



## Betonda ince uçucu kül kullanımı ile ASR genişmesinin azaltılması

*Decreasing ASR expansion by using fine fly ash in concrete*.Hasan EKER<sup>1\*</sup>, Demet DEMİR ŞAHİN<sup>2</sup>, Mustafa ÇULLU<sup>3</sup><sup>1</sup> Karabük Üniversitesi, Eskipazar MYO Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, [eker\\_hasan78@hotmail.com](mailto:eker_hasan78@hotmail.com)ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2644-4681><sup>2</sup> Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane MYO Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, [demetdemir2929@hotmail.com](mailto:demetdemir2929@hotmail.com)ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0338-6562><sup>3</sup> Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [mcullu@gumushane.edu.tr](mailto:mcullu@gumushane.edu.tr)ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0454-7949>

## MAKALE BİLGİLERİ

## Makale Geçmişi:

Geliş 5 Ağustos 2022  
Revizyon 22 Mart 2023  
Kabul 24 Mart 2023  
Online 20 Haziran 2023

## Anahtar Kelimeler:

Alkali silika reaksiyonu (ASR),  
incelik, uçucu kül, C tipi, beton.

## ÖZ

Bu çalışmada; Kahramanmaraş'ta yer alan bir termik santralden temin edilen C tipi UK, farklı sürelerde öğütülerek farklı oranlarda çimento ile ikame edilmiş ve Alkali silika reaksiyonu (ASR) üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk önce uçucu kül içermeyen referans numune karışımları ASTM C 1260 standardına göre hazırlanmıştır. Daha sonra UK'nin, 0, 10 ve 20 dk öğütme süreleri sonrasında inceltilen malzemenin her birini betonda çimento yerine % 10 ve % 30 ikame edilerek harç numuneleri hazırlanmıştır. Elde edilen numunelerin 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresi sonrasında ASR genişleme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; UK'nin eklendiği numunelerin referans numunesine göre ASR boy değişim oranları azalmıştır. Ayrıca öğütme süresinin ve ikame oranının artmasıyla birlikte ASR boy değişim değerlerinde düşüş meydana geldiği görülmüştür. Genel olarak 0, 10 ve 20 dk öğütme sonrası elde edilen farklı blaine incelik değerine sahip UK'ün % 10 ve % 30 ikame oranlarında çimento yerine kullanılarak hazırlanan harç örneklerinin 3,7 ve 14 günlük kür süreleri sonrasında ASR boy değişim değerlerinde artış gözlemlenmiştir. 28 günlük kür süresi sonrasında ise artış gözlemlenmiş ancak bu diğer kür süreleri sonrasında elde edilen değerlere kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Böylece; UK'ün öğütmeye bağlı olarak inceliğinin ve ikame oranının artmasıyla birlikte betonun bünyesindeki boşlukları doldurması sonucunda geçirimsiz bir beton oluşmuş ve betonda oluşan ASR etkisini azaltmıştır. Ayrıca öğütülmüş uçucu küller harç örneklerinin geçirimsizlik özelliğinin artmasıyla birlikte toz bağlayıcılığındaki alkali (Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O) miktarını azaltması ve Ca(OH)<sub>2</sub>'yi C-S-H jellerine dönüştürmesini sağlayarak ASR oluşumunu engellemiştir.

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 5 August 2022  
Received in revised form 22 March  
2023  
Accepted 24 March 2023  
Available online 20 June 2023

## Keywords:

Alkali silica reaction (ASR),  
fineness, fly ash, C type, concrete.

## ABSTRACT

In this study, the effect of the C-type fly ash from a power plant in Kahamanmaraş on the Alkali silica reaction (ASR) was examined as a result of the addition of different grinding times and different substitution rates to concrete. First, reference sample mixtures without fly ash are prepared according to ASTM C 1260 standard. After the FA grinding times of 0, 10 and 20 minutes, mortar samples were prepared, replacing each thinned material with cement in concrete with 10% and 30%. ASR expansion measurements were performed after the 3, 7, 14 and 28 day curing period of the samples obtained. According to the results obtained, the ASR height variation rates have decreased according to the reference sample of the samples where the FA is added. It has also been seen that the reduction in ASR height variation values has occurred as the grinding time and the substitution rate have increased. In general, an increase in the ASR height change values was observed after the 3, 7 and 14 days of exchange of mortar samples prepared using cement at the FA's 10% and 30% substitution rates with a different blaine thinness value obtained after 0, 10 and 20 min grinding. After the 28-day curing period, the increase was observed, but it was determined that it was lower than the values obtained after these other courtship periods. Thus, as the FA increased its fineness and substitution rate due to grinding, it formed a non-permeable concrete and reduced the ASR effect of concrete as a result of filling the gaps in the concrete. In addition, grinded fly ash has prevented the formation of ASR by allowing mortar samples to be impasted, as well as reducing the amount of alkali (Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O) in the dust connector and converting CA(OH)<sub>2</sub> into C-S-H gels.

Doi: 0.24012/dumf.1158420

\* Corresponding Author

## Giriş

Betonun durabilitesini etkileyen en önemli kimyasal reaksiyonlardan biri Alkali Silika Reaksiyonu (ASR)'dur. Betonda patoloji olarak bilinen en yaygın ve genel kimyasal bozulma olayının Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) olduğu söylenebilir. Bu reaksiyon portland çimento içerikli beton ve harçlar arasında oluşmaktadır. Bilindik bu reaksiyon reaktif ince/kaba agregalardaki silisli fazlar ve çimento hamurunun gözenek çözeltisindeki hidroksil iyonları arasında oluşmaktadır. Bu reaksiyon oluşumu, gelişimi ve sürdürülmesi, yeterli nem (beton içinde % 80 veya daha fazla bağıl nem), yüksek alkalinite ve reaktif silisli fazlar gibi üç temel koşulun bir arada olmasından meydana gelmektedir [1]. Bu koşulların bir arada olması sonucu jel (silisli-kalsitli-alkali) meydana gelmektedir. Bu jel beton içerisinde bulunan suyu emmesi sonucu iç basınç oluşturmaya bu da betonda genişlemeye ve çatlak oluşturmaya neden olmaktadır [2]. Kalsiyum ASR oluşumunda aktif role sahip olup reaksiyona kısmen katıldığı zaman çimento pastası içerisinde genişleyen jelin oluşmasına sonucu boşluk çözeltisinde alkalilerin miktarının artmasına sebep olmaktadır [3], [4]. ASR, yüksek su emme özelliğine sahip alkali-silika jel oluşturarak başlar. Çimentodaki alkali oksitler ( $\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$ ) ile beton içerisinde agregadaki reaktif silika ( $\text{SiO}_2$ ) kimyasal reaksiyona girerek ASR reaksiyonunu oluşturmaktadır [5]. ASR oluşumunda reaktif agregalar; amorf silika (silikat camları ve opal), kararsız kristal silika polimorfları (kristobalit ve tridimit), kötü şekillendirilmiş kristal silika, kafes yapısında kusurlu kuvars ve mikro kristal kuvars içeren kayalar başta gelmektedir [1], [6]. Jelin içerisinde kimyasal olarak betona zarar veren silika, kalsiyum, potasyum ve sodyum bulunmakta olup zarar verme derecesi jelin bileşimine, betonun gözenekliliğine, partikül boyutuna ve kristal derecesine bağlıdır [7]–[11]. ASR jelinin suyu emme ve şişme yeteneği Ca/Si oranı belirlerken bu oran 0.20 olması durumunda maksimum su emme ve şişme kabiliyeti göstermektedir [11], [12].

ASR betonda yer değiştirmelere, yüzeysel tortu oluşturmaya, çatlama, parça atmasına ve genişlemeye sebep olmaktadır. ASR oluşumunu; kullanılan agrega özellikleri, betonun alkali içeriği, betonun geçirimsizliği, nem durumu, ortam sıcaklığı, dış alkaliler, buz çözücü tuzlar gibi faktörlerin etkilediği bilinmektedir. ASR oluşumunu engellemede düşük su/çimento oranı seçimi, mineral katkı kullanımı (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb.) ile betonun geçirimsizlik özelliğinin azaltılarak bünyesinde yer alan nem ve alkalilerin hareketini kısıtlayarak ASR oluşumunu azaltmak mümkündür. Uçucu kül bağlayıcı betonlar, çimento bağlayıcı betonlara göre ASR oluşum sürecinde farklı roller üstlenmektedirler [13]–[23]. Uçucu kül katkılı betonlarda ASR genişleme potansiyeli sadece çimento katkılı betonlara göre daha düşüktür. Bu gibi önemli farklılığın altında yatan ana sebep alüminyum açısından zengin uçucu küllerde alümine silikat kaynağı bulunmasıdır. Yüksek alkali ortamda uçucu kül alüminyumun çözünmesini teşvik ederek agregada bulunan reaktif silisin çözünmesini engellediğinden ASR oluşumunu azaltmaktadır. Ayrıca uçucu külde kalsiyum içeriğinin düşük olması viskoziteyi azaltarak hacmi stabil hale getirmesi ile ASR jelinin şişmesini azaltmaktadır [18], [24]. Ayrıca; puzolanlar, çimento harcının

pH içeriğini düşürmesi ile kirecin çözünmesini engellemektedir. Kireç çözünmediğinden miktarında her hangi bir değişiklik meydana gelmez ve bu sayede zarar verici durum oluşturmaz. Düşük pH içeriği, silikanın çözünürlüğünü düşürmesiyle alkali-silika jelin oluşumunu engellemektedir. Bunun yanı sıra uçucu küller betonda bulunan boşlukları doldurması sonucu permabiliteyi azaltmaktadır. Permabilitenin azalması ve boşluk çözeltisinde ASR sonucu oluşan zararlı ürünlerin hareket mekanizması ile yayılımının engellemesi ASR'nuna bağlı oluşması muhtemel zararları minimuma düşürmeyi sağlamaktadır [25].

Uçucu küller ve çimento arasında oluşan puzolanik reaksiyona sonrasında C-S-H jeli oluşmaktadır. Puzolanik reaksiyon karışımdaki kalsiyum miktarını düşürmekte, yani uçucu külün düşük UK/ $\text{SiO}_2$  oranına sahip olması yüksek alkali bağlama özelliği göstermesini sağlamaktadır. Böylece gözenek çözeltisinde bulunan alkalilerin miktarını azaltarak ASR reaksiyonunu kontrol altına almaktadır [26]. Şöyle ki çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan portlanditin ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) yüksek kalsiyum içeriğine bağlı olarak ASR oluşturmada büyük etkisi vardır. Hidratasyon sonrası oluşan portlandit ancak uçucu külün puzolanik reaksiyonu sırasında farklı bileşiklere dönüştürülerek ASR oluşumunu engellemektedir [27]. Ayrıca; betonda  $\text{Ca(OH)}_2$  varlığı, reaktif alanların etrafında yarı geçirgen alanlar oluşturmaktadır [28]. Bu alanlar sayesinde  $\text{Na}^+$  iyonlarının içeri geçişini,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{OH}^-$  ve  $\text{H}_2\text{O}$  moleküllerinin ise dışarı çıkışını engellemektedir. Şayet ortamda uçucu külün olmaması ve portlandit ile reaksiyona girmeme durumu söz konusu durumlarda ASR oluşması kaçınılmazdır. ASR oluşması ile  $\text{Si}^{+4}$  iyonu malzemelerin reaktif alanlara pompalanmasına ve zarar vermesine neden olmaktadır. Ancak ortamda kalsiyumun bulunmaması ya da uçucu külün puzolanik reaksiyon sonrası kalsiyumu farklı bileşiklere dönüştürmesi, ASR ürünleri amorf silika şekline geçmekte ve zarar verici boyutunu engellemektedir [29]. Uçucu külün puzolanik reaksiyonu ile betonda düşük Ca/Si oranlarının kristal yapıda olması, ASR ürünlerinin oluşmasına ve ASR jelinin stabil şekilde olmasına neden olur. Bu jel ise beton bileşiminde uçucu külün kullanılması ve külün bileşiminden gelen yüksek Ca ile bir araya gelmesi sonucunda C-S-H yapısına dönüşmektedir [30], [31]. Uçucu küller beton içerisinde kullanıldığında çimento hidratasyonu sonrası açığa çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$  bileşimini puzolanik reaksiyona dahil etmesi ASR oluşumunu engellemektedir. Ancak uçucu külün beton içerisinde çimento yerin kullanılmaması durumunda da kireç eklemek mikro yapısında 2 tabaka şeklinde kalsiyum, yüksek sodyum ve potasyum bandı oluşturmaya neden olur ve bu da genişlemeye, iç gerilmelerin artmasına sebep olmaktadır [32]. Bu yüzden uçucu kül; kalsiyum içeriğini ve ASR oluşumuna neden olan alkali miktarını azaltarak oluşturduğu ASR hasarını engellemektedir [33]. Son yıllardaki yapılan araştırmalarda uçucu külün, boşluk çözeltisi içerisinde reaktif agregayı kontrol ederek ASR yayılım mekanizmasını engellemektedir. Çözelti içerisinde uçucu külün rolü silikanın yüzey alanına düşen her bir  $\text{OH}^-$  iyonu ve yüksek alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) miktarlarını azaltarak ASR yayılımını engellemektedir [26]. Yapılan mikro yapısal analizler ile örneklerin alüminyumlu NaOH ile doyurulması çok az reaktif agreganın ortaya çıkmasına neden olmaktadır [34]. Ayrıca

ASTM C 1260 [35] standardında örneklere hızlandırılmış harç çubuğu deney yöntemi uygulanmıştır. 25x25x285 mm boyutlarında hazırlanmış örnekler 24 saat sonra kalıplardan alınarak ilk boy değişim değerleri ölçülmüştür. Kalıp sökümünden 1 gün sonra 80 °C derece suda bekletilerek boy ölçümleri alınan örnekler, takip eden kür süreleri için 80 °C derece 1N NaOH (900 ml. saf suya 40 g sodyum hidroksit) çözeltisinde bekletilerek boy değişim değerleri ölçülür. Örnekler %1-3 amorf toz alüminyum hidroksit etkili hızlandırılmış gaza maruz kaldığından ASR genişlemesini engellemekte ve boy değerlerinde değişim gözlenmemektedir [36]. Al elementinin ASR'nu üzerinde bir diğer etkisi çözelti içerisinde reaksiyona dâhil olarak C-A-S-H yapısının oluşumunu arttırmaya buda gözenek çözeltisinde pH değerini düşürmesi ile alkalileri bağlamaya neden olmaktadır [37], [38]. Uçucu külün kimyasal bileşiminde bulunan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ASR'ye neden olan kalsiyum ve portlandit tüketim kabiliyetini azaltmaktadır [39], [40]. Ayrıca uçucu kül içerisinde yüksek alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) içeriğinin etkisi kısaca beton boşluk çözeltisi içerisinde reaktif agreganın çözünmesini kontrol altına aldığı için betonda kısa dönemde daha etkili olduğu, uzun dönem ise henüz çok fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür [41].

Bu çalışmada; C tipi uçucu külün 0 dk, 10 dk ve 20 dk öğütme süreleri sonrasında inceltmesi ile harç içerisinde çimento

yerine %10 ve %30 ikame edilerek örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelerin 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresi sonunda ASTM C 1260 standardı kapsamında alkali silika reaksiyonunun (ASR) gelişimi izlenmiştir. Kür süreleri içerisinde harç örneklerinin genleşme değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre uçucu küllerin farklı incelik ve ikame oranlarında çimento yerine kullanılması ile genleşme değerleri üzerinde etkisi değerlendirilmiştir. Böylece harç örnekleri içerisinde uçucu külün öğütme süresinin ve ikame oranının artmasıyla birlikte ASR oluşum durumu azalmıştır.

## Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada; çimento, agrega, Afşin Elbistan Termik Santrali'nden elde edilen C tipi uçucu kül (UK) ve şebeke suyu kullanılmıştır.

### Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Çalışmada kullanılan CEM I 42.5 R Portland çimentosu Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikasından, UK ise Afşin Elbistan Termik Santralinden temin edilmiştir. Bu malzemelerin belirleyici özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [42].

Tablo 1. Uçucu kül ve çimentoya ait tanıtıcı özellikler [42].

Kimyasal Analiz (%)			Fiziksel Testler			UK	
Bileşenler	UK	Çimento	Özellikler	UK	Çimento	Blaine İncelik Değerleri (cm <sup>2</sup> /g)	
SiO <sub>2</sub>	29.24	18.59	İncelik (45 µ elek üstü %)	50.68	8.58	Öğütülmemiş (0 dk)	1555
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.49	4.65	Özgül Ağırlık	2.54	3.08	10 dk	1632
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.67	3.04				20 dk	2347
CaO	37.84	60.34	Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	1555	4145	<b>Çimento Mekanik Özellikleri</b>	
MgO	1.86	1.92	Priz Başlangıcı (saat-dk)	2 saat-30 dk	2 saat-36 dk		
Na <sub>2</sub> O	0.38	0.11	Priz Sonu (saat-dk)	3 saat-15 dk	3 saat-19 dk		
K <sub>2</sub> O	0.69	0.60	Hacim Genişlemesi (mm)	0	0.7		
SO <sub>3</sub>	4.70	2.89	Su İhtiyacı (%)	27.4	29.10	<b>Basınç Dayanımı (N/mm<sup>2</sup>)</b>	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.054	-	Su miktarı (g)	137	-	2.Gün	23.9
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.059	-				28.Gün	51.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.494	-					
TiO <sub>2</sub>	0.49	-					
ZnO	0.001	-					
KK	2.31	7.19					
Toplam	96.27	99.42					
SCaO	4.51	0.38					

Çalışmada hazırlanan referans ve uçucu kül katkılı harç örneklerinde kullanılan kireç taşı agregası Gümüşhane yöresinden temin edilmiştir. Ayrıca; harç karışımlarının bazılarında Afşin Elbistan Termik Santral atığı olan C tipi uçucu külü çimento malzemesi yerine iki farklı ikame oranında kullanılmıştır. Bu ikame oranlarından biri % 10 olarak belirlenmiş ve bu belirlemede uçucu külün harç karışımı içerisinde en düşük değeri olarak kabul edilmiştir.

Uçucu külün en düşük değerinde elde edilen ASR bağlı genleşme etkisi belirlenmiştir. İkinci olarak % 30 gibi bir oran düşünülmüştür. Bu oranın seçilme nedeni yapılan önceki çalışmalardan yola çıkılarak uçucu küllerin optimum performans gösterdiği bir ikame oranı olup ASR üzerinde etkisi gözlemlenmiştir. Öğütülmemiş uçucu küle ait kıvama bağlı su ihtiyacı, genleşme ve priz süresi TS EN 196-3+A1[43] standardına göre belirlenmiştir. Uçucu külün farklı

öğütme sürelerine (0, 10 ve 20 dk) ve çimentoya ait blaine incelik değerleri TS EN 450-1 [44] standardına bağlı olarak belirlenmiştir.

çimento malzemeleri kullanılarak hazırlanan karışımlara ait miktarlar verilmiştir. Ayrıca karışımlarda Gümüşhane ili şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 2’de görüldüğü üzere; hızlandırılmış harç çubuğu deneylerinde kullanılan agrega, uçucu kül, şebeke suyu ve

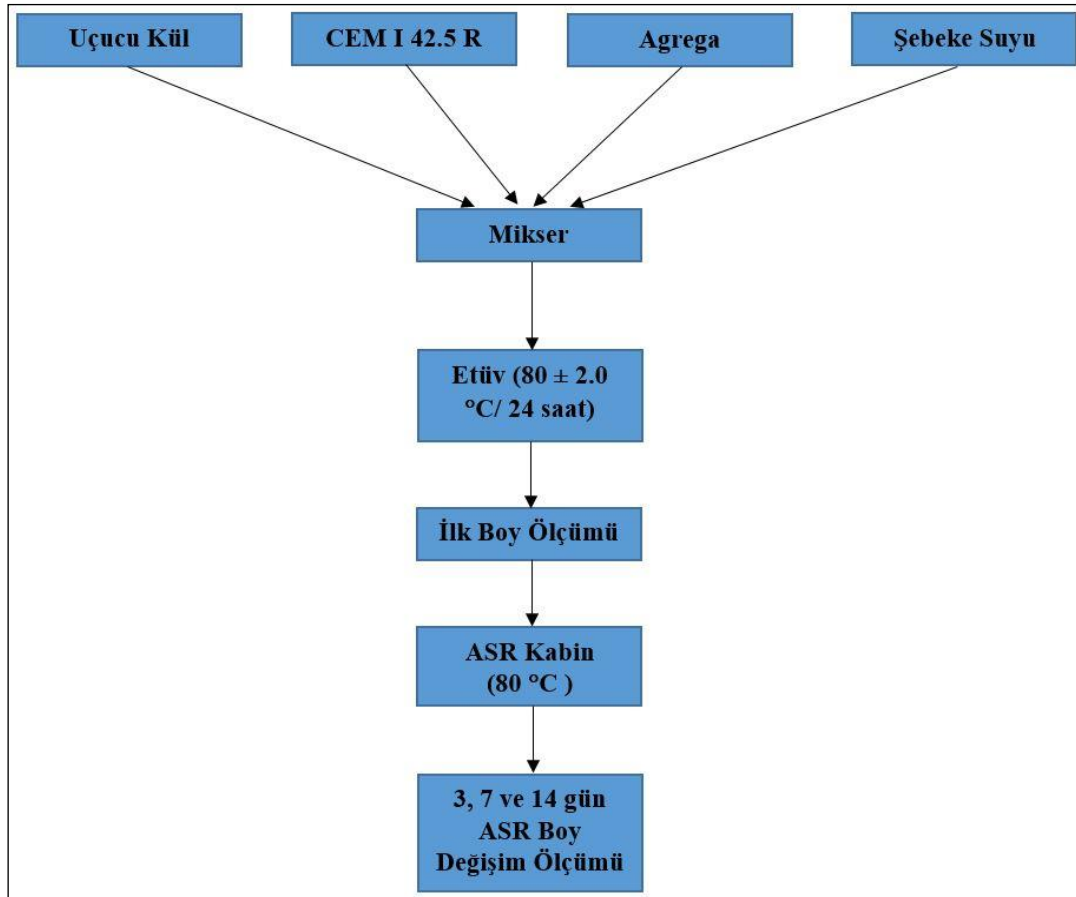
Tablo 2. Deneylerde kullanılan malzeme karışım miktarları.

Karışım Türü	Elek Serisi					S/Ç	Su (ml)	Çimento (g)	Uçucu Kül (g)
	4.75-2.36 mm	2.36-1.18 mm	1.18 mm-600 µm	600-300 µm	300-150 µm				
	% 10	% 25	% 25	% 25	% 15				
Referans	99 g	248 g	248 g	248 g	149 g	0.47	207	440	0
% 10 Uçucu Kül Katkılı	99 g	248 g	248 g	248 g	149 g	0.47	207	396	44
% 30 Uçucu Kül Katkılı	99 g	248 g	248 g	248 g	149 g	0.47	207	308	132

### Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi

ASTM C 1260 (2021) standardına göre; elek aralıkları için belirlenen miktarlarda uçucu kül içermeyen ve UK içeren karışımlar şeklinde hazırlanmış ve Tablo 2’de sunulmuştur. Daha sonra Tablo 2’de verilen elek aralıklarına ve malzeme miktarlarına göre UK içermeyen referans numuneleri, 10 dk ve 20 dk sürelerle öğütülmüş C tipi UK’ün her biri için % 10 ve % 30 ikame oranlarına sahip numuneler ASTM C 1260 standardına göre harç örnekleri hazırlanmıştır. Her bir kür süresi (3, 7, 14 ve 28 gün) için 3 adet hızlandırılmış harç çubuğu numunesi üretilmiştir. Hazırlanan harç çubukları saf

su içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra etüvde ( $80 \pm 2.0$  °C sabit ısıda) bekletildikten (24 saat) sonra beton örneklerinin ilk boy değerleri ölçülmüştür. Her bir saf suya (900 ml) sodyum hidroksit (40 g) eklenerek elde edilen NaOH çözeltisi içeren numuneler, hazırlanan ASR kabine yerleştirilmiştir. ASR kabininin sıcaklığı sabit ısıda (80 °C) tutulmuş ve kür sürelerine kadar beton harç örnekleri ASR kabini içerisinde bekletilmiştir. Hazırlanan her bir karışıma ait harç örneklerinin 3, 7, 14 ve 28 gün sonundaki ASR boy değişim ölçümleri yapılmıştır. Şekil 1’de yapılan deneylerin aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 1. Hızlandırılmış harç çubuğu deney aşamaları.

Birim boy değişim yüzdelerini belirlemede aşağıdaki Eşitlik 1 kullanılmıştır:

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

Eşitlikte;

$\%L$  = Boy değişim yüzdesi,

$\Delta L$  = Örneğin boy değişimi (mm),

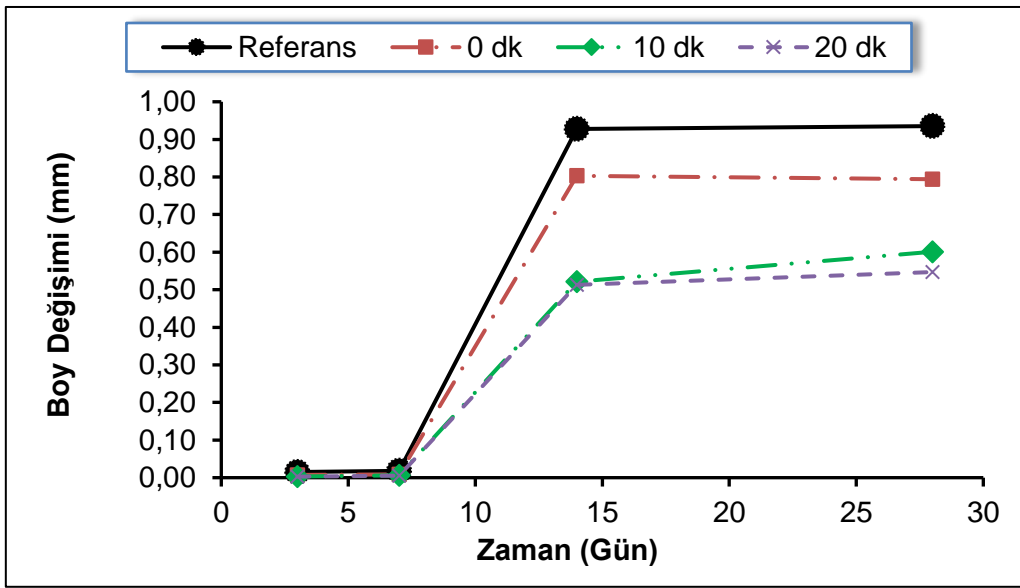
$L$  = Örneğin ilk uzunluğunu (mm) göstermektedir.

Hızlandırılmış harç çubuğu standardına (ASTM C 1260) göre; 14 gün bekletildikten sonra harç örneklerinin limit

değeri  $\leq \% 0.10$  ise reaktif değil,  $\% 0.10 - \% 0.20$  arasında ise şüpheli,  $\geq \% 0.20$  ise reaktivite olduğu belirtilmektedir.

## Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada; uçucu kül içermeyen referans, öğütülmemiş  $\% 10$  ve  $\% 30$  uçucu kül katkılı, 10 dk ve 20 dk öğütme işlemine tabi tutulmuş her bir öğütme süresi için de ayrı ayrı çimento yerine  $\% 10$  ve  $\% 30$  oranlarında uçucu kül ikame edilerek harç örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan harç örnekleri 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda alkali silika reaksiyonu (ASR) boy ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Beton içerisinde çimento yerine  $\% 10$  ve  $\% 30$  uçucu kül ikame edilmesi ile hazırlanan karışımlara ait alkali silika boy değişim sonuçları Şekil 2-3, öğütme süresine bağlı ASR değişimleri ise Şekil 4-6'da verilmiştir.



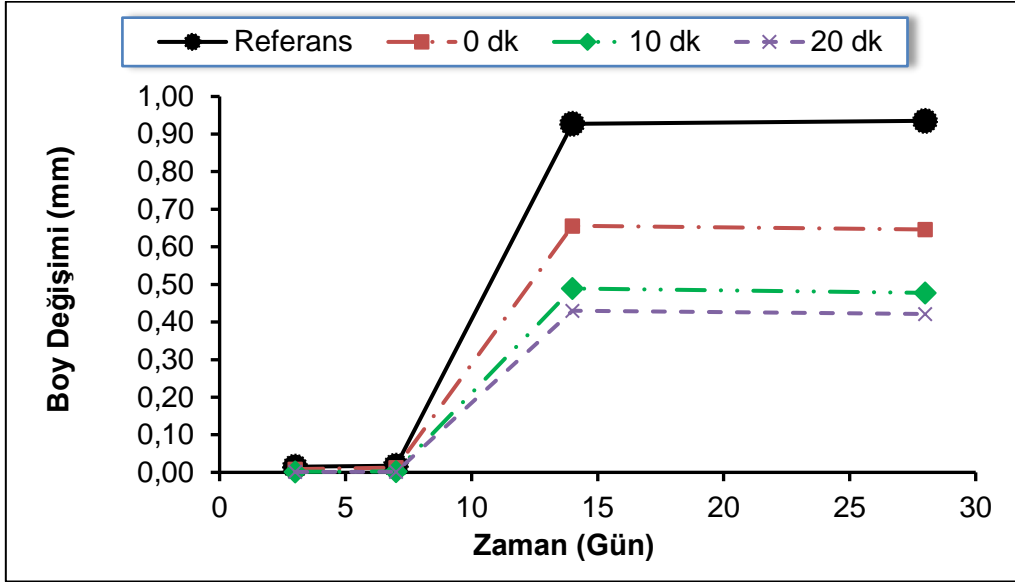
Şekil 2. Harç içerisinde çimento yerine  $\% 10$  uçucu kül ikamesi ile hazırlanan karışımların öğütme süresine bağlı olarak alkali silika boy değişimleri

Şekil 2'de görüldüğü gibi;  $\% 10$  ikameli 0, 10, 20 dk öğütme işlemine tabi tutulmuş uçucu kül katkılı harç örneğinin boy değişim değerine göre düşüş göstermiştir.  $\% 10$  ikameli UK numunelerinin kür süresine bağlı olarak boy değişiminin bütün öğütme sürelerinde 14. güne kadar arttığı, 14. günden sonra 10 dk ve 20 dk öğütme süreli numunelerin ASR değerlerindeki artışın devam ettiği, 0 dk öğütme süreli (öğütülmemiş) numunenin ASR değerinde ise düşüşün meydana geldiği görülmektedir.

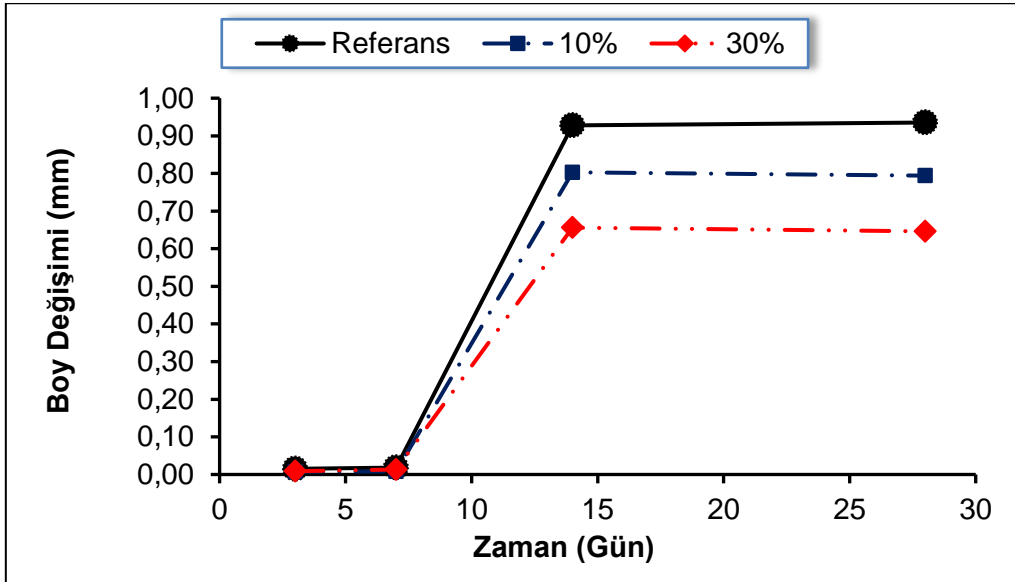
$\% 30$  ikameli 0, 10, 20 dk öğütme işlemine tabi tutulmuş uçucu kül katkılı harç örneklerinin 3, 7, 14 ve 28 günlük ASR sonucu boy değişim değerlerinde, sadece çimento katkılı referans harç örneğinin boy değişim değerine göre düşüş meydana getirmiştir.  $\% 30$  ikameli UK numunelerinin kür süresine bağlı olarak boy değişiminin bütün öğütme

sürelerinde 14. güne kadar arttığı, 14. günden sonra 0 dk, 10 dk ve 20 dk öğütme süreli numunelerin ASR değerlerinde düşmenin meydana geldiği görülmektedir (Şekil 3).

Şekil 4'te görüldüğü üzere öğütülmemiş uçucu kül katkılı harç örneklerinin 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresi sonucunda ASR ile elde edilen boy değişim değerleri çimento katkılı referans betonun boy değişim değerlerine göre düşüş göstermiştir. Referans,  $\% 10$  ikameli UK ve  $\% 30$  ikameli UK numunelerinin kür süresine bağlı olarak boy değişiminin 14. güne kadar arttığı, sonrasında ise çok az miktarda azalmanın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte; çimento yerine ikame edilen UK miktarının artmasıyla ASR değerinin düştüğü görülmektedir.



Şekil 3. Harç içerisinde çimento yerine % 30 uçucu kül ikamesi ile hazırlanan örneklerin öğütme süresine bağlı olarak alkali silika boy değişimleri.



Şekil 4. Öğütülmemiş (0 dk) uçucu külü harç içerisinde çimento yerine % 10 ve % 30 ikame edilmesi ile hazırlanan örneklere ait alkali silika boy değişim değerleri.

10 dk öğütülmüş uçucu kül katkıli harç örneklerinin 3, 7, 14 ve 28 günlük ASR sonucu boy değişim değerleri çimento katkıli referans örneğinin boy değişim değerlerine göre düşüş göstermiştir. Referans, % 10 ikameli UK ve % 30 ikameli UK numunesinin kür süresine bağlı olarak boy değişiminin 14. güne kadar arttığı, 14. günden sonra %10 ikameli UK numunesinin ASR değerindeki artışın devam ettiği, % 30 ikameli UK numunesinde ise ASR değerinde düşüşün meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte; çimento yerine ikame edilen UK miktarının artmasıyla ASR değerinde düşüş gerçekleşmiştir (Şekil 5).

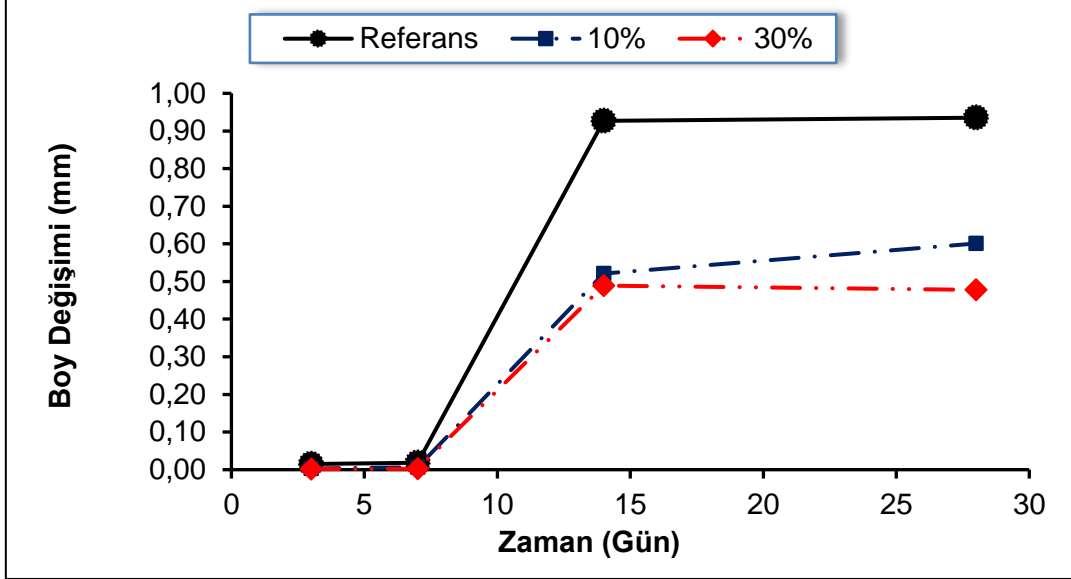
Şekil 6'da görüldüğü gibi, 20 dk öğütme işlemine tabi tutulmuş uçucu kül katkıli harç örneklerinin 3, 7, 14 ve 28 günlük ASR sonucu boy değişim değerlerinde, çimento katkıli referans harç örneğinin boy değişim değerine göre düşüş göstermiştir. Referans, % 10 ikameli UK ve % 30 ikameli UK numunesinin kür süresine bağlı olarak boy

değişiminin 14. güne kadar arttığı, 14. günden sonra % 10 ikameli UK numunesinin ASR değerindeki artışın devam ettiği, % 30 ikameli UK numunesinde ise ASR değerinde düşüşün meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte, çimento yerine ikame edilen UK miktarının artmasıyla ASR değerinde düşüş gerçekleşmiştir.

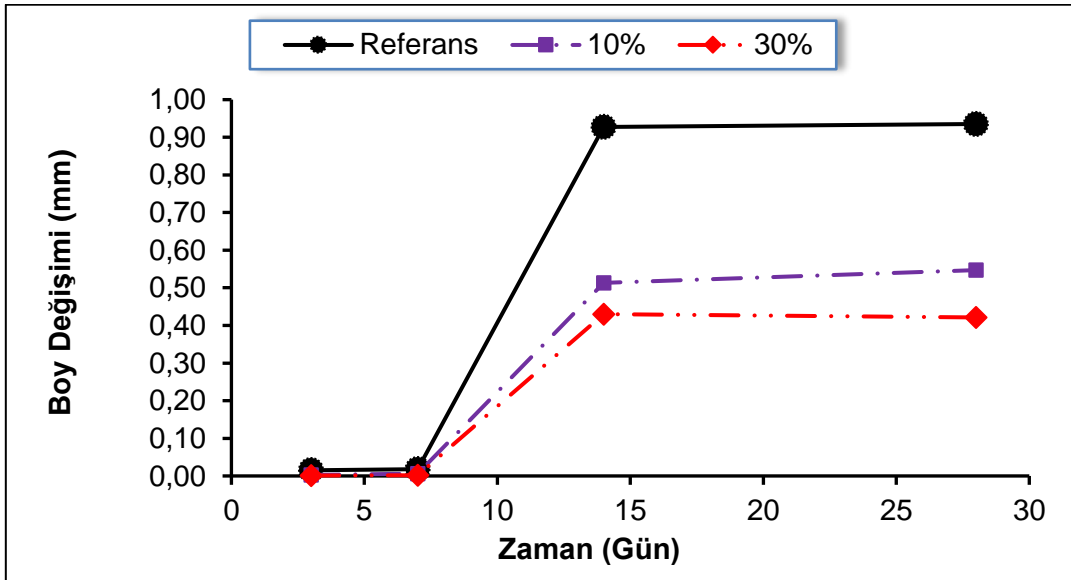
UK öğütme sonrası, incelik değeri ve ikame oranının da ki artışa bağlı olarak harç örneklerinin ASR sonucu birim boy değişim değerleri üzerinde düşürücü etkisi olmuştur. Oruji ve ark., [45] taban külünü bilyeli değirmende öğütmüşler. Öğütme işlemi sonrasında 858.6 m<sup>2</sup>/kg ve 1101.9 m<sup>2</sup>/kg gibi iki farklı blaine inceliğinde sahip uçucu kül malzemesini oluşturmuş. Öğütülmemiş uçucu külün blaine inceliğini 379.6 m<sup>2</sup>/kg ve çalışmada kullanılan çimentonun blaine inceliğini ise 388.3 m<sup>2</sup>/kg olarak belirlenmişler. Belirlenen farklı blaine inceliğine sahip her bir uçucu kül çimento yerine % 9.1, % 23.1, % 33.3, % 41.2 oranlarında kullanmışlar. Elde

etikleri sonuçlarla bu çalışmada elde edilen sonuçlar kıyaslandığında benzer eğilimde olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmalarında en yüksek ASR boy uzama değerini portland çimentolu katkı betonlardan, taban külünün inceliğine bağlı olarak boy uzama değerlerinde düşüş meydana geldiği ve en fazla düşüşün uçucu kül katkı karışımlarda olduğunu ifade etmişlerdir. Farklı inceliğe sahip taban külü içeren numunelerin ASR değerleri referans numunesine göre daha düşük değer almıştır. Ancak sadece

UK içeren numuneler taban külünün farklı incelik değerlerine kıyasla ASR'ye bağlı boy değerlerinde oluşturduğu düşüşte daha etkili olduğunu görülmüştür. Bu çalışmada ise uçucu külün öğütme süresi ile ASR sonucu birim boy uzama değerlerinde düşüşün daha fazla meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca öğütülmemiş uçucu kül katkı betonun, referans numunesi ile kıyaslandığında düşüşün olduğu ancak öğütülmüş uçucu küllere nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 5. 10 dk öğütülmüş uçucu külü harç içerisinde çimento yerine % 10 ve % 30 ikame edilmesi ile hazırlanan örneklere ait alkali silika boy değişim değerleri.



Şekil 6. 20 dk öğütülmüş uçucu külü harç içerisinde çimento yerine % 10 ve % 30 ikame edilmesi ile hazırlanan örneklere ait alkali silika boy değişim değerleri.

Oruji ve ark., [45] UK artan incelik ve çimento içerisindeki ikame oranına göre ASR boy değişiminin en az olduğu karışımı % 41.2 oranında uçucu kül katkı beton örneklerinde rastlamışlar. Bu çalışmada ise ASR boy değişimi çimento yerine % 30 UK ikame oranında kullanılan harç örneklerinde

rastlanmıştır. Alkali silika reaksiyonu üzerine uçucu külün incelik ve ikame oranının etkisi önemsenmeyecek kadar büyük boyutlarda olsa da farklı faktörler devreye girdiğinde etkinlikte değişiklikler oluşturduğu görülmektedir. Bu faktörlerin başında çözünür alimüna içeriği, gözenek



solisyonu, alkalite ve gözeneklilik gibi değişkenlerin neden olduğu düşünülmektedir [26]. Ayrıca bu çalışmada öğütülmüş uçucu külün kullanımı ile ASR üzerinde 0, 3, 7 günlük kür süreleri sonunda azaltıcı rolünün olması artan öğütme süresine bağlı olarak ince malzeme oluşmasına ve bu malzemenin de karışım içerisinde boşlukları doldurucu etki oluşturmasından ileri gelmiştir. 14 ve 28 günlük kür sürelerinde meydana gelen değişikliklerin nedenleri ise puzolanik reaksiyonun oluşumundan ileri anlaşılmıştır. Bu etki özellikle % 30 oranında uçucu külü çimento yerine kullanıldığında erken dönemde ASR'ye bağlı daha az genleşme oluşturduğu ilerleyen günlerde (850 gün sonra) ise ASR genleşme oranı daha yüksek olduğunu gösteren çalışmalarda ortaya konmaktadır [1]. Özellikle öğütmenin etkisi ile ince boyuta getirilen uçucu külün, filler (dolgu) etkisi oluşturması ASR mekanizmasının oluşumuna neden olan boşluklardaki nem ve alkalilerin taşınmasını engelleyici özellik kazandırmaktadır. Ayrıca UK inceliğinin kimyasal olarak puzolanik reaksiyonu artırıcı özellik göstermesi; reaksiyon sonrası daha fazla C-S-H ürününün açığa çıkmasına, zararlı alkalileri bağlamaya, daha kompakt ve boşlukları doldurması ile ASR oluşturma mekanizmasını engelleyici özellik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Ramjan ve ark., [46] çalışmalarında uçucu külü eleme yöntemi ile iki farklı boyuta getirip % 20 oranında çimentoyla yer değiştirerek harç örnekleri hazırlanmış ve uçucu kül katkısız harca göre ASR boy değişim değerlerini karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre uçucu kül inceliğindeki artışla beraber ASR boy değişim değerinin düştüğünü tespit etmişlerdir. Özellikle öğütme sonrası oluşan UK inceliğinin etkisi 14 günlük kür süresine sahip örneklerde ASR boy değişim değerlerinde % 50 değerinde azalma meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Bu çalışma da ise 14 gün sonrasında UK öğütme ile inceliğin ASR değerleri üzerinde çok fazla bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür [47], [48]. ASR'nu önlemede uçucu külü öğütterek ince boyuta getirmek eleme yöntemi ile boyutsal değişimden daha etkin bir yöntem olduğu yapılan çalışmalarda açıkça belirtilmektedir. Özellikle ASR betonun durabilitesini etkileyen kimyasal bir reaksiyon olup durabilite üzerinde UK inceliğinin etkisi çalışılmıştır. Hsu ve ark., [49] çalışmalarında uçucu kül inceliğinin durabilite özellikleri üzerine etkisini incelemişler. Burada F tipi uçucu külü bilyeli değirmende öğütme ile 4610 cm<sup>2</sup>/g, 5690 cm<sup>2</sup>/g, ve 6300 cm<sup>2</sup>/g, blaine incelik değerleri elde etmişler. Bu inceliklerin her birini çimento yerine % 0, % 10, % 15 ve % 20 oranında kullanarak harç örnekleri oluşturmuşlar. Elde ettikleri sonuçlara göre inceliği 5690 cm<sup>2</sup>/g, olan uçucu külden % 20 oranında hazırlanan harç örneklerinden en yüksek basınç dayanımı, en düşük su ve porozite değerini verdiğini belirtmişlerdir. Uçucu kül inceliğinin ve ikame oranının artması çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan Ca(OH)<sub>2</sub> miktarını azaltarak oluşturulan katkılı çimento harçlarının özelliklerini olumlu yönde etkilemesi ile durabiliteyi geliştirdiği sonucuna varmışlardır. Yüksek durabilite özelliğine sahip uçucu kül katkılı harçlar normal çimento katkılı harçlara göre daha az ASR boy değişim olayı meydana gelmiştir. ASR mekanizmasına bağlı boy değişim değerleri uçucu kül katkılı harçlarda ya da beton üretiminde uçucu külün incelik ve ikame oranına bağlı poroziteyi düşürmesi ile boy değişim değerlerinde düşüşü sağlamıştır. Hsu ve ark., [50] çalışmalarında ise uçucu külü 3150 cm<sup>2</sup>/g, 5690 cm<sup>2</sup>/g,

iki farklı incelik değerinde betonda çimento yerine % 30, % 40 ve % 50 oranlarında ikame etmişlerdir. Çalışmalarında basınç dayanımı, su emilimi, klor geçişi ve civa porozimetresi üzerine etkisini araştırmışlar. Araştırma sonucuna göre uçucu külün incelik değerinin 5690 cm<sup>2</sup>/g, ve % 40 oranında betonda çimento ile yer değiştirilerek üretilen betonların özelliklerinin değişimi ve yüksek performans sağladığını ifade etmişlerdir. Yapılan birçok çalışmada ve bu çalışmada uçucu külün incelik ve ikame oranının artması çimento pastasını, harcını ve betonun sadece ASR sonucu oluşan boy değişim değerleri üzerinde etkisinin yanı sıra malzemenin özelliklerini arttıran ve daha dayanıklı duruma gelmesini sağlayan birçok özellik üzerine etkisini ortaya koymuşlardır.

## Sonuç

Bu çalışmada; uçucu külün (C tipi) farklı öğütme sürelerinde (0 dk, 10 dk ve 20 dk) farklı ikame oranlarında (% 10 ve % 30) beton karışım örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler; 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süresi sonunda ASTM C 1260 standardına göre alkali silika reaksiyonu (ASR) değerleri ölçülmüştür. Elde edilen farklı öğütme süreli ve ikame oranlı uçucu kül katkısının betonun ASR özelliği üzerine oluşturduğu etkisi konusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuç olarak çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- ❖ % 10 ve % 30 uçucu kül ikameli harç örneklerinin ASR boy uzama miktarları referans numunenin değerine göre daha az olduğu ve uçucu kül ikamesinin ASR değerinde düşüş sağladığı anlaşılmıştır.
- ❖ Uçucu kül ikame oranının artmasıyla birlikte harç örneklerinin ASR özelliğinde meydana gelen düşüş miktarı da artmıştır.
- ❖ Öğütme süresinin artmasıyla birlikte ASR değerlerinde de düşüşler meydana gelmiştir.
- ❖ Harç örnekleri içerisinde uçucu külün öğütme süresinin ve ikame oranının artmasıyla birlikte ASR oluşum durumu azalmaktadır.
- ❖ Harç içerisinde uçucu kül kullanımı ve özellikle uçucu külün öğütülerek inceliğinin artırılması sonucunda örnekler geçirimsiz özellik kazandırılması ile boşlukların azaltılmasına katkı sağlamıştır.
- ❖ Bu durum; boşluk miktarı azalan örneklerde ASR sonucu oluşabilecek hasara karşı uzun ömürlü beton karışımlarının oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Bu konuda daha sonra yapılacak çalışmalarda; daha fazla öğütme süresine sahip uçucu küllerin kullanımının araştırılması ve farklı tip uçucu küllerin ASR üzerindeki etkisinin araştırılmasının yerinde olacağı düşünülmektedir.



## 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”

## Yazar Katkıları

Eker: Veri toplama, Verilerin analizi ve yorumlanması, Taslağın oluşturulması, Revizyon.

Demir Şahin: Veri toplama, Verilerin analizi ve yorumlanması, Taslağın oluşturulması.

Çullu: Çalışma konsepti ve tasarım.

## Teşekkür

Yazarlar; Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü öğrencilerine yardımlarından dolayı teşekkür ederler.

## Kaynakça

- [1] M. D. A. T. K. J. F. B. F. T. D. S. I. Garber, “Methods for Preventing ASR in New Construction: Results of Field Exposure Sites,” United States, 2013.
- [2] M.-A. Berube and B. Fournier, “Les produits de la réaction alcalis-silice dans le béton; étude de cas de la région de Québec,” *Can. Mineral.*, vol. 24, no. 2, pp. 271–288, Jun. 1986.
- [3] E. Grimal, “Caractérisation des effets du gonflement provoqué par la réaction alcali-silice sur le comportement mécanique d’une structure en béton,” Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2007.
- [4] A. . Rodrigue, J. . Duchesne, B. . Fournier, M. . Champagne, and B. . Bissonnette, “Alkali-silica reaction in alkali-activated combined slag and fly ash concretes: The tempering effect of fly ash on expansion and cracking,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 251, p. 118968, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118968.
- [5] İ. Demir, Ö. Sevim, and İ. Kalkan, “Microstructural properties of lithium-added cement mortars subjected to alkali-silica reactions,” *Sādhanā*, vol. 43, no. 7, p. 112, Jul. 2018, doi: 10.1007/s12046-018-0901-3.
- [6] F. Naiqian, J. Hongwei, and C. Enyi, “Study on the suppression effect of natural zeolite on expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 50, no. 1, pp. 17–24, Mar. 1998, doi: 10.1680/mac.1998.50.1.17.
- [7] L. S. Dent Glasser and N. Kataoka, “The chemistry of ‘alkali-aggregate’ reaction,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, Jan. 1981, doi: 10.1016/0008-8846(81)90003-X.
- [8] N. Thaulow, H. Jakobsen, Ulla, and B. Clark, “Composition of alkali silica gel and ettringite in concrete railroad ties: SEM-EDX and X-ray diffraction analyses,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 2, pp. 309–318, Feb. 1996, doi: 10.1016/0008-8846(95)00219-7.
- [9] I. Fernandes, “Composition of alkali-silica reaction products at different locations within concrete structures,” *Mater. Charact.*, vol. 60, no. 7, pp. 655–668, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.matchar.2009.01.011.
- [10] T. Katayama, “Petrographic Study of the Alkali-Aggregate Reactions in Concrete,” University of Tokyo, 2012.
- [11] A. Leemann and C. Merz, “An attempt to validate the ultra-accelerated microbar and the concrete performance test with the degree of AAR-induced damage observed in concrete structures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 49, pp. 29–37, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.03.014.
- [12] A. Gholizadeh-Vayghan and F. Rajabipour, “Quantifying the swelling properties of alkali-silica reaction (ASR) gels as a function of their composition,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 100, no. 8, pp. 3801–3818, Aug. 2017, doi: 10.1111/jace.14893.
- [13] P. M. Gifford and J. E. Gillott, “Alkali-silica reaction (ASR) and alkali-carbonate reaction (ACR) in activated blast furnace slag cement (ABFSC) concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 1, pp. 21–26, Jan. 1996, doi: 10.1016/0008-8846(95)00182-4.
- [14] Z. Xie, W. Xiang, and Y. Xi, “ASR Potentials of Glass Aggregates in Water-Glass Activated Fly Ash and Portland Cement Mortars,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 67–74, Feb. 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(67).
- [15] S. Tuylu, “Effect of different particle size distribution of zeolite on the strength of cemented paste backfill,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, Sep. 2021, doi: 10.1007/s13762-021-03659-7.
- [16] I. García-Lodeiro, A. Palomo, and A. Fernández-Jiménez, “Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 2, pp. 175–183, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.11.002.
- [17] F. Puertas, M. Palacios, A. Gil-Maroto, and T. Vázquez, “Alkali-aggregate behaviour of alkali-activated slag mortars: Effect of aggregate type,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 5, pp. 277–284, May 2009, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.02.008.
- [18] M. Thomas, A. Dunster, P. Nixon, and B. Blackwell, “Effect of fly ash on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction – Exposure site studies,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 3, pp. 359–367, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.11.006.
- [19] Y. Kawabata and K. Yamada, “The mechanism of limited inhibition by fly ash on expansion due to alkali-silica reaction at the pessimum proportion,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 92, pp. 1–15, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2016.11.002.
- [20] Z. Shi, C. Shi, S. Wan, and Z. Ou, “Effect of alkali dosage on alkali-silica reaction in sodium hydroxide activated slag mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 143, pp. 16–23, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.125.
- [21] R. Tänzler, Y. Jin, and D. Stephan, “Effect of the inherent alkalis of alkali activated slag on the risk of alkali silica reaction,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 98, pp. 82–90, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.04.009.
- [22] D. Adiguzel, A. Bascetin, and S. A. Baray, “Determination of Optimal Aggregate Blending to Prevent Alkali-Silica Reaction Using the Mixture Design Method,” *J. Test. Eval.*, vol. 47, no. 1, p. 20160441, Jan. 2019, doi: 10.1520/JTE20160441.
- [23] A. Bascetin, D. Adiguzel, H. Eker, E. Odabas, and S. Tuylu, “Effects of pozzolanic materials in surface paste disposal by pilot-scale tests: observation of physical changes,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, Aug. 2020, doi: 10.1007/s13762-020-02892-w.
- [24] T. Yang, Z. Zhang, Q. Wang, and Q. Wu, “ASR potential of nickel slag fine aggregate in blast furnace slag-fly ash geopolymer and Portland cement mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 119990, Nov. 2020, doi:

- 10.1016/j.conbuildmat.2020.119990.
- [25] A. U. Shettima, M. W. Hussin, Y. Ahmad, and J. Mirza, "Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 120, pp. 72–79, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095.
- [26] S. M. H. Shafaatian, A. Akhavan, H. Maraghechi, and F. Rajabipour, "How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)?" *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, pp. 143–153, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.11.004.
- [27] F. Rajabipour, E. Giannini, C. Dunant, J. H. Ideker, and M. D. A. Thomas, "Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps," *Cem. Concr. Res.*, vol. 76, pp. 130–146, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.024.
- [28] S. Chatterji, A. D. Jensen, N. Thaulow, and P. Christensen, "Studies of alkali-silica reaction. Part 3. Mechanisms by which NaCl and Ca(OH)<sub>2</sub> affect the reaction," *Cem. Concr. Res.*, vol. 16, no. 2, pp. 246–254, Mar. 1986, doi: 10.1016/0008-8846(86)90141-9.
- [29] S. Joseph, R. Snellings, and Ö. Cizer, "Activation of Portland cement blended with high volume of fly ash using Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 104, p. 103417, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103417.
- [30] K. Kurtis, P. J. Monteiro, J. Brown, and W. Meyer-Ilse, "Imaging of ASR Gel by Soft X-Ray Microscopy," *Cem. Concr. Res.*, vol. 28, no. 3, pp. 411–421, Mar. 1998, doi: 10.1016/S0008-8846(97)00274-3.
- [31] Z. Shi and B. Lothenbach, "The role of calcium on the formation of alkali-silica reaction products," *Cem. Concr. Res.*, vol. 126, p. 105898, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105898.
- [32] R. F. Bleszynski and M. D. A. Thomas, "Microstructural Studies of Alkali-Silica Reaction in Fly Ash Concrete Immersed in Alkaline Solutions," *Adv. Cem. Based Mater.*, vol. 7, no. 2, pp. 66–78, Mar. 1998, doi: 10.1016/S1065-7355(97)00030-8.
- [33] S. Guo, Q. Dai, X. Sun, X. Xiao, R. Si, and J. Wang, "Reduced alkali-silica reaction damage in recycled glass mortar samples with supplementary cementitious materials," *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 3621–3633, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.119.
- [34] T. Chappex and K. L. Scrivener, "The influence of aluminium on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 12, pp. 1645–1649, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2012.09.009.
- [35] ASTM C1260, "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)," West Conshohocken, PA, 2021. doi: 10.1520/C1260-21.
- [36] A. Brykov and A. Anisimova, "Efficacy of Aluminum Hydroxides as Inhibitors of Alkali-Silica Reactions," *Mater. Sci. Appl.*, vol. 04, no. 12, pp. 1–6, 2013, doi: 10.4236/msa.2013.412A001.
- [37] S.-Y. Hong and F. Glasser, "Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 7, pp. 1101–1111, Jul. 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00753-6.
- [38] M. Thomas, "The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1224–1231, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.11.003.
- [39] B. F. K.J. Folliard, R. Barborak, T. Drimalas, L. Du, S. Garber, J. Ideker, T. Ley, S. Williams, M. Juenger, "Preventing ASR/DEF in New Concrete," 2006.
- [40] R. B. Figueira et al., "Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods," *Constr. Build. Mater.*, vol. 222, pp. 903–931, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.230.
- [41] R. Hay and C. P. Ostertag, "New insights into the role of fly ash in mitigating alkali-silica reaction (ASR) in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 144, p. 106440, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106440.
- [42] D. Demir, Şahin, M. Çullu, and H. Eker, "Betona Eklenen Uçucu Külün Aşındırma ve Karbonatlaşma Üzerine Etkisi," *Eur. J. Sci. Technol.*, pp. 1150–1163, Dec. 2019, doi: 10.31590/ejosat.654733.
- [43] Türk Standartlar Enstitüsü, "TS EN 196-3: Çimento deney yöntemleri - Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini," Ankara, Türkiye, 2017.
- [44] Turkish Standards Institution, "TS EN 450-1: Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri," Ankara, Türkiye, 2013.
- [45] S. Oruji et al., "Mitigation of ASR expansion in concrete using ultra-fine coal bottom ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 202, pp. 814–824, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.013.
- [46] S. Ramjan, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, C. Chee Ban, P. Jitsangiam, and T. Suwan, "Influence of Cement Replacement with Fly Ash and Ground Sand with Different Fineness on Alkali-Silica Reaction of Mortar," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 6, p. 1528, Mar. 2021, doi: 10.3390/ma14061528.
- [47] C.-S. Shon, D. G. Zollinger, and S. L. Sarkar, "Evaluation of modified ASTM C 1260 accelerated mortar bar test for alkali-silica reactivity," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 12, pp. 1981–1987, Dec. 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00903-1.
- [48] T. C. Esteves, R. Rajamma, D. Soares, A. S. Silva, V. M. Ferreira, and J. A. Labrincha, "Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 687–693, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.075.
- [49] S. Hsu, M. Chi, and R. Huang, "Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 176, pp. 250–258, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.060.
- [50] S. Hsu, M. Chi, and R. Huang, "Influence of Fly Ash Fineness and High Replacement Ratios on Concrete Properties," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 9, 2019.