



Aktivatör Türünün Alkalilerle Aktive Edilmiş Cüruf Bağlayıcılarında Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisinin Araştırılması

Investigation of Activator Type on Alkali Silica Reaction in Alkali Activated Slag Cements

Nilgün Çirkin^{1*}, Serdar Aydın²

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, TÜRKİYE

² Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: nilgun0696@gmail.com

Öz

Alkali ile aktifleştirilmiş cüruf (AAS) bağlayıcılarının üretiminde kullanılan aktivatörler yüksek miktarda alkali içermektedir. Bu sebeple, AAS bağlayıcılarının reaktif silis içeren agregalar ile birlikte kullanımı halinde Alkali Silika Reaksiyonu (ASR) kaynaklı hasar oluşma mevcuttur. Bu konunun; hammadde türü, aktivatör türü ve dozajı gibi önemli parametreler bakımından değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, yüksek fırın cürufunun çeşitli aktivatörler ile aktive edilmesiyle üretilen bağlayıcı madde ve reaktif agrega kullanılarak üretilen AAS harç karışımlarının ASTM C1260 Hızlandırılmış Harç Çubuğu yöntemiyle ASR genleşmeleri belirlenerek, aktivatör tipinin ASR üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Aktivatör olarak, sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat ve sodyum sülfat kullanılmıştır. Zayıf aktivatörler (sodyum karbonat ve sodyum sülfat); kalsiyum hidroksit ve sodyum hidroksit ile hibrit şekilde kullanılmıştır. Ayrıca, kıyaslama yapabilmek için Portland çimentosu (PÇ) harçlarının da genleşmeleri incelenmiştir. PÇ ile kıyaslandığında alkalilerle aktive edilmiş cüruf harçlarının ASR genleşmelerinin daha düşük olduğu görülmüştür. PÇ kullanılarak üretilen numuneler dışında 14. gün ölçümlerinde ASTM C1260 standardında verilen zararlı genleşme limitini (%0,1) geçen numune olmamıştır. Sodyum silikat aktivatörü kullanılarak hazırlanan numunelerinin genleşme değerleri 90. günde %0,1'i aşmıştır. Sodyum hidroksit aktivatörü ile hazırlanan numunelerin genleşme miktarları %0,1'in altında kalmıştır. 3 ayın sonundaki ölçümlerde sodyum karbonatlı ve sodyum sülfatlı karışımlar %0,1'in yaklaşık 3 katına ulaşmıştır. Bu durum alkalilerle aktive edilmiş harçlar için ASTM C1260 standardında verilen 14 günlük sürenin kısa olduğunu göstermektedir. Elde edilen SEM görüntülerine göre ASR sonucu agrega, matris ve matris-agrega ara yüzeyinde çatlakların oluştuğu, agrega-matris arayüzeyinde ve boşluklarda iğnemi morfolojiye sahip ASR ürünlerinin oluştuğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Alkali Aktive Cüruf Harçlar (AAS), Alkali Silika Reaksiyonu (ASR), Alkali Aktivatörler, ASTM C1260

Abstract

The activators used in the production of alkali-activated slag (AAS) binders contain high amounts of alkali. Therefore, if AAS binders are used together with aggregates containing reactive silica, damage due to Alkaline Silica Reaction (ASR) is possible. This issue needs to be evaluated in terms of important parameters such as raw material type, activator type and dosage. In this study, the effect of activator type on ASR was investigated by determining the ASR expansions of AAS mortar mixtures produced by activating blast furnace slag with various activators using binder and reactive aggregate using ASTM C1260 Accelerated Mortar Bar method. Sodium hydroxide, sodium silicate, sodium carbonate and sodium sulfate were used as activators. Weak activators (sodium carbonate and sodium sulfate) were used in hybrid form with calcium hydroxide and sodium hydroxide. Expansions of Portland cement (PC) mortars were also investigated for comparison. It was observed that the ASR expansions of the alkali-activated slag mortars were lower compared to those of PC. Except for the specimens produced using PC, no specimen exceeded the harmful expansion limit (0.1%) given in ASTM C1260 standard in the 14th day measurements. The expansion values of the samples prepared using sodium silicate activator exceeded 0.1% on day 90. The expansion amounts of the samples prepared with sodium hydroxide activator remained below 0.1%. At the end of 3 months, the sodium carbonate and sodium sulfate mixtures reached approximately 3 times 0.1%. This shows that the 14-day period given in ASTM C1260 standard for alkali-activated mortars is short. According to the SEM images obtained, it was observed that cracks were formed at the aggregate, matrix and matrix-aggregate interface as a result of ASR, and ASR products with needle-like morphology were formed at the aggregate-matrix interface and voids.

Keywords: Alkaline Activated Slag Mortars(AAS), Alkaline Silica Reaction (ASR), Alkaline Activators, ASTM C1260

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Portland cement (PC), the primary binder in concrete, is the most widely used construction material in the world. In recent years, the construction sector in developing countries has seen increasing growth, leading to a significant demand for cement [1]. For every ton of cement produced, approximately one ton of carbon dioxide is released into the atmosphere, alongside other greenhouse gases [2]. In addition to causing various environmental issues, the Portland cement industry requires substantial amounts of energy for production [3]. Due to these factors, there is an ongoing search for environmentally friendly solutions, focusing on producing concrete with reduced energy consumption and increased use of industrial waste. In recent years, research has concentrated on alkali-activated binders, which are considered the most promising alternative to Portland cement [4,3].

In alkali-activated slag (AAS) mortars, the risk of alkali-silica reaction (ASR) increases when used with reactive aggregates due to the high alkali content. ASR is a reaction that occurs between reactive silica and alkali solutions, leading to the formation of gel-like products that can cause expansion, cracks, and structural damage in the mortar. Shi et al. reviewed previous studies on ASR in alkali-activated systems and demonstrated that ASR in AAS is influenced by various factors, including the nature and dosage of activators, binders, reactive aggregates, and testing methods [5]. However, there is a limited number of studies focusing on the effect of activator type on ASR in alkali-activated systems. Youzhi et al. investigated ASR expansion in slag-based AAS mortars activated with four different types of activators using the ASTM C1260 Accelerated Mortar Bar method. They reported that the expansion of the four systems followed the order of sodium silicate > sodium carbonate > sodium sulfate > sodium hydroxide [6].

Materials and Methods

In this study, high furnace slag was used as the binder for the production of alkali-activated slag (AAS) mortars. The control sample was prepared using CEM-I 42.5R cement. A reactive basalt aggregate obtained from Dere Beton was used. The aggregates were sieved and utilized according to the particle size distribution given in ASTM C1260. The activators used included sodium carbonate (Na_2CO_3) with 99% purity, sodium hydroxide (NaOH) with 98% purity, sodium sulfate (Na_2SO_4) with 99% purity, calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) with over 87% purity, and sodium silicate (Na_2SiO_3) containing 8% Na_2O and 27% SiO_2 . To determine whether the observed expansion was related to the aggregate or the paste, additional experiments were conducted using non-reactive aggregate (limestone) in place of the reactive aggregate in the mixture exhibiting the highest expansion.

The samples were designated with the following abbreviations: sodium carbonate as "NC," sodium hydroxide as "NH," sodium silicate as "SS," calcium hydroxide as "CH," and sodium sulfate as "NS." The mortar mixture containing non-reactive limestone as aggregate is indicated by "(K)." The numbers at the end of the mixture names represent the proportions of the activators used. The aggregate/binder ratio for the mixtures is 2.25, the water/binder ratio is 0.52, and the Na_2O content is 6%. The SS-6 mixture, prepared using sodium silicate, has an Ms ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) ratio of 1.0.

The expansion measurements of the samples were determined using ASTM C 1260 "Accelerated Mortar Bar Method" [7]. In this

method, mortar samples sized 25x25x285 mm were initially conditioned at 20°C and 95% relative humidity for 24 hours, followed by a steam curing process at 80°C for 24 hours. Subsequently, the samples were exposed to a 1 M NaOH solution at 80°C for 2 hours, and their initial dimensions were measured using a comparator with a precision of 1 micrometer. The dimensional changes of the samples were regularly measured on the 1, 3, 5, 7, 10, 14, 21, and 28 days, and subsequently every two weeks for a total duration of 6 months. SEM (Scanning Electron Microscope) analysis was conducted on the samples that were exposed to ASR test for six months.

Results and Discussion

The Portland cement mortars exceeded the 14-day harmful expansion limit specified in ASTM C1260 on the 3rd day. In contrast, none of the alkali-activated slag mortars surpassed the 14-day harmful expansion limit (%0.1) outlined in the ASTM C1260 standard. However, based on measurements taken after 3 months, the mixtures containing sodium carbonate and sodium sulfate reached approximately three times the 14-day harmful expansion limit given by ASTM C1260.

The samples prepared with the NH activator remained below the limit expansion values specified in the ASTM C1260 standard. However, the mixtures prepared with the SS activator exceeded this limit after the 90th day, indicating a risk of alkali-silica reaction (ASR). Similarly, Shi et al. reported that slag mortars activated with NaOH exhibited lower expansion compared to those activated with sodium silicate [8].

In the case of using reactive aggregates, the limit expansion value specified in the ASTM C1260 standard (%0.1) was exceeded on the 28th day. However, the AAS mixture prepared with non-reactive aggregates exhibited negligible expansion. These findings indicate that the observed expansion is not related the reactivity of the aggregate.

The SEM images showed that the alkali-silica reaction (ASR) leads to crack formation within the aggregate, the matrix, and at the interface between the matrix and aggregate. Additionally, the images illustrate the emergence of ASR products exhibiting a needle-like morphology both at the aggregate-matrix interface and within the voids.

Conclusion

The findings of this study indicate that the 14-day testing period outlined in the ASTM C1260 standard is insufficient for adequately assessing the performance of alkali-activated cement mortars. Based on the results, it is recommended that alkali-activated cements should be subjected to a testing duration of at least three months to thoroughly evaluate the risk of alkali-silica reaction (ASR). This extended testing period is crucial for ensuring the long-term durability and structural integrity of constructions utilizing alkali-activated materials. It was found that AAS mixtures were more resistant to ASR expansions as compared to Portland cement mortars. The best results in terms of ASR were obtained with sodium hydroxide activator.

1. Giriş

Betonun temel bağlayıcısı olan Portland çimentosu, dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Son yıllarda gelişmekte olan ülkelerde inşaat sektörüne ilgi artmış bu durum da büyük miktarda çimento ihtiyacı oluşturmuştur. Portland çimentosunun son 10 yıldaki üretimi dünyada yıllık ortalama 4,1 milyar ton seviyelerindedir [1]. Üretilen her bir ton çimento için atmosfere yaklaşık olarak 1 ton karbondioksit salınmaktadır. Ayrıca üretim sırasında diğer sera gazları da açığa çıkmaktadır [2]. Portland çimentosu endüstrisi birçok çevresel soruna neden olmanın yanı sıra üretimi sırasında büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca Portland çimentolu harçlar; sülfat saldırısı, alkali silika reaksiyonu ve yangın direnci gibi birçok dayanıklılık problemlerine karşı beklenen dayanıklılığa sahip değildir [3]. Bu sebeplerden dolayı endüstriyel atıkların kullanımını artırarak ve daha az enerji kullanarak çevreci bir beton üretimi konusunda çözüm arayışları devam etmekte olup, son yıllarda araştırmalar Portland çimentosuna en iyi alternatif olarak görülen alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar üzerinde yoğunlaşmıştır [4,3].

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların üretiminde atmosfere salınan karbondioksit (CO_2) miktarının Portland çimentosuna kıyasla yaklaşık %80 daha az olabileceği bildirilmektedir. Bir başka ifade ile, alkalilerle aktive edilmiş betonlar Portland çimentosu betonlarına göre daha çevreci bir yapı malzemesidir [9]. Alkali ile aktive edilmiş betonlar klorür penetrasyonuna, sülfat saldırısına, donma-çözülme döngülerine ve alkali-agrega reaksiyonuna karşı genellikle PÇ betonundan daha iyi direnç gösterir [10]. Ayrıca alkali ile aktive edilmiş betonunun toksik ve nükleer atıkların immobilizasyonu, petrol kuyuları, açık deniz mühendisliği, refrakter malzemeler, kimya mühendisliği vb. uygulamalarda Portland çimentosu betonundan daha iyi performans gösterebileceği belirtilmiştir [11].

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar; uçucu kül, yüksek fırın cürufu (YFC), kaolin, metakaolin gibi puzolanların sodyum silikat, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit gibi alkali çözeltiler ile aktivasyonu ile üretilir [12]. Yüksek fırın cürufu, amorf haldeki yüksek silika ve alümina içeriği nedeniyle alkali ortamda puzolanik ve bağlayıcı özellikler gösterir [13]. Alkali ile aktive edilmiş cüruf harçlarının performansı, kullanılan cüruf ve aktivatörün türüne göre belirlenir [14]. Genellikle en yüksek dayanım, YFC'nin sodyum silikat ile aktivasyonundan elde edilir [15-18] ancak sodyum silikat ile aktive edilen cüruf bağlayıcılarının hızlı priz ve yüksek kuruma büzülmesi gibi dezavantajları vardır [19,20].

Alkali ile aktive edilmiş cüruf harçlarında (AAS), alkali-silika reaksiyonu (ASR) potansiyeli önemli bir sorundur. AAS harçlarında, yüksek alkali içeriği nedeniyle reaktif karakterli agregalar ile kullanıldığında ASR riski artar. ASR, reaktif silika içeren agregalar ile alkali çözeltisi arasında gerçekleşen kimyasal bir reaksiyon olup, bu reaksiyon sonucunda genleşmeye neden olan jel benzeri ürünler oluşur. Genleşme, harçta iç gerilmeler yaratarak çatlakların oluşmasına ve yapısal hasara yol açabilir. Shi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sodyum silikata kıyasla sodyum hidroksit ile aktive edilen AAS harçlarının daha düşük genleşmeye sahip olduğunu bulmuştur [21]. Singh ve Singh yaptığı çalışmada bakır cürufunun sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile hazırlanan aktivatör çözeltisiyle aktivasyonu sonucu oluşan AAS harçlarında sodyum hidroksit içeriği arttıkça ASR genleşmelerinin arttığını, sodyum silikatın silikat modülü arttıkça ise ASR genleşmelerinin azaldığını rapor etmiştir [22]. Puertas ve arkadaşları [23], reaktif silisli agrega ile yapılan PÇ'li

harçlarda oluşan ASR genleşmelerinin AAS harçlarına göre neredeyse dört kat daha fazla olduğunu rapor etmiştir.

Fernandez-Jimenez ve Puertas [24], suda ve 1 M NaOH çözeltisinde bekletilen PÇ harçlarının AAS harçlarından daha yüksek miktarda genleştiğini rapor etmiştir. NaOH çözeltisinde bekleyen AAS harçlarında gecikmiş genleşme görüldüğü bildirilmiştir [24]. Ancak Bakharev ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada AAS betonundaki genleşmenin, özellikle deneyin ilk ayında, PÇ betonundakinden daha yüksek olduğunu ve PÇ örneklerinde görsel bir hasar oluşmazken, AAS örneklerinde harita çatlakları oluştuğunu bildirmiştir [25]. Bu nedenle, AAS betonunun saha koşullarında ASR'ye karşı daha düşük potansiyele sahip olup olmadığı belirsizdir. Shi ve arkadaşları alkalilerle aktive edilen sistemlerde ASR üzerine yapılan önceki çalışmaları incelemiş ve AAS'lerde oluşan ASR'nin aktivatörlerin doğası ve dozajı, bağlayıcılar, reaktif agregalar, test yöntemleri gibi birçok faktörden etkilendiğini göstermiştir [5]. Bununla birlikte, alkali ile aktive edilmiş sistemlerde aktivatör türünün ASR üzerindeki etkisine odaklanan kısıtlı sayıda çalışma vardır. You-zhi ve arkadaşları ASTM C1260 Hızlandırılmış Harç Çubuğu yöntemini kullanarak dört tip aktivatör ile aktive edilen cüruf esaslı AAS harçlarındaki ASR genleşmesini araştırmış ve dört tip sistemin genleşmesini şu sırayla sodyum silikat > sodyum karbonat > sodyum sülfat > sodyum hidroksit şeklinde olduğunu bildirmiştir [6].

Bu çalışma kapsamında, farklı tür aktivatörle hazırlanan alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu esaslı bağlayıcıların ASTM C1260 Hızlandırılmış Harç Çubuğu yöntemine göre ASR genleşmeleri araştırılmıştır. Zayıf aktivatörler olarak bilinen sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sodyum sülfat (Na_2SO_4), düşük dozajlarda sodyum hidroksit (NaOH) ve kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile birlikte hibrit aktivatör olarak kullanılarak mekanik özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan aktivatörler; sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH), sodyum karbonat (Na_2CO_3) + kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) veya sodyum hidroksit (NaOH), sodyum sülfat (Na_2SO_4) + kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) veya sodyum hidroksit (NaOH)'tır. Oluşan genleşmenin agrega veya hamur kaynaklı olup olmadığını bulabilmek için en yüksek genleşmeyi gösteren karışımda reaktif agrega yerine reaktif olmayan agrega (kireçtaşı) kullanılarak da bazı deneyler yapılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada AAS harcı üretiminde bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Kontrol numunesi olarak hazırlanan harçta ise CEM-I 42.5R tipi portland çimentosu (CEM-I) kullanılmıştır. Agrega Dere Beton'dan temin edilen, andezit bazalt türü reaktif bir agrega kullanılmıştır. Kullanılan agrega, çimento ve yüksek fırın cürufunun (YFC) kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Agregalar elenerek ASTM C1260 standardında verilen tane boyut dağılımına göre kullanılmıştır. Aktivatör olarak; %99 saflıkta sodyum karbonat (Na_2CO_3), %98 saflıkta sodyum hidroksit (NaOH), %99 saflıkta sodyum sülfat (Na_2SO_4), %87 saflıkta kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ve içeriğinde %8 Na_2O , %27 SiO_2 bulunan sıvı Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır.

Numuneler isimlendirilirken sodyum karbonat "NC", sodyum hidroksit "NH", Sodyum Silikat "SS", kalsiyum hidroksit "CH" ve sodyum sülfat "NS" olarak kısaltılmıştır. Agrega olarak reaktif olmayan kireçtaşı kullanılan harç karışımı "(K)" ile belirtilmiştir. Hazırlanan tüm karışımların Na_2O oranı %6'dır. Karışım isimlerinin sonundaki sayılar kullanılan aktivatörlerin yüzdece oranlarını göstermektedir. Örneğin, NS5NH1 sodyum sülfattan gelen Na_2O miktarının YFC ağırlığının %5'i ve sodyum

hidroksitten gelen Na₂O miktarının ise YFC ağırlığının %1'i olduğu anlamına gelmektedir. NS6CH1 sodyum sülfattan gelen Na₂O miktarının YFC ağırlığının %6'sı ve kalsiyum hidroksit miktarının ise YFC ağırlığının %1'i olduğu anlamına gelmektedir. Karışımların agrega/bağlayıcı oranı 2,25, su/bağlayıcı oranı 0,52'dir. Sodyum Silikat kullanılarak hazırlanan SS-6 Karışımının Ms (SiO₂/Na₂O) oranı 1,0'dir.

Tablo 1. Agregası, Çimento ve Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Bileşenleri (%).

Table 1. Chemical Components of Reactive Aggregate, Portland Cement and Blast Furnace Slag (%).

Bileşen	Reaktif Agregası	YFC	Portland Çimentosu
SiO ₂	62,78	41,40	19,40
Al ₂ O ₃	15,62	11,69	5,3
Fe ₂ O ₃	5,71	1,23	2,99
TiO ₂	0,71	--	--
CaO	5,65	36,35	62,94
MgO	2,37	3,64	1,37
Na ₂ O	2,60	0,60	0,34
K ₂ O	2,01	0,80	0,83
SO ₃	--	0,64	3,29
Na	--	--	--
Klorür (Cl-)	--	0,02	--
Kızdırma Kaybı	2,5	0,04	3,03

2.2. Metot

Aktivatör çözeltileri kullanılmadan 1 gün önce hazırlanmıştır. Sodyum sülfatlı çözeltiler 40 °C'de, diğer çözeltiler 20 °C 24 saat bekletilerek kullanılmıştır. Karışımların hazırlanmasında Hobart mikser kullanılmıştır. Karıştırma kabına alınan YFC'nin üzerine aktivatör çözeltisi ilave edilip 30 saniye yavaş devirde karıştırılmıştır. Daha sonra ASTM C1260 standardında verilen tane boyut dağılımına getirilmiş agrega yavaş devirde çalışmakta olan mikserde 30 sn içinde ilave edilmiş ve hızlı devirde 30 sn karıştırılmıştır. Son olarak, hızlı devirde bir dakika süreyle tekrar karıştırma yapılmıştır. Basınç dayanımı testi için her bir harç karışımından 6 şar adet küp numune, ASR genleşme testi için her karışımından 2'şer adet çubuk numune hazırlanmıştır.

2.2.1. Yayılma Deneyi (TS EN 1015-3)

Hazırlanan karışımların kıvamları TS EN 1015-3 standardına göre yayılma tablası deneyi ile belirlenmiştir. Taze harç, yayılma tablası üzerine yerleştirilen yüksekliği 60 mm, taban çapı 100 mm ve üst çapı 70 mm olan kesik koni şeklindeki kalıba iki tabaka halinde her tabakaya 25 tokmak darbesi uygulanarak yerleştirilmiş, yayılma tablası 3 sn'de 5 kez düşürülmüştür. Yayılma çapı kumpas ile birbirine dik iki yönde ölçülerek ortalama yayılma çapı belirlenmiştir.

2.2.2. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Yöntemi (ASTM C1260)

Numunelerin genleşme miktarlarını belirlemek için ASTM C 1260 "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of

Aggregates (Mortar-Bar Method) hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi bir miktar modifiye edilerek kullanılmıştır. Literatürde bu tür bir modifikasyon Shi ve Arkadaşları tarafından da kullanılmıştır [26]. Bu çalışmada 25x25x285 mm boyutlarında hazırlanan uçları pimli harç çubukları 20°C %95 bağıl nemli ortamda 24 saat bekletildikten sonra 24 saat 80°C buhar kürü uygulanmıştır. Daha sonra 80 °C sıcaklıkta 1 M NaOH çözeltisine 2 saat maruz bırakılarak harç numunesinin ilk boy ölçümü (referans boy değeri), 1 mikrometre hassasiyetli komparatör ile ölçülmüştür. Numunelerin sonraki boy ölçümleri, 1, 3, 5, 7, 10, 14, 21 ve 28 günlerde ve daha sonra ise iki haftada bir ölçülerek toplam 6 ay süreyle boy değişimi Denklem 1'e göre belirlenmiştir. ASTM C1260 standartlarına göre, genleşme değeri %0,20'den fazla ise kullanılan agreganın potansiyel reaktif agrega olduğu, %0,10 ile %0,20 arasında olduğunda hem zararsız hem de zararlı olduğu bilinen agregaları içerdiği ve %0,10'dan daha az genleşmeler olduğunda agreganın reaktif olmadığı sonucu çıkarılmaktadır.

$$\%L = \Delta L / L \times 100 \quad (1)$$

%L= Genleşme değeri

ΔL= Harç çubuğun boy değişimi

L= Harç çubuğun ilk boyu

2.2.3. Basınç Deneyi (TS EN 12390-4)

Her karışımdan altı adet 50 mm ayrıtlı küp numune üretilmiştir. Bunlardan üç tanesi buhar kürü sonrası, diğer üçü ise 80 °C sıcaklıkta 1 M NaOH çözeltisinde 28 gün bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuştur. Basınç deneyleri numune sıcaklığı oda sıcaklığına eriştikten sonra gerçekleştirilmiştir.

2.2.4. SEM ve EDS Analizi

Reaksiyon ürünlerinin mikroyapıları SEM (taramalı elektron mikroskopu) analizleri ile belirlenmiştir. SEM analizleri ASR testine 6 ay süreyle maruz bırakılan harç örnekleri üzerinde yapılmıştır. Analizler, hem kırılmış harç numuneleri üzerinde (SE- secondary electron modunda), hem de hazırlanan parlak kesitlerde (BSE- backscattered electron modunda) yapılmıştır. Oluşan reaksiyon ürünlerinin kimyasal kompozisyonu EDS (Enerji Dispersiv Spektrum) analizleri ile belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yayılma Deneyi Sonuçları

Yayılma deneyi sonucunda elde edilen yayılma çapları Tablo 2' de verilmiştir. Hazırlanan harçların yayılma çapları 135±20 mm olduğu görülmüştür. En az yayılma kontrol harcına (CEM-I) yakın yayılma gösteren NC6-CH2 harcında gerçekleşmiş olup en fazla yayılma ise SS-6 harcında gerçekleşmiştir. Bezer şekilde Rajesh ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sodyum silikatla aktive edilmiş harçların işlenebilirliğinin diğer aktivatörler ve Portland çimentosu harcına göre daha yüksek olduğunu rapor etmiştir [17]. NC6-CH2 ve NC6-CH1 karışımlarının sonuçlarına göre kalsiyum hidroksit oranı arttıkça işlenebilirlik azalmıştır. NC4-NH2 ve NC5-NH1 karışımlarının sonuçlarına göre NC oranının artıp NH oranının azalmasıyla işlenebilirlik artmıştır.

3.2. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Testi Sonuçları

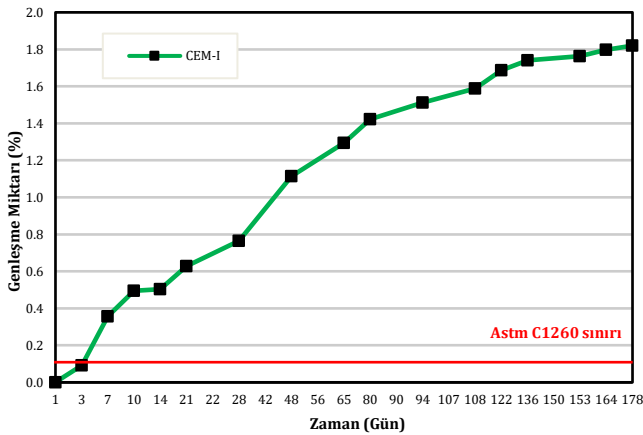
CEM-I numunesi 3. günde ASTM C1260 standardı sınır genleşme değeri olan %0,1 değerine, 14. günde ise %0,5 değerine ulaşmıştır (Şekil 1). Bu durum agreganın reaktif olduğunu gösterir. Yaklaşık 180 gün sonunda genleşme miktarı ASTM C1260 standardı limit genleşme değerinin yaklaşık 18 katı olmuştur.

Tablo 2. Harç Karışımlarının Yayılma Çapları (mm).**Table 2.** Spreading Diameters (mm) of Mortar Mixtures.

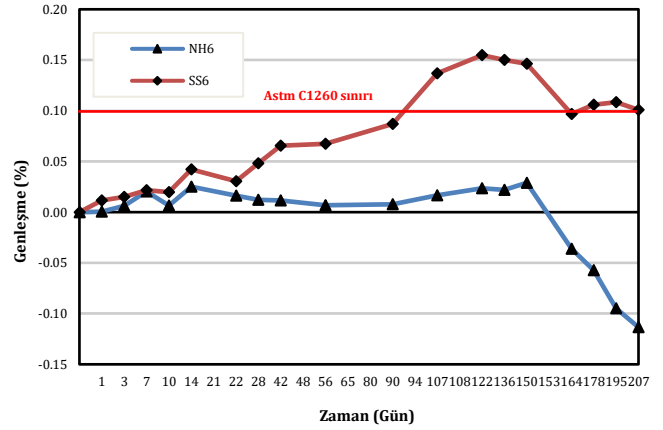
Karışım	Yayılma Çapı (mm)
CEM-I	118
NH6	132
SS6	155
NC4-NH2	126
NC5-NH1	142
NC6-CH1	143
NC6-CH2	114
NS5-NH1	125
NS6-CH1	116

3.3. Hızlandırılmış Harç Çubuğu Testi Sonuçları

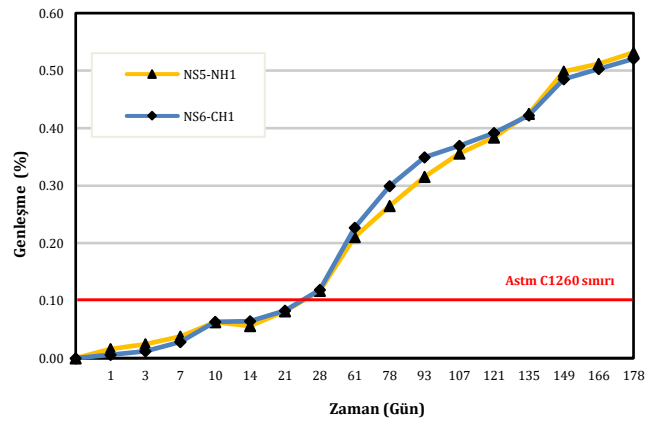
CEM-I numunesi 3. günde ASTM C1260 standardı sınır genleşme değeri olan %0,1 değerine, 14. günde ise %0,5 değerine ulaşmıştır (Şekil 1). Bu durum agreganın reaktif olduğunu gösterir. Yaklaşık 180 gün sonunda genleşme miktarı ASTM C1260 standardı limit genleşme değerinin yaklaşık 18 katı olmuştur.

**Şekil 1.** CEM-I Numunesinin ASR Genleşmeleri.**Figure 1.** ASR Expansion of CEM-I Specimen.

Şekil 2’de NH6 ve SS6 aktivatörleri ile üretilen AAS numunelerinin ASR genleşme miktarları verilmiştir. NH aktivatörüyle hazırlanan numuneler ASTM C1260 standardı limit genleşme değerinin altında kalmıştır. Ayrıca 150. günden sonra büzülme başlamıştır. Ancak SS aktivatörüyle hazırlanan karışımlar 90. günden sonra ASTM C1260 standardı limit genleşme değerini aşarak, alkali silika reaksiyonu riski taşıdığını göstermektedir. Shi ve arkadaşları da NaOH ile aktive edilen cüruf harçlarının sodyum silikat ile aktive edilenlere kıyasla daha düşük oranda genleştiğini bildirmiştir [8]. Bu durum, SS6 numunesinin zamanla genleşmeye devam edeceğini ve uzun vadede dayanıklılığı olumsuz yönde etkileyeceğini göstermektedir. SS-6 numunesi de 153. günden sonra bir miktar büzülme davranışı göstermiştir. Bakharev ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da sodyum silikat esaslı AAS karışımlarının benzer bir genleşme eğilimine sahip olduğu rapor edilmiştir [25].

**Şekil 2.** NH6 ve SS6 Aktivatörleri Kullanılarak Hazırlanan Harçların ASR Genleşmeleri.**Figure 2.** ASR Expansion of the Sample Prepared with NH6 and SS6 Activators.

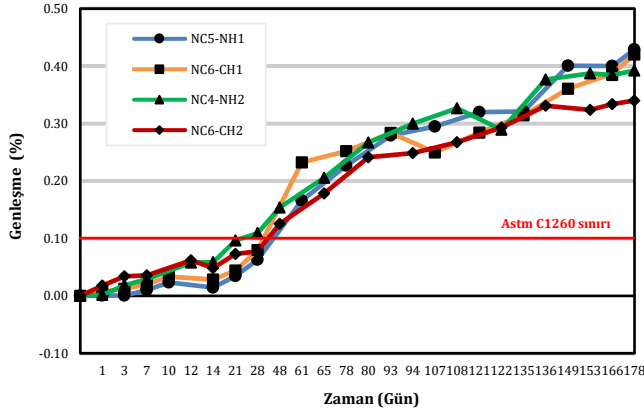
Şekil 3’te sodyum sülfat ile aktive edilen AAS numunelerinin ASR genleşme miktarları verilmiştir. NS5-NH1 ve NS6-CH1 numunelerinin genleşme miktarları birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. NS5-NH1 ve NS6-CH1 numunelerinin ASTM C1260 standardı 14. gün genleşme limitini (%0,1) ilk 14 günde aşmamıştır. Ancak 28. günde bu limit aşılmıştır. 6 ay sonunda ise NS5-NH1 ve NS6-CH1 numunelerinin genleşme miktarı ASTM C1260 sınırının yaklaşık 5 katına ulaşmıştır.

**Şekil 3.** NS5-NH1 ve NS6-CH1 Numunelerinin ASR Genleşmeleri**Figure 3.** ASR Expansion of NS5-NH1 and NS6-CH1 Samples

Sodyum karbonatın farklı oranlarda sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit ile karıştırılması ile oluşturulan aktivatörlerle hazırlanan AAS numunelerinin genleşme miktarları Şekil 4’te görülmektedir. Tüm karışımlar için genleşme miktarları 6 aylık ölçüm periyodunda benzer bir eğilim göstermiştir. Hiçbir karışım 14. günde ASTM C1260 standardında verilen 14. gündeki genleşme limitine ulaşmamıştır. Daha sonra geç genleşme göstermiş ve bu limiti önemli oranda aşmıştır.

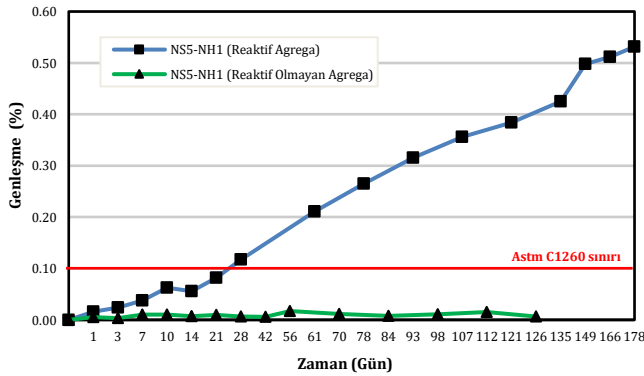
AAS harçlarında meydana gelen genleşmelerin, test koşullarından (80 °C 1 M NaOH çözeltisine maruziyet) veya reaktif agrega kullanımından kaynaklı olup olmadığını belirleyebilmek için agrega olarak reaktif olmayan kireçtaşı agregası da kullanılarak ASTM C1260 standardına göre boy değişimleri belirlenmiştir. Reaktif olmayan agrega kullanılarak hazırlanan NS5-NH1 karışımlarının genleşme miktarları, reaktif agrega kullanılan NS5-NH1 ile birlikte Şekil 5’te verilmiştir. Daha önce de söz edildiği gibi, reaktif agrega kullanılması durumunda

28. günde ASTM C1260 standardında verilen limit genleşme değeri (%0,1) aşılmıştır. Ancak reaktif olmayan agregat ile hazırlanan AAS karışımında önemsiz miktarda genleşme meydana gelmiştir. Bu durum, oluşan genleşmenin sıcaklıkla veya NaOH çözeltisi etkisiyle matris yapısında meydana gelebilecek olası değişikliklerle ilgisinin olmadığını, ASR genleşmelerinin agreganın reaktif olmasından kaynaklı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Sodyum Karbonat Esaslı Aktivatörle Aktive Edilen Numunelerinin ASR Genleşmeleri.

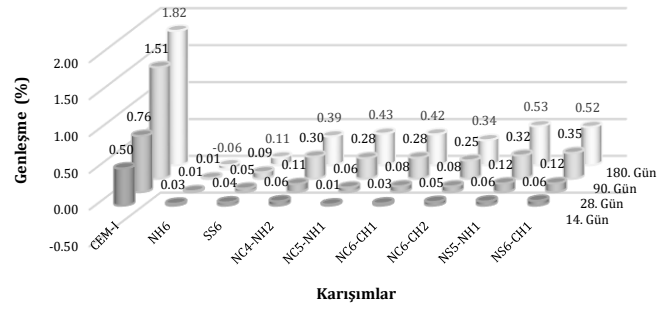
Figure 4. ASR Expansion (%) of Samples Activated With Sodium Carbonate Based Activator.



Şekil 5. 80 °C 1 M NaOH Çözeltisinde Bekletilen NS5-NH1 (Reaktif Agregat) ve NS5-NH1 (Reaktif Olmayan Agregat) Numunelerinin ASR Genleşme Miktarları.

Figure 5. ASR Expansions of NS5-NH1 (Reactive Aggregate) and NS5-NH1 (Non-Reactive Aggregate) Specimens Stored in 80 °C 1 M NaOH Solution.

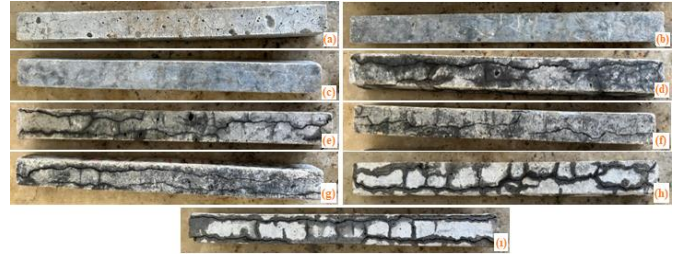
Şekil 6'da 80 °C sıcaklıkta 1 M NaOH çözeltisinde bekletilen karışımların 14, 28, 90 ve 180. gündeki genleşme miktarları görülmektedir. 90. gündeki genleşmeler kıyaslandığında NH6 ve SS6 karışımlarının genleşmesi ASTM C1260 standardında verilen sınırın (%0,1) altında kalmıştır. Diğer karışımların genleşmesi bu standartta verilen limitin oldukça üzerindedir. En fazla genleşme ise Portland çimentosu harcında ortaya çıkmıştır. Bir başka ifade ile, alkalilerle aktive edilmiş cüruf harçlarının ASR genleşmelerinin Portland çimentosundan daha düşük olduğu söylenebilir.



Şekil 6. 14, 28, 90 ve 180 Gün Süreyle ASR Testine Maruz Bırakılan Harçların Genleşme Miktarları.

Figure 6. ASR Expansion Samples at 14, 28, 90 and 180 Days.

Şekil 7 'de karışımların 6 ay sonraki görüntüleri görülmektedir. Karışımlardan NH6 karışımında çatlak görülmezken diğer karışımlarda çatlaklar görülmüştür. Numuneler incelendiğinde en fazla çatlak oluşumunun sodyum karbonat ve sodyum sülfatlı aktivatörlü karışımlarda ortaya çıktığı görülmüştür.

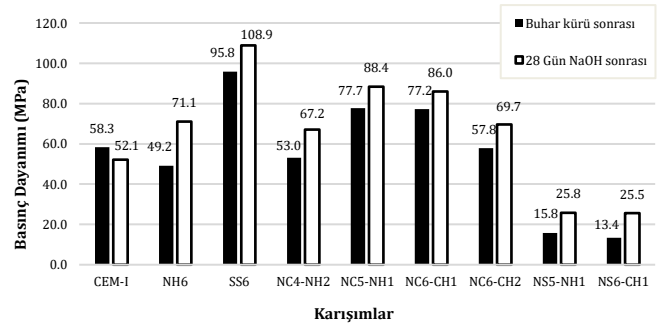


Şekil 7. ASR testine maruz bırakılan örneklerin 6 ay sonraki görüntüsü (a) CEM-I, (b) NH6, (c) SS6, (d) NC5-CH1, (e) NC4-NH2, (f) NC6-CH2, (g) NC5-NH1, (h) NS5-NH1, (i) NS6-CH1.

Figure 7. Photos of the Samples Exposed to ASR Test for 6 Months (a) CEM-I, (b) NH6, (c) SS6, (d) NC5-CH1, (e) NC4-NH2, (f) NC6-CH2, (g) NC5-NH1, (h) NS5-NH1, (i) NS6-CH1.

3.4. Basınç Dayanımı Sonuçları

Karışımların 80 °C buhar küründen çıktıktan sonra ve 80 °C 1 M NaOH çözeltisinde 28 gün bekletildikten sonraki ortalama basınç dayanımı değerleri Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Buhar Kürü Sonrası ve 28 Gün NaOH Çözeltisine Maruz Kaldıktan Sonra Örneklerin Basınç Dayanımları.

Figure 8. Compressive Strength of Mixtures Exposed to Steam Curing and NaOH solution for 28 Days.

Şekil 8'den görüldüğü gibi, hazırlanan karışımlar arasında buhar kürü sonrası en yüksek basınç dayanımı (96 MPa) sodyum silikat ile aktive edilen YFC karışımından elde edilmiştir. Sodyum silikat aktivatörünü yaklaşık 77 MPa dayanıma sahip olan NC5-NH1 ve NC6-NH1 aktivatörlü AAS karışımları takip etmiştir. CEM-I

çimentosu ve NH6, NC4-NH2 ve NC6-CH2 aktivatörlü AAS karışımları ise 50-58 MPa dayanıma sahiptir. NS aktivatörlü karışımlar ise 13-16 MPa basınç dayanımına sahiptir. Puertas ve arkadaşlarının çalışmasında sodyum silikatla aktive edilmiş cürüflü harçların diğer harçlara göre daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu not edilmiştir [26].

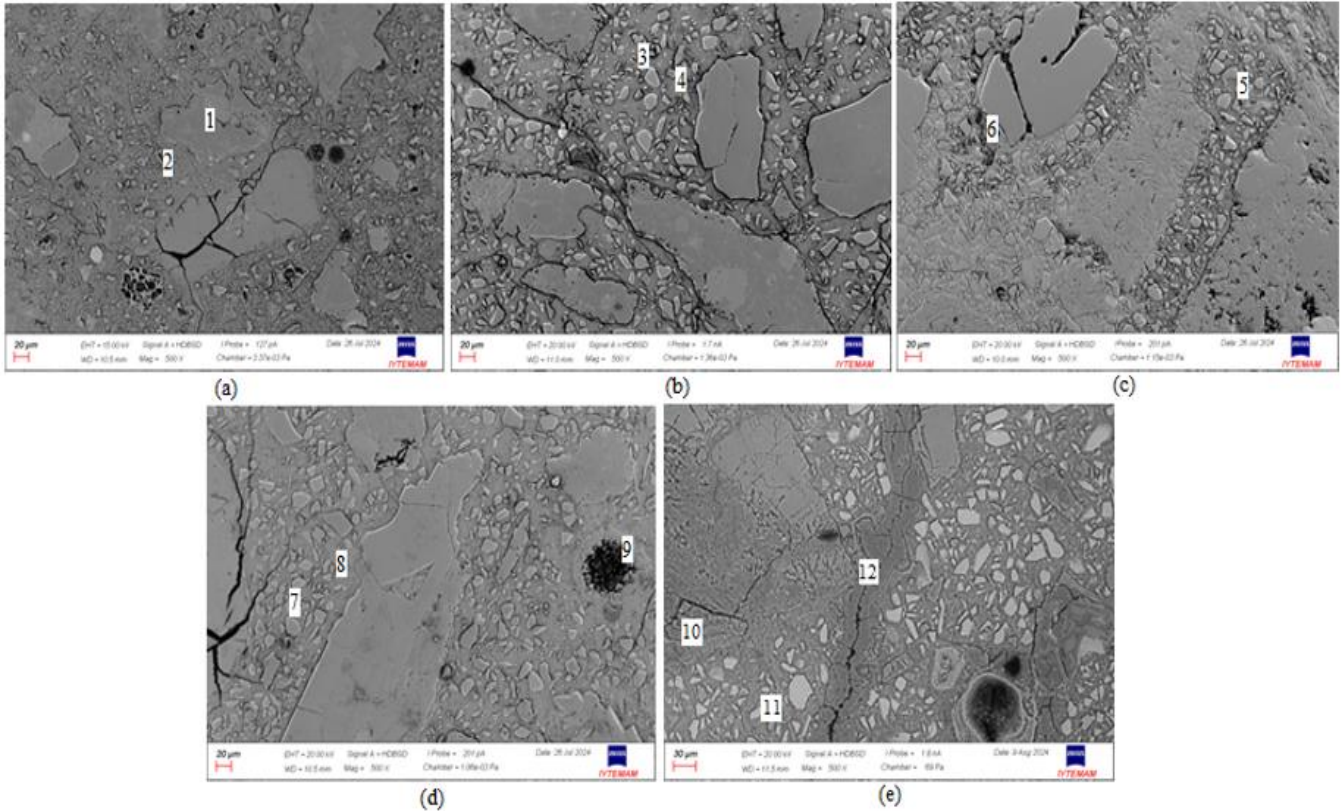
Ayrıca 28 gün süreyle 1 M NaOH çözeltisine maruziyet sonrası sadece CEM-I çimentosu harcının dayanımında azalma (%11) olmuştur. NH6 numunesinin basınç dayanımında %45, SS6 ve NC5-NH1 numunelerinde %14, NS5-NH1 numunesinde %63, NS6-CH1 numunesinde %91, NC6-CH1 numunesinde %11, NC6-CH2 numunesinde %20 ve NC4-NH2 numunesinde %27 oranında artış olmuştur. Dayanımda meydana gelen artış, esasen NaOH çözeltisi içerisinde bekletilen AAS örneklerinde ASR sonucu hasar oluşmadığını göstermektedir. AAS numunelerinde ASR genleşmelerinin ilk 28 gün boyunca ASTM C1260 limitine ulaşmamış olması da bu bulguyu desteklemektedir. Henüz 3. günde genleşme limitine ulaşan CEM I çimentosu harçlarında meydana gelen dayanım kaybı da genleşme ölçümlerini doğrulamaktadır.

3.5. SEM ve EDS Analiz Sonuçları

CEM-I karışımının SEM (BSE) analizi görüntüsü Şekil 9.(a)' da görülmektedir. CEM-I karışımında alkali silika reaksiyonu neticesinde agregalarda önemli miktarda çatlak oluştuğu görülmektedir. Şekil 9.(b)'de sodyum silikat esaslı aktivatörle aktive edilen SS6 karışımının matrisinde oluşan çatlaklar

görülmektedir. Yüksek fırın cürufunun sodyum silikat esaslı aktivatör ile aktive edilmesi halinde otojen büzülme sebebiyle matriste önemli miktarda çatlak oluşumlarının meydana geldiği birçok çalışmada rapor edilmiştir [24,28,29]. Gerek agrega matris arayüzeyi gerekse matris fazında ASR ürünlerinin gözlemlenememiş olması bu çatlakların ASR kaynaklı olmadığını düşündürmüştür. Bu karışımdan hazırlanan harç çubuklarının ASR genleşmelerinin diğer karışımlara kıyasla daha düşük olması da bu sonucu doğrular niteliktedir. Sodyum hidroksit ile aktive edilen NH6 karışımında bazı agregalarda çatlama ve agrega ile matris arasındaki ara bölgede ASR ürünlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 9.(c)). Navarro ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da sodyum silikat ile aktive edilen harçlarda büzülmelerden kaynaklı çatlakların olduğu ve sodyum hidroksit ile aktive edilen harçların matrislerinde çatlaklar oluştuğu bildirilmiştir [30].

Şekil 9.(d)'de 6NC-1CH numunesinin ASR sonucu agrega, matris ve matris-agrega ara yüzeyinde çatlakların oluştuğu, agrega-matris arayüzeyinde ve boşluklarda reaksiyon ürünlerinin oluştuğu görülmektedir. 6NS-1CH karışımında agregaların belirgin şekilde çoğunluğunun çatladığı ve ayrıştığı, matris fazında da ciddi çatlamaların meydana geldiği ve çatlak boyunca ASR ürünlerinin çökeldiği Şekil 9.(e)'de görülmüştür. Şekil 9' da belirtilen bölgelerin EDS analiz sonuçları Tablo 3' te verilmiştir. Karışımların EDS analizleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 9. 6 Ay Süreyle ASR Testine Maruz Kalan Örneklerin SEM (BSE) Görüntüsü (500x) (a) CEM-I, (b) SS6, (c) NH6, (d) NC6-CH1, (e) NS6-CH1.

Figure 9. SEM (BSE) Image of Specimens Exposed to ASR test for Six Months (a) CEM-I, (b) SS6, (c) NH6, (d) NC6-CH1, (e) NS6-CH1.

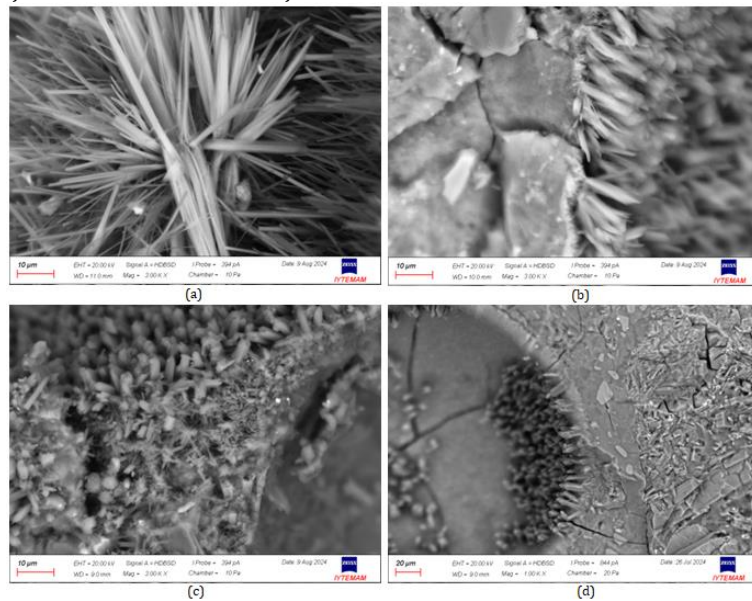
Tablo 3. EDS analizi sonuçları (%).**Table 3.** Results of EDS analysis (%).

Bileşen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
O K	56.93	57.31	57.28	58.25	57.26	59.28	58,74	58,59	58	57,38	58,93	57,89
NaK	4.58	5.78	4.21	3.59	3.66	3.87	3,67	3,72	5,65	6,33	6,01	7,1
MgK	0.26	1.06	1.73	1.27	2.09	0.53	1,16	1,3	1,12	1,51	1,22	0,6
AlK	8.52	4.51	5.75	5.79	6.6	3.43	5,86	6,87	5,67	5,63	5,55	7,63
SiK	19.87	16.34	19	20.07	18.2	24.38	17,81	18,17	19,22	18,08	16,68	19
S K	0.17	0.58	0.54	0.16	0.6	0.21	0,16	0,16	0,53	0,56	0,19	0,21
K K	0.57	0.64	0.73	0.72	0.56	0.51	0,42	0,36	1,05	0,4	0,17	0,59
CaK	8.24	12.48	10.04	9.23	10	7.55	10,98	9,81	8,51	9,27	10,44	6,7
TiK	0.04	0.21	0.12	0.12	0.13	0.08	0,15	0,17	0,09	0,12	0,14	0,12
FeK	0.82	1.09	0.59	0.8	0.91	0.15	1,05	0,86	0,17	0,72	0,68	0,16
Ca/Si	0.41	0.76	0.53	0.46	0.55	0.31	0.62	0.54	0.44	0.51	0.63	0.35
Na+K	5.15	6.42	4.94	4.31	4.22	4.38	4.09	4.08	6.70	6.73	6.18	7.69
(Na+K)/Si	0.26	0.39	0.26	0.21	0.23	0.18	0.23	0.22	0.35	0.37	0.37	0.40

CEM-I numunesinde agreganın merkezinden arayüzey bölgesine yaklaştıkça Ca/Si oranı artmış ve Si miktarı azalmıştır. Bu durum agreganın hamur fazına yakın kısımlarında silisyumun çözüldüğünü göstermektedir. Arayüzey bölgesindeki ASR ürününün Ca/Si oranının 0,76 iken, agrega merkezindeki ASR ürünleri için ise bu oran 0,41'dir. SS6 numunesi için ara yüzey bölgesindeki Ca/Si oranı matrise kıyasla biraz daha düşüktür. NH6 karışımının matrisi için Ca/Si oranı 0,55 iken, ara yüzey bölgesinde ve agrega çatlağındaki reaksiyon ürünleri için bu oran yaklaşık 0,31'dir. NC6-CH1 numunesi için EDS analizleri matris için Ca/Si oranının 0,62 olduğu, boşluk içindeki reaksiyon ürünleri için 0,44 ve ara yüzey bölgesindeki reaksiyon ürünleri için ise 0,54 olduğu görülmüştür. NS6-CH1 numunesi için EDS

analizleri, matris için Ca/Si oranının 0,63, ara yüzey bölgesindeki reaksiyon ürünleri için 0,51 ve matriste çatlak boyunca uzanan reaksiyon ürünü için ise 0,35 olduğunu göstermiştir. Ca/Si oranının azalması ve silis miktarının artması ASR ürünlerinin oluşumuna işaret etmektedir. NH6 numunesinin SEM (SE) görüntüsü Şekil 10'da verilmiştir.

NH6 ve NC5-NH1 numunelerinde iğnemsî, NS5-NH1 ve NC6-CH1 numunelerinde çubuk morfolojinde ASR ürünlerinin olduğu görülmüştür. Gong ve Yang [31] tarafından yapılan çalışmada da benzer reaksiyon ürünleri rapor edilmiş olup, AAS harçlarında rozet tipi morfolojiye sahip ASR ürünleri olduğu da bazı araştırmacılar tarafından bildirilmiştir [24,32].

**Şekil 10.** ASR Deneyine Maruz Kalmış Örneklerin SEM (SE) Görüntüleri (a) NH6, (b) NC5-NH1, (c) NS5-NH1 (d) NC6-CH1.**Figure 10.** SEM (SE) Images of samples Exposed to ASR test (a) NH6, (b) NC5-NH1, (c) NS5-NH1 (d) NC6-CH1 Samples.

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, yüksek fırın cürufunun çeşitli aktivatörler ile aktive edilmesiyle üretilen bağlayıcı madde ve reaktif agregata kullanılarak üretilen harç karışımlarının ASTM C1260 harç çubuğu yöntemiyle ASR genleşmeleri belirlenerek, aktivatör tipinin ASR üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Portland çimentosu ile kıyaslandığında alkalilerle aktive edilmiş cüruf harçlarının ASR genleşmelerinin daha düşük olduğu görülmüştür.
2. Portland çimentosu harçları 3. günde ASTM C1260 standardında verilen 14 günlük zararlı genleşme limitini aşmıştır.
3. Alkalilerle aktive edilmiş cüruf harçlarının hiçbirisi ASTM C 1260 standardında verilen 14 günlük zararlı genleşme limitini (%0.1) aşmamıştır. Ancak 3 ayın sonundaki ölçümlerde sodyum karbonatlı ve sodyum sülfatlı karışımlar ASTM C 1260 standardında verilen 14 günlük zararlı genleşme limitinin yaklaşık 3 katına ulaşmıştır. Bu durum alkalilerle aktive edilmiş harçlar için ASTM C1260 standardında verilen 14 günlük sürenin kısa olduğunu göstermektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar ASR için en az 3 ay süreyle deneye tabi tutulmalıdır.
4. Sodyum silikat aktivatörü kullanılarak hazırlanan numunelerinin genleşme değerleri 90. günde ASTM C1260 standardında verilen 14 günlük zararlı genleşme limitini aşmıştır.
5. Sodyum hidroksit aktivatörü ile hazırlanan numunelerin genleşme miktarları %0,1'in altında kalmıştır. ASR bakımından en uygun aktivatörün sodyum hidroksit olduğu görülmüştür.
6. Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılarda en fazla ASR genleşmesi, az miktarda sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit içeren sodyum sülfat ile aktive edilen hibrit aktivatörlü sistemlerde daha sonra sodyum karbonatla aktive edilen hibrit aktivatörlü sistemde görülmüştür. İkincil aktivatörün sodyum hidroksit veya kalsiyum hidroksit olması ASR genleşme değerlerini etkilememiştir.
7. 28 gün 80°C NaOH çözeltisinde bekletilen AAS karışımlarının basınç dayanımları, buhar kürü sonrası ölçülen basınç dayanımlarına göre artış gözlenirken; CEM-I karışımında azalma gözlenmiştir.
8. Elde edilen SEM görüntülerine göre ASR sonucu agregata, matris ve matris-agrega ara yüzeyinde çatlakların oluştuğu, agregata-matris arayüzeyinde ve boşluklarda reaksiyon iğnemesi morfolojiye sahip ASR ürünlerinin oluştuğu görülmüştür.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, yüksek fırın cürufunun temininde sağladığı destek için Fatih ÖZER'e ve agregata temini için Dere Beton'dan Raif EVLEK'e teşekkürlerini sunar. Bu çalışma, yazarlardan Nilgün ÇİRKİN'in "Alkalilerle Aktive Edilmiş Bağlayıcılarda Alkali Silika Reaksiyonunun Araştırılması" başlıklı yüksek lisans tezinin bir parçasıdır ve son olarak Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne teşekkür edilmektedir.

Yazar katkılarının beyanı

Nilgün ÇİRKİN: Literatür araştırması, deneylerin yapılması deney verilerinin değerlendirilmesi, makalenin yazılması, Serdar AYDIN: Deney verilerinin değerlendirilmesi, makalenin kontrolünün yapılması

Kaynaklar

- [1] PwC Türkiye, 2024. Dünyada ve Türkiye'de Çimento Sektörü. <https://www.pwc.com.tr/dunyada-ve-turkiyede-cimento-sektoru> [Erişim Tarihi: 09.10.2024].
- [2] Davidovits, J. 1991. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Cilt. 37, s. 1633-1656. DOI: 10.1007/BF01912193
- [3] Amer, L., Kohail, M., El-Feky, M.S., Rashad, A., Khalaf, M.A. 2021. A review on alkali-activated slag concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, Cilt. 12, Sayı. 2, s. 1475-1499. DOI: 10.1016/j.asej.2020.12.003
- [4] Giergiczny, Z. 2019. Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, Cilt. 124, s. 105826. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105826
- [5] Shi, C., Shi, Z., Hu, X., Zhao, R., Chong, L. 2015. A review on alkali-aggregate reactions in alkali-activated mortars/concretes made with alkali-reactive aggregates. *Materials and Structures*, Cilt. 48, s. 621-628. DOI: 10.1617/s11527-014-0505-2
- [6] You-zhi, C., Xin-cheng, P., Chang-hui, Y., Qing-jun, D. 2002. Alkali aggregate reaction in alkali slag cement mortars. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, Cilt. 17, Sayı. 3, s. 60-62. DOI: 10.1007/BF02838542
- [7] ASTM C1260. 2007. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). Section 4, s. 676-680.
- [8] Shi, Z., Shi, C., Wan, S., Ou, Z. 2017. Effect of alkali dosage on alkali-silica reaction in sodium hydroxide activated slag mortars. *Construction and Building Materials*, Cilt. 143, s. 16-23. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.125
- [9] Davidovits, J. 1994. Properties of geopolymer cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Cilt. 1, s. 131-149. Kiev, Kiev State Technical University, Scientific Research Institute on Binders and Materials.
- [10] Mohamed, O.A. 2019. A review of durability and strength characteristics of alkali-activated slag concrete. *Materials*, Cilt. 12, Sayı. 8, s. 1198. DOI: 10.3390/ma12081198
- [11] Wang, S.D., Pu, X.C., Scrivener, K.L., Pratt, P.L. 1995. Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. *Advances in Cement Research*, Cilt. 7, Sayı. 27, s. 93-102. DOI: 10.1680/adcr.1995.7.27.93
- [12] Gök, S.G., Kılınc, K. 2017. Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Alkali Activated Concrete. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt. 3, Sayı. 2, s. 123-131.
- [13] Atiş, C.D., Bilim, C., Çelik, Ö., Karahan, O. 2009. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and Building Materials*, Cilt. 23, Sayı. 1, s. 548-555. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.011
- [14] Lei, J., Law, W.W., Yang, E.H. 2021. Effect of calcium hydroxide on the alkali-silica reaction of alkali-activated slag mortars activated by sodium hydroxide. *Construction and Building Materials*, Cilt. 272, s. 121868. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121868
- [15] Fernández-Jiménez, A., Palomo, J.G., Puertas, F. 1999. Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*, Cilt. 29, Sayı. 8, s. 1313-1321. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00154-4
- [16] Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.B. 1999. Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, Cilt. 29, Sayı. 1, s. 113-120. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00170-7
- [17] Rajesh, D.V.S.P., Reddy, A.N., Tilak, V., Raghavendra, M. 2013. Performance of alkali activated slag with various alkali activators. *International Journal of Innovative Research in Engineering and Technology*, Cilt. 2, s. 378-386.
- [18] Wang, S.D., Scrivener, K.L., Pratt, P.L. 1994. Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research*, Cilt. 24, Sayı. 6, s. 1033-1043. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90026-4
- [19] Živica, V. 2007. Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures. *Construction and Building Materials*, Cilt. 21, Sayı. 7, s. 1463-1469. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.07.002
- [20] Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.B. 1999. Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, Cilt. 29, Sayı. 10, s. 1619-1625. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00143-X

- [21] Shi, Z., Shi, C., Wan, S., Zhang, Z. 2018. Effects of alkali dosage and silicate modulus on alkali-silica reaction in alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research*, Cilt. 111, s. 104-115. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.06.005
- [22] Singh, J., Singh, S.P. 2020. Evaluating the alkali-silica reaction in alkali-activated copper slag mortars. *Construction and Building Materials*, Cilt. 253, s. 119189. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119189
- [23] Puertas, F., Palacios, M., Gil-Maroto, A., Vázquez, T. 2009. Alkali-aggregate behaviour of alkali-activated slag mortars: Effect of aggregate type. *Cement and Concrete Composites*, Cilt. 31, Sayı. 5, s. 277-284. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.02.008
- [24] Fernández-Jiménez, A., Puertas, F. 2002. The alkali-silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, Cilt. 32, Sayı. 7, s. 1019-1024. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00745-1
- [25] Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.B. 2001. Resistance of alkali-activated slag concrete to alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, Cilt. 31, Sayı. 2, s. 331-334. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00483-X
- [26] Shi, Z., Shi, C., Zhang, J., Wan, S., Zhang, Z., Ou, Z. 2018. Alkali-silica reaction in waterglass-activated slag mortars incorporating fly ash and metakaolin. *Cement and Concrete Research*, Cilt. 108, s. 10-19. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.002
- [27] Puertas, F., González-Fonteboa, B., González-Taboada, I., Alonso, M.D.M., Torres-Carrasco, M., Rojo, G., Martínez-Abella, F. 2018. Alkali-activated slag concrete: Fresh and hardened behaviour. *Cement and Concrete Composites*, Cilt. 85, s. 22-31. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.10.003
- [28] Aydın, S. 2010. Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 281s., İzmir.
- [29] Gifford, P.M., Gillott, J.E. 1996. Alkali-silica reaction (ASR) and alkali-carbonate reaction (ACR) in activated blast furnace slag cement (ABFSC) concrete. *Cement and Concrete Research*, Cilt. 26, Sayı. 1, s. 21-26. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00182-4
- [30] Navarro Martínez, R.M., Zornoza, E., Sánchez, I., García Alcocel, E.M. 2022. Influence of the type and concentration of the activator on the microstructure of alkali activated SiMn slag pastes. *Construction and Building Materials*, Cilt. 321, s. 128067. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128067
- [31] Gong, C., Yang, N. 2000. Effect of phosphate on the hydration of alkali-activated red mud-slag cementitious material. *Cement and Concrete Research*, Cilt. 30, Sayı. 7, s. 1013-1016. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00260-X
- [32] Shi, Z., Shi, C., Zhao, R., Wan, S. 2015. Comparison of alkali-silica reactions in alkali-activated slag and Portland cement mortars. *Materials and Structures*, Cilt. 48, s. 743-751. DOI: 10.1617/s11527-015-0535-4