



## The effect of particle size of pozzolonic materials (bottom ash and zeolite) on alkali-silica reaction and compressive strength of mortar

Bahri Ersoy<sup>1\*</sup>, Fahri Yentürk<sup>2</sup>, Zeyni Arsoy<sup>1</sup>, Tayfun Uygunoğlu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mining Engineering., Faculty of Engineering, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, 03200, Türkiye

<sup>2</sup>Technical Services Unit, Afyonkarahisar University of Health Sciences, Afyonkarahisar, 03030, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Civil Engineering., Faculty of Engineering, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, 03200, Türkiye

### Highlights:

- Alkali silica reaction and strength of mortar
- Effect of particle size of mineral additives
- Bottom ash and Zeolite

### Keywords:

- Concrete mortar
- Alkaline silica reaction
- Compressive strength
- Zeolite
- Bottom ash

### Article Info:

Research Article

Received: 31.10.2022

Accepted: 17.05.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1197446

### Acknowledgement:

This study was carried out within the scope of the 17.FEN.BİL.53 AKÜ-BAPK project.

### Correspondence:

Author: Bahri Ersoy  
e-mail: bersoy@aku.edu.tr  
phone: +90 272 228 1423

### Graphical/Tabular Abstract

For both types of additives, the best results in terms of suppressing ASR and reducing the expansion of the mortar bars were obtained at the grinding time of 240 minutes. Therefore, the expansion values obtained from these mortar bars were taken as a basis in the comparison of both mineral additives. As can be seen from Figure A, it is seen that zeolite gives better results than bottom ash in terms of suppressing ASR, that is, reducing expansion in length. In terms of contribution rate, it is seen that ASR can be suppressed to a great extent with 10% contribution. It can be said that this situation is related to the very porous crystal structure and high cation exchange capacity of the zeolite.

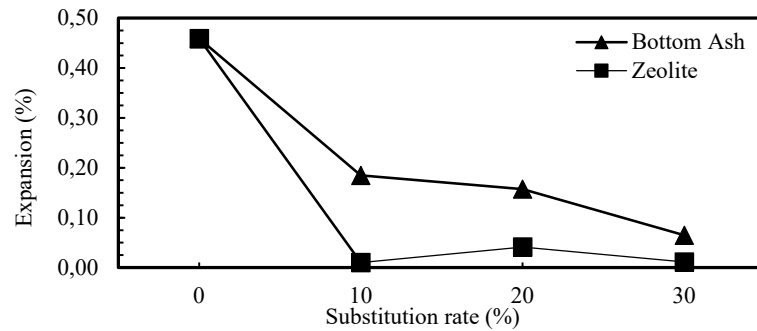


Figure A. Variation of the ASR expansion of the mortar bars prepared with 240 min ground ash and zeolite depending on the additive ratio

### Purpose:

To examine the effect of particle size of mineral additives (bottom ash and zeolite) on alkali-silica reaction and strength of concrete mortar.

### Theory and Methods:

Bottom ash and zeolite were ground separately in a ball mill at five different grinding times (0, 30, 60, 180 and 240 min). Concrete mortars were prepared by substituting 10, 20 and 30 percent of the additives for each particle size, respectively, instead of cement. Length expansions of the prepared mortar bars were determined and also their compressive strengths were measured.

### Results:

In terms of suppressing the alkali silica reaction in the bottom ash added concrete mortar, the best result was obtained with the bottom ash, which was ground for 240 minutes (average grain size 16.79  $\mu\text{m}$ ) with 30% admixture. It has been determined that this product reduces the asr expansion rate by 85.86% compared to the mortar produced without additives and causes a slight decrease (2.45%) in the compressive strength. In studies with zeolite, the best result was obtained with 10% substitution of the product, which was ground for 240 minutes (d<sub>50</sub>:10.49  $\mu\text{m}$ ). It was determined that the expansions of the mortars produced with 10% substitution of zeolite were reduced by about 98% compared to those prepared with mortars without mineral additives, but there was a ~29% decrease in compressive strength.

### Conclusion:

The finer the particle size of both additives, the better the suppression of ASR. However, zeolite plays a much more effective role than bottom ash. In addition, the compressive strength of the mortars prepared under the optimum conditions obtained for the suppression of ASR was partially decreased.



## Puzolinik malzemelerin (dip külü ve zeolit) tane boyutunun harcın alkali-silika reaksiyonuna ve basınç dayanımına etkisi

Bahri Ersoy<sup>1\*</sup>, Fahri Yentürk<sup>2</sup>, Zeyni Arsoy<sup>1</sup>, Tayfun Uygunoğlu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Müh. Bölümü, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup>Afyonkarahisar Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Teknik Hizmetler Birimi, 03030, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>3</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Harcın alkali silika reaksiyonu ve mukavemeti
- Mineral katkıların tane boyutunun etkisi
- Dip külü ve zeolit

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 31.10.2022

Kabul: 17.05.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1197446

### Anahtar Kelimeler:

Beton harcı,  
ASR genişmesi,  
basınç dayanımı,  
zeolit,  
dip külü

### ÖZ

Bu çalışmada, puzolanik katkı maddelerinin (dip külü ve zeolit) tane boyutunun çimento esaslı harçlarda oluşan alkali-silika reaksiyonu (ASR) üzerine ve mekanik özelliklerden basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Farklı tane boyutunda puzolanik katkı maddesi elde etmek için dip külü/zeolit bilyalı değirmende 5 ayrı sürede (0, 30, 60, 180 ve 240 dk) öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Çimento yerine ikame edilmek üzere her bir tane boyutundaki puzolanik katkıdan farklı oranlarda (%10, 20 ve 30) kullanılarak beton harçları hazırlanmıştır. Çimento esaslı harçlarda, doğal ince agregası ve CEM-I 42,5 tipinde Portland çimentosu kullanılmıştır. Elde edilen her bir harç çubuğunun TS 13517'ye göre ASR'den kaynaklı boyca genişleme miktarları ve TS EN 12390-3'e göre basınç dayanımları belirlendi. Sonuç olarak beton harcında meydana gelen ASR'nin azaltılmasında zeolit tane boyutuna göre daha etkili olduğu ve en düşük ASR genişleme değerinin de 240 dk boyunca öğütülmüş zeolit tane boyutunda çimento ile yer değiştirilmesiyle elde edildiği belirlenmiştir. Ancak, her iki puzolanik katkının beton harcı basınç dayanımına etkisi karşılaştırıldığında, dip külü katkısının basınç dayanımı üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı buna mukabil zeolit katkısının basınç dayanımını bir miktar (%10-29) düşürdüğü görülmüştür.

## The effect of particle size of pozzolanic materials (bottom ash and zeolite) on alkali-silica reaction and compressive strength of mortar

### H I G H L I G H T S

- Alkali silica reaction and strength of mortar
- Effect of particle size of mineral additives
- Bottom ash and Zeolite

### Article Info

Research Article

Received: 31.10.2022

Accepted: 17.05.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1197446

### Keywords:

Concrete mortar,  
ASR expansion,  
compressive strength,  
zeolite,  
bottom ash

### ABSTRACT

In this study, the effect of particle size of pozzolanic additives (bottom ash and zeolite) on alkali-silica reaction (ASR) and compressive strength as mechanical properties of cement based mortar was investigated. In order to obtain pozzolanic additive in different particle sizes, the bottom ash/zeolite was subjected to grinding process in 5 different times (0, 30, 60, 180 and 240 minutes) in a ball mill. Concrete mortars were prepared by using different proportions (10, 20 and 30%) of pozzolanic additive in each particle size to replace cement. Natural fine aggregate and CEM-I 42.5 type Portland cement were used in cement based mortars. The amount of expansion of each mortar bar resulting from ASR according to TS 13517 and compressive strength according to TS EN 12390-3 were determined. As a result, it was determined that zeolite was more effective than bottom ash in suppressing ASR occurring in concrete mortar and the lowest ASR expansion value was obtained by 240 minutes grounded and 10% replacement of zeolite by cement. However, when the effect of both pozzolanic additives on the compressive strength of the concrete mortar was compared, it was observed that the bottom ash additive did not have a significant effect on the compressive strength, whereas the zeolite additive reduced the compressive strength a little (10 - 29 %).

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*bersoy@aku.edu.tr, fahriyenturk@outlook.com, zeyniarsoy@aku.edu.tr, uygunoglu@aku.edu.tr / Tel: +90 272 228 1423

## 1. Giriş (Introduction)

Çimentolu kompozitlerde en önemli ve en sık karşılaşılan problemlerden birisi olan alkali-silika reaksiyonunda (ASR), beton porozite çözeltisi içerisinde yer alan ve çoğunlukla çimentodan çözünerek veya harç karışım suyundan gelen  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  gibi alkali iyonlar ile portlanditin ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) çözünmesinden kaynaklanan  $\text{OH}^-$  iyonları agreganın aktif silisli (amorf silika/opal, kalsedon, kristobalit, tridimit, volkanik cam vb.) bileşenleri ile yüksek  $\text{pH}$ 'lı ( $\text{pH} \approx 11-12$ ) alkali ortamda kimyasal etkileşime girerek viskoz halde alkali-silika jelini oluştururlar [1-4]. Bu reaksiyon alkali-silika reaksiyonu (ASR) olarak adlandırılır. ASR sonrası oluşan bu jel, yapısında varolan  $-\text{OH}^-$ ,  $-\text{O}^-$  gibi fonksiyonel atom grupları nedeniyle hidrofilik karakterde [2, 5] olup, ortamdaki/çevredeki su/nem ile kolayca reaksiyona girerek (su absorplayarak) hacimce genleşir ve bunun sonucunda agregada ve betonda iç gerilmeler ve çatlamlar meydana gelir ve nihayetinde bu hadise betonun mukavemet kaybetmesine neden olur [1, 4, 6, 7].

Betonda ASR'yi başlatmak ve sürdürmek için şu üç temel koşulun birarada bulunması gerekir [8]: (1) agregalar potansiyel olarak reaktif olmalıdır; (2) alkali ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  vb.) konsantrasyonu beton gözenek çözeltisinde yeterince yüksek olmalıdır ve (3) beton yüksek nem koşullarına maruz kalması gerekir. ASR'nin engellenmesi yani bastırılması ve dolayısıyla betonda oluşabilecek çatlakların azaltılmasına yönelik farklı yöntemler önerilmektedir. Bunlar sıralanacak olursa; (i) aktif silis içeriği düşük olan agregaların kullanılması, (ii) çimento bileşiminde düşük alkalinite ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  içeriği) bulunması, (iii) puzolanik malzemelerin bileşime dahil edilmesi ve (iv) çimentolu kompozit içerisine nem veya suyun girişinin önlenmesidir [1]. Literatürde ASR azaltmaya yönelik yapılan çalışmaların puzolanik katkıların kullanımı üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Puzolanik katkıları (i) çimentodan veya çimentoda yer alan portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) fazından çözünerek ortama geçen hidroksil iyonlarını adsorplayıp ortamın  $\text{pH}$ 'sını düşürmek suretiyle agregadaki silisin çözünürlüğünü azaltarak (ii) şayet alüminyum içeren puzolonlar ise kendisinden çözünüp ortama (por çözeltisine) geçen alüminyum iyonlarının miktarını artırarak ASR'yi ve jel oluşumunu önlerler [9-11]. Ayrıca puzolonların bir diğer faydası da boşlukları doldurarak betonun geçirgenliğini azaltmalarıdır [9]. Puzonelik katkıların ASR'ye etkisi konusunda çalışılan başlıca mineral katkıları uçucu kül [12-15] silis dumanı (diğer adıyla silika füm) [13-16], yüksek fırın cürufu [13, 15] ve metakaolin [13-15, 17] olup, bunun yanında tuğla/kiremit tozu [11, 12], zeolit [11, 18-20], cam tozu [11, 21], dip/tabana külü [22, 23] geliştirilmiş mineral katkıları [24], nano silika [25] vb. ile de çalışmalar yapılmıştır.

Puzolanik mineral katkıların ASR üzerine etkisi konusunda literatürde gerçekleştirilen bu çalışmalar incelendiğinde ağırlıklı olarak çimento yerine ikame edilecek katkı miktarı üzerinde yoğunlaştığı ancak bu puzolonların tane boyutundaki değişimin harçtaki ASR üzerindeki etkisine odaklanmış çalışma sayısının çok daha az [22, 19, 20] olduğu görülmektedir. Literatürde zeolit tane boyutunun puzolanik reaktivitesine ve dolayısıyla ASR'ye ve harcın basınç dayanımına etkisi konusunda iki detaylı çalışma yapıldığı görülmektedir [19, 20]. Burris vd (2016) [19]'nin yaptıkları çalışmada zeoliti bilyalı değirmende 0-6 saat aralığında farklı sürelerde öğütürerek 6 farklı tane boyut dağılımına sahip zeolitden %0-20 oranında ikame ederek her bir numune ile portland çimentosu harcı hazırlamışlar ve çimentonun hidratasyonuna ve harcın basınç dayanımına zeolit etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak öğütülmemiş zeolit katkısının basınç dayanımında pozitif bir etkisi tesbit edilememişken, bilyalı değirmende öğütme işleminin çimento harcında kullanılan zeolit puzolanik aktivitesini artırdığı ve dolayısıyla harcın 28 ve 90 günlük basınç dayanımını öğütme süresine bağlı olarak %10-25 oranında

arttırdığını ortaya koymuşlardır. Ancak, zeolit öğütülebilirliğinde yani inceltmesinde d50 tane boyutu yaklaşık  $9 \mu\text{m}$ 'ye karşılık gelen belirli bir kritik öğütme süresi (yaklaşık 4 saat) olduğunu bunun üzerinde uygulanan öğütme sürelerinde boyutta daha fazla bir küçülme olmadığını ve buna bağlı olarak da çimentonun hidratasyonunu iyileştirme bakımından bu kritik süreden sonra bir artışın olmadığını belirlemişlerdir. Florez vd. [20] ise doğal zeolit üzerinde farklı sıcaklıklarda (300-800 °C) kalsinasyonu ve (seramik bilyalı değirmende 3 saat) öğütme gibi ön işlemler uygulandıktan sonra elde edilen her bir ürünü kum, portland çimentosu ve su ile su/bağlayıcı oranı 0,5 olacak şekilde hazırladıkları harcın içine farklı oranlarda (%30, 40 ve 50) çimento yerine ikame ettikten sonra harcın puzolanik aktivitesini ve basınç dayanımlarını ölçmüşlerdir. Sonuçta zeolite uygulanan her iki ön işlemin de puzolanik atıviteyi artırdığı ve harcın basınç dayanımını yükselttiği ancak öğütmenin kalsinasyona göre çok daha pozitif etkiye sahip olduğunu ve ayrıca %30-40 oranında öğütülmüş veya kalsine edilmiş zeolit harç içerisinde kullanılabilirliğini belirlemişlerdir. Ayrıca, harçta kullanılacak zeolit öğütme şartlarının optimizasyonu için d90 değeri  $\sim 45 \mu\text{m}$ 'lik bir tane boyutunun yeterli olduğunu beyan etmişlerdir. Öteyandan Oruji vd. [22] texas/ABD dip külünü 0,5 ve 3 saat öğüttükten sonra ayrı ayrı harç hazırlayıp ASR genleşmeleri, basınç dayanımları vb. özelliklerini detaylı olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak öğütmenin her iki parametreyi de ciddi şekilde etkilediğini belirlemişler ve en düşük genleşmeyi ve en yüksek basınç dayanımını titreşimli bilyalı değirmende 3 saat öğütülen ( $d_{50} : 4,5 \mu\text{m}$ ) %10 katkılı dip külü ile hazırlanan harç üzerinde ölçmüşlerdir.

Bilindiği üzere puzolanik aktivite kavramı, CaO ve su bileşiminin oluşturduğu alkali ortam içerisinde aktif silis içeren puzolanik mineral katkının ilavesiyle oluşan kimyasal reaksiyonu ve fiziksel ve mekanik değişimleri ifade eder [9, 26]. Puzolanik katkı amacıyla kullanılan mineral katkıların kimyasal içeriği, mineralojik bileşeni, tane şekli (tabakalı, kübik, iğnemi yapısı), tane boyutu, porozite yapısı ve miktarı, (ve bu son iki özelliğiyle ilgili olarak) yüzey alanı gibi her bir özelliği onun puzolanik aktivitesine etki etmektedir [9]. Farklı ülkelerden ve bölgelerden çıkartılan veya elde edilen gerek doğal minerallerin ve gerekse kömürlerin yakılmasıyla oluşan atık küllerin isimleri aynı olsa da jeolojik oluşum şartlarına bağlı olarak kimyasal içeriği mineralojik bileşenleri ve diğer (yoğunluk, tane morfolojisi, porozite vb.) bir çok fiziksel özellikleri bakımından aralarında ciddi farklılıklar olabilmektedir [23]. Böylesi bir durumda ise bu tür mineral katkıların puzolanik aktivitesinin de maden ocaklarının yer aldığı ülkeden ülkeye ve bölgeden bölgeye farklılık göstermesi doğaldır. Bu bağlamda, bu çalışmada puzolanik katkı olarak kullanılan üzere ülkemiz Manisa ili Gördes ilçesindeki açık ocaklardan üretilen doğal zeolit minerali ile yine Manisa'nın Soma ilçesindeki termik santralinden çıkan atık ürünü olan dip külü tercih edilmiştir. Çalışmada, 5 değişik sürede öğütülerek farklı tane boyutlarına getirilen puzolanik mineral katkıların, beton harcında meydana gelen alkali-silika reaksiyonunu, buna bağlı harç çubuğunun genleşmesini ve basınç dayanımını nasıl etkilediği detaylı olarak incelenmiştir.

## 2. Malzemeler ve Metotlar (Materials and Methods)

Bütün deneysel çalışmalar Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

### 2.1. Malzemeler (Materials)

#### 2.1.1. Agregada (Aggregate)

Beton harçlarının hazırlanmasında kullanılan ince agregada Doğancık köyü (Sultandağı/Afyonkarahisar) deresinden temin edilmiş olup,

agreganın hangi tür mineraller içerdiği ve ASR'ye sebep olan aktif silisli minerallerin olup olmadığını görmek amacıyla CuK $\alpha$  radyasyonu kullanılarak Shimadzu XRD-6000 X-ışını cihazıyla mineralojik analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Açıkça görüldüğü üzere kullanılan agrega ağırlıklı olarak aktif silikat mineralleri olan kuvars ve kristobalit içermektedir. Ayrıca, muskovit, albit gibi diğer mineraller de bulunmaktadır. Dalga boyu dağılımlı XRF (Rigaku ZSX Primus II) yöntemiyle gerçekleştirilen kimyasal analiz sonuçları da bu minerallerin varlığını desteklemektedir (Tablo 1).

### 2.1.2. Çimento (Cement)

Beton harcı hazırlama çalışmalarında puzolanik malzeme olarak kullanılan CEM-I 42,5 Portland çimentosu Afyonkarahisar'daki ÇİMSA AŞ'den temin edilmiştir. Çimentonun dalga boyu dağılımlı XRF yöntemiyle kimyasal analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Çimentodaki "Eşdeğer Na<sub>2</sub>O" değeri aşağıda verilen Eş. 1 ile hesaplanmış ve %1,24 olarak elde edilmiştir. Bu değer olarak kütlece %0,6 değerini aşmaması gerektiğinden [1] ASR oluşumu açısından riskli bir çimentodur.

$$(Na_2O)_{Eşdeğer} = \%Na_2O + 0,658 \times \%K_2O \quad (1)$$

### 2.1.3. Dip külü (Bottom ash)

Termik santrallerde kömür yakma işleminin tabii bir sonucu olarak sistemde, kimyasal özellikleri birbirlerine benzemekle beraber mineralojik özellikleri, tane boyutları ve fiziksel özellikleri birbirlerinden farklı [23, 26] olan iki atık ürün (uçucu kül ve dip külü) meydana gelmektedir. Çalışmalarda kullanılan dip külü Soma/Manisa termik santralinin kül depolama tesisinden alınmış olup, sonrasında dalga boyu dağılımlı XRF yöntemiyle kimyasal analizi (Tablo 1) ve XRD yöntemiyle de mineralojik analizi yapılmıştır. XRD verilerine göre dip külünde yer alan minerallerin Kuvars (SiO<sub>2</sub>), Gismondin (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>4H<sub>2</sub>O), Kalsit (CaCO<sub>3</sub>), Dolomit (MgCaCO<sub>3</sub>), Jips (CaSO<sub>4</sub>·2(H<sub>2</sub>O)) ve Kalsiyum hidrojen sülfat (Ca(HSO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>)'dir. Ayrıca dip külünün orijinal haliyle (alındığı şekliyle) tane boyut dağılımı analizi (Malvern Mastersizer 2000) yapılmış olup, tanelerin 1 mm'nin altında ve d<sub>50</sub> değerinin de 128,34  $\mu$ m olduğu belirlenmiştir.

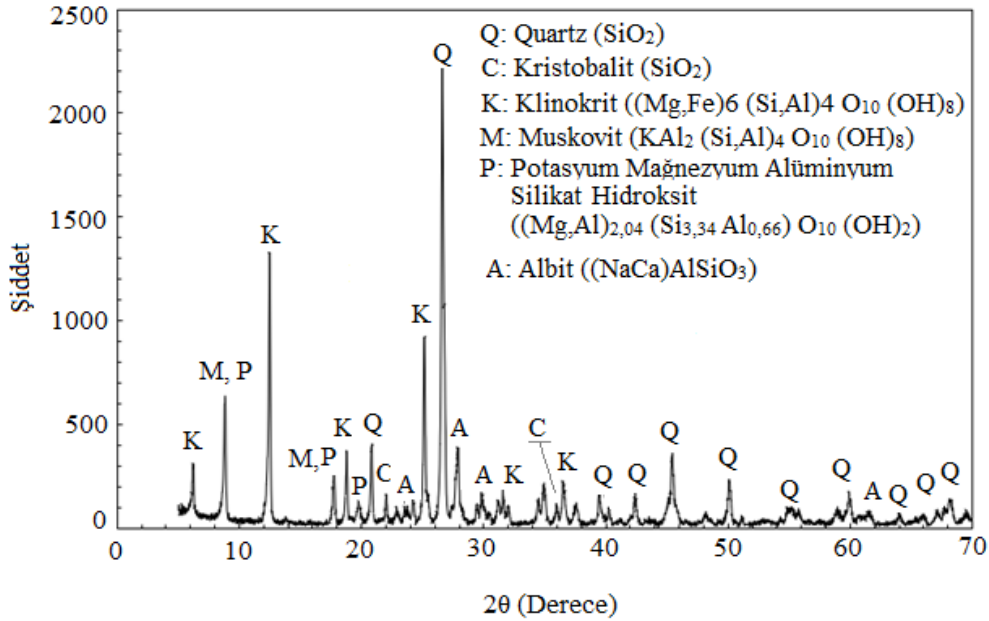
### 2.1.4. Zeolit (Zeolite)

Beton harcında puzolanik malzeme olarak kullanılan diğer bir katkı ise Gördes/Manisa zeoliti olup, Gördes Zeolit AŞ'den temin edilmiş ve sonrasında kimyasal (Tablo 1) ve mineralojik analizleri yapılmıştır. XRD mineralojik analizine göre zeolit numunesinde ana zeolit minerali Klinoptilolit [(Na,K,Ca)<sub>6</sub>(Si,Al)<sub>36</sub>O<sub>72</sub>·20H<sub>2</sub>O] olup, buna eşlik eden diğer mineraller ise Kuvars [SiO<sub>2</sub>], Ortoklaz [(K,Na)(AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)], Opal [SiO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O] ve kristobalit [ $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>]dir. Yapılan tane boyut dağılımı analizinde (Malvern Mastersizer 2000) tane çaplarının 1 mm'den daha küçük olduğu ve ortalama tane boyutunun (d<sub>50</sub>) da 45,55  $\mu$ m olduğu belirlenmiştir.

Her üç malzemenin de kimyasal bileşenleri aşağıda Tablo 1'de görülmektedir.

**Tablo 1.** Agregata, çimento, dip külü ve zeolitin kimyasal analizi (Chemical analysis of aggregate, cement, bottom ash and zeolite)

Bileşim	Miktar (%)			
	Agregata	Çimento (CEM-I 42,5)	Dip Külü	Zeolit
SiO <sub>2</sub>	56,5	15,715	33,9	68,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,9	3,97	16,6	12,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,78	2,8158	4,36	1,16
CaO	5,18	65,1398	26,2	3,15
MgO	2,96	1,6723	1,117	0,993
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,114	0,1056	0,199	0,0213
K <sub>2</sub> O	3,01	1,1053	1,142	4,8
Na <sub>2</sub> O	1,138	0,5155	0,266	0,312
SO <sub>3</sub>	0,0744	4,3123	2,73	0,0533
SrO	0,0136	0,0432	0,0409	0,0388
TiO <sub>2</sub>	0,653	0,2756	0,642	0,109
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0317	0,0513	--	--
ZrO <sub>2</sub>	0,0189	0,0122	0,0263	0,0156
MnO	0,103	0,0488	0,0564	0,0455
Rb <sub>2</sub> O	0,0128	0,006	0,0123	0,0237
ZnO	0,011	0,0056	0,0142	0,0073
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--	--	0,0202	0,0079
KK	6,21	4,1207	12,3	7,52



**Şekil 1.** Agreganın mineralojik (XRD) analizi (Mineralogical (XRD) analysis of aggregate)

## 2.2. Deneysel Yöntemler (Experimental Methods)

### 2.2.2. Minerolojik analiz (XRD) (Mineralogical analysis (XRD))

Bu çalışmada gerçekleştirilen minerolojik analizler (Şekil 1) Shimadzu XRD-6000 cihazı ile yapılmıştır. Öncelikle numuneler halkalı değirmende öğütülerek -125 µm tane boyutuna getirilmiştir. X-ışını olarak dalga boyu (λ) 0,1542 nm olan CuKα radyasyonu kullanılmış ve analizler 2°/dk'lık difraksiyon/kırınım açısı (2θ) tarama hızında gerçekleştirilmiştir.

### 2.2.4. Öğütme deneyleri (Grinding experiments)

Puzolanik mineral katkıları olan dip külü ve zeolitin tane boyutunun beton harcı alkali-silika reaksiyonuna etkisini incelemek üzere her iki mineral katkı, çelik hazneli bilyalı değirmende öğütmeye tabi tutuldu. Öğütme işlemi öncesinde mineral katkıları etüvde kurutuldu. Öğütme işlemi sırasında değirmen dönme hızı kritik hızın %75'i, bilya şarjı değirmen hacminin ~%25'i ve öğütücü ortam (bilya) şarjı değirmen hacminin ~%25'i olacak şekilde sabit tutularak puzolanik katkıları ayrı ayrı 30, 60, 180 ve 240 dk. boyunca öğütüldü. Öğütücü ortam olarak üç farklı boyuttaki çelik bilyeler kullanıldı. Öğütme şartlarına ilişkin daha detaylı bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Öğütmede kullanılan bilyalı değirmen, ortam ve mineral katkıların özellikleri (Characteristics of the ball mill, media and mineral additives used in grinding)

Özellik	Değer		
Değirmen	Hazne hacmi (cm <sup>3</sup> )	5000	
	Hızı (kritik hıza göre %)	75	
	Öğütme süreleri (dk.)	30-60-180-240	
Ortam	Bilya boyutları (mm)	10-14-16	
	Bilya yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	7,6	
	Bilya şarjı (değirmen hacmine göre %)	25	
Mineral Katkı		Zeolit	Dip Külü
	Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,27	2,35
	Yığın yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	0,88	0,76
	Şarj miktarı (değirmen hacmine göre %)	25	25
	Şarj miktarı (g)	1102	955
	Boyut	d <sub>10</sub> (µm)	5,45
	d <sub>50</sub> (µm)	45,55	128,34
	d <sub>90</sub> (µm)	334,29	550,14

### 2.2.5. Tane boyut analizi (Particle size analysis)

Ham ve öğütülmüş puzolanik malzemelerin tane boyut dağılım analizleri lazer difraksiyon tekniği ile çalışan tane boyut analiz cihazı (Malvern Mastersizer 2000) ile gerçekleştirildi. Analiz için saf su içeren bir beher cihazın yaş analiz bölmesine yerleştirildi ve 2000 rpm hızda karıştırma başlatılarak sıfırlama yapıldı. Bu işlemi takiben, ölçümü yapılacak malzemeden yeterince alınarak içerisinde saf su bulunan bir beher kondu ve manyetik karıştırıcıda 5 dk homojenleştirme yapıldı. Sonra, mikro pipet ile beherdeki süspansiyondan bir miktar (~1-2 mL) numune çekilerek cihazın dispersiyon ünitesinde yeralan ve içerisinde saf su bulunan beher ilave edilip 400 Watt'da 1 dk ultrasonik işlem uygulanarak disperse edildi ve hemen ardından cihaz kendisi tane boyut ölçümünü gerçekleştirdi. Analiz üç kez tekrarlanarak ortalama değerler kaydedildi.

### 2.2.6. Harç çubuklarının hazırlanması (Preparation of mortar rods)

TS 13517 [29] standardına göre hazırlanan harç karışımlarında agrega/bağlayıcı oranı 2,50 ve su/bağlayıcı oranı 0,47 olarak kullanılmıştır. Farklı sürelerde (0, 30, 60, 180 ve 240 dk.) öğütmeye tabi tutulan her bir puzolanik malzemeden ağırlıkça %10, %20, %30 oranlarında çimento yerine harca ilave edilerek farklı kompozisyonlarda toplam 31 adet beton harcı hazırlandı (Tablo 3). Tabloda öğütme süresi 0 (sıfır) dk. olan puzolonlar öğütmeye tabi tutulmamış ham (veya orijinal) katkıları göstermektedir. Karışımların hazırlanmasında çimento ve agregalar mikserle konulduktan sonra en az 1 dk. süreyle karıştırıldı daha sonra su, puzolanik katkı eklenerek 5 dk. daha karıştırılmıştır. Sonra bu harçlar 25x25x285 mm ebadında çelik kalıplara döküldü ve ardından vibrasyon masasına alınıp harcın içinde hava boşluklarını gidermek için vibrasyon işlemi uygulandı. Harç çubukları 24 saat sonra kalıp içerisinden çıkartılmışlardır.

### 2.2.7. Alkali – Silika reaktivitesi tayini (Determination of alkali-silica reactivity)

Harç çubuklarına uygulanan alkali-silika reaktivitesi tayini deneyleri TS 13517 [29] hızlandırılmış harç çubuğu yöntemine göre yapılmıştır. Çelik kalıplardan çıkartılan harç çubukları 80 ± 2°C sıcaklığındaki saf su içeren test kabininde (Şekil 2) 24 saat bekletildikten sonra harç çubuklarının ilk boy okuması dijital komperatör ile laboratuvar ortamında yapılarak yine sıcaklığı 80 ± 2°C sıcaklıktaki 1 N NaOH çözeltisinin içerisine konuldu. Harç çubuklarının sırasıyla 1., 4., 7., 11. ve 14. günlerde çözeltiden alınarak boy değişimleri komperatör ile ölçülerek kaydedildi (Şekil 2). Daha sonra aşağıda verilen eşitlik (Eş. 2) yardımıyla harç çubuklarının boyca % genişleme miktarları hesaplandı. Her bir kompozisyondaki harç karışımı için 3 harç çubuğu hazırlandı ve %genleşme değeri olarak bu 3 harç çubuğunun ortalaması alındı.

$$\%L = \left(\frac{\Delta L}{L}\right) \times 100 \quad (2)$$

Eşitlikte:

%L :Boy değişimi yüzdesi (genleşme)  
 $\Delta L$  :Numunenin boy değişimi (mm)  
 L :Numunenin ilk uzunluğu (mm)

### 2.2.8. Basınç testleri (Compressive tests)

Farklı tane boyutlarındaki dip külü ve zeolitin kullanımıyla hazırlanan harçlar 40x40x160 mm ebadındaki çelik kalıplara dökülüp vibrasyon uygulandıktan sonra 24 saat bekletilip kalıplardan çıkartıldı ve kür havuzunda oda sıcaklığında 28 gün bekletildi. Daha sonra 40x40x40 mm boyutunda küp örnekler kesilerek TS EN 12390-3'e göre 200 kN kapasiteli otomatik basınç test cihazında basınç dayanımları ölçüldü. Her bir kompozisyonun basınç dayanımı ölçümü için 3 numune kullanılarak ortalaması alındı.

### 2.2.9. İç yapı incelemesi (Internal structure)

ASR etkisine maruz kalmış numunelerden alınan ince kesit örnekleri üzerinde polarizan mikroskop (Nikon ECLIPSE 2V100 POL) altında jel oluşumları incelenmiştir. Hazırlanan ince kesitler x25 büyütmede optik floresans mikroskop ile polarizan ışık altında incelenmiştir. Ayrıca uçucu kül ve zeolit katkılı harçlarda hidrasyon ürünlerinin gelişimini ortaya koymak amacıyla kırık yüzeyli ve karbon kaplanmış numunelerde taramalı elektron mikroskopu (SEM; Leo-1430 VP) ile inceleme de gerçekleştirilmiştir. Tüm iç yapı incelemelerinde, potansiyel olarak en fazla ASR hasarı tespit edilen %30 oranında ve %0 öğütme serisine ait mineral katkı içeren harçlar kullanılmıştır.

**Tablo 3.** Beton harcında kullanılan malzemeler ve miktarları (Materials and quantities used in concrete mortar)

Dip Külü Öğütme Süresi (dk.)	Numune Kodu	Çimento (g)	Su (g)	Dip Külü (g)	Zeolit (g)	Agrega (g)	
-	0	880,0	413,6	0	0	2200,0	
	1	792,0	413,6	88,0	0	2200,0	
	0	2	704,0	413,6	176,0	0	2200,0
	3	616,0	413,6	264,0	0	2200,0	
	4	792,0	413,6	88,0	0	2200,0	
30	5	704,0	413,6	176,0	0	2200,0	
	6	616,0	413,6	264,0	0	2200,0	
	7	792,0	413,6	88,0	0	2200,0	
60	8	704,0	413,6	176,0	0	2200,0	
	9	616,0	413,6	264,0	0	2200,0	
	10	792,0	413,6	88,0	0	2200,0	
180	11	704,0	413,6	176,0	0	2200,0	
	12	616,0	413,6	264,0	0	2200,0	
	13	792,0	413,6	88,0	0	2200,0	
240	14	704,0	413,6	176,0	0	2200,0	
	15	616,0	413,6	264,0	0	2200,0	
Zeolit Öğütme Süresi (dk.)	Numune Kodu	Çimento (g)	Su (g)	Dip Külü (g)	Zeolit (g)	Agrega (g)	
0	16	792,0	413,6	0	88,0	2200,0	
	17	704,0	413,6	0	176,0	2200,0	
	18	616,0	413,6	0	264,0	2200,0	
	19	792,0	413,6	0	88,0	2200,0	
30	20	704,0	413,6	0	176,0	2200,0	
	21	616,0	413,6	0	264,0	2200,0	
	22	792,0	413,6	0	88,0	2200,0	
60	23	704,0	413,6	0	176,0	2200,0	
	24	616,0	413,6	0	264,0	2200,0	
	25	792,0	413,6	0	88,0	2200,0	
180	26	704,0	413,6	0	176,0	2200,0	
	27	616,0	413,6	0	264,0	2200,0	
	28	792,0	413,6	0	88,0	2200,0	
240	29	704,0	413,6	0	176,0	2200,0	
	30	616,0	413,6	0	264,0	2200,0	



**Şekil 2.** Alkali silika reaktivitesi tayininin yapıldığı test kabini, içerisine yerleştirilen harç çubukları ve deney sonrası hazırlanan harç çubuklarının komperatör ile boy ölçümü (The test cabinet where alkali silica reactivity determination is made, the mortar rods placed in it and length measurement of the mortar rods prepared after the experiment with the comparator)

### 3. Bulgular ve Tartışmalar (Results and Discussions)

#### 3.1. Öğütme Süresinin Dip Külü/Zeolit Tane Boyutuna Etkisi (Effect of Grinding Time on Bottom Ash/Zeolite Particle Size)

Soma termik santrali dip külünün öğütme süresine bağlı tane boyut değişimlerini gösteren kümülatif elek altı eğrileri aşağıda Şekil 3'de verilmiştir. Dip külünün öğütülmeden önce tane boyutu ( $d_{50}$ ) 128,3

$\mu\text{m}$  iken 30, 60, 180 ve 240 dk. öğütülünce  $d_{50}$  boyutu sırasıyla 29,2, 26,6, 18,4 ve 16,7  $\mu\text{m}$ 'ye düşmektedir. Literatürde Teksas (ABD) termik santrali dip külü ile yapılan çalışmada ham halde dip külünün ortalama tane boyutu  $d_{50}$  3,3 mm iken, yüksek enerjili titreşimli bilyalı değirmende 0,5 saat ve 3 saat (180 dk.) öğütme işlemine tabi tutulduğunda  $d_{50}$  tane boyutunun sırasıyla 6,3 ve 4,5  $\mu\text{m}$ 'ye indirildiği görülmektedir [22]. Aradaki fark öğütme teknolojisindeki farklılıktan kaynaklanmakta olup yüksek enerjili titreşimli değirmen ile çok daha

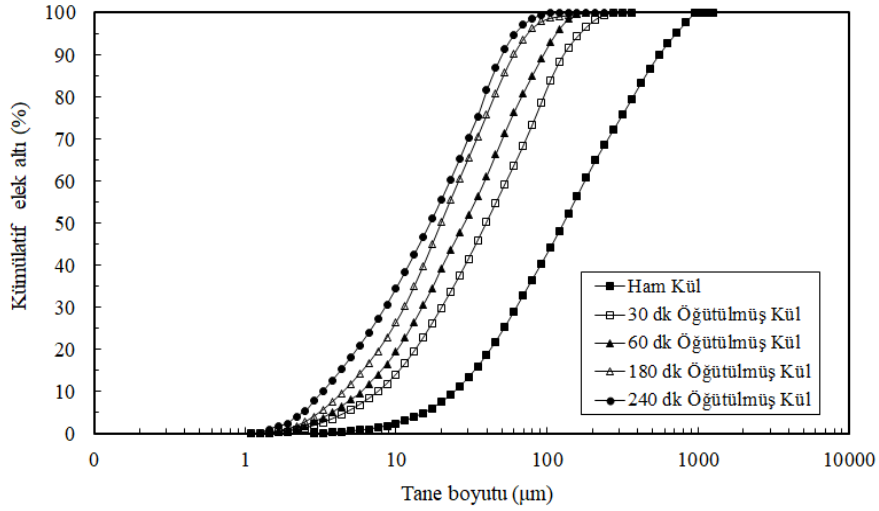
etkin bir öğütme gerçekleşebilmektedir. Soma termik termik santrali dip külünün kullanıldığı bir başka çalışmada [27] da 20 dk.'lık öğütme ile +90  $\mu\text{m}$  ürün miktarı %7,4 olarak verilmiş ancak öğütmenin hangi ekipman ile ve hangi şartlarda yapıldığı bilgisi verilmemiştir. Bu çalışmada 30 dk.'lık öğütme ile elde edilen üründe +90  $\mu\text{m}$  ürün miktarı yaklaşık %27'dir.

Gördes zeolitinin ise öğütülme öncesi tane boyutu ( $d_{50}$ ) 45,55  $\mu\text{m}$  iken 30, 60, 180 ve 240 dk öğütülmüş  $d_{50}$  boyutu sırasıyla 36,2, 24,6, 14,7 ve 10,4  $\mu\text{m}$ 'ye düşmektedir (Şekil 4). Literatürde yapılan bir çalışmada geleneksel seramik bilyalı değirmende 3 saat öğütülen ham Kolombiya zeolitinin  $d_{50}$  tane boyutunun 258,5  $\mu\text{m}$ 'den 13,3  $\mu\text{m}$ 'ye düştüğü görülmektedir [20]. Burris ve Juenger (2016) [19]'in yaptıkları başka bir çalışmada ise 0,56 mm boyutlu Texas zeoliti kullanılmış ve klasik bilyalı değirmende farklı sürelerde (1, 2, 4, 6, ve 8 saat) %75 kritik hızda (85 d/d dönme hızında) öğütme işlemi yapılmış ve öğütme öncesi numune etüve 105°C'de 12 saat kurutulmuştur. Sonuçta öğütülmemiş zeolit  $d_{50}$  tane boyutu 77,4  $\mu\text{m}$  iken, sırasıyla 1, 2, 4, 6 ve 8 saat öğütme sonrası  $d_{50}$  tane boyutunun

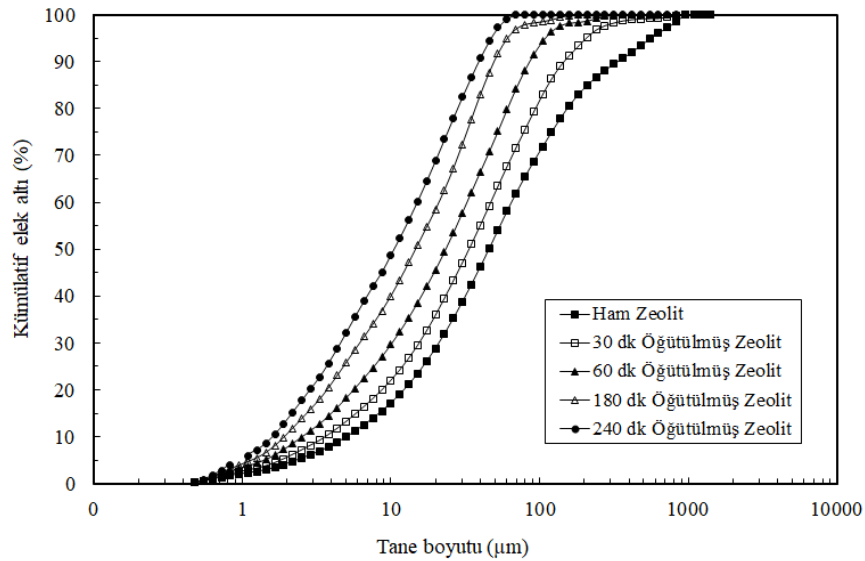
sırasıyla 25,1, 13,9, 9,0, 7,8 ve 6,9  $\mu\text{m}$ 'ye düştüğü belirlenmiş ve tane boyut dağılım eğrilerini esas alarak kendi kanaatlerine göre 4 saatlik öğütmeden sonra tane boyutunda kayda değer bir azalmanın olmadığını yani daha fazla öğütme yapılamadığını beyan etmişlerdir. Bu çalışma ve literatürde verilen çalışmalarda elde edilen  $d_{50}$  değerleri arasında az da olsa farklılıklar olduğu ve bunun sebebinin ise öğütme koşulları ve şartlarıyla alakalı olduğu söylenebilir.

### 3.2. Dip Külü Tane Boyutunun ve Miktarının ASR'ye Etkisi (Effect of Bottom Ash Particle Size and Amount on ASR)

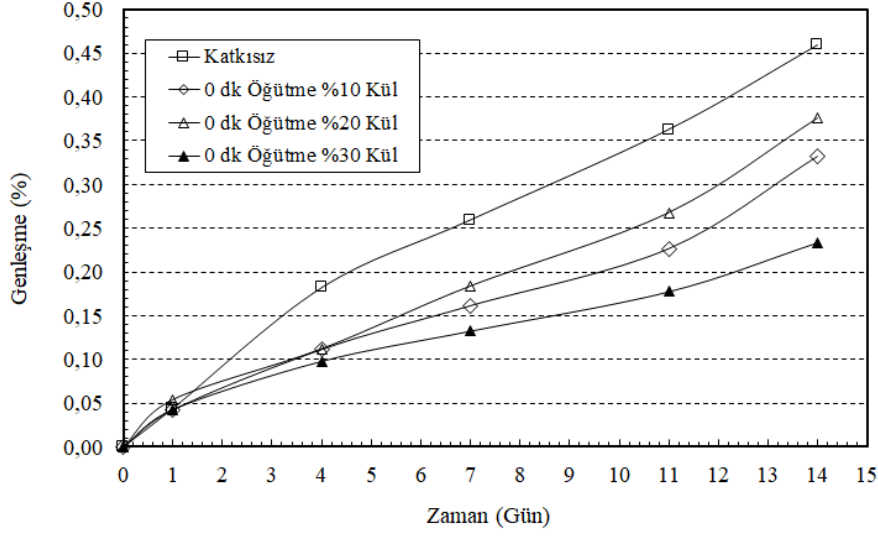
Katkısız ve %10-30 ham dip külü ( $d_{50}=128,34 \mu\text{m}$ ) katkılı beton harcı çubuklarının zamana bağlı boyca % genişleme eğrileri Şekil 5'de verilmiş olup, dip külü katkı miktarının artmasına uygun olarak harç çubuklarının alkali-silika reaksiyonundan (ASR) kaynaklanan genişlemesi azalmaktadır. Katkısız harcın 14 gün sonrasında ölçülen genişlemesi %0,46 iken, dip külünün çimento ile %10 ikamesiyle %0,37'ye, %20 dip külü ikamesiyle %0,33'e ve %30 dip külü ikamesiyle de en düşük genişleme değerine (%0,23) ulaşıldığı



Şekil 3. Öğütme süresine bağlı dip külünün tane boyut dağılımı eğrileri (Particle size distribution curves of bottom ash depending on grinding time)



Şekil 4. Zeolit öğütme süresine bağlı tane boyut dağılımı eğrileri (Particle size distribution curves of zeolite depending on grinding time)



**Şekil 5.** Ham (öğütülmemiş) dip külü ikamesiyle hazırlanan harç çubuklarının zamana bağlı genleşme değerleri (Time-dependent expansion values of mortar bars prepared with raw (unground) bottom ash substitute)

**Tablo 4.** ASTM C1260 standardına göre ASR sınır değerleri [12, 30] (ASR limit values according to ASTM C1260 standard)

Boy Değişimi, %	< 0,1	0,1 – 0,2	> 0,2
14 gün sonra ölçülen boy değişimi oranı	Güvenli bölge, ASR riski yoktur	Şüpheli bölge, ASR riski muhtemeldir	Tehlikeli bölge, ASR açısından tehlikelidir

görülmektedir. Ancak Tablo 4'de ASTM C1260 standardına göre verilen ASR sınır değerleri göz önüne alındığında, elde edilen bu genleşme değerlerinin hepsinin tehlikeli bölgede ( $> 0,20$ ) yer aldığı açıkça görülmektedir.

Şekil 6'da ise farklı sürelerde öğütülmüş dip külünün %10-30 oranında ikamesiyle hazırlanan harç çubuklarının 14 günlük kür sonrası ölçülen % genleşme değerleri bar grafik şeklinde verilmiştir. Açıkça görüldüğü üzere dip külünün öğütülmeden (ham halde) kullanılması alkali-silika reaksiyonunun bastırılmasında önemli bir etki göstermezken, öğütülerek kullanıldığında betondaki alkali silika reaksiyonu önemli ölçüde engellenebilmekte yani bastırılabilir. Bu durum öğütme sonrası dip külünün yüzey alanının ve buna bağlı puzolanik aktivitesinin artmasıyla harç por çözeltilisindeki OH<sup>-</sup> iyonlarını adsorplayarak pH'yı düşürüp silikanın çözünürlüğünü azaltarak jelleşmeyi engellemesi şeklinde izah edilebilir. Bu durum tüm puzolanik maddeler için genel anlamda geçerlidir [10,11]. Öğütülmemiş (0 dk) dip külü ile hazırlanan tüm harç çubuklarının ASR genleşmeleri tehlikeli bölgede ( $> 0,20$ ) yer alırken, tüm öğütme sürelerindeki %20 dip külü katkılı harçların genleşme değerleri şüpheli bölgeye (0,1- 0,2 arası) doğru azaltılabilmektedir. Benzer şekilde 30-240 dk öğütülmüş %30 dip külü katkılı harç çubuklarında da güvenli bölgede genleşme değerleri ( $< 0,1$ ) elde edilmiştir. En düşük genleşme (0,07) 240 dk öğütülmüş dip külünün %30 ikamesinde elde edilmiştir. Literatürde [22] Texas termik santrali uçucu kül ve iki farklı sürede (0,5 ve 3 saat) öğütürerek pulverize ettikleri dip külü numuneleriyle beton harcı hazırlayarak sertleşmiş harçların boyca genleşmelerini ölçmüşler ve (i) ASR'nin bastırılması ve genleşme oranının düşürülmesi bakımından her iki tür katkının da ASR'yi bastırmada ciddi bir etkiye sahip olduğunu ancak uçucu külün etkisinin biraz daha fazla olduğunu ve ayrıca daha fazla süre öğütme uygulanmış dip külünün diğerine göre ASR'yi bastırmada biraz daha etkili olduklarını belirlemişlerdir. Puzolanik katkı kullanılmaksızın hazırlanan beton harcının 14 günlük kür sonrası ölçülen genleşme değeri  $\sim 0,42$  iken %9,1 oranında katılan 0,5 ve 3 saat öğütülmüş dip külü katkılı harçların

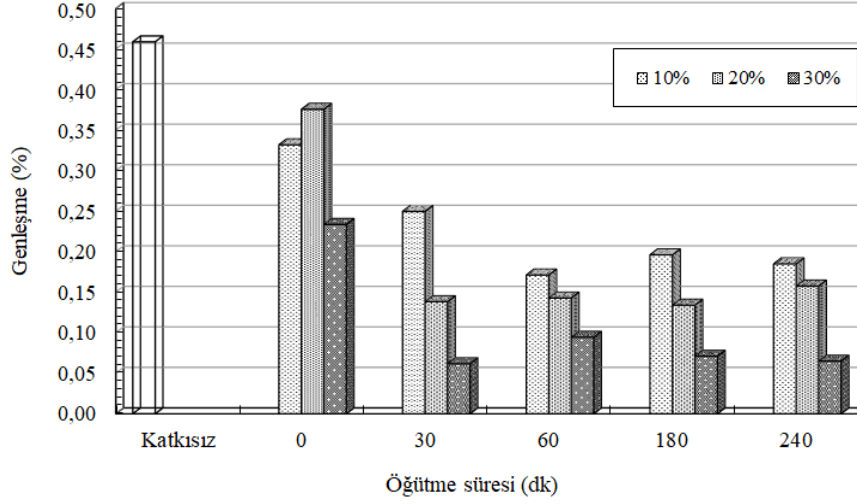
genleşmelerinin sırasıyla  $\sim 0,32$  ve  $\sim 0,29$  olduğu, %23,1 katkı miktarında genleşmelerinin  $\sim 0,19$  ve  $\sim 0,17$ 'ye düştüğü, %33,3 katkı miktarında ise genleşmelerinin 3 saat öğütülmüş dip külü kullanılan harç için güvenli bölgeye düşerken ( $\sim 0,08$ ) 0,5 saat öğütülmüş dip külü kullanılan harç için tam sınır değerde kaldığı ( $\sim 0,1$ ) ve en yüksek katkı oranında (%41,2) ise her iki tür harç için de genleşme değerlerinin güvenli bölgeye ( $< 0,1$ ) düştüğü belirlenmiştir [22]. Öğütülmüş dip külü kullanılan harçların ASR'ye etkisi bakımından literatürde elde edilen bulgular ile bu çalışmada elde edilen bulguların birbirini desteklediği görülmektedir.

### 3.3. Zeolitin Tane Boyutunun ve Miktarının ASR'ye Etkisi (Effect of Particle Size and Amount of Zeolite on ASR)

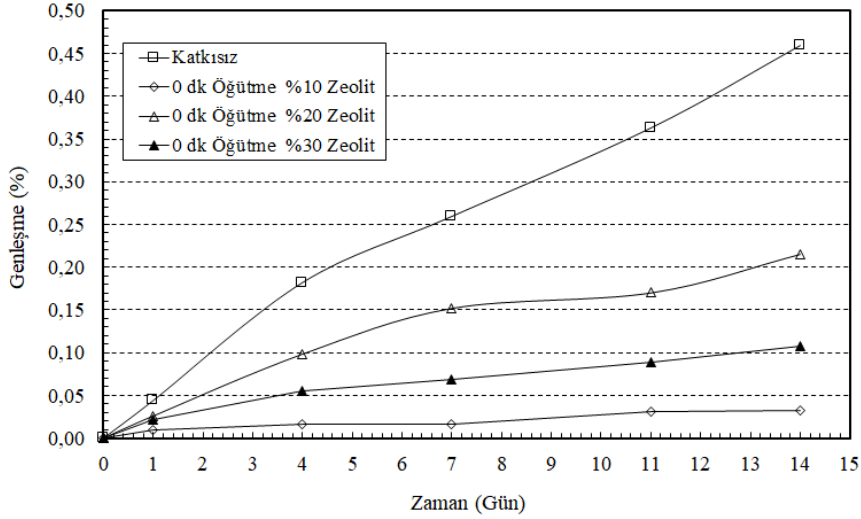
Katkısız ve %10-30 ham zeolit ( $d_{50}=45,55 \mu\text{m}$ ) katkılı beton harcı çubuklarının boyunda elde edilen zamana bağlı genleşme değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Görüldüğü gibi zeolit katkısı beton harcında ASR oluşumunu ciddi düzeyde engellemekte yani bastırmaktadır. Ancak, %10'dan daha fazla zeolit ilavesinin bir avantaj sağlamadığı bilakis dezavantaj oluşturduğu görülmektedir. Katkısız harcın genleşmesi %0,46 iken %10 oranında zeolitin çimentoyla ikamesi ile bu değer  $\sim 93$  azalarak %0,02'e düşmekte ve ancak daha fazla zeolit ilavesiyle genleşme tekrar artmaktadır. Bu veriler Tablo 4'deki ASTM C 1260 standardı sınır değerleriyle kıyaslandığında, %10 zeolit katkılı harcın genleşme açısından güvenli bölgede yer aldığı buna mukabil %20 zeolit katkılı harcın genleşmesinin tehlikeli bölgede, %30 zeolit katkılı harcın genleşmesinin ise şüpheli bölgede yer aldığı görülmektedir.

Şekil 8'de ise farklı sürelerde öğütülmüş zeolitin %10-30 oranında ikamesiyle hazırlanan harç çubuklarının 14 günlük kür sonrası ölçülen % genleşme değerleri bar grafik şeklinde verilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi ham veya öğütülmüş olarak harca %10 zeolit kullanılmasıyla oluşan ASR önemli ölçüde bastırılabilir olup, çubukların boyca genleşmesi  $0,45$ 'den  $0,05$ 'in altına düşmekte bir başka ifadeyle harçlar ASR genleşmesi bakımından güvenli bölgede





**Şekil 6.** Farklı sürelerde öğütülmüş dip külü ile hazırlanan harç çubuklarının 14 günlük kür sonrası ölçülen genleşme değerleri (The expansion values of the mortar rods prepared with ground ash at different times, measured after 14 days of curing)



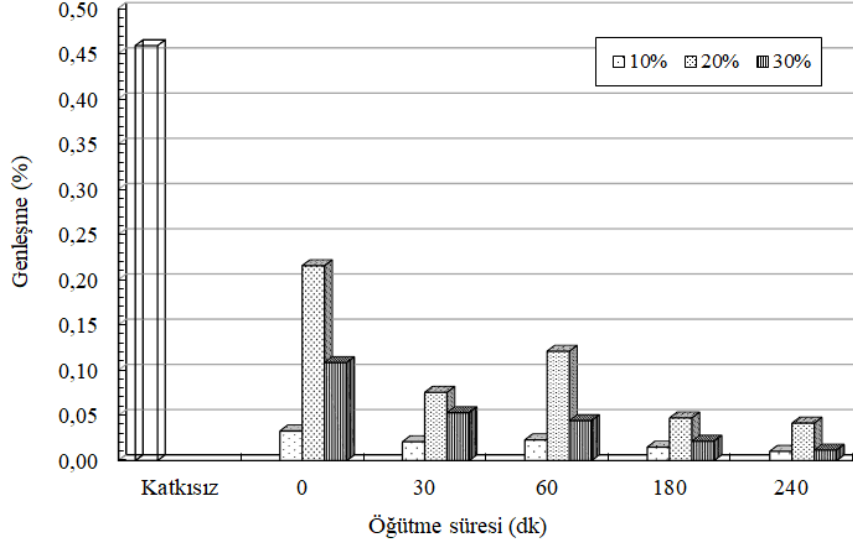
**Şekil 7.** Ham (Öğütülmemiş) zeolit ikamesiyle hazırlanan harç çubuklarının zamana bağlı genleşme değerleri (Time-dependent expansion values of mortar bars prepared with raw (unground) zeolite substitute)

(<0,1) yer almaktadır (Tablo 4). Tane boyutunun öğütme ile küçültülmesi sonucunda, zeolitün pozolanik aktivitesinin daha fazla artmasını sağlamak ve bu da ASR'yi daha iyi bastırıp genleşmeyi daha da azaltmaktadır. Zeolitün %10 oranında ikame edildiği harç çubuklarında en düşük genleşme (%0,01) 240 dk öğütülmüş halde elde edilmiştir. Literatürde [31] klinoptilolit içeren ve d50 tane boyutu 16,84 µm olan İran'ın Semnan bölgesi doğal zeoliti ile yapılan bir çalışmada beton harcına %10, %20 %30 ve %40 oranında doğal zeolit ikame edildikten sonra harç çubuklarının genleşmeleri ölçülmüş ve katkısız betona göre %10-20 zeolit katkılı harçların genleşme oranında ciddi bir düşüş olduğunu %20 zeolit katkılı harçdaki genleşmenin %0,1'in altına düştüğü (%0,05) ancak bundan sonraki zeolit ilavelerinde harç genleşmesinde önemli bir düşüşün olmadığı hemen hemen sabit bir seviyede devam ettiği görülmüştür. Ahmedi ve Skekarchi (2010) [31]'nin elde ettiği bulgular bu çalışmada ham zeolit ile üretilen harçlar için elde edilen sonuçları kısmen desteklemektedir. Şöyleki her iki çalışmada da doğal zeolit katkısının ASR'yi engelleyerek genleşmeyi ciddi oranda düşürmüştür. Ancak onların çalışmasında %20 zeolit katkısında elde edilen genleşme değerine (%0,05) bu çalışmada %10 zeolit katkıyla ulaşılmıştır ve ayrıca bu

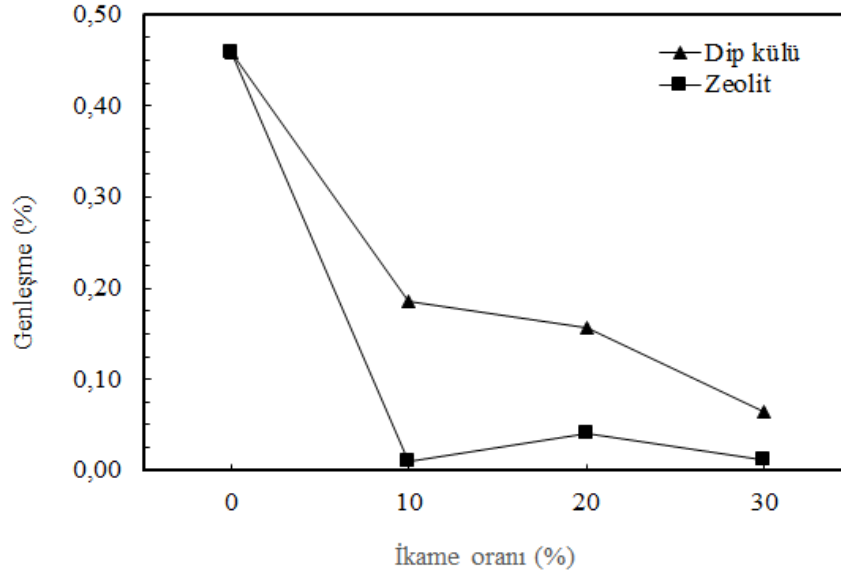
çalışmada %10'dan sonraki zeolit katkılarında genleşmede anşı artış ve azalış olmuştur. Literatürdeki bir başka çalışmada [11] da yine -149 µm tane boyutuna sahip doğal zeoliti, çimento yerine %10 ve %20 ikame ederek hazırladıkları beton harcında ölçülen genleşmelerde katkısız harçlardakine (Genleşme: %0,25) göre ciddi bir düşüş olduğu ve %10 zeolit katkılı harçın genleşmesinin %0,04'e düştüğü ve %20 zeolit katkılı olanda ise ~%0,01'e düştüğü belirlenmiştir.

#### 3.4. Dip Külü ve Zeolitün ASR Etkisi Bakımından Karşılaştırılması (Comparison of Bottom Ash and Zeolite in terms of ASR Effect)

Gerek zeolit ve gerekse dip külünün her ikisi için de ASR'nin bastırılması bakımından en az genleşme değerleri 240 dk'lık öğütme süresindeki mineral katkıların kullanımında elde edilmiştir. Dolayısıyla pozolanik katkıların birbiriyle kıyaslanmasında bu harç çubuklarından elde edilen genleşme değerleri baz alınmıştır. Şekil 9'dan da görüldüğü üzere ASR'nin bastırılması yani boyca genleşmenin azaltılması bakımından aynı öğütme süreleri için zeolit kullanımı dip külüne göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Harç içerisinde kullanım oranı bakımından dikkate alındığında ise %10'luk ikame



Şekil 8. Farklı sürelerde öğütülmüş zeolit ile hazırlanan harç çubuklarının 14 günlük kür sonrası ölçülen genleşme değerleri (Expansion values of mortar sticks prepared with ground zeolite at different times, measured after 14 days of curing)



Şekil 9. 240 dk öğütülmüş dip külü ve zeolit ile hazırlanan harç çubuklarının genleşmelerinin katkı oranına bağlı değişimi (Variation of the expansion of the mortar bars prepared with 240 min ground ash and zeolite depending on the additive ratio)

oranının ASR'yi önemli oranda azaltabileceği görülmektedir. Bu durumun zeolitin sahip olduğu çok gözenekli kristal yapısı ve yüksek kation değiştirme kapasitesi ile ilgili olduğu söylenebilir. Zeolitin sahip olduğu bu özelliklerinin, onun puzolanik aktivitesinin artırdığı ifade edilmektedir [18; 20]. Bu çalışmada elde edilen sonuçların aksine uçucu kül ve zeolit katkı harçların genleşmelerinin ölçüldüğü başka bir çalışmada ise %10 katkıya kadar uçucu külün 14 günlük kür sonrası ölçülen genleşmeyi azaltmada daha etkili olduğu ancak bundan sonraki katkı miktarlarında (%20, 30 ve 40) genleşmelerin birbirine yakın değerlerde olduğu ölçülmüştür [31].

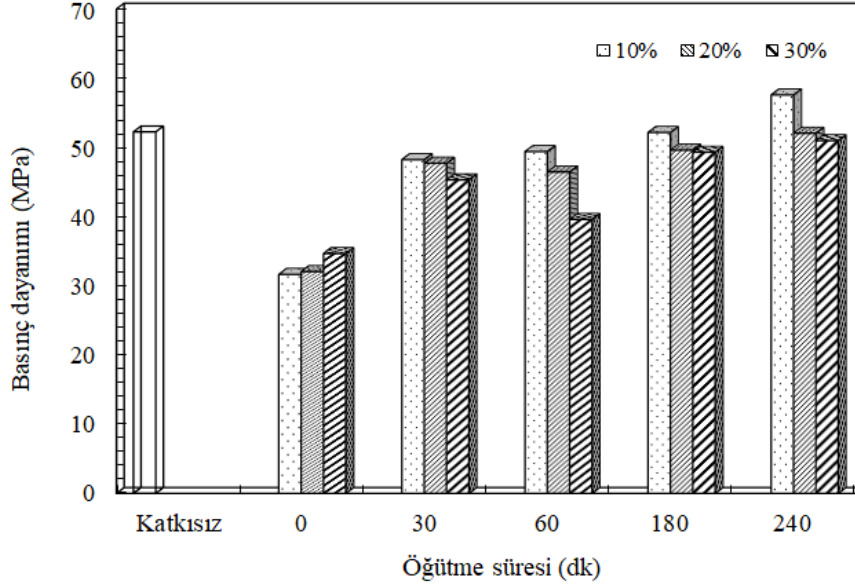
### 3.5. Dip Külü Tane Boyutunun Basınç Dayanımına Etkisi (Effect of Bottom Ash Particle Size on Compressive Strength)

Tablo 5 ve Şekil 10'da görüldüğü üzere çimento yerine (240 dk öğütülen hariç) dip külü ikamesi harcın basınç dayanımını

düşürmüştür. Katkısız harcın basınç dayanımı 52,25 MPa iken (Tablo 5), %10 öğütülmemiş dip külü ikamesinde bu değer 31,65 MPa'a, düşerken sırasıyla 30 ve 60 dk öğütülmüş %10 dip külü ikamesinde ise yeniden arttığı ancak katkısız haldekine göre halen daha (sırasıyla 48,23 ve 49,39 MPa) düşük olduğu ancak 180 dk öğütülmüş dip külü ikamesinde ise harcın dayanımının katkısız harçla aynı seviyede (52,15 MPa) olduğu ve 240 dk öğütülmüş dip külü katkısıyla da bir miktar arttığı (57,58 mPa) görülmektedir. Bu durum muhtemelen öğütme işlemiyle külün puzolanik aktivitesinin artması ve ayrıca harçtaki boşlukların/gözeneklerin doluluk oranının artmasıyla ilgilidir [22]. Literatürde [22] dip külünün tane boyutunun (öğütme süresinin) harcın ASR'na etkisi ve buna bağlı basınç dayanımına etkisi konusunda yapılmış detaylı bir çalışmada texas dip külü titreşimli bilyalı değirmende 0,5 ve 3 saat öğütmeye tabi tutularak d50 tane boyutu sırasıyla 6,3 ve 4,5 µm olan iki farklı ürün elde edilmiş ve her biri %9 ila %43 arasında çimento harcına katılarak elde edilen

**Tablo 5.** Farklı sürelerde öğütülmüş dip külü ile hazırlanan harcın 28 günlük kürleme sonrası basınç dayanımları ve dip külü ortalama tane boyutları  
(Compressive strengths and average particle sizes of bottom ash after 28 days of curing of the mortar prepared with ground ash at different times)

Öğütme Süresi, dk	0	30	60	180	240
$d_{50}$ Boyutu, $\mu\text{m}$	128,34	39,41	28,32	19,82	16,79
İkame Oranı, %	Basınç Dayanımı, MPa				
0		52,25			
10	31,65	48,23	49,39	52,15	57,58
20	32,05	47,71	46,45	49,60	52,04
30	34,66	45,30	39,59	49,29	50,97



**Şekil 10.** Farklı sürelerde öğütülmüş dip külü ile hazırlanan harc çubuklarının 28 günlük kürleme sonrası basınç dayanımına katkı oranının etkisi

(The effect of the contribution ratio on the compressive strength of the mortar bars prepared with ground ash at different times after 28 days of curing)

sertleşmiş harcın 28 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek basınç dayanımı (31 MPa) 3 saat öğütülmüş dip külünün %9 katkısıyla hazırlanan harçta elde edilmiştir. Ayrıca katkısız harcın 27,5 MPa olan basınç dayanımlarının her iki tür dip külü için de ~%20'den fazla katkı oranlarında düştüğü belirlenmiştir. Literatürde kömür dip külüne uygulanan işlemler ve çimentoda/beton harcında kullanımı konusunda yazılmış derleme başka bir makalede [23] yapılan çalışmalara göre kömür dip külü için külün içeriğinden ziyade küle uygulanan (eleme, öğütme, suda bekletme, kurutma gibi) ön işlemlerin harcın/betonun basınç dayanımı üzerinde daha fazla etkiye sahip oldukları beyan edilmekte ve bu şartlara ve harç karışımına bağlı olarak çok farklı basınç dayanımları elde edildiği belirtilmektedir. Literatürde [23] değişik ülkelerdeki farklı termik santrallerine ait farklı kimyasal, mineralojik ve fiziksel özelliklere sahip dip külleri ile yapılan çalışmalarda %5'den %40'a kadar farklı oranlarda çimento yerine ikame edilerek hazırlanan harçların 28 günlük basınç dayanımlarının 33-70 MPa arasında değiştiği ve genel olarak en yüksek basınç dayanımlarının ~%5-15 dip külü katkısıyla elde edildiği ve yine aynı harçlar için 28 günlük minimum basınç dayanımlarının (20-40 MPa) ise %18-%40 dip külü katkısıyla elde edildiği görülmektedir. Gooi vd (2020) [23]'nin verdiği farklı ülkelere ait çok sayıda değişik tip dip külü ikameleriyle hazırlanan harçlardan elde edilen basınç dayanımı tablosu incelendiğinde dip külünün bir anlamda tane boyutunu da simgeleyen özgül yüzey alanı değerlerine göre ve harca ikame edilen oranlarına bağlı olarak karşılaştırma yapıldığında mesela yüzey alanı 4050 m<sup>2</sup>/kg olan ispanya dip külünün

harca %5 ikamesiyle elde edilen 28 günlük basınç dayanımı 57 MPa iken, yüzey alanı 859-1102 m<sup>2</sup>/kg olan Texas/ABD dip külünün harca %9 ikamesiyle elde edilen 28 günlük basınç dayanımının 31 MPa olduğu görülmektedir ki bu durum dip külü inceliğinin harcın dayanımında önemli bir rolü olduğunu göstermektedir.

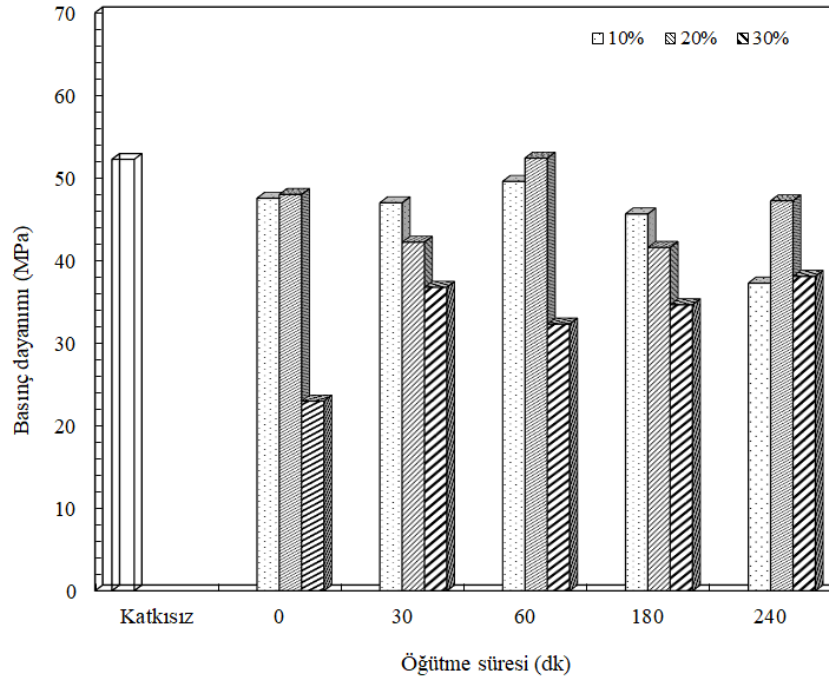
### 3.6. Zeolitin Tane Boyutunun Basınç Dayanımına Etkisi (Effect of Particle Size of Zeolite on Compressive Strength)

Harca zeolit katkısı ile 28 günlük basınç dayanımında belirli bir miktar azalma meydana geldiği ve ayrıca zeolit katkı miktarının tane boyutundan daha fazla etkili olduğu görülmektedir (Tablo 6 ve Şekil 11). Öğütülmüş zeolitler ile hazırlanan harçların basınç dayanımları dip külü katkılı harçlara benzer şekilde katkısız harca yakın veya katkı oranına bağlı olarak daha düşük çıkmıştır. Bununla birlikte zeolitin öğütme süresinin artırılmasıyla zeolit katkılı harcın dayanımının arttığı ve katkısız haldeki seviyeye geldiği açıkça görülmektedir ki bu durum hem puzolanik aktivitenin artması ve hem de daha ince hale gelen zeolitin harç gözeneklerini daha iyi doldurmasından kaynaklandığı söylenebilir ki literatürde öğütülmüş zeolitin harcın basınç dayanımlarına etkisi konusunda yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir [19, 20]. Puzolanik katkı içermeyen harçların basınç dayanımı değeri 52.25 MPa iken, öğütülmemiş zeolit kullanılması durumunda basınç dayanımı değerleri ikame oranına göre belirgin şekilde azaldığı; en düşük basınç dayanımının %30 ikame oranında elde edilmiştir. Seriler içerisinde en yüksek basınç dayanımı değeri de 60 dk öğütme işlemine sahip zeolitin %20 ikamesi

**Tablo 6.** Farklı sürelerde öğütülmüş zeolit ile hazırlanan harcın 28 günlük kürlenme sonrası basınç dayanımları ve zeolitinin ortalama tane boyutları

(Compressive strength of the mortar prepared with zeolite ground at different times after 28 days of curing and average particle size of the zeolite)

Öğütme Süresi, dk	0	30	60	180	240
$d_{50}$ Boyutu, $\mu\text{m}$	45,55	33,46	23,37	14,63	10,49
İkame Oranı, %	Basınç Dayanımı, MPa				
0			52,25		
10	42,53	46,98	49,57	45,63	37,25
20	47,99	42,21	52,39	41,57	47,23
30	22,97	36,75	32,29	34,64	38,08

**Şekil 11.** Farklı sürelerde öğütülmüş zeolit ile hazırlanan harç çubuklarının 28 günlük kürlenme sonrası basınç dayanımına katkı oranının etkisi (The effect of the contribution ratio on the compressive strength of the mortar bars prepared with zeolite ground at different times after 28 days of curing)

ile üretilen harçlarda ve 52.39 MPa olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde Florez vd (2021) [20]'nin çalışmasında kontrol numunesinin 28 günlük basınç dayanımı 49 MPa iken, %30 öğütülmemiş zeolit katkılı harcın dayanımı 16 Mpa ve %30 (bilyalı değirmende 3 saat) öğütülmüş zeolit katkılı harcın dayanımı 37,8 MPa ölçülmüştür. Burris vd. [19] yaptıkları çalışmada öğütülmemiş zeolit katkısının harcın basınç dayanımında pozitif bir etkisi belirlenememişken, bilyalı değirmende öğütme işleminin çimento harcında kullanılan zeolitinin puzolanik aktivitesini artırdığını ve dolayısıyla harcın 28 ve 90 günlük basınç dayanımını öğütme süresine bağlı olarak %10-25 oranında artırdığını ortaya koymuşlardır. Literatürde, gerek öğütülmüş ve gerekse öğütülmemiş zeolit katkılı harçların katkı miktarının artmasına paralel basınç dayanımlarının düştüğü [20];  $d_{50}$  boyutu 16,84  $\mu\text{m}$  olan doğal zeolitinin katkı miktarının artmasıyla önce arttığı sonra tekrar azaldığı ancak kontrol numunesi basınç dayanımına (43 MPa) göre tüm katkılı harçların basınç dayanımlarının ~%10-15 daha yüksek oldukları ve en yüksek değer (52-54 MPa) %10-15 katkılı harçlarla elde edildiği [31]; Katkısız çimento pastasının ~40 MPa olan 28 günlük basınç dayanımının, %20 öğütülmemiş zeolit katıldığında ~38 MPa'a düştüğü ancak %20 ikame oranında 2 saat öğütülmüş ( $d_{50} = 13,9 \mu\text{m}$ ) zeolit katıldığında basınç dayanımının ~42 MPa'a çıktığı ve %20 ikame oranında 8 saat öğütülmüş ( $d_{50} = 6,9 \mu\text{m}$ ) zeolit katıldığında ise basınç dayanımının ~46 MPa'a yükseldiği [19]; yüzey alanı 227  $\text{m}^2/\text{kg}$  olan doğal zeolit

ile hazırlanan beton harcının 28 günlük basınç dayanımları ölçülmüş ve katkısız halde ~60 MPa olan dayanımın %10, 20 40 ve 60 zeolit katkısı sonrası sırasıyla yaklaşık 48, 45, 32 ve 26 Mpa olduğu ve en yüksek basınç dayanımının %10 katkılı harçta elde edildiği ve daha fazla katkı miktarıyla dayanımın önemli oranda düştüğü [32] görülmektedir. Literatürde yapılan başka bir çalışmada ise betonda %15 mikronize ( $d_{50}: 3,85$  ve  $d_{90}: 8,16 \mu\text{m}$ ) zeolit kullanımının, %10 silis dumanı kullanımına yakın dayanım değerleri verdiği ve dolayısıyla yüksek performanslı beton üretiminde mikronize zeolitinin, silis dumanına alternatif bir mineral katkı olabileceği ortaya konmuştur [33].

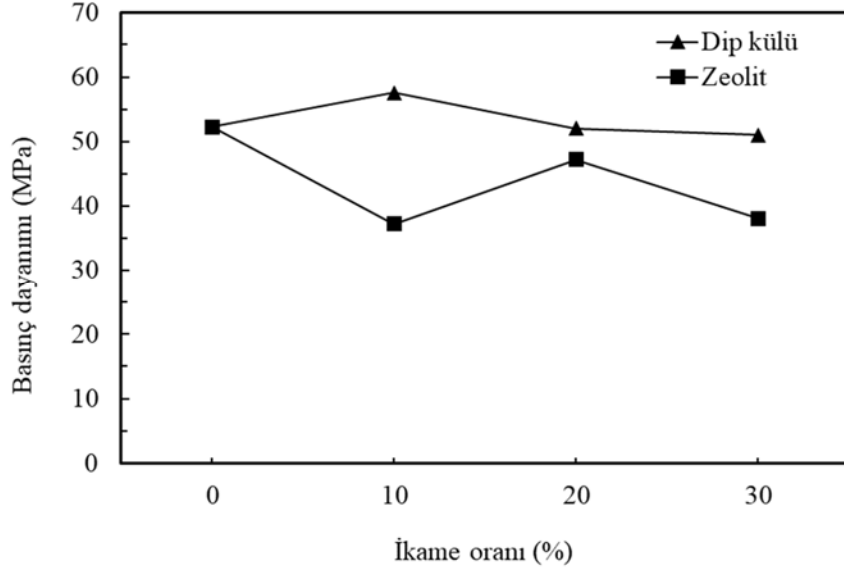
### 3.7. Dip Külü ve Zeolitinin Basınç Dayanımına Etkisi Bakımından Karşılaştırılması

(Comparison of Bottom Ash and Zeolite in terms Effect on Compressive Strength)

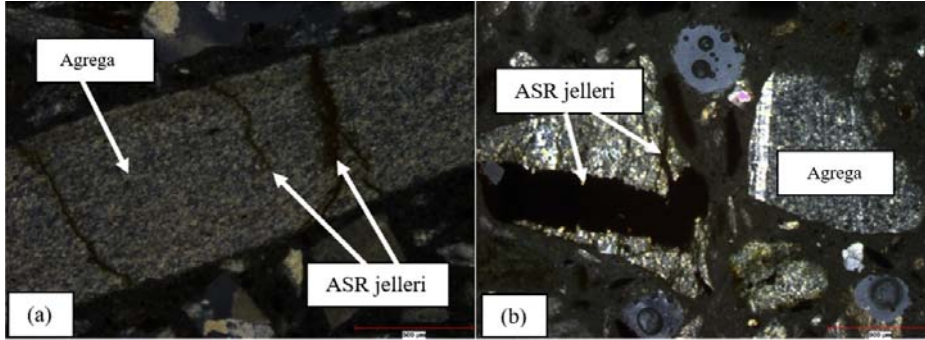
Zeolit ve dip külü puzolanik katkıların kullanılmasıyla üretilen harçların basınç dayanımları üzerindeki etkisinin incelenmesinde ASR'nin bastırılması bakımından en iyi sonuçların elde edildiği 240 dk öğütülmüş mineral katkıların kullanımı dikkate alınmıştır. Şekil 12'de verilen harçların 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, puzolan içermeyen harcın basınç dayanımı değeri yaklaşık 50 MPa olup, dip külü kullanımının harçların basınç dayanımında önemli bir

etkisi görülmezken zeolit ikamesi ile basınç dayanımının kısmen azaldığı ve yaklaşık 35 MPa seviyesine azaldığı gözlenmiştir. 240 dk öğütülmüş dip külü ve zeolitın ortalama tane boyutları (d50) sırasıyla 16.7 ve 10.4 µm olup, zeolitın tane boyutu daha ince olmasına rağmen basınç dayanımlarının dip külü katkısına göre daha düşük olması

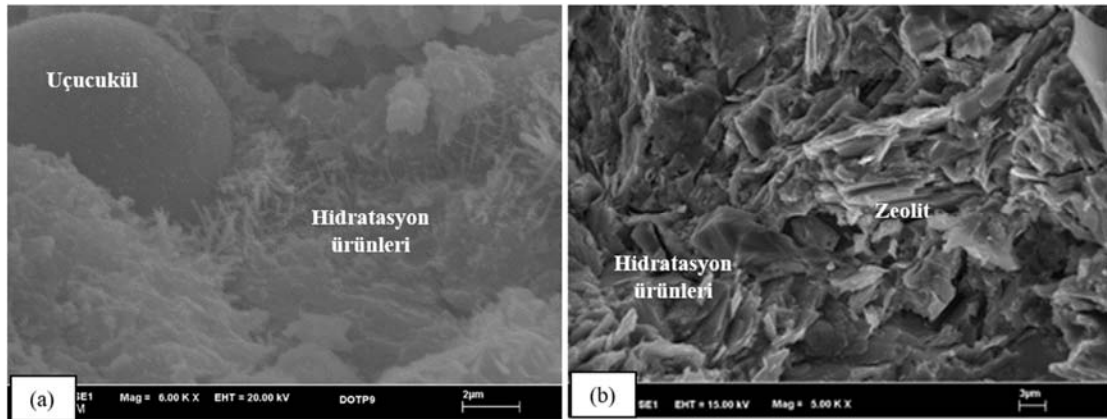
genel anlamda beton veya harçta puzolanik katkıların tane boyutunun incelmeyeine bağlı puzolanik aktivitenin artışı ve ayrıca boşluk dolgu oranının artması izahatı ile uyuşmamaktadır. Bu durum zeolitın kristal yapısıyla alakalı olabilir. Bilindiği üzere zeolit mineralleri 3 boyutlu boşluk/kanal sistemlerine ve buna bağlı yüksek gözenekliliğe sahip



**Şekil 12.** 240 dk öğütülmüş dip külü ve zeolit ile hazırlanan harç çubuklarının basınç dayanımlarının katkı oranına bağlı değişimi (Variation of the compressive strength of the mortar bars prepared with ground ash and zeolite for 240 minutes depending on the additive ratio)



**Şekil 13.** ASR etkisine maruz kalmış harç çubuklarının (a: uçucukül katkılı ve b: zeolit katkılı) mikroskop görüntüleri (Microscope image of mortar bars (a: fly ash blended and b: zeolite blended) exposed to ASR)



**Şekil 14.** Harç çubuklarının (a: uçucukül katkılı ve b: zeolit katkılı) SEM görüntüleri (SEM image of mortar bars (a: fly ash blended and b: zeolite blended))

minerallerdir. Dolayısıyla bu kristal yapısı ile ortamdaki su emme/absorplama davranışı dip külüne göre farklı olması ve çok daha hızlı su emerek harcın hızlı prizlenmesine sebep olabilir. Bu durum ise harcın mukavemet kazanmasına kısmen de olsa negatif bir etki göstermiş olabilir.

### 3.8. İç yapı incelemesi sonuçları (Internal structure view results)

Mikroskop altında mineral (dip külü ve zeolit) katkılı harçların iç yapıları incelendiğinde, silis esaslı agregalar üzerinde ASR jellerinin oluşumu açıkça görülmektedir (Şekil 13a ve Şekil 13b). Reaktif olarak kullanılan silis esaslı agregalar harç içerisinde ortamın çimentonun hidratasyon ürünlerinden kaynaklı yüksek pH'ı nedeniyle aktif hale gelmiştir [25]. Çimento içerisinde bulunan Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O oksitleri ile reaksiyona girerek oluşan jel ürünleri hem uçucu kül ve hem de zeolit katkılı harçlar içerisinde oluştuğu gözlenmiştir.

Bir diğer iç yapı incelemesi de SEM ile yine mineral katkılı harçlarda hidratasyon ürünlerinin oluşumunu gözlemek için yapılmıştır. Uçucu kül katkılı harçlarda (Şekil 14a) özellikle iğnemi yapıdaki kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) ürünleri uçucül tanesi etrafında yoğun bir şekilde oluştuğu gözlenmiştir. Zeolit katkılı harçların SEM görüntülerinde ise (Şekil 14b) daha çok zeolit yapısının ve bunun yanında az miktarda hidratasyon ürünleri gözlenmiştir. Bu yapılar da puzolanik etki olarak basınç dayanımlarına yansıdığı deneysel sonuçlardan görülmüştür.

## 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, Doğançık (Sultandağı/Afyonkarahisar) deresi agregası, CEM-I 42,5 portland çimentosu ve su ile hazırlanan harçta puzolanik katkı olarak kullanılan Gördes (Manisa) zeoliti ve Soma termik santrali dip külünün tane boyutunun, harcın alkali-silika reaksiyonuna (ASR) ve basınç dayanımına etkisi detaylı olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Puzolanik katkıların tane boyutunun küçültülmesinde öğütme süresi önemli etkiye sahiptir. En uzun öğütme süresi (240 dk) her iki puzolanik katkı için de en küçük tane boyutunu vermiştir. Ham halde dip külü ve zeolit d<sub>50</sub> değerleri sırasıyla 128.34 µm ve 45.55 µm iken, öğütme süresinin 240 dk boyunca yapılması durumunda bu değerler sırasıyla 50,19 µm'ye 10,49 µm'ye düşürülmüştür.
- Kullanılan puzolanik malzemelerin tane boyutunun incelmeye paralel olarak harç çubuklarında ASR bastırılabilen ve boyca gelişme büyük ölçüde önlenilebilmektedir.
- Yaklaşık %10'luk puzolanik katkı harç çubuklarındaki ASR'yi engelleyebilmektedir. En düşük gelişme %30 oranında mineral katkı kullanımında gerçekleşmektedir. Dip külü katkılı harç çubuklarının en düşük boyca gelişme değerine (%0,07) 240 dk öğütülen dip külünün %30 ikamesi ile ulaşılmıştır. Zeolit katkılı (%10 ikameli) harç için ise en düşük gelişme %0,01 olup, 240 dk öğütülmesi durumunda elde edilmiştir. Mineral katkı oranına bağlı gelişmenin azaltılmasında, dip külü kullanımına bağlı olarak doğrusal bir ilişki söz konusu iken zeolit için doğrusal bir ilişki kurulamamıştır.
- ASR'nin bastırılmasında zeolit, dip külüne kıyasla çok daha etkilidir.
- Puzolanik katkıların basınç dayanımına etkisi mukayese edildiğinde, ASR sonucundaki gelişmelerin azaltılmasında etkili olan 240 dk öğütme ve %30 ikamede kullanılan dip külünün, harcın basınç dayanımında cüzi (%2,45) bir azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Buna karşın, yine aynı sürede öğütülmüş %10 ikame oranındaki zeolit kullanımının ise basınç dayanımını belirli oranda (%29) azalttığı görülmüştür. Bunlara ilaveten, tane boyutu ile

basınç dayanımı ilişkisi açısından dikkate alındığında, dip külü kullanımı durumunda tane boyutu küçüldükçe basınç dayanımı değerlerinde sınırlı bir artış gözlenirken, zeolit kullanımı için bir ilişki kurulamamıştır.

- Harç çubuklarındaki ASR jelleri optik mikroskop ile her iki mineral katkı kullanımında da gözlenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde uçucu kül içeren harçlarda zeolit içerenlere göre daha yoğun hidratasyon ürünlerinin oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum da dayanımda etkisini göstermiştir.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma 17.FEN.BİL.53 kodlu ve "Harçlarda Kullanılan Bazı Puzolanik Malzemelerin Tane Boyutunun Alkali-Silika Reaksiyonuna ve Basınç Dayanımına Etkisinin Araştırılması" başlıklı yüksek lisans tez projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olup, katkılarından dolayı AKÜ-BAPK birimine teşekkür ederiz.

## Kaynaklar (References)

1. Yalçın H., Gürü M., Çimento ve Beton Ders Kitabı, Palme Yayıncılık, Ankara, Türkiye, 2006.
2. Rajabipour F., Giannini E., Dunant C., Ideker J. H., Thomas M.D.A., Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps, *Cem. Concr. Res.*, 76, 130-146, 2015.
3. Multon S., Sellier A., Multi-scale analysis of alkali-silica reaction (ASR): Impact of alkali leaching on scale effects affecting expansion tests, *Cem. Concr. Res.*, 81, 122-133, 2016.
4. Shi T., Zheng L., Xu X., Evaluation of alkali reactivity of concrete Aggregates via AC impedance spectroscopy, *Constr. Build. Mater.*, 145, 548-554, 2017.
5. Hench L.L., Clark D.E., Physical Chemistry of Glass Surfaces, *J. Non-Cryst. Solids*, 28, 83-105, 1978.
6. Sanchez L.F.M., Multon S., Sellier A., Cyr M., Fournier B., Jolin M., Comparative study of a chemo-mechanical modeling for alkali silica reaction (ASR) with experimental evidences, *Constr. Build. Mater.*, 72, 301-315, 2014.
7. Abdelrahman, M., ElBatanouny, M.K., Ziehl, P., Fasl, J., Larosche, C.J., Fraczek, J., Classification of alkali-silica reaction damage using acoustic emission: A proof-of-concept study, *Constr. Build. Mater.*, 95, 406-413, 2015.
8. Drolet C., Duchense J., Fournier B., Validation of the alkali contribution by aggregates to the concrete solution, *Cem. Concr. Res.*, 98, 10-23, 2017.
9. Massazza F., *Puzzolona and Pozzolonic Cements*, Lea's Chemistry of Cement and Concrete Forth Edition, Editor: Peter C. Hewlett, Elsevier Ltd., Oxford, 471-631, 1998.
10. Thomas M., The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: a review, *Cem. Concr. Res.* 41 (12), 1224-1231, 2011.
11. Meesaka T., Sujjavanicha S., Effectiveness of 3 different supplementary cementitious materials in mitigating alkali silica reaction, *Mater. Today: Proc.*, 17, 1652-1657, 2019.
12. Korkmaz, S., Bazı yapay puzolanların harçların basınç dayanımlarına ve alkali silika reaksiyonu üzerine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
13. Yıldırım, K., Betonda alkali silika reaksiyonunun azaltılmasında mineral katkı kombinasyonlarının optimizasyonu, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2013.
14. Nayır, S., Mineral katkıların alkali-silika reaksiyonunu iyileştirmede etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2015.
15. Dinçdemir, İ., Alkali-Silika reaksiyonunun iyileştirilmesinde mineral ve kimyasal katkıların kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2015.
16. Boddy A.M., Hooton R.D., Thomas M.D.A., The effect of product of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction, *Cem. Concr. Res.*, 30, 1139-1150, 2000.
17. Liu Y., Lei S., Lin M., Li Y., Ye Z., Fan Y., Assessment of pozzolanic activity of calcined coal-series kaolin, *Appl. Clay Sci.*, 143, 159-167, 2017.

18. Yılmaz B., Uçar A., Oteyaka B., Uz V., Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement, *Build. Environ.* 42, 3808–3815, 2007.
19. Burris L.E., Juenger M.C.G., Milling as a pretreatment method for increasing the reactivity of natural zeolites for use as supplementary cementitious materials, *Cem. Concr. Compos.*, 65, 163-170, 2016.
20. Florez C., Restrepo-Baena O., Tobon J.I., Effects of calcination and milling pre-treatments on natural zeolites as a supplementary cementitious material, *Constr. Build. Mater.*, 310, 125220, 2021.
21. Afshinnia K., Rangaraju .PR., Efficiency of ternary blends containing fine glass powder in mitigating alkali-silica reaction, *Constr. Build. Mater.*, 100, 234-245, 2015.
22. Oruji S., Brake N.A., Guduru R.K., Nalluri L., Günaydın-Sen Ö., Kharel K., Rabbanifar S., Hosseini S., Ingram E., Mitigation of ASR expansion in concrete using ultra-fine coal bottom ash, *Constr. Build. Mater.*, 202, 814–824, 2019.
23. Gooi S., Mousa A.A., Kong D., A critical review and gap analysis on the use of coal bottom ash as a substitute constituent in concrete, *J. Cleaner Prod.*, 268, 121752, 2020.
24. Mladenovic, A., Suput, J.S., Ducman, V., Skapin, A.S., Alkali-Silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates, *Cem. Concr. Res.*, 34, 1809-1816, 2004.
25. Salah Abd El-Ghany Abo El-E., Essam Abd El-Aziz K., Sayieda Rawwash R. Z., Reham Abu-Elwafa M., Effect of nano-SiO<sub>2</sub> (NS) on dolomite concrete towards alkali silica reaction, (*Housing and Building National Research Center HBRJ Journal*) 14, 165-170, 2018.
26. Kurugöl S., Puzolanik aktivite tespit yöntemleri: Fiziksel metotlar, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi (CFD)*, 38 (1), 2017.
27. Sönmez G., Işık M., Environmental effects of coal combustion wastes and usage areas, *Nigde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 9 (1), 72-83, 2020.
28. Canpolat F., Yılmaz K., Kose M.M., Sumer M., Yurduse M.A., Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production, *Cem. Concr. Res.*, 34, 731–735, 2004.
29. TS 13517, Türk Standartları, Bağlayıcı Malzemeler ve Agregâ Karışımlarının Potansiyel Alkali Silika Reaktivitesinin Tayini (Hızlandırılmış Harç Çubuğu Yöntemi), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
30. Uygunoğlu, T., Yüksek oranda silis dumanı içeren harçlarda alkali-silika reaksiyonu (ASR) gelişiminin incelenmesi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5, 9-16, 2009.
31. Ahmadi B., Shekarchi M., Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cem. Concr. Compos.*, 32, 134–141, 2010.
32. Vejmelková E., Konakova D., Kulovana T., Keppert M., Zumar J., Rovnaníková P., Kersner Z., Sedlmajer M., Robert Cerny R., Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance. *Cem. Concr. Compos.*, 55, 259–267, 2015.
33. Ceylan S., Yazıcıoğlu S., Turanlı L., Usage of micronized zeolite in high performance concrete, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 163-176, 2021.

