

766006

**ERMENEK HAVZASI ÇETİNKALESİ TEPE CİVARI
KIRMATAŞLARININ ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU
AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Saniye TABAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPI EĞİTİMİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2005

ANKARA

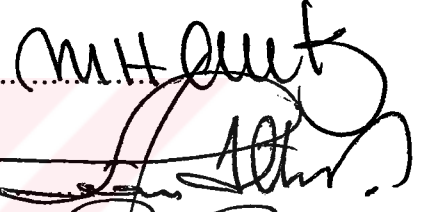
Saniye TABAN tarafından hazırlanan ERMENEK HAVZASI ÇETİNKALESİ TEPE CİVARI KIRMATAŞLARININ ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU AÇISINDAN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Prof. Dr. Metin Arslan
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan:.....Prof. Dr. M. Haluk Gelik.....



Üye:.....Prof. Dr. Sinan Altın.....



Üye:.....Prof. Dr. Metin Arslan.....



Üye:.....

Üye:.....

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



**ERMENEK HAVZASI ÇETİNKALESİ TEPE CİVARI KIRMATAŞLARININ
ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU AÇISINDAN İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Saniye TABAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2005**

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, Ermenek Havzası Çetinkalesi Tepe civarına ait kayalardan üretilen kırmataşların alkali silika reaksiyonuna ilişkin özelliklerini belirlemektir. Kırmataş örnekleri üzerinde alkali-silika reaksiyonunu belirlemek için kimyasal analiz ve hızlandırılmış harç çubuk deneyleri yapılmıştır. Verilerin istatistik analizleri yapılarak bulgular standart değerlerle karşılaştırılmıştır. Kimyasal analiz sonuçları ilgili standarda göre zararsız bölgede yer almıştır. Hızlandırılmış harç çubuk deneyinden elde edilen 14 ve 28 günlük boy değişim değerlerinin, alkali silika reaksiyonu için standartta öngörülen %0.1 ve %0.2 genleşme sınırının altında olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, araştırma bölgesinden elde edilecek kırmataşların alkali silika reaksiyonu açısından zararsız olduğu anlaşılmıştır.

Bilim Kodu : 2251101
Anahtar Kelimeler : Alkali silika reaksiyonu, kırmataş, harç çubuğu
Sayfa Adedi : 71
Tez Yöneticisi : Prof.Dr. Metin ARSLAN

**INVESTIGATION OF CRUSHED STONES AROUND ÇETİNKALESİ HILL
IN ERMENEK REGION ACCORDING TO ALKALI SILICA REACTION
(M.Sc. Thesis)**

Saniye TABAN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
June 2005**

ABSTRACT

The goal of this study is to determine the characteristics of crushed stones that are produced from rocks belonging to Çetinkalesi Hill in Ermenek Region. Chemical analyses and accelerated mortar bar experiments are carried out on crushed stones samples in order to determine alkali silica reaction. By applying statistical analyses on dates, they are compared with standard values. The results of chemical analyse are found in the harmless range of concerned standards. By using mortar bar experiments, 14 and 28 days expansion variation values are measured. It is recognised that the values are below the limits % 0.1 and % 0.2 of the standard required for alkali silica reaction. In conclusion, it is shown that the crushed aggregates found are harmless and reliable with respect to alkali-silica reaction.

Science Code : 2251101
Key Words : Alkali silica reaction, crushed stone, mortar bar
Page Number : 71
Adviser : Prof.Dr. Metin ARSLAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Metin ARSLAN'a, desteğini esirgemeyen hocam "G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi" Yapı Eğitimi Bölüm Başkanı Prof. Dr. Haluk ÇELİK'e, deneysel işlemlerin gerçekleştirilmesinde yardımcı olan "DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı", Kimya Laboratuvarı şube müdürü Kim.Müh. Metin HALICI ve ekibine, bilgilerinden yararlandığım BM İnşaat ve Mühendislik A.Ş. çalışanlarından Jeoloji Mühendisi Seyhan Önç'e, ayrıca manevi destekleriyle beni hiç bir zaman yalnız bırakmayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	Sayfa iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
RESİMLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Alkali - Silika Reaksiyonu	3
2.1.1. Alkali - silika reaksiyonunu etkileyen faktörler	7
2.1.2. Alkali - silika reaksiyonunun belirtileri	24
2.1.3. Alkali - silika reaksiyonunu önlemeye ilişkin güncel çalışmalar	35
2.1.4. Alkali-silika reaksiyonunu belirlemek için kullanılan güncel yöntemler	39
2.2. Ermenek Havzası Coğrafi Konumu ve Bölge Jeolojisi	42
3. MATERYAL VE METOT	44
3.1. Materyal	44
3.1.1. Kırmataş	44
3.1.2. Çimento	44

3.2. Metot	45
3.2.1. Deney örneklerinin hazırlanması	46
3.2.2. Kimyasal analizler.....	51
3.2.3. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi.....	52
3.2.4. İstatistiksel Metodlar	55
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	57
4.1. Kimyasal Analiz	57
4.2. Hızlandırılmış Harç Çubuğu.....	59
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ	71

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Reaktivite seviyelerine göre mineral ve kayalar	15
Çizelge 3.1. Çimento kimyasal özellikleri.....	45
Çizelge 3.2. Harç çubuğu ve hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri için malzeme karışım oranları.....	47
Çizelge 3.3. Harç çubukları malzeme karışım miktarları.....	48
Çizelge 3.4. Harç çubuk metodu deney sonuçlarının ASTM C-1260'a göre değerlendirilmesi	55
Çizelge 3.5. Standart bir kutu grafiğinin yapısı ve özellikleri.....	56
Çizelge 4.1. Kırmataş örneği kimyasal analiz verileri.....	57
Çizelge 4.2. Harç çubuklarının 3, 7, 14 ve 28 günlük boy değişim değerleri açıklayıcı istatistikleri	59
Çizelge 4.3. Harç çubuklarının 3, 7, 14 ve 28 günlük boy değişim değerleri varyans analiz tablosu	60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Çimentodaki alkali miktarını, alkali silika genleşmesine etkisi.....	8
Şekil 2.2. Çimento Na ₂ O eşdeğeri %'si çimento dozajına bağlı olarak beton alkali miktarları.....	12
Şekil 2.3. Farklı reaktif agrega tane boylarına sahip harç prizmalarının boyca genleşmesi.....	17
Şekil 2.4. Farklı reaktif agrega tane boylarına sahip harç prizmalarının boyca genleşmesi.....	19
Şekil 2.5. 224 günlük genleşme ile agregadaki reaktif silika miktarı arasındaki bağıntı.....	20
Şekil 2.6. Agregadaki reaktif silika bileşeni boyutunun, alkali agrega genleşmesine etkisi	21
Şekil 2.7. Farklı iklimlerdeki beton kaplamalarında derinlik bağlı nem ilişkisi	23
Şekil 2.8. ASR'nin neden olduğu harita çatlakları.....	25
Şekil 2.9. ASR'den kaynaklanan çatlaklara ilişkin örnek görünüşler.....	26
Şekil 2.10. Zemin üzerinde yanal basınca maruz kalmayan beton kaplamalarda ASR çatlakları için model	30
Şekil 2.11. Ermenek Havzası Çetinkalesi Tepe ve Sazak Deresi Bölgesi	43
Şekil 4.1. Çözünen silika ve alkaliniteye azalma değerlerine göre, altı farklı agrega ocağına ait örneklerin, ASTM C 289 grafiği kullanılarak zararlı-zararsız agrega olarak sınıflanması	58
Şekil 4.2. Harç çubuklarının 3, 7, 14 ve 28 günlük boy değişimlerine ilişkin regresyon analiz grafiği.....	61
Şekil 4.3. Harç çubuklarının 3, 7, 14 ve 28 günlük boy değişimlerine kutu ilişkin grafiği	63

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Hong Kong şehrinde beton kaplama duvarlarda alkali-silika reaksiyonu sonucu gelişmiş harita şekilli çatlaklar	6
Resim 2.2. Avusturalya'da köprü ayağında ASR etkisi sonucu gelişen çatlaklar	7
Resim 2.3. a) Beton yollarda görülen ASR etkisi, b) Köprülerde görülen ASR etkisi	10
Resim 2.4. Opallerde gelişen ASR etkisi	14
Resim 2.5. ASR'den kaynaklanan çatlaklara ilişkin görünüşler	27
Resim 3.1. Üçlü harç çubuğu kalıbı	49
Resim 3.2. Harç çubuklarının uçlarına yerleştirilen pim	50
Resim 3.3. Harç çubukları (Mortar bar)	50
Resim 3.4. Termostat'lı kür tankı	53
Resim 3.5. Dijital Komparatör ile örneklerin boy ölçümü	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
S_c	Orijinal süzüntüdeki silis konsantrasyonu (mmol/litre)
V	200 ml.'lik çözeltiden çekilen numune hacmi (ml)
C	Kolorimetrede ölçülen çözeltinin silis konsantrasyonu (mmol/litre)
R_c	Alkali azalması (mmol/litre)
V_1	200 ml'lik çözeltiden çekilen numune hacmi (ml)
V_2	Numune için sarf edilen hidroklorik asit hacmi (ml)
V_3	Tanık numune için sarfedilen hidroklorik asit hacmi (ml)
%L	Boy değişim yüzdesi
L_0	Numunenin ilk uzunluğu (mm)
L_1	Numunenin belirli zamandaki uzunluğu (mm)
L	Harç çubuğun boyu (mm)
α	Anlamlılık düzeyi

Kısaltmalar	Açıklama
ASR	Alkali Silika Reaksiyonu
ACR	Alkali Karbonat Reaksiyonu
ASTM	Amerikan Standartları
DSİ	Devlet Su İşleri
HES	Hidroelektrik Santrali
PÇ	Portland çimentosu
TS	Türk Standart



1. GİRİŞ

Beton veya betonarme bir yapı herhangi bir şekilde tahrip olmadan veya özelliklerinde bir azalma meydana gelmeden, belirli bir süre kendinden beklenen fonksiyonu yerine getirmelidir. Böyle bir durum ancak betonun dayanıklılığı sayesinde elde edilir (1).

Betonarme veya beton yapı elemanlarının zamanla bozulup işlevlerini beklenen servis ömürlerine ulaşmadan yitirmelerine birçok faktör sebep olabilir. Yapı elemanının dayanıklılığını etkileyen faktörler arasında beton bileşimini oluşturan malzemelerin fiziksel ve kimyasal yapısından kaynaklanan iç etkiler ve çevreden kaynaklanan dış etkiler sayılabilir. Bazı durumlarda, beton bileşimini oluşturan malzemelerin kendi aralarında veya çevreden gelen zararlı maddelerle kimyasal reaksiyonlara girebildiği, böylece beton hacim sabitliğinin bozulması nedeniyle yapı elemanının zarar gördüğü bilinmektedir (2).

Betonarme yapılarda mekanik etkiler dışında bozulma süreçlerini kontrol eden ana faktör, ortamda su veya nemin bulunmasıdır. Su, zararlı maddeleri betonun içine taşır. Su aynı zamanda kimyasal reaksiyonların başlamasına ve devam etmesine neden olur. Örneğin boşluk çözeltisindeki OH^- iyonları, agregalardaki aktif silika ile reaksiyona girerek, jel oluşturur. Jelin hacmi bünyesine su aldıkça arttığından, suya maruz kalan elemanlarda reaksiyon daha belirgin hale gelir. Thames Vadisi kumu, düşük reaktif agrega, silika ve yüksek reaktif agreganın betonun mekanik özellikleri üzerine etkisi İngiltere’de yapılan bir araştırmada incelenmiştir. 12 aydan fazla süren bir araştırmada, basınç dayanımı, direk çekme dayanımı, yarmada ve eğilmede çekme dayanımı, statik elastisite modülü ve su emme gibi mekanik özellikler araştırılmıştır. Betonun mekanik özellikleri üzerine her iki agreganın da etkisi referans karışım ile karşılaştırılmıştır. Bu araştırmanın sonuçları, çeşitli mekanik özellikler üzerine reaktif agreganın etkisinin reaktif agreganın

çeşidine bağlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, direk çekme dayanımı ve statik elastisite modülünün reaktivitenin en iyi belirteci olduğuna işaret etmiştir (3).

Reaksiyonlar sonunda oluşan su emme özelliği olan jel, şişerek genişlemektedir. Reaksiyonun bu özelliğinden dolayı beton bünyesinde 0,1-11 MPa'a varan çekme gerilmeleri yarattığı ileri sürülmektedir (4).

Alkali - agrega reaksiyonu, betondaki agreganın çeşitli bileşenlerinin çimento alkalileri ile reaksiyona girmesi olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde iki çeşit alkali-agrega reaksiyonu (AAR) bilinmektedir. Bunlar alkali-silika reaksiyonu (ASR) ve alkali-karbonat (ACR) reaksiyonudur. Bunlardan alkali-silika reaksiyonu daha yaygın olarak görülmektedir (5).

1920'li ve 1930'lu yıllarda ABD'de, Kaliforniya'daki beton yapılarda nedeni belirsiz çatlak oluşumlarına bağlı yıkımlar rapor edilmiştir. Bu raporlarda beton malzemelerin standartlara uygun olmasına rağmen, yapım yılını takiben birkaç yıl içinde çatlaklar olduğu açıklanmıştır. Ayrıca, genellikle harita çatlağı şeklinde görülen çatlaklardan jel çıkışı, betonda patlamalar gibi belirtiler de işaret edilmiştir. Stanton, 1940 yılında bu tür çatlakların (daha sonra Alkali - Silika Reaksiyonu olarak adlandırılan) kimyasal bir reaksiyonun sonucu olduğunu açıklamıştır (6).

Bu çalışmanın amacı; Ermenek Havzası Çetinkalesi Tepe civarına ait kayaçlardan üretilen kırmataşların alkali-silika reaksiyonuna ilişkin özelliklerini belirlemektir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Alkali - Silika Reaksiyonu

Alkali-silika reaksiyonu, çimento içerisindeki sodyum ve potasyum gibi alkali metaller ile aktif silis bileşenleri içeren agregalar arasındaki kimyasal bir reaksiyondur. Silikanın en fazla reaktif formları opal, kalsedon ve tridimittir. Bu reaktif malzemeler; opalin veya kalsedonik çörtler, silisli kireçtaşı, riyolit, riyolitik tuf, dasit, dasit-tuf, andesit, andezit-tuf ve fillit içerisinde görülür. Alkali-silika reaksiyonu oldukça kompleks bir kimyasal olaydır ve ortaya çıkması birçok parametreye bağlıdır (7).

Çimento içerisindeki sodyum ve potasyum bileşenlerinin miktarına bağlı olan beton gözenek solüsyonu konsantrasyonu; Na^+ , K^+ , Ca^{+2} ve OH^- iyonlarının içeriği ile tanımlanabilir. Reaksiyon, gözenek suyu içerisindeki alkalın hidrositlerin agregadaki silisli mineraller üzerine hücum etmesi ile başlar (8).

Alkali - silika reaksiyonu, beton içerisindeki alkalın hidroksil iyonları ile beton agregası bünyesindeki bazı reaktif silis içeren malzemeler arasında oluşan reaksiyondur (9).

Bazı çimentoların içinde fazla miktarda bulunan sodyum oksit (Na_2O) ve potasyum oksit (K_2O) gibi alkali oksitler beton gözenek suyunda çözülerek sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) oluştururlar ve aktif silis içeren agregalarla reaksiyona girerek, zamanla betonu çatlatan bir jel oluşumuna sebep olurlar (10). ASR'nin oluşturduğu reaksiyon ürünleri aşırı derecede su emme özelliği olan ürünlerdir. Su emme özelliği olan bu ürünler, suyu emdikçe şişip betonda içsel çekme gerilmeleri oluşturarak betonun genişlemesine ve agregası ile onu çevreleyen çimento pastasının çatlamasına neden olur (8). Reaksiyonun neden olduğu genişleme belli bir sınırı aştığında beton için potansiyel bir tehlike oluşturur (10).

Beton gözenek suyunda bulunan hidroksil (OH^-) iyonları ile beton agregası bünyesindeki bazı reaktif silis içeren malzemeler arasında oluşan kapalı reaksiyon aşağıdaki şekilde gösterilebilir (10).



Reaksiyon sonucu bünyesinde yüksek oranda su tutabilen bir jelin oluşumu nedeniyle genişlemenin neden olduğu basınç, içsel gerilmelerin oluşmasına neden olur. Bu olay jel oluşumuyla eş zamanlı değildir. Bu nedenle, jelin varlığı mutlaka ciddi boyutta ASR tahribatı oluşturacak anlamı taşımayabilir. Jel ileriki safhalarda çimento pastasından su emerek hacmini artırır. Hacmini arttıran jel agrega ve çimento pastasında mikro çatlakları oluşturur. Mikro çatlaklarda yayılan jel giderek artar ve su emerek daha da genişler ve çatlakların genişleyip çoğalmasına ve betonun çatlamasına neden olur (10). ASR'nin belli viskozite ve özelliklere sahip jeli; şişme ve hacimsel olarak büyüme özelliğindedir. Jelin karakteristik kompozisyonu henüz tam olarak belirlenememiştir. Ancak, başlangıçta az miktarda kalsiyum içeren jel, şişerek genişler ve yayılır (11).

Bazı jeller çok az, bazıları hemen hiç genişleme özelliği göstermezler. Eğer jel, az su emme ve şişme özelliğinde ise problem yaratmaz. Çok su emerek şişme özelliği olan jelin betonda yarattığı içsel gerilmeler betonun çekme dayanımını aşınca beton çatlamaktadır. Betonun boşluklarındaki çözeltinin reaksiyon bölgesine ulaşması ve sıcaklık jelin genişleme basıncını artırır (11).

Bazı durumlarda betondaki genişleme hacimce %2-3 mertebesine kadar ulaşır. ASR'de diğer alkali-agrega reaksiyonları gibi birçok faktörün etkisi altındadır. ASR diğer reaksiyonlar gibi yavaş ilerleyen bir reaksiyon olduğu için, genişleme nedeniyle betonun iç yapısında oluşan hasar (çatlak) birkaç yıl sonra görünür hale gelir (12).

ASR'nin hasara yol açan üçüncü aşaması, jelin su emerek genişmesi özelliğine dayanır. Bu özellik negatif yüklü silis yüzeylerinin pozitif yüklü Na^+ veya K^+ iyonları tarafından kaplanması ile başlar. Bu bakımdan $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ molar oranı önem taşır ve 3 ile 10 arasında değişebilen bu oranın henüz kesinleştirilemeyen bir değerinde genişleşme maksimum olmaktadır. Bu değere pessimum oranı adı verilmiştir (13).

Reaksiyonun oluşabilmesi için çimento alkali içeriğinin "eşdeğer Na_2O " değeri olarak % 0,6 değerini aşması gerekir. Portland çimentosunun toplam alkali içeriği sodyum oksit eşdeğeri olarak Eş.2.2 eşitliği ile hesaplanmaktadır (12):

$$(\text{Na}_2\text{O})_e = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O} \quad [2.2]$$

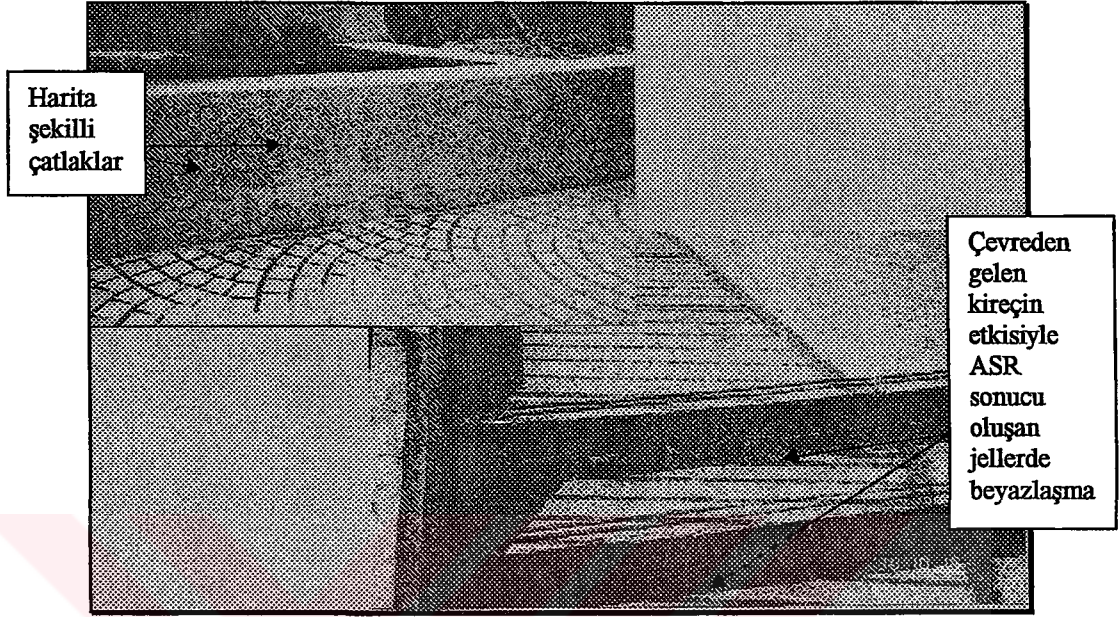
Çimentoda bulunan sodyum ve potasyum oksitler çimentonun hammaddelerinden (kil, kireçtaşı, şeyl vb) kaynaklanır. Ayrıca alkaliler, çimento dışında agrega, karışım suyu, beton katkı maddeleri, buz çözücü tuzlar, zemin suyu, beton kür suyu ve endüstriyel atık suları aracılığıyla beton bünyesine girebilirler (4).

Genelde, sadece çimento ve çimentolanma özelliği olan malzemelerin alkalinitesi göz önüne alınmaktadır. Ancak, betona katılan kimyasal yada mineral katkılar alkali içeriyorsa gelen ilave alkali miktarı gözönüne alınır. Beton içine alkali girişi sadece çimentodan kaynaklanıyorsa alkali içeriği aşağıda verilen Eş.2.3 eşitliği ile hesaplanabilir (8);

$$[\text{Çimentonun alkali } \%] \times [\text{Çimento dozajı (kg/m}^3\text{)}] = \text{Betondaki alkali miktarı(kg/m}^3\text{)} \quad [2.3]$$

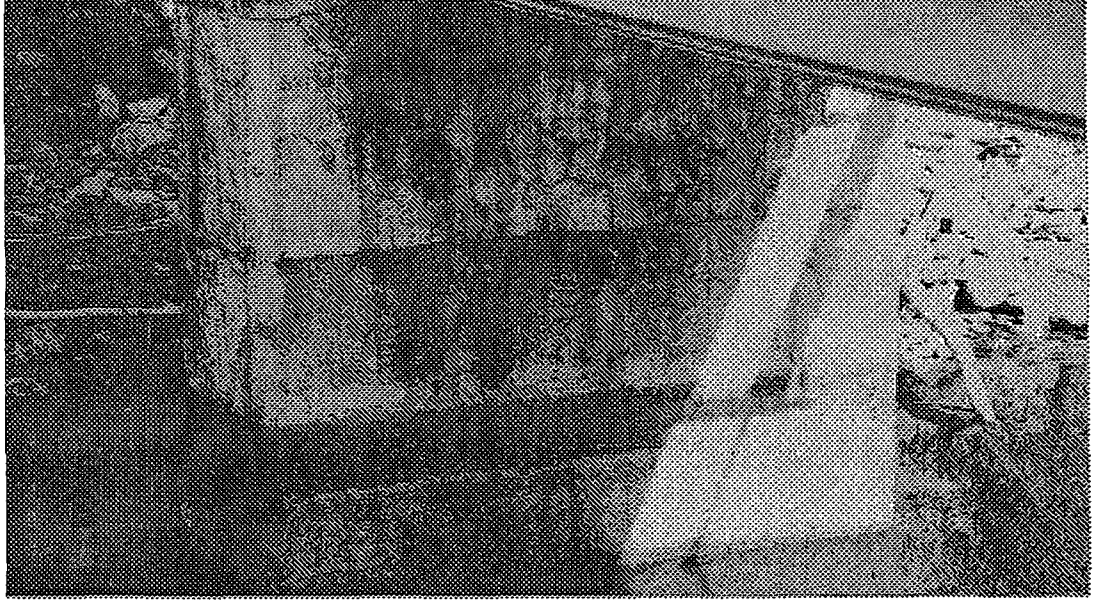
ASR'nin çok yavaş devam eden bir reaksiyon olmasından dolayı, çoğu zaman birkaç yıldan önce genişleşme görülmez. Reaksiyonun beton içerisinde

genleşerek oluşması dıştan çatlama görülmesine neden olur. Beton yüzeyinde oluşan çatlaklara harita çatlakları adı verilir (14). (Resim 2.1).



Resim 2.1. Hong Kong şehrinde beton kaplama duvarlarda alkali - silika reaksiyonu sonucu gelişmiş harita şekilli çatlaklar (14)

Genelde betonda çekme birim deformasyon kapasitesi $150-200 \cdot 10^{-6}$ düzeyindedir. Bu değer nadiren $500 \cdot 10^{-6}$ düzeyine kadar çıkabilir. Demir donatısız kütle betonlarında veya kaplama betonlarında, genleşme sonucu meydana gelen deformasyonun çekme dayanımını aşması sonucu, betonda çatlaklar meydana gelir. Sabit ve hareketli yüklemelere maruz kalan betonlarda daha farklı mekanizma geçerlidir. Bu tür betonlar proje yükleri nedeniyle gözle görülmeyecek düzeyde zararsız çatlak potansiyeline sahiptirler. Fakat daha ileri yükleme durumunda birim deformasyonun %0.05 - %0.10 düzeyine kadar çıkmasıyla çatlaklar zararlı boyutlara ulaşır ve betonun uzun süreli davranışında olumsuz etkiye neden olurlar (Resim 2.2).



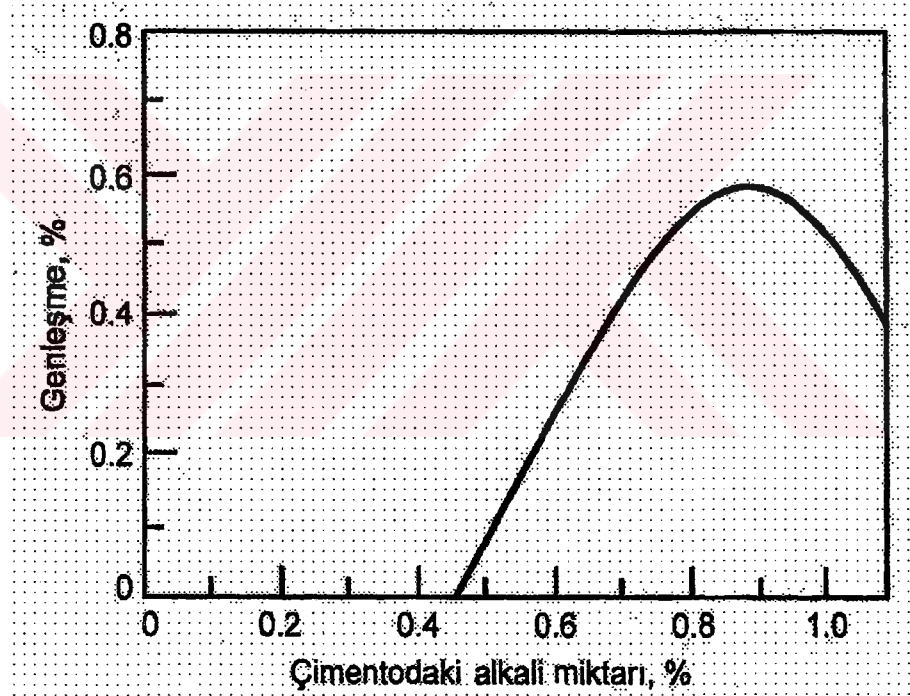
Resim 2.2. Avustralya'da bir köprü ayağında ASR etkisi sonucu gelişen çatlaklar (14)

2.1.1. Alkali - silika reaksiyonunu etkileyen faktörler

Alkali içeriği

Betonda kullanılan çimentonun alkali içeriğinin değişmesi, betonun hidroksil iyon konsantrasyonunu, betonun alkali içeriğini ve reaktif silis / alkali oranını değiştirir. ASR ile ilgili olarak alkali terimi, genellikle portland çimentosu bünyesinde bulunan sodyum ve potasyum alkalileri ifade etmek üzere kullanılır. Portland çimentosu beton bünyesinde mevcut alkalilerin önemli bir kaynağıdır. Fakat betona karışım suyu, agregası gibi diğer bileşenler yoluyla da alkaliler girebilir. Gerçekte alkali taşıyan agregalar ASR ' ye neden olan alkaliler için önemli diğer bir kaynak olabilir. Bununla birlikte yüksek alkaliye sahip çimento kullanılan betonda, agregadan gelen alkali ile birlikte çok daha yüksek alkali seviyeleri meydana gelir. Düşük alkaliye sahip çimento kullanılmış bazı döşeme betonlarında da ASR nedeniyle hasar meydana gelme nedeni olarak agregada mevcut alkalinin katkısı gösterilmektedir (15).

Hidrolik bağlayıcıların büyük çoğunluğunun hammaddeleri içinde saf olmayan alkalin mineraller bulunmaktadır. Bu, çimentolar içinde sodyum ve potasyum elementlerinin alt bileşenlerinin çoğu zaman bulunacağı anlamındadır. Bunların çimento içindeki oranları %1.3'ü pek aşmadığı halde çimento ve beton özelliklerini genellikle olumsuz yönde etkilerler. Bu maddeleri çimento üretim süreçlerinde bertaraf etmek güç ve ekonomik açıdan imkansız görülmektedir. Bu nedenle beton üretenlerin zararlı etkileri iyice bilmeleri ve önlem almaları zorunludur (16). Şekil 2.1'de görüleceği gibi çimentodaki alkali miktarının yaklaşık % 0,5'den başlayarak % 0,9'a kadar yükselmesi durumunda, genleşme miktarında artma olmaktadır (17).



Şekil 2.1. Çimentodaki alkali miktarının, alkali silika genleşmesine etkisi (17)

Çözünen alkali

Çimentoların hidratasyonunda arayer sıvısının bileşimi, özellikle alkali kanyonlarının konsantrasyonu pH değeri etkinlik taşır. Yüksek alkalili çimento hamurunda 2 dakika içerisinde ortamın pH 'ı 12.9 'a yükselir ve zamanla 13.7 değerine ulaşabilir (16).

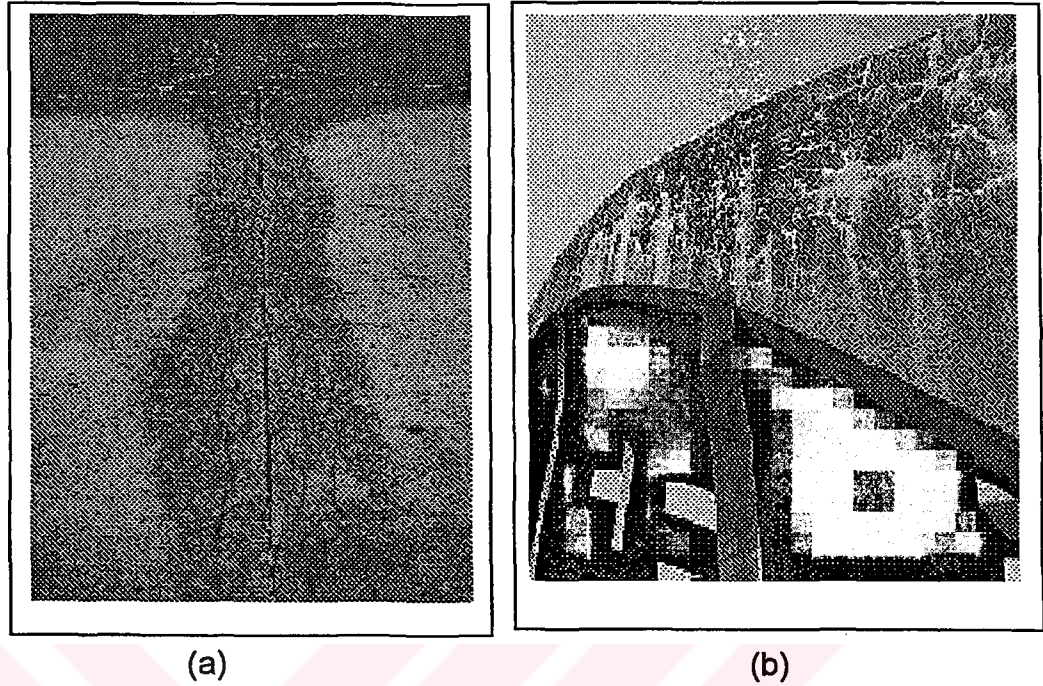
Alkalilerin hidratasyonu hızlandırmasını, basit olarak etrenjit oluşumunu önlemelerine bağlamak mümkündür. Çok aktif hidratasyona başlayıp, sona erdiren alüminatlı mineralleri C_3A etrenjit örterek hidratasyon hızını yavaşlatır. Hidratasyon sürecinde etrenjit oluşumu için sıvı ortamda $CaSO_4$ ve $Ca(OH)_2$ 'nin çözülmesi ve bulunması şarttır. Alkaliler SO_3 ile öncelikle birleşerek $CaSO_4$ oluşumunu yavaşlatır hatta engeller. $Ca(OH)_2$ 'nin çözünürlüğünü azaltarak çökeltirler ve kimyasal aktivitesini yok ederler. Böylece etrenjit oluşmaz ve su ile direkt temasa geçen C_3A hızla çözünür ve hidrate olur. Fakat bu arada C_3S ve C_2S 'nin hidratasyonları da hız kazanır (16).

Dış alkaliler

Kar mücadelesinde kullanılan tuz ($NaCl$), deniz suyu, beton kür suyu ve endüstriyel atık suları aracılığıyla beton bünyesine dışarıdan giren alkaliler dış alkaliler olarak adlandırılır. Özellikle geçirimli betonlarda ve/veya çatlaklar oluşmuş betonlarda dış alkaliler ASR'nin neden olduğu genleşmeleri artırır (18).

Deniz suyunun sertleşmiş betonda oluşan ASR genleşmelerini artırıcı etkisi, hidrate C_3A ve portlandit bileşenlerinin $NaCl$ ile oluşan reaksiyonu sonucu OH^- miktarının artması sebebiyledir (15).

Betonda çimentolanma özelliği olan mineral katkıları kullanarak daha sıkı dokulu beton elde etmek ve su/çimento oranı düşük iyi sıkıştırılmış dayanımı yüksek az geçirimli beton üretmek suretiyle dış alkalilerin betona girişi yavaşlatılabilir. Böylece ASR etkisi azaltılabilir. Koruyucu kaplama ve sızdırmazlık önlemleri, deniz suyu ve buz çözücü tuz çözeltilerinin beton bünyesine girişinin engellenmesi bakımından anlamlıdır. Ancak bu önlemlerin bir kısmı, özellikle köprü, viyadük gibi sanat yapılarının veya yürüme yollarının kaplama betonları için pratik yol olarak görülmemektedir (19).



Resim 2.3. a) Beton yollarda görülen ASR etkisi (Amerika),
b) Köprülerde görülen ASR etkisi (Amerika) (20)

Beton alkalinitesi

Alkalilerin betonların ana nitelikleri olan işlenebilme, dayanım ve dayanıklılık üzerindeki etkileri oldukça çarpıcıdır. Bu etkilerin ortaya çıkmasına neden olan faktörlerin başında alkalilerin hidratasyon sürecinde meydana getirdikleri değişimler gelir. Alkali içeriğini belirli sınırlarda tutmak gerekir. Çoğunlukla sınırlama sadece maksimum sınır değeri saptanarak gerçekleştirilir ve alkali içeriği sodyum alkali eşdeğeri denilen ve % olarak $\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$ ile ifade edilen büyüklük ile sayısallaştırılır. Alkali içeriğinin beton özelliklerinde yarattığı değişimler incelenirken özellikle alkali iyon türünün etkisi bilinmelidir (16).

Beton alkalinitesi arttıkça ASR potansiyeli de artar. Kanada ve Avrupa'da beton alkalinitesi bir kavram olarak ele alınmakta, arazi performansı bir kılavuz olarak kullanılarak ASR kontrolü için beton alkalinitesi ile ilgili sınırlamalar oluşturulmaktadır. Bu kriter ana bağlayıcı olarak portland

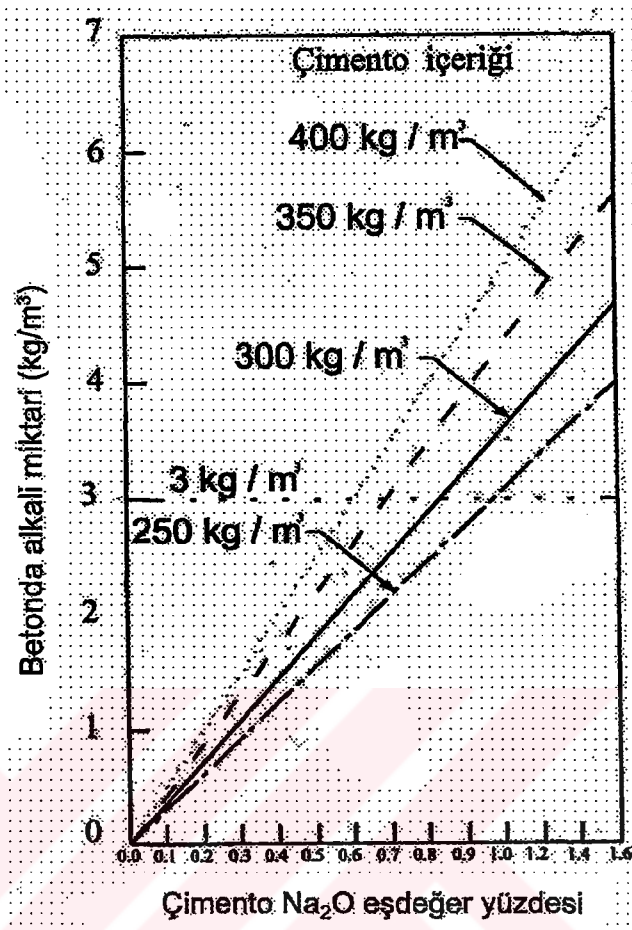
çimentosu, yani PÇ türü çimentoların kullanıldığı betonlar için iyi bir kriterdir. Diğer taraftan bu kriter, beton özelliklerini iyileştirme amacıyla kullanılan ve çimentolanma özellikleri olan mineral katkıların kullanıldığı betonlar için de uygulanabilir. Beton alkalinitesinin kriter olarak kullanımı halinde en doğru yaklaşım, betonu oluşturan tüm bileşenlerin alkalinitesi göz önüne alınarak beton alkalinitesinin belirlenmesidir (8).

Ancak genelde sadece çimento ve çimentolanma özelliği olan malzemelerin alkalinitesi göz önüne alınmaktadır. Çünkü diğer beton bileşenlerinin beton alkalinitesine etkisi azdır. Bu nedenle beton alkalinitesi [2.4] eşitliği ile hesaplanmaktadır (8);

$$[M_{\text{çimento}} (\text{kg/m}^3) \times \text{Çimentonun Na}_2\text{O Eşdeğeri } \% \text{' si}] = 1\text{m}^3 \text{ Betondaki Alkali Miktarı } (\text{kg/m}^3) \quad [2.4]$$

Eğer betona katılan ve çimentolanma özelliği olan malzemeler veya beton kimyasal katkıları ile mineral katkıları varsa, bunlardan ileri gelen ilave alkali miktarı da göz önüne alınıp yukarıdaki eşitlikte belirlenen beton alkalinitesine eklenmelidir (8).

Potansiyel bir alkali silika reaksiyonu (ASR) tehlikesi söz konusu olduğunda Kanada ve Avrupa ülkelerinde betondaki alkali miktarı 3 kg/m^3 ile sınırlanmaktadır (8). Şekil 2.2'de çimento dozajı ve çimentonun sodyum oksit (Na_2O) eşdeğeri %'sine bağlı olarak 1 m^3 betondaki alkali miktarı verilmektedir (21).



Şekil 2.2. Çimento Na₂O eşdeğeri %'si çimento dozajına bağlı olarak beton alkali miktarları (21)

Amerika Birleşik Devletlerinde beton alkalinitesini kontrol etmek için, çimento alkalinitesinin düşük düzeyde tutulması (düşük alkalili çimento) benimsenmektedir. ASR'nin neden olduğu genleşmenin azaltılması için düşük alkalili çimento kullanımı genelde kabul gören ve başarılı olan bir metodudur. ASTM C 150'de düşük alkalili çimento olarak Na₂O eşdeğeri %'si 0.60'dan az olan çimentolar kabul edilir. Düşük alkalili çimento kullanılsa bile;

- Betonda su veya bağıl nemin hareketi sonunda belli noktalarda alkali konsantrasyonu oluşursa,
- Agregası aşırı derecede reaktif ise,
- Betonda kullanılan mineral ve kimyasal katkılardan, karma suyu ve agregadan yeterli miktarda alkali ilavesi söz konusu oluyorsa,

- Çimento dozajının çok yüksek olması nedeniyle beton alkalinitesi çok yükseliyorsa, ASR tehlikesi söz konusu olabilir (8).

Bir başka yaklaşımda ise alkali miktarının toplam oksit miktarıyla ve özellikle Na_2O alkali eşdeğeri ile verilmesi yetersiz ve hatta yanıltıcıdır. Beton özelliklerine etkileyen toplam alkaliler değil arayer sıvısında çözünabilen alkali iyonlarıdır. Ayrıca potasyum ve sodyum iyonlarının etkileri, her olayda çok farklıdır, potasyumu miktar olarak sodyuma indirgeyerek sorunları basitleştirmek hatalıdır (16).

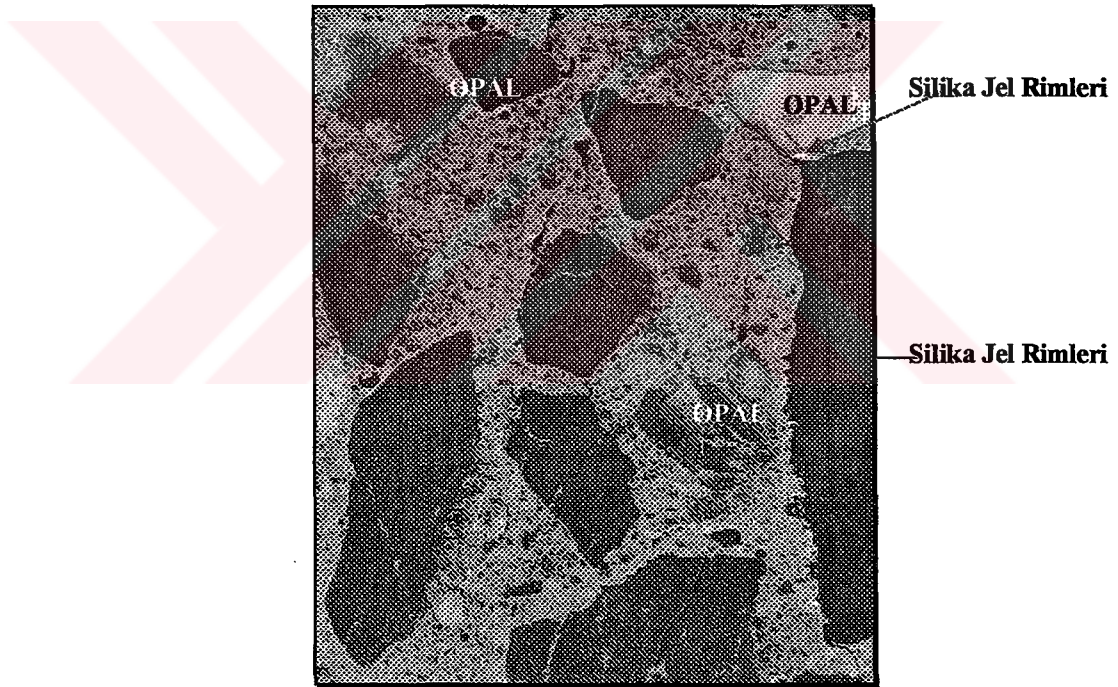
Agregada reaktif silika içeriği

1982 yılından bu yana, Japonya'da beton yapılar üzerindeki alkali - silika reaksiyonu araştırılmaktadır. Reaksiyona neden olan agregaları, Japon kayaçlarındaki reaktiviteyi ve Japonya'daki reaktif kayaçların dağılımını belirlemek için çalışılmaktadır. Çeşitli test metodları sonucunda, ASR'ye bağlı reaksiyon ürünleri andezit, riolit ve şeyl üzerinde görülmüştür. Beton içerisinde alkali - silika reaksiyonundan etkilenen veya etkilenmesi mümkün olan; porfirit, andezit, dasit, riolit, kumtaşı, şeyl ve çört gibi bozunmuş veya bozunmaya eğilimli kayaçlar kimyasal metotla tanımlanmıştır. Kimyasal yöntem ve harç çubuk metodu sonuçları, beton yapılarında agrega olarak kullanılan kayaçlarda aynı sonucu vermiştir. Bazalt, andezit, dasit, riolit, kumtaşı, şeyl, sleyt (arduvaz), tuf, çört ve kuvars, şist reaktif kayaçlardır. Volkanik kayaçların reaktivitesi; kristobalit, tridimit ve volkanik cam ile kontrol edilir. Sedimanter ve metamorfik kayaçların reaktivitesi kristalinite ve kuvars içeriği ile kontrol edilir (22).

ASR ile ilgili silisin reaktivite potansiyeli, oluşumlarının tanımlanması ve belirlenmesi karmaşık ve zor bir işlemdir. Silisli bileşenlerin yapısı ve dokusu genellikle amorf, kriptokristalli, mikrokristalli ve kristalli olarak tanımlanır. Silika mineralleri büyük oranda normal hava sıcaklığında kararlı olmayan

polimorfik oluşumlara sahiptir. Bileşiminde silika bulunan ve en yaygın olan mineraller kuvars, tridimit, kristobalit, opal ve kalsedon gruplarıdır (23).

Değişik silis minerallerinin reaktiviteleri kristal yapıdaki silika miktarına bağlıdır. Opal düzensiz kristal yapısına sahiptir ve en yüksek reaktiviteye sahip silika içerir. Diğer taraftan doğal halde (dengede) bulunan kuvars, çok düzenli bir kristal yapısına sahiptir ve normal olarak reaktif değildir. Camlar, mikrokristalli ve kriptokristalli kuvarslar, deforme olmuş kuvarslar, kalsedon, tridimit, kristobalit gibi diğer silika oluşumları orta derecede reaksiyon gösterirler (Resim 2.4) (14).



Resim 2.4. Opallerde gelişen ASR etkisi, İngiltere (14)

Xray-analizi, elektron mikroskobu ve diğer cihazların kullanımıyla desteklenen, petrografik incelemeler ve ince kesit çalışmaları, agrega minerallerinin belirlenmesinde yeterli bilgi sağlayabilir. Agreganın, porozitesi, tane boyu dağılımı, beton içinde reaktif parçacık miktarı ve çevre koşulları,

alkali-agrega reaksiyonu sonucu ortaya çıkan genleşmeler üzerinde önemli etkiye sahiptir (24).

Betonda ASR'nin oluşabilmesi için herhangi bir formda reaktif silisin bulunması gerekmektedir. Reaktif silis, oldukça farklı doku ve kristal yapısı sergiler. Silisin doku farklılığı, kayaçlaşma sürecinde azalan soğuma hızına bağlıdır. Agregadaki silisli mineraller kayaç oluşum sürecinde soğuma hızına bağlı olarak amorf veya camsı (kristalleşmemiş) yapıdan kriptokristal, mikro kristal ve kristal yapıya kadar geniş bir aralığa dağılırlar. Kimi durumlarda kuvars kristallerinin oluşumu sırasında içsel gerilmeler oluşur. Bu tür kuvars mineralleri içeren agregalar reaktiftir. Çizelge 2.1.'de reaktivite seviyelerine göre mineral ve kayaçlar belirtilmiştir (15).

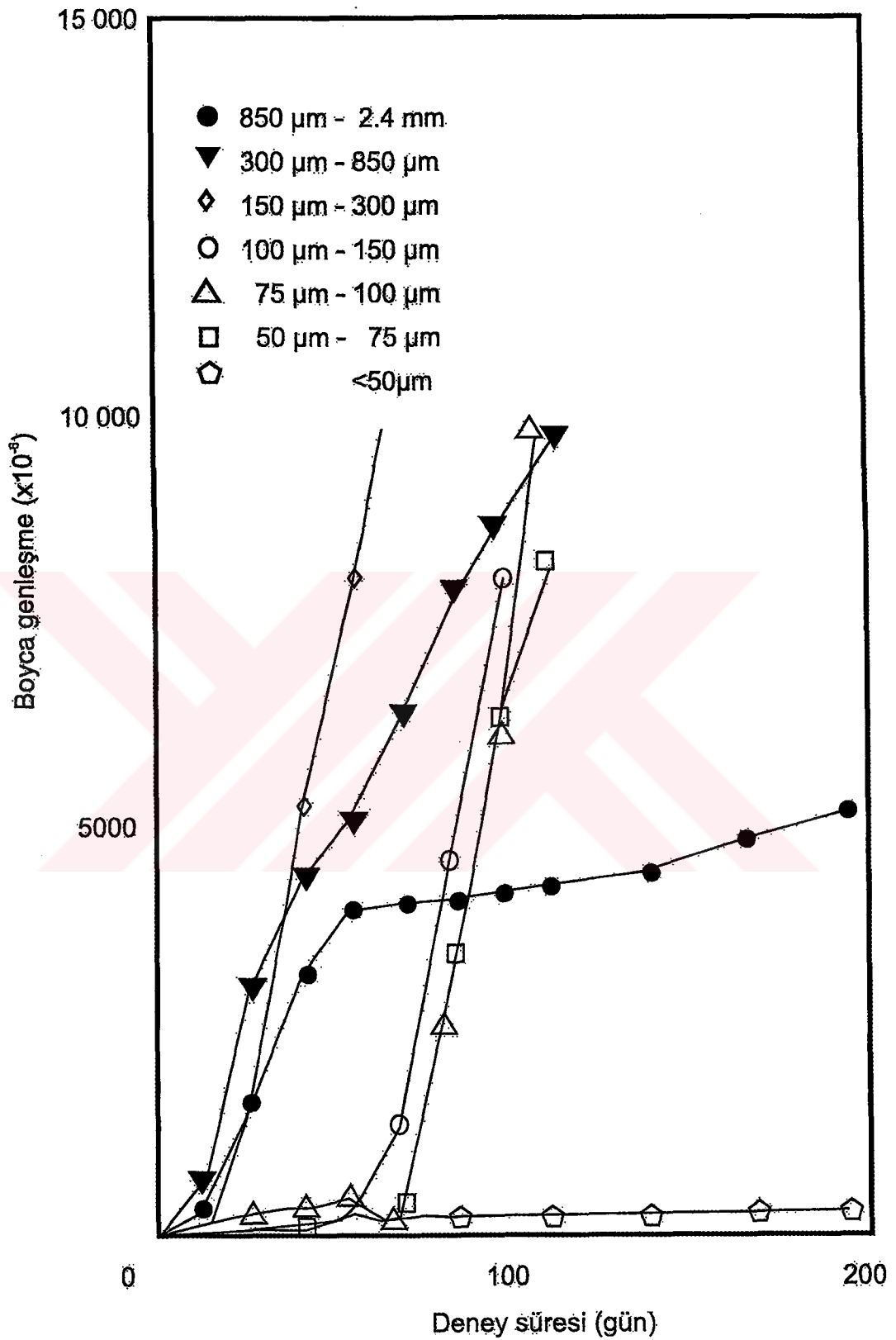
Çizelge 2.1. Reaktivite seviyelerine göre mineral ve kayaçlar (15)

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

Agrega içinde ne kadar reaktif mineral bulunduğu zaman beton genleşmesinin zararlı olacağını tespit etmek üzere çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Agregada içinde % 3-5 opal bulunması halinde beton şişmesinin maksimum değere ulaştığı buna karşılık %20'den fazla opal ihtiva eden agregalarda şişme meydana gelmediği gözlenmiştir. Reaktif minerallerin fazla olması halinde betonda şişme meydana gelmemesi ilk bakışta anlamsız görünmektedir. Bu durum, mevcut alkali oksitlerinin agrega içinde bulunan bütün aktif silise yeterli olmayışından ve etkisiz derecede alkali silis jeli teşekkül etmesinden ileri gelmektedir (25).

Reaktif agreganın tane büyüklüğü de ASR sebebiyle oluşabilecek zararlar üzerinde etkilidir. Büyüklüğü 75 µm ile 1 mm arasında değişen, hatta bazen 5 mm boyutuna kadar reaktif agrega kullanılması durumunda genleşmenin maksimum olduğu görülmektedir. Ancak, 75 µm altındaki boyutlarda reaktif agreganın fazla miktarda bulunması halinde genleşme oluşmadığı halde reaksiyon delillerinin ortaya çıktığı gözlenmiştir. Reaktif agreganın boyutunun etkisi, reaktif agreganın fiziksel ve mineralojik karakterine de bağlıdır. Gözenekliliği fazla olan agreganın içine boşluk çözeltisinin girişi daha kolay olmakta ve reaksiyon alanı artmaktadır (20).

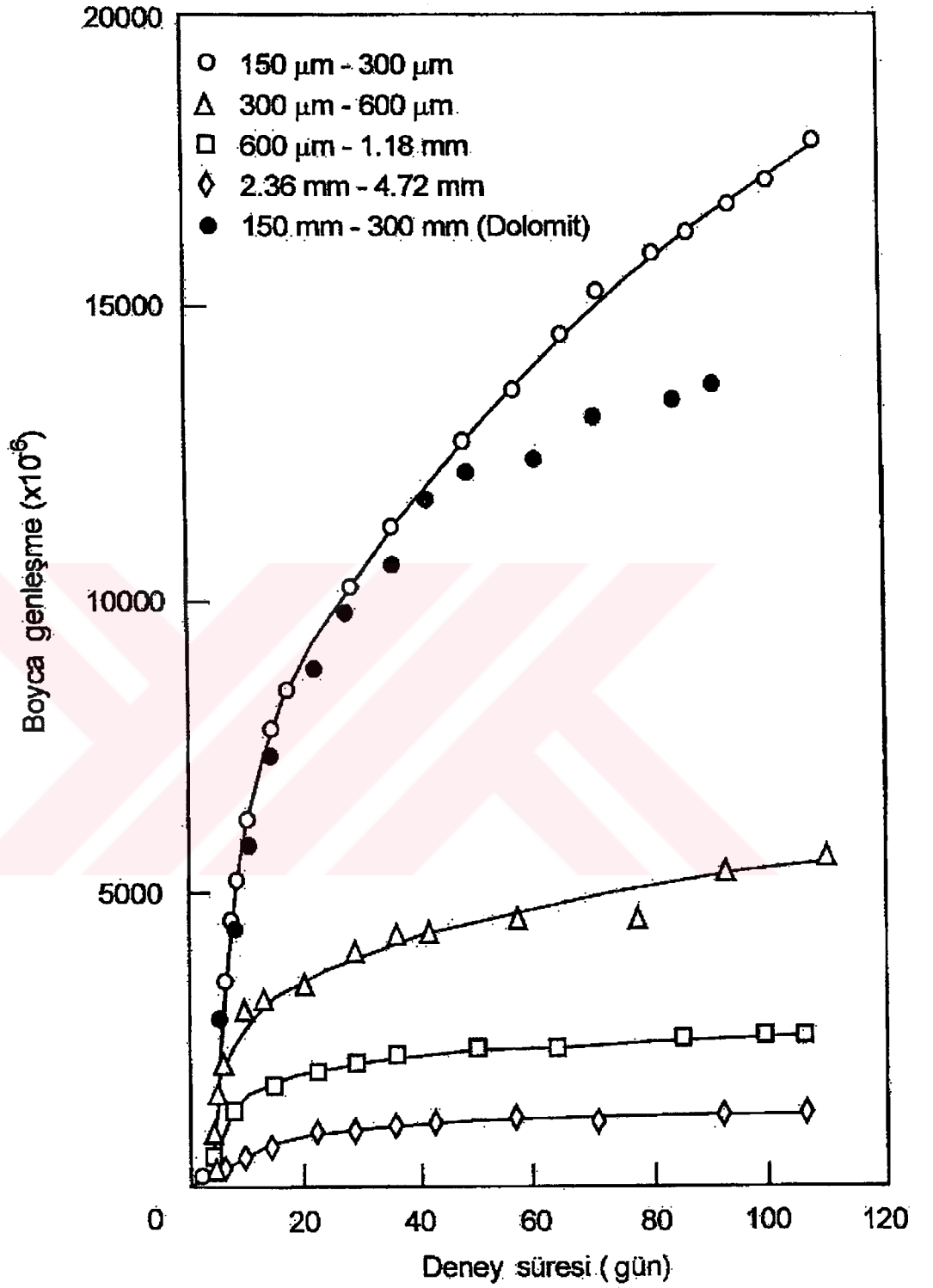
Vivian (1951) ve Zhang (1999) reaktif agrega olarak opal yumrusu içeren harç prizmalarında yaptıkları deneylerde, en fazla boyca genleşmeyi 150–300 µm arasında tane boyutuna sahip harç prizmalarında ölçmüşlerdir (Şekil 2.3) (26, 27).



Şekil 2.3. Farklı reaktif agrega tane boylarına sahip harç prizmalarının boyca genişlemesi (26)

Diamond ve Thaulow (1974) reaktif agregaların tane boyutunun, reaksiyon sonucu harç prizmalarının genleşmesi üzerine etkisini incelemek amacıyla yaptıkları deneylerde, tane boyutları 20-30 μm ve 53-74 μm aralıklarında değişen reaktif agregalar kullanmışlar ve en fazla boyca genleşmenin, 20-30 μm arasında tane boyutuna sahip harç prizmalarında meydana geldiğini belirtmişlerdir (28).

Hobbs ve Gutteridge (1979) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise, deneylerinde reaktif agrega olarak opal-A minerali içeren Beltane opalini kullanılmıştır. Deneylerde kullandıkları çimentonun eşdeğer alkali içeriği $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşdeğer}}$: %1,15 dir. 25x25x250 mm boyutlarındaki harç prizmalarında yapılan boyca genleşme ölçümlerinde, en fazla genleşmeyi 150-300 μm arasında tane boyuna sahip harç prizmalarında meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 2.4) (29).

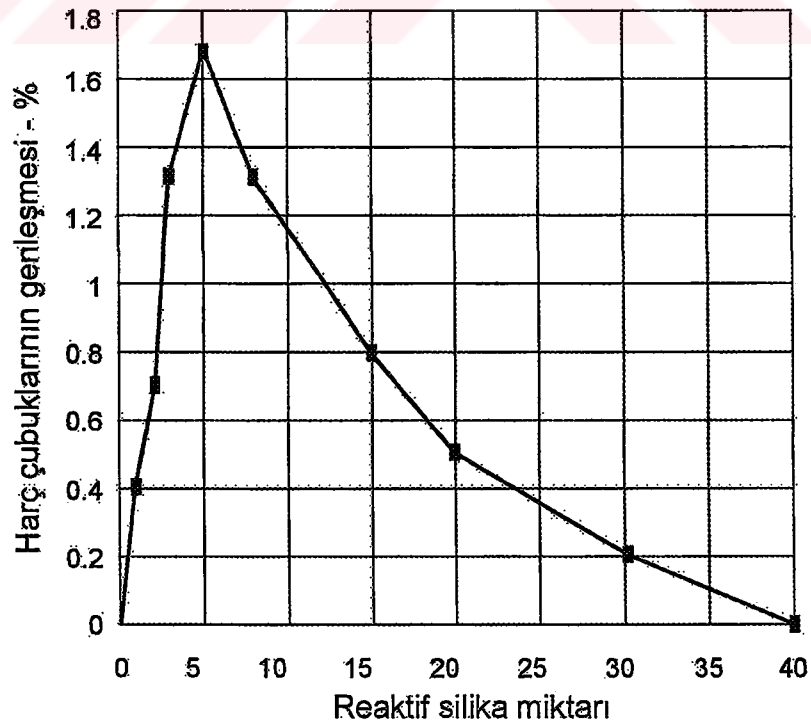


Şekil 2.4. Farklı reaktif agrega tane boylarına sahip harç prizmalarının boyca genişmesi (29)

Günümüzde, reaktif agregaları ve mineralleri belirlemek petrografik incelemelerle mümkün olmaktadır. Bununla birlikte mikroskobik tespitlerle yapının uğradığı hasarlar arasında doğrudan bir ilişki kurmak zordur (30).

Bazı durumlarda ASR'nin sebep olduğu betondaki genişlemenin miktarı, agregadaki reaktif bileşenin artışı ile artmaktadır. Buna karşılık, diğer pek çok durumda, maksimum genişleme oluşması, diğer şartlar aynı kalmak kaydıyla, agregada bulunan reaktif bileşen miktarının belirli bir değeri içindir (23). Agregadaki reaktif bileşenin bu sınır değerinden az yada çok olması genişleme miktarını azaltır. Bu durum literatürde "Sınır Değer Davranışı" olarak tanımlanmaktadır (31).

Herhangi bir agreganın en yüksek genişlemeyi veren reaktif madde içeriği değeri, daha düşük su-çimento oranında ve daha yüksek çimento dozajlarında artar. Şekil 2.5'de reaktif silika miktarının genişlemeye etkisiyle ilgili bir araştırmanın sonuçları verilmiştir (32).



Şekil 2.5. 224 günlük genişleme ile agregadaki reaktif silika miktarı arasındaki ilişki (32)

Şekil 2.5'den görüleceği gibi reaktif silika miktarı % 5 oranına doğru arttıkça alkali agreganın genişlemesinde de artma olmaktadır. Ancak % 5 üzerindeki artma daha düşük genişlemelere yol açmaktadır. Yüksek miktarlarda silika içeren ortamdaki alkali-silika genişlemesinin az olması, şu şekilde açıklanmaktadır. Ortamda mevcut olan alkali, fazla miktarda yer alan silisin tümü ile alkali silika reaksiyonu yapmaya yetmemektedir. O nedenle reaksiyonlar tam olarak gerçekleşmemektedir (10, 33).

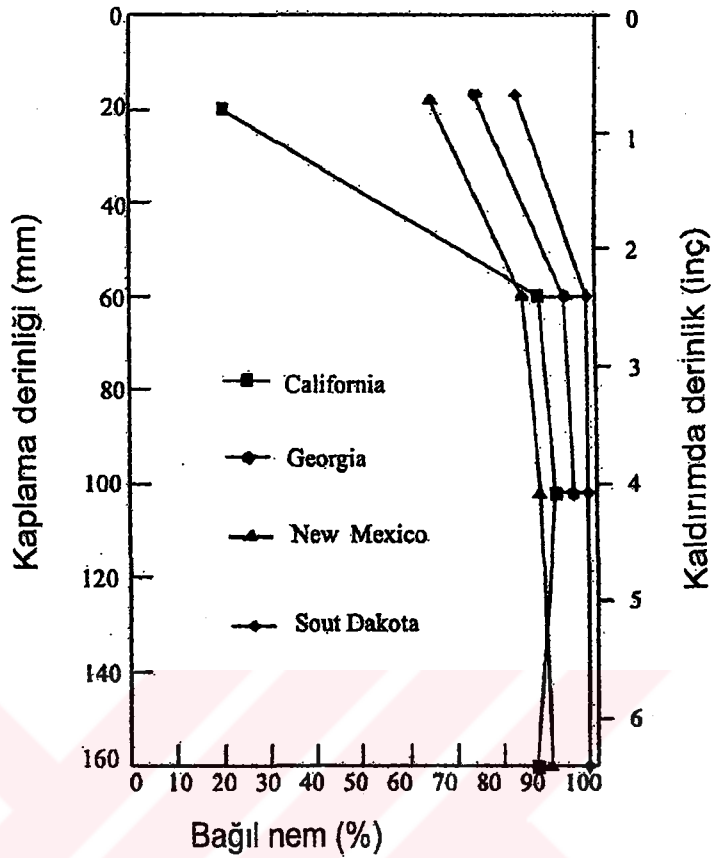
Sınır değer davranışına benzer olarak, reaktif agregaların betonda maksimum genişleme verebilmesi için ideal boyutta olmaları gerekmektedir. Şekil 2.6'da görüleceği gibi, genişleme orta boyuttaki reaktif taneciklerde en yüksektir (33).



Şekil 2.6. Agregadaki reaktif silika bileşeni boyutunun, alkali agreganın genişlemesine etkisi (33)

Nem

Yeterli miktarda nem bulunması, kimyasal reaksiyon sırasında ortaya çıkan alkali-silika jelin bünyesine su emme kabiliyeti ile genleşme basıncı oluşturması ve böylece çekme gerilmesine neden olması bakımından önemlidir. Bu nedenle ASR nedeniyle önemli ölçüde hasar, ıslak muhafaza koşullarında ve gerçek uygulamada nemli çevre koşullarında meydana gelir. Diğer taraftan kütle betonunda, nem kaybının az olması nedeniyle, bünyede, zararlı oranda genleşmeye neden olabilecek düzeyde nem bulunabilir. Geniş boyutlu yapısal elemanlarda da, çoğu beton karışımlarında, ASR'nin oluşması ve genleşme meydana getirmesi için gerekli su, karışım suyunun hidratasyonda kullanılmayan kısmı olarak bulunur. Bu nedenlerle jel nispeten kuru çevre şartlarında da oluşabilir, ancak daha ileri düzeyde genleşme ve hasara neden olabilmesi için ilave suya ihtiyaç vardır. Nemli betonun bina iç kısımlarında kuru ortamda (atmosferdeki bağıl nem $< \%75$) bulunması durumunda muhtemelen ASR nedeniyle hasara karşı emniyetlidir. Ancak, yağmur, deniz suyu veya yer altı suyu etkisinde kalan betonlarda daima ASR nedeniyle hasar riski mevcuttur (24). Çöl gibi kuru iklim bölgelerinde, iyi kür edilmiş betonlarda beton yüzeyinin hemen altında bağıl nem $\%80$ veya daha yüksek olabilmektedir. Şekil 2.7'de bu ilişki görülmektedir (34). Bu nedenle, zemin kaplamaları, istinat duvarları, temeller ve barajlar ASR tarafından kolaylıkla etkilenebilir (24).



Şekil 2.7. Farklı iklimlerdeki beton kaplamalarında derinlik bağıl nem ilişkisi (34)

Düşük su / çimento oranlı beton, ilave çimento, mineral katkı veya herhangi bir metotla beton geçirgenliği azalır; rutubetin betona girişi ve beton içerisinde yayılması azalır. Dolayısı ile, beton içerisinde alkalilerin yayılması da azaltılmış olur (34).

Sıcaklık

Sıcak iklim koşullarındaki yapılar, soğuk iklim koşullarına göre ASR' ye karşı daha duyarlıdır. Çünkü, ASR' nin hızı, sıcaklık arttıkça artar. Sıcaklık etkisi agregaların büyük çoğunluğunda aşırı termal genleşmelere neden olur. Bazı agregalarla 13-20 °C aralığında yapılan ASR genleşme ölçümleri sonuçlarının, 38 °C 'de yapılan ASR genleşme ölçümlerinden daha küçük genleşme değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Yüksek ve düşük sıcaklıkların

genleşmeye etkisi agreganın yapısına da bağlıdır (18). Agreganın büyük çoğunluğu daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla reaksiyon göstermektedir (24).

Agrega reaksiyonunun oluşumunda süre ve çevre koşullarını kontrol altına almak mümkün değildir. Normal şartlarda reaktif olmayan bazı agregalar sıcaklığın 35-45 °C' ye çıkmasıyla zararlı genleşme reaksiyonları meydana getirebilir. Birçok yapı kullanım ömrü boyunca zaman zaman bu tür çevre şartlarına maruz kalabilir (12).

Sürüklenmiş hava

Reaktif agregaya içeren ancak ASR sebebiyle hasar görmeyen yapılar incelendiğinde, jelin hava boşluklarını tamamen veya kısmen doldurduğu görülmektedir (2). Hava katkısı kullanılan betonlarda oluşan çok küçük çaplı ve aralıklı hava kabarcıkları (ortalama 50 µm çaplı, 200-250 µm aralıklı) beton içinde oluşan buzun genleşme etkisini karşıladıkları gibi jelin de genleşme etkisini azaltarak betonun hasar görmesini önleyebilirler (18).

Bundan dolayı, jelin hasar görmemiş betonda hava boşluklarını doldurarak ilerlediğini ve hava sürükleyici katkı kullanımının ASR sebebiyle oluşan hasarı önleyebileceği söylenebilir (20).

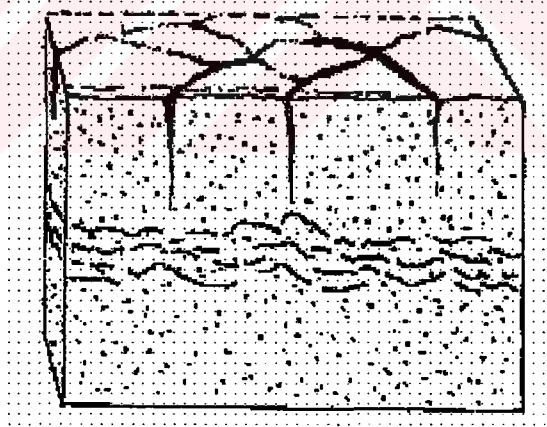
2.1.2. Alkali - silika reaksiyonunun belirtileri

ASR'nin belirgin ve görünür etkisi beton yüzeyinde çatlak oluşumudur. Ancak betonun bazı fiziksel ve mikro yapısal özelliklerinin de ASR'den etkilendiği petrografik incelemelerle ortaya konmuştur. Bu etkiler agregaya taneleri yüzeyince reaksiyon bölgeleri oluşumu, reaksiyon ürünleri ile doldurulmuş boşluklar, agregaya tanelerinde çatlaklar ve agregaya ile çimento hamuru arasındaki bağ kaybı şeklinde ortaya çıkar. Bazı özel durumlarda, jel, hafif lekeler, patlamalar (popout), çatlaklardan dışarı sıvı akışı ve beton yüzeyinde

sızma şeklinde görülebilir. Jel bu durumda kireç ile reaksiyona girerek beyaz ve opak renkli olarak beton yüzeyinde belirginleşir (Resim 2.1). Diğer taraftan , bazen dışarıya jel çıkışının olmadığı durumlara da rastlanabilir. Bu nedenle beton yüzeyinde herhangi bir belirtinin olmaması, ASR nedeniyle çatlak meydana gelme ihtimalini ortadan kaldırmaz (19).

Betonda ASR ürünleri oluşmadıkça ASR hasarından bahsedilemez. Yapılacak dikkatli incelemelerle tespit edilebilecek ASR belirtileri; genleşme, betonda çatlaklar, yüzey birikintileri, yüzey parçalanmaları-patlamları ve renk değişimleridir (18).

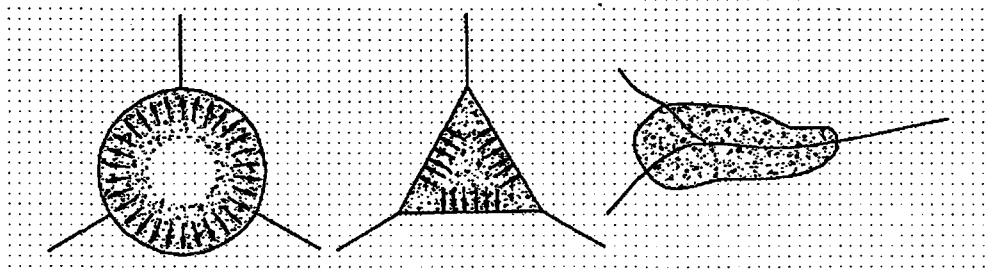
ASR varlığının en tipik göstergesi, genleşmelerle ortaya çıkan harita çatlağı tipindeki çatlak desenleridir (Şekil 2.8). ASR çatlaklarının deseni, yapılarda oluşan zemin ve muhtelif yüklerin neden olduğu çatlak düzenlerinden oldukça farklıdır (18).



Şekil 2.8. ASR'nin neden olduğu harita çatlakları (35)

Göz muayenesi ile; çatlakların konumu ve deseni, uzunlukları, genişlikleri, görünür derinlikleri, çatlakların agrega kesitinden mi yoksa çimento hamurundan mı geçtiği saptanabilir. ASR'nin oluşturduğu jelleşme, agrega taneciği içinde veya agrega taneciği çevresinde reaksiyon halkası biçiminde gelişebilir. Bulabildiği ölçüde su emerek enerjisini boşaltan bu jel, su emdikçe

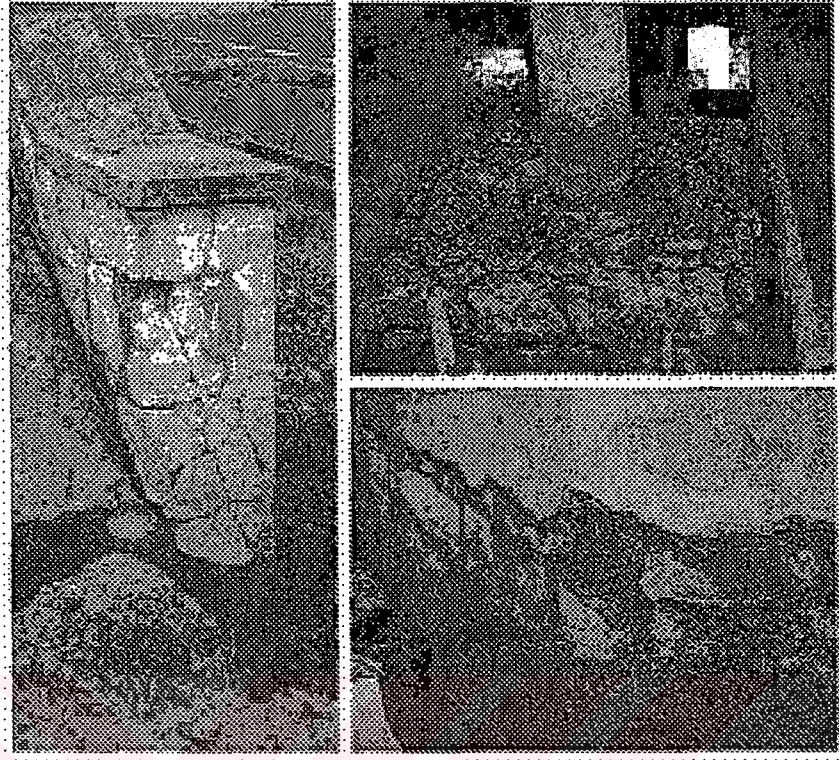
hacimsel olarak büyüyerek ASR'den kaynaklanan çekme gerilmeleri nedeni ile 3 veya 4 kollu yıldız şeklinde çatlaklar (Şekil 2.9) (18).



Şekil 2.9. ASR'den kaynaklanan çatlaklara ilişkin örnek görünüşler (18)

ASR jelinin su emerek şişmesi sonucu beton içinde depolanan potansiyel enerji, bu çatlamlar ile boşalır (18). Reaksiyona giren tanecik sayısı arttıkça bu yıldızlar birleşerek harita çatlağı biçimli çatlak deseni oluştururlar (36).

Harita çatlağı biçiminde çatlak deseni oluşturan tek mekanizma ASR değildir. Tekrarlı donma-çözülme ve benzeri büzülme-şişme olayına neden olan mekanizmalar da harita çatlağı deseninde çatlak oluştururlar (8).



Resim 2.5. ASR'den kaynaklanan çatlaklara ilişkin görüşler (8)

Beton çatlakları boyunca beyazdan griye kadar değişen renklerde ASR jeli yada kalsiyum karbonat tortuları görülebilir. Bu birikintilere bazen yüzey tortuları veya salgıları da denir. Çatlaklardan dışarı sızan bu maddeler, beyaz sarımtırak veya renksiz, viskoz, akışkan, mumsu, elastik yapışkan yada sert olabilirler (18).

Yüzeyde veya yüzeye çok yakın bölgelerdeki parçalanmalar, tipik bir mısır patlaması gibi davranarak beton yüzeylerinde küçük çukurlar oluşturur. İleri yaşlarda, ASR kopmalarının kaplama betonlarında daha çok görülür. Özellikle rutubetli, ıslak kohezif zeminler üzerinde olan beton kaplamalarda, rutubet yoğunlaşması patlama türü parçalanmaları artırır (18).

Yüzeyde renk kaybı veya renklemeler genellikle harita çatlağı ile birlikte görülür. Koyu renkli veya kararmış bölgeler genellikle ASR'den

kaynaklanmaktadır. Çatlak boyunca olan bölgelerde 2-3 mm genişlikte renk açılması, beyazlaşma, pembeleşme yada kahverengileşme görülebilir (18).

Genleşme

Beton ve betonarme yapılarda ASR varlığının en tipik göstergesi harita çatlağı (map cracking) türünde bir çatlak desenidir. ASR çatlaklarının deseni, yapı yada yapı elemanlarında zemin ve/veya yük etkileri ile oluşmuş çatlak düzeninden çok farklıdır. Basınç, çekme, kesme, oturma vb. nedenlerle oluşmuş çatlaklardan kolayca ayırt edilebilir. ASR çatlakları ileri yaşlarda veya ileri safhalarda kapalı eklem yerleri, pullanmış beton yüzeyler, kapak atma veya yapı elemanının farklı kısımlarının birbirlerine göre konumlarında kayma şeklinde kendini gösterir (35).

ASR'nin betonda yarattığı bozulmalar çok yavaş seyrettiği için ileri boyuttaki bozuklukların, ani göçmelerin oluşma riski azdır. ASR, yapının servis hizmetinde problemlere yol açabilir. Ayrıca tuzlu su, sülfat etkileri, tabii don ve donma çözülmenin etkilerinin hızlanmasını ve artmasını sağlar. Örneğin beton kaplamalarda ASR nedeniyle oluşan harita çatlağı biçimindeki çatlaklardan içeri giren su veya tuzlu suların donma çözülme etkisi ile parçalanma hızlanır ve artar. Benzer şekilde ASR dışında başka nedenlerle oluşan çatlaklardan içeri giren tuzlu sular veya su, ASR'nin oluşumuna ve/veya hızlanmasına ve oluşturacağı hasarların artmasına neden olabilirler. Hidrolik barajlarda ASR daha ciddi bir öneme sahiptir. Özellikle yüksek hızlarda dönen güçlü ekipmanların ankrajı ve ASR ilişkisi çok önemlidir (37, 38).

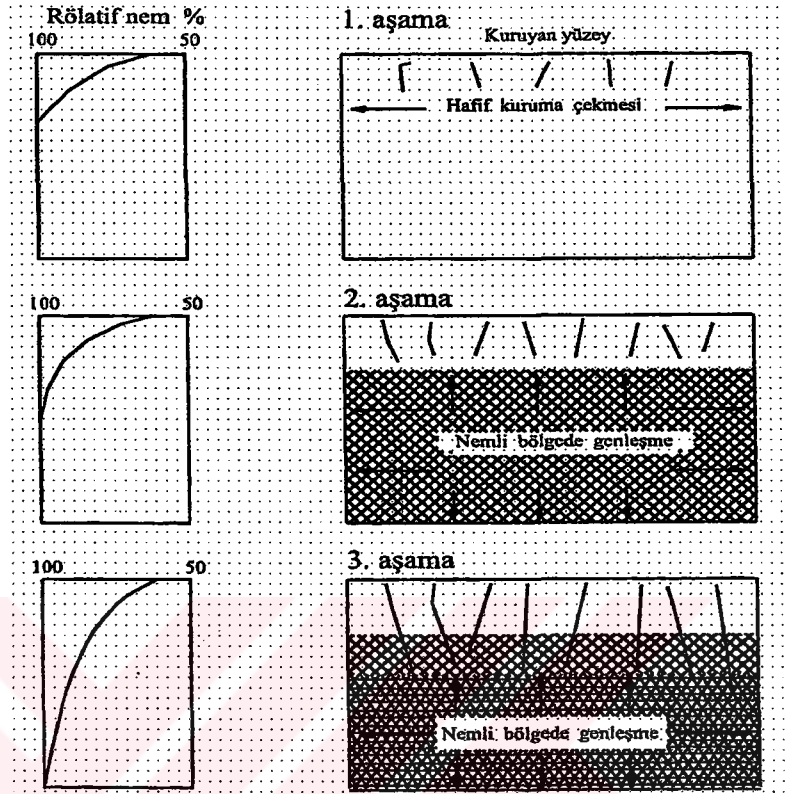
Çatlaklar

ASR'nin betondaki en tipik görülebilir etkisi harita çatlağı şeklindeki çatlak ağıdır. Çatlakların doğru tanımlanabilmesi için, donatı durumu, gerilme doğrultusu, mesnet koşulları ve diğer sınır koşulları ile renk değişimleri ve

yüzey koşullarının çok iyi ve doğru saptanması gerekir. Geniş çatlaklar kolay fark edilebilir. İnce çatlaklar her zaman kolay görünmezler. Ancak yüzey ısıtılıp bir süre kurumaya bırakıldığında, yüzeyde çatlak olmayan yerlerdeki suyun, çatlaklardaki sudan daha çabuk buharlaşması nedeniyle kılcal çatlaklarda kolayca fark edilebilirler. Bu nedenle beton yüzeylerin yağmur sonrasında izlenmesi iyi bir zamanlamadır (39).

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

Beton kaplamalarda ve bordürlerde ASR'nin neden olduğu genleşmeden dolayı oluşan çatlamlar, önce rutubetin fazla olduğu serbest uçlarda ve birleşme yerlerinde oluşur (40). ASR çatlakları genelde enine birleşimlere dik ve serbest yol kenar uçlarına paralel ve asfalt kaplamaya karşı yöndedirler. Bu çatlaklar genellikle harita çatlağı şeklinde gelişim gösterirler. Sürekli donatılı kaplamalarda ASR çatlakları donatıya paralel gelişir. Trafikten ileri gelen statik ve dinamik yüklenmeler, ASR'nin neden olduğu çatlakların genişlik ve oluşum hızını artırır. Şekil 2.10'da beton kaplamalarda ASR çatlaklarının gelişim hızı ve aşamaları verilmektedir. İlk aşamada kuruma büzülmesinden kaynaklanan kılcal çatlaklar oluşur. İkinci safhada beton içinde oluşan ASR'nin neden olduğu genleşme ve çatlamlar gelişir. Üçüncü aşamada, yüzeyde sürekli kuruma, içe giren suyun reaksiyon hızını ve arttırışı gözlenir. Bu model özel olarak beton kaplamalar için oluşturulmuş olmasına karşın, olayların sırası diğer yapılarda da buna benzerdir (41).



Şekil 2.10. Zemin üzerinde yanal basınca maruz kalmayan beton kaplamalarda ASR çatlakları için model (41)

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

- İlk aşamada kaplama yüzeyindeki hızlı buharlaşma nedeniyle yüzeyde su kaybının neden olduğu büzülmeden dolayı çok kılcal çatlaklar oluşur. Bu aşamada ASR'nin neden olduğu çatlaklar gözlenemez. Beton bu aşamada stabildir ve bu halini uzunca bir süre korur (42).
- ASR'de ikinci aşama betonun yapıdaki yerine yerleştirilmesinden aylar hatta yıllar sonra başlayabilir. Reaktif agreganın fazlalığı ve pH değeri yüksek

por çözeltileri bu aşamaya geçişi ve bu aşama süresini kısaltır. İkinci aşamada jel oluşumu ve gelişmenin neden olduğu çatlaklar oluşur ve gelişir. Jel hem agrega taneciği çatlaklarının içinde hem de agrega dış yüzeyinde oluşabilir. Jel oluşumu ilk aşamada hacimsel küçülmeye de neden olabilir. Ancak rutubet nedeniyle suyu emen jel şişerek hacimsel olarak genişlerken beton içinde çekme gerilmeleri dogmasına neden olur (42).

Serbestçe genişemeyen, yük yada herhangi bir nedenle genişmesi sınırlandırılmış beton yüzeyler, şişmeye karşı koyamaz ve yüzey çatlakları ayrılmaya başlar. Genişleyen yüzey çatlakları, ASR'nin oluştuğunun bir göstergesidir. Genişleyen çatlaklar, yüzey sularının beton içine girişini kolaylaştırır. Bu ise oluşan jelin artmasına ve daha çok şişmesine neden olur. Bu aşamada genişleyen çatlaklardan jelin dışarı çıkışı söz konusu olur (42).

- Üçüncü aşamada ise, sürekli kuruyan yüzeye yakın bölgelerde reaksiyon hızı yavaşlar. Ancak rutubetin fazla olduğu iç kısımlarda reaksiyon hızla devam ederek jel oluşumu, artışı ve şişme basıncında artış devam eder. Böylece çatlaklar giderek genişler (42).

ASR, reaksiyona giren silika tükeninceye veya por çözelti pH'ı yeterli miktarda azalınca yada jelin oluşumu ve genişmesini tamamen durduracak boyutta kuruma gerçekleşinceye kadar devam edecektir. Bu üç aşamalı olarak açıklanan süreç, tamamen kesilebildiği gibi, sürekli yada sürekli olarak devam edebilir. Örneğin, yapı servis ömrü boyunca rutubete karşı korunur veya rutubet söz konusu olmazsa, reaksiyon bir noktadan sonra tamamen durabilir. Ancak ortam koşulları reaksiyona olanak sağladığında ASR yeniden başlamak durumundadır (42).

Beton kaplamalar ve bordürlerin dışındaki yapılarda gözlenen ASR çatlakları, genellikle yapı betonlarının sürekli veya tekrarlanan su etkilerinin (rutubetinin) söz konusu olduğu kısımlarda daha çok, daha geniş ve daha tahripkardır. Örneğin iskelelerin suya yakın bölgeleri, köprü, menfez, alt geçit, üst geçit ve

viyadük kanat duvarlarında, beton bordürlerin alt kısımlarında, liman mendireklerinde, ve kolon tipi düşey elemanlarda (kılcallık nedeniyle su girişinin etkisiyle) ASR çok daha fazla tahribat yapar (43).

Herhangi bir yönde basınç etkisi söz konusu olmadığında, betondaki ASR çatlakları rasgele yönlerdedir. Ancak kolon tipi düşey yük etkisinin fazla olduğu elemanlarda basınç yükü (düşey yük) etkisi nedeniyle, düşey doğrultuda beton serbestçe genişleyip deforme olmadığından, ASR çatlakları düşey yük doğrultusunda daha geniş ve düşey çatlaklar çıplak gözle bile oldukça net bir şekilde görülebilirler (36), çünkü yanal doğrultularda beton genişleme ve deforme olmasını engelleyen herhangi bir yanal bir basınç söz konusu değildir. Ancak düşey basınç yüküne dik, yani yere paralel doğrultudaki çatlaklar çoğu kez gözle fark edilemeyecek kadar kılcal boyutta ve azdır. Boyuna donatılar basınç gerilmelerine paralel olduğundan, doğrusal ASR çatlakları, yaklaşık olarak donatıya paraleldirler. Çeliğin korozyonu nedeniyle oluşan çatlaklar hemen tam donatı üstünde gelişirken, ASR çatlakları donatılar arasında ve donatılara paralel olarak oluşup gelişir. Donatı iki yönde de eşit aralıklarda ise, yaklaşık dikdörtgen desenli çatlaklar gelişir (40).

Donatısız beton yapılarda ise çatlak desenini daha çok yapının serbestçe genişleyip deforme olmasını engelleyen sınır koşulları belirler. Donatısız beton barajlarda, yatay doğrultuda betonun serbestçe genişleyip genişlemeyi ve deformasyonunu sınırladığından çatlaklar düşey doğrultulu değildir, tersine düşey doğrultuda deformasyonu sınırlayan koşullar olmadığından çatlaklar yatay doğrultuludur (42).

Yüzey birikintileri

Beton çatlakları boyunca beyazdan griye kadar değişen renklerde ASR jeli yada kalsiyum karbonat tortuları görülebilir. Bu birikintilere bazen yüzey tortuları veya salgıları da denir. Çatlaklardan dışarı sızan bu maddeler beyaz

sarımtırak yada renksiz, viskoz, akışkan, mumsu, elastik yapışkan veya sert olabilirler (8).

Yüzey birikintileri ASR jelinin genişmesi veya başka suların çimentodaki kireci çözmesi sonucu yüzeyde beyaz veya farklı renkte birikintiler görülebilir. Bu yüzey birikintileri ASR ürünü olmasa bile, saha etütleri, gözlemleri ve incelemeleri sırasında renklenmeler, yüzeydeki doku özellikleri, rutubetlilik durumu, yüzey sertliği vb. farkı gözlemlerin desen ve bölgelerinin kaydının tutulması son derece önemlidir. Yüzey tortuları içinde ASR jelinin bulunup bulunmadığına ilişkin yapılacak kimyasal analizler oldukça önemli ve yararlıdır (8).

Popout (Yüzey patlamaları, parçalanmaları)

Yüzeydeki veya yüzeye çok yakın bölgelerdeki fragmentler, tipik bir mısır patlaması (patlamış mısır) gibi davranarak beton yüzeylerinde boyutu genellikle 25-50 mm. arasında değişen oyuklar, çukurlar oluştururlar. Kum taneciği boyutundaki parçacıkların neden olduğu pop-out türü patlama ve parçalanmalar daha küçük boyutlu çukurlar oluştururlar. Çukurda genellikle, oyuk tabanında parçalanmış çatlamış bir agrega parçacığı bulunur (8).

Beton yüzeyindeki bu tür çukurların varlığı ve durumları, betonda kullanılan agreganın kalitesi hakkında önemli ip uçları, bilgiler verirler. ASR'nin neden olduğu genişmeden kaynaklanan pop-out'lar, beton yüzeyinin hemen altındaki ASR jelinin potansiyel enerjisinin boşaltılması, basınç fazlasının giderilmesi isteğinin bir sonucudur. Pop-out bölgesinde jel bulunması ise, ASR varlığının çok önemli bir kanıtıdır (8).

İleri yaşlarda ASR kopmalarının gelişmesi, artması kaplama betonlarında daha çok görülür. Özellikle rutubetli, ıslak kohezif zeminler üzerinde olan beton kaplamalarda rutubet yoğunlaşması pop-out türü parçalanmaları

arttırır. Pop-out sonrası oluşan çukur yüzeydeki agregaların incelenmesi ile parçalanmaların nedeni açıklanabilir (8).

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

Bunlar;

- Zorunlu ve gerekli olmadıkça, düzgün çelik master yada mala ile kaymaklanmış çok düzgün pürüzsüz yüzeyler oluşturulmamalıdır.
- Kür metodu olarak, zorunlu olmadıkça kür maddeleri poliflimler, kür kaplama elemanları (kağıt) yerine ıslak kür maddeleri, su ile sisleme veya pulverize su püskürtme gibi ıslak kür metotları tercih edilmelidir.
- Katkılı çimento tipleri (katkılı çimento, cürufu çimento, uçucu küllü çimento, vb.) ve/veya çimentolanma özelliği olan puzolanlar kullanılmalıdır (8).

ASR kaynaklı pop-out'ların varlığı, beton yapıda mutlaka genişleme ve harita desenli çatlakların oluşacağı veya ASR'nin neden olacağı diğer etkilerinde mutlaka oluşacağı anlamına gelmez. Ancak önemsenmesi de gerekir. Pop-out türü patlama ve parçalanmalar bazen yüzeyde veya yüzeye yakın bölgede bulunan poröz bir çakmak taşının su emmesi ve suyun donması sonucu genişleme ile parçalanabilir, kopmalara neden olabilir (8).

Renk değişimi

Yüzeyde renk kaybı ve/veya renklemler, genellikle harita çatlağı ile birlikte görülür (36). Koyu renkli veya kararmış bölgeler genellikle ASR'den kaynaklanır. Çatlak boyunca olan bölgelerde 2-3 mm. genişlikte renk açılması, beyazlaşma, pembeleşme, kahverengileşme görülebilir (8).

2.1.3. Alkali-silika reaksiyonunu önlemeye ilişkin güncel çalışmalar

Alkali-silika reaksiyonu hızını yavaşlatmada LiOH'ın etkileri

Laboratuvar koşullarında 20 °C'de zeolitizasyon olmuş perlit içeren harcın alkali-silika reaksiyonu genleşmesi uzun süreli ve etkili bir şekilde LiOH ile yavaşlatılabilir. Bu etki Li/(Na+K) molar oranının artmasıyla daha da artar. Harç dayanımı LiOH eklendiğinde azalacaktır. Ayrıca, 28 günlük dayanım üzerine etki 3 günlük dayanımdan daha fazladır. LiOH etki derecesi basınç dayanımını çekme dayanımından daha yüksek tutacak şekildedir. LiOH ilave edildiğinde, çimentonun başlangıç ve bitiş priz süreleri kısılacaktır. 20 °C'deki değişim sadece harç çubuk genleşmesi değil ayrıca reaksiyonun oluşumu ve reaksiyon ürünlerinin bileşimi bakımından 4 yıl kürden sonra tarama elektron mikroskopu ve enerji dağılımlı spektroskop ile araştırılmıştır. Görülüyor ki, ASR genleşmesi olayının ana nedeni lityum bileşenlerinin ilavesiyle engellenebilir (44).

Diğer bir çalışmada, lityum hidroksit solüsyonunun etkisi opal ile oluşturulmuş alkali-silika reaksiyonu jeli üzerinde araştırılmıştır. Kalsiyum hidroksit, potasyum hidroksit ve lityum hidroksit solüsyonları içeren Nevada opali reaksiyonu incelenmiştir. Ayrıca, opal bu üç hidroksitin birleştirilmiş solüsyonu etkisine bırakılmıştır. Üç reaksiyonun ilerlemesi X-Ray difraksiyon , Si nukleer magnetik rezonans ve tarama elektron mikroskopu kullanılarak izlenmiştir. X-Ray difraksiyon sonuçları lityum esaslı reaksiyonlara doğru düşük açılı piklerin varlığına işaret etmiştir. Nukleer magnetik rezonans

sonuçları, lityum varlığındaki silika yapılarıdaki değişimi öne sürmüştür. Bu teknikler, opal başlama malzemesi ile alkali reaksiyonuna engel olunduğuna ve lityum hidroksit varlığında reaksiyonun durabileceğine işaret etmiştir. SEM, reaktif opal tanelerinin yüzeyindeki reaksiyon ürünlerinin morfolojisinin belirgin olduğunu gösterir (45).

Alkali-silika reaksiyonunu önlemeye yönelik mekanik yaklaşımlar

Son zamanlarda beton dayanıklılık ve mekanik özellikleri üzerine alkali ilavesinin etkileri araştırılmaktadır. Karışım suyuna NaOH ilavesi ile eşdeğer çimento Na_2O_e miktarının % 0,6'dan %1.25'e çıkmasıyla artan beton alkali içeriği, su/çimento oranı 0,41 olan ve alkali-silika reaksiyonuna karşı dirençli kireçtaşı agregalarından üretilmiş beton mekanik özellikleri (basınç dayanımı, direk çekme dayanımı, eğilmede ve yarmada çekme dayanımı) üzerine zararlı etkiye sahiptir. Fakat, basınç veya çekme dayanımı altında elastisite modülü ölçülmemiştir. 7 gün süreyle 23 °C ve %100 bağıl nem altında kaldıktan sonra 23 °C ve % 50 bağıl nem altında başlayan büzülme testleri aynı su kayıplarına rağmen, düşük alkali içeriğine sahip betonun yüksek alkali içeriğine sahip betona göre daha fazla büzüldüğü görülmüştür (46).

Alkali-silika reaksiyonunu önlemede diğer mekanik yaklaşım ise mikrofiber çeliklerin etkisinin araştırılmasıdır. Alkali-silika reaksiyonu üzerine mikrofiber çeliklerin etkisi sabit çapta payrex çubuk, kırılmış opal ve iki çeşit reaktif agregası kullanılarak incelenmiştir. Mikrofiber çelik ile desteklenmiş harçlardaki çatlaklar, mikrofiber çelik ile desteklenmemiş harçlara göre daha azdır. Genleşme ve ASR ürünleri mikroprob analizi ve endaktif çiftli plazma spektroskop ile belirlenir. Mikrofiber çelikler yüzünden oluşan hapsedilme, reaksiyon yerinden çıkan ASR sıvı Na ve Si iyon konsantrasyonundaki artma ile sonuçlanır. Yüksek konsantrasyon , ASR hızını azaltır ve mikrofiber çelikli harçlardaki reaktif payreksin reaktivitesini düşürür (47).

Alkali-silika jeli oluşumuna C-S-H ve portlanditin etkileri

Alkali-silika reaksiyonunun zararlı etkileri puzolonik çimentolar kullanılarak azaltılabilir. Yeterli miktarda puzolan katılması halinde klinker içinde bulunan alkali oksitleri sorun yaratmaz. Puzolonik aktivite özelliği gösteren bir puzolandan, çimentoya % 30-40 oranında katılması halinde genleşme önlenabilir (48).

Beton dayanıklılığı üzerine yapılan laboratuvar çalışmalarında, portland çimento, silis dumanı ve uçucu kül üçlü karışımı içeriğinin etkileri araştırılmıştır. Bu çalışma sonuçlarına göre, alkali-silika reaktivitesi kontrolünde yüksek CaO uçucu külün genellikle daha az etkili olduğu, ASR yüzünden oluşan genleşmeyi uçucu kül ile kontrol etmek için % 60 seviyesine kadar ikame ihtiyacı doğduğu fakat nispeten küçük seviyelerde silis dumanı (%3-%6) ve orta seviyede yüksek CaO uçucu kül (%20-%30) ASR yüzünden oluşan genleşmeyi azaltmada daha etkili olduğu açıklanmaktadır (49).

Alkali-silika jel yapısı oluşumunda C-S-H ve portlanditin rolleri incelendiğinde, silika, alkali hidroksit solüsyonu ve kalsiyum hidroksit arasındaki reaksiyonların deneysel araştırmaları göstermiştir ki, portlandit veya Ca bakımından zengin, Si bakımından fakir C-S-H portland çimento pastası silika ile reaksiyona girdiğinde , alkali-silikat hidrat jeli , ASR yüzünden oluşan bu yapı ile karşılaştırılabilir. Bu koşullar altında, ya çözünen silika ile Ca(OH)_2 reaksiyonu vasıtasıyla fazladan C-S-H oluşumu ya da C-S-H'nin ileryen polimerizasyonu gözlemlenir. Q^3 polimerizasyonu yapısı ile baskın olan alkali-silikat hidrat jeli tüketilir ve C-S-H polimerize olur. Gözenek solüsyonu içindeki kimyasal ortamdaki beton yapının alkali-silika jeli, portlant çimento pastasının gözenek solüsyonundan Ca bakımından düşük, Si bakımından yüksektir. Bu sonuçlar, ASR ve puzolonik reaksiyon arasındaki benzerliği vurgular ve harç çubuk örnekleri için verileri destekler (50).

Alkali-silika reaksiyonuna karşı beton dayanıklılığını artırmada
yüksek reaktivite metakaolinin etkileri

Yüksek reaktivite metakaolin, kaolinitik kilin termal işlemlerle üretilmesi ile elde edilmiş bir puzolandır. Yüksek reaktivite metakaolin içeren betonun yerinde ve laboratuvar araştırmaları köprü, köprü kaplamaları, endüstriyel döşeme, yüksek dayanımlı beton ve duvar üretimi için önemli olduğunu göstermiştir. Amerika'da yapılan bir laboratuvar çalışmasında, klorid penetrasyonuna karşı direnç sağlamak ve ASR yüzünden oluşan genleşmeleri azaltmak için yüksek reaktivite metakaolin içeren betonun uzun süreli performansı değerlendirilmiştir.

Hacim difüzyon deneyi yüksek reaktivite metakaolinin su/çimento oranı 0.30 veya 0.40 olana betonda klorid iyon penetrasyonunun azalmasına işaret eder. Difüzyon katsayısındaki azalmalar sırasıyla beton için %8 ve %12 yüksek reaktivite metakaloin %50 ve %60 kontrol örnekleri ile karşılaştırılır. %8 veya %12 yüksek reaktivite metakaolin ile çimento ikamesi su/çimento oranı 0.4'den 0.3'e düşmesine karşı performansı arttırdığı görülmüştür. Reaktif agregata içeren beton prizmalar üzerindeki genleşme testleri %15 yüksek reaktivite metakaolin, ASR yüzünden oluşan zararlı genleşmeleri önleyebileceğini göstermektedir (51).

2.1.4. Alkali-silika reaksiyonunu belirlemede kullanılan güncel yöntemler

Alkali-silika reaksiyonuna bağlı olan genleşmenin “ Damage Rating Index Method” yöntemi ile değerlendirilmesi

Alkali-silika reaksiyonu yüzünden oluşan içsel bozunmanın miktarını belirlemek için tüm nicel metodlar arasında en uygunu olarak görülen “Damage Rating Index Method” önerilmiştir. Bu çalışma, laboratuvar beton prizmaları üzerinde alkali-silika reaksiyonuna neden ölçülmüş genleşme ve betona verdiği zarar arasındaki korelasyonu, bu prizmalardan hazırlanmış bozunmamış kısımlar üzerinde Damage Rating Index Metodunu kullanarak araştırır. Yeni deneysel sonuçlar, çeşitli petrografik özellikler ve genleşme seviyeleri arasında bağlantı olduğunu göstermiştir. Petrografik çalışmalar, ASR'den etkilenmiş 35 cm beton küplerden alınmış karotlar üzerinde de izlenmiştir.

Damage Rating Index Metodu farklı agregalardan üretilmiş beton prizmalarının genleşme miktarını nispeten daha iyi değerlendirmeye imkan verir. Sonuçlar, Damage Rating Index Metodu ile kullanılan ağırlık faktörlerinin uygun olduğunu ileri sürüyor. Fakat, faktörlerin kombinasyonundan kaynaklanan genleşme ve zarar agregaları aynı biçimde etkilemez. Potsdam kumtaşı içeren beton karışımlar için en çarpıcı petrografik özellik reaktif partikül etrafındaki reaksiyon rimidir. Spratt kireçtaşı içeren beton karışımlar için hemen hemen her petrografik özellik (agrega partiküllerindeki ve çimento pastasındaki çatlaklar) sürekli olarak genleşme ile artar. Ayrıca bu çalışma, yüksek su/çimento oranı ile üretilmiş küp örneklerde ve düşük elastisite modüllü betonda zararın iç zona kıyasla yüzey zonunda daha şiddetli olduğunu göstermiştir. Yüksek elastisite modüllü, düşük su/çimento oranına sahip beton küplerde böyle fark gözlemlenmemiştir (52).

Alkali-silika reaktivitesi potansiyelinin agregada ince kesit dijital görüntü analizi ile teşhisi

Alkali-silika reaksiyonu, belirli agregada tipleri ve beton gözenek çözeltisi içindeki alkaliler arasında silika jel formunda oluşur. Ortamda nemin varlığında, jel genişleyecek ve çatlaklara ve yapıda diferansiyel harekete neden olacaktır. Aynı zamanda, donma-çözülme dayanımında azalma ve beton dayanım özelliklerinde azalma gibi diğer bozucu etkilere neden olacaktır. Bu çalışmada, beton agregası olarak kullanılan çeşitli İspanyol alkali reaktif kayalar mikroyapısal karakteristikleri ve potansiyel reaktif kayalar tipleri ve diğer potansiyel reaktivite olasılığına sahip İspanyol kayalar tipleri, petrografik teknikler ve mikroskopik ve makroskopik görüntülerin dijital analiz metodları ile belirlenmiştir. Kuvars reaktivite index değeri, agregada içindeki kuvars yüzdesinin bu mineral fazının karakteristiği olan özgül yüzey alanı ile çarpılması ile elde edilir. Bu sonuçlar, hızlandırılmış harç çubuk testi ile belirlenmiş olan alkali reaktivitesi ile ilişki kurmaktadır. Bu çalışma, kuvars oluşumunda tane boyundaki azalmanın, alkali reaktivitesini artıran metamorfik süreç ve reaksiyon için gerekli olan kuvars tanelerinin yüzey alanının artması ile oluştuğunu göstermektedir (53).

Eski betonlardaki alkali-agregada reaksiyon ürünlerinin mikroskopik analizi

Büyük barajlara ait 50 yıllık betonlar, beton için agregada malzemesi olarak kullanılan granitin özellikleri hakkında araştırma programı yerinde incelenmiştir. Geliştirilmiş saha soruşturması, floresans ve exudations ortaya çıkmış betonun mümkün olan bozunma belirtilerini bulmak için yapılır.

Tarama elektron mikroskopu ve enerji dağılımlı spektroskop analizleri bu malzemelerin kompozisyonunu ve morfolojilerini tanımlamak için yapılmıştır. Analizlerden, alkali-silika jeli yüzünden oluşan bazı sızıntılar üzerinde karara varılmıştır. Örneklerdeki ilgi çekici davranış 3 ay sonunda farklı zamanlarda

gözlemlenmiştir. Başlangıçta kristal olmayan alkali-silika jelinin, laboratuvarında desikatörde bir kaç ay saklanması sonrasında sodyumca zengin çubuk ve tabletlere dönüştüğü fark edilmiştir. O yüzden, alkali-agrega reaksiyon ürünlerinin evriminin farklı basamaklarında benzer olan tanımlanmış malzemeler olduğu sonucuna varılmıştır (54).

Alkali-silika reaksiyonu derecesini ölçmek için önerilen kimyasal bir metod

Bu metod, alkali-silika reaksiyonunu derecesini nicel olarak ölçmek için kullanılan yeni bir kimyasal metottur. Bu metod, alkalın solüsyonu ile temas halinde bulunan kırmataş reaktif agregalar üzerine uygulanır. Bu kimyasal sistem, reaktif agregalarla temas halinde olan beton kapiler gözenek alkali solüsyonunu modellemek için tasarlanmıştır. Sözü edilen mekanizmada iki tane reaksiyon basamağı oluşur. Bir tanesi reaktif silika siloxane bağının kırılması ile oluşan Q_3 yerlerin formasyonu diğeri bu Q_3 yerlerin çözünmesidir. Çözünme derecesi seçilen asitli işlemler ile ölçülür ve solüsyon içerisindeki silikanın yapısı "likid nukleer magnetik rezonans spektroskop" ile belirlenir. Q_4 tetrahedron ve Q_3 protonated yerlerden oluşan kalan silika yapısı "katı nukleer magnetik rezonans spektroskop" ile tanımlanır. Bu Q_3 protonated yerler "termogravimetre analizi" ile ölçülür. Q_3 bölgeler formasyonu reaksiyon ilerledikçe çözünmeyi etkili hale getirir ve içsel silika jeli üretimine katkıda bulunur. Son basamak siloxane kırılmasıdır. Petrografik gözlemler, reaksiyonun agreganın porozitesi içinden nüfuz ettiğini göstermiştir (55).

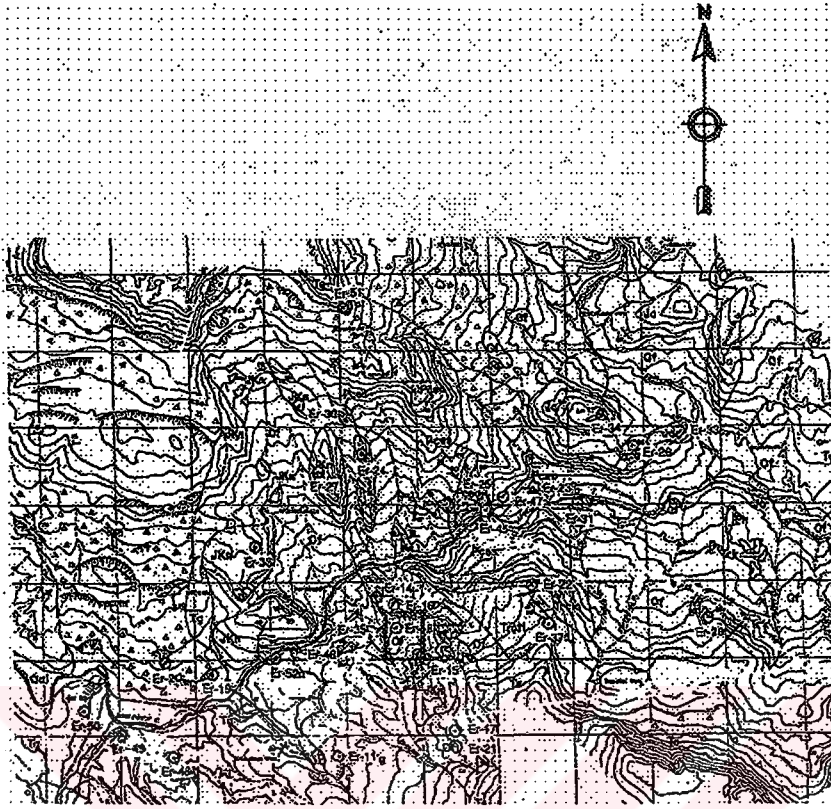
2.1. Ermenek Havzası Coğrafi Konumu ve Bölge Jeolojisi

Ermenek Havzası Toros Kuşağının doğu kısmında, Akdeniz kıyı çizgisinden (Anamur) kuzeye doğru yaklaşık 50 km mesafededir.

Proje alanının genel tektonik ve stratigrafik yapısı genel gösterimde iki ana birim altında gruplanmıştır. Bu gruplar Bolkar Dağı ve Bozkır Birliğidir. Bolkar Dağı Birliği; fliş sedimanları (kumtaşı ve şeyl ardalanmasından oluşan) ve yüzlerce metre Triyasik kireçtaşlarından oluşan büyük bloklar olan bir Melanj oluşumudur. Bozkır Birliği; Triyas sedimanları, esas olarak ince tabakalı kireçtaşı ve marn ardalanması, orta ile kalın tabakalı kireçtaşları ve kireçtaşı ardalanmalı marnlardan oluşmaktadır (56).

Ermenek Havzasından alınan kaya örnekleri üzerinde petrografik incelemeler yapılmıştır. Petrografik inceleme kayaç örneklerinden ince kesit alınması yöntemi ile yapılmıştır. Kayaç incekesiti polarizan mikroskopta incelenerek, içerdiği mineral yapısı hakkında bilgi edinilmiş ve kayacın türü belirlenmiştir (56).

Ermenek Havzası pafta G-26 üzerinde işaretlenen çalışma alanı Şekil 2.11.'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Ermenek Havzası Çetinkalesi Tepe ve Sazak Deresi Bölgesi (56)

Petrografik incelemeler sonucunda, kaya örneği tane boyunun 0.14-0.68 mm arasında değişen kısmen yuvarlaklaşmış taneler halinde kuvars, daha az miktarda çört, feldispat ve eser miktarda mika ve kloritten ibaret olduğu görülmüştür. Kripto ve mikrokristalin kalsit ile bağlanmıştır. Kayacın 1/5.000 ölçekli haritada 'Of ' simgesi ile gösterilen 'Kalsit Çimentolu Kumtaşı' olduğu açıklanmıştır. (56).

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Bu araştırmada; kırmataş, imento ve karışım suyu kullanılmıştır.

3.1.1. Kırmataş

Kırmataşlar Ermenek Havzası etinkalesi Tepe civarına ait kaya örneklerinden elde edilmiştir.

Kırmataş rnekleri, kırmataş yığını temsil edecek şekilde "TS 707; Beton Agregalarından Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi" nde belirtilen esaslara uygun olarak alınmıştır (57).

3.1.2. Çimento

Araştırmada; kimyasal özelliği izelge 3.1'de verilen P 42,5 imentosu kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Çimento kimyasal özellikleri

Kimyasal analiz	Sonuç (%)	Limit (TS 19)
Kızdırma kaybı	3,9	Ma x. % 4
Kalsiyum oksit (CaO)	63,58	-
Silisyum oksit (SiO ₂)	17,76	-
Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃)	5,63	-
Demir oksit (Fe ₂ O ₃)	3,06	-
Magnezyum oksit (MgO)	1,45	Max. % 5
Sodyum oksit (Na ₂ O)	0,78	-
Potasyum oksit (K ₂ O)	1,07	-
Klorür (Cl ⁻)	0,02	Max. % 0,1
Kükürt trioksit (SO ₃)	2,37	Max. % 3,5
Çözünmeyen kalıntı	1,00	Max. % 1,5
Alkalinite (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	1,48	-

3.2. Metot

Agrega örnekleri üzerinde, alkali-silika reaktivitesini belirlemek için kimyasal analiz ve hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler üzerinde istatistik analizler gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Deney örneklerinin hazırlanması

Kimyasal analiz örneklerinin hazırlanması

Kimyasal analiz örnekleri ASTM C-289 "Standart test Method for Potential Reactivity of Aggregates (Chemical Method)" ve TS 2517 "Alkali agrega reaktivitesinin kimyasal yolla tayini" standartlarında belirtilen esaslara uygun olarak hazırlanmıştır. 50 ve 100 nolu elekler arasında kalan malzemeden "çeyreklemeye yöntemi" kullanılarak alınan örnek akar saf su altında yıkanarak toz ve ince parçalardan arınması sağlanmıştır. Yıkanan malzeme 24 saat süreyle 105 ± 5 ° C sıcaklıkta etüvde kurutulmuştur.

Elenen, yıkanan ve kurutulan örnekten elektronik tartı ile 25 g.'lık 3 adet örnek alınarak reaksiyon kabı içerisine konmuştur. Bu kapların her birine 25 ml. 1 N NaOH çözeltisi ilave edilmiş. İçerisine örnek konulmayan dördüncü kaba sadece 25 ml. 1 N NaOH çözeltisi konmuştur.

Örnek kapları 80 ± 1 ° C sıcaklıkta sabit tutulan su banyosunda konarak 24 saat bekletilmiş. Bu süre sonunda örnekler su banyosundan çıkarılarak 30 ° C sıcaklığa kadar soğutulup kapakları açılarak kuru bir kap içerisine süzölmüştür. Homojenliğin sağlanması için karıştırıldıktan sonra bir pipet yardımıyla 10 ml. çekilerek 200 ml.lik balon jojeye alınmış ve üzeri damıtık su ile 200 ml. ye tamamlanmıştır. Bu çözelti, çözünmüş silisin ve alkali azalmasının tayini için kullanılmıştır.

Harç çubuklarının hazırlanması

Harç çubukları (ASTM C-227) ve (ASTM C-1260)'da belirtilen esaslara uygun olarak hazırlanmıştır. Harç karışımları için 8-16-30-50 ve 100 nolu elek serilerinden elenen agregalar, Çizelge 3.2'de karışım oranları verilen miktarlarda kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi için malzeme karışım oranları (58,59)

Elek göz açıklığı, mm		Ağırlıkça, %
Üzerinden geçen elek	Üzerinde kalan elek	
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

Karışım su / çimento oranları, ASTM C -109 "Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars" 'da belirtilen esaslara uygun olarak belirlenmiştir.

Kırmataş harç çubuğu dökümü için gerekli malzeme karışım miktarları Çizelge 3.3'de verilmiştir (58,59).

Ermenek Havzası Çetinkalesi Tepe civarından alınan kaya örneklerinden elde edilen kırmataşlar üzerine uygulanan hızlandırılmış harç çubuğu deneyi için toplam 15 adet harç çubuğu üretilmiştir.

Çizelge 3.3. Harç çubukları malzeme karışım miktarları (58,59)

Malzeme Türü	Elek Serisi					S/Ç	Su (ml)	Çimento (gr)
	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100			
	%10	%25	%25	%25	%15			
Kırma taş	100 gr	250 gr	250 gr	250 gr	150 gr	0,5	222	444

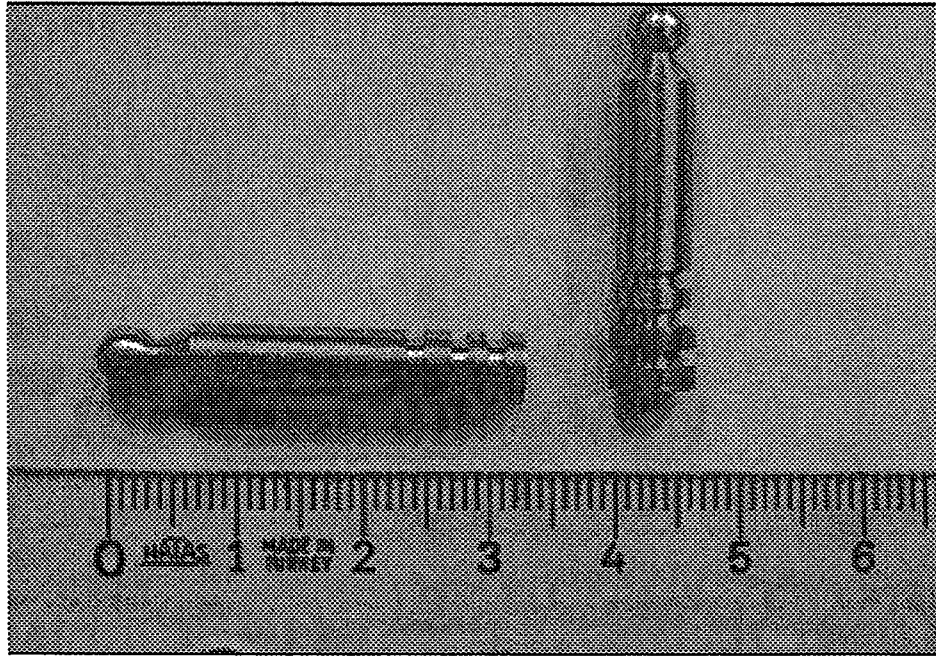
Çizelge 3.3’de verilen karışım miktarları ASTM C 305 “Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Paste and Mortars of Plastic Consistency” (60)’de belirtilen esaslara uygun olarak hazırlanmıştır.

Harç çubuklarının üretiminde, bir seferde 3 adet örnek dökümüne imkan veren 25x25x285 mm boyutlarında, plastik kalıp kullanılmıştır (Resim 3.1).



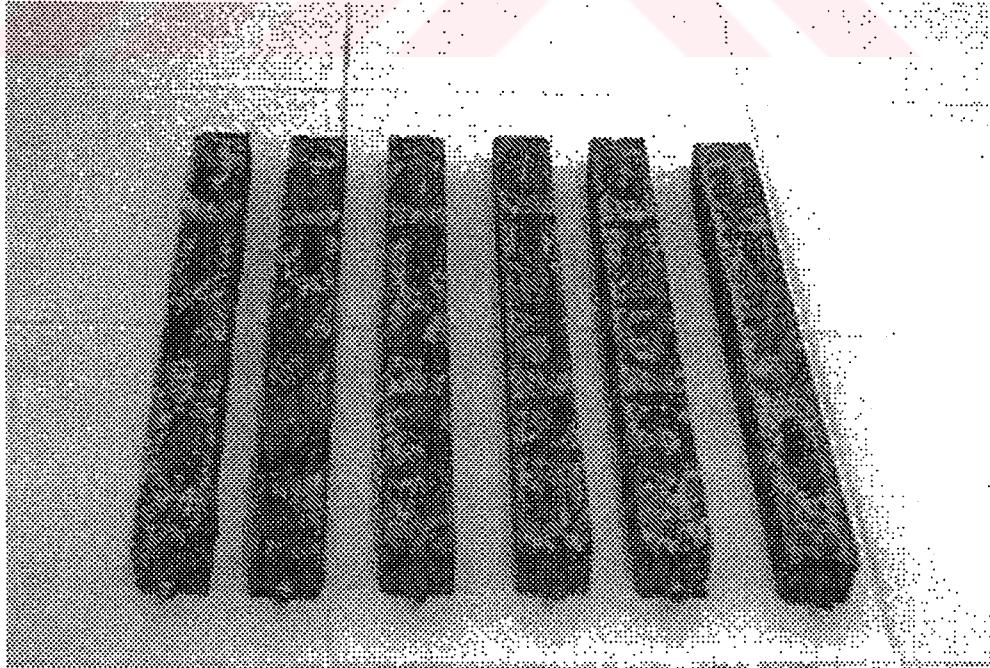
Resim 3.1. Üçlü harç çubuğu kalıbı

Harç çubuklarının boy değişimlerini ölçmek için, 7 mm çapında ve 3,2 mm boyundaki pirinçten üretilmiş pimler (Resim 3.2) kalıplarda açılan deliklere yerleştirilmiştir.



Resim 3.2. Harç çubuklarının uçlarına yerleştirilen pim

Kalıplara yerleştirilen harç şişlenerek sıkıştırılmıştır. Kalıplar %90 nispi nem bulunan kür odasında $23 \pm 1,7$ °C' de 24 saat bekletilmiştir (Resim 3.3).



Resim 3.3. Harç çubukları (Mortar bar)

3.2.2. Kimyasal analizler

Çözünmüş silisin tayini “Kolorimetrik metot”

3.2.1.1.'de anlatıldığı gibi hazırlanan 200 ml' lik çözeltiden pipetle 10 ml çekilmiş ve 100 ml lik bir ölçülü balon jojeye konmuştur. Üzerine 1/1 HCl den 0,5 ml ve amonyum molibdat çözeltisinden 1 ml ilave edilip yaklaşık 10 dakika sonra kolorimetrede okunmuştur. Kalibrasyon eğrisi yardımıyla SiO_2 'nin konsantrasyonu “Sc mmol/litre” olarak okunmuştur.

Çözünen silis konsantrasyonu [3.1] eşitliği ile hesaplanmıştır;

$$S_c = \left(20 \times \frac{100}{V} \right) \times C \quad [3.1]$$

Bu eşitlikte;

S_c = Orijinal süzüntüdeki silis konsantrasyonu (mmol/litre),

V = 200 ml.'lik çözeltiden çekilen örnek hacmi (ml),

C = Kolorimetrede ölçülen çözeltinin silis konsantrasyonu (mmol/litre) göstermektedir (61,62).

Alkali azalmasının tayini “Titrasyon metodu”

3.2.2'de anlatıldığı gibi hazırlanan 200 ml' lik çözeltiden 20 ml örnek alınmış 100 ml'lik bir erlenmayere konduktan sonra 2-3 damla fenolftalein çözeltisi damlatılmıştır. 0,05 N hidroklorik asit çözeltisi ile karışımın rengi pembeden beyaza döndüğü noktaya kadar titre edilmiştir.

Alkali azalması [3.2] eşitliği ile hesaplanmıştır;

$$R_c = \frac{20N}{V_1} (V_3 - V_2) \times 1000 \quad [3.2]$$

Bu eşitlikte;

R_c = Alkali azalması (mmol/litre),

N = Hidroklorik asidin normalitesi,

V_1 = 200 ml'lik çözeltiden çekilen örnek hacmi (ml),

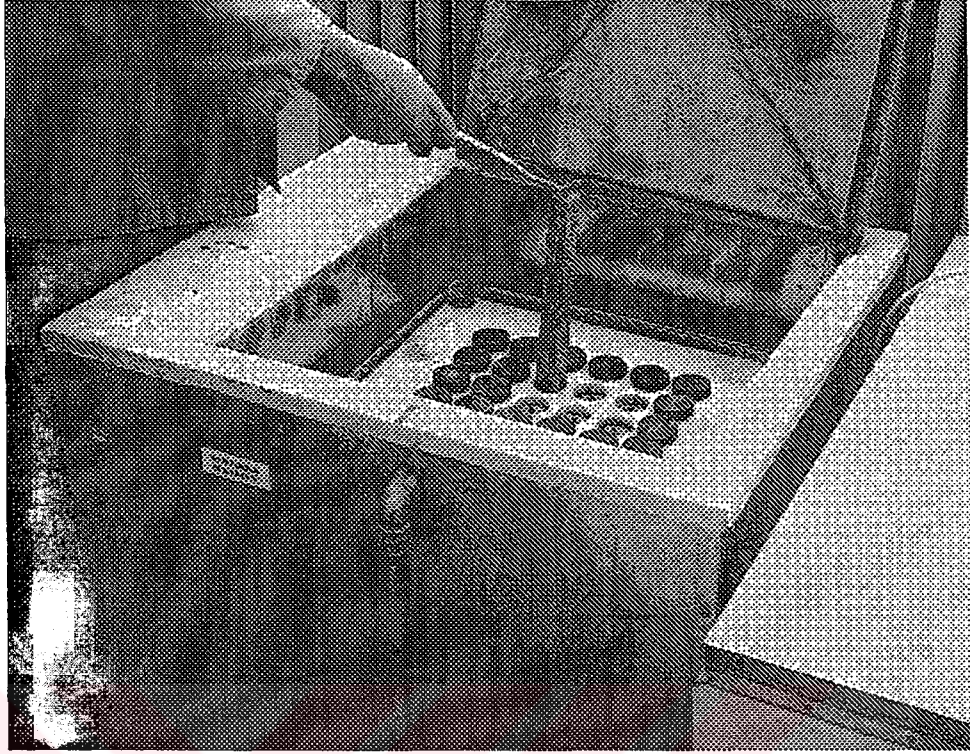
V_2 = Örnek için sarf edilen hidroklorik asit hacmi (ml),

V_3 = Tanık örnek için sarf edilen hidroklorik asit hacmi (ml)

göstermektedir (61,62).

3.2.3. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi

Harç çubukları saf su içerisinde konarak $80 \pm 2,0$ °C sabit ısıdaki etüvde 24 saat bekletildikten sonra ilk boy ölçümleri alınmıştır. 1 N NaOH çözeltisi, 900 mlt. Saf suya 40 gr sodyum hidroksit konularak hazırlanmış ve hazırlanan bu sodyum hidroksit çözeltisi 80 °C' de sabit ısıda tutularak, harç çubukları bu çözelti içerisinde konmuştur (Resim 3.4).



Resim 3.4. Termostat'lı kür tankı

Boy ölçümleri çözelti içerisinde bulunan 15 adet harç çubuğunun 3, 7, 14, ve 28. günlerde dijital komparatörle (Resim 3.5) yapılmıştır. Boy değişim yüzdeleri [3.3] eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.



Resim 3.5. Dijital komparatör ile örneklerin boy ölçümü

Boy değişim yüzdelerinin [3.3] eşitliği kullanılarak hesaplanması:

$$\%L = \left(\frac{\Delta L}{L} \right) \times 100 \quad [3.3]$$

Bu eşitlikte;

$\%L$ = Boy değişim yüzdesi,

ΔL = Örneğin boy değişimi (mm),

L = Örneğin ilk uzunluğu (mm),

göstermektedir (58).

ASTM C -1260'a göre boy değişimindeki verilerin değerlendirilmesi Çizelge 3.4.'de verilmiştir;

Çizelge 3.4. Hızlandırılmış harç çubuk metodu deney sonuçlarının ASTM C - 1260'a göre değerlendirilmesi (59)

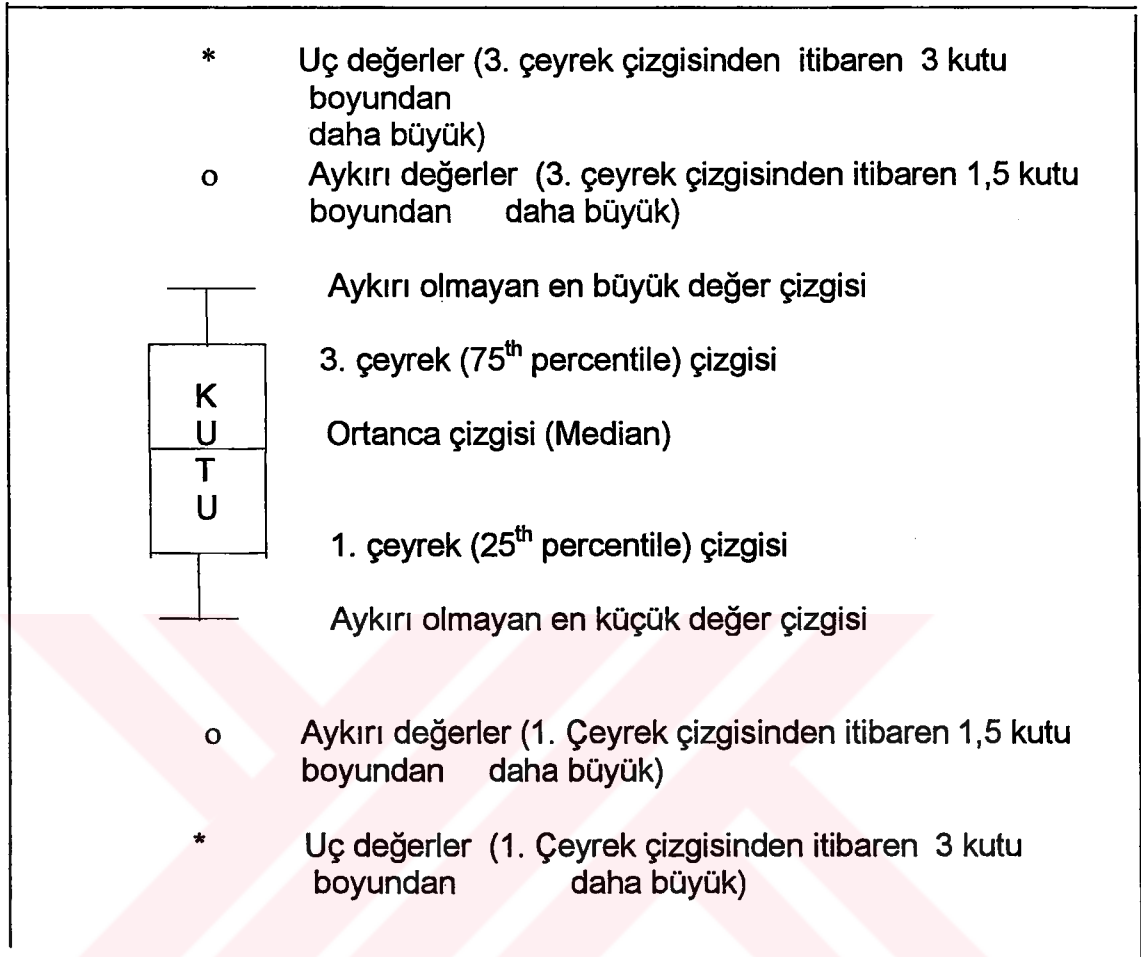
Boy değişimi (%)	< 0,1	0.1-0.2	>0.2
14 gün sonra ölçülen boy değişimi yöntemi ile alkali-silika reaksiyonu	Zararsız	28. gün sonunda tekrar okuma yapılmalıdır	Potansiyel olarak zararlı seviyede

3.2.4. İstatistiksel metodlar

Kırmataş örnekleri üzerinde gerçekleştirilen hızlandırılmış harç çubuk metodu deney sonuçlarından dört gözleme ait istatistiki veriler elde edilmiştir. Gözlemler arasında fark olup olmadığı varyans analizi tekniği ile belirlenmiştir. Varyans analizinde 'gruplar arasında fark yoktur' kararına varılırken, yanılmış olma olasılığı (anlamlılık düzeyi) $\alpha = 0,05$ olarak (1.tip hata) kabul edilmiştir (63). Hızlandırılmış harç çubuk metodu deneyinde dört gözleme ait verilerin zamana ilişkin regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca boyca değişim verilerinin dağılımlarını ve gözlemler arasında dağılım farklılıklarını göstermek amacıyla kutu grafikleri çizilmiştir. Çizelge 3.5'de standart bir kutu grafiğinin yapısı ve özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.5. Standart bir kutu grafiğinin (boxplot) yapısı ve özellikleri



Çizelge 3.5'de verilen standart kutu grafiğinde;

- Ortanca çizgisi ile merkezi eğilimler arasındaki ilişki (ortanca çizgisi kutunun ekseninde ise dağılımın normal, ortanca çizgisi 1. çeyrek çizgisine daha yakın ise dağılımın pozitif yönde çarpık, ortanca çizgisi 3 çeyrek çizgisine daha yakın ise dağılımın negatif yönde çarpık olduğu),
- Kutunun boyu ile verilerin yayılma veya değişkenliği (gözlemlerin %50' sinin değerleri kutu içerisinde yer almakta ise bu durum kutu boyunun uzun olmasını veya değişkenliğin fazla olduğunu ifade etmektedir (64).

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kimyasal Analiz

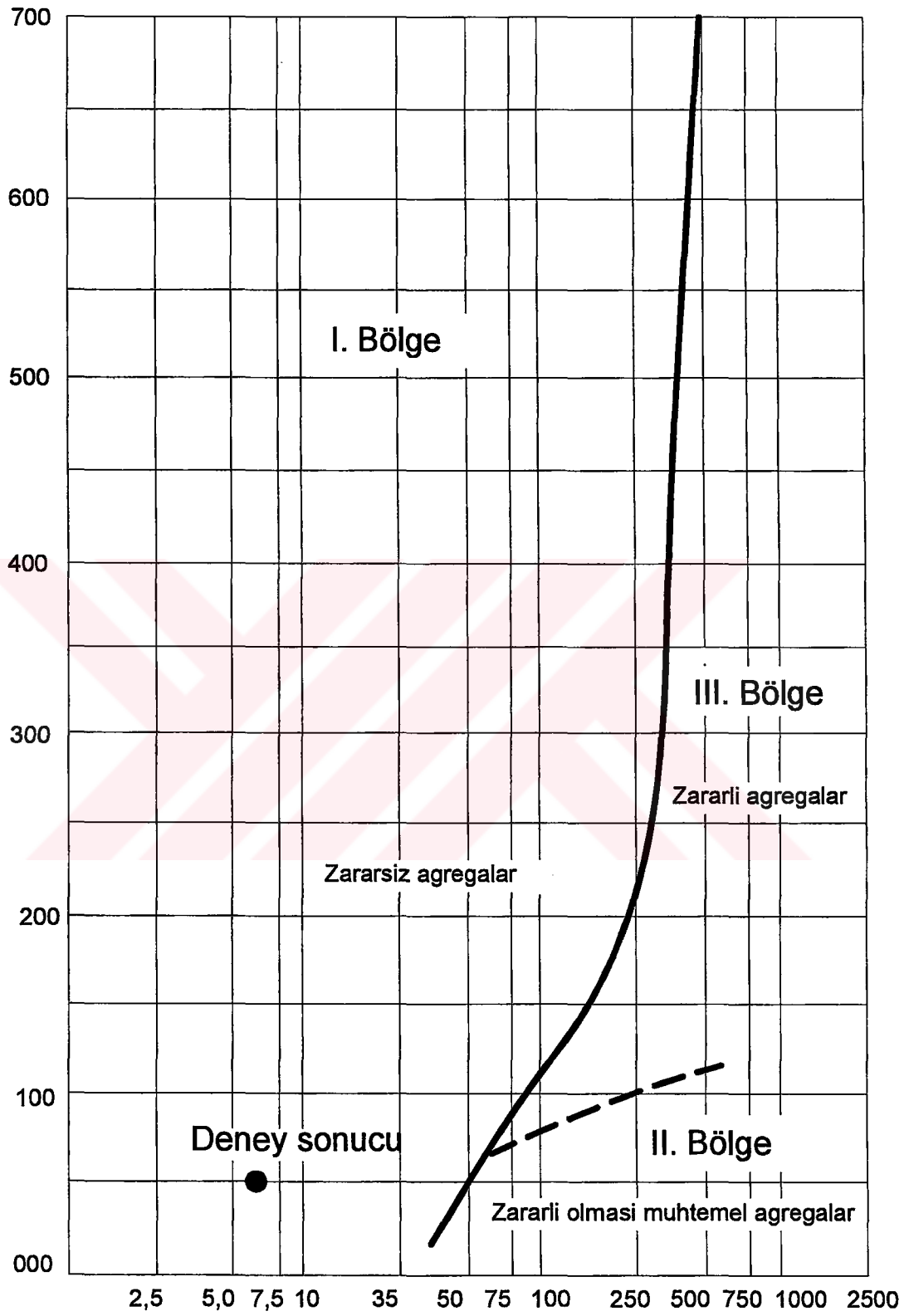
Kaya örneklerine ait kırmataş örnekleri için kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kırmataş örneği kimyasal analiz verileri

Kırmataş alındığı yer	R _c alkali azalması (mmol/lit)	S _c çözünen silika (mmol/lit)	CaCO ₃ (%)
Ermenek Havzası	50	6,0	99,56

Kırmataş örnekleri kimyasal analiz sonuçlarına göre, alkali azalmasının 50 mmol/lit, çözünene silika içeriğinin 6,0 mmol/lit olduğu görülmektedir. Kalsiyum karbonat (CaCO₃) miktarı ise % 99,56 ‘dır.

ASTM C-289 “Test Method for Potential Reactivity of Aggregates (Chemical Method) ve TS 2517 “Alkali Silika Reaktivitesinin Kimyasal Yolla Tayini” ne göre alkali azalması (R_c) ve çözünmüş silis (S_c) değerleri kullanılarak Şekil 4.1’deki grafik yardımı ile söz konusu Kırmataşın yeri belirlenmiştir. Kırmataş örneği, alkali silika reaktivitesi bakımından standartlarda belirtilen “Zararsız agregalar”ın tanımlandığı I. Bölge içerisinde yer aldığı görülmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Çözünen silika ve alkalinite azalma değerlerine göre, Kırmataş örneğinin, ASTM C 289 grafiği kullanılarak değerlendirme

4.2. Hızlandırılmış Harç Çubuğu

Ermenek Havzası Çetinkalesi Tepe civarından alınan Er-18 no'lu kaya örneklerinden elde edilen kırmataşlara ait harç çubukları üzerinde yapılan hızlandırılmış harç çubuğu testi bölüm 3.2.3'de belirtilen esaslara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda kırmataş örneğinin boy değişimi değerleri belirlenmiş ve istatistiksel değerlendirmesi bu veriler esasında yapılmıştır. Harç çubuklarının boy değişimi boy değişim yüzdesi olarak belirlenmiştir. Hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçlarına ait açıklayıcı istatistikler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Harç çubuklarının 3,7,14 ve 28 günlük boy değişim değerleri açıklayıcı istatistikleri

Deney süreleri (gün)	Örnek sayısı (adet)	Art. ort. (%)	Standart sapma	Min. (%)	Maks. (%)
3	15	0.002	0.00521	-0.0053	0.0131
7	15	0.002	0.00521	-0.0053	0.0131
14	15	0.001	0.00427	-0.0053	0.0089
28	15	0.002	0.00521	-0.0053	0.0131

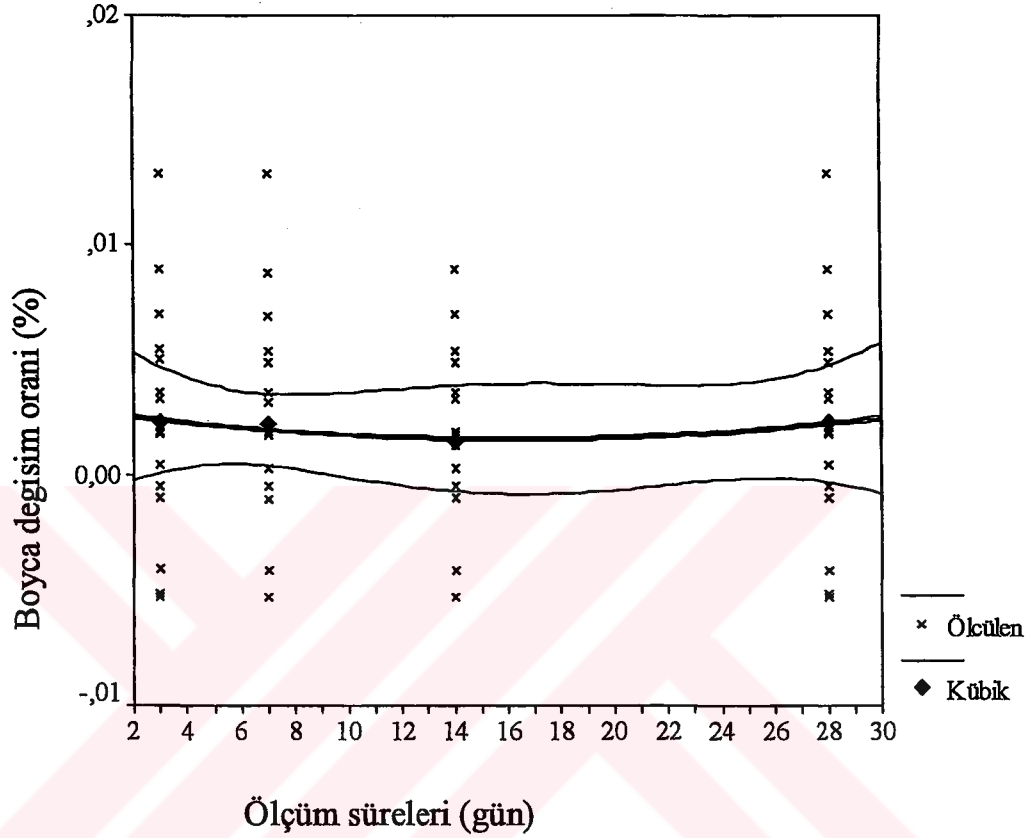
Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçlarına göre, 3 günlük örneklerin % 0.002, 7 günlük örneklerin %0.002, 14 günlük örneklerin %0.001 ve 28 günlük örneklerin %0.002 oranında boy değişimine uğradığı görülmüştür (Çizelge 4.2.).

Varyans analizi sonuçlarına göre gruplar arasında anlamlı farklılık olmadığı görülmüştür. Gruplar arasında anlamlı fark olmadığından çoklu karşılaştırma yapılmamıştır (Çizelge 4.3.).

Çizelge 4.3. Harç çubuklarının 3, 7, 14 ve 28 günlük boy değişim değerleri varyans analiz tablosu

Varyansın kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F-Testi	Anlamlılık düzeyi (α)
Gruplar arası	3	0.000007	0.000002	0.096	0.962
Gruplar içi	56	0.001397	0.000024		
Toplam	59	0.001405			

Harç çubuklarının 3, 7, 14 ve 28 günlük boy değişimlerine ilişkin regresyon analizi grafiği Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Harç çubuklarının 3, 7, 14 ve 28 günlük boy değişimlerine ilişkin regresyon analiz grafiği

Regresyon modeli kübik olup, regresyon formülü $y=0.0020+0.0002x-0.00002x^2+0.0000006x^3$ olarak belirlenmiştir.

Harç çubuğu örneklerinin 3, 7, 14 ve 28 günlük boy değişimlerinde zamana bağlı olarak önemli bir fark görülmemiştir. Fakat, harç çubukların 14 günlük değişimlerinde 4 günlük boy değişimlerine göre çok az miktarda bir azalma buna karşın 28 günlük boy değişimlerinin 14 günlük boy değişimlerine göre ise çok az miktarda bir artış olduğu görülmektedir (Şekil 4.2.). Diğer taraftan

varyans analizi sonuçlarına göre farklılıkların anlamlı olmadığı hatırlanırsa bu artışın önemsiz olduğu söylenebilir.

Harç çubuğu örneklerinin 14 günlük boy uzama değerlerinin ASTM C-1260 "Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)" standardında belirtilen "Genleşme Sınırını, (% 0,1)" aşmadığı görülmektedir (Şekil 4.2).

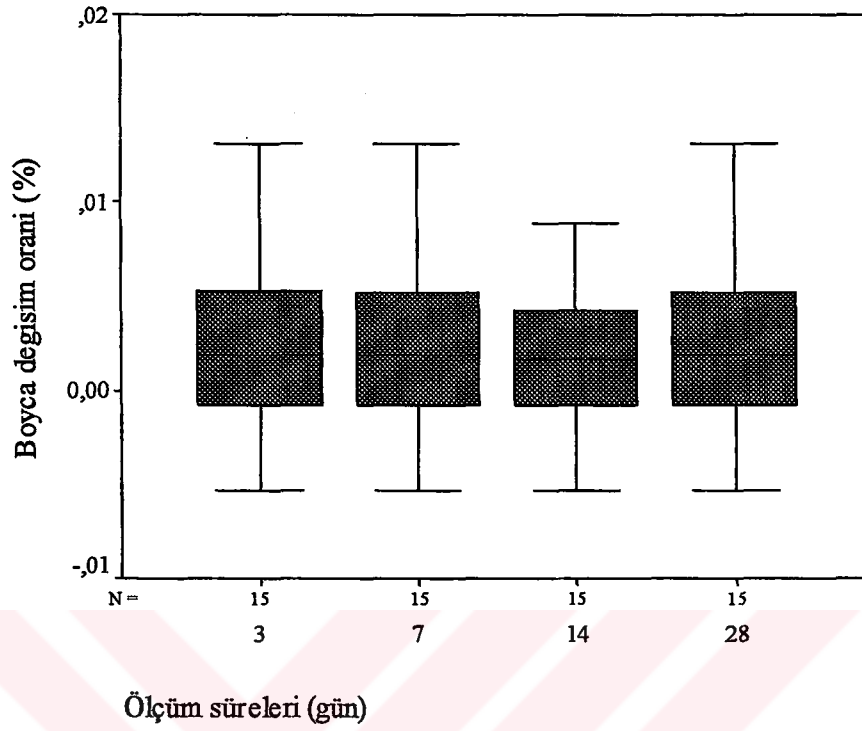
Ayrıca, harç çubuğu örneklerinin 28 günlük boy uzama değerlerinin ASTM C-1260 "Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)" standardında belirtilen "Genleşme Sınırını, (% 0,2)" aşmadığı görülmektedir (Şekil 4.2).

ASTM C-1260 "Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)" (Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi) sonucunda; 14 ve 28 günlük boy değişim değerlerinin, alkali- silika reaktivitesinden kaynaklanan genleşmelerin %0,1'lik ve %0,2'lik genleşme sınırının altında kaldığı için kırmataşların alkali-silika reaktivitesi açısından zararsız olduğu söylenebilir.

Harç çubuklarının 3, 7, 14 ve 28 günlük boy değişim verilerinin dağılımları ve ortanca çizgileri Şekil 4.3.'de görülmektedir. 3, 7, 14 ve 28 günlük boy değişim verileri dağılımının hafif ölçüde pozitif yönde çarpık olduğu, aykırı olmayan en büyük değerler bakımından aykırı olmayan en küçük değere göre homojen bir yapı göstermediği, büyük ve küçük bölgelerde uç ve aykırı değerler içermediği görülmektedir.

Bu bakımdan 3 günlük ölçüm sonucu elde edilen boyca değişim verilerinin normale yakın bir dağılım gösterdiği ve deneysel verilerin güvenilir olduğu söylenebilir.

14 günlük boyca değişim verilerinin dağılımlarının normal olduğu, aykırı ve uç değerler içermediği görülmüştür. Bu bakımdan 14 günlük boyca değişim verilerinin güvenilir olduğu görülmüştür (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Harç çubuklarının 3, 7, 14 ve 28 günlük boy değişimlerine ilişkin kutu grafiği

Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonucunda elde edilen verilerin ASTM C-1260 standardında öngörülen genleşme sınırlarını aşmaması ve boyca uzama verilerinin normal dağılım göstermesi örneklenen alanın kırmataşların alkali-silika reaksiyonu bakımından zararsız olduğunu açıklama imkanı vermiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ermenek Havzası Çetinkalesi Tepe civarından alınan kaya örneklerine ait kırmataşlar üzerinde alkali-silika reaksiyonunu belirlemek amacı ile kimyasal analiz ve hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri yapılmıştır. Veriler üzerinde istatistiki analizler yapılarak bulgular standart değerlerle karşılaştırılmıştır.

- Petrografik incelemeler sonucunda, kaya örneği tane boyunun 0.14-0.68 mm arasında değişen kısmen yuvarlaklaşmış taneler halinde kuvars, daha az miktarda çört, feldispat ve eser miktarda mika ve kloritten ibaret olduğu görülmüştür. Kripto ve mikrokristalin kalsit ile bağlanmıştır. Kayacın 'Kalsit Çimentolu Kumtaşı' olduğu,

- Kimyasal analiz sonuçlarına göre; alkali azalmasının 50 mmol/lit, çözünen silika içeriğinin 6,0 mmol/lit olduğu, kalsiyum karbonat (CaCO_3) miktarının % 99,56 olduğu görülmektedir. Kırmataş örneğinin ASTM C-289 "Test Method for Potential Reactivity of Aggregates (Chemical Method) standardına göre alkali silika reaksiyonu bakımından "Zararsız Agregalar" sınıfında olduğu,

- Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçlarına göre, 3 günlük örneklerin % 0.002, 7 günlük örneklerin %0.002, 14 günlük örneklerin %0.001 ve 28 günlük örneklerin %0.002 oranında boy değişimine uğradığı, ASTM C-1260 "Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)" (Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi) sonucunda; 14 ve 28 günlük boy değişim değerlerinin, alkali- silika reaktivitesinden kaynaklanan genleşmelerin %0,1'lik ve %0.2'lik genleşme sınırının altında kaldığı için kırmataşların alkali-silika reaktivitesi açısından zararsız olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, kırmataş örneklerinin temsil ettiği bölge kayaçlarından elde edilecek kırmataşların alkali-silika reaksiyonu açısından zararsız olduğu anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Arslan, M., "Betonarme Yapı Elemanı Tasarımında Dayanıklılık Faktörlerinin Belirlenmesine Yönelik bir Araştırma", Ankara, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 9 (4): 615-630 (1996).
2. Tosun, K., Yazıcı, H., Baradan, B., "Uçucu Kül ve Silika Tozunun Alkali - Silika Reaksiyonuna Etkisinin İncelenmesi", Ankara, **Türkiye İnşaat Mühendisliği, XVI. Teknik Kongre Bildirileri**, 188-203 (2001).
3. Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S., Abu-Tair, A., " The Effect of Alkali Reactivity on the Mechanical Properties of Concrete", **Construction and Building Materials**, 17: 123-144 (2003).
4. "Swelling Properties of Synthetic Alkali-Silica Gel", **Journal of the American Ceramic Society - Struble and Diamond**, 64 (11): 5 (1996).
5. Ramachandran, V.S., " Concrete Admixture Handbook ", **Science and Technology, Second Edition**, USA, (1995).
6. Bektaş, F., "Preventive Measures Against Alkali-Silica Reaction", MSc Thesis, **Middle East Technical University**, Ankara, 1-87 (2002).
7. Kosmatha, S.H., Panarese, W.C., "Design and Control of Concrete Mixture", **Portland Cement Association**, USA, 40-75 (1998).
8. Farny, J. A., Kosmatka, S. H., "Betonda Alkali Agregat Reaksiyonunun Teşhis ve Kontrolü", Çeviren: Kalmış, M., Güngör, N., Eribol, S., **American Concrete Pavement Association (ACPA)**, 1-26 (1998).
9. Johansen, V., Thaulow, N., Skalny, J., " Internal Reactions Causing Cracking of Concrete", **Concrete Precasting Plant and Technology**, Issue 11, 56-58 (1995).
10. Neville, A. M., "Properties of Concrete", **Longman Scientific & Technical**, England, 155-166 (1981).
11. Diamond, S., Barneyback, R. S. Jr., Stuble, L.J., "On the Physics and Chemistry of Alkali-Silica Reactions", Proceedings of the Fifth Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Pretoria, South Africa, **National Building Research Institute**, 1-11 (1981).
12. Binal, A., "Beton Agregalarında, Alkali Silika Reaksiyonu Etkisinin Belirlenmesi İçin Harç Prizması Deneyi Tasarımı ve Uygulaması", Doktora Tezi, **H. Ü. Jeoloji Mühendisliği**, Beytepe-ANKARA, 1-216 (2002).

13. Prezzi, M., Kurtis, K.E., Monteiro, P.J.M., Mehta, P.k., " The Surface Chemistry of Alkali-Silica Reaction" , **Mario Collepardi Symp. On Advance in Concrete Technology**, Rome, 239-270 (1997)
14. Wen, H.X., "Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Lecture Notes", Hong Kong, **Civil Engng. Dept., Hong Kong Univ.**, 1-55 (1998).
15. Ramyar, K., Dönmez, H., Andiç, Ö., "Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması", Ankara, **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Çimento ve Beton Araştırma – Geliştirme Enstitüsü**, (ÜNİPR 00/23): 3-15 (2002).
16. Akman, M.S., "Çimentolar İçindeki Çözünen Alkalilerin Miktar ve Türlerinin Beton ve Harç Özelliklerine Etkileri", **Çimento ve Beton Dünyası**, 7 (40): 35-51 (2002).
17. Woods, H., "Durability of Concrete Construction", Detroit Michigan, **American Concrete Institute**, 11 (4): 28-44 (1968).
18. Arslan, M., " BETON (Dökümü, Kalıpları, Kusurları, Dayanıklılığı)", İstanbul, **Atlas Yayınevi**, 167-216 (2001).
19. Tordoff, M.A., "Assesment of Prestressed Concrete Bridges Suffering from Alkali-Silika Reaction", **Cement and Concrete Composites**, 12 (3): 203-210 (1990).
20. SHRP., "Alkali Silica Reactivity Library Handbook for Identification of ASR", <http://leadstates.tamu.edu/asr/> (11/10/2004).
21. Hawkins, M.R., "Alkali-Aggregate Reaction: Minimizing the Risk of Alkali-Silica Reaction, Guidance Notes, Report of a Working Party", Wexham Springs, Slough, UK, **Cement and Concrete Association**, 97-304 (1983).
22. Wakizaka, Y., "Alkali-Silica Reactivity of Japanese Rocks", **Engineering Geology**, 56: 211-221 (2000).
23. Ineson, P.R., "Siliceous Components in Aggregates", **Cement and Concrete Composites**, 12 (3): 185-190 (1990).
24. Swamy, R.N., "Alkali-Aggregate Reaction in Concrete; Material and Structural Implications", Ottawa Canada, **Sciences in Concrete Technology, Energy, Mines and Resources**, 533-581 (1992).
25. Yalçın, H., Özalp, R., "Betonlarda Alkali-Agrega Reaksiyonu ve Türkiye Çimentolarının Alkalinite Değerleri", Ankara, **Devlet Su İşleri Yayınları**, (Kİ-551): 1-46 (1974).

26. Vivian, H. E., "Studies in Cement- Aggregate Reaction, XIX: The Effect on Mortar Expansion of the Particle Size of the Reactive Component in the Aggregate", ***Australian Journal of Applied Science***, 2 (2): 488-494 (1951).
27. Zhang, C., Wang, A., Tang, M., Wu, B., Zhang, N., "Influence of Aggregate Size Grading on ASR Expansion", ***Cement and Concrete Research***, 11 (29): 1393-1396 (1999).
28. Diamod, S., Thaulow, N., "A Study of Expansion Due to Alkali Silica Reaction as Conditioned by the Grain Size of the Reactive Aggregate", ***Cement and Concrete Research***, 4 (12): 591-607 (1974).
29. Hobbs, D.W., Gutteridge, W.A., "Particle Size of Aggregate and Its Influence upon the Expansion Caused by the Alkali-Silica Reaction", ***Magazine of Concrete Research***, 31 (109): 236-242 (1979).
30. Hewlett, P.C., "Lea's Chemistry of Cement and Concrete 4th ed.", London, ***John Wiley and Sons Inc.***, 38-66 (1998).
31. Hobbs, D.W., "Alkali Silica Reaction in Concrete", London, ***Thomas Telford Ltd.***, 50-78 (1998).
32. Vivian, H. E., "Studies in Cement Aggregate Reaction the Effect on Mortar Expansion of Amount of Reactive Component 2nd ed.", ***Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Bull.***, (256): 68-93 (1950).
33. Mindess, S., Young, J.F., "Concrete", New Jersey, ***Prentice-Hall, Inc.***, 96-111 (1981).
34. Stark, D, "Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity, SHRP-C-343", Washington, D.C., ***Strategic Highway Research Program***, 2 (178): 22-45 (1993).
35. ACI 221.1R, "Guide for Use of Normal Normal Weight and Heavy Weight Aggregates in Concrete", ***America Concrete Institute ACI Manual Concrete Practice***, 1-46 (2000).
36. Poole, A.B., "Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete", In The Alkali-Silica Reaction in Concrete, Edited by Swamy, R.N., New York, ***Van Nostrand Reinhold***, 1-66 (1992).
37. Danay, A., "Structural Mechanics Methodology in Diagnosing and Assessing Long-Term Effects of Alkali-Aggregate Reactivity in Reinforced Concrete Structures", Detroit, ***ACI Materials Journal, American Concrete Institute***, 54-62 (1994).

38. "Second International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams", Denver, Colorado, **U.S. Committee on Large Dams**, 8 (1995).
39. Natesaiyer, K., Hover, K., "Cornell's Gel Fluorescence Test Identifies ASR Products in Concrete", Concrete Technology Today, Skokie, Illinois **Portland Cement Association**, (922): 22-45 (1992).
40. Figg, J., "ASR-Inside Phenomena and Outside Effects (Crack Origin and Pattern)", In Concrete Alkali Aggregate Reactions, edited by Bellew, G., Patrick, E., Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, **Proceedings of the 7th International Conference**, 152-156 (1987).
41. Helmuth, R., "Alkali-Silica Reactivity: An Overview of Research", SHRP-C-342", Washington, D.C., **Strategic Highway Research Program**, (177): 66-78 (1993).
42. Stark, D., "Handbook for the Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures, SHRP-C/FR-91-101", Washington, D.C., **Strategic Highway Research Program**, (165) 10-33 (1991).
43. Liu, T.C., "Causes of Deterioration", Lesson 201, Maintenance and Repair of Concrete Structures, Vicksburg, Miss., **U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station**, 66 (1981).
44. Mo, X., "Laboratory Study of LiOH in Inhibiting Alkali-Silica Reaction At 20 C : a Contribution", **Cement and Concrete Research**, Article in Press, (2004).
45. Mitchell, L.D., Beaudoin, J.J., Grattan-Bellew, P., "The Effects of Lithium Hydroxide Solution on Alkali-Silica Reaction Gels Created With Opal", **Cement and Concrete Research**, 34: 641-649, (2004).
46. Smaoui, N., Bérubé, M.A., Fournier, B., Bissonnette, B., Durand, B., "Effects of Alkali Addition on Mechanical Properties and Durability of Concrete", **Cement and Concrete Research**, Article in Press, (2004).
47. Yi, C.K., Ostertag, C.P., "Mechanical Approach in Mitigating Alkali-Silica Reaction", **Cement and Concrete Research**, Article in Press, (2004).
48. Şenöz, B., Yalçın, S., "Çimento Fırınlarında Alkali- Klörür Sirkülasyonunun Kemer Oluşumu Üzerine Etkileri", **Çimento ve Beton Dünyası**, Yıl:6, Sayı:35, Ocak-Şubat (2002).

49. Thomas, M.D.A., "Use of Ternary Cementitious Systems Containing Silica Fume and Fly Ash Concrete", ***Cement and Concrete Research***, 29: 1207-1214 (1999).
50. Hou, X., Struble, L.J., Kirkpatrick, R.J., "Formation of ASR Gels and the Roles of C-S-H and Portlandite ", ***Cement and Concrete Research***, 34: 1683-1696 (2004).
51. Gruber, K.A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R.D., Thomas, R.D.A., "Increasing Concrete Durability with High-Reactivity Metakaolin " ***Cement and Concrete Composites***, 23: 479-484 (2001).
52. Rivard, P., Ballivy, G., "Assessment of the Expansion Related to Alkali-Silica Reaction by the Damage Rating Index Method ", ***Construction and Building Materials***, 19: 83-90 (2005).
53. Del Amo, D.G., Pérez, B.C., "Diagnosis of the Alkali-Silica Reactivity Potential by means of Digital Image Analysis of Aggregate Thin Section ", ***Cement and Concrete Research***, 31: 1449-1454 (2001).
54. Fernandes, I., Noronha, F., Teles, M., "Microscopic Analysis of Alkali-Aggregate Reaction Products in a 50-Years-Old Concrete ", ***Article in Press***, (2004).
55. Bulteel, D., Garcia-Diaz, E., Vernet, C., Zanni, H., "Alkali-Silica Reaction A Method to Quantify the Reaction Degree ", ***Cement and Concrete Research***, 32: 1199-1206 (2002).
56. "Ermenek Barajı ve Hidroelektrik Santrali Proje Raporu ", Ankara, ***Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Electrowatt Engineering Ltd.Şti, Dolsar Mühendislik Ltd.Şti***, 6-11(1999).
57. TS 707 "Beton Agregalarından Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi", Ankara, ***Türk Standartları Enstitüsü***, 1-9 (1980).
58. ASTM C-227-97, "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)", Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Philadelphia, PA, USA, ***American Society for Testing and Materials***, 4 (2): 126-130 (1994).
59. ASTM C-1260-94, "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)", Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Philadelphia, PA, USA, ***American Society for Testing and Materials***, 4 (2): 650-653 (1994).

60. ASTM C-305 "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency", Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Philadelphia, PA, USA, **American Society for Testing and Materials**, 4 (2): 201-203 (1994).
61. ASTM C-289-94 "Standard Test Method for Potential Reactivity of Aggregates (Chemical Method)", Annual Book of ASTM Standards, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Philadelphia, PA, USA, **American Society for Testing and Materials**, 4 (2): 157-163 (1994).
62. TS 2517 "Alkali Agrega Reaktivitesinin Kimyasal Yolla Tayini", Ankara, **Türk Standartları Enstitüsü**, 1-8 (1977).
63. TS 2871 "Taze Betonda Kıvam Deneyi", Ankara, **Türk Standartları Enstitüsü**, (1977).
64. TS 2871 "Taze Betonda Birim Ağırlık Verim ve Miktarın Ağırlık Yöntemi", Ankara, **Türk Standartları Enstitüsü**, (1978).

ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Ankara'da doğdu. İlkokulu Çankaya İlkokulu ve ortaokulu Çankaya Ortaokulunda yılında tamamladı. 1992 yılında Çankaya Lisesi'ni bitirdi. 1997 yılında Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Hidrojeoloji Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2002 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek lisans eğitimine başladı.

