

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**ALKALİ AGREGA REAKSİYONU
PERFORMANS TEST METOTLARININ
GELİŞTİRİLMESİ**

Cihat YÜKSEL

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemesi Doktora Programı

İZMİR
2020



Cihat YÜKSEL tarafından doktora tezi olarak sunulan “Alkali Agrega Reaksiyonu Performans Test Metotlarının Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 25/12/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Raportör Üye : Prof. Dr. Şemsi YAZICI

Üye : Prof. Dr. Halit YAZICI

Üye : Prof. Dr. Kamile TOSUN FELEKOĞLU

Üye : Doç. Dr. Özge ANDİÇ ÇAKIR



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Alkali Agrega Reaksiyonu Performans Test Metotlarının Geliştirilmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

25/12/2020

Cihat YÜKSEL



ÖZET**ALKALİ AGREGA REAKSİYONU PERFORMANS TEST
METOTLARININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEL, Cihat

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Aralık 2020, 231 sayfa

Alkali agrega reaksiyonu (AAR) çimento alkalileri ile reaktif bileşenli agrega tipleri arasında meydana gelerek betonda hasara sebep olan bir reaksiyondur. Bazı durumlarda beton karışım oranlarında yapılan değişikliklerin veya farklı çevre koşullarına maruz kalmasının betonun AAR performansını kötü yönde etkilediği bilinmektedir. Bazen standart testlerde reaktif olmadığı belirlenen agregalar dahi saha betonunda tehlike yaratabilmektedir. Kaynakların etkin kullanımı için potansiyel reaktif agregaların kullanımının yasaklanmasının tek çözüm olmadığı bilinmektedir. Saha genleşmeleri betonun boşluk çözeltilisinin alkalitesi, betonun permeabilitesi, betonda kullanılan malzemelerin tip ve oranları ile çevresel faktörlerden etkilenmektedir. O halde, iyi bir performans deneyi bu faktörlerin tümünü göz önünde bulundurmalıdır.

Bu çalışmanın kapsamında öncelikle sonuçların değişkenliğini incelemek ve laboratuvarın ölçüm güvenilirliğini belirlemek için ulusal ve uluslararası laboratuvarlar ile kontrollü deneyler gerçekleştirilmiştir. Ardından performans deney metotlarının geliştirilmesinde özel agregaların kullanımı (atık cam, hafif agrega), özel beton karışımları (kendiliğinden yerleşen beton, lifli beton) gibi durumlar incelenmiş, çoklu çevre koşulları altındaki AAR performanslarının incelenmesi amacıyla diğer dayanıklılık problemlerinin (donma-çözülme, ıslanma-kuruma gibi) etkisi göz önüne alınmıştır.

Bu çalışma sonucunda yeni geliştirilen çoklu çevre koşullarının etkilerinin incelendiği deney metotlarının, incelenen parametreleri ölçmede güvenilir olduğu ve araştırmalar için umut verici olduğu belirlenmiştir. Ayrıca dünyada mevcut deney yöntemleri arasında performans deney metodu olmaya en büyük aday olan beton prizma deneylerinin metinlerinin sadece normal betonları kapsadığı, özel betonlar

için geliştirilebilecek bazı modifikasyonlarla önemli aşama kaydedileceği düşünülmektedir. Betondaki alkalilerin kaynağının, seviyesinin ve deneyler sırasında dışarıya sızma sıkıntısının sonuç genleşmelere etkisi olduğundan alkali sızıntısı ölçümlerinin deneyler prosedürüne eklenmesi önerilmektedir. Son olarak parlak kesitlerde çatlakların belirli sınıflara ayrılarak sayıldığı DRI (hasar derece indeksi) metodunun ve işbirliği yapılan Delft Teknik niversitesi'nde geliştirilen Delft Lattice programı aracılığıyla yapılan hasar modellemesinin, karışımların reaktivite seviyeleri ile uyum gösterdiği sonucuna varılmıştır. Tez kapsamında kurulan, beton maruziyet sahasından uzun yıllar boyunca veri toplanarak gerçek saha performansı ve hızlandırılmış deney sonuçları arasındaki ilişki tespit edilecektir.

Anahtar sözcükler: Alkali agrega reaksiyonu, beton performans deneyleri, özel betonlar, çoklu ortam koşulları, maruziyet sahası, modelleme

ABSTRACT**IMPROVEMENT OF ALKALI AGGREGATE REACTION
PERFORMANCE TEST METHODS**

YÜKSEL, Cihat

Ph.D. in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

December 2020, 231 pages

Alkali aggregate reaction (AAR) is a reaction between cement alkalis and certain aggregate types with reactive constituents, resulting in concrete damage. It is known that, alteration in concrete mixture proportions or exposure to different environmental actions may adversely affect the AAR performance of concrete. Even some aggregates classified as innocuous by standard test methods may be dangerous in field concrete. For the efficient use of available sources, banning the utilization of reactive aggregates is not a solution. AAR expansion in field concrete is affected by various parameters such as concrete pore solution alkalinity, concrete permeability, type and amount of concrete ingredients, and other environmental factors. Thus, a reliable performance test method should consider all these parameters.

In the scope of this study, comparative tests were applied with different national and international laboratories to measure variability and confirm the measurement reliability of our laboratory. Subsequently, some performance test parameters such as the utilization of special aggregates (waste glass, lightweight aggregate), designing particular concrete types (self-consolidating concrete, fiber-reinforced concrete) were evaluated. Besides, other durability problems (freezing-thawing and wetting-drying) were considered for AAR performance tests to assess the effect of multiple environmental conditions.

As a result of this study, the newly developed performance test methods for evaluating the effect of multiple environmental test conditions were convenient for measuring these parameters and promising for future studies. In addition, among the various test methods available for measuring the AAR expansions, concrete prism tests, as the most promising candidate for performance tests, may also be

modified to evaluate the performance of special concrete types. It was determined that the source of concrete alkalis, the alkalinity of concrete, and alkali leaching during the test period significantly impact resultant expansions; therefore, alkali leaching measurement is suggested to be included in the test procedures. Finally, it was shown that damage rating index (DRI) method for determining the crack damage as an input for Delft Lattice model (developed in collaborator Delft University of Technology) and the resultant model solution was found to be consistent with the measured expansions in this study. The field exposure site founded during this thesis will continue to supply data for years to come to correlate performance test results with field expansions.

Keywords: Alkali aggregate reaction, concrete performance tests, special concretes, multiple environmental effects, exposure site, modelling

ÖNSÖZ

Araştırma konusu olan alkali agreg reaksiyonu, çimento alkalileri ile bazı agreg tipleri arasında meydana gelen ve betonda genleşmelere yol açan bir dayanıklılık problemi olarak tanımlanabilir. AAR'nin bu tanımı, çimento, agreg ve sudan oluşan klasik beton için uygun görülmektedir. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmaların tarihçesi incelendiğinde ilk hedefin her zaman öncelikle reaktivite potansiyeli olan agreganın belirlenmesi ve potansiyel reaktif agregaların kullanımından kaçınılması yolunda olduğu görülmektedir. Oysa günümüzde bu konu ile ilgili uluslararası platformda benimsenen yaklaşımın beton karışımını esas alan bir performans deneyi uygulamak olduğu bilinmektedir. Bunun pek çok sebebi vardır; reaktivite potansiyeli olan bir agreganın belli incelikte öğütüldüğünde ve uygun gradasyonda beton içerisinde kullanıldığında zarar vermek yerine mineral katkı gibi davranarak genleşmeleri azaltabildiği görülmüştür, reaktif olmadığı varsayılan agregaların dış alkaliler, özel beton tasarımları, ortama alkali salıveren agregalar vb. gibi durumlarda reaktif davranış sergileyerek genleşmeleri arttırdığı bilinmektedir.

Tez çalışmasında, klasik betonların yanısıra özel beton tiplerinde ve ek çevresel koşulların (donma-çözülme, ıslanma-kuruma) varlığında oluşabilecek olası alkali agreg reaksiyonu (AAR) genleşmelerinin ölçülmesine yönelik performans deney metotları uygulanmıştır. Ek olarak, mevcut deneylerde yer alan alkali sızıntısı, sıcaklık etkisi vb. parametreler incelenmiş, deney sonuçlarından alınan ölçümler mevcut bilgisayar modelleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

İZMİR

25/12/2020

Cihat YÜKSEL



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇ KAPAK	i
KABUL ONAY SAYFASI	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xix
TABLolar DİZİNİ.....	xxxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam.....	2
2. ALKALİ-AGREGA REAKSİYONU	4
2.1 Reaksiyon Türleri	4
2.1.1 Alkali-silis reaksiyonu.....	4
2.1.2 Alkali-silikat reaksiyonu	5
2.1.3 Alkali-karbonat reaksiyonu	6
2.2 Reaksiyonun Tarihçesi	14
3. ALKALİ-SİLİS REAKSİYONU.....	20

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.1 Reaksiyon Kimyası	20
3.1.1 Reaksiyon mekanizması	28
3.1.2 Jelin oluşumu ve genel özellikleri	31
3.1.3 Genleşme mekanizması	40
3.1.4 Pesimum oran	44
3.2 ASR Kaynaklı Hasarın Oluşumu için Zorunlu Bileşenler	47
3.2.1 Alkaliler	48
3.2.2 Reaktif silis	63
3.2.3 Nem.....	69
3.3 ASR'nin Tespitinde Kullanılan Deney Yöntemleri.....	70
3.3.1 RILEM yaklaşımı	71
3.3.2 ASTM yöntemleri	78
3.3.3 Maruziyet sahalarından alınan ölçümler	79
3.3.4 Deney yöntemleri üzerine genel değerlendirme	82
3.4 Mineral Katkılarla ASR'nin Kontrol Altına Alınması	83
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	88
4.1 Kullanılan Malzemeler	88

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.1.1 Bağlayıcılar.....	88
4.1.2 Agregalar	89
4.1.3 Lifler	96
4.1.4 Kimyasal katkı.....	96
4.2 Yürütülen Çalışmalar ve Uygulanan Deneyler.....	96
4.2.1 Beton prizma deneyleri (AAR-3 ve AAR-4).....	96
4.2.2 Numunelerden sızan alkali miktarının tespiti.....	99
4.2.3 Agregalardan alkali salımının tespiti.....	102
4.2.4 Çoklu çevre koşullarının etkisinin araştırılması	102
4.2.5 Maruziyet sahalarının oluşturulması	105
4.2.6 Modelleme çalışmaları	108
4.3 Deney Programı.....	112
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	113
5.1 Ön Sonuçların Diğer Laboratuvarlarla Karşılaştırılması.....	113
5.2 Farklı Alkali Seviyelerindeki Karışımların AAR Performansı	125
5.2.1 Alkalinitenin çimento ile sağlandığı karışımlar	125
5.2.2 Alkalinitenin NaOH ilavesi ile sağlandığı karışımlar	126

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.2.3 Alkalinitenin uçucu kül ikamesi ile sağlandığı karışımlar.....	127
5.2.4 Agregada reaktivite seviyesindeki değişkenliğin incelenmesi	134
5.3 Özel Agregalar İçeren Betonların AAR Performansı	139
5.3.1 Atık cam agregasının reaktivitesi	139
5.3.2 Hafif agreganın reaktivitesi.....	149
5.4 Özel Betonların AAR Performansı	157
5.4.1 Kendiliğinden yerleşen betonların reaktivitesi	157
5.4.2 Lifli betonların reaktivitesi	164
5.5 Çoklu Çevre Koşullarının Betonların AAR Performansına Etkisi	166
5.5.1 AAR ve donma-çözülme etkilerinin birlikte incelenmesi	167
5.5.2 AAR ve ıslanma-kuruma etkilerinin birlikte incelenmesi	172
5.6 Maruziyet Sahalarından Alınan Ölçümler	177
5.7 Beton Performans Modellerinin Geliştirilmesi.....	181
5.7.1 Hasar derece indeksi (DRI) sayımları.....	181
5.7.2 Latis hazırlanması	187
5.7.3 Çatlak gelişimi	192
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	198

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

KAYNAKLAR DİZİNİ..... 204

TEŞEKKÜR 229

ÖZGEÇMİŞ 231





ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Alkali-karbonat reaksiyonuna yatkın kayaçların dokusuna dair iki ince kesitin mikro görüntüleri (Beyene et al., 2013).	6
Şekil 2.2 Beton numunelerde dolomitsizleşmenin gözlemlendiği ince kesit görüntüleri a) reaksiyon halkasında b) çatlak boyunca c) agregâ üzerinde d) çatlak ağzında (Katayama, 2004).	10
Şekil 2.3 a) Karotun boyuna yönde kesildikten sonraki fotoğrafı. Oklar: İri agregadan başlayan ve beyaz renkli jelle dolu çatlaklar. b) Stereo-mikroskop görüntüsü. Oklar: Reaktif özellikteki koyu gri agregadan başlayan, hamura doğru uzanan ve ASR jeli ile dolu çatlaklar (Beyene et al., 2013).	11
Şekil 2.4 Çatlamış agregadan çimento hamuruna doğru uzanan ASR jelinin BSE görüntüsü ve iki farklı noktada EDS analizi (Beyene et al., 2013).	11
Şekil 2.5 Thomas Stanton ve bir parapet duvarda ASR kaynaklı hasar (Thomas et al., 2013).	14
Şekil 2.6 İzmir’de ASR hasarına uğramış köprü ayakları (Baradan vd., 2010). ..	17
Şekil 2.7 İzmir’de hasar gören köprülerde kullanılan agregaların hızlandırılmış harç çubuğu genleşmeleri (Katayama, 2000).	18
Şekil 2.8 Adnan Menderes Havalimanı pist ve taksi yollarında ASR çatlakları (Andiç-Çakır et al., 2012, Ramyar, 2013).	18
Şekil 2.9 Türkiye’de ASR’ye neden olabilecek agregaların konumları.	19
Şekil 3.1 Portland çimentosu (a) hamuru ve (b) harcında boşluk çözeltisi kompozisyonu (Diamond, 1983; Thomas et al.’dan, 2013).	21

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.2 Çimento alkali içeriği ile boşluk çözeltisinde denge halinde OH ⁻ iyonu konsantrasyonu arasındaki ilişki (Diamond, 1989).	22
Şekil 3.3 Reaktif agrega tipinin boşluk çözeltisi kompozisyonuna etkisi a) reaktif Beltane Opal agregası (Diamond et al., 1981) b) reaktif flint kumu (Thomas,1996) (Thomas et al.'dan, 2013).....	24
Şekil 3.4 Boşluk çözeltisindeki alkali konsantrasyonunun zamanla değişimi (Kim et al., 2015).	25
Şekil 3.5 Zamana bağlı genleşme (a) ve alkali tüketimi (b) davranışlarının karşılaştırılması (Kim et al., 2015).	26
Şekil 3.6 Yüksek basınç ile boşluk çözeltisi elde edilmesi (Plusquellec et al., 2017).	27
Şekil 3.7 Örneğe yerinde su ekleme ile boşluk çözeltisi elde edilmesi (Plusquellec et al., 2017).	28
Şekil 3.8 Örneğe dışarıdan su ekleme ile boşluk çözeltisi elde edilmesi (Plusquellec et al., 2017).....	28
Şekil 3.9 Silisin yapısı (Thomas et al., 2013).	29
Şekil 3.10 Literatürde çeşitli çalışmalarda rastlanan ASR jellerinin kimyasal kompozisyonlarına dair verilerin dağılımı; (a) – (e) grafiklerinde x eksenlerindeki veriler atomik oranlar cinsindendir (Gholizadeh-Vayghan and Rajabipour, 2017).....	34
Şekil 3.11 Konik parça kopması oluşan bölgenin üst yüzeyinde bulunan jelin stereo mikroskop görüntüleri a) beyaz-sarımsı katı ürün (0,6x) b) viskoz ve yarı saydam ürün (1,6x) (Fernandes et al., 2007).	35

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.12 a) Beton yüzeyine sızmış olan düzgün yüzeyli amorf jel ürününün ve b) gül benzeri yassı kristallerin SEM görüntüleri (Fernandes et al., 2007).	36
Şekil 3.13 Betonlarda a) kuvars minerali üzerinde, b) hava boşluğunda yoğun halde, c) lepisphere kristalleri ile kaplanmış ve d) gulsü ASR jellerinin SEM görüntüleri (Gavrilenko et al., 2007).	37
Şekil 3.14 Harç çubuklarında a) gül şeklinde, b) süngersi dokulu, c) iki katmanlı ve d) üçü de yoğun yapıları olan fakat farklı dönemlerde oluşmuş ASR jellerinin SEM görüntüleri (Gavrilenko et al., 2007).	38
Şekil 3.15 ASR jellerinde SiO_2 , CaO ve $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ bileşenlerinin birbirlerine kütlece oranı (siyah daireler-harç çubukları, üçgenler-beton örnekleri (Gavrilenko et al., 2007).	38
Şekil 3.16 ASR jellerinde CaO , Na_2O ve K_2O bileşenlerinin birbirlerine kütlece oranı (siyah daireler-harç çubukları, üçgenler-beton örnekleri (Gavrilenko et al., 2007).	39
Şekil 3.17 Harçlarda şişme davranışının şematik gösterimi (Garcia-Diaz et al., 2006).	42
Şekil 3.18 ASR'den etkilenen andezit için a) reaksiyon halkasının (koyu renkli) yer aldığı kesit b) kalsiyum analizi için elementsel haritalama (Ichikawa and Miura, 2007).	43
Şekil 3.19 Pesimum davranış, su/çimento oranı: 0,4 ve agrega/çimento oranı: 2,75 (Hobbs, 1988).	45
Şekil 3.20 Çört agregasında karşılaşılan pesimum davranış (Bektaş et al., 2004).	47
Şekil 3.21 a) A-G agregalarının b) H-O agregalarının değişken alkali seviyelerinde 1 yıllık genleşmeleri.	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil	Sayfa
Şekil 3.22 Karışımlardan farklı konsantrasyonlardaki çözeltilere salınan alkali miktarları a) toplam bağlayıcı ağırlığının %'si cinsinden b) bağlayıcı fazdaki alkalilerin %'si cinsinden.	53
Şekil 3.23 Yüksek alkalili uçucu külün dört farklı çimentoyla ikamesinin 28. gündeki boşluk çözeltisi kompozisyonuna etkisi (Nixon et al., 1986a). 54	54
Şekil 3.24 Yüksek alkalili uçucu külün dört farklı çimentoyla ikamesinin 365. gündeki boşluk çözeltisi kompozisyonuna etkisi (Nixon et al., 1986a). 54	54
Şekil 3.25 Üç farklı tipte agreganın aşırı doygun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen 28 günlük alkali salımı seviyeleri (Lu et al., 2006b).	56
Şekil 3.26 Üç farklı deney koşulunda alkali içeriğinin genleşmeye olan etkisi (Thomas et al., 2006).	60
Şekil 3.27 CSA A23.2-14A (38°C) beton prizma deneyi uygulanan karışımlarda alkalilerin dağılımı (Rivard et al., 2003).	62
Şekil 3.28 a) Reaktif kuvars (10-60 μm) b) Oldukça reaktif kuvars (<10 μm) (Alaejos and Lanza, 2012).	64
Şekil 3.29 a) Piroksen ve plajiyoklaz fenokristallerinin yaygın olduğu, matrisin volkanik cam ile daha küçük plajiyoklaz, piroksen, olivin ve opal yapılarından oluştuğu andezit, b) Esas olarak kriptokristalin kuvars, opalin silis ve kalsedon ile eser miktarda karbonatlı mineraller içeren ve literatüre göre pesimum davranış gösteren çört, c) Deforme kuvars, plajiyoklaz, biyotit, klorit, serisit ve demir oksit içeren gnays mikro-görüntüleri (RILEM AAR-1.2, 2016).	66
Şekil 3.30 Alkali-reaktivitesi deneyleri için RILEM'in önerdiği akış şeması.	72

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.31 AAR-3'te numuneler için gereken saklama koşulu.....	76
Şekil 3.32 AAR-4'te 60°C sıcaklık ve %100 bağıl nemi sağlayan kabinin şematik gösterimi.	77
Şekil 3.33 ASTM C289 deneyi için reaktiviteyi belirleyen alkalinitede azalma (R _c)-çözünen silis (S _c) grafiği.....	79
Şekil 3.34 a) Texas'ta (Fournier et al., 2009) b) Düsseldorf'ta (Lindgård et al., 2010) kurulmuş olan maruziyet sahalarının genel görüntüsü.....	80
Şekil 3.35 Düsseldorf'ta a) kısmen su içerisinde b) olağan nem koşullarında bekletilen aynı karışıma ait iki örneğin genleşme ve çatlak genişliği değerleri (Lindgård et al., 2010).....	80
Şekil 3.36 İngiltere'deki maruziyet sahasında 18 yıllık 915 mm ayrıtlı küpler a) 550 kg/m ³ portland çimentosuyla b) 450 kg/m ³ portland çimentosu + 150 kg/m ³ uçucu külle (Thomas et al., 2011).....	81
Şekil 3.37 Numune boyutunun genleşmeler üzerindeki etkisi (Thomas et al., 2011).....	82
Şekil 3.38 Mineral katkıların reaktif silisli kireçtaşı içeren beton numunelerin 2 yıllık genleşmesine etkisi (Shehata et al., 1999; Shehata and Thomas, 2002; Bleszynski, 2002; Ramlochan et al., 2000; Thomas and Innis, 1998).....	85
Şekil 3.39 Boşluk çözeltisi kompozisyonu ile bağlayıcı fazın kimyasal kompozisyonu arasındaki ilişki (Thomas, 2011).....	86

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

Şekil 4.1 a) Çekirdek kısmında bronzit, yüzeye yakın kısımlarda hipersten bileşimli fonokristal piroksen yapısı, b) nispeten daha koyu renkli camsı matris ve bu matris içinde dağılmış halde bulunan daha açık renkli plajiyoklaz çubukları, c) ortada fonokristal yapının psödomorfu şeklinde ve alt kısımda damar şeklinde nontronit bazlı smektit yapısı.	90
Şekil 4.2 Bazalt ve atık cam agregalarının gradasyon eğrileri.....	91
Şekil 4.3 a) Bazalt agregası ve b) atık cam agregası ile hazırlanan harçların AAR-2 genleşmeleri.	92
Şekil 4.4 Menderes pomzasına ait X-ışını difraktogramı.	92
Şekil 4.5 Kayseri pomzasına ait X-ışını difraktogramı.	93
Şekil 4.6 İki farklı pomza agregası ile hazırlanan harç örneklerinin zaman içerisindeki AAR-2 genleşmeleri.	94
Şekil 4.7 Pomza agregalarının gradasyon eğrileri.	94
Şekil 4.8 Deney numunelerinin a) AAR-3 deneyi için ve b) AAR-4 deneyi için metal kaplar içerisinde yerleşimi.	98
Şekil 4.9 a) AAR-3 deneyi için 38°C'lik sıcaklığın sağlandığı oda, b) AAR-4 deneyi için 60°C'lik sıcaklığın sağlandığı kabin.	99
Şekil 4.10 Atomik absorpsiyon spektrometrisinde kullanılan a) deney cihazının ve b) içerisindeki katot lambalarının görünümü.	101
Şekil 4.11 Donma-çözülme ile ASR etkilerinin birlikte uygulandığı deney programı.	103

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.12 Islanma-kuruma ile ASR etkilerinin birlikte uygulandığı deney programı.	104
Şekil 4.13 Maruziyet sahasındaki küplerin a) üst ve (b) yan yüzeylerinde pimlerin konumu ile ölçüm doğrultuları.	106
Şekil 4.14 a) Kontrol çubuğu yardımıyla ölçülerin alınması, b) pimlerin yerleştirilmesi ve diyagonal ölçüm yönleri, c) boy değişimini ölçmede kullanılan komparatör.....	107
Şekil 4.15 Maruziyet sahasının genel görünümü.....	108
Şekil 4.16 a) Sıcaklık ve nem sensörü, b) kablosuz olarak çalışan gösterge ünitesi, c) rüzgar sensörü.....	108
Şekil 4.17 DRI sayımları için parlak kesit oluşturmada kullanılan kesitlerin elde edilmesi.....	110
Şekil 4.18 DRI sayımları için kullanılan normal ışık ve ultraviyole ışık altındaki görüntülere örnek.....	110
Şekil 4.19 Deneysel çalışmanın ayrıntılarını gösteren şema.	112
Şekil 5.1 Ottersbo iri agregası ile hazırlanan karışımların 38°C’de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.....	114
Şekil 5.2 Ottersbo iri agregası ile hazırlanan karışımların 60°C’de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.....	115
Şekil 5.3 Spratt iri agregası ile hazırlanan karışımların 38°C’de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.....	118

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.4 Spratt iri agregası ile hazırlanan karışımların 60°C’de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.	118
Şekil 5.5 Ege ve Dokuz Eylül Üniversiteleri’nde test edilen Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarının 60°C’de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.	121
Şekil 5.6 Ege ve Dokuz Eylül Üniversiteleri’nde test edilen 0/3HA, 0/3LA ve 0/3MA karışımlarının 60°C’de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.	121
Şekil 5.7 Ege ve Dokuz Eylül Üniversiteleri’nde test edilen 0,063/3HA, 0,063/3LA ve 0,063/3MA karışımlarının 60°C’de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.	122
Şekil 5.8 NaOH ilavesi gerçekleştirilen Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarının a) 38°C’de ve b) 60°C’de genleşme-zaman grafikleri. .	129
Şekil 5.9 NaOH ilavesi gerçekleştirilen Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarının a) 38°C’de ve b) 60°C’de ağırlık artışı-zaman grafikleri.	129
Şekil 5.10 Alkali seviyesindeki değişimin a) 38°C’de ve b) 60°C’de ölçülen nihai genleşmelere etkisi.	131
Şekil 5.11 Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarından AAR-3 deneyi boyunca sızan a) Na ⁺ ve b) K ⁺ iyon konsantrasyonları.	132
Şekil 5.12 Bazalt agregası ocak kesidi, önde şu anda çalışılan saha, arkada geçmişte çalışılan kısım.	135
Şekil 5.13 a) Eski örneğe ait polarizan mikroskop görüntüsü, b) görüntü analizi sonucu elde edilen kontör görüntüsü.	136

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.14 Solda polarizan mikroskop görüntüsü, sağda görüntü analizi sonucu a) yeni örnek, b) eski örnek.	137
Şekil 5.15 Yeni örnekte yer alan volkanik cam matrisin 3000x büyütmede SEM mikro-görüntüsü.	137
Şekil 5.16 a) 0/3 mm ve b) 0,063/3 mm cam agregası içeren karışımların 38°C'ye maruz kalma sonrasındaki genleşme-zaman grafikleri.	140
Şekil 5.17 a) 0/3 mm ve b) 0,063/3 mm cam agregası içeren karışımların 60°C'ye maruz kalma sonrasındaki genleşme-zaman grafikleri.	140
Şekil 5.18 0/3HA, 0/3LA ve 0/3MA karışımlarından AAR-3 deneyi boyunca sızan a) Na ⁺ ve b) K ⁺ iyon konsantrasyonları.	143
Şekil 5.19 0,063/3HA, 0,063/3LA ve 0,063/3MA karışımlarından AAR-3 deneyi boyunca sızan a) Na ⁺ ve b) K ⁺ iyon konsantrasyonları.	143
Şekil 5.20 Farklı tane boyutlarına sahip bazalt agregalarından a) 38°C'de ve b) 60°C'de salınan Na ₂ Oeşd. miktarı (agrega kütlelerinin %'si).	146
Şekil 5.21 Farklı tane boyutlarına sahip atık cam agregalarından a) 38°C'de ve b) 60°C'de salınan Na ₂ Oeşd. miktarı (agrega kütlelerinin %'si).	146
Şekil 5.22 a) 38°C'de ve b) 60°C'de kürlenmiş cam agregalı karışımlar için genleşme-ağırlık artışı ilişkisi.....	149
Şekil 5.23 Harç karışımların 180 gün boyunca NaOH çözeltisinde bekletilmesiyle oluşan (a) genleşme-zaman ve (b) ağırlık artışı-zaman grafikleri.	151
Şekil 5.24 B/HA, B/LA ve B/MA karışımlarının a) AAR-3 deneyinde 38°C'de ve b) AAR-4 deneyinde 60°C'de genleşme-zaman grafikleri.	153

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.25 B/HA, B/LA ve B/MA karışımlarının a) AAR-3 deneyinde 38°C’de ve b) AAR-4 deneyinde 60°C’de ağırlık değişimi-zaman grafikleri.....	154
Şekil 5.26 B/HA, B/LA ve B/MA karışımlarının (ağırlıkça dizayn) a) AAR-3 deneyinde 38°C’de ve b) AAR-4 deneyinde 60°C’de genleşme-zaman grafikleri.....	156
Şekil 5.27 a) 38°C sıcaklığa ve b) 60°C sıcaklığa maruz kalan KYB karışımların genleşme-zaman grafikleri.....	160
Şekil 5.28 a) 38°C’de ve b) 60°C’de kürlenmiş KYB karışımlar için genleşme-ağırlık artışı ilişkisi.	162
Şekil 5.29 KYB karışımların a) kılcal yolla su emme ve b) klor iyon geçirimsizliği davranışları.....	164
Şekil 5.30 a) 38°C sıcaklığa ve b) 60°C sıcaklığa maruz kalan lifli betonların genleşme-zaman grafikleri.....	165
Şekil 5.31 AAR-3 ve AAR-4 deneylerinde elde edilen nihai veriler arasında a) tüm karışımlar için ve b) cam agregalı karışımlar hariç tutularak elde edilen korelasyonlar.	166
Şekil 5.32 a) Ard arda ASR etkisine ve donma-çözülme çevrimlerine, b) sadece ASR etkisine uğrayan Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarının genleşme davranışları.	167
Şekil 5.33 Ard arda ASR etkisine ve donma-çözülme çevrimlerine uğrayan Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarının a) ağırlık ve b) ultrases hızı değişimleri.	168
Şekil 5.34 a) Ard arda ASR etkisine ve donma-çözülme çevrimlerine, b) sadece ASR etkisine uğrayan KYB karışımlarının genleşme davranışları.....	170

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

- Şekil 5.35 Ard arda ASR etkisine ve donma-çözülme çevrimlerine uğrayan KYB karışımlarının a) ağırlık ve b) ultrases hızı değişimleri. 170
- Şekil 5.36 a) Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımları ve b) KYB karışımları için dayanıklılık etkilerinin ayrı ayrı yarattığı genleşmelerle çoklu deneyler sonrasında elde edilen genleşmelerin karşılaştırılması. 172
- Şekil 5.37 a) Ard arda ASR etkisine ve ıslanma-kuruma çevrimlerine, b) sadece ASR etkisine uğrayan Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarının genleşme davranışları. 173
- Şekil 5.38 Ard arda ASR etkisine ve ıslanma-kuruma çevrimlerine uğrayan Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarının a) ağırlık ve b) ultrases hızı değişimleri. 174
- Şekil 5.39 a) Ard arda ASR etkisine ve ıslanma-kuruma çevrimlerine, b) sadece ASR etkisine uğrayan KYB karışımlarının genleşme davranışları. 175
- Şekil 5.40 Ard arda ASR etkisine ve ıslanma-kuruma çevrimlerine uğrayan KYB karışımlarının a) ağırlık ve b) ultrases hızı değişimleri. 176
- Şekil 5.41 İnce ve iri agrega olarak bazalt içeren karışımlara ait maruziyet sahası küplerinin a) üst yüzeylerinde ve b) yan yüzeylerinde oluşan genleşmeler. 178
- Şekil 5.42 İnce boyutta cam agregası ve iri agrega olarak bazalt içeren karışımlara ait maruziyet sahası küplerinin a) üst yüzeylerinde ve b) yan yüzeylerinde oluşan genleşmeler. 178
- Şekil 5.43 7 yıl boyunca maruziyet sahasında bekletilen a) 0/3HA ve b) 0,063/3HA karışımlarının görüntüleri. 180

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.44 Maruziyet sahasında yer alan cam agregalı karışımlar için elde edilen genleşme-ultrases hızı değişimi ilişkisi.	180
Şekil 5.45 a) OTT38, b) OTT60, c) SPR38 ve d) SPR60 karışımlarına ait kesitlerin numune hazırlığı öncesi fotoğrafları.	182
Şekil 5.46 OTT38 karışımına ait parlak kesitin a) normal ışık ve b) UV ışık altında görüntüsü.....	183
Şekil 5.47 OTT60 karışımına ait parlak kesitin a) normal ışık ve b) UV ışık altında görüntüsü.....	183
Şekil 5.48 SPR38 karışımına ait parlak kesitin a) normal ışık ve b) UV ışık altında görüntüsü.....	183
Şekil 5.49 SPR60 karışımına ait parlak kesitin a) normal ışık ve b) UV ışık altında görüntüsü.....	184
Şekil 5.50 a) İri agreganın içerisinde ve b) sınırlarında oluşan çatlaklara örnekler.	185
Şekil 5.51 a) Çimento hamurunda ve b) hava boşlukları etrafında oluşan çatlaklara örnekler.	185
Şekil 5.52 Karışımların nihai genleşmesi-DRI arasında elde edilen bağıntı.	187
Şekil 5.53 Ayırıştırma ile elde edilen ikili (binary) görüntü örnekleri: a) agrega ve çimento hamuru, b) hava boşlukları ve c) çatlaklar	188
Şekil 5.54 Vokseller içerisine rastgele yerleştirilen düğüm noktaları ve oluşturulan latis elemanlar.	188
Şekil 5.55 Latis tanımlaması ve imaj eşleştirmesi sonuçları.	189

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.56 Elastisite modülü değerlerinin normal dağılımla atanmasına örnek (OTT-38 karışımı için).	191
Şekil 5.57 OTT-38 kesitinde simülasyonun farklı aşamalarında çatlak gelişimleri.	193
Şekil 5.58 OTT-60 kesitinde simülasyonun farklı aşamalarında çatlak gelişimleri.	194
Şekil 5.59 SPR-38 kesitinde simülasyonun farklı aşamalarında çatlak gelişimleri.	195
Şekil 5.60 SPR-60 kesitinde simülasyonun farklı aşamalarında çatlak gelişimleri.	196
Şekil 5.61 Tüm karışımlarda farklı adımlara karşılık gelen çatlak genişlikleri..	197



TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Çeşitli deney koşullarında agregalardan gerçekleşen alkali salımları (Drolet et al., 2017).....	57
Çizelge 3.2 Farklı ülkelerde reaktivite gösterdiği bilinen çeşitli kayaç isimleri ve potansiyel reaktiviteye neden olan mineral bileşenleri (RILEM AAR-1.2, 2016).....	65
Çizelge 3.3 Agregat boyutunun bir fonksiyonu olarak ASR genleşmesi (Mukhopadhyay and Liu, 2014).	68
Çizelge 3.4 AAR-2 deneyinde agreganın sahip olması gereken gradasyon.	75
Çizelge 3.5 İdeal deney yöntemini tanımlayan nitelikler ve deney yöntemlerinin karşılaştırılması (Thomas et al., 2006).	83
Çizelge 4.1 Bağlayıcı malzemeler üzerinde TÇMB tarafından gerçekleştirilen analiz sonuçları.	88
Çizelge 4.2 Camsı matrisin EDS analizi ile belirlenen kütlece bileşenleri, %.	90
Çizelge 4.3 Agregaların XRF ile belirlenen kimyasal kompozisyonları.	95
Çizelge 4.4 Agregaların bazı fiziksel özellikleri.	95
Çizelge 4.5 DRI yöntemindeki çatlak ve hasar grupları ile bunlara atanan önem katsayıları (Grattan-Bellew and Danay, 1992).	109
Çizelge 5.1 Referans malzemeler kullanılarak üretilen karışımlar.	114
Çizelge 5.2 Karşılaştırmalı deneylerde ölçülen veriler ve sonuçlardaki değişkenlikler.	117

TABLOLAR DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.3 Ege ve Dokuz Eylül Üniversiteleri'nde deneye tabi tutulan karışımların genleşme ortalamalarına (%) uygulanan hipotez testi sonuçları.	124
Çizelge 5.4 Alkalinite seviyesinin çimento ile sağlandığı karışımların malzeme oranları (kg/m ³).	126
Çizelge 5.5 Alkalinite seviyesinin NaOH ilavesi ile sağlandığı karışımların malzeme oranları (kg/m ³).	126
Çizelge 5.6 Alkalinite seviyesinin uçucu kül ikamesi ile sağlandığı karışımların malzeme oranları (kg/m ³).	127
Çizelge 5.7 Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarından AAR-3 ve AAR-4 deneyleri boyunca sızan toplam alkali miktarları.	133
Çizelge 5.8 Aliğa kaynaklı bazalt agregası üzerinde farklı zamanlarda yapılan deney sonuçları.	134
Çizelge 5.9 Cam agregası içeren karışımlarda malzeme oranları (kg/m ³).	139
Çizelge 5.10 Cam agregalı karışımlardan AAR-3 ve AAR-4 deneyleri boyunca sızan toplam alkali miktarları.	144
Çizelge 5.11 Bazalt ve atık cam agregalarının alkali hidroksit çözeltilerinde bekletilmesi sonucu oluşan alkali salımı değerleri.	148
Çizelge 5.12 AAR-2 hızlandırılmış harç çubuğu deneyine göre test edilen harç karışımlar.	150
Çizelge 5.13 Pomza agregası içeren karışımlarda malzeme oranları (kg/m ³).	152

TABLOLAR DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.14 Pomza agregası içeren karışımlarda malzeme oranları (kg/m ³) – ağırlıkça dizayn.....	155
Çizelge 5.15 Hazırlanan KYB karışımlarının malzeme oranları ve kodlamaları.	157
Çizelge 5.16 Toz malzemelerin fiziksel özellikleri.	158
Çizelge 5.17 Hazırlanan KYB karışımlarının taze hal özellikleri.	159
Çizelge 5.18 Kontrol karışımları ile KYB’lerde AAR-3 ve AAR-4 deneyleri boyunca sızan toplam alkali miktarları.....	163
Çizelge 5.19 Lif içeren beton karışımların malzeme oranları (kg/m ³).	164
Çizelge 5.20 Karışımlara ait kesitlerde DRI incelemelerinde belirlenen çatlak sayıları.	186
Çizelge 5.21 Dijital imaj analizi sonrası elde edilen faz dağılımı.	190
Çizelge 5.22 Delaunay üçgenleme algoritması sonrası tanımlanan latis elemanların faz dağılımı.	190
Çizelge 5.23 Nano-indentasyon deney sonuçları uyarınca atanan malzeme mekanik özellikleri.	191
Çizelge 5.24 Agregada yer alan kuvars yapılarının tane boyutlarına bağlı olarak miktarları.	192



1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen beton teknolojisi, çimento esaslı bağlayıcıların tiplerinde ve kullanım oranlarında, beton agregaları olarak kullanılan malzemelerin çeşitliliğinde, kimyasal katkıların tiplerinde ve bunlarla üretilen betonların tasarımlarında değişikliğe yol açmış, taşıyıcı hafif beton, kendiliğinden yerleşen beton gibi özel beton tiplerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Betonun uzun yıllar boyunca göstereceği performans her zaman tek bir çevresel etki problemi odaklı olmamaktadır. Yapıların maruz kaldığı dış etkiler, yapının tipine, kullanım ömrüne ve bulunduğu ortama göre farklılık göstermektedir. Bu bilgiler ışığında performans deneylerinin klasik beton tasarımı ve malzemeleri kullanılarak uygulanan deneyler olmaması gerektiği, günümüzde üretilen farklı ihtiyaçlara yönelik özel karışımların da performanslarını değerlendirebilecek kapasitede olması ve çoklu dayanıklılık etkilerinin birlikte görüldüğü durumları da göz önüne alması beklenmektedir.

Alkali agrega reaksiyonu (AAR) çimento alkalileri ile bazı agrega tipleri arasında meydana gelerek betonda hasara sebebiyet veren bir reaksiyondur. Reaksiyon, yüksek sıcaklık ve artan bağıl nem gibi koşullarda oldukça tahrip edicidir. Harita şeklinde çatlaklar, beton yüzeyinde dökülme ve parça atmalar gibi AAR hasarları dayanım kaybı ve yapısal hasara sebebiyet verebilir. Özellikle köprüler, barajlar ve beton yollar gibi yüksek miktarda alkali içeren kütleli yapılarda AAR hasarı daha yaygındır. Islanma-kuruma, sülfat etkisi, asit etkisi ve/veya donma-çözülme gibi diğer dayanıklılık problemleri ile birleştiğinde AAR hasarı daha da artmaktadır.

AAR'nin önlenmesi beton sektörü için global ve yaygın bir problemdir. Türkiye'deki agrega kaynaklarının çeşitliliği ve çimentonun alkali seviyelerinin yükselmesi konunun derinlemesine araştırılmasını gerektirmektedir. AAR'yi kontrol altına almak için düşük alkalili çimento kullanımı, mineral katkı veya lityum tuzlarının eklenmesi, reaktif olmayan agrega kullanımı gibi pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin etkinliğinin betonda uygulanan genleşme deneyleri veya saha tecrübesi ile incelenmesi gerekmektedir. Reaktivite düzeyine önemli ölçüde etki edebilecek betondaki alkali seviyesi, alkali iyonlarının kaynağı, reaksiyona neden olabilecek agreganın ve bünyesinde yer alan minerallerin türü, agreganın kristal yapısı ve fiziksel özellikleri, ortam sıcaklığı ve nemi gibi parametrelerin net etkilerinin anlaşılması büyük öneme sahiptir. Bu bilgiler ışığında, betonun gerçek performansının değerlendirilmesi amacıyla sahada kullanılacak olan beton karışımının gerçeğe yakın hızlandırılmış koşullarda test edilmesi esastır.

1.1 Amaç ve Kapsam

Tez çalışmasının amacı sahadaki alkali-silis reaksiyonu (ASR) genleşmelerine etki eden faktörleri göz önünde bulundurabilecek performans deney yöntemlerinin incelenmesi ve geliştirilmesidir. Boşluk çözeltilisinin alkalinitesi, betonun geçirimliliği, betonda kullanılan malzemelerin tip ve oranları ile çevresel koşullar, bu faktörlere örnekler olarak sıralanabilir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar aşağıda sıralanan aşamalarla gerçekleştirilmiştir:

- Öncelikle laboratuvarda elde edilecek olan genleşme değerlerinin çift yönlü kontrolünün yapılması için AAR-3 (beton prizma deneyi) ve AAR-4 (hızlandırılmış beton prizma deneyi) deneyleri gerçekleştiren diğer laboratuvarlardan getirilen referans malzemeler test edilerek laboratuvar sonuçlarının değişkenliği incelenmiş ve geçerliliği doğrulanmıştır. Bu çalışmaya hem yurt dışından bu alanda önemli bilgi birikimine sahip kurumlar olan Norveç'in SINTEF araştırma merkezi ve Hollanda'da yer alan Delft University of Technology (TUDelft) hem de İzmir'den Dokuz Eylül Üniversitesi laboratuvarları destek vermiştir. Aynı karışımlar üzerinde farklı laboratuvarların elde ettiği genleşmeler karşılaştırılmış, kurum içi ve kurumlar arası değişkenliklerin seviyeleri belirlenmiştir.

- Ardından halihazırda performans deneyi olarak kullanılmaya ve geliştirilmeye en uygun oldukları düşünülen AAR-3 ve AAR-4 beton prizma deney metodları baz alınarak farklı beton karışımlarının deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada betonun toplam alkali içeriğinin ve farklı bağlayıcıların performanslarını gözlemlemek amaçlanmıştır. Farklı alkali seviyelerinin alkalinitesi değişken (düşük, orta ve yüksek alkali seviyeli) çimentolarla sağlanması, deney metodlarında ön görüldüğü şekilde karışım suyuna NaOH ekleyerek yapay olarak artırılması ve mineral katkı (bu çalışmada uçucu kül) kullanımını ile değişken beton alkali seviyelerinin sağlanması gibi üç farklı parametrenin etkisi incelenmiştir.

- Sonraki aşamada, geri-dönüşüm cam agregasının ve hafif agreganın farklı alkali seviyelerindeki karışımlarda kullanımının oluşturduğu sonuçlar irdelenmiştir. Aşırı reaktif nitelikli cam agregası kullanımının getirdiği özel durumlar olan çok ince cam tanelerinin reaktiviteye etkisi ve cam agregasının alkali salabilme potansiyeli de araştırılmıştır. Pomzanın hem ince hem de iri agrega olarak kullanıldığı karışımların yanı sıra ince agrega olarak bazalt ve iri agrega olarak pomza içeren hafif betonların da

reaktivitesi araştırılmıştır. İlave olarak, hafif agrega içeren betonların karışım oranlarının belirlenmesi sırasında deney metotlarında normal agregalar için öngörülen koşullarda gerekli olduğu düşünülen değişiklikler uygulanmış ve bu değişikliklerin deney sonuçlarına etkisi araştırılmıştır.

- Ardından toz malzeme tipi ve su/toz oranı değişken kendiliğinden yerleşen beton karışımların ASR performansı ile üçer farklı dozajda kullanılan çelik ve cam liflerin genleşmeler üzerindeki etkisi araştırılan konular olmuştur. Kendiliğinden yerleşen betonlar için de karışım tasarımlarının özel durumları göz önünde tutularak performans deneyleri iyileştirilmiştir.

- Yukarıda sıralanan hızlandırılmış deneyler sırasında, beton prizmalardan dışarıya alkali sızıntısı olup olmadığının belirlenmesi amacıyla belirli periyotlarda kür suyundan numune alınarak alkali iyonlarının miktarı atomik absorpsiyon spektrometrisi ile analiz edilmiştir.

- Beton prizma deneyleri sırasında incelenen karışımların bir kısmı seçilerek donma-çözülme ve ıslanma-kuruma etkilerinin alkali agrega reaksiyonu ile birlikte görülmesi durumu simule edilmeye çalışılmıştır. Bu etkilerin çoklu şekilde/eş zamanlı uygulanmasını öngören standart bir yöntem bulunmadığından ilgili deney metotları modifiye edilerek seçilen karışımlara ait örnekler, tezde geliştirilen deney programıyla birbirinin peşi sıra çoklu etkiye maruz bırakılmıştır. Donma-çözülme ve ıslanma-kuruma esnasında alkali sızıntısının önlenmesine yönelik tedbirler alınmıştır. Sadece AAR testleri uygulanan durumlar, kontrol örnekleri olarak göz önünde tutularak donma-çözülme ve ıslanma-kuruma etkisi ile birlikte oluşan genleşmelerin artışı irdelenmiştir.

- Seçilen karışımlardan 300 mm ayrıtlı ikişer adet küp numune hazırlanmış ve laboratuvar dışında kurulan maruziyet sahasına yerleştirilmiştir. Bu numunelerden birisi tabandan belirli yüksekliğe kadar su ile temas edecek şekilde bekletilmiş, diğer numuneye ise böyle bir işlem uygulanmamıştır. Hızlandırılmış deneylerde tercih edilen sıcaklığın ve bağıl nemin yükseltilmesi ve sürekli sabit tutulması koşulları uygulanmadan numunelerin olağan koşullarda saklanmasıyla genleşmelerin uzun yıllar içindeki değişiminin belirlenmesi amaçlanmıştır.

- Son aşamada ise kesitlerde mikroskop altında çatlak incelemeleri ve sayımlarıyla oluşan hasarın öncelikle sayısallaştırılmasına sonra da genleşme simülasyonları aracılığıyla modellenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

2. ALKALİ-AGREGA REAKSİYONU

Sertleşmiş betonda çimento hamuru fazında yer alan mikro-boşluklar, oldukça bazik ($\text{pH} \geq 12,5$) yapıdaki sıvı ile doludur. Boşluk çözeltisi adı verilen bu sıvı, çözülmüş haldeki alkali hidroksitler (K^+ , Na^+ , OH^-) ile az miktarda diğer iyonlardan (Ca^{+2} , SO_4^{-2} gibi) oluşur. İnce ve/veya iri agregada bulunan reaktif ve asidik yapıdaki bazı mineral bileşenler bu tip yüksek pH koşullarında kimyasal kararlılığını kaybederek ve çözünüp başka iyonlarla reaksiyona girerek sertleşmiş betonda genleşme, çatlama ve servis ömründe azalmaya yol açacak şekilde hasara neden olabilir (Fournier and Bérubé, 2000).

Daha sonraki başlıklarda da ayrıntılı olarak açıklanacağı üzere hem hidroksil iyonlarının hem de alkali-metal iyonlarının bulunması, genleşme yaratan reaksiyonların oluşması için gereklidir. Sertleşmiş çimento hamurunda yüksek miktarda kalsiyum hidroksit bulunduğundan boşluk çözeltisinde hidroksil iyonu miktarı hep yüksek seviyelerdedir. Genel bir kanı olarak beton üretiminde düşük alkali bileşimine sahip çimento kullanımıyla alkali-metal iyonlarının miktarını ve genleşme davranışını kısıtlamak mümkündür. Ancak alkali içeren mineral ve kimyasal katkılar, tuz içeren agregalar gibi betonu oluşturan malzemelerden sızan veya deniz suyu ve NaCl içeren buz çözücü tuzlar gibi dış ortamlardan betona nüfuz eden alkalilerin de betonun toplam alkali yükünü arttırabileceği bilinmektedir (Mehta and Monteiro, 2006).

2.1 Reaksiyon Türleri

Alkalilerle reaktivite gösteren agreganın tipi, reaksiyon mekanizması ve hızı göz önüne alındığında alkali-agrega reaksiyonlarını alkali-silis reaksiyonu, yavaş/geç genleşme gösteren alkali silikat/silis reaksiyonu ve alkali-karbonat reaksiyonu olmak üzere üç gruba ayırmak mümkündür (Wigum, 1995). Bu reaksiyonlar aşağıda ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.1.1 Alkali-silis reaksiyonu

Amerikan Beton Enstitüsü'nün (ACI CT-13, 2013) tanımına göre alkali-silis reaksiyonu (ASR) temel olarak Portland çimentosundan gelen alkalilerle (sodyum ve potasyum) agregalarda bulunabilen opalin çört, deforme kuvars, asidik volkanik cam vb. gibi bazı silisli mineraller arasında meydana gelen zararlı reaksiyondur.

ASR, diğer iki reaksiyon türüne kıyasla dünya çapında çok daha yaygın görülmekte olup tez kapsamında yapılan deneyler de ASR etkisinin saptanmasına yöneliktir. ASR

olgusu tüm yönleriyle tezin üçüncü başlığı altında literatürden alıntılarla ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.1.2 Alkali-silikat reaksiyonu

Alkali-silis reaksiyonunda genellikle çört, opal ve kalsedon gibi silisin amorf, heterojen, boşluklu ve bileşiminde su bulunan yapıları reaktif nitelik gösterirken, kristal haldeki kuvars içeren kayaçların neden olabildiği reaksiyon ise “yavaş/geç genleşme gösteren alkali silikat/silis reaksiyonu” olarak adlandırılmaktadır. Bu kayaçlarda deforme kuvarsın reaktif bileşen olduğu düşünülmektedir. Kristal kafeste oluşan açılmal deformasyon, reaktivitenin bir göstergesidir. Normal koşullarda reaksiyona girmesi uzun seneler süren bu tip geç genleşen agregaların reaktivitesi, numunelerin saklandığı koşulların nispeten daha ağır olduğu hızlandırılmış testler (80°C, 1M NaOH gibi) ile belirlenebilmektedir (Wigum, 1995; Pedersen, 2004).

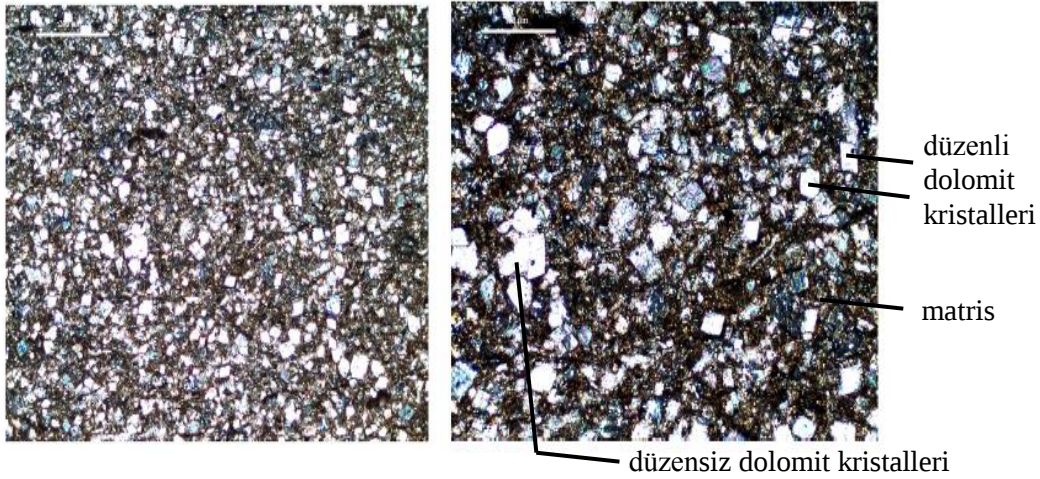
Alkali-silikat reaksiyonunun beton boşluk çözeltisindeki metal alkalilerle grovak, fillit veya argilit tipi kayaçlardaki fillo-silikatların katmanları arasındaki çökelti arasında gerçekleştiği belirtilmektedir. Bu çökelti maddesi vermikülit benzeri bir mineraldir (Hobbs, 1988). Bu tip kayaçların alkaliler ile reaksiyonu yavaş ilerlemektedir ve reaksiyon mekanizması henüz tam olarak açıklanamamıştır. Bu kayaçlarda, daha önceden kuru olarak bulunan mikrokristalin alümino-silikatların bünyesine su alarak genleştiği düşünülmektedir. Mikrokristalin malzemenin miktarı ve porozitesi ile betonun genleşmesi arasında doğru orantı bulunmaktadır (Poole, 1992a). Bu agregalarla üretilen betonlarda alkali-silis reaksiyonu ürünlerine de rastlamak mümkündür çünkü fillo-silikat minerali içeren agregalarda genelde mikrokristalin kuvars veya deforme kuvars da yer almaktadır (Hobbs, 1988).

Alkali-silikat reaksiyonunun, yaygın görülen alkali-silis reaksiyonundan en önemli farkı beton numunelerin genleşmeye başlamasındaki gecikme ve beton yapılarda çatlakların belirginleşmesine kadar geçen sürenin oldukça uzun olmasıdır. 80’li yılların sonlarında Kanada Standartlar Birliği (CSA, 1986) alkali-silikat reaksiyonu ismini yavaş/geç genleşme gösteren alkali-silikat/silis reaksiyonu olarak değiştirmiştir. 90’lı yılların sonları ve 2000’li yılların başlarında yapılan araştırmalar neticesinde ise alkali-silis ve alkali-silikat reaksiyonlarının oldukça benzer yapıda olmasından ve ayırt edilmelerindeki zorluktan dolayı bazı kaynaklarda (Sims and Brown, 1998; RILEM AAR-1.1, 2016) bu iki tür, alkali-silis reaksiyonu adı altında tek grupta toplanmıştır (Castro, 2012).

2.1.3 Alkali-karbonat reaksiyonu

Alkali-karbonat reaksiyonu (ACR), boşluk çözeltisindeki alkali hidroksitlerle belirli türlerdeki dolomitli kireçtaşları arasında gerçekleşmektedir. Amerika ve Kanada'da yayımlanmış olan ve beton bileşenlerine ilişkin terimler dizininin, tanımların ve temel gereksinimlerin sunulmuş olduğu ASTM C294-12 (2012) ve CSA A23.1-00 (2000) standartlarında, ayrıca ACI tarafından yayımlanan alkali-agrega reaktivitesine dair raporda (ACI 221.1R-98, 1998), alkalilerle reaksiyona girerek zararlı genleşme yaratabilecek agregaların kendine has doku ve bileşime sahip oldukları ifade edilmiştir. Mikroskobik dokuları incelendiğinde kısmen daha büyük olan eşkenar dörtgen şeklindeki dolomit kristalleri, mikritik kalsit ve kilden oluşan daha ince gren yapılı matris içerisinde dağılmış haldedir. Bileşimleri açısından da reaktif agregaların karbonat kısımları önemli miktarda dolomit ve kalsit içerirken, hidroklorik asitte çözünemeyen kalıntıları da belirgin miktarda kile sahiptir.

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi kayaçta karbonatlı dokunun bulunması, reaktivitenin teşhisinde güvenilir bir kılavuzdur. Çünkü şimdiye dek yapılan araştırmalarda bu yapıya sahip tüm kireçtaşlarının istisnasız olarak yüksek alkaliniteye sahip ortamda reaksiyona girdiği veya dolomitsizleşmeye (dolomitin ayrışması) uğradığı görülmüştür (ACI 221.1R-98, 1998).



Şekil 2.1 Alkali-karbonat reaksiyonuna yatkın kayaçların dokusuna dair iki ince kesitin mikro görüntüleri (Beyene et al., 2013).

Kayacın matrisindeki dolomit kristallerinin bazıları birbirine değecek şekilde kalabalık halde görülürken, bazıları ise daha dağınık halde bulunabilmektedir. Diğer kristallerden ayrı halde görülenler daha sivri kenarlara ve düzgün kristal şekline, diğerleri ise daha düzensiz geometriye sahiptir. Rombik yapıdaki dolomit kristallerinin

ortalama boyutu 25 μm iken en büyük kristaller 50-75 μm boyutundadır. Matris fazında bulunan kalsit 2-6 μm büyüklüğündeyken, kil taneleri ise daha küçüktür. Kil tanelerinin bulunmadığı hallerde matris daha boşluklu yapıda olmakta ve çoğunlukla silt boyutunda kuvars taneleri içermektedir (ACI 221.1R-98, 1998).

Kanada'da (Kingston ve Gull nehri, Ontario) ve ABD'de (Iowa, Illinois, Indiana ve Virginia) bulunan reaktif nitelikteki karbonatlı kayaçlar, genleşme gösterdikleri zaman dilimi açısından (1) erken genleşenler ve (2) geç genleşenler olarak iki gruba ayrılmıştır. Bu iki sınıf arasındaki fark asitte çözünemeyen kalıntı (erken genleşenlerde %5-29 ve geç genleşenlerde %21-33) ve karbonat fazındaki dolomit miktarlarıdır (erken genleşenlerde %40-73 ve geç genleşenlerde %75-90'dan fazla). ACR hasarlarıyla karşılaşılma sıklığı, ASR hasarlarındaki kadar yüksek değildir çünkü ACR açısından reaktif kayaçların düşük dayanım ve dayanıklılık nedeniyle betonda kullanılmaya uygun olmadığı bilinmektedir (Farny and Kosmatka, 1997; Beyene et al., 2013).

Farklı ülkelerde günümüze dek rapor edilen çeşitli alkali-karbonat reaksiyonları, oluşan reaksiyon halkaları ve ürünleri baz alınarak aşağıdaki sınıflandırmayı ortaya çıkarmıştır:

- a) Dolomit kökenli olmayan kalsitik kireçtaşlarının sebep olduğu reaksiyonlar: Kireçtaşı agregasının en kesitinde ve sınır bölgelerinde koyu renkli reaksiyon halkası oluşur. Bu reaksiyon halkaları, agrega tanesinin reaksiyona girmeyen iç kısmına kıyasla hidroklorik asitte daha fazla çözünür yapıdadır.
- b) Dolomitli kireçtaşların sebep olduğu reaksiyonlar: Bu reaksiyon türünde de agreganın en kesitinde sınırlara yakın bölgelerde belirgin reaksiyon halkası oluşur. Hem reaksiyon halkası hem de reaksiyona girmeyen iç kısım benzer derecede çözünürdür.
- c) Bünyesinde kalsit ve kil bulunduran ince-grenli dolomit kökenli kireçtaşlarının sebep olduğu reaksiyonlar: Alkalilerle girilen reaksiyon, dolomitsizleşmeye uğramış bir reaksiyon halkası oluşturur. Reaksiyona giren agrega taneleri hidroklorik asitte bekletildiğinde, çoğunlukla silis açısından zengin, belirgin bir reaksiyon halkasının açığa çıkmasına neden olur.

Yukarıda bahsedilen reaksiyon tiplerinden ilk ikisinin zararlı olmadığı bilinirken sadece üçüncüsü genleşmeye neden olabilmektedir (Gillott, 1975; Poole, 1992a).

Alkali-karbonat reaksiyonunun mekanizması ile ilgili ortaya atılan ilk görüşlerde (Gillott, 1964) reaksiyonun (1) genleşme yaratmayan nitelikteki dolomitsizleşme ve (2) kayacın bünyesinde bulunan kil minerallerinin su emerek genleşme oluşturmalarının bir bileşimi olduğu savunulmuştur. Reaksiyona giren ve reaksiyon sonucu oluşan tüm ürünlerin molar ağırlıklarının (g/mol), yoğunluklarına (g/cm³) bölünerek her birinin molar hacimlerinin (cm³/mol) verildiği dolomitin ayrışması veya dolomitsizleşme olarak bilinen reaksiyonun formülü şu şekildedir:



Dolomit	Suda-çözünür	Brusit	Kalsit	Suda-çözünür
184,41/2,85	80,00/2,13	58,34/2,38	100,09/2,7	105,99/2,53
=64,71	=37,56	=24,51	=36,93	=41,88

Hacim değişimi: [(24,51 + 36,93) – 64,71] x 100/64,71 = -%5,1

Yukarıdaki reaksiyonda yer alan NaOH ve Na₂CO₃, betonda yer alan potasyum iyonları da hesaba katılarak bazı kaynaklarda MOH ve M₂CO₃ (M: alkali-metal iyonu) olarak yazılabilmektedir. Bu reaksiyonda yer alan hacim hesabının, oluşan katı ürünlerin ancak reaksiyona giren ürünün kapladığı alanda oluşması durumunda doğru olacağı unutulmamalıdır. Fakat reaksiyona giren dolomit kristalindeki bir miktar CO₃⁻² iyonu agreganın yüzeyinden başlayarak agrega bünyesindeki çatlaklar boyunca da kalsit oluşturabilmektedir. Dolayısıyla oluşan katı ürünlerin teorik olarak hesaplanandan dahi daha az yer kapladığı bilinmektedir (Katayama, 2010).

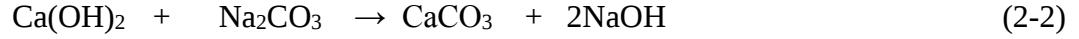
Dolomitsizleşme reaksiyonu her ne kadar kendi başına genleşme yaratmasa da agrega tanelerinin porozitesini artırarak bünyede bulunabilen ve önceden kuru durumda olan kil damarlarına nemin girişini kolaylaştıracak şekilde kanallar yaratmaktadır. Kil minerallerinin su emerek şişmesi ise betonda geri dönüşümü olmayan genleşme ve çatlak oluşturmaya yetecek gerilmeler meydana getirmektedir (Gillott and Swenson, 1969; Hobbs, 1988; Poole, 1992a).

Fakat Grattan-Bellew and Chan'a (2013) göre ACR hasarına neden olan kayaçların çoğunda yer alan kil mineralinin su emmeyen ve genleşmeyen nitelikteki illit tipi olması, genleşme mekanizmasının sadece kil minerallerinin su emmesine bağlanması fikrinin kabul edilebilir olmamasına yol açmıştır.

Dolomit kristallerini çevreleyen ince-grenli matrise alkali iyonlarının ve su moleküllerinin nüfuzu sonucu dolomit ayrılmakta ve brusitin kristalizasyonu sırasında oluşan basınç ACR sırasındaki genleşme mekanizmasını işaret etmektedir.

Dolomitsizleşme sonucu oluşan ürünlerin konumları arasında önemli bir fark, kalsitin reaksiyona giren dolomit kristalinin kapladığı alanda, brusitin ise kristalin dışında yeni ve komşu bir katman oluşturacak şekilde büyümesidir (Tang and Lu, 1987; ACI 221.1 R-98, 1998).

ACR'nin oluşumu sırasında gerçekleşen ve karbonat halesi oluşumu (karbonatlaşma) olarak da adlandırılan diğer kimyasal tepkime şu şekildedir:



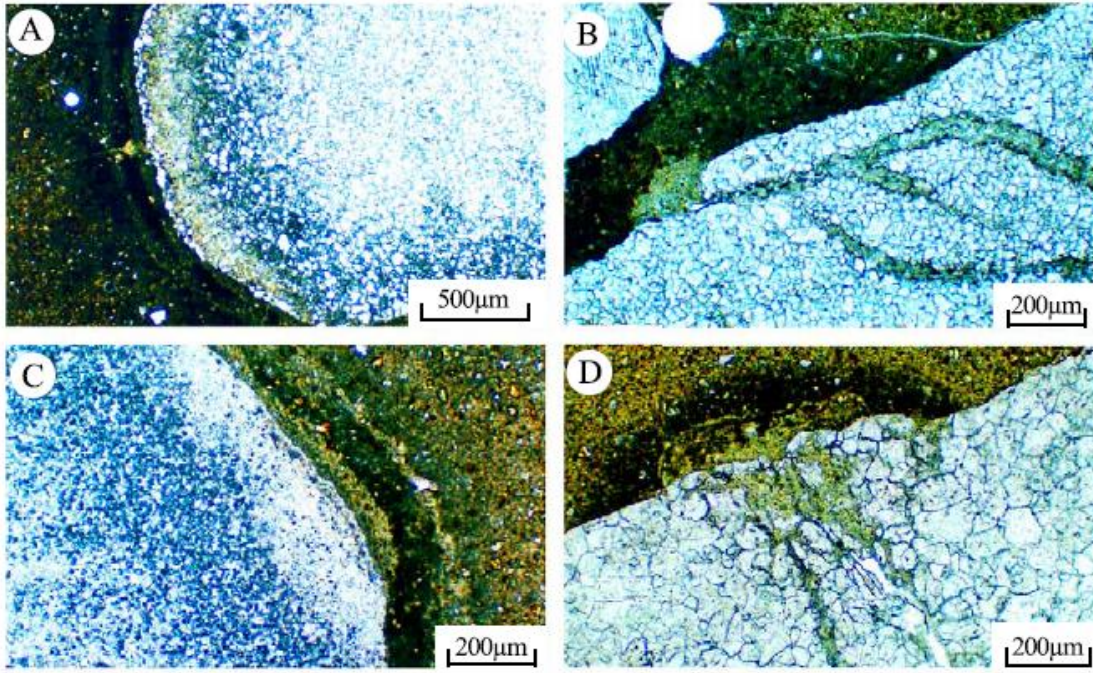
Portlandit	Suda-çözünür	Kalsit	Suda-çözünür
74,09/2,21	105,99/2,53	100,09/2,71	40,00x2/2,13
=33,52	=41,89	=36,93	=37,56

Hacim değişimi: $(36,93 - 33,52) \times 100/33,52 = + \%10,2$

2-1 numaralı denklemde dolomitten ayrılan CO_3^{2-} iyonu çimento hamuruna nüfuz etmektedir. Bu iyon, 2-2 numaralı denklemde görüldüğü gibi portlanditin ayrışmasına ve Ca^{+2} iyonlarının serbest kalarak agrega çevresinde karbonat halesi oluşturmaya yol açmaktadır. Kapalı bir sistemin aksine, reaksiyon ürünü olan kalsit, reaksiyona giren portlandit ile bire bir aynı alanda değil, çimento hamurunda portlandite yakın olan boşluklarda geliştiğinden reaksiyon sonucu genleşme oluşmamaktadır. 2-1 ve 2-2 numaralı denklemlerde görüldüğü üzere alkaliler (Na^+ , K^+) dolomitsizleşme esnasında yeniden oluşmaktadır. Bu nedenle sistemde alkali yükü az bile olsa ACR oluşabilmektedir (Katayama, 2010). Sonuç olarak alkali-silis reaksiyonu sonrası oluşan alkali-silis jelinin ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_{2\text{aq}}$) bünyesine girdiği bilinen alkaliler, alkali-karbonat reaksiyonu sırasında katalizör olarak görev yapmaktadır. ACR sırasında azalmayan alkali iyonları nedeniyle yüksek pH'nın devamlı korunması, düşük alkalili çimento veya mineral katkıların ACR nedeniyle oluşan genleşmeleri azaltmadaki yetersizliğini açıklamaktadır (Tang et al., 1994).

ACR'nin genleşme yaratan mekanizması, reaksiyonun ilk ortaya çıktığı tarihten itibaren tam olarak anlaşılamamıştır. Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılabileceği gibi araştırmacılar tarafından konu ile ilgili farklı görüşler ortaya atılmıştır. ACR hakkında son dönemde yapılan çalışmalara yol gösteren iddia ise Katayama'nın (1992) dolomitik agregalarda oluşan genleşmenin agrega bünyesindeki kriptokristalin kuvarsın yarattığı ASR nedeniyle olduğu, dolomitsizleşmenin ise zararsız bir reaksiyon olduğu ve genleşme yaratmadığı yönündeki hipotezidir.

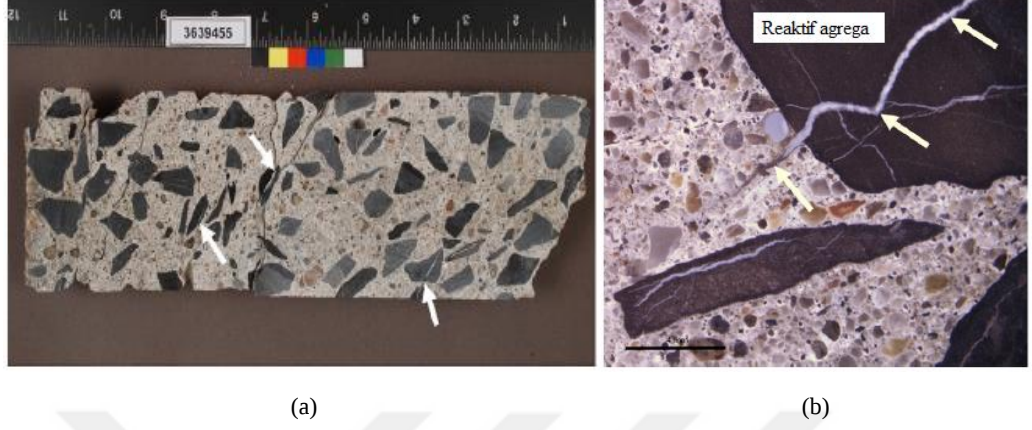
Katayama tarafından 2004'te gerçekleştirilen bir çalışmada Avusturya ve Kanada kökenli karbonatlı agregalar üzerinde AAR-5 deneyleri (80°C, 1 M NaOH, 14 gün, 40x40x160 mm numune, 4-8 mm agregası) gerçekleştirmiştir. Beton mikrobartlardan hazırlanan ince kesitlerde polarize mikroskop altında hem dolomitsizleşme hem de ASR olgularının belirtilerine rastlanmıştır. Avusturya'dan temin edilen dolomitik agregalarla oluşturulan karışımlarda agregası içerisindeki reaksiyon halkasında (Şekil 2.2a), agregası içerisinde ASR nedeniyle veya agregasıya uygulanan kırma işlemi sırasında oluşan çatlak boyunca (Şekil 2.2b), agregası yüzeyindeki karbonat halesinde (Şekil 2.2c) ve agregadaki çatlak ağzında (Şekil 2.2d) dolomitsizleşmeye rastlanmıştır.



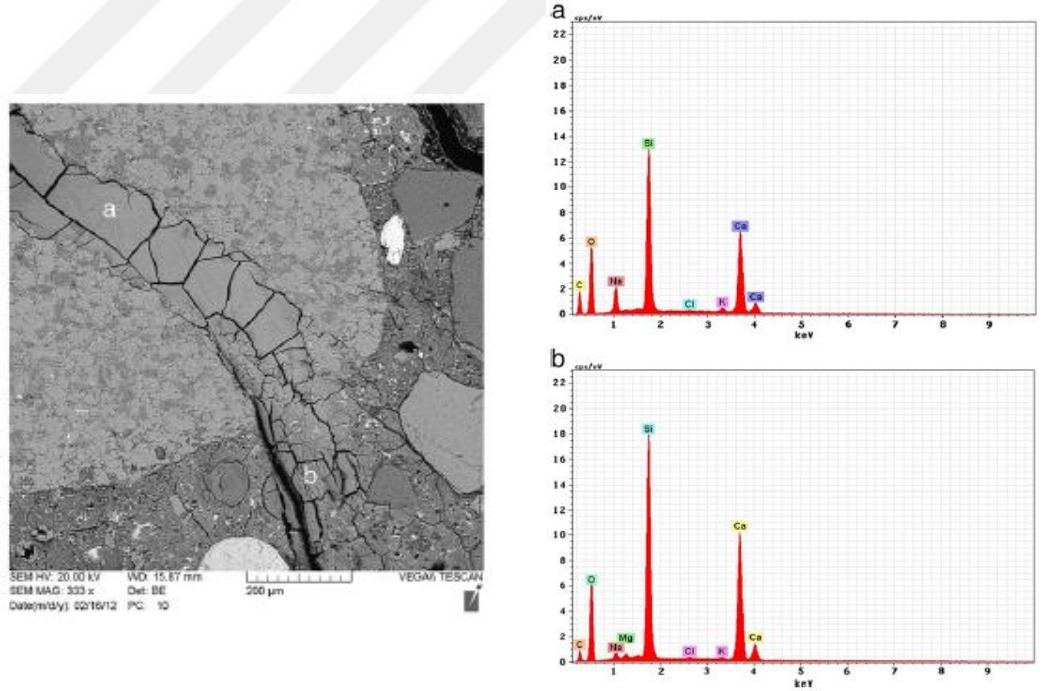
Şekil 2.2 Beton numunelerde dolomitsizleşmenin gözlemlendiği ince kesit görüntüleri a) reaksiyon halkasında b) çatlak boyunca c) agregası üzerinde d) çatlak ağzında (Katayama, 2004).

Beyene et al. (2013), Quebec, Kanada'da ACR'ye yatkın agregası (ince-grenli killi dolomitik kireçtaşı) ile inşa edilmiş bir iskele yapısından karot örnekler (Şekil 2.3a) almıştır. SEM-EDS analizleri sonucu dolomit kristallerinin bozunarak reaksiyona uğramış bir halde bulunmadığı, sadece az miktarda lokal bölgelerde dolomitsizleşme olduğu anlaşılmıştır. Buna göre, numunelerdeki çok sayıda ve geniş çatlakların bu düşük ACR reaktivitesine bağlanamayacağı ifade edilmiştir. Stereo-optik mikroskop (Şekil 2.3b) ve SEM-EDS analizleri reaktif agregalardan hamur fazına doğru uzanan ASR çatlaklarının ve jelinin varlığını ortaya koymuştur. ASR çatlaklarının agregası matrisindeki mikro-kristalin kuvars nedeniyle oluştuğu ifade edilmiştir. Ayrıca Şekil 2.4'teki BSE (geri saçılmış elektron) görüntüsü ve EDS (enerji ayırmalı spektrometri) analizi ile

çatlamış agregada oluşup hamura uzanan ASR jelinin özellikle hamur fazına yaklaştığı bölgelerde kalsiyum miktarının arttığı, sodyum ve potasyum seviyelerinin azaldığı ve bilindik kompozisyonuna daha da yaklaştığı belirtilmiştir.



Şekil 2.3 a) Karotun boyuna yönde kesildikten sonraki fotoğrafı. Oklar: İri agregadan başlayan ve beyaz renkli jelle dolu çatlaklar. b) Stereo-mikroskop görüntüsü. Oklar: Reaktif özellikteki koyu gri agregadan başlayan, hamura doğru uzanan ve ASR jeli ile dolu çatlaklar (Beyene et al., 2013).



Şekil 2.4 Çatlamış agregadan çimento hamuruna doğru uzanan ASR jelinin BSE görüntüsü ve iki farklı noktada EDS analizi (Beyene et al., 2013).

Gratan-Bellew et al. (2010), Kanada Beton Prizma Deneyi (CSA A23.2-14A – 38°C, %100 bağıl nem) ile gerçekleştirdikleri çalışmada ACR yönünden reaktif olduğu

bilinen Kingston, ASR yönünden orta derecede reaktif olan Spratt ve yine ACR yönünden reaktif olan ve Çin’de bulunan bir tip dolomitik kireçtaşı olmak üzere üç tip agregâ kullanmışlardır. Kingston agregâsının asitte çözünemeyen kalıntısının ağırlıkça %11,4’e eşit olduğu ve XRD analizi sonucu bu kalıntının da %96’sının kuvars içerdiği ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla toplam kuvars içeriğinin yaklaşık %10 olduğu ve çört, opal gibi bazı silis mineralleri için %5’lik miktarın bile yeterli olduğu düşünüldüğünde Kingston agregâsı ve portland çimentosu ile üretilen betonda ASR yönünden tehlike oluşabileceği açıktır. Ayrıca çalışmada agregâlar için asitte çözünemeyen kalıntıların ASTM C289’a göre NaOH çözeltisindeki çözünabilirlikleri araştırılmıştır. Agregâların kristallik indeksleri azaldıkça (kristaldeki kusurlar arttıkça) NaOH çözeltisinde çözünen miktarın arttığı ve korelasyonun oldukça güçlü olduğu bulunmuştur. Yine asitte çözünemeyen kalıntıda yer alan kuvars içeriği arttıkça beton prizma genleşmelerinin de güçlü bir korelasyonla artması, yazarların “Alkali-karbonat reaksiyonu, alkali-silis reaksiyonunun sadece değişik bir türüdür” ve “ACR = ASR” ifadelerini kullanmalarına yol açmıştır. Karbonatlı agregâ içeren betonda oluşan ASR jelinin kalsiyum-magnezyum-alüminyum-silikat-hidrat yapısında olduğu, silisli agregânın neden olduğu ASR jelinin ise sodyum/potasyum-kalsiyum-silikat-hidrat içerdiği belirtilmiştir.

Son dönemde yapılan çalışmalar sonucu üzerinde hemen hemen fikir birliği sağlanan konu sadece ACR nedeniyle genleşme ve hasar olamayacağıdır. Bazı araştırmacılar (Milanesi et al., 2012; Fecteau et al., 2012) ASR’nin ACR açısından reaktif olduğu düşünülen karbonatlı agregâların reaksiyon ve hasar mekanizmasında az ya da çok rol sahibi olduğunu, bazıları (Beyene et al., 2013; Francisco et al., 2014; Grattan-Bellew et al., 2010; Katayama 1992, 2004, 2010) ise hasarı yaratanın sadece dolomitik agregâdaki silisli minerallerin yarattığı ASR etkisi olabileceğini ve ACR’nin zararsız olduğunu savunmaktadır.

ACR’nin ortaya çıktığı ilk yıllardan itibaren ASR’nin aksine agregâ boyutu arttıkça ACR genleşmelerinin arttığı bilinmektedir. O halde karbonatlı agregâlarda genleşmelere neden olan hâkim olgunun ASR olduğu iddiası üzerine boyut etkisinin ASR ve ACR’de neden birbirlerinden farklı olduğunun açıklanması gereği de ortaya çıkmıştır. Katayama’ya (2010) göre ince karbonatlı agregâlarda hem dolomitsizleşme hem de ASR daha hızlı gelişmektedir. Dolomitsizleşme olayı ince agregânın tüm kesiti boyunca gerçekleşerek ve oluşan brüst ASR jeliyle reaksiyona girerek ASR jeline kıyasla çok daha az genleşen nitelikteki Mg-silikat jeline dönüşmektedir. İri karbonatlı agregâlarda ise dolomitsizleşme olayı iri agregânın sadece yüzeyinde gerçekleşmekte, daha az Mg-silikat jeli oluşabilmekte ve böylelikle ASR jeli ince agregâdaki kadar etkin bir şekilde tüketilememektedir. Bu görüş Fecteau et al. (2012) tarafından da kabul edilerek

alternatif/ilave bir açıklama daha getirilmiştir. Yazarların çalışmalarında kullandıkları Kingston agregasında hem dolomitsizleşme hem de çatlakların agreganın kil ve çözünemeyen kalıntılar açısından zengin mikro-yataklarında olduğu BSE görüntüleri ile ortaya çıkmıştır. Reaktif bileşenlerin daha yoğun olarak bulunduğu kil ve çözünemeyen kalıntılar açısından zengin bu mikro-yatakların agregada zayıf düzlemler oluşturduğu bildirilmiştir. İri agreganın ince agrega boyutuna getirilmesi esnasında kırılma olayının bu düzlemlerden gerçekleşerek reaktif malzemenin büyük kısmının agrega bünyesinden ayrılmasına neden olabileceği belirtilmiştir.

Alkali-agrega reaktivitesinin tespit edilmesinde kullanılan deney prosedürlerinin genelde petrografik analiz (ASTM C295, RILEM AAR-1.1) ile başlaması önerilmektedir. Petrografik analizde litolojik karakteristiği ve doku yapısı nedeniyle reaktif olup olmadığından şüphe duyulan karbonatlı kayaçların reaktivitesinin tespit edilmesinde kullanılan deney yöntemlerinden biri ASTM C586-11 (2011) “Kaya-Silindir Metodu” dur. Bu standart 35 mm uzunluğunda ve 9 mm çapında kayaç örneklerinin ilk boyları sabitlenene kadar suda, sonrasında da $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ’deki 1 M NaOH çözeltisinde bekletilmesini öngörmektedir. 28 günde %0,1’den daha büyük kaya-silindir genişmesi değeri, reaktivite potansiyeline dair bir işaret olarak değerlendirilmektedir.

Daha güvenilir nitelikteki ASTM C1105-08a (2016) “Alkali-Karbonat Reaksiyonu Nedeniyle Betonda Boy Değişimi” standardı uyarınca hazırlanan 75x75x285 mm boyutundaki beton prizmalar, 23°C ’de nemli ortamda bekletilmektedir. Bu numunelerin genişleme ortalaması 3 ay sonunda %0,015’i, 6 ay sonunda %0,025’i veya 12 ay sonunda %0,030’u aşıyorsa çimento-agrega kombinasyonunun potansiyel reaktiviteye sahip olduğu ifade edilir. Beton prizma yönteminin Kanada Standartları’nda yer alan versiyonu (CSA A23.2-14A, 2000) benzer numune boyutlarını kullanmakta fakat örnekler 23°C yerine 38°C ’de bekletilmekte ve genişleme limiti 1 yıllık süre sonunda %0,040 olarak tercih edilmektedir. İki yöntemde öngörülen karışımın alkali seviyesi ve agreganın gradasyon özellikleri arasında da farklılıklar bulunmaktadır.

Karbonatlı bileşenler içeren ve saha tecrübelerine göre alkalilerle hasar oluşturan reaksiyona girdiği bilinen agregaların reaktivitesinin tespit edilebilmesi için RILEM tarafından AAR-5 yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde 40x40x160 mm boyutunda mikrobar numuneler hazırlanmakta, karışımlarda 0/4 mm boyutunda ince agregaya yer verilmeden sadece 4/8 mm boyutunda iri agrega kullanılmaktadır. Mikrobar numuneleri 24 saat sonra kalıplardan alınmaktadır. Kalıp sökümünden itibaren 1 gün süreyle 80°C suda bekletilerek ilk boy ölçümleri alınan numuneler, takip eden 14 gün boyunca 80°C 1 M NaOH çözeltisinde bekletilir ve periyodik olarak ölçümleri alınır. AAR-5 deneyi

uygulanarak alkali-karbonat reaksiyonu kaynaklı genleşmelerin belirlenebilmesi için AAR-2 yöntemi uyarınca da ilave karışımların hazırlanması gerekmektedir. AAR-2 yönteminde sadece ince agreg a kullanılmaktadır ve dökümden sonra numunelerin saklandığı koşullar AAR-5 yöntemi için anlatılan koşullarla tamamen aynıdır. Sonuçlar değerlendirilirken AAR-5 deneyi kapsamında hazırlanan mikrob arların ve AAR-2 deneyinde hazırlanan harç çubuklarının 14 günlük genleşmeleri kıyaslanmaktadır. AAR-5 standardının metninde belirtildiği üzere alkali-silis reaksiyonu için beklenen durum agreganın tane boyutu azaldıkça genleşmelerin artmasıdır. Ancak 4/8 mm boyutundaki agreganın kullanıldığı AAR-5 deneyinde, 0/4 mm agreganın yer aldığı AAR-2 deneyine kıyasla daha yüksek genleşmelerin elde edilmesi, alkali-silis reaksiyonundan farklı bir reaksiyonun (alkali-karbonat reaksiyonu gibi) gerçekleştiğine işaret olarak değerlendirilmektedir. Böyle bir durumda da yine RILEM komiteleri tarafından geliştirilen beton prizma yöntemleri ile ilave deneyler önerilmektedir.

2.2 Reaksiyonun Tarihçesi

Alkali-agrega reaksiyonu kaynaklı problemlerin yapılarda ilk teşhisi 1920’li ve 1930’lu yıllara dayanmaktadır (Şekil 2.5) (Thomas et al., 2013). İlk hasar gören yapılar arasında ABD’nin California eyaletindeki bazı okul binaları, köprüler, kaldırımlar ve bir deniz yapısı yer almaktaydı. Gözlemlenen genleşme ve çatlaklar sonucu, California Eyaleti Karayolları Dairesi’nde çalışan Amerikalı mühendis Stanton, 1940 yılında “çimento ile agreg a arasında gerçekleşen reaksiyon sonucu betonda genleşme” başlıklı makalesinde alkali-silis reaksiyonunu dünyada açıkça ilk anlatan kişi olarak tarihe geçmiştir (Hobbs, 1988; Broekmans, 2002).



Şekil 2.5 Thomas Stanton ve bir parapet duvarda ASR kaynaklı hasar (Thomas et al., 2013).

Stanton'un laboratuvar çalışmasında agregada bulunan silisli minerallerden olan opal ile yüksek alkali içerikli çimento arasında nemli ortamda gerçekleşen reaksiyon sonucu harç çubuklarında hasar görülmüştür. Stanton'un çalışması sadece ASR'nin varlığını ortaya koymakla kalmamış, aynı zamanda ASR'yi önleme veya azaltma amacıyla günümüzde de sıklıkla tercih edilen iki yöntemin de temellerini atmıştır. Çimentonun eşdeğer Na_2O ($\text{Na}_2\text{O}+0,658\times\text{K}_2\text{O}$) içeriği %0,6'nın altına indiğinde ya da puzolan niteliğindeki ince taneli pomza yeterli miktarda kullanıldığında oluşan genleşmelerin ihmal edilebilir seviyelerde kaldığı ifade edilmiştir (Stanton, 1940; Hobbs, 1988; Thomas et al., 2006; Thomas et al., 2013).

Stanton'un bulgularından kısa bir süre sonra ABD'de U.S. Bureau of Reclamation (Meissner, 1941) tarafından yürütülen çalışmalar sonucu iki adet barajda ASR kaynaklı çatlaklara rastlanmıştır. Yine 1940'larda ABD'de yer alan diğer kuruluşlar (Army Corps of Engineers, Bureau of Public Roads, Portland Cement Association) çimento kompozisyonu, agregası tipi ve karışım oranlarının ASR genleşmesi üzerindeki etkisi konusunda incelemeleri ileriletmiştir (ACI 221.1R-98, 1998).

Birleşik Krallık'ta ASR konusundaki bilinçlenme, İngiltere'deki agregaların ilk defa 1947 yılında ABD'de ASR deneylerine tabi tutulması ile başlamıştır. Hem bu çalışma hem de ulusal bir kuruluşları olan Building Research Station'da yürütülen deneyler neticesinde 1970'li yılların sonlarına kadar Birleşik Krallık'ta belirgin alkali-agregası reaktivitesi gösterebilecek agregası kaynağına rastlanmamış ve ASR sadece yabancı ülkelerde oluşabilen bir beton dayanıklılığı sorunu olarak düşünülmüştür. ASR konusunda ülkedeki ilk uyarı, 1957-1961 yılları arasında Jersey'de inşa edilen Val de la Mare ağırlık barajının 1971 yılında harita çatlakları, jel sızıntısı ve parapette 13 mm'ye varan yer değiştirmeler göstermesiyle gelmiştir. Bu ciddi hasarı, 1976 yılında Plymouth'da elektrik trafolarının donatısız temel betonlarının hava etkisine maruz olan üst yüzeylerindeki çatlaklar izlemiştir (Sims, 1992).

Kanada'da ASR hakkındaki ilk saha olayına Montreal, Quebec'teki bir köprü yapısında rastlanmış ve Swenson tarafından 1957'de (Swenson, 1957a) raporlanmıştır. Bu çalışmanın en önemli göstergelerinden birisi, hasar gören yapılarda hasarın nedenini araştırmak için bugün de kullanılan temel yöntemlerden olan karot alma, ultrases hızı ölçme, karotlardan parlak ve ince kesitler hazırlama ve karotların arta kalan dayanımlarını ölçme gibi tekniklerin 1950'li yılların sonlarında da gerçekleştirilmekte olduğudur. Hasarlı köprüden alınan karotlarda çatlakları ve hava boşluklarını dolduran jele, agregası tanelerinde ve çimento hamurunda çatlaklara ve reaktif agregaların etrafında reaksiyon halkalarına rastlanmıştır. Bu köprü'nün yer aldığı Montreal'deki çörtlü kireçtaşlarının

alkalilerle reaktivitesi bu yıllarda ülkede yapılan tek ASR araştırması olurken, 1950'lerde ve 1960'larda daha çok alkali-karbonat reaksiyonuna odaklanılmıştır. ACR'nin dünyada ilk defa teşhisi yine Swenson tarafından ve yine 1957'de (Swenson, 1957b) Kanada'da gerçekleştirilmiştir (Grattan-Bellew, 1992a). Kingston, Ontario'da dökümden sonra 6 ay içerisinde kaplama betonlarında derzlerin kapanmasına neden olan aşırı genleşmeler meydana gelmiştir (Poole, 1992a). ACR kaynaklı hasarlara, ilerleyen yıllarda yine Kanada'da, ABD'nin çeşitli eyaletlerinde, Bahreyn, Irak, Çin, Arjantin, İspanya ve Brezilya'da (ve Avusturya'da sadece laboratuvar örneklerinde) rastlanmıştır (Jensen, 2012). Fakat ASR ile kıyaslandığında ACR'nin saha betonlarında yarattığı problemler oldukça nadirdir; bu nedenle ACR konusunda gerçekleştirilen araştırmalar da nispeten az sayıdadır (Thomas et al., 2013).

ASR açısından Avrupa'da en şanssız konumdaki ülkelerin başında Danimarka gelmektedir. Danimarka'da yer alan hem ince hem de iri agrega kaynaklarının çoğunun reaktif silis içerikli olduğu, en sık rastlananların ise flint ve opalli kireçtaşları olduğu belirtilmektedir. Danimarka'da ASR ile ilişkili olabileceği düşünülen ilk kaynak Stanton'un 1940'daki çalışmasından önceki bir tarihe, 1914'e dayanmaktadır (Poulsen, 1914). Fakat ilk sistematik çalışma 1951 yılında Nerenst'in raporuyla başlamış ve sonrasında önlem olarak düşük alkalili çimento ve/veya %2'den daha az reaktif bileşen içeren agrega kullanımı önerilmiştir. Fakat 1970'li yıllarda üretiminden sonra 4 yıl içerisinde hasar gören beton yollar, düşük alkalili çimento kullanımının her zaman yeterli bir önlem olamayabileceğini, buz çözücü tuzların ve dış kaynaklı diğer alkalilerin de reaksiyonun gelişmesine katkıda bulunabileceğini göstermiştir (Chatterji et al., 1992).

Alkali-agrega reaksiyonu alanındaki konferanslar (ICAAR) serisi 1974 yılında Danimarka'da başlamıştır. Zamanla hem katılımcı, hem yayın hem de bu yayınların temsil ettiği ülkelerin sayısında artışlar olmuştur. Diğer konferanslar ise İzlanda (1975), İngiltere (1976), ABD (1978), Güney Afrika (1981), Danimarka (1983), Kanada (1986), Japonya (1989), İngiltere (1992), Avustralya (1996), Kanada (2000), Çin (2004), Norveç (2008), ABD (2012) ve Brezilya'da (2016) düzenlenmiştir (Thomas et al., 2013).

Türkiye'de yer alan agregaların reaktivitesinden bahsedilen ilk kaynak 1975'te yayımlanmıştır. Yazıda ülkemizin agrega kaynaklarının yaklaşık %30'una varan oranının kimyasal bir deney yöntemi olan ASTM C289'a göre alkalilerle reaktivite göstermeye yatkın olduğu bildirilmiştir (Kocaçıtak, 1975). Fakat bu yıllarda kullanılan çimentoların çoğunlukla düşük alkalili ($<0,66 \text{ Na}_2\text{O}$ eşd.) olması neticesinde yapılarda herhangi bir hasar kaydına 1995 yılına kadar rastlanmamıştır. 1995'te Karayolları 2. Bölge Müdürlüğü mühendislerinin rutin incelemeleri sırasında 1980'lerin ortaları ile 1990'ların ortaları

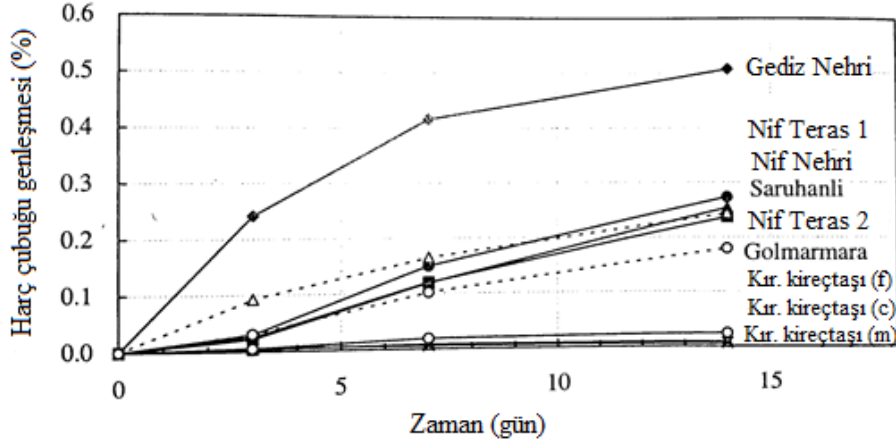
arasında inşa edilen altı adet köprüde (Naldöken, Turgutlu, Buca, Hilal 2, Halkapınar ve Turan) Şekil 2.6’da örnekleri görüldüğü gibi yaygın çatlaklar gözlemlenmiştir (Andiç-Çakır et al., 2012). Aynı yıl bu köprülerin incelenmesi, bakımı ve iyileştirilmesi çalışmaları Japon Jica firması tarafından üstlenilmiş ve neticesinde Gediz ve Nif nehirlerinin yataklarından alınan ince ve iri agregalarda bulunan reaktif silisin ASR’ye yol açtığı raporlanmıştır (Jica/KGM, 1996; Andiç-Çakır, 2007; Andiç-Çakır et al., 2012). Bu yıllarda çimento tesislerinin üretimde yaş sistem yerine kuru sistemi tercih etmesi ve ön ısıtma yöntemini uygulamaya başlaması sonucu üretilen çimentoların alkali içeriğindeki artışların (%0,81-0,97 Na₂O eşd.), ASR hasarlarının gelişmesinde önemli rol oynadığı düşünülmektedir (Andiç-Çakır et al., 2012).



Şekil 2.6 İzmir’de ASR hasarına uğramış köprü ayakları (Baradan vd., 2010).

İzmir’deki köprülerin betonlarında kullanılan agregalarla gerçekleştirilen hızlandırılmış harç çubuğu deneyi genleşmeleri (80°C, 1 M NaOH), köprülerden alınan karotların genleşmeleri (80°C, 1 M NaOH), karotların ve agregaların mikroyapı incelemeleri sonuçları, 2000 yılındaki Uluslararası Alkali-Agrega Reaksiyonu Konferansı’nda Katayama tarafından sunulmuştur. Bu çalışmada özellikle Ahmetli yöresinden alınan Gediz nehri yataklarındaki kumun, pesimum oranına yakın olduğu düşünülen %10 oranında camsı riylit ve dasit içerdiği ve harç çubuğu deneyinde Şekil 2.7’de görüldüğü üzere en yüksek reaktiviteye sahip olduğu görülmüştür. Köprülerde kullanılan reaktif dere agregalarının %3’ten fazla camsı riylit içeriğine sahip olduğu tespit edilmiş, kireçtaşlarında ise ASR veya ACR kaynaklı genleşme oluşmamıştır. Köprülerden alınan karotlar da 28 gün boyunca artan genleşme eğilimleri göstermiş, hatta harç çubuğu deneyinde elde edilen genleşmelerle benzer seviyelerde değerler elde edilmiştir. Betonların harçlara göre daha az geçirimli olması ve karotların çapının harç numunelerin en kesit boyutlarından daha yüksek olması, karot genleşmelerinin “yüksek” seviyelerde olduğu yorumunu beraberinde getirmiştir. Çalışma sonucunda sunulan dere

agregası yerine kırma kireçtaşı kullanılması önerisi, hasar görülen yıllardan günümüze kadar İzmir’de kabul görmüştür (Katayama, 2000).



Şekil 2.7 İzmir’de hasar gören köprülerde kullanılan agregaların hızlandırılmış harç çubuğu genişmeleri (Katayama, 2000).

Yine İzmir’de 1985 yılında Adnan Menderes Havaalanı’nda benzer agrega kaynakları kullanılarak üretilen betonlarla yapımı tamamlanan ilave pist ve taksi yollarında hasarlar oluşmuştur (Şekil 2.8). İnşasından yaklaşık beş yıl sonra yer yer derzlerin kapanmasına neden olan harita çatlakları gözlemlenmiş, 2004’te yolların yenilenmesi zorunlu hale gelmiş ve yeni betonlarda kırma kireçtaşı tercih edilmiştir (Andiç-Çakır et al., 2012, Ramyar, 2013).



Şekil 2.8 Adnan Menderes Havalimanı pist ve taksi yollarında ASR çatlakları (Andiç-Çakır et al., 2012, Ramyar, 2013).

Ülkemizde yer alan beton bileşenleri kullanılarak gerçekleştirilen araştırmalar, İzmir’deki (1) dere agregalarının yanı sıra Aliğa (2) (Çopuroğlu et al., 2007), Niğde (3)

(Korkanç and Tuğrul, 2004), Sivas (4) (Erik and Mutlutürk, 2004), Fırat havzası (5) (Aşık vd., 2004), Deriner Çoruh havzası (Sağlık vd., 2003) (6), Ankara (7) (Bektaş et al., 2004), Sakarya (8) (Yıldırım vd., 2011), Gölcük (9) (Gümüş, 2009), Kırklareli (10) ve Aksaray (11) (Mannasoğlu, 2010) yörelerinde de reaktiviteye sahip olabilecek agrega kaynaklarının olduğunu göstermiştir (Şekil 2.9). Bahsedilen bu kaynaklar, genellikle sahada rastlanan hasarlardan ziyade agregaların reaktivitesinin incelendiği deneysel çalışmalarda ortaya çıkarılmıştır (Andiç-Çakır et al., 2012; Ramyar, 2013).



Şekil 2.9 Türkiye’de ASR’ye neden olabilecek agregaların konumları.

Türkiye’de alkali-karbonat reaktivitesine dair bir tecrübeye rastlanmamakla birlikte bir yüksek lisans tezi çalışmasında 26 farklı dolomit agregası temin edilmiş, bunlar arasından sadece Zonguldak agregası, sadece iri agreganın kullanıldığı AAR-5 deneyinde sınır değer olan %0,1’den fazla genleşme göstermiştir. ACR açısından reaktif olduğuna dair bu belirtinin yanı sıra sadece ince agreganın kullanıldığı AAR-2 yönteminde de genleşmenin %0,1’i aşması, bu agregada ACR ile ASR’nin birlikte geliştiğini göstermiştir. Bu sonuç, farklı şekil ve kimyasal kompozisyonlara sahip ASR ve ACR ürünlerinin SEM ile mikroyapı incelemelerinde bir arada görülmesiyle de doğrulanmıştır (Alptuna, 2009).

3. ALKALİ-SİLİS REAKSİYONU

3.1 Reaksiyon Kimyası

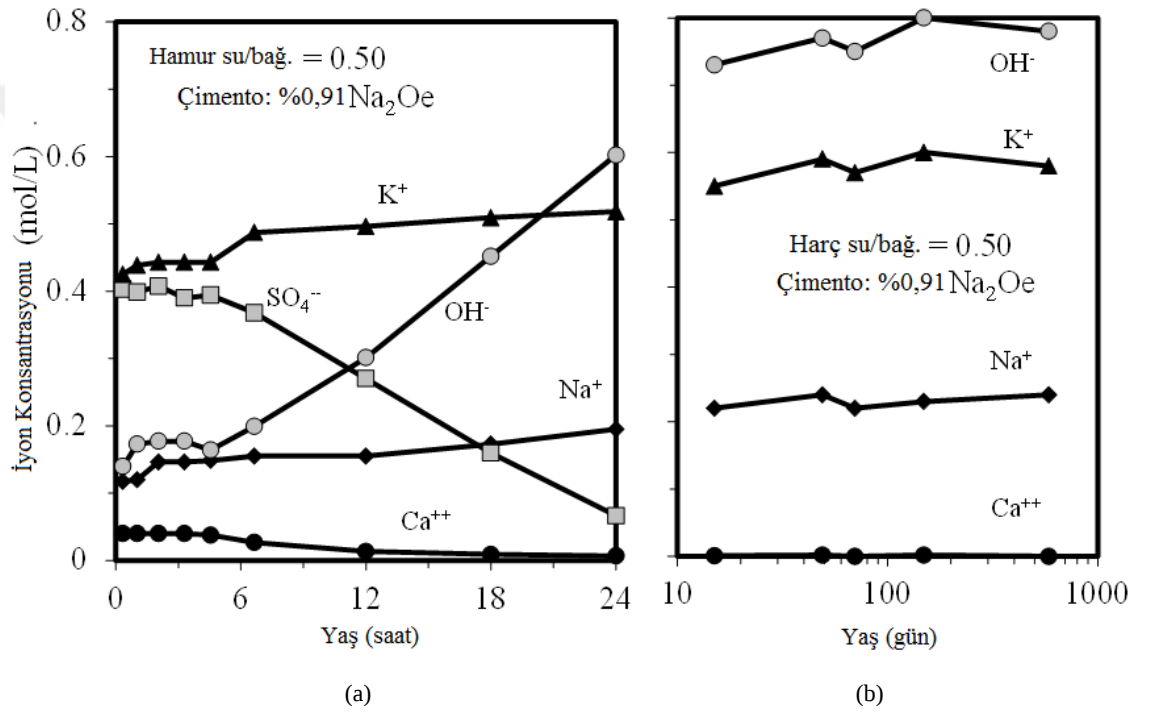
Betonda boşluk çözeltisi hem reaktif silis içeren agregayla hem de çimento hidratasyon ürünleriyle temas halinde bulunmaktadır. Dolayısıyla reaksiyonda OH^- ve alkali iyonlarını taşıyan faz konumundadır (Glasser, 1992). Boşluk çözeltisinin yüksek pH'ı daha fazla silisin çözünmesine yol açmakta, daha sonra da boşluk çözeltisindeki alkaliler çözünen silisle reaksiyona girerek alkali-silis jelini oluşturmaktadır (Lindgård et al., 2012). Bu başlık altında ilk olarak boşluk çözeltisinin temel özelliklerini incelemekte fayda vardır.

Portland çimentosu hamurunda hidratasyonun gelişimiyle birlikte oluşan katı fazda nispeten çözünmeyen nitelikteki kalsiyum silikat hidrat, kalsiyum hidroksit ve kalsiyum sülfö-alüminat(-ferrit) hidratlar gibi ürünler yer almaktadır. Bu katı faz, kapiler boşluklarda yer alan yüksek pH'lı boşluk çözeltisi ile kimyasal bir denge halinde bulunmaktadır. Na^+ , K^+ ve OH^- iyonlarının konsantrasyonuna bağlı olarak bu çözeltinin pH değeri genel olarak 12.5-13.5 arasında değişmektedir. Bu değer, hidrate çimento hamurundaki sıvı fazın oldukça bazik yapıda olduğu ve silisli minerallerden oluşan asidik kayaçların betonda agrega olarak kullanıldığında stabilitelerini kaybedebileceği anlamına gelmektedir (Mindness et al., 2003; Mehta and Monteiro, 2006).

Çimento kompozisyonunda yer alan oksitlerden alkali oksitler, diğerlerine kıyasla düşük miktarda bulunsun da yüksek oranda çözünür nitelikte olup boşluk çözeltisi kompozisyonunu önemli ölçüde tayin eden bileşiklerdir. Çimento hamuru (Şekil 3.1a) ve harçlarından (Şekil 3.1b) elde edilen boşluk çözeltisi analiz sonuçlarından güldüğü gibi yaklaşık olarak ilk 8 saat içerisinde boşluk çözeltisi, K^+ , Na^+ , OH^- ve SO_4^{2-} iyonlarından oluşan bir karışım halindedir. Daha sonra sistemde kullanılan alçının alüminat ve ferrit fazlarıyla reaksiyonunun önemli ölçüde tamamlanmasıyla SO_4^{2-} iyonu miktarında önemli ölçüde düşüş olmakta, sistemde kalan pozitif yüklü alkali katyonlarla yük dengesini sağlayabilmek için de çözeltiye artan miktarda OH^- iyonu katılmaktadır. İlk günden sonra boşluk sıvısı, yoğun bir alkali hidroksit çözeltisi haline gelmekte ve içerisinde yer alan diğer bileşenler ancak eser miktarda kalmaktadır (Diamond, 1983; Diamond, 1989; Chatterji, 2005; Thomas et al., 2013).

Barneyback and Diamond (1981) tarafından boşluk çözeltisindeki alkalilerin miktarının tespiti amacıyla gerçekleştirilen çalışmada, 1:2:0,5 oranlarında portland çimentosu, inert kum ve su kullanılarak harç karışımı hazırlanmıştır. Kullanılan çimentonun %0,30 Na_2O ve %0,93 K_2O içerdiği bildirilmiş ve sıvı fazın alkali miktarı, harcın 30 dakika-70 günlük yaşa sahip olduğu aralıkta periyodik olarak incelenmiştir.

Analizler öncesinde yapılan hesaplamalar sonucu çimentoda yer alan alkalilerin tamamının çözünmesi durumunda boşluk çözeltisinde 0,395 M K^+ ve 0,193 M Na^+ olmak üzere toplam 0,588 M alkali konsantrasyonunun yer alması gerektiği bulunmuştur. Yazarlar 70 günlük süre tamamlanınca klinkerde yer alan alkalilerin büyük bir çoğunluğunun boşluk çözeltisine salındığını, hatta yaptıkları ölçümlerde K^+ ve Na^+ konsantrasyonlarının sırasıyla 0,575 M ve 0,218 M değerlerine yükseldiğini bildirmişlerdir. Özellikle 49. ve 70. günler arasında gözlemledikleri ve beklenenin üzerinde olan bu artışı, çimento hidratasyon ürünlerinin kimyasal kompozisyonuna katılmaya devam eden serbest suyun miktarındaki azalmaya bağlamışlardır (Glasser, 1992).

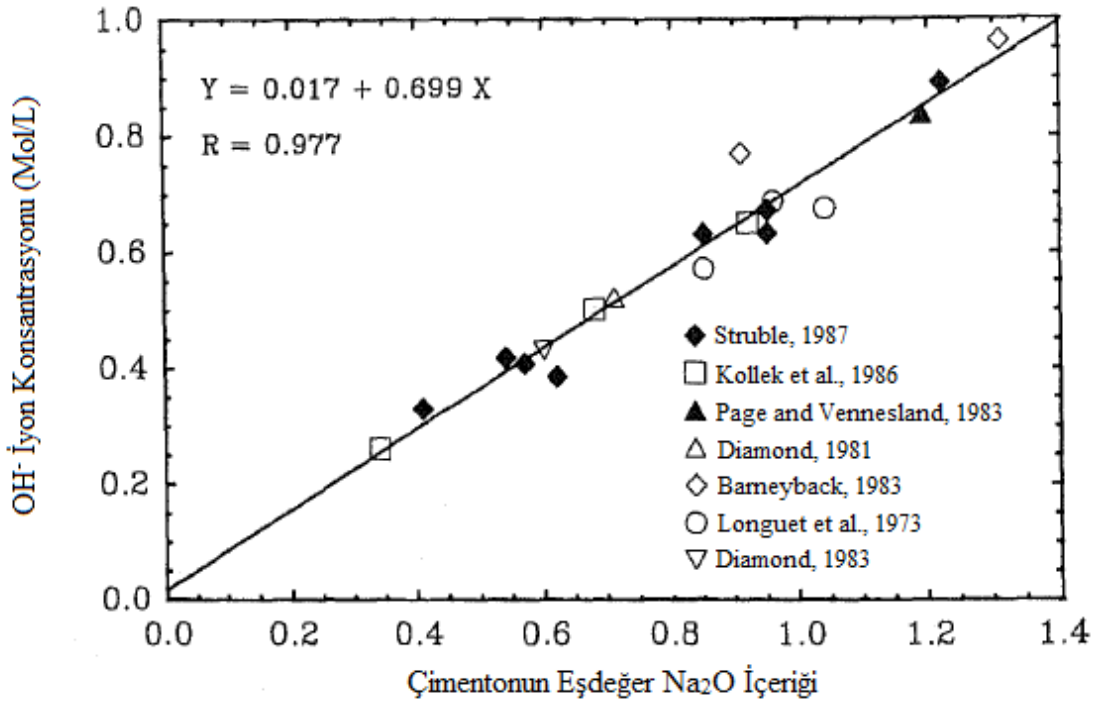


Şekil 3.1 Portland çimentosu (a) hamuru ve (b) harcında boşluk çözeltisi kompozisyonu (Diamond, 1983; Thomas et al.'dan, 2013).

Alkali konsantrasyonunun tespiti için gerçekleştirilen deneylerde birkaç mekanizma birlikte işlemektedir. Boşluk çözeltisindeki alkali miktarını arttırabilecek etmenler arasında portland çimentosundan hızlıca salınan alkaliler, ilave bağlayıcı malzemelerde bulunabilen ve daha geç yaşlarda salınabilecek alkaliler ve hidratasyon derecesindeki artışa bağlı olarak boşluk çözeltisindeki suyun azalması ve buna karşılık alkalilerin ölçülen konsantrasyonlarının artması sıralanabilir (Lawrence, 2004). Alkali miktarı tespitinde kimyasal absorpsiyonu ve hesaplanan değerdeki fiziksel artışı birbirine karıştırmamak için konsantrasyon değerlerinin karışım suyunun başlangıç değerine göre düzeltilmesi önerilmiştir (Barneyback and Diamond, 1981; Lawrence, 2004). Alkali

miktarını azaltıcı yönde rol oynayan etmenlerin çoğu ise puzolanların ASR'yi önlemesi ile ilgili öne sürülen mekanizmalar ile paralellik göstermektedir (Lawrence, 2004). Bu konu ayrıntılı olarak ilerleyen başlıklarda incelenecektir.

Diamond (1989) tarafından literatürde var olan verilerin birleştirilerek yayımlandığı bir çalışmada, çimento eşdeğer alkali içeriğinin boşluk çözeltisindeki OH^- iyonu konsantrasyonuna (mol/litre) etkisi araştırılmıştır. Var olan veriler 0,34-1,31 olmak üzere geniş bir aralıkta Na_2O eşdeğer içeriğine (%) sahip 19 farklı çimentoyu kapsamaktadır. Verilerin bazıları çimento hamurlarına bazıları ise harçlara ait olup tüm veri setinin ortak özelliği numunelerin 0,5 su/çimento oranına sahip olacak şekilde ve ilave bağlayıcı malzeme içermeden hazırlanmış olmasıdır. Şekil 3.2'de de görüldüğü gibi kimyasal denge sağlandıktan sonra boşluk çözeltisindeki OH^- iyonu konsantrasyonu, kullanılan çimentonun alkali içeriğinin bir fonksiyonu olarak gelişmektedir. Fonksiyonu temsil eden doğrunun eğimi çimentodaki %1'lik Na_2O eşdeğerine karşılık 0,7 mol/litre OH^- iyonu konsantrasyonuna eşittir.



Şekil 3.2 Çimento alkali içeriği ile boşluk çözeltisinde denge halinde OH^- iyonu konsantrasyonu arasındaki ilişki (Diamond, 1989).

Hidroksil iyonu konsantrasyonu kullanılarak hidrojen iyonu konsantrasyonunun hesapla yaklaşık tahmini mümkündür. Hidrojen iyonu konsantrasyonunun eksi logaritması olarak tanımlanan pH değeri, düşük alkalili çimentoyla hazırlanan betonun

boşluk çözeltisinde 12,7-13,1, yüksek alkalili çimento kullanıldığında ise 13,5-13,9 arasında değişmektedir (Hobbs, 1988).

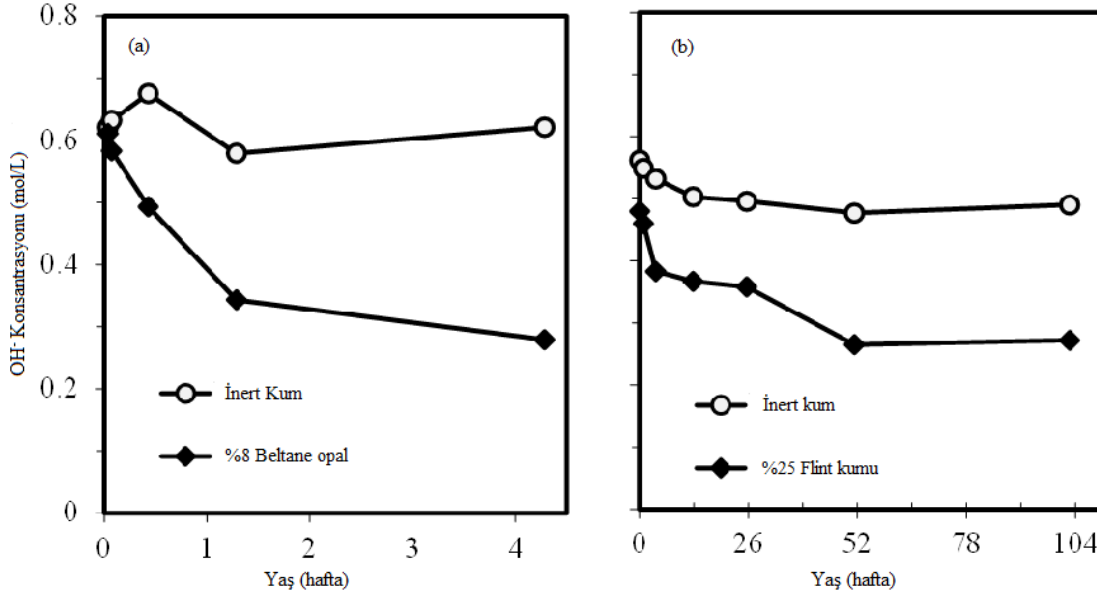
Genel ilke olarak boşluk çözeltisi kompozisyonunu (alkali içeriğini) etkileyen faktörler arasında numunenin yaşı ve saklanma koşulu, iri ve ince agrega türü (özellikle alkalilerle reaktivitesi), bağlayıcı türü ve kompozisyonu (özellikle alkali içeriği), karışım oranı (su/çimento oranı) ve deney için numune hazırlama yöntemi yer almaktadır. Ayrıca numunenin nem durumu ve varsa karbonatlaşma derecesi de kompozisyona önemli ölçüde etki edebilmektedir (Lawrence, 2004).

Helmuth (1993) tarafından gerçekleştirilen derlemede ise hidroksil iyon konsantrasyonunun belirlenmesine yönelik bir denklem geliştirilmiştir. Dış koşullara maruz kalmayacak şekilde saklanan toplam 31 çimento hamurunun ve harcın su/çimento oranı ve alkali içeriğinin hidroksil iyonu konsantrasyonuna etkisi araştırılmıştır. Elde edilen çoklu doğrusal regresyon ($R=0,94$) denklemi şu şekildedir:

$$[\text{OH}^-] = 0,339\text{Na}_2\text{O}\% / (\text{w/c}) + 0,022 \pm 0,06 \text{ mol/litre} \quad (3-1)$$

Bu denklem yukarıda Diamond'un (1989) 0,5 su/çimento oranı için önerdiği eşitlikle bulunan sonuçları da doğru tahmin etmektedir. Şekil 3.2'de tek parametre olarak çimento alkali içeriği yer alırken, bu denklem ilave bir parametre olarak su/çimento oranını da bünyesinde barındırmaktadır.

Sistemde reaktif agrega yer alması durumunda hidroksil ve alkali iyonları konsantrasyonlarının zamanla ASR gelişimiyle azalması beklenmektedir. Şekil 3.3a'da (Diamond et al., 1981) Beltane opal agregasının, Şekil 3.3b'de (Thomas, 1996) ise flint kumunun boşluk çözeltisinde OH^- konsantrasyonuna etkisi görülmektedir. İki grafik incelendiğinde flint agregası kullanıldığında alkali miktarındaki azalmanın daha yavaş gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum Beltane opal'in daha yüksek reaktiviteye sahip olduğunun göstergesidir. Her iki çalışmanın da sonuçları uyarınca kararlı duruma farklı yaşlarda fakat benzer hidroksil iyon konsantrasyonu değerlerinde ($0,27\text{-}0,28 \text{ M OH}^-$) ulaşıldığı belirtilmiştir. Diamond'a (1983) göre de alkali-silis reaksiyonunun devam edebilmesi için gereken hidroksil iyonu konsantrasyonunun sınır değeri en az $0,25 \text{ M}$ 'a karşılık gelmektedir (Thomas et al., 2013).



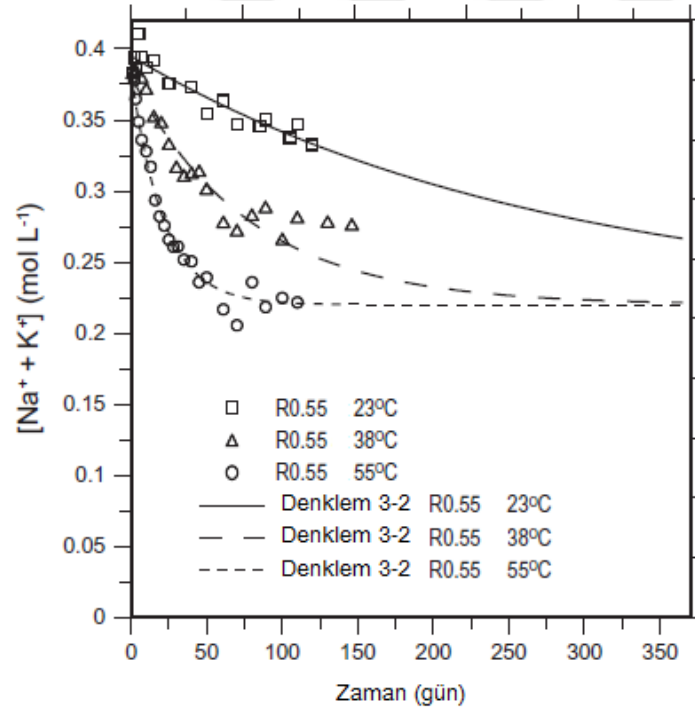
Şekil 3.3 Reaktif agrega tipinin boşluk çözeltisi kompozisyonuna etkisi a) reaktif Beltane Opal agregası (Diamond et al., 1981) b) reaktif flint kumu (Thomas,1996) (Thomas et al.'dan, 2013).

Taylor (1987) tarafından boşluk çözeltisinde alkali iyonu miktarının tahmini için geliştirilen matematiksel model, alkali iyonlarının boşluk çözeltisi ve çimento hidrasyon ürünleri arasında paylaştığı esasına dayanmaktadır. Bu modele göre portland çimentosunda yer alan alkalilerden Na^+ ve K^+ iyonlarının sırasıyla %40-60'ı ve %50-70'i nihai olarak boşluk çözeltisine salınmaktadır (Lawrence, 2004). Rivard et al. (2003) tarafından Kanada CSA A23.2-14A standardına (38°C , %100 BN, 52 hafta) göre gerçekleştirilen deneylerde beton prizmalarda çimentodan salınan alkalilerin ASR jelinin veya agregaların üzerine/içerisine yerleştiği, çimentonun hidrasyon ürünlerinin kimyasal kompozisyonuna katıldığı, boşluk çözeltisine nüfuz ettiği veya beton bünyesinden dışarıya sızabildiği ifade edilmiştir. Betonun yaşına bağlı olarak alkalilerin dağılımının incelendiği çalışmada numunelerden yüksek basınç altında çıkartılan boşluk çözeltileri atomik absorpsiyon spektrometrisi yöntemiyle analiz edilmiştir. Başlangıçta çimentonun bünyesinde yer alan alkalilerin yaklaşık %33'ünün birinci haftanın sonunda boşluk çözeltisinde kendisine yer bulduğu belirlenmiş, ilerleyen haftalarda ise boşluk çözeltisinin alkali içeriğinde genel olarak düşüşler gözlemlenmiştir.

Kim et al. (2015) tarafından yapılan çalışmada reaktif agrega içeren ve 23, 38 ve 55°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta bekletilen örneklerde boşluk çözeltisinin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Belirlenen alkali ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) konsantrasyonlarından yola çıkılarak herhangi bir t anında çözeltide kalan ve dolayısıyla reaksiyon oluşturabilecek alkalilerin miktarını belirten Denklem 3-2'deki genel matematiksel ifadeyi

geliştirmişlerdir. Denklemdaki 0,22 ifadesi, çalışmalarında gözlemledikleri mol/l cinsinden ASR'nin oluşması için gerekli sınır değeri ve t ise gün olarak zamanı göstermektedir. Bu denkleme ulaşmadan önce $\ln [Na^+ + K^+ - 0,22] - \text{zaman}$ grafiklerini elde eden araştırmacılar doğrusal nitelikli regresyon ilişkilerine ulaşmışlardır. Bu doğruların eğimleri hız sabitlerini simgelemekte ve Denklem 3-2'de de k_{exp} ile gösterilmekte olup hız sabitlerinin 23, 38 ve 55°C için değerleri sırasıyla $3,63 \times 10^{-3}$, $1,28 \times 10^{-2}$ ve $4,65 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ mertebesinde-dir. Denklemden alt indis olarak kullanılan "0" ifadesi ise $t=0$ (başlangıç) anını belirtmektedir. Şekil 3.4'e göre, çalışmada boşluk çözeltisi analizlerinden elde edilen bireysel verilerin ve Denklem 3-2 ile modellenen genel davranışların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu ifade edilebilir.

$$[Na^+ + K^+]_t = 0,22 + [Na^+ + K^+ - 0,22]_0 e^{-k_{exp} \cdot t} \quad (3-2)$$

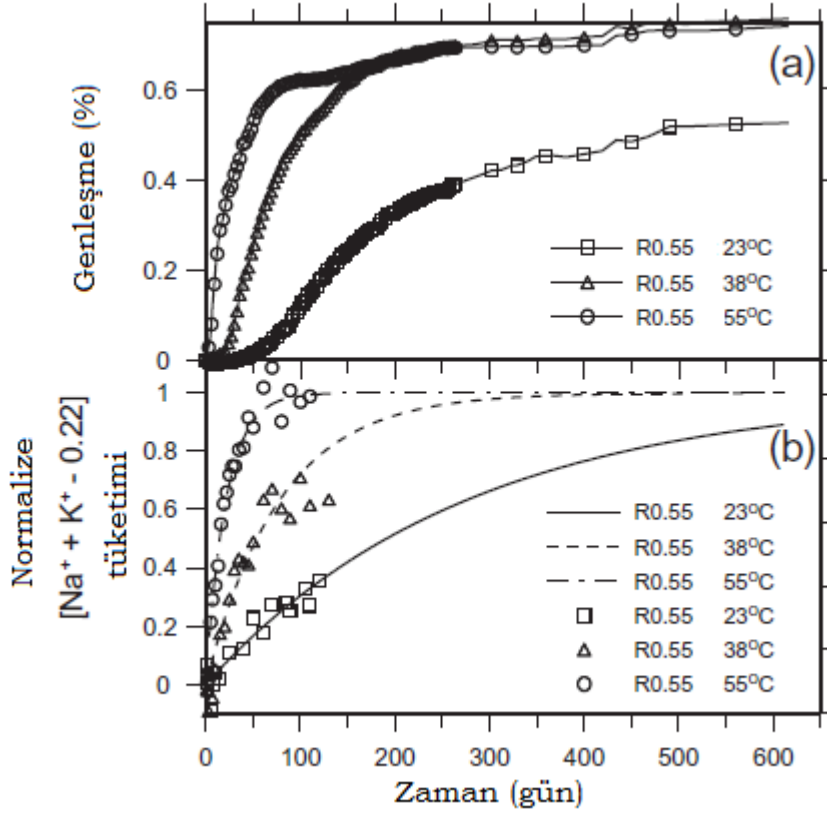


Şekil 3.4 Boşluk çözeltisindeki alkali konsantrasyonunun zamanla değişimi (Kim et al., 2015).

Aynı çalışmada başlangıç anındaki alkali iyonlarının miktarı $[Na^+ + K^+ - 0,22]_0$ ile Denklem 3-2 ile belirlenen t anındaki alkali iyonlarının miktarından $[Na^+ + K^+ - 0,22]_t$ yola çıkılarak tüketilen alkali iyonlarının miktarı normalize şekilde Denklem 3-3 yardımıyla hesaplanmıştır. Farklı sıcaklıklarda bekletilen numunelerin zamana bağlı genleşme eğilimleri (Şekil 3.5a) ile boşluk çözeltisindeki alkali tüketimi (Şekil 3.5b) eğilimlerinin birbirine çok benzer olduğu grafiklerde belirgindir. Bu durum, ASR'de ilk aşamadaki kimyasal reaksiyonlar ile ikinci aşamada gelişen jelin bünyesine su alarak

genleşme yaratması olguları arasında bir gecikme olmadığını göstermektedir. Dolayısıyla boşluk çözeltisi kimyasındaki değişim, potansiyel ASR genleşmelerinin tahmininde başarılı bir şekilde kullanılabilir.

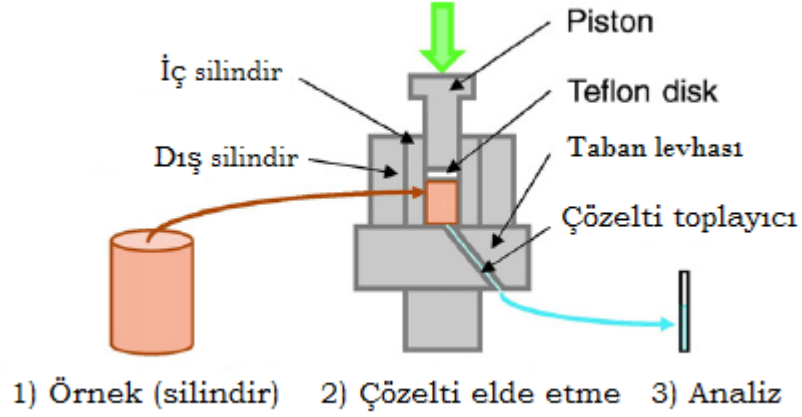
$$\text{Normalize alkali tüketimi} = \frac{[\text{Na}^+ + \text{K}^+ - 0,22]_0 - [\text{Na}^+ + \text{K}^+ - 0,22]_t}{[\text{Na}^+ + \text{K}^+ - 0,22]_0} \quad (3-3)$$



Şekil 3.5 Zamana bağlı genleşme (a) ve alkali tüketimi (b) davranışlarının karşılaştırılması (Kim et al., 2015).

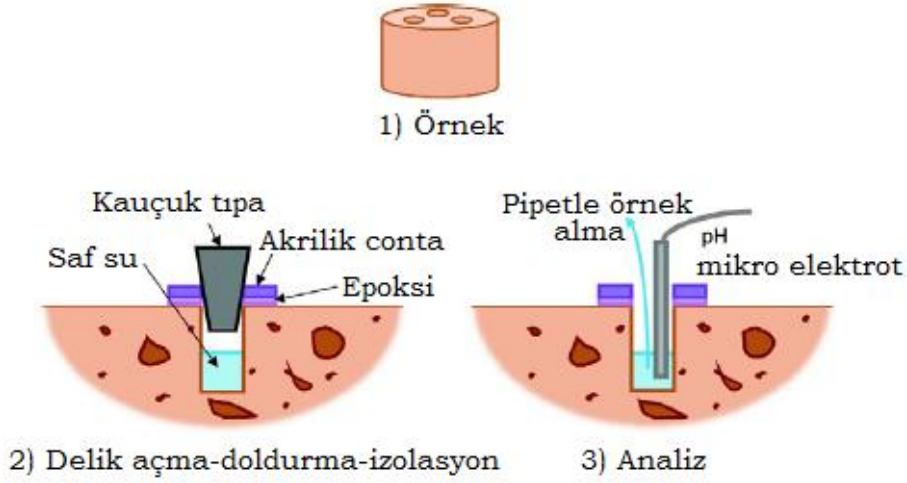
Boşluk çözeltisinin analizi için kullanılan yöntemlerden en güvenilir ve en yaygın olarak tercih edileni Şekil 3.6'da şematik olarak gösterildiği gibi çimento hamurlarından boşluk çözeltisinin yüksek basınç altında çıkartılıp süzülmesi (Böhm and Baetzner, 2008 – 260 MPa basınç ve 0,45 µm filtre; Hüngrer et al., 2012 – 320 MPa basınç ve 0,2 µm filtre) esasına dayanmaktadır (Glasser, 1992). Süzülen sıvılar atomik absorpsiyon spektrometrisi, plazma fotometrisi, iyon kromatografisi veya diğer hassas yöntemlerle incelenmektedir (Massazza, 2004). Bu yöntemde elde edilen sıvı miktarı özellikle su/bağlayıcı oranı çok düşük olan az boşluklu, yaşı çok fazla olan ya da yüksek miktarda agrega içeren örneklerde analiz için yetersiz olabilmektedir (Plusquellec et al., 2017). Bu yöntemin güvenilirliği hakkındaki en önemli kuşku ise elde edilen boşluk sıvısının

genellikle daha büyük boşluklardan çıkartılması ve bu sıvının küçük boşluklardaki sıvıyla benzer kompozisyona sahip olup olmadığıdır (Glasser, 1992).

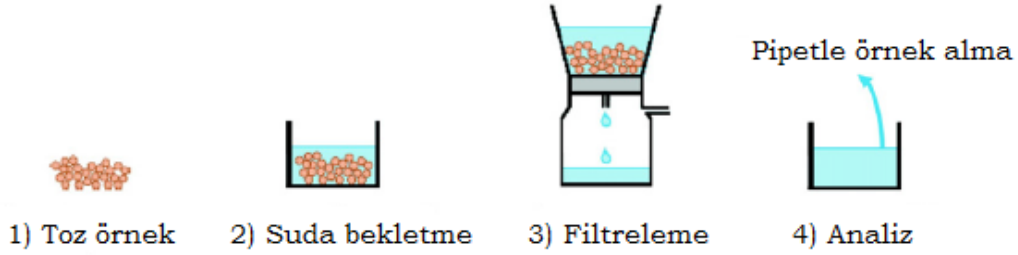


Şekil 3.6 Yüksek basınç ile boşluk çözeltisi elde edilmesi (Plusquellec et al., 2017).

Boşluk çözeltisi analizi için tercih edilen ve Şekil 3.7’de gösterilen diğer bir yöntemde 1) örnek suya doymun hale getirilmekte, 2) örneğin üst yüzeyinde kuru yöntemle 3-5 mm çaplı, 25-35 mm derinlikli delik açılmakta, 3) deliğe 0,2-0,4 ml hacminde saf su eklenip sonrasında hızlı priz alan epoksi, akrilik conta ve kauçuk bir tıpa ile izolasyonu sağlanmakta, 4) örnek %100 BN sağlayan ortama alınmakta ve 5) periyodik olarak deliğe yerleştirilen mikro pH elektrodu ile pH değişmez hale gelene yani denge durumu sağlanana kadar pH ölçümleri gerçekleştirilmektedir. İstendiği takdirde pipet yardımıyla su örnekleri alınıp element analizleri de gerçekleştirilebilir. Bu yöntemde ilk aşamada gerçekleştirilen suya doyurma sırasında alkalilerin bünyeden ayrılabilmesi karşılaşılan sıkıntılardandır. Boşluk çözeltisi analizi için geliştirilen son hasarlı yöntemde (Şekil 3.8) ise 1) örnek toz haline getirilmekte, 2) örnek bilinen miktarda saf su içerisine yerleştirilip yine denge hali sağlanana kadar bekletilmekte, 3) filtreleme ile sıvının ve katı tanelerin birbirinden ayrılması sağlanmakta ve 4) boşluk çözeltisinin analizi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde oluşabilen sıkıntılardan en önemlisi ise katı fazların da bazı durumlarda çözünerek ayrışabilmesidir. Bu paragrafta anlatılan her iki yöntemde de denge hali oluşana kadar bekleme zorunluluğu ortak bir dezavantajdır. Gelişen teknolojiyle birlikte son dönemde ortaya çıkan ve geliştirilmeye devam eden hasarsız bir yöntem ise döküm esnasında betona yerleştirilen fiber-optik sensörler ile pH belirlenmesidir (Plusquellec et al., 2017).



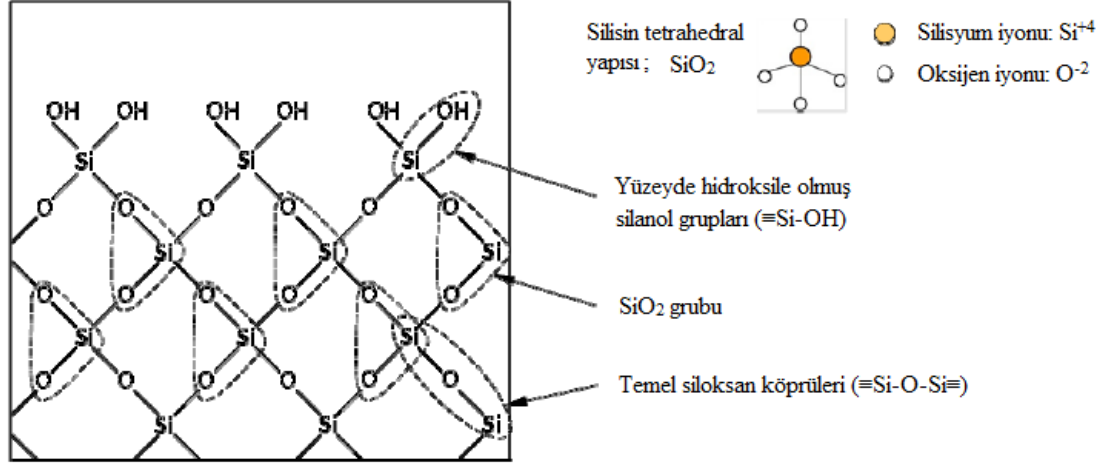
Şekil 3.7 Örneğe yerinde su ekleme ile boşluk çözeltisi elde edilmesi (Plusquellec et al., 2017).



Şekil 3.8 Örneğe dışarıdan su ekleme ile boşluk çözeltisi elde edilmesi (Plusquellec et al., 2017).

3.1.1 Reaksiyon mekanizması

Merkezde yer alan Si^{+4} iyonuna köşelerde bulunan O^{-2} iyonunun bağlanmasıyla oluşan SiO_4 tetrahedronu, kristal yapıdaki silis için temel yapı birimidir. Kristal yapıdaki kuvars (SiO_2), tetrahedronun 3-boyutlu olarak düzenli ve sürekli tekrarlanmasıyla oluşur. Bu temel birimde yer alan her bir oksijen iyonunun iki adet silisyum iyonu tarafından paylaşılmasıyla oluşan kristal yapının yüzeyinde, düzenli iç yapının aksine tam bir tetrahedron bulunması olanaksızdır. Dolayısıyla tamamlanamayan bağlar nedeniyle negatif bir elektriksel yük bulunmaktadır (Carman, 1940; Prezzi et al.'dan, 1997). Amorf yapıdaki silis de temel birim olarak tetrahedrona ve nötr durumda olmayan bir yüzey yapısına sahiptir. Amorf siliste düzenli bir yapı bulunmadığından daha çok boşluk ve yapı kusuruna, aynı zamanda daha büyük bir yüzey alanına ve yüksek reaktiviteye rastlamak mümkündür (Prezzi et al., 1997).



Şekil 3.9 Silisin yapısı (Thomas et al., 2013).

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere kristal yapıda sadece yüzeyde fazlalık durumunda O^- elektriksel yükü bulunmakta ve su ile reaksiyon sonucu asidik yapıda $\equiv\text{Si-OH}$ (silanol) gruplarına dönüşmektedir (Şekil 3.9). Genellikle yoğunluğu yüksek ve geçirimsizliği az olan bu tip agregaların reaksiyonu yavaş gelişmektedir. Amorf ya da zayıf bir kristal yapıya sahip agregalarda ise yüzeydekilere ilave olarak iç yapıdaki silisyum atomlarının bir miktarı da silanol gruplarına sahip olabilir. Hidroksil iyonu miktarı fazla değilse (alkali ve kalsiyum hidroksit bulunmayan su gibi), reaktif silis bünyesine bir miktar su alır fakat iç yapıdaki yoğun Si-O-Si (siloksan) çapraz bağlanması sayesinde önemli ölçüde şişme göstermeyebilir. Alkali çözeltilerinde yer alan yüksek hidroksil iyonu konsantrasyonu, reaktif silisin dış ve iç yüzey alanına ve çapraz bağlanmanın ne ölçüde tamamlandığına bağlı olarak şişme olayına ve silisin çözünmesine neden olur (Helmuth, 1993).

Silisin yapısındaki silisyum atomları, dört adet oksijen atomuyla zincir oluşturup (Q_4) çapraz bağ gösterebilir. Ya da bağın tamamlanma derecesinin düşük olmasına yol açacak şekilde 3, 2 veya 1 oksijen atomuyla da bağ yapabilir. Kuvars, kristobalit ve tridimitte ^{29}Si için MAS-NMR (Magic Angle Spinning-Nuclear Magnetic Resonance) spektrumları, sadece Q_4 piklerinin ve dolayısıyla üç boyutta eksiksiz bir polimerizasyonun varlığını ortaya koymuştur. Fakat opalde Q_4 piklerinin yanı sıra sadece üç adet oksijenle bağ anlamına gelen Q_3 piklerine de rastlanmıştır. Alkalilerle reaksiyona giren örneklerde ise silis yapısının zayıflamasına işaret olarak algılanan Q_4 piklerinde azalma, Q_3 ve Q_2 piklerinde artma görülmüştür (Kirkpatrick, 1991; Helmuth'dan, 1993).

ASR için geçerli reaksiyon modellerinde iki aşama bulunmaktadır (Glasser and Kataoka, 1981a; Poole, 1992b; Wang and Gillott, 1991; Garcia-Diaz et al., 2006; Castro, 2012):

(1) Asit-baz reaksiyonu: Silis minerallerinin yüzeyindeki elektriksel yükün nötr olabilmesi için boşluk çözeltisinde yer alan OH^- iyonlarının asidik silanol gruplarıyla reaksiyonu;



SiO_2 : Q_4 tetrahedronu

$\text{SiO}_{5/2}^-$: Q_3 tetrahedronu

Dolayısıyla Denklem 3-4'te yer alan reaksiyonun gelişmesi, bir adet bağın kırılmasına yol açmaktadır.

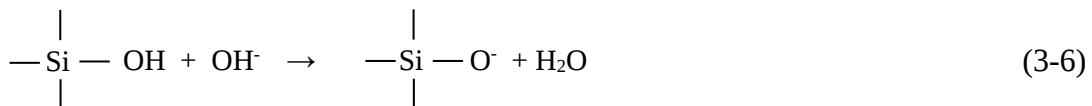
(2) Silisin çözünmesi: Hidroksil iyonlarının Q_3 tetrahedronlarına saldırısı sonucu $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, H_3SiO_4^- ve diğer küçük polimerler gibi silikat iyonlarının oluşumu;



Daha sonra silikat iyonlarının boşluk çözeltisinde yer alan katyonlarla birleşmesi ve alkali-silis jeline ($\text{CaO-Na}_2\text{O/K}_2\text{O-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$) dönüşmesi gerçekleşir.

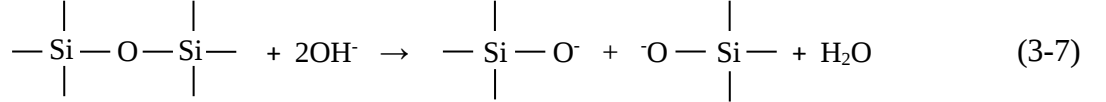
Denklem 3-5'ten anlaşılacağı üzere silisin çözünmesini kontrol eden en önemli faktör alkali iyonlarının değil, hidroksil iyonlarının varlığıdır. Reaksiyonun ismi her ne kadar alkali-silis reaksiyonu olarak anılsa da reaktif silis ile tepkimeye giren bileşen öncelikli olarak boşluk çözeltisinde yer alan hidroksil iyonlarıdır. Silisin çözünmesini etkileyen önemli faktörler arasında boşluk çözeltisinin pH'ı, silisin polimorf türü, kristal kafesin ne derecede kusurlu olduğu ve sıcaklık seviyesi sıralanabilir (Pedersen, 2004).

Hidroksil iyonlarının reaktif silis ile reaksiyonunu açıklayabilmek için yapılan öncü ve kapsamlı çalışmalardan biri Glasser ve Kataoka'ya (1981a) aittir. Yazarlar ilk aşamada asidik silanol gruplarıyla bazik yapıdaki boşluk çözeltisinin Denklem 3-6'ya göre reaksiyona girdiğini ifade etmiştir.



Reaksiyon ürününün negatif yüklü oksijen ucu, çözeltide yer alan alkali katyonlar (Na^+ , K^+) ile elektriksel olarak dengelenmektedir. Yazarlara göre Denklem 3-6'da ifade edilen asit-baz reaksiyonu, sadece H^+ iyonu ile Na^+ iyonunun yer değiştirmesiyle sonuçlanan ve silisin yapısında ciddi bir bozunma yaratmayan tipte bir reaksiyondur.

Boşluk çözeltisinin iyon konsantrasyonunun yeterince yüksek olması durumunda, fazla miktarda bulunan OH^- iyonlarının reaktif silisin içyapısına da nüfuz edebildiği ve siloksan köprülerini Denklem 3-7'ye göre yıkabildiği belirtilmiştir.



Siloksan köprüleri yıkıldıkça silisin yapısı oldukça zayıflamakta, silise daha fazla hidroksil iyonunun ve suyun nüfuzu kolaylaşmaktadır. Çok fazla miktarda siloksan köprüsü bozunması, silisin bağlarının tamamen kaybolup silikat iyonu şeklinde çözeltiye karışması ile sonuçlanabilir. Bu durumda daha önceden (-) yükü dengelemek için silisin yapısına katılan alkali iyonları da çözeltiye tekrar salınıp ileride gerçekleşecek reaksiyonlarda bir kez daha kullanılabilir (Shehata, 2001).

3.1.2 Jelin oluşumu ve genel özellikleri

Bir önceki başlık altında Denklem 3-5'te gösterilen silisin çözünmesi sonrasında oluşan ve çözünürlükleri yüksek H_2SiO_4^- ya da H_3SiO_4^- gibi silikat ürünleri, ortamda Ca^{+2} iyonlarının bulunmaması durumunda çözeltide iyon halinde kalabilmektedir. Hatta bu iyonların çözünürlük limitleri var olduğundan, bu limite yaklaşıldıkça agregadaki amorf silisin çözünmesi yavaşlamakta ve hatta reaksiyon durabilmektedir. Fakat portland çimentosu içeren betonda portlandit, Ca^{+2} iyonları için hep bir kaynak konumunda olduğundan, silikat iyonları, bağ kurarak poli-metal-silikatlara dönüşebilmektedir. Çekirdek boyutu kritik seviyeye ulaştığında nano-koloidal bir yapı, koloitlerin 2 ve 3 boyutta bir araya gelmesiyle de sürekli ve boşlukları doldurabilecek nitelikte ASR jelleri oluşmaktadır. Özetle, ASR jelinin oluşabilmesi için portlandit veya kalsiyum kaynağı olabilecek çözünür ürünlerin varlığı zorunludur (Rajabipour et al., 2015).

Farklı araştırmacıların alkali-silis jelinin kimyasal kompozisyonuna dair bulduğu bilgiler Poole (1992a) tarafından derlenmiştir. Verilerde önemli ölçüde değişkenlikler gözlenmiştir. Örnek olarak CaO içeriği sıfır ila %30 arasında değişmektedir. Jelin alkali içeriğindeki farklılık da Na_2O ve K_2O için sırasıyla %0-%17,9 ve %0-%13,9 olmak üzere geniş aralıklardadır (Pedersen, 2004).

Jones'a (1988) göre genleşme sürecini birbirleriyle etkileşim içinde olan iki alt grupta incelemek mümkündür:

- Jelin su ile birleşmesiyle oluşan hacimsel artış
- Jelin oluştuğu bölgeden ayrılarak farklı alanlara yayılması

Genleşme durumu, ancak jelin çimento hamuru fazında yayılması olayının jel oluşumundan daha yavaş gerçekleşmesi ile meydana gelebilir. Aksi takdirde oluşan ürün, içsel gerilme ve betonda hasar oluşturmada yayılabilir (Ben Haha, 2006).

Jelin hareket kabiliyetini ifade eden en önemli özelliği viskozitesidir. Oluşan jel ürününün viskozitesi, sahip olduğu su içeriğine bağlı olarak değişmektedir. İlk oluştuğu anda jel yüksek viskoziteye sahiptir. Jelin bünyesine su almasıyla birlikte zamanla viskozite düşmekte ve akışkan haldeki yapı yayılarak çimento hamurundaki çatlakları ve boşlukları doldurabilmektedir. Fakat çimento hamuru ile etkileşimi sonucu jelin bünyesine Ca^{2+} iyonları girdikçe viskozitede tekrar artış gözlenmektedir (Poole, 1992a; Ben Haha'dan, 2006).

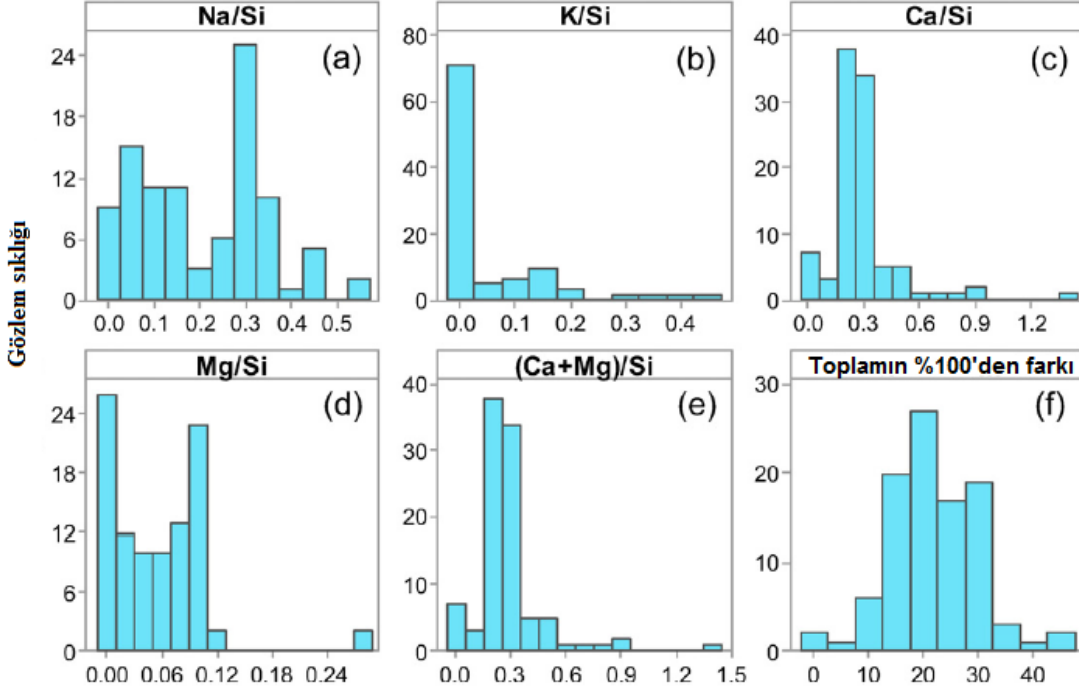
Thomas et al. (1991) tarafından yapılan çalışmanın sonuçları da bu bulguları desteklemektedir. Reaktif flint agregası kullanılan çalışmada uçucu kül içeren ve içermeyen (kontrol) örneklerde jel kompozisyonu incelenmiştir. Kontrol örneğindeki jelin Ca/Si molar oranı reaktif agrega tanesi içinde 0,3, hasar gören hamur fazındaki çatlaklarda ise 0,9 olarak bulunmuştur. Uçucu küllü betonda ise hem agregada hem de hamurdaki jel için Ca/Si molar oranı 0,3'tür. Reaktif agrega içerisinde/yüzeyinde oluşmaya başlayan ve başlangıçta kalsiyum içeriği düşük olan jel akışkan haldedir ve çatlaklara yol açmadan hamurda ilerleyebilir. Fakat kontrol örneğinde olduğu gibi hamurda Ca^{+2} iyonlarıyla temas ederse, Ca^{+2} iyonları jelde bulunan Na^{+}/K^{+} iyonları ile yer değiştirir ve jelin Ca/Si oranını artırır. Böylelikle jel yüksek viskoziteli hale gelir ve bünyesine su aldıkça hamurda hasara yol açmadan hareket edebilmesi olanaksız hale gelir. Na^{+}/K^{+} iyonlarının tekrar hamura salınması ise alkalilerin sonraki reaksiyonlarda bir kez daha kullanılabileceği anlamına gelmektedir (Shehata, 2001).

Regourd et al. (1981) tarafından yapılan çalışmada 1 yıl boyunca %100 bağıl nem ve 40°C sıcaklıkta bekletilen küp şeklindeki beton örneğe ek olarak Güney Afrika'daki bir köprüye ait 20 yıllık bir istinat duvarından alınan karotun mikro analizi gerçekleştirilmiştir. Her iki örnekte de reaktif agrega tanelerine yakın olan jele kıyasla hamurda ve büyük boşluklarda yer alan jelin kalsiyum içeriğinde artış ve potasyum içeriğinde düşüş oluşmuştur. Küp numunede ve karotta agregaya yakın alanda tespit

edilen jelin Ca/Si molar oranı sırasıyla 0,22-0,31 ve 0,45-0,47 aralığında olduğu açıklanmıştır. Çimento hamurunda ise bu değerlerin 1,2-1,3 ve 1,2-1,4 mertebesinde olduğu bildirilmiştir (Shehata, 2001).

Helmuth and Stark (1992), ASR jel kompozisyonuna dair verileri detaylı olarak derlemiş ve jellerin iki bileşenli bir yapı olarak ele alınabileceğini ifade etmişlerdir. Bileşenlerden bir tanesi değişken kompozisyonlara sahip olabilen alkali-kalsiyum-silikat yapısı, diğeri ise neredeyse sabit kompozisyona sahip alkali-silikat yapısıdır. Genel olarak alkali-silikat yapısının kompozisyonu %17 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) ve %83 SiO_2 iken, alkali-kalsiyum silikat yapısı %6,6 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$), %52,6 CaO ve %40 SiO_2 'den oluşmaktadır. Fakat Diamond (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ASR jelinin kimyasal kompozisyonunun oldukça karmaşık ve değişken olduğu, Helmuth and Stark (1992) tarafından yapılan modellemenin faydalı olduğu fakat olası tüm jel kompozisyonlarını temsil edemeyeceği ifade edilmiştir (Hou et al., 2004).

Alkali-silis jelleri, jelin temel bileşeni olan silisyum, jelin ağ yapısını bozan/değiştiren alkaliler (sodyum ve potasyum) ve alkali-silikat zincirlerinin çapraz bağlanmalarına yardımcı olan toprak alkali metallerin (kalsiyum ve magnezyum) oluşturduğu ve bileşimlerinde su da bulunan karmaşık yapılardır. Literatürde farklı çalışmalarda yer alan ve SEM/EDS analizleri ile belirlenmiş olan 100 farklı ASR jel kompozisyonlarına dair veriler 2017'de yayımlanan bir makalede derlenmiş ve Şekil 3.10'daki sonuçlar ortaya çıkmıştır. Grafikler, jel yapısında rastlanan Na, K, Ca ve Mg elementlerinin, temel bileşen olan Si'ye atomik oranları şeklinde sunulmuştur. Verilere göre jel yapısında sodyumun potasyuma kıyasla genellikle daha yüksek miktarlarda bulunduğu belirlenmiştir. Magnezyum miktarının kalsiyuma kıyasla çoğu jel yapısında eser miktarda kaldığı ve her iki çift değerlikli katyonun jelin davranışına etkisinin benzer olmasının beklenebileceği ifade edilmiştir. Al/Si atomik oranının da çoğunlukla çok düşük miktarlarda ($<0,05$) kaldığı görülmüştür. İncelenen jellerin kompozisyonunda yer alan elementlerin ağırlıkça %'leri toplamının 100'den farkı Şekil 3.10f'de gösterilmiş, bu farkın da jelde yer alan kimyasal olarak bağlı sudaki (ve OH gruplarındaki) oksijeni temsil ettiği ifade edilmiştir (Gholizadeh-Vayghan and Rajabipour, 2017).



Şekil 3.10 Literatürde çeşitli çalışmalarda rastlanan ASR jellerinin kimyasal kompozisyonlarına dair verilerin dağılımı; (a) – (e) grafiklerinde x eksenlerindeki veriler atomik oranlar cinsindendir (Gholizadeh-Vayghan and Rajabipour, 2017).

ASR sonucu oluşan ürün tüm dünyada “alkali-silis jeli” olarak adlandırılırsa da amorf, yarı kristal veya kristal yapıdaki farklı birçok morfolojiye ve çeşitli kompozisyonlara sahip silikat türü, reaksiyonun gerçekleştiği örneklerde mikroskop altında gözlenebilmektedir (Locati et al., 2012). Aslında kristal yapıya dönüşümün ilerleyen periyotlarda ve ancak kristalin gelişebilmesi için yeterli boş alanın mevcut olduğu (agregayla temas halindeki hava boşlukları gibi) durumlarda gerçekleştiği bildirilmektedir (Lu et al., 2006a). Cole and Lancucki (1983) jelin 110°C’de kurutulması ve sonra da 12 gün oda sıcaklığında bekletilmesiyle kristal hale dönüşümün gerçekleştiğini bildirmiştir (Peterson et al.’dan, 2006). Sahadaki yapılarda betonların yeterli olgunluğa erişmesi ile jelin kristal hale geldiğini bulan yazarlar arasında Šachlová et al. (2010) ve Peterson et al. (2006) yer almaktadır. Šachlová et al. (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 50-80 yıllık köprü yapısında CaO içeriğinde yükselme görülen yarı kristal yapıdaki jele rastlanmıştır. Peterson et al. (2006) tarafından 1890’larda inşa edilen batarya yapısından alınan karotta ise EDX (Enerji Dağılımlı X-Işını Analizi) ölçümlerine göre amorf jelin, kristal jele kıyasla daha düşük K ve Na içeriklerine ve daha yüksek Ca içeriğine sahip olduğu ifade edilmiştir. Yazarlar jel için elde ettikleri oksit yüzdeleri iyon içeriklerine dönüştürmüş ve kristal jelin mineral formülünü $(Ca,Na,K)_{5,4}(Si,Al)_{9,0}O_{23}(H_2O)_{9,8}$ olarak belirlemiştir. Ayrıca amorf jelin kimyasal kompozisyonundaki varyans daha yüksek çıkmıştır. Literatürde yer alan çalışmalarda

ilerleyen dönemlerde kristal hale dönüşümün genleşmeye etkisinin olup olmadığı konusunda ise net bilgiler bulunmamaktadır (Lu et al., 2006a).

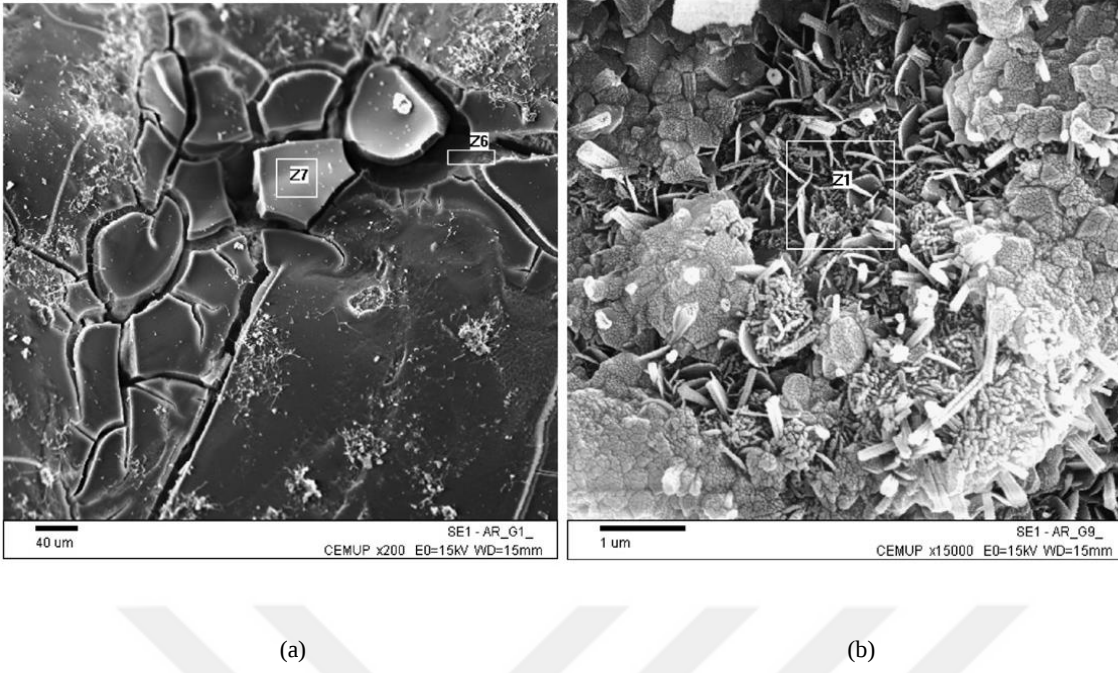
Fernandes et al. (2007) Portekiz’de 1960’larda inşa edilen bir barajda ASR nedeniyle parça kopmaları ve beton yüzeyine jel sızıntısı oluşan bölgelerden numuneler toplamışlardır. Konik parça kopmasının gerçekleştiği bölgelerden birinin yüzeyinden alınan numunede beyaz-sarımsı bir katı ürüne (Şekil 3.11a) ve yarı saydam-akışkan bir ürüne (Şekil 3.11b) rastlanmıştır. Çalışmada rastlanan diğer ürünler arasında yer alan düzgün yüzeyli, amorf ve büzülme çatlaklarına sahip olan masif yoğun jel Şekil 3.12a’da, kristal haldeki gül benzeri oluşum ise Şekil 3.12b’de görülmektedir. Baraj yapısının sadece yüzey bölgelerinden alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilen EDS analizlerine göre farklı alkali-silis jellerinin kimyasal kompozisyonunda silisyum miktarı %85,7-90,6, potasyum miktarı %5,3-7,4 ve sodyum miktarı %1,9-4,3 aralığında değişmektedir. Tüm örneklerde potasyum içeriği, sodyum içeriğinden yüksek çıkmıştır. Bazı örneklerde ilave olarak kalsiyum (%0,2-4,7) ve alüminyuma (%0,2-6,1) da rastlanmıştır.



(a)

(b)

Şekil 3.11 Konik parça kopması oluşan bölgenin üst yüzeyinde bulunan jelin stereo mikroskop görüntüleri
a) beyaz-sarımsı katı ürün (0,6x) b) viskoz ve yarı saydam ürün (1,6x) (Fernandes et al., 2007).

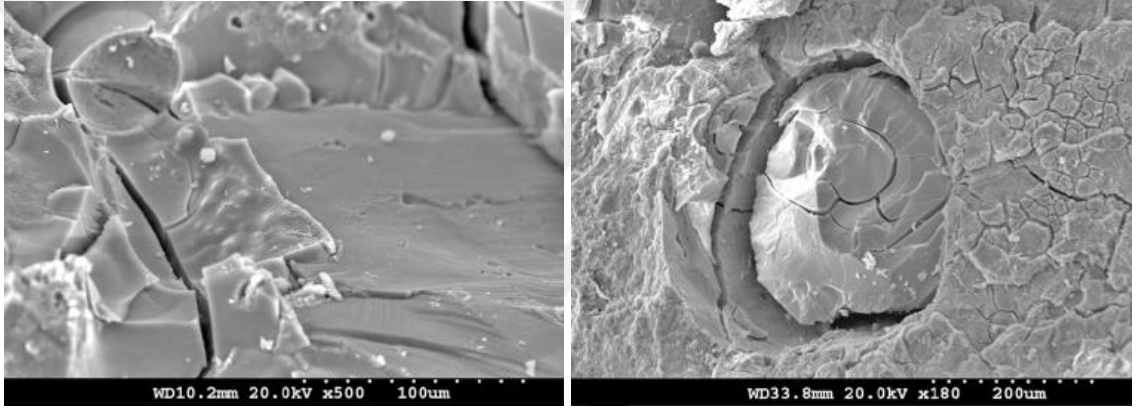


Şekil 3.12 a) Beton yüzeyine sızmış olan düzgün yüzeyli amorf jel ürününün ve b) gül benzeri yassı kristallerin SEM görüntüleri (Fernandes et al., 2007).

Gavrilenko et al. (2007) İspanya'daki iki adet barajdan alınan karot örneklerde ve bu barajlarda kullanılan agregalarla ASTM C1260'a uygun olarak hazırlanan ve çözeltide 49 gün bekletilen harç örneklerinde gelişen ASR jellerinin özelliklerini karşılaştırmıştır. Agregalarda reaktiviteye yol açan bileşenin yavaş/geç genleşme gösteren mikrokristalin ve/veya deforme kuvars olduğu bildirilmiştir. Betonlardaki SEM görüntülerinde ASR jelinin, agrega tanelerinde kuvars minerallerinin yüzeyinde çatlaklara sahip katmanlar oluşturabildiği görülmüştür (Şekil 3.13a). Ayrıca çimento hamurundaki hava boşlukları içerisinde de jele rastlanmıştır (Şekil 3.13b). İlk geliştiği esnada yoğun bir yapı oluşturan jel, nihai olarak lepisphere kristalleriyle kaplı (Şekil 3.13c) veya gül (Şekil 3.13d) şeklinde dokuya sahip olabilmektedir. Hızlandırılmış harç çubuklarında ise en sık rastlanan yapı, düzgün ve çatlaklı yüzeye sahip yoğun haldeki jeldir. Bununla birlikte sırasıyla Şekil 3.14a ve 3.14b'de görülen gülsü ve süngersi oluşumlara da rastlanmıştır. Yoğun ve gözenekli katmanların oluşturduğu birleşik yapı (Şekil 3.14c) ve farklı dönemlerde geliştiği anlaşılan ve buna rağmen tamamı yoğun bir morfolojiye sahip katmanların oluşturduğu yapı (Şekil 3.14d) diğer çeşitler arasındadır.

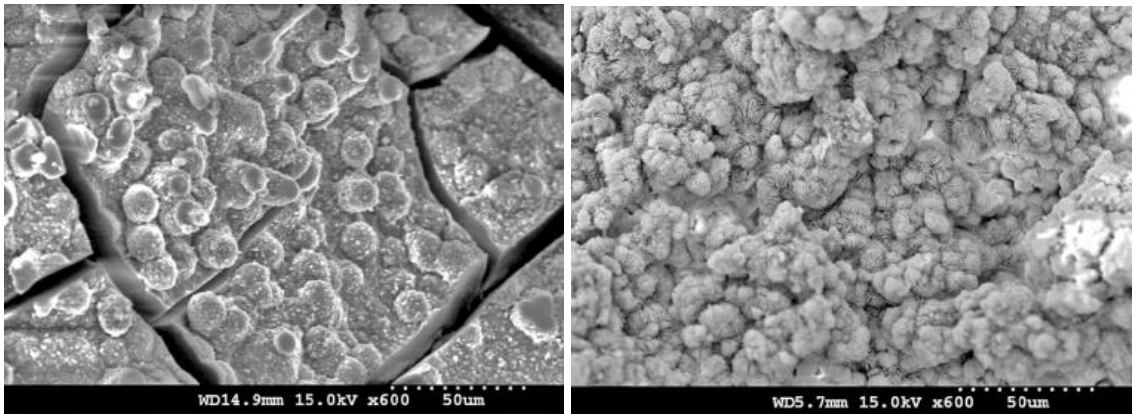
Gavrilenko et al.'ın (2007) çalışmasında EDX ile 15 adet harç çubuğunda toplam 67 jelin ve 10 adet beton örnekte 55 jelin kimyasal analizi de gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.15 ve 3.16'daki üçlü diyagramlarda yer alan oksitlerin toplamı %100 olacak şekilde normalizasyon uygulanmıştır. Betondaki jellerle harç çubuklarındaki jeller ayrı ayrı

grafiklere işaretlendiğinde önemli farklılıklar ortaya çıkmıştır. Şekil 3.15 uyarınca genel olarak harçlardaki jellerin alkalice zengin ve kalsiyumdan yoksun olduğu görülmüştür. Yazarlara göre saha betonlarında alkali içeriği sınırlıdır; fakat kalsiyum, portlanditin çözünmesi aracılığıyla sürekli olarak boşluk çözeltisine dahil olabilir. Böylece ilerleyen dönemlerde Ca içeriği yüksek ve genleşme yeteneği düşük jele dönüşüm beklenebilir. Fakat hızlandırılmış harç çubuğu deneyinde sodyum hidroksit çözeltisinden gelen alkali nüfuzu, portlanditin çözünmesinden çok daha hızlı gerçekleşmekte ve jeller alkalice zengin olmaktadır. Ayrıca çözeltideki yüksek alkali kaynağı, silisli agreganın çözünmesini hızlandırmakta ve reaksiyon durmadan hızlı bir şekilde gelişmeye devam etmektedir. Şekil 3.16'ya göre ise betonlarda K_2O ile Na_2O içerikleri eşit seviyelerdeyken, harç numunelerinde Na_2O içerikleri oldukça yüksektir. Çalışmada jel morfolojisi ile jelin kimyasal kompozisyonu arasında korelasyon bulunamamıştır.



(a)

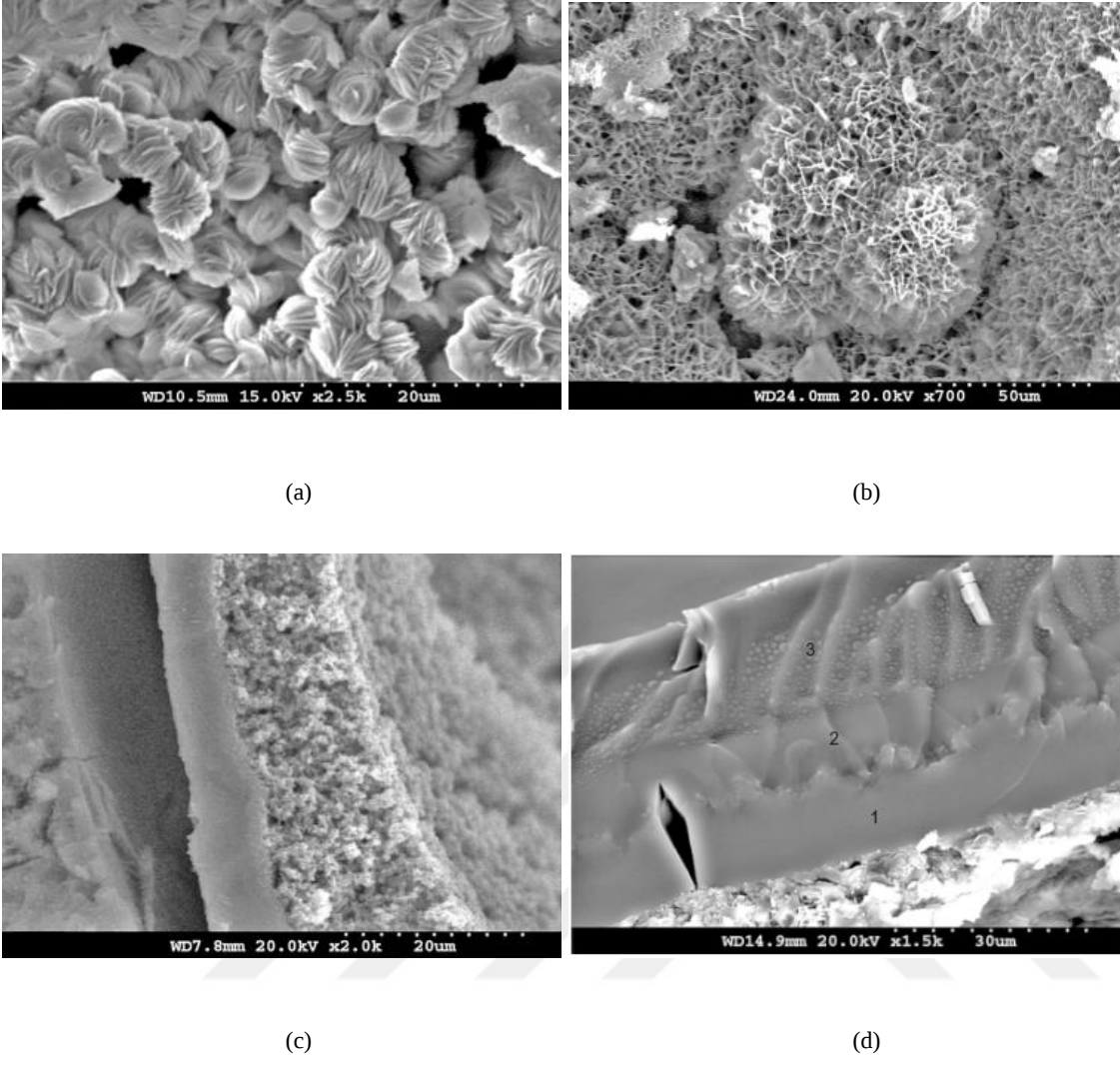
(b)



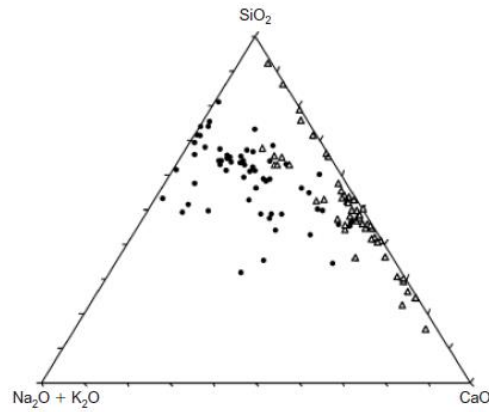
(c)

(d)

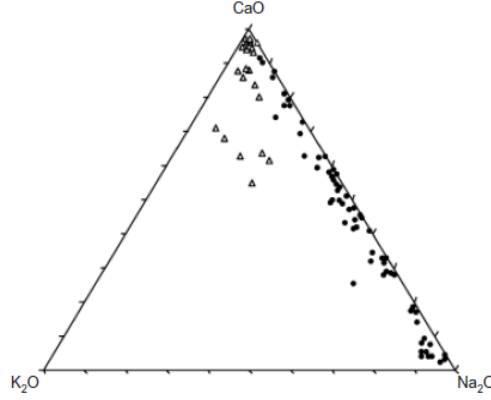
Şekil 3.13 Betonlarda a) kuvars minerali üzerinde, b) hava boşluğunda yoğun halde, c) lepisphere kristalleri ile kaplanmış ve d) gülsü ASR jellerinin SEM görüntüleri (Gavrilenko et al., 2007).



Şekil 3.14 Harç çubuklarında a) gül şeklinde, b) süngersi dokulu, c) iki katmanlı ve d) üçü de yoğun yapılı olan fakat farklı dönemlerde oluşmuş ASR jellerinin SEM görüntüleri (Gavrilenko et al., 2007).



Şekil 3.15 ASR jellerinde SiO_2 , CaO ve $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ bileşenlerinin birbirlerine kütlece oranı (siyah daireler-harç çubukları, üçgenler-beton örnekleri (Gavrilenko et al., 2007).



Şekil 3.16 ASR jellerinde CaO, Na₂O ve K₂O bileşenlerinin birbirlerine kütlece oranı (siyah daireler-harç çubukları, üçgenler-beton örnekleri (Gavrilenko et al., 2007)).

Laboratuvar ortamında 12,7 mm x 12,7 mm x 127 mm boyutlarında üretilip %95 bağıl nem sağlayan kabinde bekletilen prizmatik sentetik jellerle gerçekleştirilen bir çalışmada jellerin Ca/Si, Na/Si ve K/Si atomik oranlarının, jellerin serbest genleşmelerine etkisi incelenmiştir. Silisin düzenli ağ yapısını bozan sodyum ve potasyum iyonlarının artışı, genleşme miktarını arttırmıştır. Fakat Ca/Si oranının düşük ya da yüksek miktarlarda olması genleşmeleri azaltırken orta seviyede Ca/Si oranlarında genleşme maksimum seviyelere ulaşmıştır. Yazarlar düşük Ca/Si oranlarında yüzeydeki Si—O—gruplarından kaynaklanan (-) yükün Ca⁺² iyonları ile nötr hale gelebildiğini ve su alıp şişme eğiliminin azaldığını belirtmişlerdir. Yüksek Ca/Si oranlarında ise etki yüzeyden tüm yapıya dek genişlemekte, çapraz bağlanmayı arttırabilen ve dolayısıyla ağ yapısını kuvvetlendiren Ca⁺² iyonları jelin şişme yeteneğini kısıtlamaktadır. Orta seviyede Ca/Si oranlarında ise kalsiyum, Si—O⁻ ... Na⁺ yüzey yapılarının Si—O⁻ ... Ca⁺² ... O—Si bağlarına dönüşümüne yani iyon değişimi reaksiyonuna neden olmaktadır. Alkalilerin, jelin boşluk çözeltisine tekrar katılmasına neden olan bu reaksiyon, jelin yarattığı ozmotik basıncın ve su almaya eğiliminin önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır (Gholizadeh-Vayghan and Rajabipour, 2017). Diğer bir çalışmada jellerin serbest genleşme davranışlarının yanı sıra reolojik özelliklerinin de önemli olduğu açıklanmıştır. Bugüne dek yapılan çalışmalarda elde edilen SEM görüntülerinde ASR jelinin harekete başlamadan dahi hasar yaratabildiği ve dolayısıyla Newtonyen olmayan bir akışkan olarak nitelendirilebileceği belirtilmiştir. Bitişindeki kapiler boşluklara ya da mikro çatlaklara doğru hareket etmeden önce jelin ne ölçüde sıkıştırma basıncına dayanabileceği bir başka ifadeyle eşik kayma gerilmesi önem kazanmaktadır. Hareket bir kez başladıktan sonra oluşan bu içsel basınç, eşik kayma gerilmesinin belirli oranlarına kadar kademeli olarak azalmaktadır. Jelin şişmesi ile oluşacak basıncı belirleyen diğer özellik, jelin genleşme yeteneğini belirleyici konumda olan boşluk çözeltisindeki Ca⁺², Na⁺, OH⁻, H₂SiO₄²⁻, H₃SiO₄⁻ iyonlarının molar konsantrasyonları toplamı ve dolayısıyla yarattıkları

ozmotik basınç seviyesidir. Hem eşik kayma gerilmesi yüksek hem de hidrofilik ve genleşme yeteneği fazla jeller en fazla hasara neden olabilenlerdir. 4 farklı kompozisyonda üretilen ve laboratuvar ortamında $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de bekletilen sentetik jellerin 28 güne kadar farklı yaşlarda paletli reometre ile reolojik özelliklerini, basınçlı (4-10 MPa) filtrasyon ile boşluk çözeltisi pH'ını ve kompozisyonunu inceleyen araştırmacılar, yine yüksek Na/Si oranlı ve orta seviyede Ca/Si oranlı jellerin yaratacağı şişme kaynaklı basıncın en yüksek olacağını belirtmişlerdir (Gholizadeh-Vayghan et al., 2016).

3.1.3 Genleşme mekanizması

Reaksiyonlar sonucu oluşan alkali-silis jelinin sertleşmiş betonda genleşmeye neden olduğu kabul görmekle birlikte, şişme ve çatlama mekanizması hakkında ortaya atılan birçok farklı görüş bulunmaktadır (Castro, 2012). Hansen'in (1944) hipotezinde reaktif agreganın neden olduğu basıncın şişme kaynaklı değil ozmotik nitelikte olduğu belirtilmiştir. Şişme olayında yüksek alkalineteye sahip çözelti, reaktif taneciğin içerisine doğru hareket etmektedir. Fakat ozmoz ile kastedilen çözücü faza karşı geçirgen olan fakat çözünen faza karşı geçirgen olmayan yarı-geçirgen bir membranın var olmasıdır. Hansen'in (1944) teorisine göre reaktif agregayı çevreleyen sertleşmiş çimento hamuru yarı-geçirgen bir membrandır. Bu membran yüksek pH'lı boşluk çözeltisinin agregaya difüzyonuna izin verirken sıvı haldeki sodyum silikatın dışarıya çıkışını engellemektedir. Böylelikle reaksiyon alanında sertleşmiş çimento hamuruna karşı bir basınç oluşmaktadır (Shehata'dan, 2001).

McGowan and Vivian (1952), ozmotik basınç teorisine eleştiri getirmiştir. Yazarlar, geçerli mekanizmanın gerçekten ozmotik basınç olması durumunda, ozmotik hücre içerisindeki basıncın artmasıyla çevreleyen hamur fazında oluşan ilk çatlamanın ozmotik basıncın sönümlenmesine ve daha fazla hasarın engellenmesine yol açması gerektiğini bildirmiştir. Fakat yazarların gözlemlerine göre, reaktif agrega yüzeyinde alkali-silikat katmanı şeklinde oluşan jelin su emmesi sonucu çatlamaların oluştuğu ve sonraki genleşmelerin de var olan çatlakların büyümesiyle geliştiği bildirilmiştir. McGowan and Vivian'a (1952) göre betondaki genleşme, jelin hacimsel konsantrasyonuna, büyüme hızına ve fiziksel özelliklerine bağlıdır (Castro'dan, 2012).

Powers and Steinour'a (1955) göre yukarıda bahsedilen iki teori esasen benzerdir. Öncelikli hasar mekanizması, oluşan jel halindeki katı ASR ürününün kalsiyum içeriğine bağlı olarak sahip olduğu şişme yeteneğinden ileri gelmektedir. Yazarlara göre akışkan haldeki alkali-silis yapısında ve bu yapının dışında yer alan su molekülleri arasında termodinamik açıdan denge sağlanması gerektiğinde oluşan ozmotik basınç da hasara

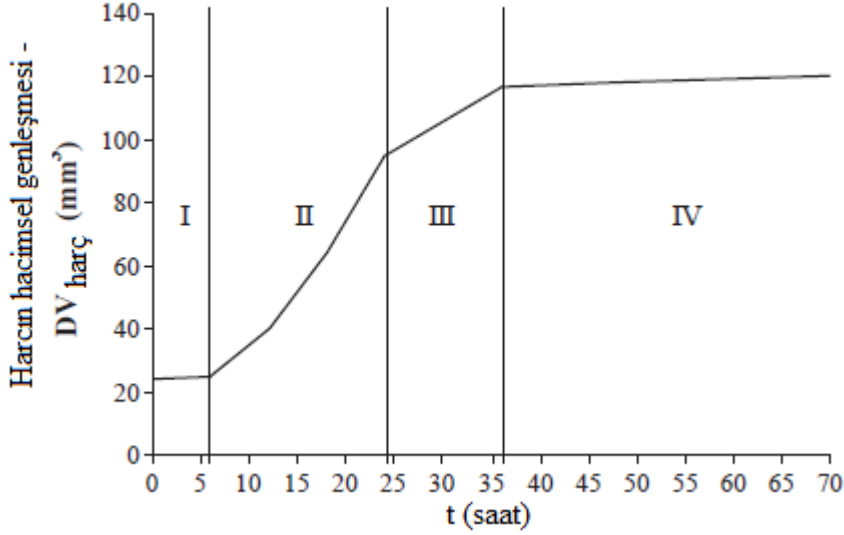
neden olabilir (Castro'dan, 2012). Sonuç olarak, temel mekanizmanın türünden bağımsız olarak hasarın nedeni, suyun serbest enerjisini azaltmak için başka bir alana doğru hareketi ve girişidir (Thomas et al., 2013).

Alkali-silis jelinin genleşme davranışını açıklayan bir diğer model de Prezzi et al. (1997) tarafından geliştirilmiştir. Bir malzemenin diğer bir malzemeye temas ettiğinde kararlılık durumunu açıklayabilmek, bazı durumlarda ancak malzemenin yüzey özelliklerinden yola çıkarak mümkün olmaktadır. Bir katı ile bir sıvı fazın temasında hemen hemen her durumda katıda fazlalık yük bulunmakta ve bu nedenle ara yüzeyde elektriksel bir alan oluşmaktadır. Bu elektriksel yük, hem sıvı hem de katı fazın özelliklerinde değişikliklere neden olmaktadır. Prezzi et al. (1997) tarafından geliştirilen elektriksel çift tabaka modeline göre, önceki başlıklarda açıklanan silisin çözünmesi olayından sonra silikat taneleri, boşluk çözeltisinde kolloidal bir çözelti oluşturmaktadır. Silisli yapıların yüzeyinde bulunan oldukça yüksek miktardaki negatif yükler, boşluk çözeltisinden gelen pozitif yüklerle dengelenmek zorundadır. Silisin yüzeyindeki negatif yüklere değen ve bu yüzeyin tutabildiği pozitif yüklü iyonların oluşturduğu ilk rijit tabaka Stern tabakası olarak adlandırılmaktadır. Bu tabakayı çevreleyen ikinci tabaka ise boşluk çözeltisinde yer alabilen diğer pozitif yükler ve negatif yüklerden oluşmakta olup Gouy-Chapman tabakası olarak adlandırılır. Silisin yüzeyindeki yüklerle elektriksel çift tabakadaki yüklerin toplamı sıfırdır. Başlangıçta kolloidal bir süspansiyon olan bu sistem, daha sonra bir jel yapısına dönüşmektedir.

Çift tabakada oluşan itki kuvvetleri ve çift tabakanın kalınlığı, jelde yer alan katyonların konsantrasyonuna ve valanslarına bağlıdır. Suyun varlığında, çift tabakadaki karşıt iyonların değerlikleri ya da konsantrasyonları arttıkça, çift tabakanın kalınlığı ve oluşan itki kuvvetleri azalmaktadır. O halde Na^+ ve K^+ tek değerlikli iyonlarının, Ca^{+2} iki değerlikli iyonuna kıyasla daha yüksek genleşmeye neden olması beklenir. Prezzi et al. (1997), uçucu küllü ve cürufllu karışımlarla ASTM C1260 deneyleri gerçekleştirmiş ve jellerde $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$ miktarı arttıkça ve $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$ oranı azaldıkça daha yüksek genleşmelerle karşılaşmıştır. Elektriksel çift tabaka modeline göre hesaplanan genleşme kaynaklı basıncın değeri 2,2-10,3 MPa arasındayken, Diamond (1989) 6-7 MPa seviyesinde değerler rapor etmiştir.

Garcia-Diaz et al. tarafından 2006 yılında geliştirilen modelde öncelikle deneyler sırasında agregada oluşan şişme nedeniyle agreganın boşluk hacminde artışlar gözlenmiş ve sonrasında agregadaki şişme miktarıyla harçların hacim artışının orantılı olduğu belirlenmiştir. Bu deneylerde 0,16-0,63 mm boyutunda agreg, su/çimento oranı: 0,35 ve çimento/agrega oranı: 2 tercih edilmiştir. Karışım suyu olarak 1,7 mol/l KOH çözeltisi

kullanılmıştır. Kalıptan alma işleminden sonra 4 saat 100°C’de buhar kürü, sonrasında da 80°C’de otoklavlama uygulanmıştır. Deneyler süresince Q_4 (SiO_2), Q_3 ($\text{SiO}_{5/2}$) ve Q_0 ($\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$) tetrahedronlarının miktarına ek olarak harçlardaki hacim değişikliği belirlenmiştir. Harçlardaki şişme olayının farklı aşamalara ayrıldığı sonuçlar Şekil 3.17’de görülmektedir.



Şekil 3.17 Harçlarda şişme davranışının şematik gösterimi (Garcia-Diaz et al., 2006).

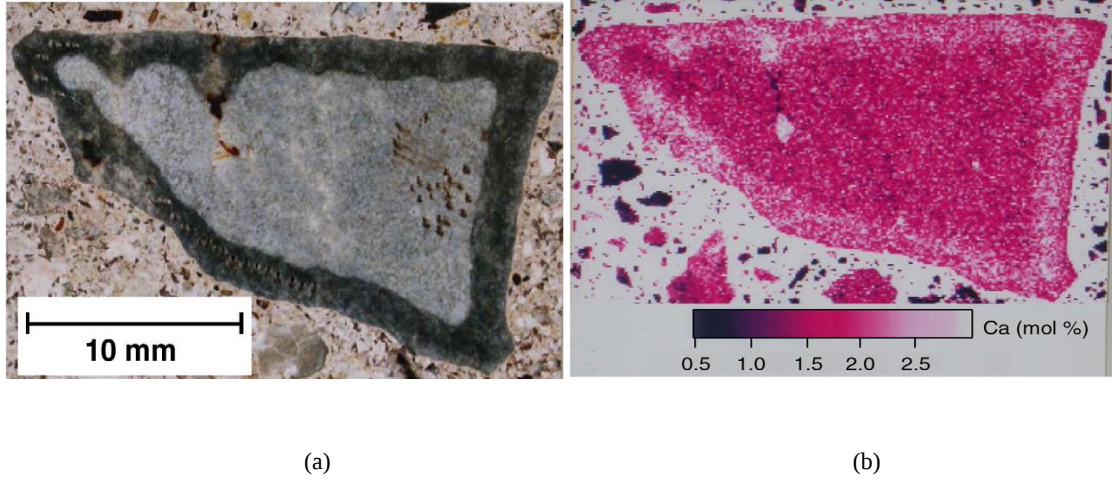
- I. aşama (otoklavlamamanın ilk 6 saati): Denklem 3-5 uyarınca agreganın çözünmesiyle oluşan Q_0 tetrahedronu, kalsiyum hidroksit ve alkalilerle reaksiyona girerek C-S-H, C-K-S-H ve C-N-S-H oluşturmaktadır. Bu aşama harç çubuklarında henüz hacim değişikliği yaratmamaktadır.

- II. aşama (otoklavlamada 6-24 saat aralığı): Q_0 tetrahedronlarının yeni ürünlere dönüşme evresi yavaşlamış ya da sonlanmıştır. Denklem 3-4 uyarınca oluşan Q_3 tetrahedronlarının sayısı, Denklem 3-5 uyarınca tüketilen Q_3 tetrahedronlarının sayısından fazladır. $Q_4 \rightarrow Q_3$ dönüşümünün genişleme yaratan bir reaksiyon olduğu bilinmektedir; bu dönüşüm agregadaki şişme ve çatlamadan sorumludur. Bu aşamada agregadaki boşluk hacminin beş kat arttığı gözlenmiştir. Bu şişme, çimento hamurunun düşük rijitliği nedeniyle oluşan kolay çatlamalar aracılığıyla çimento hamurundaki hacim artışına daha da büyük sayısal değerlerle yansımaktadır.

- III. aşama (otoklavlamada 24-36 saat aralığı): II. aşamada bahsedilen şişme mekanizması devam etmektedir; fakat bir yandan da Q_0 oluşumu tekrar başlamıştır. Net hacim artışında yavaşlama gözlenmektedir çünkü Q_0 tetrahedronlarının oluşturduğu ürünler çatlakların bir miktarını doldurmaktadır.

- IV. aşama (otoklavlamada 36 saatten sonra): Reaksiyon devam etmesine rağmen şişme olayı durmuştur. Q_0 ve Q_3 ürünleri çatlakları doldurmaktadır ve agreganın boşluk hacminde az da olsa azalmalar gözlemlenmektedir (Garcia-Diaz, 2006).

Ichikawa and Miura (2007) ise özellikle ilk aşamada oluşan akışkan haldeki alkali-silis jelinin su emmesi sonucu nasıl genişleme ve çatlamaya yol açtığına açıklama getirmiştir. Yazarlara göre genişleme mekanizmasındaki temel etmen agreganın yüzeyinde yarı geçirimli bir membran şeklindeki reaksiyon halkasıdır (Şekil 3.18). OH^- ve alkali iyonlarının silisli agreganın çözünmesine yol açmasıyla öncelikle akışkan jel oluşmaktadır. OH^- iyonları tükendikçe bir yandan da çimento hamurundaki Ca^{+2} iyonlarının çözünmesi sürmektedir. Jel ürünü, Ca^{+2} iyonlarıyla reaksiyona girerek çözünemez ve rijit nitelikli reaksiyon halkasını oluşturmaktadır. Bu reaksiyon halkasının, ASR'ye maruz kalan agregadan ve çevreleyen çimento hamurundan daha yüksek Vickers sertlik değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Reaksiyon halkası, yüksek alkaliniteli boşluk çözeltisinin agrega içerisine girmesine izin verirken viskoz yapıdaki alkali-silis jelinin dışarıya çıkışını engellemektedir. Bu şekilde agrega içinde depolanmaya devam eden basınç, nihai olarak agregada ve çevreleyen hamur fazında çatlamaya neden olmaktadır. Yazarlara göre çok ince taneli ve silisli mineral katkılarda ASR, daha reaksiyon halkası oluşmadan tamamlandığından genişleme oluşmamaktadır.



Şekil 3.18 ASR'den etkilenen andezit için a) reaksiyon halkasının (koyu renkli) yer aldığı kesit b) kalsiyum analizi için elementsel haritalama (Ichikawa and Miura, 2007).

Kalsiyum iyonlarının reaksiyon üzerindeki etkisiyle ilgili görüşlerde ASR jelinin oluşumu için kalsiyumun zorunlu olduğu, fakat yüksek miktarda kalsiyum içeren jellerin genişleme yeteneğinin düşük olduğu görüşleri baskındır. Thomas (1998) tarafından yapılan çalışmada sistemde CH bulunmaması durumunda ASR'nin geliştiği fakat agregadan çözünen silisin genişleme yaratmadan boşluk çözeltisinde kaldığı

belirlenmiştir. Chatterji et al.'a (1986, 1992) göre kalsiyum hidroksit, reaksiyon üzerinde iki farklı role sahiptir. İlk olarak silisin kimyasal yapısının bozulmasına yol açan OH⁻ iyonlarının kaynağı konumundadır. Ayrıca silisli agreganın etrafında fazlaca kalsiyum iyonu bulunması, SiO₂'nin agrega dışına çıkışına engel olmaktadır. Agregaya içine nüfuz eden su, alkaliler, kalsiyum ve hidroksit miktarı, dışarıya sızabilen jelin miktarından yüksek oldukça genleşme oluşur. Ayrıca Wang and Gillott (1991) tarafından da belirtildiği gibi Ca⁺² iyonları, ASR ürününün yapısında bulunan alkalilerle yer değiştirebilir ve neticesinde boşluk çözeltisine salınan alkaliler reaksiyon için tekrar kullanılmaya hazır hale gelip daha fazla jel oluşturabilir (Pedersen'den, 2004). ASR kaynaklı hasarları arttırabilecek bu etkilerin aksine, Prezzi et al. (1997) tarafından geliştirilen elektriksel çift tabaka teorisine göre jeldeki Ca⁺² iyonlarının varlığı, tek değerlikli katyonlara kıyasla daha düşük genleşme ile sonuçlanmaktadır. Jelin bünyesine çok fazla miktarda kalsiyum katılırsa alkalice zengin ve genleşmeyen nitelikte bir C-S-H ürününe dönüşmesi beklenebilir (Pedersen, 2004).

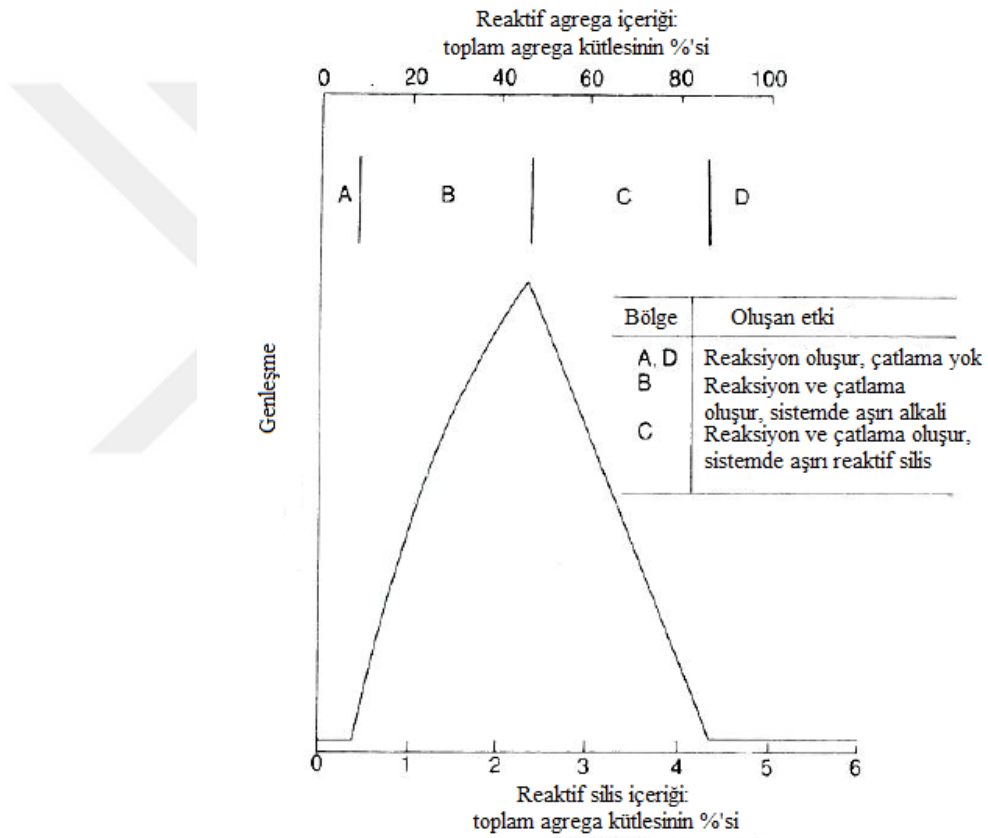
ASR mekanizmasıyla ilgili dikkat çekici bir diğer nokta ise ASR'nin puzolanik reaksiyon ile önemli ölçüde benzerliğidir. ASR'de amorf yapıdaki reaktif silis alkali hidroksitlerle reaksiyona girerken, puzolanik reaksiyonda yine amorf yapıdaki silisin partneri bu kez kalsiyum hidroksit olmaktadır. Aslında puzolanlardaki reaktif silis de boşluk çözeltisindeki alkali hidroksitlerle reaksiyona girerek düşük kalsiyumlu alkali-silis jeli oluşturabilmektedir. Zamanla kalsiyum iyonları, jeldeki alkalilerle yer değiştirebilirse portland çimentosu hamurundakine kıyasla daha düşük Ca/Si oranına sahip bir C-S-H ürünü ortaya çıkar. ASR ile puzolanik reaksiyon arasındaki önemli farklılıklar ise reaksiyonların farklı zamanlarda gerçekleşmesi ve puzolanik reaksiyonda genleşme oluşmamasıdır (Thomas, 2011). Puzolanların oldukça ince boyutta maddeler olması, oluşturdukları jellerin tüm hamura yayılmasını sağlamakta ve reaktif agregalarda karşılaşılan daha büyük jel yapılarından oluşan lokal genleşme alanları engellenmektedir (Thomas et al., 2013).

3.1.4 Pesimum oran

Oldukça yüksek ve hızlı reaktiviteye sahip bazı silisli agregalar için ASR kaynaklı genleşmelerin her zaman agrega kütlelerinde yer alan reaktif mineral miktarı ile doğru orantılı olmayabileceği bilinmektedir. Bir başka deyişle reaktif bileşenlerin miktarı arttıkça genleşmeler artmakta fakat bazen belirli bir oranın ötesinde genleşme seviyelerinde düşüşler gözlemlenmektedir. Maksimum genleşmeye yol açan tüm agrega kütlelerindeki reaktif bileşenlerin oranına pesimum oran adı verilmektedir (Hobbs, 1988; Lindgård et al., 2012; Brouard, 2012). Örneğin flint içeren agregalar için pesimum oran

%20-30'a karşılık gelmekte ve agrega fazındaki flint oranı %60'ı geçtiğinde genellikle genleşme oluşmamaktadır. Silisin en reaktif türlerinden biri olan opal için ise pesimum içerik sadece %2-5'e eşittir (Brouard, 2012). Yavaş reaksiyona giren agregalar için bu oran artarak çoğu durumda %100 olmakta, yani pesimum etki oluşmamaktadır (Lindgård et al., 2012).

Şekil 3.19'da opalin silis içeriği ve reaktif agrega miktarına karşılık genleşme davranışı gösterilmiştir. Grafiğin yatay eksenindeki sayısal değerlerden de anlaşılacağı gibi her bir agrega tanesinin kütlece %5'inin opalin (reaktif) silis içerdiği farz edilmiştir. Toplam alkali içeriği ise 6 kg/m^3 'tür (Hobbs, 1988).



Şekil 3.19 Pesimum davranış, su/çimento oranı: 0,4 ve agrega/çimento oranı: 2,75 (Hobbs, 1988).

Şekil 3.19'daki genleşme eğrisini A, B, C ve D olmak üzere dört farklı bölgeye ayırmak mümkündür.

- A Bölgesi: Reaktif silisin miktarı düşüktür ve hasar oluşturabilecek kadar jel oluşturmaya yeterli değildir.

- B Bölgesi: Beton sertleştikten sonra da reaksiyon devam etmektedir ve reaksiyon derecesi çatlamlara yol açabilecek boyuttadır. Tüm reaktif silis tükenene ya da yeterli miktarda azalana kadar reaksiyonlar devam eder. Bu bölgede alkali miktarı nispeten fazladır ve reaksiyon ürününün kompozisyonu alkali/reaktif silis oranından bağımsızdır.

- C Bölgesi: Reaksiyon beton sertleştikten sonra devam eder, çatlaklar oluşur ve boşluk çözeltisindeki alkaliler tükenince ya da kritik bir seviyeye inince genleşmeler durur. Bu bölgede reaktif silisin miktarı nispeten fazladır ve reaksiyon ürününün bünyesine su alabilme yeteneği, alkali/reaktif silis oranı düştükçe azalır.

- D Bölgesi: Reaktif silis miktarı çok fazladır ve reaksiyon aşırı hızlı gelişir. Beton henüz yeterli rijitliğe ulaşmadan sistemdeki alkalilerin çoğu tüketilerek jel ürünleri oluşur. Betonun dayanım kazanmasından sonra jel oluşumu oldukça azalmaktadır (Hobbs, 1988).

Özellikle C bölgesindeki azalan genleşmelerin nedeni Hobbs'a (1988) göre reaktif silisin, ortamdaki alkalilere nazaran aşırı fazlalığı ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$ oranının çok yükselmesi) olarak görülmüştür. Fakat bazı araştırmacılar tarafından (örneğin Shayan, 1992) 1 M NaOH çözeltisinde bekletme uygulanan ASTM C1260 deneyinde de pesimum oranla karşılaşılması bu açıklamayla pek bağdaşmamaktadır. Çünkü bu yüksek konsantrasyonlu çözeltide alkali kaynağının tüketilebilmesi pek mümkün gözükmemektedir (Thomas et al., 2013).

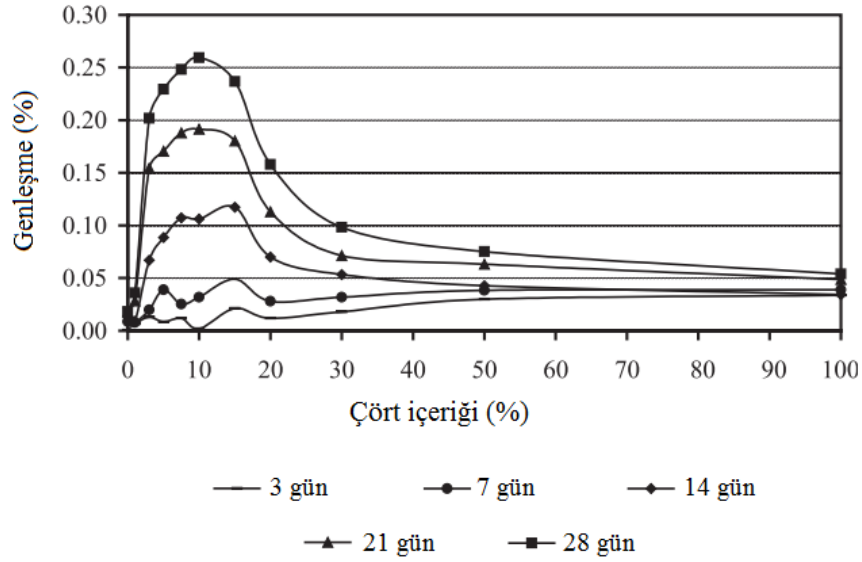
Silisin miktarının aşırı yüksek olduğu durumlarda silisin ancak bir miktarı, boşluk çözeltisi doygunluğa erişene kadar çözünebilmektedir. Geri kalan silis ise çözeltiden OH^- iyonlarını ayırarak pH'nın düşmesine neden olmaktadır. O halde silisin tamamının çözünebileceği bir $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$ optimum oranı bulunmaktadır. Bu oran aslında genleşmeler için geçerli pesimum reaktif silis içeriğine karşılık gelmektedir (Glasser and Kataoka, 1981b). Bazı yazarlara göre reaktif $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$ oranı 4-6 arasında kaldıkça yüksek genleşmeler oluşmakta ve 6'nın üzerinde genleşmeler düşmektedir. Şekil 3.19'da gözlenen pesimum oranda geçerli opalin silis/ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$ oranı da 6'dır (Brouard, 2012).

Brouard (2012), D bölgesindeki genleşmelerin sıfıra yakın çıkmasını farklı bir nedenle açıklamıştır. Reaktif bileşen miktarının aşırı yüksek olması, birçok reaksiyon bölgesinin oluşmasına, bir başka ifadeyle jelin tüm beton kütesine yayılmasına neden olmaktadır. Bu durum, toplam jel sayısı çok olsa da herhangi bir lokal alanda reaksiyon kaynaklı çok fazla genleşme oluşmamasına neden olmaktadır. Reaksiyon alanındaki

genleşmenin azlığından dolayı çekme dayanımını aşan seviyede gerilme ve önemli hasar oluşmamaktadır.

Şekil 3.19'da görülen pesimum eğrisi (oranı), grafiğin sol tarafına (orijine) doğru yaklaştıkça, agreganın reaktivitesinin yani alkalileri tüketme hızının arttığından bahsetmek mümkündür (Poole, 1992a). Benzer şekilde betondaki alkali yükü azaldıkça pesimum oranda düşüş görülmektedir (Rajabipour et al., 2015). Agrega boyutu azaldıkça da grafiğin sola yanaşması beklenebilir (Brouard, 2012).

Bektaş et al. (2004) tarafından Ankara yakınlarında Soğukçam bölgesinde bulunan çörtlerle yapılan bir araştırmada %5-15 aralığında pesimum oran varlığı bulunmuştur (Şekil 3.20). Yazarlar, kontrol örneklerinde reaktif olmayan kireçtaşı kullanmışlar, diğer karışımlarda ise reaktif çört agregası için %1, %3, %5, %7,5, %10, %15, %20, %30, %50 ve %100 oranlarında ikame uygulamışlardır. Çörtlerin mineralojik bileşimi, ince grenli opalin silisten kriptokristalin silise ve kalsedondan mikrokristalin kuvarsa doğru değişkenlik gösterebilmektedir. ASTM C1260 deneyi uygulanan araştırmada 3. ve 7. günlerde pesimum oranının varlığı henüz net olmasa da, ilerleyen maruziyet sürelerinde bu oran belirginleşmiştir.



Şekil 3.20 Çört agregasında karşılaşılan pesimum davranış (Bektaş et al., 2004).

3.2 ASR Kaynaklı Hasarın Oluşumu için Zorunlu Bileşenler

ASR'yi etkileyen sayısız faktör bulunmakla birlikte öncelikle kimyasal reaksiyonun gerçekleşebilmesi için yeterli seviyede yüksek alkalitenin ve alkali

hidroksitlerle reaksiyona girme potansiyeline sahip agrega içerisindeki silisli minerallerin varlığı zorunludur. Ayrıca “genleşme mekanizması” başlığı altında anlatılan teorilerin ortak yönü, jelin bünyesine ancak su girişiyle sertleşmiş betonda hasar oluşabileceği düşüncesidir.

3.2.1 Alkaliler

3.2.1.1 Portland çimentosu alkalileri

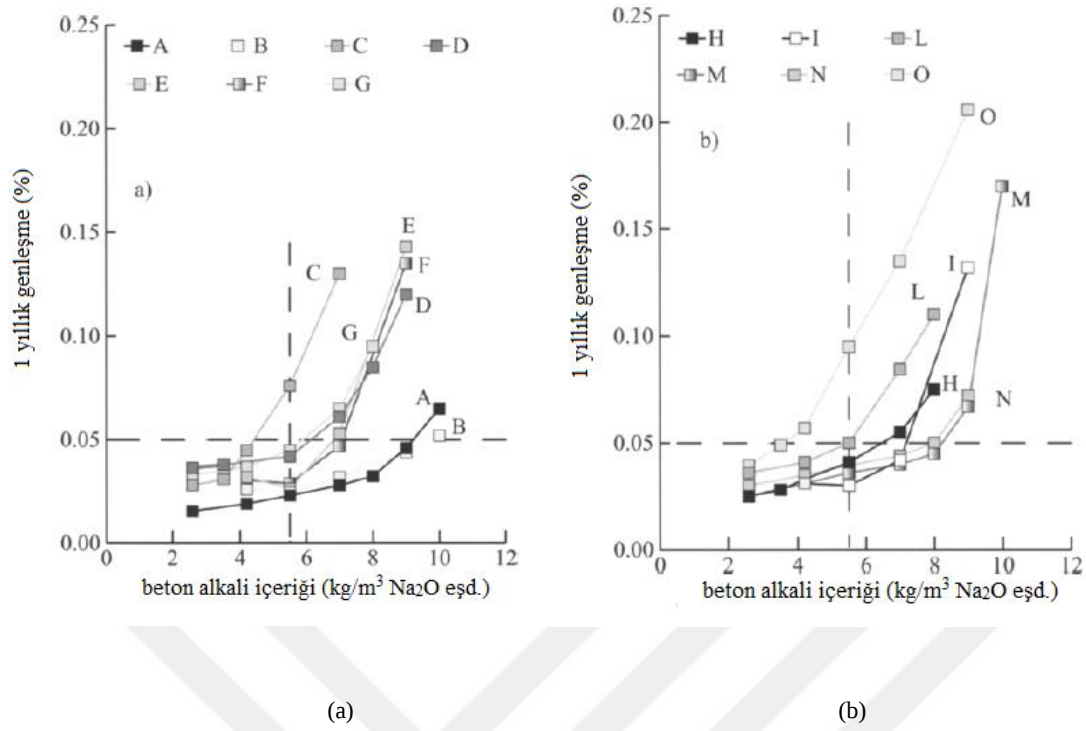
Daha önce de bahsedildiği gibi, betonda boşluk çözeltisine salınan alkaliler, temel olarak kullanılan çimentodan gelmektedir. Klinker, alkali içeriği ve en çok rastlanan iki alkalinin (sodyum ve potasyum) birbirine oranı bakımından oldukça değişkenlik gösterebilmektedir. Hammaddelerden kalkerde genel olarak alkali bulunmazken, alkali kaynakları arasında en çok şeyil ve yakıt olarak tercih edildiğinde kömür yer almaktadır (Glasser, 2004). Çimento kompozisyonunda yer alan bileşenlerden sadece kükürt ve alkaliler, klinkeri üretebilmek için gerekli sıcaklık seviyelerinde uçucu gazlar arasına karışabilmektedir (Macphee and Lachowski, 2004). Ön ısıtıcıların kullanıldığı çimento üretimi tesislerinde alkalice yoğun sıcak gazların üretimde tekrar kullanılması, alkali içeriğinde artışa neden olmaktadır. Dolayısıyla Stanton’un henüz 1940 yılında önermiş olduğu ve günümüzde de kabul gören ASR’yi engellemek için düşük alkalili çimento ($<0,60 \text{ Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}}$) kullanımı fikri, hem alkali içermeyen hammadde bulmadaki zorluk hem de modern ve ekonomik çimento üretim teknikleri nedeniyle her zaman mümkün olmamaktadır (Poole, 1992a; Mindness et al., 2003).

Na_2O ve K_2O içeriklerini ayrı ayrı ifade etmek yerine tercih edilen geleneksel yöntem, toplam alkali içeriğini tek bir sayısal değerle belirtmektir. Denklem 3-8’e göre hesaplanan eşdeğer Na_2O içeriğinin bulunmasında yer alan 0,658 katsayısı, iki bileşenin moleküler ağırlıklarının oranına denk gelmektedir (Hobbs, 1988; Poole, 1992a).

$$\text{Eşdeğer Na}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O} (\text{kütlece } \%) + 0,658 \times \text{K}_2\text{O} (\text{kütlece } \%) \quad (3-8)$$

ABD’de üretilen Tip I-V portland çimentoları için temel fiziksel ve kimyasal gereksinimlerin yer aldığı ASTM C150 (2012) standardında düşük alkalili çimento kullanımı, betonda reaktif agrega kullanıldığı hallerde opsiyonel bir limit olarak yer almaktadır. Fakat çimentonun eşdeğer alkali içeriği, betonda kullanılan çimento dozajını dikkate almadığından betonun toplam alkali yükünü ve dolayısıyla ASR kaynaklı hasar riskini tek başına ifade etmekten uzaktır (Thomas and Folliard, 2007). Bunun farkında olan Birleşik Krallık’ta beton alkali içeriği için getirilen limit $2,5\text{-}4,5 \text{ kg/m}^3$ arasında

değişmektedir (Nixon and Sims, 1992; Thomas and Folliard'dan, 2007). Kanada'da ise agreganın reaktivitesi, beton yapı elemanının boyutu ve çevresel şartlara bağlı olarak değişen beton alkali miktarı sınır değerleri $1,8-3,0 \text{ kg/m}^3$ mertebelerindedir (CSA-A23.1, 2004; Farny and Kerkhoff'tan, 2007). Saha betonlarında bu alkali seviyeleri çoğu agreganın için genleşme yaratmaya yetmezken diğer bir yandan bazı agregaların için gereğinden fazla kısıtlayıcı olmaktadır. Zararlı ASR genleşmesine neden olacak minimum alkali içeriği, "eşik alkali seviyesi" olarak adlandırılmakta ve bu limiti etkileyen en önemli özelliklerin başında agreganın kökeni ile mineralojik ve kristalografik yapısı gelmektedir. Berra et al. tarafından 2005 yılında yapılan çalışmada 38°C 'de ve %100 bağıl nemde gerçekleştirilen RILEM AAR-3 deneyi ile 13 farklı agreganın genleşmeleri değişken alkali seviyelerinde tespit edilmiştir. Bu deneyde olması gereken (standart) alkali içeriği $5,5 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}$ eşd. iken Şekil 3.21a ve 3.21b'den görüldüğü üzere $2,6 - 10,0 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}$ eşd. arasında değişen çeşitli alkali içerikleriyle karışımlar hazırlanmıştır. Genleşme limiti 1 yıl sonunda %0,05'e eşit olup grafiklerde kesikli çizgilerle işaretlenmiştir. Bu limit değeri ile agregalara ait eğriler kesiştirildiğinde her bir agreganın için ayrı ayrı eşik alkali seviyesini bulmak mümkün olmaktadır. En yüksek genleşmeye sahip olan "O" kodlu agreganın için bu değeri Na_2O eşdeğeri cinsinden $3,6 \text{ kg/m}^3$ 'e eşittir. Sahada karışım tasarımlarında tercih edilebilen ve nispeten düşük sayılabilecek bir alkali içeriği olan bu limit, bu agregaya dair saha performansı tecrübelerine göre çoğu uygulamada neden önemli ASR hasarı yarattığını açıklamaktadır. Diğer bir yandan genleşmeleri daha düşük kalan A, B, M ve N agregalarının tümü için eşik alkali seviyeleri Na_2O eşdeğeri cinsinden $8,0 \text{ kg/m}^3$ 'ten yüksek bulunmuştur. Uygulamada karşılaşılmaması pek mümkün olmayan bu çok yüksek alkali seviyesi ile bu agregaların saha performanslarında genleşme yaratmadığına dair tecrübe yine yakından ilişkilidir. $4,4 - 7,2 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}$ eşd. aralığında eşik alkali seviyelerine sahip olan diğer agregaların (C – L) saha performansının ise hem betonun sahip olacağı ilk alkali seviyesine hem de çevresel koşullara bağlı olması beklenmektedir.



Şekil 3.21 a) A-G agregalarının b) H-O agregalarının değişken alkali seviyelerinde 1 yıllık genleşmeleri.

Çimentoda veya betonda yer alan toplam alkali seviyesini “eşdeğer Na₂O içeriği” gibi tek bir terimle ifade etmek pratiklik sağlamaktadır. Fakat diğer bir yandan potasyum ve sodyumun göstereceği etkilerin aynı olacağı anlamına geldiğinden bu terimin yanıltıcı sonuçlar yaratacağını savunanlar da bulunmaktadır. Leeman and Lothenbach (2008) tarafından yapılan çalışmada birbirlerine yakın eşdeğer Na₂O içeriğine (%0,894; %0,986; %0,798 ve %0,881) ve farklı K/Na molar oranlarına (sırasıyla 3,95; 2,41; 3,95; 2,83) sahip dört farklı çimentoyla hazırlanan betonların genleşmelerinde büyük farklılıklar gözlemlenmiştir. Çimentoların kimyasal kompozisyonlarında sadece Fe₂O₃, MgO ve Na₂O içeriklerinde önemli sayılabilecek farklılıklar bulunduğu bildirilmiştir. Fe₂O₃ ve MgO bileşiklerinin çözünabilirliği az olduğundan boşluk çözültisi kompozisyonunda fark yaratan tek etmenin Na₂O içeriği (ya da K/Na) olduğu düşünülmüştür. Dört çimentoyla hazırlanan hamur ve harç örneklerinde gerçekleştirilen boşluk çözültisi analizlerinde de hidroksil iyonu konsantrasyonu oldukça benzer çıkmış, gözlenen tek fark yine K/Na oranı olmuştur. Reaksiyon ürünlerinin EDX ile belirlenen kimyasal kompozisyonlarında da jellerin silisyum ve kalsiyum içerikleri benzer çıkmıştır. Sonuç olarak boşluk çözültisi analizleri ve reaksiyon ürünlerinin kompozisyonları için yapılan incelemeler sonucunda düşük K/Na oranının (yüksek sodyum içeriğinin) daha yüksek genleşme oluşturduğu belirtilmiştir (Leeman and Lothenbach, 2008). Bu konuda yapılan çalışmalarda birbiriyle çelişkili sonuçlara rastlanmaktadır. Farklı alkali metal tuzlarına daldırılan harçlarda ise sabit bir pH ve iyonik şiddet derecesinde potasyumun sodyuma kıyasla daha yüksek

genleşmeye yol açtığı bulunmuştur (Chatterji et al., 1987; Leeman and Lothenbach'dan, 2008). 150°C'de otoklavlama uygulanarak gerçekleştirilen başka bir çalışmada da numuneler farklı alkali hidroksit çözeltilerinde bekletilmiştir. Sabit bir molar konsantrasyonda NaOH çözeltisi, KOH çözeltisine kıyasla daha yüksek genleşmelere neden olmuş ve LiOH çözeltisinin genleşmeleri azaltıcı yönde etkisine rastlanmıştır (Lu et al., 2006a).

Klinkerde yeterli miktarda sülfat bulunan hallerde alkaliler, sülfat tuzları şeklinde yer almaktadır. Bu sülfatlı bileşikler K_2SO_4 , Na_2SO_4 , $Na_2SO_4 \cdot 3K_2SO_4$ (afitalit) ve/veya $2CaSO_4 \cdot K_2SO_4$ (kalsiyum langbeinit) yapılarında olabilmektedir. Klinkerde alkali sülfatların oluşumuna yetecek kadar sülfat bulunmaması durumunda ise Na_2O 'nun C_3A 'nın yapısına katılıp reaktivitesini daha da arttırdığı ve priz düzenleyici olarak uygun yapıda kalsiyum sülfat eklenmemesi durumunda ani priz sorunu oluşabileceği bilinmektedir. K_2O ise C_2S 'in yapısına katılıp yine bu fazın su ile reaksiyonunu hızlandırmakta fakat olası bir C_3S 'e dönüşümü engellemektedir. Yüksek alkali içeriklerinin erken dayanımlarda artışa ve nihai dayanımlarda azalmaya neden olduğu ifade edilmektedir (Jackson, 2004).

Alkalilerin klinkerde nasıl yer aldığı, çimentonun hidratasyonu esnasında hangi hızla açığa çıkacaklarını önemli ölçüde etkilemektedir (Glasser, 2004). Suda çözünebilir sülfat bileşikleri halinde bulunan alkaliler hidratasyonun ilk evrelerinde hızla çözeltilmeye salınırken, çimentonun ana bileşiklerinde bağlı olan alkaliler ilerleyen zamanlarda ve bu fazlar hidrate oldukça salınabilir. Genel olarak alkali-silis reaksiyonu, doğası gereği yavaş ilerleyen bir reaksiyondur. Buna göre, reaksiyonun etkisini gösterebileceği bu uzun süre tamamlandığında tüm çimento alkalilerinin açığa çıkmış olması beklenmektedir (Glasser, 1992). Açığa çıkan alkalilerin tamamı boşluk çözeltisinin yapısına katılmayıp yaklaşık %40'ı gibi önemli bir miktarının çimento hidratasyon ürünleri tarafından bağlandığı açıklanmıştır (Bérubé et al., 2002).

3.2.1.2 Mineral katkılardan gelen alkaliler

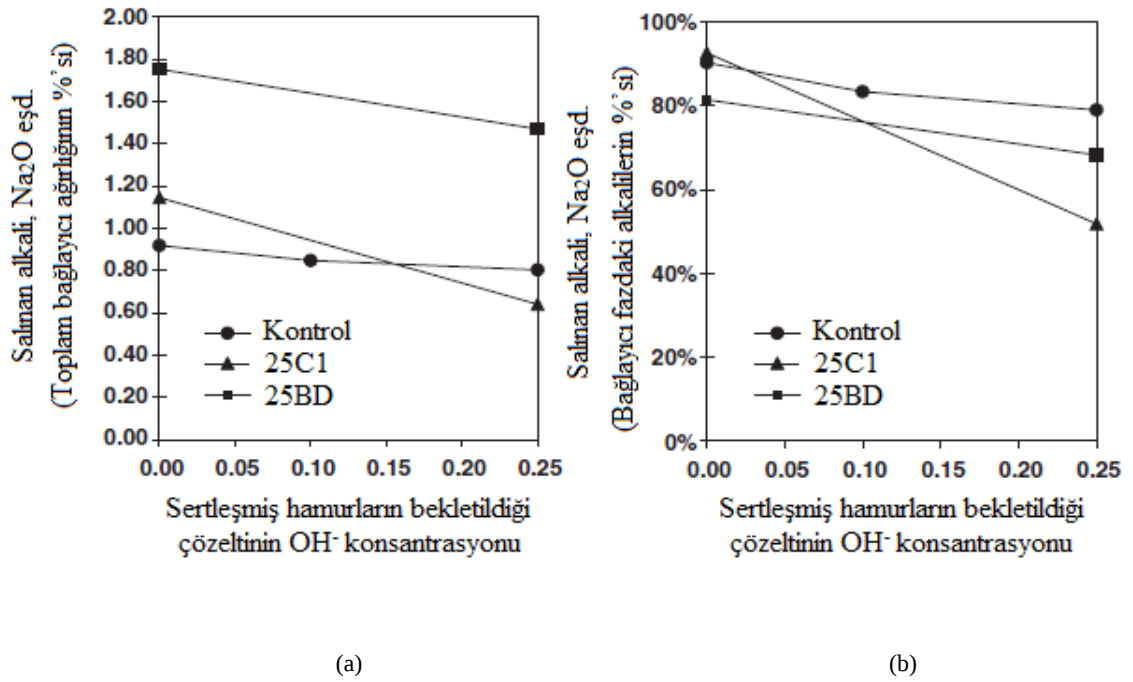
Özellikle cüruf ve uçucu kül başta olmak üzere mineral katkıların bünyesinde bazı durumlarda portland çimentosundaki miktarı bile aşan seviyelerde alkaliler yer alabilmektedir. Kuzey Amerika'da 100 farklı kaynaktan alınıp analiz edilen uçucu küllerin toplam Na_2O eşd. içeriğinin %1'den düşük miktarlardan başlayıp %10'a kadar değişen değerlerde olduğu ve ortalamalarının da %2,44'e eşit olduğu görülmüştür. Bu alkalilerin bir miktarı kristal fazlarda bağlı olup agregalarla oluşabilecek reaksiyon için elverişli değildir. Daha önemli olan, camsı fazlarda bağlı ve kolay salınabilecek

alkalilerin miktarını belirlemektir. Mineral katkı ve portland çimentosu içeren bağlayıcı sistemi su ile birleştğinde portland çimentosundaki alkaliler göreceli olarak daha hızlı salınmaktadır. Uçucu küldeki alkalilerin salınma hızı ise katkının reaktifliğine de bağlı olarak daha uzun bir sürede gerçekleşmektedir. Kimyasal reaksiyonların tamamlanmasına yaklaşıldıkça sistemde yer alan ve salınabilir konumda olan alkalilerin tümü, katı hidratasyon ürünleri ve sıvı boşluk çözeltisi arasında paylaşılmış hale gelmektedir. Alkalilerin miktarı ve dağılımında hem bağlayıcı fazın alkali içeriği hem de hidratların alkali bağlayabilme yeteneğini doğrudan etkileyen CaO ve SiO₂ içerikleri büyük rol oynamaktadır (Hobbs, 1988; Shehata and Thomas, 2006).

Mineral katkılar için “salınabilen”, “suda çözünebilen” ve “toplam” alkali içeriği olmak üzere farklı terimler kullanılabilmektedir. Salınabilen alkali içeriğini belirlemek için uygulanan ASTM C311 (2016) standardında uçucu kül, sönmüş kireç ve sudan oluşan karışım 38°C sıcaklıkta 28 gün bekletilmektedir. Daha sonra tokmak yardımıyla çok küçük parçalara ayrılan sertleşmiş numuneler, su içerisinde 1 saat bekletilmekte ve sonrasında sıvı süzülme işlemi yapılmaktadır. Filtre üstünde kalan kısım 8-10 kez sıcak su ile de yıkandıktan sonra süzülen sıvının sodyum ve potasyum iyon konsantrasyonları belirlenmektedir. Kısacası bu deneyde agreganın maruz kalacağı yüksek alkaliniteye sahip boşluk çözeltisi ortamı simüle edilmeye çalışılmakta ve alkaliler Ca(OH)₂ çözeltisi yardımıyla katkının yapısından çıkartılmaktadır. ASTM C114 (2015) standardına göre uygulanan deneyde ise toplam alkali içeriğini belirlemek için hidroklorik asit çözeltisi kullanılmaktadır. ASTM C114’te (2015) suda çözünebilen alkali miktarını belirlemek için de bir yöntem yer almakta ve bu içerik, genellikle diğer ikisinin arasında kalan değerlere sahip olmaktadır (Detwiler, 1997).

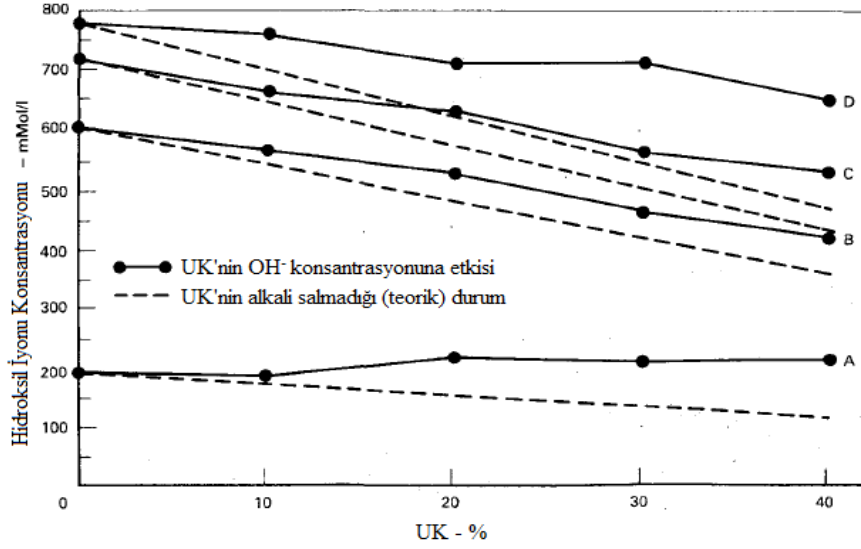
Shehata and Thomas (2006) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada CaO ve SiO₂ içerikleri birbirine oldukça yakın olan C1 ve BD kodlu uçucu küllerle hamur karışımları hazırlanmıştır. C1 ve BD uçucu küllerinin toplam alkali içerikleri ise Na₂O eşd. cinsinden sırasıyla %1,68 ve %5,35’e eşittir. Sadece portland çimentosu ile hazırlanan kontrol ile ağırlıkça %25 ikame oranlarıyla hazırlanan 25C1 ve 25BD karışımlarının bağlayıcı fazlarındaki toplam alkali içerikleri Na₂O eşd. cinsinden sırasıyla 1,017; 1,236 ve 2,153 kg/m³ seviyelerine eşit olmuştur. Suda ve değişken OH⁻ konsantrasyonlarına sahip çözeltilerde bekletilen sertleşmiş hamur numunelerinin bağlayıcı fazlarından salınan alkali konsantrasyonları, deneylerde hazırlanan çözeltilerin Na⁺ ve K⁺ konsantrasyonlarındaki değişim yardımıyla bulunmuştur. Yazarlar, Şekil 3.22a’daki verilere göre hem suda hem de 0,25 mol/L OH⁻ konsantrasyonlu çözeltide bekletme sonucunda 25BD numunesinden çözeltiliye aktarılan alkali miktarının toplam bağlayıcı ağırlığının %’si cinsinden ifade edildiğinde diğer iki karışıma kıyasla daha yüksek

olduğunu belirtmiştir. Şekil 3.22b’de ise salınan alkaliler, bağlayıcı fazdaki toplam alkalinin %’si cinsinden ifade edilmiştir. Kontrol karışımının bünyesindeki alkalilerin %80’inden fazlası 0,25 mol/L OH⁻ konsantrasyonlu çözeltiye aktarılırken 25BD ve 25C1 karışımları için bu değerler sırasıyla yaklaşık olarak %70 ve %50 mertebelerinde kalmıştır. Dolayısıyla kontrol karışımında yer alan katı ürünlerin alkali tutabilme yetenekleri en azdır. Mineral katkılı karışımlar kıyaslandığında ise daha yüksek alkalili BD uçucu külüyle ve %25 ikame oranıyla hazırlanan karışımda yer alan hidratların alkali tutabilme yeteneklerinin C1 uçucu külüne kıyasla aynı ikame oranında daha az olduğu sonucu çıkmaktadır.

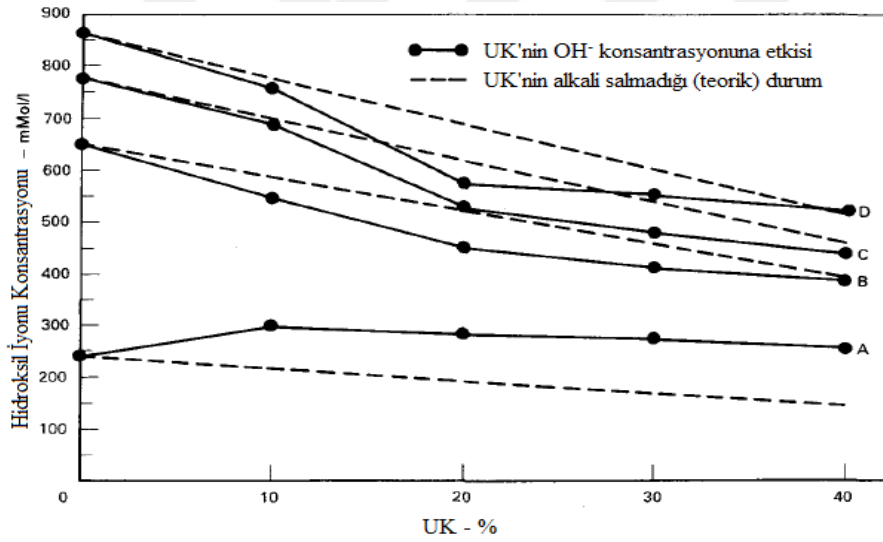


Şekil 3.22 Karışımlardan farklı konsantrasyonlardaki çözeltilere salınan alkali miktarları a) toplam bağlayıcı ağırlığının %’si cinsinden b) bağlayıcı fazdaki alkalilerin %’si cinsinden.

Nixon et al. (1986a) tarafından yapılan diğer bir çalışmada yüksek alkalili bir tip uçucu külün (Na₂O: %0,96 ve K₂O: %3,71) boşluk çözeltisi kompozisyonu ve ASR genleşmeleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan dört farklı çimentoya A, B, C ve D kodlamaları verilmiş olup eşdeğer Na₂O içeriklerinin sırasıyla %0,255; %0,67; %0,86 ve %0,96 olduğu bildirilmiştir. Uçucu külün (UK) bu çimentoların yerine ikame edilme oranı ile boşluk çözeltisinin hidroksil iyonu konsantrasyonu arasındaki ilişki 28. ve 365. günler için sırasıyla Şekil 3.23 ve 3.24’te gösterilmiştir.



Şekil 3.23 Yüksek alkalili uçucu külün dört farklı çimentoyla ikamesinin 28. gündeki boşluk çözeltisi kompozisyonuna etkisi (Nixon et al., 1986a).



Şekil 3.24 Yüksek alkalili uçucu külün dört farklı çimentoyla ikamesinin 365. gündeki boşluk çözeltisi kompozisyonuna etkisi (Nixon et al., 1986a).

Grafiklerdeki kesikli çizgiler, uçucu külün inert olduğu, yani alkali salmadığı durum için düşünülen teorik etkiyi, sürekli çizgiler ise ölçülen gerçek sonuçları göstermektedir. Sonuçlara göre 28. günde uçucu külün boşluk çözeltisi alkalinitesini artırıcı yönde etkisi gözlemlenirken ilerleyen dönemde bu etkinin B, C ve D çimentoları için yok olduğu görülmüştür. Bu analizleri genişleme sonuçları ile birlikte yorumladıklarında yazarlar, %20 ve %30 ikame oranlarında 20°C veya 38°C'de bekletilen numunelerde genişleme ve hasarla karşılaşmadıklarını ifade etmişlerdir. Son

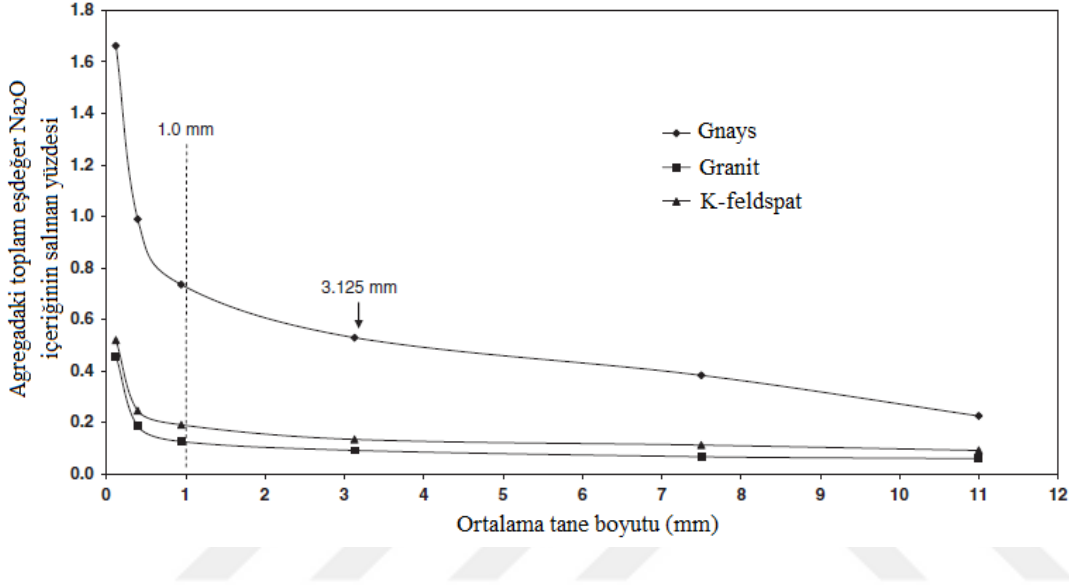
olarak kendi çalışmalarında kullandıkları flint agregasının yerine 28 günden daha önce çatlamalara neden olabilecek daha reaktif bir agrega kullanılması durumunda (Beltane opal gibi), kullanılan uçucu külün genleşmeleri azaltmadaki etkinliğinin azaldığının belirgin olduğu açıklanmıştır.

3.2.1.3 Agregalardan salınan alkaliler

Boşluk çözeltisine alkali salımı gerçekleştirebilecek beton bileşenlerinden bir diğeri feldspat, mika, kil, zeolit ve volkanik cam gibi mineraller içeren agregalardır. Bérubé et al. 2002 yılında 1,25-5 mm boyutundaki 17 çeşit agregadan alkali salımını araştırmıştır. Çalışmada agregalar 38°C’de suda (Na ve K ölçümleri için), fazladan katı kireç de içeren doymun Ca(OH)_2 çözeltisinde (Na ve K ölçümleri için), 0,7 M NaOH çözeltisinde (K ölçümü için) ve 0,7 M KOH çözeltisinde (Na ölçümü için) 1,5 yıl boyunca bekletilmiştir. Bu koşullar arasından en yüksek alkali salımı değerlerine 0,7 M alkali hidroksit çözeltilerinde rastlanmıştır. Feldspat içermeyen tortul yapıdaki şeyl, dolomitik kireçtaşı, silisli kumtaşı ve kireçtaşı agregalarında nispeten düşük ($0,2-1,1 \text{ kg/m}^3$) alkali salımı seviyeleri olduğu görülmüştür. Feldspatça zengin volkanik veya başkalaşım agregalarında ise ölçülen maksimum alkali salımı değerlerinde belirgin artışlar (granit: 3,4; diyorit: 3,3; granitik gnays: 2,6; andezit: 1,9; riolitik tuf: 1,5; litik çakıl: 3,1 kg/m^3) göze çarpmıştır. Bu agregalara kıyasla çok daha yüksek eşdeğer Na_2O içeriğine (%12,30) sahip olan nefelin minerali yönünden zengin fonolit agregasında toplam alkali seviyesinin %5,56’sının salınabileceği bulunmuştur. Dolayısıyla bu agreganın, betonun toplam alkali seviyesinde $12,65 \text{ kg/m}^3$ ’lük aşırı bir artışa neden olabileceği belirtilmiştir. Deneylerde agregadaki alkaliden gerçekleşen salımlar, agregadaki toplam alkalinin %’si cinsinden belirlenmiş; kg/m^3 cinsinden verilen salım hesapları ise herhangi bir beton karışımında toplam 1850 kg/m^3 agrega kullanıldığı farz edilerek gerçekleştirilmiştir (Bérubé et al., 2002).

Lu et al. (2006b) tarafından yapılan başka bir çalışmada agregadan salınan alkali miktarının agreganın tane boyutuna önemli ölçüde bağlı olduğu bulunmuştur. Saha betonlarının (özellikle de kütle betonların), geniş bir tane boyutu aralığında değişen agrega granülometrisine sahip olduğu unutulmamalıdır. Lu et al. (2006b) granit, gnays ve K-feldspat agregalarını kullanarak yaptığı çalışmada 80°C’de aşırı doymun Ca(OH)_2 çözeltisinde bekletme neticesinde azalan tane boyutunun salınan alkali miktarını arttırdığını bulmuştur (Şekil 3.25). Sonuçta, granit ve K-feldspat için alkali salımı eğrilerinde 1-10 mm arasında değişen tane boyut aralığının salım değerlerini önemli ölçüde etkilemediği bildirilmiştir. Fakat gnays agregasında bu aralıkta da tane boyutundaki değişimin salım miktarına etkisinin var olduğu bulunmuştur. Granit ve K-

feldspat agregalarında alkali içeren mineral sadece feldspatken gnaysda mika ve serisit gibi katmanlı-silikatların da yer almasının bu farklılıkta etkili olabileceği belirtilmiştir. Çünkü feldspat sadece çözünerek yapıdan ayrılırken gnaysın içeriğindeki diğer mineraller katyon-değişimi reaksiyonlarında da yer alabilmektedir. 80°C'ye ilave olarak 20, 40 ve 60°C'de de ilave deneyler gerçekleştiren yazarlar, sıcaklık arttıkça alkali salımının da arttığını ve iki parametre arasındaki ilişkinin üstel bir fonksiyonla ifade edilebileceğini bulmuşlardır.



Şekil 3.25 Üç farklı tipte agreganın aşırı doygun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen 28 günlük alkali salımı seviyeleri (Lu et al., 2006b).

Laboratuvar deneyleri uygulayarak sahadaki betonda yer alan agregadan salınabilecek gerçek alkali miktarını bulmadaki zorluk aslında belirigindir. Bazı laboratuvar çalışmalarında agregaların daldırıldığı çözelti tipi olarak doygun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisi tercih edilmiştir. Fakat alkali salımı araştırılan agregada aynı zamanda reaktif silisli bileşenler de içeriyorsa ikincil reaksiyon ürünleri çökelti şeklinde oluşabilmekte ve çözeltinin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ konsantrasyonu zamanla düşmektedir. Bu sıkıntıyı gidermek için çözeltiye doygunluk noktasını da aşacak şekilde fazladan katı kireç eklemek mümkündür. Yine de reaksiyon ürünleri, alkalilerin bir kısmını bünyesine alabileceğinden çözeltiden alınan örnekler üzerinde tespit edilen alkali salımı değerleri, gerçek salım değerinin altında tahmin edilebilmektedir. Ayrıca doygun kireç çözeltisinin pH'ı 25°C'de 12,45 seviyesindeyken beton boşluk çözeltisinin genellikle 13,2-13,9 aralığındadır. Bazı yazarlar normal betonların boşluk çözeltisi alkalinitesini en iyi yansıtan çözeltiler olması gerekçesiyle 0,7 M NaOH çözeltisi kullanıp agregadan K salımını ve 0,7 M KOH çözeltisi kullanıp agregadan Na salımını tespit etmeye çalışmışlardır (Drolet et al., 2017).

Çizelge 3.1 Çeşitli deney koşullarında agregalardan gerçekleşen alkali salımları (Drolet et al., 2017).

Yazar	Agrega	Deney süresi	Sıcaklık (°C)	Agrega / çözelti oranı	Agrega boyutu	Çözelti türü	Agregadan salınan alkali (%Na ₂ O eşd.)
Van-Aardt and Visser, 1977	6 feldspar, 2 kil minerali	250 gün	39	1:50	Toz	25 ml doymun Ca(OH) ₂ ^a	0,01-2,32
Stark and Bhatti, 1986	3 feldspar, 3 kum, 3 çakıl, 1 andezit	90 gün	38	1:5	< 80 µm	25 ml doymun Ca(OH) ₂	0,26-1,99
	3 feldspar, 1 andezit	28 gün	80	1:5	< 80 µm	25 ml doymun Ca(OH) ₂	0,83-5,03
	3 feldspar, 1 andezit	28 gün	80	1:5	< 80 µm	25 ml saf su	0,03-0,13
						40 ml saf su	0,001-0,151
Bérubé and Duchesne, 1996	17 farklı agrega	578 gün	38	1:1	1,25-5 mm	40 ml doymun Ca(OH) ₂ ^a	0,002-0,11
						40 ml alkali hidroksit ^b	> 0,004-0,684
						500 ml alkali hidroksit ^b	
Ouali, 1997	7 farklı agrega	1000 saat	60	1:4,2	0,08-0,63 mm		0,008-0,47
Locati et al., 2010	2 K-feldspar, 2 Na-feldspar	24 saat	80	-	0,15-0,30 mm	Alkali hidroksit ^c	0,009-0,016
Soares et al., 2016	6 granit agregası	455 gün	38	1:4	0-2 mm	Doygun Ca(OH) ₂	0,024-0,045
					4,75-9,5 mm	Doygun Ca(OH) ₂	0,007-0,010
					12,5-20 mm	Doygun Ca(OH) ₂	0,005-0,007
					0-2 mm	Alkali hidroksit ^c	0,190-0,206
					4,75-9,5 mm	Alkali hidroksit ^c	0,131-0,153
					12,5-20 mm	Alkali hidroksit ^c	0,104-0,144

^a Doygun Ca(OH)₂ çözeltisi + fazlalık katı kireç içeren^b Na salımını belirlemek için 0,7 M KOH ve K salımını belirlemek için 0,7 M NaOH^c Na salımını belirlemek için 1 M KOH ve K salımını belirlemek için 1 M NaOH, Ca(OH)₂ yönünden de doymun)

Günümüzde agregadan potansiyel alkali salımı miktarını belirleyebilecek bir standart yöntem bulunmamaktadır. Literatürdeki çalışmalarda agregalar bazen öğütülerek ya da kırılarak daha ince boyutlara, bazen de kontrollü olarak iri agregayı da temsil edecek şekilde belirli tane boyutu aralıklarına getirilmiş, sonrasında çeşitli tipte çözeltilerde, çeşitli sıcaklık seviyelerinde ve farklı süreler boyunca bekletilmiştir. Agregadan alkali salımını belirlemek için periyodik aralıklarla çözeltiden örnekler alınıp Na^+ ve K^+ konsantrasyonları belirlenmiştir. 1970'lerin ortalarından bugüne dek gerçekleştirilen bazı çalışmaların deney koşulları ve sonuçları Çizelge 3.1'de derlenmiştir. Bazı agrega türlerinden alkali salımının mümkün olduğu ve genel olarak çözeltilerin pH seviyesinin, ortam sıcaklığının ve agreganın yüzey alanının artmasıyla alkali salımının arttığı yönünde eğilimler belirlenmiştir (Drolet et al., 2017).

3.2.1.4 Dış kaynaklı alkaliler

Portland çimentosu, ilave bağlayıcı malzemeler, agregalar, karışım suyu ve kimyasal katkıları gibi iç kaynaklı alkalilerin yanı sıra yeraltı suları, buz çözücü tuzlar ve deniz suyu gibi dış etmenlerin de betonda alkaliniteyi artırıcı rolü bulunabilmektedir. NaCl'nin buz çözücü tuz olarak kullanıldığında ASR üzerinde zararlı etkisi olabileceğinden yola çıkarak son dönemlerde potasyum asetat veya sodyum format alternatifleri üzerinde araştırmalar yaygınlaşmaya başlamıştır (Farny and Kerkhoff, 2007). Harç veya betonlara bileşenlerinin karıştırılması esnasında NaCl ekleyen Nixon et al. (1986b), alkali içeriği yüksek çimento kullanımına benzer bir etki ve boşluk çözeltilisinin hidroksil iyon konsantrasyonunda artış görmüştür. Fakat Duchesne and Bérubé (2003) ve Shayan et al. (2010) tarafından yapılan çalışmalarda numunelerin NaCl çözeltilisinde bekletilmesinin genleşmeleri artırıcı yönde önemli etkisi olmadığı bulunmuştur. Bu çalışmalarda NaCl'nin ancak C_3A fazı ile reaksiyonu sonucu kalsiyum kloroalüminat (Friedel tuzu) oluşursa alkalinite de artış oluşabileceği vurgulanmıştır. Çünkü böylelikle NaCl'nin yapısından ayrılan Cl^- iyonlarının yerine yük dengesinin sağlanması için portlanditten OH^- iyonları ayrılmakta ve Na^+ iyonlarının yeni partneri konumuna gelmektedir. Bahsedilen bu mekanizma gerçekleşmezse boşluk çözeltilisinin hidroksil iyonu konsantrasyonunda artış beklenmemektedir. Dolayısıyla alkali tuzlarının etkisine maruz betonlarda C_3A içeriği de önemli rol oynamaktadır.

3.2.1.5 Betonda alkali göçü

Fazla sayıda gelişen ıslanma-kuruma tekrarları, nemin beton içerisinde dolaşmasına ve bu esnada alkalileri de taşınmasına neden olabilir. Böylelikle özellikle kurumunun gerçekleştiği bölgede alkali konsantrasyonunda artışlar oluşabilir. O halde betonda

üniform bir şekilde dağılması durumunda “düşük” olarak tanımlanabilecek bir beton alkali seviyesi, lokal olarak bir noktada yoğunlaştığında önemli gerilmelere ve hasara neden olabilir (ACI 221.1R-98, 1998).

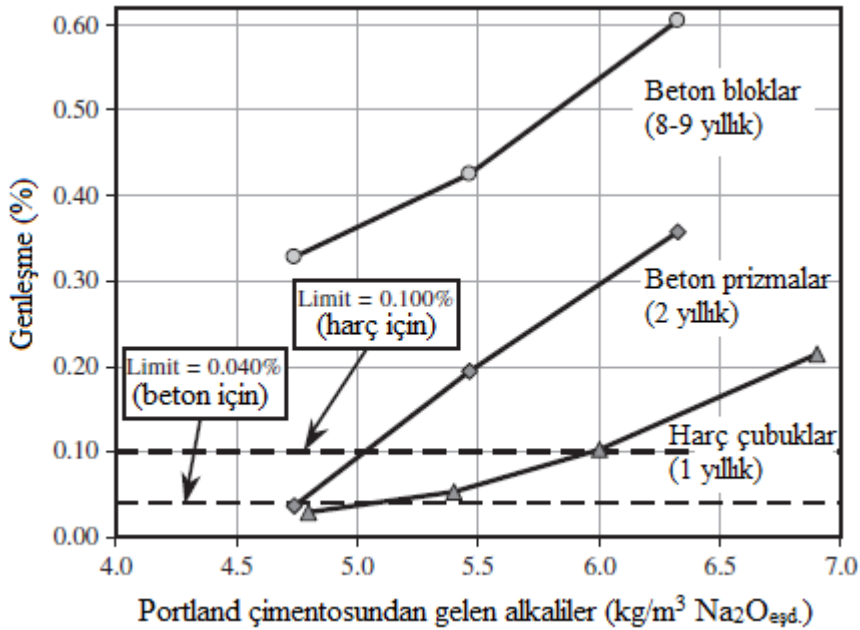
Bérubé et al. (2002) baraj yapıları üzerinde yaptığı incelemelerin sonucunda yüzeye yakın bölgelerde değil, en az 0,5 m derinlikten başlayarak analizlerin yapılması gerektiğini belirtmiştir. Yüzeyin sadece buharlaşmaya maruz kalması durumunda alkali konsantrasyonunun normalden yüksek, yağmur suyu ya da hareketli su etkisi olduğunda ise alkalilerin beton bünyesinden dışarıya taşınması sonucu normalden düşük olarak tahmin edilebileceği belirtilmiştir. Gerçekte beklenen ise iç bölgelerde sıcaklık seviyesinin genelde daha yüksek kalması sonucu ASR'nin daha çok gelişmesi, alkalilerin böylelikle reaksiyon ürünlerinin yapısına bağlanması sonucu konsantrasyonlarının azalması ve nihayetinde iç kısımlarda alkali konsantrasyonlarının yüzeye kıyasla düşük çıkmasıdır.

3.2.1.6 Alkali sızıntısı problemi

Hızlandırılmış deneyler esnasında kapalı kaplarda ve su üzerinde bekletilen betonlarda oluşan alkali sızıntısı problemi, ilk olarak 1946 yılında Blanks and Meissner tarafından açıklanmıştır. Yazarlar, kapların alt kısmında yer alan suyun içerisinde zamanla alkali iyonlarının biriktiğini belirlemişlerdir. Bu durum, numunelerin yüzeyinde yoğunlaşan buharın sıvılaştığında numune yüzeyinden alt tarafa doğru hareket etmesine ve bu esnada betondaki alkalileri de beraberinde taşımasına bağlanmıştır (Lindgård et al., 2012). Betonların su üzerinde bekletildiği deneylerde, numuneleri saklayan kaplar yüksek sıcaklıklı ortama koyulduğunda suyun ve betonun ısı iletkenliklerinin farklı olması nedeniyle sıcaklıklarının da farklı olacağı geçici bir evre oluşmaktadır. Bu esnada bir miktar su beton yüzeyinde yoğunlaşabilir. Dolayısıyla alkali sızıntısının da deney başlangıcında, ara ölçümlerden hemen sonra ve yüksek sıcaklığa maruziyet esnasında hedef sıcaklıktan sapmaların olduğu durumlarda oluşması beklenebilir. Fakat deneyler boyunca su buharının ve betonun sıcaklıkları arasında hiçbir fark olmasa bile suyun yoğunlaşması gerçekleşebilir. Kapiler yoğunlaşma adı verilen olgu, beton boşluklarında yer alan su buharının denge basıncının (p'_s), saklama kabı içerisinde yer alan serbest su buharının denge basıncından (p_s) daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Betondaki boşluğun çapı küçüldükçe p'_s değeri daha da azalır. $\Delta p = (p_s - p'_s)$ basınç farklılığı, su buharının beton boşluklarına doğru hareketini ve sonucunda yoğunlaşmayı beraberinde getirir. Yüksek sıcaklığa maruziyet başlamadan önce ilk kür ile beton boşluklarının tamamen suya doygun olması sağlansa bile kapiler yoğunlaşma gerçekleşebilir. Çünkü zamanla boşluklardaki suyun bir miktarı hidrasyon ile ya da ASR jelleri tarafından

harcanacağından boşluklara tekrar su girişi olağandır. Kapiler yoğuşma, beton iç bölgesine göre daha boşluklu olması muhtemel olan ve mikro-çatlak oluşumundan daha çok etkilenebilen kabuk (yüzey) bölgesinde daha fazla gerçekleşmektedir (Costa et al., 2017).

Beton alkali seviyesinin ve numune boyutunun genleşmeler üzerindeki etkisine dair bir çalışmanın sonuçları Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Grafikteki veriler 900 mm ayrıtlı olan ve doğal koşullarda (bir maruziyet sahasında) bekletilen büyük küp bloklara, 38°C'de su üzerinde bekletilen 75x75 mm kesit alanlı beton prizmalara ve yine 38°C'de su üzerinde bekletilen 25x25 mm kesit alanlı harç çubuklarına aittir. Karışımlarda agrega kütlesinin %25'ini reaktif flint agregası, geri kalanını ise reaktif olmayan kireçtaşı oluşturmuştur. Verilerin ait olduğu beton prizmaların ve harç çubuklarının yaşı, büyük küp örneklerle kıyasla daha azdır. Fakat Şekil 3.26'da belirtilen yaşlara kadar alınan ölçümlere göre, beton prizma ve harç çubuklarının genleşme seviyelerinin artık nihai genleşme değerlerine ulaştığı fakat maruziyet sahasında bekletilen küplerde hala genleşme artışları gözlemlendiği belirtilmiştir. Yazarlar, laboratuvarında yüksek sıcaklıklarda bekletilen daha küçük boyutlu numunelerdeki bir miktar alkalinin beton bünyesinden dışarıya sızabildiğini ifade etmiştir. Gerçek koşullarda bekletilen örneklerde gözlenen daha yüksek ve henüz sonlanmayan genleşme seviyelerini, bu betonlarda alkali sızıntısı problemi olmamasına bağlamışlardır (Thomas et al., 2006).



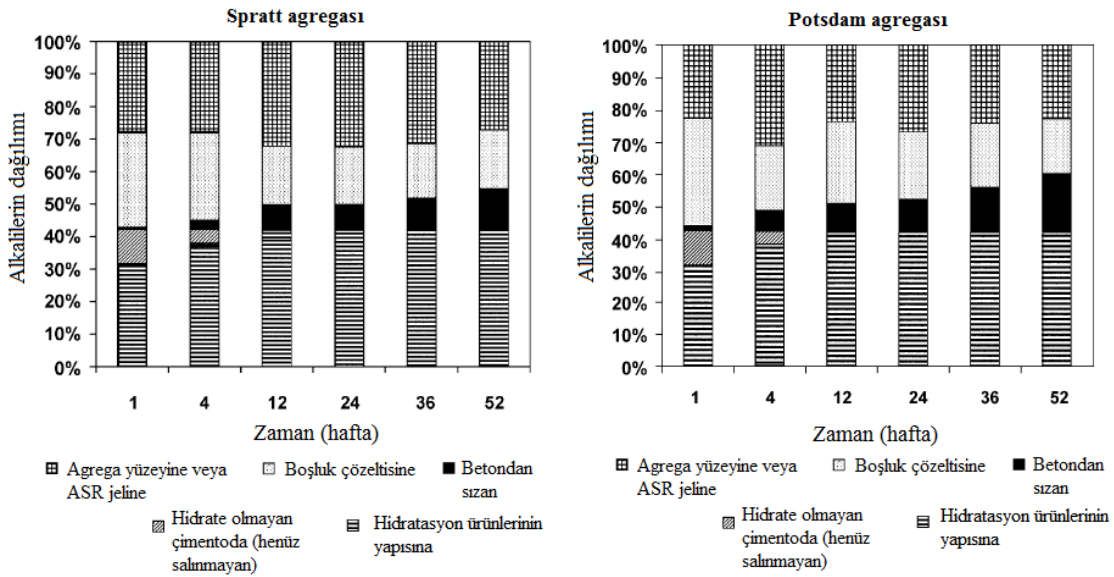
Şekil 3.26 Üç farklı deney koşulunda alkali içeriğinin genleşmeye olan etkisi (Thomas et al., 2006).

Mineral katkı içeren karışımlarla gerçekleştirilen 38°C'deki beton prizma deneyinde 2 yıl sonunda yataylaşan genleşme-zaman eğrileri, sistemdeki alkalilerin ASR ürünlerine bağlanarak ya da betondan sızarak tükenmesinin bir sonucu olarak gösterilmiştir (Duchesne and Bérubé, 2001). Thomas et al. (2006) tarafından silisli kireçtaşıyla gerçekleştirilen 38°C'deki beton prizma deneyinde, betondaki alkalilerin 90 gün sonunda %20'sine, 1 yıl sonunda da %35'ine varan oranının sızabildiği belirtilmiştir. Uzun vadede oluşan bu alkali seviyesi azalmaları, özellikle yavaş/geç reaksiyona giren agregaların toplam genleşme seviyesinin belirlenmesinde daha da büyük sorun teşkil etmektedir. Lindgård et al. (2013a) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise 38°C'ye ve 60°C'ye maruz beton prizmalarda sırasıyla %10-49 (112 haftada) ve %14-37 (39 haftada) mertebelerinde alkali sızıntısı değerleri rapor edilmiştir. Sıcaklık seviyesinden bağımsız olarak ilk 4 haftada alkalilerin %3-20 gibi önemli bir kısmının beton bünyesinden çıkışının genleşme sonuçlarını etkileyen en önemli parametrelerin başında geldiği ifade edilmiştir.

Fournier et al. (2004a) sadece sıcaklık seviyesinin farklı bir parametre olduğu 38°C'lik beton prizma ve 60°C'lik hızlandırılmış beton prizma deneyi sonuçlarına göre, 60°C'de nihai genleşme değerlerinin önemli ölçüde daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Bunun nedeni olarak da sıcaklık seviyesindeki artış ile alkalilerin betonun içerisinden yüzeyine doğru olan difüzyon hızının artması gösterilmiştir (Lindgård et al., 2012). Sıcaklık seviyesinin sabit olup numune boyutunun değişken olduğu bir diğer çalışmada ise numune boyutu küçüldükçe nemin beton içerisine girişi kolaylaşmış ve böylelikle erken yaşlarda genleşme hızı artmıştır. Diğer bir yandan küçük boyutlu numunelerden deneyler süresince sızan alkali miktarının da daha fazla olduğu ve bu betonlarda hem genleşme-zaman grafiklerinin daha erken yataylaştığı hem de nihai genleşme seviyelerinin daha az olduğu ifade edilmiştir (Bérubé et al., 2012a).

Rivard et al. (2003) tarafından yapılan bir çalışmada 38°C'de kapalı kaplarda bekletilen beton prizmalarda, beton bünyesinde yer alan alkalilerin zamanla nasıl dağıldığına yönelik deneysel analizler ve bazı kabullere dayanarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. İki farklı reaktif agregayla karışımlar hazırlanmıştır. Karışımların ortak yönü 320 kg/m³ çimento içeriğine, 0,55 su/çimento oranına ve başlangıçta çimentodan gelen 4,00 kg/m³ eşdeğer Na₂O içeriğine sahip olmalarıdır. Alkalilerin sertleşmiş beton içerisindeki olası farklı konumları arasından boşluk çözeltisinde yer alan ve beton bünyesinden sızan miktarlar kimyasal analizler yardımıyla bulunmuştur. Henüz çimentodan salınmayan alkaliler ise hidrate olmayan çimento miktarından yola çıkılarak hesaplanmış ve 38°C'de 1, 4 ve 12. haftalarda hidratasyon derecelerinin sırasıyla %75, %90 ve %100 olduğu farz edilmiştir. Ayrıca hidratasyon ürünlerinin yapısına katılanların

hesabında mevcut toplam alkalinin %42'sinin ürünler tarafından bağlandığı kabul edilmiştir. Bu miktarlar belirlendikten sonra arta kalan alkalilerin ise önce agrega yüzeyine daha sonra ASR'nin gelişimiyle de alkali-silis jelinin yapısına katıldığı düşünülmüştür. Şekil 3.27'de sunulan sonuçlara göre başlangıçta çimentonun bünyesinde yer alan alkalilerin 1 hafta sonunda yaklaşık üçte birinin boşluk çözeltisinde yer aldığı, daha sonra çözeltideki miktarlarının zamanla azalma eğiliminde olduğu bulunmuştur. Sızan alkali miktarında ise zamanla artışlar görülmüştür. 52 haftalık deney süresi sonunda Spratt ve Potsdam agregasıyla hazırlanan bu karışımlarda alkalilerin sızma oranı sırasıyla %12 ve %18'e ulaşmıştır. Toplam alkalilerin yaklaşık %42'sinin hidrasyon ürünlerinin yapısına katıldığından aslında reaksiyon için daha elverişli konumdaki alkalilerin sızma oranları sırasıyla %22 ve %30'a ulaşmaktadır. Son olarak genleşme sonuçlarında elde edilen verilere göre Spratt agregasının daha reaktif olduğu bulunmuştur. Bu nedenle Spratt agregası ile hazırlanan karışımda oluşan jel miktarının ve alkalilerin bu jel yapısına katılan oranlarının artması beklenen bir sonuçtur. Bu durum, sonuçlardan görüldüğü gibi reaktivitesi daha yüksek olan agregalarda beton bünyesinden sızabilen alkali miktarının azalmasına yol açmaktadır (Rivard et al., 2003).



Şekil 3.27 CSA A23.2-14A (38°C) beton prizma deneyi uygulanan karışımlarda alkalilerin dağılımı (Rivard et al., 2003).

Kapalı kaplarda dik olarak bekletilen numunelere sadece alt kesit açık kalacak şekilde plastik kılıf geçirme, numuneleri alüminyum folyo ile sarma ve betonlara silan bazlı kaplama malzemesi uygulama olmak üzere üç farklı işlemin etkisinin araştırıldığı bir çalışmada alkali sızıntısı değerlerinde plastik ve alüminyum folyo uygulamalarında azalmalar sağlanabilmiştir. Fakat en yüksek genleşmelerin koruyucu uygulanmayan

kontrol numunesinde elde edilmesi ve koruyucu önlemlerin uygulandığı durumlarda kontrol numunesinin nihai genişmesinin en fazla %60-70'ine ulaşılması uygulamaların başarısız olarak nitelendirilmesine neden olmuştur (Bérubé et al., 2012a). Başka bir çalışmada numunelerin önceden yüksek alkalili ($\text{pH} = 14,2$) sıvıya daldırılan bir tekstil malzemesi ile sargılanmasının alkali sızıntısını önleyebildiği, fakat özellikle düşük alkalili karışımlarda beton içerisine alkali girişi sağlayarak genişmeleri arttırabildiği ifade edilmiştir (Lindgård et al., 2016).

3.2.2 Reaktif silis

3.2.2.1 Kristalografik ve mineralojik yapı

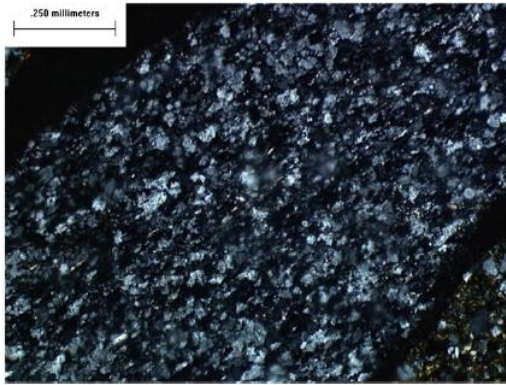
Daha önce “reaksiyon mekanizması” adlı başlıkta açıklandığı gibi silisin yapısındaki düzensizlik arttıkça reaktivitesi de artmaktadır. Dolayısıyla kristallik derecesi ve kristal kafesteki kusurların miktarı, agreganın potansiyel reaktivitesini ve agregadaki silisin çözünübilirliğini etkilemektedir. Diğer önemli etmenler ise agregadaki reaktif bileşenlerin miktarı ve dağılımı ile agreganın porozitesi ve boşluklarının bağlantılı olup olmadığıdır (Broekmans, 2002).

Agregaların reaktivitesini etkileyen en önemli unsurlardan biri mineralojik yapılarıdır. ASR'ye neden olabilecek silisli mineraller genel olarak iki çeşittir: a) kuvarsın bazı düzensiz yapılarını da içerecek şekilde silisli yarı kararlı yapılar (opal, kalsedon, tridimit, kristobalit gibi), b) nötr ve asidik karakterdeki volkanik kayalarda matris fazında yer alan alümina-silikatlı camsı faz (St John et al., 1998; Lindgård et al.'dan, 2012). Agreganın mikroskop altında incelenmesiyle yapı ve doku özelliklerinin yanı sıra mineral tipleri ve minerallerin hangi oranlarda dağıldığı ortaya çıkabilmektedir. Reaktif olup olmadığından şüphe duyulan agregaya uygulanacak deneyler serisi, uygun bir petrografik analiz ile başlamalıdır (Lindgård et al., 2012).

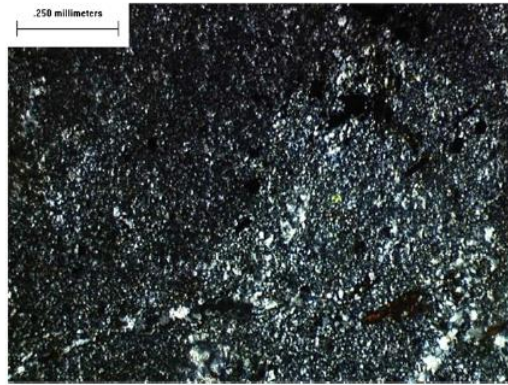
Silisin doğada en sık rastlanan polimorfu α -kuvarstır. Diğer polimorflar arasında yer alan ve yüksek sıcaklıklarda oluşum gösteren kristobalit ve tridimit daha genç kayalarda bulunabilmektedir. Her ne kadar kristal düzende de olsa bu yapılar, normal sıcaklıklarda termodinamik açıdan kararsız halde olup ASR sonucu çözünmeye yatkındır (Pedersen, 2004). Silisin farklı yapıları arasından reaksiyona girme eğilimi en düşük olanı kristal yapıdaki kuvarstır. Kuvars içeren agregalarda ASR ile karşılaşıldığında reaksiyonun nedeni başlangıçta kristal kafesteki kusurlar ve dislokasyonlar olarak gösterilmiştir. Daha sonra da kristalde oluşan açısız deformasyon ile reaktivite ilişkilendirilmeye çalışılmıştır (Gogte, 1973; Dolar Mantuani, 1981; West, 1991). Fakat

Grattan-Bellew (1992b) tarafından yapılan çalışmalar sonucu basınç altında başkalaşım geçiren kayaların reaktivitesinin mikrokristalin kuvarsın varlığından kaynaklandığı bulunmuştur. Mikrokristalin kuvars miktarı ile harç çubuğu genleşmeleri arasındaki korelasyon kuvvetli çıkmıştır. Kristal yapının boyutundaki azalma, reaksiyon için elverişli olan gren sınırlarının toplam alanını arttırmaktadır. Dolayısıyla kuvarstan kaynaklanan reaktiviteyi belirlemede açısal deformasyonun çok uygun olmadığı anlaşılmış, gren sınırlarının toplam alanı ve kuvarsın ortalama gren boyutu gibi parametreler öne çıkmıştır (Wigum, 1995; Alaejos and Lanza'dan; 2012).

Mikrokristalin ve kriptokristalin kuvars kavramları, sırasıyla 4-62 μm aralığında ve $<4 \mu\text{m}$ boyutunda kuvars grenlerine karşılık gelmektedir (RILEM AAR-1.1, 2016). Alaejos and Lanza (2012) tarafından yapılan çalışmada kuvarsın gren boyutunun harç çubuğu genleşmeleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlara göre agrega fazında hacimce %2,6 oranında 0-10 μm kuvars ya da %8,3 oranında 10-60 μm kuvars bulunduğu 14 günlük harç çubuğu genleşmesi %0,1'e (standart limit) denk gelmektedir (Şekil 3.28). 60-130 μm boyutundaki kuvarsın genleşmeleri etkilemediği görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 3.28 a) Reaktif kuvars (10-60 μm) b) Oldukça reaktif kuvars ($<10 \mu\text{m}$) (Alaejos and Lanza, 2012).

Potansiyel olarak reaktivite gösterebilecek mineral ve kayaç türleri literatürde ve çeşitli standartlarda yer almaktadır (ASTM C294-12, 2012; CSA A23.2-15A, 2004; BS 7943, 1999; RILEM AAR-1.1, 2016). Bunlar arasında örneğin RILEM komitesi tarafından önerilen AAR-1.1 deney yöntemi, hem petrografik analizin nasıl gerçekleştirileceğini açıklamakta hem de daha önceden reaktivite gösterdiği çeşitli ülkelerde rapor edilen bazı kayaçları ve iç yapılarında sahip oldukları mineralleri tanımlayarak örnekler sunmaktadır. Bu tip genel sınıflandırmalar her ne kadar geçmiş

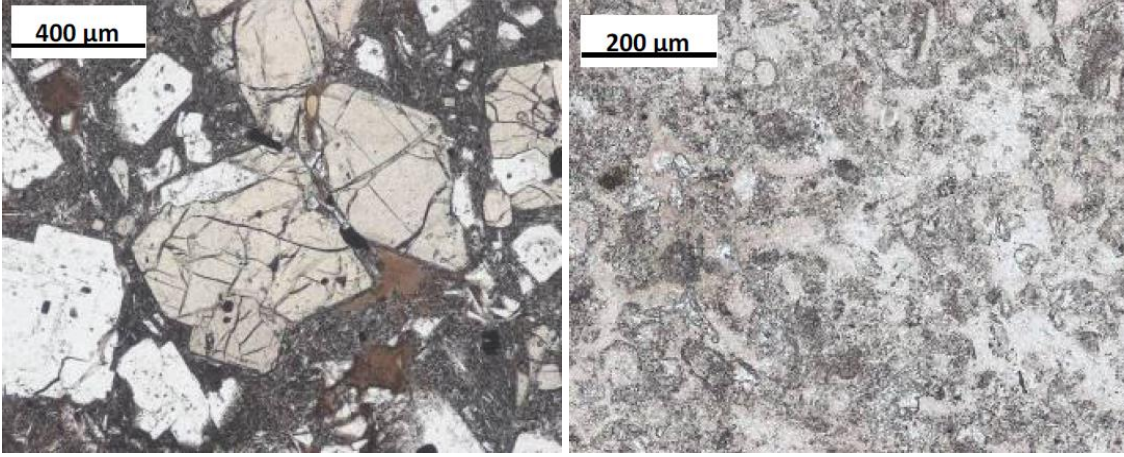
tecrübelere dayansa da benzer kayaç türleri, jeolojik geçmişlerine ve minerallerinin bileşimlerine bağlı olarak reaktivite açısından önemli farklılıklar gösterebilir (RILEM AAR-1.1, 2016; Lindgård et al., 2012).

Yine RILEM komitesinin girişimleriyle dünya çapında 24 farklı ülkeden (Türkiye de dahil olmak üzere) reaktif olduğu bilinen çeşitli agregalar ve bu agregalarla hazırlanan beton örnekler temin edilip mikro-analizlere tabi tutulmuştur. “Petrografik Atlas” adı verilen yayında ince-kesitler üzerinde elde edilen mikro-görüntüler sunulup bu görüntülerde gözlenen agregadaki mineral bileşenlerin türleri, dağılımları, yapıları ve doku özellikleri ile ASR’ye neden olabilecek bileşenin ne olduğu açıklanmıştır. Atlastaki bulgular genel olarak incelendiğinde çeşitli kayaç türlerinde gözlemlenen ve reaktiviteye sahip olduğu düşünülen bileşenlerin türleri Çizelge 3.2’de derlenmiştir. Bu yayın, AAR-1.1’in tamamlayıcısı niteliğinde olup AAR-1.2 adıyla yayımlanmıştır. Şekil 3.29a’da Japonya’dan bir tip andezit, Şekil 3.29b’de Danimarka’dan bir tip çört ve Şekil 3.29c’de İsviçre’den bir tip gnaysın mikro-görüntüleri, sırasıyla reaktif mağmatik, tortul ve başkalaşım kayaçlara örnek teşkil etmesi amacıyla sunulmuştur.

Çizelge 3.2 Farklı ülkelerde reaktivite gösterdiği bilinen çeşitli kayaç isimleri ve potansiyel reaktiviteye neden olan mineral bileşenleri (RILEM AAR-1.2, 2016).

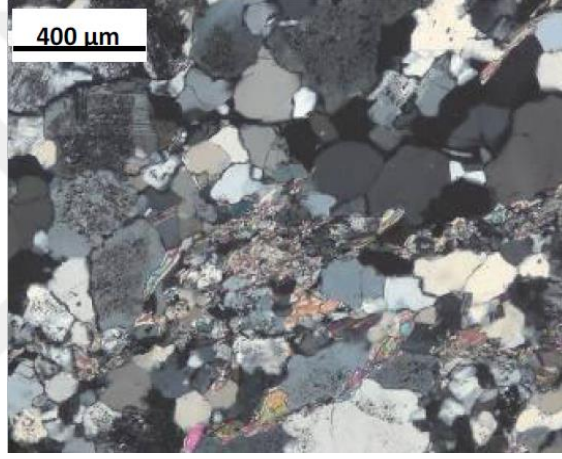
Kristal kuvars			Silisin kararsız yapıları*	Volkanik cam
Mikrokristalin (< 100 µm)	Kriptokristalin (<10 µm)	Kuvars yapısında kusur		
Granit	Riyolit	Gnays	Andezit	Andezit
Flint/çört	Riyo-dasit	Kuvarsit	Bazalt	Bazalt
Grovak	Flint/çört	Şist	Dasit	Felsik porfir
Kumtaşı	Grovak	Fay breşi	Riyo-dasit	Riyolit
Granofel	Kiltaşı	Kataklasit	Riyolit	
Fillit	Kumtaşı	Milonit	Flint/çört	
Şist	Silisli kireçtaşı		Kumtaşı	
Arduvaz	Arduvaz		Silisli kireçtaşı	
	Kalk-silikat			
	Gnays			
	Şist			
	Fillit			
	Kuvarsit			
	Kataklasit			
	Fay breşi			
	Milonit			
	Tüf			

* yüksek sıcaklıkta: kristobalit, tridimit; düşük sıcaklıkta: opal, kalsedoni, moganit



(a)

(b)



(c)

Şekil 3.29 a) Piroksen ve plajiyoklaz fenokristallerinin yaygın olduğu, matrisin volkanik cam ile daha küçük plajiyoklaz, piroksen, olivin ve opal yapılarından oluştuğu andezit, b) Esas olarak kriptokristalin kuvars, opalin silis ve kalsedon ile eser miktarda karbonatlı mineraller içeren ve literatüre göre pesimum davranış gösteren çört, c) Deforme kuvars, plajiyoklaz, biyotit, klorit, serisit ve demir oksit içeren gnays mikro-görüntüleri (RILEM AAR-1.2, 2016).

Tortul kayaçlardaki reaktivitenin daha çok opalin silis, mikrokristalin/kriptokristalin kuvars ya da kalsedon varlığından, başkalaşım kayaçlarında ise kuvars yapısında meydana gelen deformasyon sonucu kristal kafeste oluşan gerilmelerin yarattığı kusurlardan kaynaklandığını belirtmek mümkündür. Çoğu durumda volkanik kayaçlarda reaktiviteye neden olan faz ise alkali çözeltilerde çözünürlüğü çok yüksek olan riolititik yani Si açısından zengin, Fe ve Mg açısından yoksun camsı matristir (Fernandes et al., 2012; RILEM AAR-1.2, 2016). Çopuroğlu et al. (2009) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada yaklaşık %40'lık bir hacmi kaplayan bazalt matrisinin

ortalama %67,5'lik SiO₂ içeriği genleşmelere neden olmuştur. Korkanç and Tuğrul da (2005) 11 farklı bazalt üzerinde gerçekleştirdikleri analizlerde camsı fazın reaktiviteden sorumlu olduğundan bahsetmiştir. Fakat bu yazarlar, camsı fazın kompozisyonu yerine agregaların genel kimyasal kompozisyonları üzerinden sonuçları yorumlamışlar ve bazaltın SiO₂ içeriği %50'yi aştıkça yani bazik yapıdan nötr ve asidik yapıya geçtikçe genleşmenin arttığını belirtmişlerdir.

3.2.2.2 Reaktif agreganın tane boyutu

Reaktif agreganın tane büyüklüğünün genleşmeler üzerindeki etkisi Stanton'un (1940) ilk çalışmasından beri araştırılmakta olup bu konuda çok sayıda yayın bulunmaktadır. Bu konuda iki önemli etki göz önüne alınmalıdır: 1) ince agregadan oluşan reaktif agreganın reaksiyon hızı daha yüksektir, 2) uzun süreli genleşmeler dikkate alındığında iri agreganın genleşmesi daha yüksek çıkabilmektedir (Andiç-Çakır, 2007; Ramyar, 2013). Reaksiyonun agregaya ile çimento hamurunun temas noktasından başladığı düşünüldüğünde agreganın tane boyutunun küçülmesiyle yüzey alanında ve genleşme hızında artış beklenmektedir. Fakat iri agregalarda özellikle agregaya içerisine de doğru gelişen reaksiyon çatlakları uzun vadede oluşan hasarda ciddi artış yaratabilir.

Çizelge 3.3'te agregaya tane boyutunun etkisine dair gerçekleştirilen farklı çalışmaların sonuçlarına örnekler sunulmuştur. İkinci kolonda elde edilen veriler farklı tane boyutlarının ayrı ayrı kullanıldığı ve genleşmelerin iri boyutlara kıyasla daha ince boyutlarda maksimum olduğu durumlara ait örneklerden oluşmaktadır. Üçüncü kolonda elde edilen veriler ise hangi agregaya boyutunun genleşmeye neden olmadığına belirgin olduğu çalışmalara aittir. Son satırda ise oluşan ASR etkisini engellemek için reaktif agreganın toz kısmının etkili olabileceğine dair bir örnek sunulmaktadır. Çizelge 3.3'te görülen ve farklı çalışmalarda elde edilen veriler arasında değişkenlikler görülmesi çok doğaldır. Bu durum herşeyden önce kullanılan agregaların doğasından ve kompozisyonundan kaynaklanan farklılıklara bağlanabilir (Mukhopadhyay and Liu, 2014).

Agreganın tane boyutu belirli bir kritik sınırın altına düştükçe genleşmeler ihmal edilebilir seviyelere düşmektedir. Hatta bazı reaktif agregaların öğütülmesi, ASR kaynaklı genleşmeleri engelleyici yönde rol oynamaktadır. İzlanda'da reaktif riyolit agregasının %9 oranında kullanılarak portland çimentosu klinkeri ile beraber öğütülmesi ve bu çimentonun agregaya boyutundaki riyolitin yol açtığı genleşmeleri engelleyici rolü buna örnektir (Asgeirsson and Gudmundsson, 1979; Thomas et al.'dan, 2013). Pedersen'in (2004) tez çalışmasında atık camlardan ve riyolitten elde edilen filler

boyutundaki malzemelerin kendiliğinden yerleşen betonda genleşmeleri önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir. Aslında bu örneklerle tersten bakılırsa, aslen çok etkin bir pozolan olan silis dumanının topaklaştığında reaktif agrega gibi davranıp ASR genleşmelerine yol açması da tane boyutu etkisinin olağan bir sonucudur (Maas et al., 2007).

Çizelge 3.3 Agrega boyutunun bir fonksiyonu olarak ASR genleşmesi (Mukhopadhyay and Liu, 2014).

Araştırmacı	Maksimum genleşmenin oluştuğu tane boyutu	Sıfıra yakın genleşmenin oluştuğu tane boyutu	Kullanılan agrega/deney yöntemi
Stanton, 1940	0,17-0,6 mm		Opal ve kalsedon içeren silisli magnezyumlu kireçtaşı / harç çubuğu deneyi – 38°C’de
Woods, 1968	0,07-0,85 mm		Opalin agrega taneleri / harç çubuğu deneyi
Zhang et al., 1999	0,15 mm		Silisli agrega / harç çubuğu deneyi
Kuroda et al., 2000, 2004	0,48 mm		Sadece reaktif agrega / harç çubuğu deneyi
	0,15-0,30 mm		Reaktif ve reaktif olmayan agrega kombinasyonları / harç çubuğu deneyi
Hobbs and Gutteridge, 1979; Han and Tang, 1984		0,02 mm’den az	Harç çubuğu deneyi
Kawamura et al., 1983; Zhang et al., 1990; Shayan, 2002; Multon et al., 2008		0,05-0,15 mm	Harç çubuğu deneyi
Shao et al., 2000; Shayan, 2002; Moisson et al., 2004		<0,1 mm (ASR’yi engellemek için)	Harç çubuğu deneyi

Bažant et al. tarafından 2000 yılında farklı reaktif agrega boyutlarında karşılaşılan ASR hasarlarının kırılma mekaniği yasaları göz önüne alınarak modellenilebilmesi amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, ASR’nin agreganın yüzeyinden başlayarak agrega tanesi içerisine doğru ilerlediği fikrinden yola çıkarak tane boyutu büyükse, reaktif agreganın göreceli olarak daha küçük bir hacminin reaksiyona uğradığını belirtmişlerdir. Bir başka ifadeyle tane boyutu arttıkça agreganın yüzey alanı/hacim oranı azaldığından yüzeyde oluşan ASR jeli miktarı azalmakta, ayrıca agreganın merkez kısımlarında yer alan reaktif özellikli minerallerle OH⁻ iyonlarının teması zorlaşmaktadır. Bu açıdan bakıldığında maksimum genleşmeyi veren pesimum boyut, belirli bir deney süresinde agreganın tüm hacminin reaksiyona uğrayabileceği tane çapına denk gelmektedir. Yani pesimum boyutun altına inildikçe karşılaşılan genleşmeler artık tane

boyutundan bağımsız olmaktadır. Hatta tane boyutunun pesimum boyuttan daha düşük seviyelerde kalacak şekilde azaltılması, reaksiyona giren tanelere yakın bölgelerde daha önceden var olan boşluk, mikro-çatlak gibi kusurlarda oluşacak gerilme şiddeti faktörünün (veya enerjinin salınma hızının) azalmasına neden olacak, çatlakların yayılması zorlaşacak ve ASR hasarı azalacaktır.

Son dönemde üzerinde çokça araştırma yapılan atık cam agregası, neden olduğu ASR genleşmeleri açısından normal agregalara kıyasla önemli farklılıklar sergilemektedir. 80°C’de uygulanan harç çubuğu deneyinde 14 günlük deney süresi boyunca genleşme gözlenmesi de deney süresinin uzatılmasıyla çok yüksek genleşme seviyesi ve hasarla karşılaşmıştır (Zhu et al., 2009; Yüksel et al., 2013). Genleşmelerde ilk günlerdeki bu durgunluk, Zhu et al. (2009) tarafından 80°C’de çok ince cam tanelerinin puzolanik reaksiyonuna ve iri tanelerin genleşmesinin böylelikle ertelenmesine bağlanmıştır. Diğer bir önemli farklılık da cam tanelerinin boyutundaki artışın genleşmeleri de arttırmasıdır (Zhu et al., 2009; Rajabipour et al., 2010; Lee et al., 2011; Yüksel et al., 2013). Rajabipour et al. (2010) tarafından incelenen mikroskop görüntüleri sonucunda normal agregaların aksine cam agregası kullanıldığında reaksiyonun agrega yüzeyinden değil, cam tanelerinde reaksiyon öncesinde de var olan çatlaklardan başladığı belirtilmiştir. Camın tane boyutu azaldıkça çatlakların sayısı, boyutu ve boşluk çözeltisi tarafından ulaşılabilirliği azaldığından genleşmeler de azalmaktadır.

3.2.3 Nem

Nemin alkali-silis reaksiyonunu tetikleyen iki farklı rolü bulunmaktadır. Öncelikle agregadaki silisli minerallerin yer aldığı reaksiyon sahasına alkali ve hidroksil iyonlarını taşıyan faz konumundadır. Reaksiyon sonucu oluşan jel ürünü de ancak bünyesine su alarak şişmeye uğrarsa genleşme ve gerilmeler oluşmaktadır (ACI 221.1R-98, 1998). Betonda suyun kaynağı içsel (karışım suyundaki fazlalık) ya da dışsal olabilir (Castro, 2012). Özellikle otoyol kaplamaları ve köprüleri, otopark yapıları, su tutucu yapılar ile su altındaki yapılar reaksiyona oldukça yatkındır (ACI 221.1R-98, 1998).

Betonun içsel bağıl nemi, reaksiyon için elverişli nem derecesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. 21-24°C sıcaklık seviyesinde betonun içsel bağıl nemi %80’den daha fazlaysa genleşme oluşması için yeterli nemin var olduğu düşünülmektedir (Stark, 1991; ACI 221.1R-98’den, 1998).

Betona nem girişini engellemenin yollarından birisi su/çimento oranında azaltma uygulamaktır. Fakat bu durumun olumsuz etkilerinden biri su miktarındaki azalma sonucu beton boşluk çözeltisindeki alkali konsantrasyonunun artacak olmasıdır. Ayrıca boşluk miktarındaki azalma, jelin neden olduğu genleşme sonucu oluşan gerilme seviyesinin artmasına neden olacaktır. ASR'yi önleme açısından düşünüldüğünde, beton geçirimsizliğini azaltmanın daha uygun yolları etkin bir kürleme yöntemi ve uygun bir mineral katkının doğru oranda kullanımıdır (ACI 221.1R-98, 1998).

Lindgård et al. (2012) tarafından ASR'nin teşhisi için uygulanan performans deneylerindeki önemli parametrelerin derlendiği bir çalışmada, deneylerde su/bağlayıcı oranının aşırı düşürülmesinin ($s/b \leq 0,45$) zati büzülme ön plana çıkarttığından bahsedilmektedir. Bu betonlarda dışarıdan su girişi olmadığında bağıl nem zamanla %80'in altına kolaylıkla düşmektedir. Sonuç olarak aslında potansiyel olarak reaktif bir karışımın, deneyler esnasındaki nem eksikliği nedeniyle reaktivliğinin anlaşılamaması tehlikesi ortaya çıkmaktadır. Su/bağlayıcı oranının yükseltilmesi ise daha yüksek miktarda ve daha sürekli yapıda boşluk hacmine (kapiler porozitede artışa), böylelikle beton içerisindeki iyon taşınmasının artmasına, dışarıdan da nem girişinin kolaylaşmasına yol açarken alkali sızıntısı probleminde de artışa neden olacaktır.

Lindgård et al. (2013b) tarafından gerçekleştirilen bir deneysel çalışmada ise bağıl nemin ancak boşluklarda bulunan suyun termodinamik durumunu yansıttığı, boşluklardaki suyun miktarı hakkında bilgi vermesinin mümkün olmadığı bildirilmiştir. Ayrıca bağıl nemi hassas bir şekilde ölçmenin zor olduğundan da bahsedilmiştir. Araştırmacıya göre kapiler doygunluk derecesi, reaksiyon için elverişli ve kapiler etkiyle çekilebilecek olan suyun (jel boşlukları ve kapiler boşluklardaki) miktarının doğrudan bir göstergesidir. Bu değerın hesaplanmasında basit olarak numunelerin deney süresince herhangi bir andaki nemli ağırlığı, suya doygun ağırlığına bölünmüştür.

3.3 ASR'nin Tespitinde Kullanılan Deney Yöntemleri

ASR hakkında yapılan hem laboratuvar hem de saha çalışmaları özellikle Avrupa, ABD, Kanada ve Japonya başta olmak üzere dünyanın dört bir yanında hızla ilerlemektedir. Günümüzde tercih edilen deney yöntemleri incelendiğinde ASTM tarafından standart hale getirilen ve yıllardır kullanılmakta olan özellikle harç çubuğu (ASTM C1260) ve beton prizma deneylerinin (ASTM C1293) öne çıktığı ifade edilebilir. Aslında Stanton'un 1940 yılındaki ilk çalışmasından hemen sonra ABD'de test metodlarının geliştirilmesi ve standartlaştırılması konularında çaba gösterilmeye başlanmıştır. İlk aşamada geliştirilen harç çubuğu yöntemleri (ASTM C1260 ve ASTM

C227) ve kimyasal yöntem (ASTM C289) Stanton'un da (1940) çalışmasına konu olan nitelikteki hızlı reaksiyona giren (oldukça reaktif) agregalar için iyi sonuç vermiştir. Ancak zaman içinde farklı ülkelerde farklı mekanizmalarla kendini gösteren alkali-agrega reaksiyonlarıyla (alkali-karbonat reaksiyonu da dahil) karşılaşmış, yani farklı türlerdeki kayaçların reaksiyondan çok farklı şekillerde etkilenebildiği görülmüştür. Bu durum ülkelerin kendi jeolojik yapısına ve tecrübesine göre kendilerine özgü deney yöntemleri geliştirmesini beraberinde getirmiştir (Nixon and Sims, 2016).

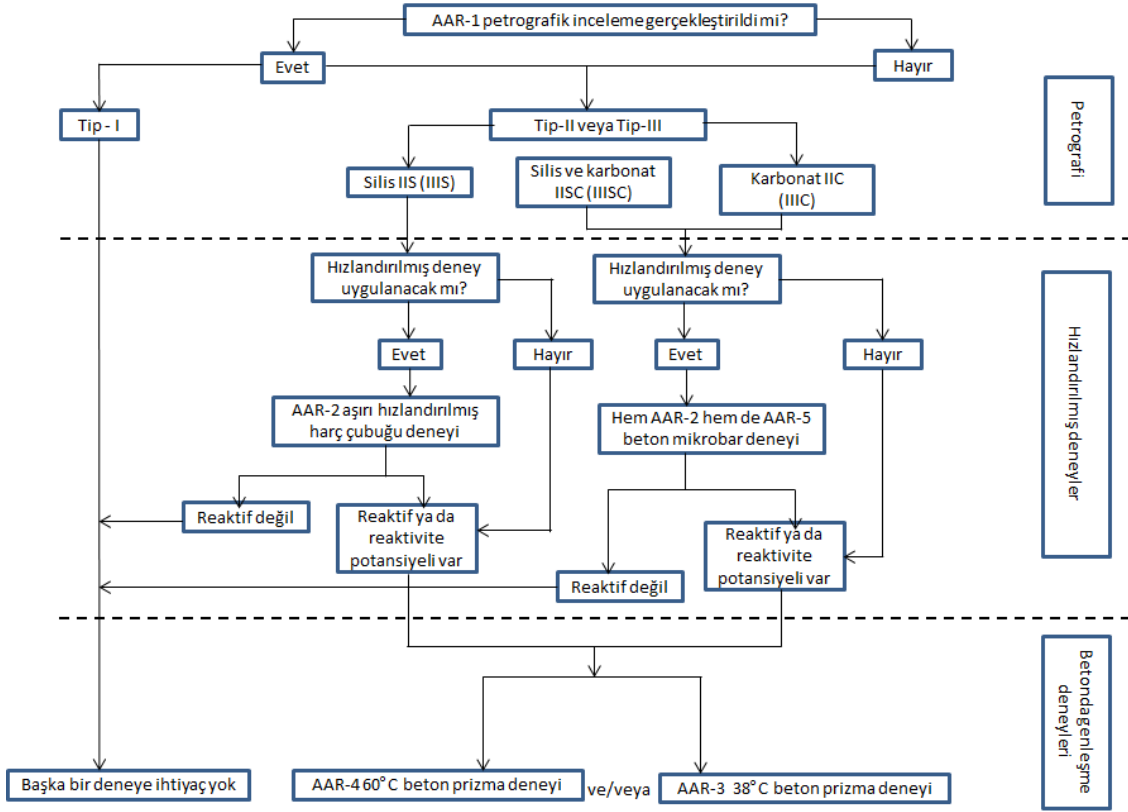
Avrupa'da yerel deney yöntemlerinin sayısındaki artışın yarattığı sorunlar neticesinde RILEM TC-106 komitesi 1988 yılında güvenilir, saha performansını yansıtabilecek, uygulamanın pratikliği açısından hızlı sonuç verebilecek ve uluslararası kabul görebilecek deney yöntemleri geliştirmek amacıyla kurulmuştur. Bu komitenin odak noktası ilk aşamada petrografik inceleme (AAR-1), hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi (AAR-2, 80°C) ve beton prizma yöntemi (AAR-3, 38°C) olmuştur. Daha sonra 2000'de kurulan RILEM TC 191-ARP komitesi kapsamını daha geniş tutarak hızlandırılmış beton prizma yöntemi (AAR-4, 60°C) ve karbonatlı agregaların reaktivitesini araştırmada kullanılan AAR-5 yöntemi üzerine de önemli çalışmalar gerçekleştirmiştir. Ayrıca ayrı ayrı geliştirilen bu beş deney yönteminin, sistematik bir değerlendirme halinde nasıl uygulanacağı, yani bir akış şeması çizilmesi üzerine de çalışılmıştır. RILEM TC 191-ARP'nin organizasyonunda başlatılan uluslararası laboratuvarların karşılaştırmalı deneylerinden edinilen tecrübe, 2006'da kurulan RILEM TC 219-ACS komitesi tarafından değerlendirilmiş ve deney yöntemleri, son hallerine karar verilerek 2016'da yayımlanmıştır. Günümüze dek birbiri ardına çalışmalarını sürdüren bu üç RILEM Teknik Komitesi'nin ortak ve temel hedefi, geliştirilen deney metotlarının CEN (Avrupa Standardizasyon Komitesi) tarafından değerlendirilerek yeni standartlara dönüştürülmesidir (Nixon and Sims, 2016; Wigum and Lindgård, 2016).

Bu başlık altında ilk olarak potansiyel reaktivitenin tespit edilebilmesi için RILEM'in takip edilmesini önerdiği yol haritası açıklanacak ve deney metotlarının mevcut halleri hakkında bilgiler sunulacaktır. Daha sonraki başlıklarda ise sırasıyla Amerikan standartlarına ve maruziyet sahalarında gerçekleştirilen deneylere yer verilecektir.

3.3.1 RILEM yaklaşımı

RILEM tarafından yayımlanmış olan AAR-0 standardı, alkali reaktivitesinin belirlenmesi için var olan RILEM deney yöntemlerinin nasıl bir akış şeması (Şekil 3.30) izlenerek uygulanması gerektiğini açıklayan bir kılavuzdur. Bu kılavuzda bahsi geçen

yöntemler, Şekil 3.30’da görüldüğü üzere petrografik analiz – AAR-1, aşırı hızlandırılmış harç çubuğu deneyi – AAR-2, beton prizma deneyi – AAR-3, hızlandırılmış beton prizma deneyi – AAR-4 ve karbonatlı agregaların tespitinde kullanılan AAR-5’tir.



Şekil 3.30 Alkali-reaktivitesi deneyleri için RILEM’in önerdiği akış şeması.

Akış şemasında görüldüğü üzere deney programının petrografik analiz ile başlaması ideal olanıdır. Reaktif olabileceğinden şüphe duyulan mineraller var ise bir sonraki aşama, bu minerallerin alkali-silis reaksiyonu ve alkali-karbonat reaksiyonu etkilerinden hangisine yol açabileceğinin ayırt edilmesi gerekliliğidir. Reaktif silisli mineraller varlığında kısa sürede fikir sahibi olabilmek amacıyla AAR-2 ve uzun süreli beton prizma deneyi olan AAR-3 uygulanmalıdır. Reaktivite potansiyeli olan karbonatlı bileşenlerin varlığından şüphe duyulduğunda ise yine kısa süreli AAR-5 ve uzun süreli AAR-3 uygulanmalıdır. Bu akış şemasında yer alan AAR-3 beton prizma deneyi 12 ayda sonuç veren ve referans niteliğinde olan bir yöntemdir. Beton prizmaların 60°C’de bekletildiği AAR-4 deneyi 4 ay sürmekte olup AAR-3’e bir alternatif olarak düşünülebilir. AAR-4 henüz yeni geliştirilen bir yöntem olmasına rağmen ilk bulgulara göre bu deneyin sonuçları ve saha performansı arasındaki korelasyon yüksektir. AAR-0’da anlatılan akış şemasının öne çıkan fikri; reaktivite şüphesi olduğunda, sadece

petrografik analiz ve hızlandırılmış deneylerin sonuçlarına güvenilmemesi ve beton prizma yönteminin de uygulanması gerekliliğidir.

AAR-0’da deney yöntemlerinin birlikte nasıl kullanılacağına dair yer alan bu akış şemasına ilave olarak her bir deneyin sonuçlarının nasıl yorumlanacağına dair de kapsamlı öneriler yer almaktadır. Aşağıdaki alt başlıklarda beş deney yöntemi için de temel bilgiler verilmiştir. Bu akış şemasında yer almayan AAR-6 ve AAR-7 sırasıyla AAR’nin yapılarda doğru teşhisine ve yapılarda AAR kaynaklı hasarların en aza indirgenmesi için alınabilecek önlemlere yönelik kılavuzlardır. AAR-8 olarak adlandırılan ve halen hazırlanmakta olan deney yöntemi ile de agregalardan salınan alkalilerin miktarının belirlenmesi hedeflenmektedir.

3.3.1.1 AAR-1, Petrografik analiz

Tezin daha önceki kısımlarından “reaktif silis” başlığı altında petrografik incelemenin özellikle reaksiyona yatkın minerallerin varlığının ortaya koyulabilmesi amacıyla yapıldığı belirtilmişti. Hatta Çizelge 3.2’de bu minerallere ve reaktif olabilecek agregalara örnekler de sunulmuştu. Uygun bir petrografik inceleme sonucunda agreganın hangi mineral tiplerini içerdiği tespit edilmeli, bu minerallerin göreceli miktarları belirlenmeli ve bu veriler ışığında alkalilerle reaksiyona girme eğilimi olup olmadığı değerlendirilmelidir. Petrografik analiz neticesinde agrega, şu üç sınıftan birine dahil edilmektedir:

- Alkalilerle reaktivite göstermesi hiç beklenmeyen – Tip I
- Alkalilerle reaktivite gösterip göstermeyeceği konusunda kesin bilgi bulunmayan – Tip II
- Alkalilerle yüksek ihtimalle reaktivite göstermesi beklenen – Tip III

Eğer agrega reaktiviteye neden olabilecek mineraller içermiyorsa Tip I, önceki tecrübeler ışığında bu minerallerden betonda hasar yaratabilecek kadar çok içeriyorsa Tip III, kesin olarak bu iki gruptan birine dahil edilemiyorsa veya agrega kaynağı yeniyse Tip II olarak sınıflandırma yapılması önerilmektedir. Tip II veya Tip III agregalarında, bu ifadelerin yanına “S” veya “C” harflerini de ekleyip agreganın sırasıyla ASR veya ACR açısından reaktif olabileceği ek bilgisinin verilmesi gerekmektedir. Örneğin Tip III-S, Tip III-C ve Tip III-SC, sırasıyla ASR, ACR ve aynı anda her ikisine birden yol açabilecek minerallere sahip agregaları işaret etmektedir. Tip II veya Tip III olarak değerlendirme

yapıldığında petrografik analizle yetinilmeyip daha sonraki adımlarda hangi ilave deneylerin gerçekleştirileceğine dair karar verilmelidir.

AAR-1’de petrografik analiz için gereken tüm teknikler ve donanımlar açıklanmakla birlikte analiz en genel haliyle iki farklı yöntemi içermektedir:

- Makroskobik analiz: Daha çok iri agregalar (>4 mm) için uygun bir yöntem olup çıplak gözle, cep lensleriyle veya 10-80 kat arası büyütme uygulayabilecek stereo tip bir mikroskopla litolojik sınıflandırma yapılmaktadır.
- İnce kesit hazırlama: İnce agregaların yanı sıra makroskobik yöntemle net olarak petrografik analizi gerçekleştirilemeyen iri agregalarda uygulanmaktadır. 20-500 kat büyütme uygulayabilen optik mikroskop yardımıyla analiz yapılmaktadır. İnce kesit üzerinde agrega tane boyutuna göre aralıkları değişen kılavuz çizgileri çizilip kesişim noktalarına denk gelen noktalardaki agrega bileşenlerinin tek tek analizi gerekmektedir. Bu yöntem, nokta sayma yöntemi olarak adlandırılır.

Petrografik analizi gerçekleştiren kişinin betonda kullanılan malzemelerle ilgili genel bilgisinin yanı sıra özellikle yörede bulunan agregalarla ilgili deneyiminin olması önemli fayda sağlamaktadır.

3.3.1.2 AAR-2, Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi

AAR-2 deney yöntemi, alkalilerle reaktiviteyi oldukça hızlı bir şekilde belirlemek için harç karışımların hazırlanarak NaOH çözeltisinde ve 80°C’de bekletilmesi esasına dayanmaktadır. Özellikle yavaş/geç reaksiyona giren agregaların tespitinde çok etkin bir yöntemdir. Bu deneyde öncelikle test edilecek agreganın Çizelge 3.4’te belirtilen gradasyona getirilmesi gerekmektedir. Daha sonra ağırlıkça su/çimento oranı 0,47 ve agrega/çimento oranı 2,25 olan 25x25x285 mm veya 40x40x160 mm boyutunda harç numuneler hazırlanmaktadır. Harç çubukları sırasıyla 24 saat kalıp içerisinde oda sıcaklığında, 24 saat 80°C’de suda ve daha sonrasında 14 gün boyunca 1 M NaOH çözeltisinde bekletilmektedir. 80°C’de suda bekletme işleminden sonra ilk boyu ölçülen numunelerin çözeltide bekletildikleri süre boyunca da periyodik olarak boy ölçümleri alınmaktadır.

Çizelge 3.4 AAR-2 deneyinde agreganın sahip olması gereken gradasyon.

Elek boyutu		Kütlece %
Geçen	Kalan	
4 mm	2 mm	10
2 mm	1 mm	25
1 mm	500 µm	25
500 µm	250 µm	25
250 µm	125 µm	15

Bu deneyle iri agreganın reaktivitesi belirlenmek istenildiğinde agrega kırıcısında öncelikle ince agrega boyutuna daha sonra da Çizelge 3.4'te belirtilen gradasyona getirilmesi gerekmektedir. Bu kırma işlemi, yüzey alanında artış sağlayacağından iri agreganın normalde sahip olduğu reaktivite seviyesinin neden olabileceğinden daha yüksek genleşmelerle karşılaşılabilir.

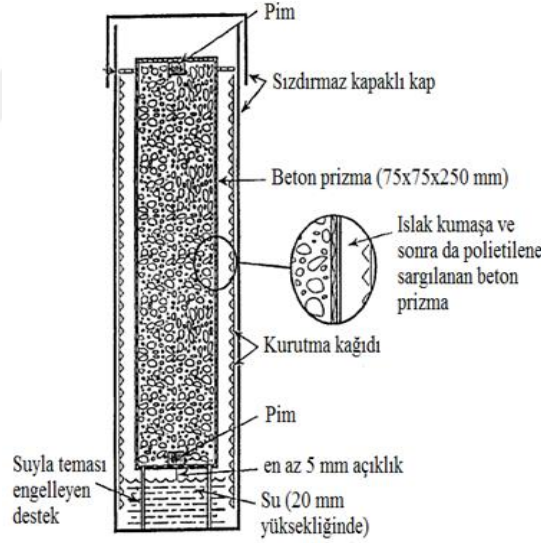
Çözeltide bekletilen 14 günün sonunda ölçülen genleşmeler %0,1'den azsa genleşmeye yatkın olmayan, %0,2'den fazlaysa genleşmeye yatkın, %0,1-0,2 arasındaysa potansiyel olarak reaktif şeklinde sınıflandırma yapılması önerilmektedir.

3.3.1.3 AAR-3, Beton prizma deneyi

AAR-3 deneyi kapsamında beton karışımlardan elde edilen numuneler test edilmekte olup bu deney, farklı agrega kombinasyonlarının reaktiflik derecelerinin ölçülmesine olanak sağlamaktadır. İnce agreganın reaktifliğinden şüphe duyuluyorsa reaktif olmayan bir iri agregayla, iri agreganın reaktifliğinden şüphe duyulduğu durumlarda da reaktif olmayan bir ince agregayla birleştirilip test uygulanması önerilmektedir. Bazı durumlarda ise doğrudan ince ve iri agreganın yarattığı kombinasyonun reaktivitesi incelenebilir.

Bu deney için gereken karışım oranları esaslarına göre çimento ve serbest suyun miktarlarının sırasıyla 440 ve 220 kg/m³ olması gerekmekte ve iri agrega:ince agrega ağırlıkça oranı ise %60:%40 olarak önerilmektedir. Agrega gradasyonu için alt ve üst sınır eğrileri yer almakta ve istendiği takdirde agrega fazındaki reaktif olduğu bilinen kısmın mümkün olan en yüksek düzeyde kullanılmasına da olanak sağlamaktadır. AAR-3.1 metodunda betondaki alkali seviyesinin 5,5 kg/m³ Na₂O eşdeğerine eşit olması istenmekte, bu değer gerektiğinde karışım suyuna NaOH ekleyerek sağlanmaktadır.

Böylelikle deney sonunda oluşan genleşme seviyesine göre belirli bir agrega kombinasyonunun reaktifliği hakkında fikir sahibi olunmaktadır. AAR-3.2 metodunda ise alkali içeriği 2 ila 5 kg/m³ arasında değişen karışımlar hazırlanmakta ve bu karışımlar arasından belirli bir agrega kombinasyonu için zararlı ASR genleşmesine neden olacak minimum alkali içeriği, yani eşik alkali seviyesi tespit edilmektedir. Her iki yöntemde de hazırlanan 75x75x250 mm boyutlarındaki numunelerin kalıp sökümünden sonra ilk boyları ölçülmektedir. Daha sonra ise 38°C sıcaklığa sahip izolasyonlu odada veya etüvde yer alan kapalı kaplarda ve su üzerinde Şekil 3.31’de gösterildiği gibi saklanmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi kap içerisindeki nem seviyesinin yüksek ve her bölgede benzer olabilmesi için kapların kenarlarında tüm yükseklik boyunca su emebilen kurutma kağıdı ya da havlu kumaş yer almalıdır. Lindgård et al. (2013b) tarafından gerçekleştirilen kapsamlı deneyler sonucunda Şekil 3.31’de gösterilen betonu ıslak kumaş ve polietilen ile sargılama işleminin, özellikle ilk haftalarda beton bünyesindeki alkalilerin dışarıya sızan miktarlarında ciddi artışa ve dolayısıyla ölçülen genleşme seviyelerinde düşüşe neden olduğu bulunmuştur. Standardın 2016’da yayımlanan son halinde sargılama işleminden vazgeçilmiştir.



Şekil 3.31 AAR-3’te numuneler için gereken saklama koşulu.

1 yıl süren deneyde tüm ölçümler 20°C’de gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla her ölçüm anından 24 saat önce numunelerin, kapların içinde kalacak şekilde soğutulması gerekmektedir. Kapalı kaplarda uygulanan 1 yıllık bekletmenin sonunda ölçülen genleşme değerleri %0,05’ten azsa genleşmeye yatkın olmayan, %0,1’den fazlaysa genleşmeye yatkın, %0,05-0,1 arasındaysa potansiyel olarak reaktif şeklinde sınıflandırma yapılması önerilmektedir.

3.3.1.5 AAR-5, Karbonatlı agregalar için deney yöntemi

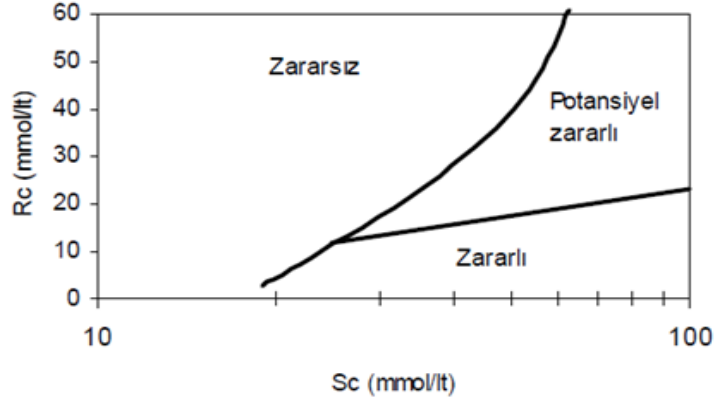
Alkali karbonat reaksiyonunun teşhisi için uygulanan AAR-5 deneyinin koşulları ve sonuçların yorumlanması, tezin önceki kısımlarından “2.1.3 Alkali-karbonat reaksiyonu” başlığı altında (son paragrafında) verilmiştir.

3.3.2 ASTM yöntemleri

ASTM yöntemlerinden bazıları yukarıda anlatılan RILEM yöntemleriyle büyük ölçüde benzerlikler göstermektedir. Bunlar arasından ASTM C295 standardında petrografik analiz, ASTM C1260 standardında hızlandırılmış harç çubuğu deneyi (80°C), ASTM C1293 standardında ise beton prizma deneyi (38°C) için gerekli prosedürler açıklanmaktadır. ASTM C1260 ile AAR-2 arasında sadece küçük farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin AAR-2 deneyinde agrega gradasyonu için gerekli şartlar sağlanırken metrik elekler kullanılmakta, ASTM C1260’da ise karşılık gelen ASTM elekleri kullanılmaktadır. Ayrıca AAR-2’de numune boyutunu seçme şansı (25x25x285 mm veya 40x40x160 mm) varken ASTM C1260’da böyle bir opsiyon yer almamaktadır. ASTM C1293 ile de AAR-3 deneyi özellikle maruziyet koşulları bakımından büyük ölçüde benzerdir. Farklıklar arasında çimento içeriği ve su/çimento oranları arasındaki küçük farklılıklar sıralanabilir. İlave bir farklılık olarak ASTM C1293’te belirlenen genleşme limiti 1 yılda %0,04’tür.

Diğer ASTM yöntemlerinden ASTM C227’de, aslında Stanton’un 1940 yılındaki çalışmasında geliştirilen yöntem esas alınmıştır. Bu standart uyarınca, ince agrega ve yüksek alkalili çimento içeren 25x25x285 mm boyutlarında harç çubuklar hazırlanmaktadır. Numuneler su üzerinde 38°C ve %100 bağıl nemde saklanmakta ve periyodik olarak boy ölçümleri alınmaktadır. Önerilen genleşme limitleri 3 ayda %0,05 ve 6 ayda %0,10’dur. 1 yıla kadar ölçümlerin devam ettirilmesi gerektiği belirtilmektedir. Bu yöntemin yavaş reaksiyona giren agregaları test etmede yetersiz kaldığı bilinmektedir. Bu standart 2018’de yürürlükten kaldırılmıştır.

ASTM C289 ise kimyasal yöntem olarak bilinmekte olup bu deneyde agrega kırılıp elenerek her biri 25 g olan üç örnek hazırlanmaktadır. Daha sonra bu malzeme, yüksek alkaliniteli çözeltide (1 M NaOH çözeltisinde) reaksiyona uğratılmaktadır. 24 saat sonunda, agregada çözünen silis ile çözeltinin alkalinitesindeki azalma belirlenmekte ve sonuçlar Şekil 3.33’e göre yorumlanmaktadır. Ancak standardın 2016’da yürürlükten kaldırılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.33 ASTM C289 deneyi için reaktiviteyi belirleyen alkalinite azalma (R_c)-çözünen silis (S_c) grafiği.

3.3.3 Maruziyet sahalarından alınan ölçümler

Laboratuvarda uygulanan deneyler doğru ve güvenilir sonuçlara ulaşabilmek için her ne kadar kontrollü ve izotermal bir ortam yaratsa da, saha betonlarının gerçekte karşılaşacağı olağan çevresel etkileri dikkate almamaktadır. Laboratuvar deneyleri alkali-silis reaktivitesinin belirlenebilmesi için kesin olarak büyük önem arz etmektedir. Maruziyet sahalarından alınan ölçümlerin gerektirdiği süreler ise araştırma çalışmalarında kabul edilebilir zaman dilimlerinin çok ötesindedir. Yine de laboratuvar deneylerinin sahada oluşabilecek reaktiviteyi doğru tahmin ettiğinden emin olmak için kısa süreli deneylerle çevresel şartların etkisini en doğru şekilde yansıtabilen saha ölçümleri arasında öncelikle güçlü korelasyonlar kurulması şarttır (Fournier et al., 2009).

Fournier et al. (2009) tarafından yapılan bir çalışmada reaktif agrega içeren aynı karışıma ait beton bloklar (0,40x0,40x0,70 m), Texas (ABD-Şekil 3.34a) ve Ottawa (Kanada) olmak üzere iki farklı maruziyet sahasında bekletilmiştir. Betonların daha sıcak bir bölgede (Texas) bekletilmesi neticesinde daha soğuk iklimdekilere (Ottawa) kıyasla tehlikeli olabilecek genleşme seviyesine ($>0,04$) 4-5 kat daha hızlı ulaştığı görülmüştür. Yazarlara göre çatlak gözlemlenebilen bu seviyeye ulaşıldıktan sonra ise iki farklı sahada bekletilen betonların genleşme hızları arasındaki önemli fark kaybolmuştur. Avrupa'da yapılan karşılaştırmalı deneylerde ise 6 farklı ülkede maruziyet sahaları kurulmuş, test edilecek karışımlardan 300 mm ayrıtlı ikişer adet küp hazırlanmış, küplerden biri alttan suyla temas edecek şekilde, diğeri ise sadece olağan sıcaklık ve neme maruz kalacak şekilde bekletilmiştir. Örnek olarak Düsseldorf, Almanya'daki (Şekil 3.34b) genleşme ölçümleri sonuçlarına göre (Şekil 3.35a ve b) bu iki durum arasında önemli bir fark oluşmamış, en büyük genleşmeler küplerin güneş ışınlarına en çok maruz kalan üst

yüzeylerinde oluşmuştur. Genleşmelerin artmasıyla maksimum çatlak genişliği değerlerinin de arttığı görülmüştür (Lindgård et al., 2010).

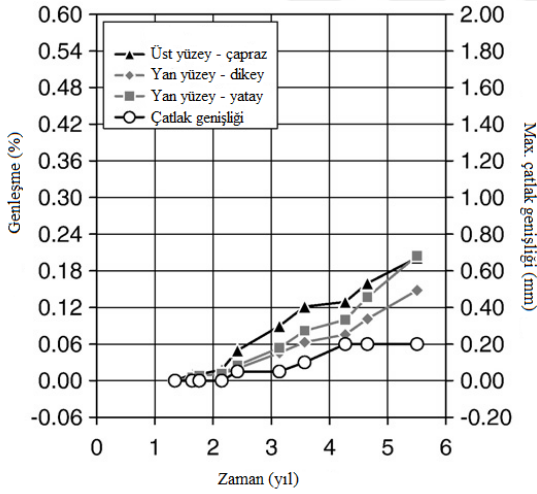


(a)

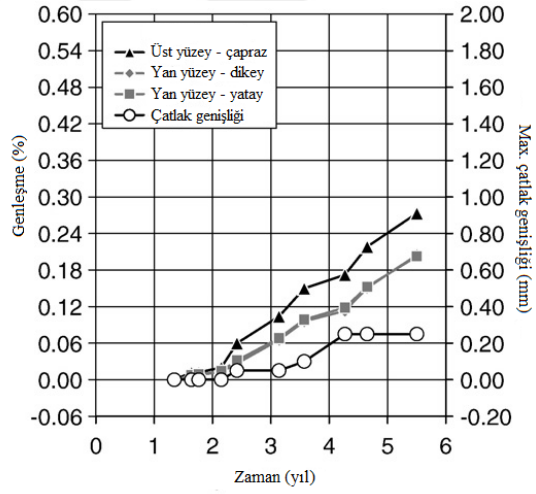


(b)

Şekil 3.34 a) Texas'ta (Fournier et al., 2009) b) Düsseldorf'ta (Lindgård et al., 2010) kurulmuş olan maruziyet sahalarının genel görüntüsü.



(a)



(b)

Şekil 3.35 Düsseldorf'ta a) kısmen su içerisinde b) olağan nem koşullarında bekletilen aynı karışıma ait iki örneğin genleşme ve çatlak genişliği değerleri (Lindgård et al., 2010).

İngiltere'de 1989'da Yapı Araştırma Kurumu'nda (Building Research Establishment – BRE) kurulan bir maruziyet sahasından alınan ölçümlerin sonuçları Thomas et al. (2011) tarafından yayımlanmıştır. Bu sahadaki betonlarda dört farklı reaktif agrega ve iki farklı uçucu kül kullanılmıştır. Reaktif agregalardan üçü flint kumu, biri ise grovak agregasıdır. Flint agregasının pesimum orana sahip olduğu önceden bilindiğinden beton karışımlarda toplam agreganın %25'i olarak kullanılmıştır. 16-18 yıllık ölçüm

sonuçlarına göre %25 ve %40'lık uçucu kül ikamelerinin genleşmeleri ve çatlakları etkin bir şekilde azalttığı bildirilmiştir (Şekil 3.36a ve b).

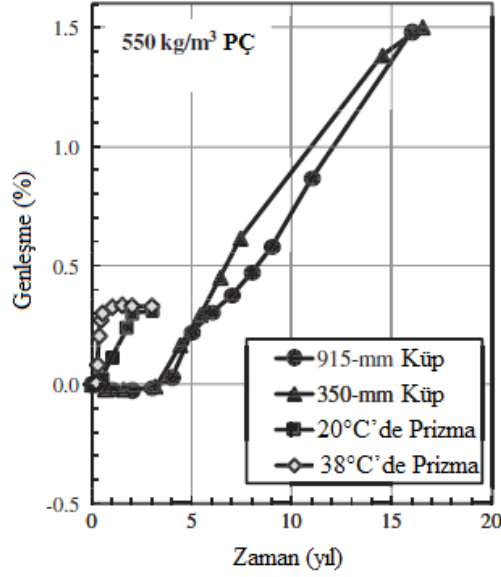


(a)

(b)

Şekil 3.36 İngiltere'deki maruziyet sahasında 18 yıllık 915 mm ayrıtlı küpler a) 550 kg/m³ portland çimentosuyla b) 450 kg/m³ portland çimentosu + 150 kg/m³ uçucu külle (Thomas et al., 2011).

İngiltere'de maruziyet sahalarındaki betonlarla aynı karışım oranlarına sahip olan beton prizmalar (75x75x250 mm) da hazırlanmış ve laboratuvarında kapalı kaplarda su üzerinde 20 veya 38°C'de bekletilmiştir. Şekil 3.37'ye göre beton prizmalar hızlı bir şekilde genleşmeye başlamış fakat genleşmelerdeki artış 1-2 yıllık süre sonunda durmuştur. Uçucu kül içermeyen maruziyet küpleri ise 4-5 yıl boyunca genleşmemiş fakat sonra genleşmeler devamlı artmıştır. Yaklaşık 16 yıl sonunda küplerin genleşmeleri %1,5 seviyesine ulaşırken beton prizmalar 2-3 yıl sonunda en fazla %0,30-0,35 değerlerinde genleşme göstermiştir (Thomas et al., 2011). 38°C'de laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerde beton prizmalardaki genleşmelerin daha düşük seviyede kalmasının ve maruziyet küplerine kıyasla genleşme-zaman eğrilerinin çok daha erken yataylaşma eğiliminin başlıca nedeni beton prizmalardan gerçekleşen alkali sızıntısı olduğu açıklanmıştır. Fournier et al.'a (2004b) göre bu etki göz önüne alınarak yapılan deneysel çalışmalarda alkali seviyesi NaOH ilavesiyle artırılarak %1,25 Na₂O eşd. seviyesine getirilen beton prizmalarla alkali seviyesi değiştirilmeden %0,95 Na₂O eşd. seviyesinde tutulan maruziyet küpleri arasındaki korelasyon en yüksek çıkmıştır.



Şekil 3.37 Numune boyutunun genleşmeler üzerindeki etkisi (Thomas et al., 2011).

3.3.4 Deney yöntemleri üzerine genel değerlendirme

Alkali-agrega reaksiyonunu tespit etmede kullanılacak ideal bir deney yönteminin hızlı sonuç vermesi, güvenilir olması ve agrega reaktiflik derecesi, karışımın alkali içeriği ve çevresel koşulların reaksiyona etkilerini tespit edebilmeye olanak tanınması gerekir. Şimdiye kadar anlatılan deney metotlarının nitelikleri Çizelge 3.5'teki gibi özetlendiğinde mevcut hiçbir yöntemin bu niteliklerin tümünü birden aynı anda sağlayamadığı görülmektedir. Bu yöntemler arasından beton prizma yöntemi referans bir deney olarak kabul edilse de normal deney süresi 1 yıl, mineral katkıların etkinliğini ölçmede kullanıldığında ise 2 yıl olup geç sonuç vermektedir. Ayrıca betonlardan gerçekleşen alkali sızıntısı, alkali içeriğinin etkisini net olarak belirlemeyi zorlaştırmaktadır. Hızlandırılmış beton prizma yönteminde tercih edilen daha yüksek sıcaklık seviyesi, sızan alkali miktarını arttırabilmektedir. Bu deney, henüz yeni geliştirildiğinden güvenilirliği üzerine yorum yapmak için zamana ihtiyaç vardır. Hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi oldukça hızlı sonuç vermesine karşın agregayı eleme veya kırıcıdan geçirme suretiyle işlem uygulanması, yüksek alkaliniteye sahip çözeltide ve oldukça yüksek bir sıcaklık seviyesinde bekletme gibi şiddetli koşullar hem agreganın reaktivite seviyesinin hem de mineral katkıları ve lityum tuzları gibi önlemlerin etkinliğinin belirlenmesindeki güvenilirliğin sorgulanmasına yol açmaktadır (Thomas et al., 2006).

Çizelge 3.5 İdeal deney yöntemini tanımlayan nitelikler ve deney yöntemlerinin karşılaştırılması (Thomas et al., 2006).

Deney yöntemi	Güvenilir	İşlenmemiş agrega	Sahadakiyle aynı çimento içeriği	Puzolanların etkinliği	Li tuzlarının etkinliği	Hızlı sonuç
İdeal deney	√	√	√	√	√	√
Saha performansı	√	√	√	√	√	X
AAR-2	?	X	X	X	X	√
AAR-3	√	√	X	√	√	X
AAR-4	?	√	X	√	√	√

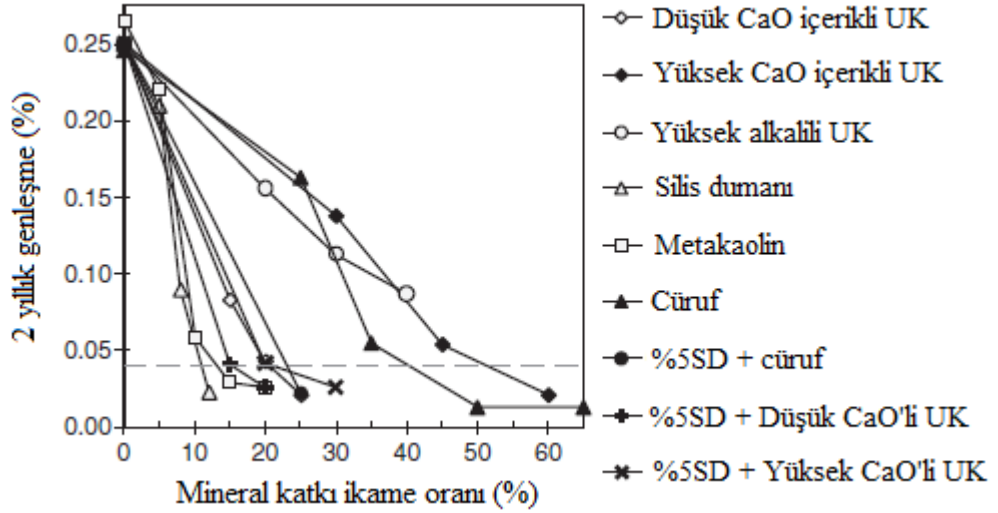
Deney yöntemleri hakkındaki bu tartışmalar henüz çok yeni sayılabilecek “performans deneyi” kavramının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Deney yöntemlerindeki yeni gelişmelerin odak noktasının mevcut deney yöntemlerinde yer almayan bir konu olan belirli bir projede kullanılacak esas beton karışımını test edebilme olanağının yaratılması olduğu ifade edilebilir. Örneğin pesimum orana sahip çok reaktif bir agregada az miktarda reaktif silis bulunması en yüksek genleşmelere yol açabilmektedir. Diğer bir yandan reaktif bir iri agrega türünün ASR davranışını, karışımda kullanılan ince agrega türü ve miktarı da önemli ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla AAR-3 ya da bu deney yönteminde bazı değişikliklerle geliştirilebilecek olan versiyonları, “performans deneyi” yöntemi geliştirilmesi ve ASR’nin en gerçekçi şekilde tespit edilmesi yolunda temel alınacak metinlere sahiptir. Bununla birlikte reaktif olduğu belirlenen bir agrega türü/kombinasyonu için zararlı genleşme yaratmayacak alkali seviyesinin ya da mineral katkıları gibi koruyucu önlemlerin belirlenmesi ve böylelikle agreganın kullanılmasının mümkün kılınması, laboratuvar verileri ve maruziyet sahalarının uzun dönemli sonuçları arasında güçlü korelasyonlar kurulması ve betondaki alkali yükünün gerçekçi bir şekilde belirlenmesi için agregadan ve dış kaynaklardan gelen alkali miktarının tespit edilebilmesi gibi hususlar da performans deneylerinin geliştirilebilmesi için büyük önem teşkil etmektedir (Wigum and Lindgård, 2016). Bu tez kapsamında da temelde mevcut beton prizma yöntemlerinden yararlanılmış ve çeşitli değişikliklerle ve ilave yöntemlerle “performans deneyi” geliştirebilmek adına önemi olan konularda kapsamlı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.4 Mineral Katkılarla ASR’nin Kontrol Altına Alınması

ASR’ye etki eden faktörlerin başında karışımın alkali içeriğinin geldiği ve de betondaki alkalilerin temel kaynağının kullanılan çimento olduğu tezin önceki

kısımlarında açıklanmıştır. Dolayısıyla herhangi bir mineral katkının belli bir ağırlık veya hacim oranında çimentonun yerine ikame edilerek kullanılması sonucunda karışımın alkali içeriğinde ve böylelikle ASR genleşmelerinde azalma beklenmesi doğaldır. Fakat zaman içindeki çalışmalar mineral katkıların ASR genleşmelerini azaltmasının temelinde yatan mekanizmanın sadece çimentodan gelen alkalinitenin seyreltilmesi ile açıklanamayacağını göstermiştir. Örneğin Duchesne and Bérubé (2001) tarafından yapılan bir çalışmada bir tip silis dumanı ve iki farklı tip uçucu külün toplam alkali içeriklerinin çimentodan yüksek olmasına rağmen 1 yılda hamurların boşluk çözeltisindeki alkali konsantrasyonunu ve beton prizmaların genleşmelerini düşürmede başarılı olduğu görülmüştür. Diğer bir çalışmada (Schmidt et al., 2008) ise çimentonun yerine %20 oranında inert kalker tozu veya uçucu kül kullanıldığında karışımların ASR performansı önemli farklılıklar göstermiştir. Hasar yaratan genleşmelerin oluşması için geçen süre kalker tozu ve uçucu kül ikameli karışımlarda sırasıyla 6 ve 21 ay olarak belirlenmiştir.

Portland çimentosu ve mineral katkının birleşiminden oluşan bağlayıcı fazındaki alkalilerin salımıyla betonda üç farklı konumda yer alması beklenebilir. Bu alkaliler, boşluk çözeltisinde çözünebileceği gibi, hidratasyon ürünleri veya alkali-silis jelinin yapısına da katılabilmektedir. Özellikle boşluk çözeltisi ve hidratasyon ürünlerinin arasındaki paylaşım, büyük oranda bağlayıcı fazın kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Glasser and Marr'a (1985) göre C-S-H jelinin yüzeyindeki elektrostatik yük durumu alkalileri tutabilme kapasitesini etkilemektedir. Bu oran yükseldikçe yüzey yükü pozitif olmakta ve böylece katyonları itmektir. Mineral katkıların varlığında ise Ca/Si oranı azalmakta olup özellikle ~1,3'ün altına indikçe yük negatife dönüşerek alkali katyonlarını bünyesine daha çok almaktadır. Kuşkusuz mineral katkının türü ve miktarı, ASR kaynaklı genleşmeyi azaltabilme yeteneğini önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 3.38'de ASTM C1293 beton prizma yöntemine göre gerçekleştirilen deneylerde tek tip reaktif agrega kullanıldığında 2 yıllık genleşme seviyesini %0,04 limitinin altına düşürmede farklı mineral katkıların performansları karşılaştırılmıştır. Silis dumanı (SD) ve metakaolinin en etkin katkılar olduğu, bunları düşük CaO içerikli uçucu külün (UK) takip ettiği görülmüştür. Cüruf, yüksek CaO içerikli uçucu kül ve yüksek alkalili uçucu külün ise etkinliğinin daha az olduğu ve dolayısıyla genleşmeyi %0,04'ün altına indirebilmek için diğer katkılardan daha yüksek miktarlarda kullanılması gerektiği belirgindir. Bu katkıların ayrı ayrı sadece %5 silis dumanıyla beraber kullanılarak üçlü bağlayıcı sistemlerin oluşturulması ise yine Şekil 3.38'e göre performanslarını belirgin şekilde iyileştirmiştir (Thomas, 2011).



Şekil 3.38 Mineral katkıların reaktif silisli kireçtaşı içeren beton numunelerin 2 yıllık genişmesine etkisi (Shehata et al., 1999; Shehata and Thomas, 2002; Bleszynski, 2002; Ramlochan et al., 2000; Thomas and Innis, 1998).

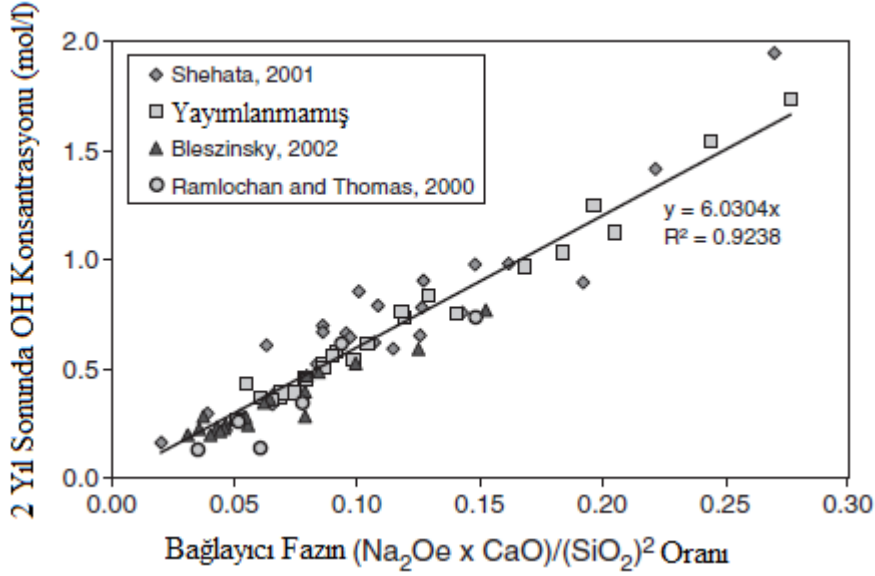
Şekil 3.39, çimento ve farklı mineral katkıları içeren, 2 yıl dış ortama maruz kalmayacak şekilde bekletilen ve su/bağlayıcı oranı 0,5 olan hamurlara ait farklı araştırmacıların verilerini birleştirmektedir. Grafikte yer alan noktalar 79 farklı bağlayıcı fazına ait olup bu sistemler:

- %100 oranında ve farklı alkali içeriklerine (%0,36-1,09 aralığında eşd. Na_2O) sahip portland çimentosu,

- Farklı kimyasal kompozisyonlara (%1,1-30,0 aralığında CaO ve %1,4-9,7 aralığında eşd. Na_2O) sahip 18 farklı uçucu küller ve %25-70 aralığında ikame oranlarıyla hazırlanan ikili karışımlar,

- %25-50 oranında bir tip cüruf, %5-10 oranında bir tip silis dumanı ve %10-20 oranında bir tip metakaolin ile hazırlanan ikili karışımlar ve

- Silis dumanının cüruf ya da uçucu küllerle karıştırılarak kullanıldığı üçlü karışımlardan oluşmaktadır (Thomas, 2011).



Şekil 3.39 Boşluk çözeltisi kompozisyonu ile bağlayıcı fazın kimyasal kompozisyonu arasındaki ilişki (Thomas, 2011).

Şekil 3.39'daki veriler kullanılarak boşluk çözeltisi kompozisyonu ile en yüksek korelasyonu gösterebilecek "kimyasal indis" bulunmaya çalışılmış ve çimento-mineral katkılı sistemin sahip olduğu $(\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd.}} \times \text{CaO})/(\text{SiO}_2)^2$ değerinin en iyi uyumu gösterdiği belirtilmiştir. Bu ifade ampirik bir oran olmasına rağmen, bağlayıcı fazdaki alkali içeriğini ve hidratasyon ürünlerinin alkali tutabilme yeteneğini önemli ölçüde etkileyen kalsiyum oksit/silisyum oksit oranını bünyesinde barındırdığından mantıklı gözükmektedir.

Mineral katkıların genleşmeleri önlemedeki performansını etkileyen diğer önemli parametreler ise betonun toplam alkali içeriği ve reaktif agreganın türüdür. Shayan et al. tarafından 1996 yılında bağlayıcı içeriğinin 500 kg/m^3 'te sabit tutulduğu ve betonun toplam alkali içeriğinin karışım suyuna NaOH eklenerek bağlayıcının %1,38 ve %2,5'i seviyelerine getirildiği durumlar için deneyler gerçekleştirilmiştir. 40°C sıcaklık ve %100 bağıl nem koşullarında uçucu külün %25 oranında çimento yerine ikame edilmesi sonucu, %1,38 alkali seviyesinde genleşmeler etkin bir şekilde çok düşük mertebelere inmiştir. Ancak, %2,5 alkali seviyesinde uçucu kül genleşmelerde sadece geciktirici bir rol oynayabilmiştir. 6 farklı reaktif agreganın kullanıldığı çalışmada agrega türüne bağlı olarak bu gecikmenin süresi 2-6 yıl arasında değişmiştir.

Son dönemde üzerinde fikir birliğine varılan bir diğer konu ise Al_2O_3 açısından zengin mineral katkıların ASR'ye karşı daha etkin olduğudur. Fakat alüminyum iyonlarının reaksiyon ya da genleşme mekanizmasındaki rolü tam olarak

anlaşılamamıştır. Hong and Glasser (2002) tarafından yapılan çalışmada sentetik C-S-H jelleri, Ca:Si molar oranları 1,5; 1,2 ve 0,85'e eşit olacak şekilde laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Al içermeyen bu ürünlerin yanı sıra aynı özelliklere sahip jeller sabit miktarda $\text{Al}(\text{OH})_3$ ilavesiyle de hazırlanmış ve bunlar da C-A-S-H jelleri olarak adlandırılmıştır. Jellerin tamamı konsantrasyonları değişken olan NaOH veya KOH çözeltilerinde bekletilmiştir. Yazarlar, zamanla çözeltilerin alkali konsantrasyonlarında oluşan azalmadan yola çıkarak C-S-H jellerinin alkali tutabilme kapasiteleri ya da bir başka deyişle alkalilerin, C-S-H jelleri ile çözelti arasındaki paylaşımı hakkında verilere ulaşmışlardır. Ca/Si oranı azaldıkça ya da eşit bir Ca/Si oranında alüminyumun jel yapısına katılmasıyla alkali tutabilme yeteneğinin arttığı görülmüştür. Chappex and Scrivener (2012a) tarafından gerçekleştirilen deneylerde ise aynı ikame oranında metakaolin içeren harçların, silis dumanı içerenlere kıyasla daha düşük genleşme verdikleri görülmüştür. Katkılı hamurlar üzerinde boşluk çözeltisi kompozisyonu inceleyen yazarlar, çözeltide yer alan serbest alkali miktarını, karışımın sahip olduğu bilinen toplam alkali miktarından çıkartarak C-S-H jelinde bağlı olan alkalilerin miktarını hesaplamışlardır. Aynı zamanda karışımda oluşan C-S-H yapılarının toplam kütlesi hakkında fikir vermesi amacıyla termogravimetrik analizlerle C-S-H yapılarından kaybolan suyun toplam miktarı belirlenmiştir. Farklı hamur karışımlarında C-S-H tarafından tutulan alkalilerin miktarı, C-S-H yapısındaki suların miktarına bölünmüş ve birim C-S-H başına düşen alkali tutabilme kapasitesi ortaya çıkarılmıştır. Sonuçta, aynı ikame oranında silis dumanlı ve metakaolinli hamurlarda bu oranların birbirlerine oldukça benzer çıktığı açıklanmıştır. Dolayısıyla aynı yazarlar alüminyumca zengin olan metakaolinin genleşmeleri azaltmadaki mekanizmasını açıklayabilmek amacıyla başka bir çalışma (Chappex and Scrivener, 2012b) daha gerçekleştirmiş ve reaktif agregadaki hasarı görüntü işleme teknikleriyle incelemişlerdir. Bulgulara göre kontrol karışımına kıyasla %15 metakaolin ikamesi sonucunda agreganın reaksiyona girerek hasar gören kısmında %42'lik azalma oluşmuştur. Boşluk çözeltisinde yer alan alüminyumun agreganın reaktif silisli bölgelerine yerleşerek amorf silisin çözünmesini sınırlandırdığı yorumu yapılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışma kapsamında laboratuvarında çeşitli karışımlar hazırlanıp testlere tabi tutulmuştur. Agregası olarak sadece reaktif bazalt içeren kontrol karışımlarının yanı sıra, atık cam agregalı, hafif agregalı, lifli ve kendiliğinden yerleşen betonların üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri bu başlık altında tanıtılmaktadır.

4.1.1 Bağlayıcılar

Hazırlanan beton karışımlarında biri Bolu Çimento Sanayi A.Ş.'den temin edilen alkali içeriği düşük (LA), diğeri ise Afyon Çimento Sanayi T.A.Ş.'den temin edilen yüksek alkali içerikli (HA) olmak üzere iki tip çimento kullanılmıştır. Bu çimentoların Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nde (TÇMB) yapılan kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Bağlayıcı malzemeler üzerinde TÇMB tarafından gerçekleştirilen analiz sonuçları.

Bileşen, %	HA çimentosu	LA çimentosu	Uçucu kül	Uygulanan Deney Standartı / Metodu
CaO	62,33	62,65	15,94	XRF/ ICP OES
SiO ₂	19,72	19,54	47,07	XRF/ ICP OES
Al ₂ O ₃	5,31	4,80	11,56	XRF/ ICP OES
Fe ₂ O ₃	3,37	5,71	7,22	XRF/ ICP OES
SO ₃	3,33	3,12	2,78	TS EN 196-2
MgO	2,33	1,89	7,77	XRF/ ICP OES
Na ₂ O	0,53	0,37	1,59	XRF/ ICP OES
K ₂ O	0,77	0,40	3,04	XRF/ ICP OES
Cl ⁻	0,0136	0,0087	-	XRF
Kızdırma Kaybı	2,09	1,53	0,42	TS EN 196-2
Belirlenemeyen	0,21	-	2,61	-
Toplam Alkali - Na ₂ O Eşdeğer (%)	1,04	0,63	3,59	-
Salınabilir Na ₂ O (%)	-	-	0,46	ASTM C 311-04
Salınabilir K ₂ O (%)	-	-	1,20	ASTM C 311-04
Salınabilir Alkali - Na ₂ O Eşdeğer (%)	-	-	1,25	-
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,48	0,20	-	TS EN 196-2
Reaktif SiO ₂ (%)	-	-	34,19	TS EN 197-1
Yoğunluk (g/cm ³)	3,08	3,13	2,55	Dijital piknometre ile
Özgül Yüzey – Blaine (cm ² /g)	3960	3570	-	Otomatik Blaine cihazı
Hacim genleşmesi (mm)	1,0	1,0	-	TS EN 196-3
45 µm Elek Bakiyesi (%)	-	-	32,5	TS EN 451-2

Yüksek alkalili (HA) çimentonun ve düşük alkalili (LA) çimentonun Na_2O eşdeğeri cinsinden toplam alkali miktarları Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi sırasıyla %1,04 ve %0,63 olarak bulunmuştur. Bazı karışımlarda bu iki çimento tek başlarına, bazılarında ise %50-50 oranlarında karıştırılarak kullanılmış ve böylelikle betonda çimento kaynaklı üç farklı alkali seviyesinin etkisini incelemek mümkün olmuştur.

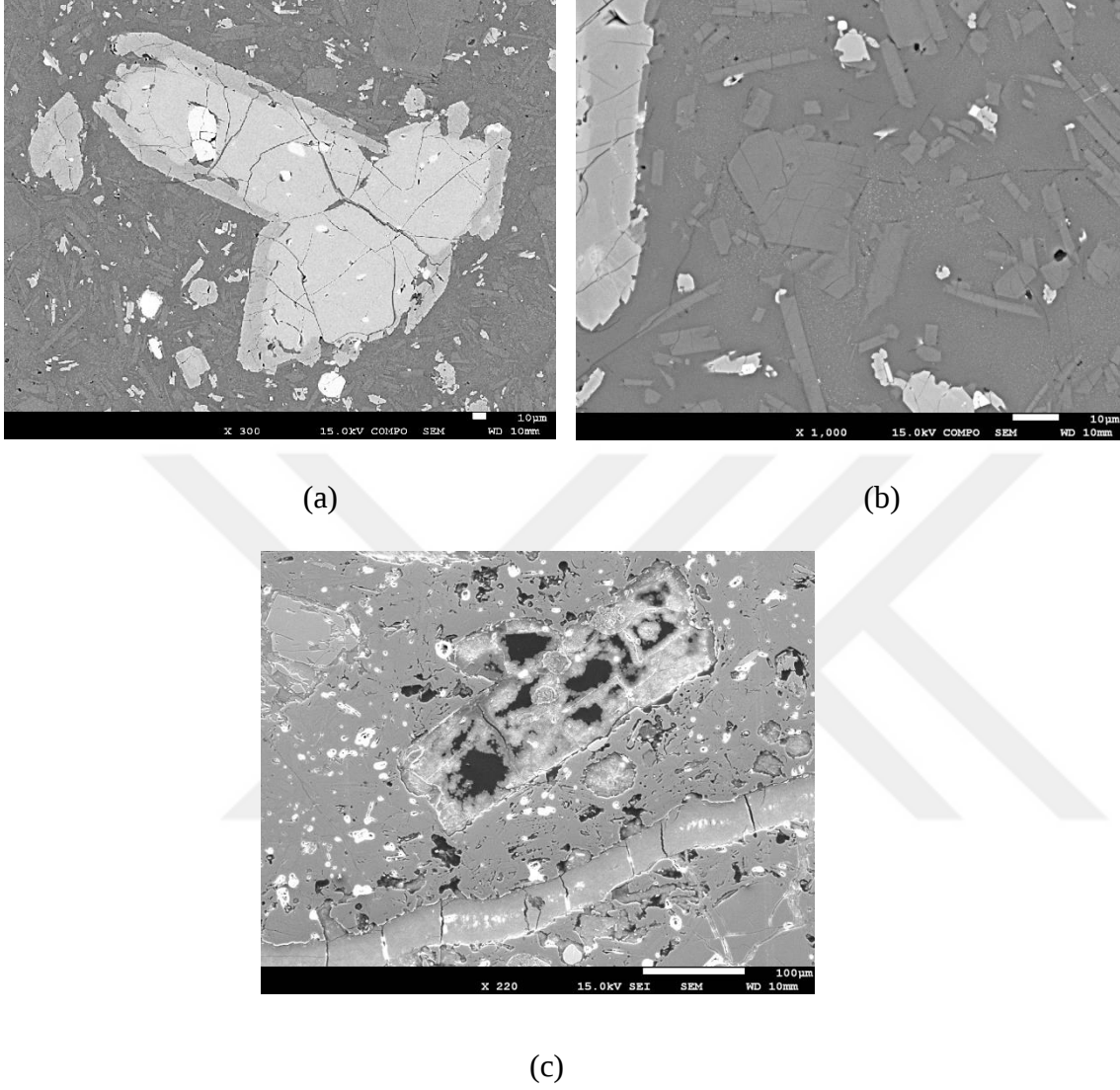
Yine Çizelge 4.1’de Çayırhan Termik Santrali’nden temin edilen C sınıfı uçucu külün (UK) kimyasal ve fiziksel özellikleri görülmektedir. Uçucu külün dayanım aktivite indeksi 7. günde %78, 28. günde ise %84 olarak belirlenmiştir.

4.1.2 Agregalar

Tez kapsamında kullanılan agrega tipleri bazalt agregası, atık cam agregası ve pomza agregasıdır. Hazırlanan farklı karışımlar arasından özellikle tezin kontrol karışımları niteliğindeki betonlarda agrega fazının tamamını 0-4 mm, 4-16 mm ve 11,2-22,4 mm olarak adlandırılan üç farklı boy sınıfındaki bazalt agregaları oluşturmuştur. Aliğa yöresinden temin edilmiş olan bazaltlar, Ege Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarları’nda önceki senelerde yapılan hem harç hem de beton deneylerinde yüksek seviyelerde alkali-silis reaktivitesine neden olan agregalardır (Andiç-Çakır, 2007). Yine önceki tecrübelerden (Çopuroğlu et al., 2009) agreganın petrografik analizi ile elde edilen mineralojik bileşiminde plajiyoklaz (hacimce ~%35), K-feldspar (hacimce ~%5), klinopiroksen (hacimce ~%10), olivin (hacimce ~%10) ve matris (hacimce ~%40) fazlarının yer aldığı bilinmektedir. Bazaltın camsı matrisindeki yüksek SiO_2 içeriğinin (~%70) reaktifliğe neden olduğu, yüksek alkaliniteye sahip ortamda silisin çözünmesi sonucu hem agrega-hamur arayüzeyinde hem de porozitesi artmış olan camsı matriste yani agrega bünyesinde reaksiyonun gerçekleşerek hasar yarattığı rapor edilmiştir.

Deneyisel çalışma başlangıcında temin edilen bazalt örneklerine uygulanan petrografik analiz sonuçları da eski bazalt örneklerinininkine hem mineralojik hem de dokusal açıdan oldukça benzer çıkmıştır. Yeni örneklerde de baskın fazların genelde matriste ince taneli kristaller halinde bulunan plajiyoklaz çubukları, ortopiroksen ile klinopiroksenler ve camsı matris olduğu belirlenmiştir. Camsı faz ile piroksenlerin psödomorfik dönüşümleriyle oluşan smektit yapılarının yanı sıra magnezit-siderit şeklinde karbonatlı minerallere de rastlanmıştır. Olivin yapıları ise eski örneklerden farklı olarak eser miktarda gözlemlenmiştir. Yeni örneklerde rastlanan fonokristal halindeki piroksen yapısı Şekil 4.1a’da, çok sayıda plajiyoklaz çubuğu içeren camsı matris Şekil 4.1b’de ve son olarak smektit yapısına dair görüntülere örnekler Şekil 4.1c’de sunulmuştur. Şekil 4.1b’de SEM görüntüsü sunulan camsı matrisin iki farklı noktadan

EDS analizi ile belirlenen oksit kompozisyonu ise %100'e normalize edilerek Çizelge 4.2'de verilmiştir.



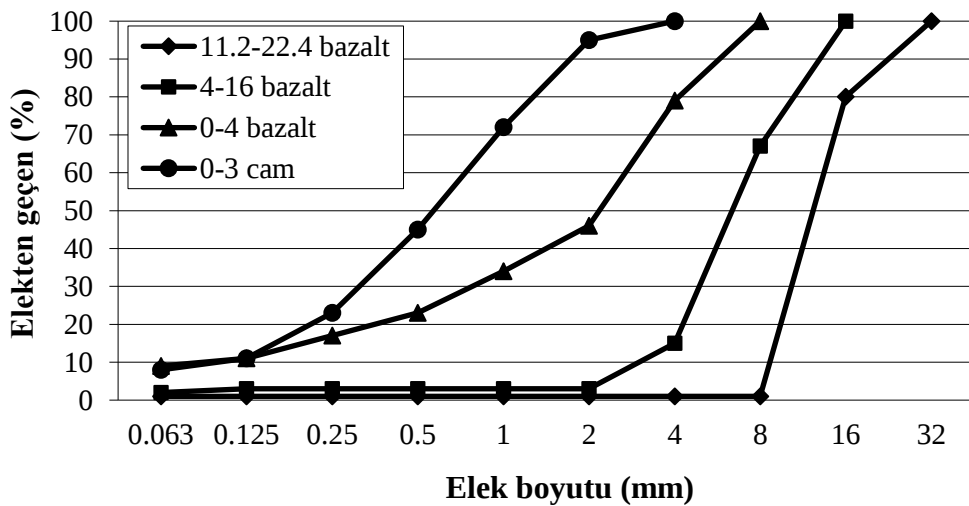
Şekil 4.1 a) Çekirdek kısmında bronzit, yüzeye yakın kısımlarda hipersten bileşimli fonokristal piroksen yapısı, b) nispeten daha koyu renkli camsı matris ve bu matris içinde dağılmış halde bulunan daha açık renkli plajiyoklaz çubukları, c) ortada fonokristal yapının psödomorfu şeklinde ve alt kısımda damar şeklinde nontronit bazlı smektit yapısı.

Çizelge 4.2 Camsı matrisin EDS analizi ile belirlenen kütlece bileşenleri, %.

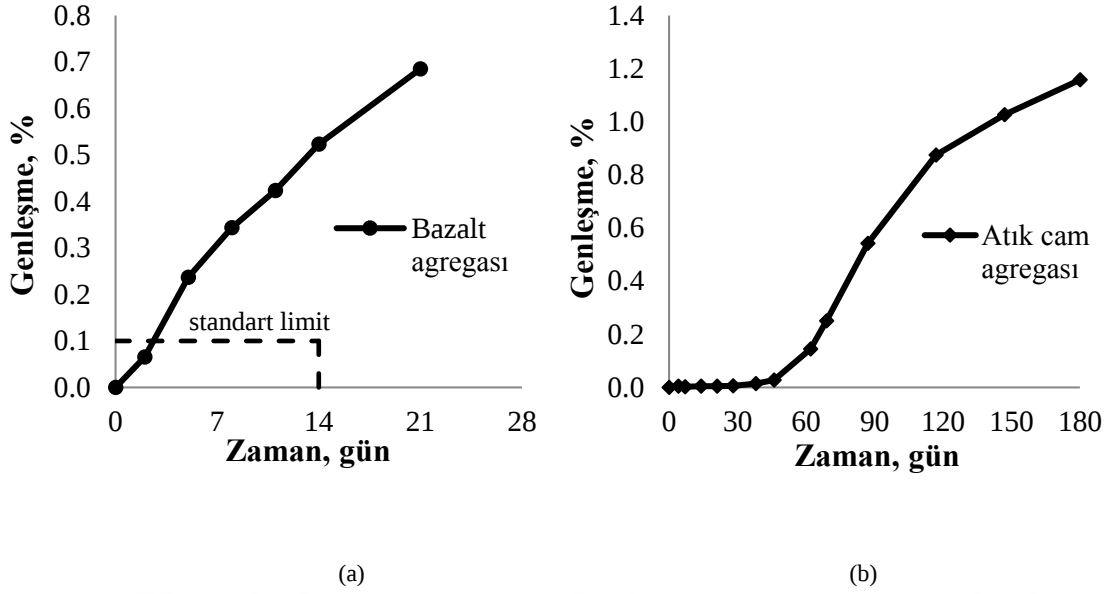
Analiz	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅
1	77,60	1,00	12,04	2,24	-	0,23	0,81	1,04	5,04	-	-
2	74,37	1,14	11,80	4,96	0,06	0,24	1,04	1,18	5,00	0,03	0,18

Tez çalışmasında kullanılan ikinci agrega tipi soda-kireç camları kategorisine giren renksiz pencere camlarından elde edilen atıklardır. Toplanan atık cam kırıkları önce yıkanmış, daha sonra kurutulmuş olup darbe ve makaslama etkisi uygulayan bir çekiçli kırıcı yardımıyla ince agrega boyutuna getirilmiştir. Cam agregası karışımlarda ya 0-3 mm ya da 0,063-3 mm tane boyutlarında kullanılmıştır. 0,063-3 mm tane sınıfı, kırıcıdan elde edilen cam agregasının 0,063 mm'lik elekten ıslak elenmesi ve sonrasında elek üstü malzemenin kurutulmasıyla temin edilmiştir. Kırıcıdan elde edilen cam agregasının ıslak eleme neticesinde %8'inin 0,063 mm'lik elekten geçebildiği görülmüştür. Bazalt ve atık cam agregalarının gradasyonları Şekil 4.2'de görülmektedir.

Atık cam agregası da tıpkı bazalt agregası gibi önceki yıllarda Ege Üniversitesi'nde gerçekleştirilen bazı deneysel çalışmalarda agrega olarak kullanılmış olup, camın amorf yapısında yer alan silisin alkalilerle yüksek reaktiviteye sahip olduğu tecrübe edilmiştir. Şekil 4.3a'da tezde kullanılması kararlaştırılan bazalt kumu ile, Şekil 4.3b'de ise önceki bir çalışmamızda (Yüksel et al., 2013) renksiz atık cam agregası ile hazırlanan harç karışımların RILEM AAR-2'ye göre 1 N NaOH çözeltisinde 80°C sıcaklıkta bekletilmesiyle elde edilen ortalama genleşme değerleri sunulmuştur. Bazalt agregasının 14 günlük genleşme değeri %0,52 olarak belirlenmiştir. Bu değer reaktivite açısından etkisiz agrega için öngörülen üst genleşme sınırının yaklaşık 5 katıdır. Camla hazırlanan örneklerde ilk 14 günlük sürede genleşme oluşmamasına ve yaklaşık olarak ilk 30 günlük sürede reaktivite açısından durağanlık görülmesine rağmen 180 güne kadar uzatılan deney süresi, genleşmenin %1,16 seviyesine çıkmasına ve numunelerde çatlak oluşumlarına neden olmuştur.

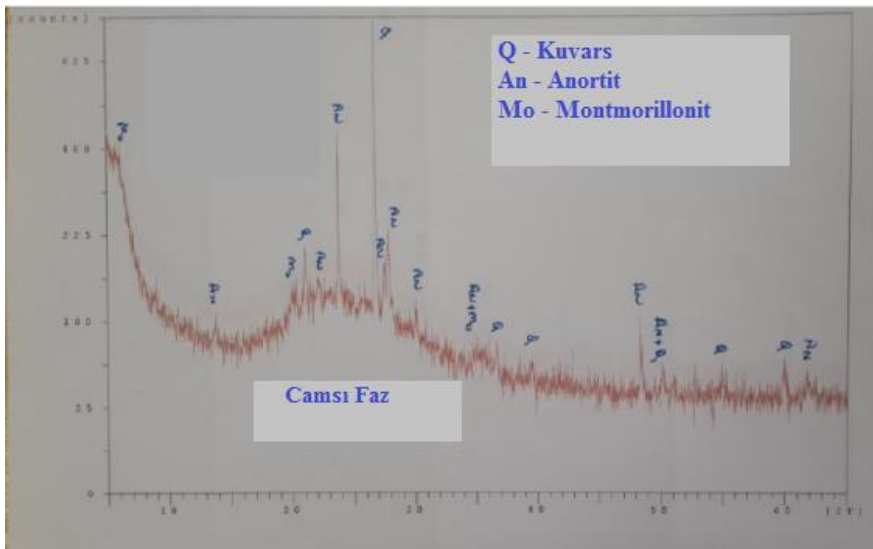


Şekil 4.2 Bazalt ve atık cam agregalarının gradasyon eğrileri.

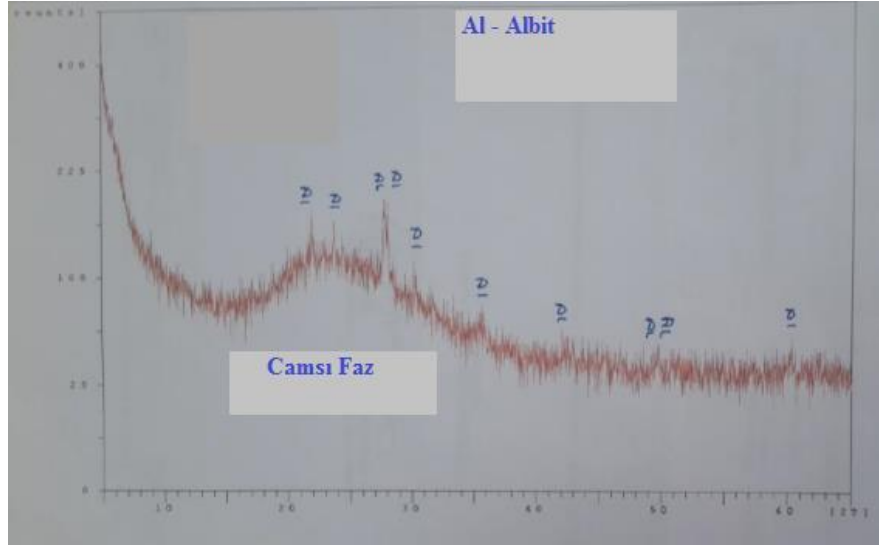


Şekil 4.3 a) Bazalt agregası ve b) atık cam agregası ile hazırlanan harçların AAR-2 genleşmeleri.

Tez kapsamında reaktivitesinin araştırılmasına karar verilen son agrega tipi ise pomzadır. Mağmanın ergimiş halde bulunan bir silikat kütlesi olduğu, diğer bir deyişle magma bileşiminde baskın oranda (%45 veya daha fazla) SiO_2 bulunduğu bilindiğinden ve literatürde pomzanın reaktivitesi ile ilgili çalışmaya rastlanmadığından, Türkiye’de bolca rezervi bulunan bu agrega tipi de tez kapsamına dahil edilmiştir (Sen, 2014; Gündüz, 1998). Hafif betonlarda kullanılacak pomza agregası türüne karar verebilmek için Menderes ve Kayseri pomzaları olmak üzere iki tip agreganın öncelikle TÇMB laboratuvarlarında sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te görülen X-ışını difraktogramları (XRD) çekilmiştir.



Şekil 4.4 Menderes pomzasına ait X-ışını difraktogramı.

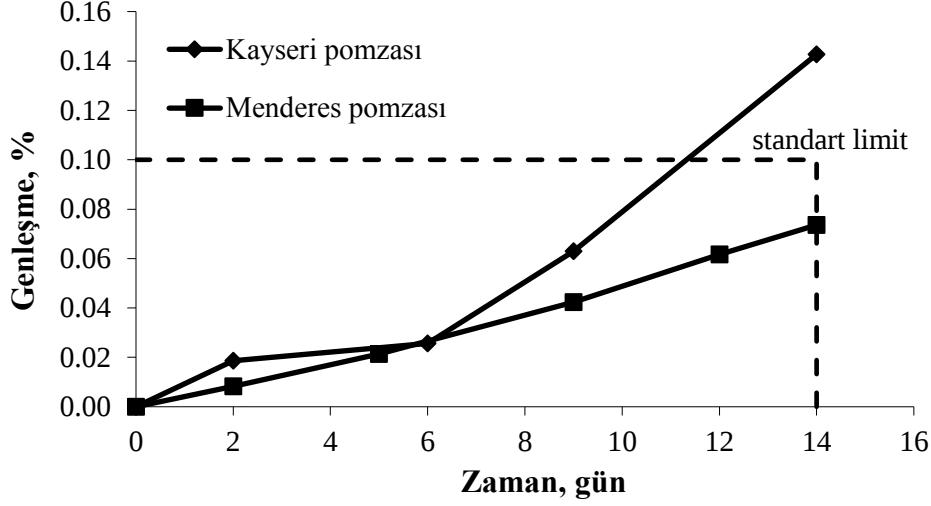


Şekil 4.5 Kayseri pomzasına ait X-ışını difraktogramı.

Şekil 4.4 ve 4.5'e göre her iki pomza agregasının XRD profilinde 2θ 'nın 20° - 30° aralığına denk gelen kısımlarında önemli ölçüde bir eğim değişimi ve dolayısıyla camsı fazların varlığı belirgindir. Bununla birlikte oluşan pikler, Menderes pomzasında (Şekil 4.4) kuvars (SiO_2), anortit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) ve montmorillonit [$\text{Na}_{0,3}(\text{Al.Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.4\text{H}_2\text{O}$], Kayseri pomzasında (Şekil 4.5) ise albit [$(\text{Na.Ca})\text{Al}(\text{Si.Al})_3\text{O}_8$] kristal fazlarının varlığını işaret etmektedir.

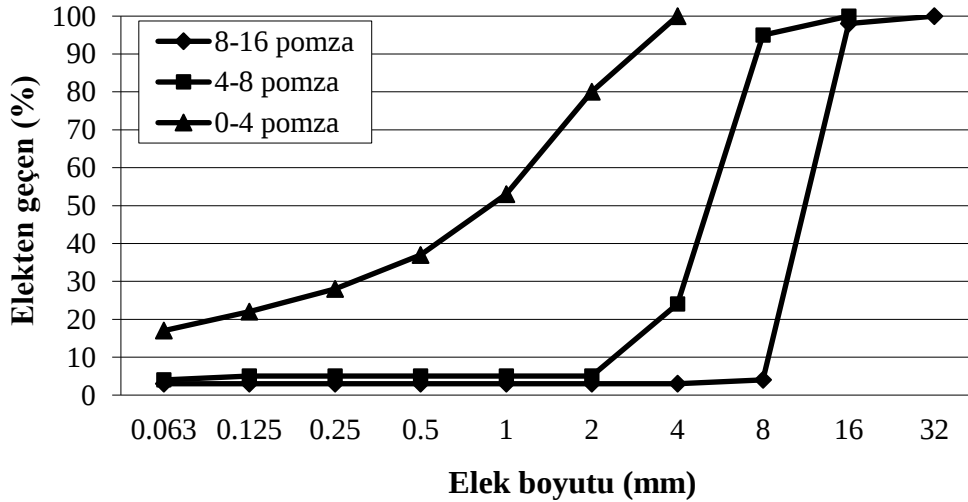
Pomza örnekleri içeren harçlar hızlandırılmış harç çubuğu (RILEM AAR-2) metoduna uygun olarak ön deneye tabi tutulmuş olup 14 günlük genleşme değerlerinin Kayseri pomzası için %0,143, Menderes pomzası için ise %0,074 seviyesinde olduğu görülmüştür (Şekil 4.6). Pomza içeren numunelerin ayrıca bu süre zarfında kütlelerindeki değişim de ölçülmüş olup, 14. günde Kayseri pomzası içeren örnekler %5,6'lık bir kütle artışı göstermiş, bu değer Menderes pomzalı örneklerde %2,5 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak tez kapsamında üretilecek hafif betonlarda daha reaktif olduğu anlaşıldığından sadece Kayseri pomzasının kullanılmasına karar verilmiştir. Tezin ilerleyen bölümlerinde kısaca yazılacak olan "pomza" ifadelerinin tümü "Kayseri pomzası"nı temsil etmektedir. Bu agreganın kullanılmasına karar verildikten hemen sonra yine TÇMB laboratuvarlarında 8-16 mm boyut aralığındaki pomzanın TS 10088 EN 932-3'e göre petrografik analizi de gerçekleştirilmiştir. Pomza kütlelerinin çok büyük bölümü beyaz-açık gri renkli tanelerden oluşurken siyaha dek varabilen daha koyu renkli taneler de gözle ayırt edilebilmektedir. Analiz sırasında da numunede fark edilen köken farklılıkları nedeniyle geneli temsilen 12 farklı agrega ince kesiti hazırlanmış, incelemeler sonunda bunların 5 tanesi pomza olarak sınıflandırılmış, diğerlerinde ise skorya, tuf ve bazalt olarak adlandırılan örnekler de tespit edilmiştir. Pomza olarak isimlendirilen

numunelerde genellikle akma dokulu ve camsı parçacıkların yoğun olduğu matris içinde gelişen iri piroksenler ve ikizlenmeleri ile karakterize plajiyoklaz kristallerinin yer aldığı, ayrıca gaz boşluklarının kesit boyunca oldukça yaygın olduğu rapor edilmiştir.



Şekil 4.6 İki farklı pomza agregası ile hazırlanan harç örneklerinin zaman içerisindeki AAR-2 genleşmeleri.

Gradasyonları Şekil 4.7’de sunulan pomzaların tane sınıfları 0-4 mm, 4-8 mm ve 8-16 mm olup bazı beton karışımlar hem ince hem de iri agrega olarak pomza, bazıları ise ince agrega olarak bazalt ve iri agrega olarak pomza içerecek şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 4.7 Pomza agregalarının gradasyon eğrileri.

Beton karışımların hazırlanmasında kullanılan bazalt ve pomza agregalarının Çimentaş İzmir Çimento Fabrikası’ndan ve atık cam agregasının Şişe Cam bünyesindeki

Bilecik Camiř Madencilik'ten temin edilen kimyasal analiz (XRF) sonuçları Çizelge 4.3'te gösterilmektedir. Agregaların TS EN 1097-6 standardına göre tane yoğunluğu ve su emme özellikleri de belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 4.4'te sunulmuştur. Normal ağırlıktaki agregaların sadece 24 saatlik (WA_{24}), hafif agregaların ise hem 1 (WA_1) hem de 24 saatlik su emme oranları belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre pomzaların emdiği su miktarlarının 1. ve 24. saatler sonunda yüksek ve birbirlerine yakın mertebelerde olduğu bulunmuştur. Bir başka deyişle, bu hafif agregaların yüksek geçirimliliği nedeniyle emebilecekleri suyun çok büyük bölümünü (%88-%91) ilk 1 saatte bünyelerine kattıkları görülmektedir. Dolayısıyla pomza agregalarının özgül ağırlık hesaplamalarında 1 saatlik veriler göz önünde bulundurulmuş ve her bir tane boyutundaki pomza agregası beton dökümlerinden 1 saat önce emebilecekleri kadar su ile karıştırılıp doygun duruma getirilmeye çalışılmıştır.

Çizelge 4.3 Agregaların XRF ile belirlenen kimyasal kompozisyonları.

Bileşen, %	Bazalt	Atık cam	Pomza
SiO ₂	54,08	71,38	64,16
Al ₂ O ₃	14,37	1,30	13,14
Fe ₂ O ₃	6,68	0,107	2,54
CaO	8,71	8,28	1,43
MgO	2,50	4,27	1,02
Na ₂ O	2,41	14,29	4,08
K ₂ O	1,67	0,07	3,39
TiO ₂	-	0,076	-
Cl ⁻	-	-	-
SO ₃	-	0,23	0,08
Kızdırma kaybı	6,84	-	8,47
Belirlenemeyen	2,74	-	1,69

Çizelge 4.4 Agregaların bazı fiziksel özellikleri.

Agrega	Doygun kuru yüzey özgül ağırlığı	1-saatlik su emme oranı, WA_1 (%)	24-saatlik su emme oranı, WA_{24} (%)
0-4 bazalt	2,79	-	0,65
4-16 bazalt	2,81	-	0,45
11,2-22,4 bazalt	2,83	-	0,40
0-3 cam	2,53	-	0,14
0-4 pomza	1,10	29,0	31,8
4-8 pomza	0,93	37,2	40,7
8-16 pomza	0,85	43,4	49,2

4.1.3 Lifler

Bazı karışımların hazırlanmasında çelik lif veya cam lif kullanılarak bunların genleşmeler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kullanılan cam lif Cam Elyaf San. A.Ş.'den (Çayırova/Gebze-Kocaeli) temin edilmiş olup tex (g/1000 m) büyüklüğü 2400'dür. Çapı 12 µm olan iplikler, 10 mm boya sahip olacak şekilde kesilerek kullanılmıştır. Beton karışımlar için seçilen kullanım oranları toplam beton hacminin %0,1, 0,2 ve 0,3'üdür. Çelik lif olarak ise Bekaert İzmit Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilen 60 mm uzunluğa, 0,90 mm çapa ve 1160 N/mm² nominal çekme dayanımına sahip olan iki ucu kancalı lifler tercih edilmiştir. Çelik lifler için kullanım oranları toplam beton hacminin %0,3, 0,6 ve 0,9'u olarak seçilmiştir.

4.1.4 Kimyasal katkı

Beton kıvamının istenilen düzeyde ayarlanabilmesi için bazı karışımlarda gereken miktarda bir tip polikarboksilik eter esaslı TS EN 934-2 ve ASTM C494 Tip F'ye uygun yüksek oranda su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Üretici firmanın hazırladığı ürün bilgi föyü uyarınca katkının yoğunluğu 1,063-1,103 kg/litre, önerilen kullanım oranı ise bağlayıcı miktarının en fazla %1,5'ine denk gelecek şekildedir.

4.2 Yürütülen Çalışmalar ve Uygulanan Deneyler

Tez kapsamında hazırlanan farklı karışımların tümüne betonların saha performansını en iyi yansıtabilecek deneyler olan AAR-3 ve AAR-4 deneyleri uygulanmıştır. Bu deneyler devam ederken alınan periyodik genleşme ve ağırlık ölçümlerinin yanı sıra bazı karışımlarda kapalı kapların alt kısımlarında bulunan saf sudan az miktarda örnekler alınarak betondan sızan Na⁺ ve K⁺ iyonlarının miktarı analiz edilmiştir. Deneysel çalışmanın ilerleyen safhalarında ise özellikle yüksek genleşme gösteren bazı karışımlar seçilmiş ve bu beton karışımlardan prizmalar bir kez daha hazırlanarak yeni geliştirilen çoklu çevre koşulları deney prosedürüne maruz bırakılmıştır. Tez kapsamında son dönemlerde tamamlanan diğer aşamalar ise maruziyet sahalarının oluşturulması ve genleşme davranışının modellenmesine ilişkin çalışmalardır.

4.2.1 Beton prizma deneyleri (AAR-3 ve AAR-4)

Tezin daha önceki kısımlarında açıklandığı gibi AAR-4 deneyi, AAR-3'e kıyasla RILEM teknik komitesi tarafından günümüze daha yakın dönemlerde geliştirilmiş bir deney yöntemidir. Beton dökümlerinin yapıldığı sırada her ne kadar AAR-4 deneyi için

hazırlanmakta olan standart metin son halini almış olmasa da komitenin tüm güncelleme çalışmaları ve literatürdeki önemli bulgular da göz önünde bulundurularak deney prosedürlerine karar verilmiştir. 2016 yılı itibariyle RILEM TC 219-ACS komitesi çalışmalarını tamamlamış olup standart deney yöntemlerinin son halleri yayımlanmıştır.

AAR-3 ve AAR-4 deneyleri için hazırlanan karışımların malzeme oranlarının hesaplanmasında temel kriterler 440 kg/m^3 çimento içeriği, 220 kg/m^3 serbest su içeriği ve ağırlıkça 1,5 olan iri agrega/ince agrega oranıdır. Beton karışımın alkali içeriğini %1,25'e çıkarmak için karışım suyuna NaOH ekleme gerekliliğine her karışımda uyulmamıştır.

Karışım oranlarına karar verildikten sonra agregaların nem durumları göz önünde bulundurularak nem düzeltilmesi de yapılmıştır. Malzemelerin karıştırılması esnasında mikserle sırasıyla iri agrega, ince agrega, çimento, suyun yarısı ile varsa NaOH ve suyun diğer yarısı ile varsa süperakışkanlaştırıcı eklenmiştir. Standart taslağında belirtildiği gibi taze betonların teorik ve ölçülen birim ağırlıkları arasında en fazla $\pm\%1,5$ oranında bir fark olduğundan emin olunmuştur. Herhangi bir sıkıştırma uygulanmayan kendiliğinden yerleşen beton karışımlar haricinde kalan betonlarda kalıplara yerleştirme işlemi 2 tabaka halinde şişleme uygulanarak yapılmıştır. Her bir karışımdan altı adet $75 \times 75 \times 285 \text{ mm}$ boyutlarında prizmalar hazırlanmış ve üçü AAR-3, diğer üçü de AAR-4 deneyine maruz bırakılmıştır. Numunelerin her iki ucunda kesitin orta bölgesi paslanmaz çelikten pim içermektedir.

Numuneler ilk 24 saat boyunca kalıplarda $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık ve %90 bağıl neme sahip bir odada ıslak örtüler altında saklanmıştır. Hem erken yaşta hem de deneyin ilerleyen zamanlarında su kaybı oluşmaması çok önemlidir. Kalıp alındıktan sonra numunelerin üzerine gerekli kodlamalar yazılmış ve ayrıca ölçüm yönü işaretlenmiştir. Deney sonlanana kadar tüm ölçümler bu yönde yapılmıştır. Daha sonra $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip bir odada numunelerin ilk boyuna dair komparatör okuması (l_0) 0,001 mm ve ilk ağırlığı (W_0) da 0,1 g hassasiyetle belirlenmiştir.

Bir karışıma ait üç numune, AAR-3 deneyi için alt çapı 250 mm, üst çapı 295 mm ve yüksekliği 365 mm olan silindirik (Şekil 4.8a), AAR-4 deneyi için ise $140 \times 280 \times 410 \text{ mm}$ boyutlarında prizmatik (Şekil 4.8b) sızdırmaz kaplara dik olarak yerleştirilmiştir. Kapların alt kısmına 30 mm yüksekliğe kadar saf su yerleştirilmiştir. Şekil 4.8a ve 4.8b'de görüldüğü gibi kapların içerisinde yer alan ilave metal parçalar yardımıyla numunelerin birbirlerine, kapların kenarlarına ve aşağıda bulunan suya değmemesine özen gösterilmiştir. AAR-3 deneyinde kapların iç kenarları ince bir havlu

kumaş ile kaplanmıştır. AAR-4'te ise böyle bir işlem uygulanmamıştır. AAR-3 deneyinde numuneleri içerisinde barındıran kaplar, 38°C'lik sıcaklığı sağlayan bir odaya (Şekil 4.9a), AAR-4'te ise 60°C'lik sıcaklığı sağlayan bir kabine (Şekil 4.9b) yerleştirilmiştir. Her iki beton prizma deneyinde de ilerleyen haftalarda herhangi bir yaştaki boy (l_i) ve ağırlık (W_i) ölçümünden 24 saat önce numunelerin kapların içerisinde kalması koşuluyla $20\pm 2^\circ\text{C}$ 'ye kadar soğumasına izin verilmiş ve tüm ölçümler $20\pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip oda içerisinde alınmıştır.

AAR-3 ve AAR-4 deneyleri için tüm karışımlarda tamamlanan süreler sırasıyla 52 ve 20 haftadır. Herhangi bir süredeki; örneğin 20. haftadaki boy değişimi;

$$\text{genleşme, \%} = \frac{l_{20}-l_0}{l_0} \times 100 \quad (4-1)$$

ile hesaplanmıştır. Denklemden yer alan l_{20} ifadesi 20. haftadaki, l_0 ise kalıptan çıkartılan numunelerde elde edilen ilk komparatör ölçümünü ifade etmektedir. Bu ölçümler arasındaki fark, numune içerisinde gömülü olarak yer alan pimler arası serbest açıklığa ($l = 250 \text{ mm}$) bölünmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.8 Deney numunelerinin a) AAR-3 deneyi için ve b) AAR-4 deneyi için metal kaplar içerisinde yerleşimi.



(a)



(b)

Şekil 4.9 a) AAR-3 deneyi için 38°C'lik sıcaklığın sağlandığı oda, b) AAR-4 deneyi için 60°C'lik sıcaklığın sağlandığı kabin.

4.2.2 Numunelerden sızan alkali miktarının tespiti

Seçilen bazı karışımlarda 38°C ve 60°C'de metal kaplar içerisinde bekletilen beton numunelerin alt kısmında yer alan saf sudaki Na^+ ve K^+ iyon konsantrasyonlarındaki değişim tespit edilmiştir. 38°C'de gerçekleştirilen deneylerde genleşme sonuçlarının tespit edildiği her yaşta deney kaplarından su örnekleri de temin edilirken 60°C'ye maruziyet ile uygulanan AAR-4 deneylerinde analiz amacıyla örnek temini sadece deneyin sonlandığı 20. haftada gerçekleştirilmiştir.

Sızan alkali miktarının tespitinde 2013 yılında Lindgård tarafından tamamlanan doktora tezinde açıklanan yöntem (bazı küçük modifikasyonlarla) ve aşağıda açıklanan kabuller esas alınmıştır. Kapalı kaplarda saklanma durumu daha önce Şekil 3.31'de gösterilerek açıklanan numunelerin alt kısmında yer alan sulardan öncelikle cam pipetle 10 ml'lik örnekler alınmıştır. Bu numuneler, Ege Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında atomik absorpsiyon spektrometrisi yöntemiyle ve Varian-SpectrAA 10 plus tipinde bir spektrometre kullanılarak teste tabi tutulmuştur. Bu testler sonucunda alkali iyonu (Na^+ , K^+) konsantrasyonları ppm=mg/l cinsinden elde edilmiş, atomik ağırlıkları göz önünde bulundurularak bu değerler Na_2O ve K_2O miktarlarının tespitinde kullanılmıştır. Test edilen su numunelerinde sızma nedeniyle yer alan eşdeğer $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}$ miktarını stokiyometrik dönüşümle bulabilmek için Denklem 4-2'den faydalanılmıştır. Denklemden görüldüğü üzere Na^+ iyon miktarı 1,348 ile çarpılarak Na_2O içeriği elde edilirken (Na_2O : 62, Na: 23, $62/(23 \times 2) = 1,348$) K^+ içeriği de 1,205 katsayısı ile çarpılmış ve K_2O seviyesi elde edilmiştir (K_2O : 94, K: 39, $94/(39 \times 2) = 1,205$). Daha sonra bu değerler eşdeğer Na_2O içeriğine çevrilmiştir. Beton numunelerin hacmi ve numunelerde deney öncesinde yer alan alkali miktarları ile metal kapların alt

kısımlarında yer alan suyun hacmi de göz önünde bulundurularak hesap ve yorumlar alkalilerin ne kadarının suya sızdığı üzerine yapılmıştır.

$$[\text{Na}_2\text{O}_{\text{eşd}}] = \frac{[\text{Na}] \times 62}{(23 \times 2)} + 0,658 \frac{[\text{K}] \times 94}{(39 \times 2)} \quad (4-2)$$

Analizler boyunca;

- Kapların alt kısmında yer alan suyun miktarının deney süresince aynı kaldığı, buharlaşma ya da başka bir nedenle önemli ölçüde kayıp olmadığı, (bu nedenle her seferinde alınan örnek yerine aynı miktarda saf su ilave edilmiştir.)

- Kaplarda yer alan her karışıma ait üç adet numuneden de eşit miktarda sızıntı gerçekleştirildiği varsayılmıştır.

Atomik absorpsiyon spektrometrisi, serbest haldeki atomların ultraviyole veya görünür bölgedeki ışını absorplama miktarından yola çıkarak iyon konsantrasyonlarını belirlemek için geliştirilmiştir. Temel (en düşük, uyarılmamış) enerji seviyesinde bulunan atomlar elektromanyetik ışınımı absorbe ettiklerinde dış elektronları daha yüksek enerji seviyesinde yer alan boş yörüngelerden birine geçmekte ve bu durum uyarılmış hâle geçiş olarak adlandırılmaktadır. Bu yörüngelerin enerji düzeyleri günümüzde bilindiğinden iki enerji seviyesi arasındaki farktan yola çıkarak atom tarafından absorplanan ışının dalga boyu Denklem 4-3'e göre hesaplanabilmektedir.

$$E = E_1 - E_2 = h\nu = hc/\lambda \quad (4-3)$$

Denklemden yer alan E_1 : daha yüksek düzeydeki enerjiyi veya ışın absorplandıktan sonraki enerjiyi, E_2 : daha düşük düzeydeki enerjiyi veya ışın absorplanmadan önceki enerjiyi, h : Planck sabitini, ν : absorplanan ışının frekansını, c : ışık hızını ve λ : absorplanan ışının dalga boyunu göstermektedir.

Denklem 4-4'te verilen Beer-Lambert yasasına göre ışının absorplanma miktarı, ortamda uyarılmak için hazır durumda bulunan atom sayısına, bir başka ifadeyle konsantrasyona doğrusal bir ilişki ile bağlıdır.

$$\text{Absorbans, } A = \log (I_0/I_1) = abc \quad (4-4)$$

Denklemdaki I_0 : ışımanın deney başlangıcındaki şiddetini, I_1 : ışımanın numune içerisinde iletilebilen şiddetini, a : absorpsiyon katsayısını, b : ışının absorbe edilirken katettiği yolu ve c : konsantrasyonu simgelemektedir (Robinson, 1982).

Şekil 4.10a’da genel görünümü verilen spektrometre ile analizler gerçekleştirilirken öncelikle çözeltiden emilerek alınan örnekten sisleştirme de denilen işlemle farklı damlacık boyutlarına sahip aerosol oluşturulmakta ve sonrasında asetilen gibi yanıcı bir gaz ve hava ya da N_2O gibi yakıcı bir gaz karışımı ile üretilen alevle atomik buhar haline dönüştürülmektedir. Işık kaynağı ise içerisinde neon veya argon gibi soy gazlar hapsedilmiş olan ve ayrıca anot ve katot uçlarına sahip olan oyuk katot lambalarıdır (Şekil 4.10b). Anot ucu tungsten veya nikelden bir teldir. Katot ise miktarı belirlenmek istenen elementten yapılmıştır. Anot ile katot arasına gerilim uygulandığında asal gaz iyonlaşır, pozitif yüklü iyonlar katoda yönelip yeterli enerjileri bulunması durumunda katot yüzeyindeki atomları sökerler. Uyarılarak kararsız hale gelen bu atomlar enerjilerini en aza indirip kararlı hale dönerken kendilerine özgü dalga boyunda ışımaya gerçekleştirirler. Bu ışın demeti, alev içerisinde geçirilerek gaz halinde bulunan atomların absorpladığı miktar, ışımanın şiddetindeki azalmadan anlaşılır (Robinson, 1982; Cantle, 1982).



(a)

(b)

Şekil 4.10 Atomik absorpsiyon spektrometrisinde kullanılan a) deney cihazının ve b) içerisindeki katot lambalarının görünümü.

Yöntemde analize başlanmadan önce ilk olarak laboratuvarında NaCl ve KCl kullanılarak ayrı ayrı konsantrasyonu bilinen ve 100-1200 ppm arasına denk gelen referans Na ve K çözeltileri şeklinde numuneler (dörder adet) hazırlanmıştır. Daha sonra bu numuneler test cihazına yerleştirilerek adsorpladıkları ışımaya miktarları belirlenmiş olup iyon konsantrasyonu ile absorplanan ışımaya miktarı arasındaki doğrusal ilişki grafiksel olarak elde edilmiştir. Daha sonra ise analizlere başlanmış ve bu kez test

örneklerinin cihazdan okunan absorpladıkları ışıma miktarından yola çıkılarak Na ve K iyon konsantrasyonları belirlenmiştir.

4.2.3 Agregalardan alkali salımının tespiti

Agregalardan alkali salımı, reaktif agregaların kullanıldığı ve ASR riskinin çimento alkalinitesinin azaltılması, mineral katkı kullanımı gibi yöntemler ile sınırlandırıldığı durumlarda önem kazanmaktadır. Performans deney yöntemleri için ilk yaklaşımda, toplam beton alkalinitesinin bilinmesi ve deney esnasında salınan alkalilerin kontrol edilmesi söz konusudur. Ancak toplam beton alkalinitesi hesaplanırken sadece bağlayıcılardan gelen alkalilerin değil, agregaya kaynaklı alkali varlığının da bilinmesi gerekmektedir. Uygun performans deneylerinin geliştirilmesi için bu alkalilerin ne kadar zamanda betonda etki yaratabileceğinin tahminlenmesi önem kazanmaktadır.

Tez kapsamında RILEM TC 219-ACS Teknik Komitesi tarafından hazırlanan ve standartlaşması için halen üzerinde çalışılan “AAR-8: Betonda Agregaya Kaynaklı Alkalilerin Belirlenmesi” konulu taslak metin baz alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yöntemde bazalt ve atık cam agregaları önce fırın kurusu hale getirilmiş ve ardından tane boyutunun alkali salımına etkisini inceleyebilmek için <0,125 mm, 0,125-1 mm ve 1-4 mm boyut aralıklarına ayrılmıştır. Bu örnekler ayrı ayrı hazırlanmış olan 0,7M NaOH ve 0,7M KOH çözeltilerine daldırılmıştır. Çözelti/agrega oranı kütlece 4’e eşittir. NaOH çözeltisinde bekletilen örneklerden çözeltiye salınan K^+ iyonu ve KOH çözeltisinde bekletilenlerden ise çözeltiye salınan Na^+ iyonu miktarı ölçümleri periyodik olarak atomik absorpsiyon spektrometresi ile yapılmıştır. Her bir analizden önce cam kaplar iyice çalkalanmış ve 10 ml’lik örnekler alınmıştır. Bu işlemler AAR-3 ve AAR-4 deneylerinde olduğu gibi 38°C’de 1 yıl ve 60°C’de 20 hafta boyunca gerçekleştirilmiştir.

4.2.4 Çoklu çevre koşullarının etkisinin araştırılması

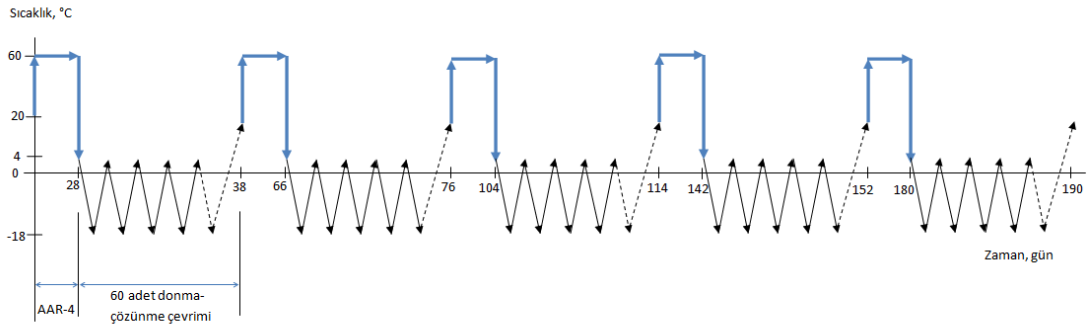
ASR de dahil olmak üzere, betonda oluşabilecek potansiyel tüm dayanıklılık problemlerinin tespiti için önerilen bir veya birçok deney yöntemi bulunmaktadır. Dolayısıyla herhangi bir çevresel etkiye maruz kalacak olan betonun bu etki altındaki dayanıklılığı hakkında fikir sahibi olmak mümkündür. Fakat herhangi bir saha betonunun sadece bir dayanıklılık problemine maruz kalması beklenen bir durum değildir. Bu problemlerin birbirini tetiklemesi ise olağandır.

Bu aşamada daha gerçekçi bir yaklaşım için betonda meydana gelebilecek diğer dış etkiler de dikkate alınarak çoklu çevre koşullarının simüle edilmesi planlanmıştır. Bu gibi

çoklu etkileri test etmeye yönelik uluslararası kabul görmüş herhangi bir standart yöntem bulunmamaktadır. Dolayısıyla tez kapsamında literatürde var olan deney metotları modifiye edilerek/birleştirilerek aşağıdaki alt başlıklar altında anlatılan iki farklı çoklu etki araştırılmıştır.

4.2.4.1 Donma-çözülme ve ASR çoklu etkilerinin incelenmesi

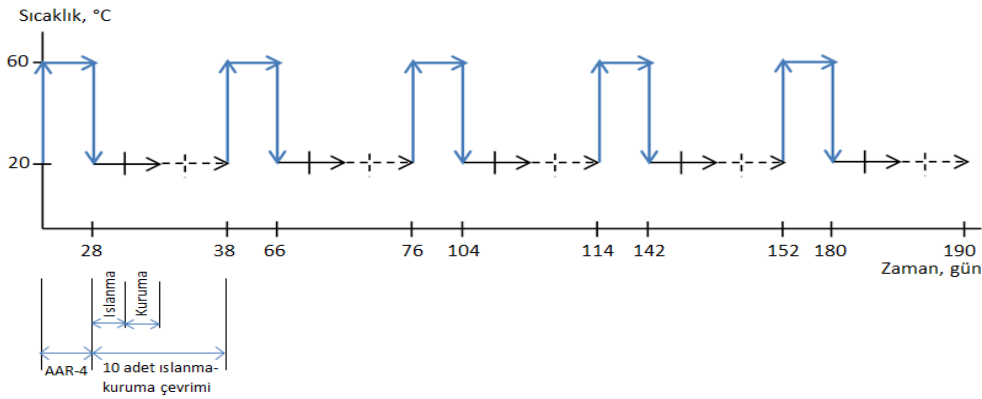
Alkali-agrega reaktivitesinin 60°C’de test edilmesini öngören AAR-4 deneyi 20 haftada, donma-çözülme direncini belirlemeye yönelik ASTM C666/C666M-03 “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing” standardına uygun deney ise 300 çevrim sonunda noktalanmaktadır. Tez kapsamında geliştirilmiş olan çevresel etkilerin de dikkate alındığı performans deney yönteminde numunelerin 4 hafta boyunca AAR-4 deneyine benzer koşullarda kürlenmesi ve takiben ASTM C666 deneyine benzer koşullarda 60 adet donma-çözülme çevrimine (toplam 10 gün) maruz bırakılması, bu periyodun 5 kere tekrarlanarak gerekli toplam deney sürelerinin tamamlanması tercih edilmiştir (Şekil 4.11). ASTM C666’da betonların su içerisinde donması ve su içerisinde çözülmesi (A Prosedürü) ile betonların havada donması ve su içerisinde çözülmesi (B Prosedürü) şeklinde iki adet yöntem tanımlanmıştır. Tez çalışmasında bunlar arasından B Prosedürü tercih edilmiş, numuneler standart uyarınca 4°C ila -18°C arası değişen kabin sıcaklıklarında donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Bir adet donma-çözülme çevriminin 2-5 saat arasında tamamlanması gerekliliği koşuluna da uyulmuştur. 75x75x285 mm boyutlu prizmalar üzerinde genleşme ölçümleri alınırken ağırlık kaybı ve ultrases hızlarındaki değişimlerin ölçülebilmesi için 100 mm ayrıtlı ilave küp numuneler de hazırlanıp çevrimlere maruz bırakılmıştır. Belirtilen bu ölçümler, Şekil 4.11’de 20°C’ye denk gelen tüm durumlarda yani çevrimlerin başlangıç ve bitişlerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.11 Donma-çözülme ile ASR etkilerinin birlikte uygulandığı deney programı.

4.2.4.2 İslanma-kuruma ve ASR çoklu etkilerinin incelenmesi

Hong tarafından 1998 yılında tamamlanan bir tez çalışmasında farklı karışım oranlarına sahip betonlara ıslanma-kuruma etkileri uygulanmıştır. İslanma evrelerinde numuneler sodyum klorür çözeltisine daldırılmış ve ıslanma-kuruma tekrarlarının, klorür iyonlarının betonlara hangi hızla ve hangi derinliğe kadar nüfuz ettiğine etkisi belirlenmiştir. Tez kapsamındaki ıslanma-kuruma döngüleri de Hong'un (1998) çalışmasında belirtilen 1 günlük çevrim esas alınarak gerçekleştirilmiştir, farklı olarak ise bu çalışmada numuneler 1 mol NaCl çözeltisi yerine 1 mol NaOH çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Bunun amacı, reaksiyonu hızlandırmak değil, su içerisinde beklemekte olan örneklerden dışarıya alkali sızıntısını önlemektir. Bir günlük çevrim süresince numuneler 20°C'de 6 saat ıslanma, 18 saat kurumaya maruz bırakılmıştır. Kuruma işlemi kapalı bir kap içerisinde numunelere temas etmeyecek halde yer alan doygun CaCl_2 çözeltisi sayesinde sağlanmıştır. İslanma aşamalarından sonra yüzeyleri basınçlı hava ile kurutulan numuneler, kapalı kapların içerisinde kuruma aşaması sonlanana kadar bekletilmiştir. Bu şekilde gerçekleştirilen bir döngü toplam 24 saatte sona ermektedir. Hong'un (1998) belirttiği üzere, kapalı kapların iç ortam nem değerlerinin takip edildiği denemelerde, nemli numunelerin yerleştirilmesiyle kap içerisinde başlangıçta bağıl nem yaklaşık %80 değerlerine yükselmekte, zamanla CaCl_2 'nin etkisi ile bağıl nem değeri %50 mertebesine düşmektedir. Tez çalışmasında, donma-çözülme ve ASR döngülerine benzer periyotlar elde edebilmek için, seçilen karışımlar 28 gün boyunca AAR-4 koşullarına tabi tutulmuş, ardından 10 gün ıslanma-kuruma prosedürü uygulanmıştır ve bu periyot Şekil 4.12'de görüldüğü gibi 5 kere tekrarlanarak toplam deney süresinin tamamlanması tercih edilmiştir.



Şekil 4.12 İslanma-kuruma ile ASR etkilerinin birlikte uygulandığı deney programı.

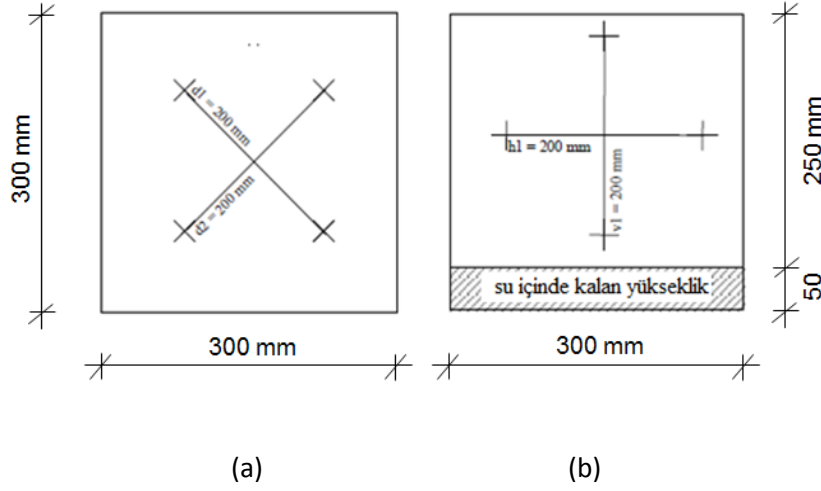
Çevrim başlangıç ve bitişlerinde, donma-çözülme ve ASR tekrarlı etkilerinin incelendiği deneylerde hazırlanan numunelerle aynı boyutlarda olan beton prizmalarda genleşme, küplerde ise ağırlık ve ultrases değişimleri belirlenmiştir.

Şekil 4.11 ve 4.12'nin yatay eksenleri ölçeksiz çizilmiş olup döngülerin uygulanış şeklinin daha net olarak görülebilmesi amacıyla bu şekilde gösterim yapılmıştır.

4.2.5 Maruziyet sahalarının oluşturulması

2002-2006 yılları arasında Avrupa Topluluğu'nun mali olarak desteklemesiyle ve 14 farklı ülkeden 24 ortağın katılımıyla "EU Partner Projesi" gerçekleştirilmiştir. Projede Avrupa'nın 10 ülkesinde yer alan 22 farklı agrega kullanılarak deneyler yapılmıştır. Projenin temel amaçlarından biri RILEM tarafından geliştirilen hızlandırılmış performans deneylerinin, agregaların reaktivitesini ortaya çıkarmadaki başarısını belirlemektir. Bu değerlendirmeyi yapabilmek için gereken ölçüt ise hızlandırılmış deneylerin verileri ile yapılardan bilinen saha performansları ve/veya maruziyet sahaları verileri arasındaki korelasyonların incelenmesidir. Partner Projesi kapsamında Valencia, Milan, Düsseldorf, Watford, Brevik, Borås ve Trondheim'da oluşturulan maruziyet sahaları, betonların yıllarca olağan hava koşullarına bırakılmasını ve karışımların sahadaki reaktivite davranışlarının incelenmesini sağlamaktadır (Lindgård vd., 2010).

Ege Üniversitesi'nde de bir maruziyet sahası kurulması düşüncesi tez kapsamına dahil edilmiş olup başlangıç aşamasında PARTNER projesinde maruziyet sahaları hakkında önemli deneyim kazanan kurumlardan biri olan ICRAAT'tan (International Centre of Research and Applied Technology for Alkali Aggregate Reactions (AAR) – Mannvit, Iceland) büyük küp numunelerin hazırlanması, sahalarla yerleştirilmesi ve ölçümlerin alınması konularında her adımın anlatıldığı bir rapor temin edilerek incelenmiştir. Elde edilen bilgilere göre hazırlanacak olan maruziyet sahasına 300 mm ayrıtlı küp örneklerin yerleştirilmesine ve küplere yerleştirilecek olan pimlerin konumlarının ve ölçüm doğrultularının küplerin üst yüzeyinde Şekil 4.13a, diğer iki adet bitişik ve karşılıklı olmayan yüzeylerde ise Şekil 4.13b'de gösterildiği gibi olmasına karar verilmiştir. Şekillerden anlaşılacağı üzere üst yüzeyden diyagonal doğrultularda, diğer iki yan yüzeyden ise yatay ve dikey doğrultularda ölçümler alınmıştır. Her karışıma ait küplerden biri 5-6 cm su içerisinde bekletilmekte olduğundan, yan yüzeylerdeki pimler üst yüzeye daha yakın bölgelerde yer almaktadır.



Şekil 4.13 Maruziyet sahasındaki küplerin a) üst ve (b) yan yüzeylerinde pimlerin konumu ile ölçüm doğrultuları.

Önceki aşamalarda hazırlanan çeşitli karışımların genleşme-zaman davranışları incelenerek aralarından bazıları seçilmiş ve bu karışımlar tekrar dökülüp betonlardan 2'şer adet 300 mm ayrıtlı küp numuneler hazırlanmıştır. Örnekler, 24 saat kalıpta ve sonrasında da ilk iki haftalık sürede laboratuvar içerisinde günde ikişer defa sulanarak ve üzerlerine ıslak örtüler serilerek bekletilmiştir. Küp numunelerin daha sonra üç adet bitişik yüzeyine 8 mm çaplı ve 10 mm uzunluklu prinçten pimlerin yerleştirilebilmesi için matkapla delme işlemi uygulanmıştır. Pimlerin konumları ve aralıkları belirlenirken Şekil 4.14a'da görülen 200 mm açıklıklı kontrol (referans) çubuğundan yararlanılmıştır. Delme derinliği pimlerin uzunluğuna denk gelmekte olup delme işlemi tamamlanınca delikler basınçlı hava ve fırça ile temizlenmiştir. Daha sonra çift komponentli yapıştırıcı ile karşılıklı iki delik doldurulmuş ve pimler üzerine bastırılmıştır. Pimlerin üzerine kontrol çubuğu yerleştirilip yapıştırıcı sertleşene dek (10-15 dakika) bu vaziyette bekletilmiştir. Diğer pimlerin yerleştirilmesi işlemi de benzer şekilde yapılmış ve böylelikle toplam 12 adet pim her bir örneğe sabitlenmiştir (Şekil 4.14b).



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.14 a) Kontrol çubuğu yardımıyla ölçülerin alınması, b) pimlerin yerleştirilmesi ve diyagonal ölçüm yönleri, c) boy değişimini ölçmede kullanılan komparatör

Küp örnekler, 28 günlük yaşa ulaşınca laboratuvar dışına çıkartılıp Şekil 4.15'te genel görünümü sunulan maruziyet sahasına yerleştirilmiştir. Bu işlemten hemen önce Şekil 4.14c'de gösterilen 0.002 mm hassasiyetli ve maksimum 5 mm'ye kadar yatay doğrultuda boy değişimi ölçümü gerçekleştirebilen komparatör yardımıyla ilk boy ölçümleri alınmıştır. Ayrıca karşılıklı yüzeylerde ultrases hızları da belirlenmiştir. Maruziyet sahasında yer alan beton örneklerde boy ölçümleri ve ultrases hızları periyodik olarak ölçülmüştür. Özellikle genleşme verilerine ortam sıcaklığının etkisini azaltabilmek için tüm ölçümler sıcaklığın 21-25°C aralığında olduğu zamanlar alınmıştır.



Şekil 4.15 Maruziyet sahasının genel görünümü.

ASR'yi etkileyen önemli parametreler arasında sıcaklık ve nem gibi hava şartları da yer almaktadır. Bu faktörlere bağlı olarak aynı karışımın farklı ülkelerdeki maruziyet sahalarında farklı performanslar gösterdiği örnekler literatürde yer almaktadır (Fournier et al., 2009; Lindgård et al., 2010). Rüzgar hızı, rüzgar yönü, sıcaklık ve nem verilerini ölçebilen basit tipte bir hava istasyonu yardımıyla maruziyet sahası için hava koşulları da kaydedilmiştir (Şekil 4.16).



(a)

(b)

(c)

Şekil 4.16 a) Sıcaklık ve nem sensörü, b) kablosuz olarak çalışan gösterge ünitesi, c) rüzgar sensörü.

4.2.6 Modelleme çalışmaları

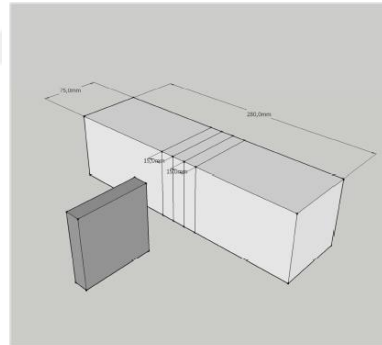
Tezin bu aşamasındaki çalışmalar uluslararası işbirliği sağlanarak gerçekleştirilmiştir. Hollanda'da TU Delft'te (Delft University of Technology) yürütülen PAT-ASR projesi (Anaç et al., 2012) ile karşılıklı veri paylaşımı ve sonuçların geliştirilmiş olan Delft Lattice modeli ile yorumlanması amaçlanmıştır. Öncelikle PAT-ASR projesinde mikro-mezo düzeyde modelleme iş paketindeki çalışmaları gerçekleştiren Caner Anaç'ın proje kapsamında hazırladığı ve mevcut tez kapsamında hazırlanan ortak karışımlar seçilmiştir. Beton kesitlerde hasar derece indeksi (Damage

Rating Index – DRI) yöntemiyle çatlak sayımları gerçekleştirilmiştir. DRI, mikroskopik ve yarı-kantitatif bir inceleme türü olarak bilinmekte ve çatlak sayısallaştırma yöntemi olarak nitelendirilmektedir. Yöntem, beton numuneden oluşturulan parlak kesitlerin stereo-mikroskop altında yaklaşık 15x büyütme uygulanarak incelenmesi, kesitte yer alan çatlakların türlerine ve konumlarına göre gruplandırılacak şekilde tek tek sayılması, bu gruplara betonun toplam hasar durumundaki rollerine göre seçilen katsayıların atanması ve çatlak sayılarının katsayılarla çarpılıp birbirleriyle toplanması esasına dayanmaktadır. Elde edilen toplam, 100 cm²'lik alana göre normalize edilerek DRI değeri olarak ifade edilmektedir. 1992 yılında Grattan-Bellew ve Danay'ın geliştirip önermiş olduğu DRI yönteminin ilk uygulanış şeklindeki çatlak grupları ve bu gruplar için belirlenen katsayılar Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Standart bir yöntem olmayan DRI ile ilgili zaman içerisinde yapılan çalışmalarda hem yöntemin uygulanış biçimi hem de atanan katsayılarla ilgili farklılıkların önerildiği durumlar da olmuştur. Örneğin karşılaşılan problemlerden birisi, yöntemde elde edilen görüntülerin sahip olduğu çözünürlükte agrega veya hamurdaki çatlaklarda yer alan ASR jellerini doğru bir şekilde teşhis edebilmekteki zorluktur. Bazı çalışmalarda çatlağın jel içerip içermemesinin betonun mevcut hasar durumundaki rolü üzerinde bir önemi olmadığı görüşü de öne çıkmıştır. Ayrıca zaman içerisinde agrega ve çimento hamuru çatlakları için “açık çatlak” ve “kapalı çatlak” terimleri geliştirilmiş olsa da bu sınıfların net tanımlarının bulunmadığı görülmüştür (Bérubé et al., 2012b; Villeneuve et al., 2012; Sanchez et al., 2015). Dolayısıyla tez çalışmasında Çizelge 4.5'te tarif edilen sayım yöntemi esas alınıp sadeleştirilmiş ve iri agregalarda, agrega sınırlarındaki reaksiyon halkalarında, sertleşmiş çimento hamurunda ve hava boşluklarına bağlı olarak bulunan çatlaklar sayılmış olup bu gruplar için sırasıyla x0,25, x0,5, x2 ve 0,5 katsayıları uygulanmıştır.

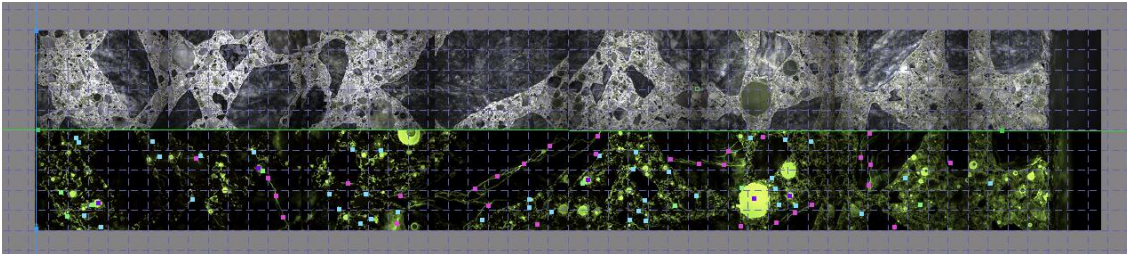
Çizelge 4.5 DRI yöntemindeki çatlak ve hasar grupları ile bunlara atanan önem katsayıları (Grattan-Bellew and Danay, 1992).

Hasar tipi	Katsayı
Agregada yer alan çatlaklar	x0,25
Agregada yer alan ASR jelli çatlaklar	x2
Çimento hamuru ile aderansını kaybetmiş agrega taneleri	x3
Agrega sınırlarındaki reaksiyon halkalarındaki çatlaklar	x0,5
Sertleşmiş çimento hamurunda yer alan çatlaklar	x2
Sertleşmiş çimento hamurunda yer alan ASR jelli çatlaklar	x4
İçerisinde ASR jeli barındıran hava boşlukları	x0,5

DRI sayımlarında ve hasar modellemesi için görüntü elde etmede kullanılan numuneler, AAR-3 ve AAR-4 testlerine maruz bırakılan bazı karışımlara ait prizmalardan (75x75x285 mm) elde edilmiştir. Bu numunelere ait 15 mm kalınlıklı kesitler, Şekil 4.17’de gösterildiği gibi prizmaların nispeten orta bölgelerinden çıkartılmıştır. Parlak kesit hazırlayabilmek için öncelikle kesitlerin her biri kurutulmuş ve floresan pigmentli epoksi kesitlere vakum altında emprenye edilmiştir. Epoksi kürlendikten sonra numunelere SiC ve endüstriyel elmas bazlı aşındırıcılarla zımparalama uygulanarak parlak kesitler elde edilmiştir. Daha sonra kesitlerin Leica stereo-mikroskopta hem normal ışık hem de ultraviyole ışık altında görüntüleri alınmıştır. Kesit görüntüleri öncelikle yukarıdan aşağıya doğru 8 eşit kalınlıklı dilime ayrılmıştır. Her bir dilim için de soldan sağa doğru 8 eşit alanlı bölgenin görüntüsü 15 kat büyütme ile elde edilmiş, sonra bu görüntüler birbirine eklenerek DRI sayımlarının yapılması için gerekli hazırlıklar tamamlanmıştır. Bu görüntüler, 1 mm x 1 mm boyutlarındaki karelerden oluşan bir ızgara sistemi (mesh) üzerine yerleştirilip çatlaklar tek tek sayılmıştır. Dilimlerden birinin nihai görüntüsü örnek teşkil etmesi açısından Şekil 4.18’de sunulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi üstte yer alan normal ışık altındaki görüntünün hemen altına ultraviyole ışık altındaki görüntü yerleştirilmiş ve çatlaklar kategorilerine göre belirlenip işaretlenerek sayım işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.17 DRI sayımları için parlak kesit oluşturmada kullanılan kesitlerin elde edilmesi.



Şekil 4.18 DRI sayımları için kullanılan normal ışık ve ultraviyole ışık altındaki görüntülere örnek.

ASR ile ilgili literatürde var olan modelleme yaklaşımları incelendiğinde temel olarak üç farklı teknikte çalışmalar gerçekleştirildiği görülmektedir (Esposito and Hendriks, 2019):

- ASR nedeniyle betonda oluşan genleşme birim deformasyonunun tanımlandığı ve bu değer zaman içerisindeki değişiminin termodinamik ilkelere dayalı olarak reaksiyon kinetiği yasalarıyla modellendiği çalışmalar (betonun gerilme durumu, sıcaklık, bağıl nem ve agrega reaktivitesi gibi ölçütler girdi olarak kullanılarak),

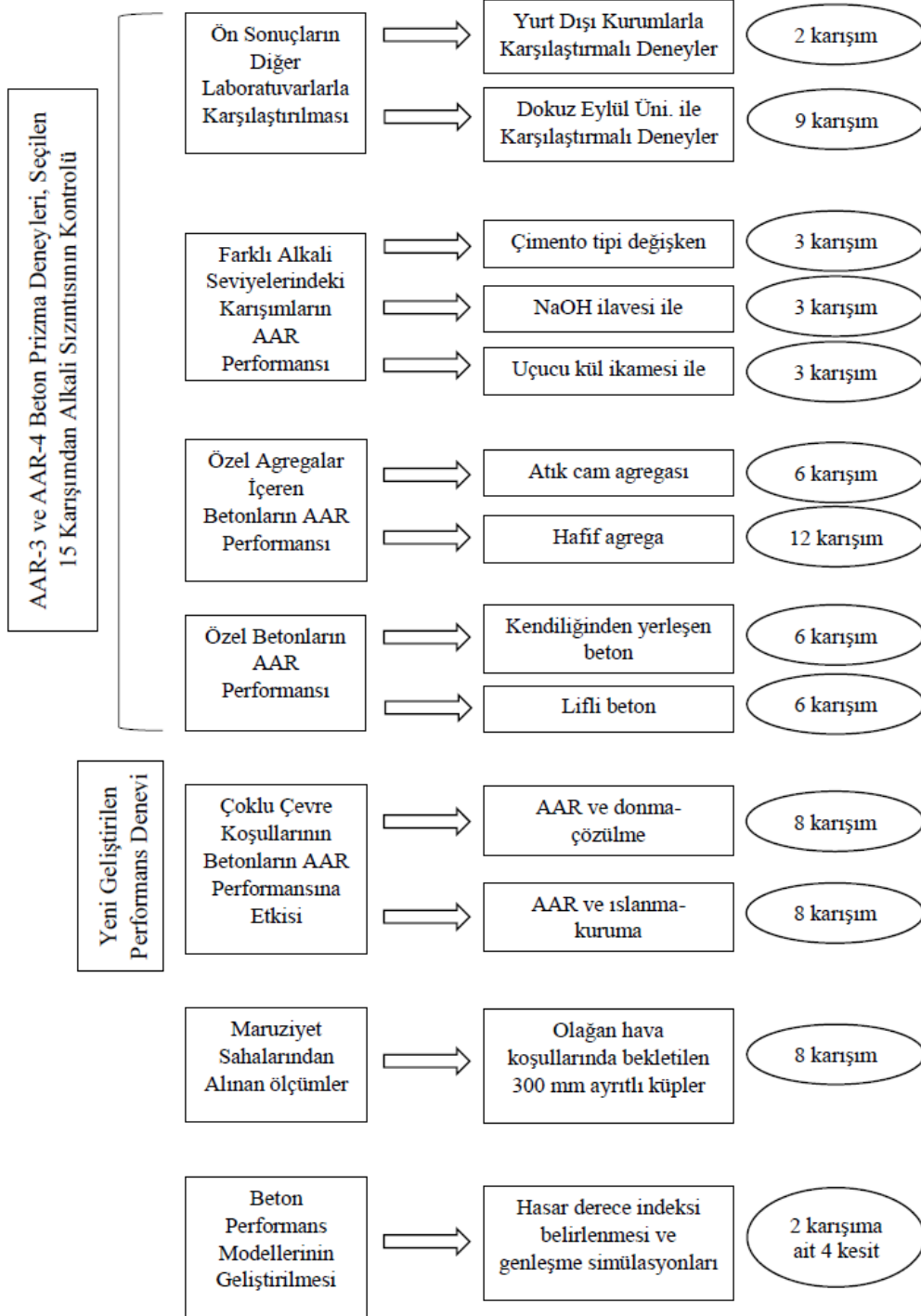
- İyon difüzyonu-reaksiyon mekanizmalarının baz alınarak matematiksel denklemlerin geliştirildiği ve alkali iyonlarının agrega bünyesine nüfuzu, silisin çözünmesi ve agrega sınır halkalarında alkali-silis jelinin oluşumu, kapiler boşluklarda yer alan suyun bir bölümünün jelin bünyesine katılması ve jelin çimento hamuru içerisinde yayılması sırasında yarattığı şişme kaynaklı hasar gibi faktörlerin aşama aşama ele alındığı çalışmalar,

- ASR sonucu oluşan ürünlerin yarattığı içsel basıncın ele alındığı ve betonda oluşan hasarın mikroyapıda gelişen çatlak oluşumlarından yola çıkılarak kırılma mekaniği yasalarıyla açıklandığı, bir başka ifadeyle hasarın modellendiği çalışmalar.

Tez kapsamında uygulanan modelleme çalışmaları, yukarıdaki gruplardan sonuncusu esas alınarak Hollanda'da TU Delft'te gerçekleştirilmiştir. Bu modelde girdi olarak beton mikroyapısında yer alan çimento hamuru, agrega, hamur/agrega arayüzeyindeki bağ elemanları, boşluklar ve çatlakların miktarı ile mekanik özellikleri kullanılmakta, ayrıca agrega içerisindeki reaktif silisli minerallerin miktarına göre genleşme noktaları ve reaksiyonun ilerleyişi simule edilmektedir. Modellemede yapılan işlemler sırasıyla özetlenecek olursa kesitlerin dijital görüntülerinin işlenmesiyle sertleşmiş betonda yer alan farklı fazların ayrıştırılması sağlanmış, küçük kırış elemanların birleşip meydana getirdiği iki boyutlu (2-D) kafes (Lattice) model tanımlamasıyla ASR sırasında oluşan jel şişmesi ve genleşme, içsel mekanik yükleme benzetmesi yardımıyla simule edilmiş, nano-indentasyon deneylerinden faydalanılarak sertleşmiş betonda yer alan fazların mekanik özellikleri tanımlanmış ve sonuçta mikro ve orta düzeyde basit genleşme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Tezin bu aşamasında hedef, karşılıklı olarak deney sonuçlarının ve modelleme çıktılarının doğrulanarak etkin parametre tanımları geliştirilmesi ve bu veriler ışığında betonun ASR etkisi altındaki performansının ve hasar durumunun tahminlenmesidir.

4.3 Deney Programı

Deneyisel çalışma sırasında her aşamada araştırılan konuların içeriğine ve kapsamına dair şematik gösterim Şekil 4.19’da yer almaktadır.



Şekil 4.19 Deneyisel çalışmanın ayrıntılarını gösteren şema.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bir önceki başlık altında detayları verilen çalışmalar/deneyler sonucu elde edilen veriler bu başlık altında yer almaktadır. Tez kapsamında her bir aşamada araştırılan konular alt başlıklar altında sunulmuş olup karışım oranları, deney sonuçları ve sonuçlara dair yorumlara yer verilmiştir.

5.1 Ön Sonuçların Diğer Laboratuvarlarla Karşılaştırılması

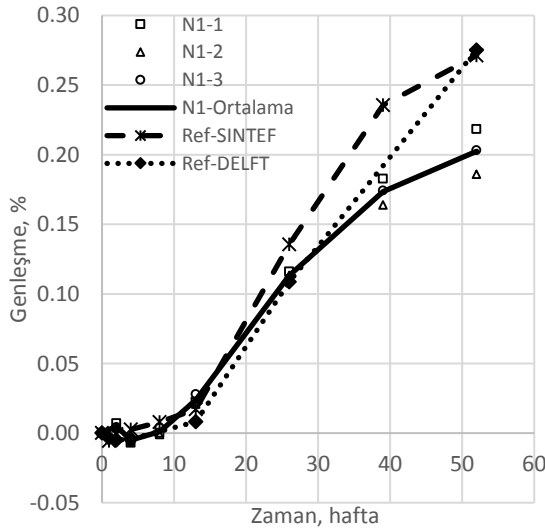
Tez kapsamında ilk iş olarak işbirliği yapılan kurumlar arasında yer alan Norveç'in SINTEF araştırma enstitüsünden referans agrega ve çimentolar temin edilmiştir. Özellikle seçilen agregalar, bu kurumun hatta yurt dışındaki çalışmalarda birçok araştırmacının uzun yıllardır tecrübe ettiği, genleşme ölçümlerinin yapıldığı ve bazı durumlarda ASR ile ilgili deney metotlarının düzenlenmesinde/güncellenmesinde yer edinen referans malzemelerdir. Bu kurumdan hem referans malzemeler, hem örnek karışım oranı, hem de malzeme miktarları verilen karışımın geçmişte neden olduğu genleşme değerleri temin edilmiştir. Laboratuvar için gerekli altyapı oluşturulduktan hemen sonra iki adet referans karışım, AAR-3 ve AAR-4 deneylerine tabi tutulmuştur. Bu referans malzemelerle karışımlar oluşturup test eden diğer bir kurum ise yine işbirliği yapılan Delft Teknik Üniversitesi (Delft University of Technology)'dir.

Referans malzemeler kullanılarak hazırlanan iki adet karışımın malzeme oranları Çizelge 5.1'de görülmektedir. Karışımlardaki doğal Ardal kumu buzul-akarsu birikintilerinden temin edilen, gnays ve granit esaslı olan ve reaktif olmadığı bilinen bileşendir. Her iki karışım da genleşmelere yol açan faz iri boyuttaki kırma agregalardır. N1 karışımında Norveç kökenli, kataklastik kayaç grubuna giren Ottersbo iri agregası, N2 karışımında ise Kanada kökenli bir silisli kireçtaşı olan Spratt iri agregası kullanılmıştır. Hem Ottersbo hem de Spratt agregası reaktif nitelikli mikrokristalin/kriptokristalin kuvars içermektedir. İri agrega:ince agrega kullanım oranı kütlece 60:40 olacak şekilde dizayn gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.1'de agregalar için verilen hem kullanım oranları hem de özgül ağırlıkları agregaların DYK (doygun yüzey-kuru) halleri cinsindendir. Industri ve Anlegg çimentolarının eşdeğer Na_2O cinsinden alkali içerikleri ise sırasıyla %1,24 ve %0,60'tır. Dışarıdan NaOH ilavesi uygulanmadığı göz önünde bulundurulduğunda N1 karışımının alkali içeriği $3,68 \text{ kg/m}^3$, N2 karışımının alkali içeriği ise $4,05 \text{ kg/m}^3$ düzeyindedir.

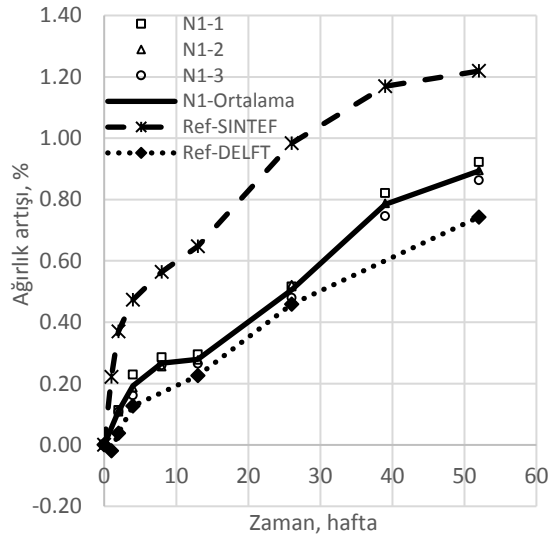
Çizelge 5.1 Referans malzemeler kullanılarak üretilen karışımlar.

Bileşen [Özgöl ağırlığı]	Karışım oranları (kg/m ³)	
	N1	N2
İndüstri çimentosu [3,16]	200	220
Anlegg çimentosu [3,15]	200	220
Su	178	220
Ardal kumu [2,66]	736	669
4/8 Ottersbo [2,76]	184	-
8/11 Ottersbo [2,77]	367	-
11/16 Ottersbo [2,77]	551	-
4/22 Spratt [2,68]	-	1004
Scancem SSP 2000 akışkanlaştırıcı [1,06]	4,3	3,8

N1 karışımının zaman içerisindeki genleşme ve ağırlık artışı performanslarını gösteren eğriler, AAR-3 (38°C) ve AAR-4 (60°C) deneyleri için sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de sunulmaktadır. Laboratuvarımızda bu karışıma ait üç numune hazırlanmış olup numunelere dair ayrı ayrı veriler N1-1, N1-2 ve N1-3 kodlarıyla, sonuçların ortalamasına dair veriler ise N1-Ortalama koduyla gösterilmiştir. Grafiklere malzemelerin temin edildiği kurumda (Ref-SINTEF) ve Delft Teknik Üniversitesi’nde (Ref-DELFT) elde edilen sonuçlar da eklenmiştir.

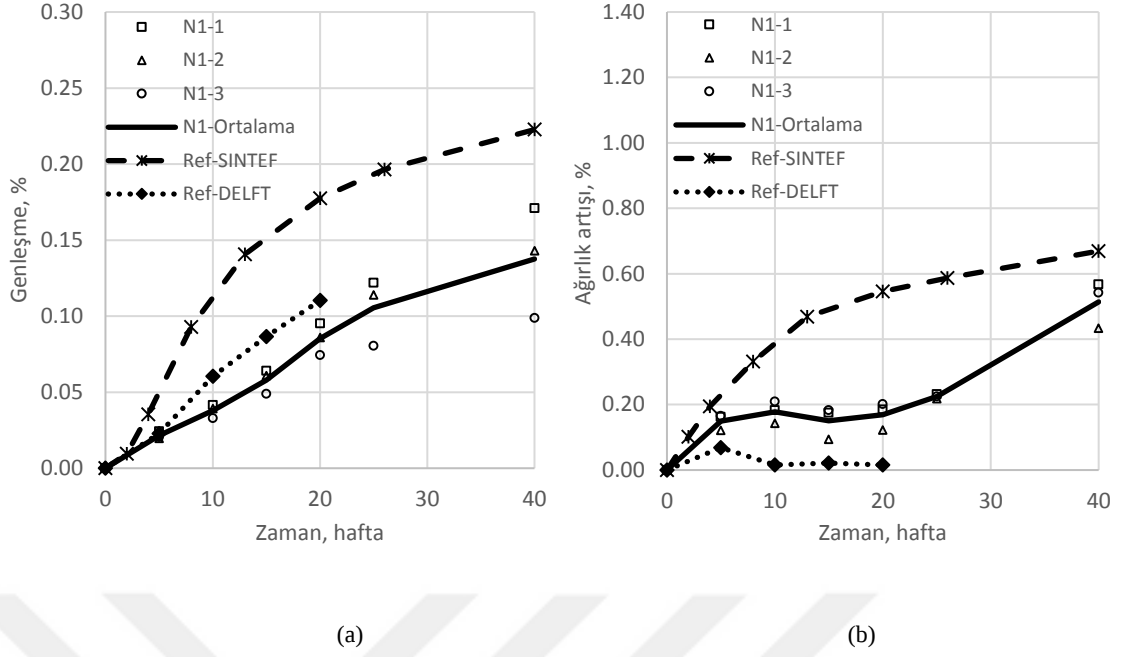


(a)



(b)

Şekil 5.1 Ottersbo iri agregası ile hazırlanan karışımların 38°C’de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.



Şekil 5.2 Ottersbo iri agregası ile hazırlanan karışımların 60°C’de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.

Şekil 5.1a’da görüldüğü gibi 38°C’lik sıcaklığa maruz kalması durumunda tüm karışımlara ait numuneler, ilk 13 hafta kayda değer genleşme göstermemiş, daha sonra genleşmelerde ani bir artış oluşmuştur. Genleşme verileri incelendiğinde her üç kurumda özellikle ilk 26 haftalık periyotta alınan ölçüm sonuçları, birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Genleşme değerlerindeki artışlar, 13. haftadan deney sonlanana kadar devam etmiş olup 52. haftada N1, Ref-SINTEF ve Ref-DELFT karışımları için elde edilen ortalama genleşme değerleri sırasıyla %0,202, %0,271 ve %0,275 düzeyindedir. 38°C’lik sıcaklık seviyesi için verilen ağırlık artışı-zaman (Şekil 5.1b) grafiklerinin eğimlerine göre ise genleşme-zaman grafiklerinde görülenin aksine ilk 4-8 haftalık periyotta, diğer zaman aralıklarına göre daha hızlı artışlar görülmüştür. İlk birkaç haftada numunelerin ağırlıklarındaki artışın henüz genleşmelerde değişim yaratmamasını, bünyeye nem girişi ile oluşan ASR ürünlerinin ilk olarak sadece boşluklarda gelişmesi ile açıklamak mümkündür. 13. haftadan sonra genleşme değerlerinin oldukça fazla yükselmesi, Şekil 1b’deki eğrilere de yansımış ve deney sonlanana kadar ağırlık değerleri de artmaya devam etmiştir. SINTEF kurumunda test edilen karışımda tüm yaşlarda daha yüksek ağırlık artışı değerleri elde edilirken diğer iki kurumun test ettiği numunelerin verileri birbirine nispeten daha yakın çıkmıştır.

Şekil 5.2a ve Şekil 5.2b’ye göre ise 60°C’lik sıcaklık seviyesi, karışımların hazırlanmasından hemen sonra numunelerin genleşme ve ağırlık değerlerinde artışlara yol açmıştır. Sıcaklık seviyesinin 60°C’ye yükseltilmesi, 38°C’de oluşan durumun aksine, ilk haftalarda reaksiyon hızının daha yüksek olmasına ve ilerleyen haftalarda

grafiklerin eğimlerinde düşüşlere sebep olmuştur. Standart deney süresi olan 20. haftada N1, Ref-SINTEF ve Ref-DELFT karışımları için elde edilen ortalama genleşme değerleri sırasıyla %0,085, %0,177 ve %0,110 düzeyindedir. Ege Üniversitesi'nde ve SINTEF'de yapılan deneyler 40 haftaya kadar uzatılmış olup bu süre zarfında da genleşmelerin artma eğilimi devam etmiştir. Şekil 5.2a ve Şekil 5.2b'ye göre SINTEF'de hem genleşme hem de ağırlık artışı verileri diğer kurumlara kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Şekil 5.1a'ya göre 38°C'de farklı kurumlarda elde edilen genleşme verileri nispeten birbirlerine yakınken 60°C'de daha büyük varyasyonların oluşmasının, saklama koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Laboratuvarlarda gerekli alt yapının oluşturulmaya başlandığı ve tezin ön çalışmaları niteliğinde değerlendirilebilecek olan bu aşamada özellikle 60°C'lik yüksek sıcaklık seviyesinde kabin içerisinde bekletilen deney kaplarında ilk haftalardan itibaren yer yer sızdırma problemleri ile karşılaşmıştır. Bu nedenle ivedilikle contalar değiştirilip tezin diğer aşamaları için gereken dökümlere yeni contalarla devam edilmiştir. Sonraki paragraflarda açıklanacak olan Dokuz Eylül Üniversitesi ile yapılan karşılaştırmalı deneyler esnasında bu tip problemlerin oluşmadığı ve verilerin birbirlerine çok daha yakın çıkması sızdırma probleminin giderildiğini göstermektedir.

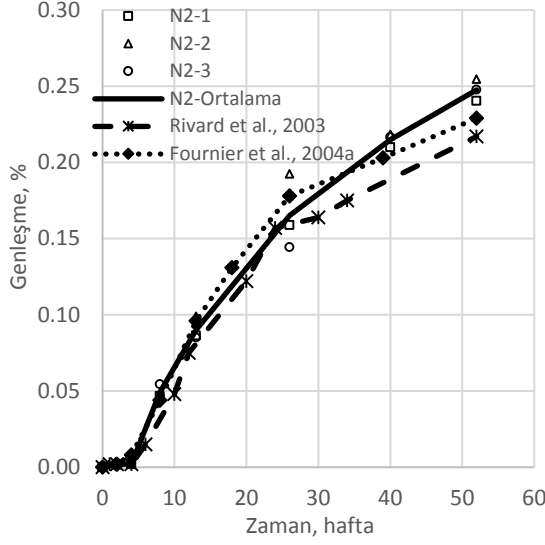
Şekil 5.1 ve 5.2'de grafiklerde gösterilmiş olan N1 karışımına ait N1-1, N1-2 ve N1-3 numunelerine dair verilerin kendi arasındaki değişkenlik deney tekrarlanabilirliğini (repeatability), N1 karışımına ait ortalama değerlerle diğer kurumlarda elde edilenler arasında ölçülen değişkenlik ise sonuçların yeniden üretilebilirliğini (reproducibility) değerlendirmeye dair ölçülerdir. Bir başka ifadeyle, deney tekrarlanabilirliği laboratuvar içerisindeki, sonuçların yeniden üretilebilirliği ise laboratuvarlar arası kalite kontrol düzeyini temsil eden veriler sunmaktadır. Çizelge 5.2'deki hesaplamalarda örnek teşkil etmesi için ortak yaşlarda ölçümlerin elde edildiği 38°C'de 26 ve 52 haftalık ile 60°C'de 20 haftalık genleşme verileri kullanılmıştır. Tablodaki μ ve s ifadeleri sırasıyla ortalama ve standart sapmanın kısaltılmış gösterimleridir. Değişkenliği sayısal ifadelere dökme amacıyla ise varyasyon katsayısı (COV) değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 5.2'de belirtilen COV_r ifadesi deney tekrarlanabilirliğinde oluşan varyasyonu simgelemekte olup Ege Üniversitesi'nde hazırlanan N1 karışımına ait üç numunenin genleşme değerlerindeki standart sapmanın serinin ortalamasına bölünmesiyle bulunmuştur. Aynı çizelgedeki COV_R ise sonuçların yeniden üretilebilirliğini değerlendirmek için belirlenmiş olup bu büyüklüğün hesabında farklı kurumların elde ettiği ortalama genleşme değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 5.2 Karşılaştırmalı deneylerde ölçülen veriler ve sonuçlardaki değişkenlikler.

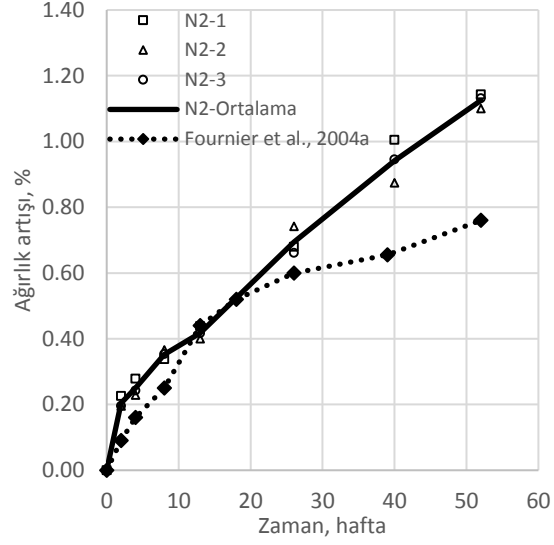
Genleşme sonuçları (%)	38°C		60°C
	26. hafta	52. hafta	20. hafta
N1-1	0,1160	0,2184	0,0952
N1-2	0,1132	0,1858	0,0860
N1-3	0,1108	0,2032	0,0744
μ (%)	0,1133	0,2025	0,0852
s (%)	0,0026	0,0163	0,0104
COV_r (%)	2,30	8,06	12,23
N1-Ortalama	0,1133	0,2025	0,0852
Ref-SINTEF	0,1355	0,2713	0,1775
Ref-DELFT	0,1086	0,2752	0,1103
μ (%)	0,1191	0,2497	0,1243
s (%)	0,0143	0,0409	0,0477
COV_R (%)	12,03	16,39	38,38

Çizelge 5.2’deki hesaplamalar uyarınca belirli bir sıcaklık seviyesi ve deney süresi için kurum içinde oluşan değişkenliğin, kurumlar arasında oluşana kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte AAR-3 deneyinde genleşme değerlerinde ortaya çıkan değişkenlik, deneyin hızlandırılmış versiyonu olan AAR-4’te elde edilene nazaran daha azdır. Literatürde Avrupa’da yer alan sekiz farklı laboratuvar arasında değişkenliğin ölçülmesi amacıyla gerçekleştirilen bir çalışmada (Lindgård et al., 2010) COV_r büyüklükleri 38°C ve 60°C için sırasıyla %13,8-%20,7 ve %9,1-%16,4 aralığında kalmıştır. COV_R değerleri ise yine 38°C ve 60°C sıcaklık seviyelerinde sırasıyla %49,3-%54,3 ve %24,2-%33,1 arasındadır. N1 karışımı için üç kurumun birlikte yürüttüğü çalışmaların sonuçları özetlendiğinde 60°C’de oluşan sonuçların yeniden üretilebilirliği (COV_R: %38,38) haricinde diğer koşullarda oluşan tüm varyasyonların düşük/kabul edilebilir seviyelerde kaldığı yorumunu yapmak mümkündür.

Çizelge 5.1’de belirtildiği gibi bu aşamada uygulanan deneylerde reaktivitesi araştırılan diğer karışım N2’dir. N1 karışımından farklı olarak N2 karışımında yukarıdaki paragraflarda bahsedilen kurumlarla bire bir aynı karışımlar dökülüp verilerin karşılaştırılması yoluna gidilmemiştir. Fakat Spratt iri agregası, yurt dışında çeşitli araştırmacılar tarafından sıklıkla test edilen bir referans agrega olduğundan bu agrega da temin edilmiş ve oluşturulan N2 karışımı AAR-3 ve AAR-4 deneylerine maruz bırakılmıştır. N2 karışımına ait genleşme ve ağırlık artışı verilerini gösteren eğriler, AAR-3 (38°C) ve AAR-4 (60°C) deneyleri için sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te verilmiştir.

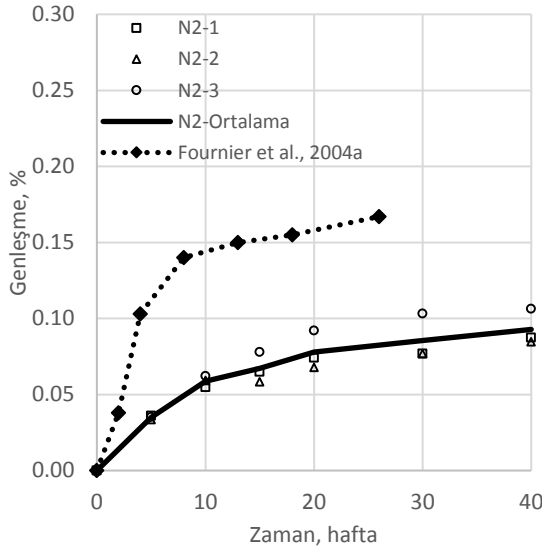


(a)

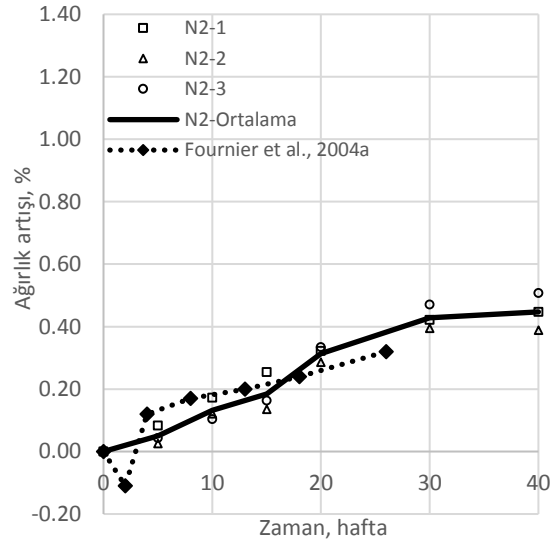


(b)

Şekil 5.3 Spratt iri agregası ile hazırlanan karışımların 38°C’de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.



(a)



(b)

Şekil 5.4 Spratt iri agregası ile hazırlanan karışımların 60°C’de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.

Şekil 5.3a’daki karşılaştırmada Ege Üniversitesi’nde hazırlanan karışımın 38°C’deki genleşme-zaman eğrisi, literatürde farklı iki makalede yer alan referans eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Her iki yayında da Spratt agregasının Kanada CSA A23.2-14A standardına uygun test edilmesi durumunda, başka bir ifadeyle AAR-3 deneyine benzer koşullarda 38°C’deki genleşme-zaman eğrisi bulunmaktadır. Şekil 5.3a’daki

eğrilere göre yürütülen her üç çalışmada da Spratt agregasının genleşme eğrilerinde yaklaşık olarak ilk 4-6 haftada bir durağanlık oluşmuştur. 38°C'lik sıcaklık seviyesinde daha önce de tartışıldığı gibi Ottersbo agregası kullanıldığında 13 haftalık durağanlık olduğu düşünüldüğünde, Spratt agregasının genleşme hızının daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Yine Şekil 5.3a'ya göre genleşmeler literatürden alınan eğrilerde 20-25 haftalık periyoda kadar ani bir şekilde artmıştır. Laboratuvarımızda hazırlanan N-2 karışımında ise genleşme hızı ilk 12. haftaya kadar nispeten daha yüksek olup sonradan daha yavaş ilerlese de nihai genleşme sonucu, referans karışımlarinkinden daha yüksek çıkmıştır. Ege Üniversitesi'nde 38°C'de 52 haftada elde edilen genleşme düzeyi %0,248 iken diğer çalışmalarda karşılık gelen değerler %0,217 ve %0,229'dur. Nihai genleşme sonuçları birbirine oldukça yakın olup aradaki fark yaklaşık olarak %10 mertebesinde. Şekil 5.3b'ye göre ise bu sıcaklık seviyesinde numunelerin ağırlıklarındaki artış, ilk 20 haftada benzerlik göstermiş, bu süreçten sonra ise N2 karışımı, literatürden seçilene kıyasla daha yüksek değerler göstermiş ve deney sonlanana kadar aradaki fark açılmıştır.

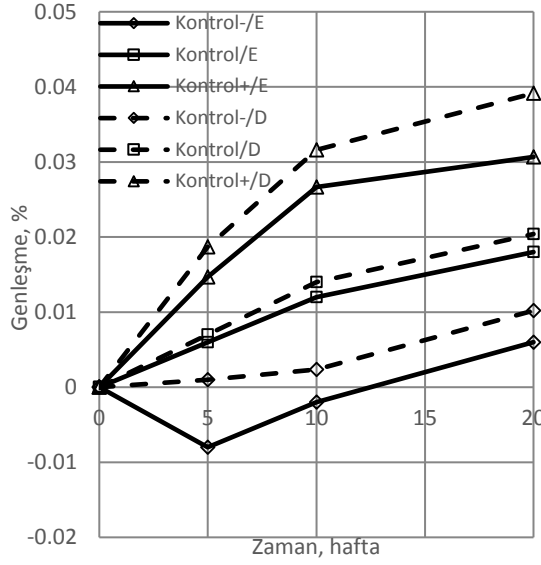
Spratt agregasını kullanarak hazırlanan beton prizmaları 60°C'ye maruz bırakan araştırma sayısı nispeten daha azdır. Yakın koşullar içeren ve karşılaştırma yapabilmeyi mümkün kılan bir çalışma yine literatürden seçilmiş ve Spratt iri agregalı karışımların 60°C'de oluşan genleşme-zaman grafikleri Şekil 5.4a'da sunulmuştur. Şekil 5.4a'ya göre 60°C'lik sıcaklık seviyesi, ilk haftalardaki durağanlığı ortadan kaldırmış olup genleşmelerin önemli bir kısmı ilk 10 haftalık periyotta oluşmuştur. Bununla birlikte her iki referans reaktif agrega türünde de karşılaşılan bir durum, karışımların 60°C'lik sıcaklığa 20 haftalık test süresi boyunca maruz kalması sonucu, 38°C'lik sıcaklık seviyesinde 1 yılda elde edilen genleşme değerinden daha düşük genleşmelerin elde edilmesidir. Sıcaklık seviyesini yükseltmenin nihai genleşmeleri bazı durumlarda arttırmadığı, sadece genleşme hızını arttırdığı bilinmektedir. Hatta yüksek sıcaklığın beton içerisindeki alkalilerin dışarıya sızıntısı probleminin artmasına neden olması, daha düşük sıcaklıkta bekletilen numunelerin daha fazla genleşme göstermelerine bile neden olabilmektedir (Rivard et al., 2003).

Şekil 5.4a'da yer alan iki farklı genleşme-zaman eğrisi incelendiğinde literatürden seçilen çalışmada daha yüksek genleşmeler olduğu görülmektedir. Öngörülen deney süresinin tamamlandığı ya da sürenin uzatıldığı ölçümlerde Ege Üniversitesi'nde okunan genleşmeler, diğer çalışmada oluşanların yaklaşık yarısı kadardır. Şekil 4b'ye göre ise genleşmeler arasındaki farklılıklar, ağırlık artışı-zaman grafiklerinde benzer değişkenliğe sebep olmamış ve veriler birbirine çok daha yakın çıkmıştır. İki karışımın ölçülen nihai genleşmeleri arasındaki farkın nedenlerinden biri referans karışımın alkali içeriğinin 1,20 kg/m³ mertebesinde daha yüksek olmasıdır. Bunun dışında karışımların test edildikleri

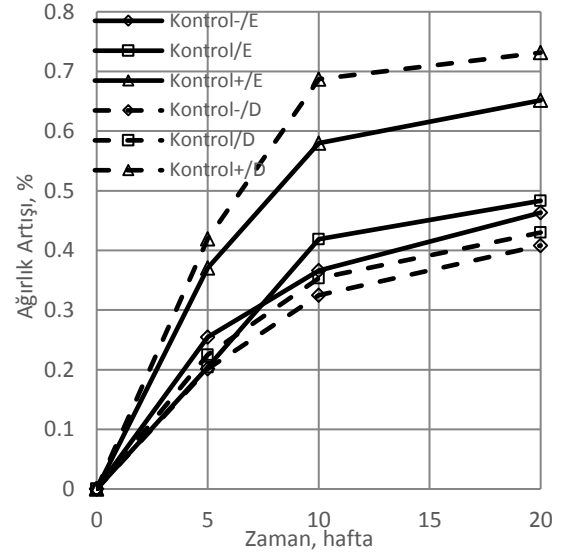
standartlar ve karışım oranlarında yer alan küçük farklılıklar az da olsa değişkenliğe katkıda bulunmaktadır. Literatürde yer alan diğer bir çalışma (Ideker et al., 2010) ise iri agreganın reaktivitesinin test edildiği deneylerde kullanılan reaktif olmayan ince agrega tipinin genleşme sonuçlarını büyük ölçüde değiştirebildiğini göstermiştir. Belirtilen bu çalışmada reaktif iri agrega olarak yine Spratt agregası kullanılmış, yedi farklı reaktif olmayan ince agreganın kullanılmasıyla birlikte 38°C’de 52 haftada %0,150-%0,320; 60°C’de 13 haftada ise %0,069-%0,193 olmak üzere geniş aralıklarda değişen genleşme değerleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 5.4a’da yer alan genleşme-zaman grafiklerine sahip olan karışımlarda kullanılan ortak iri agrega haricindeki diğer malzemelerin farklı olduğunu belirtmek gerekmektedir. Tezde elde edilen verilere göre deney koşullarında oluşan bu değişkenlikler, 38°C’ye kıyasla 60°C’de daha büyük genleşme farklılıklarının oluşmasına neden olmuştur.

Yurt dışındaki kurumlarla ve farklı araştırmacılarla verilerin karşılaştırılması amacıyla hazırlanan N1 ve N2 karışımlarının yanı sıra, tez kapsamında çeşitli aşamalarda test edilen Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ kodlu karışımlar ile 0/3HA, 0/3LA, 0/3MA, 0,063/3HA, 0,063/3LA ve 0,063/3MA kodlu karışımlar birer kez daha hazırlanmıştır. Bu dokuz karışıma ait üçer adet numune AAR-4 deneyine Dokuz Eylül Üniversitesi laboratuvarlarında da tabi tutulmuştur. Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ kodlu karışımlar alkali seviyesi dışarıdan NaOH ilavesi ile artırılan ve toplam alkali içerikleri sırasıyla 4,4; 5,5 (standart metnine göre olması gereken seviye) ve 6,6 kg/m³’e eşit olan karışımlardır. Her üç karışım da hem ince hem iri agrega olarak sadece bazalt içermektedir. 0/3HA, 0/3LA, 0/3MA, 0,063/3HA, 0,063/3LA ve 0,063/3MA karışımları ise kum boyutunda renksiz atık cam içeren karışımları simgelemektedir. LA, HA ve MA kısaltmaları sırasıyla düşük alkalili, yüksek alkalili ve orta seviyede alkalili çimento kullanıldığını, kodlarda yer alan sayılar ise camın kullanıldığı tane boyutu aralığını (mm) ifade etmektedir. Bu karışımların malzeme oranları tezin ilerleyen kısımlarında Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.9’da verilmiştir. Bu başlık altında ise daha çok Ege Üniversitesi ve Dokuz Eylül Üniversitesi’nde elde edilen genleşmelerin karşılaştırmalı analizine odaklanılmıştır.

Aşağıda yer alan grafikler arasından Şekil 5.5’te Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarının, Şekil 5.6’da 0/3HA, 0/3LA ve 0/3MA karışımlarının, Şekil 5.7’de ise 0,063/3HA, 0,063/3LA ve 0,063/3MA karışımlarının genleşme (a) ve ağırlık artışı (b) değerleri yer almaktadır. Karışım isimlerinde rakamlardan sonra yer alan “E” ve “D” harfleri ise sırasıyla Ege ve Dokuz Eylül Üniversiteleri’nin laboratuvarlarında teste tabi tutulan karışımları simgelemektedir.

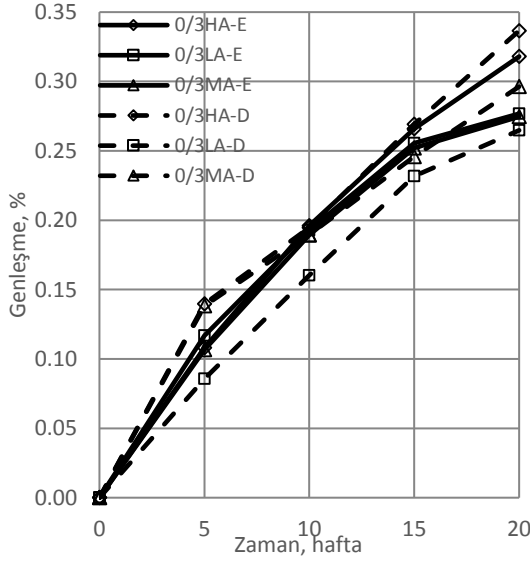


(a)

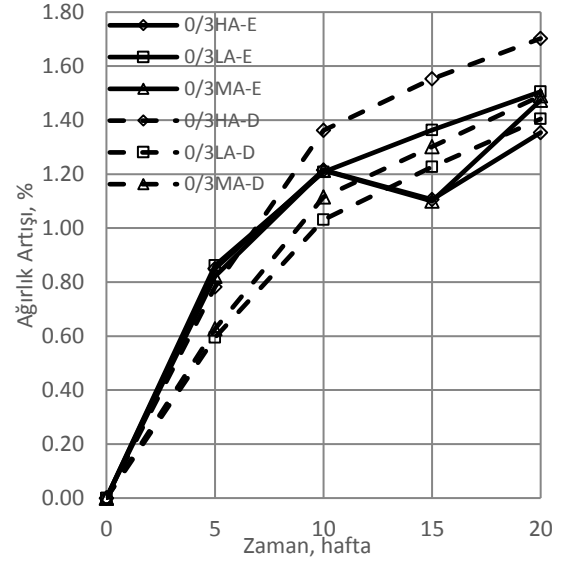


(b)

Şekil 5.5 Ege ve Dokuz Eylül Üniversiteleri'nde test edilen Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarının 60°C'de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.

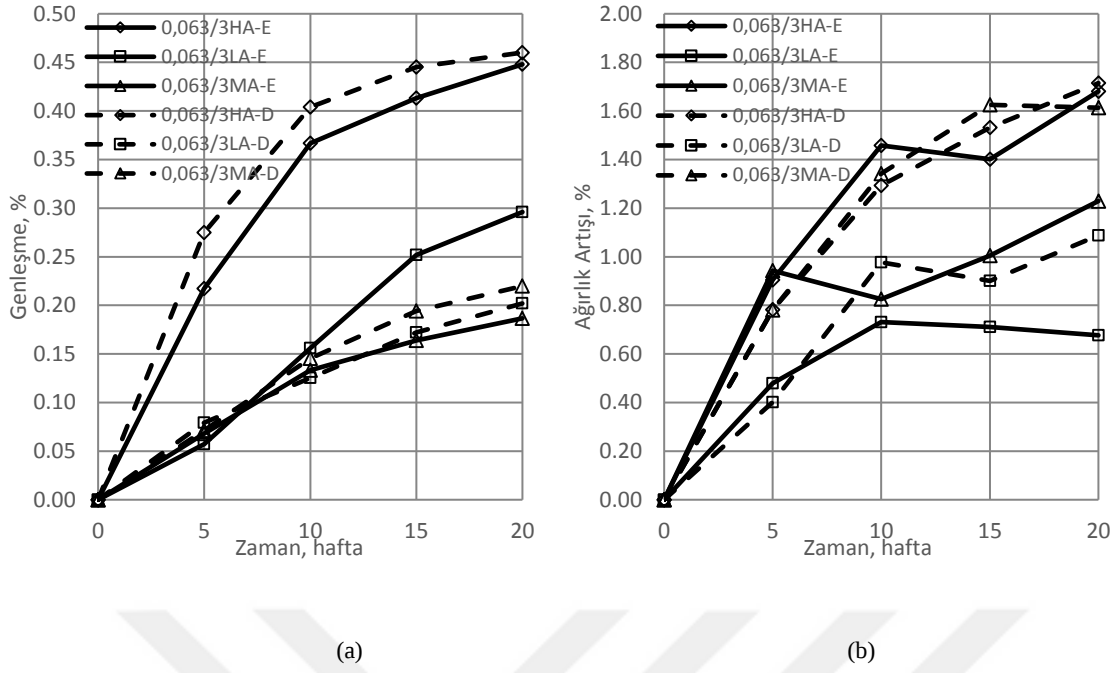


(a)



(b)

Şekil 5.6 Ege ve Dokuz Eylül Üniversiteleri'nde test edilen 0/3HA, 0/3LA ve 0/3MA karışımlarının 60°C'de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.



Şekil 5.7 Ege ve Dokuz Eylül Üniversiteleri'nde test edilen 0,063/3HA, 0,063/3LA ve 0,063/3MA karışımlarının 60°C'de a) genleşme, b) ağırlık artışı değerleri.

Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7 incelendiğinde, önceki paragraflarda anlatılan yurt dışı kurumlarla karşılaştırmalı olarak ortaya çıkan değişkenliğe kıyasla, İzmir'deki laboratuvarlar arası değişkenliğin çok daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu durum numunelerin farklı yüksek sıcaklık kabinlerinde saklanması ve boy ölçümlerinin farklı kişilerce farklı aparatlarda alınması haricinde tüm koşulların aynı tutulmasındandır. Numunelerin tamamı Ege Üniversitesi'nde yer alan laboratuvarında hazırlanmış, dolayısıyla tamamen aynı malzemeler kullanılmış, karışımların hazırlanmasında aynı kişiler görev almıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra Dokuz Eylül Üniversitesi laboratuvarına götürülürken nem kaybetmemesi için büyük özen gösterilmiştir. 60°C gibi yüksek bir sıcaklık seviyesinde gerçekleştirilen bu deneylerde sonuçların numunelerde meydana gelebilecek olası nem kayıplarına (Şekil 5.6b ve Şekil 5.7b) hassas şekilde bağlı olduğu düşünülmektedir. Genleşme sonuçlarında oluşan farklılıkların, ölçümleri gerçekleştiren kişilerin farklı olmasının yanı sıra bazı zaman aralıklarında numunelerin içsel nem düzeyindeki değişkenlikten de kaynaklanabildiğini ifade etmek mümkündür.

Ege ve Dokuz Eylül Üniversitesi laboratuvarlarında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçlarının kıyaslanması amacıyla, ortak çalışılan tüm karışımların 60°C'de 5, 10, 15 ve 20. hafta genleşme değerleri için istatistiksel hipotez testleri uygulanmıştır. Her iki laboratuvarından alınan genleşme verilerinin ortalamalarının eşit olup olmadığı, t-testi gerçekleştirilerek sınanmıştır. Hipotez testleri popülasyondan seçilen rastgele örneklerden elde edilen verileri kullanmaktadır (Montgomery and

Runger, 2014). Buna göre, elde edilen veriler kurulan hipotezi destekliyor ise hipotez kabul edilir, aksi halde reddedilir. Hipotez testleri için öncelikle hipotez (H_0 : sıfır hipotezi) kurulmuş ve bunun reddi halinde kabul edilecek olan hipotez (H_1 : alternatif/zıt hipotez) belirlenmiştir. Ayrıca α ile ifade edilen anlamlılık düzeyi (Tip I hata değeri) 0,05 seçilmiştir. Bu çalışmada kıyaslama amacıyla, 3 örnek ($N=3$) için ortalamaların (μ) eşitliğinin çift yönlü hipotez testi aşağıdaki gibi kurulmuştur:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2, H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

N_1 ve N_2 adet veriden oluşan, ortalamaları $\bar{X}_1$ ve $\bar{X}_2$ olarak hesaplanan iki ayrı setten elde edilen büyüklüklerin ayrı ayrı varyansları S_1^2 ve S_2^2 olarak bilindiğinde, S_p^2 olarak ifade edilen birleştirilmiş tahmini varyans değeri Denklem 5-1'e göre hesaplanmaktadır.

$$S_p^2 = \frac{(N_1-1)S_1^2 + (N_2-1)S_2^2}{N_1 + N_2 - 2} \quad (5-1)$$

Dolayısıyla “ $N_1 + N_2 - 2$ ” büyüklüğünde serbestlik dereceli t-dağılımında, t istatistiğinin değeri ise Denklem 5-2’de ifade edildiği gibidir.

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - \mu_1 - \mu_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}} \quad (5-2)$$

İki ayrı laboratuvarından elde edilen verilerin birbirine yakınlığı değerlendirilirken kurulan H_0 hipotezinin $\mu_1 = \mu_2$ olduğu göz önünde bulundurulduğunda ve Denklem 5-1 ile 5-2 birleştirildiğinde, test istatistiğinin değeri Denklem 5-3 aracılığıyla belirlenmiştir.

$$t_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{(N_1-1)S_1^2 + (N_2-1)S_2^2}{N_1 + N_2 - 2} \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}}} \quad (5-3)$$

Gerçekleştirilen t-testinin sonuçları Çizelge 5.3’te sunulmuştur. Tabloda Ege ve Dokuz Eylül Üniversiteleri’nde elde edilen ortalama ve standart sapma değerlerinin yanı sıra Denklem 5.3 ile hesaplanan t değerleri ile bunlara karşılık gelen P-olasılık değerleri de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 Ege ve Dokuz Eylül Üniversiteleri'nde deneye tabi tutulan karışımların genleşme ortalamalarına (%) uygulanan hipotez testi sonuçları.

Kontrol-/E ile Kontrol-/D							
Hafta	$\bar{X}_E$	S_E	$\bar{X}_D$	S_D	t-değeri	P-değeri	Hipotez testi sonucu
5	-0,0080	0,0057	0,0011	0,0005	3,0210	0,0567	KABUL
10	-0,0020	0,0028	0,0021	0,0005	2,7016	0,0737	KABUL
15	-	-	0,0059	0,0020	-	-	-
20	0,0060	0,0028	0,0104	0,0008	2,7405	0,0713	KABUL
Kontrol/E ile Kontrol/D							
Hafta	$\bar{X}_E$	S_E	$\bar{X}_D$	S_D	t-değeri	P-değeri	Hipotez testi sonucu
5	0,0062	0,0085	0,0069	0,0017	0,2011	0,8535	KABUL
10	0,0120	0,0000	0,0136	0,0016	1,3416	0,2722	KABUL
15	-	-	0,0165	0,0009	-	-	-
20	0,0181	0,0028	0,0200	0,0008	1,2457	0,3013	KABUL
Kontrol+/E ile Kontrol+/D							
Hafta	$\bar{X}_E$	S_E	$\bar{X}_D$	S_D	t-değeri	P-değeri	Hipotez testi sonucu
5	0,0147	0,0046	0,0184	0,0021	1,2727	0,2721	KABUL
10	0,0267	0,0115	0,0315	0,0032	0,6933	0,5263	KABUL
15	-	-	0,0357	0,0048	-	-	-
20	0,0307	0,0101	0,0392	0,0048	1,3253	0,2557	KABUL
0/3HA-E ile 0/3HA-D							
Hafta	$\bar{X}_E$	S_E	$\bar{X}_D$	S_D	t-değeri	P-değeri	Hipotez testi sonucu
5	0,1083	0,0113	0,1392	0,0077	3,7664	0,0327	RED
10	0,1960	0,0113	0,1947	0,0082	0,1564	0,8856	KABUL
15	0,2662	0,0014	0,2693	0,0047	0,9330	0,4196	KABUL
20	0,3183	0,0028	0,3368	0,0068	3,5416	0,0383	RED
0/3LA-E ile 0/3LA-D							
Hafta	$\bar{X}_E$	S_E	$\bar{X}_D$	S_D	t-değeri	P-değeri	Hipotez testi sonucu
5	0,1168	0,0115	0,0853	0,0039	4,4696	0,0111	RED
10	0,1928	0,0234	0,1605	0,0072	2,2867	0,0842	KABUL
15	0,2555	0,0282	0,2312	0,0106	1,3960	0,2352	KABUL
20	0,2768	0,0354	0,2648	0,0126	0,5539	0,6091	KABUL
0/3MA-E ile 0/3MA-D							
Hafta	$\bar{X}_E$	S_E	$\bar{X}_D$	S_D	t-değeri	P-değeri	Hipotez testi sonucu
5	0,1067	0,0046	0,1381	0,0067	6,7237	0,0025	RED
10	0,1893	0,0180	0,1891	0,0069	0,0239	0,9821	KABUL
15	0,2520	0,0212	0,2459	0,0081	0,4691	0,6634	KABUL
20	0,2747	0,0220	0,2968	0,0097	1,5926	0,1865	KABUL
0,063/3HA-E ile 0,063/3HA-D							
Hafta	$\bar{X}_E$	S_E	$\bar{X}_D$	S_D	t-değeri	P-değeri	Hipotez testi sonucu
5	0,2173	0,0335	0,2744	0,0068	2,2593	0,1090	KABUL
10	0,3667	0,0441	0,4048	0,0204	1,1037	0,3503	KABUL
15	0,4133	0,0474	0,4456	0,0136	0,8954	0,4366	KABUL
20	0,4480	0,0423	0,4608	0,0192	0,3862	0,7251	KABUL

Çizelge 5.3 Ege ve Dokuz Eylül Üniversiteleri'nde deneye tabi tutulan karışımların genleşme ortalamalarına (%) uygulanan hipotez testi sonuçları (devamı).

0,063/3LA-E ile 0,063/3LA-D							
Hafta	$\bar{X}_E$	S_E	$\bar{X}_D$	S_D	t-değeri	P-değeri	Hipotez testi sonucu
5	0,0573	0,0083	0,0795	0,0082	3,2783	0,0305	RED
10	0,1561	0,0208	0,1256	0,0105	2,2629	0,0864	KABUL
15	0,2517	0,0106	0,1733	0,0072	10,6380	0,0004	RED
20	0,2960	0,0461	0,2019	0,0140	3,3811	0,0278	RED
0,063/3MA-E ile 0,063/3MA-D							
Hafta	$\bar{X}_E$	S_E	$\bar{X}_D$	S_D	t-değeri	P-değeri	Hipotez testi sonucu
5	0,0680	0,0040	0,0712	0,0021	1,2247	0,2879	KABUL
10	0,1333	0,0122	0,1459	0,0124	1,2455	0,2809	KABUL
15	0,1637	0,0342	0,1949	0,0080	1,5263	0,2016	KABUL
20	0,1867	0,0311	0,2192	0,0141	1,6523	0,1738	KABUL

Çift kuyruklu t-testinde elde edilen hipotez testi sonucuna göre ortalamalar arasındaki fark anlamlı ise hipotez reddedilmiş, ortalamalar arası fark anlamlı değil ise hipotez kabul edilmiştir. Kurulan hipotezlerin red/kabul değerleri ve verilen kararın güçlülüğünü ifade eden P-olasılık değerleri Çizelge 5.3'te gösterilmektedir. P-değerinin 0,05'ten küçük olması hipotez testinin reddini ifade etmektedir. Çizege 5.3 incelendiğinde, gözlemlenen 33 karşılaştırmalı sonuçtan 7'sinde ortalama değerlerin birbirlerinden istatistiki olarak uzak olduğu ifade edilebilir. Diğer ortalama değerlerin birbirleri ile istatistiki olarak eşitliği, her iki laboratuvarın sonuçların yeniden üretilebilirliği açısından %79 uyumlu çalıştığının göstergesidir. İlaveten, “red” durumlarından 4'ünün ilk 5 haftalık genleşme periyodunda oluşması, erken yaşlardaki ölçümlerin güvenilirliğinin daha düşük olduğuna, yani kaydedilen genleşme değerleri küçükken değişkenliğin fazla olduğuna bir işaret olarak gözükmektedir.

5.2 Farklı Alkali Seviyelerindeki Karışımların AAR Performansı

Bu aşamada betonun toplam alkali içeriğinin ve farklı bağlayıcıların performanslarını gözlemlemek amacıyla farklı alkali seviyelerindeki karışımlar üretilmiş ve beton prizma deneyleri uygulanmıştır.

5.2.1 Alkalinitenin çimento ile sağlandığı karışımlar

Agrega olarak bazalt ve bağlayıcı olarak yüksek alkalili (HA), düşük alkalili (LA) ve %50 yüksek + %50 düşük alkalili (MA) çimento içeren ve karışım oranları Çizelge 5.4'te verilen 3 farklı karışım hazırlanmıştır. Hem bu tabloda, hem de tez kapsamında

hazırlanan diğer karışımların malzeme oranlarını gösterecek olan tablolarda agregalar için verilen kullanım oranları agregaların DYK (doğgun yüzey-kuru) halleri cinsindendir.

Çizelge 5.4 Alkalinite seviyesinin çimento ile sağlandığı karışımların malzeme oranları (kg/m³).

	HA	LA	MA
Yüksek alkalili çimento	440	0	220
Düşük alkalili çimento	0	440	220
Su	220	220	220
0/4 bazalt	696	699	699
4/16 bazalt	522	524	524
11,2/22,4 bazalt	522	524	524
NaOH	0	0	0
TOPLAM	2400	2407	2407
Alkali miktarı (kg/m ³)	4,58	2,77	3,67
Alkali miktarı (bağlayıcının %'si)	1,04	0,63	0,84

5.2.2 Alkalinitenin NaOH ilavesi ile sağlandığı karışımlar

Bu yöntem AAR-3 ve AAR-4 deneylerinin şartlarında yer almakta, gerektiği takdirde çimento alkali seviyesi, karışım suyunda NaOH'in çözülerek eklenmesiyle yapay olarak arttırılmaktadır. Bu aşamada Çizelge 5.5'te görüldüğü gibi reaktif agrega olarak bazalt, çimento olarak da düşük alkalili çimento kullanılmış, farklı miktarlarda NaOH eklenerek 3 karışım hazırlanmıştır.

Çizelge 5.5 Alkalinite seviyesinin NaOH ilavesi ile sağlandığı karışımların malzeme oranları (kg/m³).

	Kontrol-	Kontrol	Kontrol+
Yüksek alkalili çimento	0	0	0
Düşük alkalili çimento	440	440	440
Su	220	220	220
0/4 bazalt	698	696	696
4/16 bazalt	523	522	522
11,2/22,4 bazalt	523	522	522
NaOH	2,12	3,57	5,02
TOPLAM	2406	2404	2405
Alkali miktarı (kg/m ³)	4,40	5,50	6,60
Alkali miktarı (bağlayıcının %'si)	1,00	1,25	1,50

Beton prizma deneylerine dair RILEM standartlarının metinlerine göre istenen alkali içeriği $5,50 \text{ kg/m}^3$ 'tür ve bu alkali seviyesine sahip olacak şekilde hazırlanan karışım "Kontrol" karışımı olarak adlandırılmıştır. Bu seviyenin altında ve üstünde alkaliniteye sahip diğer karışımlar ise sırasıyla "Kontrol-" ve "Kontrol+" olarak kodlanmıştır (Çizelge 5.5).

5.2.3 Alkalinitenin uçucu kül ikamesi ile sağlandığı karışımlar

Bu karışımlarda toplam bağlayıcı miktarı sabit kalacak şekilde uçucu kül için ağırlıkça üç farklı ikame oranı (%20, %40 ve %60) denenmiştir. Yüksek reaktiviteli bazalt ve düşük alkalili çimento kullanılarak hazırlanan karışımların malzeme oranları Çizelge 5.6'daki gibidir. Tablodaki alkali miktarı değerleri hesaplanırken uçucu külün alkali miktarı %1,25 olarak dikkate alınmıştır. Bu değer, uçucu kül üzerindeki analiz sonucunda bulunan Na_2O eşdeğeri cinsinden mevcut (salınabilir) alkali (ASTM C311) içeriğidir (Çizelge 4.1).

Çizelge 5.6 Alkalinite seviyesinin uçucu kül ikamesi ile sağlandığı karışımların malzeme oranları (kg/m^3).

	20UK	40UK	60UK
Yüksek alkalili çimento	0	0	0
Düşük alkalili çimento	352	264	176
Uçucu kül	88	176	264
Su	220	220	220
0/4 bazalt	692	685	677
4/16 bazalt	519	514	508
11,2/22,4 bazalt	519	514	508
NaOH	0	0	0
TOPLAM	2390	2373	2353
Alkali miktarı (kg/m^3)	3,32	3,86	4,41
Alkali miktarı (bağlayıcının %'si)	0,75	0,88	1,00

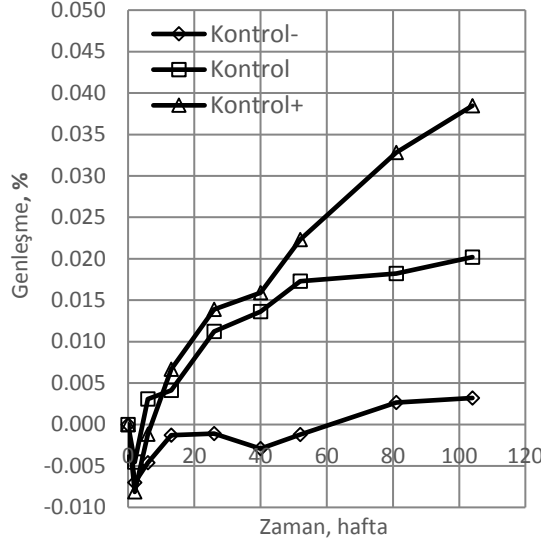
Uçucu kül içeren karışımların hazırlanmasında bir farklılık uygulanmıştır. Aslında AAR-3 ve AAR-4 deneyleri, karışımların dökümden 24 saat sonra yöntemlerde belirtilen sıcaklık seviyelerine maruz bırakılmasını öngörmektedir. Fakat mineral katkı kullanımı sonucu hidrasyonun yavaşlaması, karışımların eşit şartlarda deneye tabi tutulmasını engellemektedir. Bu nedenle oluşturulan karışımlardan 10 cm ayrıtlı küp numuneler de hazırlanmış, uçucu kül içermeyen kontrol karışımının (LA karışımı) 1 günlük dayanımı belirlenmiştir. Bu dayanım seviyesine uçucu kül içeren 20UK, 40UK ve 60UK karışımları kaçınıcı günde ulaşırsa deney koşullarına o anda maruz bırakılmaya

başlanmıştır. Kontrol karışımının 9,2 MPa olarak belirlenen 1 günlük dayanım değerini %20 oranında uçucu kül içeren karışım 2 günde, %40 oranında uçucu kül içeren karışım 4 günde, %60 oranında uçucu kül ikamesine sahip karışım ise 5 günde aşabilmiştir.

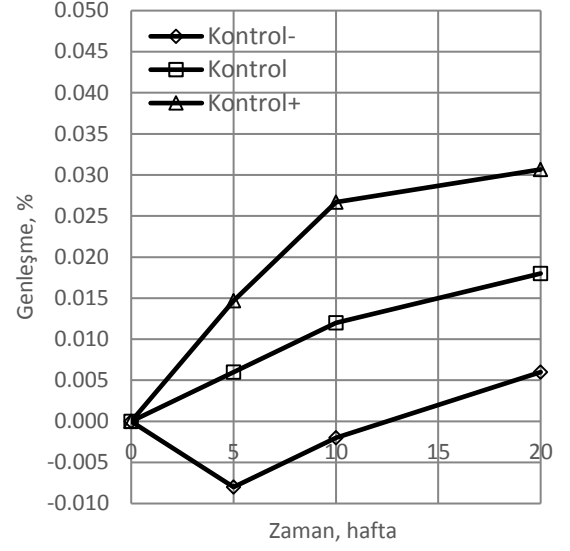
Bu aşamada elde edilen bulgular şu şekildedir:

- Alkalinite seviyesinin çimento ile sağlandığı HA, LA ve MA karışımları ile düşük alkalili çimento içeren karışıma uçucu kül ikamesi gerçekleştirilerek hazırlanan 20UK, 40UK ve 60UK karışımları AAR-3 ve AAR-4 deneylerinde, öngörülen deney sürelerinin sonuna kadar hiçbir yaşta anlamlı sayılabilecek genleşme göstermemiştir. Hatta bu karışımlara ait numunelerden 38°C’de bekletilenler için deney süresinin 1 yıldan 2 yıla uzatılması da bu sonucu değiştirmemiştir. Bunun sebebi, denenen bu alkali seviyelerinin agrega reaktivitesini ortaya çıkarmaya yetmemesidir. İlerideki deneylerde ise alkali seviyelerinin arttırılması, veya kendiliğinden yerleşen beton (KYB) gibi yüksek çimento dozajlı kullanımlarında, karışımların genleşmelerinin önerilen limitlerin üzerine çıkabildiği gözlemlenmiştir.

- AAR-3 ve AAR-4 deneyleri için yazılmış olan ortak metinde “Potansiyel Alkali Reaktivitesinin Belirlenmesi” başlığı altında “Gerekirse, beton karışımının alkali içeriğini %1,25’e çıkarmak için karışım suyuna sodyum hidroksit eklenmelidir” ifadesi yer almaktadır. Bu kapsamda hazırlanan ve toplam alkali seviyesinin %1,25’ten düşük olduğu Kontrol- karışımı için de genleşmeler yukarıda belirtilen sebepten ötürü sıfıra yakın seviyelerde kalmıştır. Kontrol ve Kontrol+ karışımlarının ise alkali içerikleri sırasıyla %1,25 ve %1,50 olup bu seviyelerin genleşmelerde zamanla artışlara neden olduğu görülmüştür. Alkali seviyesinin NaOH ilavesi ile ayarlandığı bu üç karışımın 38°C ve 60°C’deki genleşme verileri sırasıyla Şekil 5.8a ve 5.8b’de, ağırlık artışı verileri ise Şekil 5.9a ve 5.9b’de sunulmuştur.

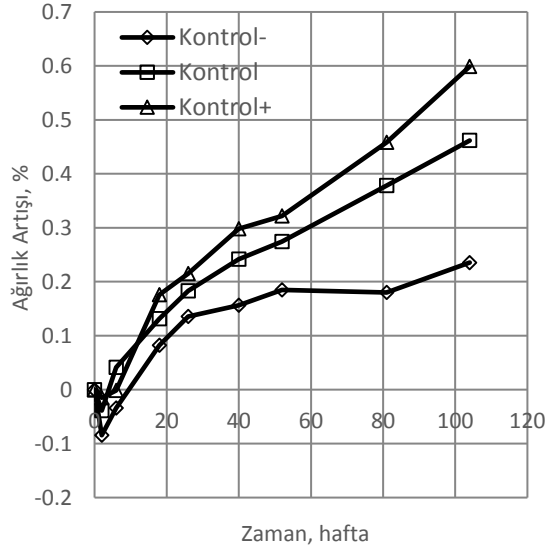


(a)

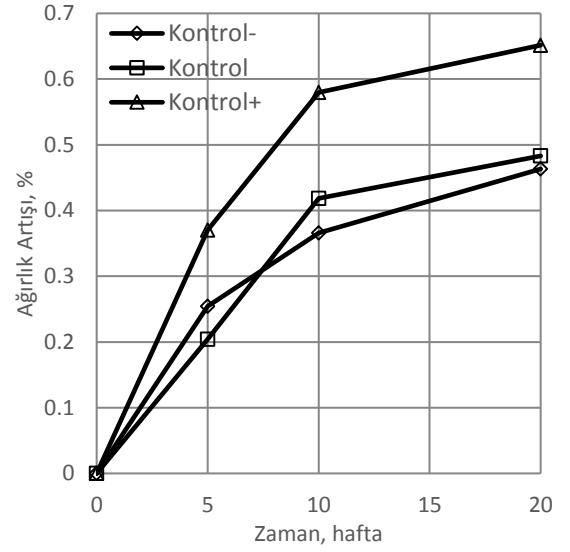


(b)

Şekil 5.8 NaOH ilavesi gerçekleştirilen Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarının a) 38°C’de ve b) 60°C’de genleşme-zaman grafikleri.



(a)



(b)

Şekil 5.9 NaOH ilavesi gerçekleştirilen Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarının a) 38°C’de ve b) 60°C’de ağırlık artışı-zaman grafikleri.

Beton prizma deneyleri sonucunda elde edilen verilerin yorumlanmasında kılavuz niteliği gören AAR-0’da, genleşme limitlerinin henüz kesin olarak kararlaştırılmadığı belirtilmektedir. Çünkü bunun için öncelikle laboratuvar deneylerinde elde edilen

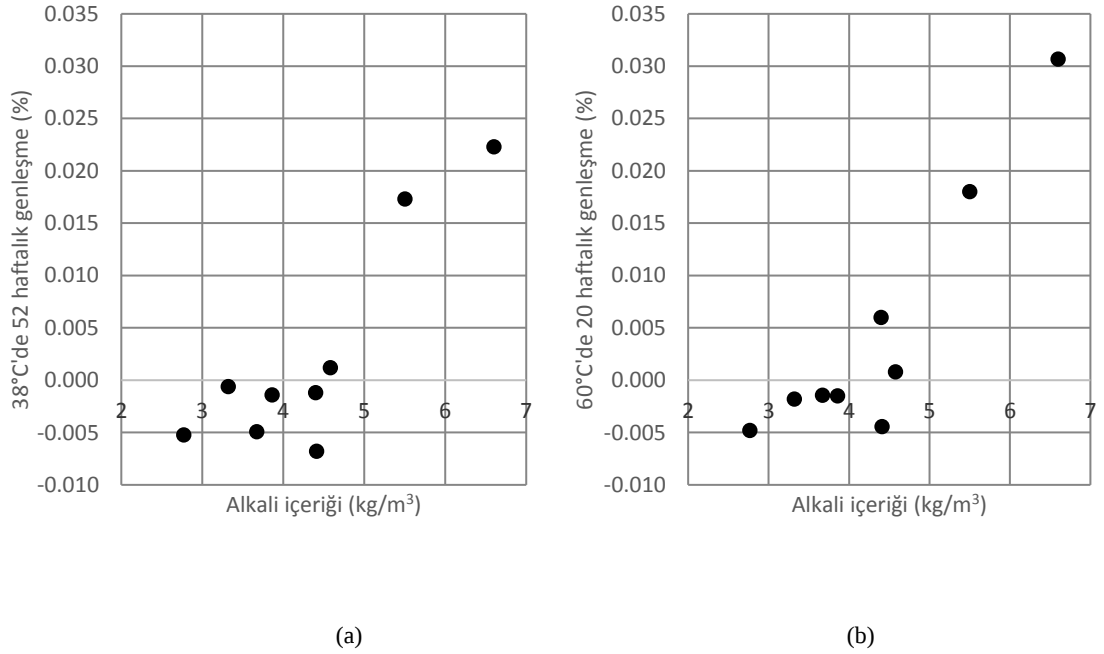
genleşmelerle saha betonlarının genleşmeleri arasında çok fazla veri üzerinden elde edilecek güçlü korelasyonlara ihtiyaç vardır. Yine de AAR-0'a göre, RILEM komitelerinin öncülüğünde, dünyanın çeşitli bölgelerinden temin edilen agrega kombinasyonları ile gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda (EU Partner Projesi - Lindgård et al., 2010) AAR-3 ve AAR-4 deneylerinde önerilen genleşme limitleri sırasıyla 1 yıllık sürede %0,05 ve 20 haftalık sürede %0,03 şeklindedir. Şekil 5.8a uyarınca Kontrol ve Kontrol+ karışımlarının genleşmelerinin bu limitlerin yarısına bile ulaşmadığı, Şekil 5.8b'de ise Kontrol+ karışımının deney süresi bitiminde limiti zorlukla geçebildiği ve Kontrol karışımının bu limitin yaklaşık olarak ancak yarısına ulaştığı görülmektedir. Yine de her iki grafikte hem alkali içeriğindeki hem de betonun yaşındaki artışın genleşme değerlerini arttırdığı gerçeği unutulmamalıdır. Bir başka önemli konu da gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde genleşmeleri etkileyen önemli bir faktörün beton numunelerden dışarıya alkali sızıntısı olmasıdır. Bu parametre, ölçülen genleşmeleri azaltıcı yönde etkiye sahiptir.

Şekil 5.8a ve 5.8b'de verilen karışımların 38°C ve 60°C'deki performansları karşılaştırıldığında 52 hafta sonunda 38°C'de elde edilen genleşmelerin 60°C'de 20 haftalık verilerden daha düşük olduğu görülmüştür. Fakat Kontrol ve Kontrol+ karışımlarında AAR-3 deneyinde verilerin 2 yıla kadar alınmaya devam etmesiyle durum tersine dönmüştür. Hızlandırılmış deneylerde genleşme-zaman eğrilerinde deney sürelerinin sonlarına doğru sıklıkla görülen yataylaşma eğiliminin aksine, 38°C'de Kontrol+ karışımında bu zaman aralığında genleşmelerde çok ciddi artış oluşması ve Kontrol karışımının da genleşmeye devam etmesi dikkat çekicidir. Bu durumun agreganın yavaş reaktivite özelliğine sahip olması ve 38°C'lik sıcaklık seviyesinin bu potansiyeli 52 haftada tamamen açığa çıkarmaya yetmemesi ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Hem bir önceki paragrafta anlatılan alkali sızıntısı problemine sahadaki betonların maruz kalmayacağı, hem de genleşmelerin deney süreleri sonunda sonlanmayıp artmaya devam etmesi, alkali seviyesine bağlı olarak reaktivite gösterebilecek bu tip agregalarla hazırlanan karışımların malzeme oranlarında toplam alkali yükünün göz ardı edilmemesi gerektiğini göstermektedir.

Şekil 5.8 ve 5.9'daki grafikler bir arada ele alındığında ise karışımların ağırlık artışı-zaman grafikleriyle genleşme-zaman grafikleri arasında büyük benzerlikler olduğu görülmüştür. Bir başka deyişle, karışımları temsil eden numunelerin ağırlıklarındaki zamanla artma eğilimlerinin, genleşmelerde oluşan artışları andırdığı ifade edilebilir. Örneğin 52 hafta sonunda 38°C'de elde edilen ağırlık artışı değerleri 60°C'de 20 haftalık verilerden daha düşük kalmıştır. 60°C'de ilk haftalardan sonra genleşmelerin artış hızının düşmesi, ağırlık artışı-zaman grafiklerine de yansımıştır.

38°C’de de farklı zaman aralıklarında oluşan genleşme artışları genellikle ağırlık artışı-zaman grafiklerindeki artış hızlarına denk gelmektedir. Önemli bir farklılık olarak ise, çimentonun %1’i oranında alkali içeriğine sahip olan Kontrol- karışımında genleşmelerin diğer karışımların genleşmelerinden çok daha düşük kalıp sıfıra yakın değerler almasına rağmen, ağırlık artışı verilerinde karışımlar arasında oluşan farklılıklar nispeten daha düşüktür. Hatta 60°C’de, beklenenin aksine, Kontrol- ve Kontrol karışımlarının ağırlık artışı verileri birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

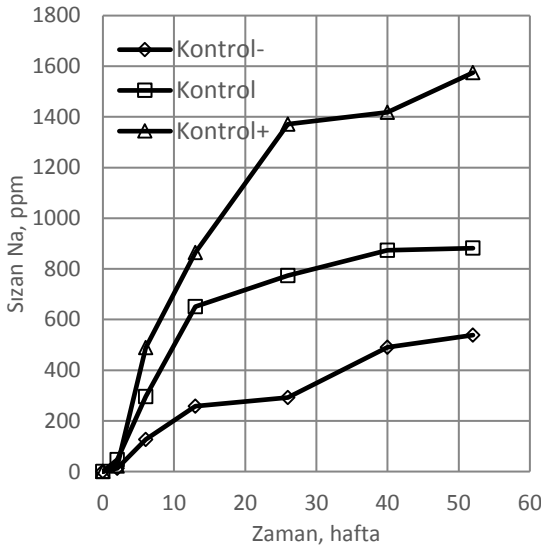
Tezin bu aşamasında alkali seviyesindeki değişimin genleşmelere etkisinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan ve Çizelge 5.4, 5.5 ve 5.6’da karışım oranları verilmiş olan dokuz adet karışımın AAR-3 ve AAR-4 deneylerinde öngörülen deney süreleri sonunda sahip olduğu genleşmeler sırasıyla Şekil 5.10a ve 5.10b’de gösterilmiştir. Hem 38°C’de hem de 60°C’de deneylerde kullanılan agrega için aşılması gereken eşik alkali seviyesine kadar genleşme değerlerinin sıfıra yakın olduğu ve sadece Kontrol ve Kontrol+ karışımlarının sahip olduğu alkali seviyelerinin nihai genleşmelerde önemli artışa yol açtığı grafiklerden anlaşılmaktadır. Bu grafiklerde verilen tüm alkali içeriklerinin karışımların deney başlangıcında sahip olduğu seviyeler olduğunu unutmamak gerekmektedir. Sonraki paragraflarda açıklanacağı üzere alkali sızıntısı problemi, karışımların alkali içeriğinde kademeli olarak bir azalışa neden olmaktadır.



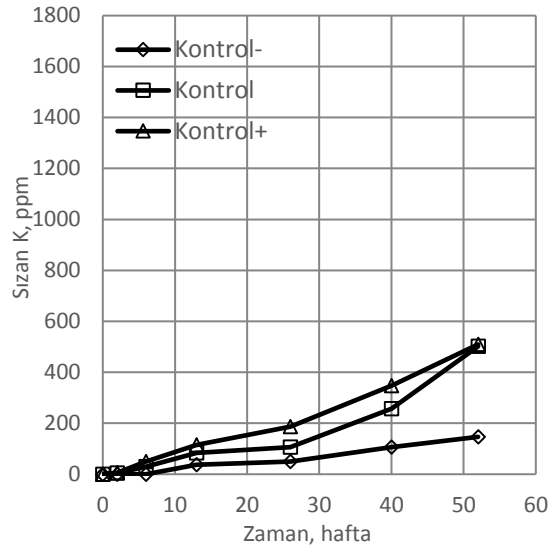
Şekil 5.10 Alkali seviyesindeki değişimin a) 38°C’de ve b) 60°C’de ölçülen nihai genleşmelere etkisi.

Şekil 5.11’de Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımları için sunulmuş olan verilere göre alkali sızıntısı problemi, AAR-3 hızlandırılmış beton prizma deneyinde öngörülen

süre zarfında kümülatif olarak artarak devam etmektedir. Dışarıya sızan alkaliler arasında baskın olanın Na^+ iyonları olduğu ve bu iyonların sızma derecesinde deneyin sonlarına doğru bariz bir yavaşlama görüldüğünü belirtmek mümkündür. Nispeten çok daha az miktarda sızan K^+ iyonlarının sızma hızında ise zamanla böyle bir eğilim oluşmamıştır. Karışımlara alkali seviyelerini ayarlamak için dışarıdan eklenen NaOH miktarları da göz önünde bulundurulduğunda, Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarının başlangıçtaki Na/K oranları sırasıyla 1,64, 2,19 ve 2,74 seviyelerindedir. Şekil 5.11a ve 5.11b’de verilen sonuçlara göre ise tüm yaşlarda sızan Na/K oranları hesaplandığında -bir istisna haricinde- karışımların başlangıçtaki Na/K oranlarına kıyasla çok daha yüksek katsayılar ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla alkali katyonları arasından sodyumun, potasyuma kıyasla sızma oranının daha yüksek oluşunun, atomik yarıçapının daha küçük olmasından ve karışımların alkali seviyesini yükseltmek amacıyla kullanılan NaOH’in hemen çözülebildiği için boşluk çözeltisine hızlıca karışıp sızmaya daha elverişli hale gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sızan Na/K oranlarında zamanla azalmalar oluşması da ikinci savı destekler niteliktedir.



(a)



(b)

Şekil 5.11 Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarından AAR-3 deneyi boyunca sızan a) Na^+ ve b) K^+ iyon konsantrasyonları.

Yukarıda AAR-3 deneyi için sunulan verilerin yanı sıra AAR-4 deneyinin sonunda da kaplardan alınan su örnekleri üzerinde analiz gerçekleştirilmiştir. Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarının 38°C ve 60°C ’de bekletilmesi sonucunda ortaya çıkan nihai alkali sızıntısı miktarları Na_2O eşdeğeri cinsinden Çizelge 5.7’de verilmiştir. Bu hesaplamalarla her bir karışımdan gerçekleşen alkali kaybı düzeyini % cinsinden

belirlemek mümkün olmuştur. Bu verilere göre belirgin bulgulardan birisi artan sıcaklık seviyesinin daha fazla alkali sızıntısına yol açmasıdır. 60°C’de gerçekleştirilen deneylerde, 38°C’de saklama koşuluna kıyasla, kapların içerisinde oluşan buhar miktarında ve beton numunelerin yüzeylerinde oluşan beyaz renkli lekelerde önemli derecede artış da gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.7 Kontrol-, Kontrol ve Kontrol+ karışımlarından AAR-3 ve AAR-4 deneyleri boyunca sızan toplam alkali miktarları.

	Bir prizmada deneyler öncesindeki alkali miktarı (g – Na ₂ O eşd.)	38°C’ye maruz kalma sonucunda 52 hafta sonundaki alkali sızıntısı (mg – Na ₂ O eşd.)	38°C’ye maruz kalma sonucunda 52 hafta sonundaki alkali kaybı (%)	60°C’ye maruz kalma sonucunda 20 hafta sonundaki alkali sızıntısı (mg – Na ₂ O eşd.)	60°C’ye maruz kalma sonucunda 20 hafta sonundaki alkali kaybı (%)
Kontrol-	7,04	421,38	5,99	1054,66	14,98
Kontrol	8,80	793,78	9,02	1640,33	18,64
Kontrol+	10,56	1263,86	11,97	1868,89	17,70

Alkali sızıntısı verileri ve genleşme sonuçları beraber değerlendirilirse, 52 hafta boyunca 38°C’de saklama koşullarında hiç genleşme göstermeyen Kontrol- karışımında dahi (Şekil 5.8a) alkalilerin bir miktarının beton bünyesinden ayrıldığı görülmektedir. Dolayısıyla alkali sızıntısı probleminin oluşması, karışımların sadece reaktif olup olmamasından değil temelde deneylerin uygulanış koşullarından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte Çizelge 5.7’ye göre alkalilerin sızma mertebesinde, karışımların reaktivite seviyesi belirleyici konumdadır. Literatürde özellikle daha yüksek reaktiviteye sahip karışımlarda, alkali sızıntısı hızının (Costa et al., 2017) ya da sızıntının toplam miktarının (Rivard et al., 2003) düştüğünü belirleyen çalışmalar mevcuttur. Çünkü bu tip karışımlarda, erken yaşlarda daha çok ASR jeli oluşmakta ve neticesinde alkalilerin bir miktarı bu ürünler tarafından bağlanarak sızıntı için elverişsiz hale gelmektedir. Ancak tez çalışmasında ortaya çıkan bulgular, daha çok genleşme gösteren karışımlardan genel olarak yüzdece daha çok alkali sızdığı yönündedir (Çizelge 5.7). Alkali sızıntısı olgusunun gerçekleşmesini tetikleyen nedenlerin başında beton boşluk çözeltisindeki ve deneyler esnasında beton prizmaların altında yer alıp yer yer beton yüzeyinde yoğunlaşmaya uğrayan sudaki alkali konsantrasyonları farkı yer almaktadır (Lindgård et al., 2013a). Karışımların alkali içeriği arttıkça bu farkın daha da büyümesinden dolayı alkali sızıntısı seviyelerinin de arttığı düşünülmektedir. Hem hidrasyon hem de ASR ilerledikçe alkalilerin bir miktarı oluşan ürünler tarafından bağlanmakta, zamanla boşluk çözeltisinin alkali içeriği düşmekte ve buna bağlı olarak alkali sızıntısı problemi de özellikle baskın durumdaki Na⁺ iyonları için her üç karışımda da azalmaktadır (Şekil 5.11a).

Tezin bu aşamasında genleşme verileri için elde edilen bulgular özetlendiğinde bağlayıcı içeriğinin %1,25'inden düşük Na_2O eşdeğerine sahip hiçbir karışımda anlamlı genleşme görülmemiştir. Özellikle bu seviyeye eşit alkali içeriğine sahip olan “Kontrol” kodlu karışıma dair genleşme ve alkali sızıntısı verilerine ise ilerideki aşamalarda hazırlanan karışımlar için elde edilen verilerle karşılaştırılmak üzere tekrar değinilecektir.

5.2.4 Agreg a reaktivite seviyesindeki değışkenliğin incelenmesi

Tezin başlangıcında önceki tecrübeler ışığında reaktivite potansiyeli yüksek olan bir agreg a seçilmiştir. Ancak tezin bu aşaması sonucunda ilginç bir durum tecrübe edilmiştir. Aynı ocaktan 6 yıl arayla temin edilen bazalt agreg aları üzerinde yapılan iki farklı çalışmada, reaktivite değ erlerinin farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle 38°C 'de uygulanan beton prizma deneyinde görülen farklılıklar oldukça büyük olup her iki çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 5.8'de özetlenmiştir. Daha eski tarihli olan çalışmanın (Andiç-Çakır, 2007) tamamlanmasından sonra arta kalan örnek miktarı az olduğundan bu tez çalışması için yüklü miktarda yeni agreg a alımı yapılmıştır. Dolayısıyla, bu süre zarfında oluşan değ işikliğin sebebini belirleyebilmek için öncelikle agreg a ocağına bir ziyaret gerçekleştirilmiş, ardından ise eski örnek ve yeni örnek olarak adlandırılan agreg alar üzerinde mineralojik-petrografik inceleme de başlatılmıştır.

Çizelge 5.8 Aliğa kaynaklı bazalt agreg ası üzerinde farklı zamanlarda yapılan deney sonuçları.

	Eski örnek*	Yeni örnek**	Belirtilen testte genleşme limiti (ASTM)
16 günlük hızlandırılmış harç çubuğu (80°C) genleşmesi (%)	0,56	0,52	0,10
52 haftalık beton prizma (38°C) genleşmesi (%) – alkalinite %1,25'e yükseltilmiş	0,16	0,02	0,04
52 haftalık beton prizma (38°C) genleşmesi (%) – alkalinite %1,25'e yükseltilmemiş	0,05	0,0012	--

* Andiç-Çakır, 2007

** Tezde kullanılan bazalt örneği

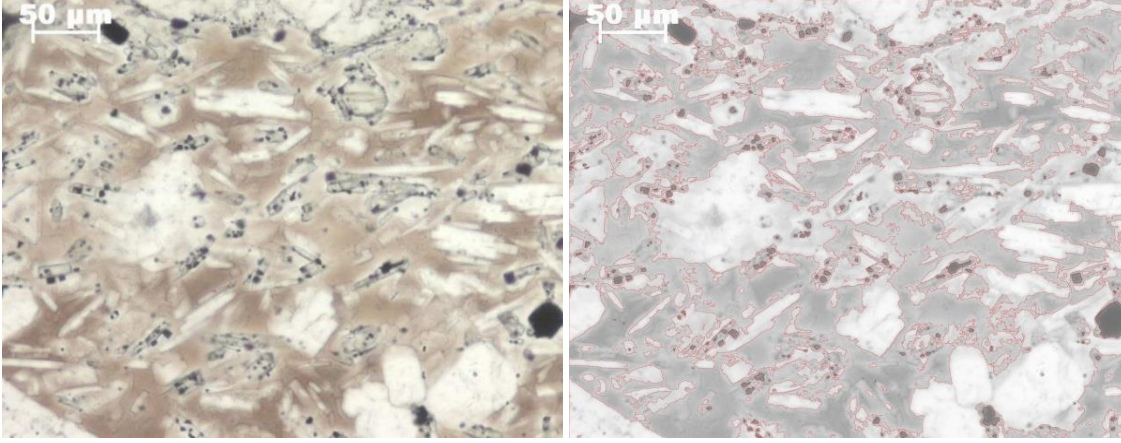
Agreg a ocağına yapılan saha incelemesinde önceki çalışma için agreg a örneklerinin alındığı yerin ocağın andezitik yapıdaki üst kısımlarına yakın olduğu, üst kısımlarda alterasyonun daha fazla görüldüğü belirtilmiştir. Şu anda çalışılan kısmın ise kolonsu yapıda bazalt örneklerinden oluştuğu görülmektedir (Şekil 5.12). Genel olarak ocağın dikey mesafesinden bağımsız olarak da çalışılan mevki değ iştikçe agreg anın heterojenlik gösterdiği saha mühendisleri tarafından belirtilmiştir.



Şekil 5.12 Bazalt agregası ocak kesidi, önde şu anda çalışılan saha, arkada geçmişte çalışılan kısım.

Eski örnek üzerinde kapsamlı mikroskobik incelemelerle gerçekleştirilen önceki çalışmalarda (Çopuroğlu et al., 2007, 2009), silisli minerallerin yer aldığı camsı matrisin reaksiyona girerek çözündüğü anlaşılmıştır. Eski ve yeni örnek camsı matrislerinin miktarının farklı olmasının reaktivite potansiyelini değiştirebileceği düşüncesi ile çalışmalar planlanmıştır. Camı matrisin miktarı, camı faz içerisinde bulunan mineral boyutu ile ilişkilidir. Mineral boyutunun görece olarak küçük olması, camı faz miktarını arttırırken, tersi de geçerlidir.

Bu konuyu açıklığa kavuşturmak amacıyla eski ve yeni örnekler üzerinde karşılaştırmalı görüntü analizi yapılarak yukarıda bahsi geçen tezin doğruluğu kanıtlanmaya çalışılmıştır. Eski ve yeni örnek ince kesitlerinden eşit büyütmede alınan mikrograflar üzerinde ImageJ ve Matlab programları kullanılarak yapılan inceleme ile matris fazı ile yayınlık halde bulunan kristal faz ayırt edilmeye çalışılmıştır. ImageJ ile yapılan çalışmada görüntüler öncelikle siyah beyaza çevrilmiş, ton farklılıkları farklı eşik (threshold) değerleri seçilerek giderilmiş ve kontörler belirlenmiştir. Şekil 5.13'te solda gerçek imaj, sağda kontör çizilmiş imaj görülmektedir. Bu çalışmada çizilen kontörlerin gerçek imajda boşluklara karşılık gelen siyah noktaları da taradığı ve kristal sınırlarını ayırt etmekte çok başarılı olmadığı görülmektedir. Bu sebeple, bu yöntem yerine aşağıda anlatılan farklı bir yöntem denenmiştir.

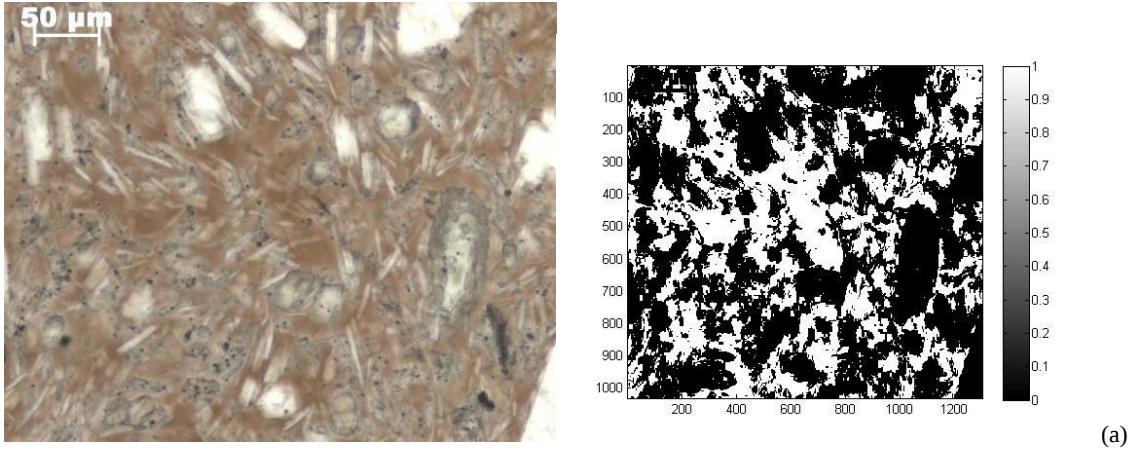


(a)

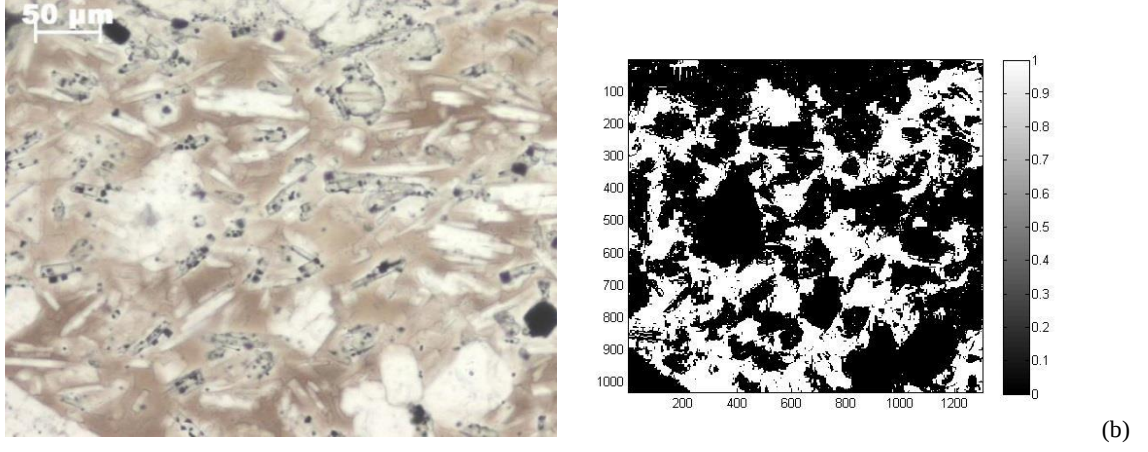
(b)

Şekil 5.13 a) Eski örneğe ait polarizan mikroskop görüntüsü, b) görüntü analizi sonucu elde edilen kontör görüntüsü.

Diğer denemede, Matlab programında üç katmandan oluşan (RGB) renkli görüntü ele alınarak R katmanındaki piksel değerleri ile B katmanındaki piksel değerleri arasındaki fark belirlenmiştir. Bu şekilde beyaz renkte gözüken kristaller ve siyah renkte gözüken boşluklar imajda elimine edilerek sadece matris ortaya çıkarılmıştır. Yeni görüntü analizi çalışmasında, belli bir eşik değerinin üzerinde kalanlar (beyaz renkte) matrisi, altında kalanlar (koyu renkte) kristalleri ve boşlukları ifade etmektedir (Şekil 5.14). Böylece hem kristal bileşenleri hem de boşlukları matristen ayırmak mümkün olmuştur.

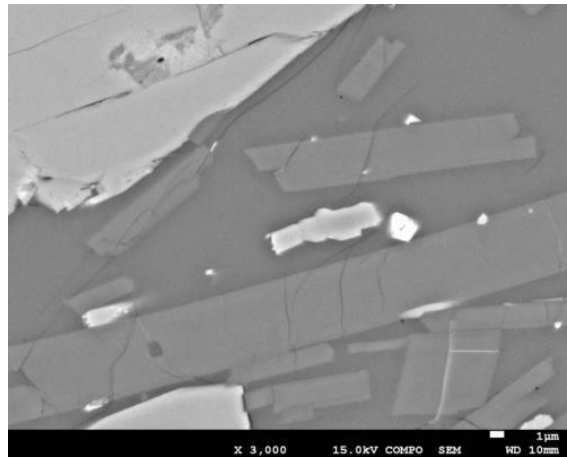


(a)



Şekil 5.14 Solda polarizan mikroskop görüntüsü, sağda görüntü analizi sonucu a) yeni örnek, b) eski örnek.

Yapılan hesaplamalar sonucunda her iki örnek için hesaplanan matris fazı alanları eski ve yeni örnek için sırasıyla %38,68 ve %38,86 olarak belirlenmiştir. Görüldüğü üzere belirlenen değerler birbirine oldukça yakın olduğundan matris fazının miktarının reaktiviteye etkisi ile ilgili herhangi bir bulguya rastlanmamıştır. Volkanik cam matrisin kimyasal kompozisyonunun ASR genleşmelerinde önemi olduğu bilindiğinden, Şekil 5.15'te yer alan yeni örneğin 3000x büyütmedeki SEM mikro-fotoğrafında koyu gri ile ayırt edilebilen matrisin iki farklı noktasından EDS analizi alınmıştır. Yeni örnek için gerçekleştirilen bu analizin sonuçları %100'e normalize edildiğinde, camsı fazın SiO_2 miktarının kütlece %74-78 olduğu anlaşılmıştır (Çizelge 4.2). Nispeten daha yüksek genleşmelerin olduğu eski örnek üzerindeki çalışmalarda ise camsı fazın EDS analizinde kütlece SiO_2 miktarının %64-69 olduğu ve dolayısıyla beklenenin aksine yeni örneğe kıyasla daha düşük düzeyde kaldığı görülmüştür (Çopuroğlu et al., 2007, 2009).



Şekil 5.15 Yeni örnekte yer alan volkanik cam matrisin 3000x büyütmede SEM mikro-görüntüsü.

ASR olgusunda önemli rolü olan silisin çözünmesi, aşağıdaki denklem ile gerçekleşmektedir:



Oluşan ürün genelde her ne kadar H_4SiO_4 ile gösterilse de, çözeltinin pH değerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yüksek pH değerlerinde, H_4SiO_4 zayıf bir asit gibi davranmakta ve örneğin 9'dan daha büyük pH değerli ortamda çözeltide baskın olarak bulunan ürün değişmektedir:



Çözeltinin alkalinitesinin daha da yükselmesiyle, deprotonasyon aşamalı bir şekilde devam etmekte ve nihai olarak $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, HSiO_4^{3-} veya SiO_4^{4-} oluşabilmektedir. Çözeltinin pH değerinin yanı sıra safsızlıkların da silisin çözünürlüğüne önemli etkisi olduğu bilinmektedir. Çünkü bu safsızlıklar, çözünmüş haldeki silis yapılarıyla reaksiyona girmektedir. Reaksiyona girme yatkınlıkları ise değerliklerine bağlıdır: $\text{Fe}^{+3} > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > \text{Na}^+$. Bu iyonlar, örneğin H_3SiO_4^- ile birleşirse, aynı molar miktarda H_4SiO_4 Denklem 5-2'ye göre deprotonasyona uğrayacak ve sonuç olarak daha fazla katı silis Denklem 5-1'e göre çözünmüş hale gelecektir. Bir başka ifadeyle safsızlıkların bulunması, daha çok miktarda silisin çözeltide yer almasıyla sonuçlanacaktır (Broekmans, 1999). Bu bilgiler ışığında özellikle matriste yer alan demir içeren fazların (safsızlıkların) silisin çözünürlüğü üzerinde önemli etkiye sahip olacağı görülmektedir. Eski örnekte camsı matrisin Fe_2O_3 içeriği ortalama %5 iken yapılan stikiometrik hesap ile ($\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ dönüşümü) yeni örnek için bu değer %3,6 olarak belirlenmiştir. Buna göre safsızlıkların eski örnek için silis çözünürlüğünü artırarak genleşmeleri erken vadede oluşturduğu söylenebilir.

Sonuç olarak, bazalt agregası seneler içinde kaynağında tüketilip kaçınılmaz olarak günümüzde daha alt katmanlardan temin edilmeye başlanmıştır. Alt katmanlardaki bazaltın soğuma hızının daha yavaş olması ile değişen amorflik derecesi ve camsı matrisin safsızlığının reaktiflik derecesini etkilediği düşünülmektedir.

5.3 Özel Agregalar İçeren Betonların AAR Performansı

5.3.1 Atık cam agregasının reaktivitesi

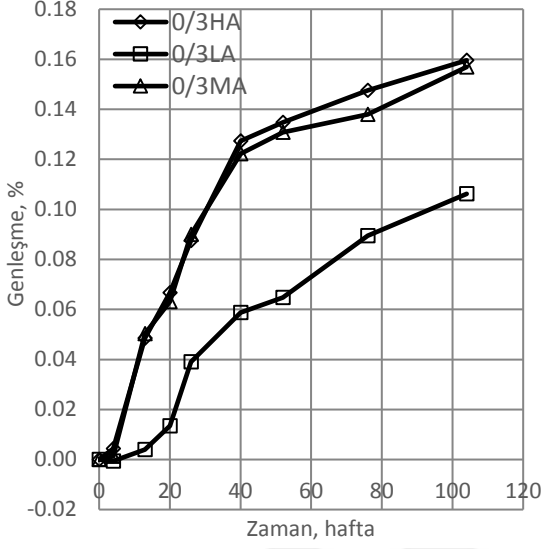
Bu kapsamda hazırlanan karışımlarda ince agrega olarak atık pencere camlarından elde edilen renksiz cam, iri agrega olarak ise bir önceki başlıkta bahsedilen tüm karışımlarda olduğu gibi 4/16 ve 11,2/22,4 mm boy sınıflarındaki bazalt agregası kullanılmıştır. Çizelge 5.9’da görüldüğü gibi bu altı farklı karışım düşük alkalili (LA), yüksek alkalili (HA) veya %50 düşük + %50 yüksek alkalili (MA) çimento içermektedir. Karışımların toplam çimento içeriği her birinde 440 kg/m³’e ve su/çimento oranı 0,5’e eşittir. Bu karışımlarda NaOH ilavesi uygulanmamış olup karışım kodlarındaki 0/3 ve 0,063/3 sayıları camın hangi tane boyutunda (mm) kullanıldığını simgelemektedir.

Çizelge 5.9 Cam agregası içeren karışımlarda malzeme oranları (kg/m³).

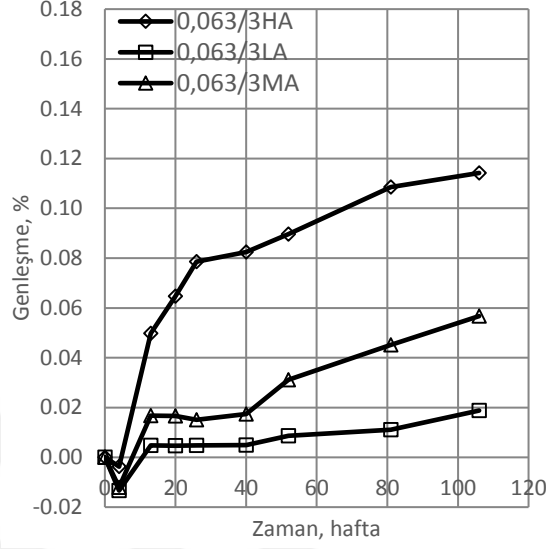
	0/3HA	0/3LA	0/3MA	0,063/3HA	0,063/3LA	0,063/3MA
Yüksek alkalili (HA) çimento	440	0	220	440	0	220
Düşük alkalili (LA) çimento	0	440	220	0	440	220
Su	220	220	0	220	220	0
4/16 bazalt	501	499	500	501	499	500
11,2/22,4 bazalt	501	499	500	501	499	500
0/3 cam	667	665	666	0	0	0
0,063/3 cam	0	0	0	667	665	666
TOPLAM	2329	2323	2326	2329	2323	2326
Alkali miktarı (kg/m ³)	4,60	2,79	3,69	4,60	2,79	3,69
Alkali miktarı (bağlayıcının %’si)	1,04	0,63	0,84	1,04	0,63	0,84

38°C ve 60°C sıcaklığa maruz bırakılan ve ince agrega olarak cam içeren karışımların zamana bağlı olarak genleşmeleri sırasıyla Şekil 5.16 ve 5.17’de sunulmuştur. Tez kapsamında hazırlanan tüm karışımlar arasında en yüksek nihai genleşme seviyelerine atık camlı karışımlarda rastlanmıştır. Hem bir önceki başlıkta anlatılan Kontrol karışımı, hem de ilerideki başlıklarda bahsedilecek diğer karışımlar ele alındığında genel olarak sadece bazalt agregası içeren karışımların genleşmeleri, atık camlı karışımlara kıyasla çok düşük kalmıştır. Atık cam agregası varlığında beton prizmalarda 38°C’de 52 haftada %0,13 ve 60°C’de 20 haftada %0,45 mertebesine varan genleşme değerleri ortaya çıkmıştır. Reaktif olduğu bilinen geleneksel beton agregalarında, agreganın yüzeyindeki kararsız silis yapıları ile agreganın bünyesindeki çatlak ya da boşluklar gibi kusurlu bölgelerde ya da iç yapıda bulunan ve miktarı agrega

türüne göre değişen silisli mineraller reaksiyona neden olmaktadır. Fakat atık cam kullanıldığında agrega tanelerinin bütünüyle amorf nitelikteki reaktif silis içermesi, zararlı reaksiyonların gelişme derecesini çok daha yukarılara çıkartmaktadır.

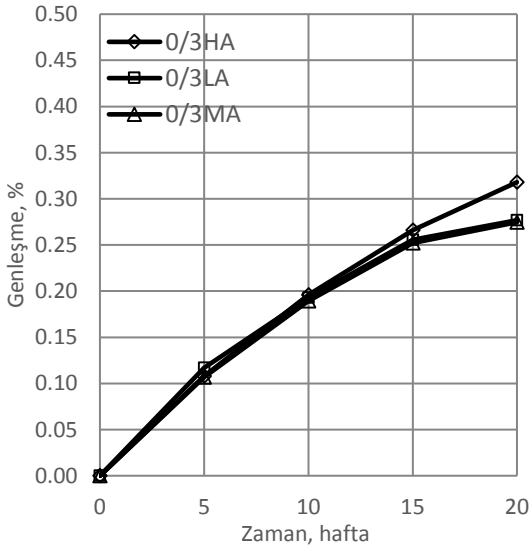


(a)

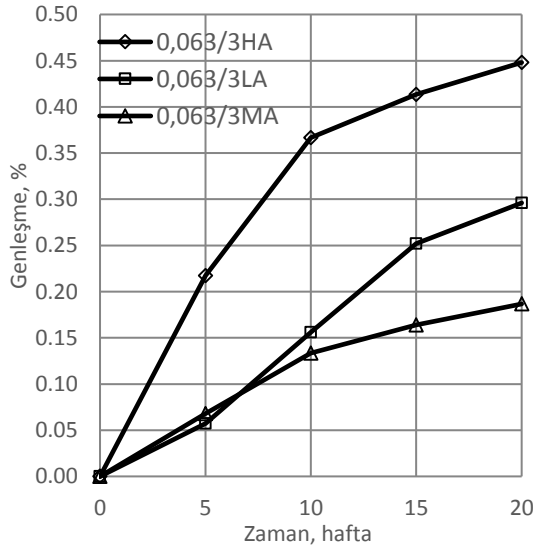


(b)

Şekil 5.16 a) 0/3 mm ve b) 0,063/3 mm cam agregası içeren karışımların 38°C'ye maruz kalma sonrasındaki genleşme-zaman grafikleri.



(a)



(b)

Şekil 5.17 a) 0/3 mm ve b) 0,063/3 mm cam agregası içeren karışımların 60°C'ye maruz kalma sonrasındaki genleşme-zaman grafikleri.

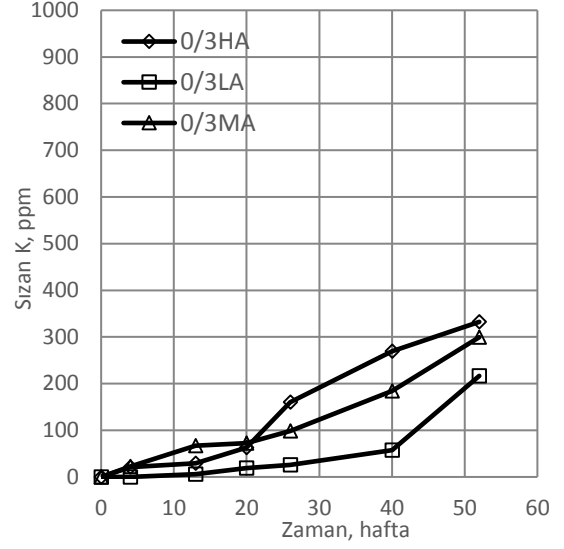
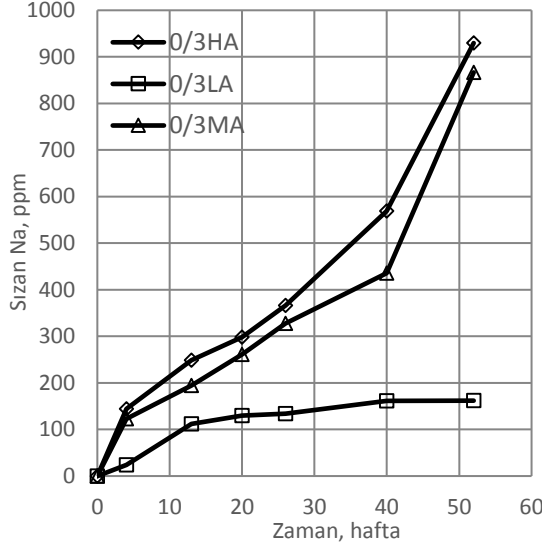
Şekil 5.16a'ya göre sıcaklığın 38°C olması durumunda düşük alkalili çimento içeren 0/3LA karışımının genleşme seviyeleri, birbirlerine oldukça benzer performans sergileyen diğer iki karışıma nazaran tüm yaşlarda oldukça düşük kalmıştır. Bu grafiğe göre özellikle 0/3HA ve 0/3 MA karışımlarının ilk 40 hafta boyunca hızlı bir şekilde genleşme gösterdiği, son haftalarda ise genleşme hızının düştüğü görülmektedir. Ancak her üç karışımın genleşme potansiyelinin deney süresinin 2 yıla kadar uzatılması sonucunda dahi sona ermediği ifade edilebilir. Şekil 5.16b'de genleşme-zaman eğrilerinin 0,063/3HA karışımı için 26 haftadan, 0,063/3LA ve 0,063/3MA karışımları için 12 haftadan sonra ilk olarak yataylaşma eğiliminde olduğu görülse de 40. haftadan itibaren tekrar artan genleşme davranışlarıyla karşılaşmıştır. Karışımlarda kullanılan hem ince agrega hem de iri agrega fazlarının reaktif nitelikli oluşu ve bu bileşenlerin reaksiyon hızlarının ile reaktivite potansiyellerinin farklılığı, karışımların da bir ölçüde farklı süre zarflarında farklı hızlarda gelişen genleşme davranışlarına sahip olmasına neden olmuştur. Bununla birlikte Şekil 5.17a'ya göre 60°C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneylerde karışımdaki çimentonun alkalinitesinin değişimi, genleşme sonuçlarını önemli ölçüde etkilememiştir. Fakat Şekil 5.17b'ye göre yüksek alkalili çimento kullanımı, 10. haftada diğer iki karışımın genleşmesinin 2 katından fazla bir boy değişimine yol açmış, 20. haftada da diğer iki karışıma göre yine daha fazla genleşme oluşturmıştır.

Literatürde yer alan ve reaktif agregalarla aynı kökendeki filler malzemelerin ASR genleşmelerine etkisinin ve puzolanik aktivitelerinin araştırıldığı bir tez çalışmasında, riyolit ve camın genleşmeleri azaltabildiği görülmüştür. Filler boyutundaki riyolit ve camda silis yapısının belirgin olarak amorf halde olduğu, bu sayede belirgin bir puzolanik aktivite de sağladığı ifade edilmiştir. Ancak aynı çalışmada, reaktif fazının mikrokristalin kuvars olduğu bilinen kataklastik başka bir kayaktan elde edilen filler malzemenin ASR'yi 38°C'lik koşulda azaltmadığı ve hatta bazı durumlarda arttırdığı, puzolanik aktivitesinin de oldukça düşük kaldığı açıklanmıştır (Pedersen, 2004). Öğütülmüş cam ile çalışılan diğer araştırmalarda Shao et al. (2000) 38 µm ve Hudec and Ghamari (2000) 75 µm'dan küçük tanelerin genleşmeleri azaltabildiğini belirlemiştir (Pedersen et al., 2016). Tez çalışmasının bu aşamasında da araştırılan konulardan biri atık cam agregalarında yer alan 63 µm altı malzemenin genleşmelere olan etkisinin belirlenmesidir. Literatürde var olan çalışmaların aksine, Şekil 5.16a ve Şekil 5.16b kıyaslandığında cam agregasında 63 µm'dan küçük tanelerin varlığında her üç camlı karışım için de 38°C'de genleşmelerin azalmadığı söylenebilir. 60°C'de elde edilen sonuçlara göre ise farklı çimentolarla hazırlanan karışımlarda farklı performanslar ortaya çıkmıştır. Şekil 5.17a'daki 0/3HA ve Şekil 5.17b'deki 0,063/3HA karşılaştırıldığında, karışımda 63 µm'dan küçük cam parçalarının bulunmasının daha düşük genleşme seviyesine neden olduğu görülmektedir. Fakat yine 60°C sıcaklıkta 0/3MA-0,063/MA karışımlarında tüm

yaşlarda elde edilen genleşmeler ve 0/3LA-0,063/3LA karışımlarında 5., 10. ve 15. haftada oluşan sonuçlar tam tersi bir eğilimin varlığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlardan, cam tozunun olası bir puzolanik aktivitesi üzerinde boşluk çözeltisinin alkalinitesinin etkin rol oynadığı anlaşılmaktadır.

Bu sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde cam tozunun belirgin bir puzolanik aktivitesinden bahsedilmesini engellemektedir. 63 μm 'dan küçük tanelerin puzolan gibi davranıp genleşmeleri azaltma potansiyeli olsa da böyle bir etkiyle aynı anda yarışan başka faktörlerin de bulunduğu tezin bu aşamasında belirlenmiştir. Aşağıdaki paragraflarda açıklanacak olan bu konulardan ilki, bu boy sınıfındaki atık cam içeren karışımlardan dışarıya daha az miktarda alkali sızdığının belirlenmesi, ikincisi ise camın öğütülmesiyle birlikte daha geniş yüzey alanından boşluk çözeltisine daha çok alkali salma potansiyelinin olmasıdır. Bu faktörlerin ikisinin de olası bir puzolanik etkiye zıt yönde netice verdiği ve ölçülen genleşmeleri arttırdığı anlaşılmıştır.

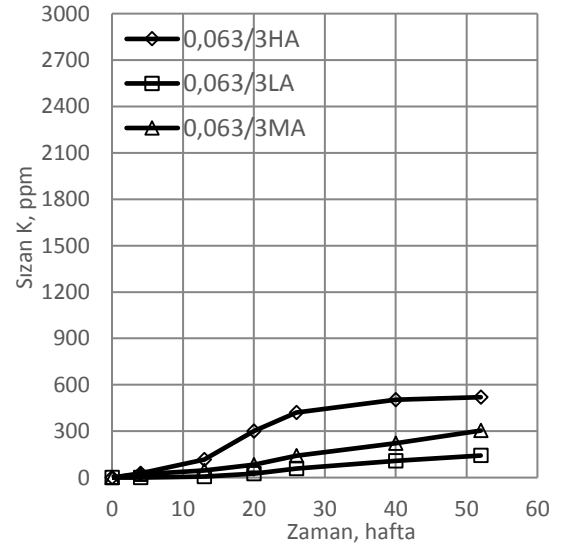
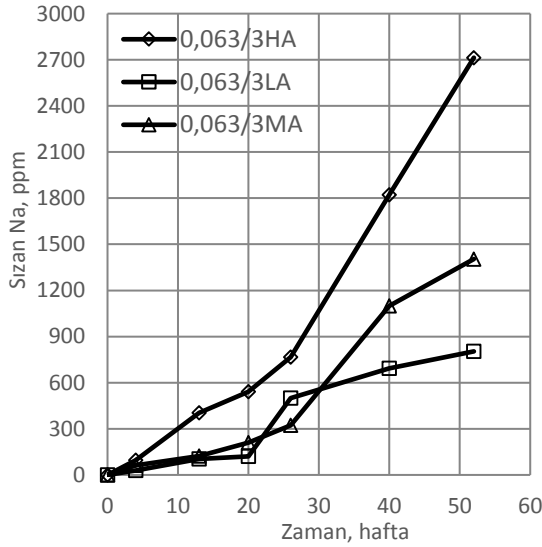
0/3HA, 0/3LA ve 0/3MA karışımlarında zamanla beton bünyesinden sızan ortalama Na^+ ve K^+ iyon miktarları sırasıyla Şekil 5.18a ve 5.18b'de, 0,063/3HA, 0,063/3LA ve 0,063/3MA karışımlarından sızan Na^+ ve K^+ iyon miktarları ise sırasıyla Şekil 5.19a ve 5.19b'de gösterilmektedir. Bu grafiklerde y-eksenlerinin ölçeklerinin birbirinden farklı olduğunu hatırlatmakta fayda görülmektedir. Bir önceki aşamada Kontrol karışımı olarak adlandırılan betonlarda olduğu gibi, sızan iyonların miktarları karşılaştırıldığında, baskın olanın Na^+ iyonları olduğu görülmüştür. Fakat daha önce tartışıldığı üzere, Kontrol karışımlarında alkali sızıntısının ilk yaşlarda hızlı gerçekleşip sonradan yavaşlaması söz konusuysa, Şekil 5.18 ve 5.19'a göre cam agregalı karışımlarda genel olarak böyle bir davranış görülmemiştir. Özellikle yüksek alkalili çimento ile hazırlanan ve daha yüksek genleşme potansiyeli olan karışımlarda ilerleyen yaşlarda Na^+ iyonlarının sızma hızındaki belirgin artış dikkat çekicidir. Bu durumu, iki farklı nedene dayandırmak mümkündür. Cam agregalı bu karışımlarda reaksiyon geliştikçe oluşan hasar, karışımların geçirimsizliği üzerinde olumsuz etki yaratıp alkalilerin sızmasını ilerleyen yaşlarda da kolaylaştırmaktadır. İkinci olarak ise Kontrol karışımlarında dışarıdan NaOH ilavesi uygulanmış ve bu bileşenin hızlı çözülmesi erken yaşlardaki sızıntıyı arttırmıştır. Cam agregalı karışımlarda böyle bir işlem uygulanmamış olup zaman içerisinde agreganın kendisinden salıverilen alkali daha çok ilerleyen yaşlardaki sızma hızı üzerinde rol oynamaktadır.



(a)

(b)

Şekil 5.18 0/3HA, 0/3LA ve 0/3MA karışımlarından AAR-3 deneyi boyunca sızan a) Na^+ ve b) K^+ iyon konsantrasyonları.



(a)

(b)

Şekil 5.19 0,063/3HA, 0,063/3LA ve 0,063/3MA karışımlarından AAR-3 deneyi boyunca sızan a) Na^+ ve b) K^+ iyon konsantrasyonları.

Bu aşamada hazırlanan karışımların 38°C ve 60°C 'de bekletilmesi sonucunda ortaya çıkan nihai alkali sızıntısı miktarları Na_2O eşdeğeri cinsinden Çizelge 5.10'da verilmiştir. Hem Şekil 5.18 ve 5.19'da ppm cinsinden sunulan iyon miktarları, hem de

Çizelge 5.10'da mg cinsinden gösterilen Na_2O eşd. verilerine göre belirgin olan bir bulgu, karışımlarda başlangıçta daha yüksek miktarda alkali bulunmasının, sızan alkali miktarının da daha yüksek olmasına yol açmasıdır. Çizelge 5.10 uyarınca yüzde cinsinden belirlenen alkali kayıplarının maksimum değerleri de HA veya MA kodlu karışımlarda gerçekleşmiştir. Ayrıca artan sıcaklık seviyesi difüzyonu hızlandırdığından (Lindgård et al., 2012; Fournier et al., 2004a) 60°C 'de yüzde cinsinden kaydedilen değerler 38°C 'ye kıyasla 1,5-5,2 kat aralığında daha yüksek çıkmıştır.

Çizelge 5.10 Cam agregalı karışımlardan AAR-3 ve AAR-4 deneyleri boyunca sızan toplam alkali miktarları.

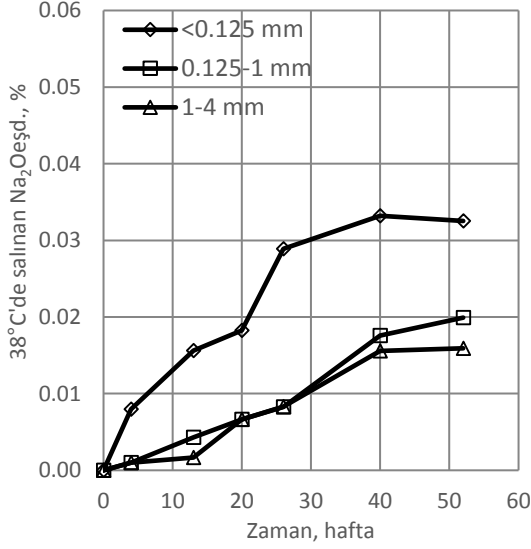
	Bir prizmada deneyler öncesindeki alkali miktarı (g – Na_2O eşd.)	38°C 'ye maruz kalma sonucunda 52 hafta sonundaki alkali sızıntısı (mg – Na_2O eşd.)	38°C 'ye maruz kalma sonucunda 52 hafta sonundaki alkali kaybı (%)	60°C 'ye maruz kalma sonucunda 20 hafta sonundaki alkali sızıntısı (mg – Na_2O eşd.)	60°C 'ye maruz kalma sonucunda 20 hafta sonundaki alkali kaybı (%)
0/3HA	7,36	758,68	10,31	2561,06	34,80
0/3LA	4,46	195,20	4,38	1020,91	22,89
0/3MA	5,90	702,71	11,91	2181,46	36,97
0,063/3HA	7,36	2035,57	27,66	3306,46	44,92
0,063/3LA	4,46	598,27	13,41	1663,31	37,29
0,063/3MA	5,90	1067,18	18,09	2348,37	39,80

0,063/3LA, 0,063/3HA ve 0,063/3MA karışımlarında $63\ \mu\text{m}$ 'dan küçük tanelerin uzaklaştırılması, cam içeren diğer karışımlara kıyasla yüksek geçirimsizlikleri nedeniyle daha yüksek alkali sızıntısı seviyelerinin oluşmasına yol açmıştır. Fiziksel olarak boşluk doldurma yeteneği yüksek olan filler malzemelerin kullanılmadığı karışımlarda taze halde ölçülen birim ağırlık değerlerinin, $80\text{-}120\ \text{kg/m}^3$ mertebelerinde düşük olması, bu yorumu destekler niteliktedir. Örnek olarak, Çizelge 5.9'da verilen karışım oranlarından da görülebileceği üzere, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarında dizaynda eşit miktarlarda cam agregası kullanılmıştır. Camda yer alan çok ince tanelerin alkali-silis reaksiyonuna sebep olmadığı bilindiğinden 0,063/3HA karışımının daha fazla reaktif bileşene sahip olduğu açıktır. $63\ \mu\text{m}$ 'dan küçük taneler içermeyen karışımlar, yüksek geçirimsizliklerine ve reaksiyona yatkın olan daha fazla bileşen içermelerine rağmen genel olarak, daha yüksek genleşme seviyeleri göstermemişlerdir (Şekil 5.16 ve 5.17). O halde bu karışımlarda gerçekleşen yüksek alkali sızıntısı seviyelerinin genleşmeler üzerinde oldukça etkin ve baskın rol oynadığı anlaşılmaktadır. Alkali sızıntısı sonuçları arasında ölçülen en yüksek değere 0,063/3HA karışımının 60°C 'de bekletilmesi sonucunda rastlanmıştır. Bu karışımda belirlenen %44,92'lik alkali kaybı, başlangıçta çimentodan gelen $4,60\ \text{kg/m}^3$ olan alkali içeriğinin 60°C 'de bekletilme neticesinde $2,53\ \text{kg/m}^3$

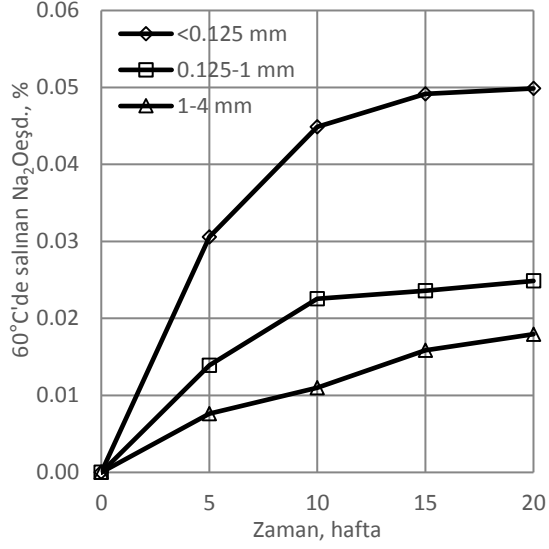
seviyesine düşmesi anlamına gelmektedir. Yapılan bu hesaba agreganın kendi bünyesinden salınma potansiyeli olan alkalilerin dahil edilmediğini hatırlatmak gerekmektedir.

Tez kapsamında farklı tane boyutlarındaki bazalt ve atık cam agregalarının bünyelerinden 38°C ve 60°C’de salınabilecek alkali miktarları, agregaların 0,7M NaOH ve 0,7M KOH çözeltilerinde bekletilmesiyle belirlenmiştir. Agregalardan NaOH çözeltisine salınan K^+ iyonu ve KOH çözeltisine salınan Na^+ iyonu miktarı ölçülmüştür. Reaktif agregalarla gerçekleştirilen bu tip deneylerde, öncelikle yüzeydeki silis yapılarının OH^- iyonları ile etkileşimi sonucu silanol gruplarının oluşması, daha sonra çözeltinin sahip olduğu yüksek alkalinite nedeniyle silanol grupları ve iç yapıdaki siloksan köprüleri yıkıldıkça (silis çözündükçe) agreganın bünyesinde yer alan bazı alkali iyonlarının da salınmaya elverişli hale gelmesi ve çözeltideki katyon ile yer değiştirmesi beklenmektedir. Reaktif olmayan agregaların da bazı durumlarda alkali salabildiği bilinmektedir. Fakat bu agregalar için reaksiyona girip bağlarda önemli bir bozulma oluşması söz konusu olmadığından salınan miktar, alkali içeren mineral fazın iyon değiştirebilme potansiyeli ile kısıtlı kalmaktadır (Berra et al., 2018; Rajabipour et al., 2015). Bu çözelti tiplerinin seçilmesinin nedeni, tezin önceki bölümlerinden “3.2.1.3” başlığında açıklandığı gibi, beton boşluk çözeltisinin pH değerini iyi temsil etmesidir. Bazı araştırmacılar tarafından uygulanan doygun $Ca(OH)_2$ çözeltisi kullanılması fikri ise, salınabilen alkalilerin, Ca^{+2} iyonları varlığında oluşabilecek ikincil ürünlerin yapısına katılıp miktarlarının belirlenmesi konusunda zorluk oluşturmaması nedeniyle benimsenmemiştir.

Şekil 5.20’de bazalt agregaları, Şekil 5.21’de ise atık cam agregaları için sunulan alkali salımı-zaman grafiklerine göre elde edilen bariz bir bulgu, agrega tipinden ve sıcaklıktan bağımsız olarak daha küçük tane boyutuna sahip agregadan daha hızlı ve daha çok alkali salındığıdır. 0,125 mm’den daha küçük agregalardan salınan alkali miktarı, 0,125-1 mm malzemeden salınan miktarın 1,4-2 katı, 1-4 mm malzemeden salınan miktarın ise 2-2,8 katı aralığındadır. Dolayısıyla agreganın yüzey alanının, alkali salımı potansiyelini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Daha önce genleşme sonuçlarına dair paragraflarda tartışıldığı gibi, cam agregaların toz kısımlarından salınan yüksek miktardaki alkali, sahip oldukları pozolanik etkinin genleşmeler üzerindeki azaltıcı etkisini çoğunlukla dengelemiş ya da bu etkinin önüne geçmiştir.

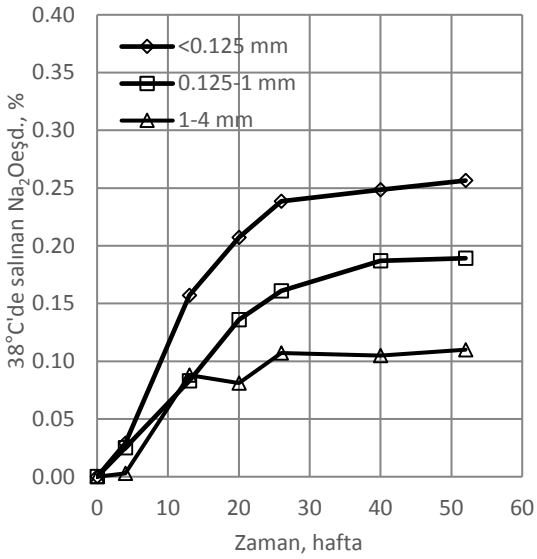


(a)

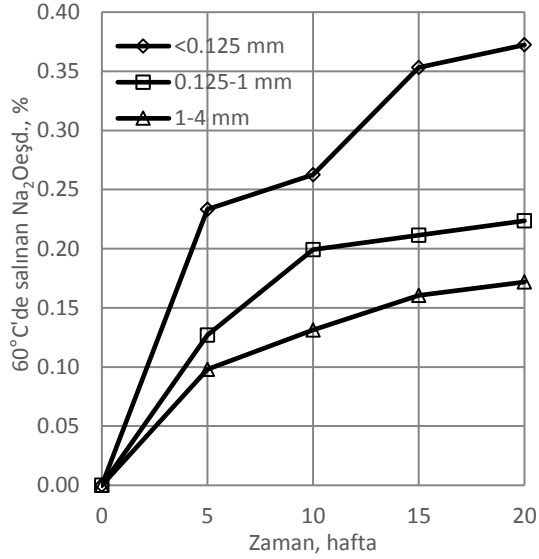


(b)

Şekil 5.20 Farklı tane boyutlarına sahip bazalt agregalarından a) 38°C 'de ve b) 60°C 'de salınan Na_2O eşd. miktarı (agrega kütlelerinin %'si).



(a)



(b)

Şekil 5.21 Farklı tane boyutlarına sahip atık cam agregalarından a) 38°C 'de ve b) 60°C 'de salınan Na_2O eşd. miktarı (agrega kütlelerinin %'si).

Agregadan salınan alkali miktarını etkileyen diğer bir faktör ise sıcaklık seviyesidir. Çözeltilerde 60°C 'de elde edilen Na_2O içerikleri, 38°C 'deki verilere göre her durumda daha yüksek çıkmıştır. Şekil 5.20'de bazalt agregaları için elde edilen sonuçlara göre

sıcaklığın yükselmesi en ince tane boyutuna sahip malzeme üzerinde en yüksek artışın (%53) gerçekleşmesine neden olmuştur. Cam agregasının test edilmesi neticesinde ise <0,125 mm, 0,125-1 mm ve 1-4 mm tane boyutundaki malzemeler için sıcaklık artışıyla beraber alkali salımı miktarlarında sırasıyla %45, %18 ve %56'lık artışlar görülmüştür. Daha önce Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de verilmiş olan cam agregalı karışımların genleşme davranışlarına göre 38°C'de hiçbir karışımın nihai genleşmesinin %0,16'yı geçmediği, 60°C'de ise genleşme mertebelerinin önemli ölçüde yükselerek %0,19-%0,45 arasında değiştiği görülmektedir. Sonuç olarak cam agregalı karışımlarda sıcaklığın artışının genleşmeler üzerindeki etkisi ile alkali salımı üzerindeki etkisinin uyumlu olduğu, bir başka ifadeyle yüksek sıcaklıkta elde edilen yüksek genleşmeler üzerinde agregalardan ortama salınan alkalilerin önemli rol oynadığı düşünülmektedir.

Şekil 5.20 ve 5.21'deki grafiklerde deney sürelerinin sonlarına doğru görülen yavaşlama/yataylaşma eğilimlerini, çözeltide yer alan OH⁻ iyonlarının reaktif agregalarla etkileşimi sonucu konsantrasyonunun düşmesi ile açıklamak mümkündür. Bu azalma çözeltinin pH değerinin ve dolayısıyla şiddetinin düşmesine neden olmaktadır (Bérubé et al., 2004).

Agregalardan alkali salımının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneylerde 38°C'de 52. haftanın ve 60°C'de 20. haftanın sonunda elde edilen veriler Çizelge 5.11'de özetlenmiştir. Bu tabloda salınan alkali içerikleri hem agregat kütlelerinin %'si hem de agreganın toplam alkali içeriğinin %'si cinsinden ayrı ayrı verilmiştir. Aynı zamanda, bazalt ve atık camların ince agregat boyutunda kullanıldığı beton karışımlardaki miktarlarından ve test edilen 0,125 mm, 0,125-1 mm ve 1-4 mm alt sınıf aralıklarının agregat gradasyonundaki oranlarından yola çıkılarak salınan alkali içerikleri son kolonda kg/m³ cinsinden de hesaplanmıştır.

Çizelge 5.11'e göre bazalt agregasından K₂O'ya kıyasla daha fazla Na₂O salındığı anlaşılmaktadır. Bu durum, bazalt agregasının oksit kompozisyonuna göre daha fazla Na₂O içermesiyle ilişkilidir. Çizelge 5.11'de ayrı ayrı gösterilmese de agregalardaki sodyum oksitin ve potasyum oksitin yüzdece ne kadarının salındığı karşılaştırıldığında belirgin bir sonuca ulaşılmadığından, sodyum iyonu kaynağı olarak yer alan plajiyoklaz (Na-feldspar) ve potasyum iyonu kaynağı olan K-feldspar'ın kararlılıklarının farklılığıyla ilgili de bir yorum yapmak mümkün değildir. Atık camların ise başlangıçta bileşimlerindeki çok düşük K₂O içerikleri nedeniyle, bu oksitin salınma miktarı hep sıfıra yakın çıkmıştır.

Çizelge 5.11 Bazalt ve atık cam agregalarının alkali hidroksit çözeltilerinde bekletilmesi sonucu oluşan alkali salımı değerleri.

Agrega	Sıcaklık	Boyut (mm)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ Oeşd. (%) ^a	% (toplam) ^b	(kg/m ³)
Bazalt	38°C	<0,125	0,022	0,016	0,033	0,93	0,13
		0,125-1	0,014	0,009	0,020	0,57	
		1-4	0,010	0,009	0,016	0,45	
Bazalt	60°C	<0,125	0,040	0,015	0,050	1,42	0,16
		0,125-1	0,015	0,015	0,025	0,71	
		1-4	0,014	0,006	0,018	0,51	
Atık cam	38°C	<0,125	0,256	0,001	0,256	1,79	1,22
		0,125-1	0,189	0,000	0,189	1,32	
		1-4	0,110	0,000	0,110	0,77	
Atık cam	60°C	<0,125	0,371	0,002	0,372	2,60	1,58
		0,125-1	0,223	0,001	0,224	1,56	
		1-4	0,171	0,001	0,172	1,20	

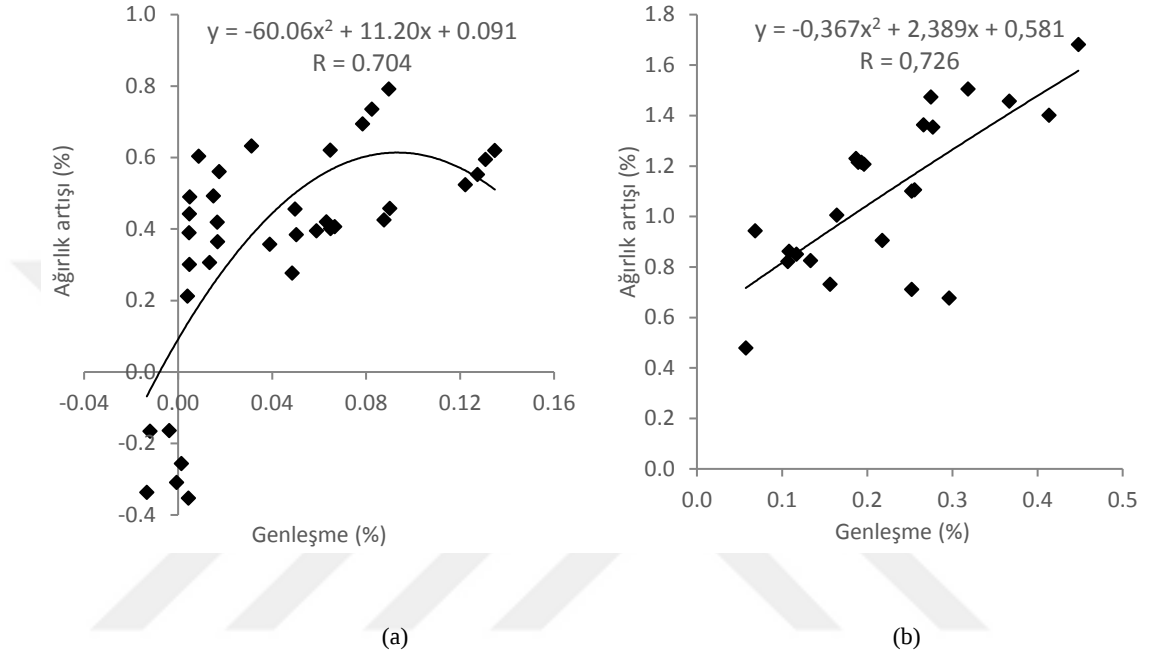
^a Agreganın bünyesindeki alkalilerin (Na₂Oeşd.) ne kadarının salındığı (yüzdece)

^b Agreganın kütlesinin yüzdesi cinsinden salınan alkali (Na₂Oeşd.) miktarı

Çizelge 5.11'e göre test edilen bazalt agregalarının yapısındaki alkali oksitlerin %0,45-%1,42'si, atık cam agregalarındakilerin ise %0,77-%2,60'ı salınmaya elverişli durumdadır. Sıcaklığın 38°C ve 60°C olması durumunda cam agregası kaynaklı alkalilerin betonun alkali içeriğinde oluşturduğu artış sırasıyla 1,22 ve 1,58 kg/m³ olup hesaplanan bu değerler karışımların reaktivite potansiyelinde önemli değişime neden olabilecek mertebelerdir. İnce bazalt agregaları için kg/m³ cinsinden hesaplanan değerler ise daha ihmal edilebilir düzeylerde kalmıştır. Bu aşamada uygulanan alkali salımı deneylerinin sadece agreganın üzerinde gerçekleştirildiğini unutmamak gerekmektedir. Beton içerisindeki ortam düşünüldüğünde boşluk çözeltisi/agrega oranı, boşluk çözeltisinin alkali iyonları açısından doygunluk durumu (kullanılan çimentonun alkali içeriği), Ca(OH)₂ varlığı, sıcaklık vb. faktörlerin salınan alkali miktarlarında önemli rol oynayabileceği belirgindir.

Deneyler süresince numunelerde incelenen genleşme davranışlarının yanı sıra ağırlıklarındaki değişimler de kaydedilmiştir. Beton prizma deneylerinde numunelerin aslında kontrol amaçlı olarak tartılması istenmekte, genleşmeler arttıkça ağırlık değerlerinde de artışlar oluşması beklenmektedir. Bu durum, reaksiyonlar neticesinde oluşan alkali-silis jelinin bünyesine su almasıyla ilgilidir. Yürütülen çalışmalar neticesinde elde edilen ağırlık artışı-zaman ilişkileri, genleşme-zaman eğilimlerine benzer çıkmıştır. Cam agregası içeren altı adet karışımda her yaştaki ölçümler dikkate

alınarak genleşme (%) – ağırlık artışı (%) grafikleri elde edilmiştir. Şekil 5.22a’da 38°C’de kürlenен örnekler için, Şekil 5.22b’de ise 60°C’de kürlenен örnekler için çizilen grafikler görölmektedir. Buna göre genleşmeler arttıkça ağırlık artışı değeri parabolik olarak artış göstermekte olup her iki deneyde de elde edilen korelasyonlar iyi düzeydedir ve daha yüksek genleşme seviyelerinde genleşme hızı, ağırlık artış hızına kıyasla daha yüksektir.



Şekil 5.22 a) 38°C’de ve b) 60°C’de kürlenен cam agregalı karışımlar için genleşme-ağırlık artışı ilişkisi.

5.3.2 Hafif agreganın reaktivitesi

Önceki başlıklar arasından malzeme özelliklerinin ayrıntılı olarak açıklandığı “4.1.2 Agregalar” kısmında belirtildiği gibi, reaktivite potansiyeli olduğu ön deneylerle anlaşılan Kayseri pomzası kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışma, bu başlık altında, iki aşamalı olarak anlatılacaktır. Beton prizma deneylerine geçmeden önce ilk aşamada üç adet harç karışımı AAR-2 (80°C, 1 M NaOH) deneyi ile test edilmiştir. Çizelge 5.12’de kodlamaları ve karışım oranları gösterilen 100B, 100P ve 50B-50P karışımlarında agrega fazlarını sırasıyla bazalt, pomza ve eşit hacimsel oranlarda bazalt ve pomza oluşturmuştur. Çizelge 5.12’de verilen malzeme miktarları, 25x25x285 mm boyutlarında üçer adet numune hazırlamak için kullanılmıştır.

Çizelge 5.12 AAR-2 hızlandırılmış harç çubuğu deneyine göre test edilen harç karışımlar.

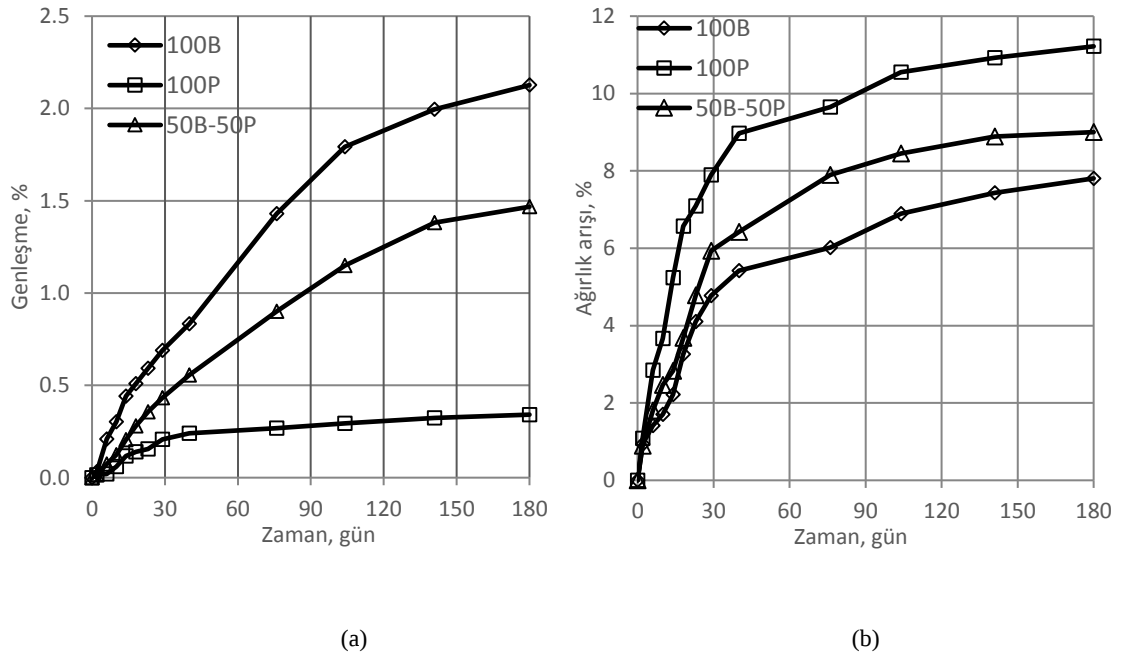
Bileşen, g	100B	100P	50B-50P
Çimento	440	440	440
Su	207	207	207
İnce bazalt agregası	990	-	495
İnce pomza agregası	-	390	195

AAR-2 deneyinde su/çimento oranı 0,47 olarak sabit tutulmuştur. Deneyde normal ağırlıktaki agregalar kullanıldığında (bu çalışmada 100B karışımı) agrega/çimento oranının kütlece 2,25 olması gerekmektedir. 100P ve 50B-50P karışımlarında ise pomzanın çok düşük olan özgül ağırlığı nedeniyle bu oran hacimsel olarak uygulanacak şekilde düzeltme yapılmıştır. Deneyde, 4 mm'den geçen ve 125 µm elekte kalan taneler kullanılmıştır. Tüm karışımlarda agregalar, AAR-2 deneyi için gereken gradasyon şartına (Çizelge 3.4) uyacak şekilde elenip hazırlanmıştır. Bu deneyde harç numuneler ilk 24 saat boyunca kalıplar içerisinde nemli bir odada, sonraki 24 saat boyunca 80°C sıcaklığa sahip su içerisinde ve sonrasında deney sonuna kadar 80°C sıcaklığa sahip 1 M NaOH çözeltisi içerisinde saklanmaktadır. Tez çalışmasında çözeltide bekletmek için gerekli olan 14 günlük standart deney süresi uzatılarak 180 gün boyunca numunelerin genleşmesi ve ağırlıklarındaki değişimler ölçülmeye devam edilmiştir.

Harç karışımların RILEM AAR-2 deney koşullarına göre 80°C'de bekletilmesiyle ortaya çıkan genleşme-zaman davranışları Şekil 5.23a'da gösterilmiştir. Grafiklerde bazalt agregasının, alkali-silis reaksiyonu gelişimine yatkınlığının çok yüksek olduğu belirgin olarak göze çarpmaktadır. Test edilen karışımlarda en yüksek genleşme değerleri, tüm yaşlarda 100B karışımında kaydedilmiştir. Bu karışım da %0,44 olarak belirlenen 14 günlük genleşme seviyesi, %0,1 olan limit değer in çok üzerindedir. Deney süresinin 180 güne dek uzatılmasıyla genleşme miktarı da %2,13'e ulaşmıştır. 50B-50P karışımının zaman içerisindeki genleşme davranışından, pomzanın %50 oranında bazalt yerine kullanılması sonucunda genleşmelerin önemli ölçüde azaldığı anlaşılmaktadır. Bu karışımın 14 ve 180 günlük genleşme mertebeleri sırası ile %0,21 ve %1,47 olarak belirlenmiştir. Agregası olarak sadece pomza içeren 100P karışımında ise ASR kaynaklı genleşmeler diğer karışımlara nazaran çok düşük kalmıştır. Bu karışım da 14 günlük limit değeri zorlukla aşılmış, özellikle 40. günden sonra reaksiyon belirgin ölçüde yavaşlamış ve 180. günde %0,34'lük bir genleşme seviyesine ulaşmıştır.

Test edilen harç karışımlarında her genleşme ölçümünden hemen sonra ağırlık değerleri de kaydedilmiş olup ağırlık değişimi-zaman grafikleri Şekil 5.23b'de

sunulmuştur. ASR sonucu oluşan jelin bünyesine su girişi devam ettikçe şişme ve ağırlık değerlerinde artma oluşmaktadır. Dolayısıyla en yüksek genleşme seviyelerine sahip olan 100B karışımında, ağırlık değişimlerinin de diğer karışımlara kıyasla daha yüksek olması beklenebilir. Ancak, bu çalışmada kullanılan agregaların su emme kapasiteleri, harç karışımların ağırlıklarında oluşan artışlar üzerinde daha baskın rol oynamıştır. Genleşme seviyelerinde karşılaşılan durumun aksine ağırlık değişimlerinde karışımlar arasında oluşan sıralama şu şekildedir: $100P > 50B-50P > 100B$. Tüm karışımlarda ağırlık değerlerindeki artışın büyük bir bölümü ilk 40 gün içerisinde gerçekleşmiştir.



Şekil 5.23 Harç karışımların 180 gün boyunca NaOH çözeltisinde bekletilmesiyle oluşan (a) genleşme-zaman ve (b) ağırlık artışı-zaman grafikleri.

Deneyisel çalışmanın ikinci aşaması ise pomza agregalarını içeren karışımların RILEM AAR-3 ve AAR-4 uyarınca beton prizma deneylerine maruz bırakılmasına ayrılmıştır. Bu kapsamda, karışım oranları Çizelge 5.13'te sunulan altı adet karışım tasarlanmış ve hazırlanmıştır. Bu karışımları da kendi arasında iki farklı seri halinde düşünmek mümkündür. P/HA, P/LA ve P/MA karışımlarından oluşan seri, normal ağırlıkta agrega içermemektedir ve hem ince hem de kaba agrega olarak pomza kullanılmasıyla oluşturulmuştur. B/HA, B/LA ve B/MA karışımlarında ise ince agrega olarak bazalt agregası, kaba agrega olarak ise pomza kullanılmıştır. Karışım kodlarında kullanılan "P" ve "B" harfleri sırasıyla ince pomza ve ince bazalt agregasını, "HA", "LA" ve "MA" ifadeleri ise sırasıyla yüksek, düşük ve orta alkali seviyesinde çimento kullanımını simgelemektedir. Bir önceki aşamada uygulanan harç deneylerinde olduğu gibi pomza agregaları, dökümden 1 saat önce suya doyurularak kullanılmıştır. Bir başka

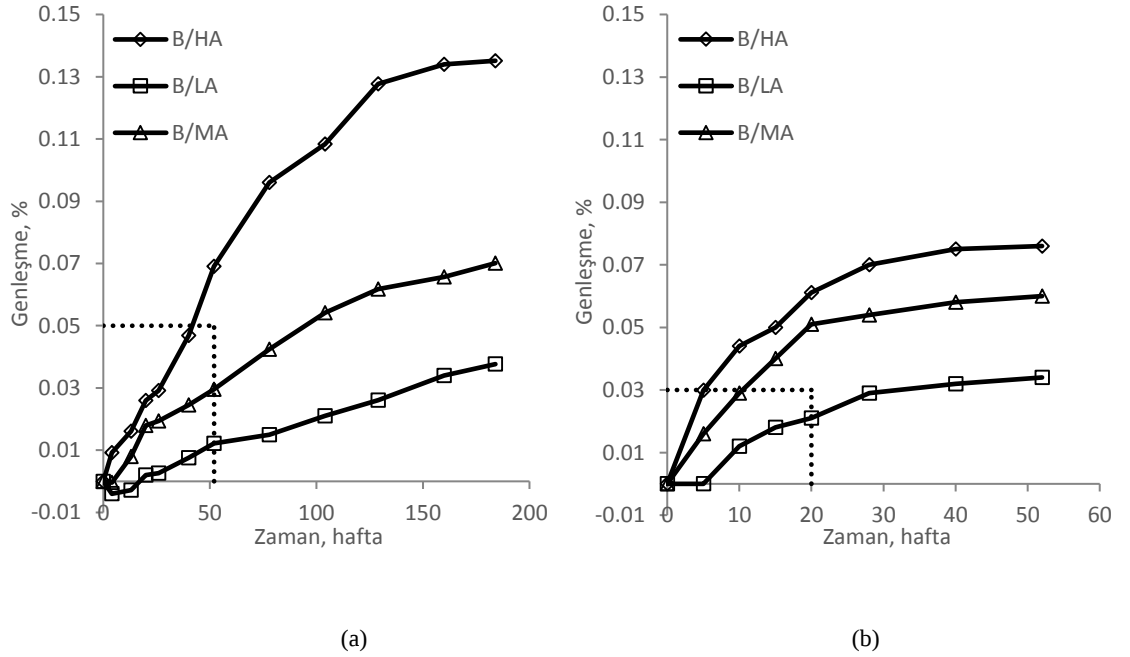
ifadeyle, hesaplar ve beton dökümü öncesi hafif agregaların doyurulması işlemi, farklı boy sınıflarındaki pomza agregalarının 1 saatlik su emme değerleri baz alınarak yapılmıştır.

Çizelge 5.13 Pomza agregası içeren karışımlarda malzeme oranları (kg/m³).

	P/HA	P/LA	P/MA	B/HA	B/LA	B/MA
Yüksek alkalili (HA) çimento	440	0	220	440	0	220
Düşük alkalili (LA) çimento	0	440	220	0	440	220
Su	220	220	220	220	220	220
0/4 bazalt	0	0	0	692	694	694
0/4 pomza	273	274	274	0	0	0
4/8 pomza	173	174	174	173	174	174
8/16 pomza	158	159	159	158	159	159
TOPLAM	1264	1267	1267	1683	1687	1687
Alkali miktarı (kg/m ³)	4,60	2,79	3,69	4,60	2,79	3,69
Alkali miktarı (bağlayıcının %'si)	1,04	0,63	0,84	1,04	0,63	0,84

İnce agregası olarak bazalt agregası ve iri agregası olarak pomza agregası içeren karışımların 38°C ve 60°C'ye maruz kalması sonucu oluşan ASR genleşmeleri sırasıyla Şekil 5.24a ve 5.24b'de verilmiştir. Grafiklerden görülebileceği gibi, sıcaklık seviyesinden bağımsız olarak kullanılan çimentodaki alkali içeriği beton prizma deney sonuçlarını büyük ölçüde etkilemiştir. Her iki sıcaklık seviyesinde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, AAR-3 deneyinde ilk birkaç haftalık periyotta nispeten daha durağan bir dönem olduğundan bahsetmek mümkündür. Daha sonra maruziyet süresi arttıkça ASR kaynaklı genleşmeler de artmıştır. Sıcaklığın 38°C olması durumunda B/HA karışımı, reaktif karışımlar için belirlenen 1 yılda %0,05 genleşme limitini aşan tek karışım olmuştur. B/LA ve B/MA karışımlarında bu sınır değeri aşılmamasına rağmen, deney süresinin 3,5 yıla kadar uzatılması, ölçülen boy değişimlerinin de kademeli olarak artmasına yol açmıştır. Bunların yanında değinilmesi gereken diğer bir konu, B/HA karışımına ait genleşme-zaman grafiğinin ölçümlerin gerçekleştirildiği süre zarfının sonlarına doğru yataylaşma eğilimine sahip olmasıdır. Ancak bu duruma daha az reaktif olan diğer iki karışımda rastlanmamıştır. Bu davranışın, B/HA karışımında daha hızlı ve daha yüksek miktarda ortaya çıkan reaksiyon ürünlerinin, alkalilerin bir bölümünü bünyesine bağlayarak ileri yaşlarda ortamı reaksiyon için elverişsiz hale getirmesi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Rivard et al., 2003).

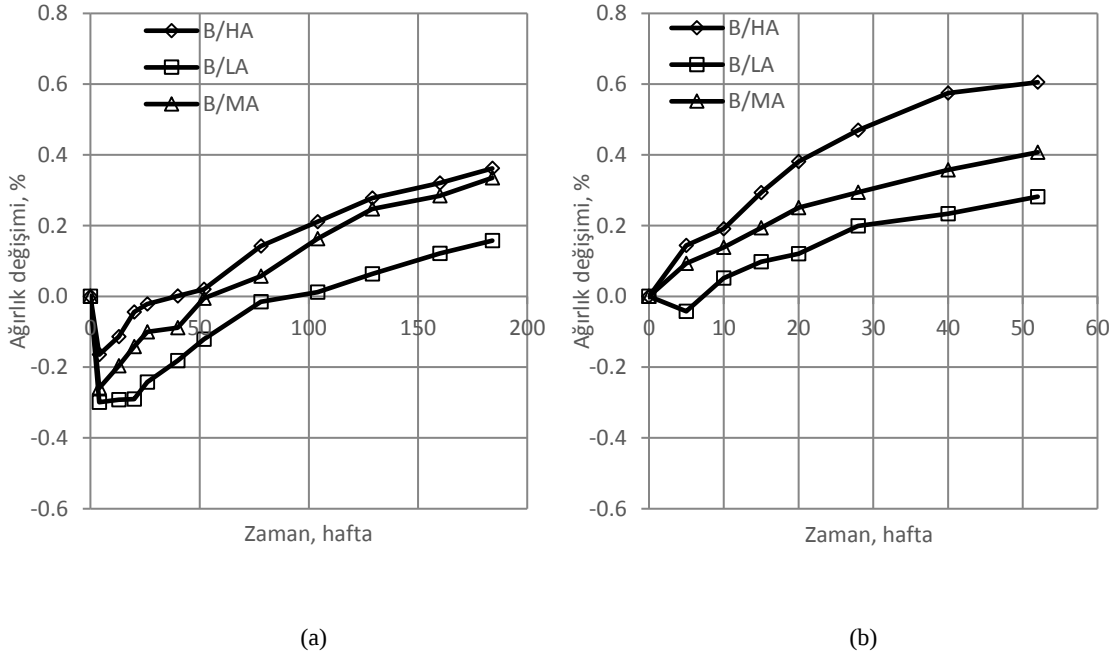
Beton prizmaların 60°C sıcaklıkta bekletilmesi, reaksiyon hızının artmasına neden olmuştur. Bu sıcaklık düzeyinde belirgin genleşme artışları, özellikle ilk 28 haftaya kadar olan periyotta gerçekleşmiştir. Ancak, bu yaştan sonra alkali seviyesi fark etmeksizin genleşmelerdeki artışlar oldukça düşük miktarlarda kalmıştır. AAR-3 deneyi için 52 hafta ve AAR-4 deneyinde 20 hafta olan standart deney süreleri sonunda elde edilen genleşme seviyeleri karşılaştırıldığında, B/HA karışımında AAR-3 deneyinde daha yüksek genleşme oluşmuştur. Bu durumun aksine, B/LA ve B/MA karışımlarında 60°C’de edilen genleşmeler, 38°C’dekilere kıyasla yaklaşık %72 mertebesinde daha yüksek kalmıştır. Dolayısıyla karışımdaki alkali seviyesinin farklı sıcaklıklarda oluşan genleşme davranışları üzerinde önemli rol oynadığı göze çarpmaktadır. Bununla birlikte, deney sürelerinin uzatılmasıyla elde edilen nihai genleşme verileri, daha yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen AAR-4 deneylerinde genleşmelerin daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum, sıcaklık artışıyla hem artan difüzyonla birlikte beton prizmalardan dışarıya alkali sızıntılarında oluşan artış hem de etrenjitin çözünürlüğü ve dolayısıyla boşluk çözeltisindeki sülfat iyonlarının konsantrasyonu artarken hidroksil iyonlarının konsantrasyonunun azalması (daha düşük pH) ile ilişkilidir (Lindgård et al., 2012; Fournier et al., 2004a).



Şekil 5.24 B/HA, B/LA ve B/MA karışımlarının a) AAR-3 deneyinde 38°C’de ve b) AAR-4 deneyinde 60°C’de genleşme-zaman grafikleri.

Komparatör ölçümleri ile boy değişimleri belirlendikten hemen sonra numuneler tartılmış olup AAR-3 ve AAR-4 deneyleri için elde edilen ağırlık değişimi-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.25a ve 5.25b’de gösterilmiştir. 60°C’de gerçekleştirilen

deneylerde beklendiği gibi, genleşme-zaman grafiği ile ağırlık artışı-zaman grafiği birbiri ile oldukça uyumlu davranış sergilemiştir. Bu sıcaklıkta 52 haftada B/HA, B/LA ve B/MA karışımları için kaydedilen ağırlık artışları sırasıyla %0,605, %0,282 ve %0,407 düzeyindedir. 60°C’de ve 38°C’de elde edilen sonuçlar kıyaslandığında daha yüksek sıcaklıkta nihai ağırlık değişimlerinin artmasında, hidrasyon gelişirken ürünlerin uniform dağılmasındaki zorluk ve buna bağlı olarak boşluk boyutlarının büyümesinin de rol oynadığı düşünülmektedir. Diğer yandan AAR-3 deneyinde, her üç karışımda da 4. haftada elde edilen sonuçlar, tez kapsamında diğer aşamalarda hazırlanan ve test edilen karışımlara kıyasla daha büyük ölçekte ağırlık kaybını işaret etmektedir. Bu süreden sonra, genleşmelerin artışına paralel olarak ağırlık değerleri tekrar artmaya başlasa da, B/LA ve B/MA karışımlarında ilk 52 haftalık, B/HA karışımında ise ilk 26 haftalık periyotta, ilk ağırlık değerine oranlayarak bulunan net ağırlık değişimi açısından pozitif sonuçlar elde edilmemiştir.



Şekil 5.25 B/HA, B/LA ve B/MA karışımlarının a) AAR-3 deneyinde 38°C’de ve b) AAR-4 deneyinde 60°C’de ağırlık değişimi-zaman grafikleri.

Sonuçlara göre, özellikle hafif agregalar kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, agregaların doygunluk durumuna da bağlı olarak beton prizmaların kurumaya ya da ağırlık kaybetmeye yatkın olabileceği görülmüştür. Bu çalışmada uygulandığı gibi bu tip boşluklu agregaları doymuş veya ıslak durumdayken karışıma eklemenin aşırı miktarda kendiliğinden kuruma oluşmasını önleme açısından kritik olduğu belirtilebilir (Lindgård et al., 2012). Ayrıca AAR-3 ve AAR-4 beton prizma deneylerinde karışımlar için elde edilen ağırlık kaybı değerlerinin %0,5-0,6’yı geçmesi durumunda deney sonuçlarının

geçersiz sayılması ve her genleşme okumasında, kapların alt kısımlarında yer alan suyun yeterli seviyede olup olmadığının dikkatlice kontrolü uygulanması gereken yaklaşımlardır (Lindgård et al., 2008).

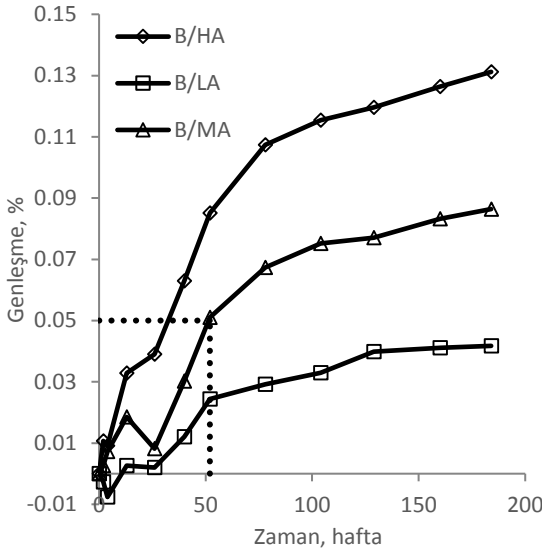
Çizelge 5.13'te karışım oranları verilen diğer karışımlar olan ve hem ince hem de iri agrega olarak pomza içeren P/HA, P/LA ve P/MA karışımları ise uzatılan deney sürelerinde dahi hiç genleşme göstermemişlerdir. Harç karışımlar üzerinde gerçekleştirilen ilk aşama çalışmalarında pomza agregasında reaktivite potansiyeli görülmesine rağmen, bu hafif agregayla üretilen beton prizmaların ne 38°C'de ne de 60°C'de genleşme göstermemesi, sonuçların birbiriyle uyumsuz çıkması olarak değerlendirilebilir. Ancak iri pomza agregasının, ince boyutlu tanelere kıyasla daha boşluklu olan yapısının, beton prizmalarda oluşan ASR ürünlerine genleşme yaratmadan yerleşebileceği alan yaratmasını beklemek de olasıdır.

Bu aşamada ek olarak araştırılan bir diğer konu ise hafif betonlarda dizayn işlemi gerçekleştirilirken iri agrega/ince agrega oranına dair ağırlıkça veya hacimce hesap yapmanın sonuçlar üzerinde oynayacağı rolün belirlenmesidir. Bu konuyu araştırma fikri, standartlar için hazırlanan metinde hafif (veya ağır) agregalar için özel bir ifade bulunmaması ve genel bir ifade olarak sadece iri agrega/ince agrega oranının ağırlıkça 1,5 olmasının belirtilmesi üzerine doğmuştur. Yukarıda tartışılan deney sonuçları ile ilişkili olan karışım oranları (Çizelge 5.13) elde edilirken bu oran hacimce uygulanmıştır. Aşağıda yer alan Çizelge 5.14'te ise bu oran ağırlıkça uygulanarak dizayn edilen karışımlardaki malzeme oranları görülmektedir.

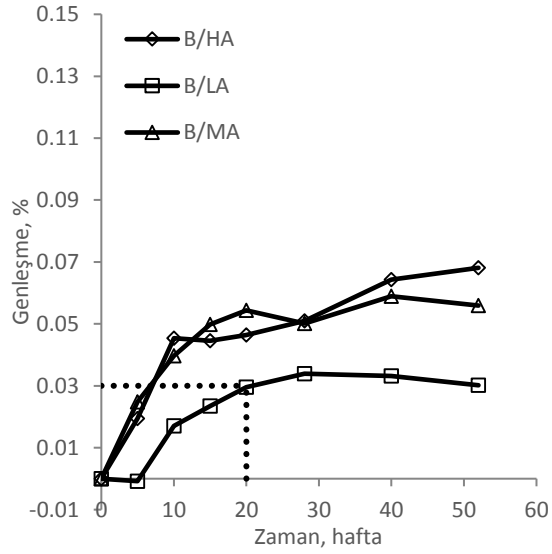
Çizelge 5.14 Pomza agregası içeren karışımlarda malzeme oranları (kg/m³) – ağırlıkça dizayn.

	P/HA-A	P/LA-A	P/MA-A	B/HA-A	B/LA-A	B/MA-A
Yüksek alkalili (HA) çimento	440	0	220	440	0	220
Düşük alkalili (LA) çimento	0	440	220	0	440	220
Su	220	220	220	220	220	220
0/4 bazalt	0	0	0	303	304	304
0/4 pomza	239	239	239	0	0	0
4/8 pomza	179	180	180	227	228	228
8/16 pomza	179	180	180	227	228	228
TOPLAM	1257	1259	1259	1417	1420	1420
Alkali miktarı (kg/m ³)	4,60	2,79	3,69	4,60	2,79	3,69
Alkali miktarı (bağlayıcının %'si)	1,04	0,63	0,84	1,04	0,63	0,84

Ağırlık esasına göre dizayn edilen karışımlar arasından B/HA-A, B/LA-A ve B/MA-A karışımlarının 38°C ve 60°C'deki genleşme-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.26a ve 5.26b'de sunulmuştur. Bu eğriler, daha önce Şekil 5.24'te hacim esasına göre dizayn edilen karışımlara dair grafiklerle kıyaslandığında, gradasyonlardaki farklılıklara bağlı olarak genleşme mertebelerinde yer yer farklılıklar göze çarpmaktadır. Ancak hacim ya da ağırlık hesabına göre dizayn yapıldığında genleşme eğilimlerinde genel olarak önemli bir değişiklik oluşmadığı görülmüştür. Karışımların nihai genleşmelerinde oluşan farklılıklar 38°C'de %3-23, 60°C'de ise %7-11 aralığında hesaplanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 5.26 B/HA, B/LA ve B/MA karışımlarının (ağırlıkça dizayn) a) AAR-3 deneyinde 38°C'de ve b) AAR-4 deneyinde 60°C'de genleşme-zaman grafikleri.

Hesap yönteminin farklılığının yarattığı sonuçlarla ilgili üzerinde durulacak olan ilk konu, bazalt ve pomza agregasını bünyesinde birlikte içeren bu karışımlarda, hacim esasına göre dizayn yapıldığında yaklaşık olarak 400 kg/m³ dolayında fazladan ince bazalt agregası kullanıldığıdır. Oldukça reaktif olduğu bilinen bu bileşenin miktarındaki önemli farklılık, genleşmelerde oluşan değişime yansımamıştır. Bu durum, ASR etkisi söz konusu olduğunda reaktif bileşenin miktarı arttıkça genleşmelerde her zaman artış oluşmayabileceğini gözler önüne sermektedir. İkinci önemli konu ise standarttaki gradasyon gereksinimi olan iri agreg/ince agreg oranı = 1,5 koşulu ağırlıkça uygulandığında, iri agreg olarak pomza ve ince agreg olarak bazalt içeren karışımlarda pomzanın düşük özgül ağırlığı nedeniyle karışımdaki iri agreg:ince agreg hacmi = 82:18 olacak şekilde çok arttığıdır. Bu çarpıcı değişim, bu çalışmada, genleşme sonuçlarında önemli bir farklılık oluşturmamış olsa da numunelerin ağırlıklarında daha

büyük değişimler gözlemlenmiştir. Agrega fazının çok büyük bir bölümünün boşluklu yapıdaki hafif agregalardan oluşması, 38°C’de ilk 4 haftada %1,48-1,95 aralığında ağırlık kayıplarına yol açmıştır. 60°C’de ilk 5 haftada ölçülen ağırlık kayıpları ise benzer şekilde %1,55-1,91’dir. Bu süre zarflarından sonra ağırlık değerlerinde genel olarak artışlar oluşsa da hesaplanan net ağırlık değişimleri her iki sıcaklıkta da hiçbir yaşta pozitif değerler almamıştır. Hem hafif agregaların düşük özgül ağırlıkları, hem de deneylerde elde edilen ağırlık kayıplarından yola çıkarak hacimce hesap yönteminin daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

5.4 Özel Betonların AAR Performansı

5.4.1 Kendiliğinden yerleşen betonların reaktivitesi

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımlar, bazalt tozu, kireçtaşı tozu ve uçucu kül olmak üzere üç farklı toz malzeme ile hazırlanmıştır. Bunun yanında iki farklı su/toz oranında (0,34 ve 0,31) dizayn edilen betonlar, akışkanlaştırıcı miktarı ayarlanarak iki farklı yayılma çapına (72-75 cm ve 65-68 cm) sahip olacak şekilde üretilmiştir. Dolayısıyla toplamda 12 adet KYB karışımı oluşturulmuştur. Çizelge 5.15’ten görüldüğü gibi karışım isimlerindeki BP, LP ve FA kodlamaları sırasıyla bazalt tozu, kireçtaşı tozu ve uçucu külü, bu kodların yanında bulunan sayılar ise su/toz oranlarını simgelemektedir. Yayılma çapının ASR genleşmeleri üzerine önemli bir etkisi tespit edilmediğinden bu parametre çıkartılmış ve 6 adet karışım üzerinden grafikler oluşturulmuştur.

Çizelge 5.15 Hazırlanan KYB karışımlarının malzeme oranları ve kodlamaları.

	BP-34	BP-31	LP-34	LP-31	FA-34	FA-31
Yüksek alkalili (HA) çimento, kg/m ³	470	470	470	470	470	470
Su, kg/m ³	235	235	235	235	235	235
0,125/4 mm bazalt, kg/m ³	780	753	777	749	769	739
4/16 mm bazalt, kg/m ³	651	628	647	622	640	617
Bazalt tozu, kg/m ³	230	280	-	-	-	-
Kireçtaşı tozu, kg/m ³	-	-	230	280	-	-
Uçucu kül, kg/m ³	-	-	-	-	230	280
NaOH, kg/m ³	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
Su azaltıcı katkı, kg/m ³	13,8	12,8	13,2	10,2	13,8	12,1
s/ç*, ağırlıkça	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
s/t**, ağırlıkça	0,34	0,31	0,34	0,31	0,34	0,31
s/t**, hacimce	1,00	0,93	0,99	0,92	0,97	0,90

*s/ç: su/çimento oranı, **s/t: su/toz oranı

KYB karışımlarda çimento içeriği, su içeriği, ince agrega/iri agrega oranı ve yayılma çapı değerleri sabit tutulmuştur. EFNARC (Özel Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Avrupa Federasyonu, 2005) tarafından önerilen KYB için su/toz oranının hacimce 0,85-1,10 arasında kalması koşuluna bağlı olarak tezde bu oran 0,90-1,00 arasında değişen değerler almıştır. Su/toz oranının ağırlıkça 0,34 ve 0,31 olduğu belirtilen karışımlardaki toz madde miktarları sırasıyla 700 ve 750 kg/m³'tür.

Yeterli yayılmaya sahip ve segregasyon belirtisi göstermeyen karışımlar üretebilmek ve karışım oranlarını kesinleştirmek için çok fazla sayıda deneme dökümü yapılmıştır. Tezin önceki safhalarında özellikle “Kontrol” kodlarıyla üretilen standart AAR-3 ve AAR-4 karışımlarının beton dizaynına kıyasla KYB karışımlarda zorunlu kalınarak önemli farklar uygulanmıştır. Bu farklar arasında KYB’lerde çimento içeriğinin 470 kg/m³’e çıkartılması, maksimum agrega boyutunun 16 mm’ye düşürülmesi ve agrega gradasyonunda değişikliğe gidilerek kum ile filler miktarlarının önemli ölçüde artırılması yer almaktadır. Su/çimento oranları ise önceki aşamalarda olduğu gibi 0,5 olarak sabit tutulmuştur. Ancak, FA-34 ve FA-31 karışımlarında sırasıyla 230 ve 280 kg/m³ uçucu kül kullanılmasıyla bu karışımların su/bağlayıcı oranları, su/toz oranlarına eşit düzeye (FA-34 için 0,34 ve FA-31 için 0,31) gelmiştir. Ayrıca tüm KYB karışımların alkali içeriği, NaOH ilavesi ile çimento ağırlığının %1,25’ine yükseltilmiştir.

KYB’lerde kullanılan bazalt tozu, 0/4 mm ince bazalt agregasının 0,125 mm elekten kuru olarak elenmesiyle hazırlanmıştır. Filler boyutundaki kireçtaşı tozu İzmir kaynaklı olup sadece bu aşamadaki deneyler için temin edilmiştir. Uçucu kül ise daha önceki kısımlarda bahsedildiği gibi C sınıfı olup Çayırhan Termik Santrali’nden getirtilmiştir. Toz malzemelerin fiziksel özellikleri Çizelge 5.16’da yer almaktadır.

Çizelge 5.16 Toz malzemelerin fiziksel özellikleri.

	Çimento	Kireçtaşı tozu	Uçucu kül	Bazalt tozu
Özgül ağırlık	3,08	2,71	2,66	2,79
Blaine inceliği, cm ² /g	3960	3780	2980	1040
0,090 mm üzerinde kalan (%)	-	5,3	6,1	15,6
0,045 mm üzerinde kalan (%)	-	16,2	27,6	56,0
0,032 mm üzerinde kalan (%)	-	24,5	40,1	69,5

Karışımlar üretildikten hemen sonra taze halde yayılma çapı, 50 cm’lik çapa yayılma süresi (T₅₀), V-hunisi akış süresi, L-kutusunda 20 cm (T₂₀) ve 40 cm’lik (T₄₀) mesafelere akma süresi ile yine L-kutusunun yatay kesiminin son ve baş kısımlarındaki

yüksekliklerin oranı (H_2/H_1) ölçülmüştür (EFNARC, 2005). Elde edilen veriler toplu olarak Çizelge 5.17’de sunulmuştur.

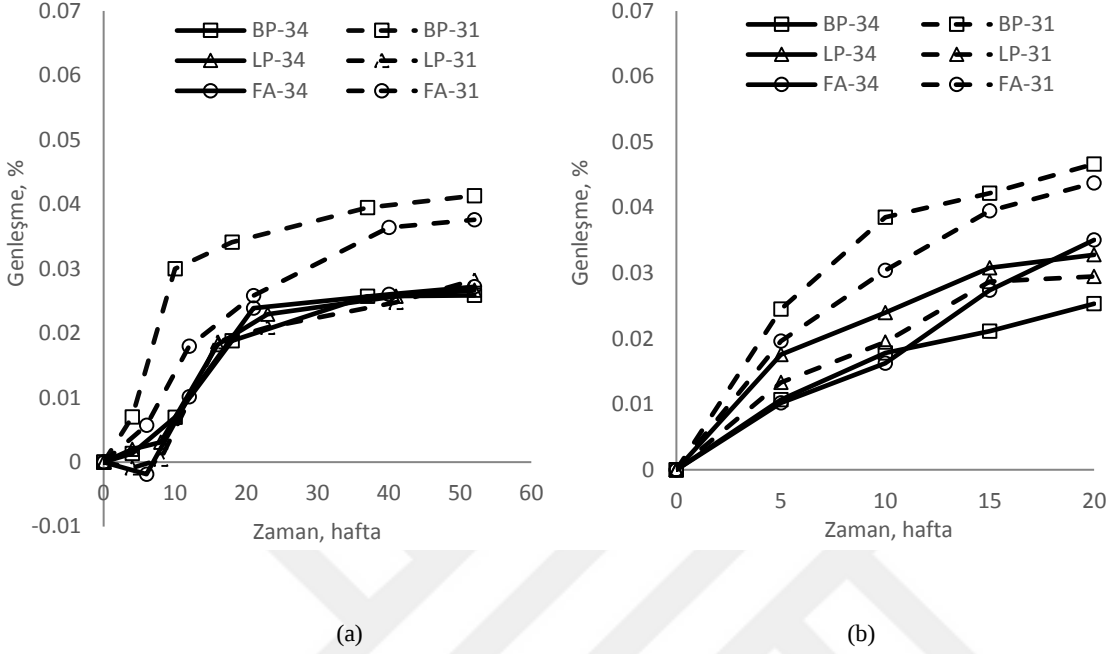
Çizelge 5.17 Hazırlanan KYB karışımlarının taze hal özellikleri.

	BP-34	BP-31	LP-34	LP-31	FA-34	FA-31
Yayılma deneyi;						
Yayılma çapı (mm)	750	745	745	750	735	750
T ₅₀ süresi (s)	1,5	3,1	1,2	3,0	1,8	3,1
L-kutusu deneyi;						
T ₂₀ süresi (s)	0,7	1,1	2,7	2,1	2,5	1,4
T ₄₀ süresi (s)	1,3	3,7	3,3	8,6	3,2	3,7
H ₂ /H ₁	0,95	0,95	0,85	0,79	0,91	0,90
V-hunisi deneyi;						
V-hunisi akış süresi (s)	7,5	7	14,4	33	25	11

Viskozite ile ilişkilendirilebilecek ölçümlerden olan T₅₀ yayılma süresi, toz malzeme tipi fark etmeksizin su/toz oranı azaldıkça akış süresinin uzadığını göstermiştir. EFNARC tarafından T₅₀ süresinin 2-5 s arasında olması önerilmektedir. Tüm karışımlar için üst sınır olan 5 s’den daha kısa akış süreleri elde edilmiştir. Fakat su/toz oranı 0,34 olan karışımlarda yayılma, alt sınır olan 2 s’den daha kısa sürede tamamlanmıştır. Bu durum, karışımın kohezifliğinde yetersizlik olarak yorumlanabilir; fakat, ne diğer deneyler sırasında ne de karışımlara taze halde uygulanan diğer işlemlerde böyle bir durum gözlemlenmemiştir. Bazalt tozunun kullanıldığı karışımlarda V-hunisi akış sürelerinde belirgin düşüşler oluşmuştur. LP-31 karışımında ise hem V-hunisi hem de L-kutusu deneyleri sırasında ciddi gecikme yaşanmıştır. İnceliği yüksek olan kireçtaşı tozunun karışıma eklenmesiyle yüzey alanında ve içsel sürtünmede artış ve bunun sonucunda yüksek viskozite nedeniyle geçiş ve doldurma yeteneğinde azalma meydana gelmiştir. L-kutusu deneyinde akış tamamlandıktan sonra ölçülen H₂/H₁ oranının da LP-31 karışımında en düşük değeri alması, bu durumun göstergesidir. Diğer tüm karışımlar ise H₂/H₁ oranının 0,80’den büyük olması koşulunu rahatlıkla sağlamıştır.

KYB karışımların RILEM AAR-3 (38°C) ve AAR-4 (60°C) deneylerine tabi tutulması sonucu oluşan ASR genleşmeleri sırasıyla Şekil 5.27a ve 5.27b’de gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde bir istisna dışında (BP-34 karışımı) karışımların 60°C’de 20 haftalık genleşme değerleri, 38°C’deki 52 haftalık genleşme değerlerinden hep yüksek çıkmıştır. Bu durum sıcaklığın yükselmesinin bağıl difüzyon katsayısını yükseltip suyun betona nüfuzunu kolaylaştırmasına ve böylelikle bağıl nemi

yükseltmesine bağlanabilir (Lindgård et al., 2013b). Karışımların 60°C’de 20 haftalık genleşme değerlerinin 38°C’deki 52 haftalık genleşme değerlerine oranı 0,98-1,29 arasında değişen değerler almıştır.



Şekil 5.27 a) 38°C sıcaklığa ve b) 60°C sıcaklığa maruz kalan KYB karışımların genleşme-zaman grafikleri.

Genleşme-zaman grafiklerinin genel eğilimi daha yüksek reaktiviteye sahip olan karışımların 38°C’ye maruz kalması durumunda reaksiyon hızının ilk 10 haftada daha yüksek olduğunu göstermektedir (Şekil 5.27a’da BP-31 ve FA-31). Diğer bir taraftan, Şekil 5.27a’ya göre daha düşük reaktiviteye sahip KYB karışımların reaksiyon hızı ise ilk 16-20 haftadan sonra düşmektedir. AAR-4 deneylerinin gerçekleşmesi ise genel olarak ilk 5 haftalık maruziyet süresinde daha yüksek reaksiyon hızı yaratmıştır (Şekil 5.27b).

Tezde daha önceki başlıklar altında bahsedilen genleşme limitleri göz önünde bulundurulduğunda, AAR-3 deneylerinin tamamlandığı süre sonunda karışımlardan hiçbiri reaktivite limitini aşmamıştır. Fakat altı karışımdan dördünün nihai genleşmesi AAR-4 deneyindeki %0,03’lük limiti aştığından reaktif karışım olarak nitelendirilmesi mümkündür. Genleşme limitlerine yakın ve limiti aşan karışımların gerekli önlemler alınmadan saha betonlarında uygulanması ASR yönünden büyük sıkıntılar doğurabilir.

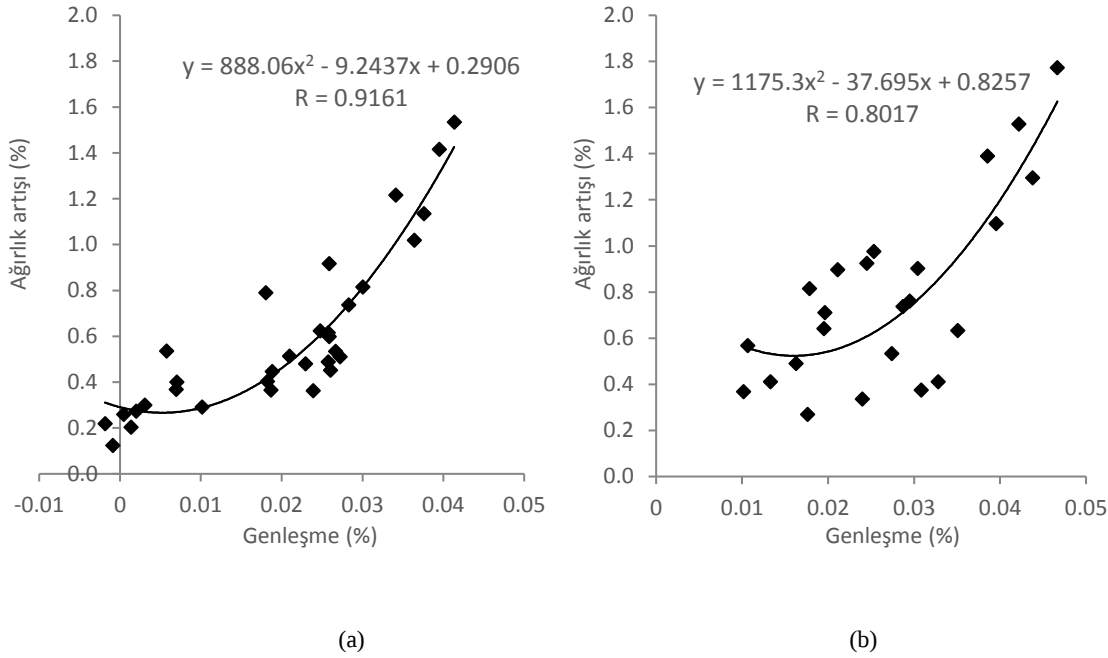
Çalışmada kullanılan filler malzemelerin ASR üzerine etkisi değerlendirildiğinde, en yüksek genleşmelerin her iki test yönteminde de bünyesinde en fazla miktarda bazalt agregası bulunduran karışım olan BP-31’e ait olduğu görülmektedir. BP-34 karışımı ile

kıyaslandığında, BP-31 karışımına ekstradan 50 kg/m^3 daha bazalt tozu katılması, AAR-3 ve AAR-4 deneylerinde elde edilen nihai genleşme değerlerinde sırasıyla %59 ve %84 artışa yol açmıştır. Sonuç olarak, bazalt agregasının filler kısmında bulunan tanelerin de belli bir ölçüde reaksiyona girerek ASR hızını ve genleşme miktarını arttırdığı kanısına varılmıştır.

Kalker tozu içeren KYB'lerde ise, bazalt tozlu karışımların aksine karışımındaki reaktif nitelikte olmayan kalker tozu miktarının artışının genleşmeler üzerinde önemli düzeyde bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bu durum, Şekil 5.27a'daki LP-34 ve LP-31 karışımlarının genleşme-zaman eğrilerinin birbirine oldukça yakın çıkmasından anlaşılabılır. Numunelerin 60°C 'de saklanması ise LP-31 karışımının genleşmesinin LP-34'ün genleşmesinden az da olsa daha düşük çıkmasına neden olmuştur (Şekil 5.27b). İki karışım arasındaki kireçtaşı tozu miktarı farkı çok yüksek olmasa da, kullanılan filler malzemeler arasında inceliği en yüksek olan kireçtaşı tozunun miktarının artmasının, suyun betona girişini zorlaştırması olasıdır.

Deney sonuçları arasında en ilgi çekici olanı diğer KYB karışımlarındaki filler miktarlarına eşit miktarda uçucu kül içeren karışımların 38°C ve 60°C 'deki performanslarıdır. Uçucu kül kullanıldığında çimento ile ikame edilmesi durumunda alkali seviyesini düşürebilmektedir. Ayrıca uçucu kül varlığında oluşan puzolanik reaksiyon ürünlerinin sodyum ve potasyum iyonu bağlama yeteneği daha yüksek olduğundan yine boşluk çözeltisi alkalinitesi düşmektedir (Thomas et al., 2006; Shehata and Thomas, 2000). Bu faktörler uçucu külün ASR genleşmelerini azaltmasına yol açmaktadır. Fakat bazı durumlarda uçucu külün camsı fazında bağlı olan sodyum ve potasyum iyonları boşluk çözeltisine salınabilmektedir. Shehata ve Thomas'ın (2000) yaptığı çalışmada sabit bir uçucu kül ikame oranında uçucu külün kalsiyum oksit veya alkali oksit içeriği arttıkça ya da silis miktarı azaldıkça beton prizma genleşmelerinin arttığı açıklanmıştır. Çalışmada kullanılan uçucu külün salınabilir alkali miktarı ASTM C311-16 uyarınca %1,25 olarak tespit edilmiştir. Deneylerde herhangi bir ikame uygulanmayıp uçucu kül ilave bağlayıcı olarak kullanıldığından betonun alkali içeriği ciddi ölçüde artmıştır. Uçucu kül içermeyen karışımlarda Na_2O eşdeğeri $5,875 \text{ kg/m}^3$ seviyesindeyken FA-34 ve FA-31 karışımlarında bu miktar sırasıyla 8,75 ve $9,375 \text{ kg/m}^3$ 'e yükselmiştir. Tüm karışımlar arasında, en yüksek ikinci genleşmeler FA-31 karışımına aittir. FA-34 ve FA-31 karışımlarında uçucu külün ASR'yi önleyici mekanizmasına dair herhangi bir bulgu yoktur. Bu karışımlarda yüksek alkalinitenin yanı sıra, ilerideki paragraflarda değinileceği üzere, düşük geçirimsizlik nedeniyle alkali sızıntısı problemi en az düzeye indirgenmiş olduğundan beton içerisinde kalabilen alkalilerin daha fazla jel oluşumuna ve genleşmeye neden olduğu anlaşılmaktadır.

Deneylerde en yüksek genleşme gösteren karışımlar olan BP-31 ve FA-31 için numunelerin ortalama ağırlık artışı değerleri de her iki deney yönteminde de diğer karışımlardan daha yüksek çıkmıştır. BP-31 karışımının nihai ortalama ağırlık artışı 38°C’de %1,53 ve 60°C’de %1,77 olarak belirlenmiştir. FA-31 karışımı için ise nihai ortalama ağırlık artışı 38°C’de %1,13 ve 60°C’de %1,30’dur. Tüm KYB karışımlarının farklı yaşlarda elde edilen genleşme değerleri, karşılık gelen ağırlık artışı değerleri ile birlikte Şekil 5.28a ve b’de verilmiştir. Elde edilen korelasyonlar oldukça iyi düzeydedir ve daha yüksek genleşme seviyelerinde ağırlık artışı değerleri daha belirgin bir hızda artmaktadır.



Şekil 5.28 a) 38°C’de ve b) 60°C’de kürlenmiş KYB karışımları için genleşme-ağırlık artışı ilişkisi.

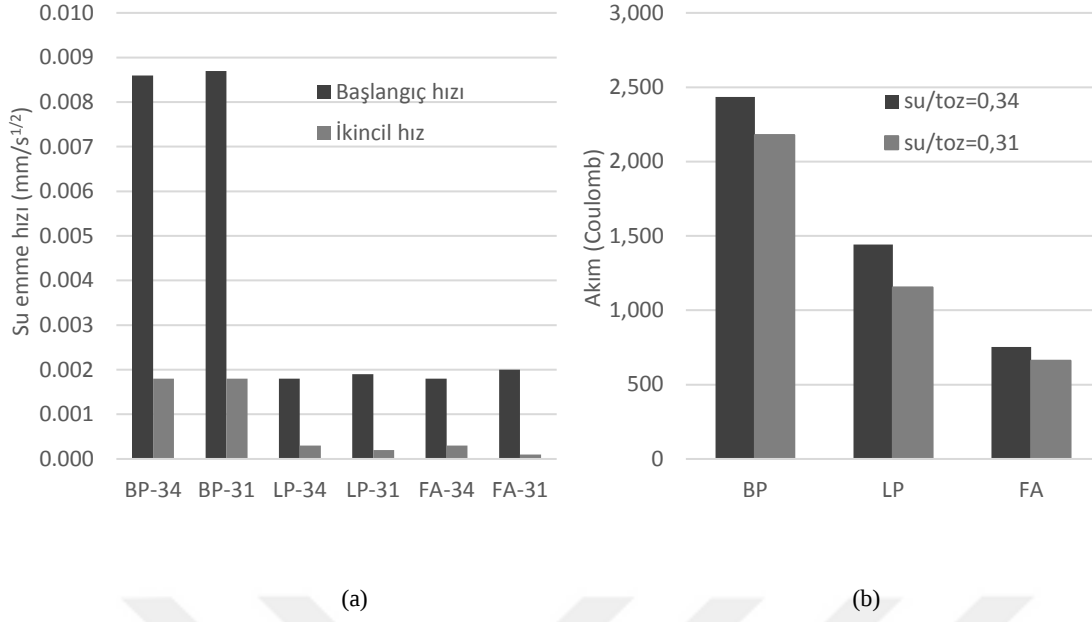
Son olarak KYB karışımları için gerçekleştirilen alkali sızıntısı ölçümlerinin sonuçları Çizelge 5.18’de sunulmuştur. Çizelge 5.18 incelendiğinde göze çarpan ilk noktalardan birisi, KYB karışımlarında yoğun hamur fazı ve düşük geçirimsizlik sayesinde normal betonlara (Kontrol ve Kontrol+) kıyasla alkali sızıntısının daha düşük çıkmasıdır. Bununla birlikte bazalt tozunun diğer iki toz malzeme kadar etkin olmadığı görülmektedir. AAR-4 deneyinde sıcaklığın daha yüksek olmasının yine alkali sızıntısı miktarlarını arttırdığı açıktır. Bir diğer nokta da uçucu küllerden olası bir alkali salınması yorumuna, Çizelge 5.18’deki sonuçlardan da varılabilmesidir. Alkali sızıntısının mg cinsinden ifade edildiği kolonlarda, uçucu kül içeren KYB’lerin kalker tozu içeren karışımlardan daha yüksek sızıntılara neden olması ilk bakışta beklenmeyen bir durumdur. Çünkü uçucu küllü karışımların yoğun yapısı nedeniyle geçirimsizliklerinin az olması beklenebilir. Ancak, alkali sızıntısı miktarında meydana gelen artışın kaynağı,

aslında uçucu küldeki alkaliler de dahil edilerek hesaplanan karışımın toplam alkali içeriğindeki artıştır. Bu değerlerden görüldüğü gibi, uçucu küllü ve kalker tozlu karışımlar karşılaştırıldığında, % cinsinden hesaplanan sayılara göre bu karışımların performansları benzerdir. Tablolarda ayrı ayrı verilmese de K^+ iyonunun Na^+ iyonuna kıyasla beton bünyesinden dışarıya hareketinin daha zor olduğu da elde edilen bulgulardandır.

Çizelge 5.18 Kontrol karışımları ile KYB’lerde AAR-3 ve AAR-4 deneyleri boyunca sızan toplam alkali miktarları.

	Bir prizmada deneyler öncesindeki alkali miktarı (g – Na_2O eşd.)	38°C’ye maruz kalma sonucunda 52 hafta sonundaki alkali sızıntısı (mg – Na_2O eşd.)	38°C’ye maruz kalma sonucunda 52 hafta sonundaki alkali kaybı (%)	60°C’ye maruz kalma sonucunda 20 hafta sonundaki alkali sızıntısı (mg – Na_2O eşd.)	60°C’ye maruz kalma sonucunda 20 hafta sonundaki alkali kaybı (%)
Kontrol	8,80	793,78	9,02	1640,33	18,64
Kontrol+	10,56	1263,86	11,97	1868,89	17,70
BP-34	9,42	786,40	8,35	1702,45	18,07
BP-31	9,42	682,65	7,25	1614,20	17,14
LP-34	9,42	579,45	6,15	1210,59	12,85
LP-31	9,42	547,42	5,81	1098,94	11,67
FA-34	14,03	702,84	5,01	1753,27	12,50
FA-31	15,03	654,57	4,36	1241,03	8,26

Karışımların geçiş özellikleri ile ilgili fikir sahibi olunması amacıyla, KYB’ler üretilirken alınan ilave numuneler üzerinde kılcal yolla su emme (ASTM C1585) ve klor iyon geçirgenliği (ASTM C1202) deneyleri de uygulanmış olup sonuçlar sırasıyla Şekil 5.29a ve 5.29b’de gösterilmiştir. Kılcallık deneyinde 100 mm ayrıtlı küp örnekler tercih edilirken, klor iyon geçirgenliği deneyinde ise 100x200 mm silindirlerden kesilen 100x50 mm boyutlu diskler kullanılmıştır. Her iki deney de 90 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bazalt tozunun daha iri tane boyutunun etkisiyle, doluluk oranı daha yüksek bir sistem oluşturmada ve dolayısıyla geçirimsizliği azaltmada diğer iki toz malzeme kadar başarı sağlayamadığı görülmektedir. Su/toz oranının kılcallık deneyi sonuçlarına belirgin bir etkisi görülmezken, klor iyon geçirimsizliği deneyinde toz içeriği arttıkça ölçülen akım değerlerinde azalmalar oluşmuştur.



Şekil 5.29 KYB karışımların a) kılcal yolla su emme ve b) klor iyon geçirirliliği davranışları.

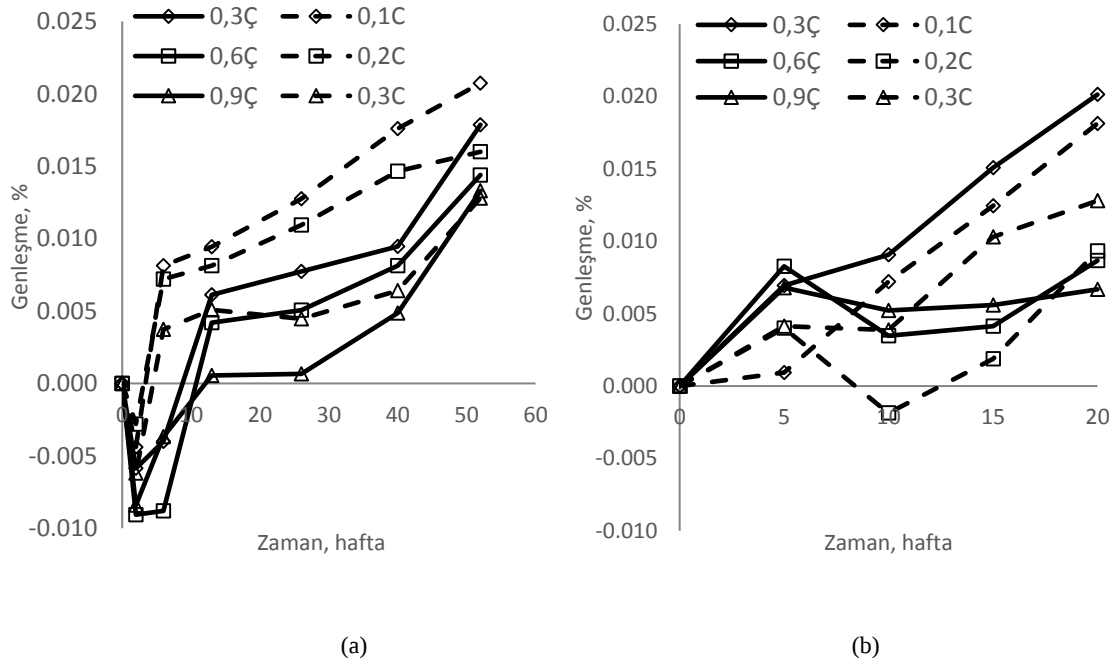
5.4.2 Lifli betonların reaktivitesi

Bu kapsamda çelik veya cam lif kullanılması genleşmeler üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çelik liflerin kullanım oranları toplam beton hacminin %0,3, 0,6 ve 0,9'u, cam liflerinki ise yine toplam beton hacminin %0,1, 0,2 ve 0,3'ü olarak seçilmiştir. Çizelge 5.19'daki malzeme oranlarında görüldüğü gibi karışım kodlarındaki sayılar lifin miktarını, "Ç" ve "C" harfleri ise sırasıyla çelik ve cam lifi simgelemektedir.

Çizelge 5.19 Lif içeren beton karışımların malzeme oranları (kg/m³).

	0,3Ç	0,6Ç	0,9Ç	0,1C	0,2C	0,3C
Yüksek alkalili (HA) çimento	440	440	440	440	440	440
Su	220	220	220	220	220	220
0/4 bazalt	696	696	696	696	696	696
4/16 bazalt	522	522	522	522	522	522
11,2/22,4 bazalt	522	522	522	522	522	522
Çelik lif	24	47	71	-	-	-
Cam lif	-	-	-	2,6	5,2	7,8
NaOH	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19
TOPLAM	2425	2448	2472	2404	2406	2409
Alkali miktarı (kg/m ³)	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
Alkali miktarı (bağlayıcının %'si)	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25

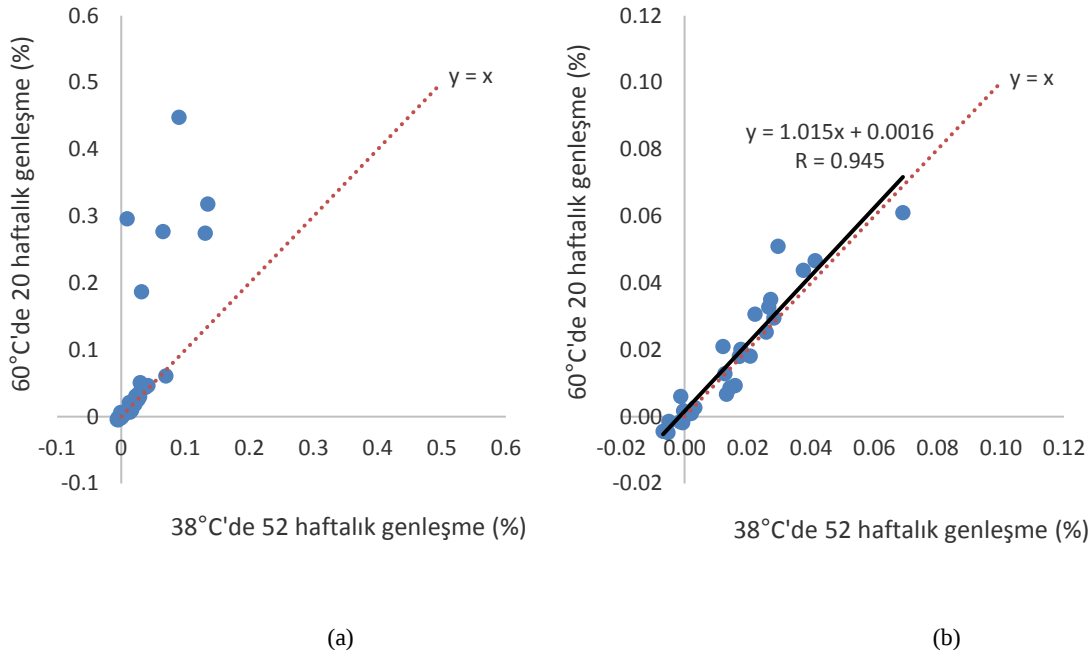
Lifli betonların 38°C ve 60°C sıcaklık seviyesi için elde edilen genleşme sonuçları sırasıyla Şekil 5.30a'da ve 5.30b'de verilmiştir. 38°C'de elde edilen sonuçlara göre 52 haftalık periyotta 0,1C ve 0,2C karışımlarının genleşme değerleri, diğer karışımlara kıyasla daha yüksek değerler almıştır. Yine en düşük çelik lif içeriğine sahip olan 0,3Ç karışımı da elde edilen nihai genleşme açısından ikinci en yüksek değere sahiptir. Daha yüksek lif içerikli 0,3C, 0,6Ç ve 0,9Ç karışımlarının ise nihai genleşmeleri birbirine yakın ve daha düşük çıkmıştır. 60°C'de oluşan sonuçlara göre ise lifli betonlar arasından en yüksek genleşme değerini en düşük çelik lif içeriğine sahip 0,3Ç karışımı vermiştir. Daha yüksek çelik lif içeriklerine sahip diğer iki karışımın son ölçüm tarihi olan 20. haftada genleşmelerinin 0,3Ç'nin genleşmesinin yarısından da az olması, çelik lifin genleşmeyi önleyici mekanizmasına işaret etmektedir. Benzer şekilde cam lif içeriği daha yüksek olan 0,2C ve 0,3C karışımlarının da 0,1C'ye kıyasla daha düşük genleşme üretmesi, cam liflerin de genleşmeyi azaltmada etkin olabildiğini göstermiştir. Cam liflerin genleşmeleri artırıcı herhangi bir etkisine rastlanmaması ise cam liflere üretim esnasında özel bir koruyucu yüzey işlemi uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Lifli betonların performans deneylerinde, liflerin saha betonlarında kullanılacak olan hacimsel oranlarda test edilmesi önerilmektedir.



Şekil 5.30 a) 38°C sıcaklığa ve b) 60°C sıcaklığa maruz kalan lifli betonların genleşme-zaman grafikleri.

“Bulgular ve Tartışma” bölümünde bu aşamaya kadar verilen tüm sonuçlar AAR-3 ve AAR-4 beton prizma deneylerinin uygulandığı karışımlara ait olup bundan sonraki aşamalar dayanıklılık etkilerinin incelendiği çoklu deney yöntemine, maruziyet sahalarından alınan verilere ve modelleme çalışmalarına ayrılacaktır. Sonraki aşamalara

geçmeden önce, AAR-3 ve AAR-4 deneylerinin standartta öngörülen sürelerinin sonunda elde edilen genleşme değerlerinin olası bir korelasyonu araştırılmış ve tüm karışımlardan elde edilen sonuçlar Şekil 5.31a’da sunulmuştur. Şekil 5.31a’ya göre reaktif niteliği yüksek olan cam agregası ile elde edilen sonuçların temsil ettiği altı adet nokta, her iki deneyden eşit genleşme değeri elde edilmesi durumunu gösteren $y=x$ doğrusuna uzak kalmaktadır. 60°C’de çok daha yüksek genleşmeler elde edilmesinde, daha önceki bölümlerde açıklandığı üzere, sıcaklığın yükselmesiyle birlikte cam agregasından salınan alkali miktarında artış görülmesinin rolü bulunmaktadır. Cam agregası içeren altı karışım hariç tutularak diğer tüm veriler grafik halinde verildiğinde ise Şekil 5.31b’de görüldüğü gibi hem korelasyon daha güçlü hale gelmekte hem de her iki deneyden elde edilen nihai veriler birbirine önemli ölçüde yaklaşmaktadır.



Şekil 5.31 AAR-3 ve AAR-4 deneylerinde elde edilen nihai veriler arasında a) tüm karışımlar için ve b) cam agregalı karışımlar hariç tutularak elde edilen korelasyonlar.

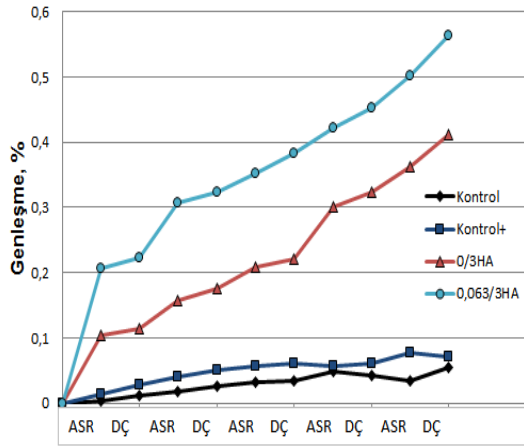
5.5 Çoklu Çevre Koşullarının Betonların AAR Performansına Etkisi

Alkali-silis reaksiyonunun donma-çözülme ya da ıslanma-kuruma etkisi ile beraber gelişmesi konusunda yapılan çalışmalarda önceki aşamalardan seçilen 8 adet karışım deneylere tabi tutulmuştur. Bu karışımlar ilk aşamada hazırlanan ve agrega olarak sadece bazalt içeren Kontrol ve Kontrol+ karışımları, atık cam içeren ve oldukça reaktif nitelikli 0/3HA ve 0,063/3HA, bazalt tozu içerikli KYB karışımları olan BP-34 ve BP-31'in yanı sıra uçucu küllü KYB'ler olan FA-34 ve FA-31 karışımlarıdır.

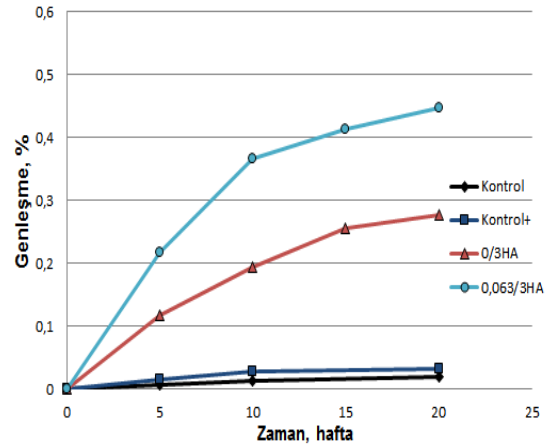
5.5.1 AAR ve donma-çözülme etkilerinin birlikte incelenmesi

Bölüm 4.2.4.1’de açıklandığı gibi karışımlara toplamda 20 hafta süren AAR-4 deneyi ve toplam 300 döngü boyunca donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Deneyler 4 hafta 60°C’ye maruziyetle başlamış, sonra 60 döngü donma-çözülme çevrimi uygulanmış ve ard arda gerçekleşen bu iki işlem 5 kez tekrarlanmıştır (Bkz Şekil 4.11). Deneyler boyunca prizmalarda boy değişimleri, hazırlanan ilave küplerde de ağırlık ve ultrases hızı değişimleri ölçülmüştür.

Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA için deney sonuçları Şekil 5.32a, 5.32b, 5.33a ve 5.33b’de sunulmuştur. Şekil 5.32a’da ASR ve donma-çözülme çevrimlerinin birlikte uygulanması sonucu oluşan genleşmeler görülürken, karşılaştırma amaçlı olarak sadece ASR uygulanan durumun hatırlanması amacıyla Şekil 5.32b’de bu karışımların AAR-4 deneyi sonuçları yer almaktadır. Şekil 5.33a ve 5.33b ise bu dört karışımın ASR ve donma-çözülme çevrimleri altında sırasıyla ağırlık ve ultrases hızı değişimlerine ayrılmıştır. Grafiklerde x-eksenlerindeki ASR kısaltması AAR-4 deneyinin, DÇ ifadesi ise donma-çözülme çevrimlerinin uygulandığı periyotları simgelemektedir.

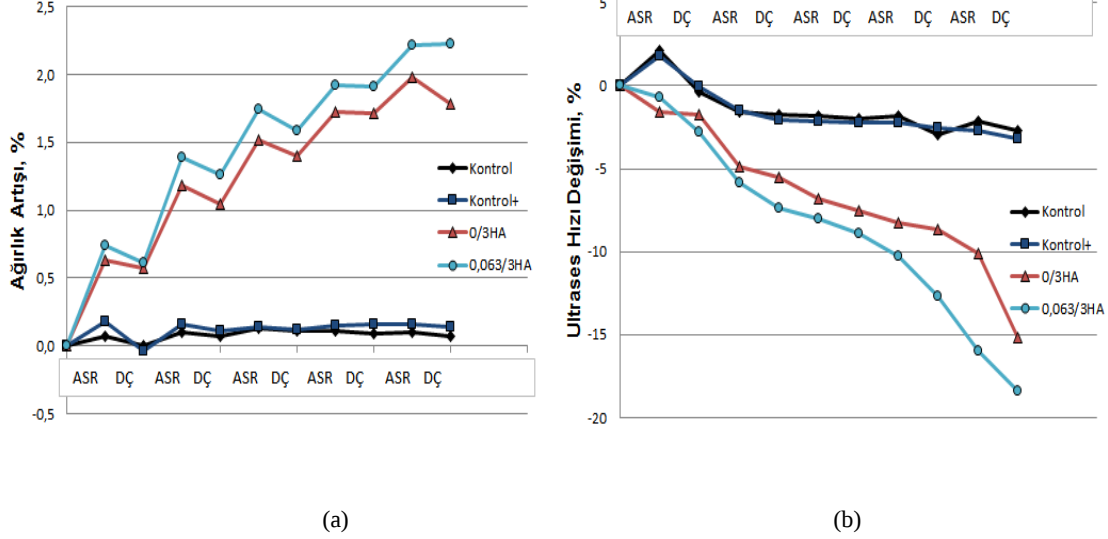


(a)



(b)

Şekil 5.32 a) Ard arda ASR etkisine ve donma-çözülme çevrimlerine, b) sadece ASR etkisine uğrayan Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarının genleşme davranışları.



Şekil 5.33 Ard arda ASR etkisine ve donma-çözülme çevrimlerine uğrayan Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarının a) ağırlık ve b) ultrases hızı değişimleri.

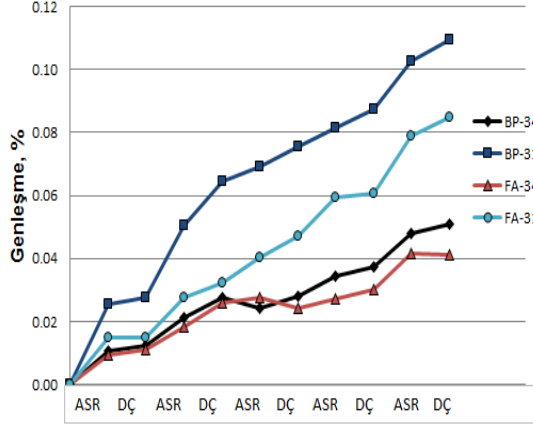
Şekil 5.32 ve 5.33’de yer alan dört grafik incelendiğinde, genleşme artışlarının özellikle ilk çevrimlerde daha çok ASR kaynaklı olduğu, donma-çözülmenin yarattığı etkilerin ilk aşamada genleşmelere değil, daha çok ağırlık ve ultrases hızı değişimlerine yansıdığı görülmüştür. Bu beklenen durum, betonun -20°C ’lere kadar doğrusal kısılma göstermesi ve birim deformasyon-sıcaklık davranışında histerisis oluşumuyla ilişkilidir. Geri dönüşü olmayan deformasyonlar ancak donma-çözülme çevrimleri ilerledikçe numunenin içyapısındaki hasarların artışıyla başlamaktadır (Bishnoi and Uomoto, 2008). Özellikle cam içeren karışımlar üzerinde görüldüğü gibi, donma-çözülme kaynaklı genleşmeler ilerleyen çevrimlerde artmaktadır. Bu davranışta numunenin hem ASR hem de donma-çözülme çevrimleri sırasında gördüğü hasarın rolü bulunmaktadır. Sonuç olarak, Şekil 5.32a ve 5.32b’nin karşılaştırılmasıyla anlaşılabacağı üzere incelenen tüm karışımlar için iki etkinin birbirinin peşi sıra yaratılmasıyla oluşan nihai genleşme seviyeleri, sadece ASR’nin neden olduğu genleşmelerden daha yüksek çıkmıştır.

ASR’nin gelişmesiyle birlikte oluşan hasar yapıları düşünüldüğünde çimento-agrega ara yüzeyinde başlayan reaksiyon sonucu geçiş bölgesinde ve agregada içerisinde oluşan çatlaklar daha sonra çimento hamuruna da uzanabilmektedir. Yine numunenin yüzeyinde de harita çatlaklarıyla karşılaşılabilir. Donma-çözülme etkileri ise, ileriki çevrimlerde hasar yeni başlarken yüzeyde çimento hamurunun ve bazı ince agregaların soyulmasına, daha ileri safhalarda ise iri agreganın da ayrılmasıyla ciddi parçalanmalara yol açmaktadır. Sonuç olarak ASR’ye maruziyet sonucunda hem oluşan jel ürününün bünyesine, hem de yer alan çatlaklara su girişiyle kütle değerlerinde artışlar gözlenmiştir. Şekil 5.33a incelendiğinde bu artışlar, cam içeren karışımlarda 60°C ’ye

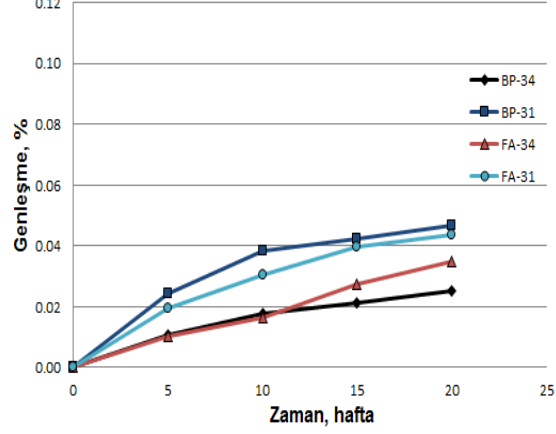
maruziyetin uygulandığı her aralıkta görülürken, reaktivite seviyesi düşük olan ve reaksiyon hızı da 10. haftadan sonra oldukça düşen Kontrol ve Kontrol+ karışımlarında sadece ilk ASR etkilerinde görülmüştür. Donma-çözülme etkileri sonucunda ise zaten ASR sonucu içyapısı hasar gören cam agregalı karışımlarda az da olsa soyulmalar da gözlemlenmiş ve kütle kaybı ilk aşamalardan itibaren başlamıştır. Kontrol ve Kontrol+ ise ASR nedeniyle çok hasar görmediğinden donma-çözülmeye direnci de nispeten yüksek kalmış ve numunelerden parça ayrılmalarına rastlanmamıştır.

ASR'nin ağırlık değerlerini arttırıcı, donma-çözülme etkilerinin ise genelde azaltıcı yönde olmak üzere birbirlerine ters etkileri bulunurken, numune yoğunluğu ve hasar derecesi ile ilişkili olan ultrases hızı (UPV) değerlerini her iki etki de genelde düşürmektedir. Ağırlık değişimi değerleri, hiçbir karışımda %2,5'i geçmezken, ultrases hızlarında cam agregalı karışımlarda oluşan %15-20'lere varan değişimler ise ciddi kayıplardır. Bu durum, hem cam agregasında ASR etkisi nedeniyle oluşan ciddi hasardan hem de bu etkinin donma-çözülme hasarlarını da tetiklemesinden kaynaklanmaktadır. İlave bir açıklama olarak da atık camların betonda özellikle tez kapsamında gerçekleştirildiği gibi ince agregaya yerine %100 ikame uygulayarak kullanılmasının ideal bir uygulama olamayacağı getirilebilir. Her ne kadar ince agregaya boyutuna kırılırken bir miktar yüzey yapısı değişse de, cam tanelerinin diğer agregalara kıyasla pürüzsüz yüzey yapısı, çimento hamuru ile olan bağını olumsuz etkilemektedir.

KYB karışımlar olan BP-34, BP-31, FA-34 ve FA-31 için elde edilen deney sonuçları Şekil 5.34a, 5.34b, 5.35a ve 5.35b'de sunulmuştur. Şekil 5.34a'da ASR ve donma-çözülme çevrimlerinin birlikte uygulanması sonucu, Şekil 5.34b'de ise bu karışımlara sadece AAR-4 deneyi uygulanması sonucu oluşan genleşmeler yer almaktadır. Şekil 5.35a ve 5.35b ise bu dört karışımın ASR ve donma-çözülme çevrimleri altında sırasıyla ağırlık ve ultrases hızı değişimlerini sunmaktadır.

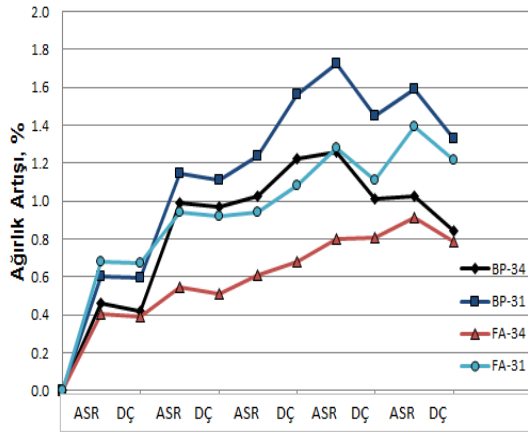


(a)

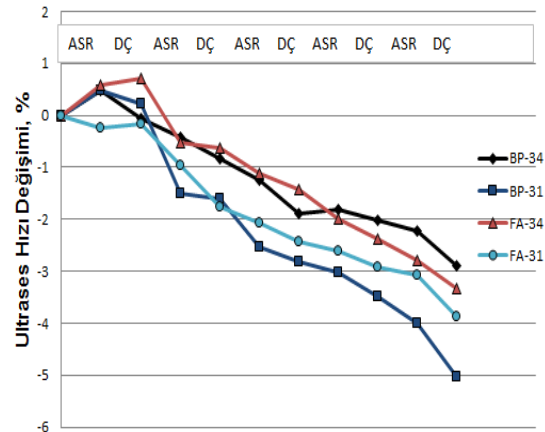


(b)

Şekil 5.34 a) Ard arda ASR etkisine ve donma-çözülme çevrimlerine, b) sadece ASR etkisine uğrayan KYB karışımlarının genleşme davranışları.



(a)



(b)

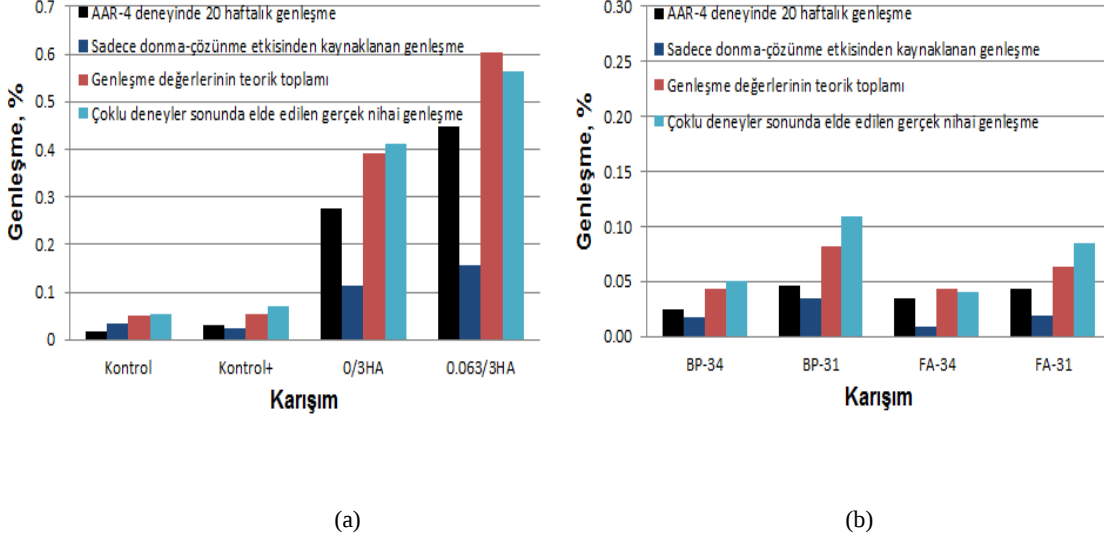
Şekil 5.35 Ard arda ASR etkisine ve donma-çözülme çevrimlerine uğrayan KYB karışımlarının a) ağırlık ve b) ultrases hızı değişimleri.

Açıklamalara başlamadan önce ilk olarak Şekil 5.34 ve 5.35'teki grafiklerin y-eksenlerinin ölçekleriyle Şekil 5.32 ve 5.33'tekilerin ölçekleri arasında farklılıklar olduğunu hatırlatmakta fayda vardır. Şekil 5.32 ile 5.34, Şekil 5.33 ile de 5.35 arasında karşılaştırma yapmak mümkündür, fakat sayısal değerlere de dikkat edilmesi sağlıklı olacaktır. KYB karışımları için deney sonuçları incelendiğinde de yukarıda diğer dört karışım için anlatılanlarla benzer etkiler görülmüştür. Örneğin ASR ve donma-çözülme çevrimleri birlikte uygulandığında sadece ASR etkisine kıyasla nihai genleşmeler yine artmıştır. Reaktivite seviyesi daha yüksek olan BP-31 ve FA-31 karışımlarında nihai

genleşme seviyesi ve ultrases hızı kaybı da diğer iki karışımdan daha yüksek çıkmıştır. KYB’lerde ASR nedeniyle oluşan çatlakların içi, muhtemelen donma-çözülme çevrimleri sırasında su ile dolduğundan bazı çevrimler sırasında ağırlık değerlerinde artışlar görülmüştür.

Genel olarak düşünüldüğünde KYB karışımların yüksek toz malzeme miktarları ve yoğun iç yapısı sayesinde suya karşı daha az geçirimli olması ve böylelikle doygunluk derecesindeki düşüşe bağlı olarak donma-çözülme çevrimlerinden önemli ölçüde etkilenmemesi beklenebilir. Fakat gerçekleştirilen döngülerde donma-çözülme çevrimlerinin, 60°C’ye ve yüksek bağıl neme maruziyet sonrasında gerçekleştirildiğini unutmamak gerekir. Daha önceki yorumlarda da bahsedildiği gibi sıcaklığın bu seviyelere kadar yükselmesi, bağıl difüzyon katsayısını yükseltip suyun betona nüfuzunu kolaylaştırmakta ve böylelikle bağıl nemi yükseltmektedir (Lindgård et al., 2013b). O halde bazı durumlarda KYB karışımlarının ultrases hızlarındaki azalmanın normal betonlar olan Kontrol ve Kontrol+’ya ait değerleri dahi aşmasını, artan hamur hacmine ve düşük boşluk oranına bağlamak mümkündür. Bağlayıcı içeriği ve de dayanımı daha yüksek olan betonlarda donma-çözülme sırasında oluşan genleşmelerin yarattığı basınç sönümlenememekte ve hasar artabilmektedir (Uysal and Akyuncu, 2012).

Bu aşamada ayrıca her bir karışım için, sadece ASR etkisinin incelendiği AAR-4 deneyinde elde edilen 20 haftalık genleşme değerleri ile çoklu deneylerde sadece donma-çözülme çevrimlerinin neden olduğu genleşme değerlerinin toplamı birbirine eklenerek teorik bir toplam genleşme değeri elde edilmiştir. Bu değer, Şekil 5.36a ve 5.36b’de verilen sütun grafiklerde, ASR ve donma-çözülme çevrimlerinin birlikte gerçekleştirildiği deneylerin bitimiyle oluşan nihai gerçek genleşme değeri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.36a, Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarına dair verileri içerirken, KYB karışımları için elde edilen sonuçlar ise Şekil 5.36b’de gösterilmiştir. Şekil 5.36a’daki sonuçlara göre, cam agregalı karışımlarda ASR’nin oldukça hızlı ve yüksek mertebede genleşmelere neden olması, donma-çözülme etkisini de tetikleyici yönde rol oynamıştır. Sadece donma-çözülme çevrimleri sırasında oluşan genleşme, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarında, diğer tüm karışımlara kıyasla belirgin olarak daha yüksektir. Şekil 5.36a ve 5.36b’ye göre, test edilen sekiz karışımdan altısında çoklu deneylerin sonunda elde edilen genleşme değeri, teorik olarak bulunan toplam genleşmeden daha yüksek çıkmıştır. Dolayısıyla bu veriler, dayanıklılık sorunlarının birlikte etki etmesinin, ayrı ayrı oluşan etkilere kıyasla beton üzerinde hasarı daha da artırıcı sonuçlarına işaretler olarak değerlendirilebilir.



Şekil 5.36 a) Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımları ve b) KYB karışımları için dayanıklılık etkilerinin ayrı ayrı yarattığı genleşmelerle çoklu deneyler sonrasında elde edilen genleşmelerin karşılaştırılması.

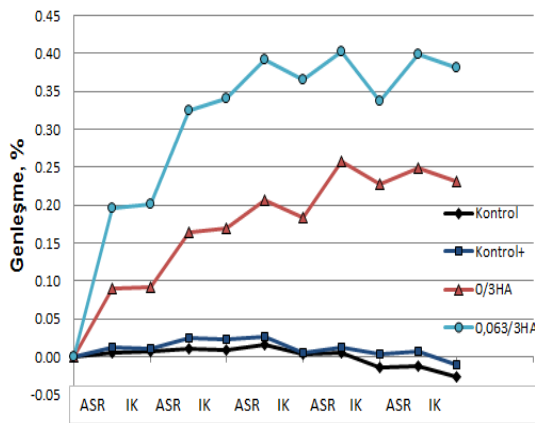
Son olarak getirilmesi gereken bir yorum da standart olmayan ve tezde yeni geliştirilen deney yönteminin geçerliliğiyle ilgilidir. Deneyler başlarken endişe duyulan noktalardan biri, numunelerin çözülmesi amacıyla donma-çözülme kabini içinde püskürtülen suyun, beton bünyesindeki alkalilerin çok büyük bir bölümünün betondan dışarıya çıkmasına neden olup olmayacağıydı. Daha önceki aşamalarda hızlandırılmış AAR testleri sırasında ölçülen alkali sızıntısı seviyesini, bu tip çoklu etkilerde araya donma-çözülme çevrimleri de girdiğinden ölçmek pratik açıdan mümkün olmamaktadır. Şekil 5.32a ve 5.34a'da ASR'nin son çevrimlerinde dahi genleşme artışlarının devam etmesi bu endişeyi ortadan kaldırmıştır. Deneyler başlamadan önce termokupl yardımıyla numuneyi çözmek için gereken minimum sürenin belirlenmesi ve gereğinden fazla yıkama uygulanmaması bunda etkili olmuştur. Hızlandırılmış beton prizma deneylerinde beklenti son haftalarda genleşmelerin yavaşlaması yönündedir. Fakat ASR ve donma-çözülme etkilerinin birlikte incelendiği deneylerde, özellikle reaktif nitelikteki karışımlarda son haftalarda genleşme eğrilerinin eğimlerinin yüksek oluşu, donma-çözülme hasarlarının da suyun girişini kolaylaştırmasına bağlanabilir.

5.5.2 AAR ve ıslanma-kuruma etkilerinin birlikte incelenmesi

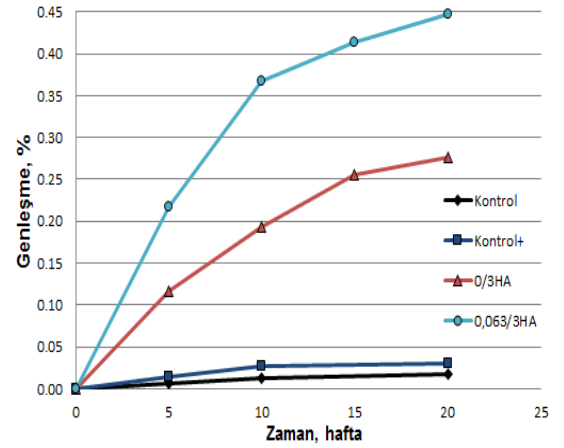
Bu başlık altında araştırılan diğer bir konu ise ASR'nin ıslanma-kuruma çevrimleriyle birlikte gelişmesinin yaratacağı etkinin şiddetidir. Bu tip bir etkinin araştırılmasını sağlayacak bir deney yöntemi standartlarda yer almamaktadır. Hatta ıslanma-kuruma etkisinin tek başına betonda incelenmesine olanak sağlayan genel kabul

görmüş bir yöntem de yoktur. Islanma-kuruma etkisinin yaratıldığı deneylerde numuneler ıslanma evresinde suda veya başka çözeltilerde bekletilmekte, kuruma evresinde ise CaCl_2 ve NaCl gibi tuzlardan faydalanılmaktadır. Kuruma aşamasını yüksek sıcaklıkta etüvde ya da normal sıcaklığa ve düşük bağıl neme sahip odalarda tamamlamak da mümkündür. Burada uygulanan işlemlerde ise toplamda 20 hafta süren AAR-4 deneyi ve toplam 50 döngü boyunca ıslanma-kuruma çevrimi uygulanmıştır. Kurutma sırasında kapalı kaplarda yer alan doygun CaCl_2 çözeltisi kullanılmıştır. Deneyler 4 hafta 60°C 'ye maruziyetle başlamış, sonra 10 döngü ıslanma-kuruma çevrimi uygulanmış ve ard arda gerçekleşen bu iki işlem 5 kez tekrarlanmıştır (Bkz Şekil 4.12). Deneyler boyunca prizmalarda boy değişimleri, hazırlanan ilave küplerde de ağırlık ve ultrases hızı değişimleri ölçülmüştür.

Islanma-kuruma ve ASR döngülerinin uygulandığı karışımlar da Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA kodlu karışımların yanı sıra BP-34, BP-31, FA-34 ve FA-31 kodlu KYB karışımlarıdır. Bunlar arasından Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA için deney sonuçları Şekil 5.37a, 5.37b, 5.38a ve 5.38b'de sunulmuştur. Şekil 5.37a'da ASR ve ıslanma-kuruma çevrimlerinin ard arda uygulanmasıyla oluşan genleşmeler yer almaktadır. Şekil 5.37b'de ise bu karışımlara sadece AAR-4 deneyi uygulanan durum, karşılaştırma amaçlı olarak verilmiştir. Bu dört karışımın iki etkiye ard arda bırakılması sonucu oluşan ağırlık ve ultrases hızı değişimleri ise sırasıyla Şekil 5.38a ve 5.38b'de gösterilmiştir. Grafiklerde x-eksenlerindeki ASR kısaltması AAR-4 deneyinin, IK kodlaması ise ıslanma-kuruma tekrarlarının uygulandığı aralıkları göstermektedir.

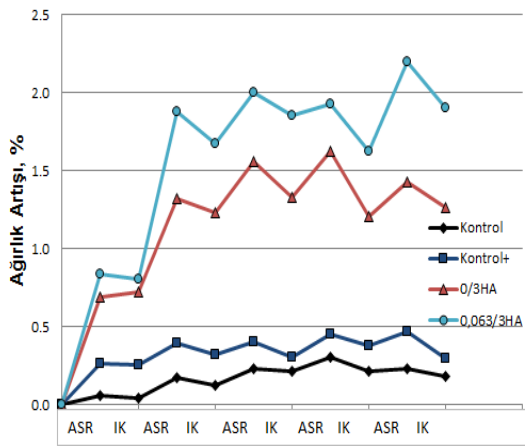


(a)

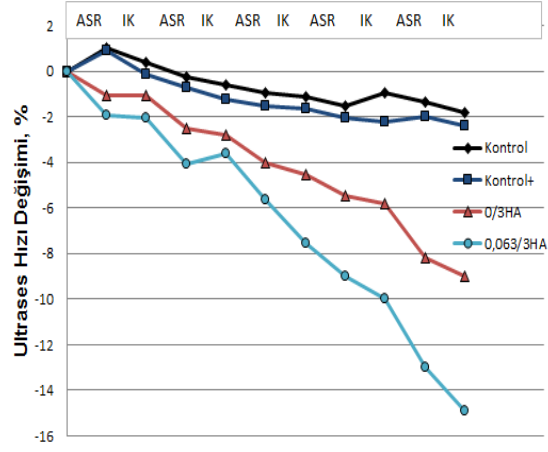


(b)

Şekil 5.37 a) Ard arda ASR etkisine ve ıslanma-kuruma çevrimlerine, b) sadece ASR etkisine uğrayan Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarının genleşme davranışları.



(a)



(b)

Şekil 5.38 Ard arda ASR etkisine ve ıslanma-kuruma çevrimlerine uğrayan Kontrol, Kontrol+, 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarının a) ağırlık ve b) ultrases hızı değişimleri.

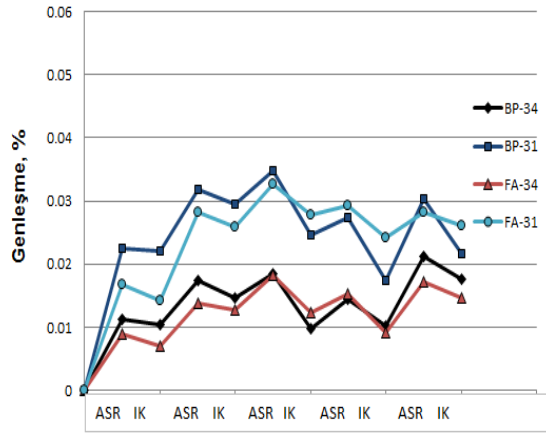
Bölüm 5.5.1’de elde edilen grafiklerde donma-çözülme çevrimlerinin, genişmeden ziyade ağırlık ve ultrases hızı değerlerine daha büyük etkiler yarattığından bahsedilmişti. Islanma-kuruma çevrimleri neticesinde ise bunun tam tersini söylemek mümkündür. Şekil 5.37b’ye göre sadece ASR etkisi varken 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarının 20. haftadaki genişmeleri sırasıyla %0,277 ve %0,448’e eşit çıkmıştır. Islanma-kuruma döngülerinin de etki etmesiyle (Şekil 5.37a) aynı karışımların nihai genişmeleri sırasıyla %0,232 ve %0,381 seviyelerine düşmüştür. Her ne kadar her iki etki birbirinden tamamen bağımsız olmasa da arada yaklaşık %0,04-%0,07 (ya da $(400-700) \times 10^{-6}$ mm/mm) mertebelerinde büzülme etkisinden kaynaklanan bir fark bulunmaktadır. Benzer şekilde ıslanma-kuruma döngüleri, Kontrol ve Kontrol+ kodlu karışımların nihai genişmelerinin ise negatif değerlerle sonuçlanmasına yol açmıştır.

Şekil 5.38a’daki ağırlık değişimleri incelendiğinde ASR etkileri sırasında numunelerin ağırlıklarında artışlar, ıslanma-kuruma çevrimlerinin noktalandığı anlarda ise su kaybı nedeniyle azalmalar oluşmaktadır. Gözlemlerin büyük çoğunluğunda ASR sonucu oluşan ağırlık artışlarının mertebesinin, büzülme nedenli azalmalara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Dolayısıyla genel bir ifade olarak ASR deneyleri sırasında bünyeye giren suyun jelin yapısına katıldığı ve artık kimyasal olarak bağlı bu suyun fiziksel olarak bağlı su gibi kaybolmasının kolay olmayacağı sonucuna varılabilir.

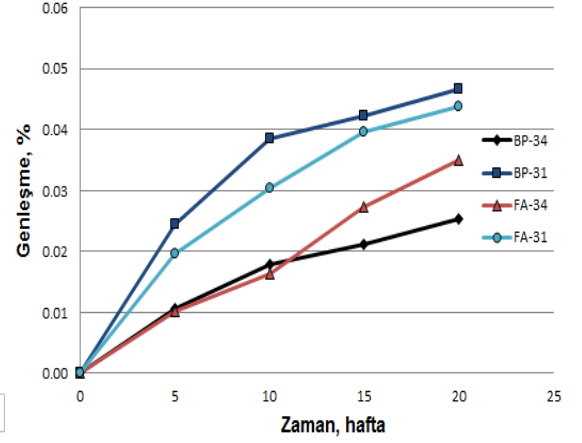
Şekil 5.38b’deki ultrases hızı değişimleri incelendiğinde ise yine özellikle cam agregalı karışımlarda yüksek kayıplar olduğu görülmektedir. Fakat bu kayıplar, donma-çözülme çevrimlerinden kaynaklanan değişimlerin mertebeleri kadar yüksek olmamıştır.

Numunelerde donma-çözülme etkisinde oluşan yüzey soyulmaları gibi daha önemli sayılabilecek hasarlar oluşmaması bu durumun nedenidir. Islanma-kuruma ve ASR'nin birlikte uygulandığı bu aşamada sadece cam agregalı karışımların yüzeyinde çok ince ve çok az sayıda çatlaklar (ASR kaynaklı olması muhtemel) gözlemlenmiştir.

BP-34, BP-31, FA-34 ve FA-31 için ıslanma-kuruma ve ASR döngüleri sonucu elde edilen deney sonuçları Şekil 5.39a, 5.39b, 5.40a ve 5.40b'de sunulmuştur. Şekil 5.39a'da hem ASR hem de ıslanma-kuruma döngülerine maruz bırakılma sonucu oluşan, 5.39b'de ise sadece alkali-silis reaksiyonu kaynaklı olan genleşmeler görülmektedir. Şekil 5.40a ve 5.40b ise ASR ve ıslanma-kurumanın ard arda uygulanması sonucu KYB karışımların sırasıyla ağırlık ve ultrases değişimlerini göstermektedir.

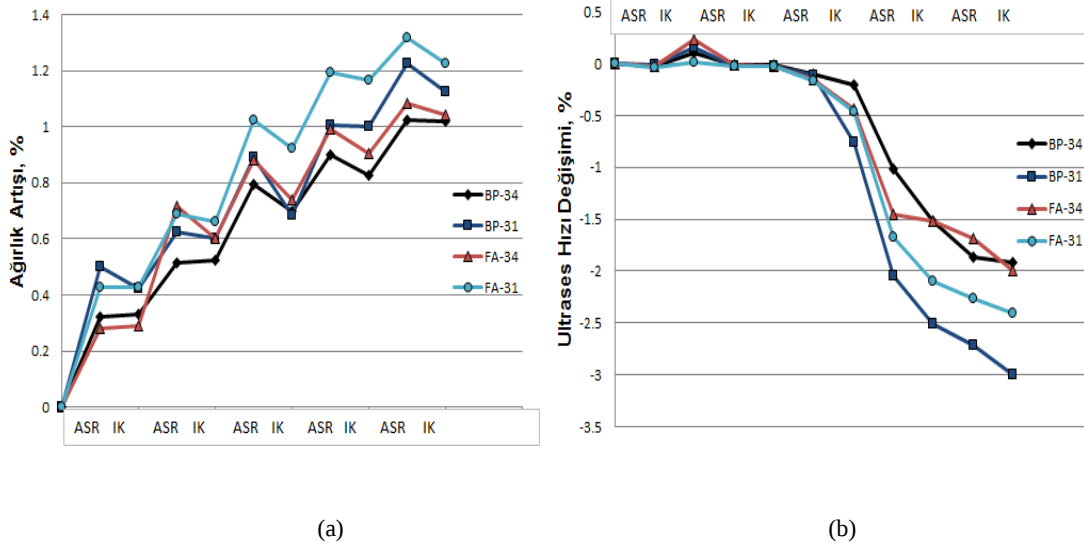


(a)



(b)

Şekil 5.39 a) Ard arda ASR etkisine ve ıslanma-kuruma çevrimlerine, b) sadece ASR etkisine uğrayan KYB karışımlarının genleşme davranışları.



Şekil 5.40 Ard arda ASR etkisine ve ıslanma-kuruma çevrimlerine uğrayan KYB karışımlarının a) ağırlık ve b) ultrases hızı değişimleri.

KYB karışımları için genleşme değerleri incelendiğinde, Şekil 5.39a ve 5.39b'ye göre büzülme nedeniyle karışımların nihai genleşmelerindeki azalma miktarı BP-34, BP-31, FA-34 ve FA-31 için sırasıyla %0,0077; %0,0249; %0,0204; ve %0,0177 (yani $(77-249) \times 10^{-6}$ mm/mm aralığında) olarak bulunmuştur. KYB'lerin uğradığı büzülme miktarı, aynı agrega ile hazırlanan normal beton karışımları olan Kontrol ve Kontrol+ için hesaplanarlardan daha düşüktür. Betonun bulunduğu ortam ile betonun boşluklarında bağıl nem farklılığı olmasından kaynaklanan büzülme olayı, sertleşmiş çimento hamuru fazında meydana gelir. Tez kapsamında hazırlanan normal betonlara kıyasla daha fazla çimento ve su içeren ve ilave olarak yine hamur hacmine dahil edilebilecek filler malzemeye sahip KYB'lerde hamur miktarı daha fazla, rötreyi engelleyebilecek agrega hacmi ise daha azdır. Dolayısıyla ilk bakışta KYB'lerde büzülme deformasyonlarında daha yüksek değişimler beklenebilir. Fakat KYB'lerde azalan büzülme miktarını yoğun içyapısı nedeniyle suyun kapiler yolla emiliminin azalmasına ve difüzyon katsayısının düşmesine bağlamak mümkündür. Böylelikle ıslanma-kuruma tekrarları boyunca su giriş-çıkışı zorlaşmaktadır (Soliman and Nehdi, 2012).

Ağırlık değişimleri ve ultrases hızlarındaki değişimler ise yine donma-çözülmenin neden olduğu mertebelere ulaşmamıştır. Genel bir ifadeyle, Şekil 5.40a ve 5.40b uyarınca KYB'lerin ıslanma-kuruma ve ASR deneyleri sırasında ağırlık ve ultrases hızı değişimi davranışlarında çok büyük farklılıklar görülmediğini ifade etmek mümkündür. Küçük bir farklılık olarak, sadece AAR-4 deneyi uygulandığında az da olsa daha reaktif olan karışım BP-31'ken, ıslanma-kuruma çevrimlerinin ASR etkisine eklenmesi ile en yüksek genleşme ve ağırlık değişimi sonuçlarına FA-31'de rastlanmıştır. Bu deney sonucu, uçucu

kül de içeren FA-31 karışımında boşluk yapısının daha etkin bir şekilde azalmasına ve büzülme etkisinin bir miktar daha düşmesine bağlanabilir.

Geliştirilen bu deney yönteminde en önemli hususlardan biri betonların ıslanmaları sırasında bu etkinin nasıl yaratılacağıdır. İlk olarak bu etkiyi suyla yaratmak düşünülmüş fakat numuneleri su içerisinde bekletmenin alkalilerin önemli miktarının kaybolmasına yol açtığı göz önünde tutulmuştur (Lindgård et al., 2012). Beton boşluk çözeltisi alkalinitesinin tam olarak belirlenmesi mümkün olmadığından, ıslanma etkilerinin 1 mol NaOH çözeltisi içerisinde bekletilerek sağlanmasına karar verilmiştir. Boşluk suyunun beklenen alkalinitesinden bir miktar daha yüksek olan bu molaritenin yarattığı endişe, alkalilerin çözeltiden beton içerisine doğru hareket etmesi tehlikesidir. Ama çalışmada elde edilen verilere göre genleşme değerlerinin beklenmedik ölçüde artmaması, bu endişeyi ortadan kaldırmıştır.

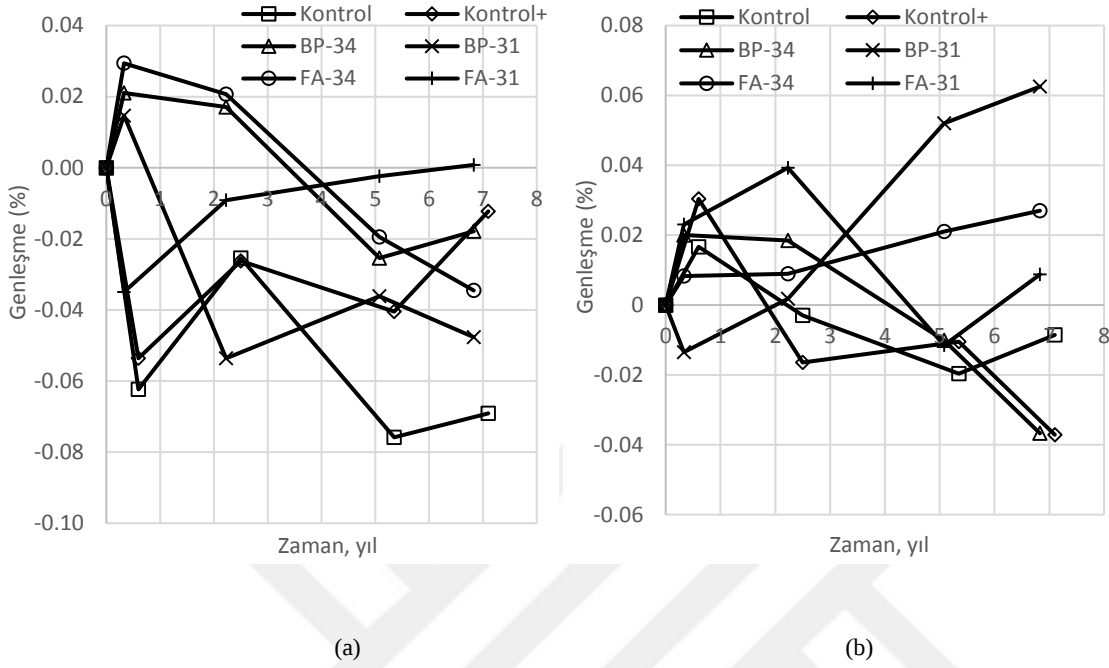
5.6 Maruziyet Sahalarından Alınan Ölçümler

Tez kapsamında kurulmuş olan maruziyet sahasına, tezin önceki aşamalarından seçilen sekiz adet karışıma ait ikişer adet numune yerleştirilmiştir. 300 mm ayrıtlı bu küpler üzerinde alınan ölçümlerle karışımların laboratuvar deney koşullarındaki gibi hızlandırıcı etkiler olmadan, doğal iklim koşullarındaki genleşme davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Seçilen karışımlar, bir önceki aşamada çoklu dayanıklılık etkilerinin incelendiği aşamada olduğu gibi, agrega olarak sadece bazalt içeren Kontrol ve Kontrol+ karışımları, atık cam içeren 0/3HA ve 0,063/3HA, bazalt tozu içerikli KYB karışımları olan BP-34 ve BP-31'in yanı sıra uçucu küllü KYB'ler olan FA-34 ve FA-31 karışımlarıdır.

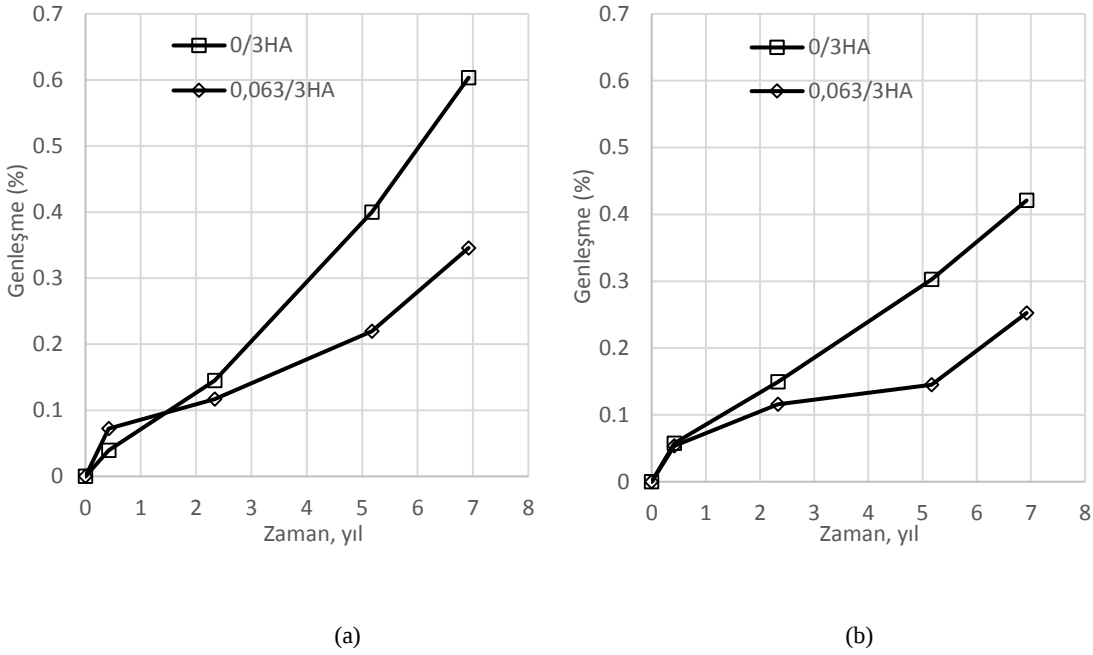
Daha önce açıklandığı gibi, genleşme ölçümleri küp numunelerin üzerine yerleştirilen pimler üzerinde iki diyagonal doğrultuda, diğer iki adet bitişik ve karşılıklı olmayan yüzeylerde ise yatay ve dikey doğrultularda alınmıştır. Şimdiye dek elde edilen sonuçlara göre, aşağıda genleşme verileri sunulmuş olan grafiklerde, karışımların iki gruba ayrılmasına karar verilmiştir. Şekil 5.41'de Kontrol, Kontrol+ ve KYB karışımlarının tümü olmak üzere, ince ve iri agrega olarak sadece bazalt içeren karışımların genleşme-zaman grafiği yer almaktadır. Şekil 5.42'deki veriler ise ince boyutta atık cam içeren 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarına aittir. Şekil 5.41a ve 5.42a'da küplerin üst yüzeylerinden elde edilen genleşme değerlerinin ortalaması yer alırken, 5.41b ve 5.42b'de ise yan yüzeylerde oluşan genleşmelerin ortalamaları sunulmuştur.

Her karışıma ait iki numuneden biri, tabandan 5-6 cm su içerisinde bekletilmiş, diğerinde ise böyle bir işlem uygulanmamıştır. Bu iki saklama koşulunun neden olduğu

sonuçlar arasında belirgin bir fark görülmediğinden, grafikler tek numune üzerinden alınan ölçümlerin ortalamasını gösterecek şekilde verilmiştir.



Şekil 5.41 İnce ve iri agrega olarak bazalt içeren karışımlara ait maruziyet sahası küplerinin a) üst yüzeylerinde ve b) yan yüzeylerinde oluşan genleşmeler.



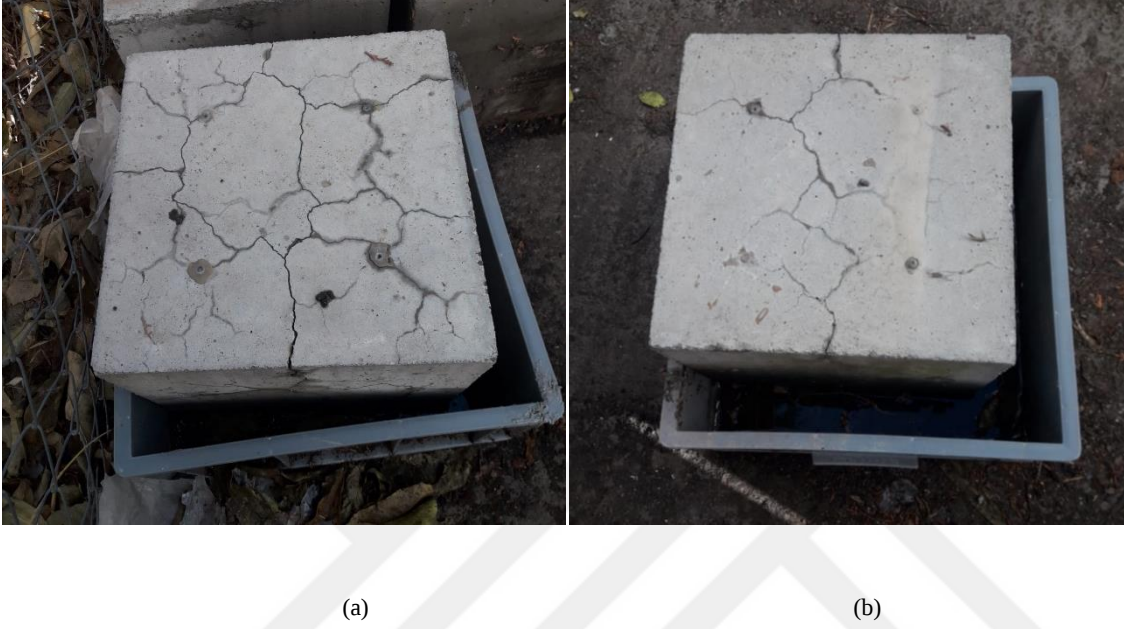
Şekil 5.42 İnce boyutta cam agregası ve iri agrega olarak bazalt içeren karışımlara ait maruziyet sahası küplerinin a) üst yüzeylerinde ve b) yan yüzeylerinde oluşan genleşmeler.

Şekil 5.41 ve 5.42’de genleşme verileri sunulan betonlar yaklaşık olarak 7 yıllık örneklerdir. Şekil 5.41a’ya göre bu süreçte bazalt agregalı karışımlar olan Kontrol, Kontrol+ ve KYB karışımlarında büyük çoğunlukla, değişen mertebelerde sertleşmiş betonda büzülme davranışları görülmüştür. Şekil 5.41b’ye göre ise ölçüm alınan son iki yaşta BP-31 karışımında %0,05- 0,06 mertebesinde genleşmeler görülmüş, uçucu küllü KYB’ler olan FA-34 ve FA-31 için de hesaplanan birim deformasyonlar, diğer karışımlarda oluşan durumun aksine pozitif çıkmıştır. Ancak benzer genleşmelerin henüz Şekil 5.41a’da görülmemesi, beton yüzeylerinde hiçbir hasar belirtisi oluşmaması ve karışımların inişli-çıkışlı boy değişimleri göstermeleri, net davranışın açıklanabilmesini ertelemektedir. ASR söz konusu olduğunda ve burada uygulandığı gibi hızlandırılmış koşullar bulunmadığında agregaların reaktif derecesine bağlı olarak genleşme ve hasar davranışlarının oldukça değişken olabildiği, özellikle yavaş genleşen agregalarda reaktivitenin belirlenmesi için çok daha uzun deney sürelerine ihtiyaç duyulabileceği bilinmektedir. Tez kapsamında kurulan maruziyet sahasından da ilerleyen yıllarda ölçümler alınmaya devam edilecektir. Özellikle maruziyet sahasından elde edilen verilerle önceki hızlandırılmış deneylerin verileri arasında kurulacak korelasyonları incelemenin fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

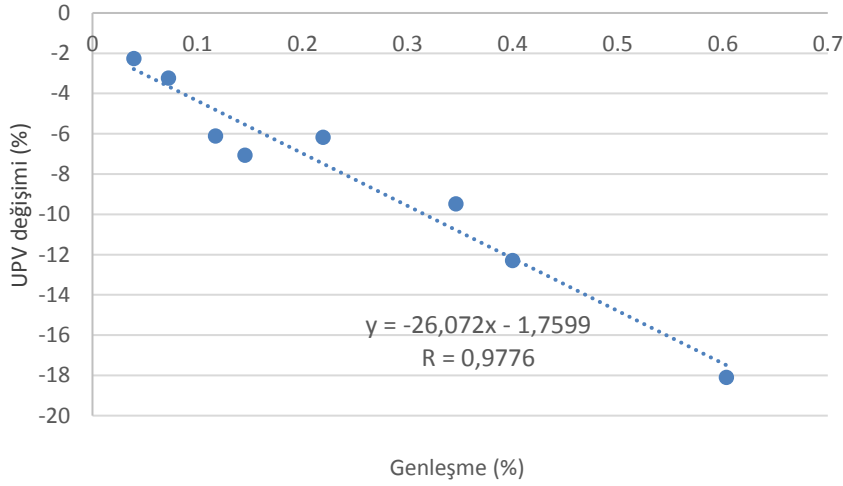
Hızlandırılmış deneylerde karşılaşılan duruma benzer olarak maruziyet sahası ölçümlerine göre de cam agregası içeren karışımlar oldukça yüksek reaktivite göstermektedir. Hatta laboratuvar deneylerinde karşılaşılan alkali sızıntısı probleminin saha betonlarında oluşması beklenmediğinden, Şekil 5.42a ve 5.42b’de genleşme hızlarında beton yaşı arttıkça düşüşler meydana gelmemiştir. Küplerin doğrudan güneş ışığına maruz kalan üst yüzeylerinden alınan ölçümlere göre 0/3HA ve 0,063/3HA karışımlarının genleşmeleri 7. yılda %0,6 ve %0,35 seviyesindedir. Yan yüzeylerde bu karışımlar için oluşan genleşmeler sırasıyla %0,42 ve %0,25’e düşmüştür. Bu karışımların son ölçümler sırasında çekilen fotoğrafları sırasıyla Şekil 5.43a ve 5.43b’de gösterilmiştir. 63 µm’dan küçük tanelerin genleşmeleri azaltıcı etkisine maruziyet sahasındaki saklama koşullarında da rastlanmamıştır. Diğer karışımlarda görülen büzülme davranışlarının oluşmaması, cam agregalı karışımların reaktif niteliğinin erken yaşlarda dahi çok daha baskın olarak ortaya çıkmasının bir sonucudur.

Oluşturulan maruziyet sahasında bekletilen 300 mm ayrıtlı küplerde komparatör ölçümlerinden hemen sonra ultrases hızları (UPV) da belirlenmektedir. Bu ölçümler perdah yüzeyi hariç tutulacak şekilde diğer yüzeylerin oluştuğu iki doğrultudan alınmıştır. Henüz zaman içerisinde anlamlı ve yüksek ASR genleşmeleri göstermeyen Kontrol, Kontrol+ ve KYB karışımlarında UPV değerleri de zaman içerisinde düzenli değişimler göstermemiştir. Örnek olarak sunulması amacıyla, bu karışımlarda dökümden

2,5 yıl sonra oluşan UPV değişimleri $\%+1,33$ ila $\%-4,98$ arasında, 7 yıl sonra oluşan değişimler ise $\%+2,93$ ila $\%-7,44$ arasında değişen değerler almıştır. Fakat cam agregalı iki karışımda daha yüksek mertebelerde ultrases hızı azalmalarıyla karşılaşmış ve ayrıca bu karışımlar için farklı yaşlarda elde edilen genleşme değerleri ile ultrases hızı değişimlerinin Şekil 5.44'e göre uyum gösterdiği görülmüştür.



Şekil 5.43 7 yıl boyunca maruziyet sahasında bekletilen a) 0/3HA ve b) 0,063/3HA karışımlarının görüntüleri.



Şekil 5.44 Maruziyet sahasında yer alan cam agregalı karışımlar için elde edilen genleşme-ultrases hızı değişimi ilişkisi.

5.7 Beton Performans Modellerinin Geliştirilmesi

Bu aşamadaki çalışmalar, Hollanda’da Delft Teknik Üniversitesi’nde yürütülmüş olan PAT-ASR projesi ile karşılıklı veri paylaşılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar var olan Delft Lattice modeli ile yorumlanmıştır. Seçilen karışımlarda içyapıda gerçekleşen ASR hasarı petrografik teknikle ve görüntü işleme yöntemleriyle sayısallaştırılmıştır. ASR sırasında oluşan jel ürününün şişmesi, içsel mekanik yükleme benzetmesi ile simule edilmiştir. Böylelikle iki boyutlu model tanımlamasıyla, beton içyapısında mikro ve orta düzeyde genleşme simülasyonları yapılmıştır. Bir başka ifadeyle betonun AAR performansının ve hasar ilerlemesinin tahmini gerçekleştirilmiştir.

PAT-ASR projesindeki çalışmalardan çıkarılan sonuca göre, araştırmalarda tez çalışmasında olduğu gibi referans agrega olarak Norveç’ten temin edilen Ottersbo agregası üzerinde AAR-3 ve AAR-4 beton prizma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile tezde elde edilen genleşme sonuçlarının oldukça yakın değerler verdiği ilk iş paketine ait sonuçların sunulduğu “5.1” başlığı altında istatistiksel hesaplamalarla açıklanmıştır. Her iki laboratuvarın da ortak çalıştığı Ottersbo agregasının yanı sıra referans agrega olarak kullanılan ve literatürle yakın genleşme elde edilen Spratt agregası örnekleri de modelleme çalışmalarına dahil edilmiştir. Tez çalışmasında AAR-3 ve AAR-4 deneyleri sonucunda yüksek genleşme ve çatlak oluşumları gözlemlenen 4 adet beton prizma örneği Delft Teknik Üniversitesi’ne gönderilmiştir. Bu örnekler, Avrupa’daki pek çok laboratuvarın üzerinde çalışma gerçekleştirdiği “referans agregaları” içerdiğinden modelleme çalışmalarının sonuçlarının genelleştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

5.7.1 Hasar derece indeksi (DRI) sayımları

Modelleme çalışmaları için seçilen karışımlar OTT38, OTT60, SPR38 ve SPR60 karışımlarıdır. Karışım kodlarındaki OTT ve SPR kısaltmaları reaktif agrega olarak sırasıyla Ottersbo ve Spratt agregası içeren karışımları, 38 ve 60 sayıları ise karışımların hızlandırılmış deneylerde maruz kaldığı sıcaklık seviyesini göstermektedir. AAR-3 ve AAR-4 deneylerinin bitmesiyle 75x75x285 mm boyutlu beton prizmalardan yaklaşık 15 mm kalınlığa sahip olacak şekilde kesilerek çıkarılan OTT38, OTT60, SPR38 ve SPR60 karışımlarına ait örneklerin herhangi bir işlem uygulanmadan önceki görüntüleri sırasıyla Şekil 5.45a, b, c ve d’de sunulmuştur.



(a)



(b)



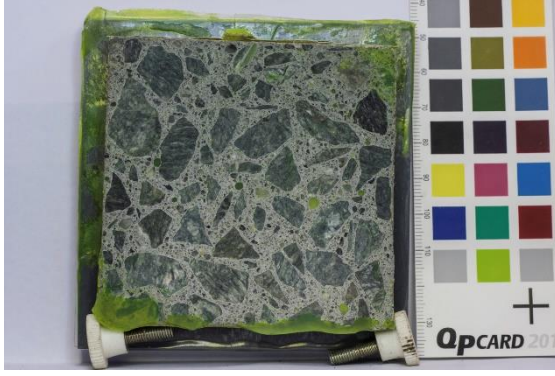
(c)



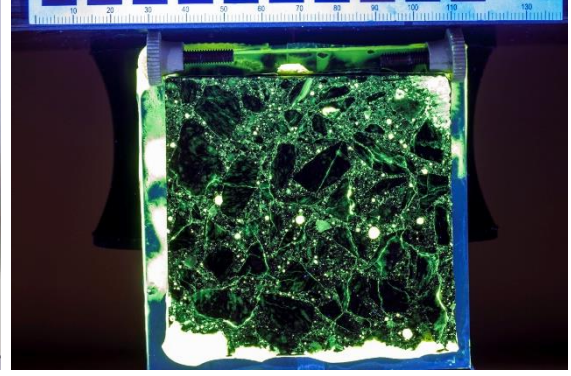
(d)

Şekil 5.45 a) OTT38, b) OTT60, c) SPR38 ve d) SPR60 karışımlarına ait kesitlerin numune hazırlığı öncesi fotoğrafları.

Floresan pigmentli epoksi, kesitlere vakum altında emprenye edilerek ve sonrasında zımparalama işlemi uygulanarak hazırlanan parlak kesitlerin dijital görüntüleri alınmıştır. Bu görüntüler, hem çatlak sayımları ile DRI belirlenmesinde kullanılmıştır hem de görüntüler işlenerek sertleşmiş çimento hamurundaki fazların ayrıştırılması sağlanmıştır. Böylelikle dijital görüntüler, iki boyutlu (2-D) kafes (Lattice) tanımlamalarında kullanılmıştır. Parlak kesitlerde elde edilen normal ve ultraviyole (UV) ışık altındaki görüntüler OTT38, OTT60, SPR38 ve SPR60 örnekleri için sırasıyla Şekil 5.46, 5.47, 5.48 ve 5.49'da gösterilmiştir.

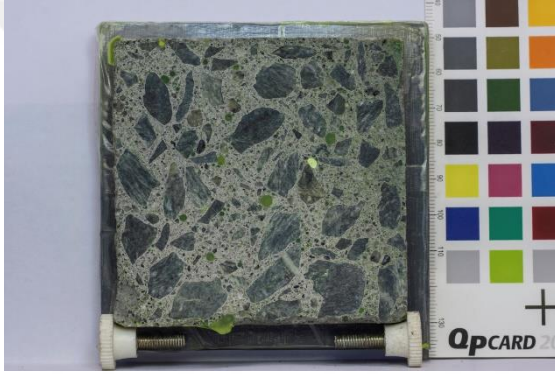


(a)

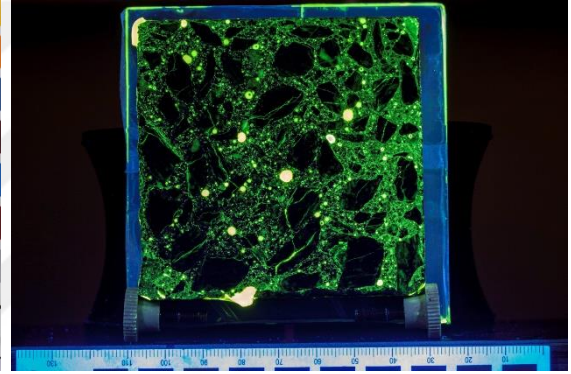


(b)

Şekil 5.46 OTT38 karışımına ait parlak kesitin a) normal ışık ve b) UV ışık altında görüntüsü.

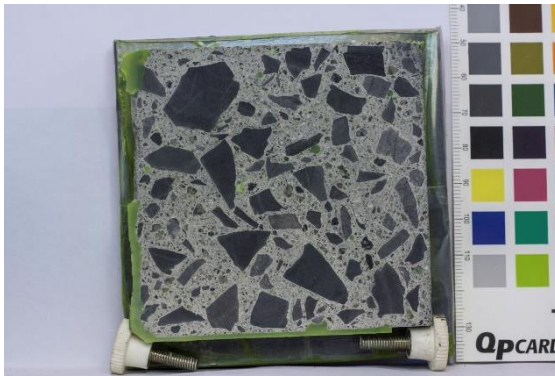


(a)

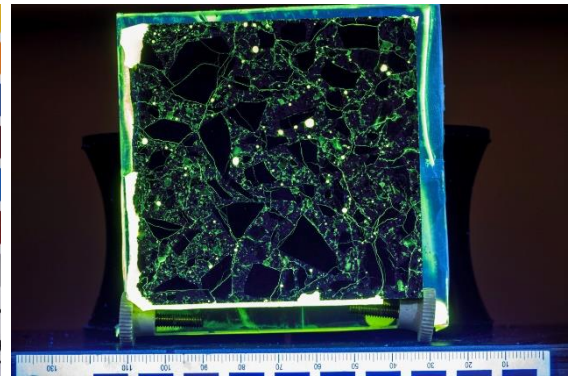


(b)

Şekil 5.47 OTT60 karışımına ait parlak kesitin a) normal ışık ve b) UV ışık altında görüntüsü.



(a)



(b)

Şekil 5.48 SPR38 karışımına ait parlak kesitin a) normal ışık ve b) UV ışık altında görüntüsü.



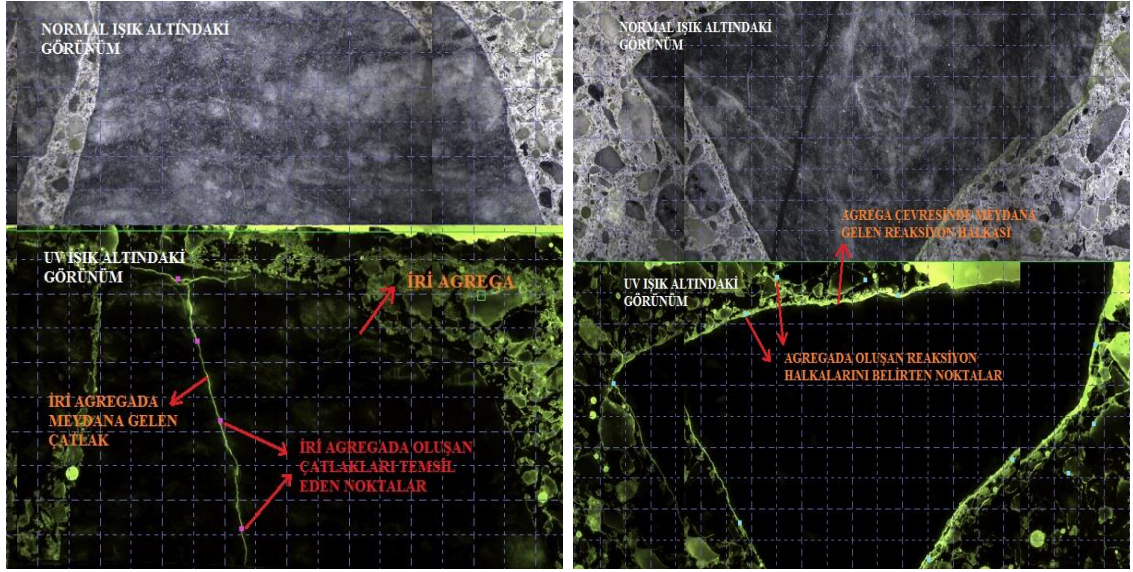
(a)

(b)

Şekil 5.49 SPR60 karışımına ait parlak kesitin a) normal ışık ve b) UV ışık altında görüntüsü.

Bu aşamadan sonra her bir kesite ait görüntüler, öncelikle daha küçük dilimlere ayrılmış, bunların stereo-mikroskop altında 15x büyütülmüş görüntüleri elde edilmiş, sonrasında bu görüntüler tekrar birleştirilmiştir. Çatlak sayımları esnasında ise karelerden oluşan bir ızgara sisteminden yararlanılmış, normal ışık altındaki görüntünün hemen altına UV ışık altındaki görüntü yerleştirilmiş ve DRI sayımları gerçekleştirilmiştir.

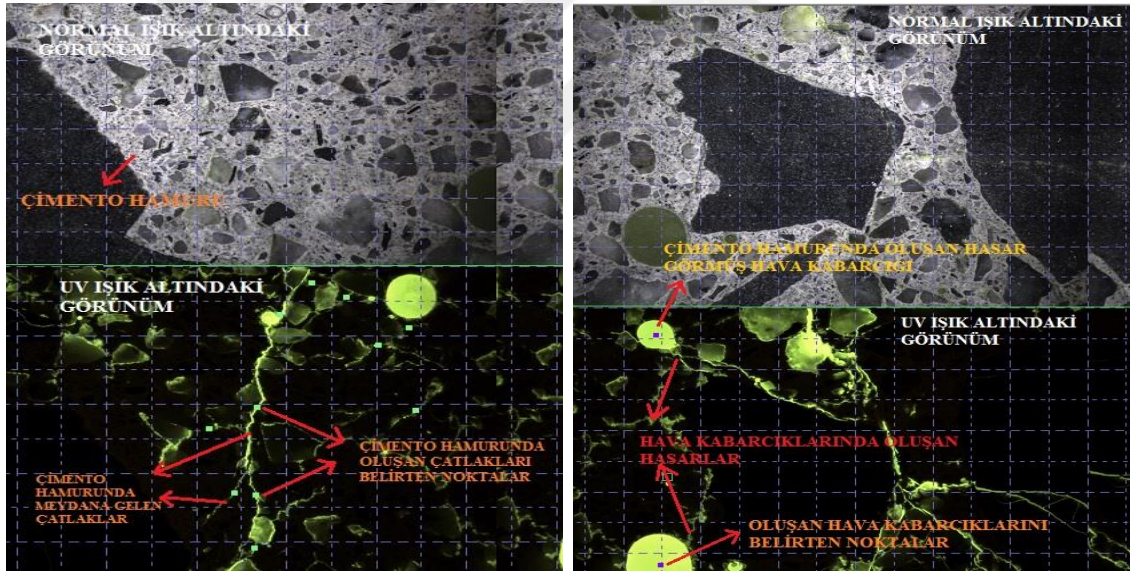
Veri aktarılan Delft Lattice modelinin hasar gelişimini tahmin etmeye yönelik olması ve kırılma mekaniği yasaları açısından çatlakların konum, yönelim ve boyutunun büyük öneme sahip olması, DRI sayımları ile çatlak analizinin modele bilgi sağlayıcı girdi oluşturabileceğini göstermektedir. Çatlaklar aslında malzemenin mekanik özelliklerinde azalmayı da işaret etmekte ve aynı zamanda artık çekme gerilmesi taşıyamayan konumları temsil etmektedir (Anaç, 2016). Görüntüleri yukarıda verilen kesitler için iri agrega içerisinde, iri agreganın sınırlarındaki reaksiyon halkalarında, sertleşmiş çimento hamurunda ve hava boşluklarına bağlı olarak bulunan çatlaklar ayrı kategorilerde sayılmıştır. Bu dört sınıfa ait çatlaklara örnekler sırasıyla Şekil 5.50a, 5.50b, 5.51a ve 5.51b’de gösterilmiştir. Bir kesite ait 8 parçadan elde edilen çatlak sayılarının toplamı ise konumlarına göre gruplandırılmış halde Çizelge 5.20’ye işlenmiştir.



(a)

(b)

Şekil 5.50 a) İri agreganın içerisinde ve b) sınırlarında oluşan çatlaklara örnekler.



(a)

(b)

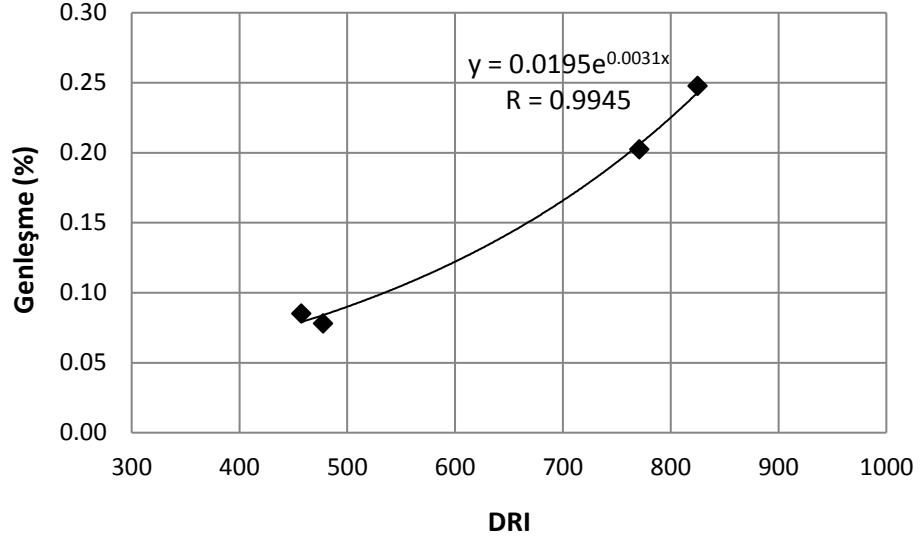
Şekil 5.51 a) Çimento hamurunda ve b) hava boşlukları etrafında oluşan çatlaklara örnekler.

Çizelge 5.20 Karışımlara ait kesitlerde DRI incelemelerinde belirlenen çatlak sayıları.

Karışım adı	İri agregası içerisinde	Agrega sınırlarında	Çimento hamurunda	Hava boşluklarına bağlı
OTT38	216	296	266	74
OTT60	204	290	118	51
SPR38	238	231	318	28
SPR60	74	415	117	35

Çizelge 5.20'deki verilerden anlaşıldığı üzere, çatlakların özellikle agregası ile çimento hamuru ara yüzeyinde oluşmaya yatkın olduğu, dört karışımdan üçünde bu çatlak grubundaki sayıların en yüksek çıkmasından anlaşılmaktadır. Agreganın yüzeyinde kararsız haldeki bağ yapıları, geçiş bölgesinin diğer fazlara göre daha zayıf olan fiziksel ve mekanik özellikleri ile agreganın şişmesi sırasında oluşturduğu radyal basınç gibi faktörler bu beklenen duruma yol açmaktadır. Oldukça reaktif nitelikli olan bu karışımlarda her iki sıcaklık seviyesinde de iri agregası içerisinde yer alan ve çimento hamuruna uzanan çatlakların sayısı da yüksek mertebelere ulaşmıştır.

İri agregası içerisinde, iri agreganın sınırlarındaki reaksiyon halkalarında, çimento hamurunda ve hava boşluklarına bağlı çatlak sınıflarının etki ve önem derecelerine göre katsayıları sırasıyla 0,25; 0,5; 2 ve 0,5'tir. DRI değerleri, Çizelge 5.20'deki verilerin belirtilen katsayılarla çarpılmasıyla bulunmaktadır. Bu katsayılar göz önüne alındığında OTT38, OTT60, SPR38 ve SPR60 karışımlarının DRI değerleri sırasıyla 771; 457,5; 825 ve 477,5 olarak bulunmuştur. 38°C ve 60°C'ye maruziyetin yarattığı etkiler karşılaştırıldığında, daha yüksek sıcaklığa maruziyetin malzemede oluşan hasar derecesini azaltıcı yönde etkisine rastlanmıştır. Aslında bu sonuçlar "5.1" başlığı altında deneysel çalışmanın ilk aşamasında bu karışımlar için verilen genleşme değerleriyle uyum göstermektedir (Şekil 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4). Daha önceki grafiklerde elde edilen nihai genleşme sonuçlarına göre 38°C'de elde edilen genleşme değerlerine, 60°C'ye maruziyet sonucu ulaşılmamıştır. Bu karışımlar için deney süreleri sonunda elde edilen genleşme değerleri ile kesitlerde belirlenen DRI değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.52'de sunulmuştur. Dört değer üzerinden elde edilen iki parametre arasındaki bağıntının kuvvetli bir korelasyona sahip olduğu ve genleşme değerleri arttıkça DRI değerlerinin de arttığı belirtilebilir. Ayrıca hem grafikteki eğilimden hem de denklemden anlaşıldığı üzere DRI değeri yaklaşık olarak 300'ün altına indikçe genleşmeler de hasar oluşturabilecek tehlikeli sınırın altında kalmaya başlamaktadır.



Şekil 5.52 Karışımların nihai genleşmesi-DRI arasında elde edilen bağıntı.

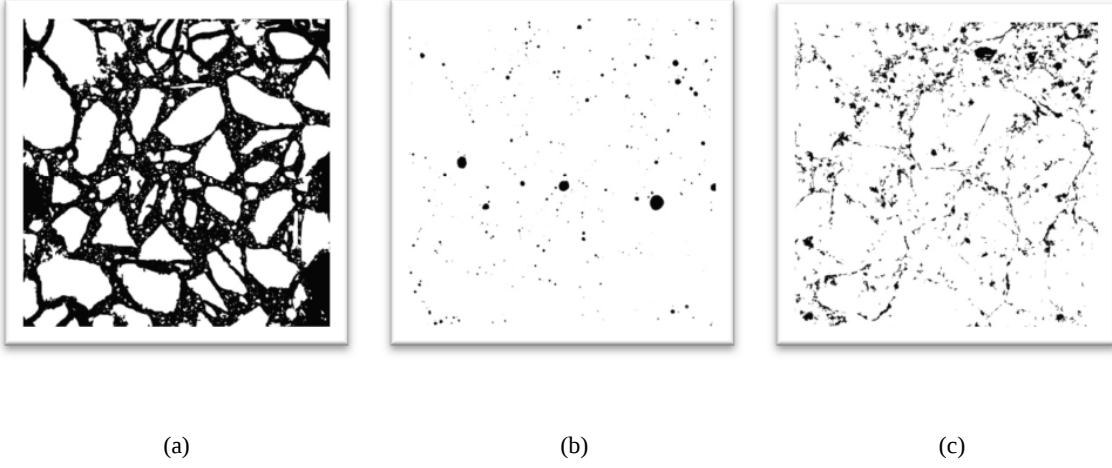
Tez kapsamında elde edilen DRI değerleri kullanılarak Delft Teknik Üniversitesi'nde genleşme simülasyonları yapılmış ve hasar modellenmiştir.

5.7.2 Latis hazırlanması

Bu kapsamda öncelikle bir önceki aşamada elde edilen dijital görüntüler, ImageJ programı aracılığıyla işlenerek fazlarına ayrılmıştır. Değerlendirilen fazlar (1) çimento hamuru (mevcut çözünürlük şartlarında 0,5 mm'den küçük agregalar da dahil), (2) agregalar (0,5 mm'den büyük agregalar) ve (3) boşluklardır. Ayrıca boşlukların oluştuğu fazı da istendiğinde hava boşlukları ve çatlaklar olarak ayırmak mümkün olmaktadır. Epoksi ile dolu olan kesitte parlak görüntüler sunan boşluk yapılarının toplam uzunluğu ve alanından yola çıkılarak Denklem 5-4 ile dairesellik oranı (f_{circ}) hesaplanmaktadır:

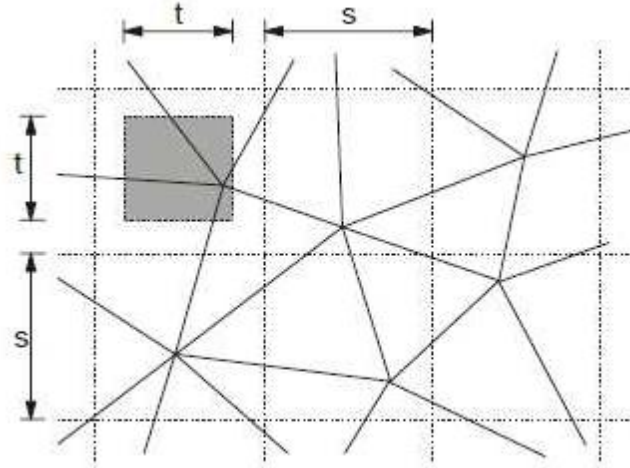
$$f_{circ} = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (5-4)$$

Denklemde A ve P sırasıyla alan ve çevreyi simgelemektedir. Hesaplanan değer 1'e yaklaştıkça gözlemlenen bölgenin dairesel yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen oran 0,55 ila 1 arasında olduğunda hava boşluğu, 0,55'ten küçük olduğunda ise çatlak benzeri bir yapı ortaya çıkmaktadır. Örnek bir faz ayrıştırmanın gösterildiği Şekil 5.53'te ikili görüntüler (binary images) halinde agrega, çimento hamuru, hava boşlukları ve çatlaklar gözükmemektedir.



Şekil 5.53 Ayrıştırma ile elde edilen ikili (binary) görüntü örnekleri: a) agrega ve çimento hamuru, b) hava boşlukları ve c) çatlaklar

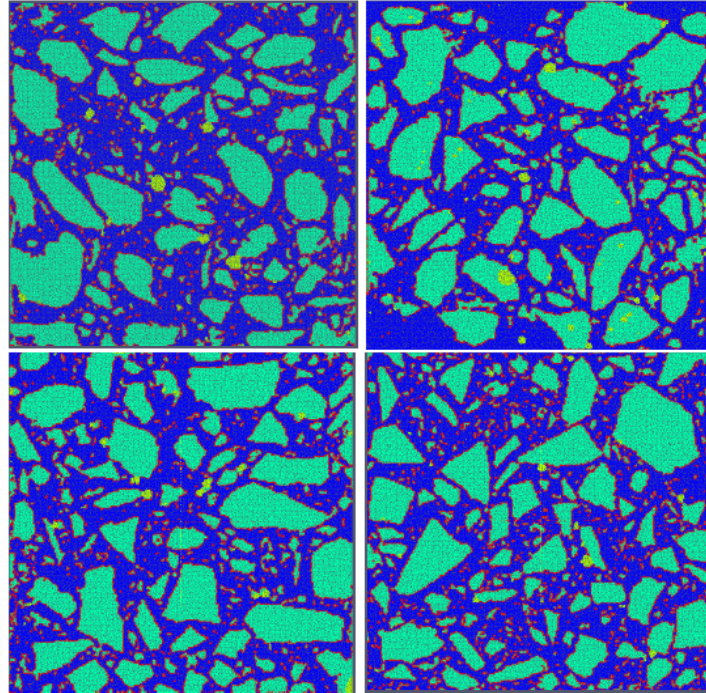
Görüntüler karesel hücrelere bölünmüş şekilde x:y doğrultularında 200x200 piksele küçültülmüştür. Bu şekilde oluşan 40,000 adet latis vokselinin her birinin içerisine aynı zamanda alt voksel hücreleri de tanımlanmıştır. Bu tanımlama sırasında 0,375 mm (s) ayrıtlı kare hücreler içinde 0,1 mm'lik dağılım (t) varsayılmıştır. Alt hücrelerin her birinin içerisine ise rastgele konumlandırılacak şekilde latislerin düğüm noktaları yerleştirilmiştir. Bu şekilde uygulanan düğüm noktalarını tanımlama işleminin temsili şeması Şekil 5.54'te gösterilmiştir.



Şekil 5.54 Vokseller içerisine rastgele yerleştirilen düğüm noktaları ve oluşturulan latis elemanlar.

Düğüm noktaları tanımlandıktan ve koordinat hesapları yapıldıktan sonra detayları Yip et al.'da (2005) anlatılan 2-boyutlu üçgenleştirme algoritması ile düğümler arası elemanlar tanımlanmıştır. Algoritma sonucu belirlenen 40,000 düğüm noktası arasında 119249 latis elemanı tanımlanmıştır. Bu elemanlar çekme ve basınç taşıyabilen dairesel kesitli kiriş elemanlarından oluşmaktadır. Simülasyon boyunca elemanların sadece çekme gerilmesi altında kırılmalarına izin verilmiştir.

Latis kalibrasyonu, elemanlara önceden belirlenmiş malzeme özelliklerinin atanmasının (çekme ve basınç mukavemet değerlerinin tanımlanması) ardından değişik eleman yarıçapları için test edilmiştir. Şekil 5.53'teki agrega, çimento hamuru ve boşluk yapılarını gösteren ikili görüntüler ve Şekil 5.54'teki gibi tanımlanan latis elemanlardan oluşan görüntü örtüştürülmüştür. Bu şekilde kafes sistemi oluşturan kiriş elemanların, artık sertleşmiş betonda yer alan farklı fazları temsil etmesi sağlanmıştır. Agregaya, çimento hamuruna, bu iki fazın sınır bölgelerine (bağ elemanlarına) ya da boşluklara denk gelen latis elemanlara bir sonraki aşamada ise farklı mekanik özelliklerin atanması sağlanmıştır. Burada hatırlatılması gereken bir konu, bağ elemanlarının sadece çok zayıf yapıdaki geçiş bölgesini değil, hem agrega hem de çimento hamuruna aynı anda denk gelen kiriş elemanları yani geçiş bölgesinden daha kalın bir bölgeyi temsil ettiğidir. İmaj analizleri sonucu elde edilen 4 kesit için latisler aşağıda Şekil 5.55'te görülmektedir. Bu şekilde mavi renkler çimento hamurunu, yeşil renkler agregayı, sarı renkler boşlukları, kırmızı renkler ise agrega-çimento hamuru arası bağ elemanlarını göstermektedir.



Şekil 5.55 Latis tanımlaması ve imaj eşleştirmesi sonuçları.

İlk aşamada sadece faz ayırıştırma uygulanarak elde edilen görüntülerde yer alan fazların alansal oranları Çizelge 5.21’de, üçgenleme algoritması sonrası tanımlanan latis elemanların temsil ettiği fazların dağılımı ise Çizelge 5.22’de gösterilmiştir. Bu veriler, latisin gerçek kesiti temsil edip etmediğinin kontrolünde kullanılmıştır.

Çizelge 5.21 Dijital imaj analizi sonrası elde edilen faz dağılımı.

	OTT-38	OTT-60	SPR-38	SPR-60
Agrega (%)	49,46	47,09	50,22	50,74
Çimento hamuru* (%)	49,24	51,91	48,68	48,06
Boşluk (%)	1,3	1	1,1	1,2

*0,5 mm’den küçük agregaları da içerir.

Çizelge 5.22 Delaunay üçgenleme algoritması sonrası tanımlanan latis elemanların faz dağılımı.

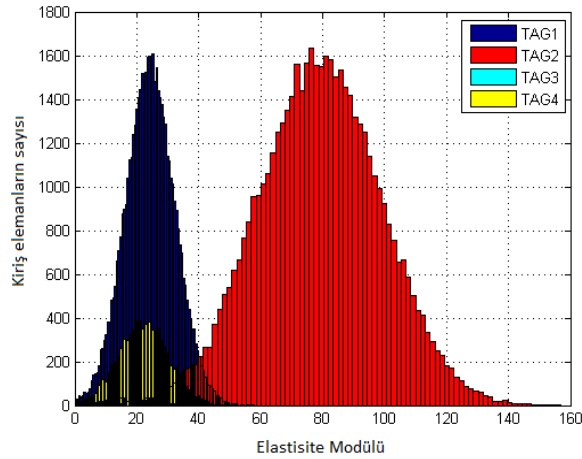
	OTT-38	OTT-60	SPR-38	SPR-60
Agrega (%)	42	39	38	43
Çimento hamuru (%)	45	47	46	43
Boşluk (%)	1	1	1	1
Bağ elemanları (%)	12	13	15	13

Tanımlanan kiriş elemanlarına malzeme özelliklerinin atanması için daha önce Delft Teknoloji Üniversitesi’nde gerçek numuneler üzerinde yapılmış olan nano-indentasyon testlerinin sonuçları (Çizelge 5.23) kullanılmıştır. Nano-indentasyon testi sertlik deneylerinin özel bir türü olup rijit bir ucun malzeme yüzeyine batırılması ile gerçekleştirilir. Deneyde 15x15 mm kesit boyutlarında ve 7,5 mm kalınlığında küçük örnekler kullanılmaktadır. Deney yapılacak noktaları (fazları) belirleyip işaretlemeye optik mikroskoptan yararlanılmaktadır. Bu deneylerde kullanılan uç ise Berkovich (piramit) tipidir. Yapılan testler sonucunda değişik faz elemanları için öncelikle sertlik ve E ortalama değerleri ve standart sapmalar hesaplanmış ve belirlenen mekanik özellikler modelleme esnasında da kullanılmıştır. Çizelge 5.23’e göre atanan mekanik özellikler boyutsal büyüklükler değildir ve asıl önemli olanın farklı fazların sahip olduğu büyüklüklerin birbirlerine olan oranı olduğunu belirtmek mümkündür.

Çizelge 5.23 Nano-indentasyon deney sonuçları uyarınca atanan malzeme mekanik özellikleri.

Faz	E (Ortalama)	G (Ortalama)	Çekme mukavemeti	Basınç mukavemeti	E (Standart sapma)	G (Standart sapma)
Çimento hamuru	22,5376	10	0,0444	-0,4440	10,8153	0,0281
Agrega	74,0292	28	0,1596	-1,5965	32,0551	0,1577
Boşluk	4,9520	1	0,0016	-0,0160	5,9067	0,0031
Bağ elemanı	21,0500	6	0,0176	-0,1765	10,8481	0,0386

Agregaların bünyesindeki farklı mineral yapılarının varlığı ve hatta sertleşmiş çimento hamurunda hidratasyon ürünlerinin dağılımındaki düzensizlikler, beton yapısına önemli ölçüde heterojenlik katmaktadır. Bu özelliğin de simule edilmesi amacıyla fazların mekanik özelliklerinin üniform halde değil, normal dağılıma sahip olacak şekilde latise atanması tercih edilmiştir (Şekil 5.56).



Şekil 5.56 Elastisite modülü değerlerinin normal dağılımla atanmasına örnek (OTT-38 karışımı için).

Bir sonraki aşama ise genleşmelerin/reaksiyonun başlayacağı noktaların belirlenmesini içermektedir. Wigum et al. (2006), Norveç kayaç sınıflandırması ile ilgili yaptığı kapsamlı araştırmayı esas alarak kuvars tane boyutuna bağlı olarak agreganın reaktivitesini belirlemektedir:

- 130 μm 'dan büyük taneler için düşük reaksiyon riski (genleşme katsayısı – 0,1)
- 60-130 μm arası taneler için orta reaksiyon riski (genleşme katsayısı – 0,4)
- 60 μm 'dan küçük taneler için yüksek reaksiyon riski (genleşme katsayısı – 1)

Tüm aktif silisli minerallerin eş zamanlı reaksiyona giremeyeceği varsayılarak reaksiyona başlama olasılığı olarak $p=0,2$ atanmıştır. Bir başka deyişle, petrografik analizde nokta sayma yöntemiyle belirlenen potansiyel reaktif bileşenlerin %20'sinin yukarıda belirtilen genleşme katsayıları ile genleşmeye başladığı varsayılmıştır.

Reaksiyonun ilerlemesi ile ilgili varsayılan senaryoda reaksiyon/genleşme noktalarından kaynaklı oluşan çatlaklar ASR jelinin oluşacağı noktalar olarak kabul edilir ve çatlakların jel ile dolu olduğu varsayılır. Latis üzerindeki kırıntılar iki aşamalı gerilme-birim deformasyon davranışına sahiptir. Çekme mukavemetini aşan kırıntı elemanların mekanik özelliklerine azaltma uygulanmaktadır. Bu durum, düzenli aralıklarla simülasyon içinde yükleme noktalarının güncellenmesi anlamına gelmektedir. Bu şekilde yükleme noktaları ve genleşme katsayıları yardımı ile jel basıncındaki değişim izlenebilir. Ayrıca devamlı oluşmakta olan jel için de genleşme katsayısı atanmaktadır.

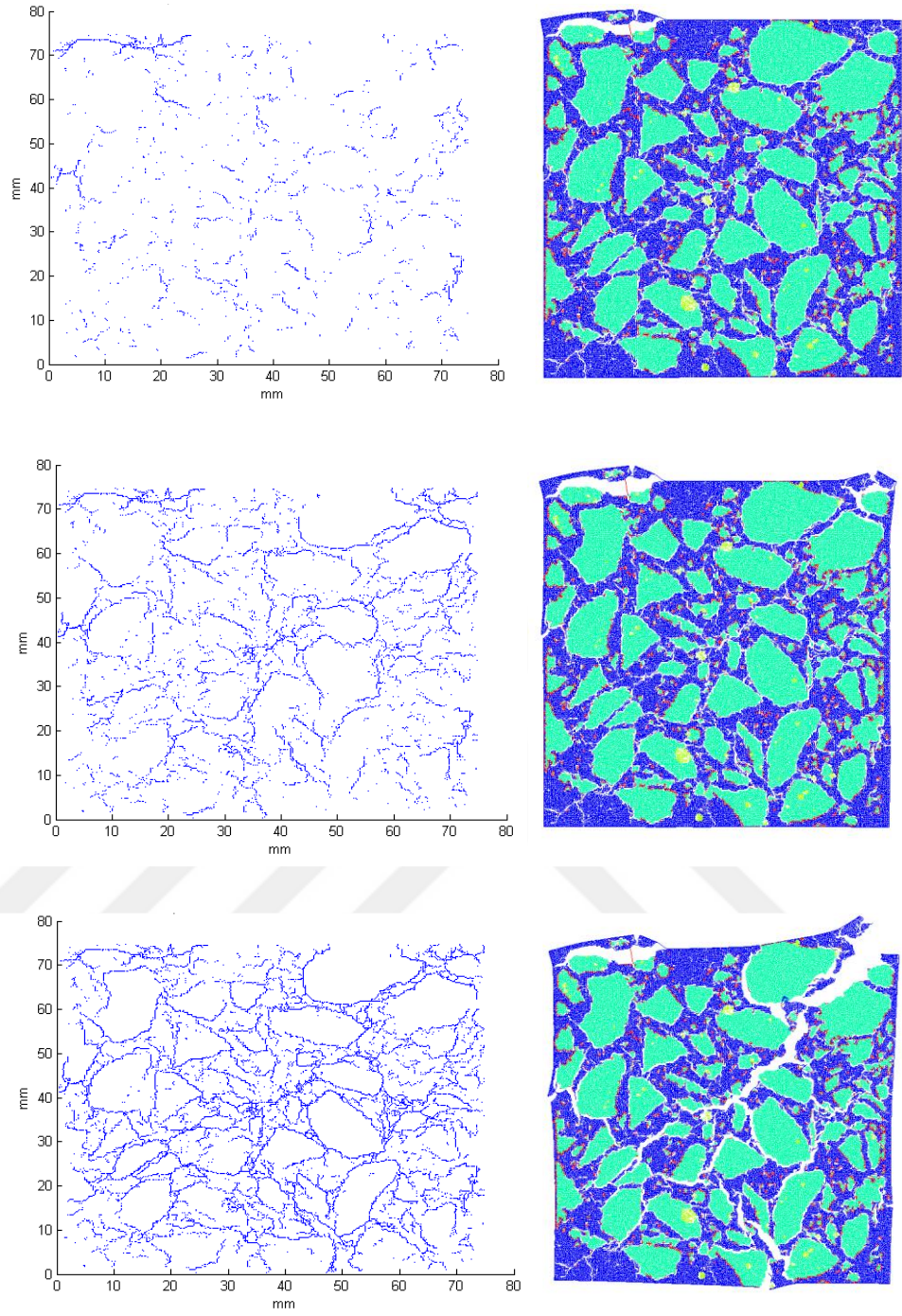
Nokta sayma yöntemi ile elde edilen reaktivite sınıflarının dağılımı Çizelge 5.24'te gösterildiği şekildedir. Bu tablodaki veriler, ilk reaksiyon başlangıcında aktif olan kırıntı elemanların sayılarını belirlemede kullanılmıştır.

Çizelge 5.24 Agregada yer alan kuvars yapılarının tane boyutlarına bağlı olarak miktarları.

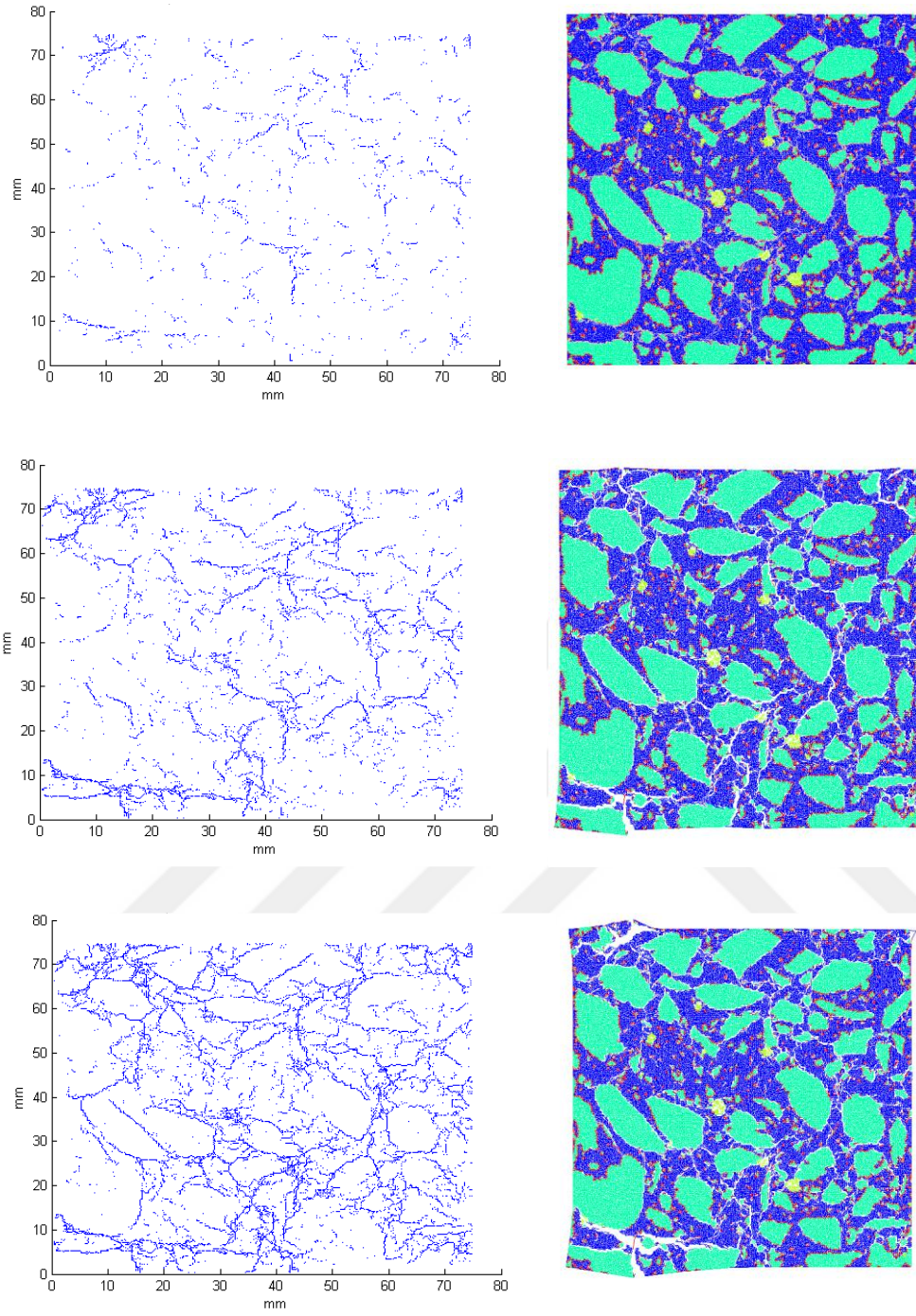
	<60 μm	60-130 μm	>130 μm	Reaktif olmayan
Agrega toplamı içindeki yüzdesi	14	26	50	10

5.7.3 Çatlak gelişimi

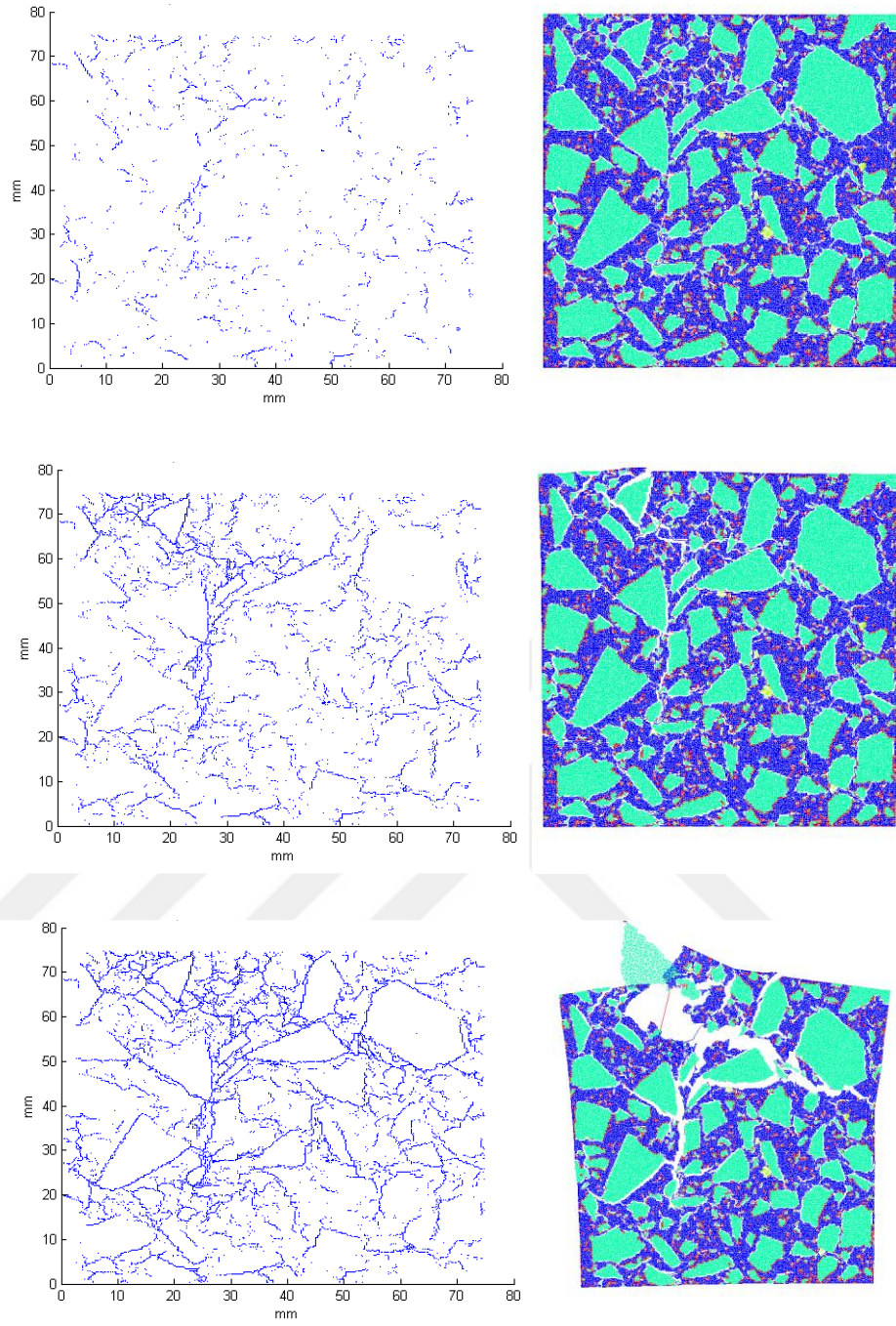
Belirtilen tüm bu bilgilerin ışığında Latis model simülasyonları çalıştırılmıştır. Yükleme noktalarına genleşme katsayıları dahilinde, latisin köşeleri harekete kısıtlanarak birim yüklemeler uygulanmıştır. Geliştirilen bu model, her aşamada sistem içinde maksimum deformasyon ya da maksimum gerilme eşiğini aşan en zayıf elemanın sistemden çıkartılmasına ya da yeni mekanik özelliklerinin tanımlanarak devam edilmesine olanak sağlamaktadır. OTT-38, OTT-60, SPR-38 ve SPR-60 kesitlerinin program çalıştırıldıkça seçilen farklı adımlarda çatlak gelişimleri sırasıyla Şekil 5.57, 5.58, 5.59 ve 5.60'da gösterildiği gibi çıkmıştır. Dört şekilde de üstte yer alan görüntüler 4000. adımda, ortada yer alanlar 12000. adımda, altta yer alanlar ise 22000. adımda yüklenen elemanların dağılımını ve kesitin hasarlı durumunu göstermektedir.



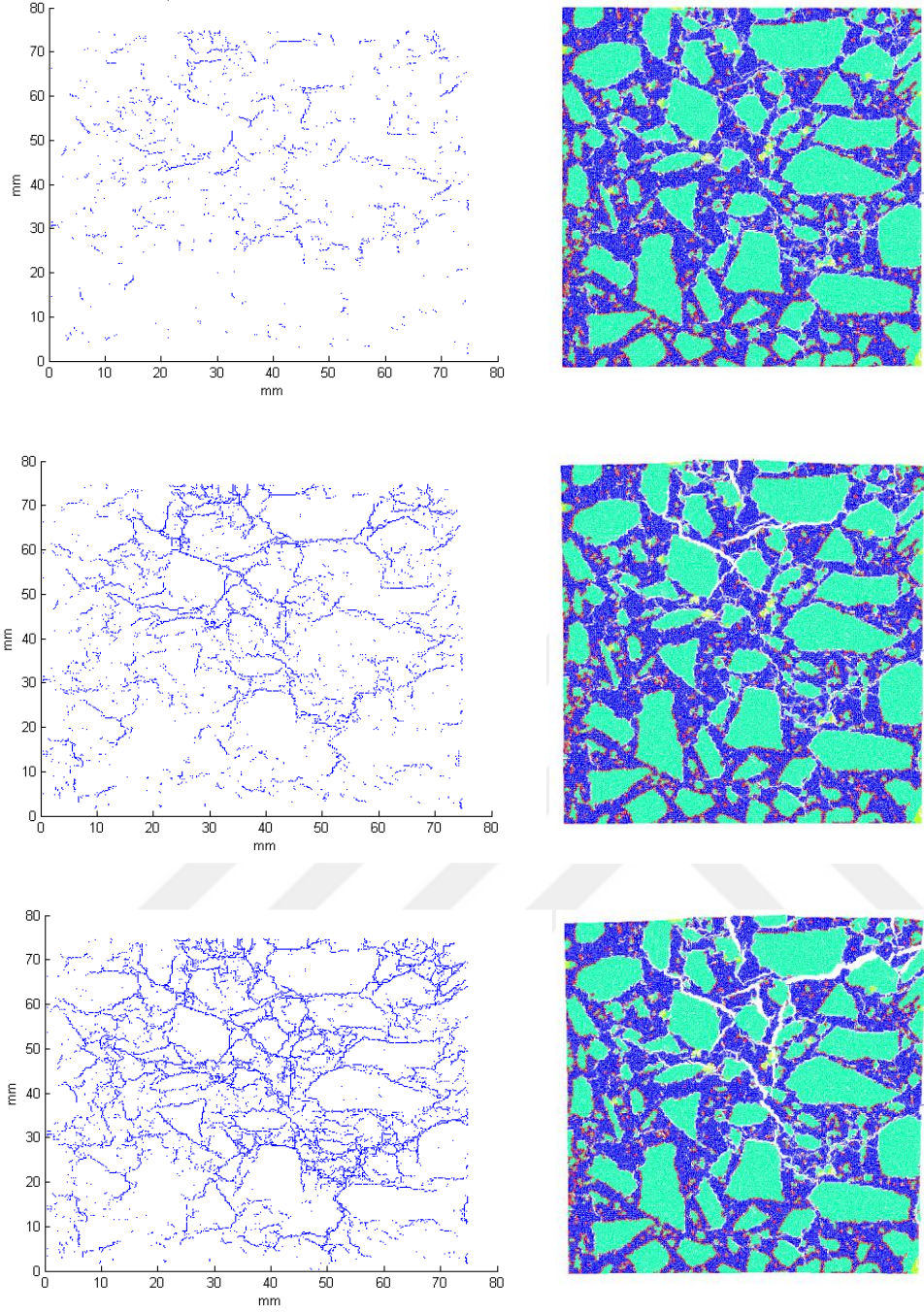
Şekil 5.57 OTT-38 kesitinde simülasyonun farklı aşamalarında çatlak gelişimleri.



Şekil 5.58 OTT-60 kesitinde simülasyonun farklı aşamalarında çatlak gelişimleri.



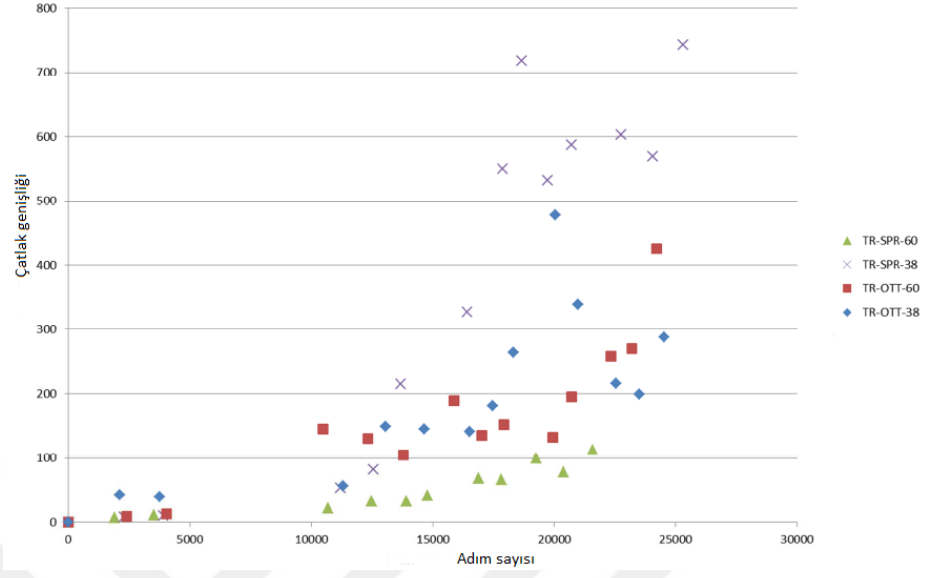
Şekil 5.59 SPR-38 kesitinde simülasyonun farklı aşamalarında çatlak gelişimleri.



Şekil 5.60 SPR-60 kesitinde simülasyonun farklı aşamalarında çatlak gelişimleri.

Şekil 5.57-5.60'taki hasar durumları incelendiğinde özellikle OTT-38 ve SPR-38 karışımlarında incelenen son adımlarda hasar daha yıkıcı olmuştur. Bu karışımların daha yüksek DRI değerlerine paralel olarak daha çok iri agregaların sistemden ayrılması ve hatta kırılma olaylarına rastlanmıştır. Bu şekillerde rastgele seçilen üç adımın yanı sıra, program ilerledikçe her adımda gerçekleşen çatlak genişlikleri için grafik ise Şekil 5.61'de sunulmuştur. Bu şekilde de 38°C'ye maruz kalan karışımlardaki daha yüksek

hasar anlaşılmaktadır. Şekildeki toplam çatlak genişliğinin herhangi bir birimi yoktur. Karışımlarda karşılaştırma yapılması için oransal değerlerdir.



Şekil 5.61 Tüm karışımlarda farklı adımlara karşılık gelen çatlak genişlikleri.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında kullanılan malzemelerle yürütülen çalışmalar ve uygulanan deneyler ışığında aşağıda özetlenen bulgulara ulaşılmıştır:

- Tezin başlangıç aşamasında iki farklı referans niteliğindeki yüksek reaktiviteye sahip iri agregayla uygulanan karşılaştırmalı deneylerin sonuçları, yurtdışındaki iki tecrübeli kurumla çoğunlukla benzer genleşme-zaman eğrilerinin elde edilebildiğini göstermiştir. Bu kurumlarla gerçekleştirilen çalışmada değişkenliği belirlemek için varyasyon katsayıları hesaplanmıştır. Laboratuvar içindeki değişkenlik %2-12, laboratuvarlar arası değişkenlik ise %12-38 aralığında çıkmıştır. Daha yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen deneylerde değişkenlik de artmıştır.

- Dokuz adet karışımın 60°C’de hem Ege Üniversitesi’nde hem de Dokuz Eylül Üniversitesi’nde test edilmesiyle gerçekleştirilen deneyler neticesinde 33 adet karşılaştırmalı sonuçtan 26’sının istatistiki olarak birbirine yakın çıktığı ve uyumun yine yüksek (%79) olduğu görülmüştür. Çoğunlukla erken yaşlardaki ölçümlerde güvenilirliğin daha düşük olduğu, yani kaydedilen genleşme değerleri küçükken değişkenliğin fazla olduğu anlaşılmıştır.

- Önceki tecrübeler ve mevcut tezin sonuçları beraber değerlendirildiğinde, kullanılan bazalt agregasının aynı ocaktaki konumuna bağlı olarak bile oldukça değişken reaktiviteye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, bazalt agregasında reaktifliğe neden olan camsı fazdaki SiO₂ miktarları neredeyse eşit olmasına rağmen ortaya çıkmıştır. Bazalt agregası, kaynağında seneler içinde tüketilip kaçınılmaz olarak günümüzde daha alt katmanlardan temin edilmeye başlanmıştır. Alt katmanlardaki bazaltın soğuma hızının daha yavaş olması ile değişen amorflik derecesi ve camsı matrisin safsızlığının reaktiflik derecesini etkilediği düşünülmektedir.

- Uygulanan hızlandırılmış beton prizma deneylerinin metninde yer alan “alkalilerin seviyesini çimento ağırlığının %1,25’i seviyesine çıkartma” ifadesinin bazaltın gösterdiği genleşme davranışlarında büyük önem taşıdığı görülmüştür. Bu seviyenin altındaki alkali içeriğinde ve sadece çimentodan ve uçucu külden kaynaklı alkalilerin bulunması durumunda bazaltın reaktif niteliği ortaya çıkmamıştır. Bu karışımlarda kullanılan agrega kombinasyonunun reaktiflik derecesine bağlı olarak, standartta belirtilen alkali düzeyinin aynı zamanda hem 38°C’de hem de 60°C’de aşılması gereken eşik alkali seviyesi olarak nitelendirilebileceği, alkali seviyesi-genleşme

grafiklerinden anlaşılmaktadır. Dışarıdan bu seviyeye ulaşılacak kadar NaOH ilavesi gerçekleştirildiğinde genleşmelerde zamana bağlı artışlar gözlenmiştir.

- Tez kapsamında hazırlanan tüm karışımlar içerisinde en yüksek genleşme seviyelerine atık cam agregası içeren karışımlarda rastlanmıştır. Atık cam agregası varlığında beton prizmalarda 38°C’de 52 haftada %0,13 ve 60°C’de 20 haftada %0,45 mertebesine varan genleşme değerleri ortaya çıkmıştır.

- Camın bir miktar puzolanik etki gösterebilecek 63 μm ’dan daha küçük olan tanelerinin genleşmeler üzerindeki etkisi, bu boy sınıfındaki camları içeren ve içermeyen beton karışımlar test edilerek değerlendirilmiştir. Ancak olası bir puzolanik etkiye zıt yönde etki eden iki faktörün varlığının belirlenmesi, kesin hükümlere varmanın zorlaşmasına yol açmıştır ve sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde cam tozunun genleşmeleri azaltıcı belirgin bir etkisinden bahsedilememektedir. Bu iki faktörden ilki, <63 μm boy sınıfındaki atık cam içeren karışımlardan dışarıya daha az miktarda alkali sızdığının belirlenmesi, ikincisi ise camın öğütülmesiyle birlikte daha geniş yüzey alanından boşluk çözeltisine daha çok alkali salımı potansiyelinin olmasıdır.

- Agregaları 0,7M NaOH ve 0,7M KOH çözeltilerinde bekleterek agregadan salınabilen alkalilerin miktarının belirlendiği aşamada, agrega tipinden ve sıcaklıktan bağımsız olarak daha küçük tane boyutuna sahip agregadan daha hızlı ve daha çok alkali salındığı bulunmuştur. <0,125 mm, 0,125-1 mm ve 1-4 mm alt sınıf aralıkları için ayrı ayrı gerçekleştirilen deneylerde bazalt agregalarının yapısındaki alkali oksitlerin %0,45-%1,42’sinin, atık cam agregalarındakilerin ise %0,77-%2,60’ının salınmaya elverişli durumda olduğu belirlenmiştir. Bu boy sınıflarının, agrega gradasyonu içerisindeki oranları da bilindiğinden sonuçlar kg/m^3 cinsinden de hesaplanmıştır. Sıcaklığın 38°C ve 60°C olması durumunda cam agregası kaynaklı alkalilerin betonun alkali içeriğinde oluşturduğu artış sırasıyla 1,22 ve 1,58 kg/m^3 , bazalt agregaları için ise bu artışlar yine sırasıyla 0,13 ve 0,16 kg/m^3 mertebelerindedir.

- Beton ve harçlar üzerinde uygulanan AAR deneylerinin tarif edildiği standartlarda agregaların ağırlıkça oranlar kullanılarak karışıma dahil edilmesi esas alınmaktadır. Bu haliyle mevcut standartlarda hafif agregalarla ilgili özel hükümler yer almamaktadır. Bu çalışma neticesinde, hafif agregalarla ilgili hazırlanması gereken özel metinlerin, herşeyden önce bu agregaların hacim esasına göre ilave edilmesi gerektiğiyle başlaması, hafif agregaların karışıma hangi nem durumuyla ilave edilmesi gerektiğini anlatan bilgilerin de yer alması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Standartta yer alan iri agrega/ince agrega oranının kütlege 60:40 oranında olması gerekliliğine uyulduğu zaman,

düşük özgül ağırlıkları nedeniyle iri pomza agregası miktarı çok yüksek seviyelere çıkmaktadır. Agreganın çok büyük bir bölümünün daha boşluklu yapıdaki hafif agregalardan oluşması, prizmaların özellikle ilk yaşlarda kurumaya daha yatkın olabileceğini göstermiştir; bu durum, tez kapsamında karşılaşılmassa da, ölçülen genleşmeleri de düşürücü ve doğru değerlendirmeyi engelleyici rol oynayabilir.

- Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler sonucunda hem ince hem de iri agregalar pomza içeren örneklerde genleşmelere rastlanmazken, ince agregalar bazalt ve iri agregalar pomza içeren karışımlar zamanla artan genleşmeler göstermiştir. Harç karışımlar üzerinde gerçekleştirilen ilk aşama çalışmalarında pomza agregasında reaktivite potansiyeli görülmesine rağmen, bu hafif agregayla üretilen beton prizmaların ne 38°C’de ne de 60°C’de genleşme göstermemesi, sonuçların birbiriyle uyumsuz çıkması olarak değerlendirilebilir. Ancak hem harç deneyleri ile beton deneylerinde saklama koşullarının farklılığı hem de beton prizmalarda daha boşluklu yapıda olan iri pomza agregasının da karışıma dahil edilmesi, ölçülen genleşmeleri önemli ölçüde etkilemektedir.

- Kendiliğinden yerleşen betonların reaktivitesinin araştırıldığı bölümde su/toz oranı ve filler malzemenin çeşidi olmak üzere iki parametre incelenmiştir. Filler olarak kullanılan bazalt tozu miktarının artışıyla bu karışımlar arasında en yüksek genleşme seviyesine ulaşılmıştır. Bu durum, filler olarak kullanılan bazalttaki tanelerin bir miktarının da reaktif nitelikte olabildiği yorumunu beraberinde getirmiştir. Diğer bir taraftan uçucu küllerin ve diğer pozolanların genleşmeleri azaltıcı yöndeki etkisi literatürde pek çok çalışmada bilinirken, bu çalışmada böyle bir etkiye rastlanmamıştır. Çünkü uçucu külün çimento yerine ikame edilmeyip ilave bağlayıcı olarak kullanılması, camsı fazındaki alkalilerin bir miktarının salınması ve yapının geçirimsizliğinin artması sonucu alkali sızıntısının azalması sebebi ile uçucu küllü karışımlarda genleşmelerin önlenemediği sonucunu doğurmuştur.

- Çelik lif içeren betonlarda en yüksek genleşme değeri (%0,02), en düşük çelik lif içeriğine sahip karışımda oluşmuştur. Çelik lif içeriğinin arttığı diğer iki karışımda, bu genleşme seviyesinin yarısından da az seviyelere ulaşılması, çelik lifin genleşmeyi önleyici mekanizmasını işaret etmektedir. Bu çalışmada cam lif kullanımı neticesinde ise lifin su itici yüzey kaplaması işlemi görmesi nedeniyle genleşmeleri artırıcı yönde eğilim oluşmamıştır.

- Hızlandırılmış deneylerde kapların alt kısmında yer alan saf sudan örneklerin alınması ve atomik absorpsiyon spektrometrisi ile incelenmesi, özellikle 60°C’de

alkalilerin önemli bir bölümünün beton bünyesinden dışarı sızabildiğini göstermiştir. 38°C ve 60°C'ye maruziyet sonucunda kontrol karışımlarındaki en yüksek alkali sızıntısı seviyeleri sırasıyla %11 ve %18 iken, cam içeren karışımlarda çok daha yüksek sızıntılar (en çok %28 ve %45) gelişmiştir. Hiç genleşmeyen karışımlarda dahi alkali sızıntısı problemi ile karşılaşılmış, genel bir kural olarak sıcaklığın sonuçları oldukça etkilediği bulunmuş, başlangıçta daha yüksek alkali içeriğine sahip karışımlarda alkali sızıntısı da yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte karışımların deneylere başlanmadan önce sahip oldukları Na/K ve deneyler sırasında tüm yaşlarda sızan Na/K oranları hesaplanarak karşılaştırma yapıldığında, K^+ iyonunun Na^+ iyonuna kıyasla beton bünyesinden dışarıya hareketinin daha zor olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, performans deneylerinde alkali sızıntılarının önlenmesinin mümkün olamadığından yola çıkılarak, uygun değerlendirme yapabilmek açısından alkali sızıntılarının ölçülerek kayıt altına alınmasının deney prosedürlerine eklenmesi önerilmektedir.

- Sadece bazalt içeren kontrol karışımlarında toplam alkali sızıntısı miktarları zaman içerisinde azalırken, cam agregalı karışımlarda bunun aksine ilerleyen yaşlarda hem Na^+ hem de K^+ iyonlarının sızma miktarında belirgin artışlar oluşmuştur. Cam agregalı bu karışımlarda reaksiyon geliştikçe oluşan hasar, karışımların geçirimsizliği üzerinde olumsuz etki yaratıp alkalilerin sızmasını ilerleyen yaşlarda da kolaylaştırmaktadır. Ayrıca Kontrol karışımlarında dışarıdan NaOH ilavesi uygulanmış ve bu bileşenin hızlı çözülmesi erken yaşlardaki sızıntıyı arttırmıştır. Cam agregalı karışımlarda böyle bir işlem uygulanmamış olup zaman içerisinde agreganın kendisinden salıverilen alkali daha çok ilerleyen yaşlardaki sızma hızı üzerinde rol oynamaktadır.

- Hızlandırılmış deneylerde 38°C ya da 60°C'ye maruziyet sonucunda hangi yöntemde daha yüksek genleşmeler elde edileceği kesin bir şekilde belli olmamaktadır. Bu durum, birbirine ters iki etkinin varlığındandır. Sıcaklığın yükselmesi bir yandan suyun bağıl difüzyon katsayısını arttırırken diğer yandan da karışımdan daha fazla alkalinin sızmasına yol açmaktadır. Atık cam agregası kullanıldığında ilave bir etki olarak, agreganın kendi bünyesinden salıverdiği alkali miktarının da sıcaklıkla arttığı görülmüştür. Genleşme-zaman eğrilerinde çoğunlukla gözlenen eğilim 38°C'de genleşmelerin kısa bir durağanlıktan sonra ani olarak artması ve daha sonra tekrar yavaşlamasıdır. 60°C'ye maruziyet ise genleşme hızını arttırmakta, genleşmeler ilk haftadan itibaren ani olarak gelişmekte, daha sonra genleşme hızı kademeli olarak düşmektedir.

- Donma-çözülmenin ASR ile birlikte gelişmesinin oluşturduğu sonuçlar incelendiğinde, genleşmeler ilk haftalarda ASR nedeniyle oluşmuş, donma-çözülmenin

yarattığı etki ise çevrimler ilerledikçe başlamıştır. Bu iki etkinin birbirinin peşi sıra yaratılmasıyla oluşan nihai genleşme seviyeleri, sadece ASR'nin neden olduğu genleşmelerden her koşulda daha yüksek çıkmıştır. Kütle değerleri incelendiğinde özellikle ASR sonucu içyapısı hasar gören cam agregalı karışımlarda az da olsa soyulmalar gözlemlenmiş ve kütle kaybı ilk aşamalardan itibaren başlamıştır. Daha az reaktif olan diğer karışımlarda ise genelde kütle kaybı oluşmamıştır. Ağırlık kaybı değerleri, hiçbir karışımda %2,5'u geçmezken, ultrases hızlarında cam agregalı karışımlarda oluşan %15-20'lere varan değişimler ise ciddi kayıplardır. KYB karışımların düşük boşluk oranları nedeniyle donma-çözülme çevrimlerinden biraz daha fazla etkilendiği de bulunmuştur.

- ASR ile ıslanma-kuruma etkileri birlikte uygulandığında ise, yıpratıcı etkiler donma-çözülme deneylerinde elde edilenler kadar yüksek olmamıştır. Bu iki etki birlikte oluştuğunda, ıslanma-kuruma çevrimlerinden kaynaklanan büzölmelere bağılı olarak, sadece ASR'nin neden olduğu genleşmelerden daha düşük genleşme seviyeleri meydana gelmiştir. KYB karışımları, büzölmelerden daha az etkilenmiştir. ASR nedeniyle kütle değerlerindeki artışın mertebeleri genelde ıslanma-kuruma çevrimleri sonucu kaybolan suyun miktarından yüksek çıkmıştır. UPV sonuçları incelendiğinde de donma-çözölmenin yarattığı kadar şiddetli düşüşler olmasa da, ıslanma-kuruma ve ASR etkilerinin bir bileşimi olarak UPV değerlerinde çevrimler ilerledikçe azalmalar görölmüştür.

- Tezde geliştirilen AAR ve donma-çözölme etkilerinin ya da AAR ve ıslanma-kuruma etkilerinin birlikte etkimesi durumunu simüle eden deney metotlarının sonuçları umut verici olarak değerlendirilmiştir. Numunelerin su ile temasının donma-çözölme çevrimlerinde minimum sürede tutulması ve ıslanma-kuruma çevrimlerinde de ıslanma aşamasında su yerine NaOH çözeltisinde bekletme işlemleri, numunelerin bünyesinden yüksek miktarda alkali sızıntısının önlenmesini sağlamıştır. Genel olarak farklı dayanıklılık sıkıntılarının birbirlerini tetikleyerek hasarın çoğaldığı gözlenmiştir. Örneğin, ASR'nin oldukça hızlı ve yüksek mertebede genleşmelere neden olduğu cam agregalı karışımlarda, sadece donma-çözölme çevrimleri sırasında oluşan genleşmelerin toplamı, diğer tüm karışımlara kıyasla belirgin olarak daha yüksektir. Ayrıca incelenen sekiz karışımdan altısında çoklu deneylerin sonunda elde edilen genleşme değeri, dayanıklılık sorunlarının ayrı ayrı etki etmesini göz önünde bulunduran teorik toplam genleşmeden daha yüksek çıkmıştır.

- Tez kapsamında kurulmuş olan maruziyet sahasından elde edilen sonuçlara göre hem ince hem de iri agrega olarak bazalt içeren karışımlarda yedi yıllık süreçte henüz

düzenli genleşme davranışlarıyla karşılaşmadığı, aksine daha çok değişen mertebelerde büzülmeler olduğu görülmüştür. Ancak bünyesinde atık cam içeren karışımlarda genleşmeler bu süreçte hızlı bir şekilde artmış ve harita çatlakları şeklinde hasarlar gözlemlenmiştir. Ayrıca bu karışımların ultrases hızı değişimi ile genleşme mertebeleri arasındaki ilişki uyumlu çıkmıştır. Önümüzdeki yıllarda bu sahadan veri toplanmaya devam edilecek olup özellikle hızlandırılmış deney sonuçları ile maruziyet sahası verileri arasındaki korelasyonlar araştırılacaktır.

- Modelleme çalışmalarına başlamadan önce parlak kesitlerde çatlakların konumlarına göre gruplandırılacak şekilde tek tek sayılarak belirlendiği DRI değerlerinin, karışımlarda oluşan genleşme seviyeleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Geliştirilen Latis modelleme tekniği ile kimyasal-mekanik bir bozunma olan ASR'ye bağlı varsayılan genleşme mekanizmaları ve yüklemeleri 2 boyutlu kesitler üzerinde uygulanmıştır. Malzeme içindeki fazların özellikleri ve değişimlerinden yola çıkılarak oluşan çatlakların pozisyon-yönelim ve şekilleri belirlenmiştir. Geliştirilen model, değişik hasar durumları altında malzeme üzerindeki çekme dayanımı ve elastik modül değişimlerini de göz önünde bulundurmaktadır. Son olarak hasar seviyesi ile DRI değerlerinin de uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- ACI CT-13**, 2013, ACI Concrete Terminology, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- ACI 221.1R-98**, 1998, State-of-the-Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity, American Concrete Institute, ACI Committee 221, Farmington Hills, MI.
- Alaejos, P. and Lanza, V.**, 2012, Influence of equivalent reactive quartz content on expansion due to alkali silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 42:99-104pp.
- Alptuna, G.**, 2009, Dolomit Kökenli Agregaların Alkali-Karbonat Reaktivitesinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 177s.
- Anaç, C., Esposito, R., Çopuroğlu, O., Schlangen, E. and Hendriks, M.A.N.**, 2012, A tool for concrete performance assessment for ASR affected structures: an outlook, *Proceedings of the 14th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. T. Drimalas, J.H. Ideker and B. Fournier, Austin, Texas, USA.
- Anaç, C.**, 2016, Assessment of Damage due to Alkali-Silica Reaction in Concrete Structures, PhD Thesis, Delft University of Technology, unpublished.
- Andiç-Çakır, Ö.**, 2007, Alkali-Agrega Reaktivitesinin Tespitinde Kullanılan Deney Metotlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 252s.
- Andiç-Çakır, Ö., Çopuroğlu, O. and Katayama, T.**, 2012, A review of alkali-silica reactivity in Turkey: a case study from Izmir, West Anatolia, *Proceedings of the 14th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. T. Drimalas, J.H. Ideker and B. Fournier, Austin, Texas, USA.
- Asgeirsson, H. and Gudmundsson, G.**, 1979, Pozzolanic activity of silica dust, *Cement and Concrete Research*, 9:249-252pp.
- ASTM C114-15**, 2015, Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C150/C150M-12**, 2012, Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- ASTM C227-10**, 2010, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C289-07**, 2007, Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C294-12**, 2012, Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C295/C295M-12**, 2012, Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C311/C311M-16**, 2016, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C586-11**, 2011, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks as Concrete Aggregates (Rock-Cylinder Method), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C666/C666M-15**, 2015, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1105-08a**, 2016, Standard Test Method for Length Change of Concrete due to Alkali-Carbonate Rock Reaction, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1260-14**, 2014, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1293-08b**, 2015, Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete due to Alkali-Silica Reaction, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aşık, İ., Şen, H., Ergintav, Y., Ünsal, A., Şentürk, E. ve Bayrak, E.**, 2004, Alkali agrega reaksiyonu yönünden zararlı olan bir ocağın iyileştirilmesi, Beton 2004, İstanbul.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H.**, 2010, Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul, 318s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Barneyback, R.S.J. and Diamond, S.,** 1981, Expression and analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars, *Cement and Concrete Research*, 11:279-285pp.
- Barneyback, R.S.J.,** 1983, Alkali Silica Reactions in Portland Cement Concrete, PhD Thesis, Purdue University.
- Bažant, Z.P., Zi, G. and Meyer, C.,** 2000, Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different sizes, *Journal of Engineering Mechanics*, 126(3):226-232pp.
- Bektaş, F., Turanlı, L., Topal, T. and Göncüoğlu, M.C.,** 2004, Alkali reactivity of mortars containing chert and incorporating moderate-calcium fly ash, *Cement and Concrete Research*, 34:2209-2214pp.
- Ben Haha, M.,** 2006, Mechanical Effects of Alkali Silica Reaction in Concrete Studied by SEM-Image Analysis, PhD Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 176p.
- Berra, M., Mangialardi, T. and Paolini, A.E.,** 2005, Alkali-silica reactivity criteria for concrete aggregates, *Materials and Structures*, 38:373-380pp.
- Berra, M., Mangialardi, T. and Paolini, A.E.,** 2018, Alkali release from aggregates in long-service concrete structures: laboratory test evaluation and ASR prediction, *Materials*, 11(8):1393.
- Bérubé, M.A. and Duchesne, J.,** 1996, Alkali contribution by aggregates to concrete, *Proceedings of the 10th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Melbourne, Australia, 899-906pp.
- Bérubé, M.A., Duchesne, J., Dorion, J.F. and Rivest, M.,** 2002, Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity, *Cement and Concrete Research*, 32:1215-1227pp.
- Bérubé, M.A., Duchesne, J., Dorion, J.F. and Rivest, M.,** 2004, Reply to the discussion by C. Shi of the paper “Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity”, *Cement and Concrete Research*, 34:897-899pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bérubé, M.A., Fournier, B. and Côté,** 2012a, Testing concrete cores for residual expansion due to AAR – an attempt to minimize alkali leaching and consequent unrealistic expansion decrease, *Proceedings of the 14th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. T. Drimalas, J.H. Ideker and B. Fournier, Austin, Texas, USA.
- Bérubé, M.A., Fournier, B. and Côté,** 2012b, Using the damage rating index for assessing the expansion of concrete affected by freeze-thaw, sulphate attack, or ASR, *Proceedings of the 14th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. T. Drimalas, J.H. Ideker and B. Fournier, Austin, Texas, USA.
- Beyene, M., Snyder, A., Lee, R.J. and Blaszkiewicz, M.,** 2013, Alkali Silica Reaction (ASR) as a root cause of distress in a concrete made from Alkali Carbonate Reaction (ACR) potentially susceptible aggregates, *Cement and Concrete Research*, 51:85-95pp.
- Bishnoi, S. and Uomoto, T.,** 2008, Strain-temperature hysteresis in concrete under cyclic freeze-thaw conditions, *Cement and Concrete Composites*, 30:374-380pp.
- Blanks, R.F. and Meissner, H.S.,** 1946, The expansion test as a measure of alkali-aggregate reaction, *Journal of the American Concrete Institute*, 17(5):517-539pp.
- Bleszynski, R.F.,** 2002, The Performance and Durability of Concrete with Ternary Blends of Silica Fume and Blast Furnace Slag, PhD thesis, University of Toronto.
- Böhm, M. and Baetzner, S.,** 2008, The effect of the alkalinity of the pore solution on ASR, *Proceedings of the 13th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. M.A.T.M. Broekmans and B.J. Wigum, Trondheim, Norway, 501-510pp.
- Broekmans, M.A.T.M.,** 1999, Classification of the alkali-silica reaction in geochemical terms of silica dissolution, *Proceedings of the 7th Euroseminar on Microscopy Applied on Building Materials*, Eds. H. Pietersen, J.A. Larbi and H.H.A. Janssen, Delft, 155-170pp.
- Broekmans, M.A.T.M.,** 2002, The Alkali-Silica Reaction: Mineralogical and Geochemical Aspects of Some Dutch Concretes and Norwegian Mylonites, PhD Thesis, University of Utrecht, Geologica Ultraiectina, 144p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Brouard, E.**, 2012, Potentially reactive aggregates with a pessimum effect: pessimum effect mechanisms, review of PRP qualification tests and conditions of use of these aggregates, *Proceedings of the 14th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. T. Drimalas, J.H. Ideker and B. Fournier, Austin, Texas, USA.
- BS 7943**, 1999, Guide to the Interpretation of Petrographical Examinations for Alkali-Silica Reactivity, ISBN: 0580282732.
- Cantle, J.E.**, 1982, Instrumental Requirements and Optimisation, in: J.E. Cantle (ed), *Atomic Absorption Spectrometry*, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 15-36pp.
- Carman, P.C.**, 1940, Constitution of colloidal silica, *Transactions, Faraday Society*, 36:964-973pp.
- Castro, N.**, 2012, Alkali-Aggregate Reactions in Concrete – Study of the Relationship between Aggregate Petrographic Properties versus Expansion Tests, PhD Thesis, NTNU – Trondheim Norwegian University of Science and Technology, 164p.
- Chappex, T. and Scrivener, K.**, 2012a, Alkali fixation of C-S-H in blended cement pastes and its relation to alkali silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 42:1049-1054pp.
- Chappex, T. and Scrivener, K.**, 2012b, The influence of aluminum on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 42:1645-1649pp.
- Chatterji, S., Jensen, A.D., Thaulow, N. and Christensen, P.**, 1986, Studies of alkali-silica reaction. Part 3. Mechanism by which NaCl and Ca(OH)₂ affect the reaction, *Cement and Concrete Research*, 16:246-254pp.
- Chatterji, S., Thaulow, N. and Jensen, A.D.**, 1987, Studies of alkali-silica reaction. Part 4. Effect of different alkali salt solutions on expansion, *Cement and Concrete Research*, 17:777-783pp.
- Chatterji, S., Fördös, Z. and Thaulow, N.**, 1992, Alkali-Silica Reaction – Danish Experience, in: R.N. Swamy (ed), *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Blackie and Sun Ltd, Glasgow and London, 188-207pp.
- Chatterji, S.**, 2005, Chemistry of alkali-silica reaction and testing of aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 27:788-795pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cole, W.F. and Lancucki, C.J.**, 1983, Products formed in an aged concrete: the occurrence of okenite, *Cement and Concrete Research*, 13:611-618pp.
- Costa, U., Mangialardi, T. and Paolini, A.E.**, 2017, Minimizing alkali leaching in the concrete prism expansion test at 38°C, *Construction and Building Materials*, 146:547-554pp.
- CSA**, 1986, Supplement no. 2 to CSA Standards CAN3-A23.1 and CAN3-A23.2, Canadian Standard Association.
- CSA A23.1-00**, 2000, Concrete Materials and Methods of Concrete Construction, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada.
- CSA A23.1-04**, 2004, Concrete Materials and Methods of Concrete Construction, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada.
- CSA A23.2-14A**, 2000, Potential Expansivity of Aggregates (Procedure for Length Change due to Alkali Aggregate Reaction in Concrete Prisms, Canadian Standards Association, CSA International, Toronto, Ontario, CA.
- CSA A23.2-15A**, 2004, Petrographic Examination of Aggregates, Canadian Standards Association, CSA International, Toronto, Ontario, CA.
- Çopuroğlu, O., Andiç-Çakır, Ö. Broekmans, M.A.T.M. and Kühnel, R.**, 2007, Mineralogy, geochemistry and expansion testing of an alkali-reactive basalt from western Anatolia, Turkey, In: I. Fernandes et al. (Eds), *Proceedings of the 11th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, Porto, Portugal.
- Çopuroğlu, O., Andiç-Çakır, Ö. Broekmans, M.A.T.M. and Kühnel, R.**, 2009, Mineralogy, geochemistry and expansion testing of an alkali-reactive basalt from western Anatolia, Turkey, *Materials Characterization*, 60:756-766pp.
- Detwiler, R.**, 1997, The role of fly ash composition in reducing alkali-silica reaction, Portland Cement Association, R&D Serial No. 2092, 33p.
- Diamond, S.**, 1981, Effects of two Danish fly ashes on alkali contents of pore solutions of cement-fly ash pastes, *Cement and Concrete Research*, 11(3):383-394pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Diamond, S., Barneyback, R.S. and Struble, L.J.,** 1981, On the physics and chemistry of alkali silica reactions, *Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Cape Town, South Africa, NBRI of the Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, 1-11pp.
- Diamond, S.,** 1983, Alkali-reactions in concrete-pore solution effects, *Proceedings of the 6th International Conference Alkalies in Concrete-Research and Practice*, Copenhagen, Denmark, 155-166pp.
- Diamond, S.,** 1989, ASR – Another look at mechanisms, *Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. K. Okada, S. Nishibayashi and M. Kawamura, Kyoto, Japan, 83-94pp.
- Diamond, S.,** 2000, Chemistry and other characteristics of ASR gels, *11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Eds. M. A. Bérubé, B. Fournier and B. Durand, Québec City, Canada, 31-40pp.
- Dolar Mantuani, D.M.M.,** 1981, Undulatory extinction in quartz used for identifying potentially alkali-reactive rocks, *Proceedings of the Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR)*, Cape Town, South Africa.
- Drolet, C., Duchesne, J. and Fournier, B.,** 2017, Validation of the alkali contribution by aggregates to the concrete pore solution, *Cement and Concrete Research*, 98:10-23pp.
- Duchesne, J. and Bérubé, M.A.,** 2001, Long-term effectiveness of supplementary cementing materials against alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 31:1057-1063pp.
- Duchesne, J. and Bérubé, M.A.,** 2003, Effect of the cement chemistry and the sample size on ASR expansion of concrete exposed to salt, *Cement and Concrete Research*, 33:629-634pp.
- EFNARC,** 2005, The European guidelines for self-compacting concrete, specification, production and use, 1-63pp.
- Erik, D. and Mutlutürk, M.,** 2004, Alkali-silica reactivity features of gravel-sand aggregates in Koç river (Hafik-Sivas), *ROCKMEC 2004 – VIIth Regional Rock Mechanics Symposium*, Sivas, Turkey.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Esposito, R. and Hendriks, M.A.N.,** 2019, Literature review of modelling approaches for ASR in concrete: a new perspective, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(11):1311-1331pp.
- Farny, J.A. and Kosmatka, S.H.,** 1997, Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.
- Farny, J.A. and Kerkhoff, B.,** 2007, Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Portland Cement Association, R&D Serial No. 2071b, 25p.
- Fecteau, P.L., Fournier, B., Choquette, M. and Duchesne, J.,** 2012, Contribution to the understanding of the so-called alkali-carbonate reaction (ACR), *Proceedings of the 14th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. T. Drimalas, J.H. Ideker and B. Fournier, Austin, Texas, USA.
- Fernandes, I., Noronha, F. and Teles, M.,** 2007, Examination of the concrete from an old Portuguese dam: texture and composition of alkali-silica gel, *Materials Characterization*, 58:1160-1170pp.
- Fernandes, I., Broekmans, M.A.T.M., Nixon, P., Sims, I., Ribeiro, M.D.A., Noronha, F. and Wigum, B.,** 2012, Alkali-silica reactivity of some common rock types – a global petrographic atlas, *Proceedings of the 14th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. T. Drimalas, J.H. Ideker and B. Fournier, Austin, Texas, USA.
- Fournier, B. and Bérubé, M.A.,** 2000, Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27:167-191pp.
- Fournier, B., Chevrier, R., DeGrosbois, M., Lisella, R., Folliard, K., Ideker, J., Shehata, M., Thomas, M. and Baxter, S.,** 2004a, The accelerated concrete prism test (60°C): variability of the test method and proposed expansion limits, *Proceedings of the 12th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. M. Tang and M. Deng, Beijing, China, 314-323pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Fournier, B., Nkinamubanzi, P.C. and Chevrier, R.,** 2004b, Comparative field and laboratory investigations on the use of supplementary cementing materials to control alkali-silica reaction in concrete, *Proceedings of the 12th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. M. Tang and M. Deng, Beijing, China, 528-537pp.
- Fournier, B., Ideker, J.H., Folliard, K.J., Thomas, M.D.A., Nkinamubanzi, P.C. and Chevrier, R.,** 2009, Effect of environmental conditions on expansion in concrete due to alkali-silica reaction (ASR), *Materials Characterization*, 60:669-679pp.
- Francisco, L., Darío, F. and Silvina, M.,** 2014, Dedolomitization and alkali-silica reactions in low-expansive marbles from the province of Córdoba, Argentina. A microstructural and chemical study, *Construction and Building Materials*, 58:171-181pp.
- Garcia-Diaz, E., Riche, J., Bulteel, D. and Vernet, C.,** 2006, Mechanism of damage for the alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 36:395-400pp.
- Gavrilenko, E., García del Amo, D., Calvo Pérez, B. and GarcíaGarcía, E.,** 2007, Comparison of ASR-gels in concretes against accelerated mortar bar test samples, *Magazine of Concrete Research*, 59(7):483-494pp.
- Gholizadeh-Vayghan, A., Rajabipour, F. and Rosenberger, J.L.,** 2016, Composition-rheology relationships in alkali-silica reaction gels and the impact on the gel's deleterious behavior, *Cement and Concrete Research*, 83:45-56pp.
- Gholizadeh-Vayghan, A. and Rajabipour, F.,** 2017, The influence of alkali-silica reaction (ASR) gel composition on its hydrophilic properties and free swelling in contact with water vapor, *Cement and Concrete Research*, 94:49-58pp.
- Gillott, J.E.,** 1964, Mechanism and kinetics of expansion in the alkali-carbonate rock reaction, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1(2):121-145pp.
- Gillott, J.E. and Swenson, E.G.,** 1969, Mechanism of the alkali-carbonate rock reaction, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 2:7-23pp.
- Gillott, J.E.,** 1975, Alkali-aggregate reactions in concrete, *Engineering Geology*, 9:303-326pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Glasser, F.P. and Marr, J.**, 1985, The alkali binding potential of OPC and blended cements, *Cemento*, 82:85-94pp.
- Glasser, F.P.**, 1992, Chemistry of the Alkali-Aggregate Reaction, in: R.N. Swamy (ed), *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Blackie and Sun Ltd, Glasgow and London, 30-53pp.
- Glasser, F.P.**, 2004, The Burning of Portland Cement, in: P.C. Hewlett (ed), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier Science and Technology Books, Oxford, United Kingdom, 195-240pp.
- Glasser, L.S.D. and Kataoka, N.**, 1981a, The chemistry of alkali-aggregate reaction, *Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Cape Town, South Africa, NBRI of the Council for Scientific and Industrial Research, S252/23.
- Glasser, L.S.D. and Kataoka, N.**, 1981b, The chemistry of alkali-aggregate reaction, *Cement and Concrete Research*, 11:1-9pp.
- Gogte, B.S.**, 1973, An evaluation of some common Indian rocks with special reference to alkali-aggregate reactions, *Engineering Geology*, 135-153pp.
- Grattan-Bellew, P.E.**, 1992a, Alkali-Silica Reaction – Canadian Experience, in: R.N. Swamy (ed), *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Blackie and Sun Ltd, Glasgow and London, 223-248pp.
- Grattan-Bellew, P.E.**, 1992b, Microcrystalline quartz, undulatory extinction and the alkali silica reaction, *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, 383-394pp.
- Grattan-Bellew, P.E. and Chan, G.**, 2013, Comparison of the morphology of alkali-silica gel formed in limestones in concrete affected by the so-called alkali-carbonate reaction (ACR) and alkali-silica reaction (ASR), *Cement and Concrete Research*, 47:51-54pp.
- Grattan-Bellew, P.E. and Danay, A.**, 1992, Comparison of laboratory and field evaluation of AAR in large dams, *Proceedings of the International Conference on Concrete AAR in Hydroelectric Plants and Dams*, Canadian Electrical Association and Canadian National Committee of the International Commission on Large Dams, Fredericton New Brunswick, Canada, 1-23pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Grattan-Bellew, P.E., Mitchell, L.D., Margeson, J. and Min, D.,** 2010, Is alkali-carbonate reaction just a variant of alkali-silica reaction ACR = ASR? *Cement and Concrete Research*, 40:556-562pp.
- Gümüş, S.,** 2009, Kocaeli Bölgesindeki Agregaların Alkali Silika Reaksiyonu Bakımından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 85s.
- Gündüz, L. (Ed.),** 1998, Pomza Teknolojisi (Pomza Karakterizasyonu), Cilt I, Süleyman Demirel Üniversitesi, 285s.
- Han, S. and Tang, M.,** 1984, Alkali-aggregate reaction under high temperature, high pressure and high alkali content, *Journal of Nanjing Institute of Chemical Technology*, 2:1-10pp.
- Hansen, W.C.,** 1944, Studies relating to the mechanism by which alkali-aggregate reaction produces expansion in concrete, *Journal of American Concrete Institute*, 40(3):213-227pp.
- Helmuth, R. and Stark, D.,** 1992, Alkali-silica reactivity mechanisms, *Materials Science of Concrete III*, Skalny, J. Ed., American Ceramic Society, Waterville, OH.
- Helmuth, R.,** 1993, Alkali-Silica Reactivity: An Overview of Research, SHRP Report C-342. National Research Council, Washington DC, 105p.
- Hobbs, D.W. and 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):235-242pp.
- Hobbs, D.W.,** 1988, Alkali-Silica Reaction in Concrete, Thomas Telford Ltd, London, 183p.
- Hong, K.,** 1998, Cyclic Wetting and Drying and Its Effects on Chloride Ingress in Concrete, Thesis for Master of Applied Science, Department of Civil Engineering, University of Toronto.
- Hong, S.Y. and Glasser, F.P.,** 2002, Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels Part II. Role of alumina, *Cement and Concrete Research*, 32:1101-1111pp.
- Hou, X., Struble, L.J. and Kirkpatrick, R.J.,** 2004, Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite, *Cement and Concrete Research*, 34:1683-1696pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hudec, P.P. and Ghamari, R.C.**, 2000, Ground waste glass as an alkali-silica reactivity inhibitor, *Proceedings of the 11th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. M. A. Bérubé, B. Fournier and B. Durand, Québec City, Canada, 663-672pp.
- Hünger, K.J., Hübert, C., Scholz, Y. and Kronemann, J.**, 2012, Changes of pore solution composition under accelerated mortar bar and concrete prism test conditions, *Proceedings of the 14th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. T. Drimalas, J.H. Ideker and B. Fournier, Austin, Texas, USA.
- Ichikawa, T. and Miura, M.**, 2007, Modified model of alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 37:1291-1297pp.
- Ideker, J.H., East, B.L., Folliard, K.J., Thomas, M.D.A. and Fournier, B.**, 2010, The current state of the accelerated concrete prism test, *Cement and Concrete Research*, 40:550-555pp.
- Jackson, P.J.**, 2004, Portland Cement: Classification and Manufacture, in: P.C. Hewlett (ed), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier Science and Technology Books, Oxford, United Kingdom, 25-94pp.
- Jensen, V.**, 2012, The controversy of alkali carbonate reaction: state of art on the reaction mechanisms and behaviour in concrete, *Proceedings of the 14th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. T. Drimalas, J.H. Ideker and B. Fournier, Austin, Texas, USA.
- Jica/KGM**, 1996, The Study on the Maintenance and Rehabilitation of Highway Bridges in the Republic of Turkey, Chapter 11, Investigation into Potential Alkali Aggregate Reaction, Oriental Consultants Co. Ltd. and Japan Overseas Consultants Co. Ltd.
- Jones, T.N.**, 1988, A new interpretation of alkali-silica reaction and expansion mechanisms in concrete, *Chemistry and Industry*, 40-44pp.
- Katayama, T.**, 1992, A critical review of carbonate rock reactions – is their reactivity useful or harmful? *Proceedings of the 9th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Ed. A.B. Poole, London, England, 508-518pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Katayama, T.**, 2000, Alkali-aggregate reaction in the vicinity of Izmir, Western Turkey, *Proceedings of the 11th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. M. A. Bérubé, B. Fournier and B. Durand, Québec City, Canada, 365-374pp.
- Katayama, T.**, 2004, How to identify carbonate rock reactions in concrete, *Materials Characterization*, 53:85-104pp.
- Katayama, T.**, 2010, The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) – Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR, *Cement and Concrete Research*, 40:643-675pp.
- Kawamura, M., Takemoto, K. and Hasaba, S.**, 1983, Application of quantitative EDXA analyses and microhardness measurements to the study of alkali-silica reaction mechanisms, *Proceedings of the Sixth International Conference on Alkalis in Concrete*, 167-174pp.
- Kim, T., Olek, J. and Jeong HG.**, 2015, Alkali-silica reaction: Kinetics of chemistry of pore solution and calcium hydroxide content in cementitious system, *Cement and Concrete Research*, 71:36-45pp.
- Kirkpatrick, R.J.**, 1991, MAS nuclear magnetic resonance spectroscopy of cement systems, *ACBM Seminar*, Northwestern University, Evanston.
- Kocaçitak, S.**, 1975, A note of information regarding to alkali-aggregate reactions in Turkey, *Proceedings of the Symposium on Alkali-Aggregate Reaction Preventative Measures*, Ed. H. Asgeirsson, Reykjavik, Iceland, 259-262pp.
- Kollek, J.J., Varma, S.P. and Zaris, C.**, 1986, Measurement of OH⁻ ion concentrations of pore fluids and expansion due to ASR in composite cement mortars, *Proceedings of the 8th Congress on the Chemistry of Cement*, Vol. 3, Rio de Janeiro, Brazil, 183-189pp.
- Korkanç, M. and Tuğrul, A.**, 2004, Evaluation of selected basalts from Niğde, Turkey, as source of concrete aggregate, *Engineering Geology*, 75:291-307pp.
- Korkanç, M. and Tuğrul, A.**, 2005, Evaluation of selected basalts from the point of alkali-silica reactivity, *Cement and Concrete Research*, 35:505-512pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kuroda, T., Nishibayashi, S., Inoue, S. and Yoshino, A.,** 2000, Effects of the particle size of reactive fine aggregate and accelerated test conditions on ASR expansion of mortar bar, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 22:113-118pp.
- Kuroda, T., Inoue, S., Yoshino, A. and Nishibayashi, S.,** 2004, Effects of particle size, grading and content of reactive aggregate on ASR expansion of mortars subjected to autoclave method, *Proceedings of the 12th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. M. Tang and M. Deng, Beijing, China, 736-743pp.
- Lawrence, C.D.,** 2004, The Constitution and Specification of Portland Cements, in: P.C. Hewlett (ed), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier Science and Technology Books, Oxford, United Kingdom, 131-193pp.
- Lee, G., Ling, T.C., Wong, Y.L. and Poon, C.S.,** 2011, Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks, *Construction and Building Materials*, 25:2611-2618pp.
- Leemann, A. and Lothenbach, B.,** 2008, The influence of potassium-sodium ratio in cement on concrete expansion due to alkali-aggregate reaction, *Cement and Concrete Research*, 38:1162-1168pp.
- Lindgård, J., Pedersen, B., Bremseth, S.K., Dahl, P.A., Rønning, T.F. and Kjellsen, K.O.,** 2008, Experience using the Norwegian 38°C concrete performance test evaluating the alkali reactivity of concrete mixes and different binder compositions, *Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Trondheim, Norway, 931-940pp.
- Lindgård, J., Nixon, P.J., Borchers, I., Schouenborg, B., Wigum, B.J., Haugen, M. and Åkesson, U.,** 2010, The EU "PARTNER" Project – European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: final results and recommendations, *Cement and Concrete Research*, 40:611-635pp.
- Lindgård, J., Andiç-Çakır, Ö., Fernandes, I., Rønning, T.F. and Thomas, M.D.A.,** 2012, Alkali-silica reactions (ASR): literature review on parameters influencing laboratory performance testing, *Cement and Concrete Research*, 42:223-243pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lindgård, J., Thomas, M.D.A., Sellevold, E.J., Pedersen, B., Andiç-Çakır, Ö., Justnes, H. and Rønning, T.F.,** 2013a, Alkali-silica reaction (ASR) – performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion, *Cement and Concrete Research*, 53:68-90pp.
- Lindgård, J., Sellevold, E.J., Thomas, M.D.A., Pedersen, B., Justnes, H. and Rønning, T.F.,** 2013b, Alkali-silica reaction (ASR) – performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on concrete porosity, moisture state and transport properties, *Cement and Concrete Research*, 53:145-167pp.
- Lindgård, J., Rønning, T.F., Thomas, M.D.A., Fournier, B. and Silva, A.S.,** 2016, ASR – performance testing: main findings in the Norwegian COIN project, *Proceedings of the 15th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Sao Paulo, Brazil.
- Locati, F., Marfil, S., Baldo, E. and Maiza, P.,** 2010, Na₂O, K₂O, SiO₂ and Al₂O₃ release from potassic and calcic-sodic feldspars into alkaline solutions, *Cement and Concrete Research*, 40:1189-1196pp.
- Locati, F., Marfil, S., Maiza, P. and Baldo, E.,** 2012, Characterization of ASR products in a 40-year-old highway province of Córdoba, Argentina, *Proceedings of the 14th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. T. Drimalas, J.H. Ideker and B. Fournier, Austin, Texas, USA.
- Longuet, P., Burglen, L. and Zelwer, A.,** 1973, La phase liquid du ciment hydraté, *Revue des Matériaux de Construction*, 676:35-41pp.
- Lu, D., Mei, L., Xu, Z., Tang, M., Mo, X. and Fournier, B.,** 2006a, Alteration of alkali reactive aggregates autoclaved in different alkali solutions and application to alkali-aggregate reaction in concrete (II) expansion and microstructure of concrete microbar, *Cement and Concrete Research*, 36:1191-1200pp.
- Lu, D., Zhou, X., Xu, Z., Lan, X., Tang, M. and Fournier, B.,** 2006b, Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the Three-Gorges dam concrete, *Cement and Concrete Research*, 36:1157-1165pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Maas, A.J., Ideker, J.H. and Juenger, M.C.G.**, 2007, Alkali silica reactivity of agglomerated silica fume, *Cement and Concrete Research*, 37:166-174pp.
- Macphee, D.E. and Lachowski, E.E.**, 2004, Cement Components and Their Phase Relations, in: P.C. Hewlett (ed), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier Science and Technology Books, Oxford, United Kingdom, 95-129pp.
- Mannasoğlu, N.**, 2010, Granitik Kayaçların Alkali-Agrega Reaktivitelerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 169s.
- Massazza, F.**, 2004, Pozzolana and Pozzolanitic Cements, in: P.C. Hewlett (ed), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Elsevier Science and Technology Books, Oxford, United Kingdom, 471-635pp.
- McGowan, J.K. and Vivian, H.E.**, 1952, Studies in cement-aggregate reaction: correlation between crack development and expansion of mortars, *Australian Journal of Applied Science*, 3:228-232pp.
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M.**, 2006, *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*, McGraw-Hill, Third Edition, New York, 659p.
- Meissner, H.S.**, 1941, Cracking in concrete due to expansive reaction between aggregate and high-alkali cement as evidenced in Parker Dam, *Proceedings ACI Journal*, 37:549-568pp.
- Milanesi, C.A., Marfil, S., Maiza, P.J. and Batic, O.R.**, 2012, An expansive dolostone from Argentina – the common dilemma: ACR or another variant of ASR? *Proceedings of the 14th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. T. Drimalas, J.H. Ideker and B. Fournier, Austin, Texas, USA.
- Mindness, S., Young, J.F. and Darwin, D.**, 2003, *Concrete*, Pearson Education, Inc., Second Edition, New Jersey, 644p.
- Moisson, M., Cyr, M., Ringot, E. and Carles-Gibergues, A.**, 2004, Efficiency of reactive aggregate powder in controlling the expansion of concrete affected by alkali-silica reaction (ASR), *Proceedings of the 12th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. M. Tang and M. Deng, Beijing, China, 617-624pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Montgomery, D.C. and Runger, G.C.**, 2014, Applied Statistics and Probability for Engineers, Sixth Edition, John Wiley and Sons, Inc.
- Mukhopadhyay, A.K. and Liu, K.W.**, 2014, ASR testing: a new approach to aggregate classification and mix design verification technical report, Report 0-6656-1, Texas A&M Transportation Institute, College Station, Texas 77843-3135, 184p.
- Multon, S., Cyr, M., Sellier, A., Leklou, N. and Petit, L.**, 2008, Coupled effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion, *Cement and Concrete Research*, 38:350-359pp.
- Nerenst, P.**, 1952, Betonteknologiske Studier i USA – Rapport over ECA Studierejse, November 1950 to February 1951 (in Danish), The Danish National Institute of Building Research, Copenhagen, Series SBI Studie No. 7.
- Nixon, P.J., Page, C.L., Bollinghaus, R. and Canham, I.**, 1986a, The effect of a Pfa with a high total alkali content on pore solution composition and alkali silica reaction, *Magazine of Concrete Research*, 38:30-35pp.
- Nixon, P.J., Page, C.L., Canham, I. and Bollinghaus, R.** 1986b, Sodium chloride and alkali aggregate reaction, *Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Ed. P.E. Grattan-Bellew, Noyes Publications, Ottawa, Canada, 110-114pp.
- Nixon, P.J. and Sims, I.**, 1992, Alkali aggregate reaction – accelerated tests interim report and summary of national specifications, *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete*, Vol.2, Published by the Concrete Society, Slough, 731-738pp.
- Nixon, P. and Sims, I.**, 2016, Globalising AAR: 26 years of RILEM endeavour, *Proceedings of the 15th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Sao Paulo, Brazil, 1-10pp.
- Ouali, A.**, 1997, Étude expérimentale du lessivage des alcalins et du silicium extractibles des granulats naturels, Université de Paris VI, France.
- Page, C.L. and Vennesland, O.**, 1983, Pore solution composition and chloride binding capacity of silica fume cement pastes, *Materials and Structures*, 16:19-25pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pedersen, B.M.**, 2004, Alkali-Reactive and Inert Fillers in Concrete, Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Structural Engineering, 198p.
- Pedersen, B.M., Wigum, B.J. and Lindgård, J.**, 2016, Influence of aggregate particle size on the alkali-silica reaction – a literature review, *Proceedings of the 15th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Sao Paulo, Brazil, 1-10pp.
- Peterson, K., Gress, D., Van Dam, T. and Sutter, L.**, 2006, Crystallized alkali-silica gel in concrete from the late 1890s, *Cement and Concrete Research*, 36:1523-1532pp.
- Plusquellec, G., Geiker, M.R., Lindgård, J., Duchesne, J., Fournier, B. and De Weerd, K.**, 2017, Determination of the pH and the free alkali metal content in the pore solution of concrete: review and experimental comparison, *Cement and Concrete Research*, 96:13-26pp.
- Poole, A.B.**, 1992a, Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, in: R.N. Swamy (ed), *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Blackie and Sun Ltd, Glasgow and London, 1-29pp.
- Poole, A.B.**, 1992b, Alkali-silica reactivity mechanisms of gel formation and expansion, *Proceedings of the 9th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Ed. A.B. Poole, London, England, 782-789pp.
- Poulsen, A.**, 1914, Betons Holdbarhed, Lecture in the Institution of Danish Civil Engineers, *Ingeniøren*, 31:293-300pp.
- Powers, T. and Steinour, H.**, 1955, An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction. Part I – The chemical reactions and mechanisms of expansion, *Journal of American Concrete Institute*, 26:497-516pp.
- Prezzi, M., Monteiro, P.J.M. and Sposito, G.**, 1997, The alkali-silica reaction, part I: use of the double-layer theory to explain the behavior of reaction-product gels, *ACI Materials Journal*, 94(1):10-16pp.
- Rajabipour, F., Maraghechi, H. and Fischer, G.**, 2010, Investigating the alkali-silica reaction of recycled glass aggregates in concrete materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(12):1201-1208pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rajabipour, F., Giannini, E., Dunant, C., Ideker, J.H. and Thomas, M.D.A.,** 2015, Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps, *Cement and Concrete Research*, 76:130-146pp.
- Ramlochan, T., Thomas, M.D.A. and Gruber, K.A.,** 2000, The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research*, 30(3):339-344pp.
- Ramyar, K.,** 2013, Betonda Alkali-Silis Reaksiyonu: Bir Derleme, Çağrılı Bildiri, *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi*, 21-23 Şubat, İstanbul, 289-311s.
- Regourd, M., Hornain, H. and Poitevin, P.,** 1981, The alkali-aggregate reaction – concrete microstructural evolution, *Proceedings of the 5th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Cape Town, South Africa, S252/35.
- RILEM AAR-0,** 2016, Outline Guide to the Use of RILEM Methods in the Assessment of the Alkali-Reactivity Potential of Aggregates, in: Nixon, P.J. and Sims, I. (eds.), RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, Springer, 5-34pp.
- RILEM AAR-1.1,** 2016, Detection of Potential Alkali-Reactivity – Part 1: Petrographic Examination Method, in: Nixon, P.J. and Sims, I. (eds.), RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, Springer, 35-60pp.
- RILEM AAR-1.2,** 2016, Petrographic Atlas: Characterisation of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis, RILEM TC 219-ACS Recommended Guidance AAR-1.2, for Use with the RILEM AAR-1.1 Petrographic Examination Method, Springer, Eds. Fernandes, I., Ribeiro, M.D.A., Broekmans, M.A.T.M. and Sims, I., 1-193pp.
- RILEM AAR-2,** 2016, Detection of Potential Alkali-Reactivity – Accelerated Mortar-Bar Test Method for Aggregates, in: Nixon, P.J. and Sims, I. (eds.), RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, Springer, 61-77pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- RILEM AAR-3**, 2016, Detection of Potential Alkali-Reactivity – 38°C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms, in: Nixon, P.J. and Sims, I. (eds.), RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, Springer, 79-97pp.
- RILEM AAR-4.1**, 2016, Detection of Potential Alkali-Reactivity – 60°C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms, in: Nixon, P.J. and Sims, I. (eds.), RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, Springer, 99-116pp.
- RILEM AAR-5**, 2016, Detection of Potential Alkali Reactivity – Rapid Preliminary Screening Test for Carbonate Aggregates, in: Nixon, P.J. and Sims, I. (eds.), RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, Springer, 117-130pp.
- Rivard, P., Bérubé, M.A., Ollivier, J.P. and Ballivy, G.**, 2003, Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali-aggregate reactivity, *Cement and Concrete Research*, 33:1147-1153pp.
- Robinson, J.W.**, 1982, Basic Principles, in: J.E. Cantle (ed), Atomic Absorption Spectrometry, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1-14pp.
- Šachlová, Š., Příkryl, R. and Pertold, Z.**, 2010, Alkali-silica reaction products: comparison between samples from concrete structures and laboratory test specimens, *Materials Characterization*, 61:1379-1393pp.
- Sağlık, A., Kocabeyler, M.F., Orkun, Y., Halıcı, M. ve Tunç, E.**, 2003, Deriner Barajı ve HES inşaatı kütle betonunda kullanılması planlanan agregalarda alkali-silika reaksiyonu riski ve önlenmesine yönelik yürütülen çalışmalar, 5. *Ulusal Beton Kongresi*, 205-224 s.
- Sanchez, L.F.M., Fournier, B., Jolin, M. and Duchesne, J.**, 2015, Reliable quantification of AAR damage through assessment of the damage rating index (DRI), *Cement and Concrete Research*, 67:74-92pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Schmidt, K., Hilbig, H., Beddoe, R.E. and Heinz, D.,** 2008, Prevention of ASR with supplementary cementitious materials – long term pore solution investigations, *Proceedings of the 13th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. M.A.T.M. Broekmans and B.J. Wigum, Trondheim, Norway.
- Sen, G.,** 2014, Petrology – Principles and Practice, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 368p.
- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S. and Rodriguez, D.,** 2000, Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research*, 30(1):91-100pp.
- Shayan, A.,** 1992, The ‘pessimum’ effect in an accelerated mortar bar test using 1 M NaOH solution at 80°C, *Cement and Concrete Composites*, 14(4):249-255pp.
- Shayan, A., Diggins, R. and Ivanusec, I.,** 1996, Effectiveness of fly ash in preventing deleterious expansion due to alkali-aggregate reaction in normal and steam-cured concrete, *Cement and Concrete Research*, 26(1):153-164pp.
- Shayan, A.,** 2002, Value-added utilisation of waste glass in concrete, in: IABSE Symposium, Melbourne.
- Shayan, A., Xu, A., Chirgwin, G. and Morris, H.,** 2010, Effects of seawater on AAR expansion of concrete, *Cement and Concrete Research*, 40:563-568pp.
- Shehata, M., Thomas, M.D.A. and Bleszynski, R.F.,** 1999, The effect of fly ash composition on the chemistry of pore solution, *Cement and Concrete Research*, 29(12):1915-1920pp.
- Shehata, M.H. and Thomas, M.D.A.,** 2000, The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 30(7):1063-1072pp.
- Shehata, M.H.,** 2001, The Effects of Fly Ash and Silica Fume on Alkali Silica Reaction in Concrete, Doctoral Thesis, University of Toronto, Department of Civil Engineering, 1321p.
- Shehata, M.H. and Thomas, M.D.A.,** 2002, Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali-silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research*, 32(3):341-349pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Shehata, M.H. and Thomas, M.D.A.**, 2006, Alkali release characteristics of blended cements, *Cement and Concrete Research*, 36:1166-1175pp.
- Sims, I.**, 1992, Alkali-Silica Reaction – UK Experience, in: R.N. Swamy (ed.), *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Blackie and Sun Ltd, Glasgow and London, 122-187pp.
- Sims, I. and Brown, J.M.**, 1998, Concrete Aggregates, in: P. Hewlett (ed.) *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4th edition, London: Arnold, 903-1011pp.
- Soares, D., Santos Silva, A., Mirão, J., Fernandes, I. and Menéndez, E.**, 2016, Study on the factors affecting alkalis release from aggregates into ASR, *Proceedings of the 15th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Sao Paulo, Brazil, 1-10pp.
- Soliman, A. and Nehdi, M.**, 2012, Early-age shrinkage of ultra-high performance concrete under drying/wetting cycles and submerged conditions, *ACI Materials Journal*, 109(2):131-139pp.
- St John, D.A., Poole, A.B. and Sims, I.**, 1998, *Concrete Petrography – A Handbook of Investigative Techniques*, Arnold, United Kingdom, 474p.
- Stanton, T.E.**, 1940, Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 66(10):1781-1811pp.
- Stark, D. and Bhatti, M.S.Y.**, 1986, Alkali-silica reactivity: effect of alkali in aggregate on expansion, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 16-30pp.
- Stark, D.C.**, 1991, The moisture condition of field concrete exhibiting alkali-silica reactivity, SP-126, American Concrete Institute, Farmington Hills, 973-987pp.
- Struble, L.J.**, 1987, The Influence of Cement Pore Solution on Alkali Silica Reaction, PhD Thesis, Purdue University.
- Swenson, E.G.**, 1957a, Cement aggregate reaction in concrete of a Canadian bridge, *ASTM Proceedings*, 57:1043-1056pp.
- Swenson, E.G.**, 1957b, A reactive aggregate undetected by ASTM tests, *ASTM Bulletin*, 226:48-51pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tang, M. and Lu, Y.**, 1987, Rapid method of determining the alkali-reactivity of carbonate rock, *Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Ed. P.E. Grattan-Bellew, Ottawa, Canada, 286-287pp.
- Tang, M., Deng, M., Lan, X. and Han, S.**, 1994, Studies on alkali-carbonate reaction, *ACI Materials Journal*, 91(1):26-29pp.
- Taylor, H.F.W.**, 1987, A method for predicting alkali ion concentrations in cement pore solutions, *Advances in Cement Research*, 1:5-17pp.
- Thomas, M.D.A., Nixon, P.J. and Pettifer, K.**, 1991, The effect of pulverized fuel ash with a high total alkali content on alkali silica reaction in concrete containing natural U.K. aggregate, *Proceedings of the 2nd CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, Ed. V.M. Malhotra, Vol. 2, American Concrete Institute, Detroit, USA, 919-940pp.
- Thomas, M.D.A.**, 1996, Review of the Effect of Fly Ash and Slag on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Building Research Establishment Report, BR314, Construction Research Communications, Ltd., Watford, U.K.
- Thomas, M.D.A.**, 1998, The role of calcium in alkali-silica reaction, *Materials Science of Concrete – Sidney Diamond Symposium*, Eds. M. Cohen, S. Mindness and J.P. Skalny, The American Ceramic Society, Westerville, OH, 325-337pp.
- Thomas, M.D.A. and Innis, F.A.**, 1998, Effect of slag on expansion due to alkali-aggregate reaction in concrete, *ACI Materials Journal*, 95(6):716-724pp.
- Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J. and Shehata, M.**, 2006, Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research*, 36:1842-1856pp.
- Thomas, M.D.A. and Folliard, K.J.**, 2007, Concrete Aggregates and the Durability of Concrete, in: C.L. Page and M.M. Page (eds), *Durability of Concrete and Cement Composites*, Woodhead, Cambridge, United Kingdom, 247-281pp.
- Thomas, M.D.A.**, 2011, The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: a review, *Cement and Concrete Research*, 41:1224-1231pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Thomas, M., Dunster, A., Nixon, P. and Blackwell, B.,** 2011, Effect of fly ash on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction – Exposure site studies, *Cement and Concrete Composites*, 33:359-367pp.
- Thomas, M.D.A., Fournier, B. and Folliard, K.J.,** 2013, Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-HIF-13-019.
- Uysal, M. and Akyuncu, V.,** 2012, Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes, *Construction and Building Materials*, 34:170-178pp.
- Van-Aardt, J.H.P. and Visser, S.,** 1977, Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions, *Cement and Concrete Research*, 7:643-648pp.
- Villeneuve, V., Fournier, B. and Duchesne, J.,** 2012, Determination of the damage in concrete affected by ASR – the damage rating index (DRI), *Proceedings of the 14th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Eds. T. Drimalas, J.H. Ideker and B. Fournier, Austin, Texas, USA.
- Wang, H. and Gillott, J.E.,** 1991, Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide, *Cement and Concrete Research*, 21:647-654pp.
- West, G.,** 1991, A note on undulatory extinction of quartz in granite, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 24:160-165pp.
- Wigum, B.J.,** 1995, Alkali-Aggregate Reactions in Concrete – Properties, Classification and Testing of Norwegian Cataclastic Rocks, PhD thesis, University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology, 227p.
- Wigum, B.J. and Lindgård, J.,** 2016, RILEM Technical Committees (TCs) – Past and present, TC 258-AAA: Avoiding alkali aggregate reaction (AAR) in concrete – Performance based concept (2014-2019), *Proceedings of the 15th International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions*, Sao Paulo, Brazil, 1-7pp.
- Woods, H.,** 1968, Durability of Concrete Construction, Monograph, vol. 4, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yıldırım, K., Sümer, M. ve Uysal, M.,** 2011, Uçucu külün alkali silis reaksiyonuna etkisinin araştırılması, 8. *Ulusal Beton Kongresi*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 5-7 Ekim, İzmir, 99-107s.
- Yip, M., Mohle, J. and Bolander, J.,** 2005, Automated modeling of three-dimensional structural components using irregular lattices, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(6):393-407pp.
- Yüksel, C., Saleh-Ahari, R., Abbaspoursani, B. and Ramyar, K.,** 2013, Evaluation of three test methods for determining the alkali-silica reactivity of glass aggregate, *Cement and Concrete Composites*, 38:57-64pp.
- Zhang, X. and Groves, G.W.,** 1990, The alkali-silica reaction in OPC-silica glass mortar with particular reference to pessimum effects, *Advances in Cement Research*, 3(9):9-13pp.
- Zhang, C., Wang, A., Tang, M., Wu, B. and Zhang, N.,** 1999, Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion, *Cement and Concrete Research*, 29:1393-1396pp.
- Zhu, H., Chen, W., Zhou, W. and Byars, E.A.,** 2009, Expansion behaviour of glass aggregates in different testing for alkali-silica reactivity, *Materials and Structures*, 42:485-494pp.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca bilgi ve tecrübesiyle bana kattığı çok şey bulunan, sadece tez çalışmasında değil her konuda yol gösteren, bana güvenen ve desteğini benden esirgemeyen, kendisini hep örnek aldığım danışman hocam Prof. Dr. Kambiz RAMYAR’a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneyisel çalışma fikrinin ortaya çıkışında, çalışmanın organizasyonunda ve gerçekleştirilmesinde, analizlerde, raporlamada, kısaca tezin her aşamasında çok büyük katkısı olan, tecrübesi ve girişimleriyle çalışmalarda yol katedilmesini sağlayan hocam Doç. Dr. Özge ANDİÇ ÇAKIR’a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmayı 110M569 kodlu proje aracılığıyla destekleyen TÜBİTAK’a, 2012-BİL-023 kodlu projeye destekleyen EBİLTEM’e ve burs desteği veren Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği’ne teşekkür ederim. Bazalt agregalarının teminini sağlayan İzmir Dere Madencilik A.Ş.’ye, kimyasal kompozisyonların belirlenmesinde yardımcı olan Çimentaş İzmir Çimento Fabrikası T.A.Ş.’ye, kimyasal katkı teminini sağlayan BASF Türk Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti.’ye ve lifleri temin eden Cam Elyaf San. A.Ş. ve Bekaert İzmit Çelik Kord San. Tic. A.Ş.’ye teşekkürü bir borç bilirim. Eşgüdüm içerisinde çalışmalar sürdürdüğümüz PAT-ASR (TUDelft) proje ekibi, ICRAT “International Centre of Research and Applied Technology for Alkali Aggregate Reactions” danışmanlar grubu ve SINTEF Araştırma Merkezi’ne teşekkürlerimi sunarım.

Hem tez izleme komitemde hem de proje ekibinde yer alan ve fikirleriyle katkıda bulunan Prof. Dr. Halit YAZICI’ya, yine proje ekibinde yer alıp deneyisel çalışma sırasında bana yardımcı olan Doç. Dr. Ali MARDANI-AGHABAGLOU ve Dr. Öğr. Üyesi Ahsanollah BEGLARİGALE’ye teşekkürlerimi sunarım. Başta İnş. Yük. Müh. Hojjat HOSSEINNEZHAD, İnş. Müh. Esin Süer ÖZGÖÇMEN, İnş. Müh. Selçuk YORULMAZ ve İnş. Müh. Erdoğan TOSUN olmak üzere laboratuvar çalışması sırasında ihtiyaç duyulduğunda yardıma koşan herkese çok teşekkür ederim.

Manevi destekleri için aileme ve hep yanımda olan Arş. Gör. Pelin ÖNELÇİN, İnş. Yük. Müh. Cihangir ÇORBACIOĞLU, Arş. Gör. Mervegül UYSAL ve İnş. Yük. Müh. Elia ODABAŞI’na sonsuz teşekkürler...

Cihat YÜKSEL

İzmir, 2020



ÖZGEÇMİŞ

Cihat YÜKSEL, ilköğrenimini Çanakkale 18 Mart İlkokulu'nda, orta öğrenimini ise Çanakkale Milli Piyango Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2000 yılında girdiği Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2005 yılında mezun oldu. 2006 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yapı Malzemesi programında yüksek lisansa başladı. 2009 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayıp aynı sene içinde doktora eğitimine başladı. Aynı zamanda, 2006 yılından beri Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

