

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**HARŞİT ÇAYI VADİSİ AGREGALARININ ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU  
BAKIMINDAN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sevda KARAKAŞ**

**HAZİRAN 2013**

**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**HARŞİT ÇAYI VADİSİ AGREGALARININ ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU  
BAKIMINDAN İNCELENMESİ**

**İnş. Müh. Sevda KARAKAŞ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24.05.2013  
Tezin Savunma Tarihi : 20.06.2013**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ**

**Trabzon 2013**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında**  
**Sevda KARAKAŞ tarafından hazırlanan**

**HARŞİT ÇAYI VADİSİ AGREGALARININ ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU**  
**BAKIMINDAN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 04/06/2013 gün ve 1508 sayılı**  
**kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**YÜKSEK LİSANS**  
**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Doç. Dr. Selim PUL** .....

**Üye : Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ** .....

**Üye : Yrd. Doç. Dr. Hasan KOLAYLI** .....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ'ye, laboratuvar olanaklarından yararlandığım Kaya Mühendislik'e, tez çalışmaları için gerekli numuneleri alırken yardımlarını esirgemeyen kardeşim Harita Mühendisi Metin ŞAHİN'e ve tez çalışmalarım sırasında maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen sevgili eşim Murat KARAKAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Sevda KARAKAŞ  
Trabzon, 2013

## **TEZ BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Harşit Çayı Vadisi Agregalarının Alkali Silika Reaksiyonu Bakımından İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ'nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 24/05/2013

Sevda KARAKAŞ

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam .....	3
1.3. Literatür Taraması.....	3
1.4. Alkali-Silis Reaksiyonuna Yol Açan Beton Bileşenleri .....	7
1.4.1. Agrega Tanım ve Özellikleri.....	7
1.4.1.1. Agregaların Sınıflandırılması.....	8
1.4.1.2. İdeal Agrega Standartları .....	8
1.4.1.3. Agrega Özelliklerinin Alkali-Silis Reaksiyonu ile İlişkisi .....	15
1.4.1.4. Alkali-Silis Reaksiyonu Açısından Kayaçların Reaktivitedeki Azalmaya Göre Sıralanması.....	15
1.4.2. Çimento Tanım ve Özellikleri.....	16
1.4.2.1. Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler .....	17
1.4.2.2. Çimento Katkı Maddeleri.....	20
1.4.2.3. Çimento Özelliklerinin Alkali-Silis Reaksiyonu ile İlişkisi .....	21
1.5. Alkali- Silis Reaksiyonu .....	24
1.5.1. ASR Kimyası .....	24
1.5.1.1. ASR Oluşum Mekanizması.....	25
1.5.2. Pesimum Oran.....	28
1.5.3. ASR Ürünleri .....	30
1.5.4. ASR Ürünlerinin Genleşme Mekanizması.....	33
1.5.5. ASR’nu Etkileyen Faktörler.....	34

1.5.5.1.	Agregadaki Reaktif Silis ve Agregada Özellikleri.....	35
1.5.5.2.	Betonun Alkali İçeriği.....	36
1.5.5.3.	Yeterli Nem.....	38
1.5.5.4.	Ortam Sıcaklığı .....	39
1.5.5.5.	Sürüklenmiş Havanın Etkisi.....	40
1.5.5.6.	Mineral Katkıların ASR'na Etkisi.....	41
1.5.5.6.1.	Uçucu Külün ASR'na Etkisi .....	41
1.5.5.6.2.	Silis Dumanının ASR'na Etkisi .....	42
1.5.5.6.3.	Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) ASR'na Etkisi.....	43
1.5.5.6.4.	Doğal Puzolanların ASR'na Etkisi .....	44
1.5.5.7.	Kimyasal Katkıların ASR'na Etkisi .....	45
1.5.6.	Alkali-Agrega Reaksiyonunun Belirtileri .....	46
1.5.6.1.	Genleşme ve Çatlama.....	47
1.5.6.2.	Yüzey Birikintileri .....	51
1.5.7.	ASR Hasarlarının Teşhisi.....	51
1.6.	Alkali-Silika Reaksiyonunu Belirleme Yöntemleri .....	52
1.6.1.	ASR Reaksiyonunda Kullanılan Deney Yöntemleri.....	52
1.6.1.1.	Harç Çubuk Deneyi (ASTM C 227) .....	52
1.6.1.2.	Hızlı Harç Çubuk Deneyi (ASTM C 1260) .....	57
1.6.1.3.	Beton Prizma Deneyi (ASTM C 1293).....	59
1.6.1.4.	Kimyasal Yöntem (ASTM C 289, TS 2517/ Kasım 2010).....	60
1.6.1.5.	Mikrobar Deneyi .....	62
1.6.1.6.	Agregaların Petrografik Analizi (ASTM C 295) .....	64
1.6.1.7.	Mineral Katkıların veya Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliklerini Ölçen Standart Deney Metodu (ASTM C 441) .....	64
1.6.1.8.	Jel Pat Metodu.....	65
1.6.1.9.	Alman Çözünme Metodu .....	66
1.6.1.10.	Ozmotik Hücre Metodu .....	66
1.6.1.11.	Otoklav Metodu .....	66
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME.....	68
2.1.	Amaç ve Kapsam .....	68
2.2.	Harşit Çayı Genel Jeolojisi .....	68
2.3.	Kullanılan Malzemelerin Özellikleri .....	71

2.3.1.	Çimentonun Özelliği .....	71
2.3.2.	Agregaların Özellikleri .....	72
2.3.2.1.	Fiziksel Özellikler .....	72
2.3.2.2.	Agregaların Petrografik Analizi.....	72
2.4.	Alkali Silika Reaksiyonu Tespiti İçin Yapılan Deneyler .....	83
2.4.1.	Hızlandırılmış Harç Çubuk Yöntemi .....	83
2.4.1.1.	Kullanılan Cihazlar ve Malzemeler .....	83
2.4.1.2.	Numunelerin Üretimi .....	84
2.4.2.	Kimyasal Yöntemle Agregaların Potansiyel Alkali Silis Reaktifliğinin Tayini .....	88
2.4.2.1.	Kullanılan Cihaz ve Malzemeler.....	88
2.4.2.2.	Deney Numunesinin Hazırlanması .....	89
2.4.2.3.	Deneyin Yapılışı .....	90
2.5.	Deney Sonuçları ve İrdeleme .....	93
2.5.1.	Petrografik Analiz .....	93
2.5.2.	Hızlı Harç Çubuk Deneyi.....	94
2.5.3.	Kimyasal Yöntem .....	99
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	102
4.	KAYNAKLAR .....	103
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

HARŞİT ÇAYI VADİSİ AGREGALARININ ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU  
BAKIMINDAN İNCELENMESİ

Sevda KARAKAŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ  
2013, 109 Sayfa

Bu çalışmanın amacı Harşit Çayı Vadisi agregalarının alkali-silika reaktivite potansiyellerini belirlemektir. Tezin ilk bölümünde çalışmanın amacı ve kapsamı açıklanmış, genel olarak alkali-agrega reaksiyonu anlatılmış, mineral ve kimyasal katkıların bu reaksiyon üzerindeki etkisi tanımlanmış ve reaksiyonun tespitinde kullanılan deney yöntemlerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde deneysel çalışma verilmiştir. Örnekler, harşit çayı vadisinde bulunan agrega ocaklarından sağlanmıştır. Agregaların petrografik analizleri yapılmış, ASTM 1260 Hızlı Harç Çubuk Deneyi ve TS 2517 Kimyasal Yöntem ile alkali silika reaktivlikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak Harşit Çayı vadisi agregalarının alkali-silika reaksiyonu potansiyellerinin olduğu söylenebilir. Fakat kesin bir yargıya varmak için beton prizma testi uygulamak ve gerekiyorsa mineral katkı maddeleri kullanarak reaksiyonu kontrol altına almak konusunda araştırmalar yapmak önerilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Agregası, Alkali-Silika Reaksiyonu, Petrografik Analiz, ASTM C289 Kimyasal Method, ASTM C1260 Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyi.

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF THE ALKALI SILICA REACTIVITY OF THE AGGREGATES  
OBTAINED FROM HARSIT RIVER VALLEY

Sevda KARAKAŞ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Şirin KURBETÇİ  
2013, 109 Pages

The aim of this study was to determine of the potential alkali-silica reactivity of the aggregates obtained from Harşit River valley. In the first chapter of the thesis, alkali-silica reaction is detailed, the effects of mineral and chemical admixtures on the alkali-silica reaction is described and the experimental methods used in the determination of the reaction are discussed. The second chapter, experimental work is given. Samples were obtained from the aggregate quarries located in Harşit river valley. The reactivity of aggregate are examined according to TS 2517 chemical method, ASTM C 1260 accelerated mortar bar method and petrographic analysis. As a result, the aggregate obtained from Harşit River may considered to be potentially alkali silica reactive. To be more conclusive, it could be suggested to make concrete prisms tests and perform experimental work using mineral additives to control the ASR, if needed.

**Key Words:** Aggregate, Alkali-Silica reaction, petrografic analysis, ASTM C289 Chemical Method and ASTM C1260 accelerated mortar bar.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Matris icinde ASR kaynaklı agreganın SEM mikrografı .....	2
Şekil 2. İzmir yöresi agregalarının 14-günlük hızlandırılmış harç çubuğu genleşmeleri .....	5
Şekil 3. İzmir yöresi hasarlı köprülerden alınan karot örneklerinin 28-günlük genleşmeleri .....	5
Şekil 4. İdeal kumun granülometrik dağılımı.....	12
Şekil 5. I nolu mıcır için granülometri eğrisi .....	13
Şekil 6. II nolu mıcır için granülometri eğrisi.....	14
Şekil 7. III nolu mıcır için granülometri eğrisi.....	14
Şekil 8. Çimentodaki alkali miktarının alkali silika genleşmesine etkisi.....	22
Şekil 9. Çimento dozajı ve çimentonun sodyum oksit (Na <sub>2</sub> O) eşdeğeri %'sine bağlı olarak 1 m <sup>3</sup> betondaki alkali miktarı verilmektedir.....	23
Şekil 10. Agreganın yüzeyi ile temas halinde olan boşluk çözeltisi ve çimento hidrasyon ürünleri .....	26
Şekil 11. Silis dörtyüzlüsü (tetrahedri).....	26
Şekil 12. Pesimum davranış .....	29
Şekil 13. Reaktif opal agregası için pesimum oran .....	30
Şekil 14. Bastogne kumtaşı için pesimum oran .....	30
Şekil 15. Çimentonun alkali içeriğinin genleşmeye olan etkisi .....	38
Şekil 16. (A) Sıcaklık - toplam genleşme ilişkisi, (B) Sıcaklık - reaksiyon oranı ilişkisi .....	40
Şekil 17. ASR'den kaynaklanan çatlaklara ilişkin örnek görüntüleri.....	47
Şekil 18. Mott MacDonald test sahasında bir karayolu köprüsünün kolonu, Devon.....	48
Şekil 19. İzmir Adnan Menderes Havalimanı değiştirilen pist ve taksit yolu betonu.....	48
Şekil 20. Zemin üzerinde yanal basınca maruz kalmayan beton kaplamalarda ASR çatlakları için model.....	49
Şekil 21. ASR kaynaklı hasarın şematik gösterimi .....	51
Şekil 22. Üçlü harç çubuğu kalıbı .....	54
Şekil 23. Harç çubuklarının uçlarına yerleştirilen pim .....	55
Şekil 24. Harç çubukları.....	55
Şekil 25. Dijital komparatör ile örneklerin boy ölçümü.....	56

Şekil 26. Termostat'lı kür tankı.....	57
Şekil 27. %100 bağıl nemi sağlayacak şekilde tasarlanmış kap .....	59
Şekil 28. Alkalinitedeki azalma-çözünmüş silis grafiği.....	62
Şekil 29. Çalışma sahası ve jeolojik haritası .....	70
Şekil 30. Tamamen kalsitten oluşan karbonat kaya parçası, + nikol. ....	73
Şekil 31. a) Mikrolitce zengin matriksten oluşan volkanik kaya kırıntısı, + nikol. b) cam matriksce zengin volknaik kaya kırıntısı, // nikol .....	74
Şekil 32. Volkanik kayaların alterasyonu sonucu oluşan ikincil epidot mineralleri, + ve // nikol. ....	74
Şekil 33. Volkanik kaya kırıntıları içerisindeki büyük oranda killeşme sunan plajiyoklas kristalleri, + nikol. ....	74
Şekil 34. Örnekte gözlenen volkanik kaya kırıntıları ve bunlar içerisinde saptanan kuvars taneleri. ....	75
Şekil 35. Tamamen kalsitten oluşan karbonat kaya parçası, + nikol. ....	76
Şekil 36. Örnekte gözlenen mikrolitce zengin ve cam matriksce zengin volkanik kaya parçaları, + nikol .....	76
Şekil 37. Magmatik kaya parçası içerisinde gözlenen biyotit kristali, + nikol. ....	77
Şekil 38. Magmatik kaya parçası içerisinde gözlenen klorit, plajiyoklas, kuvars ve ortoklas kristalleri, + ve // nikol. ....	77
Şekil 39. Granitoyitik magmatik kaya parçası ve diyabaz türü bazik magmatik kaya kırıntısı içerisinde gözlenen amfibol (hornblend) kristalleri, + ve // nikol. ....	77
Şekil 40. Magmatik kaya parçaları içerisinde gözlenen kuvars kristalleri, + nikol. ....	78
Şekil 41. Tamamen kalsitten oluşan karbonat kaya parçası, + nikol. ....	79
Şekil 42. Kloritleşme sunan camsı matriksce zengin volkanik kaya parçaları, + ve // nikol. ....	79
Şekil 43. Volkanik kaya parçalarında gözlenen plajiyoklas kristaller ve kloritler, + ve // nikol. ....	79
Şekil 44. Volkanik kaya parçalarında gözlenen kuvars kristaller, + ve // nikol. ....	80
Şekil 45. Tamamen kalsitten oluşan karbonat kaya parçaları, soldaki örnekte fosil kavkuları seçilebilmektedir, // ve + nikol. ....	81
Şekil 46. Örnekte gözlenen volkanik kaya kırıntıları, + nikol. ....	81
Şekil 47. Volkanik kayalarda yuvarlak kristaller şeklinde gözlenen zeolitler, + nikol. ....	81
Şekil 48. Örnekte gözlenen metamorfik kaya kırıntısı, muskovitler pembe, uzun çubuksu mineraller şeklinde gözlenmektedir, + nikol. ....	82
Şekil 49. a) ve b) volkanik kaya kırıntıları içerisinde gözlenen kuvars kristalleri, c) magmatik kaya kırıntısı içerisinde gözlenen kuvars kristalleri, + nikol. ....	82
Şekil 50. Karıştırma kabına malzemelerin eklenmesi .....	84

Şekil 51. Hazırlanan harcın kalıba yerleştirilmesi .....	85
Şekil 52. Harcın şişlenerek sıkıştırılması (birinci katman) .....	85
Şekil 53. Harcın şişlenerek sıkıştırılması (ikinci katman).....	85
Şekil 54. Harç çubuklarının son hali .....	86
Şekil 55. Kullanılan kür tankı .....	86
Şekil 56. Harç çubuklarının boy değişimlerinin ölçümünün yapılması .....	87
Şekil 57. Süzgeç kağıdı yardımıyla çözeltinin süzülmesi .....	89
Şekil 58. Çözeltinin buharlaştırılması .....	90
Şekil 59. Kroze muhteviyatının kurutulması.....	91
Şekil 60. Desikatör yardımıyla soğutma işlemi .....	92
Şekil 61. Değişmez kütleye ulaşan numuneler.....	92
Şekil 62. A1 örneğine ait genişleme-zaman ilişkisi .....	95
Şekil 63. A2 örneğine ait genişleme-zaman ilişkisi .....	96
Şekil 64. A3 örneğine ait genişleme-zaman ilişkisi .....	96
Şekil 65. A4 örneğine ait genişleme-zaman ilişkisi .....	97
Şekil 66. A5 örneğine ait genişleme-zaman ilişkisi .....	97
Şekil 67. Örneklerin 14 günlük genişleme-zaman ilişkisi.....	98
Şekil 68. Alkalinite azalması deneyine bağlı olarak elde edilen zararsız ve zararlı agrega sınırlarını gösteren grafik .....	100

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Beton kumları ve iri agrega standartları .....	11
Tablo 2. TS elek sistemine göre beton kumu granülometrisi .....	12
Tablo 3. TS elek sistemine göre iri agrega granülometrisi .....	13
Tablo 4. Çimento Ana Hammaddelerinin CaCO <sub>3</sub> Oranına Göre Sınıflandırılması.....	18
Tablo 5. Alkali silis jeli kimyasal analiz sonuçları (kütlece %) .....	32
Tablo 6. Yüksek fırın cürufu alkali ve efektif alkali içerikleri .....	44
Tablo 7. Bazı kimyasal katkıların ASR üzerindeki etkileri .....	46
Tablo 8. Harç çubuğu ve hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri için agrega karışım oranları.....	53
Tablo 9. Harç çubukları malzeme karışım miktarları .....	54
Tablo 10. Çimento analiz sonuçları .....	71
Tablo 11. Agrega temin edilen lokasyonlar .....	72
Tablo 12. Agregaların fiziksel özellikleri .....	72
Tablo 13. ASTM C1260'a göre granülometrik dağılım (%100 orijinal malzeme 3'lü kap için).....	84
Tablo 14. A1 örneğinin hızlı harç çubuk deneyi sonuçları.....	94
Tablo 15. A2 örneğinin hızlı harç çubuk deneyi sonuçları.....	94
Tablo 16. A3 örneğinin hızlı harç çubuk deneyi sonuçları.....	94
Tablo 17. A4 örneğinin hızlı harç çubuk deneyi sonuçları.....	95
Tablo 18. A5 örneğinin hızlı harç çubuk deneyi sonuçları.....	95
Tablo 19. Deney sonuçları.....	99

## KISALTMALAR LİSTESİ

AAR	: Alkali-Agrega Reaksiyonu
ACR	: Alkali Karbonat Reaksiyonu
ASR	: Alkali-Silis Reaksiyonu
ASTM	: Amerikan standart
BS	: Beton standartı
eşd	: Eşdeğer
PÇ	: Portland çimentosu
Ph	: Sertlik derecesi
Rc	: Alkali azalması
RILEM	: Uluslararası Malzeme ve Yapı Laboratuvarları Birliği
Sc	: Çözünmüş silis
TC	: Türkiye Cumhuriyeti
TS	: Türk Standartları
UK	: Uçucu Kül
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

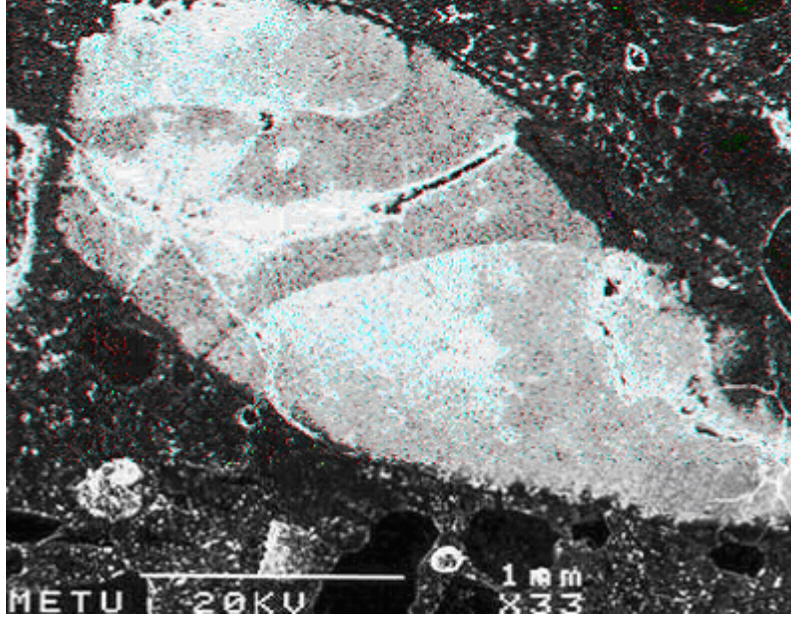
Beton, inşaat endüstrisinde en fazla kullanılan malzemedir. Sudan sonra yeryüzünde en fazla tüketilen beton sürekli sağlamlık, güvenlik, ekonomi ve çevre açısından büyük önem taşır. Büyük hacimli beton yapıların kullanım ömrünü öngörülenden önce tamamlaması, yüksek onarım, takviye ya da yeniden inşa maliyetleri gerektirebilir. Sürekli sağlam beton tasarımlarında önemli kaygı unsurlarından birisi, alkali silika reaksiyonu olmuştur.

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

Alkali-agrega reaksiyonu, betondaki agreganın çeşitli bileşenlerinin çimento alkalileri ile reaksiyonu olarak tanımlanabilir. Bu reaksiyon sonucunda su emerek genişleyen ve betonda hasarlara yol açabilecek düzeyde çekme gerilmeleri meydana getirebilen ürünler oluşmaktadır. Günümüzde üç çeşit alkali-agrega reaksiyonu bilinmektedir. Alkali-silika reaksiyonu (ASR), alkali-karbonat reaksiyonu (ACR) ve alkali-silikat reaksiyonu ASR, beton agregalarında bulunan reaktif silis ile betonun boşluklarında eriyik halde bulunan hidroksil iyonlarının reaksiyonudur. Bu reaksiyon, betonda nem etkisiyle genişleyen bir jelin oluşmasına neden olur. Reaksiyonlar sonunda oluşan su emme özelliği olan jel, şişerek genişlemektedir. Reaksiyonun bu özelliği nedeniyle beton bünyesinde 0,1-11 MPa'a varan çekme gerilmeleri yarattığı belirlenmiştir (Struble, 1981). Beton içerisinde şişme



sebebiyle meydana gelen bu hacim artışı çekme gerilmelerinin doğmasına sebep olarak betonda çatlamlara yol açar. Betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının %7'si ile %11'i arasında olduğundan, % (0,04-0,05) gibi genişleme birim deformasyonu betonu çatlatmaya yeterli olacaktır (Swamy, 1994). Haritamsı çatlaklar reaktif agregayı çevreleyen matriste başlayıp agregadan harç matrisine doğru yayılır (Şekil 1).



Şekil 1. Matris içinde ASR kaynaklı agregada çatlakın SEM mikrofotografı (Bektas vd., 2005).

Agreganın veya belirli agregada-çimento kombinasyonlarının zararlı alkali silis reaksiyonu gösterip göstermeyeceğinin tespiti için deneyler yapmak gerekmektedir. Alkali silis reaktivitesi hakkında günümüzde hala uluslararası kabul görmüş standart deney yöntemi bulunmamaktadır. Değişik ülkeler, kendilerine uygun deney yöntemlerini uygulamaktadırlar.

Şantiye performansı, agregaların reaktivitesi hakkında belirleyici bir gösterge olmasına rağmen aşağıdaki sebeplerden dolayı kesin bir fikir veremeyebilir:

1. Üzerinde çalışılan agregalarla inşa edilmiş limitli sayıda, istenilen yaşta ve belirli şiddete maruz kalmış yapının bulunması veya yapılarda kullanılan agregalar hakkında yeterli bilginin bulunmaması,
2. ASR'nu etkileyen çimento miktarı, çimentonun alkalinitesi ve kür koşulları gibi diğer faktörler hakkında yeterli bilginin olmayışı,

3. Nem, donma-çözünme, ıslanma-kuruma, deniz suyu ve buz çözücü tuzlar gibi dış etkilerin bir yapıdan diğerine farklılık göstermesi,
4. Aradan geçen zaman süresince kullanılan agregaların kazı seviyesi ve lokasyonu gibi jeolojik faktörlerdeki; patlama, kırma, yıkama, eleme, gibi teknik faktörlerdeki değişimlerin meydana gelmesi.

Bu sebeplerden dolayı, agregaların ASR yönünden değerlendirilmesinin tüm agregaların benzer koşullara maruz kaldığı laboratuvar deneyleriyle mümkün olabileceği belirlenmiştir.(Berube ve Fournier, 1992).

Özellikle günümüzde kullanım alanları oldukça artan mineral ve kimyasal katkıların ASR üzerindeki artırıcı ve azaltıcı etkisinin de laboratuvar deneyleri ile araştırılması önem taşımaktadır.

## **1.2. Amaç ve Kapsam**

Çalışma kapsamında, öncelikle Harşit Çayı Vadisinden alınan agregaların petnografik analizleri yapıldı daha sonra örnekler üzerinde hızlı harç çubuk deneyi ve kimyasal yöntemle ASR bakımından reaktivite değerleri belirlendi.

## **1.3. Literatür Taraması**

1974 yılında alkali-agrega reaktivitesi konusunda faaliyet gösteren araştırmacıların katıldığı uluslararası toplantılardan ilki Danimarka'da yapılmıştır. Ardından pek çok araştırmacının yayınlarının derlendiği konferanslar sırasıyla İzlanda (1975), İngiltere (1976), Amerika (1978), Güney Afrika (1981), Danimarka (1983), Kanada (1986), Japonya (1989), Londra (1992), Avustralya (1996), Kanada (2000) ve Çin'de (2004) düzenlenmiştir.

A. Fernandez, F. Puertas, reaktif agrega kullanarak, yüksek fırın cüruf çimentolu harçların genişmesini araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarını normal portland çimentolu harçlarla yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırmışlar ve elde edilen sonuçlara göre yüksek fırın cüruf çimentolu harçların alkali silis reaksiyonu nedeniyle genişmeye uğradığını ama benzer koşullar altında normal portland çimentolu harçlardaki genişmeden daha düşük hızda genişmenin olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Turanlı vd., 2003).

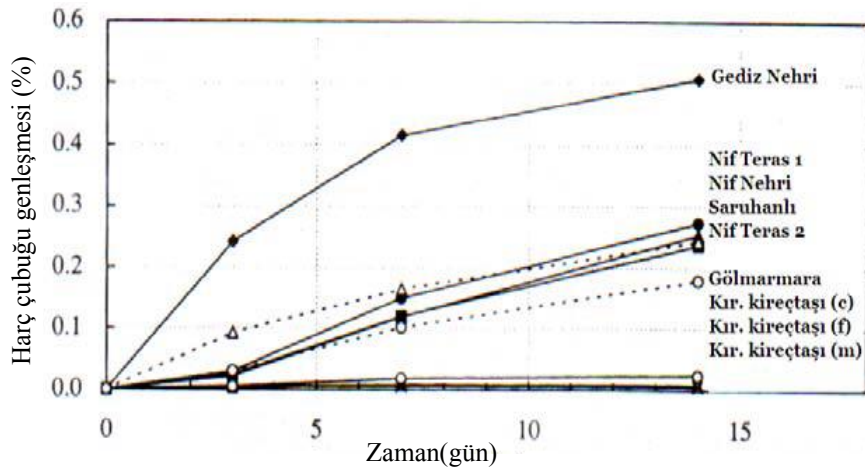
L. Turanlı, F. Bektaş, P.J.M. Monteiro, alkali silis reaksiyonu yayılımını minimize etmek için puzolanik madde özellikleri taşıması amacıyla kil tuğla kullanmışlardır. Bu amaçla yaptıkları deneyler sonucunda kil tuğlanın; çimento ile kısmi yer değiştirme ve ASR' den dolayı oluşan genleşmeyi durdurma amaçlı kullanıldığı zaman puzolanik malzeme olarak bir potansiyele sahip olduğunu gözlemlemişlerdir (Mladenovic vd., 2004).

Viggo Jensen, 1949-1951 yıllarında Norveç'te inşa edilen Elgester köprüsünde gözlenen beton ve çatlak genişlemesini ASR tarafından açıklamaya çalışmıştır. Özellikle köprünün batı yüzünde ASR reaksiyonlarının oluşumundan dolayı hasar olduğu gözlenmiş ve bunun üzerine yapılan kolon testlerinde monosilane emdirmesi ile çok ümit verici sonuçlar elde edilmiştir. Krema kıvamında olan bu ürün, önemli bir derecede ASR'nu azaltmıştır. Bu çalışmada yaklaşık zeminden 1,5 m kolon horizontal olarak delinmiştir. Mikroyapısal analizlerde cilalanmış beton parçaları uygulanmış ve ince bölümlere floresan boyalar emdirilmiştir. Gözlenen yarık ve genişlemelerin çoğunlukla ASR nedeniyle olduğu sonucuna varılmış ve reaksiyon ürünleri içindeki kumtaşının aşırı bir şekilde kristallere benzer kriptokristaline kumtaşlarından olduğu gözlenmiştir (Ferraris vd.,1997).

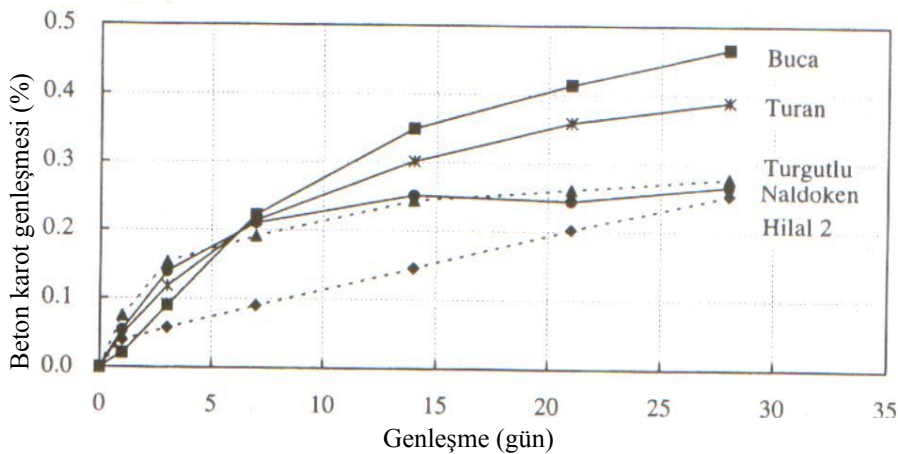
Ülkemizde, ASR'nun ilk hasarları, Karayolları 2. Bölge Müdürlüğü köprü mühendislerinin ön incelemeleri sırasında İzmir yöresindeki birçok köprüde geniş çatlakların gözlenmesi ile ortaya çıkmıştır. 1995 yılında, TC Karayolu Köprülerinin Korunması ve İyileştirilmesi Çalışmaları projesi kapsamında, İzmir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

Katayama (2000), İzmir ve yöresindeki hasar görmüş köprülerden alınan karotlar ve bu betonda kullanılan agrega ile yaptığı araştırmasını 2000 yılındaki 11. Uluslararası Alkali Agrega Reaksiyonu konferansında sunmuştur. Bu çalışma, İzmir yöresinde konu ile ilgilenen diğer araştırmacılara ışık tutan ilk örnek niteliğindedir. Şekil 2'de Katayama'nın hızlandırılmış harç çubuğu metodu uyguladığı agrega örneklerinin genleşme-zaman grafikleri görülmektedir. Bu örnekler arasında en reaktif olanı Gediz Nehri, Ahmetli yöresine ait %10 camsı riyolit ve dasit içeren agregadır. ASTM C289 kimyasal metot, bu

agregaların reaktivitesini belirlemede yetersiz kalmıştır. Hasarlı karayolu köprülerinden (Buca, Turan, Turgutlu, Naldöken, Hilal 2) alınan karot örnekleri önce 2 saat boyunca 80 °C fırında tutularak termal genişmeleri belirlenmiştir. Devamında 80 °C, 1N NaOH çözeltisinde 28 gün boyunca kürlenmiştir. Karot örneklerinin genişleme-zaman grafikleri ise Şekil 3’de görülmektedir. Söz konusu betonların toplam alkali içeriği, agregadan gelen alkali ile birlikte 2.6-3.1 kg/m<sup>3</sup> arasında hesaplanmıştır. Katayama (2000) bildirisinin sonucunda hızlandırılmış harç çubuğu metodu ile petrografik analiz yönteminin birlikte kullanılmasının bölgedeki agreganın reaktivitesini belirlemede etkili olduğunu belirtmiştir.



Şekil 2. İzmir yöresi agregalarının 14-günlük hızlandırılmış harç çubuğu genişmeleri (Katayama, 2000).



Şekil 3. İzmir yöresi hasarlı köprülerden alınan karot örneklerinin 28 günlük genişmeleri (Katayama, 2000).

Son yıllarda ülkemizde de bu konu üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bunlar: (Aköz ve Andiç, 2002) üç farklı agrega için çimentoya % 0, % 30, % 60 oranlarında yüksek fırın cürufu katılmış harçlarda, hızlandırılmış deneyler yaparak, sıcaklık, basınç ve nem artışının alkali-silika reaksiyonunu hızlandırdığı, cürufun ise yavaşlattığını görmüşlerdir.

(Topçu, 2003), üç farklı renkte ve dört farklı miktarda atık camla harç çubukları üreterek, alkali-silis reaksiyonuna camların etkisini araştırmıştır. Beyaz, yeşil ve kahverengi camlardan beyaz camın en fazla genişmeye neden olduğunu ve cam agregaların tane çapının küçülmesiyle alkali-silis reaksiyonunun hızlandığını gözlemiştir.

(Topal ve Şengöz, 2011), reaktif agrega boyutunun ve yüzey köşeliliğinin alkali-silis reaksiyonu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, reaktif olduğu bilinen Gediz nehri yatağı doğal agregasından aldıkları örnekler üzerinde çeşitli deneyler yapmışlardır. Deney sonuçları tek boyutlu agrega kullanımının alkali-silis reaksiyonu genişlemelerini arttırdığını göstermiştir. Köşeliliğin alkali-silis reaksiyonu genişmeleri üzerindeki etkisi ise seçilen her agrega grubunda tam olarak belirlenememiştir.

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

(Zarif vd., 2003), İstanbul'daki dolomit kireçtaşları üzerinde bir inceleme yapmışlar ve dolomitik kireçtaşlarının zararsız agregalar oldukları ve çimento alkanilitesi fazla olan çimentolar kullanılsa bile bu agregaların beton üretiminde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

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

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

#### **1.4. Alkali-Silis Reaksiyonuna Yol Açan Beton Bileşenleri**

##### **1.4.1. Agreganın Tanım ve Özellikleri**

Yeryuvarının kabuğu kayalardan meydana gelmektedir. Kayaların jeomorfolojilerinin incelenmesi, birçok açıdan önemlidir. Yer şekillerinin meydana gelişi ve evrimleri üzerinde kayaların mekanik (direnç, geçirimsizlik ve su tutma, genişleme katsayısı vb.) ve kimyasal özellikleri (bileşimleri, çözünme dereceleri, unsurlar arasındaki bağın kolayca çözülüp çözülmemesi vb.) doğrudan veya dolaylı olarak derin etkiler yapar.

Agregalar, beton yapımında çimento ve su ile birlikte kullanılan, kum, çakıl, kırmataş gibi taneli malzemelerdir. Beton hacminin yaklaşık % 75'ni agreganın oluşturmaktadır.

Beton yapımında kullanılan en pahalı malzeme çimentodur. Agreganın ise ucuz bir malzemedir. Bu nedenle, istenilen kalitedeki betonda mümkün olduğu kadar fazla agreganın kullanılması maliyeti düşürmektedir. Agreganın betonun teknik özelliklerine önemli katkıda bulunmaktadır. Bunlar:

- Agregalar genellikle dayanıklı ve sert malzemeler oldukları için betonun dayanımının yüksek olmasına katkı sağlar. Ayrıca betonun aşınma direncini artırır.
- Çimento hamuru zamanla kuruyarak büzülme özelliği gösteren bir malzemedir. Agreganın, beton içindeki büzülmeden dolayı oluşabilecek hacim değişikliğine engel olmaya yardımcı olur.

Beton hacminin % 60-80'ini agreganın bileşeni meydana getirdiği için, seçiminde titizlik gösterilmesi gerekmektedir. Agreganın, gereken mukavemete sahip olması ve dış etkenlere dayanabilmelidir. Agreganın fiziki ve mekanik özellikleri istenilen şartları karşılayabilecek nitelikte olmalıdır. Aşınmaya maruz kalacak bir betonun agregası yeterli aşınma mukavemetine sahip olmalıdır. Don yapan iklimlerde kullanılacak betonun agregası ise dayanıklılık bakımından don etkisi için konmuş standartları karşılamalıdır (Koca, 1996).

#### 1.4.1.1. Agregaların Sınıflandırılması

##### A. Elde Ediliş Şekline Göre Sınıflandırma;

1. Doğal Agregası (Doğal taş agregası) : Nehir yatakları, eski buzul yatakları, deniz ve göl kenarları, taş ocaklarından alınan ve üzerinde kırma, yıkama ve sınıflandırma dışında hiçbir işlem yapılmamış agregalardır. Kum, çakıl ve kırmataş en çok kullanılan doğal agregalardır. Hafif beton yapımında kullanılan ponza taşı ve bims gibi hafif agregalar ile ağır beton yapımında kullanılan hematit, magnetit ve barit gibi demir cevherleri de bu sınıfa girmektedir.
2. Yapay Agregası (Sanayi ürünü agregası) : Beton üretimi ile doğrudan ilgisi olmayan bir endüstride yan ürün veya artık malzemelerdir. Yüksek fırın cüruf taşı, izabe cürufu veya yüksek fırın cüruf kumu gibi sanayi ürünü olan kırılmış veya kırılmamış agregadır.

##### B. Tane Boyutlarına Göre Sınıflandırma;

1. İnce Agregası (4 mm altı): 4 mm açıklıklı kare delikli elekten geçen agregadır.
  - a. Kum: Kırılmamış tanelerden meydana gelen ince agregadır.
  - b. Kırma Kum: Kırılmış tanelerden meydana gelen ince agregadır. Çakılın kırılması ile elde edilir.
2. İri Agregası (4 mm üstü) : 4 mm açıklıklı kare delikli elek üzerinde kalan agregadır.
  - a. Çakıl: Kırılmamış tanelerden meydana gelen iri agregalardır.
  - b. Kırmataş (mıcır): Kırılmış tanelerden meydana gelen iri agregalardır.
  - c. Taşunu (Filler): Beton agregası olarak kullanılacak ince agreganın en küçük boyutu 0,25 mm dir. 0,25 mm' den küçük tanelere sahip agregalara filler denir (Davraz ve Gündüz, 2004).

#### 1.4.1.2. İdeal Agregası Standartları

Agregalar kullanma yeri ve amacına göre, granülometrik bileşim, tane şekli, tane dayanımı, aşınma direnci, dona dayanıklılığı ve zararlı maddeler bakımından TS 706 standartlarının gereklerini yerine getirmelidir. Ayrıca, suyun etkisi altında yumuşamamalı, dağılmamalı, çimentonun bileşenleri ile zararlı bileşikler meydana getirmemeli ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemelidir (TS 706, TS 3529, TS 3526, TS 3670, TS 3527, TS 3530, TS 3814, TS 635 Standartları).

Tane dağılımı: Agregata tane dağılımı, granülometri eğrileri ve gerektiğinde bu eğrilere bağlı olarak tayin edilen incelik modülü, özgül yüzey ve su istek katsayıları ile belirtilir.

Tane şekli: Agregata tanelerinin şekli, olabildiği kadar küresel ve kübik olmalıdır. Tanenin en büyük boyutunun en küçük boyutuna oranı 3'ten büyük olan tanelere şekilce kusurlu taneler denir. Şekilce kusurlu tanelerin (yassı veya uzun taneler) oranı, 8 mm'nin üzerindeki agregalarda ağırlıkça % 50'den çok olmamalıdır.

Tane dayanımı: Agregata taneleri, istenilen özellikli bir betonun yapımına elverişli olacak kadar dayanıklı olmalıdır. Bu özellik, doğal olarak oluşmuş kum ve çakılda veya bunlardan kırılarak elde edilen agregalarda, doğada uğradıkları ayıklanma olayı ile sağlanmaktadır.

Betonun yapımında kullanılacak agregalar için % 30'dan, diğer agregalar için ağırlıkça % 45'ten az kayıp bulunmuş ise agregata yeterli olarak kabul edilir.

Dona dayanıklılık: Bir agreganın dona dayanıklılığı öngörülen kullanma amacı için yeterli olmalıdır. Doğal olarak oluşmuş kum ve çakıl veya bunlardan kırılarak elde edilen agregalar, doğada uğradıkları ayıklanma olayı dolayısıyla çoğunlukla çok az miktarda dona duyarlı taneler içerir. Sürekli donma ve çözünme olmayan yörelerde bu özellik aranmaz.

Zararlı maddeler: Betonun prizine (katılaşmasına) veya sertleşmesine zarar veren, betonun dayanımını veya doluluğunu (kompozitesini) azaltan, parçalanmasına neden olan veya donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşüren maddelerdir. Dağılım ve miktarlarına bağlı olarak zararlı etkiyen maddeler şunlardır: yıkanabilir maddeler, organik kökenli maddeler, sertleşmeye zarar veren maddeler, bazı kükürtlü bileşikler, yumuşayan, şişen ve hacmi artıran maddeler, klorürler gibi korozyona sebep olan maddeler ve mikalardır.

Yıkanabilir maddeler: Yıkanabilir maddeler, agregada ince halde dağılmış veya topak halinde veya agregata tanelerine yapışık olarak bulunabilir. Bu maddeler genellikle kil, silt ve çok ince taş unudur.

Organik kökenli maddeler: Agregada ince halde dağılmış halde iken betonun sertleşmesine zarar verebilirler. Taneli halde buldukları zaman renk değişmesine veya şişerek betonun yüzeyinde patlamalara neden olabilirler.

Kükürtlü bileşikler: Kükürtlü bileşikler cinslerine, agregata içindeki miktarlarına ve yapının içinde bulunduğu ortam koşullarına bağlı olarak, betonda zararlı değişikliklere neden olabilirler. Burada kükürtlü bileşiğin cinsi ve dağılımı önemlidir. Örneğin iyi



sıkıştırılmamış betonlarda, hava akımı ve rutubet vasıtasıyla oksitlenen sülfatlar (alkali sülfatlar, jibs, anhidrit gibi) zararlı olabilirler. Sülfatlar betondaki kireç ve aliminyum bileşikleri ile reaksiyona girerler ve zamanla büyüyen kristaller meydana getirerek betonun parçalanmasına neden olurlar.

Çeliğe zarar Veren Maddeler: Donatılı betonda kullanılacak agregalarda, donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye sokan, Nitratlar, Halojenürler (florür hariç) gibi tuzlar zararlı miktarda bulunmamalıdır. Ön gerilmeli beton için kullanılacak agregalarda, suda çözünen klorürler, klor olarak hesaplandığında ağırlıkça % 0,2'den fazla bulunmamalıdır. Tablo 1'de beton kumları ve iri agregalar için yukarıda tanımlana standart değerler verilmektedir.

Belirli kökenli agregalar: Reaksiyon yapabilen silisten oluşan bileşenleri içerebilirler. Bu cins bileşenler, betonun boşluk suyunda çözünen alkali hidroksit ile kuvvetli kimyasal reaksiyona girerler ve önce berrak ve yüksek konsantrasyonlu sonra yüksek viskoziteli alkali silikat çözeltisini meydana getirirler. Agreganın alkaliye duyarlı bileşenlerinin cins ve miktarına, tane büyüklüğü ve dağılışına, betonun boşluğunda bulunan çözeltideki alkali hidroksit miktarına ve sertleşmiş betonun çevre koşullarına bağlıdır.

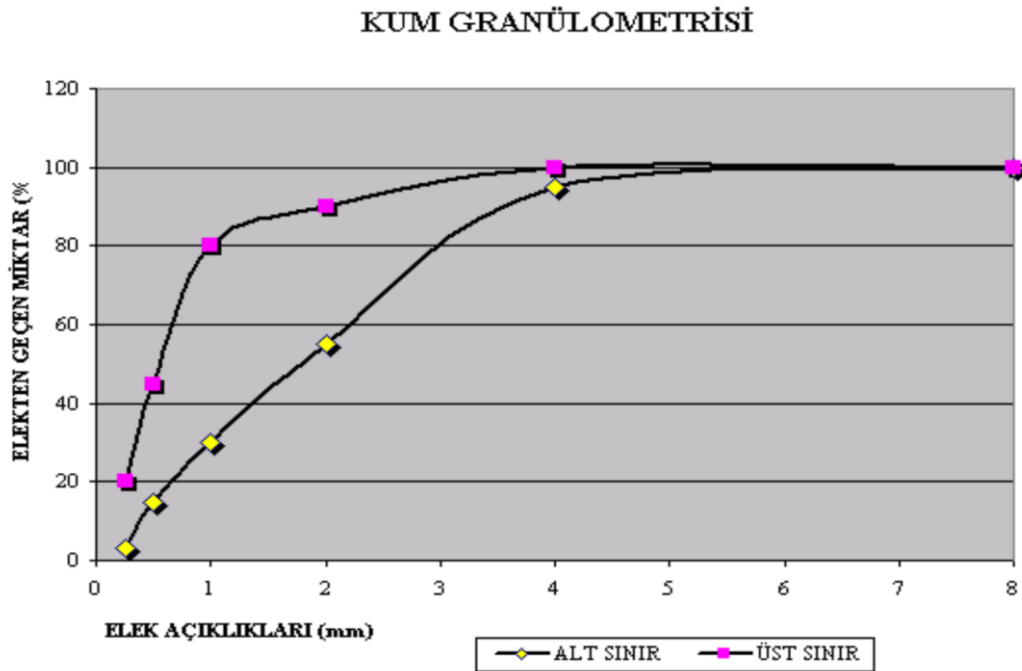
Tablo 1. Beton kumları ve iri agrega standartları (Çağlayan vd., 1999).

STANDARTLAR	KUM	İRİ AGREGA
Gevşek Birim Ağırlık (TS3529)	Min 1350 kg/m <sup>3</sup>	Min 1350 kg/m <sup>3</sup>
Özgül Ağırlık (TS3529)	Min 2250 kg/m <sup>3</sup>	Min 2600 kg/m <sup>3</sup>
Deniz Hayvanı Kabuğu İçeriği	Kompositenin 0,49 değerinden küçük olması durumunda uygulanır.	-
Organik Madde (TS3673)	Sodyum hidroksit çözeltisinde 24 saat tutulan numunenin rengi standart referans çözeltisi renginde veya daha açık renkte olmalıdır.	Sodyum hidroksit çözeltisinde 24 saat tutulan numunenin rengi standart referans çözeltisi renginde veya daha açık renkte olmalıdır.
Çamurlu Madde Miktarı (TS3527)	Çökeltme deneyi sonunda çamurlu madde miktarı hacimce % 5'den küçük olmalı.	63 µ'den daha ince kil,silt veya taş unu gibi malzemelerin miktarı, yıkama deneyine göre %1,5 değerini aşmamalı.
Su Emme Miktarı (TS3526)	Max. % 2	Max. % 2
Dona Dayanıklılık	Standart Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> çözeltisi ile yapılan dona dayanıklılık deneyinde ağırlık kaybı en çok %15 olmalı.	Standart Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> çözeltisi ile yapılan dona dayanıklılık deneyinde ağırlık kaybı en çok %15 olmalı.
Alkaliye Duyarlı Taneler	Çimentoda eşdeğer alkali oksit değeri %0,6'dan büyükse kumda, alkaliye duyarlı taneler ağırlıkça %0,5'den az olmalı.	-
Biçimsiz Tane Miktarı (TS3814)		Max. % 40'ı aşmamalı
Aşınma Miktarı		Bilyalı tamburda yapılan aşınma deneyi sonunda tayin edilen malzeme kaybı 500 devir sonunda en çok % 45 olmalı.

Beton kumları için granülometrik dağılım (TS3530): Beton dökümünde kullanılan kumlar belli bir tane boyutu dağılımına sahip olmalıdır. Yani, eleme sonunda elekten geçen malzeme yüzdeleri Tablo 2'ye uygun olmalıdır. Şekil 4'de beton kumları için granülometrik dağılım eğrisi verilmiştir (Çağlayan vd., 1999).

Tablo 2. TS elek sistemine göre beton kumu granülometrisi (Çağlayan vd., 1999).

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen Malzeme (%)	
	min	max
8	100	100
4	95	100
2	55	90
1	30	80
0,50	15	45
0,25	3	20

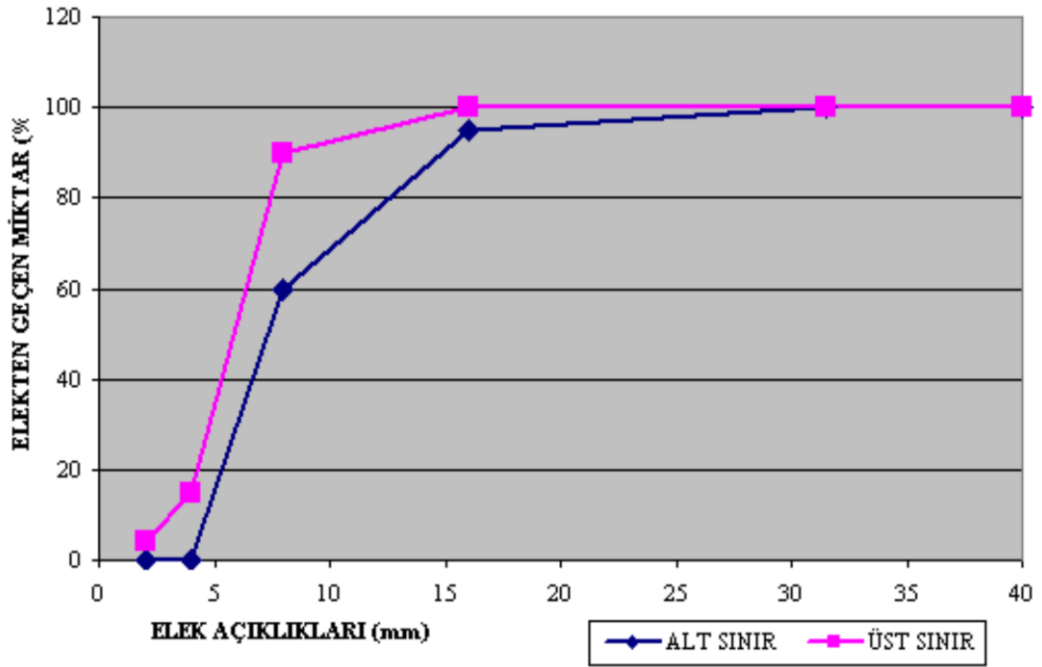


Şekil 4. İdeal kumun granülometrik dağılımı

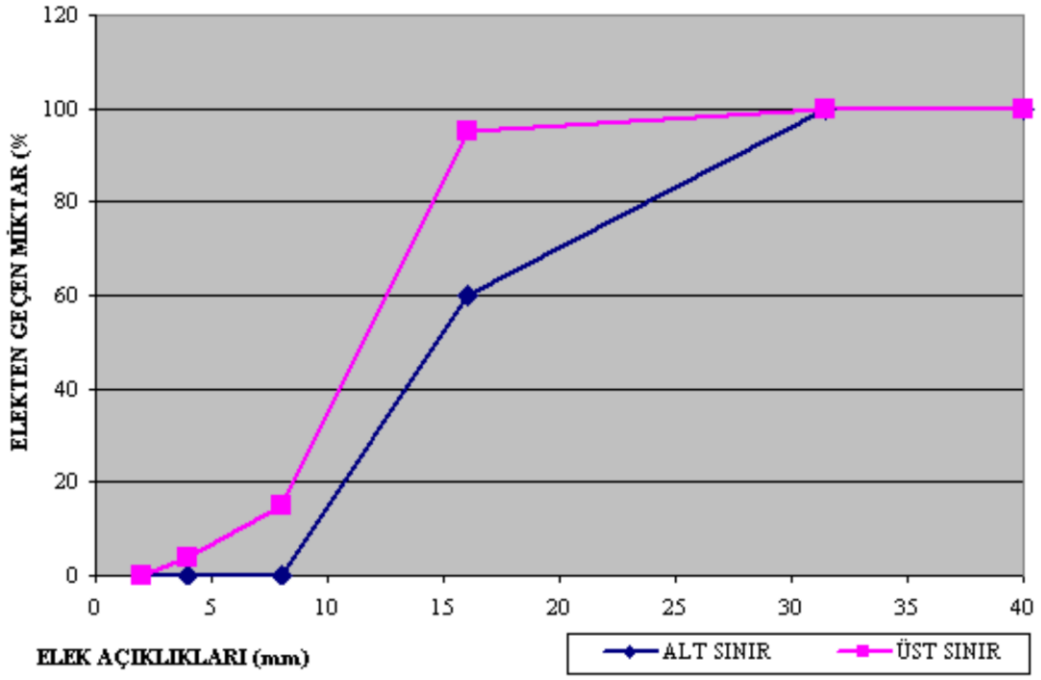
İri agregalar için granülometrik dağılım (TS3530): İri agregada içinde tane boyutu dağılımı çok önemlidir. Eleme sonunda elekten geçen malzeme yüzdeleri Tablo 3'e uygun olmalıdır. Ayrıca Şekil (5-6-7)'de iri agregalar için granülometrik dağılım eğrileri verilmiştir (Eyüpoğlu, 1995).

Tablo 3. TS elek sistemine göre iri agrega granülometrisi

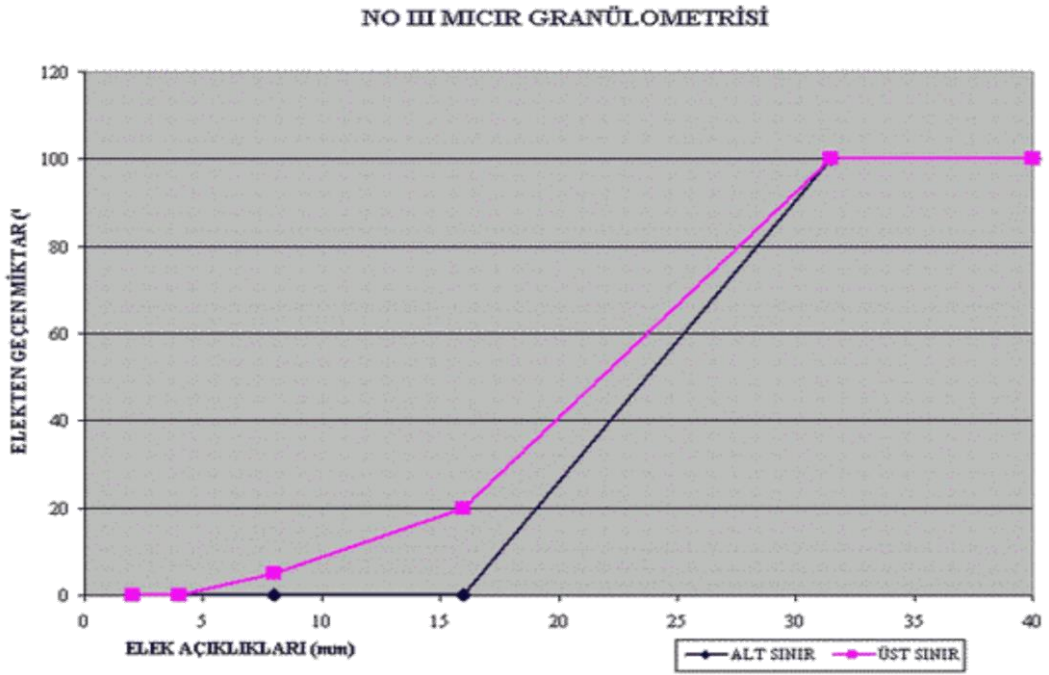
ELEKTEN GEÇEN MALZEME (%)					
Elek Göz Açıklığı (mm)	I Nolu Mıcır	II Nolu Mıcır	III Nolu Mıcır	Balast Tuvenan	Çakıl veya Karışık Mıcır
40	100	100	100	100	100
31,5	100	100	100	0-20	95-100
16	95-100	60-95	0-20	0-10	50-70
8	60-90	0-15	0-5	0-3	20-34
4	0-15	0-4	-	-	0-10
2	0-4	-	-	-	-



Şekil 5. I nolu mıcır için granülometri eğrisi



Şekil 6. II nolu mıcır için granülometri eğrisi



Şekil 7. III nolu mıcır için granülometri eğrisi

### 1.4.1.3. Agregaların Silis Bileşenlerinin Alkali-Silis Reaksiyonu ile İlişkisi

Agregaların silis bileşenlerinin dokusu genellikle amorf, kriptokristalli, mikrokristalli ve kristalli olarak tanımlanır. Silis mineralleri, büyük oranda, normal hava sıcaklığında kararlı olmayan polimorfik oluşumlara sahiptir. Bileşiminde silis bulunan ve en yaygın olan mineraller kuvars, tridimit, kristobalit, opal ve kalsedon gruplarıdır. Farklı agregaların reaktiviteleri, içerdikleri kristal yapıdaki silis minerali miktarına bağlıdır. Opalin kristal yapısı düzensizdir. Bu nedenle alkalitesi yüksek çözeltilerden diğer silis içeren agregalara göre daha fazla etkileneceğinden en yüksek reaktiviteye sahip agregalar türü olarak tanımlanır. Diğer taraftan doğal halde bulunan kuvars, çok düzenli bir kristal yapısına sahiptir ve normal olarak alkali reaktif değildir. Volkan camları, mikro ve kriptokristalin kuvars, kalsedon, tridimit ve kristobalit ise orta derecede reaktif mineral olarak tanımlanmıştır. Andezitte ise reaktif özelliğe sahip volkan camı bulunmaktadır. Genelde bazaltlar silisçe doymuş (Toleyit veya toleyitik bazalt) ve silisçe doymuş olmayan (Alkali bazalt) bazaltlar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Toleyitik bazaltların hamuru çoğunlukla volkan camından oluşması nedeni ile literatürde reaktif agregalar olarak tanımlanmaktadır. Bozunmuş bazaltlarda, klorit ve kil mineralleri (simektit grubu), alkali silis reaksiyonu sonucu alkali silis jeli dönüşmektedir. Bunun sonucu olarak bazalt içeren harçlarda ve betonlarda çatlak gelişimleri meydana gelebilmektedir. Alkali silis reaksiyonunun ürünü, yüksek oranda su tutabilen alkali silis jelidir. Alkali silis jelin çevrenin nemini içine alması ile betonda, hacimce % 2-3 seviyesine kadar genişleme meydana gelebilmektedir. Genleşme sonucu, donatısız kütle betonlarında, kaplama betonlarında çekme dayanımının aşılması sonucu beton içinde ve yüzeyinde kırıklar ve çatlaklar gelişebilmektedir (Andıç, 2002).

### 1.4.1.4. Alkali-Silis Reaksiyonu Açısından Kayaçların Reaktivitedeki Azalmaya Göre Sıralanması

- Tüfler dahil volkanik camlar (özellikle fazlaca silis içerenler)
- Metakuvarsit metamorfize kumtaşları
- Ayrışmış granitik gnayslar
- Deforme olmuş granitik gnayslar
- Diğer silis içeren metamorfik kayaçlar

- Silisli ve mikalı şist ve filitler
- İyi kristalize olmuş volkanik kayalar
- Pegmatitik (kabaca kristalize) volkanik kayalar
- Silis içermeyen kayalar (Andıç, 2002).

#### 1.4.2. Çimento Tanım ve Özellikleri

Su ile tepkimesinde sertleşerek etrafındaki maddeleri birbirine yapıştırma özelliğine sahip malzemelere "hidrolik bağlayıcı" adı verilmektedir. Çimentolar, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve az miktardaki MgO içeren uygun hammaddelerin, sinterleşme sıcaklığına (~1400 °C) kadar kızdırıldıktan ve uygun bir soğutma işleminden sonra elde edilen klinkerlerin alçı ve gereğinde yapay (uçucu kül, cüruf) ya da doğal (tras) puzolan maddelerle beraber belirli boyuta kadar öğütülmesiyle meydana gelen hidrolik bağlayıcıdır.

Çimentoyu oluşturan karma oksit bileşenleri genel olarak dört grupta toplanabilir:

1. C<sub>4</sub>AF [(CaO)<sub>4</sub> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ] Tetra kalsiyum alumino ferrit
2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve C<sub>3</sub>A [(CaO)<sub>3</sub> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ] ile birleşerek Tri kalsiyum aluminatı
3. C<sub>2</sub>S [(CaO)<sub>2</sub> SiO<sub>2</sub> ] Dikalsiyum silikat,
4. CaO ve ısıda (~1400 C) C<sub>3</sub>S [(CaO)<sub>3</sub> SiO<sub>2</sub> ] Trikalsiyum Silikat oluşturur.

Karma oksitlerin çimentoya kazandırdıkları önemli özellikleri şunlardır:

1. Çimentonun en önemli bileşiği C<sub>3</sub>S 'dir. Çimentoya ilk dayanımını veren ve basınç dayanımı yüksek bir çimento olmasını sağlayan C<sub>3</sub>S' dir.
2. C<sub>2</sub>S'in dayanıma katkısı ileriki zamanda kendini gösterse de ilk günlerde pek yoktur, ancak ötektik oluşturucu bir özelliği vardır.
3. C<sub>3</sub>A ve C<sub>4</sub>AF' in de çimentoya olumlu ve olumsuz katkıları vardır. Bu bileşik maddelerin oranlarına, kristal şekillerine ve bu kristaller içerisinde kalan minör elemanlara bağlı olarak çimentonun özellikleri değişir.

Çimentoda adı geçen maddelerin dışında alçı taşı (CaSO<sub>4</sub>. 2H<sub>2</sub>O) ve serbest halde CaO ile MgO ve alkali oksitler (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Cl) bulunur. Çimentoyu oluşturan bütün bu maddelerin beton yapısı üzerine olumlu ve olumsuz etkileri vardır:

1. C<sub>3</sub>S ve C<sub>2</sub>S su ile birleştiğinde hızla sertleşir, dayanım kazanır. C<sub>3</sub>S'in hidratasyonu daha çabuktur, oran arttıkça özellikle ilk günlerde dayanım kazandırır. C<sub>3</sub>S ve C<sub>2</sub>S hidratasyonu sırasında oluşan Ca(OH)<sub>2</sub>, çelik donatıların

paslanmasını geciktirir. Bu bakımdan yararlı ise de zamanla yıkanarak akar, beton geçirimli hale gelir.

2.  $C_3A$  ilk dayanımlarda olumlu rol oynarsa da  $C_3S$  ile kıyaslanamaz.  $C_3A$ 'nın hidratasyonu sırasında büyük ısı çıkar ve sülfat iyonları ile büyük hacimli etrengite mineralini (Candlot tuzu) oluşturur. Bu iki olay betonu olumsuz etkiler. Kütle betonu (baraj vs.) ve agresif sularla temastaki betonlarda (kuyu, rıhtım, iskele, köprü ayağı gibi) genişleme ve çatlaklara neden olur. Bu tür yerlerde kullanılacak betonların çimentolarında  $C_3A$  oranının düşük olması istenir veya puzolonik çimentolar tercih edilmelidir.
3.  $C_4AF$  çimento içerisinde en az etkinliği olan bileşendir. Bu az etki de  $C_3A$ 'nın etkisine benzer. Yararı; klinkerin pişme süresince yumuşamasını, pişme yetkinliği kazanmasını sağlar (URL-1, 2012).

Serbest  $CaO$  ve  $MgO$  fazla oranlarda olduğu zaman betona olumsuz etkiler yapar. Su ile  $Ca(OH)_2$  ve  $Mg(OH)_2$  olur. Zamanla havadan  $CO_2$  alır,  $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$  oluşur. Böylece ince yüzey çatlaklarının genişlemesine, derinleşmesine neden olurlar. Klinkerin soğuması sırasında hızlı soğutma ile cam faz oranı artırılır.  $MgO$  cam fazda kalırsa etkinliği az olur. Kristal fazda kalan  $MgO$ 'in reaksiyonlar zinciri hızla devam eder. Alkalilerin ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ ) alkali agregaya reaktivitesi nedeniyle betona olumsuz etkileri vardır. Opal, riyolit gibi aktif silis içeren agregalarla reaksiyona girerler, hacim artışlarına, betonda genişlemelere neden olurlar. Alkali agregaya reaktivitesi uzun yıllar sonra dahi ortaya çıkabilir ve önemli hasarlara neden olur (Stokowski vd., 2002)

#### 1.4.2.1. Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler

Çimento üretiminde kullanılan ana hammaddeler kireçtaşı, kil ve marndır. Klinker üretiminin ana bileşenleri olan  $CaO$  için kalker ya da kireçtaşı;  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , ve  $Fe_2O_3$  için de kil mineralleri temel kaynaklardır. Marn gibi bu dört oksiti bünyesinde bulunduran diğer malzemeler de çimento hammaddesi olarak kullanılmaktadır. Çimento üretiminde kullanılacak hammaddelerin uygunluk dereceleri onların kimyasal bileşimleri ile orantılıdır. Kireçtaşı bileşeni için kireç standardı bir kriter olarak kullanılmaktadır. Bu değer  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  gibi bileşenler hakkında ve aynı zamanda  $CaO$  içeriği konusunda bilgi vermektedir. Kil minerali olarak kullanılacak kayalarda silist ve alümina oranı



dikkate alınarak değerlendirilmektedir (URL-2, 2012). Tablo 4’de çimento ana hammaddelerinin  $\text{CaCO}_3$  oranına göre sıralanması gösterilmiştir.

Tablo 4. Çimento ana hammaddelerinin  $\text{CaCO}_3$  oranına göre sınıflandırılması

Hammadde adı	% $\text{CaCO}_3$
Mermer	99-100
Kireçtaşı (Kalker)	90-98
Kalkerli Marn	75-90
Marn	40-75
Killi Marn	10-40
Marnlı Kil	2-10
Kil	0-2

Ayrıca klinkerin öğütülmesi esnasında alçı taşı, yapay ve doğal puzolanik maddeler, yüksek fırın cürufu, silisli ve kalkerli uçucu küller, silis dumanı ve son yıllarda belirli oranlarda kalker de değişik tip çimento üretimlerinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

#### a) Kireçtaşı

Kimyasal bileşiminde en az % 90  $\text{CaCO}_3$  bulunan kayalara kalker ya da kireçtaşı adı verilmektedir. Ayrıca kireçtaşı ifadesi, kimyasal bileşiminde % 90’a kadar  $\text{CaCO}_3$ , minerolojik bileşiminde ise % 90’a kadar kalsit içeren kayalar için de yer bilimciler tarafından kullanılmaktadır. Kalsit, aragonit, vaterik kalsiyum karbonatın üç ayrı kristal şeklidir. Ancak doğada hiçbir zaman saf olarak bulunmaz. İkincil derecede değişik madde ve bileşiklerin içinde yer alması nedeniyle orijinal halde sarı renkli olup, kahverengi ve siyah renklerde de görülebilmektedir. Kayacın tüm kimyasal bileşimindeki  $\text{CaCO}_3$  miktarı % 90’dan fazla olduğundan kalker olarak adlandırılan kalker taşının sertlik derecesi 3, özgül ağırlığı 2,5-2,7  $\text{gr/cm}^3$  arasındadır. Bütün bu safsızlıklar ile gerek minerolojik gerekse kimyasal bileşim açısından görülen değişiklikler yanında yapı ve dokularına ilişkin kalkerlerin gösterdikleri ayrıcalıklar özelliklerini oluşturur. İçerdikleri maddelere göre oluşan kalkerlerin özellikleri esas alınıp pek çok sınıflamalar yapılarak verilen adlandırmalarla çeşitlere ayrılmıştır. Kalkerlerin en çok içerdikleri kil, kalsiyum ve

magnezyum karbonat % miktarlarına göre yapılan ayırım ve sınıflama olarak birçok ülkede kullanılan isimlendirme ülkemizde de kullanılmaktadır. (URL-2, 2012)

#### b) Kil

Kil terimi endüstriyel alanda kesin sınırlarla saptanarak tanımlanmasına rağmen, hammadde olarak çeşitli alanlarda çok geniş kullanımı vardır. Kil, yerbilimciler tarafından killi kayaç ve killer olarak iki anlamda kullanılmaktadır. Bu açıdan kil minerallerinden oluşmuş kayaçlar olarak tanımlandığı gibi bazı kaynaklarda tane boyutları 2 mikrondan daha küçük parçacıklardan oluşmuş kayaçlar veya çökeller olarak da tanımlanmaktadır. Gerçek anlamda kil tanımı, mineralojik bileşiminde % 90'a kadar kil mineralleri bulunan kayaç olarak yapılmaktadır. Kil minerallerinin temel özelliği kimyasal bileşimlerinde  $Al_2O_3$  bulunması ve sulu alüminyum silikatlardan meydana gelmiş olmasıdır. Demir, alkaliler ve alkali topraklarda değişik miktarlarda yer almaktadır.

Çimento hammaddesi olarak kullanılacak killerde mineralojik ve kimyasal özelliklerin yanı sıra homojenliği de çok önemlidir. Killerin kimyasal analizinde  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $SO_3$  ve kızdırma kaybı % miktarlarının tespit edilmesi gerekir. Mineralojik analizlerinde ise kil minerallerinin dışında bulunan safsızlıkları oluşturan unsurlar ve bunların % miktarları saptanır. Çimento yapımında kullanılacak kilin kimyasal bileşiminde  $Al_2O_3 / Fe_2O_3$  oranı 2/1 civarında olması,  $SiO_2$  % miktarının belirli bir üst sınırdan kalması ve alkali oksitlerin miktarının % 1'in altında olması istenir. Beyaz çimento yapımında kullanılan kaolin kil minerali olarak çimento sanayinde ayrı bir önem taşımaktadır.

Killer genellikle mineralojik bakımdan plastik olan ve olmayan unsurları içerirler. Killerin plastisite özellikleri, mineraller içerisindeki ayırt edici en önemli özelliklerden birisi olup, su ile şekillendirilme özelliğini tanımlamaktadır. Bu özellik kil minerallerinin yapısında bulunan kolloid yüzdesine, killerin tane inceliğine doğrudan bağlıdır. Çimento sanayinde kullanılan killerin plastisite sayıları % 15-20 arasında olmalıdır. Ayrıca çimento sanayinde kullanılacak killerde  $900-1050\text{ }^{\circ}C$  'de sinterleşme olması tercih edilir (URL-2, 2012).

#### c) Marn

Kalker ve kilin doğada, % (50-70) oranında kalker ve % (30-50) oranında kil karışımından oluşmuş haline marn denilmektedir. Çimento klinkeri ortalama % 70 kalker ve % 30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilmektedir. Marn doğal olarak bu bileşimi taşıdığından veya bu

bileşime çok yakın özellikte bulunduğundan ideal çimento hammaddesidir. Ayrıca kalkere göre daha yumuşak olması nedeniyle kolay öğütülebilmekte, kırma-öğütme işlemleri sırasında enerji tüketimi az olmaktadır (URL-2, 2012).

#### 1.4.2.2. Çimento Katkı Maddeleri

##### a) Puzolanik maddeler

Puzolanik maddeler, kendi başlarına hidrolik bağlayıcı özelliğine sahip olmadıkları halde ince olarak öğütüldüklerinde nemli ortamda ve normal sıcaklıkta  $\text{Ca(OH)}_2$  ile tepkimeye girerek bağlayıcı özellikte bileşikler oluşturan doğal veya yapay maddelerdir. Puzolanik maddelerin özelliği yüksek miktarda  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içermeleridir. Bu nedenle  $\text{Ca(OH)}_2$  ile tepkimeleri kolaydır ve bu özellikleri nedeniyle hidrolik bağlayıcı özellik gösterirler.

Ülkemizde çimento sanayinde doğal puzolanik katkı maddesi olarak, tras ve bazik nitelikli volkanik aktivitelerin bir ürünü olarak oluşan doğal cüruflar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çimento maliyetlerinin düşürülmesi açısından katkı maddelerinin yüksek oranda katılabilir kalitede olmaları önemlidir. Puzolanik aktivite değerleri ile çözülmüş kalıntı oranları, katılabilirlik oranını belirleyen faktörler olup, katılım oranı genellikle % 10-40 arasında değişmektedir (URL-2, 2012).

##### b) Uçucu küller

Uçucu küller ya da pulverize yakıt külleri, özellikle elektrik üretim tesislerinin pulverize kömür ile işleyen fırınlarının toz tutma ünitelerinden sağlanan malzemelerdir. Bu küller küresel biçimde olup,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içerirler. Diğer puzolanik maddeler gibi,  $\text{Ca(OH)}_2$  ile tepkimelerinde hidrolik bağlayıcı nitelik kazanırlar.

Uçucu küllerin özgül yüzey alanı değerleri 1000-4000  $\text{cm}^2/\text{gr}$  arasında değişmektedir. Kül partiküllerinin tane boyu ise 0,5-200 mikron arasındadır. İri taneli uçucu küllerden istenen çimentoyu üretmek için jips ve klinker ile öğütmeye tabi tutulması gerekmektedir. Kül kalitesi ve özelliklerine bağlı olarak uçucu küllü çimento üretiminde % 10-30 oranında, katkılı çimento üretiminde de diğer katkı maddeleri ile birlikte toplam % 19 oranında çimentoya katılabilmektedir (URL-2, 2012).

### c) Alçıtaşı

Alçıtaşı, kimyasal bileşimi kalsiyum sülfat olan bir mineraldir. Bileşiminde iki molekül kristalizasyon suyu bulunan türüne jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) denir. Susuz kalsiyum sülfat ise anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ) olarak adlandırılır. Çimento sanayi alanında genellikle jips kullanılmaktadır. Gerek jips gerekse anhidrit hiçbir zaman saf halde bulunmazlar. Bu iki mineralden her biri yarı dengeli olup biri diğerine dönüşebilmektedir. Ayrıca alçıtaşı yataklarına oluşum sırasında veya sonradan yabancı maddeler karışmış olabilir. Bunun sonucu olarak alçıtaşı ancak % 85-95 saflıkta bulunmaktadır. Çimento sanayinde genellikle maden ocağından çıktığı kalitesi ile hiçbir işleme tabi tutulmaksızın kullanılmaktadır.

Jips ya da jips-anhidrit karışımını içeren hammaddeler son öğütme prosesinde karışıma % (3-5) oranında katılarak klinker ve/veya diğer katkı maddeleriyle birlikte öğütülerek değişik tür çimentolar üretilmektedir. Alçıtaşı gibi sülfat içerikli maddelerin katılması çimentonun katılma süresinin ayarlanmasında etkili rol oynamaktadır (URL-2, 2012).

### d) Demir cevheri

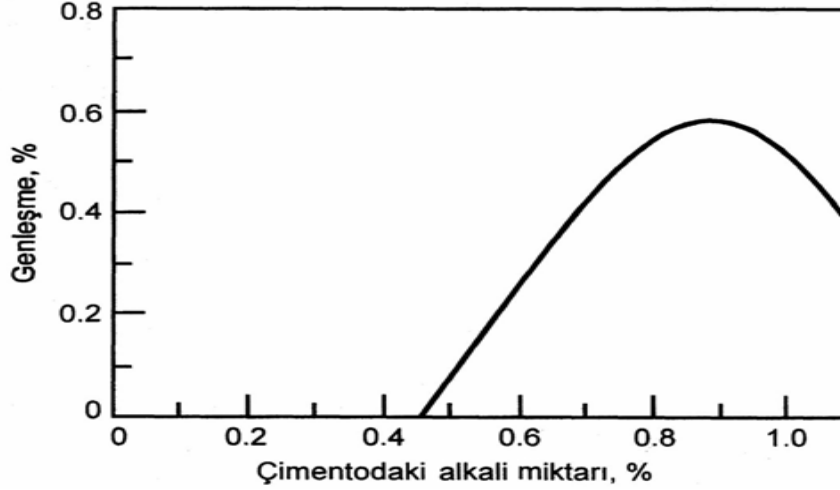
Demir cevherleri içinde çimento sanayinde kullanılanlar, hematit-olijist, götit ve limonittir. Demir yanında alümina kaynağı olarak da çimento sanayinde şamozit ve turingit kullanılabilir.

Demir cevherinin içinde demirle birlikte aynı parajeneze giren metalik cevherler ile tali derecede krom, bakır, nikel, kurşun, manganez ve kobalt elementlerinin çeşitli bileşikleri ve bu bileşiklerin mineralleri de bulunabilir. Bunların varlıkları çimento rengine etki eder ve % 1'i geçmeleri istenmez (URL-2, 2012).

### 1.4.2.3. Çimento Özelliklerinin Alkali-Silis Reaksiyonu ile İlişkisi

Hidrolik bağlayıcıların büyük çoğunluğunun hammaddeleri içinde gayri saf olarak alkalın 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. Şekil 8' de görüldüğü gibi çimentodaki alkali

miktarının yaklaşık % 0,5'den başlayarak % 0,9'a kadar yükselmesi durumunda, genişleme miktarında artma olmaktadır (Woods, 1968).

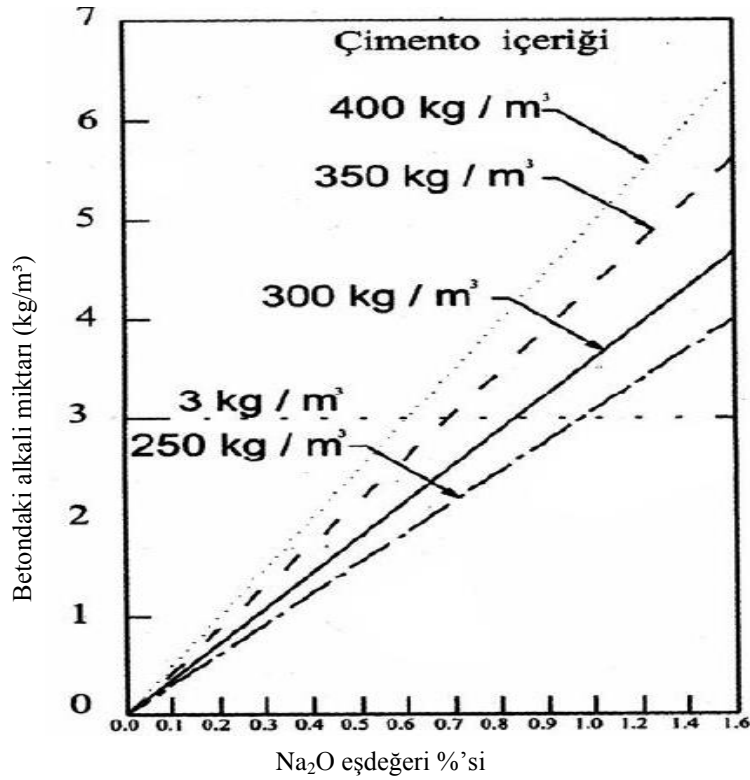


Şekil 8. Çimentodaki alkali miktarının alkali silika genişlemesine etkisi (Woods, 1968).

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

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 oluşturmaktadır. Bu kriter ana bağlayıcı olarak portland çimentosu, yani PÇ türü çimentoların kullanıldığı betonlar için iyi bir kriterdir. 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 alkalitesi göz önüne alınarak beton alkalitesinin belirlenmesidir. Ancak genelde sadece çimento ve çimentolanma özelliği olan malzemelerin alkalitesi gözönüne alınmaktadır. Çünkü diğer beton bileşenlerinin beton alkalitesine etkisi azdır. Bu nedenle beton alkalitesi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır. 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 alkalitesine eklenmelidir. Potansiyel bir alkali silika reaksiyonu (ASR) tehlikesi söz konusu olduğunda Kanada ve Avrupa ülkelerinde betondaki alkali miktarı  $3 \text{ kg/m}^3$  ile sınırlanmaktadır (Farny vd., 1998). Şekil 9'da çimento dozajı ve çimentonun sodyum oksit ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) eşdeğeri %'sine bağlı olarak  $1 \text{ m}^3$  betondaki alkali miktarı gösterilmiştir.



Şekil 9. Çimento dozajı ve çimentonun sodyum oksit ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) eşdeğeri %'sine bağlı olarak  $1 \text{ m}^3$  betondaki alkali miktarı verilmektedir (Hawkins, 1983).

ASR'nin neden olduğu genleşmenin azaltılması için düşük alkalili çimento kullanımı genelde kabul gören ve başarılı olan bir methodur. ASTM C 150'de düşük alkalili

çimento olarak  $\text{Na}_2\text{O}$  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 (Farny vd., 1998).

### 1.5. Alkali- Silis Reaksiyonu

Gerek Türkiye'de gerekse diğer ülkelerde birçok betonarme yapıda hasarlar meydana getiren ASR, oldukça kompleks kimyasal bir reaksiyondur. Bazı çimentoların içinde fazla miktarda bulunan sodyum oksit ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ve potasyum oksit ( $\text{K}_2\text{O}$ ) gibi alkali oksitler beton gözenek suyunda çözülerek sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) ve potasyum hidroksit ( $\text{KOH}$ ) oluşturur ve aktif silis içeren agregalarla reaksiyona girerek, zamanla betonu çatlatan bir jel oluşumuna sebep olur (Farny vd., 1998).

#### 1.5.1. ASR Kimyası

Alkali-silis reaksiyonu, beton agregalarında bulunan reaktif silis ile beton içinde eriyik halde bulunan alkalilerin reaksiyonudur. Bu reaksiyon, betonda nem etkisiyle genişleyen bir jelin oluşmasına neden olur. Oluşan jel, dışarıdan nem alarak şişmeye baslar (hacim artışı) ve bu genişlemenin sonunda beton içerisinde bir takım çekme gerilmelerinin doğmasına sebep olarak betonda çatlamlara yol açar.

Çimento hidrasyonunun ilk aşamalarında sıvı faz, katı faza kıyasla daha baskındır ve katı fazın etrafında devamlılığı vardır. Diğer bir deyişle, katı fazdaki parçacıkları ıslatır. Ancak, hidrasyon devam ettikçe sıvı faz azalmakta ve yerini jelsi C-S-H ve C-H gibi hidrasyon ürünlerine bırakmaktadır. Dolayısıyla sıvı fazın devamlılığı azalır. Çimento hamurunun kendisi de esasen boşluklu yapıya sahiptir. Hidrate hamurda "boşluk çözültisi" adı verilen sıvı fazın yerleşebileceği yeterince yer bulunmaktadır. Hava sürüklenmemiş ve

düşük su/çimento oranına sahip çimento hamuru, az boşluklu olup boşlukların çapı 1-2 µm arasında değişmektedir (Glasser, 1992).

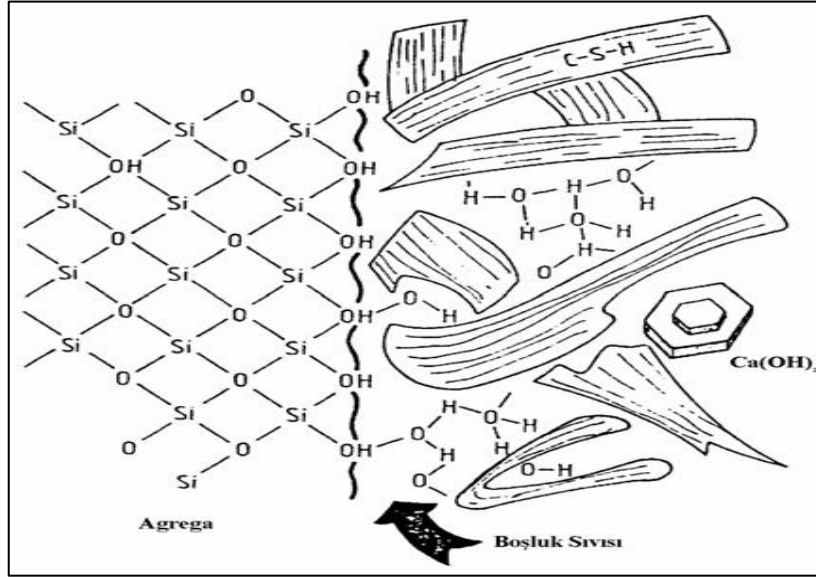
Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan betonun boşluk çözeltisi, sodyum ( $\text{Na}^+$ ), potasyum ( $\text{K}^+$ ), kalsiyum ( $\text{Ca}^+$ ) ve hidroksil ( $\text{OH}^-$ ) iyonları içermektedir. Sodyum, potasyum ve hidroksil iyonlarının boşluk suyundaki konsantrasyonu, hidrate olmamış portland çimentosundaki miktarlarına bağlıdır. Düşük alkalili çimentodan üretilen betonun, boşluk suyu pH'ı 12,7 ile 13,1 arasında değişirken, yüksek alkalili çimentodan üretilen betonlarda boşluk suyunun pH'ı 13,5 ile 13,9 arasında değişebilmektedir. Bu da yüksek alkalili çimentodan üretilen betonun boşluk suyundaki hidroksil iyon konsantrasyonunun, düşük alkalili çimentodan üretilen betonun 10 katı kadar olduğu sonucunu doğurmaktadır. Reaktif agrega üzerinde zararlı etki gösteren, betonun boşluk suyundaki yüksek hidroksil iyonu konsantrasyonudur (Hobbs, 1988). Boşluk çözeltisinin alkali silis reaksiyonundaki önemi, hem hidratasyon ürünleri ile hem de agrega parçacıkları ile yakın temas halinde olması ve iyon taşınmasında ana etmen olarak yer almasıdır (Glasser, 1992).

#### 1.5.1.1. ASR Oluşum Mekanizması

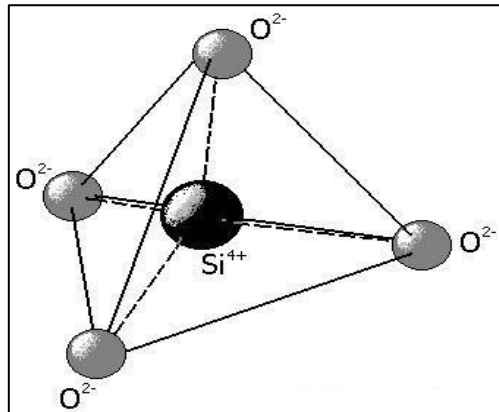
Bir agrega yüzeyi ile temas halinde olan boşluk çözeltisi ve çimento hidratasyon ürünleri Şekil 10'da şematize edilmiştir. Çimentonun katı hidratasyon ürünleri tabakalar şeklindeki C-H ve lif desteleri veya çubuksu şekilde C-S-H yapılarından oluşmaktadır. Hidratasyon ürünleri var olan tüm boşluğu doldurmamaktadır. Mezo ve mikro boşluklar olmak üzere hatırı sayılır ölçüde boşluk hacmi bulunmaktadır. Mikro boşluklar şekilde görülmemektedir ancak su dolu mezo boşluklar su molekülleri ile (H-O-H) dolu olarak şematize edilmiştir (Glasser, 1992). Suyun içine batırılmış bir silis taneciğinin yüzeyi, artan yüzey alanı ve düzensizliğe bağlı olarak artış gösteren zayıf bir asidik karakterdedir. Şekil 11'de görüldüğü gibi silis, Si atomuna bağlı 4 oksijen atomundan oluşan silis dörtyüzlüsüdür (tetrahedri). Oksijen atomları bir valansları ile silisyuma bağlı kaldıklarından diğer valansları serbesttir. Böylece, silis dörtyüzlüsünün serbest dört negatif bağı mevcuttur (Cucq,2005; Glasser, 1992). Şekil 11'de silisli agreganın yüzeyi de gösterilmektedir. Normalde, saf suda bile yüzey oksijenleri hidroksile haldedir. Yüzey araştırmaları bu karışık yüzeyin bir kaç atom, bazen onlarca atom derinliğinde olduğunu ortaya koymuştur. Agregalar hidroksilce zengin bir ortama yerleştirildiğinde hidroksile olma potansiyelleri artar. İyi kristalize olmuş kuvars için de böyle bir potansiyel söz



konusudur, ancak hidroksile olma hızı o kadar yavaştır ki inşaat mühendisliği için geçerli zaman aralığında bunu gözlemlemek mümkün değildir. Sıcaklık, reaksiyonu belirgin şekilde artırır, hidrotermal koşullarda ince öğütülmüş kristalin kuvars oldukça reaktiftir. Ancak, reaktif agregalar normal ortam koşullarında bile kristalin kuvarsa kıyasla oldukça hızlı hidroksile olur (Glasser, 1992).



Şekil 10. Agregaya yüzeyi ile temas halinde olan boşluk çözeltisi ve çimento hidratasyon ürünleri (Glasser, 1992).



Şekil 11. Silis dörtyüzlüsü (tetrahedri) (Cruq, 2005)

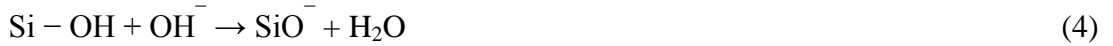
ASR sonucu oluşan ürün su emerek genişler ve betonun yapısını tahrip eder. Reaksiyonun Denklem (1) ve (2)'de idealize edildiği gibi oluştuğu varsayılır:



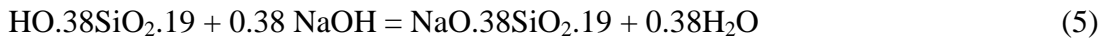
Reaksiyonun normal ortam koşullarında gelişimi ile ilgili pek çok araştırma yapılmıştır. Reaksiyonun ilk aşamasında yüksek pH'a sahip boşluk çözeltisi, agreganın Si-O-Si bağları ile reaksiyona girerek silanol bağları oluşturur (Dent-Glasser vd., 1981) (Denklem 3).



Su içeren silisli agregalar (opal gibi) zaten yapısında fazlaca silanol bağı bulundurmaktadır. Bu silanol grupları asidik karakterdedir ve bazik olan boşluk çözeltisi ile reaksiyona katılmaya hazırdır. Silanol grupları, hidroksil iyonlarının ikinci saldırısı ile yeni bir çözülmeye maruz kalır; ortama H<sub>2</sub>O molekülleri vererek =SiO<sup>-</sup> formuna dönüşür ve su içindedağılır (Denklem 4).



Negatif yüklü SiO<sup>-</sup>, pozitif yüklü sodyum, potasyum ve kalsiyum iyonlarını, oluşan jelin içine çekerek denge sağlamaya çalışır. Bu olayın kimyasal açılımı Denklem 5'de görüldüğü şekildedir.



Denklem 5'deki reaksiyonda ortamın iyon dengesi Na<sub>2</sub>O yardımıyla kurulmuştur. Diğer katyonlar da bu reaksiyona katılır. Denklem 6'da görülen üçüncü aşamada daha fazla siloksan Si-O-Si köprüsü hasara uğrar (Glasser, 1992).



Son aşama, jelin su emmesi ve sonuç olarak hacminde artış meydana gelmesidir. Jelin oluşturduğu hacim artışı, reaksiyon bölgesinin yakınlarında mikro çatlaklar meydana

getirir. Zamanla çatlaklar birbirleriyle bir araya gelerek çoğalır ve betonun yapısını tahrip ederek yapısal elemanda hasar meydana getirir. Bazı durumlarda bu çatlaklardan içeriye girebilen diğer zararlı etkiler de betonda oluşan hasarı arttırabilir. Betonun içinden akan su etkisiyle süzülme (leaching) ve yüzeyde kalsiyum karbonat birikimi görülebilir. Çatlaklardaki jelin etrinjite ( $C_3A.3CaSO_4.3H_2O$ ) dönüşümü ile birlikte etraftaki çimento hamurunda ikincil kaba kristalin etrinjitin ve ikincil portlanditin ( $Ca(OH)_2$ ) oluşumu da gözlemlenmiştir. Bu tür oluşumların gözlemlendiği betonların çoğunda betonun sülfat seviyeleri normaldir. Bu durum, etrinjit oluşumunun betonda dışarıdan meydana gelen bir sülfat etkisi ile oluşmadığını, etrinjit oluşumu için gerekli sülfatın betonun içinden sağlandığını göstermektedir. Hidrate olan alkali silis jeline doğru taşınan su ile birlikte gelen sülfat iyonlarının etrinjit kristallerinin oluşumunu ve gelişimini sağladığı düşünülmektedir (Swamy, 1992).

### 1.5.2. Pesimum Oran

En yüksek genleşmeyi sağlayan reaktif bileşenler oranına pesimum oran denir. Reaktif bileşenler bunun altında veya üstünde olduğunda, genleşme azalmaktadır. Pesimum oran, agregadaki reaktif malzemede olduğu gibi betonun alkali içeriği için de söz konusudur (Hobbs, 1988; Bektaş, 2004).

Şekil 12’de reaktif madde olarak %5 oranında opal içeren agreganın pesimum davranışı görülmektedir. Pesimum davranış, grafik A, B, C ve D olarak dört ayrı bölgeye ayrılarak açıklanmıştır (Hobbs, 1988).

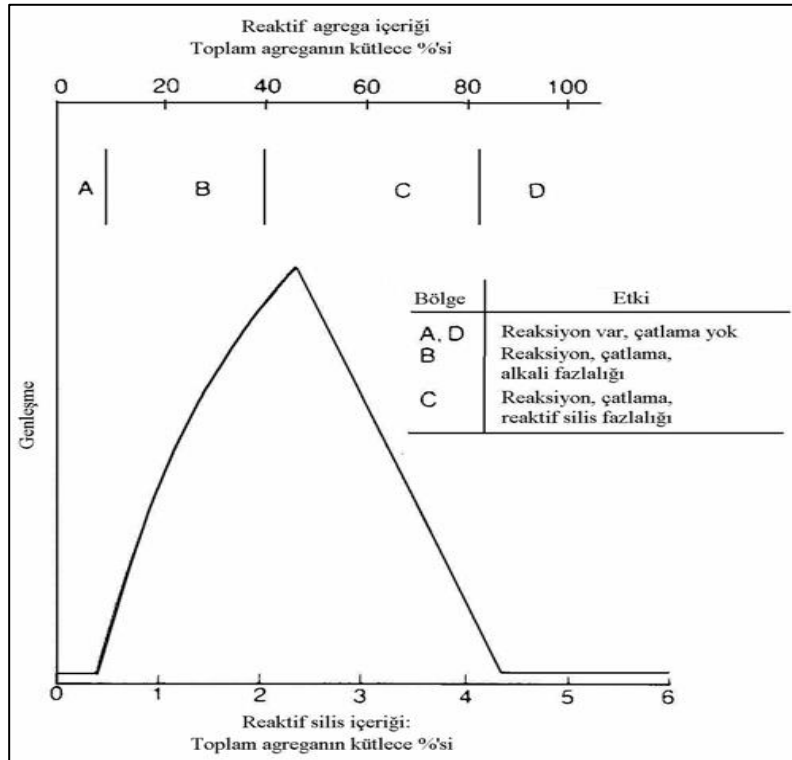
A Bölgesi: Reaktif silis miktarı düşüktür ve betonun sertleşmesinden sonra oluşan jelin hacimsel artışı çatlama yol açacak yoğunlukta değildir.

B Bölgesi: Beton sertleştikten sonra da reaksiyon devam etmektedir. Reaksiyonun yoğunluğu çatlama yol açacak büyüklüktedir. Genleşme, tüm reaktif silis tükendiğinde veya reaksiyon seviyesi yeteri kadar düştüğünde durur. Bu bölgede, alkali miktarı aşırıdır ve reaksiyon ürününün kompozisyonu büyük olasılıkla alkali/reaktif silis oranından bağımsızdır.

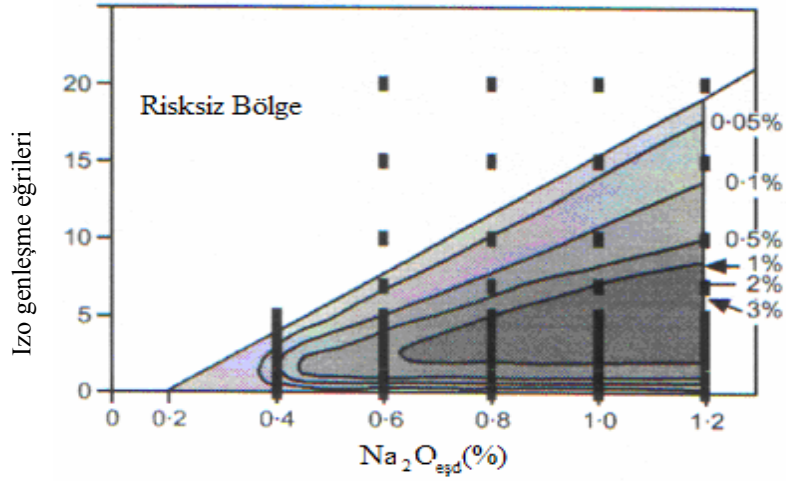
C Bölgesi: Reaksiyon, beton sertleştikten sonra da devam eder, çatlama oluşur. Reaksiyon, boşluk suyundaki alkali miktarı önemsiz bir seviyeye düştüğünde veya alkaliler tükendiğinde durur. Bu bölgede reaktif silis miktarı aşırıdır ve reaksiyon ürününün alkali/silis oranı ile su emme miktarı, azalan alkali/reaktif silis oranı ile azalma gösterir.

D Bölgesi: Reaktif silis miktarı çok fazladır ve reaksiyon o kadar hızlıdır ki beton sertleştikten sonra oluşan jel miktarı çatlama yaratmayacak kadar az olmaktadır. Betona zararlı etkisi olmayan fazla miktarda jel oluşabilir.

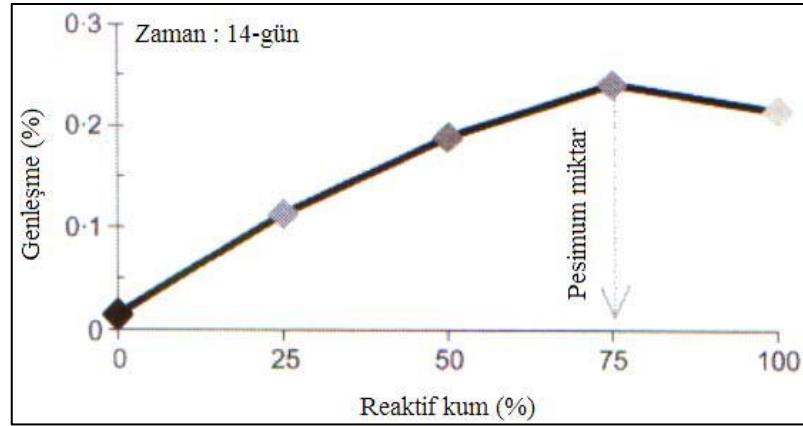
Maksimum genleşmede reaktif silis miktarı, hidroksil iyonu veya alkali konsantrasyonunu önemsiz seviyelere kadar indirebilir veya tüm sodyum ve potasyum alkalilerini tüketebilir. Bu davranışı gösteren agregaların pesimum oranlarının bilinmesi ve beton dizaynının bu ayrıntıya dikkat edilerek hazırlanması ile olası ASR hasarlarının azaltılması sağlanabilir. Fransada'daki LCPC laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda opal için elde edilen pesimum reaksiyon bölgesi Şekil 13'de görülmektedir. Şekildeki renksiz bölge zararlı reaksiyon olasılığı olmayan kısımdır (Merriau vd., 2003). (Merriau vd., 2003), çalışmalarında Bastogne kumtaşı olarak bilinen, kimyasal ve mineralojik açıdan incelendiğinde alkali reaktivitesi gösteren bir tip agreganın farklı oranlarda reaktif olmayan kireçtaşı ile verdiği pesimum oranı belirlemiştir. Bu amaçla Hızlandırılmış harç çubuğu metodu deneyi uygulamış ve en yüksek genleşmeyi reaktif agreganın % 75 oranında kullanılması ile elde etmiştir (Şekil 14).



Şekil 12. Pesimum davranış (Hobbs, 1988).



Şekil 13. Reaktif opal agregası için pesimum oran (Merriaux vd., 2003).



Şekil 14. Bastogne kumtaşı için pesimum oran (Merriaux vd., 2003).

### 1.5.3. ASR Ürünleri

Alkali silis reaksiyonu ürünlerinin kompozisyonu, boşluk çözeltisinin kompozisyonuna, reaktif silisin tipine, reaksiyon sıcaklığına ve reaksiyona giren ürünlerin konsantrasyonuna bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Reaksiyona uğramış bir betonun çatlaklarında yer alan jel genelde transparan ve reçinemsiz olup viskozitesi kaba motor yağı ile reçine arasındadır. Jel örneklerinin viskoziteleri arasında kayda değer farklılıklar bulunmaktadır. Örneklerin bazıları yeterince sıvı olup çatlaklar arasından akarak beton boşluklarını tamamen veya kısmen doldurur. Tipik olarak, jeller havayla temas ederek zamanla karbonatlaşır, beyaz ve kuru bir hal alır. Bunlarda aynen kurumuş kilde olduğu gibi kuruma çatlakları gözlenir (Poole, 1992).

ASR ürünlerinin kompozisyonu ve morfolojisi ile ilgili çalışmalar son yıllarda yapı malzemesi üzerinde uygulanan tarayıcı elektron mikroskobu çalışmalarının artmasıyla önem kazanmıştır.

ASR jelinin görsel incelemesine dayalı bir çalışmada, (Thaulow vd., 1996), çimento hamurundaki çatlaklarda ve hava boşluklarında amorf jele rastlarken kaba agrega parçacıklarının içinde gülsü kristal yapıda ASR ürünleri belirlemiştir (Moranville 1989). Reaksiyon ürünlerini jeller ve kristaller olmak üzere iki şekilde sınıflandırır. Jeller masif (yoğun) veya süngersi (dokulu ve taneli) görünümlü olarak tanımlanmaktadır. Jelin görünümündeki bu farklılıklar, kuruma esnasındaki büzülmenin tipi veya miktarına bağlı olabileceği gibi, farklı kompozisyonlardaki jellere de bağlı olabilir. Kristalin ürünlerin ise tabakalı veya gülsü, dikensi veya çubuksu ve yapraksı olmak üzere tipik morfolojileri vardır. Hızlandırılmış harç çubuğu metoduna göre kürlenmiş harçların reaksiyon ürünleri ile gerçek yapılarda meydana gelen ASR ürünleri hem morfolojik hem de kimyasal açıdan benzerlik göstermektedir.

Genel olarak kabul gören teori, amorf jelin zamanla kristalize hale geldiğidir. Jelin kristalize olmasını açıklayan pek çok mekanizma öne sürülmüştür. Araştırmacıların bir kısmı jelin kuruması ile kristalizasyonun gerçekleştiğini belirtmiştir. (Cole ve Lancucki, 1983), 12 gün oda koşullarında kürendikten sonra 110 °C'ye ısıtılan ASR jeline kristalizasyona rastlamıştır. Kristalize olmuş jellere genellikle agrega içerisinde rastlandığına ve çimento hamurundaki çatlaklarda daha az rastlandığına değinmiştir (Andersen ve Thaulow,1990). Kristalize ürünler ile amorf yapıda olanlar arasındaki kimyasal kompozisyon farklılığının çimento hamuru boşluk suyunun kimyası ile agrega boşluklarında yer alan suyun kimyasının farkından ileri geldiğini öne sürülmüştür. Yumuşak x-ray geçirimli mikroskop ile yaptıkları analizlerde alkali silis jelinin kalsiyum ve sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde kristalize olduğunu gözlemlemiştir (Kurtis vd., 1998)

1898'lerde inşa edilmiş olan Farnsworth Battery yapısındaki beton örneklerinde fazla miktarda kristalize olmuş ASR ürününe rastlanmıştır. EDS incelemeleri sonucunda, amorf jellerin kristalize jele kıyasla sodyum ve potasyum iyon konsantrasyonunun daha az olduğu buna karşın kalsiyum iyon konsantrasyonunun daha fazla olduğu belirlenmiştir. Kristalize jele yakın bulunan amorf yapıdaki jellerin ise sodyum ve potasyum iyon konsantrasyonları daha fazla olup kalsiyum iyon konsantrasyonları daha azdır.

Jel kompozisyonunun analiz sonuçları çok değişken bir aralıktadır. Tablo 5’de farklı kaynaklardan elde edilen jel analiz sonuçları görülmektedir (Poole, 1992).

Tablo 5. Alkali silis jeli kimyasal analiz sonuçları (kütlece %)

Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	% 100’e göre fark	Referans
12,9	---	53,9	2,9	0,6	29,8	Stanton (1942)
12,9	---	53,4	2,6	0,8	30,2	
14,9	5,2	61,7	0,6	---	17,6	Idorn (1961)
13,4	5,1	65,5	0,5	0,2	15,3	
12,4	4,9	69,9	0,3	0,5	12,0	
17,9	8,2	73,7	1,1	0,1	0,0	
9,4	4,1	72,8	1,3	0,2	15,3	
14,6	6,2	61,9	---	0,1	12,0	
16,2	5,7	56,8	---	---	21,3	
8,2	4,1	56,1	17,4	0,2	14,0	
8,3	5,0	28,5	22,4	0,2	35,6	
1,2	0,4	51,4	29,9	10,0	17,1	Poole (1975)
7,4	0,7	53,0	22,1	10,0	16,7	
1,5	13,9	38,9	27,3	---	17,4	Gutteridge ve Hobbs (1980)
0,4	4,7	51,1	21,5	---	22,3	Regourd (1983)
---	0,6	27,9	35,2	---	36,2	
1,0	6,9	61,5	9,2	---	21,3	Oberholster (1983)
1,0	6,2	53,8	8,2	---	30,7	
1,8	5,5	49,9	12,8	---	29,9	
1,0	5,2	50,4	12,0	---	30,7	
1,4	9,0	62,9	12,5	---	13,8	
0,8	7,4	53,2	10,0	---	28,4	
1,2	4,1	66,5	6,5	---	21,7	
3,7	12,9	43,3	21,8	0,8	14,0	Mullick ve Samuel (1986)
3,9	11,7	49,4	15,9	0,5	16,7	
2,65	9,37	40,0	18,6	0,2	29,18	Baillemont vd. (2000)

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

1. Kısmen reaksiyona uğramış ve şişmiş silis
2. Nispeten saf alkali-silikat çözeltileri veya çeşitli alkali ve su içeriklerinde jeller
3. Neredeyse sabit kompozisyonda (su içerikleri hariç) iki komponentli basit karışımlar. Kirkpatrick (1991)'in araştırmaları bu olasılığı doğrulamaktadır.

#### **1.5.4. ASR Ürünlerinin Genleşme Mekanizması**

Oluşan genleşmeler betonun çekme gerilmesini aştığında çatlaklar meydana gelir. Alkali-silis jelinin hasara yol açan özeliği su emerek genleşme olduğundan, genleşmeye yol açan mekanizmalar üzerinde durmakta fayda vardır. Bu konuda farklı teoriler mevcuttur.

Absorblanma teorisine göre ASR genleşmesi, jelin hacimsel konsantrasyonuna, gelişme hızına ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Jelin gelişme hızı yavaş olduğunda, jelin beton içinde yayılması sebebiyle içsel gerilmelerin oluşması önlenir. Jelin hızlı gelişmesi durumunda ise, içsel gerilmeler betonu genişletirip çatlatacak kadar yüksek olur (Hobbs, 1988).

Ozmotik basınç teorisine göre çimento hamuru, silikat iyonlarına karşı geçirimsiz bir membran gibi davranır (Hansen, 1944). Bu membran, içinden su, hidroksil iyonları ve alkali metal iyonlarının difüzyonuna izin verirken, silikat iyonlarının difüzyonuna engel olur. Bu durumda, reaksiyon oluşan her bölge, bu membran tarafından tutulmuş çimento hamurunda artan bir basınç oluşturur. Hansen'e göre (1944), beton boşluk çözeltisinin bu membrandan difüze olması reaksiyonu da hızlandırmaktadır. Vivian (1950), reaksiyondan sonra da çatlamların devam etmesi ve çimento hamurunun geçirimsiz bir membran gibi davranmasının olanaksız olduğunu belirterek bu teoriyi eleştirmiştir (Hobbs, 1988).

Betondaki ASR ürününün kompozisyonu zamanla çimento hamurundan kalsiyum iyonu toplamasıyla değişime uğramaktadır. ASR ürününün kalsiyum içeriği, ürünün betondaki yeri ve yaşına bağlı olarak değişmektedir (Diamond, 2000). Yine de kalsiyum iyonlarının ASR genleşmesine etkisi tartışmalıdır. Powers ve Steinour (1955)'un teorisine göre, beton boşluk çözeltisindeki kalsiyum iyonu konsantrasyonunun alkali iyonu konsantrasyonuna oranı jel genleşmesini kontrol etmektedir. Kalsiyum/alkali iyon oranı yüksekse “şişmeyen” (veya şişmesi sınırlı) tipte bir kalsiyum-alkali-silis kompleksi oluşması beklenir. Tersine kalsiyum/alkali iyon oranı düşükse “şişen” tipte alkali silikat hidrattan oluşan ve az miktarda kalsiyum içeren jel oluşur. Ayrıca, güvenli reaksiyon



oluşması için, bir kısım silisin reaksiyona uğrayan tabakalar arasından difüze olması; su, kalsiyum iyonları ve alkalilerin de reaksiyon bölgesine difüze olması gerekmektedir. Wang ve Gillot (1991), kalsiyum-alkalisilis jelinin şişmeyen özellikte olduğunda hemfikirdir. Ancak yazarlar, ortamda aşırı miktarda kalsiyum hidroksit bulunmasının da reaksiyonu ilerleteceğini belirtmektedir. Araştırmacılar, kalsiyum iyonlarının ASR ürünleri içindeki alkalilerin yerine geçerek bunların ortama salıverilmesini desteklediğini ve açığa çıkan alkalilerin de ortamdaki reaktif silisle reaksiyona girerek genleşmeleri arttırdığını belirtmişlerdir.

### 1.5.5. ASR'nu Etkileyen Faktörler

ASR'na bağlı beton hasarı ilk defa Kuzey Amerika' da 1940'da Stanton tarafından fark edilen bir olgudur. Sonraları birçok diğer ülkelerde gözlenmiştir. Stanton'un ilk makalesinden sonra birçok çalışma yayınlanmış, fakat ASR mekanizması halen tam olarak anlaşılamamıştır. Yine de, başlıca etkenler tanımlanmıştır. Su varlığında gözenek çözeltisindeki alkaliler belirli agregalarda bulunan reaktif silis ile etkileşir. Önemli rol oynayabilecek ilgili etkenler; çevresel bağıl nem, betonun gözenekliliği ve betondaki mineral katkıdır (S.P.C.; Stokowski, 1999-2003)

Genleşen ASR'nin oluşması için üç şartın sağlanması gerekmektedir:

1. Agregada silisin reaktif bir formu bulunmalıdır.
2. Esas olarak çimentodan gelen yeterli miktarda alkali sodyum ( $\text{Na}^+$ ) ve/veya potasyum ( $\text{K}^+$ ) bulunmalıdır.
3. Betonun veya harcın gözenek yapısında % 85' ten az olmayan yeterli miktarda nem olması gereklidir.

Bu koşullardan herhangi biri eksikse, ASR'den dolayı oluşan zararlı genleşme meydana gelemez. Agrega bileşiminin yanı sıra alkali-silis reaksiyonunun meydana gelmesinde çevre şartlarının da önemli etkileri bulunmaktadır. Zararlı ASR sıcaklığın yaklaşık  $+ 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $+ 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasında bulunması halinde meydana gelmektedir. Bunun dışında, ortamın porozitesi ve yeterli nemin bulunması halinde alkali-silis reaksiyonundan dolayı hasar meydana gelebilmektedir.

### 1.5.5.1. Agregadaki Reaktif Silis ve Agregada Özellikleri

Betonda alkali silis reaksiyonunun oluşabilmesi için herhangi bir formda “reaktif silis”in 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, mikrokristal ve kristal yapıya kadar geniş bir aralığa dağılırlar. Kimi durumlarda kuvars kristallerinin oluşumu sırasında içsel gerilmeler oluşur. Bu tür kuvars mineralleri içeren agregalar reaktiftir.

ASTM C295 standardına göre agregalardaki reaktif silis bileşenleri, opal, kristobalit, tridimit, silisli ve bazı volkanik camlar, çört, camsıdan kriptokristalin faza kadar asit volkanik kayaçlar, sentetik silisli camlar, bazı argilitler, filitler, metamorfik grovaklar ile grovak, filit, şist, gnays, gnays granit, damar kuvarısı, kuvarsit ve kumtaşı içeren yüksek metamorfik kayaçlardır.

Reaktif agreganın boyutunun ve agregada köşeliliğinin ASR genleşmelerine etkisini inceledikleri çalışmada bir tip doğal yuvarlak agregada ile aynı agreganın kaba parçacıklarının kırılması ile elde edilen kırma doğal agregayı, reaktif olmayan kireçtaşı agregasının yerine farklı boyutlarda kullanmıştır. Reaktif parçacıkların boyut etkisi kırma agregada daha belirgindir. Daha küçük ve büyük agregada parçacıklarında köşelilik etkili olmazken orta boy parçacıklarda köşeliliğin genleşmeye etkisi önem kazanmaktadır. Ayrıca, ayrı ayrı reaktif tane boyutları deneye tabi tutulan örneklerin toplam genleşmesi, tümü reaktif agregadan oluşan kontrol örneğine kıyasla daha fazladır. Bunun sebebi, Shayan (1992) tarafından öne sürülen çok fazla reaksiyon bölgesinin birbirlerini etkileyen bir bariyer meydana getirmesi olabilir (Ramyar vd., 2005).

Reaktif olmayan agreganın kullanılması ideal olanıdır ancak her zaman pratik bir çözüm değildir. Agreganın performansı hakkında bilgi sahibi olmanın en doğru yolu iyi bir saha kaydına sahip olmasıdır. Ancak, her agregada için saha kaydı bulunmayabilir. Dolayısıyla çoğunlukla agreganın potansiyel reaktivitesini ölçen deneyler sayesinde agreganın kalitesi hakkında fikir edinilebilir (Farny ve Kosmatka, 1997).

Agreganın tane boyutunun ve gradasyonunun genleşmeye olan etkisi üzerindeki araştırmalar sınırlıdır. Bazı araştırmacılar, reaktif silis içeren agregaların reaktif parçacık boyutu azaldıkça harc çubuğu genleşmelerini arttırdığını, ancak parçacık boyutu 20 µm'nin altına düştüğünde genleşmenin aynı şekilde artmadığını belirlemişlerdir. Büyük agregada

parçacıkları kullanıldığında genleşmelerin ertelendiğini belirtmişlerdir. Sadece reaktif ince agregaya kullanıldığı takdirde betonun genleşmesinin ilk aşamalarda oluştuğunu ve ileriki zamanda sabit kaldığını belirlemişlerdir. Diğer taraftan, reaktif agregaya sadece kaba agregaya kullanıldığı takdirde ise genleşmeler yavaş ve daha uzun sürede meydana gelmektedir. Silisli agregaya için agregaya boyutu 0,15 ile 10 µm arasında iken agregaya boyutu küçüldükçe genleşmelerin arttığını belirlenmiştir. Agregaya boyutu arttıkça maksimum genleşmeyi veren çimento/agregaya oranı azalmaktadır. Agregaya boyutu büyüdüğünde genleşmeler yavaş ilerlediğinden tek-boyutlu agregaya gradasyonunun kullanımının ASR genleşmelerini azaltmak açısından daha avantajlı olduğu söylenebilir (Andıç, 2002).

### 1.5.5.2. Betonun Alkali İçeriği

Klinkerin alkali içeriği, klinker tanelerinin yüzeyinde bazen sülfat tuzları şeklinde serbest halde bulunan alkaliler ile klinker minerallerinin yapısında bağlı olarak bulunan alkaliler olmak üzere iki farklı tiptedir. Klinkerdeki tüm mineraller katı eriyikte bir kısım alkali tutabilme özelliğine sahiptir. Ancak, sodyumun çoğu  $C_3A$ 'da bulunmaktadır. Potasyum daha düzgün yayılmaktadır ve genelde  $C_2S$  (belit) fazı ile camsı fazlar tarafından tutulmaktadır (Swamy, 1992).

Alkali içeren klinker hidrate olduğunda, yüzeydeki ve klinker mineralleri yapısındaki alkaliler açığa çıkma hızı açısından farklı davranır. Suda çözünebilir sülfatlar halinde bulunan alkaliler bir an önce çözeltiye salıverilirken klinker tanelerinde bağlı olan alkaliler buldukları bileşenlerin hidrasyonuna bağlı olarak zamanla salıverilir. Toplam karakteristik alkali salınım hızı toplam alkali içeriğine ve hızlı veya yavaş alkali bırakan minerallerdeki alkali dağılımına bağlı olmak üzere bir çimentodan diğerine değişmektedir (Swamy, 1992).

Mineral katkıları söz konusu olduğunda, F sınıfı uçucu küllerin alkali içeriklerinin çoğu potansiyel olarak ortama salıverilmek için hazırdır. Hemen hemen alkali içeriğinin çoğunu camsı fazda çözünür halde bulunduran cürüflarda da alkali, ortama rahat salınır. (Swamy, 1992).

ASR hasarı gören yapıların çoğunluğunun yüksek alkalın çimento ile üretildiği bilinmektedir. Normal portland çimentosunun içeriğinde diğer oksitlere kıyasla az miktarda sodyum ve potasyum oksit bulunmaktadır. Çimento veya betonda bulunan toplam alkalilerin eşdeğer sodyum ( $Na_2O_{eşd}$ ) adı verilen bir değerle tanımlanması standart hale

gelmiştir. Bu tanım, sodyum ve potasyum alkalilerinin moleküler oranlarının bağdaştırılmasıyla oluşturulmuştur (Denklem 7).

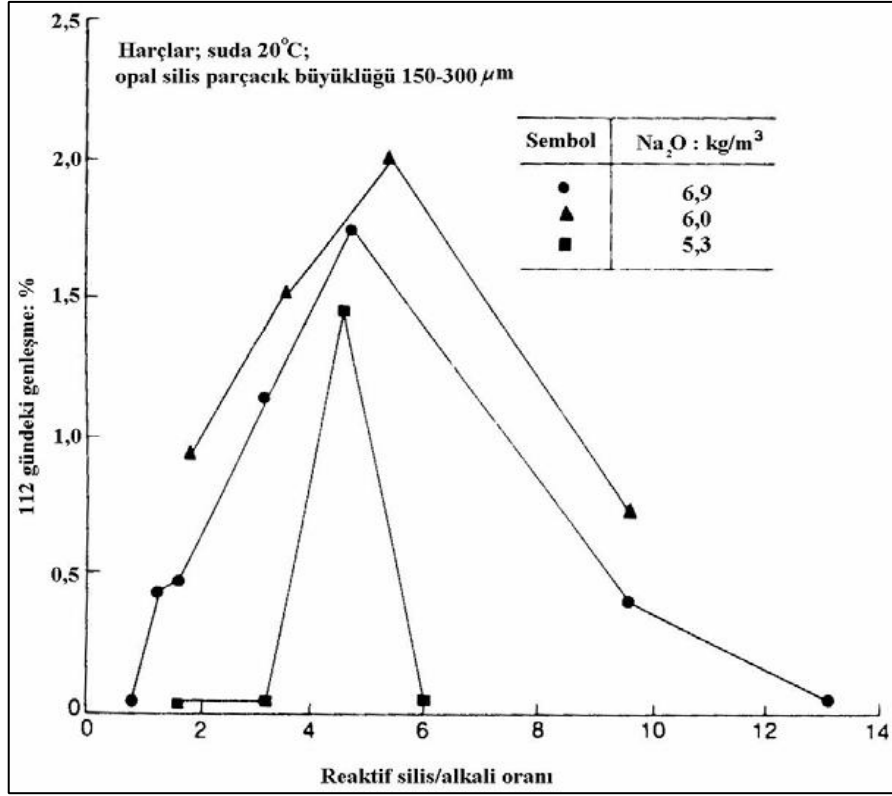
$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşdeğer}} = \text{Na}_2\text{O} (\text{kütlece } \%) + 0.658 \text{ K}_2\text{O} (\text{kütlece } \%) \quad (7)$$

Çimentonun alkali içeriği, hammaddenin doğal özelliklerine bağlı olduğundan çoğu zaman bazı yörelerde düşük alkalin çimento üretmek neredeyse imkansızdır. Dahası, çevre koruma ile ilgili yönetmelikler çimento üreticilerinin düşük alkalin çimento üretmesini engellemektedir.

Betonda kullanılan çimentonun alkali içeriğinin değişmesi, betonun hidroksil iyon konsantrasyonunu, alkali içeriğini ve reaktif silis/alkali oranını değiştirir. Suda bekletilen harç çubuklarında çimentonun alkali içeriğinin genleşmeye etkisi Şekil 15'de görülmektedir. Harçların çimento içeriği  $670 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Çimentonun alkali miktarı arttıkça pesimum davranış eğrisi genişlemekte ve maksimum genleşme reaktif silis/alkali oranı 4.5 civarında iken meydana gelmektedir (Hobbs, 1988).

Betonun alkali içeriği arttıkça ASR riski de artmaktadır. Avrupa ve Kanada'da betonun toplam alkali yükü olarak adlandırılan bir kavram kullanılmaktadır. Bu kavram, bağlayıcı malzeme olarak sadece portland çimentosu içeren betonlara uygulanmaktadır. Ancak, bazı değişikliklerle mineral katkı içeren karışımlara da uygulanabilmektedir. Sadece portland çimentosu içeren karışımlar için betonun toplam alkali içeriği Denklem (8)'de gösterildiği gibidir.

$$(\text{kg çimento/m}^3) \times (\% \text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd çimento}}) / 100 = \text{kg alkali/m}^3 \quad (8)$$



Şekil 15. Çimentonun alkali içeriğinin genleşmeye olan etkisi (Hobbs, 1988).

Devamlı kuruma-ıslanma tekrarları, alkalilerin lokalize konsantrasyonuna sebebiyet verebilir. Nem, beton içerisinde gezindikçe çözünen alkalileri de beraberinde taşır ve beton yüzeyinde buharlaştığında geride yüksek miktarda alkali bırakır. Alkali göçü olarak da adlandırılan bu durum, toplam alkali miktarı düşük bile olsa beton yüzeyinde lokal alkali konsantrasyonu artışına sebebiyet vermektedir (Farny ve Kosmatka, 1997). Diamond (1997), ıslanma-kuruma tekrarında alkalilerin bir kısmının kalıcı olarak sabitlendiğini ve tekrar ıslanma ile çözünemez hale geldiğini belirtmiştir.

### 1.5.5.3. Yeterli Nem

Betonda bulunan nemin ASR açısından iki önemli rolü vardır. Nem, alkali iyonlarının reaksiyon bölgelerine göçünü kolaylaştırır ve oluşan jel ürünü nem alarak genleşir. Servis ömrü boyunca nem etkisinde kalmayan yapılarda zararlı ASR çatlakları görülmemiştir. Araştırmalar, genleşen ASR'nun 21-24°C sıcaklık aralığında bağıl nemin % 80 üzerinde olduğu durumda oluştuğunu göstermiştir (Stark, 1992; Farny ve Kosmatka, 1997; Poole, 1992).

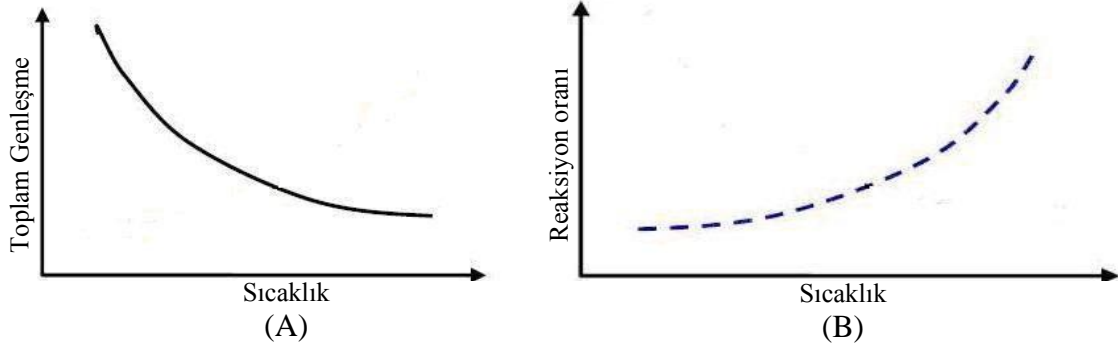
Reaksiyonun bu iki aşamalı etkisi ve oluşan reaksiyon ürününün su emmesi laboratuvar ortamında gösterilebilir. Laboratuvarda hazırlanan bir beton prizma örneği nemli bir ortamda saklanmadığı zaman jel oluşumu sonucunda oluşan genleşmeler önemsiz mertebededir. Ancak, bir zaman sonra kuru ortamdaki nemli ortama alınan örnekler hemen su alarak sürekli nemli ortamda saklanan benzer prizmalara yaklaşık aynı oranda genleşme gösterir. Bu örnek, reaksiyonun düşük nemde oluşmasına rağmen genleşmenin oluşabilmesi için jelin su emerek şişmesi gerektiğini göstermektedir. Bunun için yüksek nem içeren ortama ihtiyaç duyulmaktadır.

Betonun geçirimsizliği azaltılarak dış nemin ve alkali içeren çözeltilerin beton içerisine ilerleyişi düşürülebilir. Bunun için en basit yol su/çimento oranının düşürülmesi ve kürlenmenin doğru yapılmasıdır. Ancak, geçirimsizliğin bu şekilde azaltılmasının ASR açısından dezavantajları da vardır. Düşük su miktarı, boşluk çözeltilisinin pH'nın yüksek olmasına yol açar (ACI Committee 221, 1998).

#### **1.5.5.4. Ortam Sıcaklığı**

Alkali silis reaksiyonu kimyasal bir reaksiyon olduğundan dolayı, sıcaklığın, ASR oluşumuna etkisi büyük orandadır. Genelde, sıcaklık artışı kimyasal reaksiyonların hızlı bir şekilde gerçekleşmesine neden olur.

Locher'in (1973) yaptığı bir çalışmada, sabit alkali içeriği kullanarak sıcaklığın genleşmeye etkisini belirlemiştir. Sıcaklığın belli bir aralıkta (38 °C-40 °C) olduğu halde ASR genleşmelerinin yüksek oranda geliştiği görülmüştür. Şekil 16'da, sıcaklık ile toplam genleşmenin ve reaksiyon oranı ilişkisi gösterilmektedir. Sıcaklık arttıkça toplam genleşmenin azaldığı ve reaksiyon oranının arttığı görülmektedir (Wigum vd., 2006).



Şekil 16. (A) Sıcaklık - toplam genleşme ilişkisi, (B) Sıcaklık - reaksiyon oranı ilişkisi (Locher, 1973).

Kimyasal reaksiyonların çoğu, artan sıcaklıkla hızlanır. Jones ve Tarleton'un (1958), çimento tableti üzerindeki agreganın aşırı alkali çözeltisine maruz bırakıldığı 'jel pat' deneyi ile alkali silis reaksiyonunun bu tipte bir reaksiyon olduğu kanıtlanmıştır. Normal ortam sıcaklığında opal gibi yüksek reaktiviteye sahip agregalar bir kaç gün içerisinde jel oluşumu göstermiştir. Sıcaklık 50 °C gibi bir değere yükseltildiğinde ise 24 saat içerisinde bu agregaların üzerinde jel oluşumu gözlenmiştir. Ayrıca, flint gibi daha az reaktiviteye sahip agregalar ise normal ortam sıcaklığında reaksiyon göstermeseler dahi yüksek sıcaklıklarda jel oluşumuna sebebiyet vermiştir. Sıcaklık aynı zamanda reaksiyonunun ikinci aşaması olan jelin su emmesi, oluşan genleşmenin mikro çatlaklara yol açması ve devamında betonda hasar meydana getirmesini de etkilemektedir. Bunlar, laboratuvar deneyleriyle kanıtlanmıştır.

#### 1.5.5.5. Sürüklenmiş Havanın Etkisi

Reaktif agregaya içeren ancak alkali silis reaksiyonu sebebiyle hasar görmeyen yapılar incelendiğinde, jelin hava boşluklarını tamamen veya kısmen doldurduğu görülmektedir. Bundan dolayı, jelin hasar görmemiş betonda hava boşluklarını doldurarak ilerlediğini ve hava sürükleyici katkı kullanımının alkali silis reaksiyonu sebebiyle oluşan hasarı önleyebileceği söylenebilir.

### 1.5.5.6. Mineral Katkıların ASR'na Etkisi

Mineral katkıları, tek başına bağlayıcı olarak tanımlanmayan, ince öğütüldüğünde ve nemli ortamda çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özeliğine sahip bileşenler oluşturan silisli veya silisli-alüminli malzemelerdir. Mineral katkıların ASR genleşmelerini azaltma mekanizmaları hakkında tam bir fikir birliğine varılmış değildir. Bu konuda farklı teoriler öne sürülmüştür (Glasser, 1992);

- a) Çimentodan daha az reaktif olan katkı, ortama hızlı alkali veren portland çimentosu yerine kullanıldığında seyreltici olarak görev yapar. Örneğin, çimentonun yerine % 50 oranında cüruf kullanıldığında, cürufun bünyesindeki alkalilerin ancak yarısı bir yıl içerisinde reaksiyona girer. Dolayısıyla, su/çimento oranı aynı olan sadece çimentodan üretilmiş bir kontrol numunesine kıyasla cüruf lu karışımın boşluk çözeltilisindeki alkali miktarı da daha düşük olur.
- b) Katkılı çimento içeren sistemlerin hidratasyon ürünleri de normal çimentolu sistemlere göre farklılık gösterir. Bu tür karışımlardaki hidratasyon ürünleri, alkalileri bağlamada daha etkindir. Portland çimentosu içeren karışımların hidratasyon ürünü olan C-S-H'nin tipik Ca/Si oranı 1,8'dir. Cüruf, uçucu kül, silis dumanı gibi katkıları ortama girdiklerinde, C-S-H'nin Ca/Si oranını düşürür. Ca/Si oranı düştükçe, C-S-H ürününün yüzey şarjı pozitiften negatife doğru değişim gösterir ve alkaliler gibi katyonları bağlama yeteneği kazanır.
- c) Katkılı çimentolu karışımlardan elde edilen betonların geçirimsizliği düşük olduğundan alkalilerin reaktif agregaya ulaşması bir miktar önlenmiş olur.
- d) Katkıları, çimento hamurunun  $\text{Ca(OH)}_2$  içeriğini azaltır ve dolayısıyla pH'ını düşürür.
- e) Katkılı sistemlerdeki dayanım artışı, oluşan ASR gerilmelerine karşı betona direnç kazandırır.

#### 1.5.5.6.1. Uçucu Külün ASR'na Etkisi

Termik santrallerde, elektrik enerjisinin üretimi için toz haline getirilmiş kömür yakılmaktadır. Kömürün yakılması sonucu çeşitli gazlar ve yanmamış katı atıklar ortaya çıkar. Açığa çıkan külün yaklaşık % 80'i baca gazıyla beraber dışarı "uçar". Bu küller, atmosfere salıverilmeden bacalardaki filtreler tarafından tutulur. Bunlar literatürde uçucu



kül olarak adlandırılır. Uçucu küllerin ana kimyasal bileşenleri; silis ( $\text{SiO}_2$ ), alümin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )'tur. Uçucu küller, çeşitlerine göre farklı miktarlarda kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ), magnezyum oksit ( $\text{MgO}$ ), sülfürtrioksit ( $\text{SO}_3$ ) ve yanmamış kömür parçacıkları (karbon, (C)) içerirler. Uçucu kül puzolanik özellik gösterir. Yüksek oranda (% 10'dan fazla)  $\text{CaO}$  içeren uçucu kül puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özellik de gösterir.

Uçucu küllerin ASR genleşmeleri üzerindeki etkileri, çimentonun ve uçucu külün kimyasal ve mineralojik özellikleri ile agreganın reaktivite derecesine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Nixon ve Gaze (1983), ve Stark (1978) yavaş reaksiyona giren agregalar için çimentonun kütlece % 20-30 oranında uçucu külle yer değiştirmesi halinde ASR sebebiyle betonda oluşabilecek genleşmelerin azaldığını belirlemişlerdir.

Stark vd. (1993), hızlandırılmış harç çubuğu deneyine tabi tuttıkları üç farklı uçucu kül, bir çeşit yüksek fırın cürufu ve üç farklı agrega için buldukları sonuçları yorumlamışlardır. ASTM F sınıfı uçucu küller için tavsiye edilen minimum kullanım yüzdeleri, 15 ile 25 arasında değişmektedir ki bu değerler pratikte uygulamada kullanılan değerlere yakındır. ASTM C sınıfı uçucu kül için ise % 60'ın üzerinde kullanım gerekmektedir. Fakat bu değerlerin üzerinde kullanılması halinde de ASR sebebiyle oluşan genleşmeleri önleyebileceğine dair kesin bir gösterge yoktur. Yapılan çalışmalarda, ASR genleşmesinin, uçucu külün çözünebilir alkali ile amorf silis yüzdesine ve inceliğine bağlı olduğunu, ancak, uçucu külün toplam alkali miktarına bağlı olmadığını belirtmiştir (Shayan, 1995).

#### **1.5.5.6.2. Silis Dumanının ASR'na Etkisi**

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutularak yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve % 85-% 98 kadar silis amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye "silis dumanı" denir. Silis dumanı, amorf yapıda ve çok ince taneli malzeme olmasından dolayı ve yüksek oranda  $\text{SiO}_2$  içermesi sebebiyle, mükemmel bir puzolanik malzemedir (Akçaözoğlu, 2007).

Silis dumanının rengi açık griden koyu griye değişen renkte olabilir. Rengindeki koyuluk, karbon içeriğinin artmasıyla artmaktadır. Su ile birleşmiş durumda, siyaha yakın bir renk sergilemektedir (Erdoğan, 2007).

Silis dumanı ince öğütölmüş parçalar içermektedir. Parçaların büyük çoğunluğunun boyutları 0,1-0,2 µm arasındadır. Bu boyut portland çimentosunun taneciklerinin boyutundan 100 kez daha küçüktür. Silis dumanının esas bileşeni kristalize olmayan amaorf haldeki silistir (Akçaözöğlü, 2007). Çimento ağırlılığının % 5-15' i kadar silis kullanılmasıyla üretilen betonlarda, betondaki alkali azalmasıyla, alkali-silis reaksiyonları daha az miktarda oluşmaktadır.

#### **1.5.5.6.3. Yüksek Fırın Cürufunun (YFC) ASR'na Etkisi**

Demir cevherinden demir üretimi esnasında yüksek fırında kireçtaşı veya dolomit erimiş cüruf oluşur. Bu cüruf, erimiş haldeki demirin üzerinden akar ve ayrık halde depolanabilir. 1500-1600 °C sıcaklığındaki eriyik cüruf yaklaşık olarak, % 30-40 oranında SiO<sub>2</sub> ve % 40 oranında CaO içerir ki bu portland çimentosunun kompozisyonuna benzemektedir. Cüruflar yavaşça soğutulursa yapısında melilit veya mervinit minerallerini kristalleşir. Bu mineraller çok az bağlayıcı değer taşıdığından bu gibi cüruflar beton agregası veya yol temel tabakası olarak kullanılabilir. Suda granüle edilerek (peletleme yöntemi ile) hızlıca soğutulduğunda camsı bir yapı oluşur. Camsı yapıdaki cüruf kurutularak öğütöldüğünde hidrolük bağlayıcı özellik gösterir. Bu yapı, hidrate olmak için alkalın bir ortama ihtiyaç duyar ancak silis dumanı ve F sınıfı uçucu kül gibi kirece ihtiyaç duymaz (Hooton vd., 2000).

Yüksek fırın cürufunun inceliği, karışımın piriz süresi, kötü sıkıştırılma sebebiyle hapsolan hava miktarı ve dayanım kazanma hızı gibi diğer parametreler de yüksek fırın cürufu kullanılan betonlarda ASR gelişmelerini etkiler. Yüksek fırın cürufundaki alkaliler camsı fazlarda bağlı bulunmakta ve portland çimentosuna nazaran daha yavaş bir şekilde ortama salıverilmektedir. Yüksek fırın cürufunun toplam alkali içeriği (asitte çözünebilir alkali) kütlece % 0,3 ile % 2,6 eşdeğer sodyum oksit değerleri arasında değişmektedir.

Tablo 6. Yüksek fırın cürufu alkali ve efektif alkali içerikleri (Hobbs, 1988).

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

#### 1.5.5.6.4. Doğal Puzolanların ASR'na Etkisi

“Puzolan” terimi aslında şiddetli yanardağ patlamaları sonucu oluşan camsı piroklastik malzemeler için kullanılmaktadır. Literatürde uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi yapay malzemeler için de “yapay puzolan” terimi zaman zaman kullanılmaktadır. Kil, şeyl ve zeolit gibi betonda kullanılan doğal malzemeleri de “doğal puzolanlar” olarak gruplandırmak mümkündür.

Puzolanların, betonda genişleme yaratan reaksiyonlara karşı etkili oldukları bilinmektedir. Kireç-puzolan reaksiyonu sonucu boşluk çözültüsü pH'nın düşmesi neticesinde puzolanlar etkili olur. Ayrıca, puzolanlar alkalilerle reaksiyona girerek alkalileri tüketir ve genişleme yaratmayan ürünler oluşturur. Puzolanların ASR'unu azaltmadaki etkisi, puzolanların reaktivitesine bağlıdır ve bu etki çimento yerine kullanılacak miktarı belirler.

Bir portland çimentosu ve puzolan karışımı reaksiyona girdiği zaman, bu reaksiyon, sönmüş kirecin ve alkalilerin, (SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) oksitleri ile asit-baz reaksiyonu biçiminde tepkimeye girmesiyle meydana gelir. Bu bağlamda iki olay gerçekleşir: birincisinde, serbest sönmüş kireç miktarı zamanla azalır, ikincisinde de, portland çimentosunun hidratasyonu esnasında ortaya çıkanlara benzer biçimde, C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) ve kalsiyum-alumino-silikat miktarlarında artış olur. Çimento hamurunda gözenek yapısındaki iyileşme (azalma) biçiminde fiziksel olarak kendini gösteren puzolanik reaksiyon, kimyasal dayanıklılık ve mekanik dayanımdaki artışın nedeni olduğu belirtilmektedir. Ekonomik kazanç sağlamak veya erken hidratasyon ısısını azaltmak, ileri yaşlardaki dayanımı arttırmak, alkali agrega reaksiyonu tahribatına veya sülfat tahribatına direnci arttırmak, su sızdırmasını azaltmak ve zararlı çözültülerin beton içine sızmasına karşı direnci arttırmak amaçları için portland çimentosuna veya katkılı portland

çimentosuna doğal puzolanların belirli oranlarda karıştırılabileceği belirtilmektedir (Karahana vd., 2005).

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

#### **1.5.5.7. Kimyasal Katkıların ASR'na Etkisi**

Kimyasal katkıları potansiyel olarak;

- a. Silisin çözünmesini durdurabilir veya azaltabilirler,
- b. Alkali-silis jelinin oluşmasına engel olur ve karakterini değiştirebilirler,
- c. Jelin genişmesini azaltabilirler (Abit, 1998).

Mc Joy ve Caldwell (1951), çeşitli kimyasal katkıların ASR üzerindeki etkilerini inceleyen ilk araştırmacılarıdır. Araştırmada, pireks camı ile  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriği %0,57 ve %1,15 olan iki tip çimento kullanarak ASTM C227 harç çubuğu metodunu uygulanmıştır. Tablo 7'de yüksek alkalin çimento ve farklı oranlarda çeşitli kimyasal katkıları içeren karışımların 8 haftalık periyot sonunda kontrol numunesine kıyasla genişmelerdeki azalmaları verilmiştir. Bazı bakır ve amonyum tuzlarının etkili olduğu, ancak en iyi sonucu lityum tuzlarının verdiği görülmektedir.

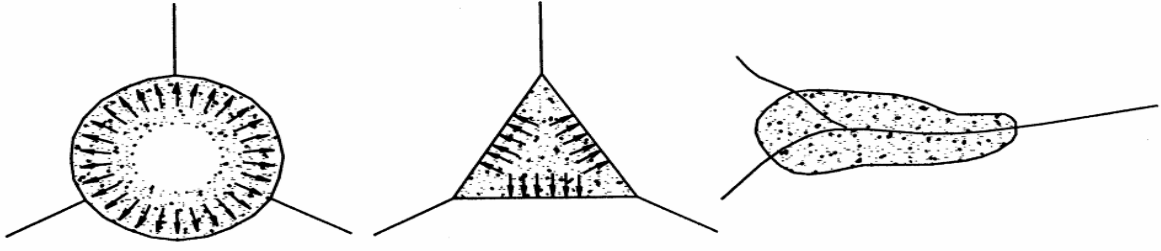
Tablo 7. Bazı kimyasal katkıların ASR üzerindeki etkileri (Mc Joy ve Caldwell, 1951).

Kullanılan kimyasal katkı	8 Haftalık genişmedekiazalma (%)
Alüminyum tuzu	75
Ba karbonat	3
Ca karbonat	-6
Cr fosfat	9
Cu klorür	29
Cu sülfat	46
Li klorür	34
Li klorür	88
Li karbonat	62
Li karbonat	91
Li florid	82
Li nitrat	20
Li sülfat	48
Na klorür	15
Na karbonat	44
NH <sub>4</sub> karbonat	38
Zn karbonat	34

### 1.5.6. Alkali-Agrega Reaksiyonunun Belirtileri

Betonda ASR ürünleri oluşmadıkça ASR hasarından bahsedilemez. Yapılacak dikkatli incelemelerle tespit edilebilecek ASR belirtileri; genişme, betonda çatlaklar, yüzey birikintileri, yüzey parçalanmaları-patlama ve renk değişimleridir. ASR varlığının en tipik göstergesi, genişmelerle ortaya çıkan harita çatlak tipindeki çatlak desenleridir. ASR çatlaklarının deseni, yapılarda oluşan zemin ve muhtelif yüklerin neden olduğu çatlak desenlerinden oldukça farklıdır.

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 (şişer). ASR'den kaynaklanan çekme gerilmeleri nedeni ile 3 veya 4 kollu yıldız şeklinde çatlaklar (Şekil 17) (Arslan, 2001).



Şekil 17. ASR'den kaynaklanan çatlaklara ilişkin örnek görünüşler

### 1.5.6.1. Genleşme ve Çatlama

ASR genleşmeleri reaktif agreganın içinde veya etrafında jel oluşumunu takiben jelin su emmesi ile başlar. Su emen jel, her yönde yaklaşık 10 MPa veya daha fazla gerilme oluşturur. Homojen küresel bir agreganın etrafındaki çimento hamuruna uyguladığı basınç her yönde eşit olup böyle bir hacim artışı karşılayan minimum çatlak sayısı üçtür ve genelde bu çatlaklar birbiri ile  $120^\circ$  açı yapar. Bu çatlaklar üç-dört kollu yıldız şeklinde agrega etrafında başlayarak yayılır. Bu çatlakların birbiri ile birleşmesi sonucunda zorlanmamış ve donatısız betonda klasik harita çatlakları oluşur (Figg, 1987). Zorlanma bulunan yapılarda ise çatlaklar gerilme doğrultusunda yönlenir (Poole, 1992). Donatılar ana gerilmeye paralel bulunduğu için doğrusal ASR çatlakları da bu yöndedir. Ancak, çelik korozyonu çatlaklarından farklı olarak bunlar donatı üzerinde değil, donatılar arasında oluşur. Şekil 18'de bir karayolu köprü kolonu üzerindeki yük ve alkali silis reaksiyonu etkisiyle oluşan çatlamlar görülmektedir. Bu kolon daha sonra köprüden ayrılarak parçalara ayrılmış ve reaksiyonun devam etmesine izin verilmiştir. Yük kaldırıldıktan sonra kolonun yüzeyinde tipik harita çatlakları gözlenmiştir. Donatının her iki yönde de eşit olarak dağıldığı döşeme gibi yapılarda ise çatlaklar genellikle dikdörtgen biçimli harita çatlakları şeklindedir (Şekil 19) (Figg, 1987; Swamy, 1992).



Şekil 15. Mott MacDonald test sahasında bir karayolu köprüsünün kolonu, Devon (Swamy, 1992)



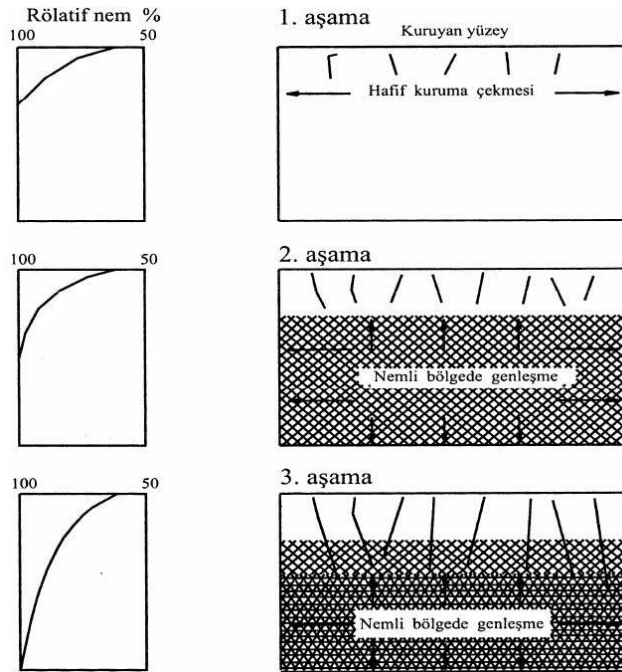
Şekil 19. İzmir Adnan Menderes Havalimanı değiştirilen pist ve taksi yolu betonu (Mayıs, 2004).

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 tahripkar tuzlu suların donma çözülme etkisi ile parçalanma hızlanır ve artar. Benzer şekilde ASR dışında başka nedenlerle oluşan çatlaklardan içeri giren tahripkar 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 (Danay,1994).

ASR hasarı tespitinde görsel inceleme ile çatlakların yeri, uzunluğu, genişliği, görünür derinliği ve devamlılığı ile çatlağın agreganın içinden mi yoksa çevresinden mi devam ettiği belirlenebilir. Çatlaklarla ilgili olarak, yapıdaki gerilme yönü, donatının yeri

ve diğer zorlanmalar tespit edilmelidir (Palmer, 1988). Özellikle yağmurdan sonra betonun kuruması sırasında ince çatlaklar daha belirgin şekilde gözlemlenebilir (Farny ve Kosmatka, 1997).

Beton kaplamalarda ve bordürlerde ASR'nin neden olduğu genişmeden dolayı oluşan çatlamlar, önce rutubetin fazla olduğu serbest uçlarda ve birleşme yerlerinde oluşur. 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 arttırır. Şekil 20'de 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 genişleme 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 (Helmuth vd., 1993).



Şekil 20. Zemin üzerinde yanıl basınca maruz kalmayan beton kaplamalarda ASR çatlakları için model



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.

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 doğmasına neden olur.

Serbestçe genişemeyen, yük ya da 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.

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.

ASR, reaksiyona giren silika tükeninceye veya por çözelti PH'ı yeterli miktarda azalınca ya da jelin oluşumu ve genişmesini tamamen durduracak boyutta kuruma gerçekleşinceye kadar devam edecektir. Bu üç aşamalı olarak açıklanan süreç, tamamen kesilebildiği gibi, süreli ya da sürekli olarak devam da 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 başlayacaktır.

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 genişmeyi ve deformasyonunu sınırladığından

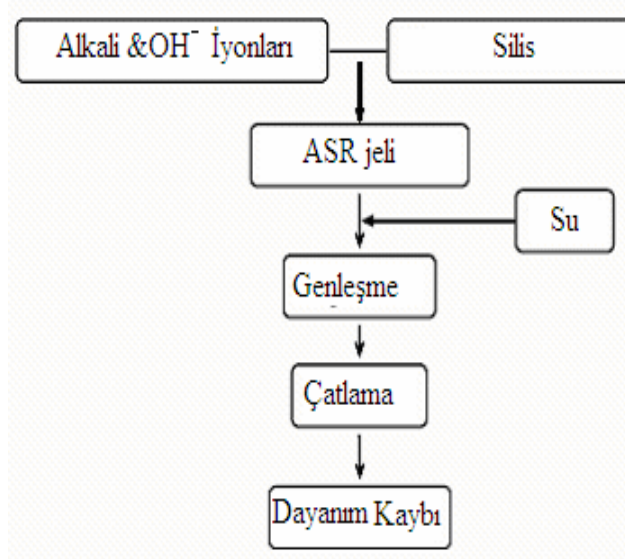
çatlaklar düşey doğrultulu değildir, tersine düşey doğrultuda deformasyonu sınırlayan koşullar olmadığından çatlaklar yatay doğrultuludur (Stark,1992).

### 1.5.6.2. Yüzey Birikintileri

Beton çatlakları boyunca beyazdan griye kadar değişen renklerde ASR jeli ya da kalsiyum karbonat tortuları görülebilir. Bu birikintilere bazen yüzey tortuları veya salgıları da denir. Çatlaklardan dışarı sızan bu maddeler beyaz sarımtırak ya da renksiz, viskoz, akışkan, mumsu, elastik yapışkan veya sert olabilirler (Farny ve Kosmatka, 1998).

### 1.5.7. ASR Hasarlarının Teşhisi

ASR kaynaklı zarara neden olan aşamaların şematik gösterimi Şekil 21’de verilmiştir.



Şekil 16. ASR kaynaklı hasarın şematik gösterimi (Bektas vd., 2005).

Reaksiyon ürünleri olmadan zararlı ASR genleşmelerinden bahsetmek mümkün değildir. Ancak tersi geçerlidir, ASR ürünlerinin gözlemlenmiş olması zararlı ASR genleşmelerinin olduğu anlamında değildir (Farny ve Kosmatka, 1997).

ASR sebebiyle oluşan genleşme ve çatlakların, beton yapılarda yapısal ve kullanımsal sorunlar doğurduğu açıktır. Geleneksel yöntemler, yüzeyde görülen çatlakların belirlenmesi ve hasarlı betondan karot alınarak dayanımının ölçülmesine dayalıdır. Oysaki araştırmalar, betonda ASR sebebiyle oluşan hasarların beton basınç dayanımından çok elastisite modülünü ve çekme dayanımını etkilediğini göstermektedir (Swamy ve Al-Asali, 1989).

## **1.6. Alkali-Silika Reaksiyonunu Belirleme Yöntemleri**

### **1.6.1. ASR Reaksiyonunda Kullanılan Deney Yöntemleri**

ASR tespitinde kullanılan deney metotları ülkeden ülkeye değişiklik göstermektedir. Bunun nedeni, ASR'nun lokal bir problem olması ve kullanılan agregaların petrografik özelliklerinin bölgeden bölgeye farklılık göstermesidir. Bu şekilde, ülkeler, kendilerine özgü deney metotları geliştirmiştir.

Son yıllarda özellikle harç ve beton numunelerinin hızlandırılmış koşullarda kürlenmesi ve belirli bir periyot sonunda genleşme değerlerinin ölçülmesine yönelik deney metotlarının standartlaştırılması konusunda bir eğilim vardır. Yine de bu deneylerin değerlendirilmesinde kullanılan genleşme limitleri yapı tipine ve/veya agrega tipine göre değişebilmektedir.

ASR reaksiyonunun belirlenmesi için değişik deney metotları geliştirilmiştir. Bu deney metotları ASR'nin genleşme özelliğinden yararlanılarak yapılan deneyler ile kimyasal yolla yapılan deneyler olarak ikiye ayrılabilir (Gün, 2007).

#### **1.6.1.1. Harç Çubuk Deneyi (ASTM C 227)**

Amerikan standartlarında, ASTM C227 “Çimento-Agrega Kombinasyonlarının Potansiyel Alkali Reaktivitesi için Deney Metodu (Harç Çubuğu Metodu)” olarak isimlendirilmiştir. Deney yöntemi, söz konusu agrega ile üretilen harç çubukları genleşmelerinin ölçülmesi esasına dayanır. Agregalar standartta belirtilen gradasyona getirilir; gerekirse kırma işlemi de uygulanır.

Bu metot, belirli şartlarda kürlenmiş 25x25x285 mm boyutlarında hazırlanan harç çubuklarının belirtilen süre sonucundaki boy değişimlerinin (genleşme yüzdesi) ölçülerek çimento-agrega kombinasyonlarının alkali kaynaklı genleşmelere açık olup olmadığını belirlemek amacıyla yapılır. Bu metot, aynı zamanda mineral ve kimyasal katkıların ASR genleşmesindeki azalmaları ölçmede kullanılmaktadır (Ramyar vd., 2002). Harç çubuk yöntemi (ASTM C227) ile hızlandırılmış harç çubuk yöntemlerinde (ASTM C 1260) kullanılan harç çubukları aynı şekilde hazırlanmaktadır (Zichao, 2003).

Deney sonucunda belirtilen sınır değer üzerinde genleşmeler elde edilmesi halinde genleşmelerin alkali reaktivitesi sonucu oluştuğunun tespiti için deney numuneleri veya agregalar üzerinde petrografik analiz uygulanması veya kimyasal metot ile inceleme yapılması önerilmektedir.

Harçta kullanılacak agregalar 4-8, 8-16, 16-30, 30-50 ve 50-100'nolu elek serilerinden elenerek Tablo 8'de verilen karışım oranlarında ve miktarlarında kullanılır.

Tablo 8. Harç çubuğu ve hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri için agrega karışım oranları

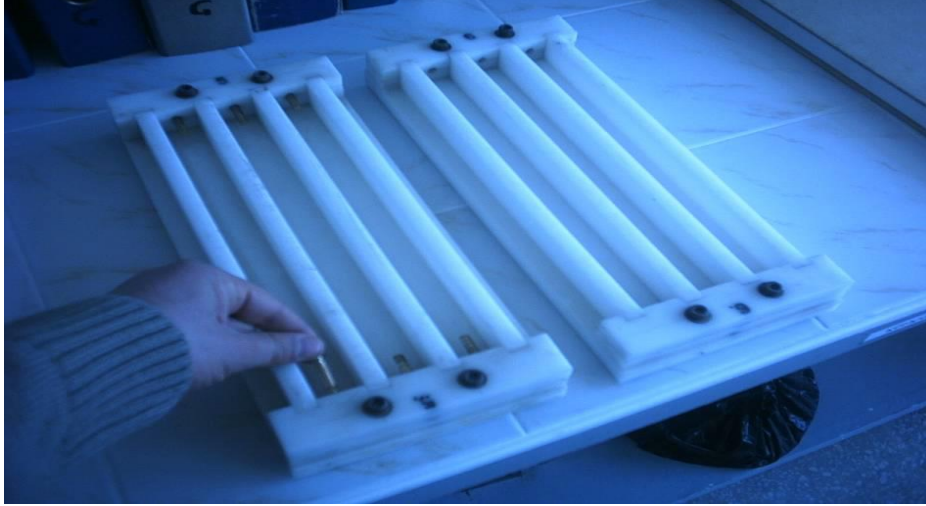
Elek göz açıklığı, mm		Ağırlıkça, %
4,75 (No.4)	2,36 (No.8)	10
2,36 (No.8)	1,18 (No.16)	25
1,18 (No.16)	0,60 (No.30)	25
0,60 (No.30)	0,30 (No.50)	25
0,30 (No.50)	0,15 (No.100)	15

Harcın, agrega türüne göre Su/çimento oranı ASTM C 109 "Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars" da belirtilen esaslara uygun olarak belirlenir. Bu esaslara uygun olarak dere agregası ve kırmataş harç çubuğu dökümü için gerekli malzeme karışım miktarları Tablo 9' da verilmiştir.

Tablo 9. Harç çubukları malzeme karışım miktarları

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			
Doğal agregata	100 gr	250 gr	250 gr	250 gr	150 gr	0,45	199,8	444
Kırma taş agregata	100 gr	250 gr	250 gr	250 gr	150 gr	0,50	222	444

Harç çubuklarının üretiminde kullanılan çimentonun alkali içeriği en az % 0,6 Na<sub>2</sub>O eşdeğeri olmalıdır. Harç çubuklarının üretiminde, 3 adet örnek dökümüne imkan veren 25x25x285 mm boyutlarında, plastik kalıplar kullanılmaktadır (Şekil 22).



Şekil 22. Üçlü harç çubuğu kalıbı

Şekil 23'de görüldüğü gibi kalıba harç çubuklarının boy değişimlerini ölçmek için, 7 mm çapında ve 32 mm boyundaki pirinçten üretilmiş pimler kalıplarda açılan deliklere yerleştirilmektedir.

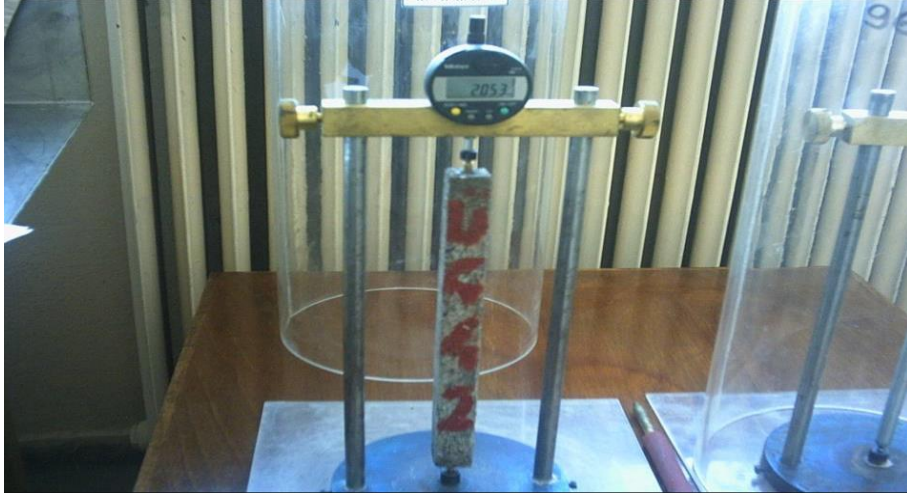


Şekil 23. Harç çubuklarının uçlarına yerleştirilen pim

En az dört adet harç numunesi hazırlanır. Kalıplara harç yerleştirilirken şişlenerek sıkıştırılmalıdır. Harç çubukları (Şekil 24) su üzerinde, % 100 bağıl nemde, 37,8 °C'de kürlenirler. 14 günden başlayarak belirli periyotlarda 12 ay veya daha uzun süre boy ölçümleri 0,002 mm (Şekil 25) hassasiyetle kaydedilir. ASTM C33 standardına göre, reaktif olmayan agrega için genleşmeler altı ayda % 0,10 ve üç ayda % 0,05'in altında olmalıdır. Agreganın reaktivitesindeki farklılıkların anlaşılabilmesi için daha uzun süreli genleşmeler de kaydedilmelidir (Farny ve Kosmatka, 1997).



Şekil 24. Harç çubukları



Şekil 25. Dijital komparatör ile örneklerin boy ölçümü

Birim boy değişim yüzdeleri belirlemede aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır (Denklem 9);

$$\% L = (\Delta L \div L) \times 100 \quad (9)$$

Eşitlikte;

%L = Boy değişim yüzdesi,

$\Delta L$  = Örneğin boy değişimi (mm),

L = Örneğin ilk uzunluğu (mm), göstermektedir.

Bu metot çimento-agrega kombinasyonlarının potansiyel alkali reaktivitesini ölçmede kullanılmaktadır. Agregaların karbonat reaktivitesini ölçmede etkili olmadığı belirtilmiştir. Reaktivitesi çok yüksek agregaya deneye tabi tutulmadığı sürece anlamlı deney sonuçlarını elde etmek bir yıl veya daha fazla sürer. Dolayısıyla deneyin uzun süreli olması dezavantajdır. Uzun süreli ölçümlerin sonucunda bile zararlı agregaların bazıları genleşme göstermeyebilir. Bazı hallerde de bu deney metodu yavaş genleşen agregaya ile zararsız agregaya arasında ayırım yapmaya elverişli değildir. Çünkü deney yönteminin koşulları yeterince şiddetli değildir veya bu ayırımın yapılabilmesi için uzun seneler ölçüm yapılması gerekebilir (Stark, 1993).

### 1.6.1.2. Hızlı Harç Çubuk Deneyi (ASTM C 1260)

Amerikan standartlarında, ASTM C1260 “Agregaların Potansiyel Alkali Reaktivitesi için Deney Metodu (Harç Çubuğu Deneyi)” olarak geçen bu deney, diğer genleşme deneylerine kıyasla kısa sürmesi sebebiyle avantajlıdır. Deney metodu, yüksek alkalin çözelti içerisinde yüksek sıcaklıkta bekletilen harç örneklerinin boy değişiminin ölçülmesi prensibine dayanır.

Bu deney, belirli çimento-agrega kombinasyonlarının davranışını değil, agreganın potansiyel reaktivitesini ölçmektedir. Bu metot, kür şartlarını ağırlaştırarak reaksiyonu hızlandırmakta ve agregaların reaktivitesinin 16 gün içinde belirlenmesine olanak vermektedir. Diğer metotlarda da belirtildiği gibi, uygulamadan önce agregaların petrografik analizinin yapılması ve limitlerin üzerinde genleşme görüldüğü takdirde reaktivitenin ASR sebebiyle oluşup oluşmadığının incelenmesi önerilmektedir.

Harç çubuklarının içerisine konulacak alkali çözeltisi, 1 N NaOH çözeltisi, 900 ml Saf suya 40 gr sodyum hidroksit konularak hazırlanır ve bu çözeltiliye sodyum hidroksit çözeltisi denir. Bu çözelti 80 °C’de sabit ısıda tutularak, harç çubukları bu çözelti içerisine konmaktadır (Şekil 26).



Şekil 26. Termostat’lı kür tankı

Standartta belirtilen gradasyondaki agregaya, kütlece çimentonun 2,25 katı kadar kullanılarak su/çimento oranı 0,47 olan harç karışımı hazırlanır. 25×25×285 mm boyutlarındaki kalıplara dökülen harç numuneleri 24 saat sonra kalıplardan alınarak ilk boyları ölçülür. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, kalıplarda numune üzerine



yapılarak suyun difüzyonunu önleyebilen standart kalıp yağları yerine teflon sprej gibi artık bırakmayan tipte kayganlaştırıcı materyal kullanılmasıdır. Kalıp sökümünden itibaren 1 gün süreyle 80 °C suda bekletilerek boy ölçümleri alınan numuneler, takip eden 14 gün boyunca 80 °C 1 N NaOH çözeltisinde bekletilir ve periyodik ölçümleri alınır. Standart, çimentonun alkali miktarı hakkında bir değer vermemektedir, bunun sebebi ise kur koşullarından dolayı numunelerin boşluk çözeltisi alkalinitesinin artmasıdır.

Bu işlemten sonra devam eden 3, 7, 14. günlerde boy ölçümleri alınarak birim boy değişim yüzdeleri harç çubuğu deney metodundaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır. Birim boy değişim yüzdelerini belirlemede harç çubuğu metodundaki aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır (Denklem 10);

$$\% L = (\Delta L \div L) \times 100 \quad (10)$$

Eşitlikte;

%L = Boy değişim yüzdesi,

$\Delta L$  = Örneğin boy değişimi (mm),

L = Örneğin ilk uzunluğu (mm), göstermektedir.

ASTM C 1260'a göre boy değişimindeki verilerin değerlendirilmesi aşağıdaki gibi yapılmaktadır;

-14 gün sonra ölçülen boy değişimi % 0,1'den küçük ise "Agrega zararsız",

-14 gün sonra ölçülen boy değişimi % 0,1 - % 0,2 arasında ise "Deney süresi uzatılarak örneklerin 28 günlük boy değişimleri ölçülür",

-14 gün sonra ölçülen boy değişimi % 0,2'den büyük ise "Agrega potansiyel olarak zararlıdır".

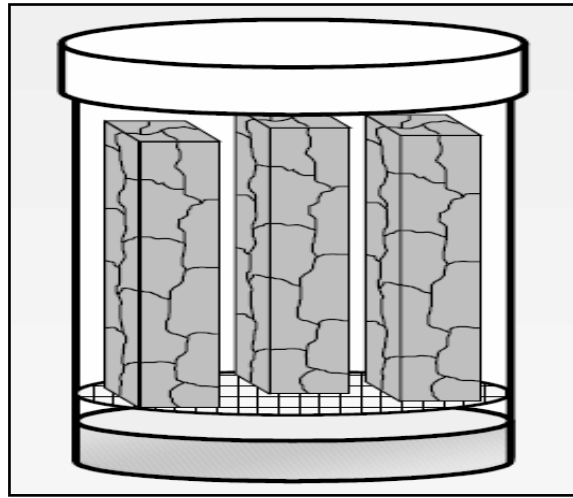
Agregaların, test yönteminde kullanılan ağır alkali ve yüksek sıcaklık koşullarına maruz kalma olasılıklarının düşük olması nedeniyle ASR geçmişi bulunmayan agregaların bazen test sonuçlarında reaktif oldukları ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle diğer testlerle birlikte kullanılmalıdır. Bu sert test koşullarının avantajı ise çok yavaş reaksiyon gösteren ve uzun süreli harç çubuk metodu ile alkali potansiyeli belirlenemeyen agregalar için kullanışlı olmasıdır.

### 1.6.1.3. Beton Prizma Deneyi (ASTM C 1293)

ASR'dan dolayı betonda meydana gelen uzunluk değişimlerini belirleyen standart deney metodudur. Beton prizmalarının boy değişimi ile agregaların alkali reaktivitesi ve katkıların etkinliğini ölçmede kullanılır. ACR'nu tespitinde de kullanılabilir.

Beton prizma testi, 75x75x285 mm boyutlarında hazırlanan harç çubuklarının zamana bağlı olarak genişleme miktarının ölçülmesi ile, çimento-agrega bileşimlerinin alkali kaynaklı genişlemelere açık olup olmadığı belirlenir. Bu deney metodunu uzun süreli harç çubuğu metodundan ayıran en önemli özellik, harç çubuk boyutları ve prizmaların hazırlanması sırasında karışım suyuna NaOH eklenerek karışımın alkali miktarının artırılmasıdır.

Deney uygulanacak agregası, ince agregası ise reaktif olmayan kaba agregası ile karıştırılarak kullanılır. Kaba agregasının reaktivitesi ölçülecek ise, reaktif olmayan ince agregası ile karıştırılıp belli gradasyona getirilen malzeme 75x75x285 mm kalıplara dökülür. Numunelerin çimento içeriği  $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$  olup su/çimento oranı 0,42 ile 0,45 arasında işlenebilirliği sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Kullanılan çimentonun eşdeğer  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriği karışım suyuna NaOH eklenerek çimentonun kütlece % 1,25'ine yükseltilir. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numunelerin ilk boy ölçümleri alındıktan sonra  $38^\circ \text{C}$  sıcaklıkta, su üzerinde (nemli ortamda) standartta belirtilen şekilde saklanır (Şekil 27) ve periyodik olarak ölçümleri alınır.



Şekil 17. %100 bağıl nemi sağlayacak şekilde tasarlanmış kap

Örneklerin boy ölçümleri alınmadan 16 saat önce saklama kapları kapalı bir şekilde  $23 \pm 1,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $73,4 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{F}$ )’de kür odasına konarak soğumaya bırakılmalıdır. Bu işlemin ardından dijital komparatörle harç çubukları üzerindeki ölçümler ilk olarak 7. 28. 56. günlerde ve 3, 6, 9, 12 aylarda yapılır ve daha sonra gerekirse her 6 ayda bir uzunluk değişimi ölçülür.

Bu metot, mineral ve kimyasal katkıların ASR genleşmelerine etkisi hakkında en gerçekçi sonuçları vermektedir. Mineral katkıların etkinliği değerlendirilirken, 2 yıllık genleşme değerinin % 0,04 olarak alınması ve karışımın alkali içeriğinin çimentonun kütlece % 1,25’i değerine arttırılması önerilmektedir (Berube ve Duchesne, 1992; Thomas vd., 1997).

Bu metot, beton üzerinde uygulandığından gerçeğe daha yakın sonuçlar vermekte ve bu sebeple diğer deney metotları yetersiz kaldığında kullanılmaktadır. Uzun süreli metotlar arasında ise  $38^{\circ}\text{C}$ ’de uygulanan ASTM C1293 beton prizma metodu en gerçekçi sonuçları vermektedir (Berube ve Fournier, 1992). Ancak, deneyin uzun sürmesi metodun dezavantajıdır.

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

#### **1.6.1.4. Kimyasal Yöntem (ASTM C 289, TS 2517/ Kasım 2010)**

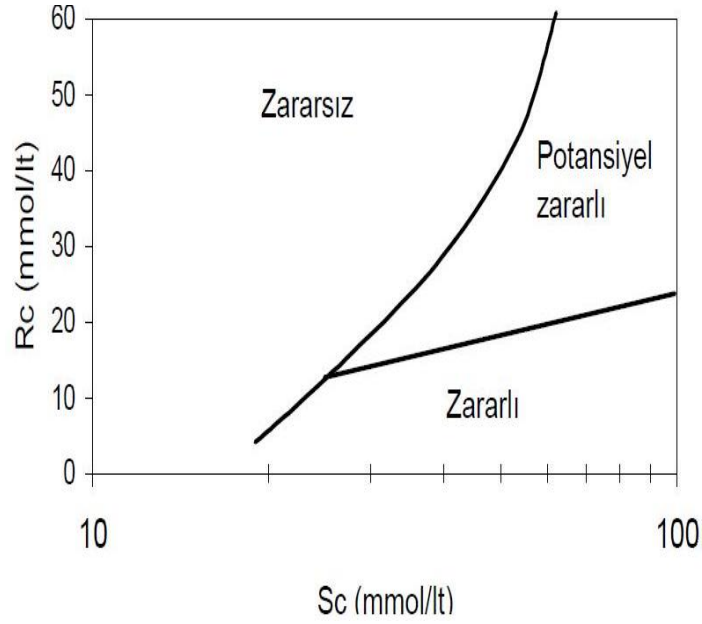
Agregaların potansiyel alkali-silis reaktifliği için standart deney metodudur. Agregaların 1N NaOH çözeltisinde bekletildikten sonra alkalinite ve çözünmüş silis miktarlarını analiz eden agrega deneyidir. Agregadaki diğer bileşenler silisin çözünürlüğünü etkilemektedir.

150  $\mu\text{m}$ ’lik elekten geçen malzemeyi tamamen uzaklaştırabilmek için, numune 150  $\mu\text{m}$  elek üzerinde yıkanarak elenmiştir, toz ve ince parçalardan arınması sağlanır. Yıkanan malzeme 24 saat süreyle  $105 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta etüvde kurutulur. Elenen, yıkanan ve kurutulan örneklerden elektronik tartı ile 25 g.’lık 3 adet örnek alınarak reaksiyon kabı içerisine konur. Bu kapların her birine 25 ml 1 N NaOH çözeltisi ilave edilir. 1 N NaOH çözeltisi, 900 ml saf suya 40 gr sodyum hidroksit konularak hazırlanır bu çözeltiliye sodyum hidroksit çözeltisi denir. İçerisine örnek konulmayan dördüncü kaba sadece 25 ml 1 N NaOH çözeltisi konur bu kap referans kabı olarak kullanılır.

Örnek kaplar  $80 \pm 1$  °C sıcaklıkta sabit tutulan su banyosuna konarak 24 saat bekletilir. Bu süre sonunda örnekler su banyosundan çıkarılarak 30 °C sıcaklığa kadar soğutulup kapakları açılarak kuru bir kap içerisine süzülür. Homojenliğin sağlanması için karıştırıldıktan sonra bir pipet yardımıyla 10 ml. çekilerek 200 ml.lik balon jöjeye alınır ve üzeri damıtık su ile 200 ml ye tamamlanır. Bu çözelti, çözünmüş silisin ve alkali azalmasının tayini için kullanılır.

Bu çözelti daha sonra filtre edilir ve asitte titre yöntemiyle çözülmüş silis ile alkalinitedeki azalma analiz edilir. Deney üç kere tekrar edilir. Sonuçlar daha sonra Şekil 28'deki eğride işaretlenerek kontrol edilir. Bu şekilde, Rc alkalinitedeki azalmayı, Sc ise çözünmüş silisi simgelemektedir. Eğer tüm sonuçlar eğrinin sol tarafındaki bölgede ise agrega zararsız olarak adlandırılabilir. Eğer sonuçlardan bir tanesi bile eğrinin sağındaki bölgede yer alırsa agreganın yüksek alkali içerikli betonda kullanımının zararlı gelişmelere yol açabileceği söylenebilir. Bu eğri, yüksek alkali içerikli harç çubuğu gelişmeleri, agregaların petrografik analizi ve betonda kullanılan agregaların saha performansları dikkate alınarak çizilmiştir.

Deney sonuçları, kalsit, dolomit, magnezit, siderit gibi kalsiyum, magnezyum veya demirli karbonatlar ile antigorit (serpentin) gibi magnezyum silikatlar içeren agregalar için doğru sonuçlar vermeyebilir. Ayrıca, bu deney, zorlanmış veya mikro-granüle kuvars içeren veya meta-grovak, metasilttaşı, metakuvars ve benzeri kayalardan oluşan yavaş ve geç silis-silikat reaktivitesi olan agregaların davranışlarını belirlemede kullanılamaz (ASTM C-289-94, 1994; TS 2517,1977)



Şekil 28. Alkalinitedeki azalma-çözünmüş silis grafiği

#### 1.6.1.5. Mikrobar Deneyi

Beton mikrobar deneyi, alkali-agrega reaksiyonu için universal hızlandırılmış deney metodu önerisidir. Yeni geliştirilen standartlaşmamış bir yöntemdir. Deneyin ileri araştırmaya ihtiyacı vardır.

Alkali-karbonat reaktif agregalar için (Xu vd., 2000)'de tanımlanan Chinese deneyinden sonra düzenlenmiştir. Deneyin kür esası ASTM C1260, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ile aynıdır. Ancak, kalıpların boyutları, agrega gradasyonu, su/çimento oranı ve deney süresi farklıdır. Beton mikrobar boyutları 40×40×160 mm'dir. Agrega gradasyonu 12,5 mm eleği geçen ve 4,75 mm elek üzeri kalan olarak seçilir. Su/çimento oranı 0.33'tur. Deneyin süresi 1 N NaOH çözeltisinde 80 °C'de 30 gün olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları metodun hem alkali-karbonat hem alkali-silis reaktif agregaları için uygulanabilir olduğunu göstermektedir (Grattan-Bellew vd., 2003). Deneyde kullanılan aletler, kalıpların uzunluk ölçüsünün 160 ± 2,5 mm ve kesit genişliklerinin ve 40 x 40 mm olması haricinde ASTM C490'a uygundur.

Agregalar, gerekirse kırılmalı, elenmeli ve 12,5 mm eleği geçecek ve 4,75 mm elek üzeri kalacak şekilde seçilmelidir. Bu gradasyon geçerli sonuçlar vermektedir. Ancak, standart bir deney için 4.75 mm elek üzeri kalan miktara ek olarak, orta elek 9,5 mm üzerinin de belirtilmesi uygun olmaktadır. Sadece bir agrega büyüklüğü kullanılması, farklı

kırma makinesi kullanılan laboratuarlarda gradasyonlarda farklılığa neden olabilir. Bu da laboratuvarlar arası varyasyon katsayısını arttırabilir. Böyle bir durumda, bunu belirlemede ilave deneyler gerekecektir.

Beton mikrobarlar için kuru malzemeler, agregası ve Tip 1 portland çimentosu (normal portland çimentosu) 1/1 şeklinde oranlanmaktadır. Üç beton mikrobar yapımı için 900 g çimento ve 900 g kuru agregası gerekmektedir. Su/çimento oranı 0,33 işlenebilirliğe göre ayarlanmıştır. Kullanılan çimentonun alkali içeriği % 0,9 Na<sub>2</sub>O eşdeğer olmalıdır. Numunelerin bekletildiği sodyum hidroksit çözeltisi fazla alkali içerdiğinden dolayı çimentonun alkali içeriği fazla önemli değildir.

Çimento ve suyun çoğu (290 ml) harç karıştırıcısına koyulup 60 saniye yavaş hızda karıştırılır. Karışımdan sonra kaseinin kenarları sıyrılır ve 90 saniye bekletilir. Daha sonra 60 saniye daha karıştırılır. ASTM C305’de belirtilen standart mikser küreği spiral sekili kanca tiple değiştirilir, agregası eklenir ve karışım bir dakika süre içinde yavaş hızda tekrar karıştırılır. Gerekirse, az miktarda su istenilen kıvamı elde etme amaçlı eklenebilmektedir. Karışım bir tokmakla kalıplara sıkı şekilde yerleştirilir. Kalıplar dolduktan sonra karışımın içerisindeki havayı çıkarmak için bir kaç saniye sarsma tablasına yerleştirilir. Plastik örtülü kalıplar kür odasında, veya nem dolabında 23 °C’de 24 ± 2 saat tutulur. Beton mikrobarlar kalıplardan alınıp uygun plastik kaplarda suya daldırılır. Kaplar 24 saat 80 °C’de fırında bekletilir. Saklama kapları fırından alınıp uzunluk ve kütle ölçümü yapılır. Bu ölçümler, sonradan gelen ölçümler için sıfır uzunluk ve kütleyi teşkil etmektedir. Kalıplar 80 °C’de 1 M NaOH çözeltisine aktarılıp, uzunluk ve kütle değişimi periyodik olarak 30 günde gözlemlenmektedir.

Mikrobarların uzunluğunu değerlendirmede, 160 mm kalıpların avantajı, bu uzunluğun Çin ve Japon araştırma laboratuvarları tarafından ve Avrupa’da RILEM tarafından kabul edilmiş olmasıdır. 160 mm kalıpların uygun görülmesi dünyanın her yerinde bu deney metodunda tek düzen yaratmasına dayanmaktadır. Ancak bunun tam sağlanması için 286 mm numunelerle ölçüm yapan Kuzey Amerika laboratuvarlarının 160 mm kalıplarda ölçüm için aparatlarını sağlaması veya değiştirmesi gerekmektedir. Değerlendirmeler, daha uzun numunelerde daha fazla genişleme oluşturduğunu doğruluyor ise, 286 mm kalıplar için bu ek bir avantajdır. Daha uzun numunelerle yapılan ölçümler duyarlılığı daha fazla sağlamaktadır.

Ölçüm sırasında numunelerin sıcaklık değişimi önemlidir. Kaplardaki numunelerin her zaman aynı düzende ölçümünü sağlamak gerekir. Çünkü ölçümlerin yapıldığı sırada

numunelerin sıcaklığı değişebilir. Raporlanan genleşmeler, 80 °C'i sağlama ve muhafaza etme amaçlı sıcak levhada bekletilen plastik kaplardan alınarak ölçülmektedir. Sıcak levha üzerinde olmasına rağmen sodyum hidroksit solüsyonunun sıcaklığı 1,4 °C/dk hızda düşmektedir. Bu plastik kabın düşük termal iletkenliğinden kaynaklanmaktadır. Numunelerin sıcaklığındaki düşüş solüsyonun sıcaklığından daha az olabilir. Fakat kapta az sayıda numune varsa, bu etki göz önüne alınacak bir değer teşkil etmez. Bu nedenle, kaptaki numunelerin sayısı üç veya en fazla altı olarak sınırlandırılması uygun görülmektedir.

Deneylerde numunelerin kütle değişiminin ölçülmesi, sonuçları değerlendirmede ve numunelerin durumunu izlemede faydalı görülmektedir. Örneğin, uçlu takımdan bir numune anormal genleşme gösteriyorsa, kütle değişiminin kontrolü bu anormalliği anlamada yararlı olmaktadır.

#### **1.6.1.6. Agregaların Petrografik Analizi (ASTM C 295)**

Petrografik inceleme, minerallerin cins ve yüzdelerine göre kayacın adlandırılması işlemidir. Agregalardan alınan ince kesitlerin optik mikroskop yardımıyla incelenmesi sonucu içeriklerinde bulunan potansiyel reaktif mineral fazların (reaktif silis) teşhisi mümkündür.

X-ışını yayılımı ve tarayıcı elektron mikroskobu gibi yöntemler reaktif silisin saptanmasında faydalıdır. Agregaların yanı sıra, zarar gören beton ve harç numunelerden alınan ince kesitler üzerindeki çalışmalar sonucu, meydana gelen etkinin ASR sebebiyle olup olmadığını tanımlayabilmek mümkündür. Petrografik incelemeyi yapan kişinin bu konudaki deneyimi önemli bir faktördür. ASR üzerinde kimyasal metotlar, beton veya harç numuneleri ile testler uygulanmadan önce bu analizin uygulanması zaman kazandırmak ve uygulanacak metodun agrega tipine göre seçimini kolaylaştırmak bakımından önemlidir.

#### **1.6.1.7. Mineral Katkıların veya Yüksek Fırın Cürufunun Etkinliklerini Ölçen Standart Deney Metodu (ASTM C 441)**

Bu metot, mineral katkılarının veya yüksek fırın cürufunun agregalarla çimento alkalileri arasındaki reaksiyon sonucu meydana gelebilecek zararlı genleşmeleri önlemedeki etkinliğini inceler. Pireks camı reaktif agregası ile mineral katkı veya cüruf

içeren çimento kombinasyonları kullanılarak hazırlanan harç çubuklarının standart kür koşullarında, belirli periyotlardaki genleşmeleri değerlendirilir. Önce, 400 gr yüksek alkalin çimento ile belirli gradasyondaki 900 gr pireks camı agrega kullanılarak kontrol karışımı hazırlanır. Bu karışımın 14 günlük minimum genleşmesi % 0,250 olmalıdır. Cüruf dışındaki mineral katkılarda 300 gr yüksek alkalin çimento ile mutlak hacmi 100 gr çimentoya eşit miktarda ( $100 \times \text{mineral katkının yoğunluğu} / 3,15$ ) mineral katkı kullanılır. Kullanılan katkı cüruf ise mutlak hacmi 200 gr çimentoya eşit miktarda ( $100 \times \text{cürufun yoğunluğu} / 3,15$ ) kullanılır. Belli durumlar için şantiyede kullanılacak oranlarda çimento-katkı karışımları ile şantiyede kullanılacak alkalinite de çimento kullanılabilir. Numunelerin döküm, kütleme ve ölçüm işlemleri ASTM C 227'deki gibidir. Deney süresi sonunda kontrol numunesi ile katkı içeren numuneler arasındaki “genleşme miktarındaki azalma” değeri yüzde cinsinden hesaplanır. ASTM'ye göre, genleşme miktarındaki azalma değerinin % 75 veya daha fazla olması halinde kullanılan mineral katkı miktarı uygundur. Belirli bir çimento-agrega kombinasyonunun kullanılması halinde ise 14 günlük maksimum genleşme değeri % 0,02 olarak belirlenmiştir. Bu metodun eleştirildiği konular; pireks camı gibi çok yüksek reaktivitedeki bir malzemenin doğal agrega gibi davranmadığı ve bu sebeple gerçekçi sonuçlar alınamayacağı ve pireks camının değişken kompozisyona sahip, ortalama alkali veren bir malzeme olması sebebiyle alkali katkısının deney sonuçlarını etkileyebileceğidir (Ramyar vd., 2002).

#### **1.6.1.8. Jel Pat Metodu**

Bu metotta agrega örneği koyu kıvamda çimento hamurunun içine gömülür ve yüzeyi bilerek agrega parçalarının açığa çıkması sağlanır. Alkalin çözeltiliye batırılan hamur, stereoskopik mikroskop ile periyodik aralıklarla incelenir. Deney, 20 °C sıcaklıkta veya yükseltilmiş sıcaklıklarda uygulanabilmektedir. Agregada opal silis içeren bileşik olması halinde birkaç gün içinde jel oluşumu gözlemlenebilir. Bu metod, petrografik mikroskop altında incelenemeyecek kadar ince dağılımlı reaktif silisin ortaya çıkarılmasına imkan verir. Bu deney sonucunda reaktif olabileceği izlenimi veren agrega hakkında yeterli saha performansı olmadığı takdirde beton veya harç prizma yöntemlerinden birinin uygulanması önerilmektedir (Ramyar vd., 2002).



### 1.6.1.9. Alman Çözünme Metodu

Bu metot, opal ve flint içeren agregaların potansiyel alkali reaktivitesini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Seçilen tanecik boyutundaki agregalar (1-2 veya 2-4 mm) 90 °C derecede 4 N NaOH çözeltisinde 1 saat boyunca bekletilir, kurutulup tartılan agregalardaki kütle kaybı, “alkalide çözülebilir” olarak adlandırılmaktadır. Böylece agreganın alkaline ortamdaki kimyasal kararsızlığını ortaya koymakta fakat çeşitli çimento kombinasyonlarıyla birlikte davranışını ve genişleme yaratıp yaratmayacağını belirleyememektedir. Ayrıca, 1 mm boyutunun altındaki agreganın potansiyel reaktiviteye katkısını göz önüne almamaktadır (Ramyar vd., 2002).

### 1.6.1.10. Ozmotik Hücre Metodu

Ozmotik hücre, agrega parçacığı ile çimento ara yüzeyinin modellenmesidir. Ozmotik hücre, her biri 1 N NaOH çözeltisi içeren iki adet odacıktan oluşmaktadır. Odacıklar, su/çimento oranı 0,55 olan çimento hamuru zarı ile birbirlerinden ayrılır. Reaksiyon odası adı verilen odacıkta 150-300 mm boyutlarında 12,40 gr ağırlığında agrega parçacıkları bulunmaktadır. ASR oluştuğunda çözelti, çimento hamuru membranının içinden “havza odacığından”, “reaksiyon odacığına” doğru akar. Her odacığın üst kısmındaki ince borucuklardaki çözelti miktarındaki değişim, bu akışın miktarını ve hızını ölçmeye imkan tanımaktadır. Günde 1,5-2,0 mm gibi bir akış hızı, agreganın potansiyel olarak reaktif olduğunun göstergesidir. Ters bir akış gözlenmesi, agreganın reaktif olmadığını işaretidir. Bu deney normal reaktif bir agregada 30-40 gün devam ederken hızlı reaktif agregada 2-3 günde sonuç vermektedir. Bu metot, reaktivitenin hızlı değerlendirilmesine imkan vermektedir. Gelişme deneyleri ile birlikte kullanılması faydalıdır (Ramyar vd., 2002).

### 1.6.1.11. Otoklav Metodu

Bazı araştırmacılar, harç veya beton numuneleri yüksek sıcaklık ve basınç altında alkali çözeltisinde veya suda kaynatarak ya da buhar kürüne tabi tutarak agregaların reaktivitesini ölçmek için metotlar öne sürmüşlerdir. Bu konuda standart bir deney yöntemi olmamakta ve numune boyutlarından kullanılan malzeme miktarına ve kür koşullarına kadar pek çok faktör değişiklik göstermektedir. Amaç, boy değişimi ve çatlakların

incelenerek agregaların reaktivitesinin belirlenmesidir. Bu yöntemler dışında pek çok farklı araştırma metodu mevcuttur. Kimyasal büzülme metodu, Duggan genişleme metodu vb.gibi. Önemli olan nokta; agregalar değerlendirilirken, uygulanan deney yöntemleri öncelikle agreganın saha performansı verileriyle, veri yoksa diğer deney metotlarıyla karşılaştırmalı olarak test edilmesi gerekliliğidir. İlk olarak yapılacak petrografik analiz, agregaların seçimi ve reddinde kullanılacağı gibi, müteakip deney metotlarının seçimi hakkında da fikir verecektir. Hızlı deney metotları arasında istatistiksel olarak en güvenilir test metodu, hızlandırılmış harç çubuğu metodudur. Uzun süreli metotlar arasında en gerçekçi sonuçları ise beton prizma metodu vermektedir (Ramyar vd., 2002).

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME**

### **2.1. Amaç ve Kapsam**

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmanın amacı, Harşit Çayı vadisi agregalarının ASR yönünden zararlı etkisi olup olmadığını ortaya koymaktır.

Günümüzde agrega reaktivitesini ölçmede sıklıkla uygulanan metot, agregaları önce petrografik incelemeye tabi tutmak, petrografik analiz sonucunda potansiyel reaktif bileşenlerin tespiti halinde hızlandırılmış metotla (çoğunlukla ASTM C1260) deneye tabi tutmaktır. Hızlandırılmış deney metotlarının sonuçları agregaların reddinde kullanılmamaktadır. Ancak genleşme görülmediği takdirde agrega zararsız olarak nitelendirilmektedir. ASTM C1260 metodu sonucunda potansiyel reaktif olduğu tahmin edilen agregalar kesin sonuç için beton prizma deneyine tabi tutulur. Genleşmeler potansiyel olarak zararlı ise bu sonuçlara dayanarak kullanılmaz veya gerekli önlemler alınarak kullanılabilir (Andıç, 2007).

Harşit Çayının 5 farklı lokasyonundan örnek alınmıştır. Agregta örneklerinin petnografik analizi yapılarak minerolojik yapıları incelenmiştir. Alkali silika reaksiyonunu belirlemek amacıyla; ASTM C-1260 (22)'ye göre hızlandırılmış harç çubuk deney metodu ve TS 2517' ye göre kimyasal yöntemle agregaların potansiyel alkali silis reaktivliğinin tayini metodu uygulanmıştır. Hızlı harç çubuk deneyinde agregaların çimento hamuruyla oluşturduğu reaksiyon sonucu, genleşmesine bağlı olarak boy uzamaları belirlenmiştir. Kimyasal yöntemde ise alkali azalması ve çözünen silis miktarları belirlenmiştir.

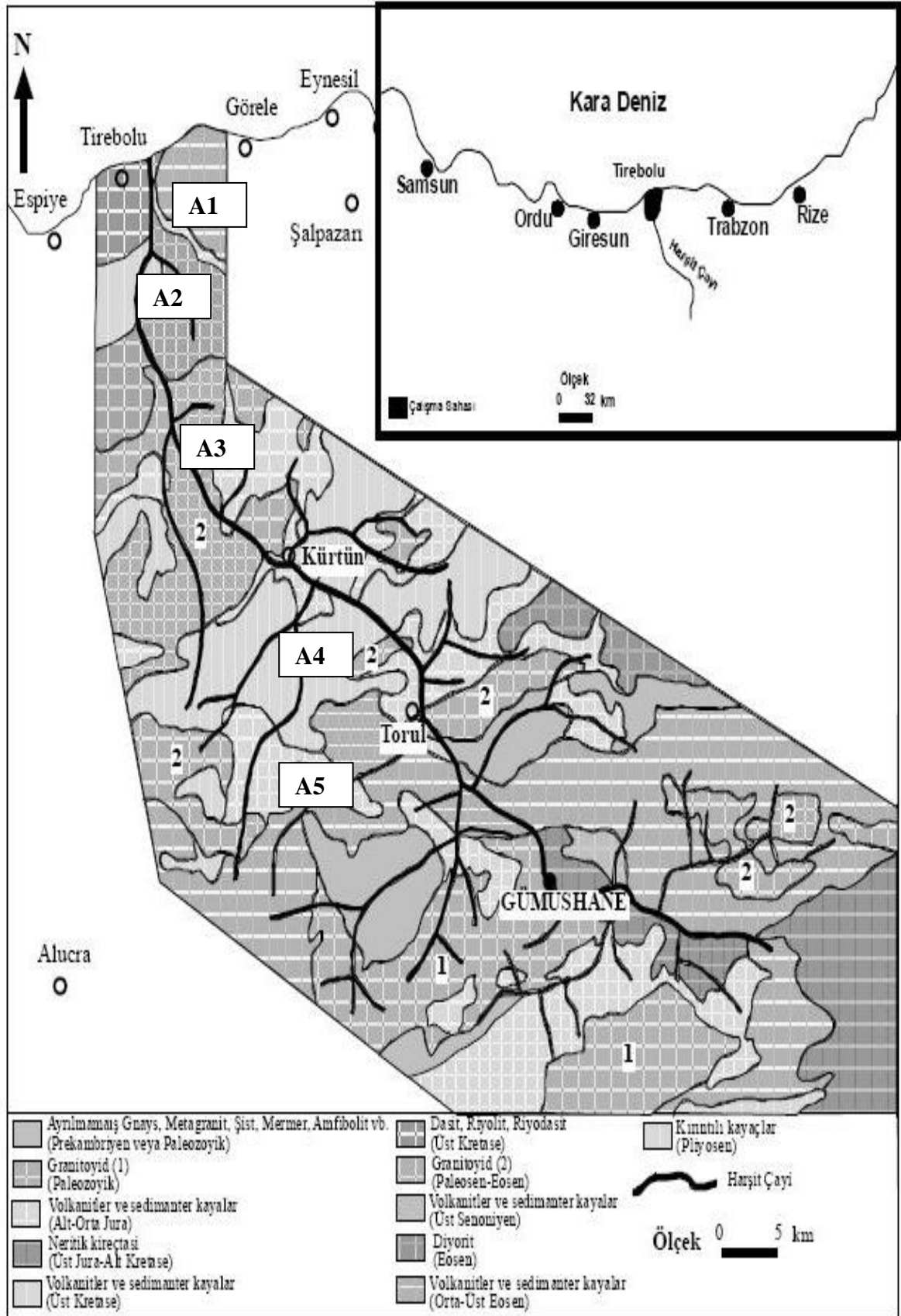
### **2.2. Harşit Çayı Genel Jeolojisi**

Çalışma alanı, Doğu Karadeniz Bölgesinde, Giresun-Gümüşhane illeri arasında kalan Harşit Çayı ve civarında yer alan vadiyi kapsamaktadır (Şekil 29). Harşit Çayı Gümüşhane ilinden başlayıp Giresun'un Tirebolu ilçesine kadar olan mesafede yer alır. Çalışmamızda Harşit Çayının bu civarından getirmiş olduğu agregalar ile bu bölgedeki kayalardan kırma eleme tesislerinde elde edilen numuneler üzerinde inceleme yapılmıştır.

Coğrafi bakımdan Doğu Karadeniz Bölgesi 'Doğu Pontidler' olarak adlandırılan jeoteknik bir birime tekabül eder. Doğu Pontid ada yayı Ekay kuşağın kuzeyinde yer alır. Güney sınırı, Giresun, Torul, Gümüşhane, İspir ve Artvin'den geçen hat oluşturur. Özsaray vd. tarafından 'Kuzey Zon', Akdeniz vd. tarafından 'Pontid Otoktonu' olarak tanımlanan bu bölge Doğu Pontid Kretase magmatik yayına karşılık gelir. Apisyen döneminde platformun kırılmasıyla Kuzeydoğu-Güneybatı yönlü transform faylarla dilimlenen bu zonda; güneyden kuzeye doğru oluşan yitim süreciyle Türoniyen de yoğun andezitik yay volkanizması oluşmuş ve bu süreci granitik magmatik yerleşim izlemiştir. Pontid yayı ve yay ardı havza olarak ayırdığımız bu kuşakta Türoniyen döneminde; yay da genellikle intrüziv kayaçlar görülürken yay ardı havzalarda volkanitler egemendir (Kurt ve Özkan, 2006). Çalışma alanları üst kretase volkanitlerinin yoğun olduğu bölge arasına sıkışmıştır.

Kuzey zondaki volkanitler tamamen yay magmatizması karakterinde olup yaşlıdan gence doğru, Alt Bazik Seri, Dasitik Seri ve Üst Bazik Seri şeklinde sınıflandırılır. Malm-Alt Kretase'de deniz tabanı volkanizması karakteri gösteren spilitik bazalt, bazalt, bazaltik andezit tuf ve aglomeralarla temsil edilen volkanitler 'Alt Bazik Seri' olarak isimlendirilmiştir. Dasitik seri ise Üst Kretase'de yaygın dasit, riyodasit, latit türde lavlar ile aglomeralardan oluşur. Üst Bazik Seri ise ada yayı volkanizması ürünlerinden oluşur (Karakaya vd., 2007)

Doğu Pontidler jeoteknik birimi ise benzer nitelikte maden yatakları içermesi nedeniyle bir maden provansı niteliğindedir. Harşit vadisi ve civarı, Doğu Karadeniz Bölgesinin karakteristik volkanitlerini içeren, kalın bir litostratigrafik istif gösterir. Şekil 29'da çalışma alanının jeolojik haritası görülmektedir.



Şekil 29. Çalışma sahası ve jeolojik haritası (MTA).

### 2.3. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Numuneler araziden konkasör ünitesinden kırılmış agrega olarak alınmıştır. Hızlandırılmış harç çubuk deneyi Kaya Mühendislik laboratuvarında, Kimyasal Yöntemle Agregaların Potansiyel Alkali Silis Reaktifliğinin Tayini Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme laboratuvarında, Agregaların Petrografik Analizi 9 Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılmıştır.

#### 2.3.1. Çimentonun Özelliği

Deneyisel çalışmada CEM I 42.5 çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Çimento analiz sonuçları

Kimyasal analizler %		Fiziksel ve Mekanik Testler		
SiO <sub>2</sub>	18,62	İncelik 45 µm elek üstü %	7,84	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,51			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,95	Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	3,13	
CaO	64,33			
MgO	2,09	Özgül yüzey (gr/cm <sup>3</sup> )	3616	
SO <sub>3</sub>	2,77			
Kızdırma Kaybı	3,46	Piriz Başı (saat-dk)	2 sa-02 dk	
Na <sub>2</sub> O	0,25	Piriz sonu (saat-dk)	3 sa-02 dk	
K <sub>2</sub> O	0,62			
(Na <sub>2</sub> O)e : (Na <sub>2</sub> O)+0,658K <sub>2</sub> O	0,66	Hacim genişlemesi (mm)	1	
Cl	0,0191			
Ölçülemeyen	0,38	Basınç Dayanımı(Mpa)	2 gün	25,1
Toplam	100		28 gün	52,8
Serbest CaO	0,62	Su İhtiyacı %		28,8
Çözünmeyen kalıntı %	0,7			

### 2.3.2. Agregaların Özellikleri

#### 2.3.2.1. Fiziksel Özellikler

Agregaların temin edildiği lokasyonlar ve tesis adları A1, A2, A3, A4 ve A5 koduyla Tablo 11’de görülmektedir. Agregalar tesislerden kırma kum halinde alınmıştır. Belirlenen özgül ağırlık ve su emme değerleri Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 11. Agregaların temin edilen lokasyonlar

Numune Kodu	Alınan Bölge
A1	Giresun Görele Bölgesi Hazır Beton Tesisinden kırma kum Çanakçı – Doğankent Karayolu üzeri
A2	Giresun- Kürtün Karayolu üzeri Fındıklı Mevki Hes Barajı İnşaatı için kullanılan agrega
A3	Giresun- Kürtün Karayolu üzeri Doğankent Mevki Hes Barajı İnşaatı için kullanılan agrega
A4	Kürtün-Elmalı Mevki Hes Barajı İnşaatı için kullanılan agrega
A5	Kürtün-Akçal Köyü Mevki Hes Barajı İnşaatı için kullanılan agrega

Tablo 12. Agregaların fiziksel özellikleri

Özellik	A1	A2	A3	A4	A5
Kuru Özgül ağırlık(gr/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,58	2,47	2,51	2,56
Doygun kuru Yüzey özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2,59	2,63	2,52	2,57	2,60
Görünen Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2,69	2,71	2,60	2,68	2,67
Ağırlıkça su emme (%)	2,19	2,21	2,15	2,18	2,16

#### 2.3.2.2. Agregaların Petrografik Analizi

- Örnek 1: (A4)

Örnek önce binoküler mikroskop altında doğal haliyle incelenmiş ve bunun sonucunda örneğin içerisinde volkanik, mermer, kireçtaşı kırıntıları saptanmıştır. Volkanik ve karbonat kaya kırıntıları baskın kaya grubunu oluşturmaktadır. Granitik kaya kırıntıları az oranda gözlenmektedir.

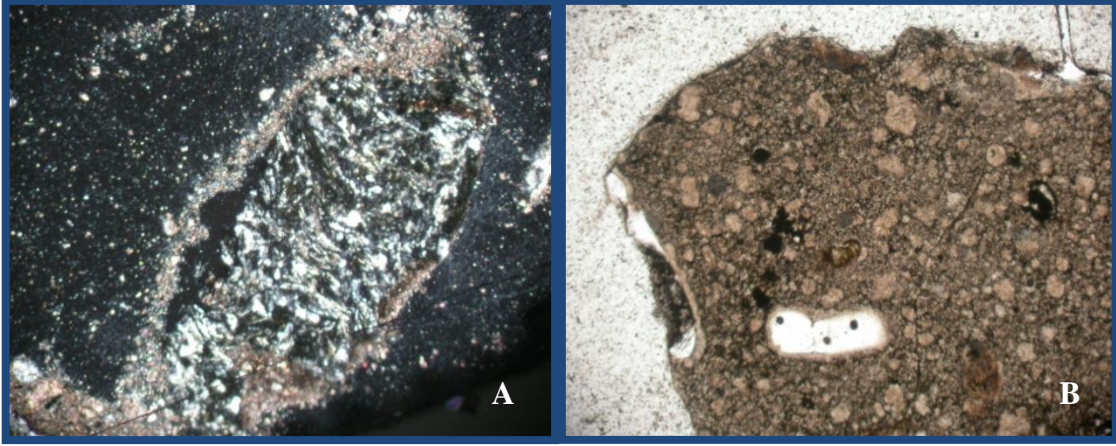
Mikroskobik incelemeler sonucunda ise numunelerin baskın olarak volkanik kaya kırıntılarında olduğu görülmektedir. Diğer kırıntıları ise karbonat kaya parçaları oluşturmaktadır. Karbonat kaya kırıntılarının tamamı kalsitten oluşmaktadır (Şekil 30). Ayrışmamış volkanik kaya kırıntılarının büyük kısmı matriks ve bunlar içerisinde yüzen iri taneli minerallerden oluşturmaktadır. Matriks genellikle volkanik camdan meydana gelmektedir, bazı tanelerde ise matriks cam ve mikrolitlerden (ince plajiyoklas kristalleri) oluşmaktadır (Şekil 31). Ayrışmış volkanik kaya kırıntıları epidot minerallerince zengindir (Şekil 32). Epidotlar ikincil olarak kayacın ayrışması sonucu oluşmuştur. Volkanik kaya kırıntılarında matriks ile beraber gözlenen plajiyoklas kristallerinde büyük oranda killeşme gözlenmektedir (Şekil 33). Kuvars mineralleri volkanik kaya parçaları içerisinde mineral bileşeni olarak görülmektedir (Şekil 34), bağımsız taneler olarak gözlenmemektedirler. Volkanik kaya kırıntılarında matriks içerisinde gözlenen iri taneli mineraller kuvars, plajiyoklas, piroksen ve opak olarak saptanmıştır. Volkanik kaya kırıntılarının doku ve mineral bileşimlerine bakıldığında büyük oranda riyolitik türdeki volkaniklerden oluştukları söylenebilir.

Örnekte volkanik kaya kırıntılarının yaklaşık yüzdesi %70-75, karbonat kırıntılarının yaklaşık yüzdesi ise % 25-30 olarak verilebilir. Volkanik kaya kırıntılarındaki kuvarsların oranı ise yaklaşık olarak % 2-3 civarındadır. Yukarıda görüldüğü gibi ince kesitte magmatik kaya kırıntısına rastlanamamasına karşın binoküler mikroskop altında bu kayalar saptanmıştır. İnce kesit yapımı sırasında tamamen rastlantı eseri tanelerin denk gelmesi kesme yerinin değişimine göre yukarıdaki oranlarda ve minerale bileşimlerinde ufak değişimler olabilir.

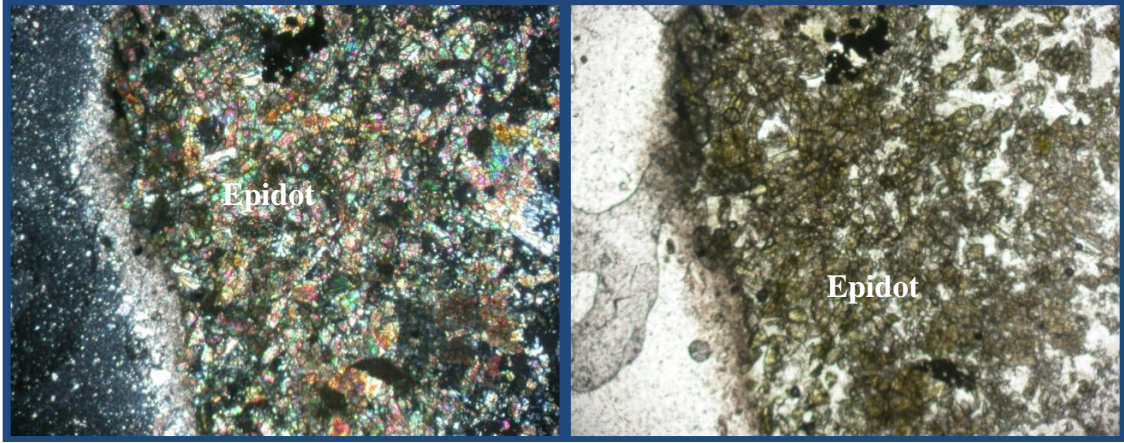


Şekil 18. Tamamen kalsitten oluşan karbonat kaya parçası, + nikol.

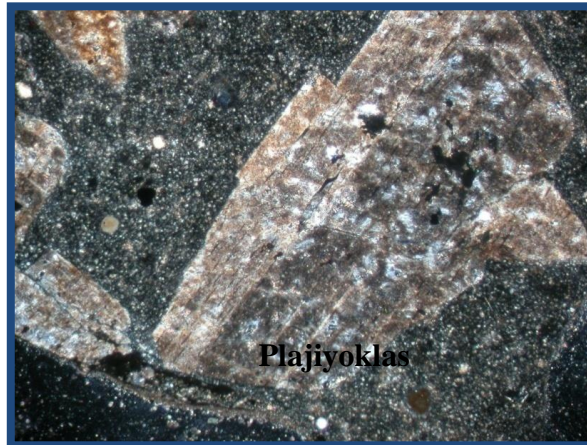




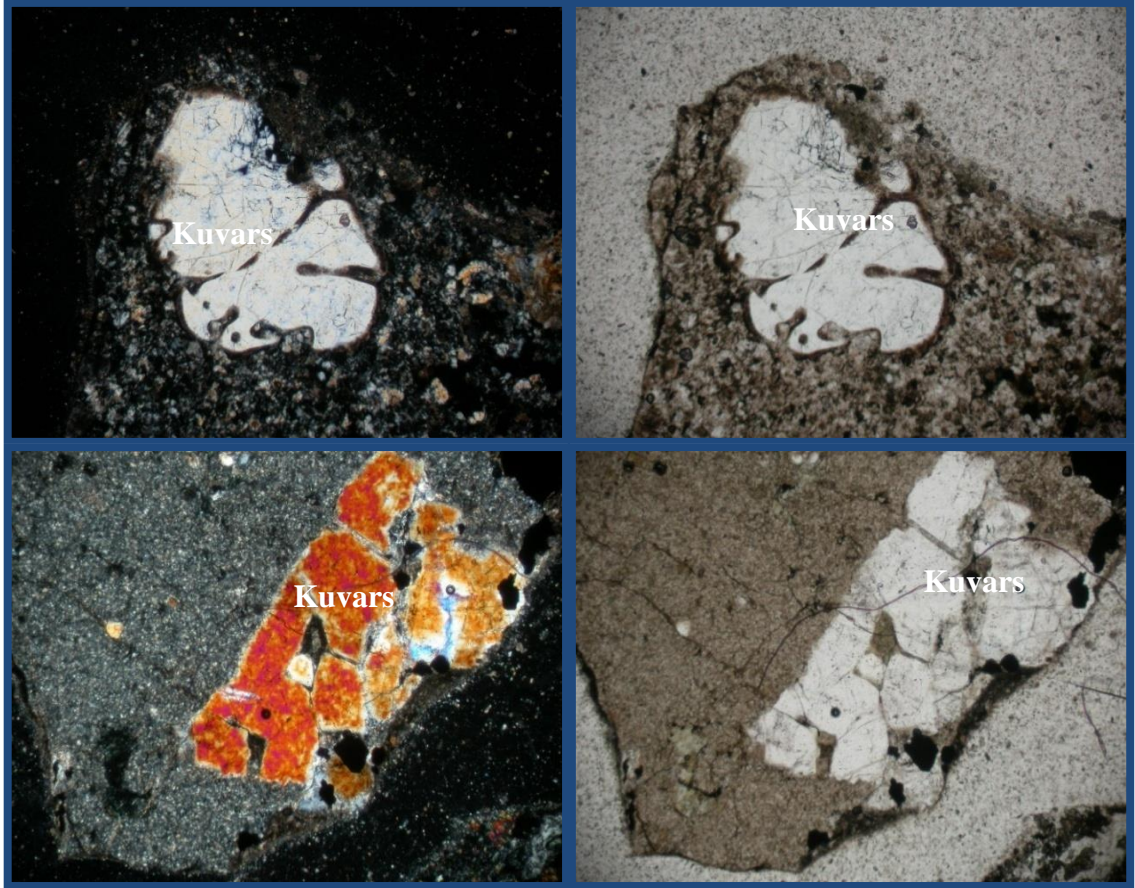
Şekil 31. A) Mikrolitçe zengin matriksten oluşan volkanik kaya kırıntısı, + nikol. B) cam matriksce zengin volkanik kaya kırıntısı, // nikol.



Şekil 32. Volkanik kayaların alterasyonu sonucu oluşan ikincil epidot mineralleri, + ve // nikol.



Şekil 33. Volkanik kaya kırıntıları içerisindeki büyük oranda killeşme sunan killeşmiş plajiyoklas kristalleri, + nikol.



Şekil 34. Örnekte gözlenen volkanik kaya kırıntıları dasit ve bunlar içerisinde saptanan kuvars taneleri.

- Örnek 2: (A3)

Örnek önce binoküler mikroskop altında doğal haliyle incelenmiş ve bunun sonucunda örneğin içerisinde volkanik, mermer, kireçtaşı, magmatik (granit) ve serpantinit kaya kırıntıları saptanmıştır. Volkanik kaya kırıntıları baskın kaya grubunu oluşturmaktadır, ikinci baskın kaya grubunu ise plütonik ve subvolkanik kaya kırıntıları oluşturmaktadır. Karbonat kaya kırıntıları ince kesitte çok az oranda gözlenmesine karşın binoküler mikroskop altında bir miktar daha fazladır.

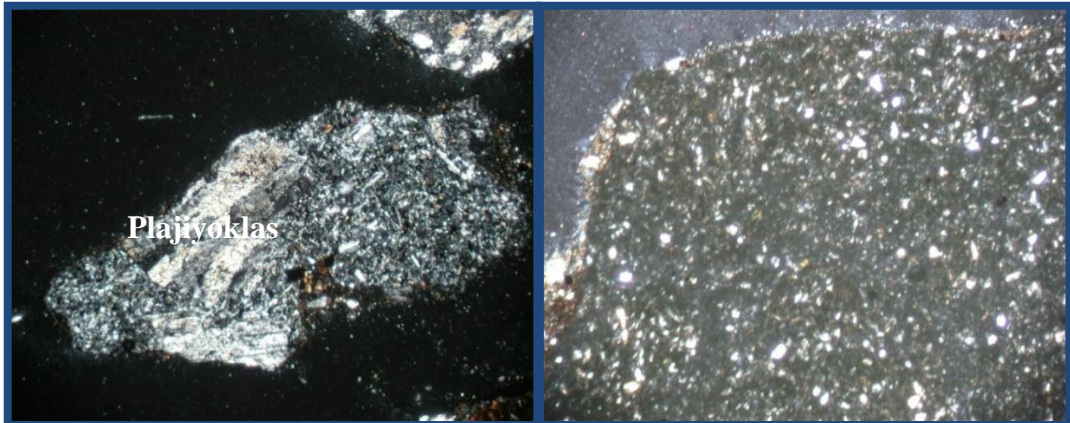
Mikroskobik incelemeler sonucunda ise örnek baskın olarak volkanik ve plütonik kaya kırıntılarından oluşmaktadır. Diğer tane bileşenini ise karbonat kaya parçaları oluşturmaktadır. İnce kesitte sadece bir tane karbonat kaya kırıntısı saptanmıştır, bu tanenin tamamı kireçtaşından oluşmaktadır (Şekil 35). Volkanik kaya kırıntılarının büyük kısmı matriks ve bunlar içerisinde yüzen iri taneli fenokristal oluşturmaktadır (Şekil 36). Volkanik ve magmatik kaya kırıntılarında matriks ile beraber iri plajiyoklas kristalleri saptanmıştır, bunlar büyük oranda killeşme sunmaktadır (Şekil 36). Biyotit ve kloritler

volkanik ve granitoyitik magmatik kaya kırıntılarında gözlenmektedir (Şekil 37,38). Hornblendler ise granotoidler de ve bazik diyabazlar içerisinde yeşil pleokroizma renkleriyle tanınmaktadırlar (Şekil 39). Ortoklaslar magmatik kaya kırıntılarında temiz bir şekilde gözlenmektedirler. Kuvars mineralleri volkanik ve granitoyitik magmatik kaya kırıntılarında mineral bileşeni olarak görülmektedir (Şekil 40). Volkanik ve magmatik kaya kırıntılarında gözlenen mineraller kuvars, plajiyoklas, ortoklas, klorit, epidot, kalsit, piroksen, amfibol, biyotit ve opak olarak saptanmıştır.

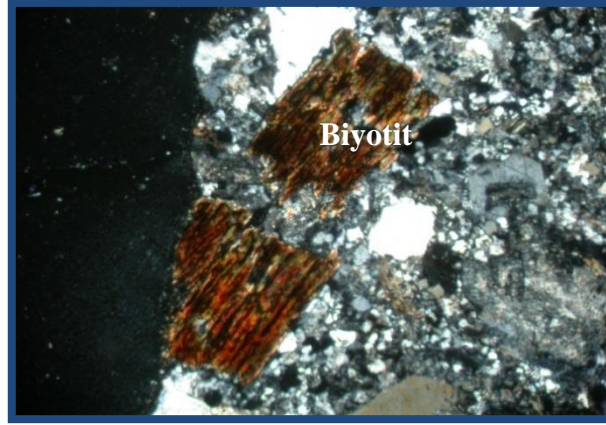
Örnekte volkanik kaya kırıntılarının yaklaşık yüzdesi % 70-75, karbonat kırıntılarının yaklaşık yüzdesi ise % 3-5 ve magmatik kaya kırıntılarının yaklaşık yüzdesi ise % 20-25 olarak verilebilir. Volkanik ve magmatik kaya kırıntılarındaki kuvarsların oranı ise yaklaşık olarak % 3-5 civarındadır.



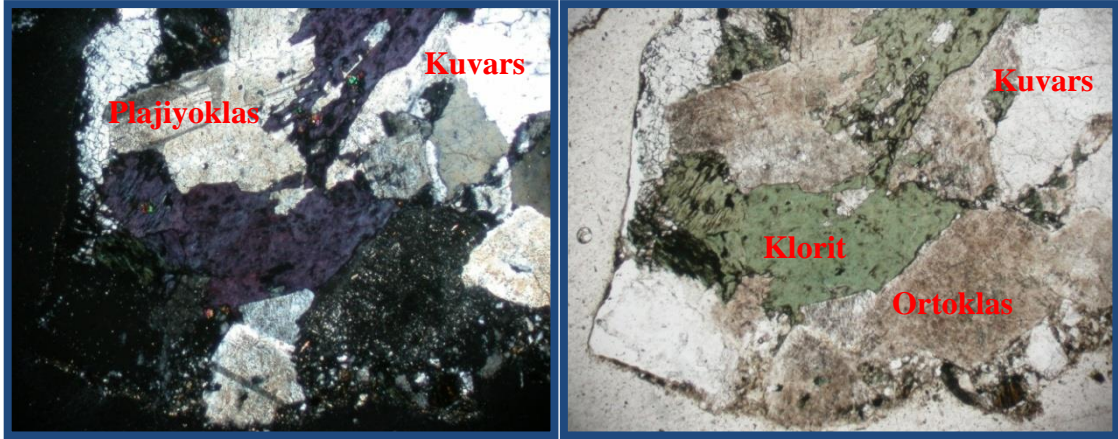
Şekil 35. Tamamen kalsitten oluşan karbonat kaya parçası, + nikol.



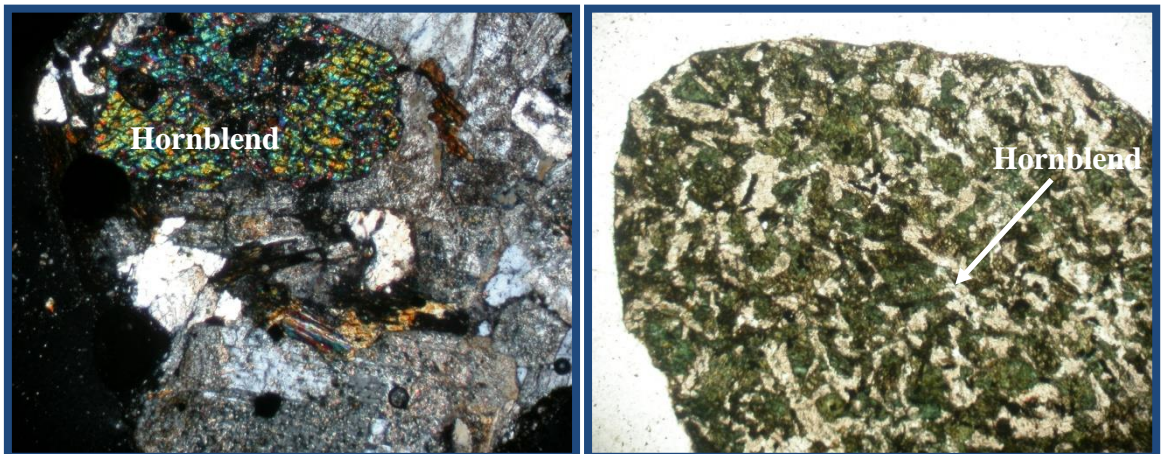
Şekil 36. Örnekte gözlenen mikrolitçe zengin ve cam matriksce zengin volkanik kaya parçaları, + nikol



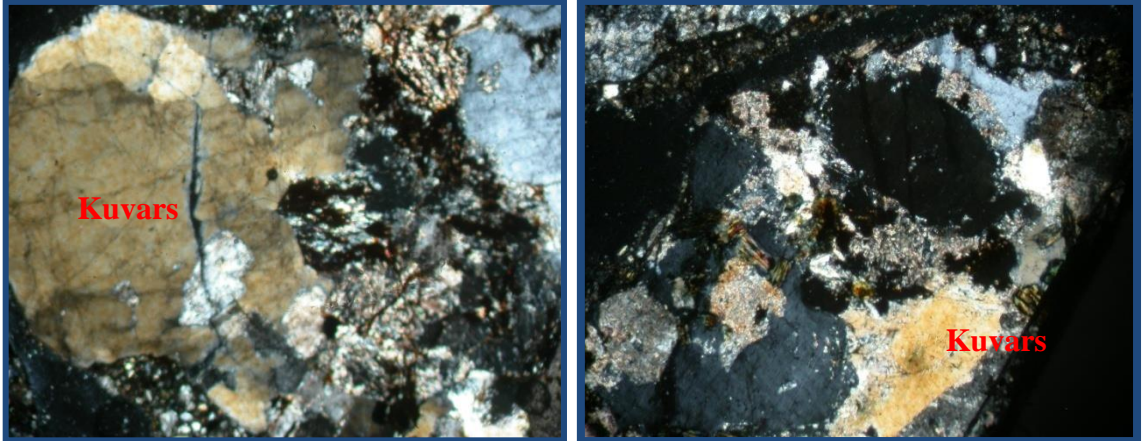
Şekil 37. Magmatik kaya parçası içerisinde gözlenen biyotit kristali, + nikol.



Şekil 38. Magmatik kaya parçası içerisinde gözlenen klorit, plajiyoklas, kuvars ve ortoklas kristalleri, + ve // nikol.



Şekil 39. Granitoyitik magmatik kaya parçası ve diyabaz türü bazik magmatik kaya kırıntısı içerisinde gözlenen amfibol (hornblend) kristalleri, + ve // nikol.



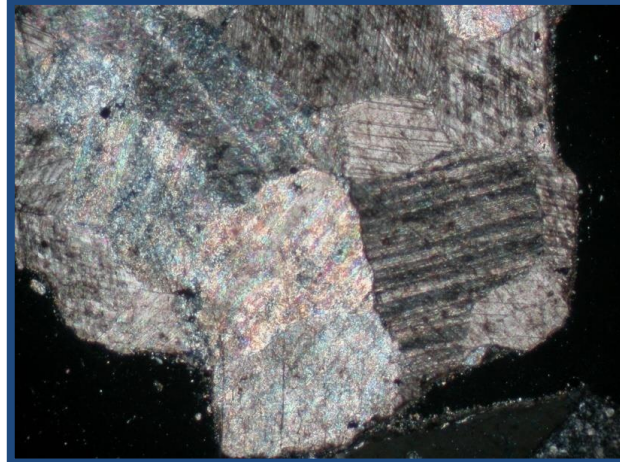
Şekil 40. Magmatik kaya parçaları içerisinde gözlenen kuvars kristalleri, + nikol.

- Örnek 3: (A2)

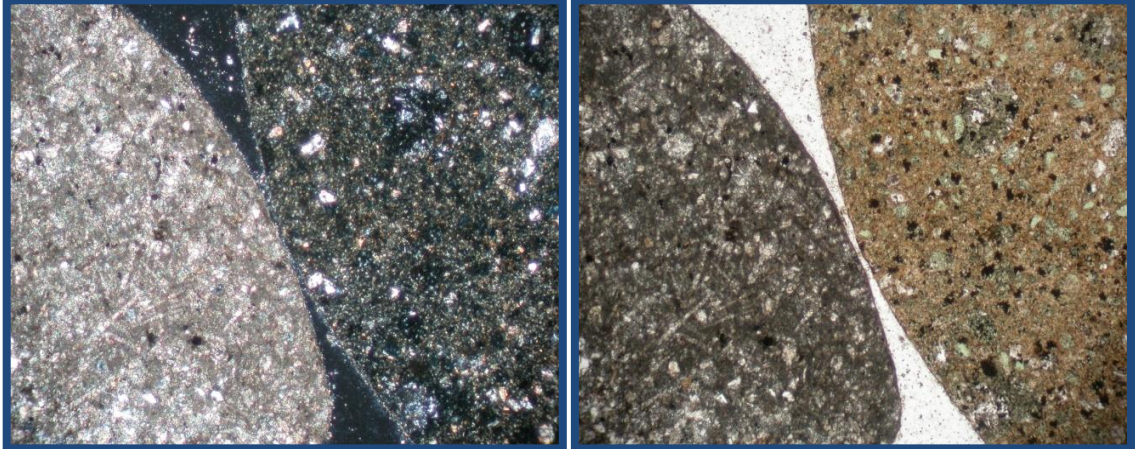
Binoküler mikroskop altında doğal haliyle incelendiğinde örneğin içerisinde volkanik (riyolit ve andezit), karbonat (kireçtaşı) ve magmatik (granitoyid) saptanmıştır. Volkanik kaya kırıntıları baskın kaya grubunu oluşturmaktadır, ikinci baskın kaya grubunu ise karbonat kaya kırıntıları oluşturmaktadır. Magmatik kaya kırıntıları daha çok granitoyid bileşimli kaya kırıntılarıdır

Mikroskobik incelemeler sonucunda ise örnek baskın olarak volkanik kaya kırıntılarından oluşmaktadır. Diğer baskın tane bileşenini ise karbonat kaya parçalarıdır. Magmatik kaya kırıntıları bunlara nazaran daha az oranda gözlenmektedir. Kireçtaşı kırıntıları tamamen kalsitten oluşmaktadır (Şekil 41). Camsı matriksce zengin volkanik kaya kırıntılarında alterasyon daha fazla gözlenmektedir (Şekil 42). Plajiyoklaslar ince uzun kristaller şeklinde volkanik kaya parçalarında gözlenirler (Şekil 43). Hornblend ve biyotitler yaygın kloritleşme sunmaktadır. Kuvarslar riyolitik bileşimli volkanik kaya kırıntıları içinde yaygındır (Şekil 44). Volkanik ve magmatik kaya kırıntılarında gözlenen mineraller kuvars, plajiyoklas, ortoklas, klorit, epidot, kalsit, piroksen, amfibol, biyotit ve opak olarak saptanmıştır.

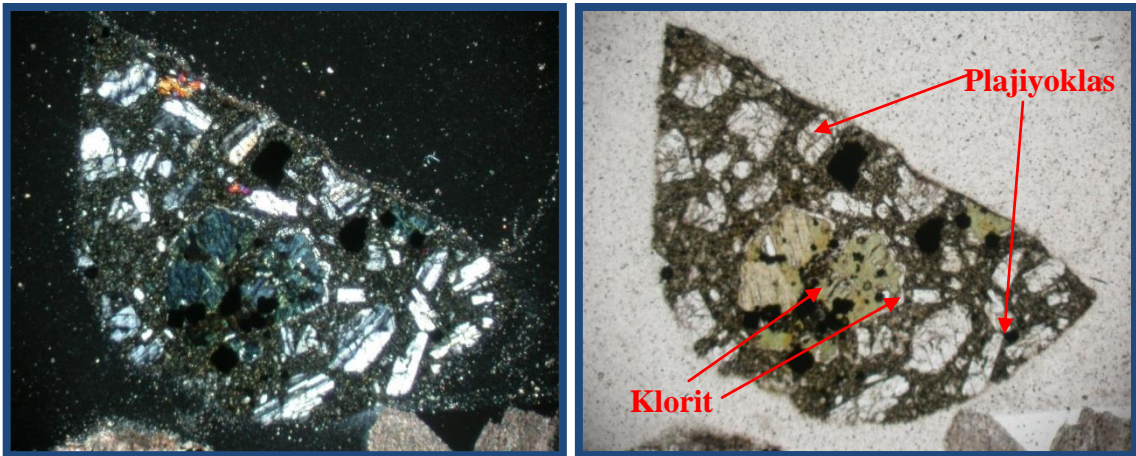
Örnekte, volkanik kaya kırıntıları yaklaşık % 70, karbonat kırıntıları yaklaşık % 20-25 ve magmatik kaya kırıntıları yaklaşık % 8-10 olarak verilebilir. Volkanik ve magmatik kaya kırıntılarındaki kuvarsların oranı ise yaklaşık olarak % 2-3 civarındadır.



Şekil 41. Tamamen kalsitten oluşan karbonat kaya parçası, + nikel.



Şekil 42. Kloritleşme sunan camsı matrisce zengin volkanik kaya parçaları, + ve // nikel.



Şekil 43. Volkanik kaya parçalarında gözlenen plajiyoklas kristaller ve kloritler, + ve // nikel



Şekil 44. Volkanik kaya parçalarında gözlenen kuvars kristaller, + ve // nikel.

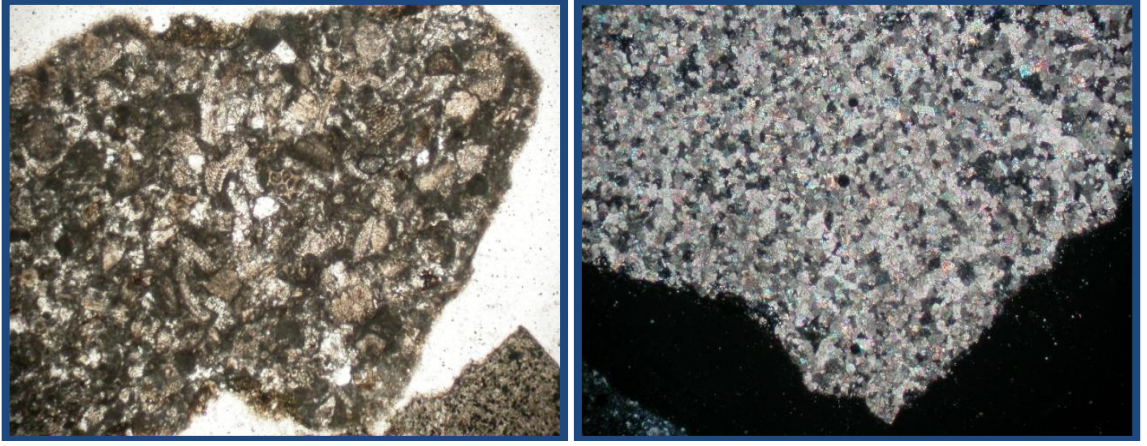
- Örnek 4: (A1)

Binoküler mikroskop altında örnek incelendiğinde volkanik (riyolit ve andezit), karbonat (kireçtaşı) ve magmatik (granitoid) saptanmıştır. Volkanik kaya kırıntıları baskın kaya grubunu oluşturmaktadır, ikinci baskın kaya grubunu ise karbonat ve magmatik kaya kırıntıları oluşturmaktadır.

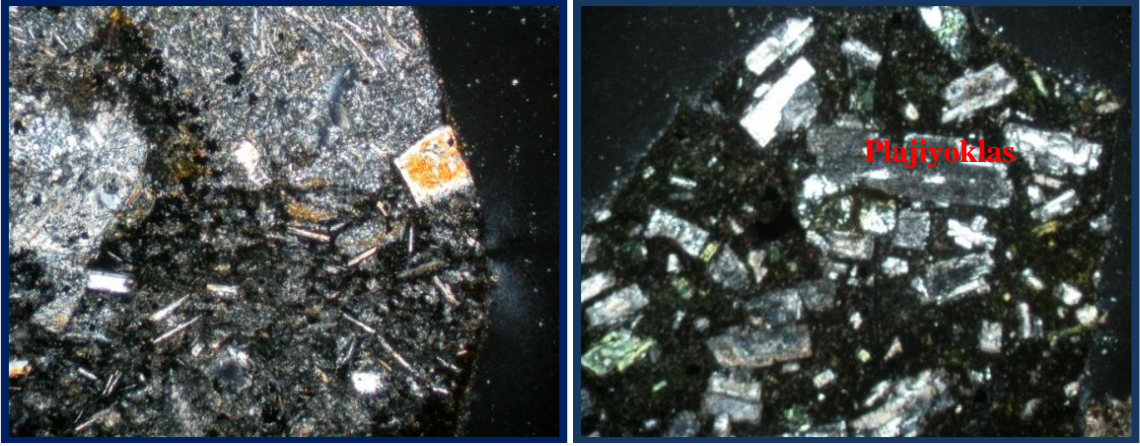
Mikroskobik incelemeler sonucunda da örneğin baskın olarak volkanik kaya kırıntılarından oluştuğu görülmektedir. Diğer baskın tane bileşenini yaklaşık eşit oranlarda karbonat ve magmatik kaya parçaları oluşturmaktadır. Tek bir tane metamorfik kaya kırıntısı da saptanmıştır.

Kireçtaşı kırıntıları tamamen kalsitten oluşmaktadır ve bazı tanelerde belirgin fosil parçalarına rastlanmaktadır (Şekil 45). Volkanik kaya kırıntıları baskın olarak camsı matriks ve bunlar içerisinde yüzen kristallerden oluşmaktadır (Şekil 46). Plajiyoklaslar ve ortoklaslar da killeşme yaygındır. Bazı volkanik kaya kırıntılarında camsı matrikste zeolitleşme gözlenmektedir (Şekil 47). Kuvarslar volkanik, magmatik ve metamorfik kaya kırıntıları içerisinde gözlenmektedir (Şekil 48,49). Volkanik, magmatik ve metamorfik kaya kırıntılarında gözlenen mineraller kuvars, plajiyoklas, ortoklas, klorit, kalsit, piroksen, amfibol, muskovit, sanidin, zeolit ve opak olarak saptanmıştır.

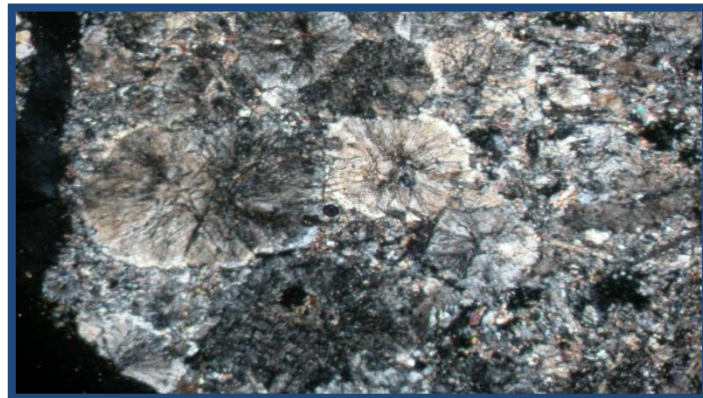
Örnekte, volkanik kaya kırıntıları yaklaşık % 85-90, karbonat kırıntıları yaklaşık % 5-7, magmatik kaya kırıntıları % 5-7 ve metamorfik kaya kırıntıları oranı yaklaşık % 2 olarak verilebilir. Kaya kırıntılarındaki kuvarsların oranı ise yaklaşık olarak % 2-3 civarındadır.



Şekil 45. Tamamen kalsitten oluşan karbonat kaya parçaları, soldaki örnekte fosil kavkuları seçilebilmektedir // ve + nikol

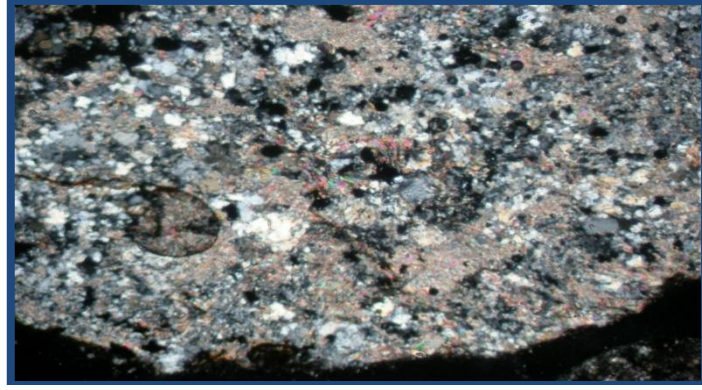


Şekil 46. Örnekte gözlenen volkanik kaya kırıntıları, + nikol

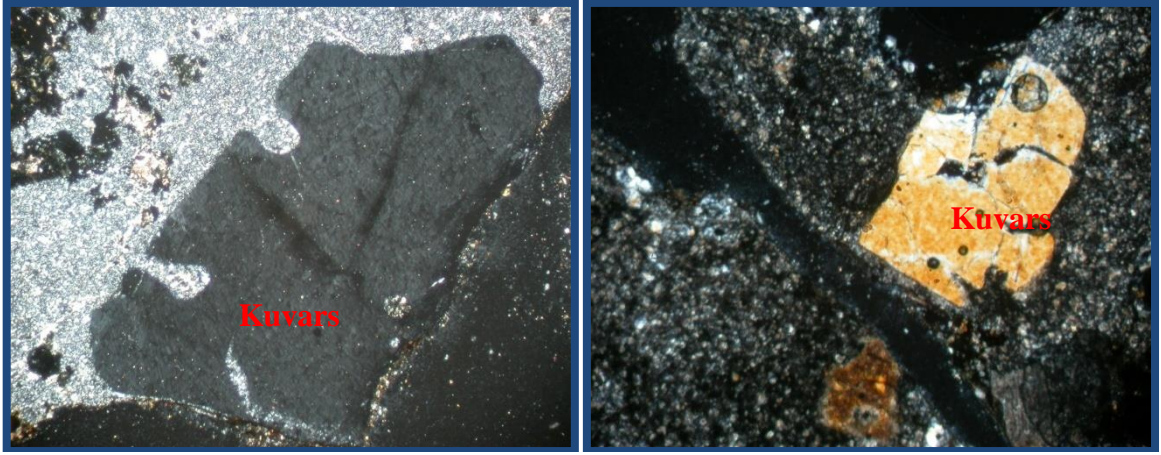


Şekil 47. Volkanik kayalarda yuvarlak kristaller şeklinde gözlenen granitik doku ürünü ortoklast+kuvars + nikol



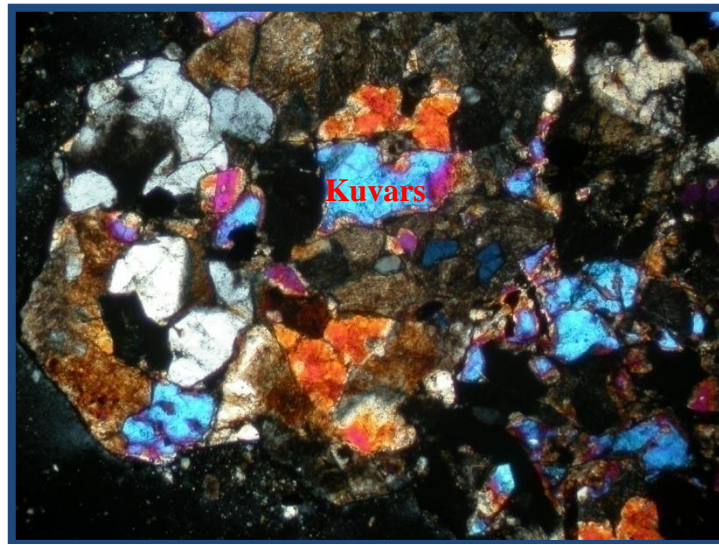


Şekil 48. Örnekte gözlenen metamorfik kaya kırıntısı, muskovitler pembe, uzun çubuksu mineraller şeklinde gözlenmektedir, + nikel



a)

b)



c)

Şekil 49. a) ve b) volkanik kaya kırıntılarında gözlenen kuvars kristalleri, c) granitik kaya kırıntısında gözlenen kuvars kristalleri, + nikel.

## 2.4. Alkali Silika Reaksiyonu Tespiti İçin Yapılan Deneyler

### 2.4.1. Hızlandırılmış Harç Çubuk Yöntemi

Alkali reaktivitesi belirlenecek agregalar ile üretilen harç çubuklarının alkalinitesi yüksek çözelti içerisinde, yüksek sıcaklıkta saklanması ve uzunluk değişimlerinin ölçülmesi ile gerçekleştirilmektedir.

Hızlandırılmış Harç Çubuk Yöntemi ile her 5 lokasyondan alınan 3'er örnek ve toplamda 15 örnek üzerinde ASR deneyi yapılmıştır.

Hazırlanan her bir örnekten 3 adet harç çubukları saf su içerisine konarak  $80 \pm 2,0^{\circ}$  C sabit ısıdaki etüvde 24 saat bekletildikten sonra ilk boy ölçümleri alınır. Harç çubuklarının içerisine konulacak alkali çözeltisi, 1 N NaOH çözeltisi, 900 ml saf suya 40 gr sodyum hidroksit konularak hazırlanır bu çözeltiye sodyum hidroksit çözeltisi denir. Bu çözelti  $80^{\circ}$  C'de sabit ısıda tutularak, harç çubukları bu çözelti içerisine konmaktadır.

Bu işlemden sonra devam eden 3, 7, 14. günlerde boy ölçümleri alınarak birim boy değişim yüzdeleri harç çubuğu deney metodundaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır. 14 gün sonunda ölçülen boy değişimleri % 0,15 'den büyükse agregalar zararlıdır.

#### 2.4.1.1. Kullanılan Cihazlar ve Malzemeler

- NaOH çözeltisi: 1 litre NaOH çözeltisi; 40 gr NaOH, 900 ml saf su içinde çözüldükten sonra, çözeltiye saf su ilave edilerek 1000 ml' ye tamamlanarak elde edilmelidir.
- Çimento
- Agregat
- Saf su
- Saf su banyosu cihazı(İçerisine konan saf suyu  $80^{\circ}$  C sıcaklığa çıkarabilen ve bu sıcaklıkta suyun sıcaklığını sabit tutabilen, cihaz sıcaklık ve korozyona karşı dayanıklı )
- Ölçüm ünitesi: 0,002 mm hassasiyeti olan komparatör
- Harç çubukları kalıbı

### 2.4.1.2. Numunelerin Üretimi

Ocaktan temsili olarak alınan agrega numunesinden deney için yetecek miktarda alınıp, konkasörde kırılıp öğütücü değirmende öğütülerek 0-5 mm malzeme elde edilmiştir. Malzeme, No.4-No.8-No.16-No.30-No.50-No.100 eleklerden elenmiş, elekler üzerinde kalan malzeme yıkanmış ve kurutulmuştur. Her elek üstü malzeme ayrı ayrı torbalanmıştır. Hızlı harç çubuk deneyi için agregalar ASTM C1260 standardına uygun olarak Tablo 13’ de verilen miktarlarda kullanılmıştır.

Her çimento-agrega kombinasyonu için 1000 gr agrega, 441 gr çimento ve 194 gr su kullanılmıştır. Harç karışımları ASTM C305’e uygun karıştırıcı ile karıştırılmıştır. ASTM C1260 standardında belirtildiği gibi harç hazırlama ve kuru malzemelerin depolama odası 20-27.5 °C arasında olmalıdır. Harçların hazırlanmasında, karıştırma kabına önce su ve çimento eklenerek 140 ± 5 dev./dk.’da 30 sn karıştırılmıştır. Bu süre içinde agrega yavaşça eklenmiştir. Mikser 285 ± 10 dev./dk.’da 30 sn daha karıştırılmış, 90 sn boyunca beklemeye alınmıştır. Karıştırma işleminin bitmesinin ardından 2 dk 15 sn içerisinde, hazırlanan harç kalıba yerleştirilmiştir. (Şekil 50-54) bu işlemlerden görüntülerdir.

Tablo 7. ASTM C1260’a göre granülometrik dağılım (% 100 orijinal malzeme 3’lü kap için)

Malzeme	Elek No					S/Ç	Su	Çimento
	4	8	16	30	50			
	% 10	%25	%25	%25	%15			
Kırma taş (gr)	100	250	250	250	150	0,44	194	441



Şekil 50. Karıştırma kabına malzemelerin eklenmesi

Kullanılan kalıplar; ASTM C490'a uygun 25x25x285 mm boyutlu ve uçlarında boy ölçmeye olanak sağlayan pimlerin bulunduğu 250 mm net açıklıdır kalıplardır. Harç kalıbın içersine iki aşamada dökülmüş ve her katman 20 defa şişlenerek sıkıştırılmıştır.



Şekil 51. Hazırlanan harcın kalıba yerleştirilmesi



Şekil 52. Harcın şişlenerek sıkıştırılması (birinci katman)



Şekil 53. Harcın şişlenerek sıkıştırılması (ikinci katman)



Şekil 54. Harç çubuklarının son hali

Hazırlanan numuneler dökümden sonra  $24 \pm 2$  saat kür odasında bekletildikten sonra kalıptan çıkarılıp numaralandırılmıştır. Kumpas ve 0,002 hassasiyeti olan komparatörle ilk boy ölçümü yapılarak,  $80 \pm 2$  °C sıcaklıktaki saf suya yerleştirilmiştir. Saf su banyosunda  $24 \pm 2$  saat bekletilen örneklerin boy ölçümleri tekrar yapıldıktan sonra, örnekler hazırlanan  $80 \pm 2$  °C sıcaklığındaki 1 N NaOH (Sodyum Hidroksit) çözeltisi içeren alkali tankına konmuştur. Alkali tankında bekletilen harç çubuklarının periyodik olarak 3, 7 ve 14. günlerde boy ölçümleri alınmıştır (Şekil 55-56). Denklem (11) kullanılarak genleşme değerleri hesaplanmıştır.

$$\text{Genleşme (\%)} = \frac{(\text{Son boy ölçüm} - \text{Sıfır ölçüm})}{\text{Efektif boy}(250 \text{ mm})} \times 100 \quad (11)$$



Şekil 55. Kullanılan kür tankı



Şekil 56. Harç çubuklarının boy değişimlerinin ölçümünün yapılması

Deney sırasında alkali tankındaki 1 N NaOH çözeltisinin normalitesi kontrol edilmiştir. NaOH çözeltisinin normalitesinin ölçülmesi şu şekilde yapılır:

- Büret içerisine 5N HCl konur (ilk hacim değeri kaydedilir)
- Alkali tankından 20 ml NaOH çözeltisi behere alınır
- Behere konan 20ml NaOH çözeltisinin üzerine pembeleşene kadar birkaç damla fenolftalin dökülür
- Büretin vanası açılarak 5N HCl asit, 20 ml'lik fenolftalin katılmış NaOH çözeltisi üzerine azar azar katılır. Bu sırada çözelti hızlı bir şekilde çalkalanır.
- Çözeltinin rengi pembeden beyaza döndüğü an vana kapatılır ve bürete titrasyon için harcanan HCl miktarı ikinci hacim olarak okunur.
- Eğer büretteki hacim azalması 4 ml ise bizim NaOH çözeltimizin normalitesi 1'dir. Bu değer bizim elde etmek istediğimiz deney standardımızdır.

Aksi halde azalma miktarının 4 ml'den az ya da fazla olması durumunda NaOH çözeltimizin normalitesi 1 değildir. Çözeltiyi normal duruma getirmek için denklem (12)'den faydalanılır.

$$N_1 \times V_1 = N_2 \times V_2 \quad (12)$$

$$N_1: 5 \text{ (5 N HCl)}$$

$V_1$ : Büreten okunan ml cinsinden eksilen hacim miktarı

$N_2$ : NaOH çözeltisinin normalitesi

$V_2$ : NaOH çözeltisinin hacmi 20 ml

Yapılan deney esnasında çözeltiliye 1,75 su ilave edilerek normalite 1'e düşürülmüştür.

#### **2.4.2. Kimyasal Yöntemle Agregaların Potansiyel Alkali Silis Reaktifliğinin Tayini**

Bu deneyde, Portland çimentosu ve katkısı çimentolar ile kullanılacak olan petrografik muayene sonucu TS 10088 EN 932-3'te belirtilen zararlı minerallerinin bulunduğu tespit edilen doğal ve kırmataş agregaların kimyasal yöntemle potansiyel alkali silis reaktifliğinin tayinini yapılıır.

Betonda alkali içeren çimento ile silisli agreganın potansiyel reaktifliğinin değerlendirilmesinde bu yöntem, diğer yöntemlerden elde edilen deney sonuçları ile birlikte kullanılmaktadır.

##### **2.4.2.1. Kullanılan Cihaz ve Malzemeler**

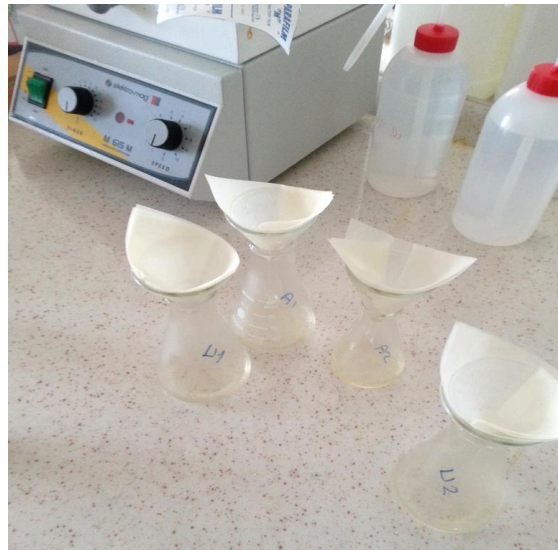
- Terazi
- Çeneli kırıcı ve öğütücü
- Elekler
- Tepkime kabı
- Saf su banyosu cihazı
- Pipet
- Damıtık su
- Ölçülü balon
- NaOH çözeltisi
- Derişik hidroklorik asit
- Düşük karbonlu süzgeç kağıdı
- Platin kroze
- Desikatör
- Fırın

### 2.4.2.2. Deney Numunesinin Hazırlanması

Her bir bölgenin agrega bir döner değirmen cihazı ile öğütülmüştür. 150 µm'lik elekten geçen malzemeyi tamamen uzaklaştırabilmek için, numune 150 µm elek üzerinde yıkanarak elenmiştir. Yıkanmış numune ( $110 \pm 5$ ) °C sıcaklıktaki etüvde ( $20 \pm 4$ ) saat kurutulmuş, soğutulmuş ve 150 µm'lik elekten yeniden elenmiştir. Elek üzerinde kalan kısım deney için saklanmıştır.

Her bir agrega için hazırlanmış numunedan ( $25,00 \pm 0,05$ ) g'lık üç deney numunesi alınmış ve üç ayrı tepkime kabına konulmuştur. Üzerine pipetle 25 ml sodyum hidroksit çözeltisi ilave edilmiştir. Dördüncü tepkime kabına ise, 25 ml sodyum hidroksit çözeltisi konulmak suretiyle tanık numune olarak hazırlanmıştır. Tepkime kaplarının ağızları sıkıca kapatılmış ve sıkışan havanın çıkabilmesi için deney numuneleri hafifçe sarsılmıştır.

Numuneler vakit geçirilmeksizin ( $80 \pm 1,0$ ) °C sıcaklıktaki su banyosu içine konulmuştur. 24 saat su banyosunda tutulduktan sonra banyodan çıkarılıp çeşmeden akan suyun altında soğutulmuştur. Kapların soğutulmasının hemen ardından kapların ağızları açılıp çözelti, agrega kalıntısından süzülerek ayrılmıştır. Bütün deneylerde süzme süresi aynı tutulmuştur. Süzme işlemi biter bitmez, süzüntü çalkalanarak homojen hale getirilmiştir. Süzüntüden kuru pipetle 10 ml çekilerek 200 ml'lik ölçülü balona alınmış ve damıtık su ile 200 ml'ye tamamlanmıştır. Bu çözelti, çözünmüş silisin ve alkali azalmasının tayini için saklanmıştır (Şekil 57).



Şekil 57. Süzgeç kağıdı yardımıyla çözeltinin süzülmesi



### 2.4.2.3. Deneyin Yapılışı

Çözünmüş silis miktarı gravmetrik veya fotometrik yöntemlerden biri ile tayin edilir ve alkali azalma miktarı hesaplanır. Bu çalışmada gravmetrik yöntem kullanılmıştır.

#### a) İşlem

Madde 2.4.2.2’de damıtık su ile hazırlanmış 200 ml çözeltilerden pipetle 100 ml alınır.

Buharlaştırmayı hızlandırma amacıyla tercihen platin buharlaşma beherine konur. Üzerine (5-10) ml derişik hidroklorik asit ( $\rho = 1,19 \text{ kg/L}$ ) ilave edilir ve buhar banyosu üzerinde kuruyuncaya kadar buharlaştırılır. Süzüntü daha fazla ısıtılmadan, (5-10) ml derişik hidrolik asit ve (5-10) ml damıtık su veya (10-20) ml HCL (1+1) ilave edilir (Şekil 58).



Şekil 58. Çözeltinin buharlaştırılması

Beherin ağzı kapatılır ve buhar banyosunda veya elektrik ocağı üzerinde 10 dakika bekletilir. Çözelti, üzerine kendi hacmine eşit miktarda sıcak damıtık su ilave edilerek seyreltilir ve teknik dereceli düşük karbonlu süzgeç kağıdından hemen süzülür. Ayrılan silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) çökeltisi önce sıcak (1+99) seyreltik hidroklorik asit çözeltisi ile ve sonra sıcak su ile yıkanır.

Süzüntü kuruyuncaya kadar ikinci kez buharlaştırılır.  $(110 \pm 5)^\circ \text{C}$  sıcaklıkta bir etüv içinde 1 saat bekletilir. Süzüntü üzerine (10-15) ml (1+1) hidroklorik asit ilave edilir ve

buhar banyosunda veya elektrik ocağında ısıtılır. Çözelti kendi hacmi kadar sıcak damıtık su ile seyreltilir. Çözelti içerisinde gözle görülebilir  $\text{SiO}_2$  bulanıklığı varsa, çözelti başka bir süzgeç kağıdından süzülür ve damıtık su ile yıkanır. İkinci kez buharlaştırma işlemi sadece, standart sodyum meta silikat çözeltisinin derişimini belirlemek için kullanılır. Diğer deney çözeltileri için ikinci buharlaştırma işlemi uygulanmayabilir.

Her iki silis bakiyesi birleştirilerek platin krozeye konur. Kroze muhteviyatı kurutulur. Bek alevinde kurutulurak süzgeç kağıdının alev almadan tamamen yanması sağlanır ve en sonunda fırında (1100-1200) °C sıcaklıkta değişmez kütleye ulaşincaya kadar kızdırılır, desikatörde soğutulur ve tartılır(Şekil 59-61).



Şekil 59. Kroze muhteviyatının kurutulması



Şekil 60. Desikatör yardımıyla soğutma işlemi



Şekil 61. Değişmez kütleyle ulaşan numuneler

b) Hesaplamalar ve sonuçların gösterilmesi

Agregadan süzülerek elde edilen sodyum hidroksit çözeltisindeki  $\text{SiO}_2$  derişimi aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır Denklem (13)

$$S_c = 3330xW$$

(13)

Sc: Orijinal süzüntü içindeki çözünmüş silis derişimi (mmol/L)

W: 100 ml seyreltik çözelti içinde bulunan silis miktarı (g)

c) Alkali azalma miktarının hesaplanması

Madde 2.4.2.2'de hazırlanmış 200ml'lik çözeltiden 20 ml numune alınır, çözelti 20 ml su ile seyreltilir ve 125 ml'lik bir erlene konulur. 2-3 damla fenolftalein çözeltisi damlatılır. Çözelti 0,05 M hidroklorik asit çözeltisi ile dönüm noktasına kadar titre edilir. Aynı reaktif kullanılarak, numune alınmadan tanık deney titrasyonu yapılır. Alkali azalma miktarı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır Denklem (14):

$$R_c = (20M/V_1) \times (V_3 - V_2) \times 1000 \quad (14)$$

Rc: Alkali azalması (mmol/L)

M: Titrasyonda kullanılan hidroklorik asitin molaritesi

V<sub>1</sub>: 200 ml'lik çözeltiden alınan numune hacmi (ml)

V<sub>2</sub>: Deney numunesinde fenolftalein ile titrasyonda dönüm noktası için sarfedilen hidroklorik asit çözeltisi hacmi(ml)

V<sub>3</sub>: Tanık numunede fenolftalein ile titrasyonda dönüm noktası için sarfedilen hidroklorik asit hacmi(ml)

## 2.5. Deney Sonuçları ve İrdeleme

### 2.5.1. Petrografik Analiz

Agregaların petrografik analizlerine bakıldığında aynı vadi agregaları olması sebebiyle benzer yapıda oldukları söylenebilir. Örnekler baskın olarak volkanik kaya kırıntılarında oluşmakta, volkanik kaya kırıntılarının büyük kısmı da volkanik camdan oluşan bir matriks içermektedir. Volkanik kayalarda bulunan volkanik camın alkali-silis reaksiyonu oluşumunda oldukça etkili olduğu bilinmektedir (Wakizaka, 1998).

### 2.5.2. Hızlı Harç Çubuk Deneyi

Tablo (14-18) sırasıyla A1, A2, A3, A4 ve A5 bölgelerinden alınan örneklere ait hızlı harç çubuk deney sonuçlarını göstermektedir. Tablolarda her bölgeden alınan agregalardan hazırlanan 3'er numune üzerinde 3, 7 ve 14 günde yapılan boy ölçümleri sonucu hesaplanan boyca genişleme yüzdeleri ve sonuçların ortalamaları görülmektedir. Şekil (62-66) ise boyca genişleme yüzdesi- zaman ilişkisini göstermektedir. Şekil 67'de ise tüm örneklerin 14 günlük genişleme yüzdeleri bir arada verilmiştir.

Tablo 8. A1 örneğinin hızlı harç çubuk deneyi sonuçları

		Boyca Genişleme Yüzdesi		
		3.GÜN	7.GÜN	14.GÜN
Deney numune seri no	1	0,00325	0,06173	0,18193
	2	0,00390	0,07800	0,18362
	3	0,00650	0,06984	0,19003
Ortalama (%)		0,005	0,007	0,185

Tablo 9. A2 örneğinin hızlı harç çubuk deneyi sonuçları

		Boyca Genişleme Yüzdesi		
		3.GÜN	7.GÜN	14.GÜN
Deney numune seri no	1	0,02027	0,19308	0,27739
	2	0,01730	0,016527	0,27578
	3	0,02342	0,19859	0,26629
Ortalama (%)		0,020	0,186	0,273

Tablo 10. A3 örneğinin hızlı harç çubuk deneyi sonuçları

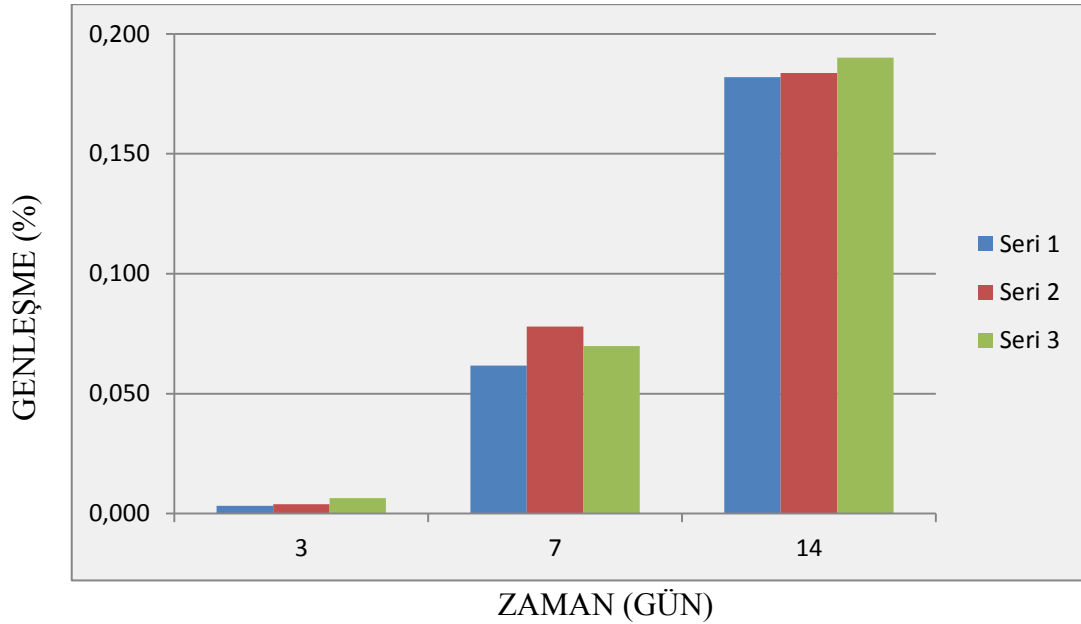
		Boyca Genişleme Yüzdesi		
		3.GÜN	7.GÜN	14.GÜN
Deney numune seri no	1	0,00390	0,07537	0,22091
	2	0,00649	0,05903	0,18812
	3	0,00712	0,10839	0,21645
Ortalama (%)		0,006	0,081	0,209

Tablo 11. A4 örneğinin hızlı harç çubuk deneyi sonuçları

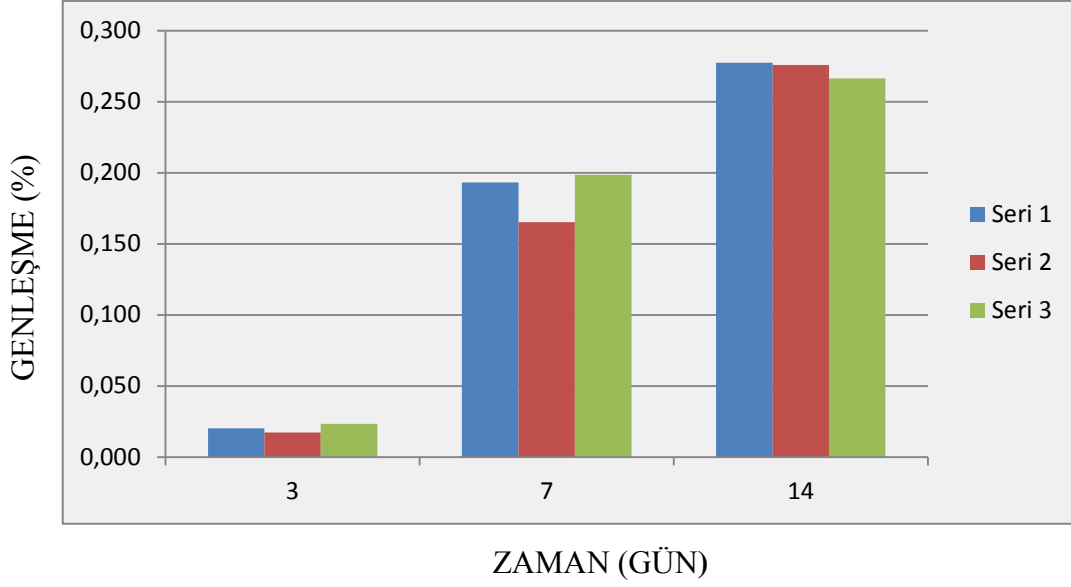
		Boyca Genleşme Yüzdesi		
		3.GÜN	7.GÜN	14.GÜN
Deney numune seri no	1	0,00909	0,15189	0,23854
	2	0,01110	0,13061	0,22890
	3	0,00390	0,13726	0,24232
Ortalama (%)		0,008	0,140	0,237

Tablo 18. A5 örneğinin hızlı harç çubuk deneyi sonuçları

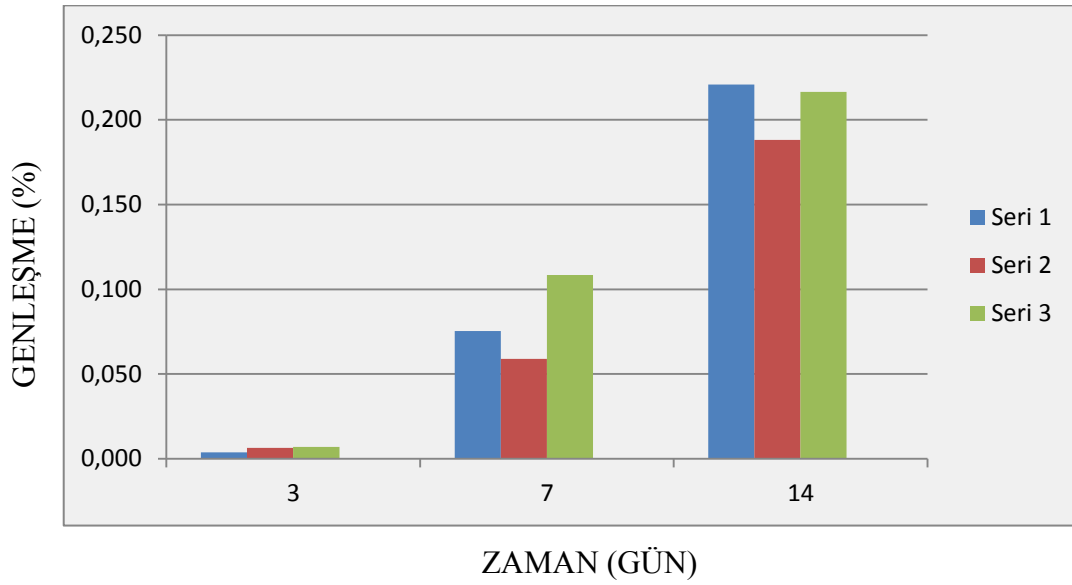
		Boyca Genleşme Yüzdesi		
		3.GÜN	7.GÜN	14.GÜN
Deney numune seri no	1	0,01535	0,14694	0,26613
	2	0,01730	0,14654	0,26535
	3	0,01208	0,13420	0,23870
Ortalama (%)		0,015	0,143	0,257



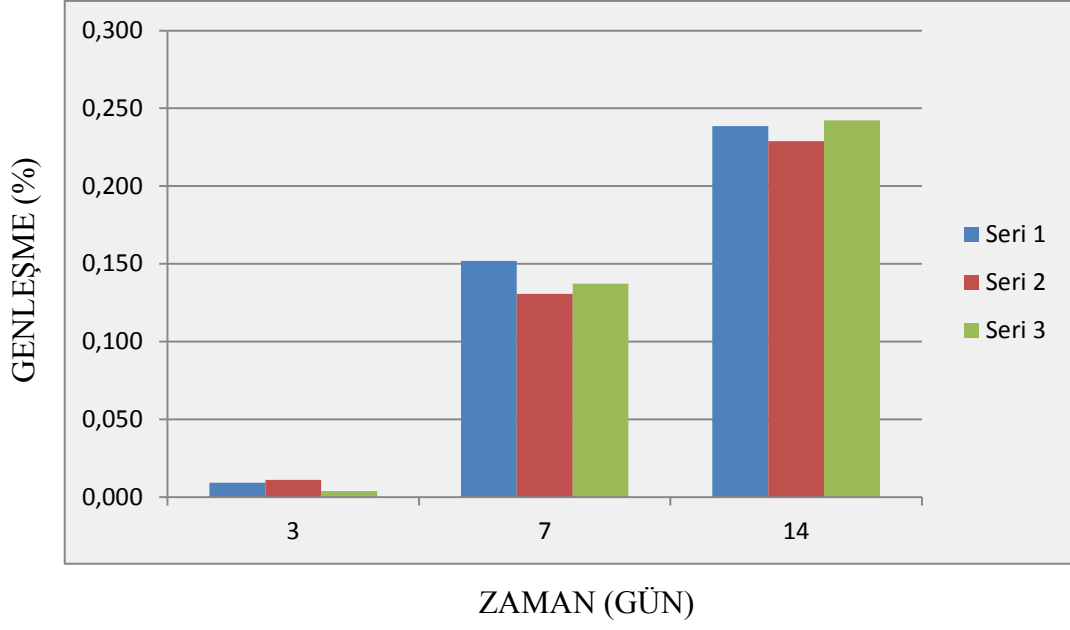
Şekil 62. A1 örneğine ait genleşme-zaman ilişkisi



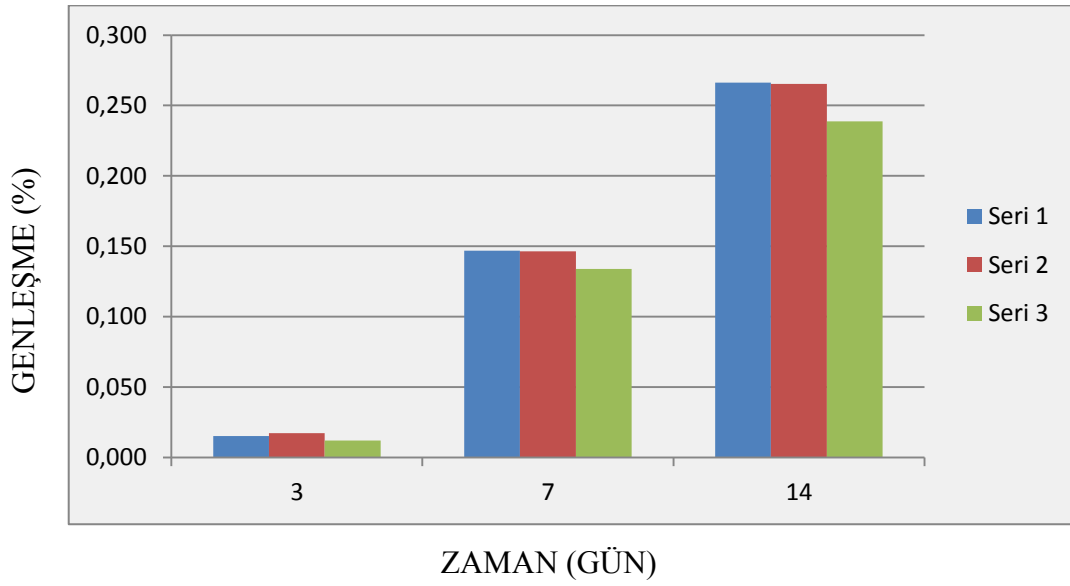
Şekil 63. A2 örneğine ait genleşme-zaman ilişkisi



Şekil 64. A3 örneğine ait genleşme-zaman ilişkisi

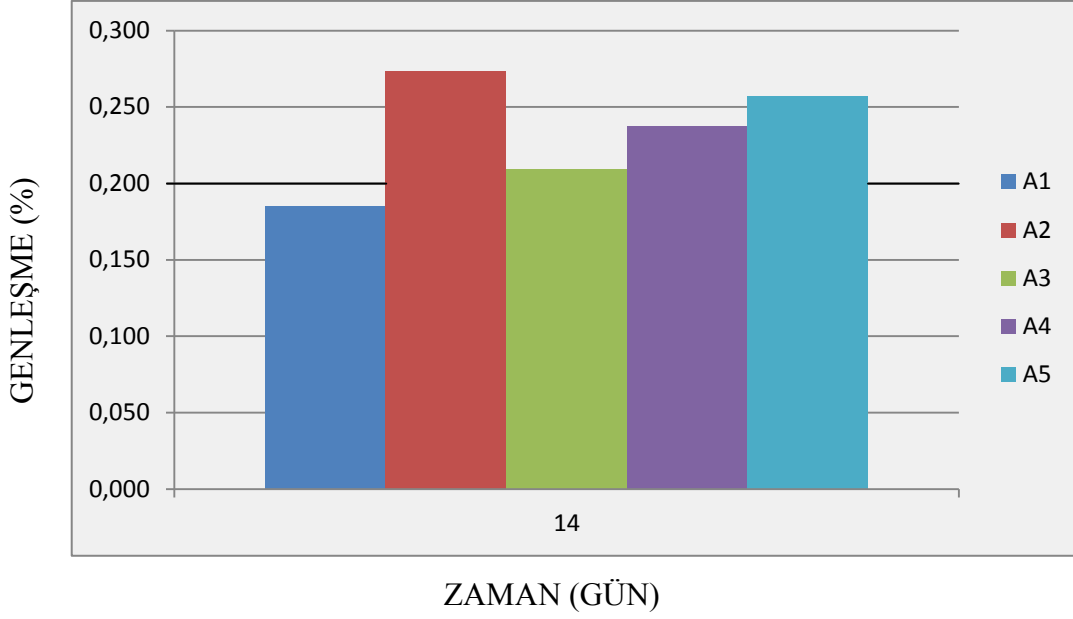


Şekil 65. A4 örneğine ait genişleme-zaman ilişkisi



Şekil 66. A5 örneğine ait genişleme-zaman ilişkisi





Şekil 67. Örneklerin 14 günlük genleşme-zaman ilişkisi

ASTM C1260 “Agregaların Potansiyel Alkali Reaktivitesi için Deney Metodu” standardına göre toplam 16 gün süren deney sonucunda, genleşme yüzdeleri aşağıdaki şekilde değerlendirilir:

- 16 gün sonundaki genleşmeler, % 0,10 değerinin altındaysa agregalar zararsız davranış göstermektedir.
- 16 gün sonundaki genleşmeler, % 0,20 değerinin üstündeyse agregalar potansiyel olarak zararlı genleşme gösterir.
- 16 gün sonundaki genleşmeler, % 0,10 ile % 0,20 değerinin arasındaysa agregalar, şantiye koşullarında hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilir. Bu sebeple, agregalar hakkında karara varmadan önce ek deneyler yardımıyla genleşmelerin sebebinin araştırılması ve ölçümlerin 28 güne kadar uzatılması önerilmektedir.

Bu standarda göre değerlendirildiğinde, sadece A1 örneğinin 14 günlük boy değişim yüzdesi % 0,185 değeriyle zararlı agrega sınırı olan % 0,2 değerinin altında yer almıştır. Standarda göre genleşmesi bu bölgede yer alan agregalar şantiye koşullarında hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilirler. Diğer örneklerin 14 günlük boyca genleşme yüzdeleri ise sırasıyla 0,257, 0,209, 0,273 ve 0,237’dir. Yani tüm örnekler ASTM C1260 standardına göre zararlı sınıfta yer almaktadır. A2, A4 ve A5 örneklerinin 7 günlük genleşmeleri dahi zararsız agrega sınırının üzerinde olmuştur.

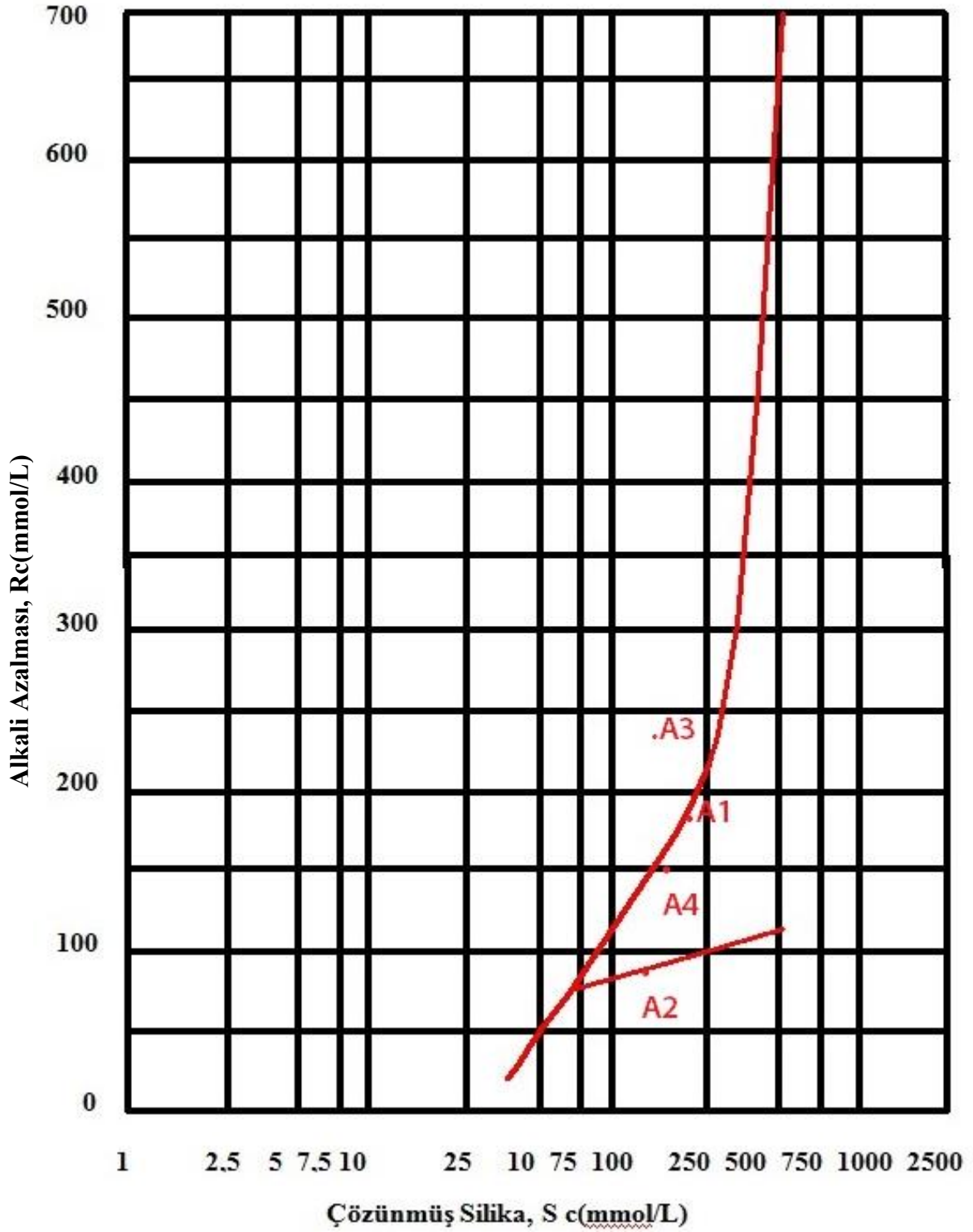
### 2.5.3. Kimyasal Yöntem

Deneye tabi tutulan agreganın çözünmüş silis (Sc) ve potansiyel alkali azalması (Rc) değerleri kullanılarak (Tablo 19) oluşturulmuştur.

Tablo 19. Deney sonuçları

	Çözünmüş Silis (mmol/L)	Alkali Azalması (mmol/L)
A 1	212,62	180
A 2	145,70	90
A 3	177,65	240
A 4	155,01	150

Deneye tabi tutulan agreganın çözünmüş silis (Sc) ve potansiyel alkali azalması (Rc) değerleri (Şekil 68) üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 68. Alkalinite azalması deneyine bağlı olarak elde edilen zararsız ve zararlı agrega sınırlarını gösteren grafik

Buna göre A2 örneği zararlı kabul edilen C bölgesinde, A4 ve A1 örnekleri potansiyel zararlı kabul edilen B bölgesinde yer almaktadır. A3 örneği ise zararsız agrega

bölgesinde olmakla birlikte potansiyel zararlı agrega bölgesi sınırına oldukça yakın bir noktadadır.

Bir agreganın ASR yönünden zararlı olan C bölgesinde yer alması, agreganın zararlı derecede alkali reaktif olduğunun göstergesidir. Ancak, B bölgesinde yer alan agrega, her ne kadar alkalilerle çok fazla reaktif olsa da, göreceli olarak harçta veya betonda düşük genleşme değerleri verebilir. Bu agregalar ile ilave deneyler gerçekleştirilmeli ve/veya betondaki performansı izlendikten sonra karar verilmelidir. Bu deney sonuçları elde edilinceye kadar agregaların potansiyel olarak zararlı oranda reaktif oldukları kabul edilir.

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada üzerinde çok miktarda HES yapılmakta olan Harşit çayı vadisi boyunca 5 farklı noktadan alınan agregalar alkali silika reaksiyonu açısından incelenmiştir. Agregalar vadi boyunca yapılan santral yapımı için kullanılan agrega ocaklarından temin edilmiştir.

1. Alınan örneklerin petrografik analizleri yapılmış, Hızlandırılmış Harç Çubuğu ve Kimyasal Yöntem uygulanarak alkali silika reaksiyonu yönünden zararlı olup olmadıkları belirlenmeye çalışılmıştır. Petrografik analizde tüm örneklerin baskın olarak volkanik kaya kırıntılarında olduğu, volkanik kaya kırıntılarının büyük kısmı da volkanik camdan oluşan bir matriks içerdiği belirlenmiştir. Volkanik kayalarda bulunan volkanik camın alkali-silis reaksiyonu oluşumunda oldukça etkili olduğu bilinmektedir.
2. Kimyasal yöntem sonucunda elde edilen alkali azalması ve çözünen silis miktarları TS 2517 standardında verilen zararlı ve zararsız agrega sınırlarını veren grafiğe yerleştirildiğinde A2 örneği C bölgesinde, A4 ve A1 örnekleri B bölgesinde A3 örneği de B sınırına çok yakın olarak A bölgesinde yer almıştır. Buna göre A2 örneği zararlı bölgede, A1 ve A4 örnekleri potansiyel zararlı bölgede, A3 örneği ise potansiyel zararlı agrega sınırına çok yakın olarak zararsız bölgede sonuç vermiştir.
3. Hızlandırılmış Harç Çubuk Deneyinde, A1, A2, A3, A4 ve A5 örneklerinin boyca uzamaları yüzdeleri sırasıyla % 0,185, 0,273, 0,209, 0,237 ve 0,257 olmuştur. ASTM C 1260'a göre A1 örneği şantiyede hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilir niteliktedir. A2, A3, A4 ve A5 örnekleri ise 14 günlük uzama yüzdesi sınırı olan % 0,2 değerinin üzerinde uzama yaptıkları için zararlı agrega sınıfına girmektedirler.
4. Çalışmada kullanılan petrografik analiz, hızlı harç çubuk ve kimyasal yöntem sonuçları birlikte değerlendirildiğinde Harşit Çayı Vadisi agregalarının alkali silika reaksiyununa eğilimli oldukları söylenebilir. Fakat kesin sonuç için bu çalışmanın devamında beton prizma deneyi uygulanabilir ve alkali prizma reaksiyonunu kontrol altına almak için agregaların mineral katkı maddeleriyle kullanımı gibi bazı tedbirlerin kullanılıp kullanılmayacağı konusunda incelemeler yapılabilir.

#### 4. KAYNAKLAR

- Abit, Ö., 1998. Alkali Silis Reaksiyonunun Kimyasal Katkılar ile Önlenmesi, Azaltılması veya Onarılması. T.C. Karayolları Kurs Programı, Ankara.
- ACI 221./R, 2000. Guide for Use of Normal Weight and Heavy Weight Aggregates in Concrete, American Concrete Institute ACI Manual Concrete Practice.
- ACI Committee 221, 1998. State of the art report on alkali aggregate reactivity, ACI 221.1R-98, 31.
- Akçaözöğlü, K., 2007. Silis Dumanı İçeren Yüksek Dayanımlı Harçlarda Numune Boy Değişiminin Basınç Dayanımı ve Birim Kısılma Üzerindeki Etkisi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana.
- Andersen T., K. ve Thaulow, N., 1990. The study of alkali silica reactions in concrete by the use of thin sections, 71-89, Petrography Applied to Concrete and Aggregates, B. Erlin, D. Stark (Eds.), ASTM STP 1061, ASTM, Philadelphia, USA, 207.
- Andıç, Ö. 2002. Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması, Y.Lisans Tezi.
- Aköz, F. ve Andıç, Ö., 2006 Alkali Agregası Reaksiyonunun Hızlandırılmış Deneysel Yöntemiyle Araştırılması, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Andıç, Ö. Ç., 2007, Alkali-Agregası Reaktivitesinin Tespitinde Kullanılan Deneysel Metotlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 255.
- Arslan, M., 2001. Beton Dökümü, Kalıpları, Kusurları ve Dayanıklılığı, Atlas Yayınevi.
- ASTM C-1260-94, 1994. 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.
- ASTM C-1293, 1994. C1293-01 Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Philadelphia, PA, USA, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C-289-94, 1994. C1293-01 Standard Test Method for Potential Reactivity of Aggregates (Chemical Method), Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Philadelphia, PA, USA, American Society for Testing and Materials.

- Bektaş, F., 2002. Preventive Measures Against Alkali-Ailika Reaction, Middle East Tecnical University, Ankara, Turkey.”
- Bektaş, F., Turanlı, L., Topal, T. ve Göncüoğlu, M.C., 2004. Alkali Reactivity of Mortars Containing Chert and Incorporating Moderate Calcium Fly Ash, Cement and Concrete Research, 34, 2209-2214.
- Bektaş, F., Turanlı, L. ve Monteiro, P.J.M., 2005. Use of Perlite Powder to Suppress the Alkali Silica Reaction, Cement and Concrete Research, 35 ,10, 2014-2017.
- Berube, M.A. ve Duchesne, J., 1992. Evaluation of Test Methods Used for Assesing the Effectiveness of Mineral Admixtures in Suppressing Expansion due to Alkali Aggregate Reaction, Proceedings, 4th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-132, American Concrete Institute, Detroit, Istanbul, Turkey, 549-575.
- Berube, M.A. ve Fournier, B., 1992. Accelerated Test Methods for Alkali Aggregate Reactivity, Advances in Concrete Technology, Malhotra, V.M.(Ed.), Energy, Mine sand Resources, Ottawa, Canada, 991.
- Blanks, R.F., 1941. Concrete deterioration at Parker Dam, Engineering News Record 126, 462-465.
- Cole, W.F. ve Lancucki, C.J., 1983. Products Formed in an Aged Concrete: The Occurrence of Okenite, Cement and Concrete Research, 13, 611-618.
- Crucq, P., 2005. Development of a Method to Measure the Mechanical Behavior of ASR Gels, Part I: Literature Study; Alkali-Silica Reaction, Causes, Effect Sand Prevention. Microlab Civilengineering and Geosciences, Dutelft, 55.
- CSA A23.2-14A, 1994. Potential Expansivity of Aggregates (Procedure for Length Change Due to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Prisms), 207-216.
- CSA A23.2-25A, 1994. Test Method for Detection of Alkali-Silica Reactive Aggregate by Accelerated Expansion of Mortar Bars, 240-245.
- CSA International, 2000. A23.1-00/A23.2-00 Concrete Materials and Methods of Concrete Construction / Methods of Test for Concrete, CSA International, 178 Rexdale Boulevard, Toronto, Ontario M9W 1R3.
- CSA, A23.2-94, 1994. Test Method for Detection of Alkali-Silica Reactive Aggregate by Accelerated Expansion of Mortar Bars, Methods of Test for Concrete, Canadian Standards Association, Ontario, Canada, 236-242.
- Çağlayan M., Haberveven S., İpekoğlu B. ve Kurşun İ., 1999. Beton Yapımında Kullanılan Agregaların Özellikleri ve Örnek Bir Kuruluş İSTON, 2. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, Haziran, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 69-79.

- Danay, A., 1994. Structural Mechanics Methodology in Diagnosing and Assessing Long-Term Effects of Alkali-Aggregate reactivity in Reinforced Concrete Structures, Detroit, ACI Material Journal, American Concrete Institute.
- Davraz, M. ve Gündüz, L., 2004. Doğal amorf silikanın alkali silica reaksiyonu gelişimine etkisi, BETON 2004 Kongresi, 10.
- Dent-Glasser, L.S. ve Kataoka, N., 1981. The chemistry of Alkali-Aggregate Reactions, 1-7, Proceedings of the Fifth International Conference on Alkali- Aggregate Reactions, 252, 23, 66.
- Diamond S., 2000. Chemistry and Other Characteristics of ASR Gels, 31-40, Proceedings 11th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction, Ed. Berube, M.A., Fournier, B., Durand, B., Quebec, QC, Canada, 1406.
- Erdoğan, T.Y., 2007. Beton ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Genişletilmiş 2. Baskı, Ankara.
- Eyüpoğlu., R., 1995. Türk Standartlarında Kırmataş, TS 706 TS 707 TS 3526, İ.T.Ü. Maden Fakültesi, İstanbul.
- Farny, J. A. ve Kosmatka, S. H., 1997. Diagnosis and Control of Alkali Aggregate Reactions in Concrete, Concrete Information, Portland Cement Association, 23.
- Farny, J. A. ve Kosmatka, S.H., 1998. Betonda Alkali Agregat Reaksiyonunun Teşhis ve Kontrolü, Çeviren: Kalmış, M., Güngör, N., Eribol, S., American Concrete Pavement Association (ACPA).
- Ferraris, C. F., Clifton, J.R., Garbozci, E. J. ve Davis, F. L., 1997. Stress Due To Alkali Silica Reactions in Mortars, National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg, M.D, U.S.A.
- Figg, J., 1987. ASR Inside Phenomena and Outside Effects (crack origin and pattern), 152-156, P.E. Grattan-Bellew (Ed.), Concrete Aggregate Reaction, Noyes Publications, New Jersey, 509.
- Glasser, F. P., 1992. Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction, The Alkali-Silica Reaction in Concrete, R. N. Swamy (ed), Van Nostr and Reinhold, New York, 333.
- Grattan-Bellew, P.E., Cybanski, C., Fournier, B. ve Mitchell, L., 2003. Proposed Universal Accelerated Test For Alkali Aggregate Reaction, 25, 2, 29-34.
- Gün M., 2007. Adapazarı Bölgesindeki Agregaların Alkali Agregat Reaksiyonu Bakımından İncelenmesi, Y.Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Hansen, W.C., 1944. Studies Relating to The Mechanism by Which Alkali Aggregate Reaction Produces Expansion in Concrete, Journal of American Concrete Institute Proceedings, 40, 3, 213-227.



- Hawkins, M.R., 1983. Alkali Aggregate Reaction: Minimizing the Risk of Alkali-Silica Reaction, Guidance Notes, Report of a Working Party, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, Slough, UK.
- Helmut, R., Stark, D. ve Diamond, S., 1993. Alkali Silica Reactivity: An Overview of Research, Strategic Highway Research Program, <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-C-342>. Pdf, National Research Council, Washington.
- Hobbs, D. W., 1988, Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thomas Telford, London, 183.
- Hooton, R.D., 2000. Canadian use of Ground Granulated Blast-Furnace Slag as A Supplement Cementing Material for Enhanced Performance of Concrete, Canadian Journal of Civil Engineering, 754-760.
- Karahan, O., Arı, K., Haktanır, T. ve Atış, C.D., 2005. İki Farklı Portland Çimentolu Betonların Dayanımına Zaman ve Kür Etkisinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21, 62-68.
- Karakaya, N., Karakaya, M., Ç. ve Faure, K. 2007. Doğu Karadeniz Bölgesi Kil Minerallerinin Oluşumu ve Kökeni, S.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22, 2-3.
- Katayama, T., 1996. Characteristics on Alkali Aggregate Reaction, The Study on the Maintenance and Rehabilitation of Highway Bridges in the Republic of Turkey, 11.
- Katayama, T., 2000. Alkali aggregate reaction in the vicinity of İzmir, Western Turkey, Alkali Aggregate Reaction in Concrete, 365-374, Proc. 11th International Conference, Ed. Berube, M.A., Fournier, B., Durand, B., Quebec, QC, Canada, 1406.
- Kirkpatrick, R.J., 1991. MAS Nuclear Resonance Spectroscopy of Cement Systems, ACBM Seminar, Northwestern University, Evanston, IL.
- Koca, C., 1996. Hazır Beton Sektörü Açısından Agregas Sektörüne Bakış, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, İstanbul.
- Korkanç, M. ve Tuğrul, A., 2004. Beton Agregası Olarak Kullanılacak Bazaltların Alkali-Silis Reaksiyonu Yönünden İncelenmesi, İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, 17, 2, 161-169.
- Kurt, İ. ve Özkan, İ. 2006. Kuzeydoğu Pontitlerin Maden Yatakları, Doğu Karadeniz Bölgesi Maden Yataklarının Değerlendirilmesi Sempozyumu, Eylül, Trabzon, Bildiriler Kitabı: Eylül, Trabzon, 43-48.
- Kurtis, K.E., Monteiro, P.J.M., Brown, J.T. ve Meyer-Ilse, W., 1998, Expansive reactions in concrete observed by soft x-ray transmission microscopy, Materials Research Society Symposium Proceedings, 524, 3-9.

- Mc Joy, W.J. ve Caldwell, A.J., 1951. New Approach to Inhibiting Alkali Aggregate Expansion, *Journal of American Concrete Institute*, 22, 693-706.
- Meissner, H.S., 1941, Cracking in Concrete Due to Expansion Reaction Between Aggregate and High Alkali Cement as Evidenced at Parker Dam, *Proc. American Concrete Institute*, 37, 549-568.
- Merriaux, K., Lecomte, A., Degeimbre, R. ve Darimont A., 2003. Alkali Silica Reactivity With Pessimism Content on Devonian Aggregates From the Belgian Ardenmassive, *Magazine of Concrete Research*, 55, No.5, October, 429-437.
- Mladenovic, A., Suput, J.S., Ducman, V. ve Skapin, A.S., 2004. Alkali- Silis Reaktivite of Some Frequently Used Lightweight Aggregates, *Cement And Concrete Research*, 34, 1809-1816.
- Moranville-Regourd, M., 1989. Products of Reaction and Petrographic Examination, 445-456, *Proc. 8th International Conference on Alkali- Aggregate Reaction*, Ed. Okada, K., Nishibayashi, S., Kawamura, M., Kyoto, Japan, 886.
- Nixon, P.J. ve Gaze, M.E., 1983. The Effectiveness of Fly Ash Sand Granulated Blast-Furnace Slags in Preventing AAR, *Proc. 6th International Conference on Alkalies on Concrete*, Idorn, G.M., Rostam, S. (Eds), Copenhagen, 61-68.
- Poole, A. B., 1992. Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 30-53, *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, R. N. Swamy (ed), Van Nostrand Reinhold, New York, 333.
- Ramyar, K., Dönmez, H. ve Andiç, Ö., 2002. Alkali Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento ve Beton Araştırma-Geliştirme Enstitüsü, ANKARA.
- Ramyar, K., Topal, A. ve Andiç, Ö., 2005. Effects of Aggregate Size and Angularity on Alkali-Silica Reaction, *Cement and Concrete Research*, 35, 11, 2165-2169.
- Sağlık, A., Kocabeyler, M., Orkun, Y., Halıcı, M. ve Tunç, Ergin., 2002. Deriner Barajı ve Hes İnşaatı Kütle Betonunda Kullanılması Planlanan Agregalarda Alkali-Silis Reaksiyonu Riski ve Önlenmesine Yönelik Yürütülen Çalışmalar.
- Shayan, A., Diggins, R. ve Ivanusec, I., 1995. Effectiveness of Fly Ash in Preventing Deleterious Expansion Due To Alkali-Aggregate Reaction in Normal and Steam-Cured Concrete, *Cement and Concrete Research*, 26, 1, 153-164.
- Shrp, Alkali Silica Reactivity Library Handbook for Identification ASR, <http://leadstates.tamu.edu/asr/>, 10 Haziran 2012.
- Stanton, D.E., 1940. The expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, *Proc. American Society of Civil Engineers*, 66, 1781- 1811.

- Stark, D., 1978. Alkali-silica reactivity in the Rocky Mountain Region, Proc. of the 4th International Conference on the Effect of Alkalies in Cement and Concrete, Purdue University: 235-243.
- Stark, D., 1992. "Eliminating or Minimizing Alkali-Silica Reactivity, SHRP-C343", Washington, D.C., Strategic Highway Research Program.
- Stark, D., 1993. Handbook For The Silica Reactivity in Highway Structures, SHRP-C/FR-91-101, Strategic Highway Research Program, Washington.
- Stokowski, Jr., Steven J. ve Sarson, J., 2002. Alkali-Silica Reactivity In Concrete, Stone Products Consultants, Massachusetts, U.S.A.
- Stone Products Consultants ve Stokowski, S.J., 1999-2003. Alkali Silica Reactivity in Concrete, U.S.A.
- Struble, L.J., 1981. Swelling Properties of Synthetic Alkali-Silica Gel, Journal of the American Ceramic Society, 64,11, 611-55.
- Swamy, R.N. ve Al- Asali, M.M., 1989. Effects of Alkali Silica Reaction on The Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beams. ACI Structural Journal, 86, 451-459.
- Swamy, R. N., 1992. Testing for Alkali Silica Reaction, 54-95, The Alkali- Silica Reaction in Concrete, R. N. Swamy (Ed), Van Nostrand Reinhold, New York, 333.
- Swamy, R. N., 1994. Alkali Aggregate Reaction the Bogeyman of Concrete, American Concrete Institute Special Report 144, Mehta, P.K. (Ed.), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 683.
- Thaulow, N., Hjorth Jakobsen, U. ve Clark, B., 1996. Composition of Alkali Silica Gel and Ettringite in Concrete Rail Roadties: SEM-EDX and X-ray Diffraction Analyses, Cement and Concrete Research, 26, 2, 309-318.
- Thomas, M.D.A., Hooton, R.D. ve Rogers, C.A., 1997. Prevention of Damage Due to Alkali Aggregate Reaction in Concrete Construction- Canadian Approach, Cement, Concrete and Aggregates, 19, 1, 26-30.
- Topal, A. ve Şengöz, B., 2011. Agregat Boyutu ve Köşeliliğinin Alkali-Silis Reaksiyonu Üzerine Etkisi, 9 Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Topçu, İ. B., 2003. Atık Camlı Harçlarda Alkali Silis Reaksiyonu, 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- TS 2517, 1977. Alkali-Agregat Reaktivitesinin Kimyasal Yolla Tayini, Ankara Türk Standartları Enstitüsü.
- TS 706, TS 3529, TS 3526, TS 3670, TS 3527, TS 3530, TS 3814, TS 635 Standartları.

- Turanlı, L., Bektaş, F. ve Montherio, P.J.M., 2003. Use of Grand Brick as A Pozzolanic Material to Reduce The Alkali Silika Reaction, *Cement And Concrete Research*, 33, 1539-1542.
- URL-1 [http://e-egitim.teknolojikarastirmalar.com/yapi\\_malzemesi/beton/Kay11.htm](http://e-egitim.teknolojikarastirmalar.com/yapi_malzemesi/beton/Kay11.htm), 15 Ekim 2012.
- URL-2 <http://ekutup.dpt.gov.tr/iller/duzce/2001.pdf>, 17 Ekim 2012.
- Wakizaka, Y., 1998. Reactivity of Rock sand Minerals in Alkaline Solution. *J. Res., Public Works Res. Inst.* 34-146.
- Wigum, B.J., Peredrsen, L.T. ve Grelk, B., 2006. State of The Art Report, Key parameters Influencing The Alkali Aggregate Reaction, Romball, Denmark, 75.
- Woods, H., 1968. Durability of Concrete Construction, Detroit Michigan, American Concrete Institute, USA.
- Xu, Z., Lan, X., Deng, M. ve Tang, M., 2000. A new accelerated method for determining the potential alkali-carbonate reactivity, 129-138, *Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, Proc. 11th International Conference, Quebec, QC, Canada, Ed. Berube, M.A., Fournier, B., Durand, B., 1406.
- Zarif İ. H., Tuğrul A. ve Dursun G., 2003. İstanbul'daki kireçtaşlarının agrega kalitesi yönünden incelenmesi, *İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi*, 16, 2, 61-70.
- Zichao, W. ve Naik, T.R., 2003. Chemically Activated Blended Cement, *ACI Materials Journal*.

## ÖZGEÇMİŞ

Sevda KARAKAŞ, 06.10.1985'de Şalpazarı'nda doğdu. İlköğretimini Şalpazarı Merkez İlköğretim Okulu'nda okudu. Orta ve lise eğitimini Vakfikebir Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2009 yılında Cumhuriyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü bitirdi. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisansa başladı. 2009-2011 yılları arasında proje mühendisliği yaptı. 2011 yılında Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı'nda göreve başladı halen devam etmektedir.