

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Silis Dumanı İçeren Harçlarda Alkali-Silika Reaksiyonunun Deneysel Olarak Değerlendirilmesi başlıklı bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez çalışması boyunca ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, çalışmanın yürütülmesinde yardımcı olan saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU'ya teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım süresince ilgi ve yardımını esirgemeyen Doç. Dr. Şirin KURBETCİ, Arş. Gör. Safa NAYIR, Arş. Gör. Memduh NAS ve diğer hocalarıma teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, en az ailem kadar destek veren Rabia YAMAK ve Fatma Berfin YAMAK'a, yanımda olan arkadaşlarıma ve çalışmalar süresince zorlukları birlikte aştığımız değerli arkadaşım İrem ÖZDEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çiğdem ERDOĞAN
Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Silis Dumanı İçeren Harçlarda Alkali-Silika Reaksiyonunun Deneysel Olarak Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, 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. 15/03/2023

Çiğdem ERDOĞAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	2
1.3. Literatür Taraması	3
1.4. Alkali-Silika Reaksiyonu.....	5
1.4.1. Alkali-Silika Reaksiyonu Kimyası	6
1.4.2. Alkali-Silika Reaksiyonu Oluşum ve Genleşme Mekanizması.....	7
1.4.3. Pesimum Oran	9
1.4.4. Alkali-Silika Reaksiyonu Ürünleri	10
1.5. Alkali-Silika Reaksiyonu Belirtileri	10
1.5.1. Genleşme ve Çatlama	11
1.5.2. Yüzey Tortullar.....	13
1.5.3. Parça Atma (Pop-out)	13
1.5.4. Renk değişimi	14
1.6. Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkiyen Etmenler	14

1.6.1. Agregadaki Reaktif Silis ve Agrega Özellikleri	14
1.6.2. Betonun Alkali İçeriği	16
1.6.3. Nem.....	19
1.6.4. Sıcaklık	20
1.6.5. Karışım Oranları Etkisi.....	20
1.7. Alkali-Silika Reaksiyonunu Kontrol Yöntemleri	21
1.8. Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi.....	22
1.9. Kimyasal Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi	25
1.10. Alkali-Silika Reaksiyonunu Ölçme Yöntemleri	25
1.10.1. Harç Çubuk Deneyi (ASTM C227).....	26
1.10.2. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C1260).....	27
1.10.3. Beton Prizma Deneyi (ASTM C1293)	28
1.10.4. Kimyasal Yöntem (ASTM C289).....	30
1.10.5. Kullanılan Diğer Deney Yöntemleri.....	31
1.10.5.1. Jel-Pat Metodu.....	31
1.10.5.2. Alman çözünme metodu.....	31
1.10.5.3. Ozmotik hücre metodu	32
1.10.5.4. Otoklav metodu	32
1.10.5.5. Petrografik analiz (ASTM C295).....	33
1.11. Silis Dumanı ve Alkali-Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi	33
2. DENEYSEL ÇALIŞMA	37
2.1. Malzeme Özellikleri	37
2.1.1. Çimento.....	37
2.1.2. Agrega.....	37
2.1.3. Silis Dumanı	38
2.1.4. Sodyum Hidroksit (NaOH) Çözeltisi.....	39

2.2.	Harç Çubuk Numunelerin Üretimi	40
2.3.	Agrega Reaktifliğini Belirlemek İçin Gerçekleştirilen Ön Çalışma.....	44
3.	DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME	46
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	51
5.	KAYNAKLAR.....	52
6.	EKLER	57

ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

SİLİS DUMANI İÇEREN HARÇLARDA ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONUNUN DENEYSEL OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Çiğdem ERDOĞAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
2023, 67 Sayfa, 1 Sayfa Ek

Bu tez çalışmasında alkali-silika reaksiyonu nedeniyle betonda meydana gelen genleşmeyi önlemede silis dumanının etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmada ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk deney yöntemi kullanılmıştır. Bunun için öncelikle Doğu Karadeniz Bölgesinde farklı yörelerden temin edilen agregalar üzerinde ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde ilgili standart uyarınca alkali-silika reaksiyonu itibarıyla en reaktif olarak değerlendirilen agregaya tespit edilerek deneysel çalışmada bu agregaya kullanılmıştır.

Alkali-silika reaksiyonuna bağlı olarak meydana gelen genleşmeyi önlemek amacıyla silis dumanı çimento yerine belli oranlarda ikame edilerek harç karışımları üretilmiştir. Bu üretimlerde silis dumanı çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ikame edilmiştir. Periyodik olarak yapılan ölçümler neticesinde silis dumanı ikameli harç numunelerin genleşmesi silis dumanı içermeyen referans numunesiyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışma ile silis dumanı ikamesinin alkali-silika kaynaklı genleşmeyi önlemede olumlu etkisi açıkça görülmektedir. Bu etkinin özellikle silis dumanı ikame oranı %10 ve üzeri olması durumunda çok daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Silis Dumanı, Alkali-Silika Reaksiyonu, ASTM C 1260

Master Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL EVALUATION OF ALKALI-SILICA REACTION IN MORTARS CONTAINING SILICA FUME

Çiğdem ERDOĞAN

Karadeniz Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
2023, 67 Pages, 1 Page Appendix

In this study, the effect of silica fume on preventing expansion in concrete due to alkali-silica reaction (ASR) was investigated. ASTM C1260 accelerated mortar bar test method was used in the experimental study. For this purpose, preliminary experiments were carried out on aggregates obtained from different locations in the Eastern Black Sea Region. In this way, the aggregate that was evaluated as the most reactive in terms of alkali-silica reaction in accordance with the relevant standard was determined and this aggregate was used in the experimental study.

Mortar mixtures were produced by substituting silica fume in certain proportions instead of cement in order to prevent expansion due to ASR. In these productions, silica fume has been substituted for cement at 5%, 10%, 15% and 20% by weight. As a result of the periodic measurements, the expansion of the silica fume-replaced mortar samples was evaluated in comparison with the reference sample that did not contain silica fume.

With the experimental study carried out, the positive effect of silica fume substitution in preventing expansion caused by alkali-silica reaction is clearly seen. It has been determined that this effect is much more pronounced, especially when the silica fume substitution ratio is 10% and above.

Keywords: Silica Fume, Alkali-Silica Reaction, ASTM C 1260

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Agrega yüzeyi ile temas eden boşluk çözeltisi	8
Şekil 2. Alkali-silika reaksiyonunda gözlenen pesimum davranış	9
Şekil 3. Alkali-silika reaksiyonu sebebiyle oluşan çatlaklara ait görünüşler	11
Şekil 4. Bir karayolu köprüsü kolonu	12
Şekil 5. ASR mikro ve makro çatlakların modeli.....	12
Şekil 6. Çatlaklar üzerinde görülen yüzeysel tortular.....	13
Şekil 7. Parça atmanın gerçekleşme süreci.....	14
Şekil 8. Reaktif agrega büyüklüğünün genleşmeye etkisi	16
Şekil 9. Çimentodaki alkali miktarının ASR genleşmesi üzerine etkisi.....	17
Şekil 10. Betondaki alkali miktarının çimento dozajı ve çimentonun Na ₂ O eşdeğer yüzdesine bağlı olarak değişimi	18
Şekil 11. Nemin ASR genleşmesi üzerindeki etkisi	19
Şekil 12. Reaktif silika/alkali oranının genleşme üzerindeki etkisi	21
Şekil 13. %100 bağıl nemin sağlandığı kapaklı kap.....	29
Şekil 14. Alkalideki azalma (Rc)-çözünmüş silis (Sc) ilişkisi	31
Şekil 15. Farklı oranlarda silis dumanı ikame edilen harç çubuk numunelerin zamana bağlı genleşme değerleri.....	35
Şekil 16. Silis dumanının harç çubukların genleşmesi üzerine etkisi.....	36
Şekil 17. Kullanılan silis dumanı örneği	39
Şekil 18. Çözeltiyi hazırlamada kullanılan sodyum hidroksit.....	39
Şekil 19. Harç çubuğu kalıpları	41
Şekil 20. Harç karıştırıcısı	41
Şekil 21. Üretilen harç çubuk numuneler	42
Şekil 22. Kalıplarından çıkarılan ve numaralanan harç numuneler.....	43

Şekil 23. Boy ölçümleri için kullanılan aparat	43
Şekil 24. Alkali-silika deney tankına yerleştirilen numuneler	44
Şekil 25. Agregaya ait genleşme-zaman ilişkisi.....	45
Şekil 26. %5 silis dumanı ikameli numunelere ait genleşme-zaman ilişkisi.....	46
Şekil 27. %10 silis dumanı ikameli numunelere ait genleşme-zaman ilişkisi.....	47
Şekil 28. %15 silis dumanı ikameli numunelere ilişkin genleşme-zaman ilişkisi.....	48
Şekil 29. %20 silis dumanı ikameli numunelere ait genleşme-zaman ilişkisi.....	49
Şekil 30. Silis dumanı ikameli numunelerin 14 günlük genleşme-katkı oranı ilişkisi	50

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Reaktiflik sınıflamasına göre mineraller ve kayalar.....	15
Tablo 2. Harç çubuk ve hızlandırılmış harç çubuk yöntemleri için agrega miktarları	26
Tablo 3. Harç çubukları malzeme karışım miktarları.....	26
Tablo 4. Benzer malzemelerin özgül yüzey alanları	34
Tablo 5. Çimentoya ilişkin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler	38
Tablo 6. Agreganın fiziksel özellikleri	37
Tablo 7. Silis dumanı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	38
Tablo 8. ASTM C1260 standardına uygun granülometrik bileşim	40
Tablo 9. Harç çubukları üretiminde kullanılan malzeme miktarları	40
Tablo 10. Agregaların temin edildiği lokasyonlar ve ölçülen genleşmeler.....	44
Tablo 11. A4 kodlu agregaya ait genleşme ölçümleri	45
Tablo 12. %5 silis dumanı ikameli numunelere ait sonuçlar.....	46
Tablo 13. %10 silis dumanı ikameli numunelere ait sonuçlar.....	47
Tablo 14. %15 silis dumanı ikameli numunelere ait sonuçlar.....	48
Tablo 15. %20 silis dumanı ikameli numunelere ait sonuçlar.....	49
Ek Tablo 1. Yomra yöresine ait agregaya ait genleşme ölçümleri.....	57
Ek Tablo 2. Harşit yöresine ait agregaya ait genleşme ölçümleri	57
Ek Tablo 3. Murgul yöresine ait agregaya ait genleşme ölçümleri	57

SEMBOLLER DİZİNİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASR	: Alkali-Silika Reaksiyonu
ASTM	: American Society for Testing and Materials
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum Hidroksit
(Na ₂ O) _e	: Sodyum oksit eşdeğeri
R _c	: Alkali azalması
S _c	: Çözünmüş silis
S/Ç	: Su/Çimento oranı
TS	: Türk Standartları

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde bazı kimyasal ve mineral katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla oluşan bir yapı malzemesidir. Düşük üretim maliyeti, bulunabilirliği ve yapısal beton elemanların çeşitli şekil ve boyutlarda oluşturulabilme kolaylığı sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Erdoğan T. Y., 2003). Ancak bazı durumlarda betonun hizmet süresi boyunca bileşimindeki malzemeler kendi aralarında veya dış etkiler sebebiyle kimyasal reaksiyonlara girerek betonun işlevselliğini kaybetmesine sebep olabilir. Alkali-silika reaksiyonu da betonda hasar oluşturan kimyasal süreçlerdendir.

1920 ile 1930 yılları arasında ABD’de yapılan bir çalışmada Kaliforniya’daki bazı beton yapılarda nedeni anlaşılmayan çatlamlar tespit edilmiştir. Betonlu oluşturan bileşenlerin ilgili standartlara uygun olmasına karşın yapımını takip eden yıllarda yapı elemanlarında çatlamlar meydana gelmiştir. Genelde harita çatlağı şeklinde olan bu problem bazen de çatlaklardan jel sızması, betonda parça atma gibi emareler meydana getirmiştir. 1940’ta Stanton, bu tür çatlamların kimyasal bir etkileşim sonucu ortaya çıktığını açıklamıştır. 1941’de Blanks ve Meissner, Kaliforniya’da bulunan Parker barajında oluşan çatlamları ve hasarları gözlemlemiştir. Yapılan incelemeler sonrasında betonda alkali-silika reaksiyonu ürününün var olduğu ve toplam agregada %2 oranında bulunan andezit ve riyolit gibi reaktif bileşenlerin varlığı rapor edilmiştir (Bektaş, 2002).

Ülkemizde ilk defa 1995 yılında İzmir’de bulunan köprü ayaklarında alkali-silika reaksiyonu görülmüştür. Yapılan incelemeler sonucunda Gediz ve Nif Nehri yataklarından alınan agregaların %3’ün üzerinde reaktif camsı riyolit içerdiği ve reaksiyona girerek çatlaklara neden olduğu görülmüştür. Daha sonraki çalışmalar reaksiyonun sadece İzmir ve çevresinde görülmediği Niğde, Afyon, Sivas, Fırat havzası, Çoruh havzası, Ankara ve Sakarya gibi diğer bölgelerde de bulunan bazı agregaların alkali-silika reaksiyonuna neden olabilecek nitelikte olduğunu ortaya koymuştur (Ramyar K. , 2013).

Alkali-agrega reaksiyonu beton karışımında kullanılan çimento veya dışarıdan gelen alkali hidroksitlerle, betondaki agreganın reaktif bileşenleri arasında oluşan bir kimyasal reaksiyondur (Binal, 2004). Alkali-agrega reaksiyonu alkali-silika ve alkali-karbonat reaksiyonu olmak üzere iki şekilde oluşabilir. Alkali-silika reaksiyonu, alkali-karbonat reaksiyonuna kıyasla daha yaygın olarak gözlemlenmektedir. Bunu sebebi alkali-karbonat agregalarının çok yaygın olmayan özel bir bileşime sahip olmasıdır (Farny ve Kerkhoff, 2007).

Alkali-karbonat reaksiyonu dolomit veya kireçtaşı içeren agregaların betonun boşluk çözeltisindeki metal hidroksitlerle reaksiyonu sonucu meydana gelmektedir (Binal, 2004). Alkali-silika reaksiyonu bünyesinde reaktivlik içeren silika mineralleri mevcut agregalar ile boşluk suyunda eriyik halde bulunan hidroksil iyonları arasında gerçekleşen karmaşık bir reaksiyondur. Reaksiyon sonucunda beton içerisinde nem etkisiyle genişleyen bir jelin oluşumuna sebep olmaktadır. Bu jel betonda hacim genişlemesine neden olmakta ve çekme gerilmeleri oluşturarak betonda çatlaklara yol açmaktadır. Betonun çekme dayanımı basınç dayanımının %7 ila %11'i kadar olması nedeniyle alkali-silika reaksiyonu sonucunda %0.04-%0.05 gibi bir genişleme dahi olsa betonda çatlakların meydana gelmesi için yeterli olmaktadır (Swamy, 1994).

1.2. Amaç ve Kapsam

Çalışmada beton yapılarda bazı hallerde ciddi hasara neden olan alkali-silika reaksiyonunu önlemek için çimento ile ikame edilen silis dumanının ne derece etkili olduğunu belirlemek amaçlanmıştır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada öncelikle Doğu Karadeniz Bölgesinde alkali-silika itibarıyla reaktif olan bir agregaya belirlenmiştir. Bunun için bölgede farklı yörelerden temin edilen agregalardan hızlandırılmış harç çubuk deney yöntemi kullanılarak alkali-silika itibarıyla en reaktif olan agregaya belirlenmiştir. Alkali-silika itibarıyla reaktif olduğu tespit edilen agregaya kullanılarak silis dumanı çimento ile belirli oranlarda ikame edilerek harç çubuk numuneler hazırlanmıştır. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde silis dumanı içeren numunelerin genişmeleri referans numuneye göre değerlendirilerek silis dumanının alkali-silika reaksiyonunu önlemede etkinliği silis dumanı ikame oranına bağlı olarak belirlenmiştir.

1.3. Literatür Taraması

Bu bölümde alkali-silika genleşmesini önlemede silis dumanının etkinliğini belirlemek amacıyla önceki yıllarda gerçekleştirilen bazı çalışmalar özetlenmektedir.

Çetin ve arkadaşları (2018), silis dumanı içeren harç numuneler hazırlamış ve alkali-silika reaksiyonunda silis dumanının etkisini araştırmışlardır. Bu sebeple taş ocağından temin edilen agrega üzerinde hızlandırılmış harç çubuk deneyi yapılarak bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda 14 günlük genleşme değeri sınır değer olan %0,2'den fazla olduğu için bu agreganın ilgili standard uyarınca tehlikeli agrega sınıfında olduğu belirlenmiştir. Deneysel çalışmada silis dumanı çimentoya %5, %7,5 ve %10 oranında ikame edilerek kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre %7,5 oranına kadar silis dumanı ikamesinin alkali-silika reaksiyonunun neden olduğu genleşmeyi azalttığı ancak %7,5 üzeri ikame oranında ise aynı etkinin sağlanamadığı rapor edilmektedir. Sonuç itibarıyla gerçekleştirilen deneysel çalışma ile silis dumanının ASR'yi iyileştirme yönünde olumlu etkiler gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Uygunoğlu (2009) yaptığı çalışmada, yüksek oranda silis dumanı içeren harçlarda ASR oluşumunu araştırmıştır. Harç üretimlerinde doğal kum, beton atığı, mermer atığı ve kırma kum ile çalışmalar yapmıştır. Silis dumanı çimento ile %0, %10, %20, %30 ve %40 oranında ikame edilmiştir. Deneyler ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk deney standardına göre yapılmıştır. Doğal kum ile üretilen silis dumanı içermeyen harçların genleşme değerleri açısından potansiyel reaktif olduğu görülmüştür. Silis dumanının eklenmesiyle ortamın boşluk suyunun pH değerindeki azalma neticesinde, kullanılan bütün silis dumanı oranlarında doğal kum ile üretilmiş harç çubukların genleşme değeri açısından zararsız bölgede kaldıklarını belirtmiştir. Kırma kum ve mermer atığı agregaları reaktif silis içermediklerinden tüm harçlardaki genleşme değerinin zararsız bölgede kaldıklarını belirtmiştir. Üretilen harçlarda tüm agrega tipleri için %10 ila %30 oranında silis dumanı ikamesinin ASR etkisini büyük ölçüde azaltarak yapı elemanlarındaki hasar riskini azaltacağını ifade etmiştir.

Demir (2010), çimento yerine silis dumanı ve uçucu kül katkılı harçların ASR üzerinde yaptığı etkiyi araştırmıştır. Çalışmada, ASR nedeniyle meydana gelen genleşmenin önlenmesi için kullanılan uçucu kül ve silis dumanının genleşmeye ve mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir. Silis dumanı ve uçucu kül %5, %10, %15 ve %20

oranında çimentoya ikame edilmiş ve reaktifliği belirlemek için ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk deney yöntemi kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, en iyi dayanım ve en az boy uzaması %20 oranında silis dumanı ikameli harç çubuklarında olduğu belirtilmiştir. %10 oranında silis dumanı kullanımının boy uzamalarını sınır değer altına düşürdüğü belirtilmiştir. Çalışmada enerji yayıcı X-ışını analizatörü (EDX) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelemeler yapılmış, bu incelemeler sonucunda silis dumanı ikamesinin yüksek olduğu harç çubuklarında ASR kaynaklı çatlakların az miktarda görüldüğü belirtilmiştir. Bu çatlakların yoğunlaştığı bölgelerde yüksek oranda kalsiyum düşük oranda silis bulunduğu ifade edilmiştir. ASR için optimum silis dumanı ikame miktarının yalnızca boy uzamasına göre değil aynı zamanda mekanik dayanımın da dikkate alınarak saptanmasının gereği ifade edilmiştir.

Dinçdemir (2015) yaptığı tez çalışmasında, mineral ve kimyasal katkıların ASR üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan Harşit Vadisinden ASR açısından zararlı olduğu tespit edilen agregalar kullanılarak ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk deneyi yapılmıştır. Deneylerde silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve lityum karbonat olmak üzere farklı katkılar kullanılmıştır. Deneyler çimentoya %5, %10 ve %15 oranında silis dumanı ikamesiyle gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonucunda %5 oranında silis dumanı kullanımının genleşmeyi zararlı agrega sınıfı sınır değeri altına düşürmediğini ancak %10 ve %15 silis dumanı ikame edilen numunelerde genleşmenin belirgin şekilde azaldığını belirtmiştir.

Nayır (2015) yaptığı çalışmada, ASR'yi iyileştirmede mineral katkıların etkilerini araştırmıştır. Deneyler ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk deney yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan taş ocağı agregası tehlikeli agrega sınıfında, dere agregası ise potansiyel tehlikeli agrega sınıfında olduğu belirlenmiştir. Çalışmada taş ocağı agregası üretimlerinde uçucu kül çimentoya %20, %40 ve %60 oranlarında, silis dumanı ve metakaolin çimentoya ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında ikame edilerek kullanılmıştır. Dere agregasıyla yapılan harçlarda uçucu kül çimentoya %10, %20 ve %30 oranlarında, silis dumanı ve metakaolin çimento ile %5, %7,5 ve %10 oranlarında ikame edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda silis dumanının taş ocağı agregasında oluşan genleşmeleri ikame oranı arttıkça hatırı sayılır bir biçimde azalttığı belirtilmiştir. Dere agregasında oluşan genleşmelerde ise ikame oranı arttıkça önemli ölçüde azalma gözlemlendiği ifade edilmiştir.

Aydın (2012), ASR'nin olumsuz etkilerini gidermek adına üç farklı kökenli agrega üzerinde %10 ve %20 oranlarında silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve dört farklı fabrikadan temin edilen Portland çimentosu kullanarak bir çalışma yapmıştır. Çalışmalarda ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuk yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile silis dumanının kullanılan her agrega için en iyi sonucu veren mineral katkı olduğunu ifade etmiştir. Reaktifliği yüksek olan üç agregada da %10 oranında silis dumanı kullanımının genleşmeleri sınır değerinin altına düşürdüğünü belirtmiştir.

Yapılan çalışmada Doğu Karadeniz Bölgesinde dört farklı yöreden temin edilen agregalar reaktivite bakımından değerlendirilmiş ve en reaktif olarak belirlenen agrega kullanılarak çimento ile ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ikame edilen silis dumanının alkali-silika genleşmesini bastırmadaki etkinliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.4. Alkali-Silika Reaksiyonu

Alkali-silika reaksiyonu dünya genelinde betonarme yapı elemanlarına zarar veren, yapıların dayanıklılığını etkileyen karmaşık kimyasal bir süreçtir. Çimentonun bünyesinde bulunan alkali oksitler (Na_2O , K_2O) boşluk suyunda çözünerek sodyum hidroksit ve potasyum hidroksite dönüşürler. Bu alkali oksitler reaktif silisli agrega ile reaksiyona girerek zamanla betonda ciddi hasarlar meydana getiren bir jelin oluşmasına neden olur. Oluşan jel, su etkisinde genleşen bir yapıdadır ve genleştikçe beton içerisinde çekme gerilmeleri oluşturarak çatlamalara sebep olur (Farny ve Kosmatka, 1997).

Alkali-silika sürecinin başlaması için agreganın yapısında reaktif silis bulunması, alkali miktarının yeterli olması ve ortamda nemin bulunması gerekmektedir. Bu unsurlardan herhangi birinin olmaması halinde alkali-silika reaksiyonu herhangi bir genleşme yaratmaz. Betonda oluşan jel miktarı silisin türüne, miktarına ve alkali hidroksit yoğunluğuna bağlıdır. Alkali-silika reaksiyonu iki aşamada gerçekleşir.

- Alkali + Reaktif Silis → Alkali-silika jeli (1. Aşama)
- Alkali-silika jeli + Nem → Genleşme (2. Aşama)

Beton içerisinde çekme gerilmelerinin oluşumu ile 1. aşamada yer alan jel oluşumu aynı zamanlı olarak gerçekleşmez. Bu sebeple ortamda jelin var olması ASR'nin ileri

derecede hasar oluşturacağı anlamına gelmez. Kullanım süresince kuru ortamda hizmet veren beton için ASR büyük bir tehlike oluşturmayabilir (Aşık vd., 2004).

Reaksiyonun meydana gelebilmesi için çimentoğun eşdeğer alkali içeriğinin %0,6'nın üzerinde olması gerekir. Denklem 1'de verilen bağıntı ile Portland çimentosu için toplam alkali miktarı Na₂O eşdeğer cinsinden hesaplanır.

$$(Na_2O)_e = Na_2O + 0,658 K_2O \quad (1)$$

Çimento betondaki alkali miktarının ana kaynağıdır. Çimento bünyesindeki sodyum ve potasyum oksitler çimento hammadde bileşenlerinden kaynaklanmaktadır. Ancak alkaliler agrega, kimyasal ve mineral katkıları, karışım suyu, zemin suyu, atık sular ve buz çözücü tuzlar aracılığıyla da beton içerisine girebilirler. Genellikle sadece çimento ve çimento özelliğine sahip olan malzemelerin alkaliliği göz önünde bulundurulmaktadır. Eğer betona alkali içeren mineral veya kimyasal katkı maddesi eklenirse gelen ilave alkali miktarı da dikkate alınmaktadır. Betondaki alkali sadece çimentodan kaynaklanıyorsa alkali miktarı Denklem 2'de verilen bağıntı vasıtasıyla hesaplanır (Neville, 1997).

$$\begin{matrix} [\text{Çimento Alkali İçeriği}] & \times & [\text{Çimento Miktarı}] & = & \text{Betondaki Alkali Miktarı} \\ (\%) & & (\text{kg/m}^3) & & (\text{kg/m}^3) \end{matrix} \quad (2)$$

Kanada ve Avrupa ülkelerinde potansiyel ASR tehlikesi toplam alkali miktarı betonda 3 kg/m³ ile sınırlandırılmaktadır (Ramyar K. , 2013).

1.4.1. Alkali-Silika Reaksiyonu Kimyası

Çimento hidratasyonu sürecinin başlangıcında sıvı faz katı faza göre daha baskın olup sıvı faz sebebiyle katı fazdaki parçacıklar ıslanır. Hidratasyon ilerledikçe sıvı faz giderek azalır ve yerini C-S-H hidratasyon ürününe bırakır. Bu nedenle sıvı fazın sürekliliği azalma görülür. Boşluklu bir yapıya sahip olan çimento hamurunda sıvı fazın kendine yeterince yer bulabileceği boşluk çözeltilisi bulunur. Çimento hidratasyonu sonucunda meydana gelen bu boşluk çözeltilisinde Na⁺ (sodyum), K⁺ (potasyum), Ca⁺ (kalsiyum) ve OH (hidroksil) iyonları bulunmaktadır. Boşluk suyu içerisindeki iyonların yoğunluğu hidrate olmamış çimento miktarına bağlıdır (Glasser, 1992).

Düşük miktarda alkali içeren çimentoyla üretilmiş betonun boşluk suyundaki pH değeri 12,7 ile 13,1 arasında değişiklik gösterirken fazla miktarda alkali içeren çimentoyla üretilmiş betonların boşluk suyunda 13,5 ile 13,9 arasında değişir. Arada oluşan fark fazla miktarda alkali içeren çimentoyla üretilmiş betonun boşluk suyu hidroksil iyonu konsantrasyonunun düşük miktarda alkali içeren çimentoyla üretilmiş betonun 10 katı kadar olduğunu göstermektedir. Reaktif agrega üzerindeki olumsuz etki beton boşluk suyunda bulunan yüksek hidroksil iyon konsantrasyonundan kaynaklanmaktadır (Hobbs, 1988).

1.4.2. Alkali-Silika Reaksiyonu Oluşum ve Genleşme Mekanizması

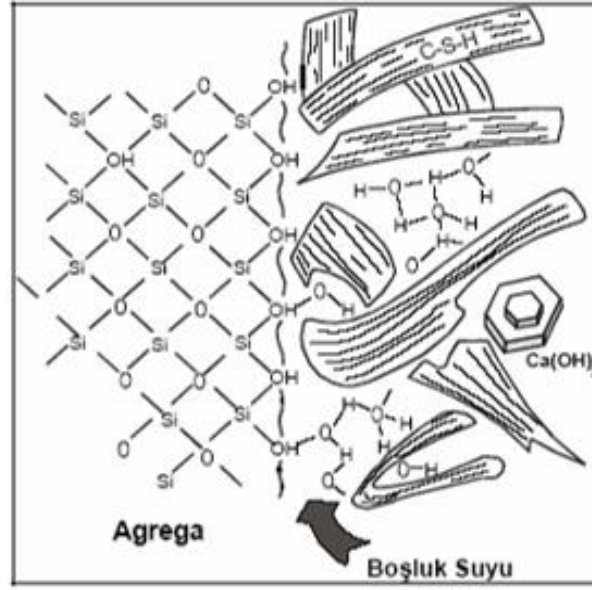
Alkali-silika reaksiyonu ardı sıra birbirini takip eden reaktif silisin çözülmesi, sodyum-potasyum-kalsiyum içeren jelin oluşması ve suyun absorbe edilmesiyle jelin genleşmesi şeklinde üç aşamada gerçekleşmektedir.

Hidroksit iyonlarının (OH^-) atağı sonucunda silisin çözülmesi iki aşamada gerçekleşir. Denklem 3'te verilen ilk aşamada silisin hidrolizi neticesinde uç kısımların OH iyonlarına dönüşmesiyle çözünebilir ve silisin yapısı değişir. Si'ler birbirlerine OH iyonları vasıtasıyla bağlanarak silanol adı verilen yapıyı oluşturur.



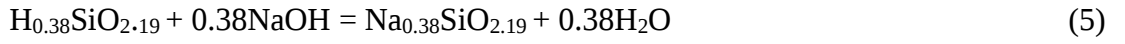
Silanol grupları asidik karakterlidir ve bazik olan boşluk çözeltisiyle reaksiyona girmeye hazır durumdadır. Bu gruplar Denklem 4'te verildiği gibi OH iyonları ile ikinci defa reaksiyona girerek yeniden çözünür. Devamında ortama H_2O molekülleri salarak SiO yapısına dönüşür ve su içerisinde dağılır (Andiç, 2002).





Şekil 1. Agregat yüzeyi ile temas eden boşluk çözeltisi (Bayhan, 2006).

Denklem 5'te görüldüğü üzere negatif yüklü SiO^- pozitif yüklü Na, K ve Ca iyonlarını meydana gelen jel içerisine çekerek kimyasal denge sağlar.



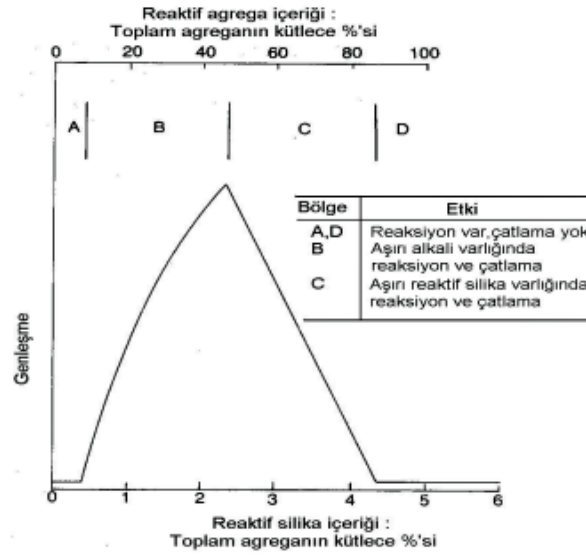
Bu denklemdeki reaksiyonun ortam iyon dengesi Na_2O sayesinde kurulur. Reaksiyonun ilerleyen süreçlerinde diğer katyonlar da eklenir. Üçüncü aşamada Denklem 6'da verildiği gibi daha çok siloksan Si-O-Si yapısı bozulur (Glasser, 1992).



Jelin su emmesi sonucu meydana gelen hacimsel artış son aşamadır. Jelin oluşturduğu hacim artışı, reaksiyon bölgesinin civarında mikro çatlakların oluşmasına neden olur. Zamanla çatlaklar birbirleriyle birleşir ve çoğalır ve bu şekilde betonun yapısı tahrip olur ve hasar oluşur. Bazı durumlarda oluşan çatlaklardan içeri girebilen zararlı maddeler betonda hasarın artmasına neden olur. Hidrate olmuş alkali-silika jeline akan su aracılığıyla taşınan sülfat iyonlarının etrenjit kristalleri oluşumuna katkıda bulunduğu düşünülmektedir (Karakaş, 2013).

1.4.3. Pesimum Oran

Reaksiyon sonucu betonda maksimum genişlemeyi meydana getiren reaktif agrega oranına pesimum oran adı verilmektedir. Reaktif bileşenlerin oranı pesimum oranın altında veya üstünde olduğu durumlarda genişleme miktarı düşüş göstermektedir (Ramyar K. , 2013). Şekil 2’de reaktif maddesi %5 oranında opal olan agregaya ilişkin pesimum davranış verilmektedir. Verilen grafikte pesimum davranış A, B, C ve D bölgelerine ayrılarak açıklanabilir.



Şekil 2. Alkali-silika reaksiyonunda gözlenen pesimum davranış (Hobbs, 1988).

A Bölgesi: Düşük miktarda reaktif silis içerir ve jeldeki hacimsel artış çatlak oluşturacak kadar güçlü değildir.

B Bölgesi: Reaksiyon, beton katılaştıktan sonra da devam eder ve reaksiyon şiddeti çatlama neden olacak düzeydedir. Ortamda reaksiyona girecek reaktif silis kalmadığında veya reaksiyon seviyesi yeterli derecede azaldığında genişleme son bulur. Alkali değeri çok yüksek olan bu bölgede reaksiyon ürünlerinin birleşimi yüksek ihtimalle alkali/reaktif silis değerinden bağımsız gerçekleşir.

C Bölgesi: Beton katılaştıktan sonra ilerleyen reaksiyon çatlamlar oluşturur. Boşluk suyunda bulunan alkali oranı ihmal edilebilecek bir dereceye kadar azaldığında ya da

tamamen bittiğinde reaksiyon son bulur. Reaktif silis miktarı bu bölgede fazla olup azalan alkali/reaktif silis oranıyla reaksiyon ürününün su emmesi ve alkali/silis oranı da azalır.

D Bölgesi: Bu bölgede çok yüksek miktarda reaktif silis bulunmaktadır. Reaksiyon, sertleşen betonda çatlamaya neden olan jel miktarı yaratamayacak kadar hızlı gerçekleşir.

Maksimum genleşme oluştuğunda mevcut reaktif silis alkali konsantrasyonunu oldukça azaltabilir. Ayrıca ortamda mevcut bütün alkalileri tüketir (Hobbs, 1988).

1.4.4. Alkali-Silika Reaksiyonu Ürünleri

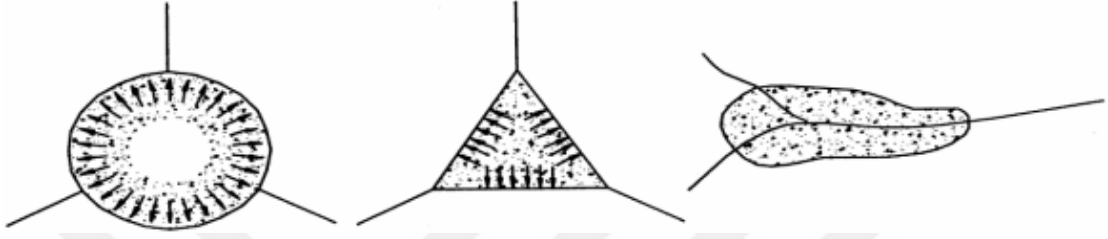
Alkali-silika reaksiyon ürünlerinin bileşimi ve dokusu boşluk suyunun bileşimine, reaktif silis tipine, reaksiyon sıcaklığına ve reaksiyona girecek ürünlerin konsantrasyonuna bağlı farklılıklar gösterebilmektedir. Reaksiyona uğramış betonun çatlaklarında oluşan jel genellikle şeffaf, reçinemsî bir görünümdeyir. Jel örnekleri viskozitelerinin arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bazı örnekler yeterince akışkan olup çatlaklar arasından sızarak beton yer alan boşlukları kısmen veya tamamen doldurur. Genellikle, jeller havaya maruz kaldıklarında zamanla karbonatlaşarak kurur ve beyaz bir görünüm oluşur (Poole, 1992).

Harç ve betonlarda ASR ürünleri üzerine çalışmalar yapan Regourd-Moranville (1989), reaksiyon sonucu oluşan ürünleri jeller ve kristaller olarak iki sınıfa ayırmıştır. Jeller masif ya da süngersi dokuya sahiptir. Jeldeki farklı görünümle kuruma sırasındaki büzülme tipine ve miktarına bağlı olmakla birlikte farklı bileşimdeki jellerden de kaynaklanabilir. Kristal ürünlerinse dikensi veya çubuksu, tabakalı veya gülsü ve yapraksı şeklinde farklı tipte görünümle olabilir. Hızlandırılmış harç çubuk deney metodu uygulanan harçlardaki reaksiyon ürünle ile inşa edilen yapılarda ortaya çıkan ASR ürünle kimyasal ve morfolojik açıdan birbirine oldukça benzemektedir.

1.5. Alkali-Silika Reaksiyonu Belirtileri

ASR sonucunda yapılarda genellikle genleşme ve çatlama, şekil değıştirme, parça atma, jel sızması ve renk değışimi gibi belirtiler görülmektedir. ASR oluşumunun en tipik örneğı genleşmeler sonucunda oluşan harita çatlağı şeklindeki çatlak desenleridir. Oluşan çatlak desenleri, yapı elemanlarında zemin ve yük etkilerinin sebep olduğu çatlak düzenlerinden farklılık göstermektedir.

ASR'nin meydana getirdiği jelleşme agrega taneciğinin içerisinde ya da çevresinde reaksiyon halkası şeklinde gerçekleşebilir. Bulabildiğince suyu bünyesine alan jel hacimsel bir artış gösterir. ASR'nin neden olduğu çekme gerilmeleri üç-dört kollu yıldız şeklinde çatlaklar oluşturur. Çatlaklara ilişkin örnek görünüşler Şekil 3'te verilmektedir. (Baradan vd., 2012).



Şekil 3. Alkali-silika reaksiyonu sebebiyle oluşan çatlaklara ait görünüşler

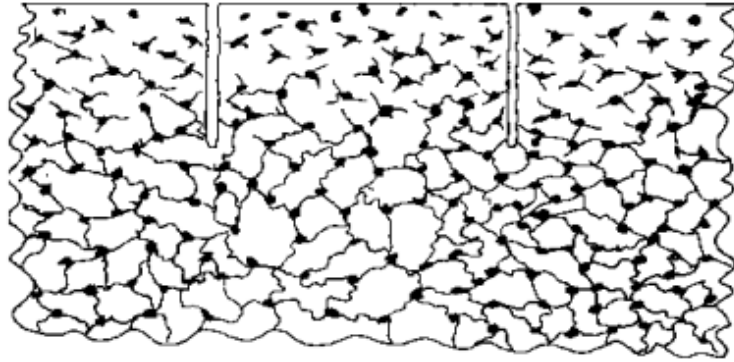
1.5.1. Genleşme ve Çatlama

Reaktif agreganın bünyesinde veya çevresinde oluşan jelin su emmesiyle birlikte ASR genleşmeleri oluşmaya başlar. Jel su emmeye devam ettikçe her yönde gerilmeler oluşur. Gerilme sonucu agreganın etrafındaki çimento hamurunda meydana gelen çatlak sayısı en az üçtür ve bu çatlaklar birbirleriyle 120° açı yapar. Agrega etrafından yayılmaya başlayan bu çatlaklar üç-dört kollu yıldız şeklindedir. Çatlakların bir araya gelmesiyle zorlanmamış ve donatı içermeyen betonda harita çatlağı şeklinde çatlaklar görülürken zorlanmaya maruz kalmış yapılarda çatlaklar gerilme boyunca ilerler. Doğrusal ASR çatlakları ana gerilmeye paralel olan donatılar ile aynı yönde oluşur. Fakat bu çatlaklar donatı korozyonu çatlakları gibi donatı üzerinde değil donatıların arasında görülür (Figg, 1987). Şekil 4'te bir köprü kolonunda yükün ve ASR sebebiyle oluşan doğrusal çatlakların bir örneği görülmektedir (Swamy, 1992).



Şekil 4. Bir karayolu köprüsü kolonu (Swamy, 1992).

Beton elemanların yüzeyinde ASR etkisiyle 0.1 mm ile 10 mm arasında çatlaklar oluşabilmektedir. Makro çatlaklar ASR'nin olduğu yüzeyden 25-50 mm derinlikte olacak şekilde devam etmektedir. Şekil 5'te mikro ve makro çatlakların modeli gösterilmektedir (Yıldırım, 2013).



Şekil 5. ASR mikro ve makro çatlakların modeli

1.5.2. Yüzey Tortullar

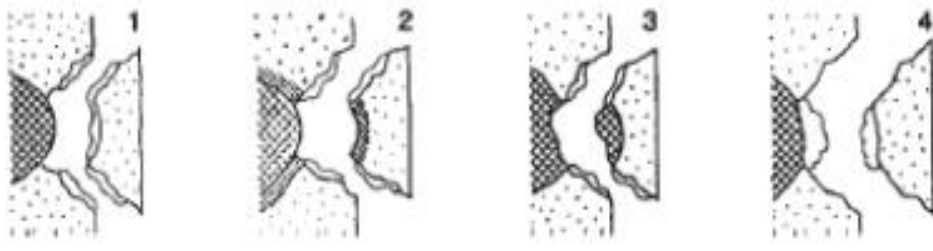
Beton çatlakları üzerinde yüzey tortulları veya salgıları olarak da bilinen beyaz görünümlü renklerde ASR jeline veya kalsiyum karbonat tortullarına rastlanabilir. Çatlaklardan dışarıya sızarak yüzeyde biriken bu maddeler sarımtırak renklerde veya renksiz, viskoz, akışkan, mumsu, esnek yapışkan veya sert yapıda olabilirler (Şekil 6) (Aydın, 2012).



Şekil 6. Çatlaklar üzerinde görülen yüzeysel tortular

1.5.3. Parça Atma (Pop-out)

Beton yüzeyine yakın agrega parçasının veya jelin genişmesi sonucunda koni biçimindeki parçanın sökülüp atılması olayına parça atma denir (Ramyar K. , 2013). Şekil 7’de parça atma olayının oluşumu verilmektedir. Boyutları 25-50 mm arasında değişen oyuk ve çukur oluşumu gözlenir. Yüzeydeki bu çukurların varlığı agreganın kalitesi hakkında önemli bilgiler verir. ASR genişlemesinden kaynaklanan parça atmalar beton yüzeyinin hemen altında bulunan ASR jelinin potansiyel enerjisini boşaltma ve basınç fazlasını giderme isteğinin bir sonucudur. Parça atma olayının gerçekleştiği bölgede jelin bulunması ASR varlığını büyük ölçüde göstermektedir (Farny ve Kosmatka, 1997).



Şekil 7. Parça atmanın gerçekleşme süreci

1.5.4. Renk değişimi

Beton yüzeyinde oluşan renk değişimi genelde harita çatlaklarıyla birlikte görülür. ASR nedeniyle oluşan renk değişimi genellikle koyu renkli ya da kararmış bölge şeklindedir. Ancak çatlaklar boyunca yüzeyde 2-3 mm arasında değişen genişlikte renk açılması veya kahveleşme gözlenebilir (Çullu vd., 2010).

1.6. Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkiyen Etmenler

Alkali-silika reaksiyonunun meydana gelmesi için üç temel etmen olan reaktif silis, yeterli miktarda alkali ve nemin aynı ortamda bulunması şarttır. Bu faktörlerin yanında sıcaklık ve karışım oranlarının dikkate alınması gereken diğer faktörlerdir.

1.6.1. Agregadaki Reaktif Silis ve Agregada Özellikleri

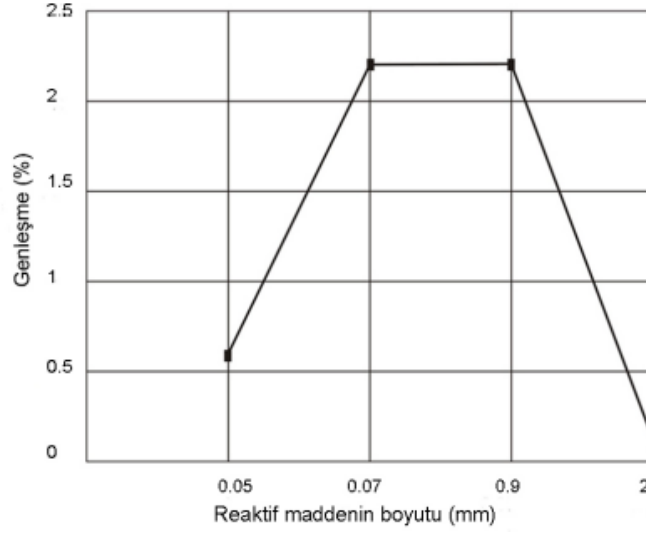
ASR'nin meydana gelebilmesi için reaktif silisin herhangi bir formunun betonda bulunması gerekir. Reaktif silis farklı doku ve kristal yapıya sahiptir. Silis dokusundaki farklılık, kayaçlaşma sürecindeki soğuma hızının azalmasına bağlıdır. Agregada bulunan silisli mineraller azalan soğuma hızına bağlı olarak amorf veya kristalleşmemiş yapıdan kripto kristal, mikro kristal ve kristal yapıya kadar geniş bir aralıkta dağılım gösterir. Bazı hallerde kuvars kristallerin oluşumu esnasında içsel gerilmeler meydana gelir. Gerilmelere yol açan bu tip kuvars mineralleri içeren agregalar reaktif sınıfında yer almaktadır. Tablo 1'de reaktivite sınıflamasına bağlı olarak mineral ve kayaçlar verilmektedir (Ramyar vd., 2002).

Tablo 1. Reaktiflik sınıflamasına göre mineraller ve kayaçlar

Reaktif azalmaya göre silis mineralleri	Reaktif azalmaya göre kayaçlar
Amorf silis	Tüfler dâhil 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 ayrıışmış ve bozulmuş kuvars	İyi kristalize olmuş volkanik kayaçlar
Deforme olmuş kuvars	Pegmatit volkanik kayaçlar
Yarı kristalleşmiş kuvars	Silis içermeyen kayaçlar
Saf kuvars	

Betonun genleşmesine neden olan agregada bulunan reaktif mineral miktarını belirlemek amacıyla çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Agregada %3-5 opal bulunması durumunda betonda oluşan genleşmenin maksimum seviyeye çıktığı fakat %20 ve üzeri opal içeren agregalarda herhangi bir şişmenin oluşmadığı gözlemlenmiştir. Agreganın çok fazla reaktif mineral içermesine rağmen betonda şişmenin oluşmaması anlamsız gibi görünse de bu durum alkali oksitlerin agregada mevcut tüm reaktif silise yeterli olmamasından ve yetersiz miktarda alkali-silis jelinin oluşmasından dolayı meydana geldiği rapor edilmektedir (Yalçın ve Özalp, 1974).

ASR nedeniyle oluşabilecek hasar üzerinde reaktif agreganın tane büyüklüğünün de etkisi vardır. Boyutu 0,075 mm ile 1 mm arasında değişkenlik gösteren reaktif agregada kullanıldığında genleşme miktarının en yüksek seviyeye ulaştığı gözlemlenmiştir. 0,075 mm'nin altında kalan çok fazla reaktif agreganın olması durumunda ise reaksiyon belirtisi ortaya çıktığı ancak genleşme oluşmadığı belirtilmiştir (Andiç, 2002). Bunlara ilaveten reaktif agreganın fiziksel ve mineralojik karakteri de ASR üzerinde etkilidir. Geçirirliiliği yüksek olan agregada içerisine boşluk çözeltisinin girmesi kolaylaşır ve reaksiyon alanı artar.



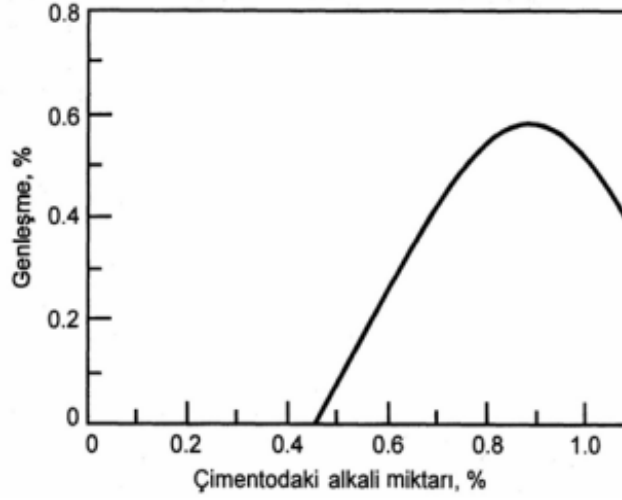
Şekil 8. Reaktif agrega büyüklüğünün genleşmeye etkisi (Gün, 2007).

Nishibayashi ve Yamura (1992), çalışmalarında yalnızca ince agrega kullanıldığında genleşmenin reaksiyonun erken dönemlerinde artış gösterdiği, ileriki dönemlerinde stabil hale geldiğini belirtmektedir. Sadece reaktif kaba agrega kullanıldığında ise betondaki genleşmenin yavaş bir şekilde daha uzun sürede oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

1.6.2. Betonun Alkali İçeriği

Betonu oluşturan malzemeler arasında diğer bileşenlere kıyasla en yüksek miktarda alkali içeren malzeme çimentodur. Ancak çimento içindeki diğer oksitlerle karşılaştırıldığında çimentodaki sodyum ve potasyum oranı oldukça düşüktür. Bu bileşenlerin oranı çimento içinde %1,3'ü pek aşmadığı halde ASR'yi olumsuz yönde etkilemektedir.

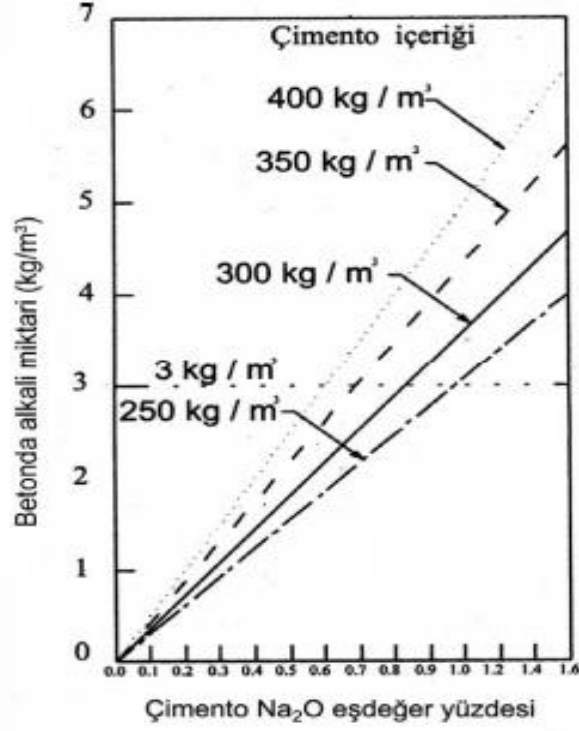
Şekil 9'da görülen çimentodaki alkali muhtevasının yaklaşık olarak %0,5'ten başlayıp %0,9'a kadar çıkması halinde genleşme miktarı devamlı olarak artış göstermektedir (Woods, 1968).



Şekil 9. Çimento alkali miktarının ASR genleşmesi üzerine etkisi

Alkalilerin en önemli kaynağı Portland çimentosudur fakat beton içerisine agrega veya karışım suyu gibi bileşenler aracılığıyla da alkali girişi olabilir. Eğer alkali içeren agregalar dikkate alınırsa ASR oluşumuna sebep olan alkaliler için önemli farklı bir kaynak olabilir. Agregadan gelen alkali, fazla alkali içeren çimento ile üretilmiş betonda alkali miktarını çok daha yüksek seviyelere çıkartabilir. Düşük alkali içeren çimento ile üretilmiş bazı döşeme betonlarında da ASR sebebiyle hasarlar meydana geldiği ifade edilmektedir (Dinçdemir, 2015). Bunun nedeni, agregada mevcut alkaliye bağlı olarak reaksiyon sonucunda hasara sebep olan jelin meydana gelmesidir.

Betonda alkali içeriği arttıkça ASR potansiyeli de artar. Beton alkali içeriğinin belirlenmesinde en gerçekçi yaklaşım betonun içerisindeki tüm bileşenlerin alkali miktarının dikkate alınmasıdır. Fakat genelde sadece çimento ve çimentomsu malzemelerin alkali içeriği dikkate alınmaktadır. Çünkü betonu oluşturan diğer bileşenlerin betonun alkali içeriğine etkisi oldukça azdır (Farny ve Kosmatka, 1997). Şekil 10'da 1 m³ betondaki alkali miktarının çimento miktarı ve çimento Na₂O eşdeğeri yüzdesine göre değişimi verilmektedir (Hawkins, 1983).



Şekil 10. Betondaki alkali miktarının çimento dozajı ve çimentonun Na₂O eşdeğer yüzdesine bağlı olarak değişimi

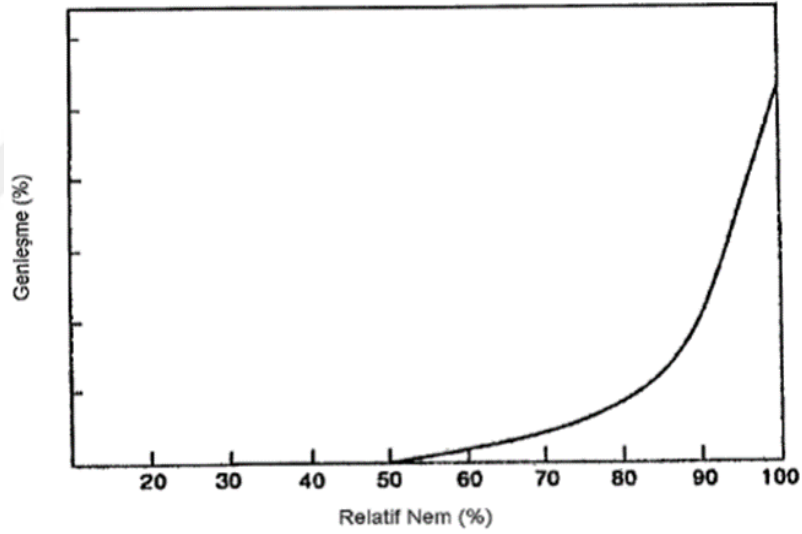
Beton üretiminde kullanılan çimentoda mevcut alkali miktarının değişmesi hidroksil iyonu konsantrasyonunun, alkali içeriğinin ve reaktif silis/alkali oranının değişmesine neden olur. ASR genleşmelerini azaltmak amacıyla düşük oranda alkali içeren çimento kullanımı başarılı bir uygulamadır. Düşük alkali içeren çimento olarak ASTM C150 standardına göre Na₂O eşdeğeri %0,6'nın altında kalan çimentolar kabul görmektedir. Çimento az miktarda alkali içeriyor olsa bile

- Betonda nem hareketi sonucunda bazı noktalarda alkali konsantrasyonu yükselirse,
- Agregaya yüksek derecede reaktifse,
- Mineral ve kimyasal katkılardan, agregaya ve karma suyundan yeterli seviyede alkali geliyorsa,
- Çimento dozajının fazla olması sebebiyle beton alkali içeriği çok yükseliyorsa

betonda ASR tehlikesi oluşabilir (Farny ve Kosmatka, 1997).

1.6.3. Nem

ASR'nin başlaması ve reaksiyonun devam edebilmesi için ortamda yeteri kadar nemin olması gerekmektedir. Nem, silisin çözünmesine, alkali iyonlarının taşınmasına ve jel oluşumuna sebep olur. Oluşan jel su emerek genişir ve betonda çekme gerilmeleri meydana gelir. Kuru hava şartları olsa bile jel oluşabilmektedir ancak betonda genişleme ve hasarın oluşması için ilave su gereklidir. Çalışmalar %80'in üstünde bağıl nem içeren betonlarda ASR genişmesinin meydana geldiğini göstermiştir (Gillott ve Rogers, 1994). Şekil 11'de ASR nedeniyle ortaya çıkan genişlemenin ortamın bağıl nemine göre gösterdiği değişim verilmektedir. Bağıl nemin %70'in altında olduğu durumlarda genişleme ihmal edilebilmektedir ancak %80'in üzerindeki durumlarda genişlemede önemli derecede bir artış görülmektedir (Swamy, 1994).



Şekil 11. Nemin ASR genişmesi üzerindeki etkisi

Nemin betona girişini ve beton içerisinde yayılmasını azaltmak için düşük su/çimento oranı veya mineral katkıları yardımıyla geçirimsizliğin azaltılması yoluna gidilebilir. Böylece beton içerisinde alkaliilerin yayılması da engellenmiş olur (Stark vd., 1993).

1.6.4. Sıcaklık

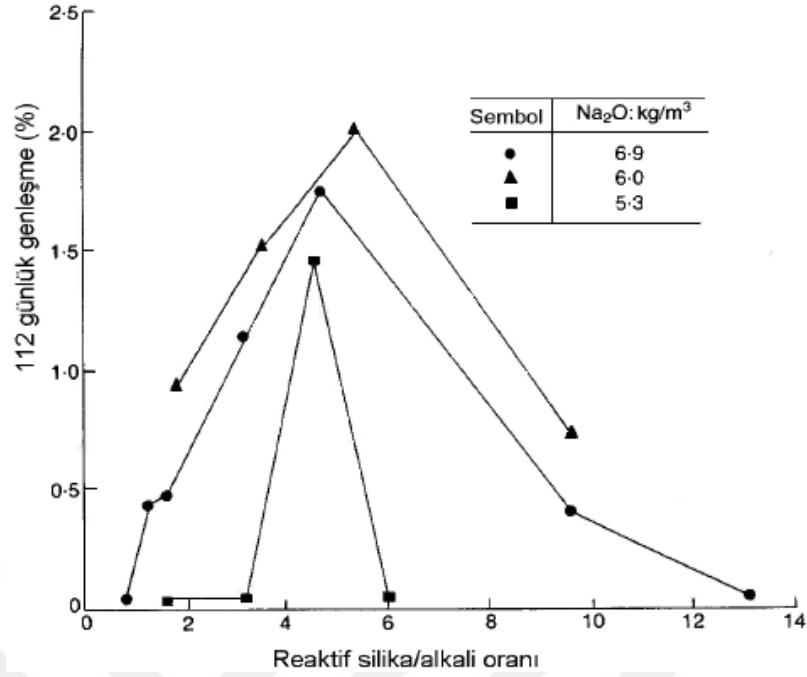
Sıcak iklim koşullarında bulunan yapı elemanları, soğuk iklim koşullarındakilere kıyasla ASR'ye karşı daha büyük bir risk altındadır. Çünkü sıcaklık arttıkça reaksiyon hızı da artmaktadır. Sıcaklık artışı agregaların büyük çoğunluğunda ısıl genleşmelere yol açar. Bazı agregalar ile 13-20°C aralığında gerçekleştirilen ASR genleşme ölçümlerinin sonuçları 38°C'de gerçekleştirilen ölçümlerden daha küçük genleşme miktarı verdiği görülmektedir (Poole, 1992). Düşük ve yüksek sıcaklıkların genleşme üzerinde göstermiş olduğu etki agreganın yapısına bağlıdır. Sıcaklık artışına bağlı olarak agregaların büyük çoğunluğunun reaktiflik seviyesi de artış gösterir (Andiç, 2002).

1.6.5. Karışım Oranları Etkisi

Bir beton reaktif agregaya içeriyorsa karışım oranlarının değiştirilmesi betonun reaktif agregaya içeriğini, alkali içeriğini ve hidroksil iyonu konsantrasyonunu değiştirilebilmektedir. Bu değişimin ASR genleşmesi üzerinde de etkili olduğu görülmektedir.

Su/çimento oranının azalması ve çimento miktarının artması betonun daha boşluksuz ve geçirimsiz bir yapıya sahip olmasını sağlar. Bu şekilde dışarıdan betonun içerisine alkali ve nem girişi ile OH⁻ iyonlarının beton içerisindeki hareketi kısıtlanır ve ASR oluşumu engellenebilir (Baradan vd., 2010).

Şekil 12'de farklı çimento alkali miktarlarında üretilen betonlar üzerinde 112 günlük bir süreçte ölçülen genleşme verilmektedir. En büyük genleşmenin reaktif silika/alkali oranı 4 ile 5 arasında olduğunda meydana geldiği görülmektedir (Hobbs, 1988).



Şekil 12. Reaktif silika/alkali oranının genleşme üzerindeki etkisi

1.7. Alkali-Silika Reaksiyonunu Kontrol Yöntemleri

ASR oluşumunu kontrol altına almanın en iyi yöntemi beton dökümünden önce ihtiyaç duyulan tedbirleri alarak dökümü gerçekleştirmektir. Bunu sağlayabilmek için malzemelerin dikkatli bir şekilde analiz edilmesi ve malzeme seçiminde verimliliği ve ekonomikliği kontrol eden bir stratejinin belirlenmesi gerekir. Malzeme seçimi yapılırken aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir (Farny ve Kosmatka, 1997):

a. Aktif silis içermeyen agregalar kullanmak

Alkali-silika reaksiyonun betonda yol açtığı hasarı yok etmek veya en aza indirmek için yapılabilecek en uygun seçim reaktif olmayan agregalar tercih etmektir. Agreganın petrografik yapısı XRD analizi ile incelenerek reaktifliği değerlendirilmelidir.

b. Betonun alkali içeriğini sınırlamak

Beton içerisinde kullanılacak agreganın reaktif olabileceği şüphesi varsa beton bileşenlerinin alkali içeriği sınırlandırılmalıdır. Eşdeğer alkali miktarı %0,6'dan daha az olan çimentoların kullanımı özen gösterilmelidir.

c. Ortam nemini kontrol altında tutmak

ASR genleşmesinin oluşabilmesi için ortamda nem varlığı gereklidir. Beton geçirimsizliği azaltılarak yapıya nem girişi engellenebilir ve böylece alkali-silika jellerinin absorbe edebileceği su miktarı da indirgenir.

d. Katkı maddesi kullanmak

Betonda uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların kullanımı ASR nedeniyle oluşan genleşmeleri kontrol altına almada etkilidir. Bu katkıların kullanılırken betondaki toplam alkali içeriğini artırmadığından emin olunmalıdır. Bir başka deyişle boşluk suyu pH değerinin yükselmesine engel olunmalıdır. Ayrıca lityum nitrat gibi lityum kökenli kimyasal katkıları da meydana gelebilecek ASR genleşmesini önlemek amacıyla kullanılmaktadır.

Reaktif agrega içeren fakat ASR nedeniyle hasara uğramayan yapılar üzerinde incelemeler yapıldığında oluşan jelin hava boşluklarını kısmen ya da tamamen doldurduğu görülür. Hava sürükleyici katkı ile betonda çok küçük boyutlarda hava kabarcıkları yaratılarak buzun genleşme etkileri önlenir. Hava kabarcıkları aynı etkiyi jel üzerinde de göstererek betonun hasar görmesini engeller. Bu nedenle hava sürükleyici katkı kullanımının yapılarda ASR nedeniyle oluşacak hasarı önlemede etkili olduğu söylenebilir (Ramyar vd., 2002; Müyesser, 2016).

1.8. Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Mineral katkıları, kendi başına bağlayıcı olmayan ancak ince öğütülerek ve çimento hidratasyonu sonucunda meydana gelen Ca(OH)_2 ile reaksiyon oluşturarak bağlayıcılık özelliği kazanan silisli veya silisli-alüminli maddelerdir. Mineral katkı maddesi olarak silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve zeolit sıklıkla kullanılmaktadır (Andiç, 2002).

ASR kaynaklı genleşmeyi engellemek amacıyla kullanılan mineral katkıları beton dayanımını ve durabilitesini arttırması bakımından önemlidir. Mineral katkıların ekonomik katkıları yanı sıra çevrenin korunması ve enerji tasarrufuna sağladıkları katkı itibarıyla da önemlidir (Swamy, 1992).

Mineral katkıların ASR genleşmesini azaltma mekanizmaları hakkında ortak bir görüşe varılamamıştır ancak farklı teoriler öne sürülmektedir (Glasser, 1992; Nayır, 2015):

- Mineral katkı maddeleri sayesinde çimento harcı daha yoğun bir yapıya sahip olur ve geçirimsizlik azalır. Böylece beton içindeki iyon hareketi ile dışarıdan alkali ve nem girişi azaltılarak reaksiyonun hızı büyük ölçüde yavaşlatılır.
- Mineral katkıları beton dayanımını artırarak ASR genleşmesi sebebiyle ortaya çıkan gerilmelere karşı direnç gösterir.
- Mineral katkıları çimento hamurunun Ca(OH)_2 içeriği azalır ve gözenek suyunun pH değeri düşer.
- Mineral katkıları boşluk suyu alkali içeriğini azaltır. Ortaya çıkan C-S-H jeli daha fazla oranda alkaliyi tutma etkisine sahip olur ve dolayısıyla serbest kalan alkali miktarı azalır.
- Mineral katkıları çimentodan daha az reaktiftir ve ortamın alkaliliğini arttıran Portland çimentosu ile yer değiştirilerek kullanıldığında seyreltici görevi görür. Örneğin, çimentoyla %50 oranında yüksek fırın cürufu ikame edildiğinde cürufun bünyesinde bulunan çoğu alkali bir yıl içinde reaksiyon oluşturur. Bundan dolayı aynı s/ç oranında yalnızca çimentoyla üretilen referans numuneyle kıyaslandığında cüruf içeren karışımın boşluk çözeltisinde bulunan alkali miktarı daha düşük olur.

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların elektrikli ark fırınlarında üretilmesi sırasında açığa çıkan gazın indirgenmesi sonucu silis dumanı elde edilir. Silis dumanı beton dökümünden sonraki dönemlerde serbest kalan alkalileri nötralize ederek geçirgenliği azaltır. Bu sayede alkali etkisini azaltarak ASR'ye karşı direnci artırır. Çimentoya ağırlığının %5-15'i kadar silis dumanı ikamesi durumunda ASR daha az miktarda oluşmaktadır (Şimşek, 2009).

Uçucu kül, elektrik enerjisi üreten termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu açığa çıkan yan üründür. Uçucu kül kullanımının ASR üzerindeki etkisi, külün ve birlikte kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri ve agrega reaktivlik seviyesine bağlıdır. Reaksiyon hızı düşük agregalar için uçucu külün ağırlıkça %20-30 oranında çimento ile yer değiştirilerek kullanılması durumunda betonda ASR sebebiyle oluşabilecek genleşmelerde azalma meydana geldiği görülür (Nayır, 2015).

Uçucu kül ASR sebebiyle oluşan genleşmeleri azaltmada ve engellemede kullanılan bir mineral katkı maddesidir. Uçucu kül betondaki suda çözünebilir alkali miktarını düşürür ve bu alkalilerin hidratasyon sonucu ortaya çıkan ürünlerle birleşmesine engel olur. Beton permeabilitesini azaltır, puzolanik reaksiyonlarla serbest kireci tutarak ortamda mevcut oranını azaltarak tüketir (Tosun, 2001)

Yüksek fırın cürufu, demir-çelik tesislerindeki yüksek sıcaklıktaki fırınlarda demir üretimi esnasında açığa çıkan eriyik haldeki kalıntıdır. Yüksek fırın cürufundaki alkalilerin yapısı camsı fazdadır ve çimentodaki alkalilerle kıyaslandığında daha düşük hızda ortaya çıkmaktadır. Bu mineral katkının sahip olduğu toplam alkali içeriği %0,3 ile %2,6 eşdeğer Na_2O değerleri arasında değişkenlik göstermektedir. Cürufun inceliği, karışımın sertleşme süresi, kötü sıkılaştırmadan dolayı içinde oluşan hava boşluğu oranı ve dayanım kazanma hızı gibi değişkenler de cüruf içeren betonlarda ASR genleşmeleri üzerinde etkili olmaktadır (Hobbs, 1988).

Genleşmeler üzerinde etkisini gösterebilmesi için cürufun beton karışımında %25-50 oranlarında kullanılması gereklidir (Forster, 1998).

Metakaolin, saflaştırılmış kaolin kilinin yaklaşık 700-800°C sıcaklıkta yakılmasıyla elde edilen puzolanik özelliğe sahip amorf yapıda bir malzemedir (Yazıcı vd., 2010). Metakaolinin çimentoyla ikame edilerek kullanılması durumunda beton boşluk suyundaki hidroksil iyon yoğunluğunu düşürerek pH'ı indirger ve geçirimliliği azaltır. Sahip olduğu bu özellikler sebebiyle metakaolin ASR kaynaklı genleşmeyi önleyen mineral katkılara yeni bir alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır (Tosun, 2001).

Doğal puzolanlar, kendiliğinden oluşan amorf silika içeren ve doğrudan öğütülerek veya bir ön işlem yapılmasıyla kullanılır hale getirilen volkanik kökenli tortul kayalardır. Puzolanlar çimento harcındaki kireci kimyasal olarak tutar ve ortamın pH değerini düşürür. Reaktif silisin çözünürlüğünü azaltarak ASR oluşumunu önler (Baradan, 2000).

1.9. Kimyasal Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisi

Bazı tipteki kimyasal katkı maddeleri silis çözünmesini azaltabilir, silis jelinin oluşmasına engel olabilir veya oluşan jelin genişmesini önleyebilir (Abit, 1998).

Mc Joy ve Caldwell, farklı türdeki kimyasal katkıların ASR genişmesine etkileri ile ilgili ilk çalışmaları yapmışlardır. Çalışmalarda lityum tuzları, kurşun, demir klorid, laktik asit, çinko, bitkisel yağlar ve reaktif agrega olarak da pyrex camı kullanılmış oluşan genişmeleri ölçmek adına ASTM C441 standardına uygun deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda en iyi genişme azalması oluşturan katkının lityum tuzları olduğu ifade edilmiştir.

Betonda lityum hidroksit (LiOH) kullanımı normalde yüksek olan OH^- iyonu yoğunluğunu artırmaktadır. Lityum hidroksitin ASR nedeniyle oluşan genişmeleri azaltma etkisinin oluşabilmesi için Li^+ iyonlarının jel ile yeteri kadar birleşmesi ve oluşan ters etkinin karşılanması gerekir. Bundan dolayı lityum hidroksit dozunun pH değerindeki yükselmeye oluşan tehlikeli etkiyi engelleyebilmesine olanak sağlayacak düzeyde ayarlanması gereklidir. Buna ilaveten lityum iyonlarının bir bölümü çimento hidrasyonu sırasında oluşan ürünlerin yapısına katılır. Dolayısıyla, LiOH gereken miktardan daha az kullanıldığında ters etki yaparak genişmelerin artmasına neden olmaktadır (Andiç, 2002; Diamond, 1999).

1.10. Alkali-Silika Reaksiyonunu Ölçme Yöntemleri

ASR'nin belirlenmesi için kullanılan deney metotları ülkeler arasında değişkenlik gösterebilmektedir. Bunun sebebi ASR'nin yerel bir sorun olması ve mevcut agregaların petrografik özelliklerinin her bölgede aynı olmamasıdır.

Agreganın veya agrega-çimento birleşiminin reaktifliğini tespit etmek amacıyla kullanılan birçok deney yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanları aşağıda verilmektedir.

1.10.1. Harç Çubuk Deneyi (ASTM C227)

Bu deney metodu belirli şartlar altında kür gören harç çubukların belirlenen süre sonundaki boy değişimlerinin yüzde olarak ölçülmesiyle çimento-agrega birleşiminin alkali kaynaklı genleşme itibarıyla nasıl davrandığını belirlemede kullanılır.

Harç çubuk yöntemi ve hızlandırılmış harç çubuk yöntemi üretimi gerçekleştirilecek harç çubuk numuneler aynı şekilde hazırlanır.

Agrega granülometrisi Tablo 2’de verilen elek seti kullanılarak belirlenir ve buna bağlı olarak karışım oranları ve agrega miktarları belirlenir.

Tablo 2. Harç çubuk ve hızlandırılmış harç çubuk yöntemleri için agrega miktarları

Elek 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)	0,60 (No.30)	25
0,60 (No.30)	0,30 (No.50)	25
0,30 (No.50)	0,15 (No.100)	15

Üretimde alkali içeriği en az %0,6 Na₂O eşdeğerde olan bir çimento kullanılmalıdır. Su/çimento oranı harcın agregası türüne göre ASTM C109 standardında ifade edilen esaslara uygun olacak şekilde belirlenir. Bu esaslara göre belirtilen gerekli karışım miktarları Tablo 3’te verilmektedir.

Tablo 3. Harç çubukları malzeme karışım miktarları

Malzeme türü	Elek serisi					S/Ç	Su (g)	Çimento (g)
	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100			
	%10	%25	%25	%25	%15			
Doğal agregası	100 g	250 g	250 g	250 g	150 g	0,45	199,8	444
Kırmatas agregası	100 g	250 g	250 g	250 g	150 g	0,50	222	444

Bu deney yönteminde 25×25×285 mm ebadında prizma kalıplar kullanılarak en az 4 adet harç çubuk numune hazırlanır. Harç çubuklar su içinde, 37,8°C sıcaklıkta küre bırakılır. 14. günden itibaren boy ölçümleri belirlenen periyotlarla 12 ay veya gerekirse daha uzun sürede kaydedilir. ASTM C33 standardı uyarınca reaktiflik içermeyen agregalar için genleşme değerleri altı ayda %0,10 veya uzun test süresi mümkün olmadığı koşullarda üç ayda %0,05 değerinden daha düşük seviyede kalmalıdır. Agregalar reaktifliğindeki farklılıkların değerlendirilebilmesi amacıyla genleşmelerin daha uzun süreli olarak kaydedilmesi gerekir (Farny ve Kosmatka, 1997).

Harç çubuk deney yöntemi çimento-agrega kombinasyonlarının agreganın potansiyel reaktifliğini ölçmek amacıyla kullanılır. Reaktifliği çok yüksek olan agregalar üzerinde deney yapılmadığı sürece anlamlı deney sonuçlarına ulaşmak bir yıl veya daha uzun sürmektedir. Bu yöntemin deney sürecinin çok uzun olması ve deney yöntem şartlarının yeteri kadar şiddetli olmaması en büyük dezavantajıdır (Stark, 1991).

1.10.2. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi (ASTM C1260)

Hızlandırılmış harç çubuk deneyi, reaktifliği belirlenecek agregalar kullanılarak üretilen harç çubuklarının yüksek seviyede alkali içeren çözelti içerisinde yerleştirilerek yüksek sıcaklıkta bekletilmesi ve boy değişimlerinin ölçülmesi esasına dayanır.

İlk kez bir araştırma bürosu tarafından uygulanmaya başlanan bu metot uzun test sürecini ortadan kaldıran diğer genleşme deneylerine kıyasla oldukça kısa süren bir metottur. (Davies ve Oberholster, 1987).

Standartta verilen granülometrideki agregalar çimentonun kütleye 2,25 katı kadar kullanılarak s/ç oranı 0,47 olan bir karışım üretilir. Karışım 25×25×285 mm ebatındaki kalıplara dökülerek her bir üretimde üçer adet harç çubuk numunesi üretilir. Numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılır ve başlangıç okumaları yapılarak 80°C sabit sıcaklıktaki saf su içerisinde konulur. Saf su içinde 24 saat bekletilen harç çubuklarının ilk boy ölçümleri yapılır. Harç çubukların konulacağı alkali çözeltisi, 1N NaOH, 900 ml saf suya 40 g sodyum hidroksit eklenerek hazır hale getirilir. Sodyum hidroksit çözeltisi adı verilen bu çözelti içerisinde harç çubukları yerleştirilerek 80°C sabit sıcaklıkta tutulur.

Harç çubuklarında oluşan boy değişimini belirlemek amacıyla 3, 7 ve 14. günlerde boy ölçümleri yapılır ve Denklem 7’de verilen bağıntı yardımıyla boy değişimi yüzde olarak hesaplanır.

$$\%L = \frac{L_i - L_0}{285} \times 100 \quad (7)$$

Bu ifadede,

$\%L$ = Boy değişim yüzdesini

L_i = Numunenin son boyunu (mm)

L_0 = Numunenin ilk boyunu (mm), göstermektedir.

ASTM C1260 standardınca boy değişimi yüzde olarak aşağıdaki gibi değerlendirilir:

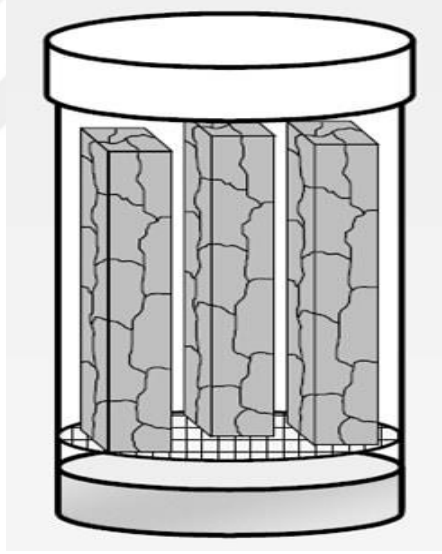
- 14 gün sonunda ölçülen boy değişim yüzdesi $\%0.10$ ’un altında olması halinde agrega alkali-silika reaktifliği bakımından zararsızdır.
- 14 gün sonunda ölçülen boy değişim yüzdesi $\%0.10$ ile $\%0.20$ arasındaysa deney süresi uzatılarak numunelerin 28 gün sonundaki boy değişimleri belirlenir.
- 14 gün sonunda ölçülen boy değişim yüzdesi $\%0.20$ ’den büyükse agrega alkali-silika reaktifliği itibarıyla potansiyel zararlıdır.

Agregaların test metodunda kullanılan yüksek alkali seviyesi ve yüksek sıcaklıklarla karşılaşma olasılığı düşük olması sebebiyle geçmişte ASR etkisine uğramayan agregaların test sonuçlarına göre reaktif oldukları görülebilir. Bu sebeple diğer test metodları ile değerlendirme yapılmalıdır. Hızlandırılmış harç çubuk deney yöntemi reaksiyon hızı düşük olan ve harç çubuk deney yöntemiyle reaktifliği belirlenemeyen agregaların reaktifliğinin belirlenmesinde kullanışlı bir yöntemdir (Tosun, 2001).

1.10.3. Beton Prizma Deneyi (ASTM C1293)

Bu deney, ASR nedeniyle betonda oluşan boy değişimini belirlemede kullanılan bir yöntemdir ve çimento-agrega karışımlarının alkaliden kaynaklanan genleşmelere duyarlılığını belirlemek amacıyla yapılmaktadır.

Yapılan deneyde ince agreganın reaktifliği belirlenecekse reaktiflik içermeyen iri agrega ile birlikte kullanılır. İri agreganın reaktifliği belirlenecek ise reaktiflik içermeyen ince agrega ile karıştırılıp belirli bir granülometriye getirilir. Çimento miktarı $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ olarak kullanılır ve su/çimento oranı belirli bir işlenebilirliği sağlayacak şekilde 0,42-0,45 arasında olacak şekilde ayarlanır. Karışım suyuna NaOH eklenerek kullanılan çimentonun eşdeğer Na_2O içeriği çimentonun kütlece %1,25'ine çıkartılır. Hazırlanan harç karışımı üç adet $75 \times 75 \times 285 \text{ mm}$ ebadındaki prizmatik kalıplara doldurulur. 24 saat kalıpta bekletilen numuneler kalıptan çıkarılır ve ilk boy ölçümleri alınır. Daha sonra numuneler alt bölgesinde yarıya kadar su dolu bir su haznesi bulunan bir kap içerisine yerleştirilir (Şekil 13). Bu şekilde tasarlanmış kapta bulunan numuneler su ile temasa girmeyecek şekilde %100 bağıl nem ortamında olmalıdır. İçerisinde numuneler bulunan bu kap 38°C 'de sabit sıcaklıkta etüve yerleştirilir.



Şekil 13. %100 bağıl nemin sağlandığı kapaklı kap

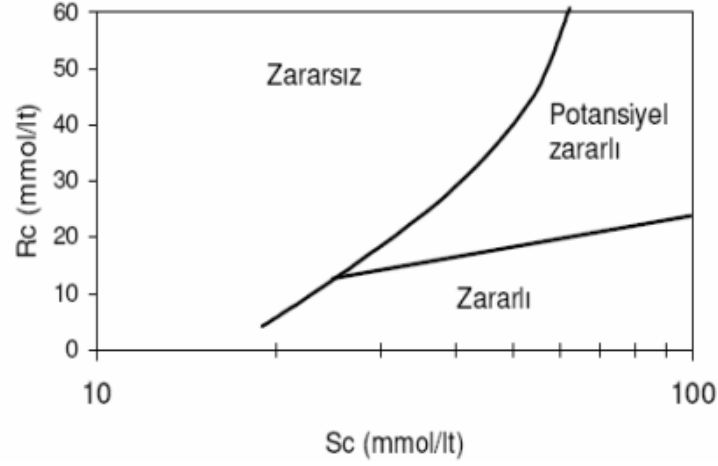
Numunelerin boy okumalarının alınmasından 16 saat kadar önce numune kapları kapalı olacak şekilde $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 'de kür odasında soğutulur. Bu süre sonunda numunelerin boyu dijital komparatörle sırasıyla 7, 28, 56. gün sonunda ve 3, 6, 9, 12. ay sonunda ve gerekli görülürse her 6 ayda bir boy değişimi ölçülür. Standarda göre genleşme bir yıl sonunda %0,04 veya bu değerın üzerinde ise agreganın tehlikeli sınıfta yer aldığı sonucuna ulaşılır.

Bu yöntem, beton numunesi üzerine uygulandığından daha gerçekçi sonuçlar vermektedir ve bundan dolayı diğer yöntemler yeterli olmadığında sıklıkla tercih edilmektedir. Fakat deney süresinin uzun olması yöntemin dezavantajıdır (Andiç, 2002).

1.10.4. Kimyasal Yöntem (ASTM C289)

Kimyasal yöntem metodu agregaların potansiyel alkali-silika reaktifliklerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu deneyde 300 µm elekten geçen 150 µm elek üzerinde kalan agregalar kullanılır. Reaktifliği belirlenecek olan agrega örneği 150 µm elek üzerinde yıkanıp elenir. Bu şekilde agrega daha küçük boyuttaki malzemeden arındırılır. Yıkanan agrega 105±5°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat boyunca kurumaya bırakılır. Hazırlanan agregadan üçer adet 25 gramlık örnek alınarak reaksiyon kabına yerleştirilir. Her bir kabın içerisine 25 ml 1N NaOH çözeltisi eklenir. Referans kabı olarak kullanılması amacıyla örnek yerleştirilmeyen dördüncü bir kaba yalnızca çözelti konulur.

Örnek kapları sabit olarak 80±1°C sıcaklıkta tutulan su banyosu içerisine yerleştirilerek 24 saat boyunca bekletilir. Su banyosundan çıkartılan örnekler 30°C sıcaklığa kadar soğutulur ve çözelti süzülerek agrega kalıntılarından arındırılır. Süzüntü homojenliğinin sağlanmak amacıyla karıştırılır ve pipet yardımıyla 10 ml çekilerek süzüntü ölçülü bir kap içerisine alınır. Kaptaki bulunan süzüntü damıtılmış su ile 200 ml'ye tamamlanır. Elde edilen bu seyreltilmiş çözeltiden çözünmüş silis (Sc) ve alkalilikteki azalma (Rc) tayin edilir. Üç kez tekrarlanan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 14'te verilen egride işaretlenerek çıkarım yapılır. Elde edilen sonuçların tamamı eğrinin sol tarafında yer alıyorsa agrega zararsızdır. İşaretlenen sonuçların bir tanesi bile eğrinin sağ tarafında kalıyorsa agrega zararlı kabul edilir. Bununla birlikte sonuçların eğri üzerinde toplanması halinde agregalar potansiyel olarak zararlı olmalarına rağmen alkaliler harç veya betonda nispeten daha düşük genleşmeye neden olur (TS 2517).



Şekil 14. Alkalideki azalma (Rc)-çözünmüş silis (Sc) ilişkisi

Bu metot her ne kadar hızlı reaktif agregaları belirlemede güvenilir olsa da yavaş reaktif agregalar için yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir. Bazı agregalar yüksek miktarda çözünebilir silis içermesine rağmen betonda küçük genleşmelere neden olabilir. Bu nedenle kimyasal yöntem metodu her zaman doğru sonuçlar sunmamaktadır (Stark vd., 1993).

1.10.5. Kullanılan Diğer Deney Yöntemleri

1.10.5.1. Jel-Pat Metodu

Jel-pat metodu petrografik mikroskop ile inceleme yapılamayacak kadar ince taneli reaktif silisin ortaya çıkarılmasını sağlamaktadır. Bu metotta koyu kıvamda hazırlanan bir çimento hamuru içerisine gömülen agrega, hamur yüzeyi tıraşlanarak görünür hale getirilir. Harç örnekleri üç gün boyunca alkali çözeltisi içerisine batırılır ve yüzeyi stereoskopik mikroskop yardımıyla incelenir. Bu metot ile agreganın reaktif olarak belirlenmesi halinde beton veya harç prizma metotlarından biri uygulanmalıdır (Çullu vd., 2010).

1.10.5.2. Alman Çözünme Metodu

Bu deney, opal ve flint içerikli agregaların potansiyel reaktifliğini belirlemeyi amaçlar. 1-2 veya 2-4 mm arasında değişen boyuttaki agregalar 90°C sıcaklıkta 4 N NaOH çözeltisi içerisinde bir saat süresince bekletilir. Ardından kurutulan ve tartılan agregada ortaya çıkan

kütlece kayıp miktara ‘alkalide çözünebilir’ adı verilmektedir. Bu yöntem agreganın alkali ortamındaki kimyasal kararsızlığını açığa çıkarmasına karşın farklı çimento bileşimleriyle nasıl davranış göstereceğini, genleşme oluşturup oluşturmayacağını saptayamamaktadır. Bu yöntem boyutu 1 mm altında olan agreganın potansiyel reaktifliğe olan katkısını dikkate almamaktadır (Berube ve Fournier, 1992).

1.10.5.3.Ozmotik Hücre Metodu

Ozmotik hücre metodu agrega parçası ile çimento ara yüzeyi modellenmesi esasına dayanmaktadır. Bu metotta iki odacık hazırlanarak her birine 1 N NaOH çözeltisi eklenir. S/ç oranı 0.55 olarak hazırlanan çimento hamuru ile odacıklar birbirinden ayrılır. 150-300 mm boyutlarında 12.40 g agrega bulunan odacığa reaksiyon odası adı verilmektedir. Diğer odacık ise havza odacığı olarak adlandırılır ve reaksiyon oluşmaya başladığında çimento hamuru bu odacıktan reaksiyon odacığına doğru hareket etmeye başlar. Her iki odacığın üzerinde bulunan ince borulardaki çözelti miktarındaki değişim, akışın hızı ve miktarını ölçmeyi sağlar. Günde 1.5-2.0 mm arasındaki akış agregada potansiyel reaktif silisin olduğunu gösterir. Eğer akış ters yönde olursa agregada reaktif silis bulunmadığı anlamına gelir. Bu metot, normal seviyede reaktivlik içeren agregalarda 30-40 gün içerisinde sonuç verirken yüksek miktarda reaktif silis içeren agregalarda 2-3 gün içerisinde sonuç vermektedir. Bu metot ile agreganın reaktifliği hızlı bir şekilde belirlenebilmektedir ve genleşme deneyleri ile uygulanması önerilmektedir (Varol, 2018).

1.10.5.4.Otoklav Metodu

Bazı araştırmalar sonucunda harç ya da beton numuneleri yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta alkali çözeltisi içerisinde ya da suda kaynatarak veya buhar kürü uygulayarak agreganın reaktifliğini ölçmede farklı yöntemler öne sürülmüştür. Bu deney için belirli bir yöntem bulunmamakta ve kullanılan malzeme miktarlarından numune boyutlarına ve kür koşullarına kadar birçok etken farklılık göstermektedir. Bu yöntemin amacı boy değişimi ve çatlaklar incelenerek agrega reaktifliğini belirlemektir (Ramyar vd., 2002).

1.10.5.5. Petrografik Analiz (ASTM C295)

Agregada bulunan minerallerin tür ve yüzdesine göre kayaçların sınıflandırılması işlemi petrografik analizdir. Agregalardan alınan ince kesitteki örneklerin optik mikroskop altında incelenmesi sonucunda içerdikleri potansiyel reaktif mineral fazlar belirlenmektedir. Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ve X ışını yayılımı (XRD) reaktif silisin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerdendir. Agregalara ek olarak hasara uğramış beton ve harçlardan alınan ince kesitli örnekler üzerinde yapılan incelemeler sonucunda hasarın ASR nedeniyle olup olmadığını tespit etmek mümkündür.

1.11. Silis Dumanı ve Alkali-Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi

Silis dumanı, silisyum metali ya da ferrosilisyum alaşımlarının üretimi esnasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin indirgenmesi neticesinde ortaya çıkan çok ince yapıdaki tozdur. Bu fırınların üst bölümlerinde sıcaklığın düşük olması sebebiyle SiO gazının havayla teması halinde hızla okside olup amorf yapıdaki SiO₂'ye dönüşür ve silis dumanı bileşiminin büyük bölümünü meydana getirir. Amorf yapıya sahip %85-%98 kadar silika içeren bu atık malzeme silis dumanı adını almaktadır. Bileşiminde ikincil bileşenler olarak karbon, demir oksit (Fe₂O₃), alümin (Al₂O₃), magnezyum oksit (MgO) ve alkaliler (Na₂O ve K₂O) bulunmaktadır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007; Yeğinobalı, 2011).

Silis dumanı, yüksek SiO₂ miktarı, amorf yapısı ve çok ince taneli olması sebebiyle yüksek seviyede puzolanik aktivitesi olan bir malzemedir. Betonda mineral katkı maddesi olarak kullanımı çimento hidratasyonu esnasında açığa çıkan Ca(OH)₂'i bağlayarak kalsiyum silikat hidratın (C-S-H) oluşmasını sağlar. Ca(OH)₂'in bağlanmasıyla çimento hamuru kimyasal direnci yüksek, mikro boşluk yapısı yoğun, geçirimsiz ve yüksek dayanımlı bir beton oluşumunu sağlar (Yüzer, 1998).

Silis dumanı açık gri ile koyu gri arasında değişen bir renktedir. İçerdiği karbon miktarının artmasıyla rengindeki koyuluk da giderek artmaktadır. Çok ince öğütülmüş bir yapıda olan silis dumanı parçalarının büyük bir kısmının boyutu 0.1-0.2 µm arasında değişmektedir. Çimento taneciklerinin boyutu silis dumanının ortalama boyutundan 100 kat daha fazladır. (Akçaözoğlu, 2007). Silis dumanı tane yapısının inceliği sebebiyle belirli bir

miktardaki çökme için betonda su ihtiyacını arttırmaktadır. Bu nedenle beton karışımında kullanılacak su miktarını azaltmak adına silis dumanı katkılı betonlarda yüksek oranda akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin de eklenmesi gereklidir (Erdoğan T. Y., 2003).

Çimentonun ve diğer puzolanik malzemelerin inceliğini ölçmede kullanılan Blaine yöntemi, silis dumanının inceliğini çok ince taneli yapısı nedeniyle tayin edememektedir. Nitrojen emme yöntemi yardımıyla belirlenen özgül yüzey alanı 130,000-280,000 cm²/g arasında değişkenlik göstermektedir. Betona katkı maddesi olarak eklenen silis dumanının özgül yüzey alanı genelde 200,000 cm²/g'dır.(Yeğınobalı, 2011).

Silis dumanının inceliği Tablo 4'te verilen benzer malzemelerin özgül yüzey alanları ile karşılaştırıldığında daha iyi görülmektedir (Yeğınobalı, 2011).

Tablo 4. Benzer malzemelerin özgül yüzey alanları

Malzemeler	Özgöl yüzey alanı (cm ² /g)
Silis dumanı	200000
Portland çimentosu	3000-4000
Uçucu kül	4000-7000
Yüksek fırın cürufu	3500-6000

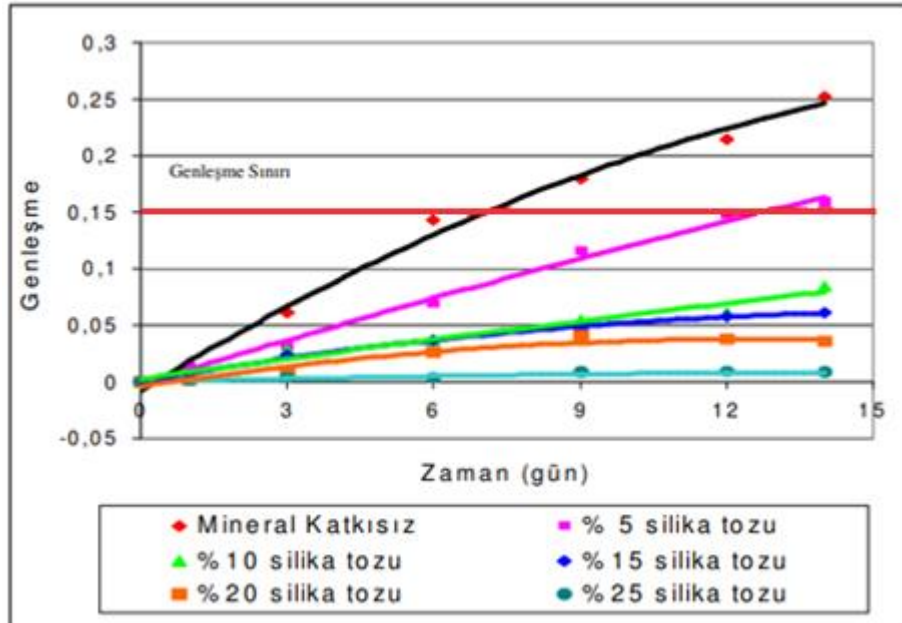
Özgöl ağırlığı 2.2-2.3 g/cm³ arasında olan silis dumanı betonda kullanıma uygundur. Toz halinde, yoğunlaştırılarak, sıkıştırılarak veya sulandırılarak ticari amaçla piyasaya sunulmaktadır (Baradan vd., 2012).

Silis dumanı, tanelerinin yüzey alanı büyüklüğü sebebiyle beton içerisindeki serbest haldeki suyun çoğunu bağlamaktadır. İnce silis taneleri çimento taneleri arasına girerek boşlukları azaltmakta ve yüzeye sızıntı oluşmasını engellemektedir. Böylelikle az miktarda suyu serbest bırakarak betonda terlemenin azalmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle beton yüzeyinden buharlaşmanın fazla olduğu yerlerde terlemenin azalması veya terleme oluşmaması plastik rötreten kaynaklı çatlak riskini arttırmaktadır (Özbek, 1998).

Mazloom ve arkadaşları (2004), silis dumanı miktarındaki artışın toplam rötre üzerinde önemli bir etki gösterdiğini ancak betondaki silis dumanı oranının artmasının otojen rötreyi arttırmadığını belirtmişlerdir.

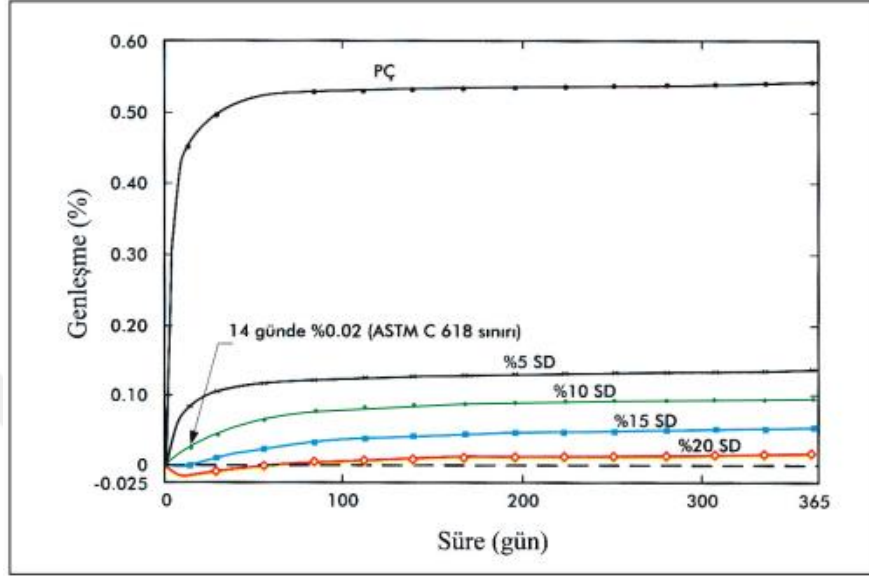
Silis dumanı büyük özgül yüzey alanı sayesinde alkalileri tutarak boşluk çözeltisindeki alkali oranını azaltır. Buna ilaveten silisin amorf halde bulunması nedeniyle silis dumanı çimentoyla yer değiştirilerek kullanıldığında beton katılaşmadan önce alkalilerle reaksiyon oluşturur. Silis dumanının yüksek inceliği sebebiyle bu reaksiyon beton taze iken hızla oluşur. Silis dumanı yeterli oranda kullanıldığında beton dayanım kazanmadan önce silis dumanı ve çimentodan ortama salınan Na ve K iyonlarının çoğu reaksiyon esnasında tüketilir. Beton gerekli dayanımı kazanmadan önce gerçekleşen reaksiyon yapıya hasar verebilecek genleşmelere ve çatlak oluşumlarına neden olmaz (Andiç, 2002).

Farklı mineral katkıları ve deney yöntemleriyle gerçekleştirilen araştırmalarda çimentoya minimum %10 oranında ikame edilen silis dumanı ASR genleşmelerini kontrol altına almada etkili olmuştur. Tosun (2001), yaptığı çalışmada çimentoya farklı oranlarda silis dumanı ikamesinin ASR genleşmesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmalar sonucunda %5 oranında silis dumanı ikamesinin genleşmeyi referans karışıma kıyasla azalttığı ancak sınır genleşme değeri altına düşürmediğini, %10 ve daha yüksek oranlarda silis dumanı ikamesinin genleşmeyi bir hayli azaltarak genleşme sınır değerinin çok altına düşürdüğünü ifade etmektedir (Şekil 15) (Gürkan, 2006).



Şekil 15. Farklı oranlarda silis dumanı ikame edilen harç çubuk numunelerin zamana bağlı genleşme değerleri

Hooton (1993), ASTM C441 deney yöntemi uygulanan yüksek alkali içerikli çimento yerine %10 oranında silis dumanı kullanıldığında genleşmenin 14 gün sonunda %0.02'nin altına düşürüldüğünü rapor etmektedir (Şekil 16) (Yeğinobalı, 2011).



Şekil 16. Silis dumanının harç çubukların genleşmesi üzerine etkisi

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma kapsamında alkali-silika reaksiyonu nedeniyle meydana gelen genleşmeyi azaltmadaki etkisini görmek amacıyla çimento ile farklı oranlarda silis dumanı ikame edilerek harç karışımları üretilmiştir. Deneysel çalışma Doğu Karadeniz Bölgesi yöre agregalarından alkali-silika itibarıyla en reaktif olarak belirlenen bir agregada üzerinde gerçekleştirilmiştir.

2.1. Malzeme Özellikleri

2.1.1. Çimento

Çalışmada Aşkale Çimento fabrikasında üretilen CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Bahse konu fabrikadan temin edilen çimentoya ilişkin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 5’te verilmektedir.

Tablo 5. Çimentoya ilişkin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler

Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşenler	%	32 µm elek üstünde kalan (%)	9,8	
SiO ₂	20,13	90 µm elek üstünde kalan (%)	--	
Al ₂ O ₃	4,77	Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3402	
Fe ₂ O ₃	3,2	Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,09	
CaO	63,24	Priz süresi (Vicat) (dk)	Başlangıç	180
MgO	1,69		Bitiş	210
SO ₃	2,78	Su Gereksinimi (%)		28
Na ₂ O	0,26	Hacim Genleşmesi (mm)		0
K ₂ O	0,91	Basınç Dayanımı (MPa)	2 gün	26,5
Cl ⁻	0,0113			
Çözünmeyen Kalıntı	1,38		28 gün	51,7
Kızdırma Kaybı	2,87			

2.1.2. Agregaya

Çalışmada kullanılan agregaya Artvin ili Şavşat ilçesi yöresinden temin edilmiştir. Agregaya ait fiziksel özellikler Tablo 6’da verilmektedir.

Tablo 6. Agreganın fiziksel özellikleri

Kuru özgül ağırlık (g/cm ³)	2,45
Doygun kuru yüzey özgül ağırlık (g/cm ³)	2,55
Görünen özgül ağırlık (g/cm ³)	2,71
Su emme oranı (%)	2,30

2.1.3. Silis Dumanı

Deney çalışmasında kullanılan silis dumanı İKSA İnşaat Katkıları San. Tic. Ltd. Şti.den temin edilmiş olup özellikleri Tablo 7’de verilmektedir. Kullanılan silis dumanına ait örnek Şekil 17’de verilmektedir.

Tablo 7. Silis dumanı fiziksel ve kimyasal özellikleri

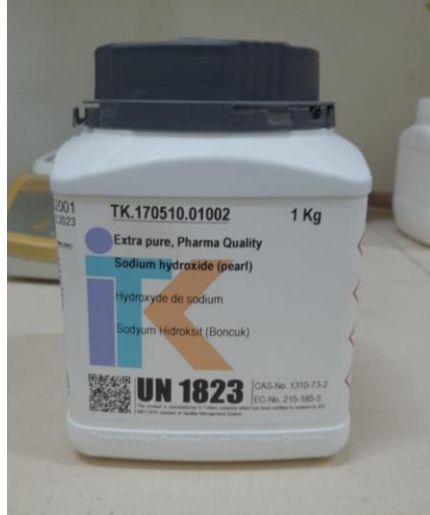
SiO ₂ (%)	93,00
Al ₂ O ₃ (%)	0,58
Fe ₂ O ₃ (%)	2,79
CaO (%)	0,60
MgO (%)	1,00
SO ₃ (%)	0,50
Na ₂ O	1,00
K ₂ O	0,10
Klorür	-
Kızdırma kaybı	0,50
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,20



Şekil 17. Kullanılan silis dumanı örneği

2.1.4. Sodyum Hidroksit (NaOH) Çözeltisi

Hızlandırılmış harç çubuk deneyinde sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır. Bu çözelti 900 ml suya 40 g toz halinde sodyum hidroksit eklenerek hazırlanmıştır. Akçay Kimya Sanayi Medikal Laboratuvar şirketinden temin edilen sodyum hidroksit Şekil 18’de verilmektedir.



Şekil 18. Çözeltiyi hazırlamada kullanılan sodyum hidroksit

2.2. Harç Çubuk Numunelerin Üretimi

Harç çubuk numunelerin hazırlanması amacıyla agrega 4, 8, 16, 30, 50 ve 100 nolu eleklerden elenmiştir. ASTM C1260 standardına uygun olarak belirlenen agrega granülometrisi Tablo 8’de verilmektedir.

Tablo 8. ASTM C1260 standardına uygun granülometrik bileşim

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

Silis dumanı kullanılmayan referans üretiminde agrega 990 g, çimento 440 g ve su 206,8 g olarak kullanılmıştır. Daha sonra yapılan üretimlerde ise silis dumanı farklı oranlarda çimentoya ikame edilmiştir. Harç çubuk üretimlerinde kullanılan malzeme miktarları Tablo 9’da verilmektedir. Harç karışımları ASTM C305 standardı uyarınca karıştırılarak hazırlanmıştır. Üretimlerin gerçekleştirildiği ve kullanılacak malzemelerin depolandığı ortam ASTM C1260 standardında belirtilen koşullara uygun şekilde ayarlanmıştır.

Tablo 9. Harç çubukları üretiminde kullanılan malzeme miktarları

Üretimler	Malzeme Miktarları (g)			
	Silis Dumanı	Çimento	Agrega	Su
Referans Üretim	0	440	990	206,8
%5 Silis Dumanı	22	418		
%10 Silis Dumanı	44	396		
%15 Silis Dumanı	66	374		
%20 Silis Dumanı	88	352		

Harç çubukları 25×25×285 mm ebadında olup kullanılan prizmatik metal kalıplar Şekil 19'da verilmektedir. Numunelerde meydana gelen boy değişimlerini ölçmek için aynı şekilden görüleceği üzere metal pimler kullanılmıştır. Harcı karıştırmak için kullanılan karıştırıcı Şekil 20'de verilmektedir.



Şekil 19. Harç çubuğu kalıpları



Şekil 20. Harç karıştırıcısı

Hazırlanan karışım kalıplara iki aşamada doldurulup her bir tabaka şişlenerek sıkıştırılmıştır. Bu şekilde üretilen harç çubuk numuneler Şekil 21’de verilmektedir. 24 saat kalıplarında bekletilen ve daha sonra kalıplardan çıkarılarak numaralandırılan numuneler Şekil 22’de verilmektedir. Dijital komparatörle başlangıç ölçümleri yapılan numuneler 80°C sıcaklıktaki su tankına yerleştirilmiştir. Numune boy ölçümü için kullanılan aparat Şekil 23’te verilmektedir. Su tankında 24 saat bekletilen numuneler çıkarılarak ilk boy ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Harç çubuk numuneler içinde 1 N NaOH çözeltinin bulunduğu kapalı kaplara koyularak tekrar 80°C sıcaklıktaki tanka yerleştirilmiştir. Tanka yerleştirilmiş numuneler Şekil 24’te verilmektedir. Bu tank içerisinde tutulan numunelerin 3, 7 ve 14 gün sonunda boyları ölçülmüş ve 1.8.2’de verilen Denklem 7 yardımıyla boy değişimleri yüzde olarak hesaplanmıştır.



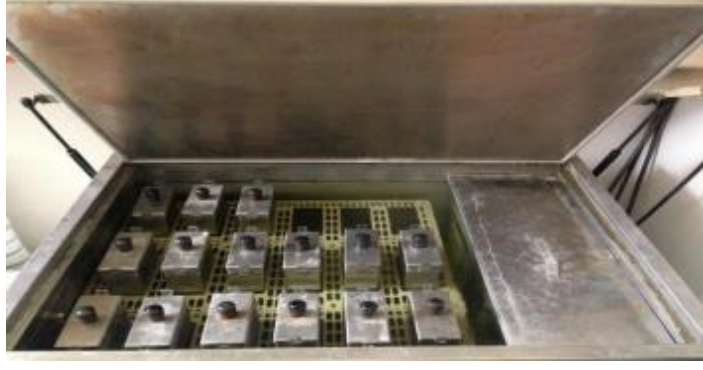
Şekil 21. Üretilen harç çubuk numuneler



Şekil 22. Kalıplarından çıkarılan ve numaralanan harç numuneler



Şekil 23. Boy ölçümleri için kullanılan aparat



Şekil 24. Alkali-silika deney tankına yerleştirilen numuneler

2.3. Agreganın Reaktifliğini Belirlemek İçin Gerçekleştirilen Ön Çalışma

Yapılan çalışmada alkali-silika reaktifliği zararlı olarak değerlendirilen bir agreganın kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla reaktivite potansiyeli olabilecek agregalar hakkında ön çalışma yapılmıştır. Yörede mevcut dört farklı lokasyondan agregalar temin edilmiş ve bu agregalar üzerinde hızlandırılmış harç çubuk deneyi vasıtasıyla reaktiviteleri deneysel olarak belirlenmiştir. Agregaların temin edildiği lokasyonlar ve ölçülen genleşme yüzdeleri Tablo 10’da verilmektedir.

Tablo 10. Agregaların temin edildiği lokasyonlar ve ölçülen genleşmeler

Numune Kodu	Temin Edilen Bölge	14 Günlük Genleşme (%)
A1	Trabzon-Yomra	0,0786
A2	Harşit Çayı Vadisi-Tirebolu	0,1373
A3	Artvin-Murgul	0,1523
A4	Artvin-Şavşat	0,2573

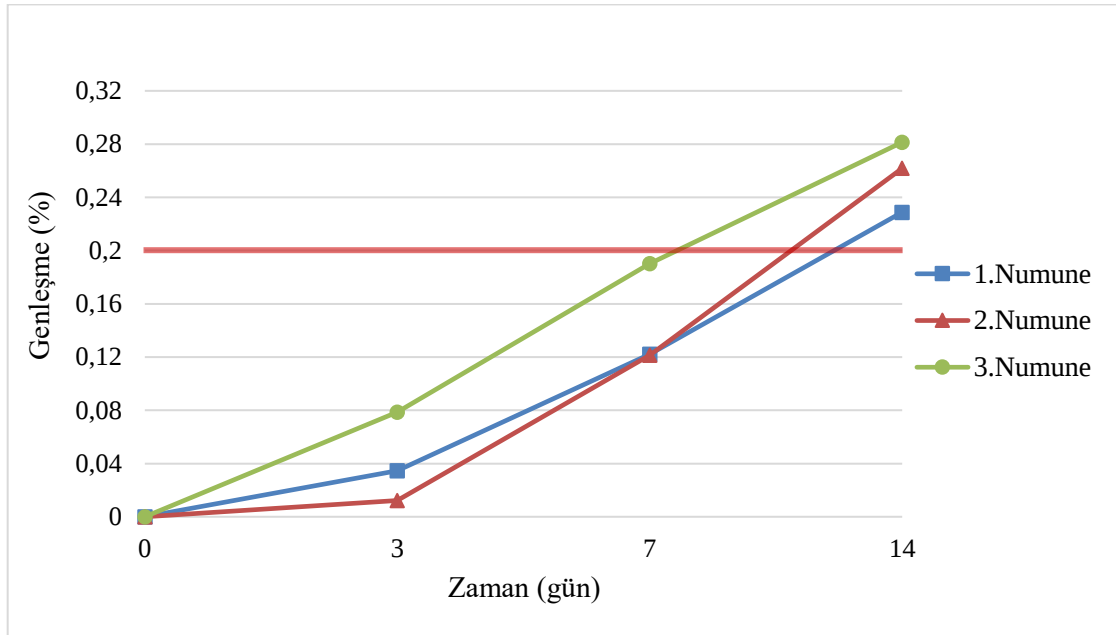
A1 kodlu agreganın 14 günlük genleşmesi %0,1’in altında kaldığından ASTM C1260 standardı uyarınca alkali-agrega reaktifliği itibariyle zararsız olarak değerlendirilmiştir. A2 ve A3 kodlu agregaların genleşmesi %0,1 ile %0,2 arasında kalmıştır ve bu bölge ilgili standarda göre saha performansında hem zararsız hem de zararlı davranış gösterebilir

niteliktedir. A4 kodlu agregaya ise reaktiflik olarak sınır değeri olan %0,2'yi aştığından zararlı agregaya sınıfı olarak değerlendirilmektedir. Elde edilen ön deney sonuçlarına göre alkali-silika itibarıyla en riskli görünen agregaya Artvin-Şavşat yöresine ait A4 kodlu agregaya olarak tespit edilmiş ve çalışmada kullanılmasına karar verilmiştir.

Alkali-silika reaksiyonu açısından en reaktif olarak değerlendirilen A4 kodlu agregaya ile gerçekleştirilen üretimler referans numune olarak kullanılmıştır. Bu agregaya ilişkin elde edilen deney sonuçları Tablo 11'de verilmektedir. Agregaya ait genleşme-zaman ilişkisini gösteren grafik Şekil 25'te verilmektedir. Diğer agregalar ile yapılan üretilere ait deney sonuçları çalışmasının sonunda yer alan ekler kısmında verilmektedir.

Tablo 11. A4 kodlu agregaya ait genleşme ölçümleri

Numune No	Genleşme (%)		
	3. gün	7. gün	14. gün
1. Numune	0,0347	0,1221	0,2288
2. Numune	0,0123	0,1214	0,2618
3. Numune	0,0786	0,1902	0,2814
Ortalama	0,0419	0,1446	0,2573



Şekil 25. Agregaya ait genleşme-zaman ilişkisi

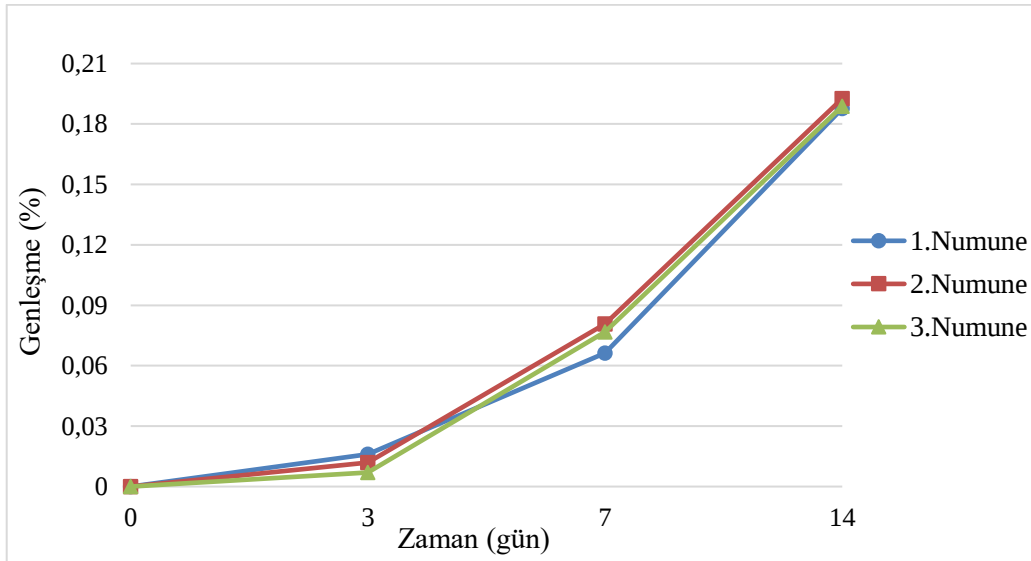
3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME

Yapılan ön çalışma ile agrega reaktifliği belirlendikten sonra silis dumanı çimento ile farklı oranlarda ikame edilerek elde edilen numuneler üzerinde 3, 7 ve 14 gün sonunda ölçülen genleşme değerleri yüzde olarak hesaplanmıştır. Üretimi yapılan harç çubuk numunelerin deney sonuçları tablo ve grafikler halinde aşağıda verilmektedir.

%5 oranında silis dumanı ikame edilen harç çubuklara ait alkali-silika reaksiyonu genleşme değerleri Tablo 12’de verilmektedir.

Tablo 12. %5 silis dumanı ikameli numunelere ait sonuçlar

Numune No	Genleşme (%)		
	3. gün	7. gün	14. gün
1. Numune	0,0161	0,0663	0,1877
2. Numune	0,0119	0,0807	0,1926
3. Numune	0,0070	0,0768	0,1888
Ortalama	0,0117	0,0746	0,1897



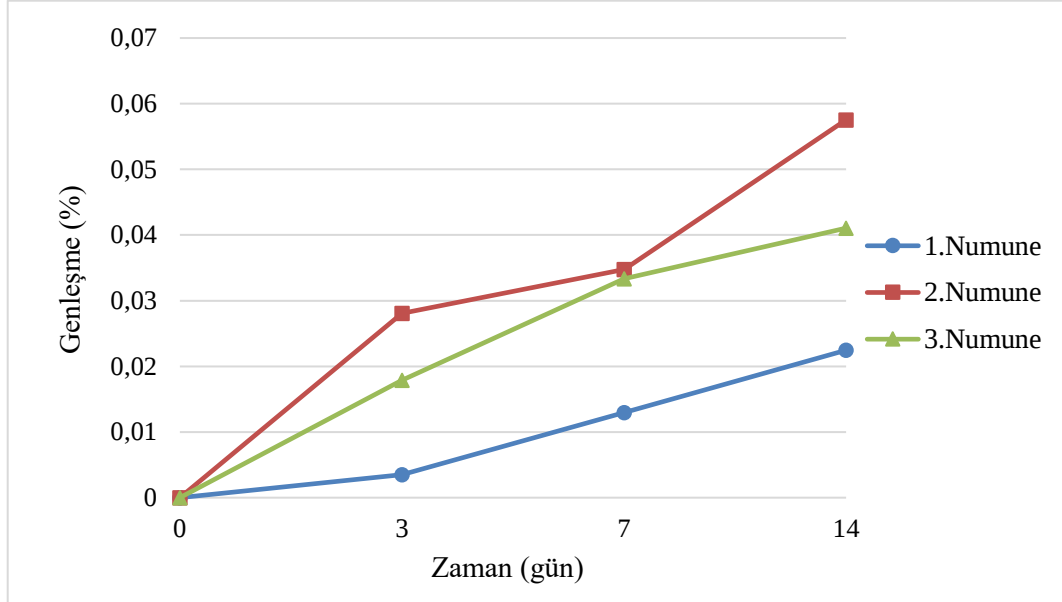
Şekil 26. %5 silis dumanı ikameli numunelere ait genleşme-zaman ilişkisi

Şekil 26'da %5 oranında silis dumanı ikame edilen harç çubuklarına ait zamana bağlı ölçülen genleşmeler yüzde olarak verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 14 gün sonunda ölçülen ortalama genleşme değeri %0,1897 olmuştur. Bu değer referans harç çubuklarına kıyasla yaklaşık %26,3 oranında azalmıştır ancak ASTM C1260 deney standardı uyarınca zararsız bölge için sınır değeri %0,1'in altına düşürmekte yetersiz olmuştur.

%10 oranında silis dumanı ikame edilen harç çubuklarına ait alkali-silika reaksiyonu genleşme değerleri Tablo 13'te verilmektedir.

Tablo 13. %10 silis dumanı ikameli numunelere ait sonuçlar

Numune No	Genleşme (%)		
	3. gün	7. gün	14. gün
1. Numune	0,0035	0,0130	0,0225
2. Numune	0,0281	0,0347	0,0575
3. Numune	0,0179	0,0333	0,0411
Ortalama	0,0165	0,0270	0,0404



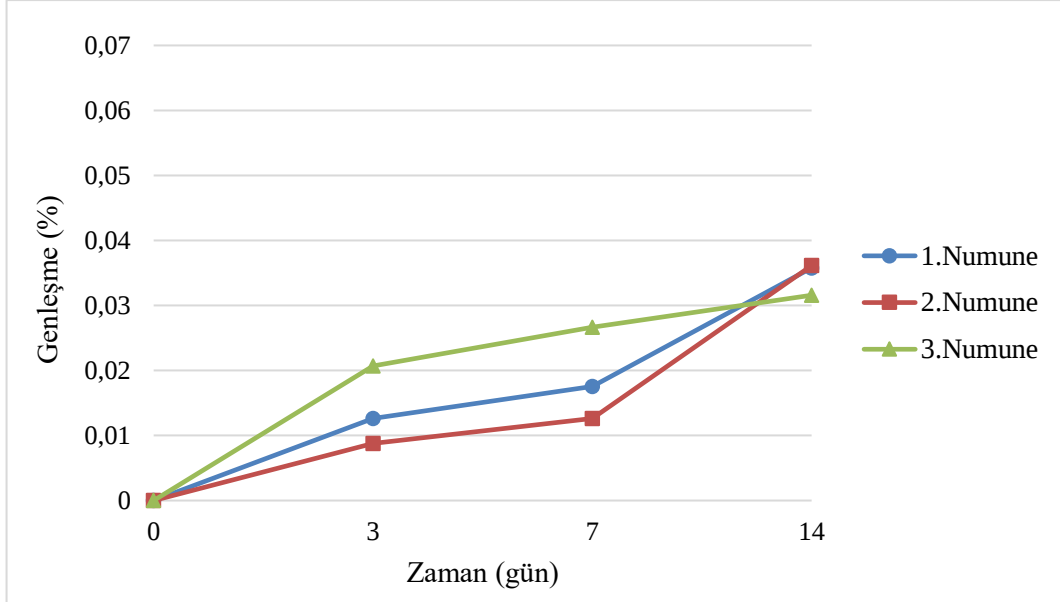
Şekil 27. %10 silis dumanı ikameli numunelere ait genleşme-zaman ilişkisi

Şekil 27’de %10 silis dumanı ikameli harç çubuklarına ait zamana bağlı genleşme değerleri verilmektedir. Harç çubuklar için 14 gün sonunda ölçülen ortalama genleşme değeri %0,0404 olup bu değer referans harç çubuklarına göre yaklaşık %84,3 oranında azalmıştır. %10 oranında silis dumanı ikamesi ilgili standarda göre genleşme yüzdesini sınır değer altına düşürdüğü görülmektedir.

%15 oranında silis dumanı ikame edilen harç çubuklara ait alkali-silika reaksiyonu genleşme değerleri Tablo 14’te verilmektedir.

Tablo 14. %15 silis dumanı ikameli numunelere ait sonuçlar

Numune No	Genleşme (%)		
	3. gün	7. gün	14. gün
1. Numune	0,0126	0,0175	0,0358
2. Numune	0,0088	0,0126	0,0361
3. Numune	0,0207	0,0267	0,0316
Ortalama	0,0140	0,0189	0,0345



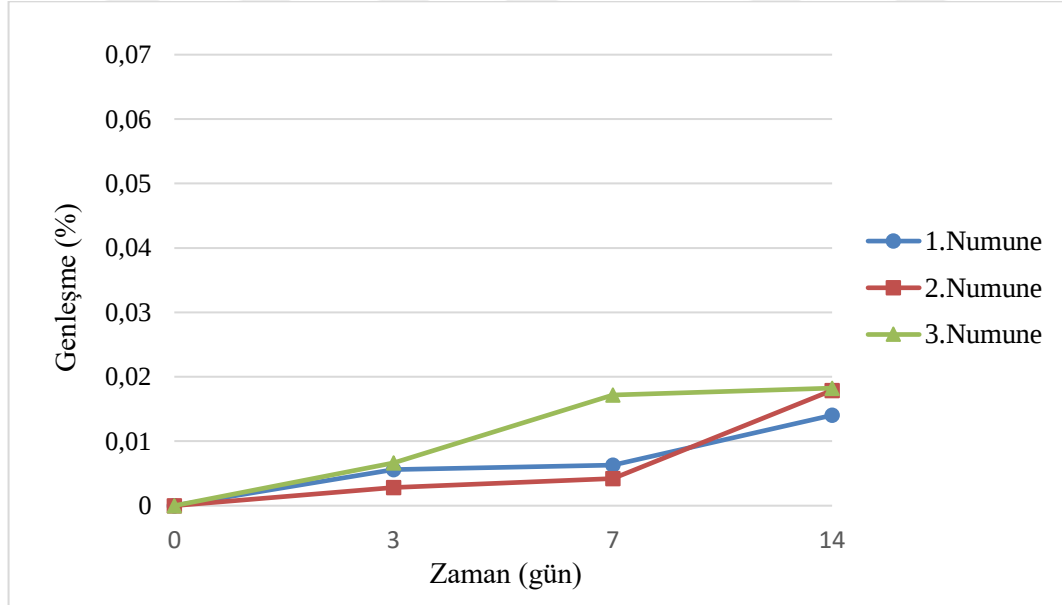
Şekil 28. %15 silis dumanı ikameli numunelere ilişkin genleşme-zaman ilişkisi

Şekil 28’de %15 silis dumanı ikameli harç çubuklarına ait zamana bağlı genleşme yüzdesi grafiği verilmektedir. Harç çubuklarına ilişkin olarak 14 gün sonunda ölçülen ortalama genleşme değeri %0,0345 olup bu değer referans harç çubuk üretimiyle karşılaştırıldığında yaklaşık %86,6 oranında azaldığı belirlenmiştir.

%20 oranında silis dumanı ikame edilen harç çubuklara ait alkali-silika reaksiyonu genleşme değerleri Tablo 15’te verilmektedir.

Tablo 15. %20 silis dumanı ikameli numunelere ait sonuçlar

Numune No	Genleşme (%)		
	3. gün	7. gün	14. gün
1. Numune	0,0056	0,0063	0,0140
2. Numune	0,0028	0,0042	0,0179
3. Numune	0,0067	0,0172	0,0182
Ortalama	0,0050	0,0092	0,0167

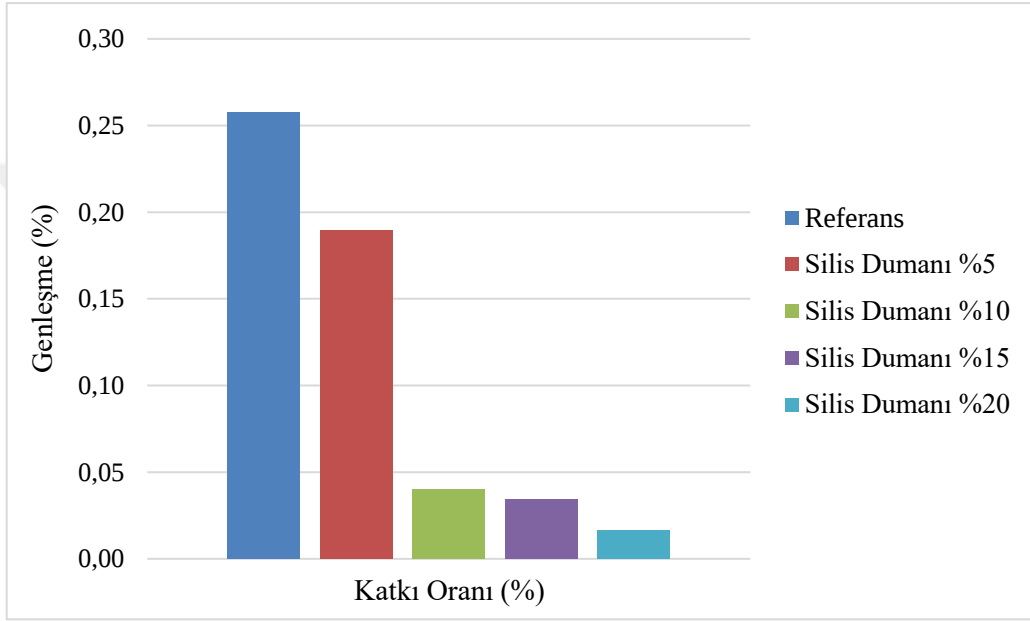


Şekil 29. %20 silis dumanı ikameli numunelere ait genleşme-zaman ilişkisi

Şekil 29’da %20 silis dumanı ikameli harç çubuklarına ilişkin olarak belirlenen zamana bağlı genleşme yüzdesi değerleri verilmektedir. Harç çubuk numuneleri için 14 gün

sonunda ölçülen ortalama genleşme değeri %0,0167 mertebesinde olup bu değer referans harç çubuklarına kıyasla yaklaşık %93,5 oranında azalmıştır.

İkame oranına bağlı olarak 14 gün sonunda ölçülen ortalama genleşme değerleri Şekil 30'da verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere silis dumanı ikame oranının artışıyla bağlı ölçülen genleşme değeri hatırı sayılır biçimde azalmaktadır.



Şekil 30. Silis dumanı ikameli numunelerin 14 günlük genleşme-katkı oranı ilişkisi

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada alkali-silika açısından reaktif olan bir agregayı beton üretiminde kullanılabilir hale getirmek amacıyla silis dumanının etkinliği araştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. 14 gün sonunda alkali-silika reaktifliği nedeniyle genleşmesi %0.2573 olarak ölçülen agrega ASTM C1260 standardı uyarınca zararlı olarak değerlendirilmiştir.
2. Silis dumanının çimentoya %5 oranında ikame edilmesi halinde 14 günlük genleşme değeri %0,1897 mertebesinde ölçülmüştür. Bu değer standartta alkali-silika itibariyle zararsız olarak belirtilen sınır değer %0,10'un üzerinde olduğundan %5 silis dumanı ikamesinin alkali-silika genleşmesini bastırmada yetersiz kaldığı görülmektedir.
3. Silis dumanı ikamesi %10, %15 ve %20 oranında olması durumunda 14 günlük genleşmeler sırasıyla %0,0404, %0,0345 ve %0,0167 mertebede belirlenmiştir. Bu genleşme değerlerinin ilgili standartta belirtilen alkali-silika itibariyle zararlı sınır değer %0.20'nin oldukça altında olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu oranlarda silis dumanı ikamesi alkali-silika reaktifliğini bastırmada yeterli olduğu görülmektedir.
4. Gerçekleştirilen deneysel çalışma ile sınırlı olmak kaydıyla silis dumanı ikamesinin alkali-silika reaksiyonunu bastırmada olumlu etkisi açıkça görülmektedir.
5. Çalışma koşulları sınırlı olmak kaydıyla, %10 ve üzeri oranlarda silis dumanı ikamesinin genleşmeyi azaltmada etkili olduğu açıkça görülmektedir. Ancak %15 ve %20 oranında silis dumanı ikamesi işlenebilirlik açısından yaratacağı soruna bağlı olarak harç karışımını yerleştirme ve sıkılaştırma işlemlerinde zorluklara sebep olması söz konusudur. Bu nedenle alkali-silika reaktifliğini bastırmak amacıyla %10'dan daha fazla oranlarda silis dumanı ikamesinin kullanımı bir anlam taşımamaktadır.
6. Deney koşulları ile sınırlı olmak koşuluyla sonuçlar dikkate alındığında yapılacak bir çalışmada %5 ve %10 arasında farklı oranlarda silis dumanı ikamesinin denenmesinin uygun olabileceği söylenebilir. Böylece daha az oranda silis dumanı kullanmak suretiyle alkali-silika reaktifliğini kontrol altına almak mümkün olabilir.
7. Çalışmada silis dumanının yalnızca alkali-silika kaynaklı genleşmeyi bastırmadaki etkinliği değerlendirilmiştir. Silis dumanı ikamesinin mekanik özellikler itibariyle de etkisi farklı bir çalışmada değerlendirilebilir.

5. KAYNAKLAR

- Abit, Ö. 1998. Alkali Silis Reaksiyonunun Kimyasal Katkıları ile Önlenmesi, Azaltılması veya Onarılması, TC Karayolları Kurs Programı, Ankara.
- Akçaözoğlu, K., 2007. Silis Dumanı İçeren Yüksek Dayanımlı Harçlarda Numune Boy Değişiminin Basınç Dayanımı ve Birim Kısılma Üzerindeki Etkisi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- American Society for Testing and Materials, 2007. ASTM C1260, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates.
- American Society for Testing and Materials, 2012. ASTM C295, Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete.
- American Society for Testing and Materials, 2017. ASTM C289. Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method).
- American Society for Testing and Materials, 2018. ASTM C227, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method).
- American Society for Testing and Materials, 2020. ASTM C1293, Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction.
- Andiç, Ö., 2002. Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkıları Yardımı ile Kontrol Altına Alınması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Aşık, İ., Şen, H., Ergintav, Y., Ünsal, A., Şentürk, E. ve Bayrak, E., 2004. Alkali Agregat Reaksiyonu Yönünden Zararlı Olan Bir Ocağın İyileştirilmesi, Beton Kongresi, Ankara Bildiriler Kitabı, 1-10.
- Aydın, E. G., 2012. Çeşitli Mineral Katkıların Betonda Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Baradan, B., 2000. Yapı Malzemesi II, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S., 2012. Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., 2010. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul.

- Bayhan, B., 2006. Deprem Hasarlarının Bir Bileşeni Olarak Alkali-Silika Reaksiyonları, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bektaş, F., 2002. Preventive Measures Against Alkali-Silika Reaction, Yüksek Lisans Tezi. O.D.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Berube, M. A. ve Fournier, B., 1992. Accelerated Test Methods for Alkali-Aggregate Reactivity, Advances in Concrete Technology, Canada.
- Binal, A., 2004. Pesimum Reaktif Agrega İçeriğinin Alkali-Silika Reaksiyonuna Etkisinin Deneysel Yöntemlerle Araştırılması. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 17, 2, 119-128.
- Çetin, M., Baki, V. A. ve Gürbüz, A., 2018. Silis Dumanı Katkılı Beton Harçlar Üzerine Deneysel Bir Çalışma, Türk Hidrolik Dergisi, 2, 2.
- Çullu, M., Subaşı, S. ve Bolat, H., 2010. Beton Kanseri-Alkali Silika Reaksiyonu, e-Journal of New World Sciences Academy, 5, 3, 526-540.
- Davies, G. ve Oberholster, R. E., 1987. Use of the NBRI Accelerated Test to Evaluate The Effectiveness of Mineral Admixtures in Preveting the Alkali Silica Reaction, Cement and Concrete Research, 17, 97-107.
- Demir, İ., 2010. Alkali-Silika Reaksiyonu Etkisine Maruz Aynı Oranda Silis Dumanı ve Uçucu Kül İçeren Harçların Mekanik Özellikleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25, 4, 749-758.
- Diamond, S., 1999. Unique Response LiNO₃ as An Alkali Silica Reaction-Preventive Admixture, Cement and Concrete Research, 29, 1271-1275.
- Diñçdemir, İ., 2015. Alkali-Silika Reaksiyonunun İyileştirilmesinde Mineral ve Kimyasal Katkıların Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Erdoğan, S. T. ve Erdoğan, T. Y., 2007. Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 263-329.
- Erdoğan, T. Y., 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık, Ankara.
- Farny, J. ve Kerkhoff, B., 2007. Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Concrete Technology.
- Farny, J. ve Kosmatka, S., 1997. Diagnosis and Control of Alkali Aggregate Reactions in Concrete, American Concrete Pavement Association.
- Figg, J., 1987. ASR-Inside Phenomena and Outside Effects (Crack Origin and Pattern), In Concrete Alkali Aggregate Reactions, Proceedings of the 7th International Conference, edited by Grattan-Bellew, Patrick E., Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 152-156.

- Forster, S. W., 1998. State of the Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity, Am. Concr. Inst. ACI, 221, 1-23.
- Gillott, J. E. ve Rogers, C. A., 1994. Alkali-Aggregate Reaction and Internal Release of Alkalis, Magazine of Concrete Research, 167, 99-102.
- Glasser, F. P., 1992. Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction, in The Alkali-Silica Reaction in Concrete, CRC Press, 30-53.
- Gün, M., 2007. Adapazarı Bölgesindeki Agregaların Alkali Agrega Reaksiyonu Bakımından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gürkan, A., 2006. Pomza ve Zeolitin Alkali Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Hawkins, M. R., 1983. Alkali Aggregate Reaction: Minimizing the Risk of Alkali-Silica Reaction, Guidance Notes, Report of a Working Party, Cement and Concrete Association, Slough, UK.
- Hobbs, D. W., 1988. Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thomas Telford, London, 183.
- Hooton, R. D., 1993. Influence of Silica Fume Replacement of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulfate Attack, Freezing and Thawing and Alkali Silica Reactivity, Materials Journal, 90, 2, 143-161.
- Karakaş, S., 2013. Harşit Çayı Vadisi Agregalarının Alkali Silika Reaksiyonu Bakımından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Katayama, T., 1996. Characteristics on Alkali Aggregate Reaction, The Study on The Maintenance and Rehabilitation of The Highway Bridges in The Republic of Turkey.
- Mazloom, M., Ramezaniapour, A. A. ve Brooks, J. J., 2004. Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, Cement&Concrete Composites, 26, 347-357.
- Mc Joy, W. J. ve Caldwell, A. J., 1951. New Approach to Inhibiting Alkali Aggregate Expansion, Journal of American Concrete Institute, 22, 693-706.
- Müyesser, D., 2016. Cam Agrega İçeren Harçlarda ASR Oluşumu ve Önleme Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Nayır, S., 2015. Mineral Katkıların Alkali-Silika Reaksiyonunu İyileştirmede Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Neville, A., 1997. Properties of Concrete, John Wiley & Sons. Inc., New York.
- Nishibayashi, S. ve Yamura, K., 1992. Effect of Reactive Fine Aggregate on Expansion Characteristics of Concrete due to Alkali Aggregate Reaction, The 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 723-730, London.

- Özbek, R., 1998. Silis Dumanının Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Poole, A. B., 1992. Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, in The Alkali-Silica Reaction in Concrete, Ed. R. N. Swamy, Van Nostrand Reinhold, 30-53, New York.
- Ramyar, K., 2013. Betonda Alkali-Silis Reaksiyonu: Bir Derleme, Hazır Beton, 70-82.
- Ramyar, K., Dönmez, H. ve Andiç, Ö., 2002. Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Çimento Endüstrisi-Üniversite İşbirliği Araştırma Projesi Raporları, Rapor No:9, Ege Üniversitesi, 2002, İzmir.
- Regourd-Moranville, M., 1989. Product of Reaction and Petrographic Examination, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 445-456, Kyoto.
- Stark, D., 1991. Handbook for The Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures, Strategic Highway Research Program, Washington.
- Stark, D., Morgan, B. ve Okamoto, P., 1993. Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity, Strategic Highway Research Program, Washington.
- Swamy, R. N., 1992. Testing for Alkali Silica Reaction, in The Alkali Silica Reaction in Concrete, Van Nostrand Reinhold, 54-95, New York.
- Swamy, R. N., 1994. Alkali-Aggregate Reaction-The Bogeyman of Concrete, American Concrete Institute Special Publication, Derleyici P. K. Mehta, 144, 105-139.
- Şimşek, O., 2009. Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Tosun, K., 2001. Uçucu Kül ve Silika Dumanının Alkali Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- TS 2517, 1977. Alkali-Agrega Reaktivitesinin Kimyasal Yolla Tayini, T.S.E., Ankara.
- Uygunoğlu, T., 2009. Yüksek Oranda Silis Dumanı İçeren Harçlarda Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) Gelişiminin İncelenmesi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 5, 2, 9-16.
- Varol, O. O., 2018. Van İli Kuzeyinde Yer Alan Ortaç Volkanik Agregalarda ASR Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Woods, H., 1968. Durability of Concrete Construction, American Concrete Institute.
- Yalçın, H. ve Özalp, R., 1974. Betonlarda Alkali-Agrega Reaksiyonu ve Türkiye Çimentolarının Alkalinite Değerleri, Devlet Su İşleri, Ankara.

- Yazıcı, Ş., Anuk, D. ve Arel, H. Ş., 2010. Metakaolin Kullanımının Harçların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25, 2.
- Yeğınobalı, A., 2011. Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 7.Baskı, AR-GE Enstitüsü, Ankara.
- Yıldırım, K., 2013. Betonda Alkali Silika Reaksiyonunun Azaltılmasında Mineral Katkı Kombinasyonlarının Optimizasyonu, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Yüzer, N., 1998. Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanlara Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi ile Araştırılması, Doktora Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



6. EKLER

Ek 1. Agregalara ait harç çubuk numune deney sonuçları

Ek Tablo 1. Yomra yöresine ait agregaya ait genleşme ölçümleri

Numune No	Genleşme (%)		
	3.gün	7.gün	14.gün
1.Numune	0,0372	0,0512	0,0653
2.Numune	0,0435	0,0523	0,0537
3.Numune	0,0947	0,1011	0,1168
Ortalama	0,0585	0,0682	0,0786

Ek Tablo 2. Harşit yöresine ait agregaya ait genleşme ölçümleri

Numune No	Genleşme (%)		
	3.gün	7.gün	14.gün
1.Numune	0,0109	0,0818	0,1161
2.Numune	0,0207	0,0923	0,1330
3.Numune	0,0081	0,1049	0,1628
Ortalama	0,0132	0,0930	0,1373

Ek Tablo 3. Murgul yöresine ait agregaya ait genleşme ölçümleri

Numune No	Genleşme (%)		
	3.gün	7.gün	14.gün
1.Numune	0,0018	0,0702	0,1330
2.Numune	0,0189	0,0863	0,1596
3.Numune	0,0193	0,0860	0,1642
Ortalama	0,0133	0,0808	0,1523

ÖZGEÇMİŞ

Çiğdem ERDOĞAN, Lise öğrenimini Tevfik Serdar Anadolu Lisesinde tamamladı. 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü bitirdi. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

