

Bazalt ve Atık Cam Agregalı Betonlarda Alkali-Silis Reaksiyonu Genleşmeleri ve Alkali Sızıntısı Seviyeleri

Cihat YÜKSEL¹
Ali MARDANI-AGHABAGLOU²
Ahsanollah BEGLARIGALE³
Halit YAZICI⁴
Kambiz RAMYAR⁵
Özge ANDIÇ ÇAKIR⁶

ÖZ

Agregada bulunan amorf silis ve boşluk çözeltilisindeki alkaliler arasında gerçekleşen alkali-silis reaksiyonu (ASR), hasarla sonuçlanan önemli durabilite sorunlarından biridir. Bu çalışmada, çeşitli karışımların alkali-silis reaktiviteleri, RILEM komitesi tarafından geliştirilen AAR-3 ve AAR-4 deneyleriyle araştırılmıştır. Bu hızlandırılmış deneylerde numunelerde yer alan alkalilerin ne kadarının dışarıya sızdığını belirlemek için kapların alt kısmında yer alan sudan örnekler alınmış ve atomik absorpsiyon spektrometrisi ile sodyum ve potasyum iyonlarının konsantrasyonu belirlenmiştir. Sonuçlara göre alkalilerin önemli bir miktarının betonlardan dışarıya sızabildiği ve buna rağmen, özellikle atık cam agregası içeren karışımlarda halen çok yüksek miktarda genleşme ile karşılaşıldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Alkali silis reaksiyonu, alkali sızıntısı, bazalt, atık cam.

ABSTRACT

Alkali-Silica Reaction Expansions and the Extent of Alkali Leaching in Concretes Containing Basalt and Waste Glass as Aggregate

Alkali-silica reaction (ASR) which takes place between amorphous silica in the aggregate and alkalis in the pore fluid is one of the durability problems causing deterioration of mortars. In this study, alkali-silica reactivity of various mixtures was evaluated according to AAR-3 and AAR-4 tests developed by RILEM. For determining the extent of alkali leaching from the specimens during these accelerated tests, samples were taken from the

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 04.05.2015 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2017 gününe kadar tartışmaya açıktır.

- 1 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - cihat.yuksel@ege.edu.tr
2 Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa - ali.mardani16@gmail.com
3 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - ahsan.beglari@gmail.com
4 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - halit.yazici@deu.edu.tr
5 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - kambiz.ramyar@ege.edu.tr
6 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - ozge.andic@ege.edu.tr

water **accumulations** at the bottom of the containers and sodium and potassium concentrations were determined using atomic absorption spectrometry. Results show that although a significant amount of alkalis can leach out, particularly waste glass aggregate leads to considerably high expansion levels.

Keywords: Alkali silica reaction, alkali leaching, basalt, waste glass.

1. GİRİŞ

Alkali-silis reaksiyonu (ASR), beton boşluk çözeltilisindeki yüksek alkali konsantrasyonu ve agregada yer alan opal, kalsedoni, çört, volkanik cam, kripto- ve mikro-kristalin kuvars, deforme kuvars, tridimit, kristobalit, vb. gibi bazı silisli mineraller nedeniyle meydana gelmektedir. Higroskopik yapıdaki alkali-silis jelinin oluşumu ile çok fazla miktarda su emilmesi ve şişme olayı, betonun çekme dayanımı aşıldığında hasara yol açmaktadır [1-3].

Stanton'un reaksiyon kimyası, deney yöntemleri ve reaksiyonu önleme yollarından bahsettiği 1940 yılındaki öncü çalışmasından [4] itibaren çok çeşitli deney yöntemleri ile kapsamlı araştırmalar gerçekleştirilmiştir [5,6]. İlk olarak Oberholster ve Davies [7] tarafından önerilen hızlandırılmış harç çubuğu deneyi (HHÇD), sadece 16 günde çok hızlı sonuç vermesine rağmen, numunelerin maruz kaldığı koşullar çok şiddetli olduğundan (80°C ve 1N NaOH çözeltisine daldırma), ölçülen genleşmelerin normalde karşılaşılabilecek seviyelerin çok üzerinde kaldığı görüşü baskındır. Günümüze dek elde edilen tecrübe, HHÇD'nin tek başına güvenilir bir deney olmadığını ve bir agregaya kaynağının bu deney uyarınca reaktif olarak nitelendirildiğinde ilave olarak beton prizma deneyinin (BPD) de gerçekleştirilmesi gerektiğini işaret etmektedir [6-9]. Sadece agregayı test eden yöntemlere kıyasla beton karışımın teste tabi tutulması daha güvenilir olup numunelerin 38°C'de, kapalı kapların içinde ve su üzerinde saklanması öngören BPD sahada oluşabilecek genleşmeleri en iyi yansıtan yöntem olarak düşünülmektedir. Fakat BPD, agreganın reaktivitesini ölçmek için uygulandığında bir yıl ve mineral katkıların genleşmeyi önlemedeki etkinliğini ölçmek için uygulandığında iki yıl sürmektedir [10]. Hızlandırılmış beton prizma deneyi (HBPD) Ranc ve Debray tarafından 2002'de [11] geliştirilmiş olup sıcaklık seviyesi 38°C'den 60°C'ye çıkartılarak gerçek saha karışımlarının performansı incelenmiştir. Araştırmacılar BPD ve HBPD genleşmeleri arasında güçlü korelasyonlar elde etmiş ve 60°C'lik yöntem için 56 günde %0,02 seviyesinde genleşme limiti önermiştir [12,13]. İlerleyen yıllarda farklı araştırmacılar tarafından yürütülen çalışmalar, henüz standart bir yöntem olmayan HBPD için çok çeşitli deney sürelerinin ve genleşme limitlerinin önerilmesini beraberinde getirmiştir [9,14,15].

2010'da sonuçları yayımlanan EU "PARTNER" Projesi'nde 10 farklı Avrupa ülkesinde bulunan 22 agregaya kaynağı RILEM tarafından geliştirilen test yöntemlerine tabi tutulmuştur. Çoğunlukla, hem RILEM AAR-3 (beton prizma deneyi, 38°C sıcaklıkta) hem de RILEM AAR-4 (beton prizma deneyi, 60°C sıcaklıkta) yöntemleri, sahadaki performansı uzun yıllardır bilinen agregaların reaktivite düzeyini doğru olarak ortaya koyabilmiştir. Özellikle AAR-4 daha tutarlı sonuçlar üretebilmiş ve yavaş reaksiyona girme eğilimi bulunan agregaya kombinasyonlarının reaktivitesini ortaya çıkarmada daha başarılı olmuştur [16]. Bazı araştırmacılara göre [11, 17-19] her iki yüksek sıcaklıklı beton prizma deneyinde de en önemli sıkıntılardan biri, beton prizmalarda başlangıçta yer alan alkalinin önemli bölümünün testler sırasında dışarıya sızması ve böylelikle genleşme seviyesinin

gerçeğin altında tahmin edilmesidir. Alkali sızıntısının hızı ve miktarı, deneylerde elde edilen genişleme-zaman ilişkisini belirleyen en önemli faktörlerden biri konumundadır.

Muhtemel ASR hasarını önceden belirleyebilmek için geçmişten günümüze sıklıkla tercih edilen mevcut standart deney metotları agreganın reaktivite potansiyelini belirlemeye yöneliktir. Bu çalışmanın ana amacı ise;

- reaktif nitelikte iki farklı agrega kullanılması neticesinde oluşan genişleme seviyelerinin RILEM tarafından henüz geliştirilen hızlandırılmış ve gerçekçi performans beton deneyleriyle ortaya koyulması ve
- deneyler esnasında karışımın alkali seviyesinde isteyerek (NaOH ilavesi veya çimento alkalinitesindeki değişimle) ya da elde olmadan (beton bünyesindeki alkalinlerin dışarıya göçüyle) oluşan değişimin genişlemelere etkisini incelemektir.

Makalede bazalt ve atık camların neden olduğu potansiyel reaktiviteyi belirleyebilmek için uygulanan AAR-3 ve AAR-4 deneyleri sonunda elde edilen veriler sunulmuştur. NaOH ilavesi, çimento alkali seviyesi ve atık cam agregası içeren karışımlarda 63 µm'dan küçük cam tanelerini uzaklaştırmanın genişleme değerleri üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Son olarak, beton prizmalardan alkali sızıntısı miktarını belirleyebilmek için atomik absorpsiyon spektrometrisi ile betonların altında yer alan sudaki sodyum ve potasyum iyonlarının konsantrasyonları da belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Kullanılan Malzeme

2.1.1. Çimento

Beton karışımların hazırlanmasında Tablo 1'de özellikleri sunulmuş olan bir tip yüksek alkalili (HA - %1,04 Na₂O eşdeğeri) ve bir tip düşük alkalili (LA - %0,63 Na₂O eşdeğeri) olmak üzere iki farklı katkısız portland çimentosu kullanılmıştır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan çimentolar üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçları

Bileşen veya özellik	HA çimentosu	LA çimentosu	Uygulanan deney standartı/metodu
Kızdırma kaybı (%)	2,09	1,53	TS EN 196-2
SiO ₂ (%)	19,72	19,54	XRF/ ICP OES
Al ₂ O ₃ (%)	5,31	4,80	XRF/ ICP OES
Fe ₂ O ₃ (%)	3,37	5,71	XRF/ ICP OES
CaO (%)	62,33	62,65	XRF/ ICP OES
MgO (%)	2,33	1,89	XRF/ ICP OES
SO ₃ (%)	3,33	3,12	TS EN 196-2
Na ₂ O (%)	0,53	0,37	XRF/ ICP OES

Tablo 1. Çalışmada kullanılan çimentolar üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçları (devam)

Bileşen veya özellik	HA çimentosu	LA çimentosu	Uygulanan deney standardı/metodu
Kızdırma kaybı (%)	2,09	1,53	TS EN 196-2
K ₂ O (%)	0,77	0,40	XRF/ ICP OES
Cl ⁻ (%)	0,0136	0,0087	XRF
Na ₂ O eşdeğeri (%) ^a	1,04	0,63	-
Çözünemeyen kalıntı (%)	0,48	0,20	TS EN 196-2
Yoğunluk (g/cm ³)	3,08	3,13	Dijital piknometre ile
Özgül yüzey – Blaine (cm ² /g)	3960	3570	Otomatik Blaine cihazı ile

^a Na₂O eşdeğeri = Na₂O + 0.656 K₂O

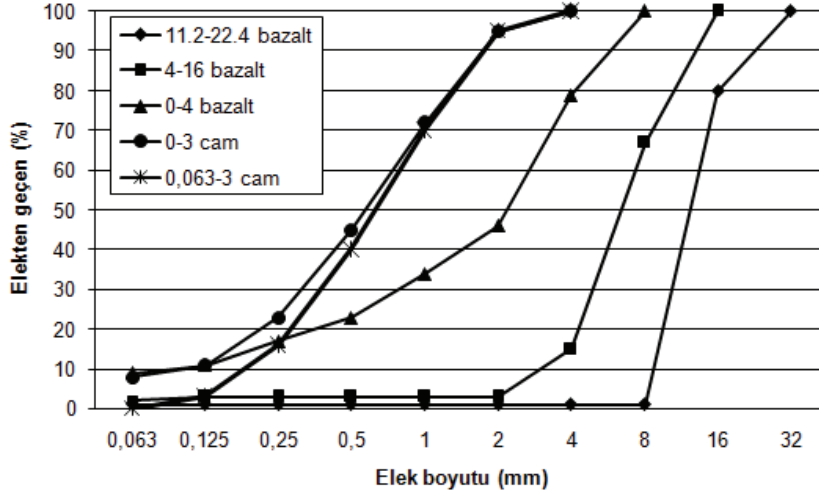
HA ve LA çimentoları sırasıyla Afyon ve Bolu çimento fabrikalarından temin edilmiştir. Bazı karışımlarda bu iki çimento tek başlarına, bazılarında ise %50-50 oranlarında karıştırılarak ve böylelikle %0,84 düzeyinde bir ilave Na₂O eşdeğer içeriği elde edilerek kullanılmıştır.

2.1.2. Agregata

Kontrol karışımı niteliğindeki betonlarda agregata fazının tamamını üç farklı boy sınıftaki (0/4 mm, 4/16 mm ve 11,2/22,4 mm) reaktif andezitik bazalt oluşturmuştur. Agreganın kaynağı İzmir'in kuzeyinde yer alan Aliğa yöresidir. Önceki tecrübelerden bazaltın camsi matrisinde yüksek SiO₂ içeriğinin (~70%) reaktifliğe neden olduğu bilinmektedir [20].

Çalışmada kullanılan ikinci tip agregata ise soda-kireç camları kategorisine giren renksiz pencere camlarından elde edilen atıklardır. Toplanan atık cam kırıkları önce yıkanmış, daha sonra kurutulmuş ve darbe ve makaslama etkisi uygulayan bir çekiçli kırıcı yardımıyla ince agregata boyutuna getirilmiştir. Atık cam içeren karışımlarda cam agregası, sadece 0/3 mm veya 0,063/3 mm tane boyutlarında kullanılırken bu karışımlarda iri agregata olarak yine bazalt tercih edilmiştir. 0,063/3 mm tane sınıfı, kırıcıdan elde edilen cam agregasının 0,063 mm'lik elekten ıslak elenmesiyle temin edilmiştir. Kırıcıdan elde edilen cam agregasının ıslak eleme neticesinde %8'inin 0,063 mm'lik elekten geçebildiği görülmüştür. Önceki çalışmalarımızdan [21] bilinen önemli bir diğer husus, soda-kireç camlarının ana bileşenlerinin yüksek miktarda SiO₂ (%71,38) ve Na₂O (%14,29) olduğudur.

Deneyssel çalışma kapsamında kullanılan her bir boy sınıftaki agreganın tane boyu dağılımları Şekil 1'de, beton karışımlarda bulunan agregata bileşimlerinin granülometrisi Tablo 2'de ve agregaların kimyasal kompozisyonları Tablo 3'te gösterilmektedir. Beton karışımlardaki agregata bileşimleri oluşturulurken deneyler için hazırlanan standart metinlerde [22] yer alan ince agreganın ve iri agreganın ağırlıkça oranlarının sırasıyla %40 ve %60 olması önerisine uyulmuştur.



Şekil 1. Bazalt ve cam agregalarının gradasyon eğrileri

Tablo 2. Betonda yer alan ince agrega türüne göre agrega karışımları için hesaplanan gradasyon değerleri

Eleğ Açıklığı (mm)	Geçen (%)		
	Karışımındaki ince agrega türü		
	0/4 bazalt	0/3 cam	0,063/3 cam
31,5	100	100	100
16	94	94	94
8	60	60	60
4	36	45	45
2	20	39	39
1	15	30	29
0,5	10	19	17
0,25	8	10	8
0,125	6	6	2
0,063	5	4	0

Tablo 3. Bazalt ve cam agregalarının kimyasal kompozisyonları

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

2.2. Deney Yöntemleri (RILEM AAR-3 ve AAR-4)

Her bir karışımdan altı adet 75x75x285 mm boyutlarında prizmalar hazırlanmış ve üçü AAR-3, diğer üçü de AAR-4 deneyine maruz bırakılmıştır. Numuneler ilk 24 saat boyunca kalıplarda 20±2°C sıcaklık ve %90 bağıl neme sahip bir odada saklanmış ve sonrasında kalıplar sökülüştür. Daha sonra 20±2°C sıcaklığa sahip odada numuneler tartılmış (W₀) ve ilk komparatör okuması (I₀) gerçekleştirilmiştir. Bir karışıma ait üç numuneyi içerisinde dik olarak muhafaza edebilecek boyutlarda standart kaplar kullanılmıştır. Kapların alt kısmına 20-30 mm yüksekliğe kadar saf su yerleştirilmiş ve numunelerin birbirlerine, kapların kenarlarına ve aşağıda bulunan suya değmemesine özen gösterilmiştir. AAR-3 deneyinde numuneleri içerisinde barındıran kaplar, 38°C'lik sıcaklığı sağlayan bir odaya (Şekil 2a), AAR-4'te ise 60°C'lik sıcaklığı sağlayan bir kabine (Şekil 2b) yerleştirilmiştir.

Her iki beton prizma deneyinde de ilerleyen haftalarda herhangi bir yaştaki boy (I_i) ve ağırlık (W_i) ölçümünden 24 saat önce numunelerin kapların içerisinde kalması koşuluyla 20±2°C'ye kadar soğumasına izin verilmiş ve tüm ölçümler 20±2°C sıcaklığa sahip oda içerisinde alınmıştır. Yakın zamanda gerçekleştirilen bir çalışmada [23], bazı beton prizma deneylerinde başvurulan bir yöntem olan numunelerin ıslak kumaşlara sarılması işleminin, özellikle erken yaşlarda betondan dışarıya alkali sızıntısını hızlandırabildiği fark edilmiştir. Dolayısıyla deneysel çalışmada bu tip bir sargılama uygulanmamıştır.

Numunelerden dışarıya sızan alkali miktarını bulabilmek için kapların alt kısmında yer alan sudan ~10 ml'lik örnekler alınmıştır. Bu arada alınan örnek yerine kaplara aynı miktarda saf su ilave edilmiştir. Düzenli aralıklarla gerçekleştirilen genleşme ölçümlerinin hemen sonrasında atomik absorpsiyon spektrometrisi yöntemiyle suda yer alan sodyum ve potasyum iyonu konsantrasyonları mg/l cinsinden belirlenmiştir. Çalışmanın bu aşaması Ege Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında Varian-SpectrAA 10 plus tipinde bir spektrometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3a). Bu yöntemde oyuk

katot lambaları (Şekil 3b) kullanılmakta olup temel prensip, miktarı belirlenmek istenilen elementin sadece kendine özgü dalga boyuna sahip ışığı absorplayacağıdır. Bu nedenle katot, miktarı belirlenmek istenilen elementten yapılmıştır. Işık kaynağının içinde anot uç tarafından iyonize edilen soy gazlar hapsedilmiştir [24].

Bir kapalı kap içerisinde herhangi bir karışıma ait üç adet numune yer aldığından kaptan alınan su örneğinde ölçülen alkali sızıntısı miktarı üçe bölünmüştür. Bir başka ifadeyle kaplarda yer alan bir karışıma ait üç adet numuneden de eşit miktarda sızıntı gerçekleştiği varsayımı kabul edilmiştir [19].



(a)



(b)

Şekil 2. a) AAR-3 deneyi için 38°C'lik sıcaklığın sağlandığı oda,
b) AAR-4 deneyi için 60°C'lik sıcaklığın sağlandığı kabin



(a)



(b)

Şekil 3. Atomik absorpsiyon spektrometrisinde kullanılan a) deney cihazının ve
b) içerisindeki oyuk katot lambalarının görünümü

2.3. Karışım Oranları

Deneysel çalışma kapsamında dokuz adet karışım AAR-3 ve AAR-4 yöntemleri uyarınca deneylere tabi tutulmuştur. Tablo 4’te karışım oranları sunulmuş olan ve su/çimento oranı 0,5 olan ilk üç seri, agrega olarak sadece bazalt ve bağlayıcı olarak da sadece LA çimentosu içermekte olup üçü de kontrol karışımları olarak adlandırılmıştır. Uygulanan AAR-3 ve AAR-4 deneylerinde gerektiğinde karışım suyuna NaOH ekleyerek beton karışımların alkali içeriğini bağlayıcı ağırlığının %1,25’ine yükseltme gerekliliği bulunmaktadır. Karışımlardaki çimento içeriği 440 kg/m^3 olduğundan standartlara uygun hazırlanan karışımın alkali içeriğinin Na_2O eşdeğeri cinsinden $5,50 \text{ kg/m}^3$ ’e eşit olması gerekmektedir. Alkali seviyesinin de genleşmeler üzerindeki etkisini anlayabilmek için $5,50 \text{ kg/m}^3$ alkali seviyesine sahip kontrol kodlu karışımın yanı sıra $4,40$ ve $6,60 \text{ kg/m}^3$ alkali yüklerine sahip kontrol- ve kontrol+ kodlu karışımlar da hazırlanmıştır.

Tablo 4. Kontrol karışımlarında malzeme oranları (kg/m^3)

	Kontrol-	Kontrol	Kontrol+
Düşük alkalili (LA) 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
Eklenen NaOH	2,12	3,57	5,02
Süperakışkanlaştırıcı	4,5	4,9	5,1
Toplam	2406	2404	2405
Alkali içeriği (kg/m^3)	4,40	5,50	6,60
Alkali içeriği (bağlayıcının %’si)	1,00	1,25	1,50

Tablo 5. Cam agregası içeren karışımlarda malzeme oranları (kg/m^3)

	0/3HA	0/3LA	0/3MA	0,063/3HA	0,063/3LA	0,063/3MA
Düşük alkalili (LA) çimento	0	440	220	0	440	220
Yüksek alkalili (HA) çimento	440	0	220	440	0	220
Su	220	220	220	220	220	220
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
0/3 cam (63 μm ’dan elenmiş)	0	0	0	667	665	666
Süperakışkanlaştırıcı	1,0	1,4	1,1	0,6	0,8	0,6
Toplam	2329	2323	2326	2329	2323	2326
Alkali içeriği (kg/m^3)	4,60	2,79	3,69	4,60	2,79	3,69
Alkali içeriği (bağlayıcının %’si)	1,04	0,63	0,84	1,04	0,63	0,84

Hazırlanan diğer altı karışımda ise ince agrega boyutundaki atık cam agregası yer almaktadır. Tablo 5'te görüldüğü üzere bu karışımlar LA ve/veya HA çimentosu içermekte olup toplam çimento içeriği her birinde yine 440 kg/m^3 'e ve su/çimento oranı 0,5'e eşittir. Cam agregası içeren bu karışımlarda NaOH ilavesi uygulanmamış olup karışım kodlarında yer alan LA, HA ve MA kısaltmaları sırasıyla düşük alkalili, yüksek alkalili veya orta seviyede alkalili çimento kullanıldığını ifade etmektedir. Yine kodlarda yer alan sayılar ise camın karışımda kullanıldığı tane boyutu aralığını simgelemektedir.

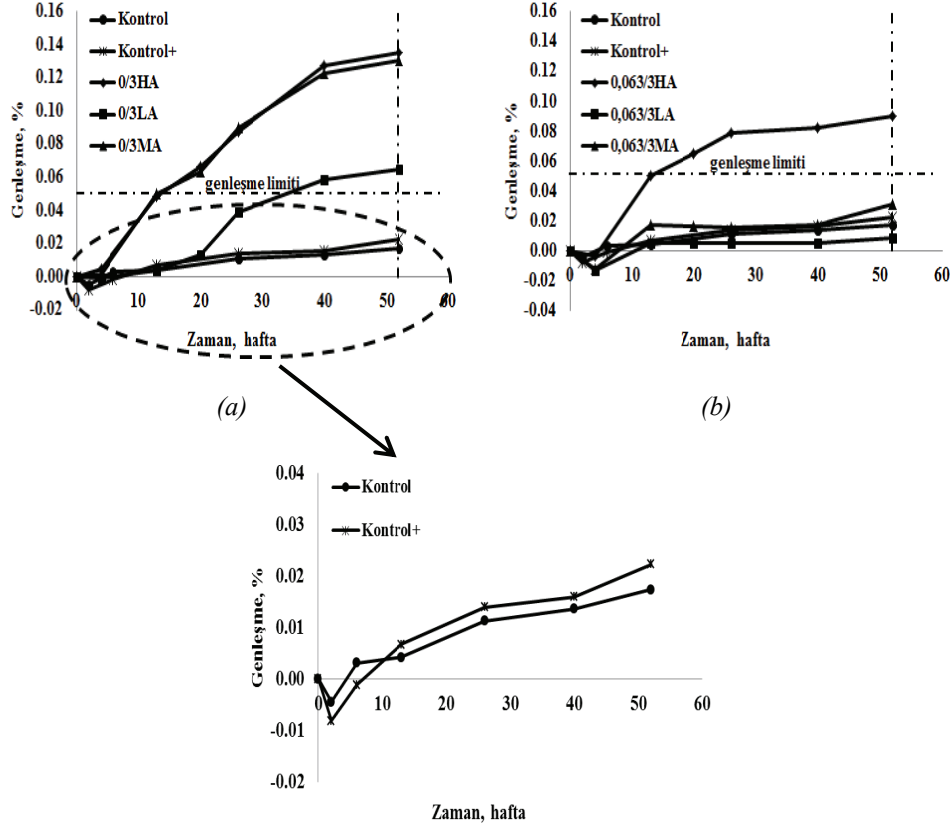
Tablo 4 ve Tablo 5'ten görüldüğü üzere çalışma kapsamında hazırlanan tüm karışımlarda gerektiğinde üreticinin önerdiği dozaj aralığında polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı beton katkıları kullanılarak taze betonda çökme değerinin $10 \pm 1 \text{ cm}$ aralığında kalması sağlanmıştır.

Hazırlanan karışımların tamamında Tablo 4 ve Tablo 5'te belirtilen alkali içerikleri hesaplanırken boşluk suyu çözeltisine sadece kullanılan çimento kaynaklı alkali salındığı varsayılmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

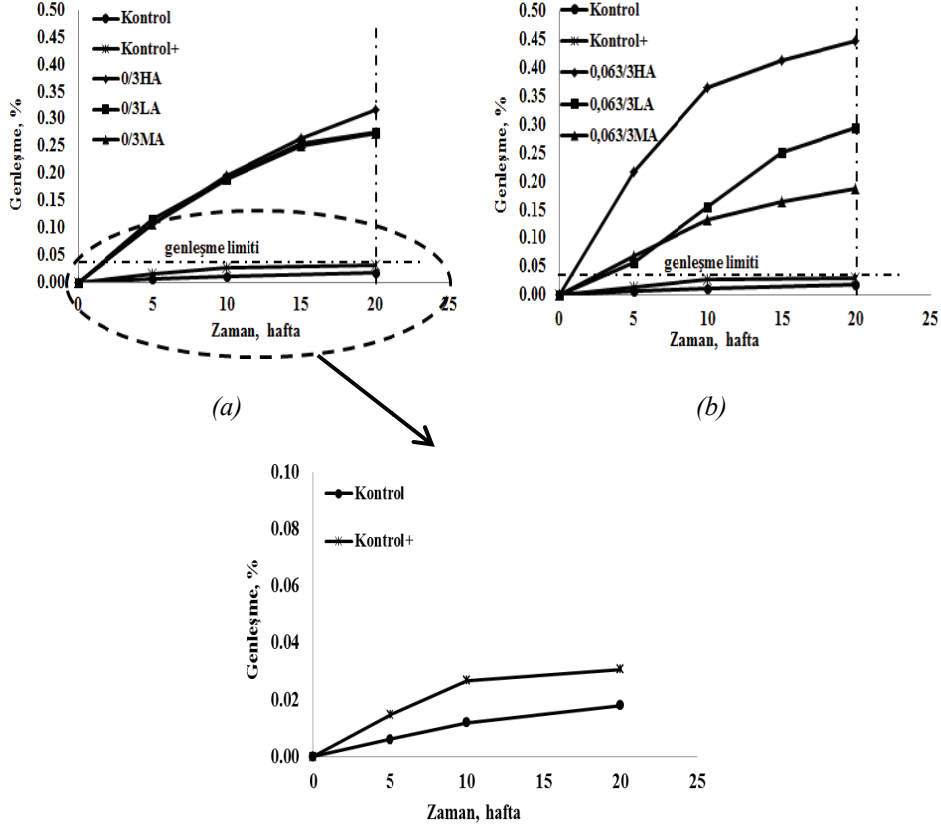
Şekil 4 ve Tablo 6'da 38°C sıcaklığa, Şekil 5 ve Tablo 7'de ise 60°C sıcaklığa maruz bırakılan karışımların zamana bağlı gelişmeleri verilmiştir. Sonuçlara göre bazalt içeren karışımların gelişmeleri, atık camlı karışımlara kıyasla çok düşük kalmıştır. Grafiklerdeki kontrol ve kontrol+ karışımlarının gelişme-zaman ilişkisi kesikli çizgilerle işaretlenerek verilerin daha rahat anlaşılması için Şekil 4c ve 5c'de ayrı olarak da sunulmuştur.

AAR-3 ve AAR-4 deneylerinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde kullanılacak olan gelişme limitleri RILEM komitesi tarafından henüz kesin olarak belirlenmemiş olup bunun için öncelikle laboratuvar deneylerinden elde edilen gelişmelerle saha betonlarının uzun dönemli gelişmeleri arasında güçlü korelasyonlara ihtiyaç duyulduğu ifade edilmektedir. Yine de EU "PARTNER" Projesi'nde elde edilen ilk sonuçlar uyarınca AAR-3 ve AAR-4 deneylerinde önerilen gelişme limitleri sırasıyla 1 yıllık sürede %0,05 ve 20 haftalık sürede %0,03 şeklindedir [16]. Şekil 4'teki sonuçlara göre kontrol karışımlarının nihai gelişmeleri, belirtilen gelişme limitinin yarısına bile ulaşmamıştır. 60°C 'ye maruz kalma sonucu oluşan sonuçların yer aldığı Şekil 5'e göre de kontrol+ karışımının gelişmesi limiti zorlukla aşabilmiş, ama kontrol karışımı yine "reaktif olmayan" kategorisinde yer almıştır. Ayrıca kontrol- karışımının her iki sıcaklık seviyesinde de deney süreleri boyunca hiç gelişme göstermediği belirlenmiştir. Bazalt agregasının ince fraksiyonunun ön deneylerimizde 80°C sıcaklıktaki harç çubuğu deneyinde 14 günde %0,5 mertebesinde gelişme ürettiği bilinmesine rağmen (potansiyel reaktivite için harç çubuğu deneyinde limit %0,1'dir), beton prizma deneyi neticesinde oldukça düşük gelişme seviyeleri oluşmuştur. Bazalt agregasının farklı deney yöntemlerine tabi tutulduğunda bu şekilde farklı davranışlar sergilemesine dair açıklamalar literatürde mevcuttur. Reaktif camsı veya kripto-kristalin bileşenler, yoğunluğu yüksek bu tip iri agregalarda yoğun yapının içerisinde hapsolüp alkalilerin saldırısından korunabilmekte ve böylelikle beton prizma deneyinde daha düşük gelişmeler oluşabilmektedir [13,25].



Şekil 4. Kontrol ve a) 0/3 mm, b) 0,063/3 mm cam agregası içeren karışımların 38°C'ye maruz kalma sonrasındaki genleşme-zaman grafiği, (c) kontrol karışımlarına ait ilişkinin daha detaylı görüntüsü

Diğer taraftan cam agregası içeren karışımlarda oldukça yüksek genleşmelerle karşılaşmıştır. Şekil 4a'ya göre sıcaklığın 38°C olması durumunda düşük alkalili çimento içeren 0/3LA karışımının genleşme seviyeleri, diğer iki karışıma nazaran tüm yaşlarda oldukça düşük kalmıştır. Şekil 4a ve Şekil 4b kıyaslandığında cam agregasından 63 µm'dan küçük tanelerin uzaklaştırılmasının her üç camlı karışım için de daha küçük genleşme değerlerine yol açtığı söylenebilir. Şekil 4b'de genleşme-zaman eğrisinin 0,063/3HA karışımı için 26 haftadan, 0,063/3LA ve 0,063/3MA karışımları için 12 haftadan sonra yataylaşma eğiliminde olduğu görülmektedir. Fakat bu grafikte 40. ve 52. haftalar arasında ortaya çıkan genleşme davranışları, reaksiyonların henüz sonlanmamış olabileceğini işaret etmektedir. Deney süresi tamamlanmış olsa da 52. haftadan sonra alınacak ölçümler, davranışın daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.



Şekil 5. Kontrol ve a) 0/3 mm, b) 0,063/3 mm cam agregası içeren karışımların 60°C'ye maruz kalma sonrasındaki genleşme-zaman grafiği, (c) kontrol karışımlarına ait ilişkinin daha detaylı görüntüsü

Tablo 6. AAR-3 deneyleri boyunca karışımların gösterdiği genleşmeler (%)

	Hafta							
	2	4	6	13	20	26	40	52
Kontrol	-0,0045	-	0,0031	0,0041	-	0,0112	0,0136	0,0173
Kontrol+	-0,0081	-	-0,0012	0,0067	-	0,0139	0,0159	0,0223
0/3LA	-	-0,0006	-	0,0040	0,0134	0,0390	0,0588	0,0648
0/3HA	-	0,0044	-	0,0485	0,0667	0,0876	0,1274	0,1348
0/3MA	-	0,0013	-	0,0503	0,0631	0,0900	0,1223	0,1308
0,063/3LA	-	-0,0133	-	0,0048	0,0047	0,0048	0,0049	0,0087
0,063/3HA	-	-0,0037	-	0,0497	0,0647	0,0785	0,0825	0,0896
0,063/3MA	-	-0,0120	-	0,0168	0,0167	0,0151	0,0174	0,0312

Tablo 7. AAR-4 deneyleri boyunca karışımların gösterdiği genleşmeler (%)

	Hafta			
	5	10	15	20
Kontrol	0,0062	0,0120	-	0,0181
Kontrol+	0,0147	0,0267	-	0,0307
0/3LA	0,1168	0,1928	0,2555	0,2768
0/3HA	0,1083	0,1960	0,2662	0,3183
0/3MA	0,1067	0,1893	0,2520	0,2747
0,063/3LA	0,0573	0,1561	0,2517	0,2960
0,063/3HA	0,2173	0,3667	0,4133	0,4480
0,063/3MA	0,0680	0,1333	0,1637	0,1867

Şekil 5a'ya göre 60°C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneylerde karışımdaki çimentonun alkalinitesinin değişimi, genleşme sonuçlarını önemli ölçüde etkilememiştir. Fakat Şekil 5b'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 oluşturmuştur. Literatürde yer alan bazı araştırmalar [26-28], camın yeterli inceliğe öğütülmesi durumunda puzolan niteliği kazanabildiğini ve hatta alkali-silis reaksiyonu nedeniyle oluşan genleşmeleri azaltıcı yönde rol oynayabildiğini açıklamaktadır. Şekil 5a'daki 0/3HA ve Şekil 5b'deki 0,063/3HA karışımlarının performansları karşılaştırıldığında, karışımda 63 µm'dan küçük cam parçalarının bulunmasının daha düşük genleşme seviyesine neden olduğu görülmektedir. Fakat yine 60°C sıcaklıkta ve 20. haftada 0/3LA-0,063/3LA ve 0/3MA-0,063/MA karışımlarında elde edilen genleşmeler tam tersi bir eğilimin varlığını göstermekte ve dolayısıyla camın puzolanik etkisinden bahsedilmesini engellemektedir. Elde edilen sonuçlardan, cam tozunun puzolanik aktivitesi üzerinde boşluk çözeltisinin alkalinitesinin etkin rol oynadığı anlaşılmaktadır.

Camın 63 µm'dan küçük tanelerinin uzaklaştırılması durumunda genleşmeleri azaltıcı veya arttırıcı etkisinin varlığıyla ilgili genel bir kanaata ulaşılmasının zorluğu aşağıda sıralanan şu faktörlerin varlığından ve bunların zaman zaman birbirleriyle yarışmasından kaynaklanmaktadır:

- Deneylerde kullanılan ve soda-kireç camları kategorisine giren renksiz camlarda alkali miktarı %14-15 mertebelerinde olmaktadır. Bu alkalilerin cam bünyesinden salınıp salınmadığının kontrolü gerekmekte olup bu deneyler ilk yazarın doktora tezi çalışmaları kapsamında başlatılmıştır. Yapılan bu deneylerde cam örnekler NaOH çözeltisinde bekletilip çözeltiye salınan K⁺ iyonu ve KOH çözeltisinde bekletilip çözeltiye salınan Na⁺ iyonu ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler de AAR-3 ve AAR-4 deneyleri gibi 38°C ve 60°C'de gerçekleştirilmektedir. Ayrıca cam agregaları <0,125 mm, 0,125-1 mm ve 1-4 mm olmak üzere üç farklı boy sınıfında deneye tabi tutulmuştur. RILEM tarafından (AAR-8) bu deneylerin, salınan alkali miktarı-zaman grafikleri yataylaşana kadar sürmesi önerilmektedir. Henüz her iki sıcaklık seviyesinde de alkali salınımının sona erdiğine dair bulguya rastlanmamıştır. Ayrıca 38°C'de bekletilen örnekler için 1 yıl süre henüz

dolmamıştır. 60°C’de gerçekleştirildiği deneyde ise 20 haftalık sonuçlara (AAR-4 deneyinin sonuna denk gelmekte) göre daha küçük camlardan daha çok alkali salındığı görülmüştür. 60°C’de sızan alkali miktarları, camların bünyesindeki alkalilerin %1,2-2,6’sına denk gelmiştir. Bu miktarlar ilk olarak küçük değerler olarak anlaşılrsa da karışımlarda yaklaşık 665 kg/m³ cam kullanıldığı ve camın yaklaşık %15 oranında alkali içeriğine sahip olduğu düşünüldüğünde, camlardan gelen alkali katkısı ~2 kg/m³ mertebelerindedir. 38°C’deki ilk bulgularda ise salınan alkali miktarları daha düşük seviyelerdedir.

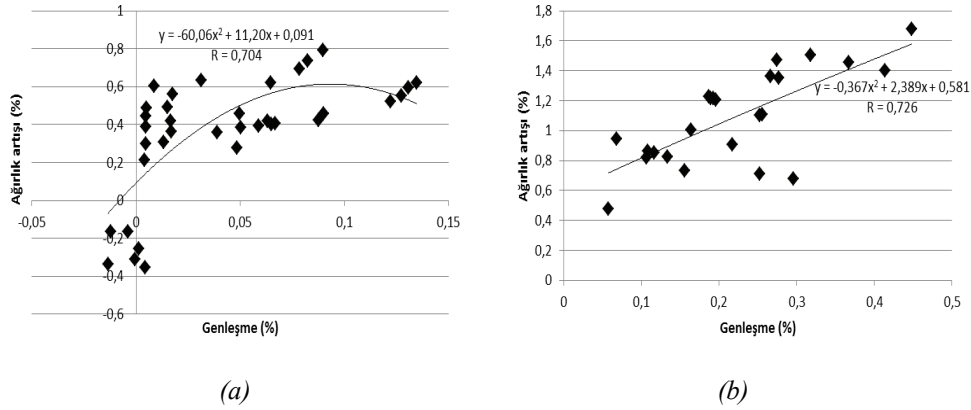
- Camın 63 µm’dan küçük tanelerinin uzaklaştırılması durumunda kuşkusuz beton örneklerin geçirimsizliği de artmaktadır. Geçirimsizliğin artması beton bünyesine suyun girişini kolaylaştırmakta, alkali-silis jelinin su emip şişmesiyle genleşmeleri arttırmaktadır. Ama geçirimsizlikteki artış aynı zamanda beton bünyesindeki alkalilerin dışarıya sızmasını da kolaylaştırmakta ve bu durum da genleşmeleri azaltıcı yönde etki etmektedir. Özellikle 60°C gibi yüksek sıcaklık seviyelerinde gerçekleştirilen deneylerde betonun bünyesinden dışarıya alkali sızıntısının önemli rol oynadığı bilinmektedir. Yakın zamanda yapılan bir çalışmada [19] deney sonunda, başlangıçta yer alan alkalilerin sızma oranının yaklaşık %40'lara vardığı belirlenmiştir. (Tablo 8’de deneysel çalışmada ölçülen değerler sunulmuştur.)

- Atık cam, silis miktarı yüksek, amorf yapıya sahip ve reaktif bir agregadır. Betonda kullanılan geleneksel agregalarda alkali-silis reaksiyonu genelde agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde başlamakta, bu durum da yüzey alanı daha fazla olan ince agregaların genellikle daha çok reaktivite göstermesine neden olmaktadır. Fakat cam agregası için durum farklı gerçekleşmektedir. Camların beton karışımına eklenmeden önce halihazırda bünyesinde çoğunlukla kırılma esnasında oluşan mikro-çatlaklar bulunmaktadır. Camlarda alkali-silis reaksiyonu bu çatlakların içerisinde başlamaktadır [29]. Bu durum da camla yapılan çalışmalarda camın tane boyutunun artmasıyla bünyesindeki çatlak boyutu ve miktarı arttığından reaktivitesinin de artmasına neden olmuştur. Camın tane boyutu belli bir seviyeye kadar azaldıkça genleşme yaratmamakta hatta yeterli inceliğe öğütüldüğünde var olan genleşmeleri bile azaltmaktadır. Bu faktörler düşünüldüğünde 63 µm’dan küçük tanelerin genleşmeleri azaltması beklenebilir.

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. Örnek teşkil etmesi açısından cam agregası içeren altı adet karışımda her yaştaki ölçümler dikkate alınarak genleşme (%) – ağırlık artışı (%) grafikleri elde edilmiştir. Şekil 6a’da 38°C’de kürlenmiş örnekler için, Şekil 6b’de ise 60°C’de kürlenmiş örnekler için çizilen grafikler görülmektedir. Buna göre numune genleşmeleri arttıkça ağırlık artışı değerleri 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.

Genleşme ve ağırlık ölçümlerine ilave olarak, numunelerin saklanması için kullanılan kapların alt kısımlarında yer alan sudaki alkali iyonu (Na⁺ ve K⁺) miktarları da

belirlenmiştir. Konsantrasyon değerleri spektrometre yardımıyla ppm cinsinden belirlendikten sonra atomik ağırlıkları göz önünde bulundurularak bu değerler Na_2O ve K_2O miktarlarının tespitinde kullanılmıştır. Na^+ iyon miktarı 2,696 ile çarpılarak Na_2O içeriği elde edilirken (Na_2O : 62, Na: 23, $62/23 = 2,696$) K^+ içeriği de 2,410 katsayısı ile çarpılmış ve K_2O seviyesi elde edilmiştir (K_2O : 94, K: 39, $94/39 = 2,410$). Daha sonra bu değerler eşdeğer Na_2O içeriğine çevrilmiş ve yorumlar, başlangıçta yer alan alkalinin ne kadarının suya sızdığı üzerine yapılmıştır. Dokuz karışım için her iki deney yönteminde deney süreleri sonunda belirlenen sızma miktarları Tablo 8’de sunulmuştur. Hesaplamalar yapılırken kabul edilen iki adet varsayım; alkalinin sadece çimento kaynaklı olduğu ve kapların altı kısmında yer alan suyun hacminin deneyler süresince sabit kaldığıdır.



Şekil 6. Cam agregası içeren a) 38°C’de b) 60°C’de kürlenmiş karışımlar için genleşme-ağırlık artışı ilişkisi

Tablo 8’de görülen sonuçlara göre, Na_2O eşdeğeri cinsinden ifade edildiğinde karışımda başlangıçta daha yüksek miktarda alkali bulunması genel bir kural olarak daha yüksek miktarda sızıntıya da neden olmuştur. Cam içeren karışımlarda alkali sızıntısı yüzdelerinin kontrol karışımlarına kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olması cam agregalarından olası alkali salınımını akla getirmektedir. Artan sıcaklık seviyesi difüzyonu hızlandırdığından [1,12] 60°C’de yüzde cinsinden kaydedilen değerler de 38°C’ye kıyasla 1,5-5,2 kat aralığında daha yüksek çıkmıştır.

0,063/3LA, 0,063/3HA ve 0,063/3MA karışımlarında 63 μm ’dan küçük tanelerin uzaklaştırılması, cam içeren diğer karışımlara kıyasla yüksek geçirimsizlikleri nedeniyle daha yüksek alkali sızıntısı seviyelerinin oluşmasına yol açmıştır. Örnek olarak, Tablo 5’te 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 μm ’dan küçük taneler içermeyen karışımlar, yüksek geçirimsizliklerine ve reaksiyona yatkın olan daha fazla bileşen içermelerine rağmen genel olarak, daha yüksek genleşme seviyeleri göstermemişlerdir (Şekil 4 ve 5). O halde bu

karışımlarda gerçekleşen yüksek alkali sızıntısı seviyelerinin genleşmeler üzerinde oldukça etkin 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 4,60 kg/m³ olan alkali içeriğinin 60°C’de bekletilme neticesinde teorik olarak 2,53 kg/m³ seviyesine düşmesi anlamına gelmektedir.

Tablo 8. Kontrol karışımları ile cam agregalı karışımlarda deney süreleri sonunda sızan 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
0/3LA	4,46	195,20	4,38	1020,91	22,89
0/3HA	7,36	758,68	10,31	2561,06	34,80
0/3MA	5,90	702,71	11,91	2181,46	36,97
0,063/3LA	4,46	598,27	13,41	1663,31	37,29
0,063/3HA	7,36	2035,57	27,66	3306,46	44,92
0,063/3MA	5,90	1067,18	18,09	2348,37	39,80

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada özellikleri açıklanan malzemeler kullanılarak üretilen karışımlar üzerinde uygulanan beton prizma deneyleri, şu bulguları ortaya çıkartmıştır:

- Bazalt agregasının hızlandırılmış harç çubuğu deneyinde yüksek, beton prizma deneylerinde ise nispeten düşük reaktiviteye yol açtığı, bir başka ifadeyle deney tekniği baz alındığında genleşme davranışları arasında uyumsuzluk görüldüğü belirlenmiştir.
- Karışımlarda atık cam agregası kullanılması, reaksiyon hızında ve nihai genleşme seviyelerinde önemli ölçüde artışa yol açmıştır. Deney süreleri sonlansa da cam agregalı karışımların çoğu genleşme göstermeye halen devam etmektedir.
- Spektrometre verilerine göre 63 µm’dan küçük cam tanelerinin uzaklaştırıldığı karışımlarda daha fazla miktarda alkali sızıntısı gerçekleşmiş ve bu durum genleşmeleri düşürmüştür. Karışımların başlangıçtaki alkalinite seviyesi ve sıcaklık da alkali sızıntısı değerleri üzerinde önemli rol oynamıştır.
- AAR-3 ve AAR-4 deneyleri sonunda ölçülen alkali sızıntısı seviyeleri sırasıyla %4,38-27,66 ve %14,98-44,92 aralıklarında değişkenlik göstermiştir.

Teşekkür

Bu yayında sunulan sonuçların tamamı, TÜBİTAK 110M569 projesinden sağlanan destekle elde edilmiştir. Yazarlar, sağladığı burs desteği ve çimentoların kimyasal analizini gerçekleştirmesi nedeniyle TÇMB'ye, sağlanan mali destek için EBILTEM'e (2012-BIL-023 kodlu projeye) ve agregaların kimyasal analizini gerçekleştiren Çimento İzmir Çimento Fabrikası ve Şişe Cam bünyesindeki Bilecik Camış Madencilik'e teşekkürü bir borç bilirlirler.

Kaynaklar

- [1] 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*. Vol. 42, pp. 223-243.
- [2] Bérubé, M.A., Dorion, J.F., Rivest, M. (2000). Distribution of alkalis in concrete structures affected by alkali-silica reactivity and contribution by aggregates. *Proceedings 11th International Conference on AAR*, June, pp. 139-148, Québec City, Canada.
- [3] Castro, N. and Wigum, B.J. (2012). Assessment of the potential alkali-reactivity of aggregates for concrete by image analysis petrography. *Cement and Concrete Research*. Vol. 42, pp. 1635-1644.
- [4] Stanton, T.E. (1940). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 66, pp. 1781-1811.
- [5] Alnaggar, M., Cusatis, G. and Di Luzio, G. (2013). Lattice discrete particle modeling (LDPM) of alkali silica reaction (ASR) deterioration of concrete structures. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 41, pp. 45-59.
- [6] Thomas, M., 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*. Vol. 36, pp. 1842-1856.
- [7] Oberholster, R.E. and Davies, G. (1986). An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates. *Cement and Concrete Research*. Vol. 16, pp. 181-189.
- [8] Fournier, B., Bérubé, M.A. and Frenette, J. (2000). Laboratory investigations for evaluating potential alkali-reactivity of aggregates and selecting preventive measures against alkali-aggregate reaction (AAR) – What do they really mean? *Proceedings 11th International Conference on AAR*, June, pp. 287-296, Québec City, Canada.
- [9] De Grosbois, M. and Fontaine, E. (2000). Evaluation of the potential alkali-reactivity of concrete aggregates: Performance of testing methods and a producer's point of view. *Proceedings 11th International Conference on AAR*, June, pp. 267-276, Québec City, Canada.

- [10] 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. *Proceedings of the 13th International Conference on AAR*, June 16-20, pp. 119-129, Trondheim, Norway.
- [11] Ranc, R. and Debray, L. (1992). Reference test methods and a performance criterion for concrete structures. *Proceedings of the 9th International Conference on AAR in concrete*, pp. 824-831, London, UK.
- [12] Fournier, B., Chevrier, R., De Grosbois, M., Lisella, R., Folliard, K., Ideker, J., Shehata, M., Thomas, M. and Baxter, S. (2004). The accelerated concrete prism test (60°C): Variability of the test method and proposed expansion limits. *Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete*, pp. 314-323, Beijing, China.
- [13] Shayan, A., Xu, A. and Morris, H. (2008). Comparative study of the concrete prism test (CPT 60°C, 100% RH) and other accelerated tests. *Proceedings of the 13th International Conference on AAR*, June 16-20, pp. 391-400, Trondheim, Norway.
- [14] Murdock, K.J. and Blanchette, A. (1994). Rapid evaluation of alkali aggregate reactivity using a 60°C concrete prism test, *Proceedings of the 3rd CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, pp. 57-78, Nice, France.
- [15] Touma, W.E., Fowler, D.W., Carrasquillo, R.L., Folliard, K.J. and Nelson, N.R. (2001). *Characterizing alkali-silica reactivity of aggregates using ASTM C1293, ASTM C1260 and their modifications*. Transportation Research Record, 1757, Paper no. 01-3019, pp. 157-165.
- [16] 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*. Vol. 40, pp. 611-635.
- [17] 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*. Vol. 33, pp. 1147-1153.
- [18] Duchesne, J. and Bérubé, M.A. (2001). Long-term effectiveness of supplementary cementing materials against alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*. Vol. 31, pp. 1057-1063.
- [19] 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*. Vol. 53, pp. 68-90.
- [20] 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*, Vol. 60, pp. 756-766.
- [21] Yüksel, C., Saleh-Ahari, R., Abbaspoursani-Ahari, B. and Ramyar, K. (2013). Evaluation of three test methods for determining the alkali-silica reactivity of glass aggregate. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 38, pp. 57-64.

- [22] RILEM State-of-the-Art Reports, Volume 17 (2016). State-of-the-Art-Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures. Eds. Philip J. Nixon and I. Sims.
- [23] 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*. Vol. 53, pp. 145-167.
- [24] Robinson, J.W. (1982). Basic Principles. In: J.E. Cantle (ed) Atomic Absorption Spectrometry. Elsevier Scientific Publishing Company. New York, pp. 1-14.
- [25] Shayan, A. (2004). Alkali-aggregate reaction and basalt aggregates. *Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete*, pp. 1130-1135, Beijing, China.
- [26] Du, H. and Tan, K.H. (2013). Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali-silica reaction and mitigation methods. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 35, pp. 118-126.
- [27] Hudec, P.P. and Ghamari, R.C. (2000). Ground waste glass as an alkali-silica reactivity inhibitor. *Proceedings 11th International Conference on AAR*, June, pp. 663-672, Québec City, Canada.
- [28] Shao, Y., Lefort, T., Moras, S. and Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 91-100.
- [29] 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), pp. 1201–1208.