



**Makale
(Article)**

Yüksek Oranda Silis Dumanı İçeren Harçlarda Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) Gelişiminin İncelenmesi

Tayfun UYGUNOĞLU*

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, 03030 Afyonkarahisar/TÜRKİYE
uygunoglu@aku.edu.tr

Özet

Alkali-silika reaksiyonu (ASR) betonda büyük genleşmelere yol açarak betonun çatlayıp kısa sürede bozulmasına yol açan kimyasal bir reaksiyondur. Sıcaklık, nem ve basıncın artması da bu reaksiyonları arttırmaktadır. Bu çalışmada, farklı agregalarla üretilen silis dumanı katkılı harçlarda alkali silika reaksiyonunun (ASR) gelişimi araştırılmıştır. Harçların üretiminde doğal kum, kırma kum, beton atığı kum ve mermer atığı kum kullanılmıştır. Silis dumanı, harçlara çimentoyla %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında ağırlıkça yer değiştirilerek katılmıştır. ASR deneyi, ASTM C 1260 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Harç çubukları (25x25x285 mm) 14 gün boyunca yüksek alkali ortamda ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Daha sonra boy değişimleri ölçülerek silis dumanı ve agrega tipinin ASR üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en fazla genleşme doğal kumda görülürken, en az genleşme de kireçtaşı kökenli agregalarla üretilen harçlarda görülmüştür. Diğer yandan silis dumanının %10-30 arasında kullanılmasıyla, tüm harçlarda ASR etkisinin önemli derecede azaldığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Silis dumanı; puzolan; harç; alkali-silika reaksiyonu

Examination of Alkali-Silica Reaction (ASR) Development in High Ratio Silica Fume Blended Mortars

Abstract

Alkali-silica reaction (ASR) is a chemical reaction that cause to cracking and led to deterioration of concrete in a short time because of led to huge expansion in the concrete. The increase of temperature, humidity and pressure increases these reactions. In this study, the alkali silica reaction (ASR) development was investigated in silica fume blended mortars produced with different aggregates. In the production of mortars, natural sand, crushed sand, waste concrete sand and waste marble sand were used. Silica fume was replaced with cement in ratio of 0%, 10%, 20%, 30% and 40% by weight in the in the mixtures. ASR test was conducted according to ASTM C 1260 standards. Mortar bars (25x25x285 mm) have been exposed to high alkali environment and high temperatures for 14 days. Then, the influence of aggregate type and silica fume was determined on the effect of ASR by measuring the length change of mortar bars. According to the results obtained, the maximum expansion was seen in mortars with the natural sand, and the minimum expansion was observed in mortars produced with limestone aggregate origin. On the other hand, by use of silica fume in ratio of 10%-30%, it was observed that expansion of all the mortars was significantly decreased.

Keywords: Silica fume; pozzolan; mortar; alkali-silica reactivity.

Bu makaleye atf yapmak için

Uygunoğlu, T., "Yüksek Oranda Silis Dumanı İçeren Harçlarda Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) Gelişiminin İncelenmesi" Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi 2009, 5(2) 9-16

How to cite this article

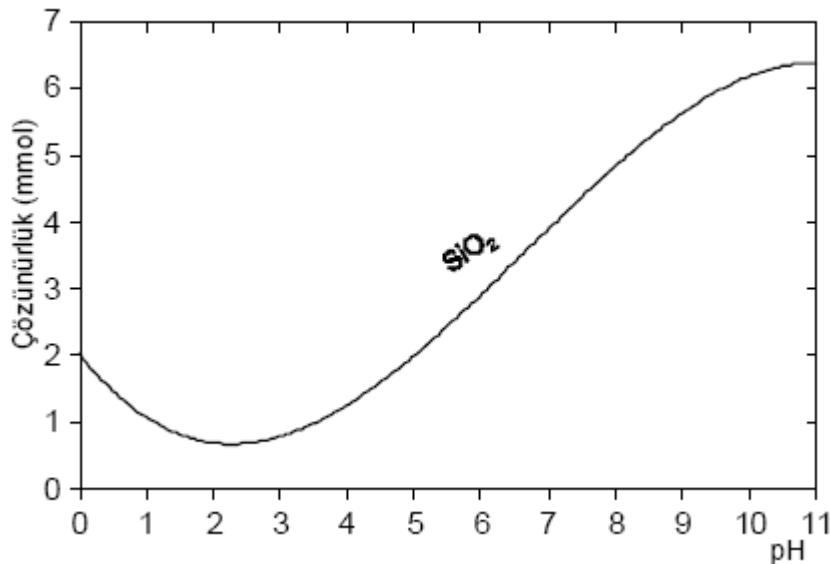
Uygunoğlu, T., "Examination of Alkali-Silica Reaction (ASR) Development in High Ratio Silica Fume Blended Mortars" Electronic Journal of Construction Technologies, 2009, 5(2) 9-16

1. Giriş

Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR), betonun ana bileşenlerinden olan Portland çimentosu içerisindeki alkalilerin, agregada bulunabilecek reaktif silikat mineralleri ile tepkimeye girmesi sonucu oluşan reaksiyondur [1]. Bu reaksiyon sonucu betonda çatlaklar oluşmakta, betonun çekme ve eğilmede çekme dayanımı düşmektedir. Özellikle köprü, tünel ve viyadük gibi büyük sanat yapılarında, beton yollarda, demiryollarında kullanılan beton traverslerde, yol kaplamasında, otoparklarda ve kaldırımlarda kullanılan parke taşlarında, ve bordür gibi çevre koşullarına direkt olarak maruz kalan beton elemanlarda meydana gelen bu reaksiyon, önemli teknik ve ekonomik sorunlara neden olmaktadır [2]. Bu reaksiyonun oluşumuna etki eden faktörler arasında kullanılan agreganın mineralojik bileşiminin yanı sıra kullanılan çimentonun içerisindeki alkali oksitlerin miktarı da etkilidir. Bununla birlikte, ortamın bağıl nemi (RH), beton boşluk suyunun pH derecesi, betonun porozitesi ve karışıma dahil olan katkı maddelerinin özellikleri gibi diğer faktörler de reaksiyonun gelişiminde önemli rol oynamaktadır [3]. Karışımda kullanılan Portland türü çimentonun içerisindeki alkalilerin toplam oranı ($\text{Na}_2\text{O}+0.658\times\text{K}_2\text{O}$) %0,6 değerinin üzerinde olması durumunda ASR bakımından çimento riskli grup içinde yer almaktadır.

2. ASR'nin Oluşumu

ASR'nin oluşumunda en önemli faktörlerden birisi beton boşluk suyunun pH derecesidir. Özellikle kuvars kökenli agregalarda bulunan silisyum oksit, pH değerinin artmasıyla birlikte daha fazla çözünmektedir (Şekil 1). Silisyumun çözünürlüğünün pH'ın 10 olduğu durumlarda en üst düzeye çıkmaktadır. Çimento pastasının (harcının) pH değeri kullanılan çimento türüne göre değişmekle birlikte Portland çimentolar ile üretilen betonlarda bu değer en az 12.5 seviyelerindedir [4]. Çözünen reaktif silisyum oksitler çimentoda yer alan alkalilerle kimyasal reaksiyona girerek alkali jelleri oluştururlar. Dışardan nem alınması durumunda da bu jeller yüksek oranda genişleyerek betonun çatlamasına yol açmaktadır. ASR'nin oluşturduğu reaksiyon ürünleri aşırı derecede su emme özelliği olan jel ürünlerdir. Su emme özelliği olan bu jeller, suyu emdikçe şişip betonda içsel çekme gerilmeleri oluşturarak betonun genişmesine ve agregaya ile onu çevreleyen çimento pastasının çatlamasına neden olur [5-7].



Şekil 1. Silisyumun pH değerine bağlı olarak çözünürlük derecesi [2]

ASR'nin oluşumunu önlemede en etkili yöntemlerden birisi beton bileşenlerine ilave olarak puzolanik malzeme kullanmaktır. Puzolanik malzemeler yüksek oranda aktif silis içermektedir. Aktif silis, harç içerisinde serbest kireçle reaksiyona girmekte ve yeni tobermorit jellerinin oluşmasını sağlamaktadır [8].

Yeni oluşan tobermorit jelleri sayesinde beton eleman daha yoğun bir yapıya sahip olmakta ve böylece nem girişinin yapı elemanına girişi zorlaşmaktadır. ASR oluşumu böylece önlenmektedir. Beton üretiminde puzolanik katkıların kullanımı, betonun dayanımını arttırması, terlemeyi ve rötreyi azaltması gibi sağladığı avantajlar bakımından geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bu malzemelerden birisi de endüstriyel bir atık olan silis dumanıdır [9]. Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında, yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucunda elde edilen çok ince taneli tozdur [10].

Bu çalışmada, beton üretiminde kullanılan doğal kum ve kırma kum ile kullanımı yeni araştırılan beton atıklarından ve mermer atıklarından elde edilen kumların harç üretiminde kullanılması; aynı zamanda silis dumanının da ilavesi ile ASR gelişiminin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Kullanılan malzemeler

- Çimento

Harç karışımlarının hazırlanmasında hidrolik bağlayıcı olarak TS EN 197-1 [11] standardına uygun olarak üretilmiş olan CEM I-42.5/R tipi Portland çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı 3.07 olup toplam alkali içeriği %0.65'dir. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

- Silis dumanı

Deneyslerde puzolanik malzeme olarak kullanılan silis dumanı (SD) Etibank Antalya Elektrometalurji Sanayi İşletmesi kurumundan temin edilmiştir. Özgül ağırlığı 2.20'dir. Silis dumanının kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Portland çimentosu ve silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellik	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	KK	Yüzey alanı (cm ² /g)
PÇ	63.56	19.3	5.57	3.46	0.86	2.96	0.8	0.13	1.15	3220
SD	0.71	91.0	0.58	0.24	0.33	1.06	3.72	0.29	1.84	14400

- Agregas

Agregas olarak doğal kum, kırma kum, beton atığı kum ve mermer atığı kırma kum olmak üzere dört farklı karakteristik özelliğe sahip agregas kullanılmıştır. Doğal kum dere Afyonkarahisar yöresine ait yatağından, kırma kum da agregas ocaklarından temin edilmiştir. Beton atığı kum, laboratuarda basınç deneyine tabi tutulduktan sonra atılmış olan beton numunelerinin çeneli kırıcı ile kırılarak elendikten sonra ince agregas bölümü kullanılmıştır. Mermer atıkları da, mermer fabrikalarındaki atık mermer parçalarının kırılarak elendikten sonraki ince agregas kısımları kullanılmıştır. Tüm agregaların tane boyutu ASTM C 1260 standardında belirtilen 0-4 mm elek aralığında kullanılmıştır [12]. Doğal kum, kırma kum, beton atığı kum ve mermer atığı kumun özgül ağırlıkları sırasıyla 2.61, 2.65, 2.24 ve 2.70'dir.

Agregaların polarizan mikroskopta yapılan petrografik analiz değerlendirmesi sonucunda, doğal kumun ağırlıklı olarak silikat mineralleri, silikat mineralli kayas kırıntularından oluşmuştur. Ana mineral olarak kuvars içerdiği gözlenmiştir. Bunun yanında kuvarsa eşlik eden plajoklas ve kalsit mineralleri mevcuttur. Kırma kum da ise, kriptokristalin kalsit kristalli kireçtaşı kalıntılarını içeren kayas rekristalizasyonu ile

0.1-1 mm boyutlu kalsit kristalleri ile kenetlenmiş olarak görülmüştür. Afyon yöresi mermerlerinden elde edilen mermer atığı kumda, kataklastik doku göstermekte ve tane boyutu farklı olan ve basınç ikizlenmesi gösteren kalsit kristallerinden meydana gelmektedir. Tane sınırları boyunca nüfuz eden demirli eriyikler nedeniyle kayada hematit ve limonit mineralleri gözlenmiştir. Küçük kalsit kristalleri arasında yer yer iri kalsit kristaller de bulunmaktadır. Atık beton kumunda yapılan incelemede hidrate olmuş çimento hamuru içerisinde beton üretiminde kullanılan doğal kumdan dolayı az miktarda da olsa kuvars mineralleri gözlenmiştir.

2.2. Karışım oranları

ASR deneyi, ASTM C 1260 [12] standardına göre belirtilen agrega ve su-çimento oranlarına göre yapılmıştır. Her bir agregayla, su-çimento oranı 0.47 ve çimento-agrega oranı 2.25 olacak şekilde 25x25x285 mm boyutlarında harç çubukları hazırlanmıştır. Buna göre, 440 g çimentoyla birlikte 990 g agrega kullanılmıştır. Çimento miktarı ayrıca silis dumanıyla %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında (çimentonun ağırlığına) yer değiştirilerek seri sayısı arttırılmıştır. Toplamda, dört farklı agrega ve beş farklı bağlayıcı oranıyla birlikte 20 farklı seri tasarlandı. Bileşenler çimento harç mikserinde karıştırıldıktan sonra kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 2). Dökümden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış olan numuneler, ilk boy ölçümleri yapılarak 80 °C sıcaklıktaki saf suya yerleştirilmişlerdir. Saf suda 24 saat bekletildikten sonra numunelerin komparatörde sıfır okumaları yapılmış ve daha sonra numuneler hazırlanan 80 °C 1 M NaOH çözeltisi içinde 14 gün bekletilmişlerdir (Şekil 3.a). Numunelerde yaklaşık 3 gün arayla boylarındaki değişimlerin ölçülmesiyle genleşme değerleri belirlenmiştir (Şekil 3.b).



Şekil 2. Üretilen çubuk harç numunelerinden bir görünüm



(a)



(b)

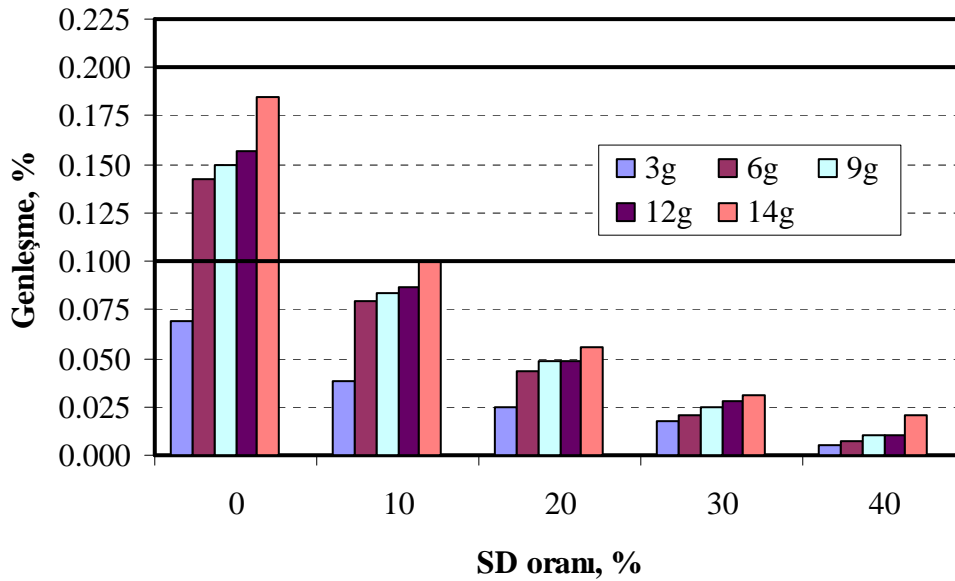
Şekil 3.a) Numunelerin kimyasal çözeltide bekletilmesi; b) komparatör okumalarının yapılması

3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

ASR deneyi sonucunda numunelerde elde edilen genleşme değerleri için ASTM C 1260 [12] standardında genleşmelerin önemi hakkında bir takım sınırlamalar önerilmektedir. Bunlar:

- **Güvenli bölge:** Genleşme değeri %0.1'in altındaysa ASR problemi yoktur.
- **Şüpheli bölge:** Genleşme değeri %0.1 ile %0.2 arasındaysa ASR riski muhtemeldir.
- **Tehlikeli bölge:** Genleşme değeri %0.2 değerinin üzerinde ise ASR açısından tehlikelidir.

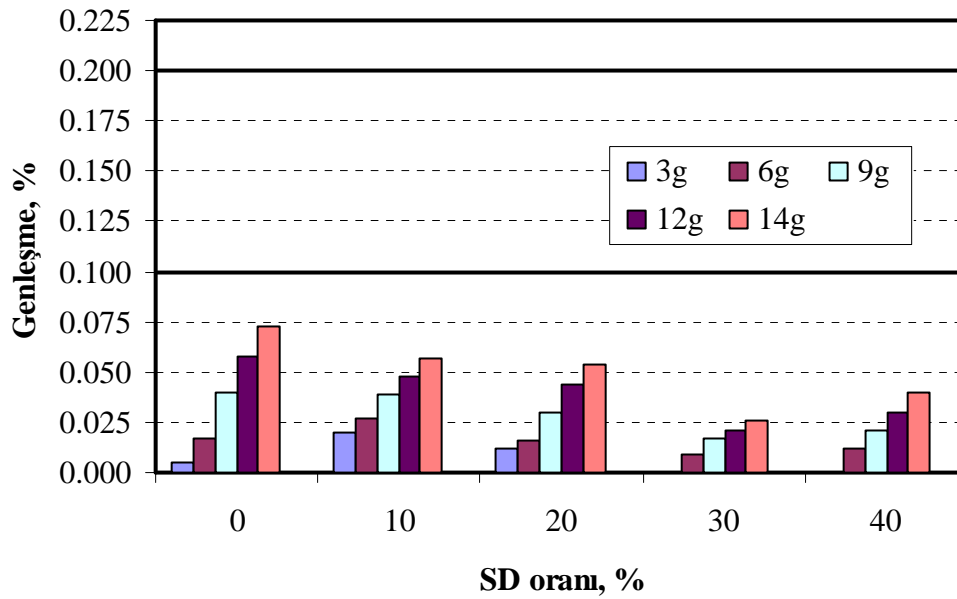
Bu durumlara göre malzemelerin seçimi de daha kolay ve güvenilir olmaktadır. Şekil 4'te doğal kum kullanılarak üretilen harçların SD oranına göre ASR genleşmeleri görülmektedir. Bütün harçların genleşmeleri incelendiğinde en düşük genleşme değeri 3. gün sonunda görülürken; en fazla genleşme değerleri de kimyasal reaksiyonun ilerlemesinden dolayı 14. gün sonundaki ölçümlerde elde edilmiştir. Harçların üretiminde doğal kum kullanılması durumunda, %0 SD içeriğinde, 14 gün sonundaki genleşme değerinin %1.8 değeri ile şüpheli bölgede kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, aynı harçların 6, 9 ve 12 gün sonraki genleşme değerleri de şüpheli bölgededir. Çimentoadaki K_2O ve Na_2O oksitlerinin de varlığıyla harçtaki boşluk suyu pH değerinin yükseltilmesi ve böylece doğal kumdaki reaktif silislerin çözünerek alkalilerle kimyasal reaksiyona girmesi ve yüksek nemin de varlığıyla numunelerin genleşmesine neden olmuştur. %10 SD içerikli doğal kumla üretilen harlardaki genleşme değerleri incelendiğinde, %0 SD içerikli olan kontrol harçlarına göre daha az genleşme değerleri elde edilmiştir. SD içeriğinin artmasıyla birlikte tüm genleşme değerlerinin de azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte yine SD kullanılmasıyla birlikte harçların genleşme değerleri açısından güvenli bölge içerisinde kaldıkları da açıkça görülmektedir.



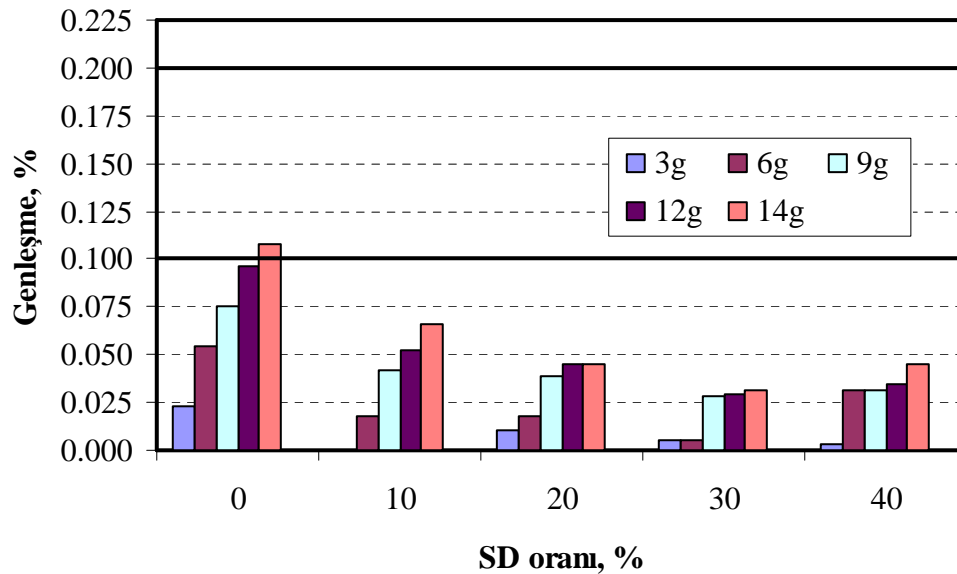
Şekil 4. Doğal kumla üretilen harç çubuklarının SD içeriğine göre genleşme değerleri

Şekil 5'te verilen ve kırma kumla üretilmiş olan harç çubuklarının NaOH çözeltisi içerisindeki 3, 6, 9, 12 ve 14 gün sonraki genleşme değerleri incelendiğinde tüm SD içeriklerindeki harçların genleşme değerlerinin %0.1 değerinin altında kaldığı ve böylece güvenli bölgede oldukları açıkça görülmektedir. Kırma kumun kireçtaşı esaslı olmasından dolayı, çimento içerisinde bulunan alkali oksitlerin reaksiyona girerek alkali jellerinin oluşması önlenmiştir. SD içeriğinin artmasıyla da harçların genleşme değerlerinde azalma görülmüştür. Beton atıklarından elde edilen kumlarla üretilmiş olan harçların genleşme değerleri incelendiğinde (Şekil 6), doğal kumla üretilmiş harlarınkine benzer şekilde, % 0 SD içeriğindeki harçlarda % 0.11 değeriyle en fazla genleşme değeri elde edilmiştir. 14 gün sonunda ölçülen bu değerle,

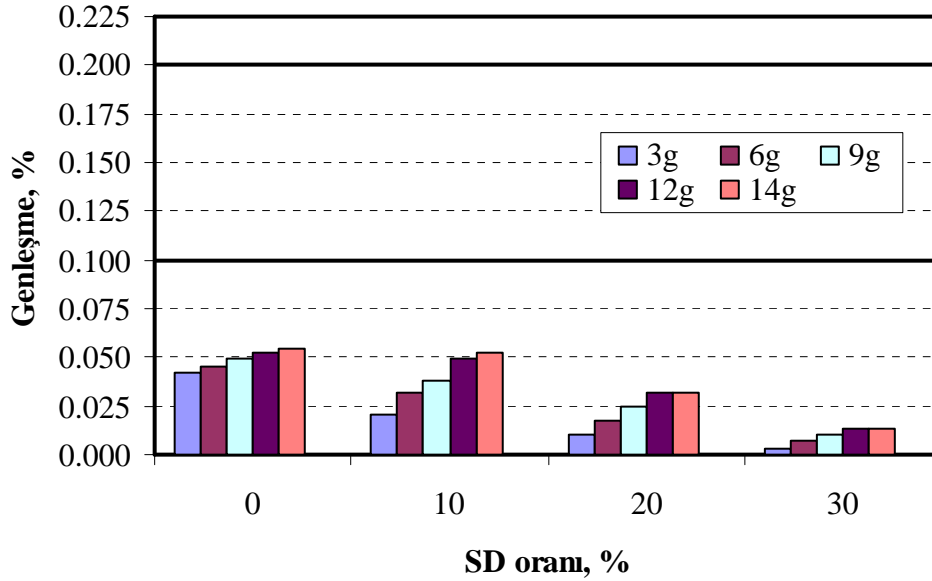
beton atıklarıyla üretilmiş %0 SD içeriğindeki harçlar, genleşme değerleri açısından şüpheli bölgede yer almaktadırlar. Bu genleşmenin sebebi de beton atığı kum içerisinde bulunan reaktif silisten kaynaklandığı belirtilebilir. Buradaki reaktif silisler de üretilen beton bileşimlerinde doğal kum kullanılmış olabilmelerinden kaynaklanmaktadır. SD'nin çimentoyla yer değiştirilmesiyle birlikte harçların genleşme değerleri de giderek azalmıştır. Ancak en yüksek silis dumanı içeriğinde (%40) harçların genleşmelerinin %30 silis dumanı içeren harçlarınkine göre bir miktar arttığı görülmüştür. Bunun nedeni, %90 oranında silis içeren silis dumanının yüksek miktarda kullanılmasıyla harç içerisinde bir miktar serbest silis kalmış olması ve bu silisin alkalilerde reaksiyona girerek harçlarda genleşmeye neden olduğu belirtilebilir. Kuvars esaslı bir agregayla yüksek oranda silis dumanı kullanılmasıyla ASR etkisi azaltılırken, kireçtaşı esaslı agregaya kullanılması durumunda aynı orandaki silis dumanı kullanılması durumunda ASR etkisinin bir miktar arttığı gözlenmiştir. Silis dumanının %5 gibi az bir oranda kullanılması durumunda da harç çubuklarında ASR etkisinden dolayı genleşmeyi arttırdığı da gözlenmiştir [5,13]. Bu nedenle kullanılacak olan agregayla önceden deneme çalışması yapılması önerilmiştir [10].



Şekil 5. Kırma kumla üretilen harç çubuklarının SD içeriğine göre genleşme değerleri



Şekil 6. Beton atığı kumla üretilen harç çubuklarının SD içeriğine göre genleşme değerleri



Şekil 7. Mermer atığı kumla üretilen harç çubuklarının SD içeriğine göre genleşme değerleri

Harçların üretiminde kullanılan diğer agrega türü de mermer atıklarından elde edilen kumdur. Mermer atığı kumla üretilen harçların genleşme değerlerinin de tüm SD içeriklerinde güvenli bölge içerisinde yer aldığı Şekil 7’de görülmektedir. Mermer atığı agregayla üretilen harçlarda %40 SD içeriğindeki harçların kalıplara dökümünden sonra aşırı plastik rötre yapmalarından dolayı numuneler çıkartılmaları sırasında kırılmışlardır. Bundan dolayı da ölçüm yapılamamıştır. Ancak diğer serilerden de görüldüğü gibi SD miktarının %0’dan %30 oranına kadar artırılmasıyla harç çubuklarının genleşme değerleri de azalmıştır.

Tüm agrega tipleriyle üretilen harçlarda SD miktarı arttırıldıkça harç çubuklarının genleşme değerinin azaldığı yukarıda bahsedilmişti. SD’nin ASR etkisini azaltmadaki en önemli rolü şu şekilde özetlenebilir:

- Beton veya harçta oluşan kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin alkali oksitleri bağlama kapasiteleri reaktif silisin bağlama derecesinden daha yüksektir. SD gibi aktif silis içeren puzolanların kullanılması durumunda, harçtaki serbest CaO ile aktif SiO₂ nem ve suyun da varlığıyla yeni C-S-H jelleri oluşturarak mevcut alkalilerin bağlanmasını sağlarlar [5,8]. Böylece boşluk suyundaki pH değeri de azalarak reaktif silisin çözünmesi de azaltılarak ASR etkisi önlenir.
- SD’nin puzolanik aktivitesinden dolayı harç veya beton, yeni oluşan C-S-H jelleri ile daha yoğun yapıya sahip olacak ve böylece yapı elemanı içerisine nem girişi daha zor olacaktır [10]. Nem girişinin yapı elemanına girmesi önlenerek alkali ve reaktif silisin oluşturduğu jellerin şişmesi önlenmiş olacaktır.

4. Sonuçlar

Doğal kum, kırma kum, beton atığı kum ve mermer atığı kumun kullanılarak üretilen harçlarda silis dumanının da ilavesiyle ASR gelişiminin incelendiği bu çalışmada önemli sonuçlar elde edilmiştir. Doğal kumla %0 SD içerikli harçlar, doğal kumun reaktif silis içermesinden dolayı, genleşme değerleri açısından şüpheli bölgede yer aldıkları görülmüştür. SD’nin ilavesiyle, ortamın boşluk suyundaki pH değeri azaltılarak, tüm SD içeriğindeki doğal kumla üretilen harçlar genleşme değeri açısından güvenli bölgede kalmışlardır. Kırma kum ve mermer atığı agregaları reaktif silis içermediklerinden dolayı tüm harçlar genleşme değeri açısından güvenli bölge içerisinde kalmışlardır. Beton atığı agregasında, üretilen betonların içerisinde doğal kum kullanılmış olabilmesi sebebiyle bir miktar reaktif silis içerdikleri ve bu

nedenle de %0 SD içeriğinde harçların genleşme değeri şüpheli bölge içerisinde yer aldıkları görülmüştür. Tüm agrega tipleriyle üretilen harçlarda %10-%30 oranında silis dumanı kullanılmasıyla ASR etkisi önemli derecede azaltılarak yapı elemanlarının hasara uğrama riskinin azaltılacağı görülmüştür.

Kaynaklar

1. Topçu, İ.B., Boğa, A.R., Bilir, T., "Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li_2CO_3 ", *Waste Management*, 28 (2008) 878-884.
2. Topçu, İ.B., Boğa, A.R., Demir A., "Prefabrik Elemanlarda Alkali-Silika Reaksiyonunun İncelenmesi", Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, 22-23-24 Eylül 2005, Antalya, Bildiriler Kitabı, Cilt 2, ss. 279-289.
3. Shon, C.S., Zollinger, D.G., Sarkar, S.L., Evaluation of modified ASTM C 1260 accelerated mortar bar test for alkali-silica reactivity, *Cement and Concrete Research*, 32 (2002) 1981-1987.
4. Erik, D., Mutlutürk, M., Koç Deresi (Hafik-Sivas) kum-çakıl ocağı malzemelerinin alkali-silika reaksiyonu özellikleri, KAYAMEK'2004-VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, 2004, Sivas, Türkiye.
5. Juenger, M.C.G., Ostertag, C.P., Alkali-silica reactivity of large silica fume-derived particles, *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 1389-1402.
6. Arslan M., Çullu M., Ankara Yöresindeki Bazı Agrega Ocaklarının Alkali Silika Reaktivitesi Açısından İncelenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Cilt 21, No 4*, 613-620, 2006.
7. İpek, M., Yılmaz, K., Sert, G., Sakarya Bölgesinde Üretilen Kırmataş Agregaların Alkali Agrega Reaksiyonunun İncelenmesi, 5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu (İats'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
8. Maas, A.J., Ideker, J.H., Juenger, M.C.G., Alkali silica reactivity of agglomerated silica fume, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 166-174.
9. Topçu, İ.B., "Betonda Silis Dumanı Kullanımının Ekonomik Analizi", Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt XIV, Sayı 1, 2001, ss. 17-30.
10. Yeğınobalı, A., Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), Ar-Ge Enstitüsü, 3 Baskı, Ekim 2003, 64 sayfa.
11. TS EN 197-1/A3, Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
12. ASTM C 1260, "Standart Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)", Annual Book of ASTM Standarts, Philadelphia, USA.
13. Perry, C., Gillot, J.E., The feasibility of using silica fume to control concrete expansion due to alkali-aggregate reaction, *Durability and Building Materials*, 3 (1985) 133-146.