

## Afşin-Elbistan Termik Santral Külünün Standartta Uygun Hale Getirilmesi ve Beton Katkısı Olarak Değerlendirilmesi

Hüseyin TEMİZ<sup>\*1</sup>, Kadir ELBİSTAN<sup>2</sup>, Betül PAKÖZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

<sup>2</sup>Devlet Su İşleri 20. Bölge Müdürlüğü, Kahramanmaraş

<sup>3</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş

Geliş tarihi: 25.06.2021

Kabul tarihi: 13.09.2021

### Özet

Türkiye’de sanayinin gelişmesi ve yaygınlaşması için enerjiye gereksinim vardır. Bu nedenle enerji üretiminin artırılması, enerjiden tasarruf sağlanması ve binaların yalıtımına önem verilmesi, atık maddelerin değerlendirilmesi gibi konuların önemi giderek artmaktadır. 2019 yılı verilerine göre Türkiye’de elektriğin yaklaşık %57,8’i fosil yakıtlardan üretilmektedir. Fosil yakıtların yaklaşık %65’ini kömür oluşturmaktadır. Kahramanmaraş Afşin-Elbistan Termik Santrali, linyit kömürü ile elektrik üreten santrallerden biridir. Afşin-Elbistan Termik Santrali’nde yılda yaklaşık iki milyon ton uçucu kül üretilmekte ve bu külün çok azı kullanılmaktadır. Bu uçucu külün yeterince kullanılmamasının nedeni; kimyasal yapısının standartların öngördüğü kriterlere uygun olmamasıdır. Atık külün depolama sorunu yanında, çevrenin kirlenmesine önemli derecede etkisi de bulunmaktadır. Diğer yandan endüstriye kazandırılması halinde ülke ekonomisine önemli oranda katkı sağlaması bilinen bir gerçektir. Bu deneysel çalışmada, Kayseri bimsi, cam atığı tozu, az oranda kolemanit ilaveleriyle Afşin-Elbistan Termik Santrali uçucu külü (AEUK) standartta uygun hale getirilmiştir. Basınç dayanımı, priz süresi, hacimsel genleşme, donma-çözülme gibi deneyler yapılmıştır. Katkı maddeleri sayesinde, AEUK’nın betonda kullanılabileceği ortaya çıkarılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Basınç dayanımı, Bims, Dayanıklılık, Kolemanit, Uçucu kül

### Investigation of the Effects of Afşin-Elbistan Thermal Power Plant Ash on Concrete

#### Abstract

Turkey are in need of energy for development and expansion of the industry. For this reason, issues such as increasing energy production, saving energy and attaching importance to the insulation of buildings, and utilizing waste materials are increasing. According to data from 2019, about 57.8% of electricity is produced from fossil fuels in Turkey. About 65% of fossil fuels are coal. Kahramanmaraş Afşin-Elbistan Thermal Power Plant is one of the power generating plants with lignite coal. Approximately two million tons of fly ash is produced annually at Afşin-Elbistan Thermal Power Plant and very little of this ash is used. The reason why this fly ash is not used enough; chemical structure does not meet the criteria stipulated by the standards. In addition to the storage problem of waste ash, it also has a significant

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Hüseyin TEMİZ, [htemiz@ksu.edu.tr](mailto:h temiz@ksu.edu.tr)

impact on environmental pollution. On the other hand, it is a known fact that if it is brought into the industry, it will contribute significantly to the national economy. In this experimental study, Kayseri pumice, glass waste powder, and the low powder colemanite additions, Afşin-Elbistan Thermal Power Plant fly ash were made compatible with the standard. Thanks to the additives, it was determined that the adverse effects of Afşin-Elbistan Thermal Power Plant fly ash on concrete were eliminated.

**Keywords:** Bims, Colemanite, Compressive strength, Durability, Fly ash

## 1. GİRİŞ

2019 verilerine göre Türkiye’de elektrik üretiminde en büyük pay %37 ile kömür santrallerinin olmuştur. Doğalgazın oranı 2018’e göre %31’den %18,86’ya inmiştir. İki fosil kaynağın toplamı %57,8’dir [1].

Beton diğer yapı malzemelerine göre; daha kolay şekil verilebilir olması, ekonomik ve dayanıklı olması, üretiminde daha az enerji tüketilmesi, her yerde üretilebilir ve estetik olması özellikleriyle en çok kullanılan yapı malzemesidir [2]. Bununla beraber bazı durumlarda normal dayanımlı betonun kullanımı yetersiz kalmaktadır. Betondan sadece dayanım değil bunun yanında durabilite de istenmektedir. Bu durumda betonun durabiliteye göre tasarımı ön plana çıkmaktadır. Genel olarak betonun çevresel etkilere diğer bir deyişle durabiliteye göre tasarımı bu iki parametreye göre yapılır. Betondaki maksimum su/çimento oranı ve minimum çimento dozajı gibi kısıtlamaların ne ölçüde gerçekleştirilebileceği (yani çevresel etki sınıfına bağlı olarak maksimum su/çimento oranı belirli bir değeri aşamaz ve çimento dozajı da öngörülen minimum değerinin altına inemez) doğrudan beton agregasının türüne, granülometrisine ve standartlarına uygun olmasına bağlıdır [3].

Kömür yakan termik santrallerin bir yan ürünü olan uçucu kül yapay puzolandır. Uçucu külün beton yapımında kullanılabilmesi için sahip olması gereken özellikler ve sınırlamalar standartlarda belirtilmektedir. Bu sınırlamaların bazıları SO<sub>3</sub> içeriği, serbest CaO içeriği, MgO içeriği, alkali oksit içeriği olarak sıralanabilir. Bu kimyasal içerikleri yüksek olan küller, çimento ikamesi için veya kompoze çimento üretiminde kullanılamamaktadır. Dolayısıyla bu küller depo

sahalarında uzun yıllar saklanmakta, zamanla yeraltı suyu karışarak veya havalandırılarak kirlilik ve çevresel tehdit oluşturabilmektedir [4]. Uçucu kül katkısı genel olarak betonun kohezif özelliğini arttırmakta; ancak akışkanlığını azalttığı için bir akışkanlaştırıcı madde ile birlikte kullanılması gerekebileceği belirtilmektedir [5]. Puzolanların kullanım amaçları arasında beton teknolojisinde enerji tasarrufu sağlamak, taze ve sertleşmiş betona bazı yeni özellikler kazandırılması bulunmaktadır. Puzolanların etkinlikleri, mineralojik ve kimyasal yapısına, aktivitesine, kullanım miktarına ve betonun bileşim özelliklerine bağlıdır. Yüksek miktarda CaO içeren C sınıfı uçucu küller ile silis dumanı betonun ilk yaşlardaki ve nihai dayanımlarını arttırmaktadır. Bunların süper akışkanlaştırıcılarla kullanılması ile yüksek mukavemetli beton üretiminde yeni bir çığır açılmıştır [6]. Uçucu küller betonda termik rötreyi önlemek için kütle betonu yapımında kullanılmaktadır. Bu malzemelerin doğrudan betona katılması durumunda büyük enerji tasarrufu sağlanabilir. Uçucu küller çok ince olduklarından geçirimsiz beton üretiminde de kullanılabilir [7]. Afşin-Elbistan Termik Santrali’nin 1. ve 2. ünitelerinden alınan numunelerin kimyasal analizleri yapılmıştır. Belirlenen kimyasal analiz sonuçlarına göre reaktif CaO oranı (%53,44) %10’un üzerinde olduğu için TS EN 197-1’e göre W sınıfına girdiği, SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toplam değerinin (%30,69) %50’nin altında kalması nedeniyle sınıf dışı kaldığı, yine SiO<sub>2</sub> oranının (%18,27) %25’in altında kalması nedeniyle sınıf dışı olduğu belirtilmiştir [8]. Diğer taraftan Afşin Elbistan Termik Santrali, ülkemizdeki en yüksek enerji üretme ve yan ürün olarak uçucu kül üretme kapasitesine sahiptir. Üretilen uçucu külün içerdiği yüksek serbest CaO, düşük SiO<sub>2</sub> ve yüksek SO<sub>3</sub> oranları nedeniyle TS EN 197-1’e uymadığı için tüketim oranı düşük kalmakta çözüm olarak depolama yoluna gidilmektedir [9].

Pomza oluşumu sırasında bünyedeki gazların ani olarak bünyeyi terk etmesi ve ani soğuma nedeniyle, makro ölçekten mikro ölçüğe kadar sayısız gözenek içerir. Gözenekler arası genelde bağlantısız boşluklu olduğundan hafif, suda uzun süre yüzebilen, permeabilitesi düşük ve yalıtımı oldukça yüksektir. Kimyasal olarak %75'e varan silis içeriği bulunabilmektedir. Kayacın içerdiği SiO<sub>2</sub> oranı, kayaca abrasif özellik kazandırmaktadır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşimi ise ateş ve ısıya yüksek dayanım özelliği kazandırır. Türkiye'de pomza yatakları, Ürgüp-Avanos ve Kayseri'nin Talas, Tomarza-Develi bölgesinde yoğunlaşmıştır. Ayrıca Bitlis, Van, Ağrı, Kars, Ankara, Isparta ve Muğla illerinde bulunmaktadır [10].

Bor kristalize görünüm ve optik özellikleri bakımından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir. Günümüzde Dünya bor rezervlerinin ve üretiminin en fazla olduğu iki ülke A.B.D. ve Türkiye'dir. Önemli üretici ülkelerin bu üretimdeki payları sırasıyla, Türkiye %33, A.B.D. %28, Rusya %23 ve diğer ülkeler %16 düzeyindedir [11].

Amorf yapıya, yüksek silis (SiO<sub>2</sub>>%70) içeriğine ve yüksek yüzey alanına sahip olan camın geri dönüşümü çevresel bir konudur. Çevrede bulunan camın erimez yapısı ve aşırı geri dönüşüm maliyeti geri dönüşümünü zorlaştırmaktadır. Puzolanik özellik gösteren çimento inceliğindeki cam tozu alternatif bir çimento katkı malzemesi olarak değerlendirilebilmektedir. Cam tozundan beklenen etki beton veya harcın dayanım ve dayanıklılığının iyileştirilmesidir. Amorf cam tozu puzolanik aktivite göstermesi sayesinde çimento ve suyun

hidratasyonu sonucunda oluşan Ca(OH)<sub>2</sub>'i, içeriğinde yüksek oranda bulunan SiO<sub>2</sub> ile bağlayarak betona dayanım kazandıran kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jellerini oluşturmaktadır [12].

Yapılan araştırmada cam tozunun betonun basınç dayanımı üzerine etkileri incelenmiştir. Araştırmada çimento yerine sırasıyla %10, %15 ve %20 oranlarda cam tozu alınarak karışımlar hazırlanmış ve numunelerin 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımları test yöntemi ile bulunmuştur. Katkılı numunelerden bulunan basınç dayanımı değerleri referans numune basınç dayanımı değeri ile karşılaştırılmıştır. Cam tozu katkı numunelerden elde edilen basınç dayanımı değerinin referans numune basınç dayanımından yaklaşık %20 daha büyük çıktığı belirtilmiştir [13].

Bu araştırmada, Kayseri pomzası (bims), cam atığı tozu, az oranda kolemanit ilaveleriyle AEUK'nın kimyasal yapısı standarda uygun hale getirilmiştir. Katkı maddeleri sayesinde, AEUK'nın neden olduğu olumsuz etkilerinin giderildiği belirlenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada kullanılan AEUK Afşin-Elbistan Termik Santralinden, Kayseri pomzası (KP) Kayseri yöresinden, kolemanit (KO) Balıkesir/Bigadiç çevresinden sağlanmış ve cam tozu (CT) ise camcıların atık camlarından elde edilmiştir. Şekil 1'de toz halindeki mineral katkı maddeleri görülmektedir.



Şekil 1. a) AEUK, b) P, c) K, d) C

AEUK'nın standarda uygun hale getirilerek C40/50 MPa dayanımlı beton üretilmesi

hedeflenmiştir. Deneylerde kullanılan bağlayıcı malzemelerin bazı kimyasal ve fiziksel analizleri

Çizelge 1 ve 2’de verilmiştir. Araştırmada optimum karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla eksiltelen CEM I çimentosunun yerine kütlece % olarak beş farklı oranda AEUK ve ince öğütülmüş cam tozu (CT), pomza (KP) ve kolemanit tozları (KO) kullanılmıştır. Değişik oranlarda katkı seçilmesinde numunelerin dayanım, dayanıklılık ve ekonomik olması gibi amaçlar esas alınmıştır. Çizelge 3’te deneme karışımları verilmiştir. Her bir karışım için altı adet 10 cm boyutlu beton küp numuneleri üretilmiştir. Numunelerin 7 ve 28

günlük basınç dayanımı değerleri ve malzemelerin kimyasal analizleri göz önünde bulundurularak optimum karışım oranı belirlenmiştir. Buna göre, yeni karışımda çimento miktarı kütlece %40 azaltılmış yerine %20 AEUK, %10 KP, %5 KO ve %5 CT kullanılmış ve miktarlar Çizelge 4’te verilmiştir. Araştırmanın bundan sonraki bölümünde üretilen numuneler Çizelge 4’te verilen referans (REF) ve karışım (6)’da belirtilen oranlar kadar alınmıştır. Beton karışım hesabında TS 802 esas alınmıştır [14].

**Çizelge 1.** Bağlayıcı malzemelerin kimyasal özellikleri

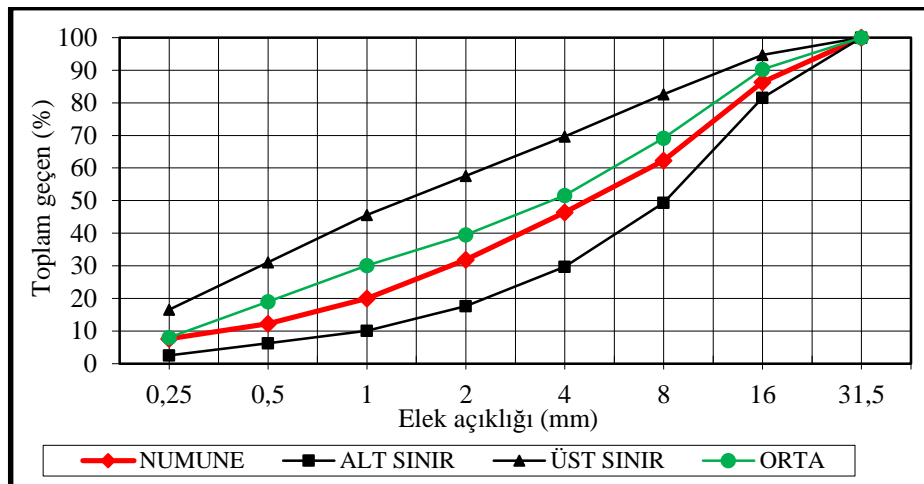
Katkı türü	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	K. Kaybı
CEM I 42.5R	19,40	5,36	3,79	64,30	2,25	2,47	0,90	0,09	1,44
CEM I <sub>60+</sub> AEUK <sub>20</sub> +KP <sub>10</sub> +KO <sub>5</sub> +CT <sub>5</sub>	26,83	6,62	3,47	47,96	1,40	3,96	1,02	0,92	5,79
Çimentosuz AEUK <sub>20</sub> +KP <sub>10</sub> +KO <sub>5</sub> +CT <sub>5</sub>	40,33	9,27	4,53	24,15	2,09	5,32	1,10	2,15	7,58

**Çizelge 2.** Bağlayıcı malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzeme	Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	Elek üzeri kalan (%)	
			90 µ	45 µ
CEM I 42,5R	3,15	3480	0,1	8,2
CEM I <sub>60+</sub> AEUK <sub>20</sub> +KP <sub>10</sub> +KO <sub>5</sub> +CT <sub>5</sub>	2,93	3790	6,2	21,3

Çalışmada kullanılan agrega Aksu-Nehir malzemesinden agrega üreten işletmeden temin edilmiştir. İşletmeden alınan dere agregası kırılmış ve kırılmamış karışımlardan meydana

getirilmektedir. Agreganın tane dağılımı TS EN 12620’de öngörülen kriterlere uygun hale getirilmiştir [15]. Agreganın tane dağılımı Şekil 2’de verilmiştir.



**Şekil 2.** Agreganın tane dağılımı

Kumun özgül ağırlığı 2,66 kg/dm<sup>3</sup>, çakılın özgül ağırlığı 2,7 kg/dm<sup>3</sup>; su emme oranları ise kumda %1,9, ince çakılda %0,4 ve iri çakılda %0,3 bulunmuştur.

Çalışmalarda beton karışımı için önerilen sınır değerler TS EN 206 'ya göre zararlı kimyasal ortam XA3 sınıfı ortam standartlarına göre tasarım

yapılmıştır. C40/50 MPa dayanımlı beton üretilmesi hedeflenmiştir. Karışımlarda çimento dozajı 420 kg/m<sup>3</sup> alınmıştır. S/Ç oranı 0,44 olarak alınmış ve taze betonun slump (çökme) değeri 13 cm olarak belirlenmiştir. (TS 802, 2009 ve TS EN 2006, 2013). Taze betonda aynı çökme değerlerini bulmak için bir ticari ürün olan süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

**Çizelge 3.** 1 m<sup>3</sup> beton karışımı için malzeme miktarları (deneme)

Numune adı	Beton bileşenleri (kg/m <sup>3</sup> )					Katkı malzemeleri (kg/m <sup>3</sup> )				
	Su	CEMI	Çakıl		Kum	Kim. katkı	KO	KP	CT	AEUK
			4/12	12/24						
REF	184,8	420	447	536	792	0,42				
1. (CEMI <sub>80</sub> +KO <sub>5</sub> +KP <sub>5</sub> +AEUK <sub>5</sub> )	184,8	252	447	536	792	3,36	21	21	21	21
2. (CEMI <sub>75</sub> +KO <sub>5</sub> +CT <sub>5</sub> +KP <sub>5</sub> +AEUK <sub>10</sub> )	184,8	315	447	536	792	3,36	21	21	21	42
3. (CEMI <sub>65</sub> +KO <sub>10</sub> +CT <sub>5</sub> +KP <sub>10</sub> +AEUK <sub>10</sub> )	184,8	273	447	536	792	3,36	42	21	42	42
4. (CEMI <sub>60</sub> +KO <sub>10</sub> +KP <sub>10</sub> +AEUK <sub>20</sub> )	184,8	252	447	536	792	3,36	42	42	-	84
5. (CEMI <sub>60</sub> +KP <sub>10</sub> +CT <sub>10</sub> +AEUK <sub>20</sub> )	184,8	252	447	536	792	3,36	-	42	42	84

**Çizelge 4.** 1 m<sup>3</sup> beton karışımı için malzeme miktarları

Numune adı	Beton bileşenleri (kg/m <sup>3</sup> )					Katkı malzemeleri (kg/m <sup>3</sup> )				
	Su	CEMI	Çakıl		Kum	Kim. katkı	KO	KP	CT	AEUK
			4/12	12/24						
REF	184,8	420	447	536	792	0,42	-	-	-	-
6. (CEMI <sub>60</sub> +KO <sub>5</sub> +CT <sub>5</sub> +KP <sub>10</sub> +AEUK <sub>20</sub> )	184,8	252	447	536	792	3,36	21	42	21	84

Çizelge 4'te verilen değerlerin alınmasında basınç dayanımı yanında, katkı maddelerinin rezerv durumları, taze ve sertleşmiş betonların özellikleri üzerine katkıların etkileri gibi durumlar da dikkate alınmıştır.

## 2.1. Metot

Çimento hamuru için gerekli normal kıvam su oranı, priz süreleri ve hacimsel genleşme değerleri bulunmuştur. Normal kıvam su oranı ve priz

süreleri vikat cihazı, hacimsel genleşme ise Le Chatelier kalıbıyla bulunmuştur. Çimento hamurunda Le Chatelier cihazı kullanılarak yapılan testle, çimento içinde bulunabilen ve su ile temas edince şişerek betona zarar verebilen, serbest CaO ve MgO'nun çimento hamurunda oluşturduğu hacim genişlemesi miktarının ölçülmesi amaçlanmaktadır. Şekil 3.a'da Vicat cihazı ile işlem, Şekil 3.b'de Le Chatelier kalıbı ile hacimsel genleşme değerini bulma işlemi verilmiştir [16].



Şekil 3. a) Priz süresi tayini işlemi, b) Hacimsel genişleme işlemi

Taze betonun işlenebilmesi hakkında bilgi edinmek için çökme testi işlemi yapılmıştır. Test işleminde çökme hunisinden yararlanılmıştır.

Beton karıştırılması ve çökme değerinin bulunması işlemi Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Betonun karıştırılması ve çökme değerinin bulunması

Beton basınç dayanımı 10 cm boyutlarındaki standart küp numunelerin test edilmesiyle saptanmıştır. Numune hazırlanmasında TS EN 12390-2 esas alınmıştır [17]. Buna göre laboratuvar ortamında hazırlanan karışımlar içi hafifçe kalıp yağı ile yağlanmış kalıba iki katman halinde ve her katman 25 kez şişlenerek yerleştirilmiştir. Uygun ortamda 24 saat bekletilen numuneler kalıptan çıkarılıp musluk suyu bulunan

kür tanklarında deney yaşına kadar  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  sıcaklıkta bekletilmiştir. Kür işlemi tamamlanan numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Optimum karışım oranını bulmak için hazırlanan numuneler 7 ve 28; araştırmanın diğer bölümü için hazırlanan numuneler (REF ve 6) ise 7, 28 ve 56 günlük yaşlarda test edilmiştir. Şekil 5'te küp numuneler ve test işlemi verilmiştir.





Şekil 5. Bir grup küp numune ve test edilme işlemi

Alkali-silika reaksiyonu hızlandırılmış, ASTM C 1260 standartlarına göre yapılmıştır. Bu yöntemle göre REF ve 6 nolu karışım için belirlenen oranlarda alınan bağlayıcı malzeme ve standart kumla 25\*25\*285 mm boyutlarında her karışım için üç adet harç prizması hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler bir gün kalıpta bekletildikten sonra 14 gün, 80°C sıcaklıktaki %3'lük sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinde bekletilmiştir. Numune boyları, 1 günlük ve 14 günlük NaOH çözeltisinde bekletilen numuneler üzerinde bulunmuştur. Şekil 3'te kür edilen

numuneler ve test işlemi görülmektedir. Alınan bu numunelerin 0,001 mm duyarlılıkta bir boy ölçer ile boyları belirlenmiştir. Son ölçülen boy-ilk ölçülen boy farkının ilk boya oranlanması ile boy değişim yüzdesi bulunmuştur. Bulunan değer standardın öngördüğü koşullarla karşılaştırılması neticesi alkali-silika reaksiyonu bakımından karışımın uygun olup olmadığı konusunda karar verilmektedir [18]. Şekil 6'da alkali silika reaksiyonunu bulmak için hazırlanan prizma numuneleri ve test işlemi görülmektedir.



Şekil 6. Prizma numuneler ve test işlemi

Kılcal su emme değerini bulmak için REF ve 6'nolu karışımlardan 3'er adet 10 cm boyutlu küp numuneler 24 saat 105 °C'de etüvde kurularak etüv kuru hale getirildi ve kütleleri belirlendi (W1). Sonra numuneler alt yüzeylerinden su ile temas ettirilerek kılcal su emme deneyine tabi tutuldu. Kılcal yolla emilen su miktarının belirlenebilmesi için 60. dakika sonunda numune

tartılarak ağırlığı bulundu (W2). Ölçülen değerlerden hareket edilerek kılcallık katsayısı;  $k_c = (Q/A)^2 \times (1/t)$  ifadesi ile bulunmuştur [19]. Şekil 7'de etüvde kurutma işlemi görülmektedir.

$k_c$  = Kılcal su emme katsayısı (cm<sup>2</sup>/s)

$Q$  = t zaman aralığında ölçülen su miktarı (cm<sup>3</sup>)

$A$  = Kılcal su emme yüzey alanı (cm<sup>2</sup>)

Çalışmada çabuk donma ve çözülme koşulları altında betonda dayanıklılık faktörü tayini deneyi için Şekil 8'de görülen donma/çözülme cihazı kullanılmıştır. REF ve 6 nolu karışımlardan 3 adet olmak üzere toplam 6 adet 10 cm boyutlu küp numune teste tabi tutulmuştur. Bunun için numuneler etüvde 24 saat kurutulduktan sonra ilk ağırlıklarının belirlenebilmesi için hassas terazi ile tartılmıştır. REF ve 6 nolu karışıma ait numuneler

2 saat su içerisinde bekletildikten sonra donma/çözülme cihazına konmuştur. Donma/çözülme kabiniinde -22 °C'de 1,5 saat donma ve 30 dakikada çözülme işlemi otomatik olarak ayarlanmış ve yapılmıştır. Bu yöntemle 28 çevrim (donma/çözülme) uygulanmıştır. Deney sonunda kütle kaybı ve basınç dayanımı değerlerindeki değişimler incelenmiştir.



Şekil 7. Numunelerin kurutulması



Şekil 8. Donma/çözülme test işlemi

Böhme aşınma değerinin bulunması için Çizelge 4'teki REF ve 6 nolu numunelerden 3'er adet küp numuneler üretilmiştir. Boyutları 71\*71\*71 mm olarak üretilen numuneler 28 gün kürde bekletildikten sonra kurumak üzere etüve bırakılmıştır. 24 saat etüvde bekletilen numuneler çıkarıldıktan sonra hassas terazide tartılmış ve kumpas ile 4 yüzeyinin ölçümü yapılmış ve kaydedilmiştir. Deneyde, başlangıç ağırlıkları bulunarak Böhme cihazının döner diski üzerine yerleştirilen numunelere sabit aşındırma kuvveti uygulanmıştır. Cihazın çalıştırılmasıyla birlikte sürtünme yolu üzerine dökülen 22 g zımpara tozunun aşındırıcı etkisine maruz bırakılan numuneler, her biri 22 devirden meydana gelen toplam 16 periyotluk aşınma testine tabi tutulmuş ve numunelerin, deney sonundaki kütle ve hacimsel aşınma kayıpları belirlenmiştir. Şekil

9'da Böhme cihazı ile aşındırma işlemi görülmektedir [20].

Hamur ve harç numunelerinin mikro yapılarının incelenmesi için Scanning Electron Microscope (SEM) taraması yapılmıştır. Hazırlanan yaklaşık 0,5-1 cm boyutlu numunelerin iletkenliğinin sağlanabilmesi için altın kaplama yapılmıştır. Çimentonun ve çimento+katkı maddelerinin su ile teması neticesi meydana gelen kimyasal reaksiyonu ve alkali-agrega reaksiyonu sırasında mikro yapıdaki durumun incelenmesi için normal sertleşmiş hamurların 7 ve 28 gün; alkali-agrega testine tabi tutulmuş aynı bağlayıcıya sahip karışımların ise 120 gün  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{MgSO}_4$  çözeltilerinde bekletilenlerinden alınan numunelerin iç yapıları SEM ile incelenmiştir. Şekil 10'da SEM cihazı verilmiştir.





Şekil 9. Böhme cihazı



Şekil 10. SEM cihazı

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

#### 3.1. Priz Süresi ve Hacimsel Genleşme

Priz süresi hacimsel genleşme sonuçları Çizelge 5’te verilmiştir. Çizelge 5’teki priz süreleri ve hacimsel genleşme değerleri incelendiğinde katkı maddelerinin çimentonun priz sürelerinde büyük miktarda artışa, hacimsel genleşmede ise azalmaya neden olduğu görülmüştür. Priz

sürelerinin artmasına neden olan en etken katkı maddesinin kolemanit olduğu söylenebilir. Saptanan bulgular, 21 nolu referansta verilen bulgularla örtüşmektedir [21]. Hacimsel genleşme değerleri standartlara uygundur. Katkıların çimentonun hacimsel genleşme değerini azaltmasının nedeni MgO oranının düşük olması ve reaksiyona girmeyen CaO oranını azaltması ile izah edilebilir.

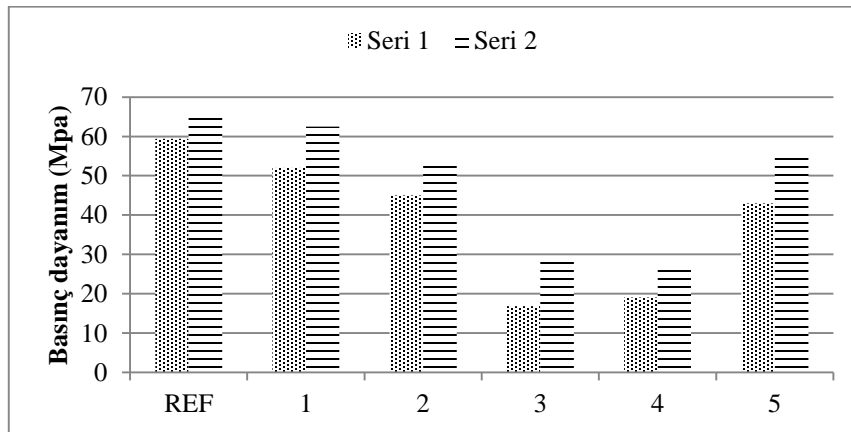
Çizelge 5. Priz süreleri

Numune	Priz süresi (dk)		Hacimsel genleşme (mm)
	Başlangıç	Sonu	
CEM I 42,5 REF	190	290	2,33
(CEMI <sub>60+</sub> KO <sub>5</sub> +CT <sub>5</sub> +KP <sub>10</sub> +AEUK <sub>20</sub> )	350	510	1,5

#### 3.2. Optimum Karışım Oranı

Karışıma giren optimum malzeme miktarlarını bulmak için hazırlanan 10 cm boyutlu deneme küp

numunelerinin ve referans numunenin basınç dayanımları Şekil 11’de görülmektedir.

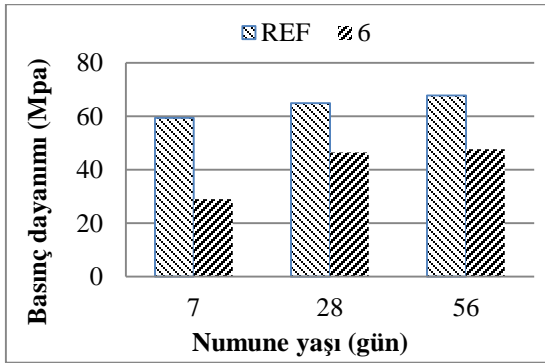


Şekil 11. 7 ve 28 günlük numunelerin basınç dayanımları

Şekil 11'deki basınç dayanımları incelendiğinde kolemanit oranı %10 olan 3. ve 4. grup numunelerin basınç dayanımları oldukça düşüktür. 3. ve 4. grup numunelerin kalıptan çıkarılma süreleri 4 günü bulmuş ve erken çıkan numunelerde dağılma gözlenmiştir. Her katkı malzemesinden %5 kullanarak elde edilen 1. grup karışımın 7 ve 28 günlük dayanımları referans numuneye yakın çıkmıştır. 5. grupta çimento %40 azaltılmış olmasına rağmen 28 günlük dayanım sonucu referans numunenin %90'ı mertebesinde çıkmıştır. Deneylerde kullanılan süper akışkanlaştırıcıyla referans numunede 7 ve 28 günlük dayanım birbirine yakın çıkmıştır. Yapılan bir çalışmada, farklı özelliklere sahip süper akışkanlaştırıcılardan erken yaşta mukavemet sağlayan katkı kullanıldığında 7 günlük basınç dayanımı, 28 günlük basınç dayanımının %98'ine kadar yaklaşmakta olduğu sonucuna varılmıştır [22].

### 3.3. Basınç Dayanımı

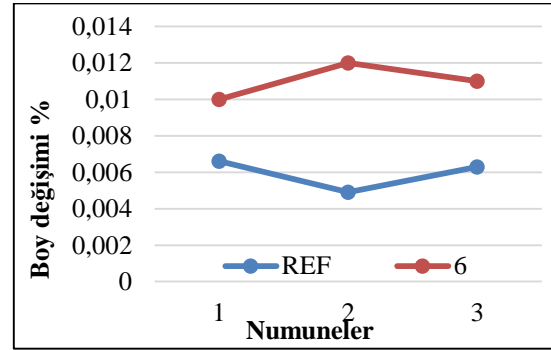
Referans ve 6 nolu numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. REF ve 6 nolu numunelerin basınç dayanımları

Şekil 12'de REF ve 6 nolu numunelerin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde referans numunesinin basınç dayanımının C40 beton sınıfını sağladığı görülmektedir. 6 nolu karışım numunesinde ise 28 günlük basınç dayanımı değeri C40'ın yaklaşık %15 altında kalmıştır. Referans numuneye göre, 6 nolu karışımın yaşla dayanım gelişmesi daha

yüksek çıkmıştır. Örneğin 6 nolu numunenin 7 günlük dayanımı ile 56 günlük dayanımı arasındaki fark incelendiğinde, 56 günde %64 artış meydana geldiği görülmektedir. Katkı maddelerinin 6 nolu numunenin ilk yaşlardaki basınç dayanımını düşürdüğü söylenebilir. Bunda kolemanit ve diğer puzolanik maddelerin etkisinin olduğu referanslarca doğrulanmaktadır [21]. Yapılan araştırmada cam tozunun mekanik özelliklere reaktif olması nedeniyle olumlu etkide bulunduğu belirtilmiştir [23]. Araştırmamızda cam tozu tek başına kullanılmadığı için etkisi belirlenememiştir. Hızlandırılmış alkali-silika reaksiyonu deneyine ilişkin 14 günlük boy değişim oranları Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Alkali-silika reaksiyonu ile boy değişimi

Şekil 13'te alkali-silika reaksiyonu testi neticesi bulunan boy değişim oranları incelendiğinde değerlerin çok düşük olduğu görülmektedir. ASTM C1293-08b standardına göre boy değişimi %0,1'den küçük ise agrega zararsız olarak tanımlanmaktadır. Sonuçların ASTM C 1260 standardına göre 14 günlük boy değişiminin maksimum sınırının altında kaldığı görülmüştür. Yine Şekil 10'dan 6 nolu karışım numunesinin boy değişiminin REF numunesine göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebi olarak karışım numunesindeki alkalilerin ( $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$ ) oranının referans numunesinden daha fazla olması gösterilebilir. Alkali-silika reaksiyonu, genellikle çimentodan kaynaklanan alkali ( $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$ ) reaktif silika formları içeren agregalar arasında oluşan ve betonda genleşme etkisine sebep olan kimyasal bir reaksiyondur [24]. Araştırmada alkali-silika reaksiyonu sonucu bulunan değerler referans tarafından doğrulanmaktadır.

### 3.4. Kılcal Su Emme ve Donma Çözülme

Çalışmada REF ve 6 nolu numuneler üzerinde kılcal su emme ve donma/çözülme işlemi sonrası basınç dayanımı kayıpları Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6'da görüldüğü gibi referans numunesine göre 6 nolu katkılı numunede bulunan ortalama

kılcal su emme katsayısı ve donma/çözülme sonrası basınç dayanımı kaybı sırasıyla %25 ve %14 daha düşük bulunmuştur. Bunun anlamı 6 nolu numune daha az geçirimli ve donma/çözülme olayından daha az etkilenmektedir. Bunun gerekçesi, mineral katkıların incelikleri ve reaksiyona girmeyen CaO ile reaksiyona girmeleri şeklinde açıklanabilir.

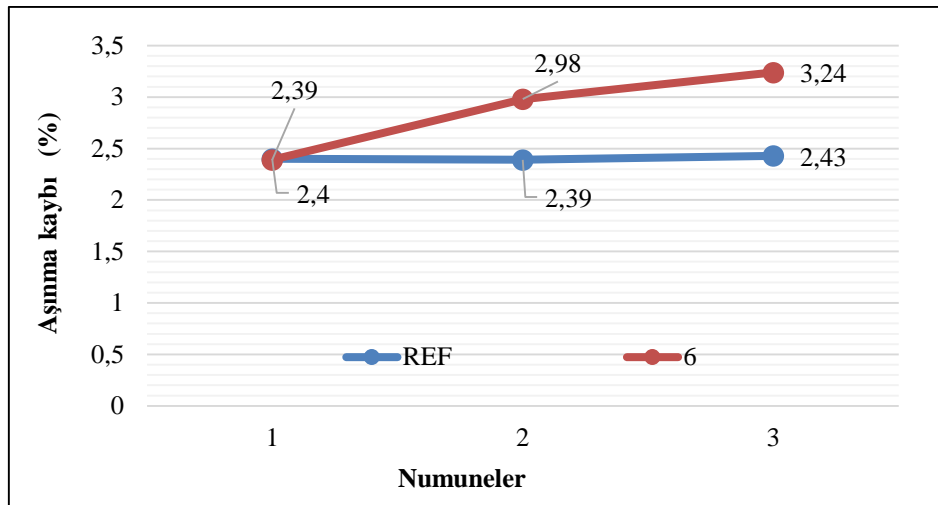
**Çizelge 6. Numunelerin kılcal su emme deneyi sonuçları**

Numune	Ortalama kılcal su emme (g)	Ortalama kılcal su emme katsayısı (cm <sup>2</sup> /s) (kc)	Ortalama donma/çözülme kaybı (%)
REF	14,24	4,7*10 <sup>-6</sup>	15,92
6	11,14	3,5*10 <sup>-6</sup>	13,68

### 3.5. Mekanik Aşınma Kaybı

Böhme yöntemiyle bulunan aşınma kayıpları Şekil 14'te verilmiştir. Şekil 14'teki örneklerin aşınma kayıpları incelendiğinde katkılı numunelerinin aşınma kayıplarının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Ancak bağıntıdaki

formülde referans ve katkılı numunelerindeki hacimsel kayıplar sırasıyla 8570 mm<sup>3</sup>/5000 mm<sup>2</sup> ve 10660 mm<sup>3</sup>/5000 mm<sup>2</sup>'dir. Her iki değer de TS EN 1338 standardında yer alan ≤18000 mm<sup>3</sup>/5000 mm<sup>2</sup> değerini sağladığından sorun teşkil etmemektedir.

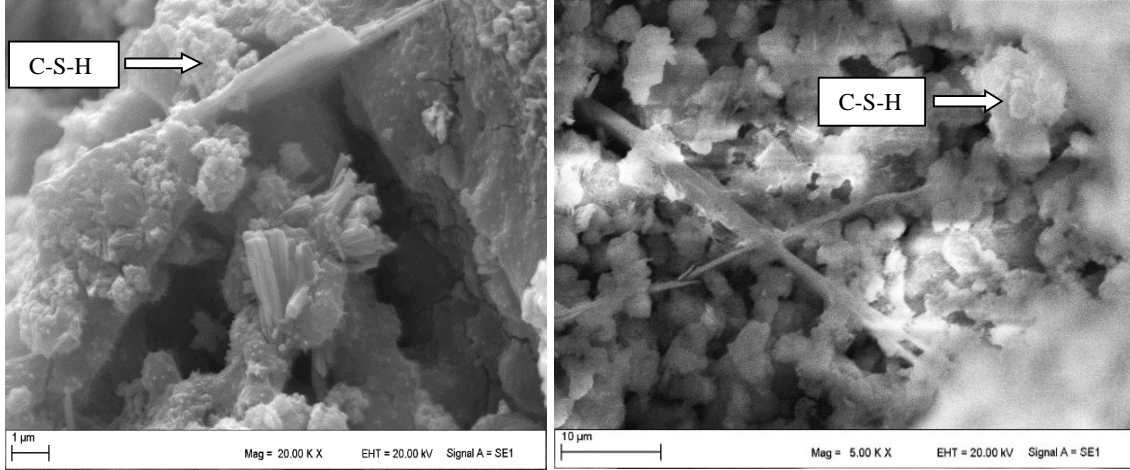


**Şekil 14.** 28 Günlük betonların mekanik aşınma kayıpları

### 3.6. Mikro Yapı

Çimentonun ve çimento+katkı maddelerinin su ile teması neticesi meydana gelen kimyasal reaksiyonu ve alkali-agrega reaksiyonu sırasında mikro yapıdaki durumun incelenmesi için normal sertleşmiş hamurların 7 ve 28 gün; alkali-agrega

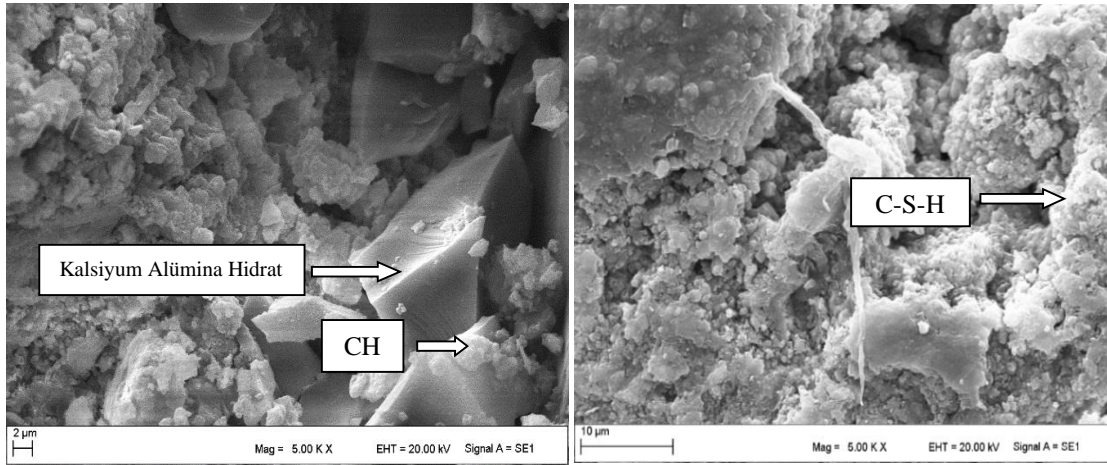
testine tabi tutulmuş aynı bağlayıcıya sahip karışımların ise 120 gün Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve MgSO<sub>4</sub> çözeltilerinde bekletilenlerinden alınan numunelerin iç yapıları SEM ile incelenmiştir. SEM resimleri Şekil 15, 16, 17, 18'de görülmektedir.



Şekil 15. REF numunelerinin 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri

Şekil 15'te REF numunesinin bağlayıcı maddesi olan CEM I 42,5R çimentosuna ait sertleşmiş 7 ve 28 günlük hamurların SEM resimleri incelendiğinde beklediği gibi reaksiyon

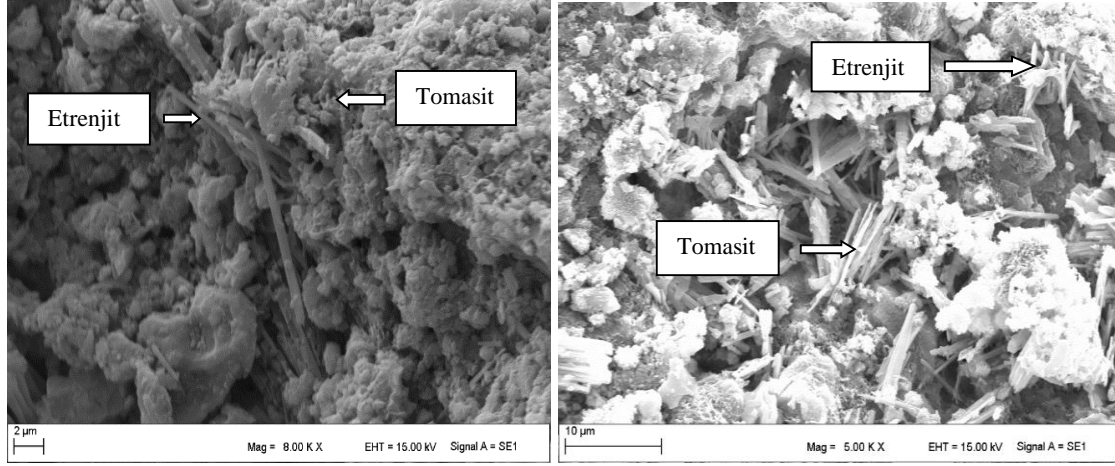
bileşiklerinin meydana geldiği görülmektedir. 28 günlük hamur görüntüsünde 7 güne göre C-S-H oranının arttığı CH oranının azaldığı görülmektedir.



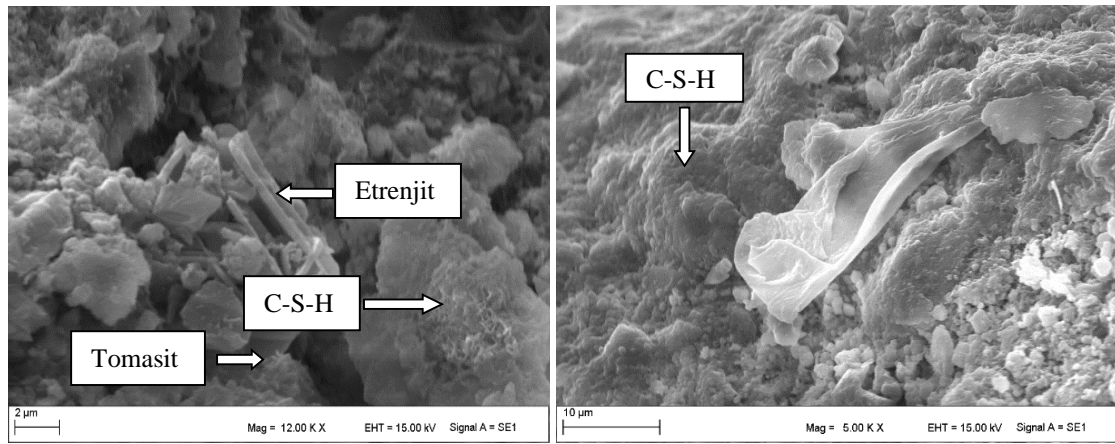
Şekil 16. 6 nolu numunelerin 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri

Şekil 16'da verilen 6 nolu katkı numunesinin bağlayıcı maddelerinin 7 ve 28 günlük sertleşmiş hamurlarının SEM resimlerinden reaksiyonun meydana geldiği görülmektedir. 7 günlük numunede 28 güne göre daha fazla oranda CH, etrenjit ve kalsiyum alümina hidratların olduğu görülmektedir. 28 günlük numunede ise C-S-H jeli oranı artmıştır.

Şekil 17'de 120 gün  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{MgSO}_4$  çözeltilerinde bekletilen referans harç prizmasından alınan numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde her iki çözeltide de etrenjitin arttığı tomasit meydana geldiği görülmektedir. Tomasitin beton üzerindeki davranışları bazı kaynaklarla araştırılmıştır [25-27]. Etrenjit ve tomasit oranı  $\text{MgSO}_4$  çözeltisinde bekletilen numunede daha fazla meydana gelmiştir.



Şekil 17. 120 gün  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{MgSO}_4$  çözeltilerinde bekletilen R numunesinin SEM görüntüleri



Şekil 18. 120 gün  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{MgSO}_4$  çözeltilerinde bekletilen 6 nolu numunenin SEM görüntüleri

Şekil 18'de 120 gün  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{MgSO}_4$  çözeltilerinde bekletilen 6 nolu harç prizmasından alınan numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde bekletilmiş numunede etrenjit ve tomasit ve boşlukların daha fazla olduğu görülmektedir.  $\text{MgSO}_4$  çözeltisinde bekletilen numunede ise daha yoğun C-S-H jeli meydana geldiği görülmektedir. Bu duruma göre 6 nolu numunenin  $\text{MgSO}_4$  içeren ortamlara karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. Sülfatların kalsiyum silikatlar (C-S-H) üzerine etkimesi sonucu oluşan ve 15 molekül su içeren tomasit tuzu da genişleterek ve özellikle betonu yumuşatarak hasar yapar [24]. Bulgular referans tarafından doğrulanmaktadır.

#### 4. SONUÇLAR

Uçucu külün kimyasal yapısının uygun hale getirilmesi ile reaksiyona girmeyen CaO oranı azaltılmış, C-S-H oranı artmış ve etrenjit miktarı azaltılmıştır.

AEUK'nın %20 oranında betona katılması ideal bir çözüm olarak görülmektedir. Çimentonun ikamesi olarak kolemanitin %5'ten fazla kullanılmasının beton prizini engellediği ve basınç dayanımına olumlu katkı sağlamadığı düşünülebilir. Cam tozunun basınç dayanımına olumlu katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Kayseri pomzasının kimyasal içeriği uygun olmasına



karşın özgül ağırlığı düşük olması nedeniyle AEUK ile birlikte kullanılması yüksek mukavemetli beton üretiminde önerilmemektedir.

Elde edilen mineral katkının priz süresini uzattığı görülmüştür. Katkılı çimento hamurunun genleşmesi ile ilgili standart bakımından sorun teşkil etmemektedir. Priz süresinin uzaması nedeniyle kütle betonu için önerilebilir.

- ✓ Alkali-Silika reaksiyonu incelendiğinde referans numuneye göre karışım numunesinin boy değişiminin arttığı gözlenmiştir.
- ✓ Karışım numunesinin standart değeri sağlamasına rağmen referans numuneden daha fazla aşındığı gözlemlenmiştir.
- ✓ 28 günlük mikro yapı incelendiğinde katkı malzemelerinin zararlı etrenjit oluşumunu önlemede katkı sağladığı düşünülebilir.
- ✓ Atık camların öğütülüp betonda puzolanik katkı olarak kullanımı çimento kullanımını azaltacağı için, çimento üretim tesislerinden kaynaklanan karbondioksit gibi sera gazlarının yayılmasını %10-15 oranında azaltacaktır.
- ✓ Ancak, dayanıklılık araştırması için 120 gün kısa bir süre olarak kabul edilebilir.

## 5. KAYNAKLAR

1. İklim Haber, 2020, 2019'da Elektrik Üretimi Azaldı: Kömür Hala Birinci Kaynak, <https://www.iklimhaber.org/2019da-elektrik-uretimi-azaldi-komur-hala-birinci-kaynak/>, (Erişim zamanı: 23 Şubat, 2020).
2. Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M. ve Uyan, M., 2004. Her Yönüyle Beton. Hazır Beton Birliği, İstanbul, 128.
3. Erdoğan, T.Y., 2010. Beton. ODTU Yayıncılık, Ankara, 760.
4. Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(1), 193-203.
5. Temiz, H., Binici, H., Coşkun, İ., 2010. Volkanik Cüruf İlave Edilmiş Uçucu Kül Katkılı Betonların Özellikleri. Hazır Beton Dergisi, 97, 75- 82.
6. Tulga, İ., Kılınc, K., 2018. Uçucu Kül Kullanımının Farklı Dayanım Sınıflarındaki Betonların Mekanik ve Durabilite Özellikleri Üzerindeki Etkisi. Kırklareli Üniversitesi Journal of Engineering and Science Dergisi, 4(2), 212-236.
7. Klemczak, B., M. Batog., Z., Giergiczny, A., Zmij, 2018. Complex Effect of Concrete Composition on The Thermo-mechanical Behaviour of Mass Concrete. Journal of Materials (Basel), 11(11), 1-18.
8. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2007. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. AR-GE Enstitüsü, Ankara, 114.
9. Temiz, H., Akçakale, A.H., 2014. Hafif Agregalı Betonun Mühendislik Özelliklerinin Araştırılması. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(2), 7-20.
10. Gündüz, L., Saruşık, A., Tozaçan, B., Davraz, M., Uğur, İ., Çankıran, O., 1998. Pomza Teknolojisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1, 275-285.
11. Uluköy, A., Can, A.Ç., 2006. Çeliklerin Borlanması. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(2), 189-198.
12. Aladdine, F., Laldji, S. And Tagnit-Hamou, A., 2009. Glass Powder as an Alternative Cementitious Material in Concrete. in: 10<sup>th</sup> ACI Int. Conf. Recent Advances in Concrete Technologies and Sustainability Issues, Seville, Espagne, 683-698.
13. Uzun, M., Çöğürücü, M.T., Keskin, Ü.S., 2018. Cam Tozunun Beton Basınç Dayanımına Etkisi. Beykent Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 11(2), 42-51.
14. TS 802, 2009. Beton Karışım Hesabı, Ankara.
15. TS EN 12620, 2003. Beton Agregaları, Ankara.
16. TS EN 196-3, 2002. Çimentonun Priz Süresi ve Genleşmesi, Ankara.
17. TS EN 12390-2, 2019. Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması, Ankara.

18. ASTM C1293-08b, 2008. Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. PA, USA.
19. TS EN 772-11, 2011. Betondan, Yapay Taş ve Doğal Taştan Yapılmış Kagir Birimlerde Kapiler Etki ile (Kılcal) Su Emme Katsayısı ve Kil Kagir Birimlerde İlk Su Emme Hızının Tayini, Ankara.
20. TS EN 1338, 2005. Zemin Döşemesi İçin Beton Kaplama Blokları-Gerekli Şartlar ve Deneysel Metotları, Ankara.
21. Bideci, Ö.S. ve Bideci, A., 2018. Öğütülmüş Kolemanit Katkısının Çimento Harçlarına Etkisi. Fırat Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(1), 133-138.
22. Çorbacıoğlu, C.U., 2008. Beton Karışım Tasarımının Geçirimsizliğe ve Mekanik Özelliklere Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 90.
23. Uzun, M., Çöğürçü, M.T., Keskin, Ü.S., 2018. Cam Tozunun Beton Basınç Dayanımına Etkisi. Beykent Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 11(2), 42-51.
24. Baradan, B., Aydın, S., 2013. Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). Hazır Beton Dergisi, 120, 54-68.
25. Ashraf, H.M. Abdalkader, 2014. Thaumasite Sulfate Attack in Cement Mortars Exposed to Sulfate and Chloride and Implications to Rebar Corrosion. PhD Thesis, The University of Sheffield, Department of Civil and Structural Engineering, Sheffield, 232.
26. Mingyu, H., Fumei, L., Mingshu, T., 2006. The Thaumasite Form of Sulfate Attack in Concrete of Yonggan Dam, Cement and Concrete Research, 36(10), 2006-2008.
27. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2010. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 318.

