

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CAM AGREGA İÇEREN HARÇLARDA
ASR OLUŞUMU VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Deniz MÜYESSER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

NİSAN 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CAM AGREGA İÇEREN HARÇLARDA
ASR OLUŞUMU VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Deniz MÜYESSER
(501111016)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç Dr. Ünal Anıl DOĞAN

NİSAN 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111016 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Deniz MÜYESSER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “CAM AGREGA İÇEREN HARÇLARDA ASR OLUŞUMU VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Ünal Anıl DOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa Hulusi ÖZKUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nabi YÜZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **28 Mart 2016**
Savunma Tarihi : **25 Nisan 2016**





Canım aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisansım boyunca bilgi ve tecrübesiyle destek olan, hayata bakışıyla da örnek aldığım değerli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ünal Anıl DOĞAN'a, eğitim öğretim hayatımda emeği geçen tüm hocalarıma, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen anneme, babama ve kardeşime ayrı ayrı teşekkür ederim.

Tezimin deneyleri için maddi olarak destekte bulunan BAP'a, malzemelerin temininde yardımcı olan Elkem, Grace ve Günkem'e, deneyler sırasında yardımlarını esirgemeyen tüm Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına da teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca yüksek lisans eğitimime devam etmem konusundaki hoşgörülü yaklaşımları için YPU yöneticilerime ve başta tiyatro ekibi olmak üzere bu yoğun süreçte yanımda olarak hayatı daha da anlamlı kılan tüm arkadaşlarıma en içten dileklerle teşekkür ederim.

Nisan 2016

Deniz Müyesser
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
2. ALKALİ AGREGA REAKSİYONU	3
2.1 Alkali Silika Reaksiyonu.....	3
2.1.1 ASR kimyası ve oluşum mekanizması.....	5
2.1.2 ASR'yi etkileyen faktörler	8
2.1.2.1 Agregadaki reaktif silis ve agrega özellikleri.....	8
2.1.2.2 Betonun alkali içeriği	11
2.1.2.3 Nemin etkisi ve geçirimsizliğin azaltılması.....	14
2.1.2.4 Sıcaklığın etkisi.....	15
2.1.2.5 Diğer faktörler	16
2.1.3 Alkali silika reaksiyonunu önleme yöntemleri	17
2.1.4 Alkali silika reaksiyonunun belirtileri.....	18
2.1.4.1 Genleşme.....	18
2.1.4.2 Çatlaklar	19
2.1.4.3 Yüzey birikintileri	20
2.1.4.4 Parça atma	21
2.1.4.5 Renk değişimi	22
2.1.4.6 Yer değiştirmeler.....	22
3. ALKALİ AGREGA REAKSİYONU TESPİTİNDE KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ	23
3.1 Harç Çubuğu Yöntemi	23
3.2 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Yöntemi	24
3.3 Mineral Katkı Kullanımı Durumunda Hızlandırılmış Harç Çubuğu Yöntemi.....	26
3.4 Beton Prizma Yöntemi	26
3.5 Hızlandırılmış Beton Prizma Yöntemi.....	27
3.6 Beton Mikrobar Deneyi.....	28
3.7 Kimyasal Yöntem.....	29
3.8 Petrografik Analiz Yöntemi	29
3.9 Otoklav Yöntemi	30
3.10 Tahribatsız ASR Yöntemleri.....	31
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	33
4.1 Kullanılan Malzeme	33
4.1.1 Çimentonun özellikleri.....	33

4.1.2	Agrega özellikleri.....	33
4.1.3	Kimyasal ve mineral katkıları	35
4.2	Karışımların Tasarımı.....	36
4.3	Uygulanan Deneyler.....	38
4.3.1	ASR deneyleri	38
4.3.1.1	Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi	38
4.3.1.2	Harç çubuğu deneyi.....	41
4.3.2	Mekanik özellikler ile ilgili deneyler	41
4.3.2.1	Eğilme dayanım deneyi.....	42
4.3.2.2	Basınç dayanım deneyi.....	43
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA	45
5.1	Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi Sonuçları.....	45
5.1.1	Yayılma değerlerinin incelenmesi.....	45
5.1.1.1	Kum agregalı harçların yayılma değerleri.....	45
5.1.1.2	Cam agregalı harçların yayılma değerleri	46
5.1.2	Genleşme değerlerinin incelenmesi	47
5.1.2.1	Kum agregalı numunelerin genleşme değerlerinin incelenmesi	47
5.1.2.2	Cam agregalı numunelerin genleşme değerlerinin incelenmesi.....	48
5.2	Mekanik Özellikler İle İlgili Deney Sonuçları	53
5.2.1	Basınç dayanım deneyi sonuçları	54
5.2.1.1	Kum agregalı numunelerin basınç dayanım değerlerinin incelenmesi	54
5.2.1.2	Cam agregalı numunelerin basınç dayanım değerlerinin incelenmesi	56
5.2.1.3	Kum ve cam agregalı numunelerin basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması	58
5.2.2	Eğilme dayanım deneyi sonuçları	60
5.2.2.1	Kum agregalı numunelerin eğilme dayanım değerlerinin incelenmesi	60
5.2.2.2	Cam agregalı numunelerin eğilme dayanım değerlerinin incelenmesi	62
5.2.2.3	Kum ve cam agregalı numunelerin eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması	65
5.3	Harç Çubuğu Deneyi Sonuçları.....	67
5.3.1	Genleşme değerlerinin incelenmesi	67
5.3.1.1	Kum agregalı numunelerin genleşme değerlerinin incelenmesi	67
5.3.1.2	Cam agregalı numunelerin genleşme değerlerinin incelenmesi.....	69
5.4	Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri	72
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	85
	KAYNAKLAR.....	87
	ÖZGEÇMİŞ	93

KISALTMALAR

AAR	: Alkali Agrega Reaksiyonu
ACI	: American Concrete Institute
ACR	: Alkali Karbonat Reaksiyonu
ASR	: Alkali Silika Reaksiyonu
BN	: Bağıl Nem
BPD	: Beton Prizma Deneyi
HBPD	: Hızlandırılmış Beton Prizma Deneyi
HCD	: Harç Çubuğu Deneyi
HHCD	: Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Agregada elek analizi	24
Çizelge 4.1 : Beyaz çimento kimyasal analizi	34
Çizelge 4.2 : CEN standart kumu tanecik büyüklüğü dağılımı.	34
Çizelge 4.3 : Cam agregada granülometrisi.	35
Çizelge 4.4 : Cam agregada kimyasal analizi.....	35
Çizelge 4.5 : Silis dumani kimyasal analizi.....	36
Çizelge 4.6 : Karışım oranları tablosu.	37
Çizelge 5.1 : Kum agregalı numuneler için 3, 7 ve 14 günlük ASR genleşmeleri (HHCD).....	47
Çizelge 5.2 : Cam agregalı numuneler için 3, 7 ve 14 günlük ASR genleşmeleri (HHCD).....	49
Çizelge 5.3 : Lityum hidroksit katkılı cam agregalı numuneler için 3, 7 ve 14 günlük ASR genleşmeleri (HHCD).	52
Çizelge 5.4 : Kum agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası basınç dayanım değerleri (HHCD).....	55
Çizelge 5.5 : Cam agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası basınç dayanım değerleri (HHCD).....	56
Çizelge 5.6 : Lityum hidroksit katkılı cam agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası basınç dayanım değerleri (HHCD).	57
Çizelge 5.7 : Kum agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası eğilme dayanım değerleri (HHCD).....	60
Çizelge 5.8 : Cam agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası eğilme dayanım değerleri (HHCD).....	62
Çizelge 5.9 : Lityum hidroksit katkılı cam agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası eğilme dayanım değerleri (HHCD).....	64
Çizelge 5.10 : Kum agregalı numuneler için 6 aylık ASR genleşmeleri (HCD).....	67
Çizelge 5.11 : Cam agregalı numuneler için 6 aylık ASR genleşmeleri (HCD).	69
Çizelge 5.12 : Lityum hidroksit katkılı cam agregalı numuneler için 6 aylık ASR genleşmeleri (HCD).	72



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Boşluk suyu çözeltisindeki silisli agrega.....	5
Şekil 2.2 : OH ⁻ iyonları agrega yüzeyine yönelir.	6
Şekil 2.3 : Yüzeydeki silanol grupları kırılarak SiO ⁻ moleküllerini oluşturur.....	6
Şekil 2.4 : Serbest kalan SiO ⁻ molekülleri boşluk suyundaki alkali katyonlarını çekerek agrega çevresinde alkali silika jeli oluştururlar.	7
Şekil 2.5 : Alkali silika jeli su emerek genişir, oluşan ozmotik basınç agregada veya bağlayıcı matriste çatlaklar oluşturur.	7
Şekil 2.6 : Pesimum davranış grafiği (Hobbs, 1988).....	13
Şekil 2.7 : Bağlı nem ile ASR genişme grafiği (Poole, 1992).	15
Şekil 2.8 : ASR'den kaynaklanan çatlaklara ilişkin örnek görünüşler.	19
Şekil 2.9 : ASR çatlaklarının beton kaplamalardaki gelişim evreleri.....	20
Şekil 2.10 : Parça atma olayının oluşum şekilleri (Poole, 1992).....	21
Şekil 2.11 : Parapet elemanı, Val de Mare Barajı, Jersey (Poole, 1992).....	22
Şekil 3.1 : Alkalinitedeki azalma (Rc) – Çözünen silis (Sc) grafiği (ASTM C289).	29
Şekil 4.1 : Cam agregaların çeşitli elek boyutlarından elenerek gruplanması.....	38
Şekil 4.2 : Harç yayılma deneyi.....	39
Şekil 4.3 : Kalıptan çıkarıldıktan sonra bir hafta ıslak beze sarılı, 3 hafta tezgaha serili şekilde kürlenmiş numuneler.	40
Şekil 4.4 : Eğilme dayanımı deney aleti	42
Şekil 4.5 : Basınç dayanımı deney aleti.....	43
Şekil 5.1 : Kum agregalı harç karışımlarının yayılma değerleri.....	45
Şekil 5.2 : Cam agregalı harç karışımlarının yayılma değerleri.	46
Şekil 5.3 : Kum agregalı numuneler için 14 günlük ASR genişmeleri (HHCD).....	48
Şekil 5.4 : Cam agregalı numuneler için 14 günlük ASR genişmeleri (HHCD)	50
Şekil 5.5 : Cam agregalar ile hazırlanan polimer ve silis dumanı katkılı numune setlerinin 14 günlük ASR genişme değerleri (HHCD).....	51
Şekil 5.6 : Kum ve cam agregalı numunelerin 14. gün sonundaki ASR genişmeleri (HHCD).....	51
Şekil 5.7 : Lityum hidroksit katkılı cam agregalı numunelerin 14 günlük ASR genişme değerleri (HHCD).	52

Şekil 5.8 : Deney sonrası ASR'ye uğrayan numune fotoğrafları (HHCD).	53
Şekil 5.9 : Kum ve cam agregalı numune kesitleri.	54
Şekil 5.10 : Kum agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).	55
Şekil 5.11 : Cam agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).	58
Şekil 5.12 : Kum ve cam agregalı numunelerde ASR öncesi basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).	58
Şekil 5.13 : Kum ve cam agregalı numunelerde ASR sonrası basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).	59
Şekil 5.14 : Kum agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).	61
Şekil 5.15 : Cam agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).	65
Şekil 5.16 : Kum ve cam agregalı numunelerin ASR öncesi eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).	66
Şekil 5.17 : Kum ve cam agregalı numunelerin ASR sonrası eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).	67
Şekil 5.18 : Kum agregalı numuneler için 6 aylık ASR genleşmeleri (HCD).	69
Şekil 5.19 : Cam agregalı numuneler için 6 aylık ASR genleşmeleri (HCD).	71
Şekil 5.20 : Lityum hidoksit katkılı cam agregalı numuneler için 6 aylık ASR genleşmeleri (HCD).	72
Şekil 5.21 : Tepkimeye girmeden kalan silis dumanı tanelerinin ESEM görüntüsü.	73
Şekil 5.22 : Tepkimeye girmeden kalan silis dumanı tanelerinin EDS analizi.	73
Şekil 5.23 : Cam agrega etrafında olduğu düşünülen ASR jelleri ESEM görüntüsü-1.	74
Şekil 5.24 : Cam agrega etrafında olduğu düşünülen ASR jelleri ESEM görüntüsü-2.	74
Şekil 5.25 : Parçalanmış cam agrega ve etrafında oluşan ASR ürünü jeller.	75
Şekil 5.26 : Altıgen CH kristalleri varlığı.	75
Şekil 5.27 : Vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanı kullanılan numunenin ESEM görüntüleri -1.	76
Şekil 5.28 : Vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanı kullanılan numunenin ESEM görüntüleri -2.	77
Şekil 5.29 : Vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanı kullanılan numunenin ESEM görüntüleri -3.	77
Şekil 5.30 : Vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanı kullanılan numunenin ESEM görüntüleri -4.	78
Şekil 5.31 : EVA esaslı sıvı polimer ve silis dumanı kullanılan numunenin ESEM görüntüleri.	78

Şekil 5.32 : Gülsü yapılı ASR ürünleri -1.....	79
Şekil 5.33 : Gülsü yapılı ASR ürünleri -2.....	79
Şekil 5.34 : Gülsü yapılı ASR ürünleri -3.....	80
Şekil 5.35 : Gülsü yapılı ASR ürünleri -4.....	80
Şekil 5.36 : Gülsü yapılı ASR ürünleri -5.....	81
Şekil 5.37 : LiOH katkılı numunelerin ESEM görüntüleri -1.	82
Şekil 5.38 : LiOH katkılı numunelerin ESEM görüntüleri -2	82
Şekil 5.39 : LiOH katkılı numunelerin ESEM görüntüleri -3.	83
Şekil 5.40 : LiOH katkılı numunelerin ESEM görüntüleri -4.	83





CAM AGREGA İÇEREN HARÇLARDA ASR OLUŞUMU VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ

ÖZET

Alkali Silika Reaksiyonu, beton içerisindeki reaktif agregalar ile betonun boşluk suyunda bulunan alkali iyonların kimyasal tepkimesi sonucu gerçekleşen bir olaydır. Reaktif silis ve alkali iyonlarının birleşimi ile ASR jeli meydana gelir. Oluşan bu jel ortamda bulunan suyu bünyesine alan ve hacmini artıran bir yapıdadır. Ortamda nemin varlığı devam ettikçe oluşan jel nemi bünyesine almaya ve şişmeye devam eder. Şişen jel etrafına basınç uygular ve bu basınca dayanamayan beton çatlar.

1930'lu yıllarda A.B.D.'nin Kaliforniya Eyaletinde bazı yol kaplamalarında, köprülerde ve okul binalarında endişe verici genleşmeler ve çatlamlar meydana gelmiştir. 1940'larda karayolu mühendisi Thomas Stanton tarafından yapılan incelemelerde oluşan bu çatlakların nedeninin alkali silis reaksiyonu (ASR) olduğu ortaya çıkmıştır. Betonda alkali silika reaksiyonu böylelikle ilk kez Thomas Stanton tarafından tanımlanmıştır.

Alkali silika reaksiyonunun zararlı etkilerinin ortaya çıkması için ortamda üç koşulun varlığı şarttır. Bunlar; agregada kritik miktarda reaktif silisin varlığı, çimentodaki yeterince yüksek miktardaki alkali hidroksitler ve ortamda bulunacak yeterli nemdir. Bu üç kriterden birinin ortamda bulunmaması alkali silika reaksiyonu sonucu hasar oluşmasına engel olur.

Alkali silika reaksiyonunu engellemek için kullanılacak agreganın silis içermediğinden emin olmak gerekir. Beton içerisinde kullanılmadan önce, agreganın petrografik yapısı incelenmeli, reaktifliği hakkında bilgi edinilmelidir.

Kullanılacak agreganın reaktif olabileceğine dair şüpheler varsa çimentonun alkali oranı incelenmelidir. Eşdeğer alkali değeri %0,6'nın altında olan çimentoların kullanımı tercih edilmelidir.

Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın curufu gibi ince toz kimyasal katkıların kullanımı ASR'ye karşı koymada etkilidir. Son yıllarda lityum nitrat, lityum florür, lityum karbonat, lityum hidroksit gibi lityum bazlı katkılar da oluşabilecek alkali silika reaksiyonlarını önleme amacıyla kullanılmaktadır.

ASR'yi önlemenin en iyi yolu beton dökülmeden önce gerekli önlemleri almaktır. Bunun için agrega ve kullanılacak bağlayıcının seçimi önemlidir. Dikkatlice analizler yapıp; verimlilik ve ekonomiklik de göz önünde bulundurularak betonda kullanılacak malzemelere karar verilmelidir.

ASR'nin zarar verici etkilerinin ortaya çıkması için ortamda %80 oranında bağıl nemin varlığı gereklidir. Yapıya nemin girişi engellenerek, ASR'nin oluşumu büyük oranda engellenebilir. Beton üretiminde düşük su/çimento oranı kullanmak ve betonun geçirimsiz olmasını sağlamakta ASR'yi azaltıcı yönde etki eder. Geçirimsiz

betonlara daha az su girmesi sonucunda, alkali silika jellerinin emebileceği su miktarı da azaltılmış olur. Bunun için betonun iyi kürlenmesi veya serpmeye, sürme vb. önlemlerle yalıtım uygulamaları yapılması gerekir.

ASR'nin en tipik belirtisi harita deseni şeklinde oluşan ve gelişerek tüm yapıya yayılan çatlaklardır. Jelin çatlaklardan dışarı sızması ile oluşan yüzey birikintileri, parça atmalar, renk değişimleri de yapıda ASR varlığını gösteren diğer belirtilerdir.

Alkali agregası reaksiyonunun tespit edilmesinde kullanılan yöntemler ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Bu farkın nedeni, beton içerisinde kullanılan agregaların bileşenlerinin bölgeye göre farklılık göstermeleri ve her ülkenin kendine özgü deney yöntemlerini geliştirmiş olmasıdır. Reaksiyonların tespiti için kullanılan çok sayıda farklı deney yöntemi vardır. Yöntemlerden bazıları şunlardır: Harç çubuğu yöntemi (ASTM C227), Hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi (ASTM C1260), Mineral katkıların etkinliğini ölçmek için hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi (ASTM C1567), Beton prizma yöntemi (ASTM C1293), Hızlandırılmış beton prizma yöntemi, Beton mikrobiyal yöntemi, Kimyasal yöntem (ASTM C289), Petrografik analiz yöntemi (ASTM C295), Otoklav yöntem, Tahribatsız ASR yöntemleri. Yöntemler arasındaki temel farklar kür koşulları ve deney sürelerinin değişkenliğidir. Son yıllarda özellikle hızlandırılmış koşullarda, alkali eklenmesi ve ortam sıcaklığının artırılmasıyla beton ve harç numunelerinin kürlenmesi ve belirli zaman sonundaki genleşmelerinin ölçülerek deney metodlarının standartlaştırılmasına yönelik çalışmalar vardır.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmanın amacı, özellikle havuz kaplamaları gibi yerlerde karşımıza çıkan alkali silika reaksiyonu kökenli çatlaklardan yapıya nüfuz eden suyun yapı ömrünü kısaltması ve yapının kullanımı sırasında problemler yaratması gibi sorunların önlenmesidir.

Deneysel çalışmada, cam agregası içeren harçlarda farklı katkı maddeleri kullanarak, bunların alkali silika reaksiyonuna etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar gerçekleştirilirken çeşitli kimyasal ve mineral katkıları (vinil ester esaslı toz polimer, EVA esaslı sıvı polimer, çeşitli oranlarda silis dumanı ve lityum hidroksit) kullanılarak, bu katkıların ASR genleşmeleri ve dayanım üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Cam agregasının ASR bakımından reaktifliğini belirlemek için aynı karışım içeriğine sahip, agregası olarak kumun kullanıldığı numuneler de üretilmiştir. Bu şekilde hazırlanan kum veya cam agregalı numunelerden birer set hızlandırılmış harç çubuğu (ASTM C1260) deney koşullarına bırakılırken, birer sette harç çubuğu deneyine (ASTM C227) tabi tutulmuştur. ASR kaynaklı genleşmeleri ölçmek için 25x25x285 mm'lik boyutlarda, eğilme ve basınç dayanım deneylerini araştırmak için ise 40x40x160 mm olmak üzere 2 farklı boyutta toplamda 338 adet numune üretilmiştir.

Agregası, beyaz çimento ve su karışımlarına polimerler eklenirken çimentonun %5'i kadar ilave edilmiştir. Silis dumanı etkisi incelenirken %4, %8 ve %12 olmak üzere 3 farklı oran belirlenmiştir. Silis dumanı miktarının artırılmasının ASR genleşmeleri ve dayanım değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Kum agregası kullanılarak hazırlanan harçlarda; katkısız, vinil ester esaslı toz polimer katkıları, EVA esaslı sıvı polimer katkıları, %4 silis dumanı katkıları, %8 silis dumanı katkıları, %12 silis dumanı katkıları, vinil ester esaslı polimer ve %4 silis dumanı katkıları, vinil ester esaslı polimer ve %8 silis dumanı katkıları, vinil ester esaslı polimer ve %12 silis dumanı katkıları olmak üzere 9 farklı karışımda numuneler üretilmiştir.

Agrega olarak cam kullanılan karışımlarda bu 9 set aynı katkı oranlarıyla hazırlanmıştır. Bunlara ilave olarak EVA esaslı sıvı formlu polimer ile silis dumanının (%4, %8, %12 oranları ile) birlikte kullanıldığı 3 set ve lityum hidroksit etkisinin araştırılması amacıyla da sadece lityum hidroksit katkılı, lityum hidroksit ve vinil ester esaslı toz polimer katkılı, lityum hidroksit ve EVA esaslı sıvı polimer katkılı, lityum hidroksit ve silis dumanı (%4, %8) katkılı olmak üzere 5 farklı set daha üretilmiştir. Lityum hidroksit karışımlarda kullanılırken çimentonun %0,9'u oranında kullanılmıştır.

Ayrıca ESEM (elektron tarayıcı mikroskopu) görüntüleme yöntemi ile numunelerin fotoğrafları elde edilerek yorumlanmış, EDS analizleri ile birlikte tezde yer verilmiştir.

Tezin birinci bölümünde çalışmanın amacı anlatılmıştır. İkinci bölümde alkali silika reaksiyonunun oluşum mekanizması, ASR'yi etkileyen faktörler, önleme yöntemleri ve reaksiyonun belirtilerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde alkali agrega reaksiyonu tespitinde kullanılan deney yöntemleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde gerçekleştirilen deneysel çalışma kapsamında kullanılan malzemeler tanıtılmış, karışım oranları ve uygulanan deneyler anlatılmıştır. Beşinci bölümde deney sonuçları tartışılmış ayrıca numunelerin içyapı fotoğraflarına yer verilmiştir. Tezin son bölümü ise sonuç ve önerilere ayrılmıştır.



FORMATION AND INHIBITION OF ASR IN MORTARS INCLUDING GLASS AGGREGATES

SUMMARY

During its lifetime, the structure exposes to various dangers. When the reactive silica in the aggregates used in the concrete combines with alkali coming from the pore water, a chemical reaction occurs. As a result of this reaction, ASR gel is formed. While the water intake continues from the outdoor, the gel continues to swell out, thus forming stress around. The concrete that does not resist to stress gets crack, the cracks gets larger and covers the whole structure in the shape of a map. The reaction develops in this way and shortens the life of structure and has cracks in the shape of a map net as the most typical symptom is described as alkali silica reaction.

In 1930s, in the State of California of USA, alarming expansions and cracks came into existence on some pavements, bridges and school buildings. In 1940s, the cause of these cracks is found out to be alkali silica reaction (ASR) by Highway Engineer Thomas Stanton. Thus, alkali silica reaction on concrete is described at the first time by Stanton.

Causing cracks on concrete and damages in time, the alkali silica reaction (ASR) takes place in two stages. Combining with alkali from reactive silica cement in the first step, ASR gel products are formed. In the second step, these formed ASR gels take the environmental moisture to its structure and expand.

In concurrence with increasing the volume by trapping the moisture in the ambience, the formed gel causes map type cracks which are typical symptom of ASR on concrete. The effects of this slow progressing event reveals at least 1-2 years after the construction. Significant cracks occur in the concrete mass. Moreover, because the concrete gets permeable due to the cracks, it exposes to all kind of external influence, and strength reduces significantly.

The presence of three conditions is required in the ambience so that alkali silica reaction's harmful effects show up. These are: the presence of critical amount of reactive silica in the aggregate, high enough alkali hydroxide in cement and enough moisture in the ambience. In the event that one of these three criteria does not exist in the ambience prevents the damage caused as a result of alkali silica reaction.

The best way to prevent ASR is to take required precautions before pouring the concrete. For this, the choice of aggregate and binder to be used is important. Making the analysis carefully and taking into account of efficiency and economy, the materials to be used in the concrete shall be determined.

It is required to be sure that the aggregate which is to be used in order to prevent alkali silica reaction does not include silica. Petrographic structure of the aggregate shall be examined and information shall be obtained about its reactivity.

If there are doubts about that the aggregate to be used in the concrete is reactive, the alkali ratio of the concrete shall be examined. The cements having equivalent alkali value under 0,6% ratio shall be preferred to be used.

Usage of fine dust chemical additives such as fly ash, silica fume, and blast furnace slag is effective in resisting ASR. In recent years lithium based additives such as lithium nitrate, lithium fluoride, lithium carbonate, and lithium hydroxide are used in order to prevent possible alkali silica reaction.

Relative humidity in 80% is required in the ambiance to arise the damaging effects of ASR come into existence. Preventing the moisture entry in the structure, ASR formation can be prevented in a large extent. Using less water/cement in concrete production, and making the concrete to be impermeable minimises ASR gel. As a result of less water addition in impermeable concretes, the water ratio to be absorbed by alkali-silica gels is reduced. For this, the concrete shall be good cured or insulation applications shall be made via base coating, dwelling precautions, etc.

The most typical sign of ASR's harmful effects is map design shaped cracks. Expanding and combining with each other, the cracks expand to the whole structure. Surface leakage, pop-outs, and colour changes are other symptoms indicating the presence of ASR in the structure.

Expansions and cracks come into existence as a result of alkali silica reaction cause structural problems in concrete structures. Diagnosis carried out by traditional methods was made by identifying the cracks on the structure, and measuring the strength by core sampling from damaged areas. But the investigations show that the ASR originated damage on the concrete effects tensile strength and elasticity modulus rather than the compressive strength of the concrete. ASR damage is identified by petrographic analysis of concrete. Within this purpose; ASR products formed by microscopic examining of the sections taken from the concrete and reactive aggregates can be determined. Gel formation can be observed in the aggregate or around the aggregate. However, this study does not provide information about the extent of damage. Expansions, cracks, superficial sediments, pop-outs and colour changes on the surface can be guide in order to determine the ASR damage.

The methods used to detect the alkali aggregate reaction vary from country to country. The cause of this difference is that the aggregate component used in the concrete differs region to region, and each country has developed its own test methods. There are various test methods to be used in order to determine reactions. Some of these methods are: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method) (ASTM C227), Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Accelerated Mortar-Bar Method) (ASTM C1260), Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar Bar Method), Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction (ASTM C1293), Concrete Microbar Test Method, Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method) (ASTM C289), Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete (ASTM C295), Autoclave Method, and Non-Destructive ASR Methods. Basic differences among these methods are curing conditions and test durations. In recent years, there are studies for standardizing the test methods by measuring the expansions at specific time-ends curing concrete and

mortar specimen by alkali addition and the ambient temperature increase particularly in accelerated conditions.

The aim of the experimental work carried out under this thesis is especially to prevent the problems such as shortened structure life as a result of the water penetrated to the structure from the alkali silica reaction originated cracks confronting especially from pool claddings, thus resulting in problems during the usage of this structure.

By using different additives in the mortars including glass aggregate in the experimental work, the reaction of these additives to the alkali silica reaction is investigated. While performing the experimental studies, various chemical and mineral additives are used (vinyl ester based polymer powder, EVA-based liquid polymer, in various proportions silica fume and lithium hydroxide), and the ASR expansions of these additives and their effects upon the strength is investigated. In order to determine the reactivity of glass aggregate in terms of ASR; the specimens in which sand is used as aggregate having the same mixture content are also produced. One set per each specimen prepared in the same way with glass aggregate or sand is left under Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method) (ASTM C1260) conditions, and one set per each is subjected to Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method) (ASTM C227). In order to prevent ASR oriented expansions, specimens having 25x25x285 mm dimensions are produced; and to investigate flexural strength and compressive strength tests, specimens having 40x40x160 mm dimension are casted. Thus 338 pieces specimens are casted totally in two different sizes.

Adding polymers into aggregate, white cement and water mixtures, 5% of cement is added. While investigating silica fume effect, 3 different portions are determined as of 4%, 8% and 12%. How the increase in silica fume affected the ASR expansions and the strength values.

In the mortars prepared using sand aggregate specimens are produced in 9 different mixtures about being pure; vinyl ester based polymer powder contributed; EVA-based liquid polymer contributed; 4%, 8%, 12% silica fume contributed; polymer powder and 4%, 8, 12 silica fume contributed.

In the mixtures in which glass is used as aggregate; the 9 sets are prepared with the same contribution rate. In addition to them, in which liquid polymer and silica fume is used together (in rate of 4%, 8%, 12%), and five different sets being only lithium hydroxide contributed, lithium hydroxide and powder polymer contributed, lithium hydroxide and liquid polymer contributed, lithium hydroxide and silica fume (4%, 8%) contributed sets are produced with the aim of investigating lithium hydroxide contribution. While being used in the mixtures the lithium hydroxide is used in 0,9% ratio of the cement.

Moreover, the photos of the specimens are taken by ESEM imaging method (scanning electron microscopy) and interpreted, and included in the thesis with ESD analyses.

The results obtained from experimental works are as follows:

ASR expansions obtained following 6 months on all glass and sand aggregate specimens under long-term (ASTM C227) test conditions shows lower expansions than the expansions obtained under short term (ASTM C1260) test conditions. It can

be said that to continue curing for 6 months under 100% relative humidity made a positive affect (curing) and took a role to reduce the ASR. In addition, this 6 month process is not found enough to reach the accelerated mortar bar test conditions. In order to compare the long-term test results with accelerated tests, annual measurement results shall be evaluated.

On both of the short-term and long-term test results, the ASR expansions of the specimens with glass aggregates are found higher than the ones of sandy specimens. The cause can be shown as reactive silica in the glass in portion of %78,45.

As a result of obtaining an expansion above the 0,1% limit value in accelerated mortar bar tests, it can be said that the sand used for control is reactive.

The polymer cured the interfaces on the used specimens, and affects the strength value in a positive way.

The more the silica fume amount used in the mixtures is increased, the less the expansions are, as expected, flexural and compressive strengths are increased.

On the strength values on the specimens before the accelerated ASR test, and when the silica sand does not show the expected cure effect, it is thought that it could not complete enough pozzolanic reaction because of the insufficient cure. On the ESEM images obtained from these specimens, silica fume pieces are seen that could not react.

Flexural and compressive strengths of glass aggregate specimens in all sets have less value than sandy specimens. It is thought that the cause of this is because the dough and interface area of glass aggregate are weak. When the cross section of the divided specimen is examined during flexural test, the breakage takes shape around the glass aggregate.

The strengths before the accelerated test on the same specimens, which are 12% silica fume, polymer and silica fume contributed, are increased rather than the strengths measured following the test. The cause of this is interpreted such like that the silica fume took away the negative effects of ASR, and in the same time on the specimens that are kept under 80°C for 14 days, cure effect can exist. Also, in the description of the lithium hydroxide contributed specimens, the same situation is seen.

Under the conditions of accelerated mortar bar test, the lithium hydroxide usage showed the most positive effect, thus reducing the ASR oriented expansions to a large extent. And under long-term test conditions, exact opposite effect is shown, and the expansions are mounted even above the control specimen expansions. It is thought that this effect is originated from lithium's "pessimistic ratio" property. Lithium hydroxide effect must continue to be investigated with additional tests.

1. GİRİŞ

Yapı kullanım ömrü boyunca çeşitli tehlikelere maruz kalmaktadır. Betonda kullanılan agreganın reaktifliği, boşluk suyundan gelen alkaliler ile birleşince kimyasal tepkimeye uğrar. Dış ortamdan su girişi devam ettikçe jel şişmeye devam ederek, etrafında basınç yaratmaya başlar. Basınca dayanamayan beton çatlama, çatlaklar ilerlemeye ve harita deseni şeklinde tüm yapıyı kaplamaya başlar. Bu şekilde gelişen ve yapı ömrünü kısaltan, en tipik belirtisi harita ağı şeklinde çatlaklar olan reaksiyona alkali silika reaksiyonu denir.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, özellikle havuz kaplamaları gibi cam agrega içeren dekoratif harç uygulamalarında karşımıza çıkan alkali silika reaksiyonu kökenli çatlaklardan yapıya nüfuz eden suyun kaplamanın ömrünü tehdit etmesi ve yapının kullanımı sırasında problemler yaratması gibi sorunların önlenmesidir.

Dekoratif kaplama malzemelerinin genellikle açık renk tercih edilmelerinden dolayı üretilen harç numunelerinde beyaz çimento ve beyaz silis dumanı kullanılmıştır. Alkali silika reaksiyonunun en belirgin etkilerini görebilmek için deneylerde reaktifliği yüksek agrega türü olan cam seçilmiştir. Cam agrega ile üretilen numunelerdeki sonuçları karşılaştırmak için de aynı karışım oranlarında agrega olarak kumun kullanıldığı numune setleri üretilmiştir. Vinil ester esaslı toz ve EVA esaslı sıvı formda polimerler, silis dumanının çeşitli oranları, lityum hidroksit ve bunların birbirleri ile birlikte kullanıldıkları çeşitli karışımlar hazırlanarak ASR genişlemelerini önleme yöntemleri araştırılmıştır.



2. ALKALİ AGREGA REAKSİYONU

Alkali Agrega Reaksiyonu beton içerisinde bulunan bazı reaktif agregalar ile çimentoda bulunan ya da dış ortamdan betona giren alkali iyonları arasında gerçekleşen oldukça karmaşık kimyasal bir reaksiyondur.

Günümüzde bilinen üç çeşit alkali agrega reaksiyonu vardır. Bunlar; alkali-silika reaksiyonu (ASR), alkali-karbonat reaksiyonu (ACR) ve alkali-silikat reaksiyonudur (Hobbs,1988). Bugüne kadar en sık rastlanılan çeşidi alkali silika reaksiyonudur (Swamy,1992).

Alkali karbonat reaksiyonu (ACR), betonun boşluk çözeltisindeki metal hidroksitlerin dolomitik kireçtaşları ile reaksiyonu olarak tariflenmektedir. Alkali silikat reaksiyonu ise grovak, filit veya argilit gibi kayaçların betonun boşluk çözeltisindeki metal hidroksitleri ile reaksiyonu olarak tanımlanmaktadır ve alkali silis reaksiyonuna göre daha yavaş gelişir.

Alkali agrega reaksiyonunun tespit edilmesinde kullanılan yöntemler ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Bu farkın nedeni, beton içerisinde kullanılan agregaların bileşenlerinin bölgeye göre farklılık göstermeleri ve her ülkenin kendine özgü deney yöntemlerini geliştirmiş olmasıdır. Reaksiyonların tespiti için kullanılan çok sayıda farklı deney yöntemi vardır. Son yıllarda özellikle hızlandırılmış koşullarda, alkali eklenmesi ve ortam sıcaklığının artırılmasıyla beton ve harç numunelerinin kürlenmesi ve belirli zaman sonundaki genleşmelerinin ölçülerek deney metotlarının standartlaştırılmasına yönelik çalışmalar vardır.

2.1 Alkali Silika Reaksiyonu

1930'lu yıllarda A.B.D.'nin Kaliforniya Eyaletinde bazı yol kaplamalarında, köprülerde ve okul binalarında endişe verici genleşmeler ve çatlamlar meydana gelmiştir. 1940'larda karayolu mühendisi Thomas Stanton tarafından yapılan incelemelerde oluşan bu çatlakların nedeninin alkali silika reaksiyonu (ASR) olduğu

ortaya çıkmıştır. Betonda alkali silika reaksiyonu böylelikle ilk kez Thomas Stanton tarafından tanımlanmıştır (Hobbs, 1988).

Betonda çatlak oluşumuna ve zamanla hasara neden olan alkali silis reaksiyonu (ASR), betonda kullanılan agregalardaki reaktif silis ve çimentoda bulunan alkali oksitler arasında meydana gelen kimyasal reaksiyondur.

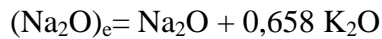
Alkali silika reaksiyonu iki aşamada gerçekleşir. İlk aşamada reaktif silika çimentodan gelen alkalilerle birleşerek ASR jel ürünlerini oluşturur. İkinci aşamada ise oluşan bu ASR jelleri ortamdaki nemi bünyesine alarak genişir.

- Alkaliler + Reaktif Silis → Alkali Silika Jel Ürünleri
- Alkali Silika Jel Ürünleri + Nem → Genleşme ve Çatlaklar

Oluşan jelin ortamdaki nemi hapsederek hacmini artırmasıyla birlikte betonda ASR'nin en tipik belirtisi olan harita tipi çatlaklar oluşur. Yavaş ilerleyen bu olayın etkileri yapımdan en az 1-2 sene sonra ortaya çıkar. Beton kütlede önemli çatlaklar meydana gelir. Ayrıca çatlaklardan dolayı beton geçirimli hale geleceğinden her türlü dış etkiye maruz kalır ve dayanım belirgin şekilde azalır.

Alkali silika reaksiyonunun zararlı etkilerinin ortaya çıkması için ortamda üç koşulun varlığı gereklidir. Bunlar; agregada kritik miktarda reaktif silikanın varlığı, çimentodaki yeterince yüksek miktardaki alkali hidroksitler ve ortamda bulunacak yeterli nemdir. Bu üç kriterden birinin ortamda bulunmaması alkali silika reaksiyonu sonucu hasar oluşmasına engel olur.

Alkali silika reaksiyonunun oluşmaması için, betonda kullanılan agregaların böyle bir reaksiyonu başlatacak miktarda reaktif silika içermemesi gerekmektedir. Ayrıca çimento alkali içeriğinin eşdeğer Na_2O değeri olarak %0,6 değerini aşmaması gerekir. Portland çimentosunun toplam alkali içeriği, sodyum oksitin eşdeğeri olarak aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir.



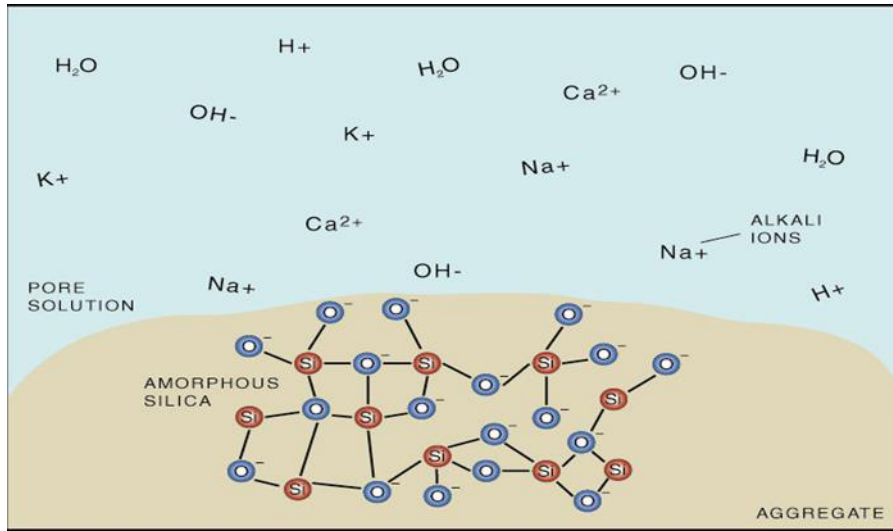
Çimentoda bulunan alkaliler (sodyum oksit ve potasyum oksit) çimentonun hammaddelerinden (kil, kireçtaşı vb.) karşılanır. Ayrıca çimento dışında; agrega, karışım suyu, zemin suyu, beton kür suyu, beton katkı maddeleri, buz çözücü tuzlar, endüstriyel atık sular, mineral katkılar, kimyasal katkılar bünyesinde bulunan

alkaliler tekrarlı ıslanma kuruma ve donma çözünme olayları aracılığıyla da betona girebilirler.

Ortamda yeterli nem bulunduğunda yani nem oranı %80'i aştığı durumda, boşluk çözeltisinde bulunan hidroksil (OH⁻) iyonları, agregalardaki aktif silika ile reaksiyona girerek silikat jelini oluştururlar. Betonda içsel çekme gerilmelerinin oluşumu 1. aşamadaki jel oluşumu ile eş zamanlı değildir. Bu nedenle jelin varlığı mutlaka ciddi boyutta ASR tahribatı oluşacağı anlamı taşımaz. Nemin varlığı ile alkali iyonları yayılır, bu yayılma ile daha fazla jel oluşur, oluşan jel su emerek şişip genişlemeye ve sertleşmiş betonda içsel gerilmelerin doğmasına neden olur. Bu nedenle, hizmet süresi boyunca kuru kalan bir betonda ASR ciddi bir tehlike olmayabilir (Swamy, 1992).

2.1.1 ASR kimyası ve oluşum mekanizması

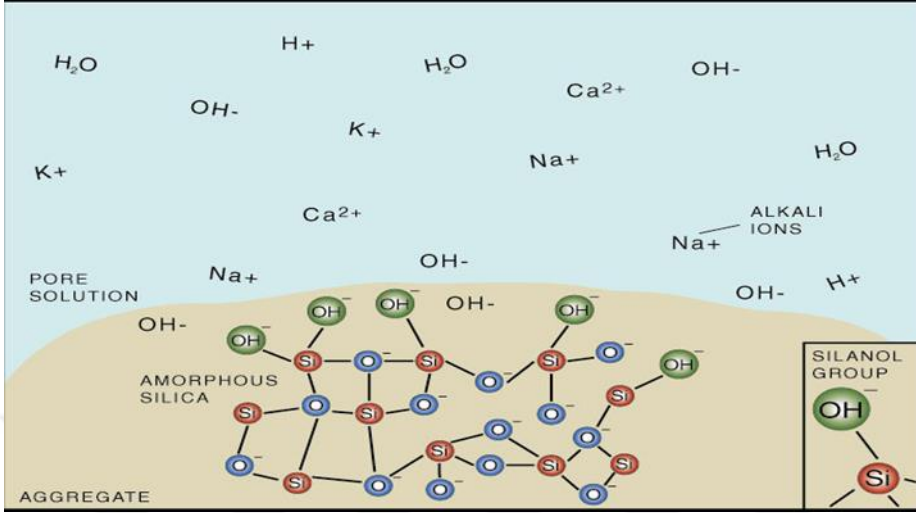
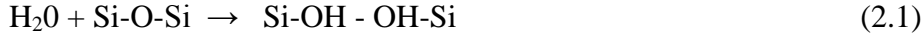
Suyun içine batırılmış bir silis taneciğinin yüzeyi, yüzey alanına ve yüzey düzensizliğine bağlı olarak artış gösteren zayıf bir asidik karakterdedir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi silis, Si atomuna bağlı 4 oksijen atomundan oluşan silis dörtyüzlüsüdür. Oksijen atomları bir valansı ile silisyuma bağlı kaldıklarından diğer valansları serbesttir. Böylece, silis dörtyüzlüsünün serbest dört bağı mevcuttur (Crucq,2005; Glasser,1992).



Şekil 2.1 : Boşluk suyu çözeltisindeki silisli agrega.

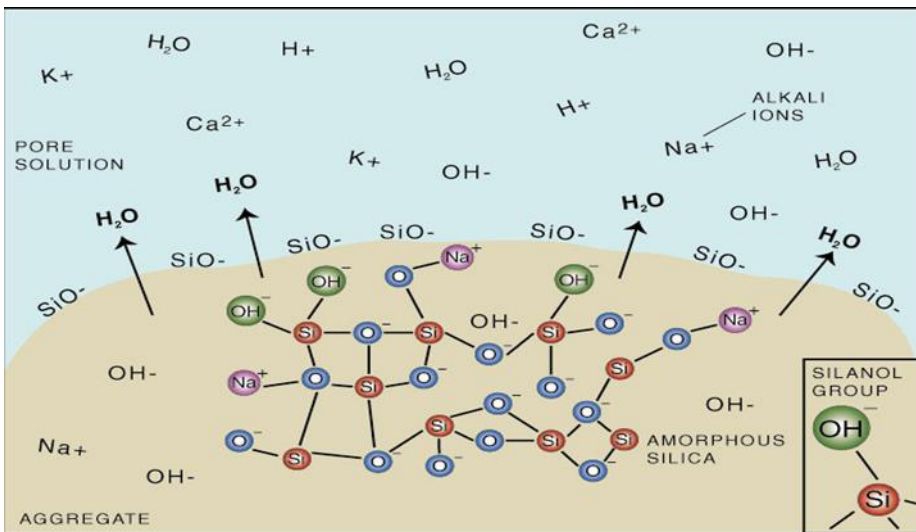
Çok miktarda hidroksil iyonları içerdiğinden pH'ı yükselen boşluk çözeltisi, alkali silika reaksiyonunun ilk aşamasında, agrega içinde bulunan Si-O-Si bağları ile

reaksiyona girer ve silanol bağları oluşturur. Bu bağların oluşumu denklem 2.1 ve şekil 2.2’de gösterilmektedir (Swamy, 1992; Franz vd., 2000).



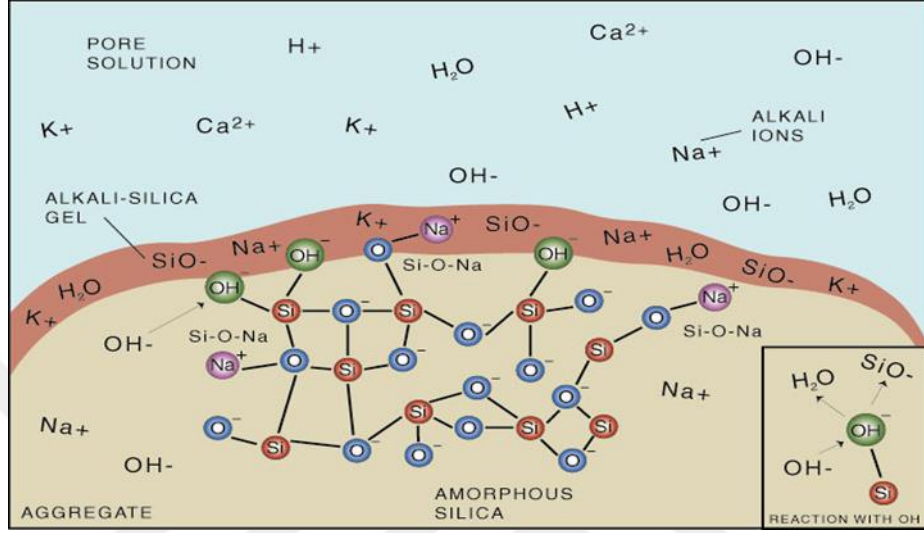
Şekil 2.2 : OH⁻ iyonları agrega yüzeyine yönelir.

Opal gibi reaktif silis içeren agregaların bünyesinde su bulunmaktadır. Bu tür agregalar, yeterince silanol bağlarına sahiptir. Silanol grupları asidik karakterde olduklarından bazik olan boşluk çözeltisi ile reaksiyona girebilir. Böylece silanol grupları, hidroksil iyonları ile reaksiyona girerek çözülmeye başlar ve bu çözülmenin sonucunda ortama H₂O vererek SiO⁻ formuna dönüşür. Çözünme denklem 2.2 ve şekil 2.3’te gösterilmektedir (Dent-Glasser ve Kataoka, 1981; Franz vd., 2000).



Şekil 2.3 : Yüzeydeki silanol grupları kırılarak SiO⁻ moleküllerini oluşturur.

Bu çözünmenin sonucunda oluşan negatif yüklü SiO^- , boşluk çözeltisinde bulunan pozitif yüklü sodyum, potasyum ve kalsiyum iyonlarını, oluşan jelin içine alarak ortamın dengesini sağlamaya çalışır. Ortamda denge sağlanması denklem 2.3 ve şekil 2.4'te gösterilmektedir (Dent-Glasser ve Kataoka, 1981).

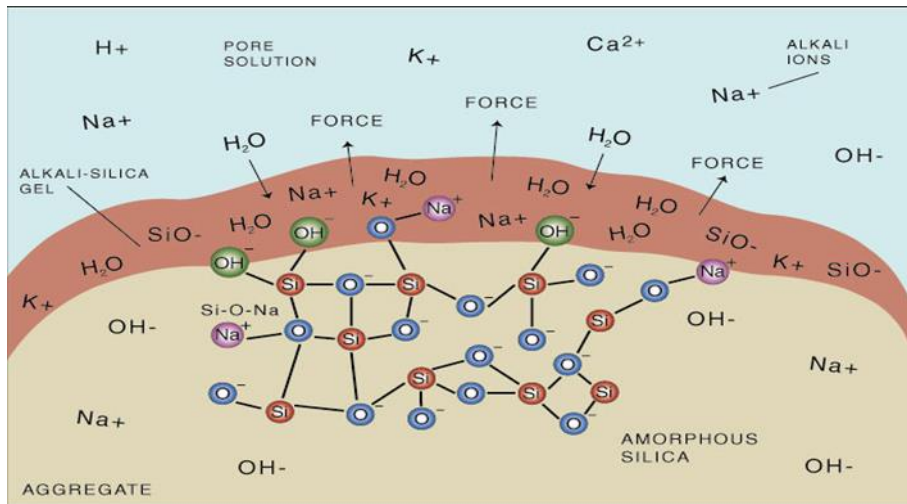


Şekil 2.4 : Serbest kalan SiO^- molekülleri boşluk suyundaki alkali katyonlarını çekerek agrega çevresinde alkali-silika jeli oluştururlar.

Son aşamada ise oluşan reaksiyonda daha fazla siloksan Si-O-Si bağları kırılmaktadır. Bu durumda denklem 2.4'te gösterilmektedir (Swamy, 1992).



Şekil 2.5'te görüldüğü üzere oluşan jel kendi bünyesine suyu emerek hacmini artırır.



Şekil 2.5 : Alkali silika jeli su emerek genişler, oluşan ozmotik basınç agregada veya bağlayıcı matriste çatlaklar oluşturur.

Hacim artışıyla birlikte betonun içinde birtakım gerilmeler oluşur ve bu durum betonda çatlaklara yol açar.

2.1.2 ASR'yi etkileyen faktörler

2.1.2.1 Agregadaki reaktif silis ve agrega özellikleri

Betonda ASR'nin oluşabilmesi için herhangi bir formda reaktif silisin bulunması gereklidir. Az miktarda bulunan reaktif silis bile ASR genleşmelerine neden olabilir. Silisli agreganın reaktiflik derecesi doku ve kristallik yapısına bağlıdır. Doku ve kristal yapıdaki farklılıklar ise kayacın oluşum sürecindeki soğuma hızına bağlıdır. Silisli mineraller, azalan soğuma hızına bağlı olarak amorf veya camı yapıdan, kriptokristalin, mikrokristal ve kristal yapıya kadar çok değişik formlarda bulunabilir (Sway,1992; Andiç,2007).

Silisli agreganın reaktiflik derecesi kuvarsin serbest enerjisine bağlıdır. Kafes yapısındaki kusurlar ve kristalleşme derecesine bağlı olan bu enerji kuvarsin çözünürlüğünü belirler. Alkali reaktivite ayrıca silisin jeolojik özelliklerine de bağlıdır. Örneğin kuvars kristalleri oluşumu sırasında zorlanmışsa reaktif olabilir. Yapısında değişken miktarda su bulunduran ve amorf yapıda silis içeren opal oldukça reaktiftir. Hızlı soğuma sonucu oluşan kristobalit ve tridimit, normal sıcaklıklarda stabil olmadığından reaktiftir. Ayrıca bazı volkanik camlar, çört, camıdan kriptokristalin faza kadar asit içeren volkanik kayalar, bazı argilitler, filitler, metamorfik grovaklar ile grovak, filit, şist, gnays, granit, damar kuvarsi, kuvarsit ve kumtaşı içeren yüksek metamorfik kayalar reaktif silis içerebilmektedir. Silisin ince dokulu olması, alkaliler ile temas yüzey alanını yükselttiğinden, reaktiviteyi artırabilmektedir (Farny ve Kosmatka, 1997; Swamy, 1992).

Doğal agregalardan başka sentetik camlar ve bazı yüzey kaplamaları gibi sentetik silisli malzemelerin de beton içerisinde agrega olarak kullanıldığı ve reaktif olabileceği bilinmektedir.

Reaktif agreganın boyutu da ASR üzerinde etkili olan bir diğer etkidir. Parçanın boyutu küçüldükçe neden olduğu ASR genleşmelerinin hızı artmaktadır. Bunun nedeni agrega yüzeyinin artmasıyla birlikte etkileşim alanının da artması ile açıklanabilir.

Agrega boyutunun ASR üzerindeki etkileri Stanton'dan beri araştırılmaktadır. Vivian (1951) ve Zhang (1999), maksimum genleşmeyi 150-300 mikron arası agrega tane boyutuna sahip harç prizma numunelerinde tespit ettikleri çalışmalarında reaktif agrega olarak opal yumrusu kullanılmışlardır. Hobbs ve Gutteridge (1979) deneylerinde reaktif agrega olarak opal-A minerali içeren Beltane opalini kullanmışlardır. Na₂O eşdeğeri %1,15 olan çimento kullanarak 25x25x285 mm boyutlarında numuneler üretmişlerdir. Deneyler sonucunda en fazla genleşmeyi 150-300 mikron arasında tane boyutunda reaktif agrega içeren harç prizmalarında belirlemişlerdir. Mehta ve Monterio çalışmalarında 1-5 mm arasındaki reaktif agrega boyutunun maksimum genleşmelere yol açtığını gözlemlemişlerdir. Zhang vd. de 0,15 ile 10 mm arası agrega tane boyutu küçüldükçe ASR genleşmelerinin arttığını tespit etmiştir. Ayrıca agrega boyutu arttıkça maksimum genleşmeyi veren çimento/agrega oranının azaldığını ve genleşmelerin ilerlemesinin yavaşladığını öne sürmüştür. Helmuth ve Stark kendi çalışmalarından yola çıkarak iri tanelerin reaksiyondan ince taneler kadar etkilenmediği için daha az ASR genleşmelerine neden olduğu hakkında görüş bildirmişlerdir.

Ramyar vd. (2005) çalışmasında reaktif bir doğal agrega ve aynı agreganın kırılmasıyla elde edilen kırma agregayı kullanarak agrega köşeliliğinin ve reaktif agreganın boyutunun ASR genleşmelerini nasıl etkilediğini incelemiştir. Agreganın boyut dağılımı ASTM C1260 standardına göre kullanılarak farklı boyutlardaki reaktif agrega ile reaktif olmayan kireçtaşı agregası değiştirilmiştir. Kırma ve doğal agregaların 14 gün sonundaki genleşmeleri ölçüldüğünde sonuçların birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Orta boy agregaların kullanımının (0,25-2 mm) özellikle %25 oranında kullanmaları durumunda farklılık açıkça görülmüştür. Ayrıca deneyler sonucunda reaktif parçacıkların boyut etkisinin doğal agregaya nazaran kırma agregada daha belirgin olduğu sonucuna da varılmıştır. Gradasyona göre en büyük ve en küçük tane boyutlarında köşelilik etkili olmazken orta boy tanelerde köşeliliğin ASR genleşmeleri üzerinde etkili olduğu da belirtilmiştir.

Fazlaca kafes kusuru bulunan, kötü kristalize, geniş bir yüzey alanına sahip, amorf, camsı, mikro gözenekli agregaların reaksiyona daha yatkın olduğu söylenebilir. Reaktif agreganın etkisi, agreganın fiziksel ve mineralojik yapısına da bağlıdır. Gözenekliliğin fazla olduğu durumda agrega içine boşluk suyu çözeltisi çok daha rahat bir biçimde girer ve reaksiyon alanı artar, buna bağlı olarak verdiği zarar artar.

Camın iri agrega olarak kullanıldığı durumlarda betonun mekanik özelliklerinde farklılık gözlenmesi beklenmektedir. Beton dayanımı, agrega ve hamur arasındaki arayüzey bölgesi tarafından kontrol edilmektedir. Pürüzlü yüzey dokusuna sahip doğal agrega yerine daha düzgün yüzeyli cam agrega kullanımı, betonda dayanım kayıplarına ve zaten düşük olan sünekliğin daha da azalmasına yol açabilmektedir. (Meyer vd., 2001)

Topçu ve Canbaz'ın 2004 yılında gerçekleştirilen çalışmalarında, betonda kırma agrega yerine %0, %15, %30, %45, %60 oranlarında soda şişesi camı atıkları kullanmışlardır. Deney sonuçlarına bakıldığında cam kullanılmayan kontrol numunelerine göre, %60 oranında cam kullanımı ile eğilme dayanımında %33 kayıp, basınç dayanım değerlerinde %49 kayıp görülmüştür. Ayrıca karışımdaki cam içeriği artırıldıkça betonun işlenebilirliğinin zorlaştığı gözlenmiştir.

Park vd. (2004) yapılan çalışmada camı ince agrega olarak kullanmışlardır. Renksiz, kahverengi ve yeşil renkli cam atıklarını %0, %30, %50, %70 oranlarında kullanarak taze ve sertleşmiş beton özelliklerini incelemişlerdir. Cam oranı arttıkça taze betonun çökme değerleri azalmıştır. Ayrıca cam miktarının artırılması betondaki hava içeriğini de artırmıştır. Bu durumun nedeni olarak, camların düzensiz şekil yapısına ve göreceli olarak daha fazla olan yüzey alanına sahip oluşu düşünülmüştür. 7, 28 ve 90 günlük basınç, çekme ve eğilme dayanımlarını da inceleyen araştırmacılar, cam renginin mekanik özelliklere ciddi bir etkisi olmadığını belirtmiş, sadece yeşil camın kullanıldığı numunelerin sonuçlarını vermiştir. Tüm yaşlarda, numunelerin dayanım değerleri, cam oranının artması ile birlikte azalmıştır. Cam miktarındaki artışın dayanım değerlerini olumsuz etkilemesinin nedeni olarak iki neden ileri sürülmüştür. İlki, cam agrega ile hamurun arasındaki aderansın zayıf olmasıdır. İkincisi, karışımlarda kullanılan camların kuma kıyasla daha yüksek incelik modülüne sahip olması ve cam miktarının artmasıyla karışımların sıkıştırma faktöründeki düşüş olduğu ifade edilmiştir.

Camın agrega olarak kullanımının ASR genişmeleri üzerindeki etkisini araştıran Lam vd. (2007) prefabrik beton bloklar üzerinde yaptıkları çalışmada, doğal dere kumu ve %30 renksiz, %40 yeşil ve %30 kahverengi şişelerden harmanlanarak elde edilen atık şişe cam kullanmışlardır. ASTM C1260 deney yöntemi kullanılarak ASR kaynaklı genişmeler ölçülmüş ardından metakaolin ve uçucu kül kullanımının bu genişmeleri önlemede etkisi üzerine çalışılmıştır. Katkı içermeyen cam agregalı,

kum agregalı ve %50 kum - %50 cam agregalı olarak hazırlanan numunelerin ASR genleşmeleri incelendiğinde, sadece cam agregaya kullanılan durumda genleşmelerin ciddi derecede arttığı görülmektedir. Bu numunelerin yüzeylerinde önemli çatlakların oluştuğu da ifade edilmektedir. 14 günlük genleşme değerleri karşılaştırıldığında, kum agregalı ve %50 kum-%50 cam agregaya ile hazırlanan numunelerin genleşmeleri sınır değer olan %0,1'in altında kalırken, sadece cam agregaya içeren numunelerin genleşmeleri %0,6 değerine yaklaşmıştır.

Agreganın reaktivitesini ve reaksiyonun oluşmasını etkileyen önemli faktörlerden biri de ortamda bulunan alkali konsantrasyonudur. Yüksek alkalinite, boşluk suyu çözeltisindeki hidroksil iyonunun yoğunluğunun artması ve daha çok silisin çözünmesi anlamına gelir. Bu durumda, belli bir reaktif agregaya, alkalisi yüksek bir ortamda daha fazla genleşmelere neden olabilir.

2.1.2.2 Betonun alkali içeriği

Betonda kullanılan çimentonun alkali içeriğinin değişmesi ile betonun hidroksil iyon konsantrasyonu, reaksiyona katılabilen alkali miktarı ve reaktif silis/ alkali oranı ile değişir. Bu faktörlerin değişmesi ile birlikte ASR kaynaklı genleşmeler de değişir.

Çimento üretilirken fırından çıkan klinkerde alkaliler, klinker tanelerinin yüzeyinde serbest halde veya klinker minerallerinin yapısında bağlı olarak bulunabilir. Klinkerdeki tüm mineraller alkali tutabilme özelliğine sahiptir. Ancak, sodyumun çoğu C₃A'da, potasyum ise genelde belit ile camsı fazda bulunmaktadır. Suda çözünebilir sülfatlar halinde bulunan alkaliler kısa sürede çözüme geçerken, klinkerin minerallerine bağlı bulunan alkaliler buldukları bileşenlerin hidrasyon hızına bağlı olarak zamanla salıverilir. Alkalinin salınım hızı toplam alkali miktarına ve hızlı veya yavaş alkali bırakan minerallerdeki alkali dağılımına bağlı olarak çimentodan çimentoya değişiklik gösterir (Swamy, 1992).

ASR hasarlı yapıların genellikle alkali içeriği yüksek çimento kullanılarak üretildiği bilinmektedir. Çimentonun alkali içeriği, hammaddesinin doğal özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle her bölgede düşük alkalili çimento üretmek ekonomik olarak mümkün değildir. Ayrıca enerji tasarrufu ve çevrenin korunması ile ilgili yönetmeliklerle uygulanan kuru üretim ve ön ısıtma tekniği ile düşük alkali çimento üretimi kısıtlanmaktadır.

ASR ile ilgili olarak alkali terimi genellikle portland çimentosunda bulunan sodyum ve potasyum alkalileri için kullanılır. Betonun alkali içeriği büyük oranda çimentoda bulunan bu alkalilerden kaynaklanır. Ancak kullanılan puzolonlar, sodyum içeren su azaltıcı gibi kimyasal katkılar veya seçilen agreganın alkali içeriği taşıyor olması da beton içerisindeki alkali miktarını artırmaktadır. Yapının ömrü boyunca maruz kalacağı deniz suyu etkisi veya buz çözücü tuzlar da ASR genleşmelerini artırmada önemli rol oynar.

Avrupa ve Kanada'da beton alkalitesi önemli bir kavram olarak görülmekte, arazideki performansa bakılarak ASR'yi kontrol altında tutmak için alkalinite ile ilgili sınırlandırmalar getirilmektedir. Bu kriterin oluşturulmasında en doğru yaklaşım, sadece çimentodan gelen değil betonun içindeki tüm bileşenlerin alkaliniteye olan etkisinin göz önüne alınmasıdır (Glasser, 1992; Andiç, 2007).

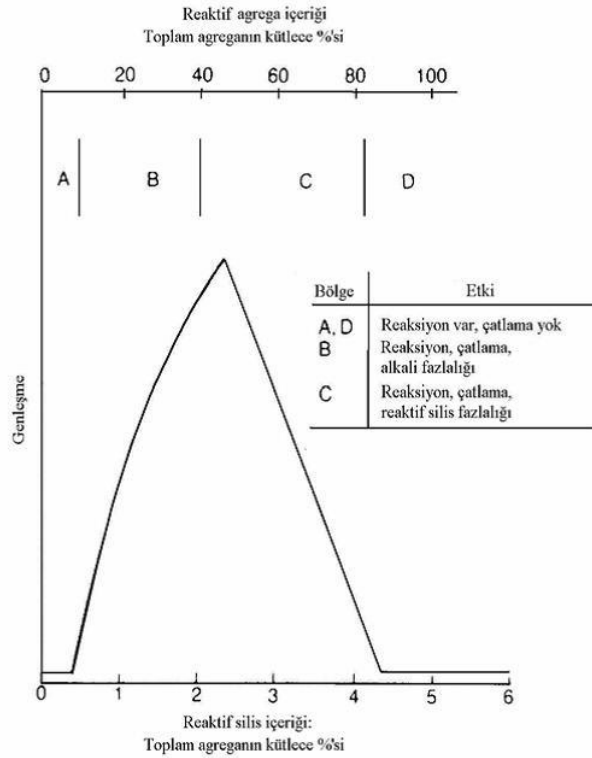
Çimentoya göre betondaki diğer bileşenlerinin alkali içeriğine etkisi daha az olduğundan, alkali içeriğinin ASR'ye etkisi hesaplanırken genellikle çimentonun etkisi göz önüne alınmaktadır. Beton alkalitesi aşağıdaki denklem yardımıyla bulunmaktadır:

$$M_{\text{çimento}} (\text{kg/m}^3) \times \text{Çimentonun Na}_2\text{O Eşdeğeri \%si} = 1 \text{ m}^3 \text{ betondaki alkali miktarı} (\text{kg/m}^3)$$

Bu denkleme çimento dışındaki diğer bileşenlerden gelen alkali miktarı da eklenerek hesap yapılmalıdır.

Avrupa ülkeleri ve Kanada'da ASR kaynaklı şüpheli bir durum sözkonusu olduğunda betondaki alkali miktarı 3 kg/m^3 ile sınırlandırılmaktadır. Benzer şekilde Amerika Birleşik Devletleri'nde de ASR genleşmelerini kontrol altında tutabilmek için düşük alkali içerikli çimento kullanımı benimsenmiştir. ASR kaynaklı sorunları önlemede bu uygulama kabul gören bir metottür. ASTM C150'de Na_2O eşdeğeri yüzdesi 0,60'dan az olan çimentolar düşük alkalili çimento olarak kabul edilmiş, bu çimentoların kullanımının tercih edilmesi önerilmiştir. İngiltere'de kimyasal ve mineral katkılardan, bazı tür agregalardan ve karışım suyundan gelen alkalilerin de toplam alkali içeriği hesaplanırken dikkate alındığı bilinmektedir. Ö. Andiç Çakır'ın çalışmalarında da betona çimento dışında diğer kaynaklardan gelen alkali miktarı $0,2 \text{ kg/m}^3$ 'ü aştığı durumlarda betonun toplam alkalinitesine dahil edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Betonun alkali içeriği için maksimum genişmeye neden olan bir oran bulunmaktadır (Ozol, 1975). Bu orana pesimum oran adı verilmiştir. Başka bir tanıma göre betonda maksimum genişme değerini veren, reaktif olmayan agregaya içerisindeki reaktif malzeme konsantrasyonuna verilen isimdir (Ozol, 1975; Mielenz, 1947). Bu oranın üstündeki ve altındaki değerlerde ASR kaynaklı genleşmeler daha azdır (Poole, 1992). Pesimum davranışın grafiği şekil 2.6'da görüldüğü gibi A, B, C ve D olmak üzere dört farklı bölgeye ayrılarak gösterilmektedir.



Şekil 2.6 : Pesimum davranış grafiği (Hobbs, 1988).

A bölgesinde, reaktif silisin miktarı azdır ve dolayısıyla beton sertleştikten sonra oluşan ASR jelinin hacimsel artışı çatlama neden olacak yoğunlukta değildir.

B bölgesinde, beton sertleştikten sonra da reaksiyon devam eder. Reaksiyon yoğunluğu artar, çatlaklar oluşmaya başlar. Ortamda bulunan tüm reaktif silis tükenene veya reaksiyon seviyesi yeteri kadar düşene kadar genleşmeler devam eder. Bu bölgede alkali miktarı fazladır. Reaksiyon ürününün kompozisyonu büyük olasılıkla alkali/reaktif silis oranından bağımsızdır.

C bölgesinde reaksiyon devam ettikçe çatlaklar da oluşmaya devam eder. Ortamdaki alkali seviyesi önemsiz bir düzeye indiğinde veya alkaliler tükendiğinde reaksiyon

durur. Bu bölgede reaktif silis miktarı fazladır. Alkalilerin azalması ile birlikte reaksiyon ürününün alkali/silis oranı ve su emme miktarı da azalır.

D bölgesinde reaktif silis miktarı çok fazladır. Reaksiyon hızının çok yüksek olması nedeniyle beton sertleştikten sonra oluşan jel miktarı çatlama yaratmayacak kadar azdır. Betona zararlı etkisi olmayan fazla miktarda jel oluşabilir.

Maksimum genişlemenin gerçekleştiği kısımda ortamdaki 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.

2.1.2.3 Nemin etkisi ve geçirimsizliğin azaltılması

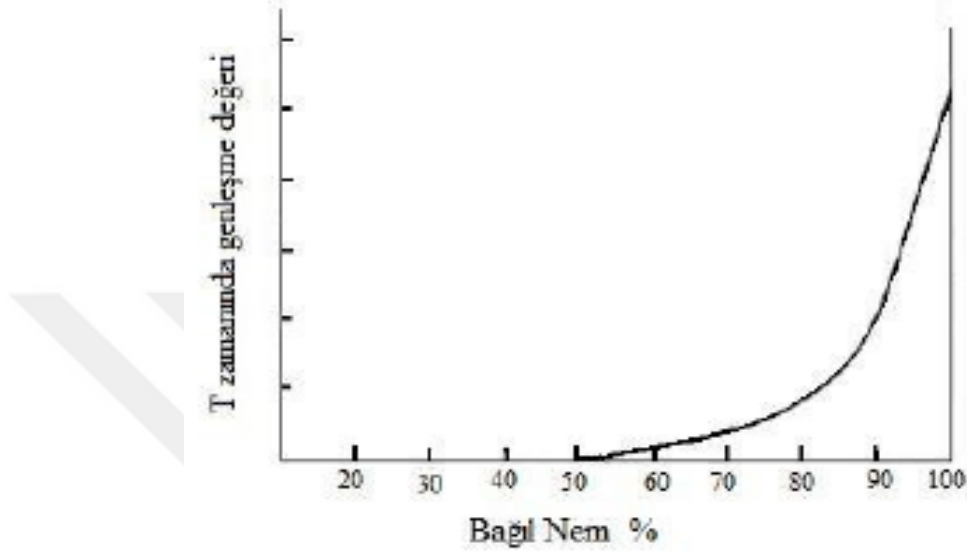
ASR çatlaklarının oluşmasında ortamda alkali varlığı ve agregadaki silisin varlığı kadar nem de olmazsa olmaz şarttır. Betonda bulunan nemin alkali silika reaksiyonu açısından iki önemli rolü vardır. Alkalilerin ve hidroksil iyonlarının, reaktif agregaların olduğu yere taşınmaları betonun boşluk suyu sayesinde olmaktadır. Ayrıca reaksiyon sonucu oluşan jel ortamdaki nemi bünyesine alarak şişer ve hacmini artırır. Bu durumda beton kütlede genişmelere ve zamanla çatlaklara neden olarak hasar meydana getirir.

ASR kaynaklı hasarlar incelendiğinde neme maruz kalan yapılardaki hasarların, nem etkisinde olmayan yapılara oranla daha fazla olduğu görülmüştür. (Swamy, 1992) Atmosfere açık veya yağmur suyu, deniz suyu, yer altı suyu gibi suyla temasta olan yapılarda (yol kaplamaları, köprüler, su tutma yapıları) ASR kaynaklı sorunların görülme ihtimali çok daha yüksektir. Yol kaplamaları gibi nemli ortamla temasta bulunan yüzeylerde beton elemanın kaplanması ASR'yi önlemek için sıkça kullanılan bir yöntemdir. Aynı yöntem reaksiyonun oluşup hasarın gözlenmeye başladığı durumda da ilerlemeyi durdurmak için tamir amaçlı olarak kullanılmaktadır.

Genellikle ASR'ye maruz kalan yapıların su içeriği, betonun boşluk suyunun termodinamik durumunu yansıtan, bağıl nem (BN) ile ifade edilir. Betonun bağıl neminin %80'in üzerine çıktığı durumlarda ASR genişmelerinin oluştuğu

açıklanmıştır (Stark, 1991; Poole, 1992). Benzer şekilde Swamy (1992) de yaptığı çalışmalarda düşük nem yüzdelerinde ASR genleşmelerine rastlamazken, %80'i geçen nem yüzdelerinde genleşmelerin hızlı bir şekilde arttığını belirtmiştir.

Şekil 2.7'de ortamın bağıl nemindeki değişime göre ASR etkisiyle oluşan genleşmenin değişimi görülmektedir.



Şekil 2.7 : Bağıl nem ile ASR genleşme grafiği (Poole, 1992).

Su/çimento oranı düşük beton kullanılarak, yeterli süreli ve uygun bir kür rejimi uygulayarak, ilave çimentolu, mineral katkılı veya başka bir yolla geçirgenliği azaltılmış beton elde ederek; nemin betona girişi ve beton içinde yayılması azaltılır. Ancak su/ çimento oranını düşürerek geçirimsiz beton elde etmek avantajlı olmayabilir. Bu şekilde elde edilen betonda düşük su içeriği, boşluk çözeltilisinin pH'ının yüksek olmasına yol açar. Ayrıca, boşluk oranı düşük betonda oluşan ASR genleşmeleri de daha fazla gerilme yaratır. Bu tür negatif etkilerle karşılaşmamak için katkı kullanımını en iyi yollardan biridir.

2.1.2.4 Sıcaklığın etkisi

Genelde sıcaklık artışı kimyasal reaksiyonları artırıcı yönde rol oynar. ASR tepkimesi de kimyasal bir reaksiyon olduğundan dolayı ortam sıcaklığının artması alkali silika reaksiyonunun daha hızlı bir biçimde gerçekleşmesine neden olur. Ayrıca sıcaklıkların etkisi agregaların reaktiflik durumlarını da değiştirir. Flint gibi normal sıcaklıkta az reaktiflik gösteren bazı agregalar yüksek sıcaklıklarda ASR jel oluşumuna neden olmaktadır. Agreganın reaktivitesinin oluşumunda çevre koşullarını

ve süreyi kontrol altına almak her zaman mümkün değildir. Normal sıcaklıklarda zararlı olmayan agregaların 35-45⁰C’de reaktifliğinin artması nedeniyle yapıda zararlı ASR genleşmeleri ortaya çıkabilir.

Locher (1973) de sıcaklığın genleşmeye etkilerini belirlemek amacıyla yaptığı çalışmalarda, alkali içeriğini sabit tutarak deneyler yapmıştır. Deney sonuçları, ASR genleşmelerinin büyük ölçüde, sıcaklığın 38-40⁰C olduğu durumlarda geliştiğini göstermiştir.

Diamond vd.’nin (1981) yaptığı çalışmalarda 20⁰C ve 40⁰C’de sıcaklıkların hem reaksiyona hem de ikinci aşama olan jel oluşumu ve genleşmeye etkisini incelemişlerdir. Deneyde kullanılan beton ve harç numunelerde yüksek sıcaklıklarda hem reaksiyonun hemde genleşmenin daha erken başladığını, zaman ilerledikçe de reaksiyon ve genleşmelerin hızlarının azaldığını belirlemişlerdir. Düşük sıcaklıklarda ise reaksiyonun daha yavaş geliştiğini ve genleşmelerin zamanla yüksek sıcaklık seviyelerinde görülen genleşmelere yaklaştığını hatta bazı durumlarda bu seviyeyi geçtiğini gözlemlemişlerdir.

2.1.2.5 Diğer faktörler

Buz çözücü tuzlar, deniz suyu, endüstriyel atık sular gibi dış alkaliler, buhar kürü uygulaması gibi faktörler ASR’nin zararlı etkilerini artırıcı yönde rol oynar. Dış alkalilerin varlığı özellikle geçirimli ve çatlak meydana gelmiş betonlarda genleşmeleri artırır.

Deniz suyu sertleşmiş betonda, hidrate C₃A ve portlandit bileşenlerinin NaCl ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan OH⁻ nedeniyle ASR genleşmelerini artırıcı yönde etki eder.

Betonda çimentolanma özelliği olan mineral katkı kullanımı ve düşük su/çimento oranlı iyi sıkıştırılmış dayanımı yüksek beton kullanımı ile geçirimsizlik azaltıldığında nem ve alkalilerin beton içindeki hareketi zorlaşmakta ve böylelikle alkali silis reaksiyonunun neden olduğu genleşmelerin önüne geçilmesi mümkün olmaktadır. Deniz suyu ve buz çözücü tuzlar gibi alkali içeren kimyasalların betona girişini engelleyen sızdırmazlık önlemleri alınması ve koruyucu kaplama yapılması gibi önlemler ASR’ye karşı etkilidir.

Betonun karışım oranları yani betondaki reaktif agrega içeriği ve hidroksil iyon konsantrasyonu değiştirilerek de ASR kaynaklı genleşme miktarı değiştirilebilir. Maksimum genleşme, reaktif alkali/ silis oranının 3,5 ile 5,5 olması durumunda gözlenmektedir.

2.1.3 Alkali silika reaksiyonunu önleme yöntemleri

ASR'yi önlemenin en iyi yolu beton dökülmeden önce gerekli önlemleri almaktır. Bunun için agrega ve kullanılacak bağlayıcının seçimi önemlidir, dikkatlice analizler yapıp; verimlilik ve ekonomiklik göz önünde bulundurularak malzemelere karar verilmelidir.

Alkali silika reaksiyonunu engellemek için kullanılacak agreganın silis içermediğinden emin olmak gerekir. XRD analizi ile agreganın petrografik yapısı incelenmeli, reaktifliği hakkında bilgi edinilmelidir.

Beton içerisinde kullanılacak agreganın reaktif olabileceğine dair şüpheler varsa çimentonun alkali oranı incelenmelidir. Eşdeğer alkali değeri %0,6'nın altında olan çimentoların kullanımı tercih edilmelidir.

Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın curufu gibi ince toz kimyasal katkıların kullanımı ASR'ye karşı koymada etkilidir. Bu tarz puzolonik katkıların kullanımı durumunda toplam alkali içeriğinin artmadığından da emin olunmalıdır. Başka bir deyişle boşluk suyunun pH değerinin çok yüksek olması engellenmelidir.

Ayrıca son yıllarda lityum nitrat, lityum florür ve lityum karbonat gibi lityum bazlı katkılar da oluşabilecek alkali silika reaksiyonlarını önleme amacıyla kullanılmaktadır.

ASR'nin zarar verici etkilerinin ortaya çıkması için ortamda nemin varlığı şarttır. Yapıya nemin girişi engellenerek, ASR'nin oluşumu büyük oranda engellenebilir. Beton üretiminde düşük bir su/çimento oranı kullanmak ve betonun geçirimsiz olması sağlamakta, ASR'yi azaltıcı yönde etki eder. Geçirimsiz betonlara daha az su girmesi sonucunda, alkali-silika jellerinin emebileceği su miktarı da azaltılmış olur.

Reaktif agrega içeren ancak ASR 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 ASR sebebiyle oluşan hasarı önleyebileceği

söylenbilir (K. Ramyar, H. Dönmez, Ö. Andiç,2002). Reaksiyon önlenemese bile bu sayede çatlak oluşma süresi uzatılabilir.

2.1.4 Alkali silika reaksiyonunun belirtileri

Betonda ASR ürünlerinin gözlemleniyor olması zararlı ASR genleşmelerinin olduğunun kanıtı değildir. Ancak tersi geçerlidir, reaksiyon ürünleri oluşmadan ASR genleşmelerinden bahsetmek mümkün değildir (Farny ve Kosmatka, 1997).

İngiliz Çimento Birliği'ne göre alkali silika reaksiyonu kaynaklı hasarların tespiti için sırasıyla saha incelemesi yapılmalı, numune alınmalı ve bu numuneler laboratuarda incelenip sonuçlar yorumlanarak hasar öngörülme çalışılmalıdır (Palmer, 1988).

Alkali silika reaksiyonu sonucu oluşan genleşme ve çatlaklar beton yapılarda yapısal sorunlara neden olmaktadır. Geleneksel yöntemle yapılan teşhis, yapının yüzeyinde görülen çatlakların belirlenip, hasarlı kısımlardan karot alınarak dayanımının ölçülmesiyle yapılmaktaydı. Ancak yapılan araştırmalar gösterdiği, betonda ASR kaynaklı oluşan hasarlar betonun basınç dayanımından ziyade çekme dayanımını ve elastisite modülünü etkilemektedir (Swamy ve Al-Asali,1988). ASR hasarı betonun petrografik analizi ile de tespit edilebilir. Bu amaçla, betondan alınan kesitlerin mikroskop altında incelenmesiyle, oluşan ASR ürünleri ve reaktif agrega belirlenebilir. Jel oluşumu agreganın içinde veya agrega etrafında gözlenebilir. Ancak bu inceleme oluşan hasarın derecesi hakkında bilgi vermez. ASR hasarlarını tespit etmek için betonda meydana gelen genleşmeler, çatlaklar, yüzeysel tortular, parça atmalar ve renk değişimleri de yol gösterici olabilir.

2.1.4.1 Genleşme

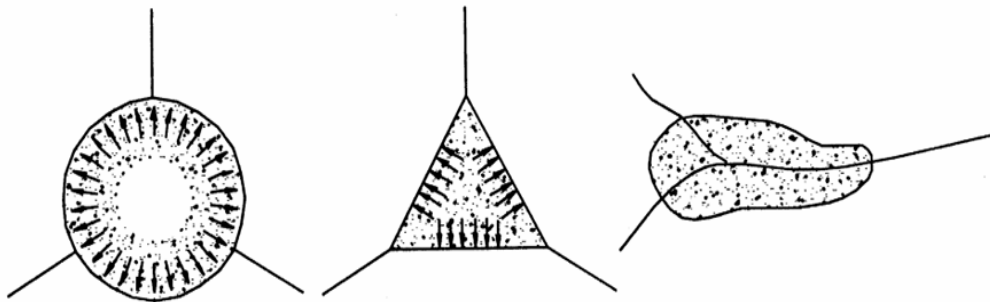
ASR'nin hasara yol açtığı bir yapıda görülen en tipik belirti, harita şeklindeki ağ çatlaklarıdır. Oluşan çatlakların uzunlukları, genişlikleri, konumu ve deseni, görünür derinlikleri, çatlakların çimento hamurundan mı yoksa agrega etrafından mı dolaşarak oluştuğu gibi birçok özellik gözle yapılan incelemede saptanabilir. Çatlaklar hakkında daha doğru yorum yapabilmek için yüzeyi ıslatmak kullanılan bir yöntemdir. Islanan yüzey kurduktan sonra daha derin çatlakların olduğu yerler daha belirgin şekilde gözlenebilir (Farny ve Kosmatka, 1997).

Alkali silika reaksiyonu çok yavaş ilerleyen bir tepkime olduğundan dolayı yapıya zarar verecek boyuttaki hasarların ortaya çıkması da yıllar alır. Ani göçmelerin oluşma riski çok düşüktür. Ancak, ilk yıllardaki çatlaklar da yapıyı dış etkilere karşı açık bıraktığından yapının hizmet süresinin kısılmasına yol açabilir. Tuzlu su etkisi, sülfat etkisi, donma çözünme gibi olayların etkisi de oluşabilecek hasarı hızlandırır ve artırır.

2.1.4.2 Çatlaklar

ASR ürünü olarak oluşan jel, agrega taneciğinin etrafında veya içinde reaksiyon halkası şeklinde gelişebilir. Bulabildiği oranda suyu bünyesine alarak enerjisini boşaltan ASR jeli, su emdikçe şişer, hacimsel olarak büyür ve böylelikle genleşmeler ortaya çıkar. Jel şişip genleşerek her yöne yaklaşık 10 MPa veya daha fazla gerilme oluşturur. Agrega bu şekilde bünyesinde depolanan potansiyel enerjiyi ancak birbiriyle 120° açı yapan minimum 3 çatlak oluşturarak boşaltır. Şekil 2.8’de ASR kaynaklı çatlaklara ilişkin örnekler görülmektedir. Çatlaklar 3 veya 4 kollu yıldız şeklini alarak agrega etrafından başlayarak ilerler (Figg, 1987). Reaksiyona giren agrega sayısı arttıkça da bu yıldızlar birleşir ve harita deseni şeklinde çatlak oluştururlar (Poole, 1992).

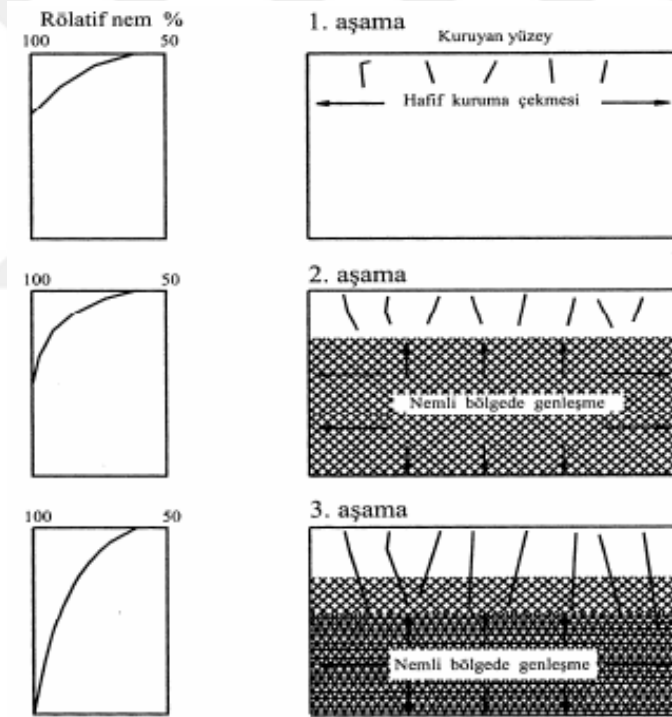
Zorlanmamış ve donatı bulunmayan betonda çatlaklar klasik harita desenini oluştururken; zorlanma mevcut olan yapılarda çatlaklar gerilme doğrultusunda yönelirler (Poole,1992). Yapıda donatılar esas gerilmeye paralel bulduklarından oluşan ASR çatlakları da bu yöndedir. Ancak, korozyonun neden olduğu çatlaklardan farklı olarak bunlar donatının üzerinde değil de donatılar arasında oluşur. Döşeme gibi donatının her iki yönde de eşit olarak dağıtıldığı durumlarda ise çatlaklar genellikle dikdörtgen biçimli harita çatlağı şeklini alır (Figg,1987; Swamy,1992).



Şekil 2.8 :ASR'den kaynaklanan çatlaklara ilişkin örnek görüntüleri.

Hobbs (1988) yayınladığı makalede, ASR'nin zararlı etkilerine maruz kalmış bir yapının yüzeyinde 0,1 mm ile 10 mm arasında makroçatlakların oluşabildiğine dikkat çekmiştir. Bu çatlakların yüzeye dik olarak 25-50 mm olacak şekilde uzandığı belirtilmiştir.

Şekil 2.9'da ASR çatlaklarının beton kaplamalardaki aşamaları ve gelişim evreleri gösterilmektedir. İlk aşamada beton yüzeyinde kılcal çatlaklar oluşur. Bu çatlakların nedeni kuruma büzülmesidir. İkinci aşamada beton içerisinde gelişen alkali silika jeli ile genleşmeler meydana gelir ve bu genleşmenin kısıtlanması nedeniyle ortaya çıkan gerilme betonun çekme dayanımını aştığında çatlaklar oluşur. Üçüncü aşamada ise yüzeyde kuruma sürekli devam ettiğinden içerideki reaksiyon hızı da artarak devam eder. Bu model beton kaplamalar için oluşturulmuş olsa da diğer yapılarda da olayların meydana geliş sırası benzerdir.



Şekil 2.9 : ASR çatlaklarının beton kaplamalardaki gelişim evreleri.

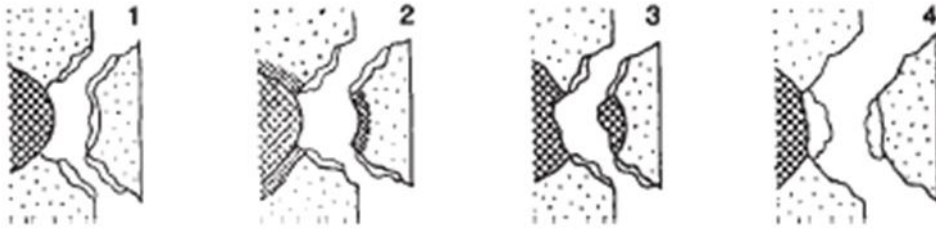
2.1.4.3 Yüzey birikintileri

ASR nedeniyle yapı yüzeyinde meydana gelen çatlaklardan dışarıya akan beyaz, saydam, kahverengi, gri gibi değişik renklerde ASR jeli ya da kalsiyum karbonat tortuları görülebilir. Bu birikintilere yüzey tortuları veya yüzey salgıları denir. Bu salgılar viskoz, akışkan, mumsu, elastik yapılı veya sert olabilir.

Bu birikintiler ASR ürünü olmasa bile, sahada yapılacak incelemeler ve etütler ile oluşan dokunun özellikleri, rengi, rutubetlilik durumu, yüzey sertliği vb. gözlemlerin desenleri ve bölgelerinin kaydının tutulup takip edilmesi önemlidir. Yüzey birikintileri içinde ASR jelinin var olup olmadığına dair kimyasal analiz yapmak önemlidir (Farny, J.A., Kosmatka, S.H., 1998).

2.1.4.4 Parça atma

Beton yüzeyine yakın jelin genişmesi veya agreg a parçasının genişerek yüzeydeki parçayı koni şeklinde sökerek atması, çukur oluşturması olayına parça atma (kapak atma, pop-out) denir (Palmer,1988; Poole,1992). Şekil 2.10'da parça atma olayının oluşum şekilleri görülmektedir. Şekillerde sırasıyla; agreg a ve yakınındaki harç arasındaki aderans azalır, agreg a içindeki reaksiyon halkası sınırdan kırılır, reaksiyon halkası oluşmadan kırılma agreg ada gerçekleşir, agreg a üzerinde oluşan jel genişerek üstteki harç tabakasını iter (Poole, 1992).



Şekil 2.10 : Parça atma olayının oluşum şekilleri (Poole, 1992).

Kapağın çıktığı yerde oluşan çukurda genellikle, parçalanmış çatlamış bir agreg a parçasığı bulunur (Farny ve Kosmatka, 1997). Bu tür çukurların durumları dikkatlice incelenirse betonda kullanılan agreg anın kalitesi hakkında önemli bilgiler elde edilir. Parça atma, yüzeyin hemen altında ASR jelinin neden olduğu genişleme ile depolanan enerjinin boşaltılması, basınç fazlalığının giderilmesinin bir sonucudur. Parçalanmış yerde ASR jelinin varlığı ASR varlığının önemli bir kanıtıdır.

Parça atma olayı genellikle hızlı reaksiyona giren agreg alarla üretilen betonlarda ve buhar küreüne maruz bırakılan elemanlarda görülür (Figg, 1987). Yapının ileri yaşlarında, rutubetli bölgelerde, ıslak zeminler üzerinde pop out olayları ile daha sık karşılaşılır. Pop out yüzey düzgünlüğünün bozulması gibi sorunlara yol açar. Özellikle yüksek hızların mevcut olduğu havaalanı pistlerinde ciddi sıkıntılar yaratabilir. Bu yüzden önlem alınmalıdır. Bazı önlemler alınarak parça atmanın önüne geçilebilir: Zorunlu ve gerekli olmadıkça, düzgün çelik master ya da mala ile

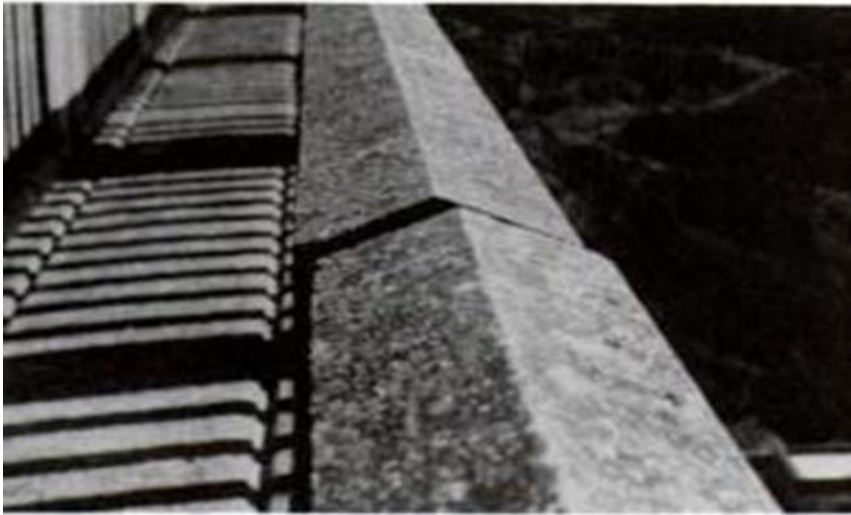
düzeltilmiş çok düzgün pürüzsüz yüzeyler oluşturulmamalıdır. Kür metodu olarak, zorunlu olmadıkça kür maddeleri poliflimler, kür kaplama elemanları (kağıt) yerine ıslak kür maddeleri, su ile sisleme veya pülverize su püskürtme gibi ıslak kür metotları tercih edilmelidir. Katkılı çimento tipleri (katkılı çimento, cürufli çimento, uçucu küllü çimento, vb.) veya çimentolanma özelliği olan puzolanlar kullanılmalıdır.

2.1.4.5 Renk değişimi

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

2.1.4.6 Yer değiştirmeler

Bazı saha örneklerinde farklı zamanlarda dökülen betonların diğerlerinden daha şiddetli etkilendiği görülmektedir. ASR'nin yapıdaki beton elemanlarda genişlemelere yol açan bir olay olduğu ve bu reaksiyonun çoğu zaman yapısal elemanın her yerinde aynı şiddette olmadığı göz önüne alındığında boyutsal yer değiştirmelerin de ASR hasarlarının tipik bir belirtisi olduğu açıklanabilir. Şekil 2.11'deki Val de Mare barajı parapetinde görüldüğü gibi beton elemanlardan biri diğerlerine göre 50 mm kadar yer değiştirmiştir (Poole, 1992).



Şekil 2.11 : Parapet elemanı, Val de Mare Barajı, Jersey (Poole, 1992).

3. ALKALİ AGREGA REAKSİYONU TESPİTİNDE KULLANILAN DENEY YÖNTEMLERİ

Alkali agregaya reaksiyonunu ölçmek için geliştirilen birçok yöntem bulunmaktadır. Deney metodlarının süresi ve kür koşulları deneyler arasındaki en temel farklılıklardır. Alkali agregaya reaksiyonunu belirlemek için kullanılan yöntemlerden bazıları aşağıda verilmiştir:

- Harç çubuğu yöntemi (ASTM C227),
- Hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi (ASTM C1260),
- Mineral katkıların etkinliğini ölçmek için hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi (ASTM C1567),
- Beton prizma yöntemi (ASTM C1293),
- Hızlandırılmış beton prizma yöntemi,
- Beton mikrobar yöntemi,
- Kimyasal yöntem (ASTM C289),
- Petrografik analiz yöntemi (ASTM C295),
- Otoklav yöntemi,
- Tahribatsız ASR yöntemleri

3.1 Harç Çubuğu Yöntemi

“Çimento-agrega kombinasyonlarının potansiyel alkali reaktivitesi için deney metodu” olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntem 25x25x285 mm boyutlarında üretilen harç çubuğu numunelerinin belirli süre ve koşullarda kürlenerek genişmelerinin ölçülmesi esasına dayanır. Agregalar 8-16-30-50 ve 100 nolu elek serilerinden elenerek gruplandırılırlar. Çizelge 3.1, ASTM C227 standardına göre kullanılması gereken agregaya elek analizi sonuçlarını vermektedir.

Çizelge 3.1: Agregada elek analizi.

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

Agrega/ çimento oranı 2,25 ve yayılma değerleri %105-120 olacak şekilde hazırlanan harç karışımları önceden pimleri yerleştirilmiş ve yağlanmış kalıplara dökülür. Bir gün sonra kalıptan çıkarılan numunelerin ilk boyları ölçülür. İlk boy ölçümleri yapılan numuneler 38⁰C sıcaklık ve %100 bağıl nemi sağlayacak koşullar sağlanarak kürlenmeye alınır.

Deney süresince boy ölçümleri alınmaya 14. günden başlanır, 1.,2.,3.,4.,5.,6. ve 12. aylarda olmak üzere düzenli aralıklarla ölçümler alınmaya devam edilir. Elde edilen genleşmeler için limit değerleri “Beton Agregaları Standardı” ASTM C33’e göre 6 aylık limit %0,10 iken 3 aylık limit %0,05 olarak belirtilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen ölçüm değerleri bu limit değerlere göre değerlendirilerek agreganın zararlı veya zararsız olduğu yorumu yapılabilir.

Ölçümlerde kullanılan harç numunelerinin boyutları ASR kaynaklı genleşmeleri etkilemektedir. Numunenin eni büyüdükçe genleşmelerin arttığını belirten çalışmalar mevcuttur (Swamy,1992). Ayrıca deneyde kullanılan kabın tipi, sıcaklık ve nem koşulları, çimentonun alkali içeriği de deney sonuçlarını etkileyen diğer faktörlerdendir.

3.2 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Yöntemi

Hızlandırılmış harç çubuğu yönteminde numuneler, harç çubuğu yöntemi ile aynı şekilde üretilir. Çeşitli elek boyutlarından elenerek standartta istenen gradasyonda hazırlanan agregalar, agregada/çimento oranı 2,25 olacak miktarda çimento ile kullanılır. Karışımın su/çimento oranı 0,47, hazırlanan harç karışımının yayılma deneyi değerleri %105-120 arası olmalıdır. Bu şekilde hazırlanan harçlar, uçlarına pimler yerleştirilmiş ve yağlanmış 25x25x285 mm boyutlarındaki kalıplara dökülür. Üzeri naylon örtüyle kapatılarak, 24 saat beklemeye alınır. 24 saat sonra

kalıplarından çıkarılan numuneler 80°C de suya koyularak 1 gün bekletilir. 1. günün sonunda numuneler sudan çıkarılarak ilk boy okumaları yapılır. Ardından numuneler 80°C NaOH çözeltisine koyulur ve 14 gün boyunca burada kürlenirken belirli aralıklarla çıkarılarak ölçümleri yapılır.

14 gün sonunda elde edilen genleşme yüzdeleri aşağıdaki durumlara göre değerlendirilir:

- 14. gün sonundaki genleşmeler %0,10 değerinin altındaysa agregalar zararsız davranış gösteriyor kabul edilir.
- 14. gün sonundaki genleşmeler %0,20 değerini aşıyorsa deneyde kullanılan agregalar ASR bakımından zararlıdır.
- 14. gün sonundaki genleşmeler %0,10 ile %0,20 değerleri arasında ise deneyde kullanılan agregalar ASR bakımından zararlı olabilir (şantiye koşullarına göre zararlı veya zararsız genleşme gösterebilir). İlave yöntemlerle tekrar test edilerek genleşmelerin nedeni araştırılmalı ve ölçümler 28 güne kadar uzatılmalıdır.

Bu deney yöntemi kür koşullarını ağırlaştırarak, alkali silika reaksiyonunun hızını artırmakta ve böylece daha kısa sürede agregaların reaktivitelerinin ölçümüne imkan sağlamaktadır. Deney süresi diğer deneylere kıyasla kısa olduğundan en çok tercih edilen deneylerden biridir.

Deneyin eleştirildiği taraf ise kür koşullarının doğada rastlanılan şartlara kıyasla daha agresif olduğu ve bu yüzden doğal şartların sağlanamadığı yönündedir. Bazı agregalar sahada iyi bir performans göstermelerine karşın bu deney koşulları altında zararlı olarak sınıflandırılabilir.

Bazı araştırmacılar yavaş genleşen tipte agregalara hızlandırılmış harç çubuğu deneyini uygulamışlardır. Grovak, argilit, mikrogranit gibi agregalar kullanılan deneylerde deneyin güvenilirliğini artırmak için deney süresinin 28 veya 56 güne kadar uzatılması gerektiği önerilmiştir (Wigum ve French, 1996). Standartta da deneyin sonucunda %0,1'in altında genleşme gösteren bazı metabazalt ve granitik gnays tipte agregaların saha betonunda zararlı genleşmeler oluşturduğu belirtilmektedir.

Hızlandırılmış harç çubuğu yönteminden türetilen, farklı ülkelerce kullanılan birçok standart bulunmaktadır. AASHTO'nun benzer standardı T303'e göre karışım hazırlanırken su/çimento oranı 0,50 olarak hesaplanmalıdır. Genleşmeler için sınır

değer ise ASTM C1260'da olduğu gibi %0,1'dir. Kanada standardı olan CAN/CSA A23.2-25A su/çimento oranını kırmataş için 0,50, doğal kumlar için 0,44 olarak farklılaştırmıştır. Standartta belirtilen sınır değer ise 16 günün sonunda silisli kireçtası, granit, gnays ve bazı kumtaşları için %0,1, diğer tip agregalar için %0,15'tir.

3.3 Mineral Katkı Kullanımı Durumunda Hızlandırılmış Harç Çubuğu Yöntemi

“Bağlayıcı malzeme ve agrega kombinasyonlarının potansiyel alkali silis reaktivitesini belirlemek için deney metodu hızlandırılmış harç çubuğu deneyi” olan ASTM C1567 standardı ASTM C1260 standardının modifiye edilmiş halidir. Silis dumanı, puzolon, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların ASR genleşmelerinin üzerindeki etkiyi belirlemek için kullanılır. Deney şartları ve kür koşulları benzerdir. Aralarındaki fark ASTM C1567'de çimento yerine kullanılan ilave katkıların olmasıdır. Katkı kullanarak hazırlanan numunelerin 14 günlük genleşme sonuçları katkısız hazırlanan harç numunelerinin sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirme yapılır. 14 gün sonunda ulaşılan genleşme değerleri %0,1 değerinin altındaysa hazırlanan karışım zararsız davranış göstermektedir. Genleşmelerin %0,1 değerini aştığı durumlarda ise kombinasyon potansiyel olarak zararlı davranış gösteriyor kabul edilir. Kullanılan katkıların oranları değiştirilerek genleşmelere etkisi incelenir. Mineral katkıların etkinliğini ölçmek için kullanılan hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi modifiye edilerek Kanada Standardı CAN/CSA A23.5 hazırlanmıştır. Bu standart ilave bazı koşullar getirmiştir. Katkı kullanılmadan hazırlanan kontrol karışımında agreganın en az %0,30 genleşme vermesi ön koşulu aranır. Deney süresi sonunda katkısız kontrol numunelerinden alınan bu genleşme değerini %0,1 sınır değerinin altına çekebilen minimum katkı miktarı kullanılabilir emniyetli (güvenli) miktardır. Ayrıca bazı araştırmacılar mineral katkı kullanılırken yayılma değerinin sabit olması yerine su/çimento oranının sabit tutulması gerektiğini belirtmişlerdir (Ramlochan vd. 2000; Thomas ve Innis, 1999).

3.4 Beton Prizma Yöntemi

“Betonun alkali silis reaksiyonu sebebiyle oluşan boy değişiminin belirlenmesi için deney yöntemi” olarak bilinmektedir. Bu yöntem beton numuneler üzerinde uygulandığından gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir.

Deney uygulanmadan önce agregaların petrografisi hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Reaktivitesi ölçülmek üzere deneylerde kullanılacak agrega kaba agrega ise, reaktif olmayan ince agrega ile karıştırılarak kullanılmalıdır. İnce agrega ise reaktif olmayan kaba agrega ile karıştırılarak kullanılır. Hazırlanacak karışımın su/çimento oranı 0,42 ile 0,45 değerleri arasında işlenebilirliği sağlayacak şekilde ayarlanabilir. Numunelerin çimento içeriği $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ alınmalıdır. Deneylerde kullanılan çimentonun eşdeğer Na_2O içeriği, karışım suyuna NaOH eklenerek çimentonun kütlece %1.25'ine yükseltir.

Hazırlanan karışım $75 \times 75 \times 285 \text{ mm}$ 'lik kalıplara dökülür. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numunelerin ilk boy ölçümleri alınır. Daha sonra numuneler 38°C sıcaklık ve %100 bağıl nemi sağlayacak kür koşullarına tabi tutulur. 7. 28. 56. günlerde ve 3, 6, 9, 12. aylarda ölçümleri alınır ve ilk boy ölçümleri ile kıyaslanarak genleşme değerleri yorumlanır. 1 yılın sonundaki genleşmeler %0,04 ve daha fazla ise potansiyel tehlikeli davranış söz konusudur.

Diğer deney yöntemleri yetersiz kaldığında ek olarak beton prizma yöntemine başvurulmaktadır. Deneyin dezavantajı ise uzun süreli olmasıdır.

Yöntem aynı zamanda mineral ve kimyasal katkıların ASR kaynaklı genleşmelerinin ölçülmelerinde de önemli deneylerden biridir. Katkıların etkinliği yorumlanırken 2 yıllık genleşme sonuçlarının %0,04 ve üzerinde değer çıkması karışımın ASR bakımından zararlı olduğu yönünde yorumlanır.

Beton prizma deneyi ASTM C1293 harçlar üzerinde uygulanan ASTM C227 harç çubuğu yöntemi ile benzer özellikler gösterir. Çimento ve agrega birleşimleri ile deney sürelerinin 1 yıla kadar uzatılıyor olması bunlardan bazılarıdır.

Bu yöntem Kanada standardı CSA A23.2-14A, RILEM TC191- AR-AAR3 ve İngiliz standardı BS 812 ile benzerlik göstermektedir. Standartlardan bazılarında üretilen deney numunelerinin boyutları $75 \times 75 \times 300 \text{ mm}$, $120 \times 120 \times 450 \text{ mm}$ gibi değişik boyutlarda olabilmekte, kür koşulları 20°C , 38°C , 60°C gibi değişken olabilmektedir.

3.5 Hızlandırılmış Beton Prizma Yöntemi

Deneyde kullanılacak numuneler beton prizma deneyindeki karışım oranları kullanılarak hazırlanır. Beton prizma yönteminden farkı numunelerin kalıptan çıkarıldıktan sonra saklandıkları kür koşullarıdır. Hızlandırılmış deneyde kür

sıcaklığı 38⁰C'den 60⁰C'ye çıkarılarak 3 ayda ulaşılan genleşme değerleri yorumlanmaktadır.

Grosbois ve Fontaine (2000) yaptıkları çalışmada beton prizma deneyi ile hızlandırılmış beton prizma deneyini karşılaştırmıştır. Farklı özelliklerde 95 agregası üzerinde gerçekleştirilen deneylerde hızlandırılmış deney için 56 günlük sınır değeri %0,02, 90 günlük sınır değeri ise %0,04 olarak önerilmiştir. Araştırma sonuçlarından biri de agregaların ASR bakımından zararlı olduğu tespit edilirken 90 günlük limit değerin kullanılmasının daha uygun olduğu yönündedir.

3.6 Beton Mikrobar Deneyi

Xu vd. (2000) tarafından alkali karbonat reaksiyonunu ölçmek için çalışılan bu yöntem 2003 yılında Grattan-Bellew vd. tarafından geliştirilerek hem alkali silikat hem de alkali karbonat reaksiyonları için kullanılmıştır.

Beton mikrobar deneyi hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ile kür koşulları ve deney sürelerinin kısa süreli oluşları gibi birçok yönden benzerlik göstermektedir. Aralarındaki farklardan biri, su/çimento oranının 0,33 olarak verilmesine karşın işlenebilirliğin sağlanması için bu oranın değiştirilebilir olmasıdır. Ayrıca karışımda kullanılacak agregası boyutu için 12,5 mm ile 4,75 mm arası kaba agregaları seçilmektedir. Agregası/ çimento oranı 1 olarak alınmakta ve 40x40x160 mm'lik kalıplar kullanılarak numuneler üretilmektedir. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler sonraki 1 gün boyunca hızlandırılmış harç çubuğu yönteminde olduğu gibi 80⁰C suda bekletilir. 1 günün sonunda sudan çıkarılan numunelerin ilk boy okumaları yapılır ve devamındaki 30 gün boyunca 80⁰C de 1 N NaOH çözeltisinde kürlenmeye bırakılır. Bu süre boyunca belirli aralıklarla boy ölçümleri yapılmaya devam edilir.

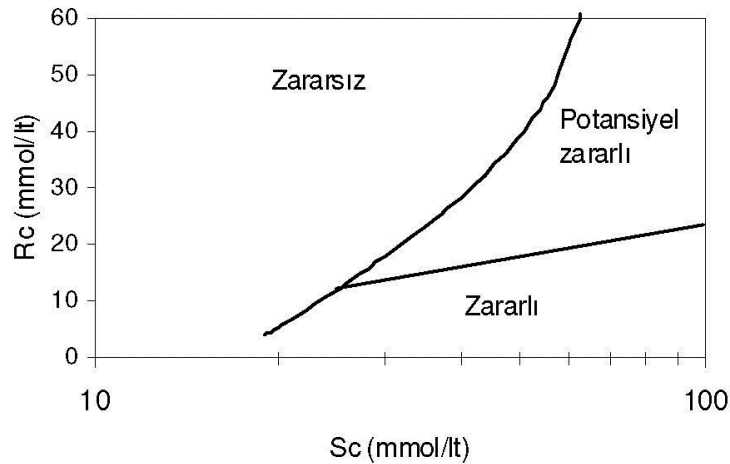
Deneyde silisli kireçtaşları için 30 günlük genleşme limitleri %0,14 iken diğer agregası tiplerinde bu limit %0,04 olarak belirlenmiştir (Grattan- Bellew, 2003).

Karışımda kullanılacak çimentonun alkali içeriği hakkında bir kısıtlanma getirilmemiştir. Bunun nedeni, hızlandırılmış harç çubuğu deneyinde olduğu gibi burada da dışarıdan alkali eklenmekte ve boşluk suyunun alkalitesi yükseltilmektedir.

3.7 Kimyasal Yöntem

Kimyasal yöntem silisli agregaların reaktivitelerinin tespitinde kullanılan önemli bir deney yöntemidir. Bu yöntemde 25 g ağırlığında, 150-300 mikron boyutlarına getirilmiş 3 adet agrega örneği 80⁰C’de hazırlanan 1 N NaOH alkali çözeltisinde bir gün bekletilir. 24 saat sonra çözelti filtre edilir ve asitte titre yöntemi kullanılarak agregada çözülmüş silis miktarı ile çözeltinin alkalinitesindeki azalma ölçülür. Çıkan sonuçlar aşağıda verilen şekil 3.1 grafiğinde işaretlenerek yorumlanır. Rc alkalinitedeki azalmayı, Sc çözülmüş silisi ifade eder. Grafikteki zararsız, zararlı veya potansiyel zararlı bölümlerden birine düşen agreganın reaktivitesi böylelikle belirlenir.

Bu yöntem yavaş tepkimeye giren agregaların ASR tespitinde başarısızdır. Ayrıca dolomit, kalsit, magnezit gibi kalsiyum veya demirli karbonat ile antigorit gibi magnezyum silikat içeren agregalarda da çok doğru sonuçlar elde edilemeyebilir. Bu tür agregaların reaktifliklerinin tespitinde ilave başka test yöntemleri de kullanılmalıdır.



Şekil 3.1 : Alkalinitedeki azalma (Rc) – Çözünen silis (Sc) grafiği (ASTM C289).

3.8 Petrografik Analiz Yöntemi

Petrografik inceleme yöntemi minerallerin cins ve yüzdelere göre kayaçların adlandırılması yöntemidir. Agregalardan alınan ince kesitler optik mikroskop yardımıyla incelenerek yapılarında bulunan reaktif silisin teşhisi yapılır. Ayrıca x ışını yayılımı ve tarayıcı elektron mikroskobu ile de silisin saptanması mümkün olmaktadır.

Deney sonuçlarının güvenilirliği petrografın deneyimi ve bilgilerine bağlıdır.

Bu yöntem İngiliz standartlarında BS 812-104 ve BS 6100-5.2, RILEM AAR-1 olarak geçmektedir. RILEM AAR-1'e göre agregalar; alkali reaktivitesi göstermekten uzak (Sınıf I), alkali reaktivitesi belirsiz (Sınıf II) ve alkali reaktivitesi gösterebilir (Sınıf III) olarak üç sınıfa ayrılırlar.

Alkali silika reaksiyonu hakkında araştırmalarının ilk adımını agregaların petrografik analizlerinin yapılması oluşturur. Petrografik analiz zaman alıcı olduğundan küçük numuneler üzerinde çalışılmaktadır. Alınan örneklerin agregayı temsil etmesi gerekmektedir (Farny ve Kosmatka, 1997).

Bu inceleme sonuçları agreganın betonun içinde nasıl davranacağı, zararlı genişleme gösterip göstermeyeceği hakkında kesin bilgi vermez. Bunun nedeni ASR oluşumunda agregalardan kaynaklı birden fazla faktörün rol oynamasıdır. Agreganın porozitesi, şekli, reaktif parçaların miktarı bu faktörlerden bazılarıdır. Bu nedenlerden dolayı betonda oluşacak ASR genişmeleri için ilave birtakım deney yöntemlerinden de yararlanmak gerekir.

ASTM C295 yöntemi, agrega numunesinin analizinde kullanılan megaskopik ve mikroskopik yöntemler hakkında rehberlik görevi görür. Megaskopik analizde agrega numunesi benzer kaya türlerinden oluşan gruplara ayrılır. Potansiyel reaktif kaya türlerinin nicel analizi toplam agrega numunesi baz alınarak gerçekleştirilir. Mikroskopik analizde genelde petrografik mikroskop kullanılır ve ince agrega kesitleri polarize ışık altında incelenir. Kırılma indisi ve toz haline getirilmiş agrega numunelerinin özgül ağırlığı da ayrıca değerlendirilir. Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM) ve taramalı elektron mikroskobu (ESEM) gibi elektron mikroskopları da agreganın mineral yapısını saptamada kullanılır. Röntgen ışını saptırma ve infrared spektroskopi gibi analitik teknikler de agrega parçacıkları içindeki silisin formu ve kristal formunun saptanmasında kullanılmaktadır.

3.9 Otoklav Yöntemi

Otoklav methodu henüz standartlaşmamış bir yöntemdir. Yüksek basınç ve sıcaklık altında harç veya beton numunelerin alkali agrega reaktivitelerini ölçmek için kullanılır. Bu konuda standart bir deney yöntemi bulunmamaktadır. Numune boyutları, kür koşulları, uygulama süreleri araştırmacılara ve ülkelere göre çeşitlilik

göstermektedir. Amaç, boy değişimi ve çatlakların incelenerek agregaların reaktivitesinin belirlenmesidir.

Fournier vd. (1991) harçlar üzerinde birkaç gün içerisinde sonuç veren hızlı bir otoklav deneyi üzerinde çalışmıştır. Su/ çimento oranı 0,5 olan, alkali içeriğini karışım suyuna NaOH ekleyerek %3,5 değerine yükselterek, harç çubuğu yöntemindeki numunelere uygun çubuklar üzerinde çalışmıştır. Numuneler 2 gün boyunca 23⁰C ve %100 bağıl nemi sağlayacak ortamda küredikten sonra otoklav deneyine tabi tutulmuştur. Otoklavda numuneler 130⁰C sıcaklıkta ve 0,17 MPa basınç altında 5 saat bekletilmiştir. Boy ölçümleri, otoklava girmeden önce ve otoklavda bekletilen numuneler 23⁰C'ye kadar soğutulduktan sonra alınır ve elde edilen genleşmeler yorumlanır.

2003 yılında Kozlova ve Millrath tarafından gerçekleştirilen çalışmada otoklav deneyi parametreleri bir miktar değiştirilerek uygulanmış, agreganın bir kısmında cam kullanılmıştır. 25x25x254 mm boyutlarındaki kalıplar kullanılarak üretilen numuneler 24 saat 123⁰C sıcaklık ve 0,136-0,15 MPa buhar basıncı altında küre tabi tutulmuştur. Otoklav yönteminden elde edilen sonuçlar ile reaktivite gösteren referans agregalarla rölatif genleşme görülmüştür.

Shayan vd. (1994), HHCD ile %3.5 çimento alkali seviyesindeki harçların 127⁰C'de 4-5 saat kürelediği otoklav metodu sonuçlarını değerlendirmiştir. Araştırmacılar, kullandıkları 5 kumun 4'ünde iki deneyin farklı sonuç verdiğini belirlemiştir. Otoklav metodunun buhar küre uygulanan betonlardaki davranışı belirlemede uygun olacağını, ancak yavaş genleşen agregalarda doğru sonuç vermediğini belirtmiştir.

3.10 Tahribatsız ASR Yöntemleri

Betonda oluşan hasarın tespitinde ultrases hızı (UPV) ve dinamik modülün belirlenmesi gibi dinamik tahribatsız deney yöntemleri kullanılmaktadır. Ultrases hızının yanı sıra rezonans frekansı da birlikte incelenerek betonun hasarlı veya hasarsız olması tespit edilip, hasar takibi yapılabilir. Ultrases hızı, betonda meydana gelen bozulma ve oluşan mikroçatlakların göstergesidir. Rezonans frekansı ise dinamik modülün belirlenmesini sağlayarak donma çözünme gibi dış etkilerin betonda oluşturacağı hasarın tespitinde kullanılır.

Bahsi geçen bu deney yöntemleri ile numunelerdeki boy değişimleri ve çatlaklar incelenerek ASR reaktivitesi belirlenir. Bu yöntemlerden başka çeşitli ülkelerce kullanılan pek çok farklı araştırma metodu bulunmaktadır. Kimyasal büzülme metodu, Duggan metodu vb. deney yöntemleri kullanılırken başka metodlarla karşılaştırmalı olarak kullanılmalıdır. Kısa srelilerde istatistiksel olarak en güvenilir olanı hızlandırılmış harç çubuğu metodudur. Uzun srelilerden ise gerçeğe en yakın sonuçları veren yöntem beton prizma deney yöntemidir. (Andiç, 2007)



4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmanın amacı, cam agrega içeren harçlarda farklı katkı maddeleri kullanarak alkali silika reaksiyonuna etkilerini incelemektir. Deneysel çalışmalar gerçekleştirilirken çeşitli kimyasal ve mineral katkıları (vinil ester esaslı toz polimer, EVA esaslı sıvı polimer, çeşitli oranlarda silis dumanı ve lityum hidroksit) kullanılarak, bu katkıların ASR genleşmeleri ve dayanım üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Cam agreganın ASR bakımından reaktifliğini belirlemek için aynı karışım içeriğine sahip agrega olarak kumun kullanıldığı numunelerde üretilmiştir. Bu şekilde hazırlanan kum veya cam agregalı numunelerden birer set hızlandırılmış harç çubuğu (ASTM C1260) deney koşullarına bırakılırken, birer set de harç çubuğu deneyine (ASTM C227) tabi tutulmuştur. ASR kaynaklı genleşmeleri ölçmek için 25x25x285 mm'lik boyutlarda, eğilme ve basınç dayanım deneylerini araştırmak için ise 40x40x160 mm olmak üzere 2 farklı boyutta toplamda 338 adet numune üretilmiştir.

Elde edilen deneysel verilerin doğru yorumlanabilmesi için kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, uygulanan deney şartlarının bilinmesi gerekir. Bu bölümde malzemeler, karışım oranları ve deney koşulları anlatılmıştır.

4.1 Kullanılan Malzeme

4.1.1 Çimentonun özellikleri

Çalışmada tüm üretimlerde Çimsa'dan temin edilen beyaz portland çimentosu TS 21 BPC 52,5 R/85 kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal analiz sonuçları çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

4.1.2 Agrega özellikleri

Deneysel çalışma kapsamında bazı numunelerde (kontrol numunelerinde) agrega olarak kum; bazı numunelerde de cam agrega kullanılarak alkali silis reaksiyonuna

karşı gösterdikleri davranışlar incelenmiştir. Kum CEN standart kumudur. Kumun agrega granülometrisi çizelge 4.2’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.1 : Beyaz çimento kimyasal analiz sonuçları.

Kimyasal Özellikler	Analiz Değerleri (%)
SiO ₂	21,60
Al ₂ O ₃	4,05
Fe ₂ O ₃	0,26
CaO	65,70
MgO	1,30
Na ₂ O	0,30
K ₂ O	0,35
Kızdırma Kaybı	3,20
Klorür (Cl)	0,01
Serbest CaO	1,60
SO ₃	3,30
Çözünmeyen Kalıntı	0,18

Çizelge 4.2 : CEN standart kumu tanecik büyüklüğü dağılımı.

Kare Göz Açıklığı (mm)	Kümülatif Elekte Kalan (%)
2,00	0
1,60	7 ± 5
1,00	33 ± 5
0,50	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 5

Cam agrega boyutları 4,75 mm ile 600 mikron arası değişen beyaz/ saydam renkli cam tozudur. Deneyde kullanılan dağılım ASTM C1260 standardında belirtildiği gibidir. Elek analizi sonuçları çizelge 4.3’te verilmiştir.

Camın içeriğinde bulunan silisin ASR genleşmelerini artırdığı daha önceki çalışmalardan bilinmektedir (Mc Joy ve Coldwell, 1951; Sakaguchi, 1989). Bu etkinin daha iyi yorumlanabilmesi için harçlarda kullanılan camın kimyasal analizi İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü kimyasal analiz laboratuvarında yaptırılmış ve sonuçları çizelge 4.4’te sunulmuştur. Deneylerde kullanılan camın SiO₂ içeriği %78,45’tir.

Çizelge 4.3 : Cam agrega granülometrisi.

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

Çizelge 4.4 : Cam agrega kimyasal analizi.

Kimyasal Özellikler	Analiz Değerleri (%)
SiO ₂	78,45
Al ₂ O ₃	1,01
Fe ₂ O ₃	0,14
CaO	6,30
MgO	0,79
Na ₂ O	12,06
K ₂ O	0,38
Kızdırma Kaybı	0,48
TiO ₂	0,04
Sb ₂ O ₃	0,20
Zn	0,00
Pb	eser miktarda
Nem	0,12

4.1.3 Kimyasal ve mineral katkıları

Yapılan deneysel çalışmada, ASR'nin cam ve kum agrega içeren numunelerde oluşturduğu genleşmeleri önlemek amaçlı çeşitli katkıların etkinliği incelenmiştir. Kimyasal ve mineral katkı olarak; Günkem marka Axilat HP8510 isimli vinil ester esaslı toz polimer; Grace marka DaraweldT isimli etilen vinil asetat (EVA) esaslı sıvı polimer, Elkem marka beyaz silis dumanı ve Merck markalı +98 saflığa sahip lityum hidroksit kullanılmıştır. Silis dumanının farklı (%4, %8 ve %12) oranlarda ikame edilmeleri ile elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Deneyleerde kullanılan silis dumanı kimyasal analizi çizelge 4.5'te verilmiştir. Ayrıca polimerlerin silis dumanı ile kombinleri de uygulanarak elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Çizelge 4.5 : Silis dumanı kimyasal analizi.

Kimyasal Özellikler	Analiz Değerleri (%)
SiO ₂	94,43
Al ₂ O ₃	0,96
Fe ₂ O ₃	0,21
CaO	0,52
MgO	0,85
Na ₂ O	0,04
K ₂ O	0,06
Klorür (Cl)	0,01
SO ₃	0,32
H ₂ O	0,10
Ca ₂ CO ₃	0,75

4.2 Karışımların Tasarımı

Agrega, beyaz çimento ve su karışımlarına polimerler eklenirken çimentonun %5'i kadar ilave edilmiştir. EVA esaslı sıvı formülü polimer kullanılırken içerdiği su oranı göz önünde bulundurularak karışım hesapları yapılmış, eklenen su miktarında ona göre azaltma yapılmıştır.

Silis dumanı etkisi incelenirken %4, %8 ve %12 olmak üzere 3 farklı oran belirlenmiştir. Silis dumanı miktarının artırılmasının ASR genleşmelerini ve dayanım değerlerini nasıl etkilediği incelenmiştir.

Kum agregası kullanılarak hazırlanan harçlarda; katkısız, vinil ester esaslı toz polimer ilaveli, EVA esaslı sıvı polimer ilaveli, %4, 8, 12 silis dumanı ilaveli, vinil ester ve %4, 8, 12 silis dumanı ilaveli olmak üzere 9 farklı karışımda numuneler üretilmiştir.

Agrega olarak cam kullanılan karışımlarda bu 9 set aynı katkı oranlarıyla hazırlanmıştır. Bunlara ilave olarak EVA esaslı sıvı polimer ile silis dumanının (%4, 8, 12 oranları ile) birlikte kullanıldığı 3 set ve lityum hidroksit etkisinin araştırılması amacıyla da sadece lityum hidroksit katkılı, lityum hidroksit ve vinil ester katkılı, lityum hidroksit ve EVA esaslı polimer katkılı, lityum hidroksit ve silis dumanı (%4, 8) katkılı olmak üzere 5 farklı set daha üretilmiştir. Lityum hidroksit karışımlarda kullanılırken çimentonun %0,9'u oranında kullanılmıştır. Karışım oranları çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Karışım oranları tablosu.

		Katkısız Karışım	Vinil Ester Esaslı Toz Polimerli Karışım	EVA Esaslı Sıvı Polimerli Karışım	%4 Silis Dumanlı Karışım	%8 Silis Dumanlı Karışım	%12 Silis Dumanlı Karışım	Vinil Ester Esaslı Toz Polimer + %4 Silis Dumanlı Karışım	Vinil Ester Esaslı Toz Polimer + %8 Silis Dumanlı Karışım	Vinil Ester Esaslı Toz Polimer + %12 Silis Dumanlı Karışım
		KATKISIZ	VİNİL ESTER TP	EVA SP	%4 SD	%8 SD	%12 SD	VİNİL ESTER + %4 SD	VİNİL ESTER + %8 SD	VİNİL ESTER + %12 SD
Agrega	g	990,00	990,00	990,00	990,00	990,00	990,00	990,00	990,00	990,00
Çimento	g	440,00	440,00	440,00	422,40	404,80	387,20	422,40	404,80	387,20
Vinil Ester Esaslı Toz Polimer	g	-	22,00	-	-	-	-	22,00	22,00	22,00
EVA Esaslı Sıvı Polimer	g	-	-	66,67	-	-	-	-	-	-
Silis Dumanı	g	-	-	-	17,60	35,20	52,80	17,60	35,20	52,80
Lityum Hidroksit	g	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Su	ml	206,80	206,80	162,13	206,80	206,80	206,80	206,80	206,80	206,80

		EVA Esaslı Sıvı Polimer + %4 Silis Dumanlı Karışım	EVA Esaslı Sıvı Polimer + %8 Silis Dumanlı Karışım	EVA Esaslı Sıvı Polimer + %12 Silis Dumanlı Karışım	LiOH Katkılı Karışım	Vinil Ester Esaslı Toz Polimer + LiOH Katkılı Karışım	EVA Esaslı Sıvı Polimer + LiOH Katkılı Karışım	%4 Silis Dumanlı + LiOH Katkılı Karışım	%8 Silis Dumanlı + LiOH Katkılı Karışım
		EVA + %4 SD	EVA + %8 SD	EVA + %12 SD	LiOH	LiOH + VİNİL ESTER	LiOH + EVA	LiOH + %4 SD	LiOH + %8 SD
Agrega	g	990,00	990,00	990,00	990,00	990,00	990,00	990,00	990,00
Çimento	g	422,40	404,80	387,20	440,00	440,00	440,00	422,40	404,80
Vinil Ester Esaslı Toz Polimer	g	-	-	-	-	22,00	-	-	-
EVA Esaslı Sıvı Polimer	g	66,67	66,67	66,67	-	-	66,67	-	-
Silis Dumanı	g	17,60	35,20	52,80	-	-	17,60	35,20	
Lityum Hidroksit	g	-	-	-	3,96	3,96	3,96	3,80	3,65
Su	ml	162,13	162,13	162,13	206,80	206,80	162,13	206,80	206,80

4.3 Uygulanan Deneyler

Cam agreganın ve seçilen katkıların alkali silis reaksiyonuna etkisini belirlemek amacıyla iki farklı deney yöntemi üzerinde çalışılmıştır:

1. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi (HHCD) “Agregaların potansiyel alkali reaktivitesi için deney metodu (ASTM C1260)”
2. Harç Çubuğu Deneyi (HCD) “Çimento-agrega kombinasyonlarının potansiyel alkali reaktivitesi için deney metodu (ASTM C227)”

Bunların yanı sıra ASR'den kaynaklanabilecek basınç ve eğilme dayanım kaybı gibi mekanik özellikler de incelenmiştir. Dayanım değerleri için üçer numune üzerinde, ASR genleşmeleri için ikişer numune üzerinde deneyler gerçekleştirilip, deney sonucu olarak bunların ortalaması verilmiştir.

Ayrıca ESEM (elektron tarayıcı mikroskopu) görüntüleme yöntemi ile numunelerin fotoğrafları çekilerek yorumlanmış, EDS analizleri ile birlikte tezde yer verilmiştir.

4.3.1 ASR deneyleri

4.3.1.1 Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi

HHCD, ASTM C1260 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Cam agregalar 4, 8, 16, 30, 50 ve 100 nolu eleklerden elenerek standartta istenen boyutlara göre beş farklı sınıfa ayrılmış, üretim zamanında kullanmak üzere paketlenmiştir. Şekil 4.1’de eleklerden elenerek gruplanan camlar görülmektedir.



Şekil 4.1 : Cam agregaların çeşitli elek boyutlarından elenerek gruplanması.

Harçlar hazırlanırken 440 g çimento, 990 g agrega ve 206,8 ml su kullanılmıştır. Agregası/ bağlayıcı madde oranı 2,24; su/ çimento oranı 0,47 olarak standartta belirtilen oranlar kullanılmış ve çeşitli katkıların ilave edilmesiyle birlikte 26 farklı harç karışımı hazırlanmıştır.

Harçlar hazırlanırken tüm malzemeler tartılıp karıştırma işlemine hazır hale getirildikten sonra; karıştırma kabına önce su eklenir. Daha sonra üzerine çimento (ve kullanılacak bağlayıcılar) eklenerek 140 ±5 dev/dk'da 30 sn süreyle karıştırılır. Bu süre içerisinde makinenin üzerinde bulunan agrega ekleme kısmından agregalar sabit hızla ve yavaşça eklenir. Mikser 285±10 dev/dk hızında 30 sn daha karıştırılır. 90 sn boyunca beklemeye alınır. Bu sürenin ilk 15 saniyesinde kabın kenarındaki harçlar temizlenerek kabın içerisindeki karışıma eklenir. 285±10 dev/dk hızında 1 dk daha karıştırılarak işleme son verilir.

Üretilen harç karışımlarının yayılma değerleri ASTM C1437-01'e göre hesaplanmıştır. Yayılma değeri ölçülürken öncelikle yayılma tablası temizlenir ve yayılma kabı tablanın tam ortasına yerleştirilir. Harç, kabın içerisine iki katman şeklinde doldurulur ve her katman sıkıştırılır. Fazla olan harçlar yayılma kabının üzerinden alınır ve üst yüzey düzeltilir. Ardından kap kaldırılır. 15 sn içerisinde 25 düşüş yapılarak harcın yayılma değeri; yayılan harcın birbirine dik iki doğrultudan ölçülerek ortalama değeri alınarak bulunur. Şekil 4.2'de harç yayılma deneyi gösterilmektedir.

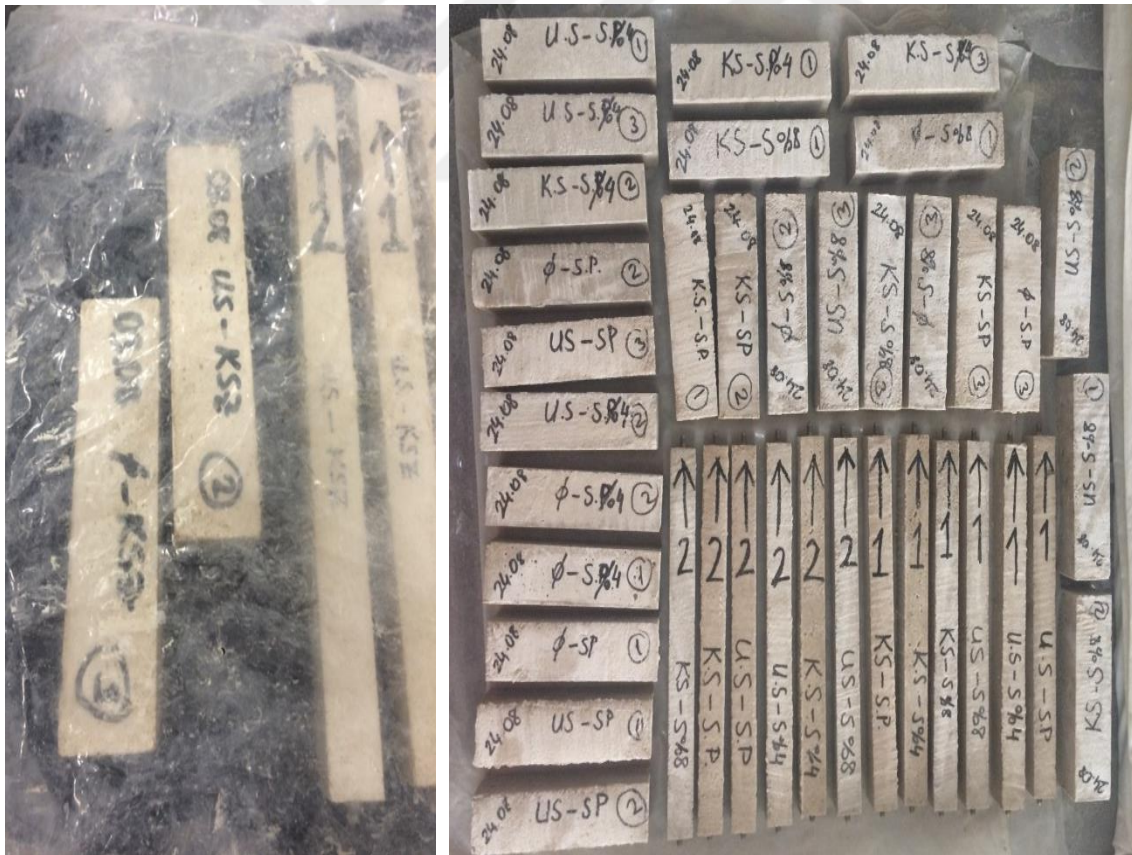


Şekil 4.2 : Harç yayılma deneyi.

Yayıma değeri ölçülen harç karışımı, 25x25x285 mm boyutlarında, uçlarına boy ölçmek için kullanılan pimlerin takıldığı kalıplara yerleştirilir. Yerleştirme işleminden önce kalıplar yağlanarak; harcın kalıba yapışması ve kalıp sökümünde kırılması önlenir.

Harç kalıba yerleştirilirken iki katman halinde dökülür, her katmandan sonra sıkıştırılarak, kalıba yerleşmesi sağlanır. Bu işlemde özellikle kalıpların uç kısımlarına pimlerin bulunduğu yerlere malzemenin iyi yerleşmesine dikkat edilir.

Harç kalıplara döküldükten sonra üzeri naylon örtüyle kapatılıp 24 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. 24 saat sonra numuneler kalıplarından dikkatlice sökülmüştür. Kalıplardan sökülen numuneler 7 gün boyunca ıslak beze sarılarak naylon içinde tutulmuştur. 7 gün sonra naylon içinden çıkarılan numuneler 21 gün süresince oda sıcaklığında açık havada tutularak kuruması sağlanmıştır. Burada amaç hava kürü ile polimerizasyon oluşumuna yardımcı olmaktır. Şekil 4.3'te bu şekilde kürlenmiş numunelere ait görsel yer almaktadır.



Şekil 4.3 : Kalıptan çıkarıldıktan sonra bir hafta ıslak beze sarılı, 3 hafta tezgaha serili şekilde kürlenmiş numuneler.

28 gün bu şekilde kürlendikten sonra 80°C suya koyulan harç numuneleri 1 gün bekletilmiş, sonra 80°C NaOH çözeltisine koyulmuş, 14 gün boyunca çözeltide bekletilmiştir.

Numuneler 24 saat 80°C suda bekletildikten sonra ilk ölçümleri alınmıştır. Ölçümler ASTM C490 standardına uygun 0,002 mm hassasiyetinde komparatörle alınmıştır.

Hazırlanan harç çubukları 80°C sıcaklığa ve NaOH çözeltisine dayanıklı plastik kaplar içinde kür havuzlarında tutulmuşlardır. Numuneler 80°C suya koyulurken NaOH çözeltisi de hazırlanarak boş bir plastik kap içerisinde kür havuzuna yerleştirilerek 1 gün öncesinden hazırlanmıştır. 1 N NaOH çözeltisi 40 g NaOH ile toplam 1 litre olacak şekilde saf su eklenerek hazırlanmıştır.

Deneysel çalışmada her bir karışımdan ikişer adet harç çubuğu numunesi üretilmiş ve tüm setler aynı koşullarda kürlenmiştir. Numuneler 80°C'deki çözeltide bekleme süresince en az 3 günde bir olmak üzere 14 gün boyunca boy ölçümleri alınmıştır. Genleşme değerleri, denklem 4.1'deki gibi hesaplanmıştır.

Genleşme(%)= (son boy ölçümü – ilk boy ölçümü)/(efektif boy 285 mm) x100 (4.1)

ASTM C1260'a göre; 14. günün sonundaki genleşme değerleri %0,1'i geçerse kullanılan agrega ASR bakımından reaktif agrega kabul edilmektedir.

4.3.1.2 Harç çubuğu deneyi

Deneyler ASTM C227'ye uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Harçların hazırlanma şekilleri, karışım oranları, karıştırma şekilleri, kalıplara yerleştirilme süreçleri tamamen hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ile aynıdır. Kalıptan söküldükten sonra bir hafta ıslak beze sarılı kalmaları, ardından üç hafta boyunca açık havada bırakılarak kurumalarının sağlanması süreçleri de aynı şekildedir. Bu şekilde geçen 4 haftalık dönemin ardından harç çubuğu numuneleri standartta belirtildiği şekilde 38°C sıcaklığa ve %100 bağıl nemi sağlayacak ortama konulmuştur. Standartta istenen şekilde 14.gün, 1-2-3-4-5-6 aylık süreçlerde boy ölçümleri alınmış ve ASR kaynaklı genleşme değerleri denklem 4.1 ile hesaplanmıştır.

4.3.2 Mekanik özellikler ile ilgili deneyler

Bu tez kapsamındaki çalışmalarda mekanik özellikler ile ilgili eğilmede çekme ve basınç deneyleri uygulanmıştır. Numuneler, hızlandırılmış harç çubuğu ve harç

çubuğu deneylerindeki gibi aynı karışım oranları ve agrega gradasyonları kullanılarak ASTM C1260'da olduğu gibi hazırlanmıştır. ASR numunelerine uygulanan kür şartları bu numunelere de uygulanmıştır. Hazırlanan harç karışımlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için 40x40x160 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir.

Eğilme ve basınç deneyleri için üç grup numune hazırlanmıştır. Her üç grup numune de kalıplarından çıkardıktan sonra ıslak beze sarılı şekilde, ağzı bağlı naylonun içinde 7 gün bekletilmiş; su ihtiyacı karşılanarak hidrasyona yardımcı olunmuştur. Devamındaki 21 gün boyunca oda sıcaklığında tezgâh üzerine serilerek numunelerin havayla teması sağlanarak tamamen kuruması sağlanmıştır.

Tüm numuneler 28 günü bu şekilde kürlenerek geçirdikten sonra 1.grup numuneler olarak adlandırılan kontrol numuneleri 28. günün sonunda başka herhangi bir küre tabi tutulmadan eğilme ve basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Burada, ASR gerçekleşmeden önceki mekanik özelliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. grup numuneler kısa süreli küre tabi tutulan ASR numuneleri olup, 28 günün ardından ilk gün 80°C suda bekletilmiş, ardından 80°C NaOH çözeltisinde 14 gün boyunca tutulmuşlardır. 14. günün sonunda çözeltiden çıkarılan numuneler oda sıcaklığına kadar soğuması beklenip eğilme ve basınç deneyleri uygulanmıştır.

3. grup numuneler olan uzun süreli küre tabi tutulan ASR numuneleri, 28 günlük standart kürün sonrasında 38°C sıcaklıkta %100 bağıl nemi sağlayacak şekilde ağzı kapalı plastik kaplarda sıcak hava etüvünde bekletilmiştir. Altı ay boyunca bu şekilde kürlenmeye devam eden numuneler, ASR genleşmeleri kısa süreli deneyde elde edilen sonuçlara ulaştığı zaman eğilme ve basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

4.3.2.1 Eğilme dayanım deneyi

Eğilmede çekme dayanımı deneyi TS EN 196-1'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kontrol numuneleri 4 haftanın sonunda, ASR numuneleri de kür sürelerinin sonunda kırılmıştır. Eğilme deneyi, 3 nokta yüklemeli deney ile uygulanmıştır. Deney aleti şekil 4.4'te gösterilmektedir. Eğilme deneyinden sonra ikiye bölünen numune parçaları basınç deneyine tabi tutulmuştur. Her harç karışımından 40x40x160 mm boyutlarında üçer numune hazırlanmıştır. Eğilme deneyi sonucu olarak üç numunenin ortalaması alınarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.4 : Eğilme dayanımı deney aleti.

4.3.2.2 Basınç dayanım deneyi

Basınç dayanım deneyi TS EN 196-1'e uygun olarak yapılmıştır. 1 adet numunenin eğilme deneyinden sonra elde edilen 2 parçasının basınç dayanımları şekil 4.5'teki basınç deneyi aleti yardımıyla bulunmuştur. ASR numuneleri kür süreleri dolduktan sonra eğilme ve ardından basınç dayanım testlerine tabi tutularak; kontrol numunelerine göre dayanım değerlerinde gözlenen farklılıklar tespit edilmiştir.



Şekil 4.5 : Basınç dayanım deney aleti.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

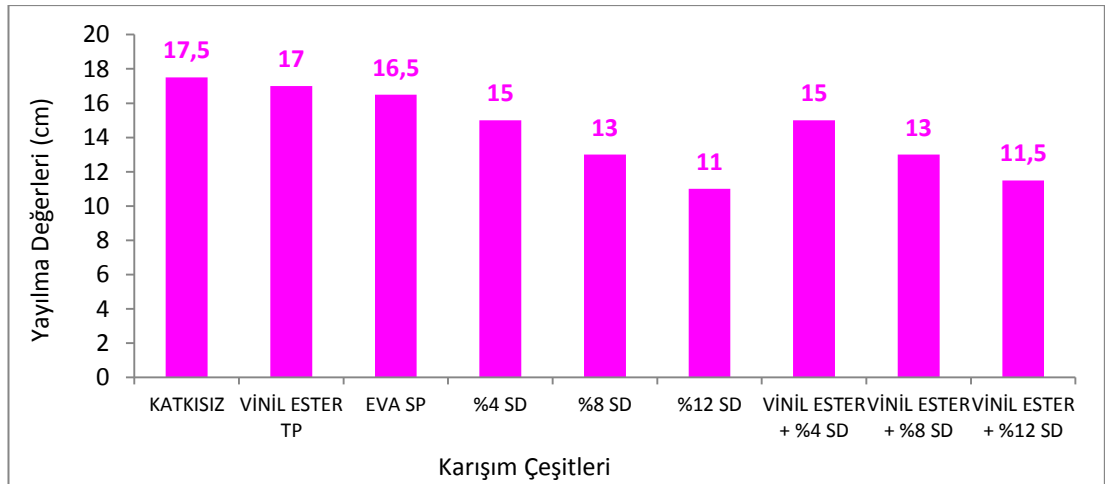
Bu bölümde, harç çubuğu ve hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri uygulanarak, farklı kimyasal ve mineral katkıların ve farklı karışım oranlarının ASR sonucu oluşan genleşmelere etkisi incelenmiştir. Ayrıca alkali silis reaksiyonunun numuneler üzerindeki basınç ve eğilme dayanımlarına etkisi araştırılmıştır.

5.1 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi Sonuçları

5.1.1 Yayılma değerlerinin incelenmesi

5.1.1.1 Kum agregalı harçların yayılma değerleri

Hazırlanan harç karışımları kalıplara dökülmeden önce ASTM C1437-1 standardına göre yayılma testine tabi tutulmuştur. Yayılma tablasında birbirine dik olacak şekilde iki doğrultuda ölçülen çap ortalaması, o karışımın yayılma değeri olarak alınmıştır. Şekil 5.1’de agrega olarak kum kullanılan harçların yayılma değerleri gösterilmektedir.



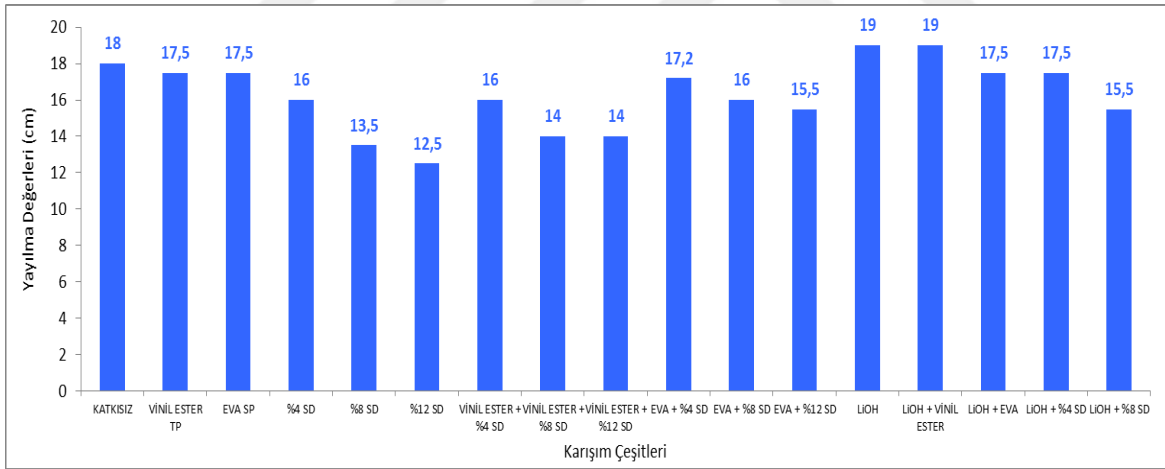
Şekil 5.1: Kum agregalı harç karışımlarının yayılma değerleri.

Kum agregası kullanılarak hazırlanan harç karışımlarında en yüksek yayılma değerini gösteren karışım katkısız karışımdır. Deney sonuçları karşılaştırıldığında katkısız karışıma polimer ilavesinin yayılma değerlerini bir miktar azalttığı görülmektedir.

Silis dumanının kullanıldığı karışımlarda yayılma tablasından okunan değerler daha düşük değerlerdir. Silis dumanı kullanım oranı arttıkça su ihtiyacının artması nedeniyle yayılma değerleri azalmaktadır. Silis dumanının vinil ester esaslı toz polimer ile birlikte kullanıldığı setlerde de benzer durum gözlenmiştir. En düşük yayılma değeri %12 silis dumanı içeren karışıma aittir. Katkısız karışımlarda yayılma değeri 175 mm iken, bu değer %12 silis dumanı kullanılan karışımda 110 mm değerlerine kadar inmektedir. Bu etki silis dumanının çok ince yapılı olmasından kaynaklanmaktadır. Çimentoya göre çok daha küçük boyuttaki silis dumanı tanelerini ıslatmak için daha fazla su gerektiğinden harcın işlenebilirliği azalmaktadır.

5.1.1.2 Cam agregalı harçların yayılma değerleri

Cam agregası kullanılan karışımlardaki yayılma değerleri kumlu karışımlarla benzerlik göstermektedir. Silis dumanı içeren tüm setlerde silis dumanı kullanım miktarı arttıkça yayılma değerleri azalmıştır. Şekil 5.2 cam agregalı harçların yayılma değerlerini göstermektedir.



Şekil 5.2 : Cam agregalı harç karışımlarının yayılma değerleri.

Cam agregası ile hazırlanan harçlarda en yüksek yayılma değerlerini lityum hidroksit kullanılan karışımlar vermiştir. Lityum hidroksitin yalnız başına kullanıldığı ve vinil ester esaslı toz polimer ile birlikte kullanıldığı camlı karışımlarda ölçüm sonuçları 190 mm'ye ulaşarak, katkısız karışımın yayılma değerini de aşmış ve en büyük yayılma değerini vermiştir. En düşük yayılma değeri ise kum agregalı numunelerde olduğu gibi yine silis dumanının tek başına kullanıldığı setlerde görülmüştür.

5.1.2 Genleşme değerlerinin incelenmesi

5.1.2.1 Kum agregalı numunelerin genleşme değerlerinin incelenmesi

Agrega olarak kum veya cam kullanılarak hazırlanan numuneler hızlandırılmış harç çubuğu deney koşullarına tabi tutulurken belirli aralıklarla boy ölçümleri alınmıştır. Polimerler ve silis dumanı ilaveleri ile hazırlanan kum agregalı numunelerin 3, 7 ve 14 günlük ASR genleşme değerleri çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 : Kum agregalı numuneler için 3, 7 ve 14 günlük ASR genleşmeleri (HHCD).

KUM AGREGALI KARIŞIMLAR	3 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	7 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	14 GÜNLÜK GENLEŞME (%)
KATKISIZ	0,018	0,053	0,169
VİNİL ESTER TOZ POLİMERLİ	0,010	0,042	0,163
EVA SIVI POLİMERLİ	0,007	0,025	0,132
%4 SİLİS DUMANLI	0,008	0,017	0,069
%8 SİLİS DUMANLI	0,005	0,012	0,043
%12 SİLİS DUMANLI	0,004	0,009	0,029
VİNİL ESTER + %4 SİLİS DUMANLI	0,008	0,027	0,090
VİNİL ESTER + %8 SİLİS DUMANLI	0,006	0,016	0,052
VİNİL ESTER + %12 SİLİS DUMANLI	0,005	0,021	0,072

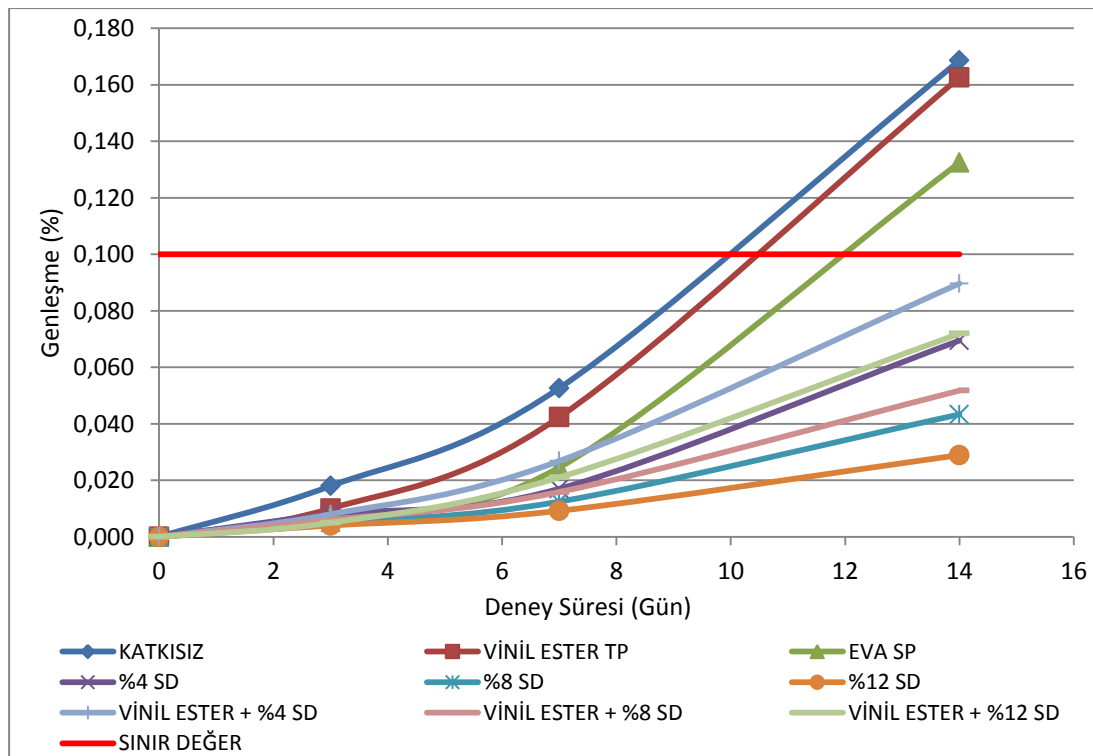
Katkısız kum agregalı numunelerin 14 günlük genleşmeleri %0,169 olarak bulunmuştur. Bu sonuç kontrol karışımı için seçilen standart kumun da reaktif olduğunu göstermektedir. Katkısız karışıma vinil ester esaslı toz polimer ve EVA esaslı sıvı polimer ilave edilmesi numunelerdeki genleşmeleri bir miktar azaltmış fakat sınır değer olan %0,1’in altına çekmeye yetmemiştir.

Buna karşın karışımlarda silis dumanı kullanımı, hem vinil ester esaslı toz polimer ile birlikte hem de tek başına kullanıldığında belirgin rol oynayarak ASR kaynaklı genleşmeleri oldukça azaltmıştır. Agregada kum kullanılan setlerde en az genleşmeyi silis dumanının tek başına kullanıldığı set vermiştir. Silis dumanı kullanım oranının %4 olduğu durumda ASR kaynaklı genleşmeler yaklaşık %59

azalmış, %8 ve %12 kullanıldığı durumlarda da sırasıyla %75 ve %83 azalarak minimum değerlere ulaşmıştır. En iyi sonuç %12 silis dumanının kullanıldığı durumda elde edilmiştir. %0,169 olan genişleme değeri %0,029 değerine inmiştir.

Vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanının birlikte kullanıldığı durumlarda genişmeler katkısız numunelere göre azalmış ve sınır değerinin altında çıkmıştır. Fakat silis dumanının vinil ester ile birlikte kullanılması tek başına kullanıldığı durumdaki kadar olumlu etki yaratmamıştır.

Şekil 5.3 kum agrega kullanılarak hazırlanmış karışımların genişlemelerini ve birbirlerine göre ilişkilerini göstermektedir.



Şekil 5.3 : Kum agregalı numuneler için 14 günlük ASR genişmeleri (HHCD).

5.1.2.2 Cam agregalı numunelerin genişleme değerlerinin incelenmesi

Agrega olarak cam kullanımı alkali silika reaksiyonunu hızlandırarak genişmeleri artırmıştır.

Katkısız kumlu numunenin genişleme değeri %0,169 iken katkısız camlı numunelerde bu değer yaklaşık 17 kat artarak %2,893 değerine ulaşmıştır. Çizelge 5.2 cam agregalı numuneler için 3, 7 ve 14 günlük deney sonuçlarını vermektedir.

Çizelge 5.2 : Cam agregalı numuneler için 3, 7 ve 14 günlük ASR genleşmeleri (HHCD).

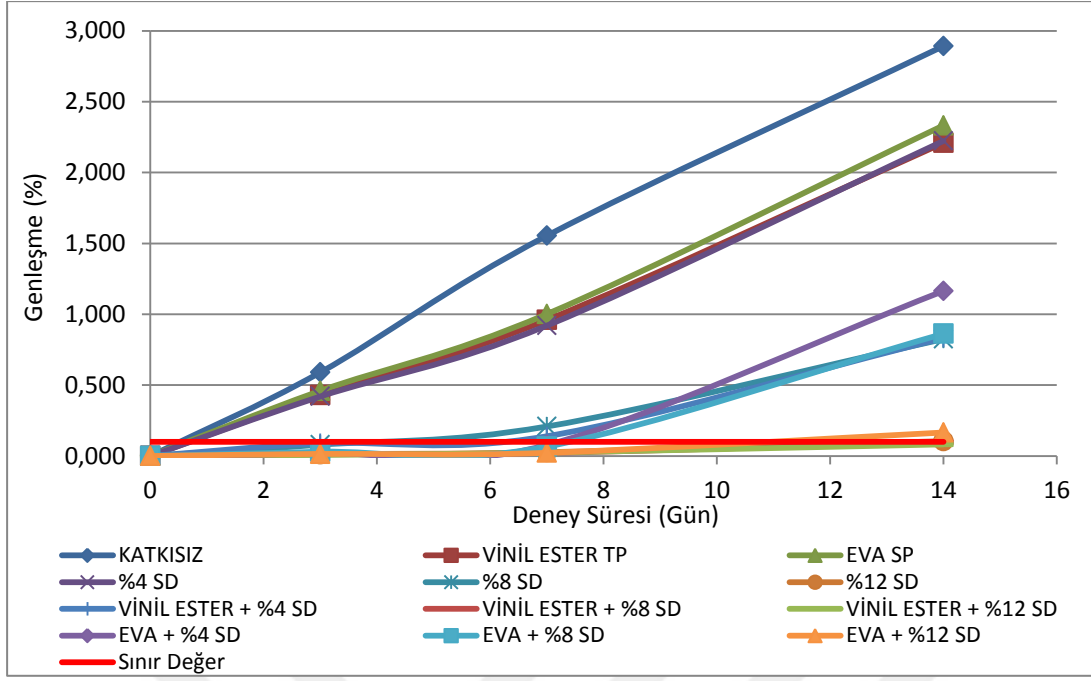
CAM AGREGALI KARIŞIMLAR	3 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	7 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	14 GÜNLÜK GENLEŞME (%)
KATKISIZ	0,590	1,554	2,893
VİNİL ESTER TOZ POLİMERLİ	0,430	0,960	2,210
EVA SIVI POLİMERLİ	0,460	1,002	2,333
%4 SİLİS DUMANLI	0,420	0,920	2,223
%8 SİLİS DUMANLI	0,080	0,208	0,825
%12 SİLİS DUMANLI	0,013	0,027	0,105
VİNİL ESTER + %4 SİLİS DUMANLI	0,090	0,140	0,832
VİNİL ESTER + %8 SİLİS DUMANLI	0,012	0,022	0,096
VİNİL ESTER + %12 SİLİS DUMANLI	0,008	0,024	0,082
EVA + %4 SİLİS DUMANLI	0,020	0,077	1,165
EVA + %8 SİLİS DUMANLI	0,030	0,066	0,863
EVA + %12 SİLİS DUMANLI	0,015	0,023	0,166

Vinil ester esaslı toz ve EVA esaslı sıvı polimer kullanımı genleşme değerlerini katkısız karışımın sonuçlarına göre bir miktar azaltmıştır. Fakat yine de ölçülen genleşmeler oldukça yüksek değerlerde, %2 değerinin üzerinde bulunmuştur.

Silis dumanının %4 oranında kullanımı ASR genleşmelerini ancak polimerlerin etkisi kadar azaltabilmiştir. Karışımlarda kullanılan silis dumanı miktarının artmasıyla birlikte genleşmeler hızla azalmış ancak en iyi sonuç alınan silisin %12 kullanıldığı durumda dahi değerler %0,1 sınırının üzerinde kalmıştır. Silis dumanı kullanım oranı arttıkça genleşmeler azalmıştır.

Cam agrega ile hazırlanan tüm setler incelendiğinde ASR genleşmelerini sınır değer altına çekebilen iki karışım elde edilmiştir. Vinil ester esaslı toz polimerin %8 ve %12 oranlarında silis dumanı ile birlikte kullanıldığı durumlarda genleşmeler %71 ve %96 azalarak en iyi sonucu vermiştir.

Cam agrega kullanılarak hazırlanmış farklı karışımların genleşmeleri ve birbirlerine göre ilişkileri şekil 5.4'te gösterilmektedir.

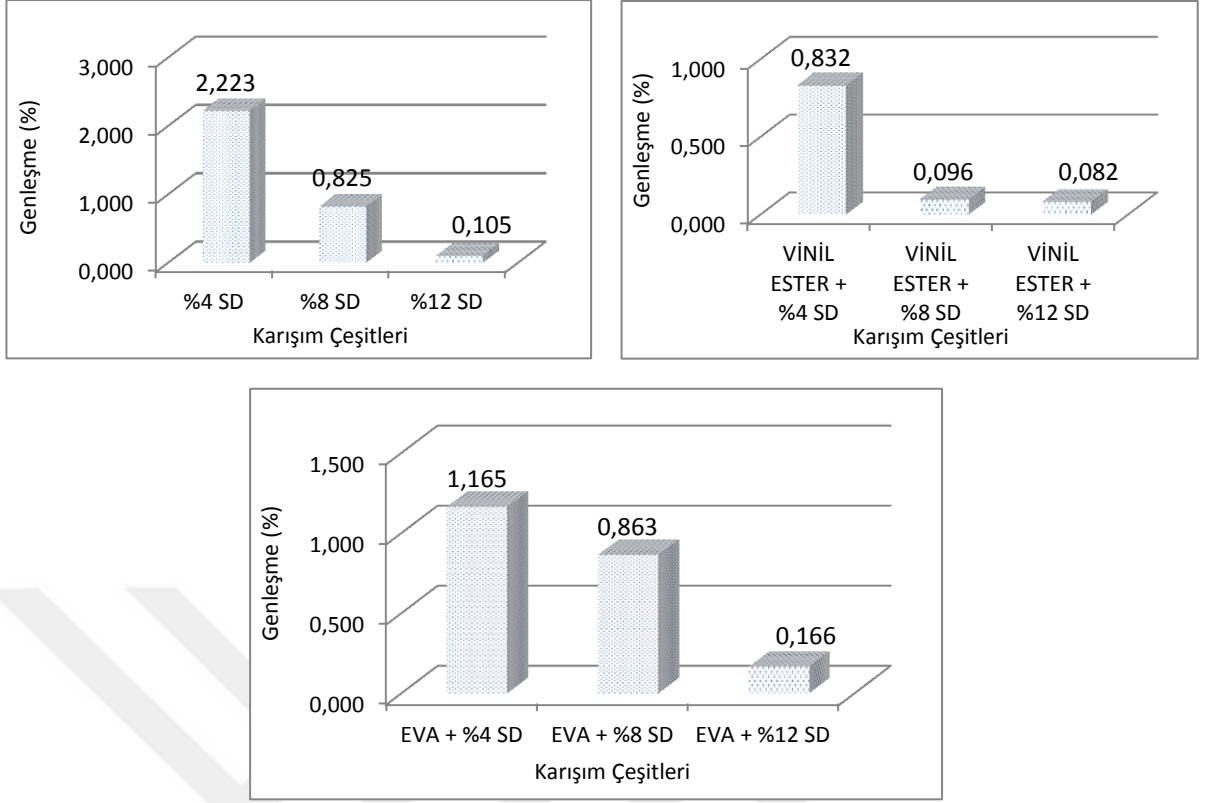


Şekil 5.4 : Cam agregalı numuneler için 14 günlük ASR genleşmeleri (HHCD).

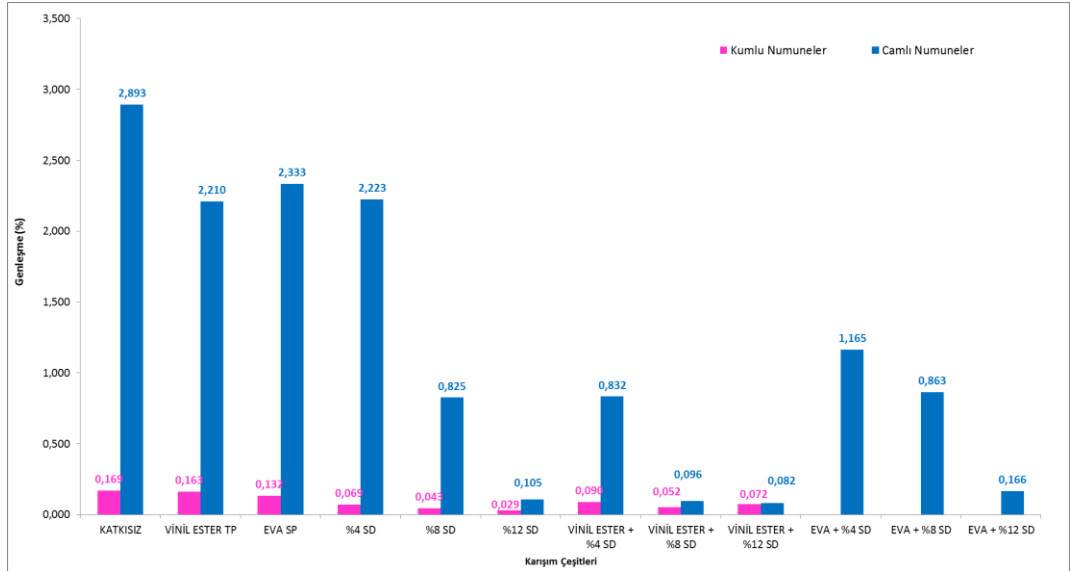
Cam agregalarla hazırlanan numuneler incelendiğinde, yalnızca %8 oranında silis dumanı kullanımı, vinil ester esaslı polimerin %4 silis dumanı ile birlikte kullanımı ve EVA esaslı polimerin %8 silis dumanı ile birlikte kullanıldığı durumda ASR kaynaklı genleşmeler yaklaşık aynı mertebelerde çıkmaktadır. Bu değerlere bakılarak bu çalışma kapsamında kullanılan vinil ester esaslı polimerin hızlandırılmış harç çubuğu deneyi koşullarında EVA esaslı polimere göre daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir. Polimerlerin tek başlarına kullanıldıkları deney sonuçları da bu düşüncüyü desteklemektedir.

Şekil 5.5 cam agrega içeren ve silis dumanı kullanılarak üretilen tüm (silis dumanı, silis dumanı ve vinil ester esaslı toz polimerli, silis dumanı ve EVA esaslı sıvı polimerli) setlerde oluşan ASR genleşmeleri kıyaslamalarını göstermektedir. Her üç settede silis dumanı miktarının artması genleşmeleri azaltıcı yönde rol oynamıştır. En az genleşmelerin görüldüğü numuneler vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanının birlikte kullanıldığı numunelerdir.

Cam agrega kullanılarak hazırlanan karışımların ASR kaynaklı genleşme değerleri, kumlu karışımlara göre oldukça yüksek çıkmıştır. Bu durum camın %78,45 mertebesinde reaktif silis içermesinden kaynaklanmaktadır. Kumlu numuneler ve camlı numuneler üzerinde uygulanan 14 günlük ASR deneyi sonunda belirlenen genleşmeler şekil 5.6'da görülebilmektedir.



Şekil 5.5 : Cam agregalar ile hazırlanan polimer ve silis dumanı katkıli numune setlerinin 14 günlük ASR genleşme değerleri (HHCD).



Şekil 5.6 : Kum ve cam agregalı numunelerin 14. gün sonundaki ASR genleşmeleri (HHCD).

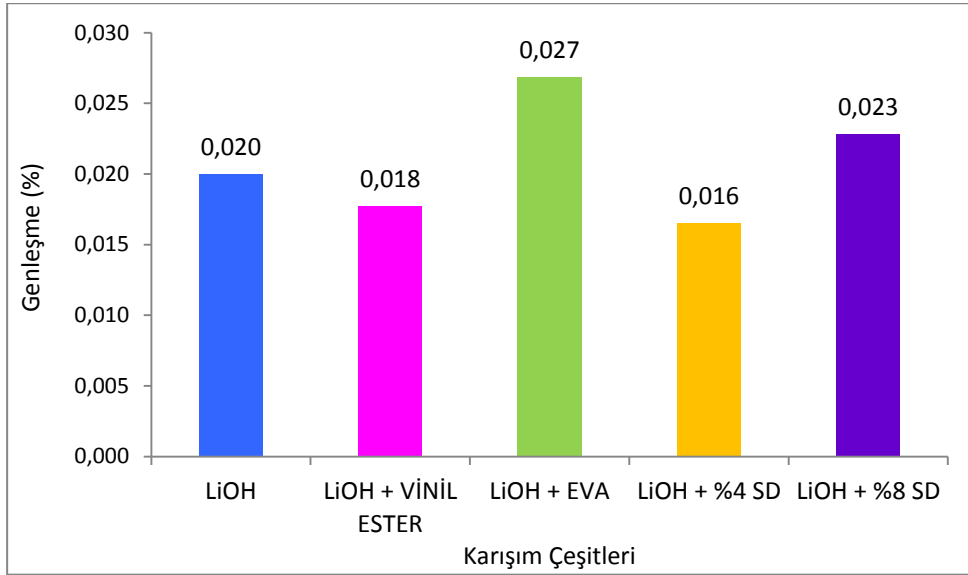
Deneysel çalışma kapsamında literatürde ASR oluşumunu baskıladığı birçok defa ortaya koyulmuş olan lityum hidroksit içeren karışımlar da üretilmiştir.

Çizelge 5.3 lityum hidroksit katkıli numuneler için 3, 7 ve 14 günlük genişleme değerlerini vermekte, şekil 5.7 elde edilen 14 günlük sonuçların karşılaştırmalarını göstermektedir.

Çizelge 5.3 : Lityum hidroksit katkıli cam agregalı numuneler için 3, 7 ve 14 günlük ASR genişmeleri (HHCD).

CAM AGREGALI KARIŞIMLAR	3 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	7 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	14 GÜNLÜK GENLEŞME (%)
LiOH	0,008	0,011	0,020
LiOH + VİNİL ESTER	0,009	0,014	0,018
LiOH + EVA	0,012	0,014	0,027
LiOH + %4 SD	0,006	0,009	0,016
LiOH + %8 SD	0,006	0,013	0,023

Lityum hidroksit kullanılan tüm durumlarda genişmeler ciddi oranlarda azalmış ve sınır değerinin çok altında çıkmıştır. %2,893 değerindeki katkısız numunelerdeki genişleme değerleri %0,016 değerlerine kadar gerilemiştir.



Şekil 5.7 : Lityum hidroksit katkıli cam agregalı numunelerin 14 günlük ASR genişleme değerleri (HHCD).

Hızlandırılmış deney sonrası alkali silika reaksiyonuna uğrayan numunelerde görülen kapak atma ve çatlak oluşumu fotoğrafları şekil 5.8’de gösterilmektedir.



Şekil 5.8 : Deney sonrası ASR'ye uğrayan numune fotoğrafları (HHCD).

5.2 Mekanik Özellikler İle İlgili Deney Sonuçları

Kalıplarından sökülen numuneler diğer gruplarda uygulandığı gibi bir hafta ıslak beze sarılı olarak bekletilmiş, ardından üç hafta boyunca açık havada tutularak kurumaları sağlanmıştır. Bu işlemin ardından 40x40x160 mm'lik numunelerin bir kısmı dördüncü haftanın sonunda, bir kısmı ise önce 80°C suya ve ardından 80°C'deki NaOH çözeltisine yerleştirilerek hızlandırılmış deneye tabi tutulmuş, ardından eğilme ve basınç dayanım testlerine uğratılmışlardır.

Dayanım değerleri incelendiğinde cam agregalı numunelerin hızlandırılmış harç çubuğu deneyi öncesindeki eğilme ve basınç dayanım değerlerinin kum agregalı numunelerden düşük çıktığı görülmektedir. Eğilme deneyinden sonra ikiye ayrılan cam agregalı numune parçası incelendiğinde kırılmanın cam agregata etrafından dolaşarak gerçekleştiği, agreganın parçalanmadığı görülmektedir. Bu durumun cam agregata tanelerinin küresel şekilli olmasından ve dolayısıyla çimento hamuru ile agregata ara yüzeyinin zayıf olmasından kaynaklandığını söyleyebiliriz. Kumlu numunelerde arayüzeyin pürüzlülüğü nedeniyle çimento hamuru ile agregata arasındaki aderansa sürtünmenin de katkısı sonucu eğilme dayanım değerleri daha yüksek çıkmıştır. Şekil 5.9'da kum ve cam agregalı numunelerin kesit görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.9 : Kum ve cam agregalı numune kesitleri.

5.2.1 Basınç dayanım deneyi sonuçları

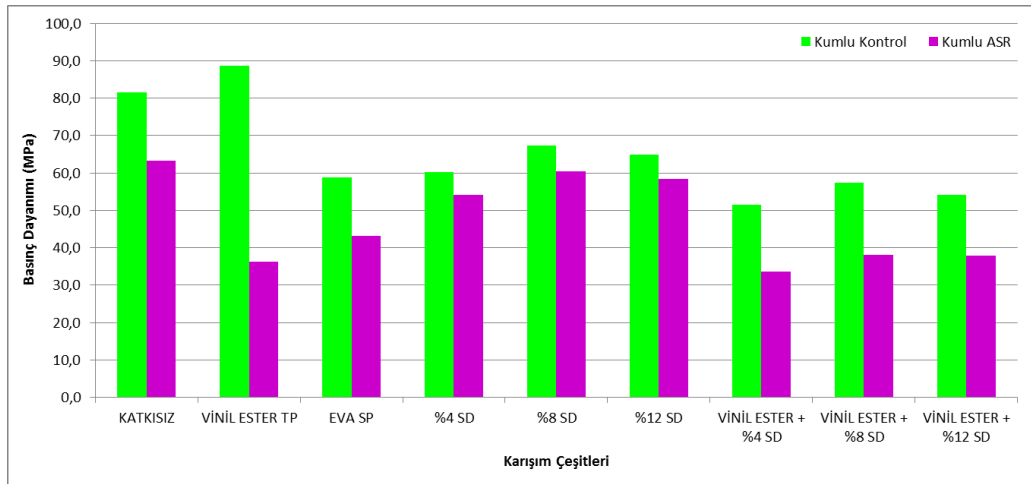
5.2.1.1 Kum agregalı numunelerin basınç dayanım değerlerinin incelenmesi

Numunelerin deney sonuçları incelendiğinde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonrası basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Kumlu karışımlar arasında hızlandırılmış harç çubuğu deneyinden en fazla etkilenen karışımın vinil ester esaslı toz polimer katkıli karışım olduğu söylenebilir. ASR sonrası vinil esterli numunenin dayanım kaybı ASR öncesi numunelere göre % 59,1'dir. Ayrıca vinil esterin silis dumanı ile birlikte kullanıldığı karışımlarda da dayanım değerlerinde ciddi oranlarda düşüşler gözlenmektedir.

Silis dumanı kullanımı basınç dayanım kayıplarını azaltarak olumlu yönde etki etmiştir. Buna karşın hem silis dumanının tek başına kullanıldığı setlerde hem de vinil ester esaslı toz polimer ile birlikte kullanıldığı setlerde, karışımda kullanılan silis dumanı miktarının artırılması (%4 oranından sonraki) dayanımlarda belirgin bir etki yaratmamıştır. Dayanım değerleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Aynı durum cam agrega ile hazırlanan setlerde söz konusu değildir. Cam agregalı setlerde silis dumanı ilavesi daha belirgin rol oynayarak, dayanımların düşüşünü azaltmıştır. Bu durumun kumun agrega reaktivitesinin cam agrega kadar yüksek olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çizelge 5.4 kumlu numunelerin hızlandırılmış harç çubuğu deneyine maruz bırakılmadan önceki ve deney sonrasındaki dayanım değerlerini ve basınç dayanımında meydana gelen kaybı göstermektedir. Şekil 5.10'da bu değerler grafik halinde gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 : Kum agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası basınç dayanım değerleri (HHCD).

KUM AGREGALI KARIŞIMLAR	ASR Öncesi Numuneleri		Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa)	ASR Sonrası Numuneleri		Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı Kaybı (%)
	Numune Parçalarının Basınç Dayanımı (MPa)			Numune Parçalarının Basınç Dayanımı (MPa)			
KATKISIZ	78,9	76,4	81,6	65,0	54,1	63,2	-22,5%
	82,8	82,2		69,1	64,8		
	86,3	83,1		63,1	63,2		
VİNİL ESTER TOZ POLİMERLİ	90,6	91,2	88,7	36,7	36,6	36,3	-59,1%
	87,6	81,4		36,0	35,7		
	90,4	90,8		36,6	35,9		
EVA SIVI POLİMERLİ	53,9	55,4	58,8	41,8	40,6	43,1	-26,7%
	65,8	58,5		44,2	43,8		
	60,6	58,9		44,4	43,9		
%4 SİLİS DUMANLI	51,1	59,8	60,2	53,4	52,9	54,1	-10,0%
	65,9	63,4		50,8	52,2		
	62,2	58,5		56,9	58,6		
%8 SİLİS DUMANLI	68,3	74,7	67,3	63,1	61,7	60,4	-10,2%
	69,1	65,6		61,0	56,3		
	63,5	62,6		60,8	59,8		
%12 SİLİS DUMANLI	65,9	62,6	64,9	59,4	59,7	58,4	-9,9%
	63,8	62,2		56,6	56,7		
	67,5	67,1		58,2	59,9		
VİNİL ESTER + %4 SİLİS DUMANLI	51,8	49,7	51,5	32,1	35,4	33,5	-34,8%
	48,3	53,7		32,4	33,6		
	51,4	54,0		34,3	33,6		
VİNİL ESTER + %8 SİLİS DUMANLI	58,8	55,9	57,4	38,0	36,6	38,0	-33,8%
	56,6	59,9		39,1	37,0		
	58,6	54,9		38,9	38,4		
VİNİL ESTER + %12 SİLİS DUMANLI	50,6	56,4	54,2	38,0	39,5	37,8	-30,2%
	54,8	58,1		38,8	35,9		
	51,6	53,9		36,5	38,3		



Şekil 5.10 : Kum agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).

5.2.1.2 Cam agregalı numunelerin basınç dayanım değerlerinin incelenmesi

Cam agrega ile hazırlanan numunelerde de hızlandırılmış ASR deneyi sonrasında en düşük basınç dayanımını verenler polimerli numunelerdir. En fazla dayanım kaybı sırasıyla EVA esaslı sıvı polimer, vinil ester esaslı toz polimer ve %4 silis dumanının kullanıldığı karışımlarda görülmektedir. Bu numunelerde ASR sonrası dayanım kayıpları %65-71 arasında değişmektedir. Çizelge 5.5 cam agregalı numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi öncesi ve sonrası basınç dayanımlarını göstermektedir.

Çizelge 5.5 : Cam agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası basınç dayanım değerleri (HHCD).

CAM AGREGALI KARIŞIMLAR	ASR Öncesi Numuneleri			ASR Sonrası Numuneleri			Ortalama Basınç Dayanımı Kaybı (%)
	Numune Parçalarının Basınç Dayanımı (MPa)		Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa)	Numune Parçalarının Basınç Dayanımı (MPa)		Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa)	
KATKISIZ	61,0	57,9	59,0	34,0	15,6	19,0	-67,8%
	60,4	58,9		15,6	16,9		
	57,3	58,3		15,9	15,9		
VİNİL ESTER TOZ POLİMERLİ	43,6	43,1	43,9	16,8	15,5	14,8	-66,3%
	43,1	48,1		14,1	13,9		
	42,3	43,4		14,7	13,9		
EVA SIVI POLİMERLİ	48,5	46,8	47,5	14,7	13,5	13,5	-71,6%
	44,8	48,4		12,9	14,1		
	49,3	47,4		12,3	13,4		
%4 SİLİS DUMANLI	53,6	54,8	54,8	17,4	18,4	18,9	-65,6%
	53,4	54,9		18,7	19,4		
	58,5	53,9		19,8	19,5		
%8 SİLİS DUMANLI	57,7	55,3	57,7	40,8	43,9	43,1	-25,3%
	59,1	63,1		42,0	43,5		
	50,4	60,8		41,9	46,6		
%12 SİLİS DUMANLI	60,4	62,4	59,0	55,3	57,0	50,5	-14,5%
	58,9	53,7		54,1	45,9		
	60,4	58,6		45,6	44,8		
VİNİL ESTER + %4 SİLİS DUMANLI	49,0	47,6	46,2	32,7	33,8	34,3	-25,9%
	44,8	39,6		34,4	37,9		
	48,1	48,5		31,4	35,6		
VİNİL ESTER + %8 SİLİS DUMANLI	50,0	55,8	49,4	41,1	44,4	41,7	-15,6%
	45,5	46,1		43,8	43,9		
	49,4	49,9		36,2	41,1		
VİNİL ESTER + %12 SİLİS DUMANLI	54,4	55,9	54,5	43,9	42,9	44,3	-18,8%
	54,7	53,1		44,9	45,1		
	55,2	53,8		46,1	42,6		
EVA + %4 SİLİS DUMANLI	51,4	50,6	52,2	38,9	41,0	36,8	-29,5%
	54,1	52,7		34,8	32,6		
	50,1	54,3		37,1	36,5		
EVA + %8 SİLİS DUMANLI	52,4	49,9	51,2	39,4	39,1	40,1	-21,6%
	50,1	50,6		40,0	40,1		
	49,8	54,4		42,6	39,6		
EVA + %12 SİLİS DUMANLI	53,1	51,4	52,6	50,6	56,4	54,3	3,1%
	51,0	56,7		55,1	55,0		
	51,3	52,2		52,9	55,6		

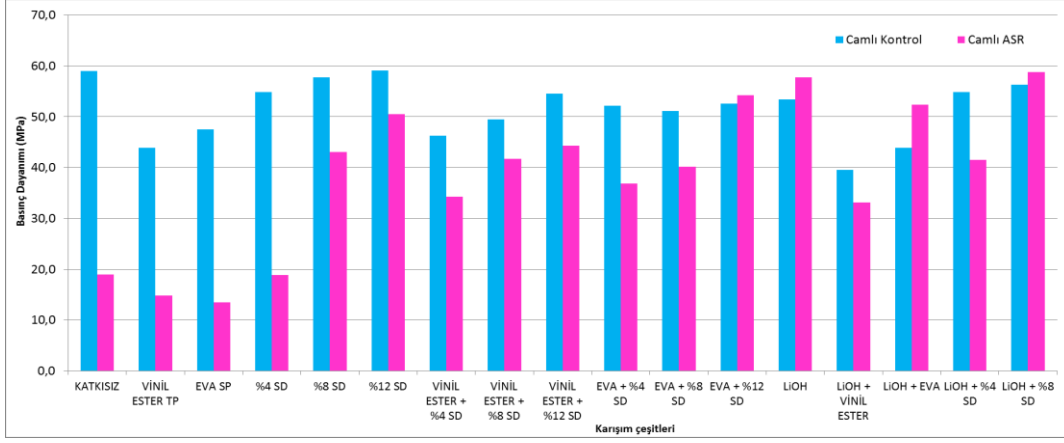
Silis dumanı ilaveli tüm setlerde (silis dumanının tek başına kullanıldığı, vinil ester esaslı polimer ile birlikte ve EVA esaslı polimer ile birlikte kullanıldığı) numunelerin hem deney öncesi hem de deney sonrası dayanım değerleri incelendiğinde silis dumanı miktarının artması ile basınç dayanım değerlerinde artış görülmektedir. Hatta EVA esaslı polimer ve %12 silis dumanının birlikte kullanıldığı numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonrası elde edilen basınç dayanım değerleri, deney öncesi değerler ile yaklaşık aynı kalmıştır.

Lityum hidroksit ilavesinin cam agregalı numunelerdeki etkisi incelendiğinde en olumlu etkinin lityum hidroksit ile EVA esaslı polimerin birlikte kullanıldığı durumda olduğu görülmektedir. Deney sonrası dayanım değerlerinde deney öncesi duruma göre %19,3'lük iyileşme meydana gelmiştir. Ayrıca deney öncesi ve sonrası basınç dayanım değerlerine bakıldığında en yüksek değerler %8 oranında silis dumanının lityum hidroksit ile beraber kullanıldığı sette elde edilmiştir. Lityum katkılı numunelerin basınç dayanım değerleri Çizelge 5.6'da verilmektedir.

Çizelge 5.6 : Lityum hidroksit katkılı cam agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası basınç dayanım değerleri (HHCD).

CAM AGREGALI KARIŞIMLAR	ASR Öncesi Numuneleri			ASR Sonrası Numuneleri			Ortalama Basınç Dayanımı Kaybı (%)
	Numune Parçalarının Basınç Dayanımı (MPa)		Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa)	Numune Parçalarının Basınç Dayanımı (MPa)		Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa)	
LiOH	52,6	54,6	53,5	56,4	56,1	57,7	7,9%
	54,4	51,6		59,1	58,3		
	53,6	53,9		61,0	55,3		
LiOH + VINİL ESTER	36,6	37,3	39,5	34,5	30,7	33,2	-16,1%
	39,1	41,6		30,6	34,1		
	39,9	42,7		32,7	36,5		
LiOH + EVA	44,6	41,7	43,9	54,2	55,3	52,4	19,3%
	43,6	47,6		53,1	54,8		
	43,9	42,0		51,1	45,8		
LiOH + %4 SILİS DUMANLI	54,3	54,7	54,8	41,9	42,8	41,5	-24,4%
	56,1	52,3		38,4	38,3		
	55,6	56,0		42,6	44,9		
LiOH + %8 SILİS DUMANLI	57,4	57,3	56,3	56,4	59,1	58,7	4,3%
	58,6	53,2		60,1	58,0		
	58,2	53,3		59,4	59,5		

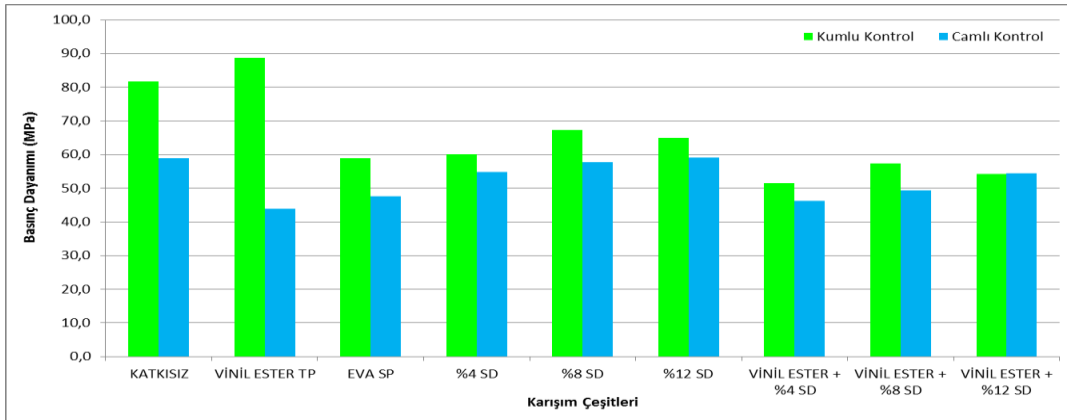
Şekil 5.11 cam agregalı numuneler ile hazırlanan polimerli, silis dumanlı, lityum hidroksit katkılı ve bunların kombinasyonlarından oluşan setlerdeki hızlandırılmış harç çubuğu deneyi öncesi ve sonrası basınç dayanımlarını karşılaştırmaktadır.



Şekil 5.11 : Cam agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).

5.2.1.3 Kum ve cam agregalı numunelerin basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması

Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi öncesi basınç dayanımları kıyaslanan kumlu ve cam agregalı numunelerin tamamına yakınında kum yerine cam kullanımı dayanım değerlerini azaltmıştır. Cam agregası kullanımı nedeniyle oluşan kayıp en çok vinil ester esaslı toz polimerli karışımlarda görülmektedir. Agregası değişiminden en az etkilenen karışım ise vinil ester ve %12 silis dumanının birlikte kullanıldığı durumdur. Bu karışımın cam agregaları ile hazırlanan numunelerden elde edilen basınç dayanım değerleri, kum agregası kullanılarak hazırlanan numunelerin dayanım değerleri ile yaklaşık aynıdır. Şekil 5.12 hızlandırılmış harç çubuğu deneyi öncesi kum ve cam agregalı numunelerin basınç dayanım değerlerinin karşılaştırmalarını göstermektedir.

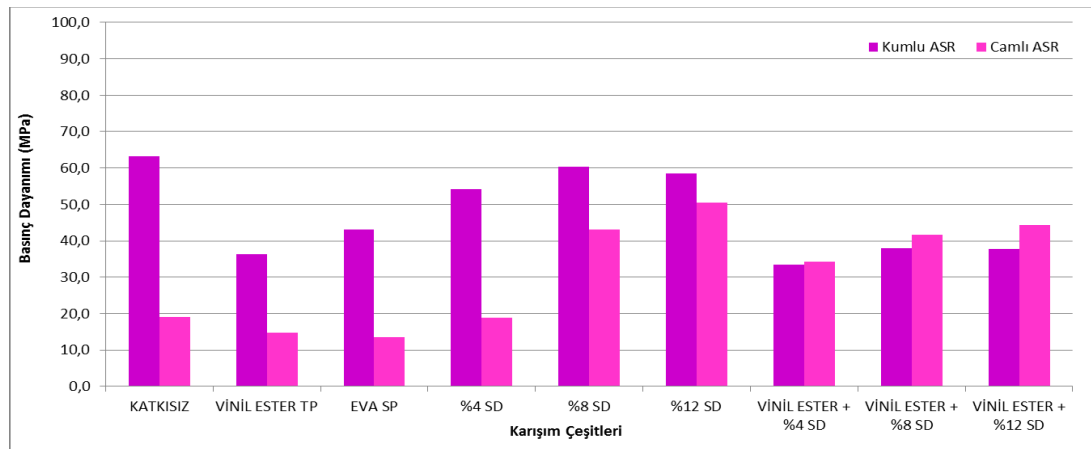


Şekil 5.12 : Kum ve cam agregalı numunelerde ASR öncesi basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).

Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonrası kum agregalı ve cam agregalı numunelerin basınç dayanım değerleri karşılaştırıldığında, agrega değişiminden en çok etkilenen grubun katkısız kontrol numuneleri olduğu görülmektedir. Bu karışımdaki numunelerde kum yerine cam agrega kullanımı %70 oranında dayanım kaybı oluşturmaktadır. Polimer ilaveli durumlarda da deney öncesi değerlere göre %60-69 oranlarında dayanım kaybı meydana geldiği görülmektedir.

Silis dumanı kullanılan setlerde silis dumanı miktarının artırılması ile cam agregalı numunelerin dayanımları bir miktar iyileşerek, kumlu numunelerin değerlerine yaklaşmaktadır. %4 silis dumanı kullanılan durumda cam agregalı numunelerin kum agregalılara göre dayanım kaybı %65,1 iken, %8 ve %12 silis dumanı kullanımında sırasıyla %28,7 ve %13,6 olarak dayanımdaki kayıp azalmaktadır.

Silis dumanı ile vinil ester esaslı toz polimerin birlikte kullanıldığı setlerde deney sonrası cam agregalı numunelerde ölçülen basınç dayanım değerleri yaklaşık kumlu numuneler ile aynı kalmış hatta bir miktar üzerine çıkmıştır. %12 silis dumanlı ve toz polimerli sette cam agregalı numunelerin basınç dayanımı ortalaması kum agregalı numunelere göre %17 oranında artmıştır. Aynı durum bu setteki numunelerin eğilme dayanım sonuçlarında da görülmektedir. Cam agregalı setlerde lityumlu karışımlardan sonra en az genleşme yüzdelerini veren bu karışımın numunelerinde az miktarda oluşan ASR jelinin harcın boşluk oranını azaltmak suretiyle bu sonucu ortaya çıkarmış olabileceği düşünülmektedir. Şekil 5.13 hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonrası kum ve cam agregalı numunelerin basınç dayanım değerlerinin karşılaştırmalarını göstermektedir.



Şekil 5.13 : Kum ve cam agregalı numunelerde ASR sonrası basınç dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).

5.2.2 Eğilme dayanım deneyi sonuçları

5.2.2.1 Kum agregalı numunelerin eğilme dayanım değerlerinin incelenmesi

Deney sonuçları genel olarak incelendiğinde hızlandırılmış harç çubuğu deney koşullarının numunelerin eğilme dayanımlarında %42'ye varan kayıp oluşturduğu görülmüştür. Çizelge 5.7 kumlu numunelerin hızlandırılmış harç çubuğu deneyi öncesi ve sonrasında ölçülen eğilme dayanım değerlerini vermektedir. Bu değerlerin sütun grafiği ile gösterimi şekil 5.14'te verilmektedir.

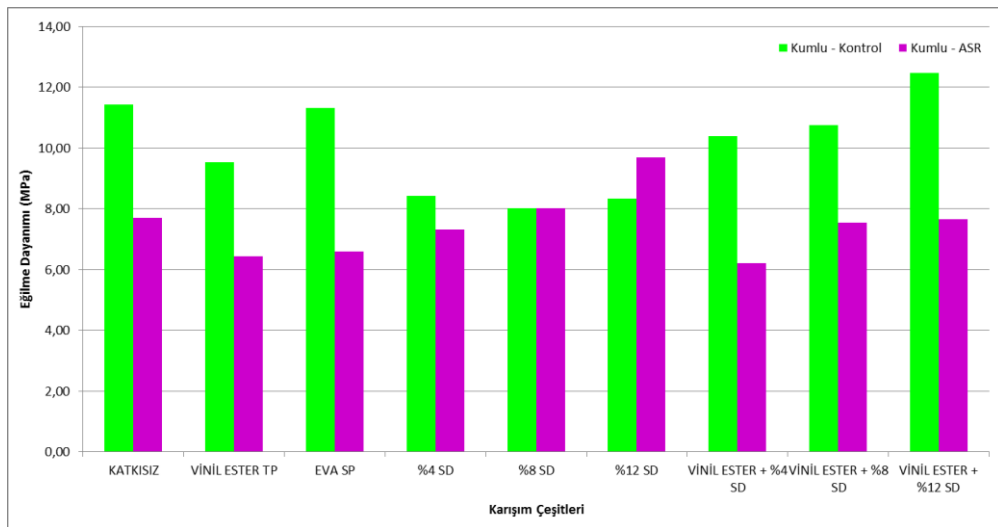
Çizelge 5.7 : Kum agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası eğilme dayanım değerleri (HHCD).

KUM AGREGALI KARIŞIMLAR	ASR Öncesi Numuneleri		ASR Sonrası Numuneleri		Ortalama Eğilme Dayanımı Kaybı (%)
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı Ortalaması (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı Ortalaması (MPa)	
KATKISIZ	11,04	11,42	8,16	7,70	-32,55%
	11,96		8,16		
	11,27		6,78		
VİNİL ESTER TOZ POLİMERLİ	9,66	9,54	6,21	6,44	-32,53%
	9,54		7,13		
	9,43		5,98		
EVA SIVI POLİMERLİ	11,11	11,31	6,78	6,59	-41,72%
	12,23		6,44		
	10,59		6,55		
%4 SİLİS DUMANLI	9,01	8,43	7,70	7,32	-13,14%
	7,76		6,32		
	8,51		7,93		
%8 SİLİS DUMANLI	7,69	8,01	7,59	8,01	0,00%
	8,03		9,08		
	8,32		7,36		
%12 SİLİS DUMANLI	8,70	8,33	9,77	9,70	16,39%
	8,06		8,74		
	8,24		10,59		
VİNİL ESTER + %4 SİLİS DUMANLI	10,23	10,39	5,75	6,21	-40,26%
	9,83		6,78		
	11,11		6,09		
VİNİL ESTER + %8 SİLİS DUMANLI	10,12	10,74	7,13	7,55	-29,73%
	11,42		7,70		
	10,69		7,82		
VİNİL ESTER + %12 SİLİS DUMANLI	12,37	12,47	7,47	7,66	-38,52%
	11,57		7,82		
	13,46		7,70		

Katkısız numunelerin ASR öncesi eğilme değerlerine göre %32,55 oranında dayanım kaybına uğradığı görülmektedir. Vinil ester esaslı polimer ilaveli durumda bu kayıp yaklaşık aynı değerlerde iken, EVA esaslı polimer içeren numunelerde dayanım kaybı artarak %42 değerine yaklaşmaktadır.

Silis dumanı ilaveli numunelerde kullanılan silis dumanı miktarı arttıkça eğilmedeki dayanım kaybının azaldığı ve %12 silis dumanı kullanılan durumda dayanımın HHCD deneyi öncesi değere göre %16,39 oranında arttığı dikkat çekmektedir. Bu iyileştirici etkinin iki nedenden dolayı olabileceği düşünülmektedir. Silis dumanı içerdiği çok miktardaki amorf silis sayesinde alkali silika reaksiyonunu harç henüz taze haldeyken gerçekleştirmekte ve böylelikle numune üzerinde çatlak oluşumuna neden olmamaktadır. Buna ek olarak HHCD'ne maruz kalmayan numunelerin sadece 7 gün süresince ıslak bez altında saklandığı düşünüldüğünde 14 gün boyunca 80°C sıcaklığa maruz kalan harçlarda puzolonik reaksiyon gelişim düzeyi daha fazla ilerlemiş olacağından dayanımların hızlandırılmış ASR deneyi sonrasında artış göstermesi mümkün olmuştur.

Vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanının birlikte kullanıldığı setlerde de silis dumanının karışım içindeki miktarı arttıkça deney öncesinde ve deneyden sonra ulaşılan dayanımların arttığı görülmektedir. Vinil esterin %4 silis dumanı ilavesi ile birlikte kullanımında dayanım kaybı EVA esaslı sıvı polimerin tek başına kullanımı ile yaklaşık aynı sonuçları vermekte ve katkısız kontrol numunelerinin dayanım kaybı değerini aşarak daha fazla kayıp meydana getirmektedir.



Şekil 5.14 : Kum agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).

5.2.2.2 Cam agregalı numunelerin eğilme dayanım değerlerinin incelenmesi

Cam agrega kullanılarak hazırlanan numunelerde eğilme dayanım sonuçları bakımından en olumsuz sonuçları polimer kullanımı vermektedir. Çizelge 5.8 cam agrega ile hazırlanan setlerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi öncesi ve deney sonrası durumlarda elde edilen eğilme dayanımı değerlerini göstermektedir.

Çizelge 5.8 : Cam agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası eğilme dayanım değerleri (HHCD).

CAM AGREGALI KARIŞIMLAR	ASR Öncesi Numuneleri		ASR Sonrası Numuneleri		Ortalama Eğilme Dayanımı Kaybı (%)
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı Ortalaması (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı Ortalaması (MPa)	
KATKISIZ	6,55	6,63	1,38	1,23	-81,50%
	5,98		1,15		
	7,36		1,15		
VİNİL ESTER TOZ POLİMERLİ	9,08	8,20	0,69	0,69	-91,59%
	8,16		0,69		
	7,36		0,69		
EVA SIVI POLİMERLİ	6,90	7,51	0,46	0,42	-94,39%
	6,44		0,46		
	9,20		0,34		
%4 SİLİS DUMANLI	7,01	6,13	1,03	0,96	-84,38%
	5,98		1,03		
	5,40		0,80		
%8 SİLİS DUMANLI	5,29	5,13	1,26	2,34	-54,48%
	5,52		2,30		
	4,60		3,45		
%12 SİLİS DUMANLI	5,75	5,75	8,28	9,47	64,67%
	5,52		10,23		
	5,98		9,89		
VİNİL ESTER + %4 SİLİS DUMANLI	5,52	5,52	8,28	8,51	54,17%
	5,29		8,51		
	5,75		8,74		
VİNİL ESTER + %8 SİLİS DUMANLI	5,52	6,05	10,35	9,08	50,00%
	6,21		8,97		
	6,44		7,93		
VİNİL ESTER + %12 SİLİS DUMANLI	7,59	8,35	9,31	9,24	10,55%
	8,05		9,20		
	9,43		9,20		
EVA + %4 SİLİS DUMANLI	9,54	9,35	1,38	1,34	-85,66%
	9,43		1,26		
	9,08		1,38		
EVA + %8 SİLİS DUMANLI	8,51	8,55	1,15	1,26	-85,20%
	8,16		1,03		
	8,97		1,61		
EVA + %12 SİLİS DUMANLI	10,12	10,08	7,13	8,20	-18,63%
	10,00		9,20		
	10,12		8,28		

Vinil ester ve EVA esaslı polimer ilaveli numunelerin 80°C su ve ardından 80°C NaOH çözeltisi deney koşullarında deney sonrası dayanım değerlerinin sıfıra yaklaştığı gözlenmiştir. Silis dumanı ilavesi numunelerin deney sonrası uğradıkları eğilme dayanımı kayıplarını azaltmıştır. %4 oranda silis dumanı kullanımında dayanım değerleri neredeyse sıfırlanırken, %8 oranında silis kullanımı deney öncesi 5,13 MP olan dayanımı 2,34 MPa değerine düşürerek %54 lük kayıp oluşturmuştur. Silis dumanı kullanım miktarı artırıldıkça dayanım kayıpları azalmıştır. %12 oranında silisin kullanıldığı durumda deney öncesi 5,75 olan dayanım değeri deney sonrası 9,47 MPa çıkarak eğilme dayanım değerinde %65'e yakın artış göstermiş, deney öncesi duruma göre iyileşme sağlamıştır. Bu durumun %12 oranında kullanılan silis dumanının ASR oluşumunu tamamen engellemeye yettiği ve hızlandırılmış deney sırasında 15 gün süreyle 80°C'ye maruz kalan numunelerde bu sürecin kür etkisi yaratması sonucunda gerçekleştiği düşünülmektedir. Cam agregalarda karşılaşılan bu durum aynı şekilde kumlu numunelerde de görülmektedir. %12 silis dumanı kullanımı durumunda kumlu numunelerin dayanım değerlerinde de deney öncesi duruma göre %16,39 oranında iyileşme görülmektedir.

Vinil ester esaslı polimerin silis dumanının farklı oranlarda kullanımı ile hazırlanan setlerde de bu olumlu etki devam etmiş, eğilme dayanım değerleri deney öncesi duruma göre daha yüksek değerlere çıkmıştır. Bu gruptaki numunelerde silis dumanı kullanım miktarı arttıkça eğilme dayanım değerleri artmıştır. Deney öncesinde ve deney sonrasında da en yüksek eğilme dayanım değerleri vinil ester esaslı polimer ile birlikte %12 oranında silis dumanının kullanıldığı numunelerde elde edilmiştir.

EVA esaslı polimerin hem tek başına, hem de silis dumanı ile birlikte kullanıldığı deney numuneleri incelendiğinde özellikle deney sonrası dayanım değerlerinin çok düşük değerler verdiği görülmektedir. %4 ve %8 oranında silis dumanı ile birlikte kullanıldığı durumlarda dayanım değerleri birbirine yakın değerler verirken %12 silis dumanı ile birlikte kullanımı deney sonrası dayanım değerlerinde ciddi oranda artış meydana getirmiştir.

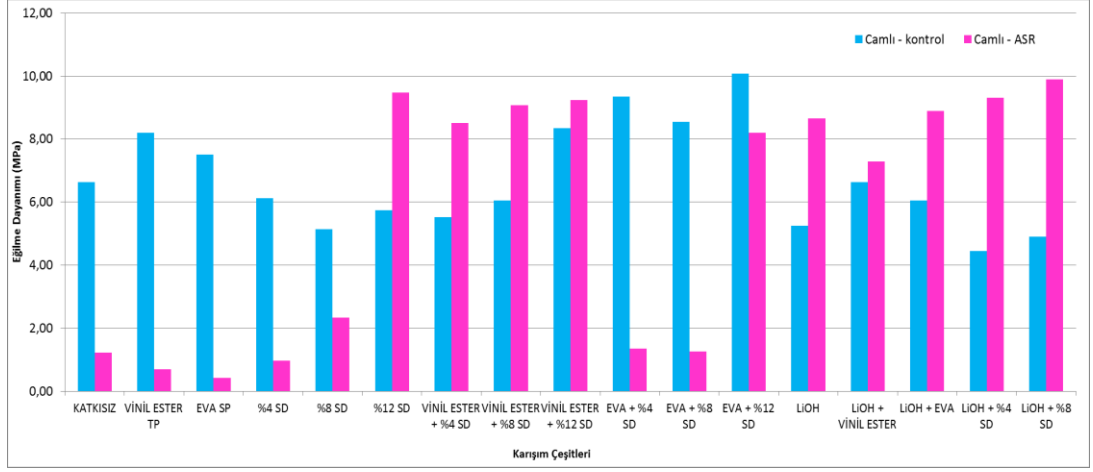
Eğilme dayanım değerlerine lityum hidroksit etkisinin araştırılması için hazırlanan numunelerin deney sonuçları incelendiğinde, lityum hidroksit ilavesinin dayanım değerlerini deney öncesi dayanımlara göre artırdığı gözlenmiştir. ASR genleşme değerlerine bakıldığında minimum genleşme değerlerini vererek alkali silika reaksiyonuna karşı maksimum fayda sağlayan katkı LiOH'tır. Burada da ASR

önlenecek ve 80°C’de 14 gün süren kür (bakım) etkisi devam ettirilerek lityum hidroksit kullanılan tüm karışımlarda deney öncesine göre dayanım değerlerinin arttığı ve iyileştirici etki görüldüğü tespit edilmiştir. Sadece lityum hidroksit katkılı numunelerde bu olumlu etki %65 iken, silis dumanı ile birlikte kullanımında iyileştirme oranı %110 seviyelerine yükselerek en olumlu sonuçlar ortaya çıkmıştır. Çizelge 5.9’da cam agregası ile hazırlanan LiOH katkılı numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyinden önce ve deney sonrası durumlarda ulaşılan eğilme dayanımı değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.9 : Lityum hidroksit katkılı cam agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası eğilme dayanım değerleri (HHCD).

CAM AGREGALI KARIŞIMLAR	ASR Öncesi Numuneleri		ASR Sonrası Numuneleri		Ortalama Eğilme Dayanımı Kaybı (%)
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı Ortalaması (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı Ortalaması (MPa)	
LiOH	5,63	5,25	9,89	8,66	64,98%
	4,60		7,36		
	5,52		8,74		
LiOH + VİNİL ESTER	6,67	6,63	7,82	7,28	9,83%
	5,75		6,67		
	7,47		7,36		
LiOH + EVA	5,52	6,05	9,43	8,89	46,84%
	6,90		8,05		
	5,75		9,20		
LiOH + %4 SİLİS DUMANLI	4,71	4,45	9,31	9,31	109,48%
	3,45		9,43		
	5,17		9,20		
LiOH + %8 SİLİS DUMANLI	4,94	4,91	10,12	9,89	101,56%
	4,71		10,35		
	5,06		9,20		

Şekil 5.15’de cam agregası içeren numunelerin alkali silika reaksiyonu öncesi ve sonrası eğilme dayanımı değerleri karşılaştırılmasının grafiksel gösterimi yer almaktadır.



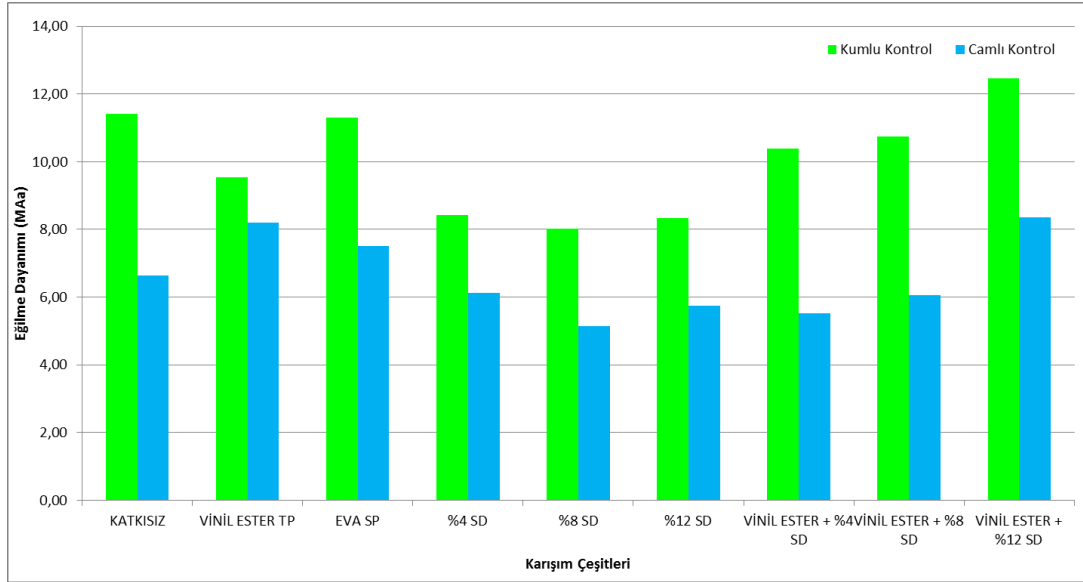
Şekil 5.15 : Cam agregalı numunelerde ASR öncesi ve sonrası eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).

5.2.2.3 Kum ve cam agregalı numunelerin eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması

Agrega olarak kum veya cam kullanılan durumlara göre hızlandırılmış harç çubuğu deneyi öncesi numunelerin eğilme dayanım değerleri karşılaştırıldığında, cam agregalı numunelerin tamamının kumlulara göre daha düşük dayanım gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeninin daha önce bahsedildiği gibi agrega ile harç hamurunun arayüzey bölgesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Cam agregalı numunelerde zayıf olan arayüzey bölgesinden dolayı dayanım değerleri de düşük çıkmaktadır.

Vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanının birlikte kullanıldığı kumlu ve cam agregalı setlerde karışımın içerdiği silis dumanı oranı arttıkça eğilme dayanımları da artmaktadır. Ayrıca silis dumanının vinil ester esaslı toz polimer ile birlikte kullanıldığı setlerde, silis dumanının tek başına kullanıldığı setlere göre eğilme dayanım değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Deney öncesi ve deney sonrası ölçülen dayanım değerlerinde de aynı durum söz konusudur. Bu durumun kullanılan vinil ester esaslı toz polimerin çekme dayanımını arttıran etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kumlu agregalarda pürüzlü olan arayüzey, polimerin de takviyesiyle daha güçlü bir hal alarak dayanım değerlerini artırmaktadır. Bunlardan başka, aynı karışımdaki camlı numunelerin dayanım değerlerinin kumlu numunelere göre %50'ye varan oranlarda düştüğü görülmektedir. Cam agregalarda yüzey yuvarlaklığından dolayı polimerin bu olumlu etkisinden

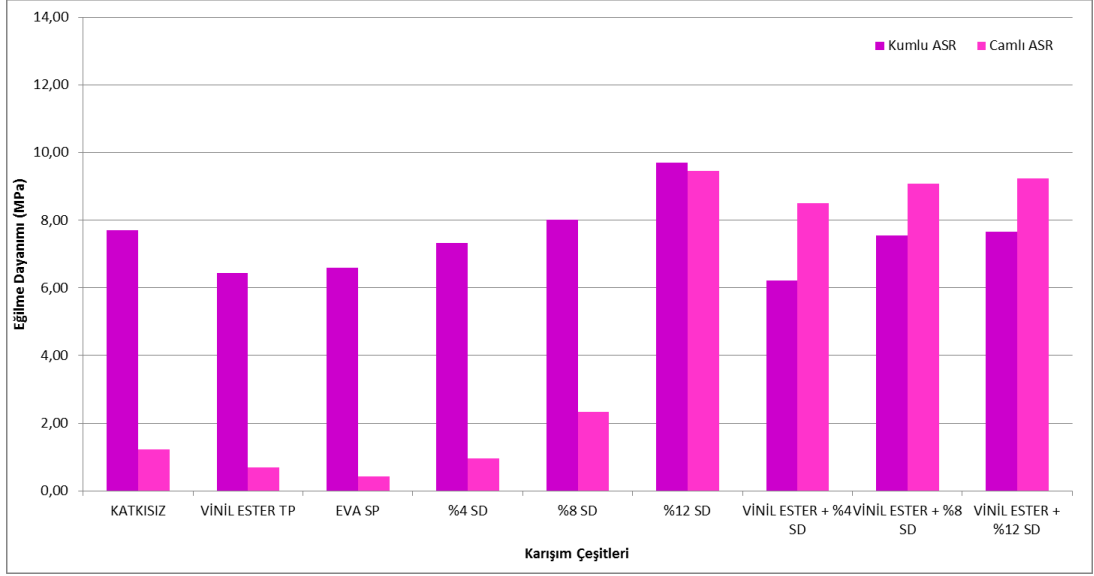
yararlanılamamaktadır. Polimer etkisi ile güçlendirilmiş arayüzey görüntüsü numuneler üzerinde gerçekleştirilen ESEM analizleri sırasında da fark edilmiştir, numune fotoğrafları bölüm 5.4 numunelerin mikroyapı incelemeleri bölümünde sunulmuştur. Şekil 5.16 cam ve kum agregalarla hazırlanan numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi koşullarına maruz bırakılmadan önceki eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırmaları gösterilmektedir.



Şekil 5.16 : Kum ve cam agregalı numunelerin ASR öncesi eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).

HHCD sonrası kum ve cam agregalı numunelerin eğilme dayanım değerleri incelendiğinde polimer ilaveli setlerde ve silis dumanının %4 ve %8 oranında kullanıldığı setlerde cam agregalı numunelerin dayanım değerlerinde kumlulara göre ciddi oranda kayıplar görülmektedir.

Vinil ester esaslı toz polimer ile silis dumanının birlikte kullanıldığı setlerde hızlandırılmış ASR deneyi sonrası dayanım değerleri incelendiğinde cam agregalı numunelerin kum agregalı numunelere göre daha yüksek eğilme dayanım değerlerine ulaştığı görülmektedir. Cam agrega ile hazırlanan bu setlerde ASR genişmelerine bakıldığında en az genişme gösteren karışımların bu karışımlar olduğu görülmektedir. Agrega ile hamurun arayüzey bölgesinde oluşan az miktardaki bu ASR jelinin arayüzeyi iyileştirmiş olabileceği düşünülmektedir. Arayüz bölgesinde biriken ASR jelinin ESEM fotoğrafları bölüm 5.4'te verilmiştir. Şekil 5.17 cam ve kum agregalarla hazırlanan numunelerde hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonrası numunelerin eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırmalarını göstermektedir.



Şekil 5.17 : Kum ve cam agregalı numunelerin ASR sonrası eğilme dayanım değerlerinin karşılaştırılması (HHCD).

5.3 Harç Çubuğu Deneyi Sonuçları

5.3.1 Genleşme değerlerinin incelenmesi

5.3.1.1 Kum agregalı numunelerin genleşme değerlerinin incelenmesi

Agrega olarak kum veya cam agregası kullanılarak hazırlanan numuneler harç çubuğu deney koşullarına (ASTM C227) tabi tutulurken standartta istenen belirli aralıklarla boy ölçümleri yapılmıştır. Hazırlanan kum agregalı numune setlerinin 14 günlük, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 aylık ASR genleşme değerleri çizelge 5.10’da gösterilmektedir.

Çizelge 5.10 : Kum agregalı numuneler için 6 aylık ASR genleşmeleri (HCD).

KUM AGREGALI KARIŞIMLAR	14 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	30 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	60 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	90 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	120 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	150 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	180 GÜNLÜK GENLEŞME (%)
KATKISIZ	0,057	0,065	0,071	0,074	0,077	0,079	0,080
VİNİL ESTER TOZ POLİMERLİ	0,048	0,051	0,054	0,057	0,065	0,067	0,068
EVA SIVI POLİMERLİ	0,038	0,041	0,046	0,048	0,051	0,052	0,055
%4 SİLİS DUMANLI	0,041	0,042	0,046	0,050	0,052	0,056	0,057
%8 SİLİS DUMANLI	0,037	0,039	0,041	0,043	0,049	0,053	0,055
%12 SİLİS DUMANLI	0,034	0,036	0,038	0,040	0,042	0,043	0,046
VİNİL ESTER + %4 SİLİS DUMANLI	0,053	0,056	0,058	0,060	0,065	0,066	0,069
VİNİL ESTER + %8 SİLİS DUMANLI	0,047	0,049	0,050	0,052	0,057	0,059	0,063
VİNİL ESTER + %12 SİLİS DUMANLI	0,049	0,051	0,054	0,058	0,062	0,063	0,065

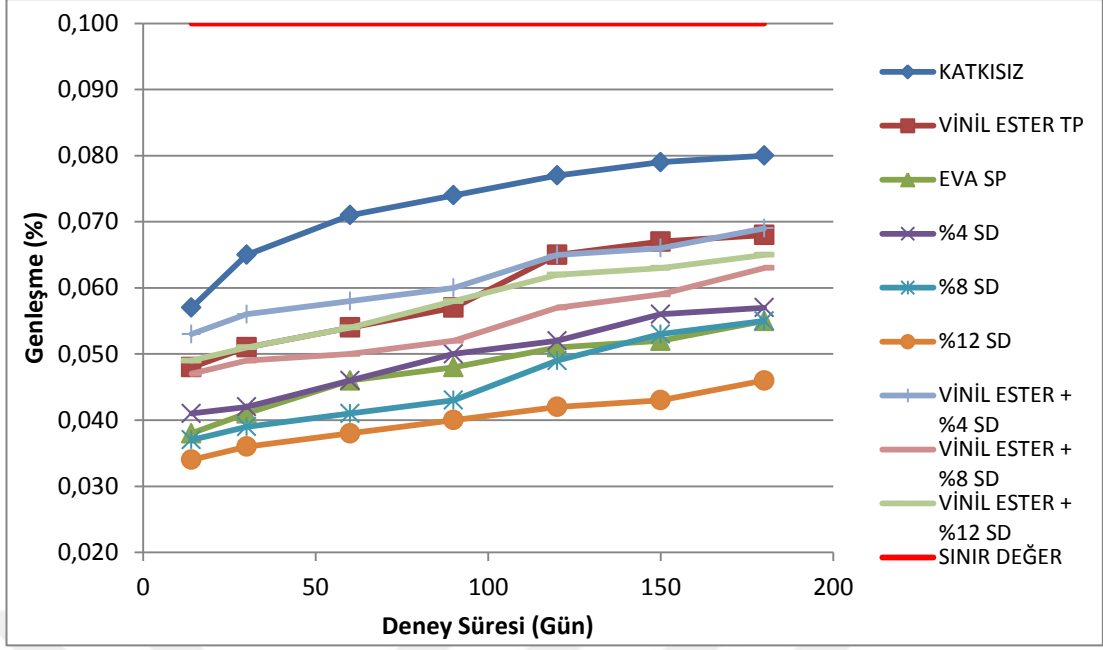
Harç çubuğu deneyi koşullarına tabi tutulan farklı karışımlardakikum agregalı numunelerin 6 aylık genleşme değerleri incelendiğinde en büyük genleşmelerin %0,080 değeri ile katkısız kumlu numunelere ait olduğu görülmektedir. Bu set numuneleri en büyük genleşmeleri göstermesine karşın limit değer olan %0,1 lik sınır değerinin altında kalmaktadır. 6 aylık süre sonunda ulaşılan deney sonuçları incelendiğinde ASR genleşmeleri açısından sınır değer olan %0,1 değerini aşan karışım bulunmamaktadır.

Vinil ester esaslı toz polimer ve EVA esaslı sıvı formlu polimer kullanımları ASR genleşmelerini katkısız numunelere göre bir miktar azaltarak, olumlu yönde etki etmiştir. Vinil ester esaslı toz polimerin tek başına kullanıldığı durumda genleşme değeri %0,068 ölçülürken, silis dumanının %4, %8, %12 kullanıldığı durumlarda da genleşmeler %0,063 ile %0,069 değerleri arasında değişmektedir. Bu durumda silis dumanı ilavesinin çok fazla etkili olduğu söylenemez. Bunun nedeni olarak yetersiz kür koşulları nedeniyle silis dumanının gerekli puzolonik reaksiyon sürecini tamamlayamadığı ve beklenen iyileştirici etkiyi gösteremediği söylenebilir. Tepkimeye girmeden kalan silis dumanı taneleri ESEM görüntülerinde de fark edilmiş, EDS analizleri yapılmıştır, fotoğraflar bölüm 5.4'te paylaşılmıştır.

EVA esaslı sıvı formlu polimer kullanımı vinil ester esaslı toz polimere göre bir miktar daha olumlu etki göstermiş, genleşme değerlerini %0,055 seviyesine çekmiştir.

Kum agregalı setlerde en az genleşmeleri silis dumanının tek başına kullanıldığı karışımlar vermiştir. Silis dumanının karışımdaki miktarı arttırıldıkça genleşmeler azalmıştır. En iyi sonuçlar %0,046 genleşme değeri ile %12 silis dumanı kullanımından elde edilmiştir. Kum agregalı numunelerde hızlandırılmış deney şartları altında da en iyi sonuçlar yine silis dumanının tek başına kullanıldığı setlerde ulaşılmıştır.

Şekil 5.18 kum agrega kullanılarak hazırlanmış karışımların genleşmelerini ve birbirlerine göre ilişkilerini göstermektedir.



Şekil 5.18 : Kum agregalı numuneler için 6 aylık ASR genleşmeleri (HCD).

5.3.1.2 Cam agregalı numunelerin genleşme değerlerinin incelenmesi

Agrega olarak cam kullanımı alkali silika reaksiyonu kaynaklı genleşmeleri artırmıştır. Katkısız kumlu numunelerin genleşme değeri %0,080 iken katkısız camlı numunelerde bu değer %0,111 değerlerine ulaşmış, limit değer olan %0,1 değerinin üzerine çıkmıştır. Çizelge 5.11 cam agregalı numuneler için 14 günlük, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 aylık deney sonuçlarını vermektedir.

Çizelge 5.11 : Cam agregalı numuneler için 6 aylık ASR genleşmeleri (HCD).

CAM AGREGALI KARIŞIMLAR	14 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	30 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	60 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	90 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	120 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	150 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	180 GÜNLÜK GENLEŞME (%)
KATKISIZ	0,084	0,096	0,101	0,104	0,108	0,109	0,124
VİNİL ESTER TOZ POLİMERLİ	0,058	0,067	0,076	0,080	0,087	0,088	0,090
EVA SIVI POLİMERLİ	0,062	0,068	0,069	0,072	0,073	0,077	0,081
%4 SİLİS DUMANLI	0,045	0,048	0,052	0,057	0,060	0,065	0,067
%8 SİLİS DUMANLI	0,042	0,043	0,046	0,047	0,050	0,053	0,059
%12 SİLİS DUMANLI	0,036	0,038	0,039	0,041	0,043	0,048	0,052
VİNİL ESTER + %4 SİLİS DUMANLI	0,040	0,043	0,055	0,078	0,090	0,110	0,125
VİNİL ESTER + %8 SİLİS DUMANLI	0,034	0,038	0,050	0,072	0,086	0,107	0,123
VİNİL ESTER + %12 SİLİS DUMANLI	0,032	0,036	0,048	0,069	0,082	0,100	0,120
EVA + %4 SİLİS DUMANLI	0,055	0,060	0,069	0,076	0,081	0,085	0,089
EVA + %8 SİLİS DUMANLI	0,058	0,060	0,068	0,073	0,080	0,082	0,087
EVA + %12 SİLİS DUMANLI	0,060	0,062	0,068	0,071	0,078	0,081	0,086

Cam agrega ile hazırlanan numune setlerinde de maksimum genleşme gösteren karışım %0,111 değeri ile katkısız karışımdır. Ardından en büyük genleşmeleri gösteren karışımlar; vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanının birlikte kullanıldığı numunelerdir. Bu numunelerden ölçülen %0,100 ile %0,110 değerleri ile katkısız kontrol numunelerine yakın değerler elde edilmiştir. 6 aylık sonuçlar incelendiğinde diğer karışımların tamamı sınır değerinin (%0,1) altında kalmıştır.

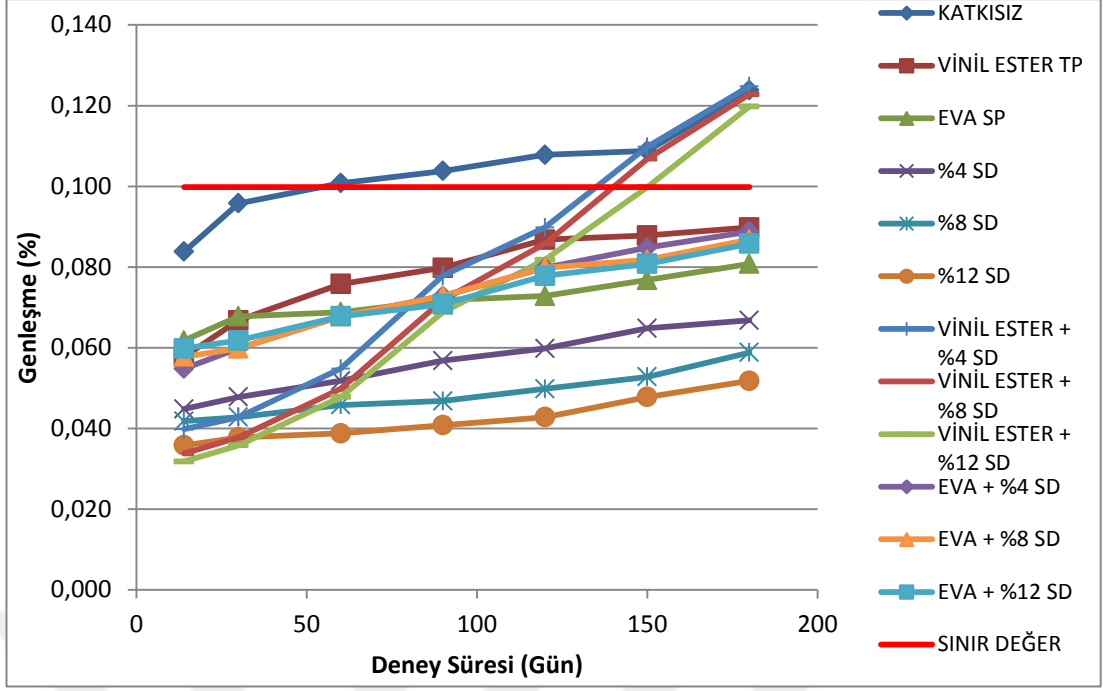
Uzun süreli deney sonuçları incelendiğinde EVA esaslı sıvı polimer ve EVA esaslı polimerin silis dumanının birlikte kullanıldığı numunelerin genleşmeleri, vinil ester esas maddeli toz polimer ve vinil ester esaslı polimerin silis dumanı ile birlikte kullanıldığı numunelerden daha düşük değerler göstermektedir. Kum agregalı numunelerde olduğu gibi burada da EVA esaslı sıvı polimer, vinil ester esaslı toz polimere göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Ayrıca hem vinil ester esaslı hemde EVA esaslı polimer kullanımında, polimerin yalnız kullanıldığı duruma göre, silis dumanı ile birlikte kullanım durumunda ASR kaynaklı genleşmelerin bir miktar arttığı veya yaklaşık aynı genleşmeler gösterdiği görülmektedir. Kum agregalı numunelerde de karşılaşılan bu durumun yetersiz kür nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Deneylerde kullanılan silis dumanı türü için su ve sıcaklık kür koşulları yeterli gelmediğinden, silis dumanının yeterli puzolonik reaksiyonu tamamlayamadığı ve beklenen iyileştirici etkiyi gösteremediği şeklinde yorumlanmıştır.

Kum agregalı numunelerde olduğu gibi agrega olarak cam kullanımında da karışımlar içinde en az genleşmeleri veren karışımlar silis dumanının tek başına kullanıldığı karışımlardır.

Silis dumanının vinil ester esaslı toz polimer veya EVA esaslı sıvı polimer ile birlikte kullanıldığı numunelerde olduğu gibi, tek başına kullanıldığı numunelerde de karışımın içerisindeki silis dumanı kullanım miktarı arttıkça ASR genleşmeleri azaltmıştır.

Cam agrega kullanılarak hazırlanmış farklı karışımların genleşmeleri ve birbirlerine göre ilişkileri Şekil 5.19'da gösterilmektedir.



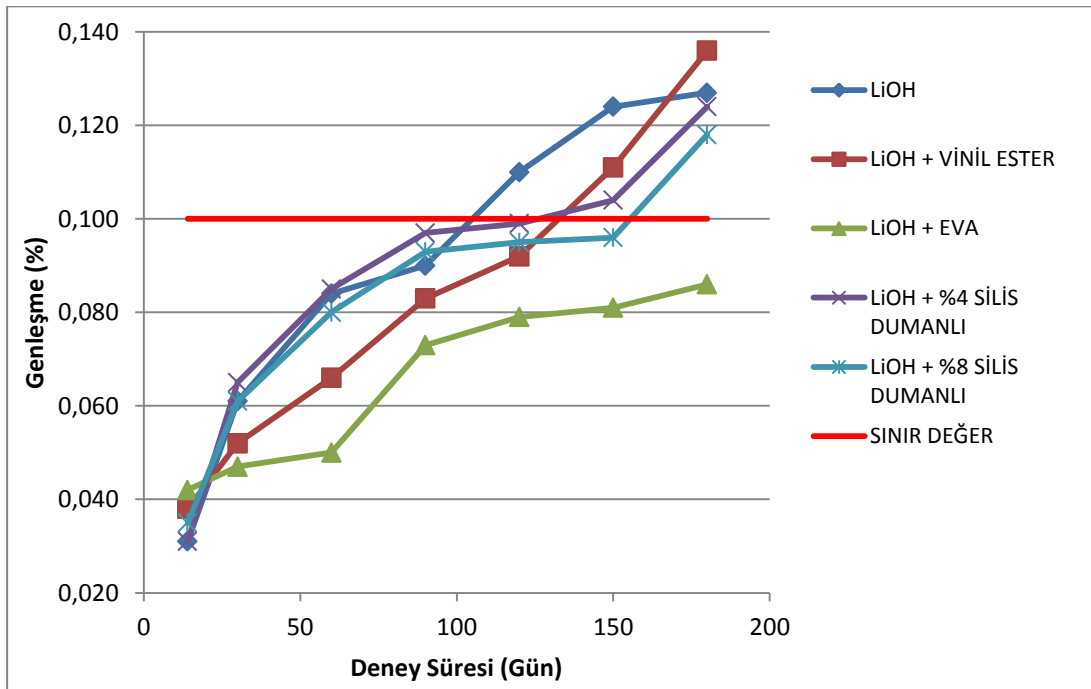
Şekil 5.19 : Cam agregalı numuneler için 6 aylık ASR genleşmeleri (HCD).

Harç çubuğu deneyine tabi tutulan numunelerin tamamında 6 ay sonunda ulaşılan genleşme değerleri, hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçlarına göre daha düşük değerlerde kalmaktadır. Bunun iki nedenden dolayı olabileceği düşünülmektedir. Uzun süreli deney (HCD)'de 6 aydır %100 bağıl nemde tutulan numunelerde kürlenmesi devam etmektedir. Kürlenme (bakım) etkisi ile numuneler iyileştirilmekte ve ASR oluşumlarının azaldığı şeklinde yorumlanmaktadır. Ayrıca 6 aylık harç çubuğu deney süresinin, 14 günlük 80°C ve NaOH etkisi ile denk olmadığı, sürenin uzatılması gerektiği düşünülmektedir.

Lityum hidroksit katkılı numunelerin harç çubuğu deneyi koşulları altında ölçülen genleşmeleri incelendiğinde en büyük genleşme değerlerini verdiği görülmektedir. LiOH katkılı numunelerin ASR genleşmeleri, katkısız kontrol numunelerinin dahi üzerine çıkarak %0,127 değerine ulaşmıştır. Lityumun bu etkisinin “kötümser oran” etkisi sebebiyle olabileceği düşünülmektedir. Bazı araştırmacılara göre lityum kullanılması gereken dozajın altında kullanıldığı durumlarda ASR genleşmelerini artırarak kontrol numunelerinin üzerine çıkarabilmektedir. Lityumun bu etkisinden “kötümser oran” olarak bahsedilmektedir. Çizelge 5.12 LiOH ve çeşitli katkıların birlikte kullanıldığı cam agregalı numunelerin ASR genleşme değerlerini göstermektedir. Şekil 5.20’de LiOH katkılı numunelerin genleşme değerlerinin grafiksel gösterimi yer almaktadır.

Çizelge 5.12 : Lityum hidroksit katkılı cam agregalı numuneler için 6 aylık ASR genleşmeleri (HCD).

CAM AGREGALI KARIŞIMLAR	14 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	30 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	60 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	90 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	120 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	150 GÜNLÜK GENLEŞME (%)	180 GÜNLÜK GENLEŞME (%)
LiOH	0,031	0,061	0,084	0,090	0,110	0,124	0,127
LiOH + VİNİL ESTER	0,038	0,052	0,066	0,083	0,092	0,111	0,136
LiOH + EVA	0,042	0,047	0,050	0,073	0,079	0,081	0,086
LiOH + %4 SİLİS DUMANLI	0,031	0,065	0,085	0,097	0,099	0,104	0,124
LiOH + %8 SİLİS DUMANLI	0,035	0,061	0,080	0,093	0,095	0,096	0,118

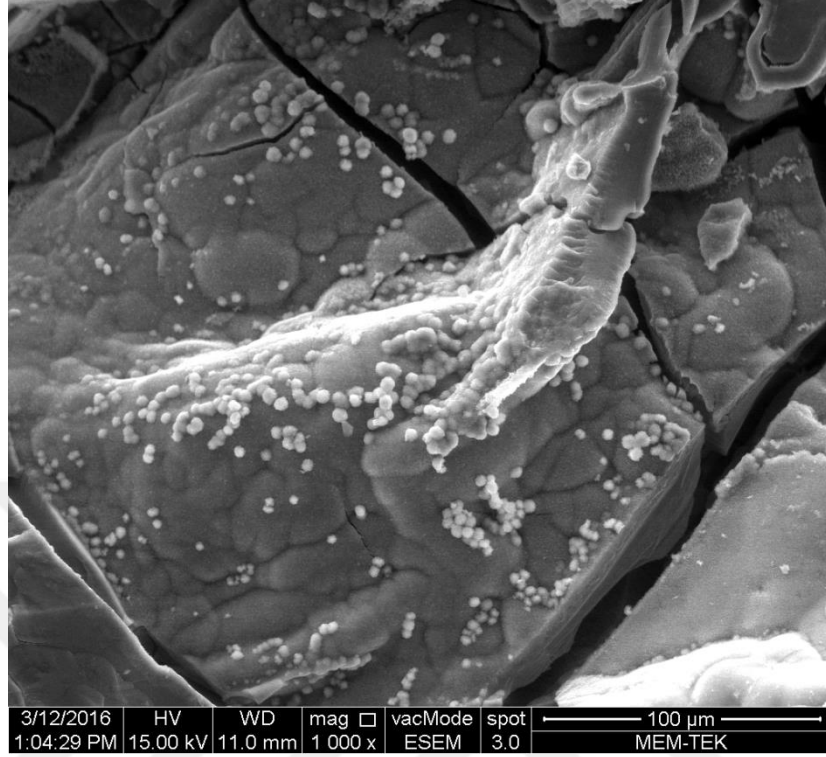


Şekil 5.20 : Lityum hidroksit katkılı cam agregalı numuneler için 6 aylık ASR genleşmeleri (HCD).

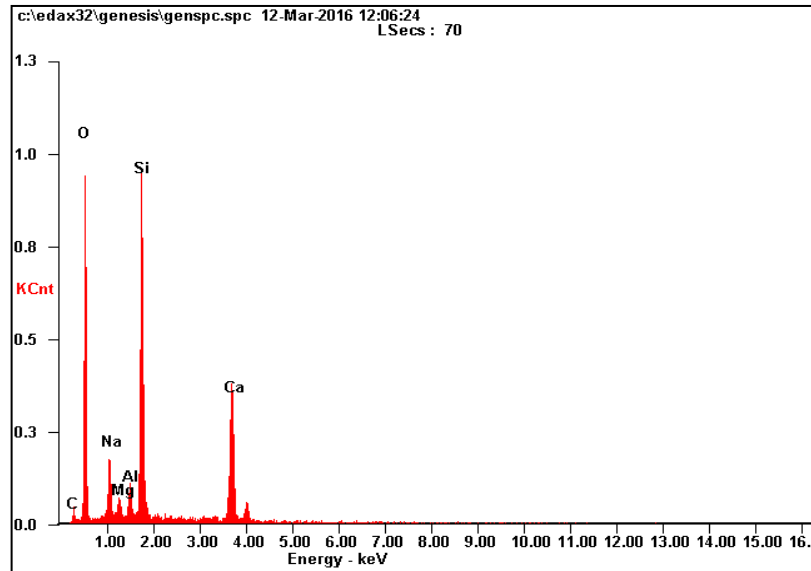
5.4 Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi gerçekleştirilen numunelerin ESEM (elektron tarayıcı mikroskopu) ile incelemeleri ve EDS analizleri bu bölümde yer almaktadır. Şekil 5.21’de yetersiz kür nedeniyle puzolonik reaksiyonunu tamamlayamadığı düşünüldükçe, tepkimeye girmeden kalan silis dumanları görülmektedir. Şekil 5.22 bu görüntüden alınan EDS analizini göstermektedir. Aynı numuneden elde edilen şekil 5.23, 5.24 ve 5.25’te cam agrega ile çimento hamuru arayüzey bölgesinde oluşan

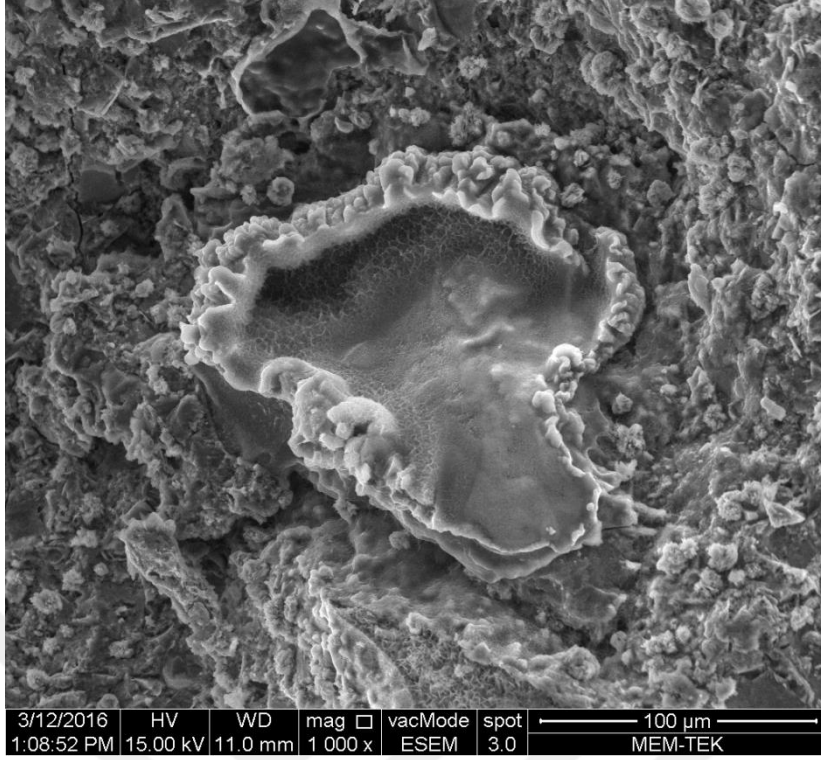
ASR jelleri görülmektedir. Şekil 5.26’da altıgen şeklinde CH kristallerinin varlığı görülmektedir.



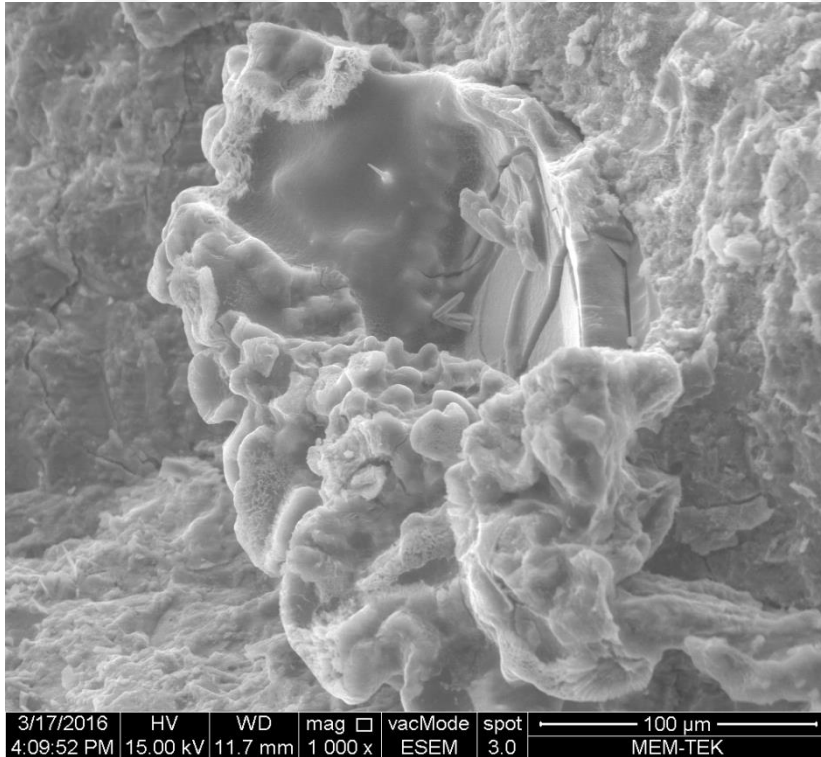
Şekil 5.21 : Tepkimeye girmeden kalan silis dumana tanelerinin ESEM görüntüsü.



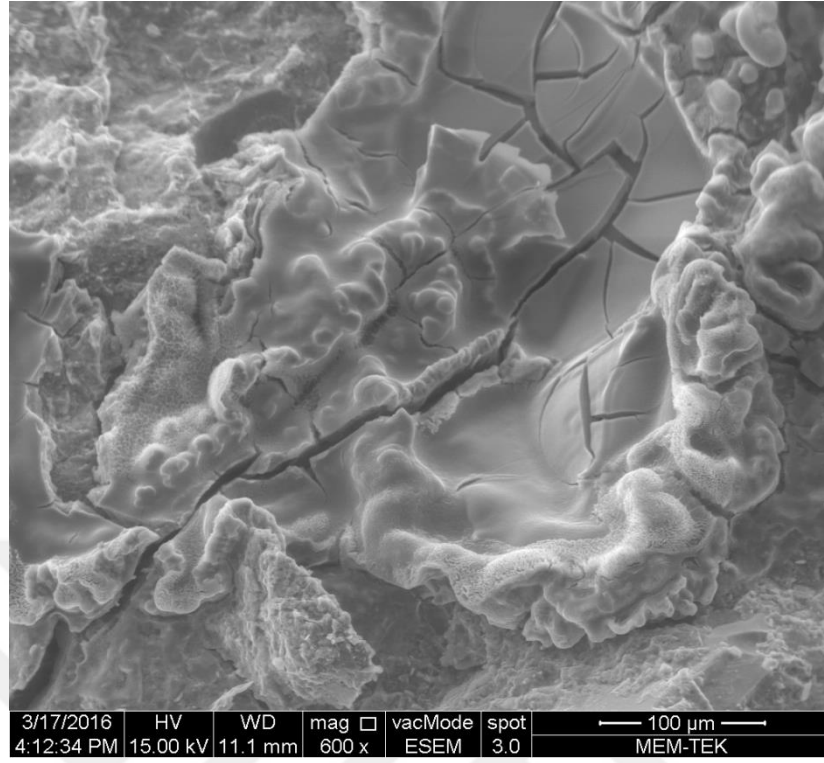
Şekil 5.22 : Tepkimeye girmeden kalan silis dumana tanelerinin EDS analizi.



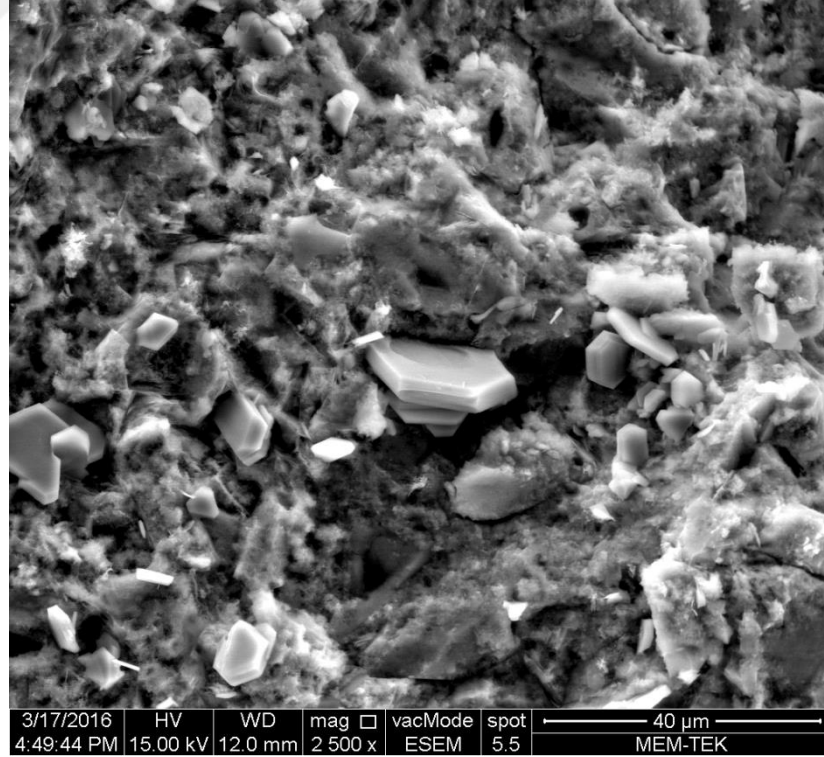
Şekil 5.23 : Cam agregası etrafında oluştuğu düşünülen ASR jelleri ESEM görüntüsü-
1.



Şekil 5.24 : Cam agregası etrafında oluştuğu düşünülen ASR jelleri ESEM görüntüsü-
2.

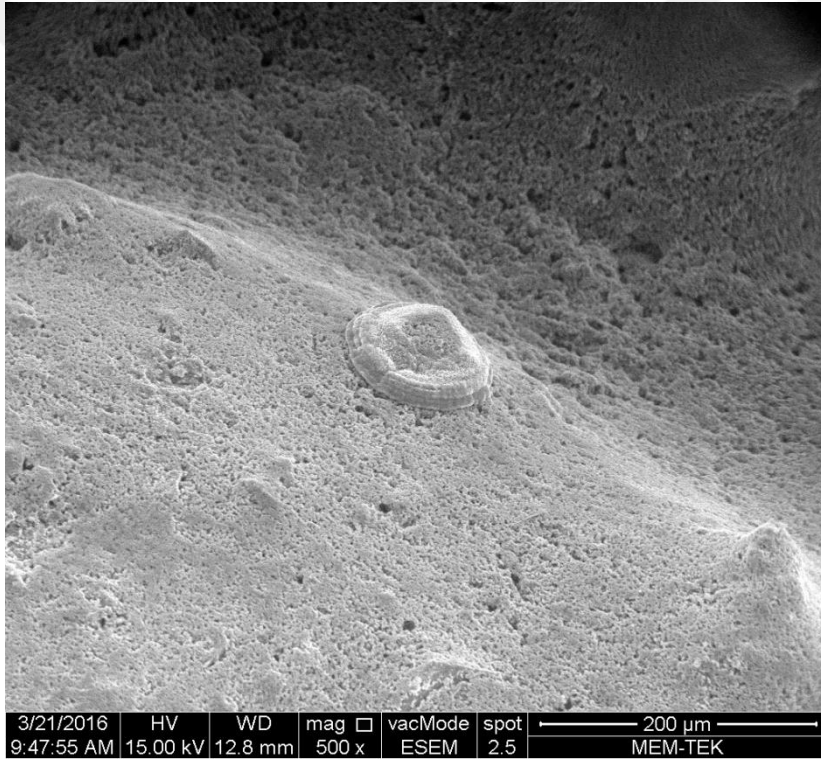


Şekil 5.25 : Parçalanmış cam agrega ve etrafında oluşan ASR ürünü jeller.



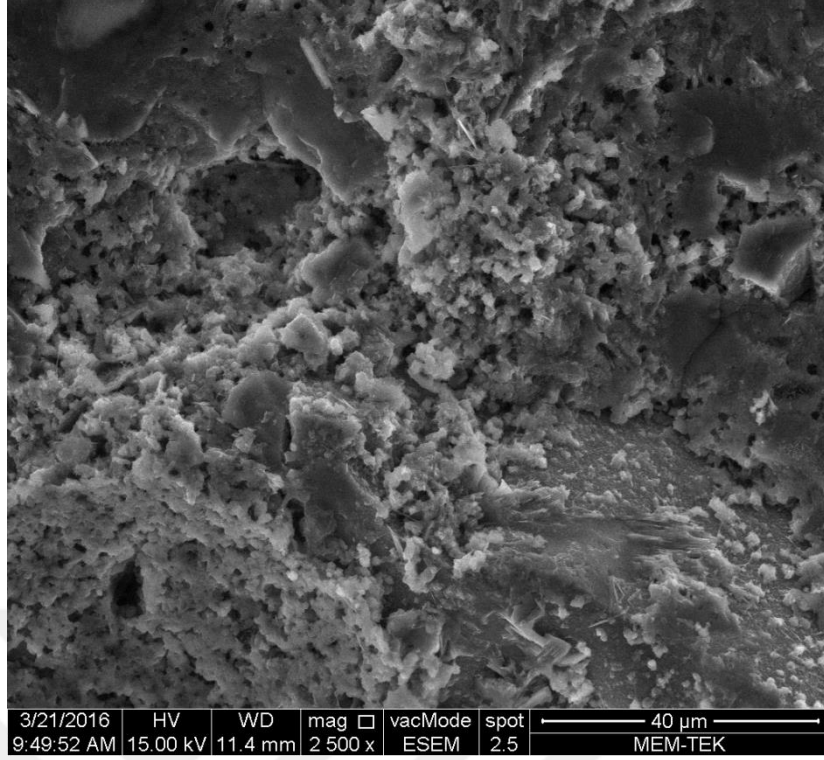
Şekil 5.26 : Altıgen CH kristalleri varlığı.

Vinil ester esaslı toz polimer ile silis dumanının birlikte kullanıldığı numuneler ASR genleşmeleri bakımından cam agregalı setler arasında minimum dayanım değerlerini veren numunelerdir. Ayrıca kum ve cam agregalı numunelerin hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonrasında ulaşılan eğilme ve basınç dayanım değerleri incelendiğinde cam agregalı numunelerin kumlu numunelerin dayanım değerlerine göre bir miktar daha fazla çıkması; bu setlerde az miktarda oluşan ASR jelinin arayüzeydeki olumlu etkisi nedeniyle olabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Vinil ester esaslı toz polimer ve %12 silis dumanı içeren numunelerdeki dolu yapı şekil 5.27, 5.28, 5.29, 5.30'daki ESEM görüntülerinde yer almaktadır. Polimer kullanımı ile arayüzeyin güçlendirilerek daha dolu bir numune elde edildiği görüntülerden anlaşılmaktadır.

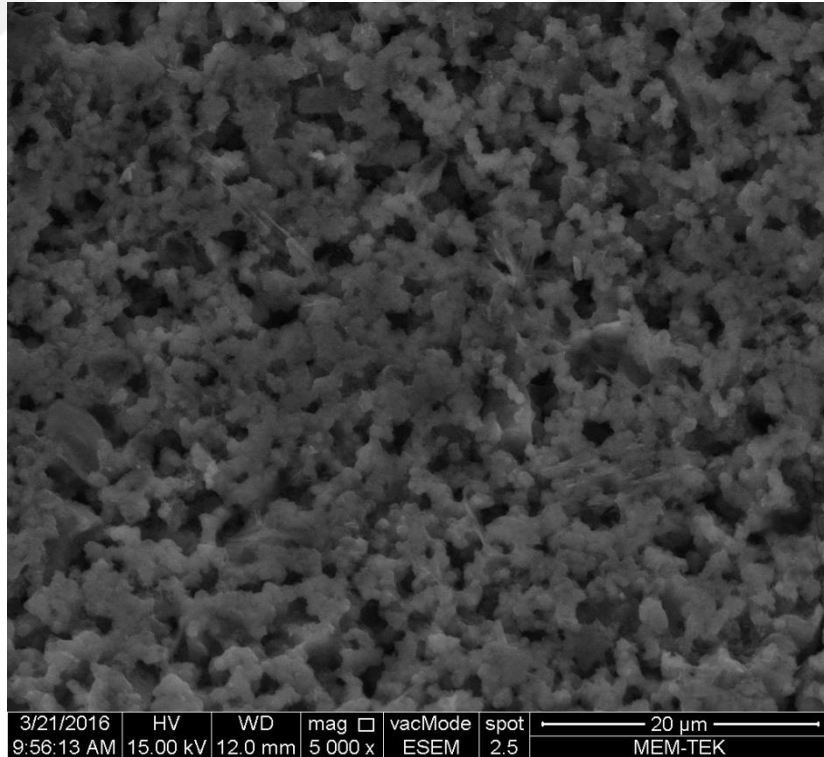


Şekil 5.27 : Vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanı kullanılan numunenin ESEM görüntüleri -1.

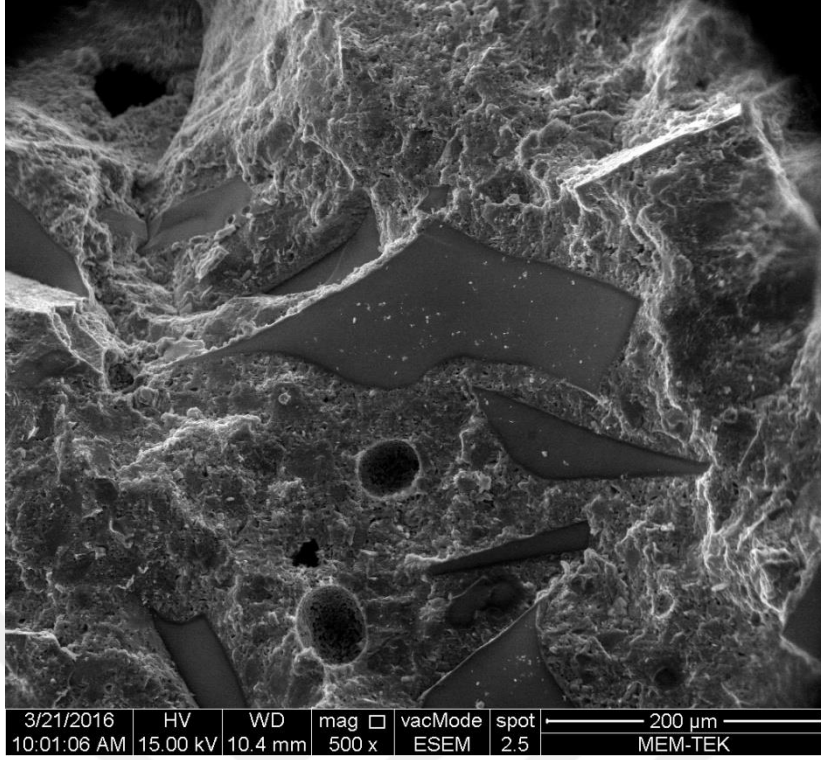
Görüntüler 500 kat, 2500, 5000 kat büyütülmüş görüntülerdir. Şekil 5.31 EVA esaslı sıvı formlu polimer ve silis dumanının birlikte kullanıldığı numuneden elde edilen görüntüdür.



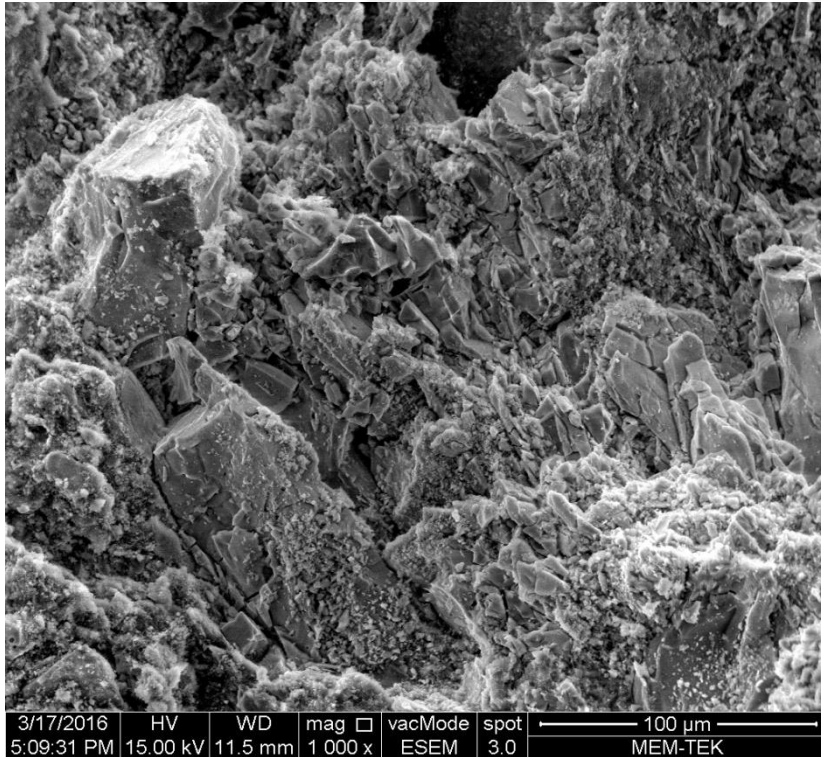
Şekil 5.28 : Vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanı kullanılan numunenin ESEM görüntüleri -2.



Şekil 5.29 : Vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanı kullanılan numunenin ESEM görüntüleri -3.

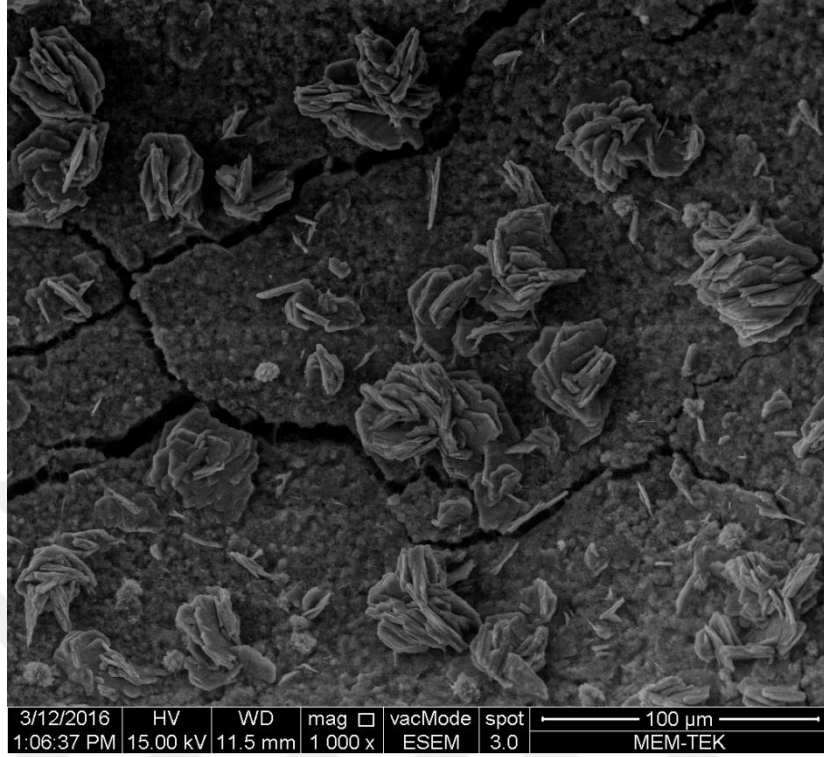


Şekil 5.30 : Vinil ester esaslı toz polimer ve silis dumanı kullanılan numunenin ESEM görüntüleri -4.

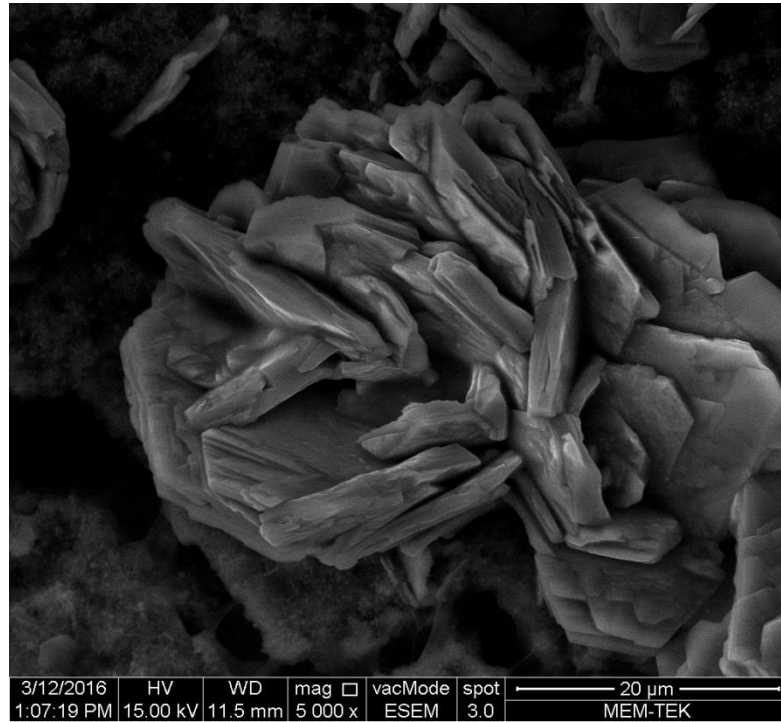


Şekil 5.31 : EVA esaslı sıvı polimer ve silis dumanı kullanılan numunenin ESEM görüntüleri.

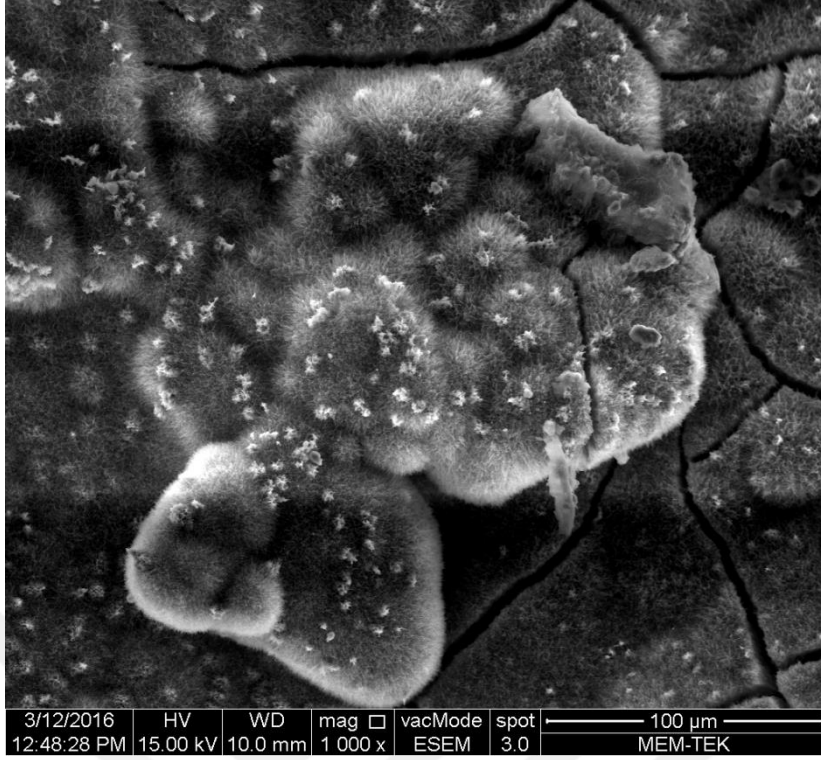
Gülsü yapı şeklinde oluşan tipik ASR ürünü ve farklı numunelerden elde edilmiş çeşitli ASR ürünleri görüntüleri şekil 5.32, 5.33, 5.34, 5.35, 5.36'da verilmektedir.



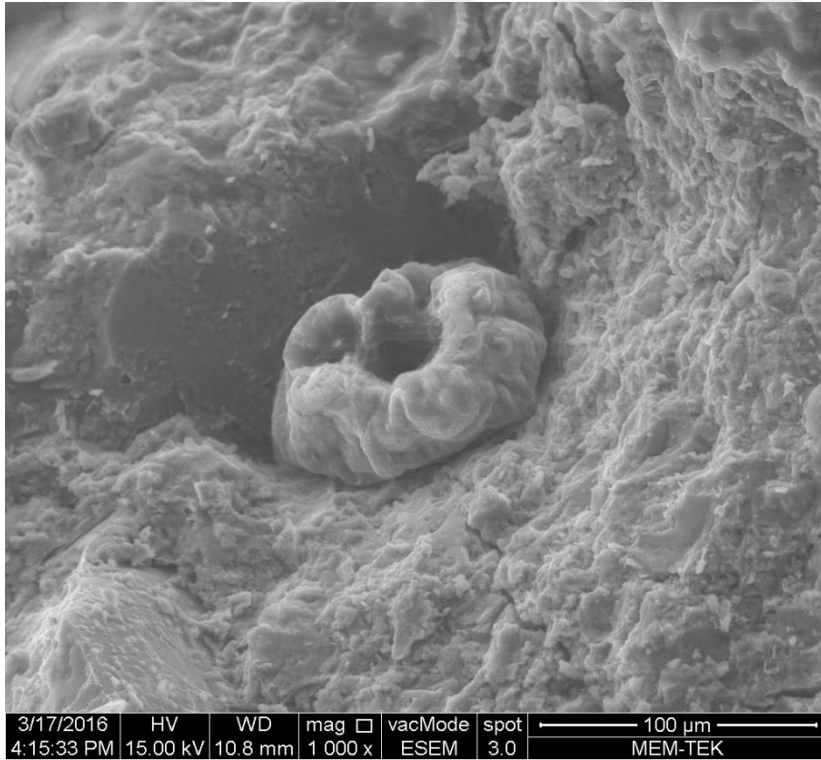
Şekil 5.32 : Gülsü yapı ASR ürünleri -1.



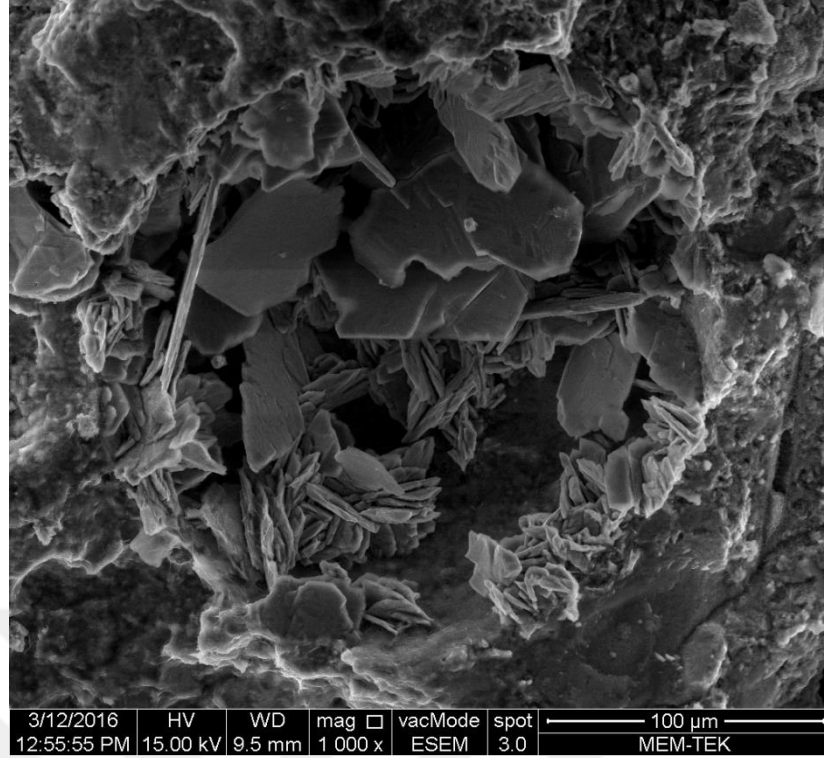
Şekil 5.33 : Gülsü yapı ASR ürünleri -2.



Şekil 5.34 : Gülsü yapılı ASR ürünleri -3.

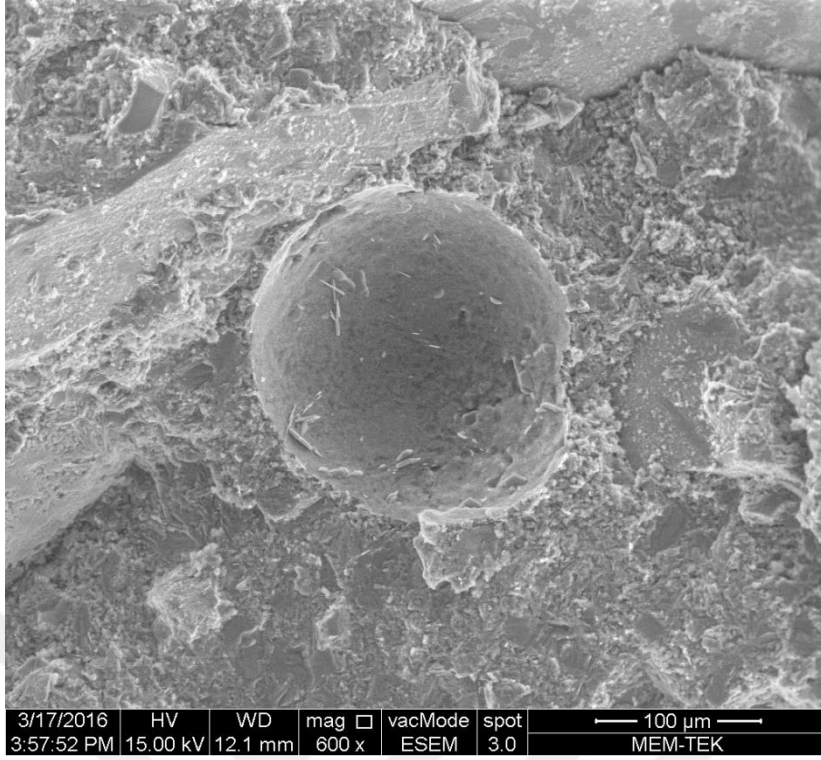


Şekil 5.35 : Gülsü yapılı ASR ürünleri -4.

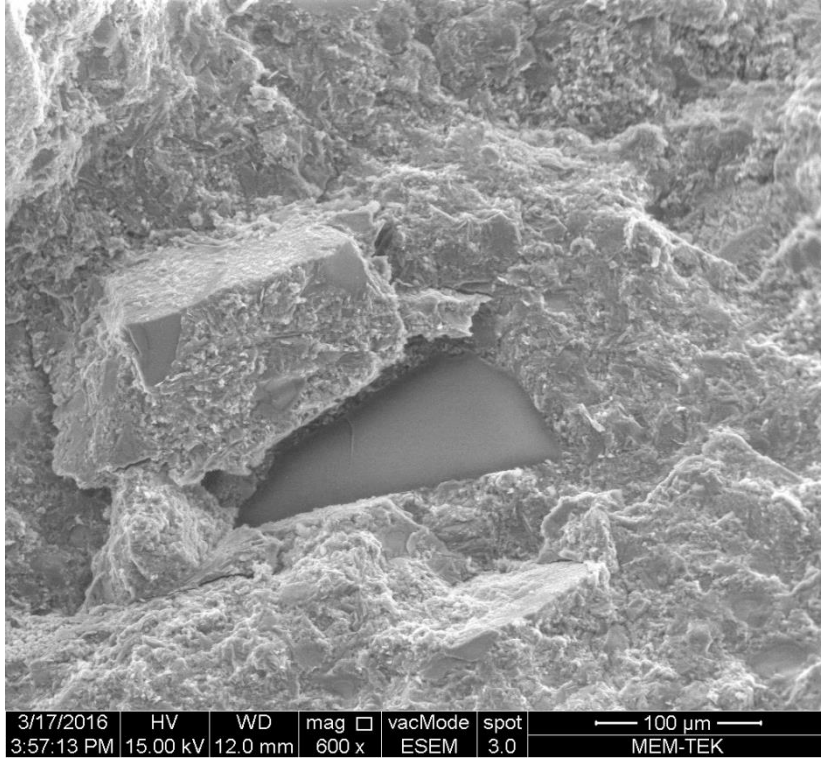


Şekil 5.36 : Gülsü yapılı ASR ürünleri -5.

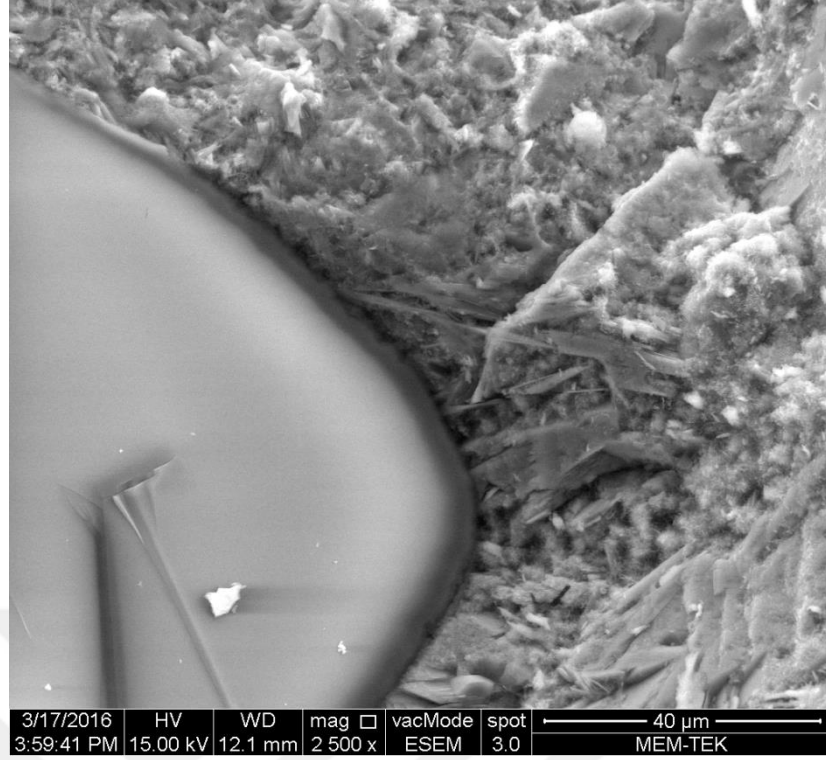
Hızlandırılmış harç çubuğu deneyine maruz kalan setlerden lityum hidroksit kullanılan numuneler, katkısız kontrol numunelerine göre çok düşük genleşmeler göstermiştir. Önceki yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda da Sakaguchi (1989) lityum ve pireks camı kullanarak gerçekleştirdiği çalışmalarda arayerde ASR jeline rastlanmadığını, bunun yerine agrega taneleri üzerinde şişmeyen ve çözünmeyen bir çeşit lityum silikata rastlandığını SEM görüntüleri ile ortaya koymuştur. Mo vd. 2003'te yaptığı çalışmada lityum kullanıldığı durumda oluşan ASR ürününün kristal yapıda ve genleşmeyen tipte olduğunu belirtmiştir. Kawamura ve Fuma (2003) çalışmasında lityumun gerekli dozajın altında kullanıldığında, ASR genleşmelerinin yüksek miktarda oluştuğunu ve tipik ASR jelinin varlığının görüldüğünü söylemiştir. Gerekli dozajın üzerinde lityum kullanımında ise ASR jeli oluşmadığını öne sürmüştür. Tez kapsamında cam agrega ile hazırlanan lityum hidroksit katkılı numuneler üzerinde gerçekleştirilen ESEM görüntülerinden elde edilen fotoğraflar şekil 5.37, 5.38, 5.39, 5.40'da verilmektedir. Arayüzde genleşen ASR jeline rastlanmamıştır. Diğer numunelerden farklı olarak agrega üzerinde yapılaşmanın olduğu yorumlanmıştır.



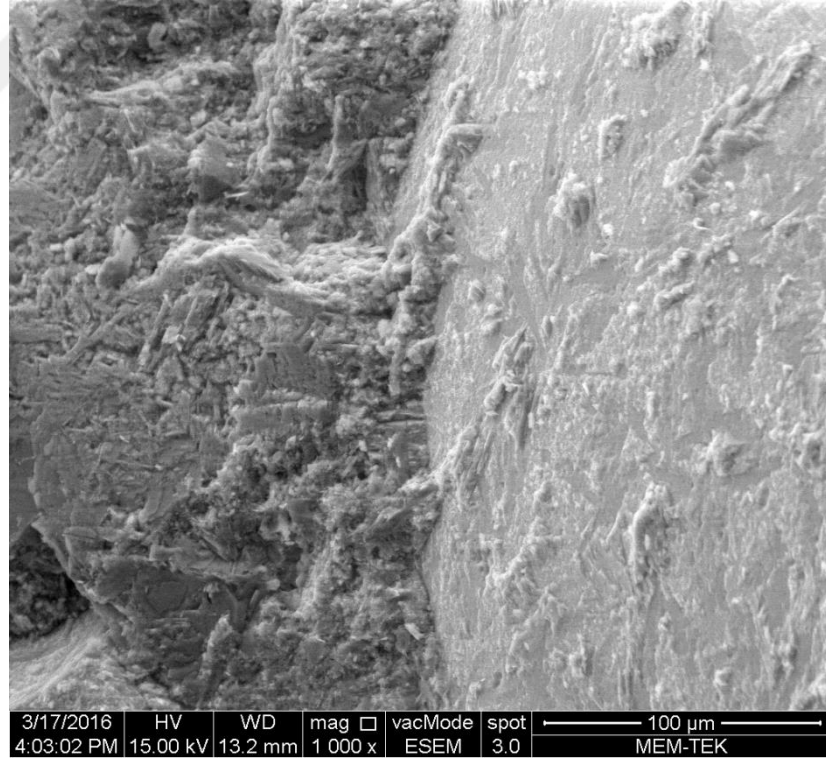
Şekil 5.37 : LiOH katkılı numunelerin ESEM görüntüleri -1.



Şekil 5.38 : LiOH katkılı numunelerin ESEM görüntüleri -2.



Şekil 5.39 : LiOH katkılı numunelerin ESEM görüntüleri -3.



Şekil 5.40 : LiOH katkılı numunelerin ESEM görüntüleri -4.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında kullanılan malzemeler ve uygulanan deneylerden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Uzun süreli (ASTM C227) deney koşulları altında cam ve kum agregalı numunelerin tümünde 6 ay sonunda ulaşılan ASR genleşmeleri, kısa süreli (ASTM C1260) deney koşullarında elde edilen genleşmelere göre daha düşük genleşmeler göstermektedir. Bunun nedeni olarak %100 bağıl nemde 6 ay boyunca kürlenmeye devam edilmesi kürün (bakım) olumlu etkisinin ASR'yi azaltıcı yönde rol oynadığı söylenebilir. Ayrıca 6 aylık süre, hızlandırılmış harç çubuğu deney koşullarının etkisine ulaşmak için yeterli bulunmamıştır. Uzun süreli deney sonuçlarının hızlandırılmış deneylerle karşılaştırılabilmesi için 1 yıllık ölçüm sonuçları değerlendirilmelidir.
2. Kısa süreli ve uzun süreli deney şartlarının ikisinde de cam agregalı numunelerin ASR genleşmeleri kumlu numunelere göre daha yüksek değerlerde çıkmıştır. Bunun nedeni olarak camın içerisinde bulunan %78,45 oranında bulunan reaktif silis gösterilebilir.
3. Hızlandırılmış harç çubuğu deneylerinde sınır değer olan %0,1'in üzerinde genleşme elde edilmesi nedeniyle deneylerde kontrol amacıyla kullanılan kumun reaktif olduğu söylenebilir.
4. Polimer, kullanılan numunelerde arayüzeyi iyileştirerek dayanım değerlerine olumlu etki etmiştir.
5. Karışımlarda kullanılan silis dumanı miktarı arttırıldıkça beklendiği üzere, genleşmeler azalmış, eğilme ve basınç dayanım değerlerinde artış görülmüştür.
6. Hızlandırılmış ASR deneyi öncesi numunelerdeki dayanım değerlerinde silis dumanının beklenen iyileştirici etkiyi göstermediği durumlarda yetersiz kür nedeniyle yeterli puzolonik reaksiyonu tamamlayamadığı düşünülmüştür. Bu numunelerden elde edilen ESEM görüntülerinde de reaksiyona girmeden kalmış silis dumanı tanelerine rastlanmıştır.

7. Tüm setlerde cam agregalı numunelerin basınç ve eğilme dayanımları, kumlu numunelere göre daha düşük değerlerdedir. Bu durumun nedeninin cam agreganın hamur ile arayüzey bölgesinin zayıflığından olduğu düşünülmektedir. Eğilme deneyinde ikiye ayrılan numunenin enkesiti incelendiğinde kırılmanın cam agregası etrafından gerçekleştiği görülmektedir.
8. %12 silis dumanı, polimer ve silis dumanı ilaveli bazı numunelerde hızlandırılmış deney öncesi dayanımlara göre, deney sonrasında ölçülen dayanımlar artmıştır. Bunun nedeni silis dumanının ASR'nin olumsuz etkilerini ortadan kaldırdığı ve aynı zamanda 80°C'de 15 gün boyunca tutulan numunelerde kür etkisinin oluşabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Lityum hidroksit katkılı numunelerin tamamında da aynı durumla karşılaşmıştır.
9. Lityum hidroksit kullanımı hızlandırılmış harç çubuğu deneyi koşullarında en olumlu etkiyi göstererek ASR kaynaklı genleşmeleri büyük oranda azaltmıştır. Uzun süreli deney koşullarında ise tam tersi etki göstererek, genleşmeleri kontrol numunelerinin dahi üzerine çıkarmıştır. Bu etkinin lityumun "kötümser oran" özelliğinden kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir. İlave deneylerle lityum hidroksit etkinliği araştırılmaya devam edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Andiç, Ö.Ç.**(2002). Alkali-silis reaksiyonunun mineral ve kimyasal katkıyardımı ile kontrol altına alınması, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisanstezi, 90s.
- Andiç, Ö.Ç.** (2007). Alkali-Agrega Reaktivitesinin Tespitinde Kullanılan Deney Metotlarının İncelenmesi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 255s.
- Berube, M.A., Tremblay, C., Fournier, B., Thomas, M.D., Stokes, D.B.**(2004). Influence of lithium-based products proposed for counteracting ASR on the chemistry of pore solution and cement hydrates, *Cement and Concrete Research* 34;1645- 1660
- Crucq, P.** 2005, Development of a method to measure the mechanical behavior of ASR gels, Part I: Literature study; alkali-silica reaction, causes, effects and prevention. *Microlab civil engineering and geosciences, Delft*, 55p.
- Dent-Glasser, L.S., Kataoka N.** (1981). The chemistry of alkali-aggregate reactions. *Proceeding of the Fifth International conference on Alkali-Silica Reaction, S252/23*, 66p.
- Diamond, S., Barneyback, R.S Jr, Struble, L.J.** (1981). On the physics and chemistry of alkali silica reactions, 1-11, *Proceedings of the Fifth Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, S252/22*, 66 p.
- Du, H., Tan, K.H.** (2013). Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali-silica reaction and mitigation methods, *Cement & Concrete Composites* 35, 118–126
- Farny, J.A., Kosmatka, S.H.** (1997) Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete, *Concrete Information, Portland Cement Association*, 23
- Feiteira, J., Ribeiro, M.S.** (2013). Polymer action on alkali-silica reaction in cement mortar. *Cement and Concrete Research* 44, 97–105
- 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 (1987), 509 p.
- Fournier, B., Berube, M.A., Bergeron, G.** (1991). A rapid autoclave mortar bar method to determine the potential alkali silica reactivity of St. Lawrence Lowlands carbonate aggregates (Quebec, Canada), *Cement, Concrete and Aggregates*, V.13, No.1: 58-71.
- Franz, J., Olivier, C., Kefei, L., and Larive, C.** (2000). Thermo – chemo – mechanics of ASR expansion in concrete structures, *Journal of Eng. Mechanics / March*, 2000/233.

- Gao, X., Multon, S., Cyr, M., Sellier, A.** (2013). Alkali–silica reaction (ASR) expansion: Pessimism effect versus scale effect. *Cement and Concrete Research* 44, 25–33
- Gibergues A.C., Cyr M., Moisson M., Ringot E.** (2008). A simple way to mitigate alkali-silica reaction. *Materials and Structures*, 41:73–83 DOI 10.1617/s11527-006 9220-y
- Glasser, F. P.** (1992). Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction, 30-53, *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, R. N. Swamy (ed), Van Nostrand Reinhold, New York, 333 p.
- Grattan-Bellew, P.E., Cybanski, G, Fournier, B., Mitchell, L.** (2003). Proposed universal accelerated test for alkali-aggregate reaction the concrete microbar test, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 25, No.2: 29-34.
- Grosbois, M., Fontaine E.**(2000) Evaluation of the potential alkali-reactivity of concrete aggregates: performance of testing methods and a producer’s point of view, 267-276, *Proc. 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Quebec, 1406 p.
- Helmuth, R., Stark,D.**(1992) Alkali-silica reactivity mechanisms, 131-208, F. Skalny (Ed.), *Materials Science of Concrete III*, The American Ceramic Society, Westerville, OH, 362 p.
- Hobbs, D.W., Gutteridge, W.A.**(1979) Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali silica reaction, *Magazine of Concrete Research*, 31 (109): 235-242.
- Hobbs, D.W.** (1988). *Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Thomas Telford, London, 183
- Hooton, R.,D., Rogers, C.A.** (1988) Evaluation of rapid test methods for detecting alkali reactive aggregates, 439-444, *Proc. of the 8th International Conference on Alkali Aggregate Reaction*, 886
- K. Ramyar, A. Topal, O . Andic** (2005). Effects of aggregate size and angularity on alkali–silica reaction. *Cement and Concrete Research* 35, 2165 – 2169
- Katayama, T., Tagami, M., Sarai, Y., Izumi, S., Hira, T.** (2004). Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, *Materials Characterization* 53, 105– 122
- Kawamura, K. Takomoto, S. Hasaba,** (1983) Application of quantitativeEDXA analysis and microhardness measurements to the study of alkalisilicareaction mechanisms, *Proc. 6th International Conference on Alkali inConcrete*, Danish Concrete Association, Idorn, G.M., Rostom, S. (Eds.),Copenhagen, 167-174.
- Kawamura, M., Fuwa, H.** (2003). Effects of lithium salts on ASR gel composition and expansion of mortars. *Cement and Concrete Research* 33, 913–919
- Kozlova, S., Millrath, K.** (2003). A suggested screening test for ASR in cementbound composites containing glass aggregate based on autoclaving, *Cement & Concrete Composites* 26 (2004) 827–835.

- Lam, C.S., Poon, C.S. and Chan, D.** (2007). Enhancing the Performance of Pre-cast Concrete Blocks by Incorporating Waste Glass – ASR Consideration, *Cement and Concrete Composites*, 29, 616-625p.
- Lee, G., Ling, T-C., Wong, Y-L., Poon, C-S.** (2011). Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks. *Construction and Building Materials* 25, 2611–2618
- Locher, F.W.** (1973). “Ursache und wirkungsweise der alkalireaktion”, in ”Vorbeugende massnahme gegen alkalireaktion im beton”, VDZ, Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 40.
- Lumley, J.S.**(1997). Asr Suppression By Lithium Compounds. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 235-244
- Mehta, P.K, Monteiro, P.J.M.** (1993). *Concrete microstructure, properties and materials*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 659 p.
- Meyer, C., Egosi, N. and Andela, C.** (2001). Concrete with Waste Glass as Aggregate in “Recycling and Re-use of Glass Cullet”, Dhir, Dyer and Limbachiya, editors, *Proceedings of the International Symposium Concrete Technology Unit of ASCE and University of Dundee*, 179-188p.
- Mielenz, R.C., Green K.T, Benton E.J** (1947) Chemical test for the reactivity of aggregate with cement alkalis: chemical processes in cement aggregate reaction, *Proc. American Concrete Institute*, 44: 193-224.
- M.U.K. Afridi, Y. Ohama, K. Demura, M.Z. Iqbal** (2003). Development of polymer films by the coalescence of polymer particles in powdered and aqueous polymer-modified mortars, *Cem. Concr. Res.* 33, 1715–1721.
- Oberholster, R.E.**(1983). Alkali reactivity of silicious rock aggregates:Diagnosis of the reaction, testing of cement and aggregate and prescription of preventive measures. *Proceeding of the 6th International Conference on Alkalies in Concrete - Research and Practice*. Technical University of Denmark, Copenhagen. 419-433.
- Ozol,** (1975) The pessimum proportion as a reference point in modulating alkali-silica reaction, *Proc. Symposium on Alkali-Aggregate Reaction, Preventive Measures*, pp 113-130.
- Palmer, D.** (1988). *The Diagnosis of Alkali-Silica Reaction, Report of a Working Party*, British Cement Association, 44p.
- Park, S.B., Lee, B.C., Kim, J.H.** (2004). Studies on Mechanical Properties of Concrete Containing Waste Glass Aggregate, *Cement and Concrete Research*, 34, 2181-2189p.
- 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, 333p.
- Ramlochan, T., Thomas, M., Gruber K.A.** (2000). The effect of Metakaolin on alkali-silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research*, 30: 339-344.

- Ramyar, K., Topal, A., Andiç, Ö.**(2005) Effects of aggregate size and angularity on alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 35 (11): 2165-2169.
- Saccani, A., Motori, A.** (2001). The effect of polymer addition on alkali silica reactions in cementitious mortars. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 34, July 2001, pp 373-377
- Serpa, D., Silva A.S., Brito, J., Pontes, J., Soares D.**(2013). ASR of mortars containing glass. *Construction and Building Materials* 47, 489–495
- Seung-Bum P, Bong-Chun L** (2004). Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers. *Cement and Concrete Research* 34, 1145–1152
- Shayan, A., Ivanusec, I., Diggins, R.**(1994) Suitability of two rapid test methods for determining the alkali reactivity of sands, *Cement and Concrete Composites*, 16: 177-188.
- Sidney D.**(1999). Unique response of LiNO_3 as an alkali silica reaction-preventive admixture. *Cement and Concrete Research* 29,1271-1275
- Stanton, Thomas E.**(1940). Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate. *Proceedings, American Society of Civil Engineers*, Vol. 66, New York, 1940, pages 1781-1811.
- Stark, David C.** (1981). *Alkali-Silica Reactivity: Some Reconsiderations*, Research Department Bulletin RD076, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.
- Stark, D.**(1991). The moisture condition of field concrete exhibiting ASR reactivity, 973-987, *CANMET/ACI Second International Conference on Durability of Concrete*, SP-126, American Concrete Institute, Detroit, 1361 p.
- Stark, David C.** (1992). *Lithium Salt Admixture An Alternative Method to Prevent Expansive Alkali-Silica Reactivity*. *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, The Concrete Society, London.
- Swamy, R.N., Al-Asali, M.M.**(1988). Engineering properties of concrete affected by alkali silica reaction, *ACI Materials Journal*, Vol. 85: 367-374.
- Swamy, R.N.** (1992). *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, R. N, 336
- Taha B., Nounu G.** (2008). Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors. *Cement & Concrete Composites* 30, 497–505
- Thomas, M.D.A., Innis, F.A.** (1999). Use of the accelerated mortar bar test for evaluating the efficiency of mineral admixtures for controlling expansion due to alkali-silica reaction, *Cement, Concrete and Aggregates*, CCAGDP, Vol.21, No.2: 157-164
- Thomas,M.**(2011). The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review, *Cement and Concrete Research* 41;1224–1231
- Topçu, İ.B.,Canbaz, M.** (2004). Properties of Concrete Containing Waste Glass, *Cement and Concrete Research*, 34, 267-274p.

- Vivian, H.E.** (1950). Studies in cement aggregate reaction, Bulletin No.256, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia, Melbourne, Part X: 13-20.
- Vivian, H.E.**(1951) Studies in cement aggregate reaction. XVI. The Effect of hydroxyl ions on the reaction of opal, Australian Journal of Applied Sciences, 2: 108-113.
- Wigum, B.J., French, W.J.**(1996) Sequential examination of slowly expanding alkali-reactive aggregates in accelerated mortar bar testing, Magazine of Concrete Research, Vol 48 (4): 281-292.
- X. Feng, M.D.A. Thomas, T.W. Bremner, B.J. Balcom, K.J. Folliard** (2005). Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review. Cement and Concrete Research 35, 1789–1796
- Xu, Z., Lan, X., Deng, M., Tang, M.**(2000). A new accelerated method for determining the potential alkali-carbonate reactivity, Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Proc. 11th International Conference, Quebec, QC, Canada, 129-138.
- Yuksel C., Ahari R.S, Ahari B.A., Ramyar K.** (2013). Evaluation of three test methods for determining the alkali–silica reactivity of glass aggregate, Cement & Concrete Composites 38, 57–64
- Zhang, C., Wang, A., Tang, M., Wu, B., Zhang, N.**(1999). Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion, Cement and Concrete Research, 29: 1393-1396.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad :Deniz Müyesser
Doğum Tarihi ve Yeri :1988 / İstanbul
E-posta :dmuyesser@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2011, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği