

Editör

Doç. Dr. Berivan YILMAZER POLAT

gece
kitaplığı

**Yapı Malzemeleri
Alanında
Uluslararası
Araştırmalar ve
Değerlendirmeler**

**Ekim
2025**

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Gece Kitaplığı

Birinci Basım / First Edition • © Ekim 2025

ISBN • 978-625-388-800-8

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Gece Kitaplığı. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Gece Kitaplığı / Gece Kitaplığı

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 0312 384 80 40

web: www.gecekitapligi.com

e-mail: gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 42488

YAPI MALZEMELERİ
ALANINDA
ULUSLARARASI
ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER

EDİTÖR

DOÇ. DR. BERİVAN YILMAZER POLAT

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

TAMAMLAYICI ÇİMENTO MALZEMELERİNİN ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONUNUN KONTROLÜNDEKİ ROLÜ

Korkmaz Yıldırım—1

Bölüm 2

BİYOKÜTLE KÜLÜNÜN BETON VE HARÇLARDA ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU OLUŞUMUNDA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Korkmaz Yıldırım—19

Bölüm 3

BİYOKÜTLE KÜLÜ KATKILI BETON NUMUNELERİNDE BASINÇ DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI

Yüksel Furkan YILDIRIM—35

Bölüm 1

TAMAMLAYICI ÇİMENTO MALZEMELERİNİN ALKALİ-SİLİKA REAKSİYONUNUN KONTROLÜNDEKİ ROLÜ

Korkmaz Yıldırım¹

¹ Dr.Öğr.Üyesi Korkmaz YILDIRIM, Kurumu: Aydın Adnan Menderes Üniversitesi,
Aydın Meslek Yüksekokulu, Orcid No: 0000-0002-7470-2297

GİRİŞ

Beton, dünya genelinde çok yaygın kullanılan kompozit yapı malzemesidir. Çimento, agrega, su ve tamamlayıcı çimento malzemelerinin birleşimiyle oluşan beton, modern inşaat sektörünün temelini oluşturmaktadır. Betonun en önemli bileşeni olan Portland çimentosunun üretim maliyetini düşürmek, yakıt ve hammadde tüketimini azaltmak, çevreyi korumak ve kaliteyi artırmak amacıyla çok sayıda çalışma yürütülmektedir. Bu kapsamda, Portland çimentosunun kısmen tamamlayıcı çimento malzemeleri ile ikame edilmesi sonucunda düşük maliyetli, enerji yönünden verimli ve çevre dostu, endüstriyel atık malzemelerin kullanımı önemli bir çözüm olarak görülmektedir.

(Dwivedi, Singh, Das, ve Singh, 2006) Tamamlayıcı çimento malzemeleri (TÇM), doğal oluşumlu malzemeler, endüstriyel yan ürünler veya atıklar olabilir. Uçucu kül (UK), silis dumanı (SF), yüksek fırın cürufu (GGBS), pirinç kabuğu külü (RHA) ve metakaolin (MK) bu malzemelere örnek olarak gösterilebilir. Tamamlayıcı çimento malzemeler yüksek dayanımlı ve performansı yüksek beton üretiminde yaygın biçimde kullanılmakta olup, Portland çimentosu ile birlikte kullanıldığında kompozit çimentoları oluşturmaktadır.

Yıldırım (2013)'e göre, Büyük beton yapıların zamanla bozulma eğilimi gösterdiği bilinmektedir. Bu bozulmanın en önemli nedenlerinden biri, çimento hamuru ile reaktif silisli agregalar arasında gerçekleşen **alkali-silika reaksiyonu (ASR)**'dur. Çimentoda bulunan Na^+ ve K^+ alkallileri, agregadaki reaktif silis ile nemin etkileşimi sonucu alkali-silika jeli oluşur. Bu jel genişleyerek çatlaklara ve ciddi yapısal bozulmalara yol açar.

Mather (1999)'a göre, Uzun vadede ASR, barajlar ve köprüler gibi kritik altyapı yapılarında ciddi hasarlara neden olabilmektedir. ASR kaynaklı çatlaklar genellikle yapının hizmet ömrünün ileri dönemlerinde ortaya çıkar. Reaktif agregalı betonlarda genleşme ve hasar seviyesi, betonun alkali içeriği ile agreganın reaktivitesine bağlıdır. Çoğu durumda çatlaklar 5–10 yıl arasında belirginleşirken, Stewart Barajı gibi yapılarda yaklaşık 30 yıl sonra ASR hasarı rapor edilmiştir.

(Back, Thorsen, ve Nielsen, 1993) Bununla birlikte, birkaç yıllık yapılarda veya yüz yıllık yapılarda da hasar gözlenebilmektedir. (Leger, Cote, ve Tinawi, 1996) Sertleşmiş betonlarda ASR sonucu oluşan genleşmeler, iç çatlak ve deformasyonlara neden olarak dayanıklılığı olumsuz etkilemektedir.

(Fernandes, Noronha, ve Teles, 2004) Örneğin, Portekiz'deki Cabril Barajı'ndan alınan 50 yıllık beton numunelerinde granit agregaların kul-

lanımı nedeniyle ASR bozulmaları saptanmıştır.

ASR'nin erken dönemde tespiti, küçük ölçekli onarım ve rehabilitasyonlarla yapıların hizmet ömrünü uzatmada önemli ekonomik avantajlar sağlayabilir. İlk olarak 1940'lı yıllarda Amerika'da tanımlanan ve günümüzde birçok ülkede görülen bu olguya ilişkin kapsamlı araştırmalara rağmen mekanizması tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır.

(Sağlık, Kocabeyler, Orkun, Halıcı, ve Tunç, 2003) Alkali-silika reaksiyonu (ASR), harçlarda ve beton yapılarda gözlenen önemli bir bozulma mekanizmasıdır. Çimentoda ve tamamlayıcı çimento malzemelerinde bulunan alkalilerle ilişkili hidroksil (OH^-) iyonları ile, farklı boyutlarda bulunabilen reaktif silisli agregalar arasında gerçekleşen kimyasal etkileşim sonucunda alkali-silika jeli oluşur. Bu jel, nem absorbe ettiğinde genişlerken çimento hamuru ve agrega taneleri içerisinde çatlaklara yol açmaktadır.

(Sağlık, Kocabeyler, Orkun, Halıcı, ve Tunç, 2003) ASR sonucu betonun su emme kapasitesi artmakta, artan jel oluşumu çatlakların ilerlemesine ve özellikle agrega-çimento ara yüzeyindeki bağın zayıflamasına neden olmaktadır. Bu durum, zamanla betonun parçalanmasına ve dayanıklılığının azalmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla ASR, kimyasal ve yapısal olarak verdiği hasar açısından araştırılması gereken kritik bir olgu olarak değerlendirilmektedir. Agregada tanelerinin boyutları reaksiyon hızında belirleyici bir faktördür. Küçük boyutlu taneler genellikle 1-2 ay gibi kısa sürede genişlemeye neden olurken, daha büyük boyutlu tanelerin reaksiyonları yıllar sonra ortaya çıkabilmektedir.

(Hobbs, 1988 - Diamond, ve Penko, 1992) Araştırmacıların büyük çoğunluğu, ASR'nin temel mekanizmasının, agregada mevcut amorf veya zayıf kristalize silislerin gözenek çözeltisindeki OH^- iyonları ile reaksiyona girmesi olduğunu kabul etmektedir.

(Diamond, (1983)' a göre, Betonun hidratasyon sürecinde kalsiyum iyonları erken aşamada hidratasyon ürünleri ile birleşirken, sodyum ve potasyum iyonları çözeltide serbest halde kalmaktadır. Bu alkaliler, zamanla kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) yapısıyla kısmen birleşerek monosülfat fazlarının oluşumuna katkıda bulunmaktadır.

Ancak betonda hasara neden olan üç temel unsur; gözenek çözeltisindeki alkaliler, reaktif silis içeren agregalar ve su olarak özetlenebilir. Bu nedenle, ASR kaynaklı bozulmaların azaltılması amacıyla tamamlayıcı çimento malzemelerinin kullanımı üzerine yapılan araştırmalar önemini korumaktadır.

Bu çalışma içeriğinde, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve biyokütle külü olmak üzere üç farklı tamamlayıcı çimento malzemesinin, aktif al-kali-silis içeren agregalarda ASR oluşumuna etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1 Malzeme Hazırlığı;

2.1.1 Agregası

Bu çalışmada kullanılan agregası, Sakarya Nehri'nin Geyve ilçesi yakınlarında bulunan bir kum-çakıl ocağından elde edilmiş, tane boyutu 0–7 mm aralığındadır. Agreganın aktif silis içeriği, ASTM C289 ve TS 2517 standartlarına uygun kimyasal analiz yöntemleri ile belirlenmiştir. Analiz sonuçları, agreganın zararlı bölgede yer aldığını göstermiştir. Elde edilen bulgular Tablo 1'de sunulmaktadır (ASTM C289-94 (1994) - (TS 2517. (1977)).

Tablo 1. TS 2517'ye Uygun Yapılan Kimyasal Agregası ASR Raporu

NaOH (Consumed)	350 (mmol/L)
SiO ₂ (Solved)	700 (mmol/L)
Result	III. Zone (Hazardous aggregate)

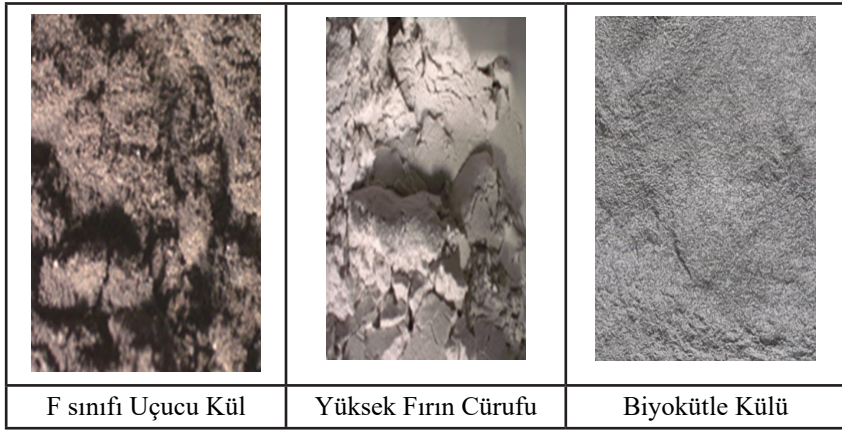
2.1.2. Çimento ve Puzolanlar

ASR deneylerinde kullanılan CEM I 42.5 R tipi çimento ile biyokütle külü, yüksek fırın cürufu ve uçucu külün kimyasal analiz sonuçları Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Çimento, Biyokütle Külü, Yüksek Fırın Cürufu ve F sınıfı Uçucu Küle ait Kimyasal analiz değerleri

		CEM I 42,5 R (12/03/2025)	Biyokütle Külü	Yüksek fırın cürufu	F sınıfı Uçucu kül
H ₂ O	%	0,22	0,46	----	----
Serbest Kireç	%	2,21	2,16	----	----
Kızdırma Kaybı	%	3,60	7,43	0.21	2.01
CaO	%	62,22	19, 27	28.79	3.4
SiO ₂	%	19,09	30,28	19.95	35.27
Al ₂ O ₃	%	4,74	6,26	5.12	14.81
Fe ₂ O ₃	%	3,20	2,39	3.75	2.13

MgO	%	2,93	8,19	8.32	4.09
SO ₃	%	3,03	0,07	0.51	0.99
Na ₂ O	%	0,38	2,53	0.50	0.00
K ₂ O	%	0,67	12,26	1.17	2.53
Na ₂ O Eşdeğer	Hsp.	0,82	10,60	1.27	1.66
Cl-	%	0,0219	1,4703	-----	----
32 Mikron	%	10,00	-----	-----	-----
45 Mikron	%	-----	68,00	0.20	27.25
90 Mikron	%	0,60	47,10	-----	----
Özgül Ağırlık		3,12	2, 58	2.95	1.98
Blaine (cm ² /gr)		3667	6789	5074	4020



Şekil 1. Harç Gruplarında Kullanılan Mineral Katkı Görüntüleri

2.1.3. Agregaların Potansiyel Alkali Reaktivitesi İçin Deney Metodu (ASTM-C 1260 Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi)

Agregaların potansiyel alkali reaktivitesini belirlemek için ASTM C1260 Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi uygulanmaktadır. (ASTM C1260-94 -1994) Bu yöntem kapsamında deney süresi toplam 16 gündür ve elde edilen genleşme değerleri aşağıdaki kriterlere göre değerlendirilmiştir:

16 gün sonundaki genleşme %0.10'un altında ise agregalar zararsız kabul edilir.

16 gün sonundaki genleşme %0.20'nin üzerinde ise agregalar potansiyel olarak zararlı kabul edilir.

16 gün sonundaki genleşme %0.10–%0.20 aralığında ise agregalar, şantiye koşullarında hem zararlı hem de zararsız davranış gösterebilir.

Bu durumda, değerlendirmelerin daha güvenilir olması için deney süresinin 28 güne kadar uzatılması önerilmektedir.

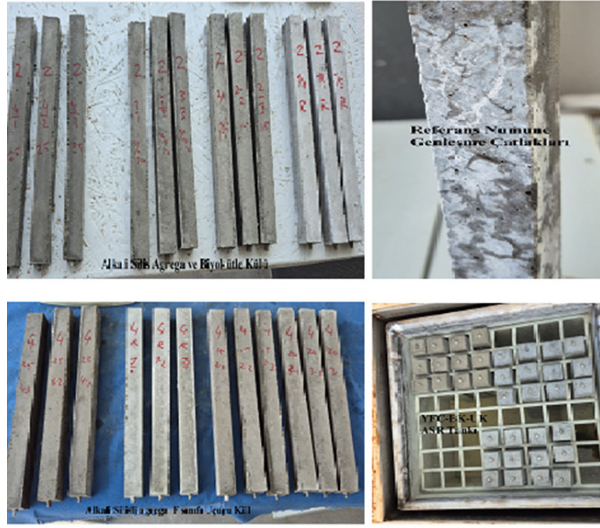
2.1.4. Numune gruplarının hazırlığı

ASTM C227 standardında belirtilen karışım oranlarına uygun olarak agrega elenmiş ve deneylerde kullanılacak uygun granülometri elde edilmiştir. Çimento ile belirli oranlarda yer değiştirilen puzolanların (%15, %20 ve %25) kullanımıyla, aynı standarda uygun harç çubukları hazırlanmıştır. Karışımlarda yayılma değeri 120–150 mm arasında olacak şekilde ayarlanmış, su/çimento oranı (S/Ç) ise 0,50 olarak sabitlenmiştir.

Elde edilen harçlar, 25×25×285 mm boyutlarındaki prizmatik kalıplara yerleştirilmiş ve her bir grup için en az dört adet numune üretilmiştir. (ASTM C227-97-1994). Referans karışım ile farklı puzolan oranlarında hazırlanan numunelerin malzeme bileşimleri Tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3. ASR Deney numunelerine ait malzeme karışım değerleri

Katkı oranları	Agrega (gr)	Çimento (gr)	Mineral katkı (gr)	Su (gr)	S/Ç
Referans numune	1320	450,00	---	225	0,50
K1 %15 İkameli	1320	382,50	67,50	225	0,50
K2 %20 İkameli	1320	360,00	90,00	225	0,50
K3 %25 İkameli	1320	337,50	112,50	225	0,50



Şekil 2. Harç Gruplarında Deneysel Aşama Görüntüleri

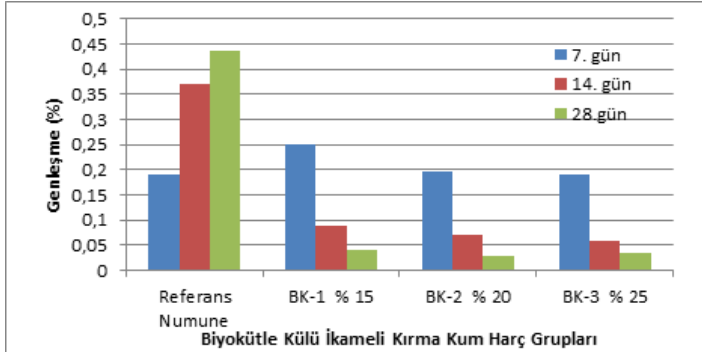
BULGULAR VE TARTIŞMA

Alkali Silis İçeren Agregası Malzemesi İle Biyokütle Külü İkameli Hazırlanan Numunelerde ASR Oluşumu;

Çalışma kapsamında hazırlanan referans karışım ile biyokütle külü katkılı numunelere ait genleşme sonuçları Tablo 4'te, alkali-silika reaksiyonu (ASR) oluşumuna ilişkin grafiksel veriler ise Şekil 3'de sunulmaktadır.

Tablo.4 Biyokütle Külü katkılı harç gruplarında ASR deneyi genleşme değerleri

	Referans Numune	BK-1 % 15	BK-2 % 20	BK-3 % 25
7. gün	0,191	0,251	0,196	0,19
14. gün	0,37	0,0898	0,0694	0,0596
28.gün	0,437	0,0407	0,0288	0,0351



Şekil 3. Biyokütle Külü katkılı harç gruplarında ASR oluşum grafiği

ASTM C1260 hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları, maksimum standart değer olan %0,20 esas alınarak değerlendirilmiştir. Biyokütle külü katkılı harç gruplarının 14 ve 28 günlük genleşme değerlerinin bu sınırın altında kaldığı görülmüştür.

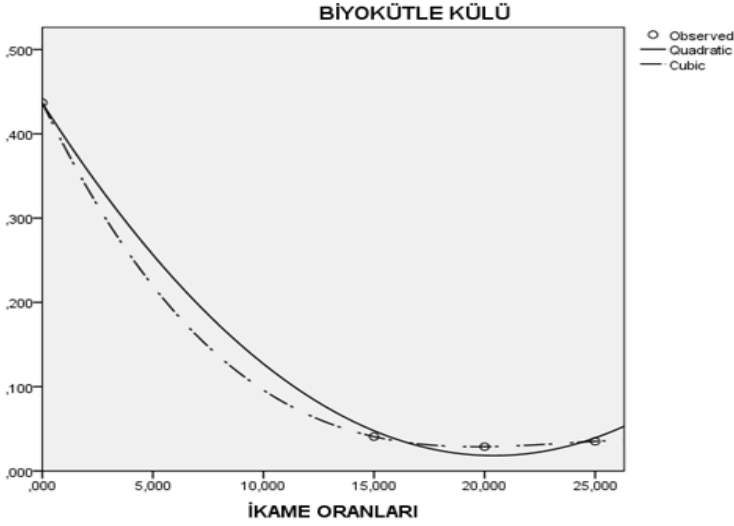
Yedi günlük ölçümlerde ise %15 ikameli BK-1 grubunda genleşme %0,25 seviyesinde gerçekleşirken, %20 ikameli BK-2 ve %25 ikameli BK-3 gruplarında bu değer %0,19 seviyesinde kalmıştır.

Yirmi sekiz gün sonundaki sonuçlar, referans karışımla kıyaslandığında;

%15 katkılı harç türünde genleşmenin yaklaşık %0,90 azaldığı,

%20 katkılı harç türünde yaklaşık %0,93 azaldığı,

%25 katkılı harç türünde ise yaklaşık %0,92 oranında azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. Varyans Analizi Biyokütle Külü katkılı harç gruplarında ASR oluşum grafiği

Gerçekleştirilen deney sonuçları üzerinde, biyokütle külü ikamesinin ASR üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Analizler, biyokütle külü katkılı tüm numunelerde, referans numuneye kıyasla ASR genişleme değerlerini azalttığı görülmüştür.

Grafiğe göre, reaktif agrega kullanılan harçlarda biyokütle külü ikamesinin ASR oluşumunu önemli ölçüde sınırladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, bu yaklaşım atıkların değerlendirilmesi ve yenilenebilir malzemelerin kullanımının artırılması açısından da önemli faydalar sağlamaktadır.

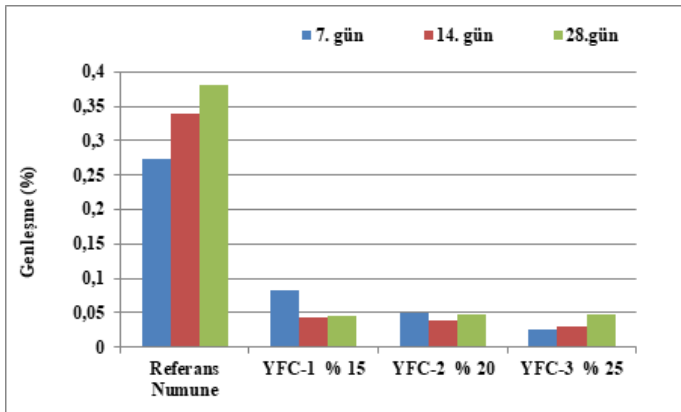
Literatürde ASR performansında benzer araştırmalar rapor edilmiştir. Esteves vd. (2012)' göre, biyokütle uçucu külü katkılı harçlarda ASR genişmesinin referansa kıyasla belirgin şekilde azaldığını, ancak değerlerin ASTM sınırlarının üzerinde kaldığını bildirmiştir. Bununla birlikte, %20 biyokütle uçucu külü (BFA) ile %10 metakaolin (MK) birlikte kullanıldığında genişlemenin önemli ölçüde düştüğü ve ASR'nin etkin biçimde kontrol altına alındığı belirtilmiştir. Ramos vd. (2013) ise odun atığı külü (WWA) katkısının ASR üzerindeki etkilerini incelemiş ve %10 ile %20 ikame oranlarında genişlemenin sırasıyla yaklaşık %18 ve %60 oranında azaldığını rapor etmiştir. ASTM C1567 standardına göre 14 gün sonunda zararlı kabul edilen %0,10 sınır değerinin, %20 WWA katkısıyla altına inildiği ve böylece düşük riskli bir bağlayıcı-agrega kombinasyonu elde edildiği ifade edilmiştir.

Alkali Silis İçeren Agregalı Malzemesi İle Yüksek Fırın Cürufu İkameli Hazırlanan Numunelerde ASR Oluşumu

Çalışma kapsamında hazırlanan referans karışım ile yüksek fırın cürufu katkılı numunelere ait genleşme sonuçları Tablo 5'te, alkali-silika reaksiyonu (ASR) oluşumunu gösteren grafiksel veriler ise Şekil 5'de sunulmaktadır.

Tablo.5 Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harç Gruplarında ASR Deneyi Genleşme Değerleri

	Referans Numune	YFC-1 % 15	YFC-2 % 20	YFC-3 % 25
7. gün	0,273576	0,082101	0,048827	0,024476
14. gün	0,33956	0,042205	0,037959	0,030227
28.gün	0,380536	0,044476	0,048461	0,046765



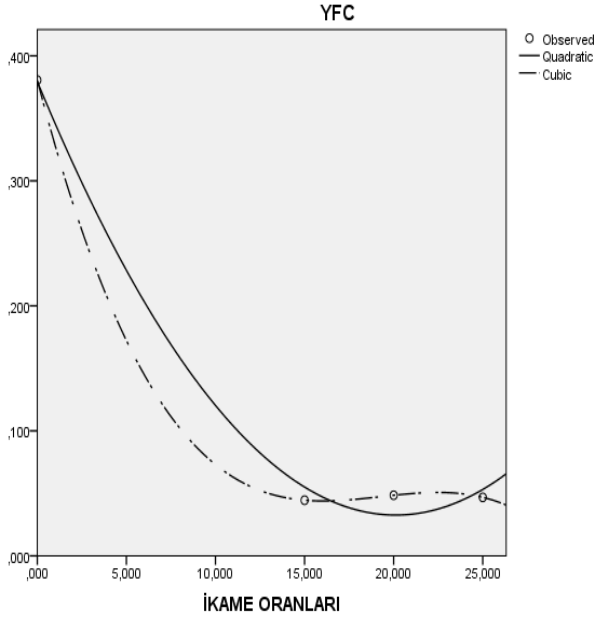
Şekil 5. Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harç Gruplarında ASR Oluşum Grafiği

Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi genleşme değerleri, maksimum standart değer olan %0,20 esas alınarak değerlendirilmiştir. Yüksek fırın cürufu katkılı harç gruplarının 14 ve 28 günlük ASR genleşme değerlerinin referans numuneye kıyasla daha düşük olduğu ve standart sınır değerinin altında kaldığı belirlenmiştir.

Deney sonuçlarına göre, 7, 14 ve 28 gün sonunda referans karışımla karşılaştırıldığında;

%15 katkılı harç grubunda genleşmenin yaklaşık %0,88 oranında azaldığı,

%20 katkılı harç grubunda yaklaşık %0,87 oranında azaldığı,
 %25 katkılı harç grubunda ise yaklaşık %0,88 oranında azalttığı,



Şekil 6. Varyans Analizi Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harç Gruplarında ASR Oluşum Grafiği

Gerçekleştirilen deney sonuçları üzerinde, yüksek fırın cürufu (YFC) ikamesinin ASR performansını değerlendirmek amacıyla varyans analizi yapılmış. Bulgular, YFC katkılı tüm numunelerde referans karışımlara kıyasla ASR genleşme değerlerinin azaldığını ve bu değerlerin standart sınırın altında kaldığını göstermektedir. Bu sonuçlar, reaktif agrega kullanılan harçlarda YFC ikamesinin ASR oluşumunu önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir.

Literatürde ASR performansında benzer araştırmalar rapor edilmiştir. Fernandez-Jimenez ve Puertas, (2012)'göre, reaktif agrega içeren yüksek fırın cürufu çimentolu harçlarda genleşme davranışını incelemiş ve normal Portland çimentolu harçlarla karşılaştırıldığında, cüruf katkılı numunelerde genleşmenin daha düşük hızda gerçekleştiğini bildirmiştir.

Hooton, (2000)' göre, Ayrıca, 1989'da Ontario'daki Magpie Nehri üzerinde yapılan çalışmalarda, bazı baraj ve hidroelektrik santrallerinde çimentonun %50 oranında YFC ile ikame edilmesiyle, yıllar sonra gözlemlenen çatlakların önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Buna karşılık,

aynı dönemde normal Portland çimentosu ile inşa edilen yakındaki bir karayolu köprüsünde ciddi ASR çatlakları rapor edilmiştir.

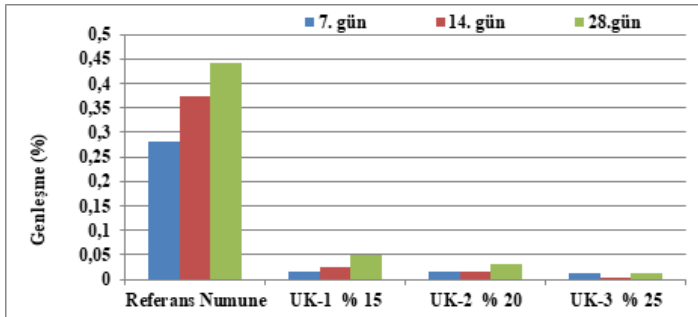
Yıldırım (2013)'e göre, Yapılan araştırmalar ayrıca, YFC katkısının özellikle erken yaşlarda (örneğin 28 gün) harç çubuklarındaki genleşmeyi belirgin şekilde azalttığını göstermektedir. YFC'nin %30'un üzerinde ikame edilmesi durumunda, A1 agregasıyla üretilen numunelerde ASR kaynaklı genleşmenin referans karışıma göre yaklaşık %78 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Alkali Silis İçeren Agregalı Malzemesi İle F sınıfı Uçucu Kül İkameli Hazırlanan Numunelerde ASR Oluşumu;

Çalışma kapsamında hazırlanan referans karışım ile F sınıfı uçucu kül katkılı numunelere ait genleşme sonuçları Tablo 6'da, alkali-silika reaksiyonu (ASR) oluşumunu gösteren grafiksel veriler ise Şekil 7'te sunulmaktadır.

Tablo.6 F sınıfı Uçucu Kül Katkılı Harç Gruplarında ASR Deneyi Genleşme Değerleri

	Referans Numune	UK-1 % 15	UK-2 % 20	UK-3 % 25
7. gün	0,280906	0,016868	0,014776	0,01415
14. gün	0,375416	0,025211	0,016116	0,001795
28.gün	0,442731	0,050409	0,031231	0,013825



Şekil 7. F sınıfı Uçucu Kül Katkılı Harç Gruplarında ASR Oluşum Grafiği

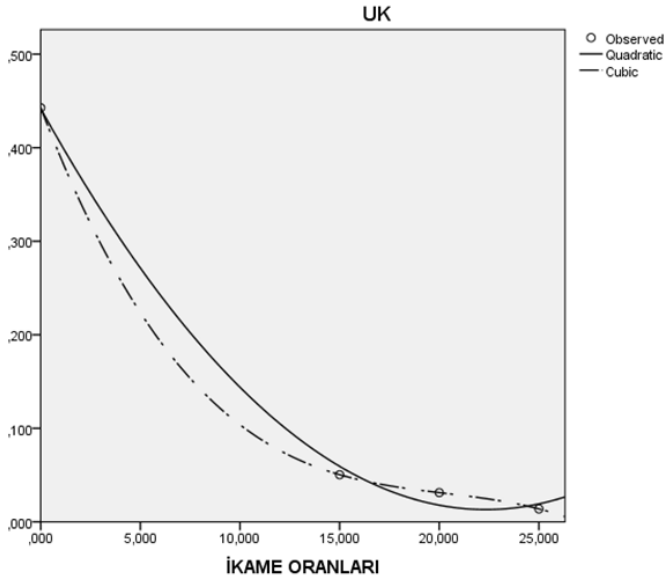
Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi genleşme sonuçları, maksimum standart değer olan %0,20 esas alınarak değerlendirilmiştir. Uçucu kül katkılı harç gruplarının 14 ve 28 günlük genleşme değerlerinin, referans numuneye kıyasla belirgin şekilde azaldığı ve standart sınırın oldukça altında kaldığı görülmüştür.

Deney genleşme değerlerine göre, 7, 14 ve 28 gün sonrasında referans karışımla karşılaştırıldığına;

%15 katkılı harç grubunda genleşmenin yaklaşık %0,89 oranında azaldığı,

%20 katkılı harç grubunda yaklaşık %0,93 oranında azaldığı,

%25 katkılı harç grubunda ise yaklaşık %0,97 oranında azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 8. Varyans Analizi F Sınıfı Uçucu Kül Katkılı Harç Gruplarında ASR Oluşum Grafiği

Gerçekleştirilen deney sonuçları üzerinde, F sınıfı uçucu kül ikamesi- nin ASR üzerindeki performansını değerlendirmek amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Bulgular, uçucu kül katkılı tüm numunelerde, referans numuneye kıyasla ASR genleşme değerlerinde azalma meydana geldiğini ve bu değerlerin standart sınırın altında kaldığını göstermektedir. Bu durum, reaktif agrega içeren harçlarda uçucu kül kullanımının ASR oluşu-

munu önemli ölçüde sınırladığını ortaya koymuştur.

Yıldırım (2013)'e göre, Literatürde ASR performansında benzer araştırmalar rapor edilmiştir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis du-manı ve metakaolin gibi mineral katkıların çimentoya belirli oranlarda ikame edilmesiyle ASR'nin önlenemediği çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir. Örneğin, uçucu külün harçlarda %25'in üzerinde kullanılmasıyla, A1 agregasında referans numuneye kıyasla ASR'nin yaklaşık %76 oranında azaldığı rapor edilmiştir.

(Sağlık, Kocabeyler, Orkun, Halıcı, ve Tunç, 2003) Deriner Barajı ve HES inşaatında kullanılacak agregalarda alkali-silis reaksiyonuna bağlı hasarların azaltılmasına yönelik deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Farklı oranlarda reaktif silis içeren agregalar kullanılarak, çimento yerine çeşitli oranlarda F sınıfı uçucu kül ikame edilmiştir. Deney sonuçları, kırmataş ince agrega ile en az %25 ve doğal şekillenmiş ince agrega ile en az %35 oranında uçucu kül kullanımının ASR'yi büyük ölçüde önlediğini göstermiştir..

(Chunxiang, Hongding, ve Mingshu, (1994)' göre, Benzer şekilde, Chunxiang vd, da uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun, alkaliler ile agregalar arasındaki kimyasal reaktiviteyi azalttığını gözlemlemiştir.

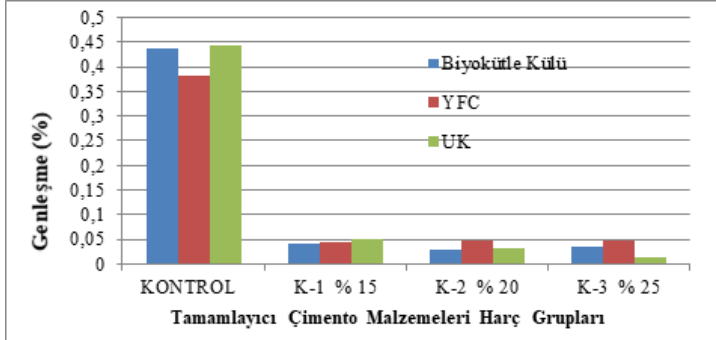
SONUÇLAR

Son yüzyılda hızla artan dünya nüfusu ve kentleşme, inşaat sektöründe yüksek düzeyde talep yaratmıştır. Beton, dünya genelinde çok yaygın kullanılan kompozit yapı malzemesidir. Çimento esaslı beton kullanımının artmasına paralel olarak, gelecekte yapılarda oluşabilecek bozulmaların önlenmesi amacıyla 19. yüzyılın sonlarından itibaren çimento ve çimento esaslı ürünler üzerine kapsamlı araştırmalar yürütülmektedir. Büyük ölçekli beton yapıların zamanla bozulma eğilimi gösterdiği bilinmektedir. Bu bozulmanın başlıca nedenlerinden biri, çimento hamuru ile bazı reaktif silisli agregalar arasında gerçekleşen ve kullanılan malzeme özellikleri ile çevresel koşullara bağlı olarak önemli genleşmelere yol açabilen alkali-silika reaksiyonudur (ASR). Uzun vadede bu süreç, barajlar ve köprüler gibi kritik altyapı yapılarında ciddi hasarlara neden olabilmektedir.

Bu çalışmada, aktif alkali-silis içeren agregalar kullanılarak, farklı puzolanların ASR üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel program kapsamında, aktif silis içeren agrega malzemesi ile %15, %20 ve %25 oranlarında çimento ikamesi yapılarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve

biyokütle külünün ASR oluşumunda performansı değerlendirilmiştir.

Çalışmamızda üç farklı puzolan, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve biyokütle külü, çimento ile belirli oranlarda yer değiştirilerek kullanılmıştır. Sabit koşullar altında yürütülen deneysel çalışmalar, söz konusu mineral katkıların alkali-silika reaksiyonunu (ASR) önemli ölçüde azalttığını göstermiştir.(Şekil 7)



Şekil 9. Tamamlayıcı Çimento Malzemeli Harç Gruplarında ASR Genleşme Değerleri

Referans karışımında 28 gün sonunda ölçülen genleşmenin standart sınır değer olan %0,20'nin üzerinde gerçekleşmesi, kullanılan agreganın zararlı grupta yer aldığını ortaya koymuştur. Buna karşılık, biyokütle külü katkılı numunelerde 28 gün sonunda genleşme değerinin yaklaşık %0,90–0,93 aralığında azaldığı; yüksek fırın cürufu katkılı numunelerde 7, 14 ve 28 gün süresince %0,87–0,88 oranında azalma sağlandığı; uçucu kül katkılı numunelerde ise genleşmenin %0,89–0,97 aralığında azaldığı belirlenmiştir. Genel olarak, her üç mineral katkının da referans karışıma kıyasla ASR'yi %87 ile %97 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar, tamamlayıcı çimento malzemelerinin yalnızca ASR kaynaklı hasarların önlenmesinde değil, aynı zamanda sürdürülebilir inşaat uygulamalarının geliştirilmesinde, iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasında ve kaynak verimliliğinin artırılmasında da kritik bir rol üstlendiğini göstermektedir.

Teşekkür

Yazar, bu çalışmaya malzeme ve laboratuvar desteği sağlayan Mavi Bayrak - Biyokütle Enerji Santrali, Batı Söke Çimento Fabrikası ve Oyak Hazır Beton Aydın Tesisleri'ne değerli katkılarından dolayı minnettarlığını sunar.

KAYNAKLAR:

- Dwivedi, V. N., Singh, N. P., Das, S. S., & Singh, N. B. (2006). A new pozzolanic material for cement industry: Bamboo leaf ash. *International Journal of Physical Sciences*, 1(3), 106–111.
- Yıldırım, K. (2013). *Betonda alkali silika reaksiyonunun azaltılmasında mineral katkı kombinasyonlarının optimizasyonu* (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Mather, B. (1999). How to make concrete that will not suffer deleterious alkali-silica reactions. *Cement and Concrete Research*, 29, 1277–1280.
- Back, F., Thorsen, T. S., & Nielsen, M. P. (1993). Load-carrying capacity of structural members subjected to alkali-silica reactions. *Construction and Building Materials*, 7(2), 109–115.
- Leger, P., Cote, P., & Tinawi, R. (1996). Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dams. *Computers and Structures*, 60(4), 601–611.
- Fernandes, I., Noronha, F., & Teles, M. (2004). Microscopic analysis of alkali-aggregate reaction products in 50-year-old concrete. *Materials Characterization*, 53, 295–306.
- Sağlık, A., Kocabeyler, M., Orkun, Y., Halıcı, M., & Tunç, E. (2003). Deriner Barajı ve HES inşaatı kütle betonunda kullanılması planlanan agregalarda alkali-silis reaksiyonu riski ve önlenmesine yönelik yürütülen çalışmalar. 5. *Ulusal Beton Kongresi Bildirileri*.
- Hobbs, D. W. (1988). *Alkali-silica reaction in concrete*. Thomas Telford.
- Diamond, S., & Penko, M. (1992). Alkali-silica reaction processes: The conversion of cement alkalis to alkali hydroxide. In G. M. Idorn (Ed.), *International symposium on durability of concrete* (ACI SP-131).
- Diamond, S. (1983). Alkali reactions in concrete pore solutions effects. In G. M. Idorn & S. Rostam (Eds.), *Proceedings of the 6th International Conference on Alkalis in Concrete* (pp. 155–166).
- ASTM C289-94. (1994). *Standard test method for potential reactivity of aggregates (Chemical method)*. Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Aggregates, 4(2), 157–163. Philadelphia, PA: ASTM.

- TS 2517. (1977). *Alkali agrega reaktivitesinin kimyasal yolla tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- ASTM C1260-94. (1994). *Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method)*. Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Aggregates, 4(2), 650–653. Philadelphia, PA: ASTM.
- ASTM C227-97. (1994). *Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (Mortar-Bar Method)*. Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, 4(2), 126–130. Philadelphia, PA: ASTM.
- Esteves, T. C., Rajamma, R., Soares, D., Silva, A. S., Ferreira, V. M., & Labrincha, J. A. (2012). Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 26(1), 687–693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.075>
- Ramos, T., Matos, A. M., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Mortar with wood waste ash: Mechanical strength, carbonation resistance and ASR expansion. *Construction and Building Materials*, 49, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.026>
- Fernandez, A., & Jimenez, P. F. (2002). The alkali-silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, 32, 1019–1024.
- Hooton, R. D. (2000). Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(4), 754–760.
- Chunxiang, Q., Hongding, G., & Mingshu, T. (1994). Mechanism of mineral admixture suppressing alkali-silica reaction: Part I, corrosion degree of reactive aggregate in blended cement pastes and its correlations with expansion value and electric resistance change. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 1111–1120.

Bölüm 2

BİYOKÜTLE KÜLÜNÜN BETON VE HARÇLARDA ALKALİ SİLİKA REAKSİYONU OLUŞUMUNDA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Korkmaz Yıldırım¹

¹ Dr.Öğr.Üyesi Korkmaz YILDIRIM, Kurumu: Aydın Adnan Menderes Üniversitesi,
Aydın Meslek Yüksekokulu, Orcid No: 0000-0002-7470-2297

1. GİRİŞ:

Betondaki çimentonun diğer yapı malzemeleriyle kısmen değiştirilmesi, endüstriyel atık ve sürdürülebilir yapı uygulamaları üzerine yapılan araştırmalar sayesinde gün yüzüne çıkmıştır.

İnşaat sektörünün vaz geçilmez yapı malzemesi olan beton ve türevleri üzerinde çimento esaslı ve tamamlayıcı çimento malzemeleri ile gelecekte inşaatların beton imalatlarında meydana gelebilecek bozulmaları önleme adına araştırma ve incelemeler günümüzde artarak devam etmektedir.

Alkali silika reaksiyonu (ASR) nedeniyle beton yapıların hasar görmesi, inşaat sektöründe önemli bir endişe kaynağı haline gelmiştir. ASR oluşumunun ardındaki mekanizmalar hala tam olarak anlaşılamamıştır.

Bununla birlikte, Lane (1999)' göre, ASR jel ürününün, gözenek çözeltisinde bulunan alkali katyonlar (K^+ , Na^+) ve hidroksil grupları (OH^-) ile bazı agregalarda bulunan zayıf kristalleşmiş silisli mineraller arasındaki reaksiyonlarla oluştuğu yaygın olarak kabul edilmektedir.

Malvar, (2006), Hester ve ark., (2005)' göre, Bu jelin aşırı nem varlığında şişmesi, betonun genişmesine ve çatlamasına neden olur. Uçucu kül veya yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların kullanımının, ASR'den kaynaklanan zararlı genişmeleri kontrol altına almada etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır.

1-Dr.Öğr.Üyesi Korkmaz YILDIRIM, Kurumu: Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın Meslek Yüksekokulu, Orcid No: **0000-0002-7470-2297**

Biyobazlı harçlar, tarımsal yan ürünleri iyileştirme ve çimentolu malzemelerin çevresel etkisini azaltma fırsatı nedeniyle ilgi görmektedir.

Çimento esaslı malzeme alanında tarımsal kaynakların kullanımı, yenilenebilir yan ürünleri veya atıkları iyileştirmenin ve geliştirilen beton ve harçların çevresel etkisini sınırlamanın bir yoludur.

Dockter, (2003), Wang, (2007), Rajamma ve ark., (2009)' göre, Araştırmalar, bir diğer endüstriyel atık malzeme olan biyokütle uçucu külünün çimento yerine kullanılmasının önemli bir olasılık olduğunu kanıtlamıştır.

Ancak, biyokütle uçucu külü, kömür kökenli olmaması nedeniyle mevcut standartlara göre betona ilave edilmemektedir.

Son zamanlarda, yeni EN-450-1 standardı, belirli biyokütle malzemelerinin birlikte yakılmasıyla elde edilen uçucu külü toplam yakıtın kütlece

%20'sine kadar kapsamıştır.

Maciejewska ve ark., (2006), Dockter, (2009)'göre, Yüksek CaO içeriğine sahip C Sınıfı uçucu küllerin de ASR'yi azaltmada faydalı olduğu ve biyokütle uçucu küllerinin genellikle yüksek kalsiyumlu uçucu küller olduğu bildirilmiştir.

Bununla birlikte, biyokütle külündeki yüksek alkali içeriği, betondaki ASR açısından büyük bir endişe kaynağı gibi görünmektedir ve biyokütle uçucu külünün betonların ASR genleşmesindeki rolü hakkında detaylı bir araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışma, Aktif Silis içeren agrega ve Aydın ilinde kullanılan Kırma Kum agregası ile hızlandırılmış harç çubuğu testlerinin ASTM C1260 prosedürünü kullanarak biyokütle uçucu külünün ASR azaltma mekanizmasındaki rolünü tartışmayı amaçlamaktadır.

Araştırmada kullanılan biyokütle uçucu külü, kimyasal bileşimlerinin C sınıfı uçucu küle benzediği analiz sonucunda belirlenmiş, biyokütle külü endüstriyel enerji üretim santralinden alınmıştır.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

2.1.1. Agregalar

2.1.1.1. Kırma Kum;

Aydın Oyak Hazır beton tesisinden alınan 0-8mm aralığında Kırma Kum Agregaya ait Özgül Ağırlık (Kuru) 2,71 gr/cm³ dür.

Kırma kum standartta (ASTM C227) belirtilmiş gradasyona getirilir (Tablo 1).

Tablo.1. ASR Harç çubuğu deneyleri için agrega elek analizi oranları

Elek göz açıklığı, mm		Ağırlıkça, %
Elek üzerinden geçen	Elek üzerinden kalan	
4.75 (No.4)	2.36 (No.8)	10
2.36 (No.8)	1.18 (No.16)	25
1.18 (No.16)	0.60 (No.30)	25
0.60 (No.30)	0.30 (No.50)	25
0.30 (No.50)	0.15 (No.100)	15

Belirtilen gradasyona getirilen kırma kum tablo 2’de gösterildiği gibi gramaj ile 1320,000 gram şeklinde hazırlanır.

Tablo 2. Agregada Gradasyon malzeme karışım oran ve miktarları

Malzeme Türü	Elek Çapları					S/Ç	Su (ml)	Çimento (gr.)
	No:8	No:16	No:30	No:50	No:100			
	0-8 mm ince agregada							
% Oranı	%10	%25	%25	%25	%15			
Miktarı (gr)	100	250	250	250	150	0,45	199.8	444

2.1.1.2. Aktif Silis İçeren Agregada:

Agregada Alkali Reaktivitesinin Belirlendiği Sakarya Geyve-Pamukova’da bulunan kum çakıl ocağından alınan agregada üzerinde TS 2517 kimyasal metoduna (ASTM C289) göre ASR araştırması yapılmış olup ilgili standarda göre örnek agreganın 3. bölgede zararlı agregada olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Aktif Silis İçeren Agregada TS-2517/ASTM C-289 ASR kimyasal analiz raporu

Numunede istenen Tayinler	Alkali Agregada Reaktivitesi
Analiz Sonuçları:	
Harcanan NaOH	350 (mmol/L)
Çözünen Silis (SiO ₂)	700 (mmol/L)
Sonuç : TS 2517	III. Bölge Zararlı Agregada

2.2. Çimento ve Biyokütle Külü Özellikleri:

ASR Harç çubuklarının yapılmasında CEM1 42.5 R türü çimento kullanılmıştır ve deneyde kullanılan çimentonun alkali içeriği %0.6 Na₂O eşdeğeri 0,82 olan çimento kullanılmıştır.

Bu eşdeğer, çimento içerisinde bulunan sodyum oksit (Na₂O) yüzdesiyle potasyum oksit (K₂O) yüzdesinin 0.658 ile çarpılıp toplanmasıyla bulunan değerdir. (Denklem 5.1).

$$\%Na_2O + 0.658 \%K_2O$$

Denklem 5.1

$0,38 + (0,658 \times 0,67) = 0,82$ değeri standart %0,6 değerinin üzerindedir.

Tablo 4. Çimento Ve Biyokütle Külüne Ait Kimyasal Analiz Değerleri

		CEM I 42,5 R (12/03/2025)	Biyokütle Külü
H ₂ O	%	0,22	0,46
Serbest Kireç	%	2,21	2,16
Kızdırma Kaybı	%	3,60	7,43
CaO	%	62,22	19, 27
SiO ₂	%	19,09	30,28
Al ₂ O ₃	%	4,74	6,26
Fe ₂ O ₃	%	3,20	2,39
MgO	%	2,93	8,19
SO ₃	%	3,03	0,07
Na ₂ O	%	0,38	2,53
K ₂ O	%	0,67	12,26
Na ₂ O Eşdeğer	Hsp.	0,82	10,60
Cl-	%	0,0219	1,4703
32 Mikron	%	10,00	-----
45 Mikron	%	-----	68,00
90 Mikron	%	0,60	47,10
Özgül Ağırlık		3,12	2, 58
Blaine		3667	6789



Şekil.1 Biyokütle Hammadde Ve Külü Foto Görüntüleri

2.3. Metot: Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi (HHÇD) (ASTM C1260)

ASTM C1260 “Agregaların Potansiyel Alkali Reaktivitesi için Deney Metodu (Hızlandırılmış Harç Çubuğu Deneyi)” olarak geçen bu deney, diğer genleşme deneylerinin sürelerine bakarak kısa sürmesi sebebiyle avantajlıdır. Deney uygulama metodu, yüksek alkalın içeren çözelti içerisinde yüksek sıcaklıkta bekletilen harç çubuğu örneklerindeki boy değişiminin ölçülmesi prensibine dayanır (ASTM C1260-94-1994) .

Harç çubukları ASTM C-227’de belirtilen esaslara uygun olarak hazırlanır. Standartta belirtilen gradasyondaki agrega, agrega/çimento oranı 2.25 olacak şekilde, su/çimento oranı, S/C 0.47 olan harç karışımı hazırlanır. 25×25×285 mm boyutlarındaki kalıplara dökülen harç numuneleri 24 saat iklimlendirme kabiniinde kürlenerek kurumması sağlanır. Kuruyan harç çubukları, kalıplardan alınarak ilk boyları ve kuru ağırlıkları ölçülür.

Toplam 16 gün sürecek deney sonucunda, genleşme yüzde birimlerinin yorumlamasına bakılır.

Yorumlama Kriterleri;

1. 16 gün sonundaki genleşme değeri, %0.10’nun aşağısında kalıyorsa agregaların zararsız davranış gösterdiği,
2. 16 gün sonundaki genleşme değeri, %0.20’nin üzerinde bir değere ulaşıyorsa agregaların zararlı genleşme potansiyelinin olduğu,
3. 16 gün sonundaki genleşme değerleri, %0.10 ile %0.20 değerlerinin arasında kalıyorsa agregaların, beton döküm yapıldığı ortamda kısmen zararlı, kısmen zararsız davranış gösterebileceği,

Agregaların kullanımı yönünde bir karara varmadan önce, ölçümlerin 28 gün devam ettirilmesi yönünde süreci uzatmak iyi olacaktır.

Bölgesel araştırma sonuçlarına göre farklı genleşme kriterleri belirlenebilir. Agreganın genleşme seviyesi genelinde betonda kullanılabilecek malzemelere karar verilebilir. (ASTM C227-97-1994).

ASR Harç çubukları ASTM C-227 standartındaki usüllere uygun olarak hazırlanmalıdır. Deneysel çalışmada agrega olarak Aydın İlinde üretim yapan hazır beton tesisinden alınan 0-8 mm Kırma kum, Aktif Silisli Agrega ile biyokütle külü ve çimento yer değiştirme yapılarak deney numuneleri üretilmiştir.(Tablo 5)

Tablo 5. ASR Deney Numunelerine Ait Malzeme Karışım Değerleri

	Agrega (gr)	Çimento (gr)	Mineral katkı (gr)	Su (gr)	S/Ç
Referans	1320	450,00	---	225	0,50
BK1 %15	1320	382,50	67,50	225	0,50
BK2 %20	1320	360,00	90,00	225	0,50
BK3 %25	1320	337,50	112,50	225	0,50



Şekil 2. Biyokütle Külü Katkılı Beton ve Harç Gruplarında ASR Oluşum Deneysel Aşama Görüntüleri

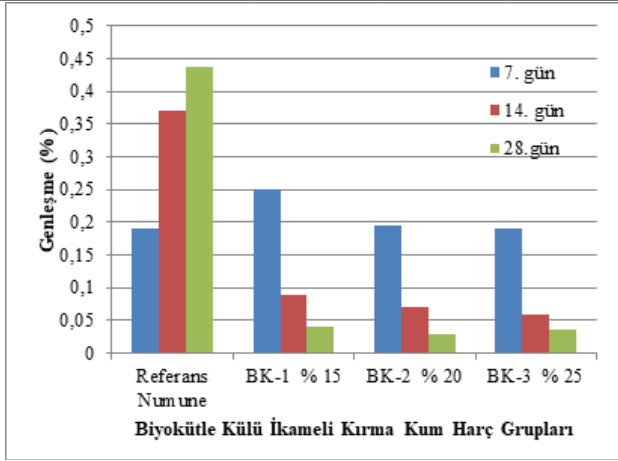
3. BULGULAR ve TARTIŞMA

2.1 Biyokütle Külü Katkılı Kırma Kum Beton Gruplarında ASR Deneyi

Üretilen deney numuneleri standart gereği laboratuvar şartlarında genleşme değerleri tespit edildi. Kırma kum agregalı numunelerde elde edilen genleşme sonuçları tablo 6'da genleşme değerleri grafiği'de Şekil 3'de verilmiştir.

Tablo.6 Biyokütle Külü Katkılı Kırma Kum Beton Gruplarında ASR Deneyi Genleşme Değerleri

	Referans Numune	K1- % 15	K2- % 20	K3- % 25
7. gün	0,022327	0,036652	0,034487	0,024386
14. gün	0,023216	0,002438	0,002107	0,005742
28.gün	0,024944	0,005405	0,004205	0,001189



Şekil 3. Biyokütle Külü Katkılı Kırma Kum Beton Gruplarında ASR Oluşumu Grafiği

ASTM-C 1260 Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçlarında maksimum standart değer 0.20 olarak ele alındığında;

Biyokütle Külü katkılı kırma kum harç gruplarının 16 ve 28 gün genleşme değerlerine bakıldığında standart değer çok altında azalttığı,

Referans karışımında 28 gün alkali silika genleşme değeri standart 0,10 biriminin altında çıkmış bunun sonucunda agrega aktif silis içermemektedir.

Biyokütle Külü katkılı kırma kum harç gruplarda; 28 gün sonrasında;

- Referans karışıma göre % 15 katkılı harç türünde 0.80 civarında genleşmeyi azalttığı,
- % 20 katkılı harç türünde 0.83 civarında genleşmeyi azalttığı,
- % 25 katkılı harç türünde 0.95 civarında genleşmeyi azalttığı gözlenmiştir.

ASR'li agrega grubunda kullanılan Biyokütle Külü ikamesinin kırma kum harçlarda ASR oluşumunu son derece azalttığı, atıkların değerlendirilmesi adına faydalı sonuçlar vereceği görülmüştür.

Literatürde de benzer eğilimler rapor edilmiştir. Esteves vd. (2012) de biyokütle uçucu külü katkılı harçlarda ASR genleşmesinin referansa kıyasla belirgin şekilde azaldığını, ancak değerlerin ASTM sınırlarının üzerinde kaldığını belirtmiştir. Buna karşın, metakaolin ilavesiyle (%20 BFA + %10 MK) genleşme önemli ölçüde düşmüş ve ASR'nin etkin biçimde kontrol altına alındığı ifade etmişlerdir.

Ramos vd. (2013) ise odun atığı külü (WWA) katkısının ASR üzerindeki etkilerini incelemiş ve %10 ile %20 ikame oranlarında genleşmenin sırasıyla yaklaşık %18 ve %60 oranında azaldığını rapor etmiştir. ASTM C1567 standardına göre 14 gün sonunda zararlı kabul edilen %0,1 sınır değerinin, %20 WWA katkısı ile altına inildiği ve böylece düşük riskli bir bağlayıcı-agrega kombinasyonu elde edildiği ifade edilmiştir.

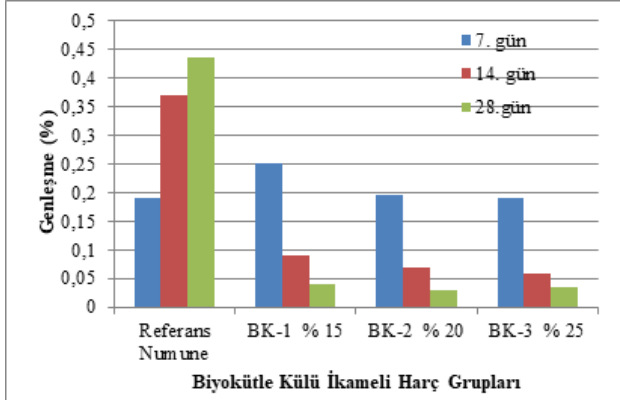
2.2 Biyokütle Külü Katkılı Aktif Silisli Agrega Harç Gruplarında ASR Deneyi

Aktif Silisli Agregalı Kontrol karışım ile Biyokütle Külü ile %15-%20-%25 oranlarında çimento ile yer değiştirerek üretilen numunelerin malzeme karışım değerleri tablo 5'de verilmiştir

Çalışma kapsamında hazırlanan kontrol karışım ve Biyokütle Külü katkılı Aktif Silisli Agregalı harç numunelere ait elde edilen genleşme değerleri tablo 7'de, ASR oluşum grafiği ise şekil 4'de verilmiştir.

Tablo.7 *Biyokütle Külü Katkılı Aktif Silisli Agregalı Harç Gruplarında ASR Deneyi Genleşme Değerleri*

	Referans Numune	BK-1 % 15	BK-2 % 20	BK-3 % 25
7. gün	0,191	0,251	0,196	0,19
14. gün	0,37	0,0898	0,0694	0,0596
28.gün	0,437	0,0407	0,0288	0,0351



Şekil 4. *Biyokütle Külü İkameli Aktif Silisli Agregalı Harç Gruplarında ASR Oluşumu Grafiği*

ASTM-C 1260 Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçlarında maksimum standart değer 0.20 olarak ele alındığında;

Biyokütle Külü katkıli harç gruplarının 16 ve 28 gün genleşme değerlerine bakıldığında standart değerinin altında azalttığı,

Referans karışımında 28 gün alkali silika genleşme değeri standart 0,10 biriminin üstünde çıkmış (0,435) bunun sonucunda agreganın aktif silis içerdiği görülmüştür.

7 günlük genleşme değerinin BK-1 % 15 katkıli harçda değerin 0,25 seviyesinde,

BK-2 % 20 ve BK-3 % 25 katkıli harçlarda değerin 0,19 seviyesinde kaldığı,

Biyokütle Külü katkıli harç gruplarda; 28 gün sonrasında;

·Referans karışıma göre % 15 katkıli harç türünde 0.90 civarında genleşmeyi azalttığı,

·% 20 katkıli harç türünde 0.93 civarında genleşmeyi azalttığı,

-% 25 katkılı harç türünde 0.92 civarında genleşmeyi azalttığı gözlenmiştir.

ASR'li agrega grubunda kullanılan Biyokütle Külü ikamesinin harçlarda ASR oluşumunu son derece azalttığı, atıkların değerlendirilmesi adına faydalı sonuçlar vereceği görülmüştür.

Literatürde de benzer eğilimler rapor edilmiştir. Rajamma vd. (2011)'göre, yüksek reaktiviteye sahip agregalarla üretilen harçlarda referans numunenin 14 gün sonunda %0,31, 28 gün sonunda ise %0,51 genleşme gösterdiğini bildirmiştir.

Biyokütle uçucu külü ikameleri genleşmeyi azaltmış olsa da (%20–30 ikamede 14 günde %0,21–0,25; 28 günde %0,31–0,39), değerler ASTM C1260 limitlerinin üzerinde kalmıştır. Buna karşılık, metakaolin ile birlikte kullanılan biyokütle uçucu kül (%20 BF + %10 M) karışımlarında genleşmenin %0,03–0,11 seviyelerine düştüğü ve ASR'nin çok daha güçlü biçimde kontrol altına alındığı rapor edilmiştir. Bu bulgular, biyokütle külünün tek başına belirli bir etki sağladığını ancak mineralojik yapısı ve tane boyutu nedeniyle performansının sınırlanabildiğini göstermektedir.

Benzer şekilde, Esteves vd. (2012) de biyokütle uçucu külü katkılı harçlarda ASR genleşmesinin referansa kıyasla belirgin şekilde azaldığını, ancak değerlerin ASTM sınırlarının üzerinde kaldığını belirtmiştir. Buna karşın, metakaolin ilavesiyle (%20 BFA + %10 MK) genleşme önemli ölçüde düşmüş ve ASR'nin etkin biçimde kontrol altına alındığı görülmüştür.

Ramos vd. (2013) ise odun atığı külü (WWA) katkısının ASR üzerindeki etkilerini incelemiş ve %10 ile %20 ikame oranlarında genleşmenin sırasıyla yaklaşık %18 ve %60 oranında azaldığını rapor etmiştir. ASTM C1567 standardına göre 14 gün sonunda zararlı kabul edilen %0,1 sınır değerinin, %20 WWA katkısı ile altına inildiği ve böylece düşük riskli bir bağlayıcı-agrega kombinasyonu elde edildiği ifade edilmiştir. Ayrıca, SEM/EDX analizleri ile reaktif agregaların yüzeyinde tipik alkali-silika jel oluşumu doğrulanmış ve jelde Na, Si ve O elementlerinin baskın olduğu belirlenmiştir.

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, biyokütle külü ikamesinin ASR'ye maruz agregalarla üretilen harçlarda genleşmeyi önemli ölçüde sınırladığı görülmektedir. Özellikle bu çalışmada, biyokütle külünün tek başına kullanıldığında dahi 28 gün sonunda ASTM sınırlarının altına inmesi, literatürdeki pek çok çalışmaya kıyasla daha ileri bir başarıyı ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, biyokütle külü hem çevresel açıdan atıkların değerlendirilmesine katkı sağlamakta hem de teknik açıdan ASR

riskini azaltarak sürdürülebilir beton üretimi için değerli bir alternatif sunmaktadır.

3 SONUÇLAR

İnsan toplumu, atık malzemelerin çöpe atılması yerine geri dönüştürülmesi için fırsatlar bularak daha temiz üretim için çabalamaktadır.

Biyokütle külü ikameli harçlar, tarımsal yan ürünleri iyileştirme ve çimentolu malzemelerin çevresel etkisini azaltma fırsatı nedeniyle ilgi görmektedir.

Tamamlayıcı çimento malzeme alanında tarımsal kaynakların kullanımı, yenilenebilir yan ürünleri veya atıkları iyileştirmenin ve geliştirilen beton ve harçların çevresel etkisini sınırlamanın bir yoludur.

Bu çalışmada, Aktif Silis içeren agregası ve Aydın ilinde kullanılan Kırmı Kum agregası ile hızlandırılmış harç çubuğu ASTM C1260 testi prosedürünü kullanarak biyokütle uçucu külünün ASR azaltma mekanizmasındaki rolü araştırılmıştır.

İçinde aktif silis bulunan agregası üzerinde referans numunenin standart 0,20 değerinin üstünde 0,437 birim genleşme ile ASR'nin oluştuğu, biyokütle külü ikameli %15,%20 ve %25 katkılı harçlarda ise ASR'yi azaltmada iyi performans potansiyeli göstermiştir.

Kırmı kum içeren harçlarda ASR oluşum performansını biyokütle külünün önemli seviyede azalttığı, referans karışımında da ASR'nin düşük çıkma nedeni olarak kırmı kum içinde aktif silis bulunmaması sayılabilir.

ASR deneylerinde ise %15, %20 ve %25 ikameli numunelerde 28 gün sonunda referansa kıyasla yaklaşık %90 oranında genleşme azalması elde edilmiş ve ASTM sınır değerlerinin altına inilmiştir. Bu sonuç, biyokütle külünün reaktif agregaların kullanımında önemli bir çözüm sağlayabileceğini ve ASR'ye bağlı zararlı genleşmeleri sınırlamada yüksek potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Ülkemiz'de pamuk ve mısır tarımsal atıklarından elde edilen biyokütle külü üzerine gerçekleştirilen bu çalışma, yerel atıkların sürdürülebilir ve yenilebilir yapı malzemelerine dönüştürülmesine yönelik önemli bir adım olup, çevresel faydalarının yanı sıra ekonomik açıdan da değerli katkılar sunmaktadır.

Tarımsal atıkların mineral katkı olarak kullanılmasının yaygınlaşması, sürdürülebilir inşaat uygulamaları, iklim değişikliğini azaltmak ve kaynak kısıtlamalarını değerlendirmek adına hayati önem taşıyacaktır.

Teşekkür

Yazar, bu çalışmaya malzeme ve laboratuvar desteği sağlayan Mavi Bayrak - Biyokütle Enerji Santrali, Batı Söke Çimento Fabrikası ve Oyak Hazır Beton Aydın Tesisleri'ne değerli katkılarından dolayı minnettarlığını sunar.

5- KAYNAKLAR:

- Lane D.S., Ozyidirim C., 1999, "Preventive Measures for Alkali Silica Reactions (binary and ternary Systems)", *Cement and Concrete Research*, (29), 1281-1288.
- Malvar L. J., Lenke L. R., 2006, "Efficiency of fly ash in mitigating Alkali Silica Reaction based on Chemical Composition", *ACI Materials Journal*, (103),5, 319-326
- Hester D., McNally C., Richardson M., 2005, A study of the influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete, *Construction and Building Materials* (19), 661-665.
- Dockter B.A., Eyelands K.E., 2003, "Development of management options for biomass combustion by products", *International Ash Utilization Symposium*, Centre for Applied Energy Research, University of Kentucky, paper no.82.
- Wang S., Baxter L., 2007, "Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability," *Fuel Processing Technology*, (88), 11, p. 1165-1170.
- Rajamma R., Ball R.J., Tarelho L.A., Allen G.C., Labrincha J.A., Ferreira V.M., 2009, "Characterization and use of biomass fly ash in cement-based materials", *Journal of Hazardous Materials*, (172), 2, 1049-1060.
- Maciejewska A, Veringa H., Sanders J., Peteves S.D., 2006, "Co-firing of biomass with coal: Constraints and role of Biomass pre-treatment", *European commission Directorate General*, Joint Research Centre, EUR22461 EN.
- Dockter B.A., 2009, "Using class C fly ash to mitigate Alkali silica reaction in concretes", 2009 *World Coal Ash (WOCA)*, May 4-7, Lexington KY, USA, (www.flyash.info)
- ASTM C289-94. (1994). *Standard test method for potential reactivity of aggregates (Chemical method)*. Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Aggregates, 4(2), 157-163. Philadelphia, PA: ASTM.
- TS 2517. (1977). *Alkali agrega reaktivitesinin kimyasal yolla tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- ASTM C1260-94. (1994). *Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method)*. Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Aggregates, 4(2), 650-653. Philadelphia, PA: ASTM.
- ASTM C227-97. (1994). *Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (Mortar-Bar Method)*. Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, 4(2), 126-130. Philadelphia, PA: ASTM.
- Rajamma, Rejini & Soares, Dora & Esteves, T.C. & Santos Silva, António & Labrincha, J.A. & Ferreira, Victor. (2011). "Investigation of Alkali-Silica Reaction in Concretes with Biomass Fly Ash." July 2011, Conference: ICCC 2011 - XIII International Congress on the Chemistry of Cement

- Esteves, T. C., Rajamma, R., Soares, D., Silva, A. S., Ferreira, V. M., & Labrincha, J. A. (2012). Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 26(1), 687–693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.075>
- Ramos, T., Matos, A. M., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Mortar with wood waste ash: Mechanical strength, carbonation resistance and ASR expansion. *Construction and Building Materials*, 49, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.026>

Bölüm 3

BİYOKÜTLE KÜLÜ KATKILI BETON NUMUNELERİNDE BASINÇ DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI

Yüksel Furkan YILDIRIM¹

¹ Öğr.Gör. Yüksel Furkan YILDIRIM, Kurumu: İstanbul Beykent Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, İstanbul, Türkiye, Orcid No: 0000-0002-5352-3871

1- GİRİŞ:

(Yaprak, Aruntaş, Demir, Simsek ve Durmuş, 2011). Modern medeniyette, yapısal beton, yıllık yaklaşık 10 milyar ton tüketimiyle en yaygın inşaat malzemesidir.

İnsan toplumu, atık malzemelerin çöpe atılması yerine geri dönüştürülmesi için fırsatlar bularak daha temiz üretim için çabalamaktadır.

Betondaki çimentonun diğer yapı malzemeleriyle kısmen değiştirilmesi, endüstriyel atık ve sürdürülebilir yapı uygulamaları üzerine yapılan araştırmalar sayesinde gün yüzüne çıkmıştır.

Tamamlayıcı çimento malzeme bileşenleri kullanılarak beton daha uygun fiyatlı hale getirilir ve ayrıca atık bertarafı endişelerini azaltmaya yardımcı olacaktır.

Birçok araştırmacı (Elinwa ve Ejeh, 2004 - Elinwa ve ark., 2008 - Elinwa ve Mahmood, 2002 - Udoeyo ve Dashibil, 2002), odun atığı külünün %5 ile %30 arasındaki tüm çimento ikamesi düzeylerinde betonda kısmi çimento ikame malzemesi olarak kullanılabileceğini gösteren ortak bulgulara ulaşmıştır.

Udoeyo vd., (2006)' a göre, Gözlemlenen bu eğilim, büyük olasılıkla odun atığı külü parçacıklarının bağlayıcı malzemeden ziyade çimento hamuru matrisi içinde dolgu malzemesi gibi davranması mekanizmasından kaynaklanmaktadır.

Böylece, çimento yerine kül içeriğinin artırılması, çimento miktarının azalmasıyla bağlanacak dolgu malzemesinin yüzey alanının artmasına ve bunun da mukavemette düşüşe neden olmasına yol açmıştır.

Wang vd. (2008a)'a göre, odun uçucu külü ve odun/kömür karışımı uçucu kül kullanarak çimento bağlayıcısının kısmen değiştirilmesiyle hava sürüklenmiş beton karışımının klorür penetrasyon direncini

araştırmıştır.

Cisse, (2000) – Agbede, (2004)’e göre, İnşaat beton ve çimento katkılı malzemelerde Pirinç kabuğu külü (RHA) kullanımı kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve betonun mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını iyileştirmedeki faydaları vurgulanmıştır.

Önceki araştırmalar, Rahman, (1987)- Khan, vd. (2021)’ göre, RHA’nın basınç dayanımını artırabileceğini, geçirgenliği azaltabileceğini ve beton ve kumbeton blokların genel performansını iyileştirebileceğini göstermiştir.

Cisse, (2000)’e göre, RHA, kısmi bir çimento ikamesi olarak kullanım için umut verici bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır; bu malzeme ASTM tarafından puzolanlar arasında kabul edilmiştir.

Mehta, (1992) - Cook, (1986)’ a göre, Artan çevresel endişeler ve enerji ile kaynakların korunması ihtiyacı nedeniyle, kabukların kontrollü sıcaklık ve atmosferde yakılması ve üretilen külün yapı malzemesi olarak kullanılması için çaba sarf edilmiştir. Pirinç kabuğu külü (Rice Husk Ash - RHA) çok ince bir puzolanik malzemedir.

Bu çalışmada:

Aydın İlinde beton harçlarında kullanılan agrega ile çimentonun ağırlığına göre kısmi ikame olarak %0, %10, %15, %20 ve %25 biyokütle külü ile karışımli numune grupları üretildi. Üretilen numune grupları test sonuçları için sırasıyla 28 ve 90 gün boyunca kürlendi ve sırasıyla basınç dayanımı açısından test edildi.

Beton ve çimento esaslı yapı malzemelerinde biyobazlı üretilen biyokütle uçucu kül kullanımını en üst düzeye çıkarmayı ve atık bertarafı endişelerini azaltmayı amaçlamaktadır

2- MATERYAL VE METOD

2.1- Malzeme Hazırlığı;

2.1.1- Agrega:

Aydın ilinde faaliyet gösteren Hazır beton tesisinden alınan 0-8 mm aralığında kırma kum, 8-13mm aralığında mıcır temin edilmiş elde edilen agreganın özgül ağırlığı $2,71 \text{ gr/cm}^3$ bulunmuştur.

2.1.2- Çimento Ve Biyokütle Külü Özellikleri:

Bu çalışmada, tablo 1’de kimyasal özellikleri verilen CEM I 42,5R çimentosu ve Biyokütle **külü** kullanılmıştır (TS EN 196-1-2002)

Biyokütle **külü** olarak kullanılan ham madde sezon bitiminde hasat sonrası pamuk ve mısır üretilen tarım arazilerinden toplanan bitki kök ve gövdesi ile ağaçlardan budama sezonunda üretilen dal ve budaklarının elektrik üretimi amacıyla 850C° ile 1100C° sıcaklık arasında yanması sonrasında oluşan Biyokütle **külüdür**.

Biyokütle **külünün oluşumunda dört ızgara kademesi olan ızgaralı yanma kazanı kullanılmaktadır**.

Deneyde kullanılan kül multisiklon sistemi altındaki bunkerden alınan kül olup küle ait kimyasal analiz Batı Söke Çimento fabrikası laboratuvarında yaptırılmıştır.

Deneyisel çalışmada kullanılan Biyokütle **külü** 105C° etüvde 24 saat bekledikten sonra 100 elek nolu, 0,150 mm göz açıklıklı elek kullanılarak elenmiştir.

Küle ait kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında potasyumoksit (K_2O) % 12,26 fazla çıkmıştır. Aynı zamanda CaO kalsiyum oksit % 19,27 oranında çıkmıştır.

ACI 221’ e göre çimento eşdeğer alkali miktarı ($\text{Na}_2\text{O}+0,658\text{K}_2\text{O}$) en fazla % 0,6 olması gerekirken bu limitin % 0,4 olması tavsiye edilmektedir.

Yıldırım (2013)’e göre, Deneyde kullanılan çimentonun alkali miktarı ($\text{Na}_2\text{O}+0.658(\text{K}_2\text{O})$) = $0.38+0.658*0.67=0.82$ (Na_2O)oranında olup %0.6 değerinin üzerindedir.

Biyokütle Külü ve Çimentonun kimyasal analizleri tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çimento ve Biyokütle Külüne ait Kimyasal Analiz Değerleri

		CEM I 42,5 R (12/03/2025)	Biyokütle Külü
H ₂ O	%	0,22	0,46
Serbest Kireç	%	2,21	2,16
Kızdırma Kaybı	%	3,60	7,43
CaO	%	62,22	19, 27
SiO ₂	%	19,09	30,28
Al ₂ O ₃	%	4,74	6,26
Fe ₂ O ₃	%	3,20	2,39
MgO	%	2,93	8,19
SO ₃	%	3,03	0,07
Na ₂ O	%	0,38	2,53
K ₂ O	%	0,67	12,26
Na ₂ O Eşdeğer	Hsp.	0,82	10,60
Cl-	%	0,0219	1,4703
32 Mikron	%	10,00	-----
45 Mikron	%	-----	68,00
90 Mikron	%	0,60	47,10
Özgül Ağırlık		3,12	2, 58
Blaine		3667	6789

Beton basınç dayanımı için standarda uygun küp şekilli numuneler imal edilmiş ise betonun basınç dayanımı $f_{c,küp}$ şeklinde ifade edilir. Basınç dayanımı 7 ve 28 günlük numunelerde tayin edilir TS EN 12390-3 (2003).

3- NUMUNE GRUPLARININ HAZIRLIĞI VE DENEYSEL ÇALIŞMA BULGULARI

Basınç dayanımı deneylerinde % 45 ince agreg, %55 oranında 1 muma mıcır ve yukarıda analiz değerleri verilen çimento ve Biyokütle Külü kullanılmıştır. Beton karışım grupları kenar boyutları 100×100×100 mm olan beton küp numuneleri hazırlanmıştır. Basınç dayanım deneyi için S/C oranı 0.50, Biyokütle Külü katkı oranları %0, %10, %15, %20 ve % 25 olan dört grup beton dökülmüştür.

Üretilen sertleştirilmiş beton karışımlarının basınç dayanımını belirlemek için ASTM Standardı C109'da (ASTM, 1998) açıklanan prosedürlere uygun olarak kalıplanmış, kurlenmiş ve test edilmiştir. TS EN 12390-3 (2003) - ASTM C109 (1998).

Beton karışım malzeme oranları m^3 bazında tablo 2’de,

28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri ise tablo 3’de şekiller ise 2- 3 ve 4’de verilmiştir

Tablo 2. Basınç Dayanımı İçin Hazırlanan Biyokütle Külü Katkılı Beton Malzeme Karışım Oranları

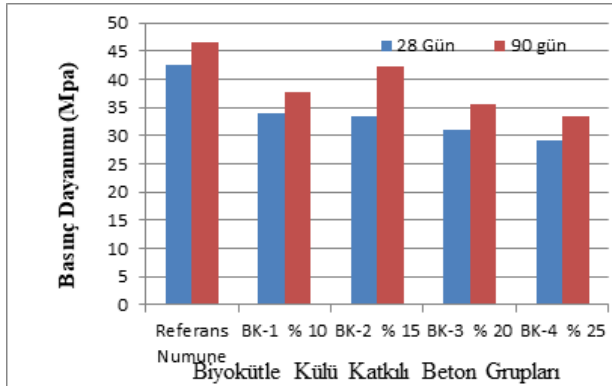
Katkı Oranları	0-8 mm ince Agrega (kg) %60	8-13 mm iri Agrega (kg) %40	Çimento (kg)	Mineral katkı (Biyokütle Külü)	Su (kg)	S/C
Referans Numune	910	745	450	----	225	0,50
BK-1 % 10	910	745	405	45	225	0,50
BK-2 % 15	910	745	382,50	67,50	225	0,50
BK-3 % 20	910	745	360	90	225	0,50
BK-4 % 25	910	745	337,50	112,50	225	0,50



Şekil 2. Biyokütle Külü Katkılı Beton Gruplarına ait Deneysel Aşama Görüntüleri

Tablo 3. Hazırlanan Biyokütle Külü Katkılı Beton Gruplarına ait 28 ve 90 gün Basınç Dayanım Değerleri

	28 Gün	90 gün
Referans Numune	42,512	46,56
BK-1 % 10	33,86	37,67
BK-2 % 15	33,39	42,23
BK-3 % 20	30,97	35,53
BK-4 % 25	29,14	33,3



Şekil 3. Biyokütle Külü Katkılı Beton Gruplarına ait 28 ve 90 Gün Basınç Dayanım Değerleri Grafiği

28 gün Basınç dayanımı sonuçlarına göre;

* Referans numune S/C oranı 0.50 olan beton grubunda % 10 Biyokütle külü katkılı olan numunede referans numuneye göre % 14,2 dolayında,

%15 katkılı grupta ise % 15,4 dolayında,

%20 katkılı grupta ise % 21,5 dolayında,

%25 katkılı grupta ise % 25,4 dolayında basınç dayanımının azaldığı,

Bütün numune gruplarında priz normal şekilde 45 dakika ile 300 dakika aralığında gerçekleşmiş, kırılma sonrası numunelerin homojen bir şekilde üretildiği görüldü.

Beton numune gruplarında % 20 katkılı Biyokütle külü numune basınç dayanım değerleri ile referans numune basınç dayanım değerleri karşılaştırıldığında basınç dayanımının %73 seviyesinde olduğu, bunun da yapılan daha önce yapılan puzolanik aktivite deney numune sonuçları

ile değerlerinin örtüştüğü görülmüştür.



Şekil 4. Biyokütle Külü Katkılı Numune 28 ve 90 Basınç Dayanımı Sonrası Görüntüleri

90 gün boyunca kurallarına uygun kür havuzunda bekletilen beton numuneleri zamanında basınç dayanım deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen basınç dayanımları tablo 3’de basınç dayanım grafiği ise şekil 3’de verilmiştir.

90 gün Basınç dayanımı sonuçlarına göre;

* Referans numune S/C oranı 0.50 olan beton grubunda % 10 Biyokütle külü katkıları olan numunede referans numuneye göre % 19 dolayında,

%15 katkıları grupta ise % 10 dolayında,

%20 katkıları grupta ise % 24 dolayında,

%25 katkıları grupta ise % 28 dolayında basınç dayanımının azaldığı,

Bu sonuçlara bakıldığında 28 ve 90 gün basınç dayanım sonuçlarının-

da en iyi neticeyi %15 katkılı beton gruplarında alınmıştır. Ayrıca 90 gün sonunda bütün gruplarda basınç dayanımının artmaya devam ettiği görülmüştür.

Literatürde de benzer eğilimler rapor edilmiştir.

Elinwa ve Ejeh,(2004)'e göre, HCWA-DSF harmanlanmış çimento hamurları, ASTM C150'nin (ASTM, 1997a) 45 dakikalık ilk minimum priz süresi ve 365 dakikalık maksimum son priz süresi gerekliliklerini karşıladı. Bağlayıcı ağırlığının %7,5'i DSF olan çimento hamuru CSP, saf çimento hamuru CP'ye kıyasla gecikmiş bir ilk ve son priz gösterdi. Bu, klinker seyreltme etkisinin hidrasyon hızını yavaşlatması ve hamurun priz sürelerinin uzamasına neden olması nedeniyledir.

Elinwa ve Ejeh,(2004)'e göre, Tüm HCWA-DSF harmanlanmış çimento hamurları, ASTM C150'nin (ASTM, 1997a) 45 dakikalık ilk minimum priz süresi ve 365 dakikalık maksimum son priz süresi gerekliliklerini karşıladı. Bağlayıcı ağırlığının %7,5'i DSF olan çimento hamuru CSP, saf çimento hamuru CP'ye kıyasla gecikmiş bir ilk ve son priz gösterdi. Bu, klinker seyreltme etkisinin hidrasyon hızını yavaşlatması ve hamurun priz sürelerinin uzamasına neden olması nedeniyledir.

Kula, Olgun, Sevinç ve Erdogan, (2002), kalay cevheri atığı (TW), kömür taban külü (BA) ve uçucu külün (FA) betonda kısmi ikame olarak kullanılma olasılığını bir dizi test aracılığıyla incelemiştir. Priz süresi, basınç dayanımı, harç genleşmesi, harcın su kıvamı ve mikro yapı ölçülmüştür.

Sonuçlar, %1 TW içeren tüm numunelerin basınç dayanımının, kürlenmenin 28. gününde kontrol numunelerinden daha yüksek olduğunu göstermiştir.

4- SONUÇLAR:

Betondaki çimentonun diğer yapı malzemeleriyle kısmen değiştirilmesi, endüstriyel atık ve sürdürülebilir yapı uygulamaları üzerine yapılan araştırmalar sayesinde gün yüzüne çıkmıştır.

Betonda bağlayıcı olarak Portland çimentosu, özellikle gelişmekte olan ülkelerde genel olarak kullanılan temel geliştirme malzemelerinden biridir.

Çimentoya olan artan talep, çimentonun kısmen ikame edilmesiyle karşılanabilir.

Ayrıca, betondaki bağlayıcıya çevre dostu alternatif bir takviye oluşturmak için bir atık ürünün kullanımını da içerir. İnceleme için tarımsal içerikli biyokütle külü seçildi.

Bu çalışma, betondaki çimentonun ağırlığına göre kısmi ikame olarak tarımsal içerikli biyokütle külünün betonda basınç dayanımı davranışını sunmaktadır.

Beton karışımları, çimentonun ağırlığına göre kısmi ikame olarak %0, %10, %15, %20 ve %25 biyokütle külü ile karıştırıldı ve sırasıyla basınç dayanımı açısından test edildi.

Beton küpleri döküldü ve test sonuçları için sırasıyla 28 ve 90 gün boyunca kürlendi.

Yapılan 28 günlük sertleşmiş beton basınç dayanımları sonuçlarına göre;

Kontrol karışıma göre biyokütle külü katkılı numunelerde katkı oranına göre %14 ila %25 arasında azalma olduğu, buna rağmen numunelerde basınç dayanımının 30Mpa civarında çıktığı gözlenmiştir.

Yapılan 90 günlük sertleşmiş beton basınç dayanımları sonuçlarına göre;

Kontrol karışıma göre biyokütle külü katkılı numunelerde katkı oranına göre %10 ila %28 arasında azalma olduğu, buna rağmen küp numunelerde basınç dayanımının 33 ila 42Mpa arasında çıktığı gözlenmiştir.

Bu sonuçlara bakıldığında 28 ve 90 gün basınç dayanım sonuçlarında en iyi neticeyi %15 katkılı beton gruplarında alınmıştır. Ayrıca 90 gün sonunda bütün gruplarda basınç dayanımının artmaya devam ettiği görülmüştür.

Test sonuçları biyokütle külünün marjinal olarak puzolanik olduğunu, katkı miktarı arttıkça beton basınç dayanımının azaldığı, su ihtiyacının arttığı tespit edilmiştir.

Düşük katkı miktarlarında iyi sonuçlar alınabileceği, betonun yerleştirilmesinde işlenebilirliği açısından akışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanılmasının gerekli olabileceği öngörülmüştür.

Sanayi artığı atıl küllerin tamamlayıcı beton ve çimentolarda katkı maddesi olarak kullanımının artırılması yaygınlaşmalıdır.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmaya malzeme ve laboratuvar desteği sağlayan Mavi Bayrak - Biyokütle Enerji Santrali, Batı Söke Çimento Fabrikası ve Oyak Hazır Beton Aydın Tesisleri'ne değerli katkılarından dolayı minnettarlığını sunar.

5- KAYNAKLAR:

- Yaprak H, Aruntas HY, Demir I, Simsek O, Durmus G (2011). Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. *Int. J. Phys. Sci.*, 6(10): 2455-2461.
- Elinwa AU, Ejeh SP (2004). Effects of incorporation of sawdust incineration fly ash in cement pastes and mortars. *J. Asian Arch. Build. Eng.*, 3(1): 1-7.
- Elinwa AU, Ejeh SP, Mamuda AM (2008). Assessing of the fresh concrete properties of self-compacting concrete containing sawdust ash. *Construct. Build. Mater.*, 22: 1178-1182.
- Elinwa AU, Mahmood YA (2002). Ash from timber waste as cement replacement material. *Cem. Concr. Compos.*, 24: 219-222.
- Udoeyo FF, Dashibil PU (2002). Sawdust ash as concrete material. *J. Mater. Civ. Eng.*, 14(2): 173-176.
- Udoeyo FF, Inyang H, Young DT, Oparadu EE (2006). Potential of wood waste ash as an additive in concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 18: 605-611.
- Wang S, Llamazos E, Baxter L, Fonseca F (2008a). Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests. *Fuel*, 87(3): 359-364.
- Cisse IK, Laquerbe M. (2000), Mechanical characterisation of filler sandcretes with rice husk ash additions. *Cem Concr Res.* 2000;30:13–8. doi: 10.1016/S0008-8846(99)00182-9
- Agbede OOS. (2004), Behaviour and service life of sandcrete block prism in an acid rain environment. *Model Meas Control C.* 2004;65:11–21. [cited 2025 Apr 1]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/293603795>
- Rahman MA. (1987), Use of rice husk ash in sandcrete blocks for masonry units. *Mater Struct.* 20: 361–6. doi: 10.1007/BF02472582
- Khan W, Fahim M, Zaman S, Khan S, Badrashi Y, Khan F. (2021), “Use of Rice Husk Ash as Partial Replacement of Cement in Sandcrete Blocks. *Adv Sci Technol Res J.* 15: 101–7. doi: 10.12913/22998624/133470
- Mehta, P. K., (1992), “Rice Husk Ash-A Unique Supplementary Cementing Material,” *Proceedings of the International Symposium on Advances in Concrete Technology*, ed. V. M. Malhotra, Athens, Greece, pp. 407-430.
- Cook, D. J., (1986), “Rice Husk Ash,” *Concrete Technology and Design: Vol. 3, Cement Replacement Materials*, Ed. R.N. Swamy, published by Surrey University Press, pp.171-196.
- TS EN 196-1, (2002), “**Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım**”. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS-EN 197-1,(2002), Genel Çimentolar-Bileşim Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Yıldırım, K. (2013). Betonda alkali silika reaksiyonunun azaltılmasında mineral katkı kombinasyonlarının optimizasyonu (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- TS EN 12390-3 (2003), “Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney

numunelerinin basınç dayanımının tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

BS 1881: Part 114 (1983b). Testing concrete. Methods for determination of density of hardened concrete.

BS 1881: Part 124 (1988). Testing concrete. Methods for analysis of hardened concrete.

BS812: Part 102 (1989). Testing aggregates. Method for sampling.

BS 1881: Bölüm 114 (1983b). Beton testi. Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini yöntemleri.

BS 1881: Bölüm 124 (1988). Beton testi. Sertleşmiş beton analiz yöntemleri.

BS812: Bölüm 102 (1989). Agregası testi. Numune alma yöntemi.

ASTM C109-1998 (1998). Test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens).

Kula I. Olgun A. Sevinc V. Erdogan Y. (2002), An investigation on the use of tincal ore waste, fly ash, and coal bottom ash as Portland cement replacement materials. Cement and Concrete Research. 2002; 32: 227–232