

Genleştirilmiş Cam Agregalı Harçlarda Alkali Silika Reaksiyonu'nun (ASR) İncelenmesi

Yusuf Tahir ALTUNCI^{1*}, Cenk ÖCAL², Kemal SAPLIOĞLU³, Hüseyin Hakan İNCE⁴, Murat ÇEVİKBAŞ⁵

¹ İnşaat Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta, Türkiye

^{2,5} İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta, Türkiye

³ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

⁴ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Burdur, Türkiye

*¹ yusufaltunci@isparta.edu.tr, ² cenkocal@isparta.edu.tr, ³ kemalsaplioglu@sdu.edu.tr, ⁴ hakanince@mehmetakif.edu.tr, ⁵ muratcevikbas@hotmail.com

(Geliş/Received: 05/03/2021;

Kabul/Accepted: 17/06/2021)

Öz: Bu çalışmada, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan 2 tip çimento (CEM I 42,5 R ve CEM IV/B F(P) 32,5 N) ile CEN standart kum granül boyutları aralığındaki Genleştirilmiş Cam Agregası (GCA), CEN standart kumu yerine %0, %10, %20 ve %30 oranlarında kullanılarak GCA'lı harç numuneleri üretilmiştir. Numuneler üzerinde Alkali Silika Reaksiyonu'nu (ASR) belirlemek için ASTM C 1260-14 standardına göre hızlandırılmış harç çubuk deneyleri yapılmış ve çimento tipine göre kullanma oranlarının ASR'ye etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, en riskli çimento olan CEM I serisi numunelerinde bile GCA'ların kullanma oranı arttıkça ASR açısından genleşmenin baskılandığı gözlemlenmiş ve GCA'ların ASR'yi önlemede etkili olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Genleştirilmiş cam agregası (GCA), harç, Alkali-silika reaksiyonu (ASR).

Investigation of Alkali Silica Reaction (ASR) of Mortar with Expanded Glass Aggregate

Abstract: In this study, mortar samples were produced by using 2 types of cement (CEM I 42.5 R and CEM IV / B (P) 32.5 N) commonly used in the construction industry and Expanded Glass Aggregate (EGA) used in place of the CEN standard sand with the rates of 0%, 10%, 20% and 30%. Accelerated mortar bar experiments according to ASTM C 1260-14 standard were performed to determine ASR on the samples, and the effect of substitution rates on Alkali Silica Reaction (ASR) was determined as per cement type. As a result of the study, CEM I series samples, which are the most risky cement types, it was observed that the expansion was suppressed in terms of ASR as the substitution rate of EGAs increased, and it is detected that EGA is effective in preventing ASR.

Key words: Expanded glass aggregate (EGA), mortar, Alkali silica reaction (ASR).

1. Giriş

Ekonomik büyümenin temel taşı olarak gösterilen inşaat endüstrisi çok hızlı bir şekilde büyüme ve buna bağlı olarak yapı malzemesi ve beton teknolojisindeki gelişmeler hızla devam etmektedir [1]. Günümüzde, sürdürülebilir kaynakların kullanılması ve malzemelerin geri dönüşüm (recycling), ileri dönüşüm (upcycling) ve geriye yönelik dönüşüm (downcycling) olarak değerlendirilmesi inşaat sektörünün sürdürülebilir yapısının korunması açısından kaçınılmaz olmuştur [2,3]. Bu nedenle harç ve beton üretiminde agregası malzemesi yerine atık malzemelerin kullanılması son derece önem arz etmektedir. Katı atık malzemeler içerisinde, atık camlar yaklaşık %4 oranıyla önemli bir hacimsel oranı oluşturmakta ve bu camların sadece %27'si geri dönüşüme sokulmaktadır [4]. Camların inşaat sektörü içerisinde kullanılarak geri dönüşüm oranının artırılması, hem ekonomik gelişimi hem de doğal çevre sürdürülebilirliğinin korunması hususlarında önemli bir rol oynamaktadır. Fakat atık camların harç ve beton içerisinde kullanılması ile oluşacak Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) ile betonun durabilitesinde ve dolayısı ile mukavemetinde zaman içerisinde önemli azalmalar meydana gelmektedir [5]. Konu ile ilgili olarak; Serpa vd. [6], çalışmalarında, Portekiz'deki geri dönüştürülmüş cam malzemesinin betonda kullanılabilirliğini tespit etmek için, geri dönüştürülmüş camı, çimento esaslı harçlarda puzolan olarak kullanarak

* Sorumlu yazar: yusufaltunci@isparta.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-5418-7742, ² 0000-0002-1407-7637, ³ 0000-0003-0016-8690, ⁴ 0000-0003-1503-1742, ⁵ 0000-0002-8421-6591

ASR deneyleri yapmışlardır. Yapmış oldukları deneyler sonucunda, geri dönüştürülmüş atık camın çimento yerine uygun oranlarda ve agrega olarak da %20 oranına kadar kullanılmasının, gerçekleşmesi muhtemel olan ASR etkilerini azaltabileceğini belirlemişlerdir. İdir vd. [7], özellikle çapı 1 mm'nin altında olan cam agregaların ASR ye neden olduğunu ve 1 mm'den büyük çaplı cam agregaların ASR'den kaynaklı genleşmeleri azalttığı sonucuna varmıştır. Saccani vd. [8], çalışmalarında farklı kimyasal kompozisyonlara sahip olan, soda şişesi camlarını, floresan lambalardan elde edilen camları, monitör camlarını ve ev ürünü camlardan elde edilen cam tozlarını; çimento esaslı numune üretimlerinde, doğal kum yerine ince agrega olarak kullanmışlar ve farklı kimyasal bileşime sahip cam tozlarının çimentolu kompozitlerde agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmışlar ve çalışmalarının sonucunda, farklı oranlarda kimyasal bileşimlere sahip atık camların potansiyel reaktivitelerinden dolayı çimento esaslı bileşimlerde kullanılmadan önce kimyasal özelliklerinin analiz edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Topçu vd. [9] çalışmalarında beyaz, yeşil ve kahverengi cam olmak üzere üç farklı renkte ve değişik oranlardaki atık camı, harç üretiminde ince agrega olarak kullanmış ve ASR etkilerini ASTM C 1260'a [10] göre araştırmışlar ve ASR açısından en iyi performansı %25 kullanma oranı ile yeşil cam atıkların verdiğini ve %25 kullanma oranından sonra atık camların ASR'ye neden olduğunu belirlemişlerdir. Bu sebeple camların, harç ve beton içerisinde agrega olarak kullanılmasında önemli kısıtlamalar söz konusudur.

Atık camların öğütme işlemlerinden sonra genleştirici malzemelerle biraraya getirilerek modern ısı fırınlarında 750°C-950°C sıcaklıklarda ergitilmesi sonucunda, granüler şeklinde üretilen genleştirilmiş cam [11] için böyle bir araştırma yapılmamıştır. GCA'nın hacmi, atık camın hacminden ortalama 17 kat daha fazladır ve bu özelliğinden dolayı suda batmayan beton kano yapımında da kullanılmıştır [12,13]. İri agrega olarak kullanımı betonun mukavemetini çok düşürmekte [14,15,16] ve bu sebepten dolayı prefabrikte duvar panellerinde, yangına karşı direnç göstermesi istenen yapı elemanlarında, sıvalarda vb. uygulamalarda 4 mm'ye kadar olan genleştirilmiş camlar kullanılabilir [17,18,19].

Literatürde, genleştirilmemiş cam agregalı harç ve betonlar hakkında sayısız çalışma bulunmaktadır [6,7,9]. Fakat harç ve beton üretiminde genleştirilmiş camların agrega olarak kullanılması ile ilgili olarak yapılmış çalışmalar yok denecek kadar azdır. Harç ve beton üretiminde GCA kullanımı ile meydana gelebilecek ASR etkileşimi, oluşturulacak harcın durabilitesini etkileyeceğinden, mevcut çalışmada GCA'ların harç içerisinde hangi oranda kullanılabileceğinin araştırılması amacıyla, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan 2 tip çimento (CEM I 42,5 R ve CEM IV/B (P) 32,5 N) ile CEN standart kum granül boyutları aralığındaki GCA'lar, CEN standart kumu yerine %0, %10, %20 ve %30 oranlarında kullanılarak harç numuneleri üretilmiştir. GCA'ların farklı kullanım oranları ile farklı çimento tiplerine göre üretilen harç numuneleri üzerinde ASTM C 1260-14 [10] standardına göre hızlandırılmış harç çubuk deneyleri yapılmış ve hem GCA'ların hem de çimento tipinin ASR üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, ASR deneylerine tabi tutulan %0 ve %30 GCA kullanarak üretilen numunelerin, SEM yüzey görüntüleri alınarak içyapıları tartışılmıştır. Yürütülen deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen araştırma bulgularına göre, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan 2 tip çimento ile CEN standart kum granül boyutları aralığındaki GCA kullanarak üretilen harç numunelerinin ASR açısından inşaat sektöründe kullanılabilirliği savunulmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında materyal olarak; CEM I 42,5 R Portland çimento ve CEM IV/B (P) 32,5 N Puzolanik çimento türleri ile CEN standart kumu, CEN standart kum granül boyutları aralığındaki GCA'lar ve karışım suyu kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan çimento türlerinin kimyasal özellikleri Tablo 1'de, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan çimentoların kimyasal özellikleri

Çimento türü / Kimyasal içerik	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)
CEM I 42,5 R	19,7	4,52	3,07	63,1	2,01	0,55	0,29	3,01
CEM IV 32,5 N	38,1	9,85	2,79	31,25	1,67	1,15	1,01	2,56

Tablo 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri [20,21]

Çimento türü	Priz başlama (dakika)	Genleşme (mm)	Basınç dayanımı (MPa)		
			2 günlük	7 günlük	28 günlük
CEM I 42,5 R	156	0,46	24,3	----	50,1
CEM IV 32,5 N	143	0,35	----	25	36,6

Deneysel çalışmalarda kum olarak, TS EN 196-1 [22] standardına uygun 2,56 g/cm³ yoğunluğundaki CEN standart kumu kullanılmıştır. CEN standart kumunun granülometrisi Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. CEN standart kumun granülometrisi TS EN 196-1 [22]

Kare göz açıklığı (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Kümülatif elekte kalan (%)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

Çalışmalarda CEN standart kum granül boyutları aralığındaki ve 0,38 g/cm³ yoğunluğundaki GCA’lar, CEN standart kumu ile değişik oranlarda kullanılmıştır. GCA’lara ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. GCA’lara ait fiziksel ve kimyasal özellikler [23]

Yoğunluk (g/cm ³)	Su emme (%)	Yumuşama noktası (°C)	pH değeri (pH)
0,37 ± 0,04	17	700	8 – 11

2.2. Metot

GCA’lı harç numunelerinin ASR performanslarını belirlemek için, ASTM C 1260-14 [10] deney yöntemine göre, CEM I 42,5 R Portland çimento (ASR açısından riskli) ve CEM IV/B (P) 32,5 N Puzolanik çimento (ASR açısından en etkin) ile CEN standart kumu yerine %0, %10, %20 ve %30 oranlarında GCA kullanılarak 25×25×285 mm boyutlarında prizmatik numuneler hazırlanmıştır. CEM I ve CEM IV grubu sertleşmiş prizmatik numunelere ait görseller Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Sertleşmiş prizmatik numuneler

Prizmatik numuneler üzerinde yapılan hızlandırılmış ASR deneyleri; ASTM C 1260-14 [10] standardına göre su/çimento oranı 0,47 ve çimento/kum oranı 2,25 olacak şekilde yapılmıştır. Ayrıca her oran için 2 adet, her çimento grubu için de 8 adet olmak üzere toplam 16 adet numune üzerinden ölçümler alınmıştır.

Deney sonuçlarının değerlendirilebilmesi için 14 günde elde edilen genleşme değerlerine yönelik olarak, ASTM C 1260-14 [10] standardı için önerilen:

- %0,10'un altında zararsız,
- %0,10-0,20 arası reaktivite potansiyeli riski var,
- %0,20'nin üstünde ise tehlikeli genleşme olarak sınıflandırılması yapılan sınır değerler referans alınmıştır.

Bununla birlikte, %0 ve %30 GCA kullanılarak üretilen numunelerin, SEM yüzey görüntüleri alınmış ve görüntüler ASR deney sonuçları ile birlikte yorumlanmıştır.

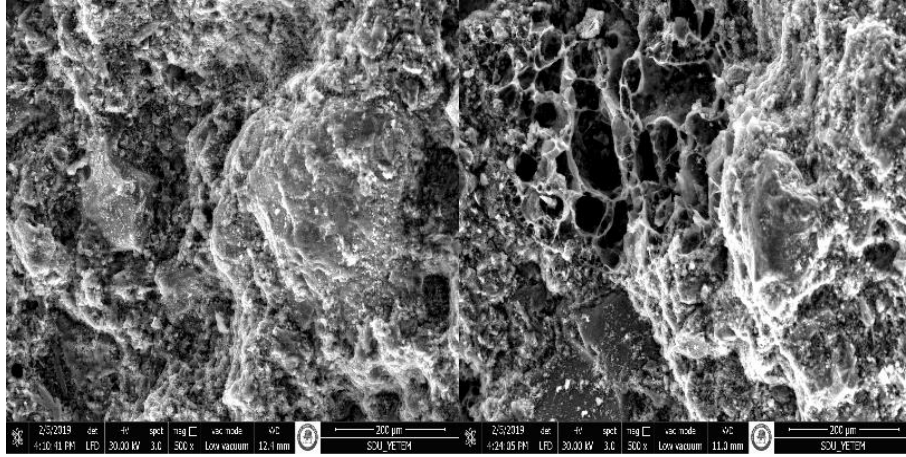
3. Deneysel Çalışma

Sertleşmiş harç ASR özelliklerini belirlemek için; ASTM C 1260-14 [10] deney yöntemine göre yapılan, GCA'lı harçlara ait 2,7, 14, 21 ve 28 günlük genleşme yüzdeleri (ASR deney sonuçları) Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. GCA'lı harçlara ait ASR deney sonuçları

Numune	Genleşme (%)				
	2 Günlük	7 Günlük	14 günlük	21 Günlük	28 Günlük
CEM I	-0,006	0,066	0,106	0,172	0,205
CEM I %10 GCA	-0,003	0,051	0,075	0,110	0,118
CEM I %20 GCA	-0,006	0,041	0,065	0,099	0,107
CEM I %30 GCA	0,003	0,038	0,053	0,073	0,074
CEM IV	0,004	0,001	-0,006	0,002	-0,001
CEM IV %10 GCA	0,001	-0,002	-0,003	-0,001	0,001
CEM IV %20 GCA	0,004	0,002	0,002	0,000	-0,003
CEM IV %30 GCA	0,002	0,004	0,002	0,000	-0,001

Tablo 5 üzerinde yapılan değerlendirmelerde; deneysel numuneler prizini aldıktan sonraki günlerde 80 °C'lik kür ortamında bekletilmesinden dolayı 20 °C ile 80 °C sıcaklık farkından doğan termik genleşmesi düşülmüştür. CEM I referans ve CEM I %30 GCA kullanılarak üretilen numunelerin SEM yüzey görüntüleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



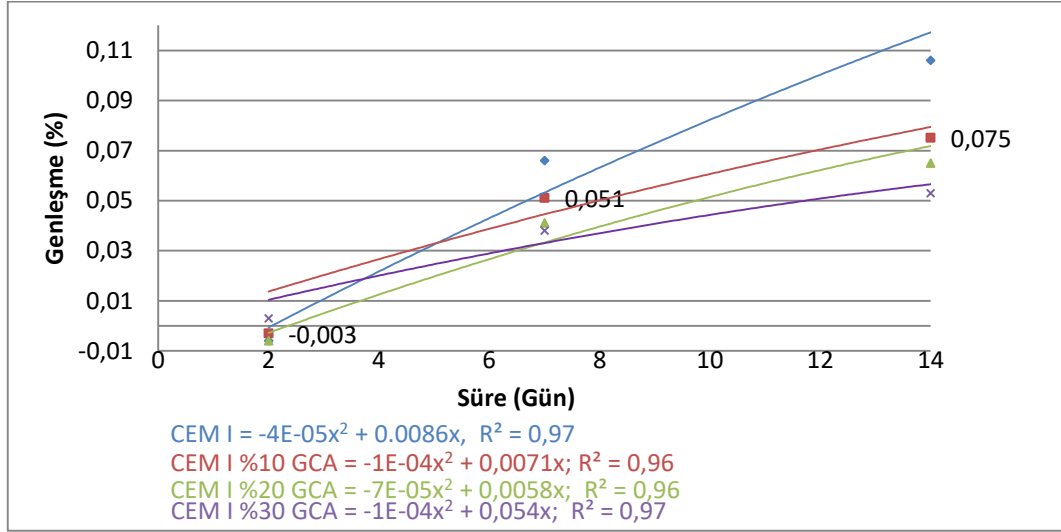
Şekil 2. CEM I – CEM I %30 GCA kullanılarak üretilen numunelerin SEM yüzey görüntüleri

Şekil 2'deki SEM yüzey görüntüsüne göre, yoğun kalsiyum silikat hidrat (CSH) yapısına sahip olan numune CEM I referans numunesidir. CSH oluşumunun boşlukları doldurduğu ve az da olsa boşlukların olduğu gözlemlenmiştir. CEM I %30 GCA kullanılarak üretilen numunelerin boşluk yapısı GCA'dan dolayı daha fazladır. Ayrıca reaktif agrega civarında oluşan jelin, GCA civarındaki boşluklara sızarak genleşmeyi engellediği söylenebilir. CEM I referans ve CEM I %30 GCA kullanılarak üretilen numunelerin EDS analiz sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. CEM I – CEM I %30 GCA kullanılarak üretilen numunelerin EDS analizleri

Element	CEM I Ağırlıkça (%)	CEM I %30 GCA Ağırlıkça (%)
O	58,78	54,65
Na	-	0,97
Mg	0,07	0,11
Al	0,49	0,72
Si	16,11	13,06
S	0,51	0,58
K	-	0,10
Ca	23,69	29,32
Fe	0,35	0,49

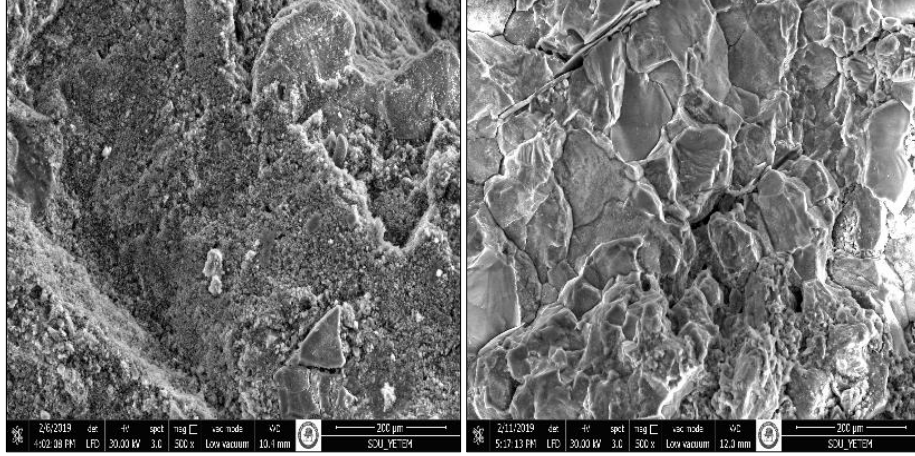
Tablo 6'daki EDS analizinde ağırlıkça yüzdeler dikkate alındığında ise en az Ca elementinin CEM I referans numunede olduğu tespit edilmiştir. CEM I grubu sertleşmiş harç serisi numunelerinin zamana bağlı genleşme değerleri ise Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. CEM I grubu sertleşmiş harç serisinin zamana bağlı genleşme değerleri

Bununla birlikte Şekil 3'de görüldüğü üzere, ASTM C 1260-14 [10] Test Metodu için 14 günde elde edilen genleşme değerlerine göre genleşmesi %0,10-0,20 arasında olan ve ASR açısından reaktivite potansiyeli riski taşıyan numune CEM I referans numunesidir Aynı şekilde bu test metodu için 14 günde elde edilen genleşme değerlerine göre genleşmesi %0,10'un altında olan ASR açısından zararsız numuneler; CEM I %10 GCA, CEM I %20 GCA ve CEM I %30 GCA numuneleridir. Buradan GCA kullanım oranı arttıkça standart kumda meydana gelecek genleşmelerin azaldığı ve ASR açısından genleşmenin baskılandığı gözlemlenmiştir.

CEM IV referans ve CEM IV %30 GCA kullanılarak üretilen numunelerin SEM yüzey görüntüleri Şekil 4'de gösterilmiştir.



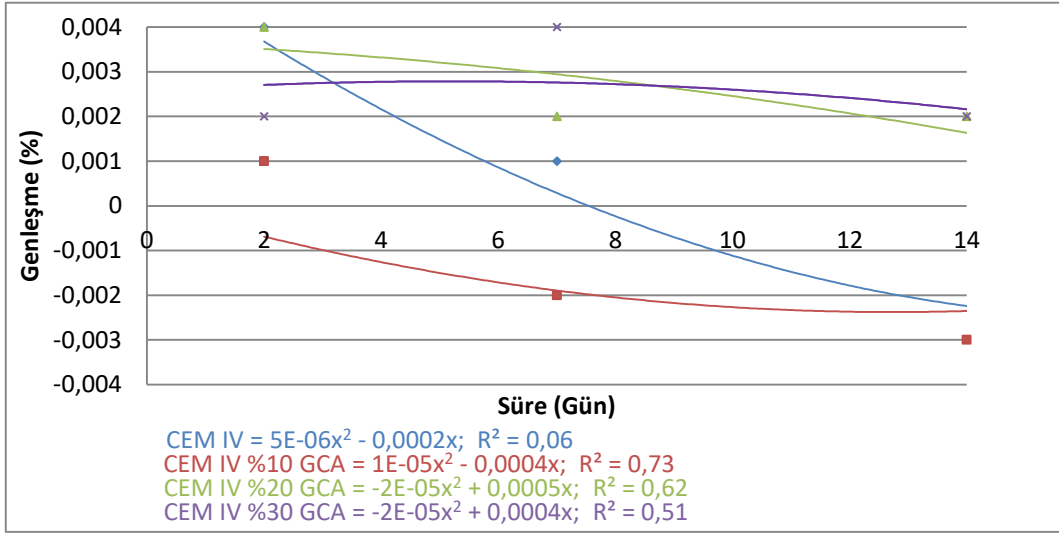
Şekil 4. CEM IV – CEM IV %30 GCA kullanılarak üretilen numunelerin SEM yüzey görüntüleri

28 günlük CEM IV referans numunesinin SEM yüzey görüntüsünde görüldüğü üzere bağ dayanımındaki artışın birim şekil değiştirme ve rijitlik davranışını olumlu bir şekilde etkilediği açıkça görülmektedir. CEM IV %30 GCA kullanılarak üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen SEM yüzey görüntüsü incelemelerinde ise, GCA'larının hidratasyona uğramamasından dolayı, matristeki boşlukların arttığı, matris yapısının yoğunlaşmadığı ve dolayısıyla da birim şekil değiştirme ve rijitlik davranışının zayıfladığı görülmektedir. CEM IV referans ve CEM IV %30 GCA kullanılarak üretilen numunelerin EDS analizleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. CEM IV – CEM IV %30 GCA kullanılarak üretilen numunelerin EDS analizleri

Element	CEM IV Ağırlıkça (%)	CEM IV %30 GCA Ağırlıkça (%)
O	46,89	42,94
Na	10,24	-
Mg	-	-
Al	10,88	6,85
Si	30,30	46,90
S	-	-
K	-	-
Ca	1,69	3,31
Fe	-	-

Tablo 7'deki EDS analizinde ağırlıkça yüzdeler dikkate alındığında ise en az Si elementinin CEM IV referans numunede olduğu tespit edilmiştir. CEM IV grubu sertleşmiş harç serisi numunelerin zamana bağlı genleşme değerleri ise Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. CEM IV grubu sertleşmiş harç serisinin zamana bağlı genleşme değerleri

Şekil 5’de görüldüğü üzere, CEM IV/B (P) 32,5 N grubu harç serisindeki tüm numunelerin ASTM C 1260-14 [10] test metodu için 14 günde elde edilen genleşme değerlerine göre genleşmesi %0,10’un altındadır ve ASR açısından zararsız olduğu tespit edilmiştir. CEM IV/B (P) 32,5 N grubu harç serisindeki ölçümler mikron mertebesinde olduğu için küçük dalgalanmalar elde edilmiştir. Mineral katkıların reaktiviteyi baskılaması yukarı doğru bir trend oluşmasını engellemekte olup, aksine eğilimi yataylaştırmakta ve bu durum küçük farklar açısından bir anlam ifade etmemektedir.

4.Sonuçlar ve Tartışmalar

Harç ve beton üretiminde geliştirilmemiş cam agrega kullanımının ASR’ye neden olduğu bilinmektedir. Buna karşılık, GCA’nın harç ve beton içerisinde kullanımı ile meydana gelebilecek olası ASR oluşumu ile ilgili olarak literatürde yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Çalışmada cam agrega olarak sadece GCA’ların CEM I 42,5 R (en saf çimento) ve CEM IV/B (P) 32,5 N (en çok katkı içeren çimento) tipi çimentolarla kullanımı sonucu meydana gelebilecek olası ASR performanslarını belirlemek için ASTM C 1260-14 [10] test metoduna göre ASR deneyleri yapılmıştır.

CEM I 42,5 R referans numunesinin ASR açısından reaktivite potansiyeli riski taşıyan numune olduğu söylenebilir. Bununla birlikte CEM I 42,5 R tipi çimentolarla üretilen numunelerde GCA kullanım oranı arttıkça ASR açısından genleşmenin baskılandığı dolayısıyla GCA kullanılmasıyla birlikte ASR etkisinin azaltılması mümkündür.

CEM IV/B (P) 32,5 N tipi çimento kullanılarak üretilen tüm numunelerde genleşmenin hemen hemen sıfırlandığı, burada Puzolanik çimentodaki mineral katkıların geçirimsizlik sağlayarak reaksiyonu baskıladığı söylenebilir. Bu sebeple CEM IV/B (P) 32,5 N tipi çimento ile daha yüksek oranlarda GCA kullanımı mümkün olmaktadır.

Sonuç olarak her iki tip çimento ile GCA’nın ASR oluşturma riski görülmemiştir. Ayrıca, her çimentonun alkali üretim koşullarına göre değişmektedir, ancak katkısız çimentolar (CEM I serisi), dayanım sınıfı ne olursa olsun katkılı çimentolara (CEM II, CEM III, CEM IV ve CEM V) göre mineral katkısız olduğu için ASR açısından daha risklidir. Bu nedenle, ASR bakımından bütün çimento tipleri ile %30 oranına kadar GCA’nın sorunsuzca kullanılacağı tespit edilmiştir. Bunun yanında çimentolardaki A, B ve C kodları, çimento içerisindeki mineral katkı ile ilgili bilgi verdiğinden C tipi bir çimentoda mineral katkı kullanım oranı daha yüksek olduğu gerekçesiyle aynı sınıf çimentonun B ve A tipine göre ASR açısından daha etkin olduğu anlaşılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde çalışmanın geliştirilmiş camın inşaat sektöründe kullanılmasına ilişkin yapılacak çalışmalara ışık tutacağına inanılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 118M111 numaralı 1002 Hızlı Destek Projesi tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Altuncu YT. Genleştirilmiş Cam Agregalı ve Genleştirilmiş Perlit Agregalı Şap Harçlarının Performans Özellikleri, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2019.
- [2] Oyenuga AA, Bhamidimarri R. Upcycling ideas for sustainable construction and demolition waste management: challenges, opportunities and boundaries. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2017; 6(3): 4066–4079.
- [3] Karagözoğlu MB, Özyonar F, Yılmaz A, Atmaca E. Katık atıkların yeniden kazanımı ve önemi. Türkiye'de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu; 15-17 Haziran 2009; İstanbul-Türkiye, 1-8.
- [4] Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı. Geri Dönüşümlü Atık Malzemeler ile ilgili Bilgiler. <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>. Erişim tarihi Mayıs 3, 2020.
- [5] Liu S, Wang S, Tang W, Hu N, Wei J. Inhibitory effect of waste glass powder on asr expansion induced by waste glass aggregate. *Materials (Basel)*, 2015; 8(10): 6849–6862.
- [6] Serpa D, Silva AS, Brito JD, Pontes J, Soares D. ASR of mortars containing glass. *Constr. Build. Mater.*, 2013; 47: 489–495.
- [7] Idir R, Cyr M, Tagnit-Hamou A. Use of fine glass as asr inhibitor in glass aggregate mortars. *Constr. Build. Mater.*, 2010; 24: 1309–1312.
- [8] Saccani A, Bignozzi MC, Barbieri L, Lancellotti I, Bursi E. Effect of the chemical composition of different types of recycled glass used as aggregates on the asr performance of cement mortars. *Constr. Build. Mater.*, 2017; 154: 804–809.
- [9] Topçu İB, Boğa AR, Bilir T. Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li₂CO₃. *Waste Manage.*, 2008; 28(5): 878–884.
- [10] ASTM C 1260-14, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [11] Şapçı, N. Doğal Kayaç Bileşenli Genleşmiş Cam Agregası Üretimi Ve Endüstriyel Olarak Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2013.
- [12] Amerika Altyapı Raporu. Suda yüzen beton. <https://www.infrastructurereportcard.org/>. Erişim tarihi Ocak 7, 2020.
- [13] İTÜ Mühendisliğe Hazırlık Kulübü. Suda yüzen beton. <http://www.itumhk.com/>. Erişim tarihi Ocak 7, 2020.
- [14] Nemes R, Józsa Z. Strength of lightweight glass aggregate concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2006; 18(5): 710-714.
- [15] Kralj D. Experimental study of recycling lightweight concrete with aggregates containing expanded glass. *Process Safety and Environmental Protection*, 2009; 87(4): 267-273.
- [16] Yu R, Onna DV, Spiesz P, Yu QL, Brouwers HJH. Development of ultra-lightweight fibre reinforced concrete applying waste glass. *Journal of Cleaner Production*, 2016; 112: 690-701.
- [17] Ismail ZZ, Al-Hashmi EA. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Manage.*, 2009; 29(2): 655-659.
- [18] Rashad AM. Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on portland cement. *Constr. Build. Mater.*, 2014; 72: 340–357.
- [19] Liaver Reapor Akustik Platten. http://www.liaver.com/fileadmin/user_upload/pdf/Liaver_reapor_en.pdf.pdf. Erişim tarihi Mart 3, 2020.
- [20] Göltaş Çimento A.Ş. CEM I 42,5 R Bilgi Föyü. <http://www.Goltas.com.tr/files/urunlerimiz/dgjrapsb6jsoc0c0kg.pdf>. Erişim tarihi Ocak 7, 2020.
- [21] Göltaş Çimento A.Ş. CEM IV 32,5N Bilgi Föyü. <http://www.Goltas.com.tr/files/urunlerimiz/b9cypybnmq74g0og8sk.pdf>. Erişim tarihi Ocak 7, 2020.
- [22] TS EN 196-1. Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları, Ankara, Türkiye, 2016.
- [23] Perhabbe. Genleşmiş Cam Teknik Bilgi Föyü. <http://www.perhabbe.com/resimler/files/PerHAbbe-Genlesmis-Cam-Teknik-Bilgi-Foyu.pdf>. Erişim tarihi Ocak 7, 2020.