No	3.Gün	7.Gün	14.Gün	3.Gün	7.Gün	14.Gün	3.Gün	7.Gün	14.Gün
1	0.0161	0.0291	0.0779	0.0011	0.0049	0.0077	0.0007	0.0067	0.0115
2	0.0119	0.0263	0.0670	0.0017	0.0059	0.0189	0.0017	0.0046	0.0070
3	0.0115	0.0298	0.0495	0.0011	0.0049	0.0091	-	-	-
Ortalama	0.0132	0.0284	0.0648	0.0013	0.0056	0.0118	0.0012	0.0052	0.0092

Yüksek fırın cürufu ikame oranına bağlı olarak harç çubuklarının genleşme yüzdesine ilişkin değişim Şekil 25’de verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi yüksek fırın cürufu alkali silika reaksiyonu üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. %20 yüksek fırın cürufu ikameli harç çubuklarının 14 gün sonunda ölçülen genleşme yüzdesi yaklaşık olarak %0.0648 olup kullanılan harç çubuk deneyi standardına göre agrega zararsız bölgede kalmıştır. %40ve %60 yüksek fırın cürufu ikameli numunelerin genleşme yüzdeleri ise sırasıyla ortalama % 0.0118 ve % 0.0092 değerindedir. Bu sonuçlara göre yüksek fırın cürufunun alkali silika reaksiyonu sebebiyle meydana gelen genleşme yüzdeleri üzerinde oldukça belirgin bir azalma meydana getirdiği görülmektedir.



Şekil 25. Yüksek Fırın Cürufu ikameli numunelerin zamana bağlı boy değişimi

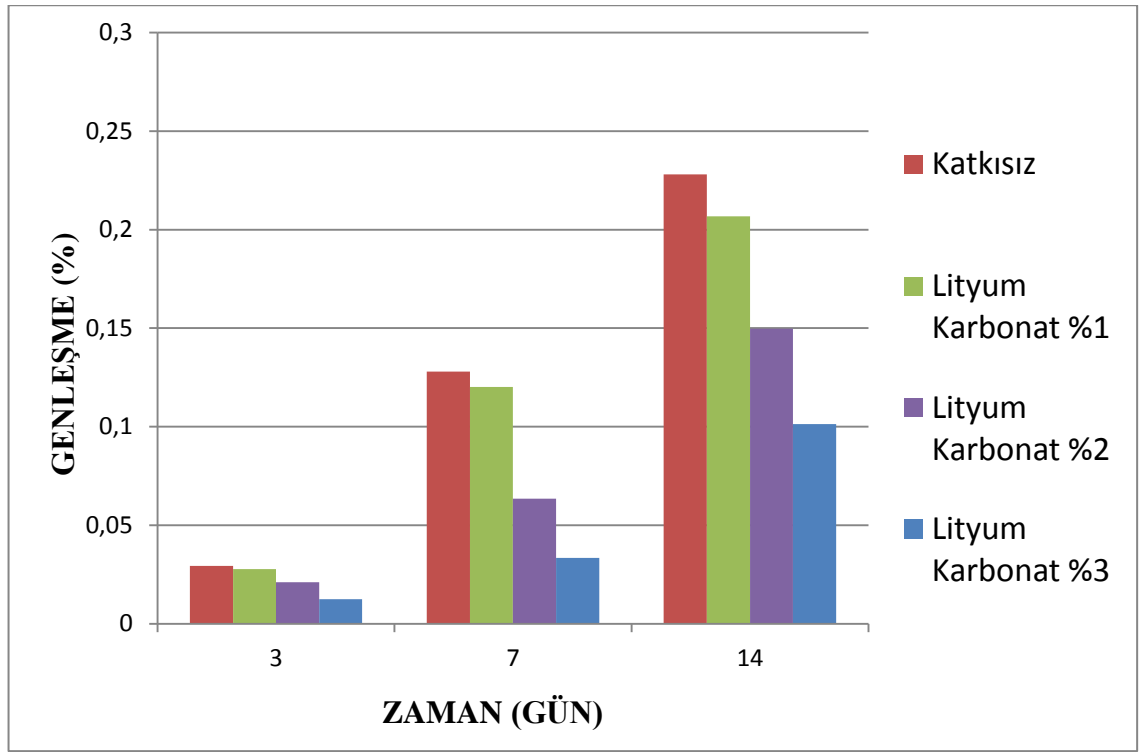
3.6. Lityum Karbonat İkame Edilen Numunelere Ait Bulgular ve İrdeleme

Tablo 22’de, %1, %2 ve %3 Li_2CO_3 ilave edilen numunelere ait deney sonuçları verilmiştir. Bu tablolarda her bir üretimde üretilen 3 numunenin 3, 7 ve 14 günlük genleşme yüzdeleri ve ortalamaları verilmiştir.

Tablo 22. Lityum Karbonat ikameli numunelere ait deney sonuçları

İlave Oranı	Genleşme (%)								
	%1			%2			%3		
Numune No	3.Gün	7.Gün	14.Gün	3.Gün	7.Gün	14.Gün	3.Gün	7.Gün	14.Gün
1	0.0284	0.1154	0.2049	0.0133	0.0495	0.1361	0.0168	0.0414	0.1077
2	0.0263	0.1221	0.2084	0.0253	0.0716	0.1565	0.0102	0.0203	0.0923
3	0.0284	0.1232	0.2070	0.0246	0.0691	0.1565	0.0105	0.0386	0.1042
Ortalama	0.0277	0.1202	0.2067	0.0211	0.0634	0.1497	0.0125	0.0334	0.1014

Li_2CO_3 ikame oranına bağı olarak harç çubuklarının genleşme yüzdelerine ilişkin değişimler Şekil 26'da verilmektedir. %1 lityum karbonat ikameli numunelerin 14 gün sonunda ölçülen genleşme yüzdesi ortalamaları yaklaşık olarak %0,2067 olup ASTM C 1260 standardına göre zararsız sınır kabul edilen %0.1 değerinin üzerinde kalmıştır %2 ve %3 ikameli lityum karbonat ikameli numunelerinde genleşme yüzdeleri sırasıyla %0.1497 ve %0.1014 olarak ölçülmüş ve bu değerler de yine sınır değer %0.1 in üzerinde kalmıştır. Yani %3 oranında ilave edilen Li_2CO_3 bile 14 günlük genleşme değerini ASTM C 1260 limit genleşmesi olan %0.1 değerinin altına düşürememiştir.



Şekil 26. Lityum Karbonat ikameli numunelerin zamana bağı boy değişimi

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada Harşit Vadisi Tirebolu yöresi'nden elde edilen agrega alkali-silika reaksiyonu bakımından zararlı olarak tespit edilmiştir. Bu reaksiyonun oluşturduğu zararlı genleşmelerin azaltılabilmesi için uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve lityum karbonat gibi katkı maddelerinin etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen bilgiler ve ulaşılan sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

1. Agrega üzerinde gerçekleştirilen hızlandırılmış harç çubuk deneyi sonucunda 14 gün sonundaki genleşme yüzdesi ortalama %0.2281 olarak belirlenmiştir. ASTM C 1260 standardına göre alkali silika reaksiyonu genleşme değeri %0.2 değeri üzerinde olan agrega zararlı agrega sınıfında yer aldığı için Harşit Vadisi'nden elde edilen bu agreganın da alkali silika reaktifliği açısından zararlı olduğu tespit edilmiştir.
2. Yapılan çalışma sonucunda mineral ve kimyasal katkıların alkali silika reaksiyonu iyileştirme yönündeki olumlu etkileri açıkça gözlemlenmiştir. Alkali silika reaksiyonunun oluşturduğu genleşmelerin iyileştirilmesi için kullanılan mineral katkıların kullanım oranı arttıkça genleşmelerin azaldığı belirlenmiştir.
3. Çimentonun %15, %30 ve %45'i oranında uçucu kül ile ikame edilmesi durumunda 14 günlük genleşmeler sırasıyla %0.063, %0.0399 ve %0.0283 olarak belirlenmiştir. Yani uçucu kül ikame oranı arttıkça genleşme yüzdeleri önemli oranda azalmıştır ve zararsız bölgede yer almıştır. En çok genleşme azalması uçucu külün %45 ikame oranında gerçekleşmiştir.
4. Silis dumanının %5 , %10 ve %15 oranında ikamesi ile üretilen hızlı harç çubuk numunelerinin 14 gün sonundaki genleşme yüzdeleri sırasıyla %0.1980, %0.0525 ve %0.0381 olarak belirlenmiştir. %5 oranında ikame edilen silis dumanı genleşmeyi ASTM nin zararlı agrega sınıfı limit değeri olan 0.02'nin altına düşüremese de %10 ve %15 silis dumanı ikameli numuneler genleşmeleri belirgin şekilde azaltmışlardır.
5. Metakaolin ikamesi ile yapılan deneylerde %5, %10 ve %15 metakaolin ikame edilerek üretilen numunelerin 14 gün sonundaki genleşmeleri sırasıyla %

0,1888, %0,0932 ve %0.0416 olarak belirlenmiştir. %5 oranında ikame edilen metakaolin genişlemede önemli bir azalma sağlamasa da %15 metakaolin ikameli numunelerin genişmesi sınır değerinde oldukça altında yer almıştır.

6. Yüksek fırın cürufu ile gerçekleştirilen deneyde yüksek fırın cürufunun %20, %40 ve %60 ikamesi sonucunda oluşan 14 günlük genişmeler %0.0648, %0.0118 ve %0.0092 olarak belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufunun alkali silika reaksiyonu nedeniyle oluşan genişleme yüzdesini düşürmede oldukça etkili olduğu ve yüksek fırın cürufu ikame oranı arttıkça genişleme yüzdesinin azaldığı gözlemlenmiştir.
7. Lityum karbonat ilavesi ile gerçekleştirilen hızlı harç çubuk deneyinde çimentoya %1 , %2 ve %3 oranında lityum karbonat eklenerek elde üretilen numunelerin 14 gün sonunda genişmeleri sırasıyla %0.2067, %0.1497 ve %0.1014 olarak belirlenmiştir. Bu üç ikame oranında da genişleme yüzdesinin ASTM C 1260 standardına göre zararsız sınıfa girecek kadar düşmediği ancak lityum karbonat ikame oranı arttıkça alkali silika reaksiyonu sebebiyle oluşan genişleme yüzdesinin giderek azaldığı tespit edilmiştir. Daha yüksek oranda bir ilave ile zararsız genişmeler elde edilebileceği düşünülmektedir.
8. Bu çalışmada alkali silika reaksiyonunun etkisi sadece hızlandırılmış harç çubuk deneyi uygulanarak belirlenmeye çalışılmıştır. Daha kesin sonuçlar elde etmek için beton prizma deneyi ve diğer yöntemler uygulanarak karşılaştırma yapılabilir. Ayrıca ikili mineral katkı kombinasyonları ile de iyileştirme yapılması denenebilir.

5. KAYNAKLAR

- Aşık, İ., Şen, H., Ergintav, Y., Ünsal, A., Şentürk, E. ve Bayrak, E. 2004. Alkali-Agrega Reaksiyonu Yönünden Zararlı Olan Bir Ocağın İyileştirilmesi, Beton Kongresi, Ankara Bildiriler Kitabı, 1-10.
- Bektaş, F., 2002. Preventive Measures Against Alkali-Silika Reaction, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Demir İ., 2010. Alkali-Silika Reaksiyonu Etkisine Maruz Aynı Oranda Silis Dumanı ve Uçucu Kül İçeren Harçların Mekanik Özellikleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25 749-758.
- Glasser, F. P., 1992. Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, New York, 333.
- Hobbs, D.W., 1979. Gutteridge, W.A., “Particle Size of Aggregate and Its Influence Upon the Expansion Caused by the Alkali-Silica Reaction”, Magazine of Concrete Research.
- İpek, M., Yılmaz, K. ve Sert, G., 2009. Sakarya Bölgesinde Üretilen Kırmataş Agregaların Alkali-Agrega Reaksiyonunun İncelenmesi, 5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Mayıs, Karabük, Bildiriler Kitabı, 1-6.
- Katayama, T., 1996. Characteristics on Alkali Aggregate Reaction, The Study on the Maintenance and Rehabilitation of Highway Bridges in the Republic of Turkey, 11.
- Katayama, T., 2000. Alkali aggregate reaction in the vicinity of İzmir, Western Turkey, Alkali Aggregate Reaction in Concrete, 365-374, Proc. 11th International Conference, Ed. Berube, M.A., Fournier, B., Durand, B., Quebec, QC, Canada, 1406.
- Kılınc, C., Satılmış, S. ve Akakın, T. 2011. Farklı Oranlarda Mineral Katkı ve Agreganın Alkali-Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi, Hazır Beton Kongresi, Ekim, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 501-510.
- Mindess, S., and Young, J.F., 1981. Concrete. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs,Nj.
- Moranville-Regourd, M., 1989. Products of Reaction and Petrographic Examination, 445-456, Proc. 8th International Conference on Alkali- Aggregate Reaction, Ed. Okada, K., Nishibayashi, S., Kawamura, M., Kyoto, Japan, 886.
- Moser, R.D., Jayapalan A.R., Garas, V.Y. ve Kurtis, K.E. 2010. Assesment of Binary and Ternary Blends of Metakaolin and Class C Fy Ash for Alkali-Silica Reaction Mitigation in Concrete, Cement and Concrete Research, 40, 1664-1672.

- Neville, A.M., 1981. Properties of Concrete, Longman Scientific and Technical, England.
- Poole, A. B., 1992. Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 30-53, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, R. N. Swamy (ed), Van Nostrand Reinhold, New York, 333.
- Perry, C., Day, R.L., Joshi, R.C., Langan, B.W. ve Gillott, J.E., 1986. The effectiveness of twelve Canadian fly ashes in suppressing expansion due to alkali-silica reaction 93-97, Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proc. of the 7th International Conference, Grattan-Bellew, P.E. (Ed.), Ottawa, Canada, 509.
- Sağlık, A., Kocabeyler, M., Orkun, Y., Halıcı, M. ve Tunç, Ergin., 2002. Deriner Barajı ve Hes İnşaatı Kütle Betonunda Kullanılması Planlanan Agregalarda Alkali-Silis Reaksiyonu Riski ve Önlenmesine Yönelik Yürütülen Çalışmalar.
- Swamy, R.N., 1994. Alkali Aggregate Reaction the Bogeyman of Concrete, American Concrete Institute Special Report 144, Metha, P.K.(Ed.), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 683.
- Hooton, R.D., 1993. Influence of silice fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulphate attack, freezing and thawing, and alkali silice reactivity.
- Ramlochan, T., Thomas, M., ve Gruber, K.A., 2000. The Effect of Metakaolin on Alkali Silica Reaction in Concrete, Cement and Concrete Research, 30, 339-344.
- Ramyar, K., ve Andiç, Ö., 2002. Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkı Yardımı ile Kontrol Altına Alınması. Tcmb, Tübitak ve Ebilt Tem Desteği ile Hazırlanan Rapor, 90s.
- Ramyar, K. ve Dönmez, H., ve Andiç, Ö., 2002. Alkali Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkıları Yardımı ile Kontrol Altına Alınması. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Çimento Ve Beton Araştırma-Geliştirme Enstitüsü.
- Ramyar, K., Andiç, Ö., 2004. Uçucu Kül İnceliği ve Kullanım Oranının Alkali-Silis Reaksiyonuna Etkisi, 17. Teknik Kongre, Nisan, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 487-494.
- Stark, D., 1995. Effects of Water-Cement Ratio on Expansion Due to ASR, Concrete Technology Today, 1-26.
- Tosun, K., 2001. Uçucu Kül Ve Silika Dumanın Alkali Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, DEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 122s.
- Vivian, H.E., 1950. Studies In Cement Aggregate Reaction The Effect On Mortar's Expansion Of Amount Of Reactive Component 2 Nd Ed. Common Wealth Scientific And Industrial Research Organisation Bull.
- Vivian, H.E., 1951. "Studies in Cement-Aggregate reaction, XIX: The Effect On Mortar Expansion of the Particle Size of the Reactive Component in the Aggregate", Australian Journal of Applied Science,.

Woods, H., 1968. Durability Of Concrete Construction, Detroit Michigan, American Concrete Institute, USA.

ÖZGEÇMİŞ

İlker DİNÇDEMİR, 18.07.1989 Ankara'da doğdu. İlköğretimini Ankara Mamak'ta Çağdaş İlköğretim Okulunda bitirdikten sonra liseyi Mamak Cumhuriyet Anadolu Lisesi'nde bitirdi. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümüne başladı ve 2013 yılında üniversiteden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisansa başladı. Şu an aynı zamanda Türkiye Futbol Federasyonuna bağlı Bölgesel Yardımcı Hakem olarak görev yapmaktadır.