

Sınıfsız Afşin – Elbistan Uçucu Külüne Amorf Silis İkame Edilerek Elde Edilen Sınıflı Kül ile Üretilen Harçların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 22.09.2023

Kabul/Accepted: 07.03.2024

Yayımlandı/Published: 29.04.2024

Investigation of the Mechanical Properties of Mortars Produced with Classified Ash Obtained by Substituting Amorphous Silica into Classless Afşin-Elbistan Fly Ash

Mustafa EKEN^{1*}, Ela AVŞAROĞLU²

¹ Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, K. Maraş/Elbistan, Türkiye

² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, K. Maraş, Türkiye

© Ayfon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Türkiye'nin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltmanın bir yolu da endüstrinin diğer kesimlerinde yararlanılamayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santrallerde kullanmaktan geçmektedir. Bu çalışmada Afşin – Elbistan sınıfsız uçucu külüne amorf silis AEFA-AS-%5, AEFA-AS-%10, AEFA-AS-%15, AEFA-AS-%20, AEFA-AS-%25 ve AEFA-AS-%30 oranlarında ikame edilerek C sınıfı kül olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Sınıflı kül ile hamur ve harç karışımları üretilerek numunelerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Karışımın üretilen hamur ve harç numunelerinin basınç, sülfat, alkali silika reaksiyonu, aşınma ve donma çözünme dayanımı ve mikro yapı özellikleri incelenerek referans numunesi ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları ile blaine değerlerinin amorf silis ikame oranı arttıkça arttığı, priz başlama ve sona erme sürelerini arttırdığı, genleşme değerlerini düşürdüğü, kapiler su emme değerlerini azalttığı, basınç dayanım değerleri %5-11 oranında, eğilme dayanım değerlerine %4-11 oranlarında katkı sağladığı ve donma-çözülme kayıp oranlarını %2-8 oranlarında azalttığı belirlenmiştir. Mekanik ve durabilite değerleri SEM incelemeleri ile desteklenmiştir. Ayrıca sınıfsız Afşin-Elbistan külüne amorf silis ikamesinin %15 oranında katılmasının optimum değer olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül; Amorf silis; Atıkların ekonomiye kazandırılması; Çimento katkı maddesi.

Abstract

To reduce Turkey's foreign dependence on energy production, one solution is to use low-calorific lignite coals that are unsuitable for other industries in thermal power plants. This study evaluates the substitution of amorphous silica AEFA-AS-5%, AEFA-AS-10%, AEFA-AS-15%, AEFA-AS-20%, AEFA-AS-25%, and AEFA-AS-30% ratios for Afşin-Elbistan unclassified fly ash, classified as C class ash. Some physical and mechanical properties of the samples were investigated by producing dough and mortar mixtures with class C ash. Compressive, sulphate, alkali silica reaction, abrasion and freeze thaw resistance and microstructure properties of the dough and mortar samples produced from the mixture were investigated and compared with the reference sample. The study found that as the amorphous silica substitution ratio increased, the blaine values also increased. Additionally, the setting start and end times increased, while the expansion values and capillary water absorption values decreased. The amorphous silica substitution also contributed to a 5-11% increase in compressive strength values, a 4-11% increase in flexural strength values, and a 2-8% decrease in freeze-thaw loss rates. SEM analyses supported the mechanical and durability values. It has been determined that the optimal amount of amorphous silica substitution for unclassified Afşin-Elbistan ash is 15%.

Keywords: Fly ash; Amorphous silica; Economic recovery of waste; Cement additive

1. Giriş

Beton, yapı sektöründen elde edilen verilere göre yılda 25x10⁹ ton ile dünyada en çok kullanılan yapı malzemesidir (Varun ve Haris 2018, Amran vd. 2021). Gelecek yıllarda sanayileşmedeki artış, yeni şehirleşmeler, köprüler, altyapılar gibi inşaat sektöründeki gelişmeler beton üretiminin artacağına göstergeleridir. Meydana gelen talep artışı ise doğrudan çimento üretimindeki artışı desteklemektedir. Çimento üretimi kalsiyum karbonatın (CaCO₃) kalsinasyonu ile başlar ve ortaya CO₂ açığa çıkar. CaO yüksek sıcaklıklarda (1400-1500°C) silis, alümin ve

demir ile reaksiyona girerek klinkeri meydana getirmektedir. Çimento, Klinkerin alçı taşı ve katkı maddeleri ile öğütülmesi sonucu ortaya çıkan hidrolik bağlayıcıdır (Latawiec 2018). Çimento üretimi esnasında 1 kg çimento elde edebilmek için çevreye yaklaşık 0,5-0,9 kg CO₂ salınımı gerçekleşmektedir. Bir yıl içerisinde 3,6 milyar ton çimento üretimi gerçekleşmekte ve dolayısı ile her yıl ortama 3,24 milyar ton CO₂ salınımının yapıldığı anlamına gelmektedir (Favomi vd., 2019). Çimento üretimi sırasında 0,5-0,9 kg oranında yayılan CO₂ çevreyi olumsuz etkilemektedir (Ali vd., 2011). 2009 yılında

Uluslararası Enerji Ajansı ve Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyinin belirlediği dört ana strateji ile 2050 yılına kadar CO₂ emisyonlarının azaltılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla klinkeri tamamlayıcı ya da çimentoya alternatif olacak uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerin kullanılması hedeflenmektedir (IEA 2009, Schneider 2015, İnt. Kyn. 1).

Uçucu kül, termik santrallerinde kömürün yakılması sonucu ortaya çıkan çok ince taneli puzolanik özelliğe sahip malzemedir. Elektrik üretimi için termik santrallerinde kömür yakımı devam etmektedir. Bu nedenle, ortaya yüksek miktarda kül çıkmakta ve uçucu külün depolanması, kısıtlı alan imkânları ve çevreye verdiği zararlı etki nedeniyle büyük sorun oluşturmaktadır. Özellikle çok küçük taneli yapısı emisyon kontrol cihazları tarafından bazen algılanmamakta rüzgâr etkisiyle hava kirliliği oluşturarak halk sağlığını tehdit etmektedir (Patil ve Anandhan 2015). Dünya’da her yıl ortaya çıkan 700 milyon ton yan ürün içerisinde uçucu külün yaklaşık 49 milyon tonluk orana sahip olması değerlendirilmesinin ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Çimento tüketiminin minimize edilmesinde alternatif olarak kullanılacak özellikte olması da çözüm yolu olarak görülmektedir.

Uçucu kül ASTM C 618 standardında belirtilenlere göre F ve C sınıfı olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. F sınıfı uçucu külün bitümlü kömürün yakılmasıyla elde edilen bir yan ürün olduğu ve CaO oranının %10’dan düşük olduğu için düşük kireçli kül olarak da ifade edildiği bilinmektedir. C sınıfı uçucu kül ise linyit ve bitümlü kömürün yakılması sonucu elde edilen bir yan üründür ve CaO oranının %10’dan fazla olduğu bilinmektedir (McCarthy ve Dyer 2019).

Uçucu kül sahip olduğu puzolanik özelliğinden dolayı beton üretiminde çimentodan ikame edilerek belirli oranlarda kullanılmaktadır (Filho vd. 2013, Ondova vd. 2012). Uçucu kül çimentodan ikame edilerek kütlece %15-25 oranlarında bazı istisnai durumlarda ise %80 oranlarına kadar kullanımı gerçekleştirilmiştir (Thomas 2017, Merceau vd. 2002). Uçucu külün çimento hamuru mikroyapısının iyileşmesine katkı sağladığı ve betonun dayanım-durabilite özelliklerini iyileştirdiği ifade edilmektedir (Montgomery vd. 1981, Filho vd. 2013). Uçucu kül katkılı betonun taze ve sertleşmiş hallerinde göstermiş olduğu performansları literatürde bazı kişiler tarafından araştırılmıştır. Turgut ve Demir (2019), uçucu külün çimentoya eklenmesi ile normal kıvam değerlerinin elde edilmesinde su miktarının artması ile mümkün olduğunu belirtmişlerdir (Turgut ve Demir 2019). Mineral

katkılıların çimentoya eklenmesi ile priz süresinin eklenen mineralin katkı oranına bağlı olarak arttırdığı, priz süresinin uçucu kül katkılı çimento hamurlarında artmasında uçucu külün inceliğinin etkili olduğu ifade edilmiştir (Brooks at al. 2000). Uçucu kül tanelerinin küresel olması ile agrega ve beton arasındaki sürtünme etkisini azaltıp karışım vizkozitesinin azalmasını sağlar ve böylece işlenebilirliği artırır (Paliwal ve Marua 2017). Sadrmomtazi ve ark. uçucu kül ile silis dumanının beton numunelerde etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonuçları %10 uçucu kül ikamesinin uzun kür süresinde dayanımını referans numunesine göre %14 oranında artırdığını belirtmişlerdir (Sadrmomtazi vd. 2018). Uçucu kül ve fiber katkılı beton numunelerinin eğilme dayanım değerleri incelendiğinde 0,25 polyester elyaf ve %20 uçucu kül katkısının eğilme dayanım değerini referans betona göre %40 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca lif katkısız sadece %10 uçucu kül katkılı numunelerin eğilme dayanımlarının da referans numunesinden yüksek değerler verdiği görülmüştür (Barbuta vd., 2017). Jena ve Panda (2018) silpozz esaslı beton üretiminde silpozz yerine %10 oranında uçucu kül katkılı numunelerin elastisite modülünü önemli ölçüde iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Uçucu kül ikameli beton numuneler ile katkısız beton numunelerin 7 günlük aşınma derinlikleri aynı çıkmıştır. Ayrıca uçucu külün 3800 cm²/g incelik değerinde olması aşınma direncine daha dayanıklı numuneler üretilmesine katkı sağladığı bildirilmiştir (Xu vd. 2020). Kumar vd. (2020) yaptıkları çalışmada SCC beton numunelerin üretiminde %15 oranında uçucu kül ikamesinin geçirgenliği azalttığı ve dolayısı ile de darbe direncini arttırdığını belirtmişlerdir. Uçucu kül katkılı numunelerin erken yaşlarda gözenekli bir yapıya sahip olduğu fakat ileriki yaşlarda bu gözenekliliğin azaldığı yorumunu yapmışlardır (Wang vd. 2021). Uçucu külün ince partiküllü yapısı numune içerisindeki boşlukları doldurarak numunenin daha yoğun ve kompakt olmasına katkı sağlayarak geçirgenliği azaltmaktadır (Islam vd. 2018). Yapılan çalışmada uçucu kül ikamesinin ekstra macun oluşumuna katkı sağlayarak klor geçirgenliğini azalttığı ifade edilmiştir (Praveeb ve Ravi 2019). Nie vd. (2014) %25 oranında uçucu kül katkılı numunelerin yüksek oranda sülfat direncine sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Uçucu külün alkali silika reaksiyonu (ASR) üzerindeki performansının kimyasal içeriğine bağlı olduğu belirtilmiştir. Kül içeriğindeki kireç oranının yüksek olması ASR oluşumuna karşı direncinin yüksek olacağı anlamına geldiği belirtilmiştir (Harish ve Rangaraju 2013). Uçucu külün hidratasyon ısısını erken yaşlardaki yavaş puzolanik etkisi nedeniyle düşürdüğünü, hidratasyon ısısının blaine inceliğine, silis içeriğine, alümina içeriğine gibi özelliklere

bağlı olduğu da ifade edilmiştir (Medepalli vd. 2020, Nocuñ-Wczelik 2001).

Amorf silis açık renkli, silis oranı bakımından oldukça zengin bir kayaç türüdür. Amorf silis dünyanın bazı noktalarında uçucu kül gibi inşaat sektöründe mineral katkı olarak kullanılmaktadır (Davraz ve Gündüz 2003).

Türkiye K. Maraş bölgesinde bulunan Afşin-Elbistan termik santrali 2795 MW güç ile linyit kömürü yakılması sonucu termik santralleri arasında 3.240.000 ton uçucu kül üreten bir santraldir (Peker 2006, Mahyar ve Erdoğan 2015). Afşin-Elbistan termik santrallerinden elde edilen uçucu kül yüksek oranda serbest CaO içermekte ve $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ miktarlarının toplamı C ve F sınıflandırılmaları için yetersiz kalmaktadır (Türker vd. 2009). Ayrıca ASTM C 618 (ASTM C 618-17a 2017), EN 197-1 (EN 197-1 2011) ve EN 450-1 (EN 450-1 2012) standartlarına uymamaktadır. Bu nedenle bölgeden temin edilen küle CaO oranı düşük SiO_2 oranı yüksek amorf silis ikamesi ile C sınıfı kül standardına getirilmiştir. Böylece ekonomik değer taşımayan, depolama, çevre sorunları oluşturan kül sınıflı hale getirilip çimento sektöründe değerlendirilmesi ile ülke ekonomisine kazandırılması öngörülmektedir.

2. Materyal ve Metot / Materials and Methods

2.1 Materyal

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül Afşin-Elbistan Termik Santralinden temin edilmiştir. Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir. TS 196-1 (TS 196-1 2016) standardına uygun kullanılan Rilem Cembureau standart kumu Trakya Limak Çimento fabrikasından temin edilmiştir. Rilem kumuna ait granülometri Çizelge 2’de verilmiştir. Çalışmada Cem I 42,5R tipi çimento Kahramanmaraş çimento sanayinden temin edilmiştir ve çimentoya ait kimyasal özellik Çizelge 3’te verilmiştir. Amorf silis malzemesi Niğde-Tepeköy mevkiinden temin edilmiştir ve amorf silisin rezerv alanı Şekil 1’de, kimyasal özelliği Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 1. Afşin-Elbistan Uçucu kül kimyasal ve fiziksel özellikler

Katkı türü	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
	30,1	10,5	5,9	29,4	2,6	10,8
Fiziksel özellikler						
Uçucu kül	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	Özgül yüzey (cm ² /gr)	Elek üzerinde kalan (%)			
	2,64	2248	90μ	45μ	4,3	10,5

Çalışmada kullanılan materyallerin kimyasal ve fiziksel analizleri Kahramanmaraş çimento sanayi tarafından yapılmıştır. Afşin-Elbistan külü ve amorf silis katkılı harç

numuneler standart 4x4x16 cm boyutlarındaki prizmatik kalıplar kullanılarak üretilmiştir. Harç karışım oranları Çizelge 5’te verilmiştir. Çalışmada doğal amorf silis malzemesinden belirli oranlarda (%5-%30) eklenmesi ile sınıflı hale getirilecek atık halde bulunan sınıfsız uçucu kül ASTM C 618’de C sınıfında belirtilen S+F+A>%50 ve TS 639’da S+F+A>%70 şartlarını kimyasal analiz yöntemi uygulanarak sağlanması çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır. Atık olarak bulunan ve değerlendirilmeyen uçucu külden daha fazla miktarda yararlanılması ve çimento katkı malzemesi olarak kullanılması ile CO₂ salınımlarında azaltmalar meydana getirecektir. Atıkların değerlendirilmesi sonucunda sürdürülebilir çevre ve enerji tasarrufu sağlayacaktır.

Çizelge 2. Rilem kum granülometrisi

Kümülatif elekte kalan (%)	0	7±2	33±2	67±2	87±2	99±1
Elek boyutları (mm)	2.0	1.60	1.00	0.50	0.16	0.08

Çizelge 3. CEM I 42,5 R çimento kimyasal özellik

Katkı	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Amorf silis	95,37	0,83	0,55	0,20	0,05	0,04

Çizelge 4. Amorf silis kimyasal analizi

Katkı türü	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
	19,4	5,4	3,8	64,3	2,3	2,5
Fiziksel özellikler						
CEM I 42,5 R	Özgül ağırlık (g/cm ³)		Özgül yüzey (cm ² /gr)	Elek üzerinde kalan (%)		
	3,15		3480	90μ	45μ	8,2



Şekil 1. Amorf silis rezerv alanı

2.2.1. İncelik

Çimento tanelerinin incelik değeri TS EN 196-6 (2020) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Blaine değeri tane yoğunluğunu ve hidrasyonu etkilemektedir.

Tane boyutu uygun oranlarda olan çimento ile hazırlanan karışımlar kompakt, uniform ve dayanım-dayanıklılık özellikleri yüksektir. Çimento taneciklerinin incelik oranının artması özgül alanın artmasına ve böylece 3, 7, 28, 90 ve ileriki günlerdeki dayanımlarının artmasını sağlamaktadır (Çelik 2004).

2.2.2. Çimento priz süresi ve hacim genleşmesi

Üretilen harç numunelerinin priz süreleri vicat cihazı ile hacim genleşmesi Le Chatelier kalıbıyla uygulanarak gösterilmiştir. Priz süreleri TS EN 196-3 standardına uygun olarak ortam sıcaklığı 20 ± 2 °C, karışım suyu sıcaklığı 20 ± 2 °C olacak deney koşulları sağlanarak yapılmıştır. Le Chatelier kalıbı ile çimento hamurunda meydana gelebilecek hacim genleşmesi TS EN ISO 9597 (EN ISO 9597 2008) standardına uygun olarak belirlenmiştir.

2.2.3. Alkali Silika Reaksiyonu (ASR)

Uçucu kül ve amorf silis katkılı harçların alkali silika reaksiyonu ASTM C 1293 (ASTM C 1293 2008) standardına göre uygulanmıştır. Karışım içeriği ASTM C 1260 standardında belirtilen oranlarında hazırlanmış ve harç karışımı 25x25x285 mm boyutlarındaki kalıplara dökülmüştür. Döküm yapıldıktan sonra harç numuneleri laboratuvar şartlarında 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda kalıptan çıkarılan harç numunelerinin boy ölçümleri yapılarak kaydedilmiş ve ardından 80°C sıcaklığındaki saf su içerisinde yerleştirilmiştir. Saf suda 24 saat süre bekletilen harç numunelerinin komparatörde sıfır okumaları gerçekleştirilmiş ve numuneler 80°C 1M NaOH çözeltisinde 14 gün süre bekletilmek üzere çözelti içerisinde bırakılmıştır. Harç numunelerinde meydana gelen boy değişim oranları ölçülerek genleşme değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 2. Harç numunelerinin ASR ölçümleri

2.2.4. Eğilme ve basınç dayanımı

Hazırlanan 4x4x16 cm boyutlarındaki harç numunelerinin eğilme dayanımları TS EN 196-1 standardında belirtilen şartlara göre yapılmıştır. Eğilme deneyi için her

karışımdan üç adet hazırlanan harç numuneleri orta noktadan kırılarak altı adet 4x4x8 cm boyutlarında numuneler elde edilmiştir. Elde edilen 4x4x8 cm boyutlarındaki harç numunelerinin basınç dayanım değerleri TS EN 196-1 standardına uygun olarak yapılmıştır.

2.2.5. Donma-Çözülme

Üretilen harç numunelerinin donma-çözülme deneyi ASTM C 666 (ASTM C 666 1998) standardına uygun olarak yapılmıştır. 28 gün süre ile kürlenmiş küp numuneler üzerinde 100 donma-çözülme çevrimine tabi tutulduktan sonra basınç dayanım değerleri ölçülmüştür. Harç numunelerine havada donma, su ortamında çözülme olacak şekilde hızlı yöntem uygulanmıştır. Donma sıcaklığı -18°C, çözülme sıcaklığı ise 5°C olarak uygulanmıştır. Ayrıca numunelerin donma-çözülme sonrası yüzey görüntüleri çatlak ölçer mikroskobu ile incelenmiştir.

2.2.6. Kapiler su emme

Harç numunelerinin kapiler su emme deneyi TS 4045 (TS 4045 1985) standardında belirtilen yönergeler dikkate alınarak uygulanmıştır. Harç numunelerinin sadece temas ettirildiği bölgeden su emme sağlanması için numunelerin yan yüzeyleri silikon ile kaplanmıştır. Harç numunelerinin su emme deney uygulaması Şekil 4'te gösterilmiştir. Numunelerin su emme deneyi için su yüksekliği 5 mm olacak şekilde sabit tutulmuştur. Harç numuneleri 0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440 dk sürelerinde tartılarak su emme katsayı değerleri (1) nolu denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (1)$$

Burada;

Q= Numunenin absorbe ettiği su miktarı (cm³),

A= suya temas eden yüzeyin alanı (cm²),

k= kapiler su emme katsayısı (cm^{/s^{1/2}}),

t= zaman (sn)

2.2.7. Mikro yapı incelemeleri

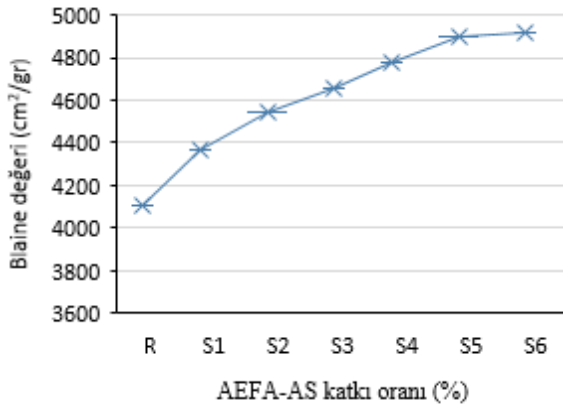
Harç numunelerinin mikro yapılarının incelenebilmesi için Scanning Electron Microscope (SEM) taraması yapılmıştır. Numuneler yaklaşık 0,5-1 cm boyutlarına getirilmiş ve iletkenliğinin arttırabilmesi için altın kaplama yapılmıştır.

3. Bulgular / Results and Discussions

3.1. İncelik

Afşin-Elbistan uçucu kül ve amorf silis katkılı harçların blaine değerleri incelendiğinde çimento yerine ikame edilen katkı oranları arttıkça blaine değerlerinin arttığı

görülmektedir. Amorf silis katkılı numunelerin blaine değerleri 4398-4915 cm²/gr arasında ölçülmüştür. En düşük blaine değeri 4398 cm²/gr ile S1 katkılı numuneden, en yüksek blaine değeri 4915 cm²/gr S6 katkılı numuneden elde edilmiştir. Çimento blaine değerlerinin 4107-5420 cm²/gr arasında olduğu çalışmada çimentodan %5-30 oranlarında azaltılarak ikame edilen katkıları sonucu elde edilen blaine değerlerinin standart değerler içinde olduğu Çelik (2004), tarafından yapılan çalışma ile desteklenmektedir (Çelik 2004). Çimento tanelerinin incelik değeri arttıkça erken yaşlardaki dayanım değeri yüksek olmaktadır (Sottili ve Padovani 2011). Ayrıca incelik değerinin yüksek olması puzolanik aktivite değerinin de artmasına neden olduğu belirtilmiştir (Demirörs 2009, Şengül vd. 2003). Yapılan farklı bir çalışmada kolemanit katkısının öğütülerek 3839 cm²/g blaine değerine getirilmesi ile puzolanik aktivitesinin arttığı belirtilmiştir (Bideci ve Bideci 2018). Fakat aynı zamanda hidrasyon ısısının yükselmesinin de nedeni olarak çimento inceliği hedef gösterilmektedir. Bu yüzden genellikle çimento inceliğinin 90µ'luk eleklerden elenmesi sonucu elek üzerinde kalan malzeme miktarının %14'ten fazla olmaması istenmektedir (Tosun vd. 2020).



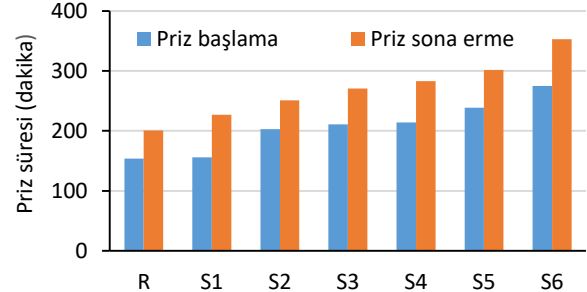
Şekil 3. Blaine değeri katkı oranı ilişkisi

3.2. Çimento priz süresi

Katkılı harçların ve katkısız referans numunesinin priz başlama ve priz sona erme süreleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te elde edilen değerlerde belirtildiği üzere uçucu kül ve amorf silis ikamesi priz başlama ve priz sona erme sürelerinde artış meydana gelmiştir. Hamur karışımların priz başlama ve sona erme süreleri incelendiğinde referans numunesine göre katkı oranı arttıkça priz sürelerinin arttığı görülmektedir.

Uçucu kül ve amorf silis ikamesi priz başlama 154-275 dk ve priz sona erme 201-353 dk arasında meydana getirmiştir. Katkılı hamurlar katkısız referans numunesi ile karşılaştırıldığında en uzun priz başlama süresi 275 dk ile

S6 nolu numuneden elde edilmiştir. Katkılı numunelerden en kısa priz başlama süresi 152 dk ile S1 nolu numuneden elde edilmiştir. Priz sona erme süreleri karşılaştırıldığında ise en uzun priz sona erme süresine sahip numune 353 dk ile S6 nolu numune olurken, en kısa priz sona erme süresine sahip numune 226 dk ile S1 olmuştur.



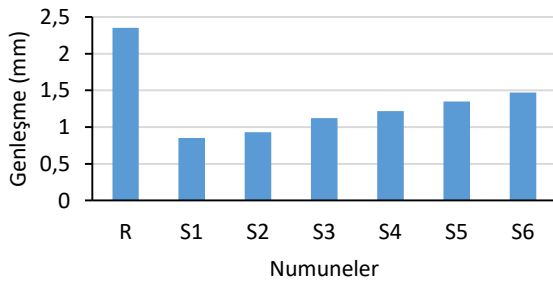
Şekil 4. Hamur karışımlarının priz süreleri

Çalışmada katkılı tüm numunelerin minimum priz başlama süresi (60 dk) ve maksimum priz sona erme (600 dk) sürelerini sağladığı görülmektedir (TS 197-1). Priz başlama ve sona erme sürelerinin belirtilen aralıklarda bulunması taze harcın taşınması ve yerleştirilmesinin kolay olacağı, dayanım değerlerine belirlenen günlerde kazanmasına katkı sağlayacağı ve numunelerin iklim koşullarından etkilenmeyeceği ifade edilebilmektedir (Şimşek 2000). Çimento hamur kıvamının yan ürünlerin eklenmesi ile (uçucu kül, silis dumanı vb. puzolanik özelliğe sahip) değerinin etkilendiği, çalışmamızdaki çimentoya eklenen uçucu kül ve amorf silis katkılarının da çimentonun kıvamını arttırdığı ve priz başlama-sona erme sürelerini arttırdığı belirtilmektedir (Şakir vd. 2011; Li vd. 2020; Mondal vd. 2010). Aynı şekilde priz sona erme süreleri incelendiğinde yine katkı oranı arttıkça priz sona erme süreleri de artmıştır. En kısa priz sona erme süresine sahip olan referans numunesi iken, en uzun priz sona erme süresine S6 nolu numunesinde görülmüştür. Tampus yaptığı çalışmada, kireç yerine odun külünü %25-100 oranlarında ikame etmiştir. Odun külü katkılı numunelerin priz başlama süreleri 114-147 dk ve priz sona erme süreleri 243-321 dk aralığında ölçülmüştür. Odun külü katkının numunelerin priz başlama ve priz sona erme sürelerini arttırdığı ifade edilmiştir (Tampus vd., 2020). Çalışmamızda çimentoya eklenen uçucu kül ve amorf silis ikamesinde priz başlama ve sona erme sürelerini arttırdığı görülmektedir. Priz sürelerinde meydana gelen bu değişimlerin nedeni olarak çimentonun hidrasyon ısısından sorumlu olan C₃A bileşeninin katkı ikamesi nedeniyle azalması olarak ifade edilmektedir (Dorum vd. 2009; Topçu vd. 2009). Çalışmadaki katkılı harç numunelerin priz başlama ve sona erme sürelerindeki değişimin uçucu kül ve amorf silis ikamesi ile C₃A

bileşeninde meydana gelen azalma olarak düşünülmektedir.

3.3. Hamur karışımlarının genişleme değerleri

Çimento hamurlarından elde edilen genişleme değerleri TS 196-3 standardına göre Şekil 5'te verilmiştir. Çimento hamurlarının genişleme değerleri TS EN 197-1 standardında verilenlere uygun olarak 10 mm ile sınırlandırılmıştır. Üretilen katkılı harç numunelerinin genişleme değerleri 0,85-1,47 mm arasında ölçülmüştür. Katkılı numuneler arasında en yüksek genişleme değeri 1,47 mm il S6 nolu numuneden elde edilirken, en düşük genişleme değeri 0,85 S1 kodlu numuneden elde edilmiştir. S3, S4 ve S5 nolu numunelerin değerleri birbirlerine yakındır. Binici vd., yaptıkları çalışmada Afşin-Elbistan uçucu külüne cam tozu ilavesinin numuneler üzerindeki hacim genişleme etkisini araştırmışlardır. Cam tozu katkılı S1 ve S2 numunelerinin genişleme değerlerinin çok düşük olduğu S3, S4, S6 ve S7 nolu numunelerinin de genişleme değerlerinin TS 196-3 standardına uygun oldukları ifade edilmiştir (Binici vd. 2021). Çimentoya ikame edilen puzolanik malzemeler ile ilgili çalışmalarda genişleme miktarları çalışmamıza benzer şekilde değerleri içermektedir (Dave vd., 2016). Çalışmada kullanılan uçucu kül ve amorf silis katkılı numunelerinin hepsinin genişleme oranlarının TS EN 197-1 standardına uygun olduğu belirtilmiştir. Hacimsel genişleme değerlerinin standardın altında kalmasında katkı olarak kullanılan amorf silisin kimyasal analizindeki CaO ve MgO oranlarının çok düşük olması ve bu nedenle de reaksiyona girmeyen CaO oranının azaltılması ile açıklamak mümkündür.

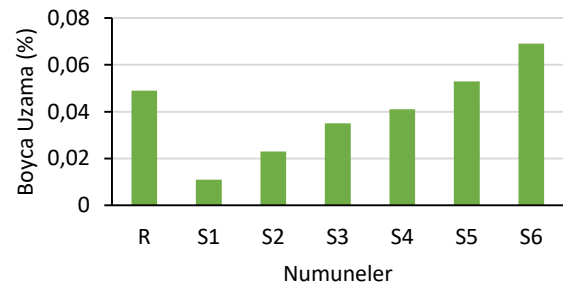


Şekil 5. Hamur numunelerinin genişleme değerleri

3.4. Alkali Silika Reaksiyon Testi Sonuçları

Harç numunelerinin 14 günlük alkali silika reaksiyon değerleri Şekil 6'da incelenmiştir. Numunelerin boyca uzama oranlarında S1, S2, S3 ve S4 nolu numunelerdeki katkı oranları dikkate alınarak referans numunesine göre düşük oranda gerçekleşmiştir. Harç numunelerinin alkali silika değerleri %0,049-0,069 arasındadır. En yüksek alkali silika değeri ölçülen numune 0,069 ile S6 numunesi olmuştur. Alkali silika reaksiyon değeri en düşük numune

ise 0,049 ile S1 nolu numune olmuştur. Katkı oranı içeriği arttıkça harç numunelerinde boyca uzama değerlerinin arttığı gözlemlense de standartlara uygun sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür (Bektas vd. 2004; Fernandez vd. 2007). TS 196'da belirtilen ifadeye göre çimento üretiminde kullanılacak malzemelerin kimyasal içeriğinin Na_2O+K_2O 'nun %5'ten fazla olması istenmemektedir. S5 ve S6 kodlu numunelerin toplam alkali oksitlerin %5'ten fazla olduğu belirlenmiştir. Katkılı numunelerin alkali silika reaksiyonu etkisi ile boyca uzama göstermesinde amorf silisin içerisindeki aktif silisin neden olduğu düşünülebilir. Nano silika, uçucu kül, metakaolin gibi puzolanik malzemelerin kullanımı alkali silika reaksiyonunun azaltılması ya da önlenmesi bakımından olumlu performans gösterdiği ifade edilmiştir (Zeidan ve Said 2016; Mukhopadhyay ve Liu 2015). Çalışmada uçucu kül ve amorf silis ikamesi ile ASR sonuçları değerlendirildiğinde katkı oranına bağlı olarak ASR oranlarında artış olduğu kaydedilmiştir. S1-S2-S3-S4 katkılı numunelerin ASR verilerinin referans numunesinden düşük çıktığı, S5 ve S6 numunelerinin ASR verilerinin yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir. S1-S2-S3-S4 katkılı numunelerin ASR verilerinin düşük çıkması uçucu kül katkısının ASR önleyici performans göstermesi olarak düşünülmekte ve Zeidan ve Mukhopadhyay'ın yaptıkları çalışmalarda yorumlar ile de desteklenmektedir. Alkali silika reaksiyonu sonucu harç numunelerinin boyca uzaması çatlamalara yol açarak dayanım-dayanıklılık problemlerinin ortaya çıkmasına neden olacaktır (Ramyar vd. 2002). Bu yüzden harç numunelerinin mekanik özelliklerine katkı sağlamak ve alkali silika reaksiyonunun oluşumunu engellemek için katkı oranının sınırlandırılmasında fayda olduğu ifade edilebilir.

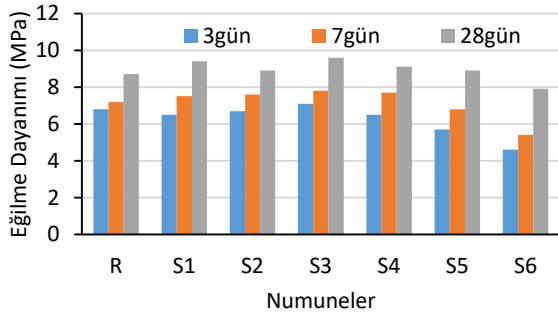


Şekil 6. Alkali silika test sonuçları

3.5. Eğilme dayanımı

Harç numunelerinin TS 196-1 standardına göre 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Üretilen harç numunelerinin 3 günlük eğilme dayanım değerleri 4,6-7,1MPa arasında değişmektedir. En yüksek eğilme dayanım değeri 7,1MPa ile S3 nolu numuneden

elde edilmiştir. Numunelerin 7 günlük eğilme dayanım değerleri 5,4-7,8MPa arasında değiştiği görülmektedir. Katkılı S1, S2, S3 ve S4 nolu numuneler referans numunesine oranla daha yüksek eğilme dayanım değerine ulaşırken, S5 ve S6 nolu numunelerin eğilme dayanım değerleri referans numunesine oranla düşük değerler vermişlerdir. Referans numunesine göre %9 oranla en yüksek eğilme dayanımı gösteren numune S3 nolu numune olmuştur. 28 günlük eğilme dayanım değerlerinde ise dayanım değerleri 7,9-9,5MPa arasındaki değerlere ulaşmıştır. Katkı oranlarına göre referans numunesine göre eğilme dayanımı yüksek çıkan S1, S2, S3, S4 ve S5 nolu numunelerdir. Eğilme dayanım değeri referans numunesine oranla yaklaşık %11 oranında en yüksek çıkan S3 nolu numunesidir. 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri incelendiğinde optimum karışım oranı olarak AEFA-AS-15 içeriğine sahip S3 nolu karışım oranına vermek mümkündür. İlk günlerdeki dayanım değerleri düşük olan numunelerin ileriki yaşlardaki eğilme dayanım değerleri yüksek çıkmıştır. Bu durumun sebebi olarak uçucu kül ve amorf silis malzemesinin sahip olduğu puzolanik özelliği ile açıklamak mümkündür. Katkılı tüm harçların kür süresi arttıkça eğilme dayanım değerlerinin arttığı, katkı oranı arttıkça eğilme dayanımının azaldığı ifade edilmiştir.



Şekil 7. Numunelerin 3, 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları

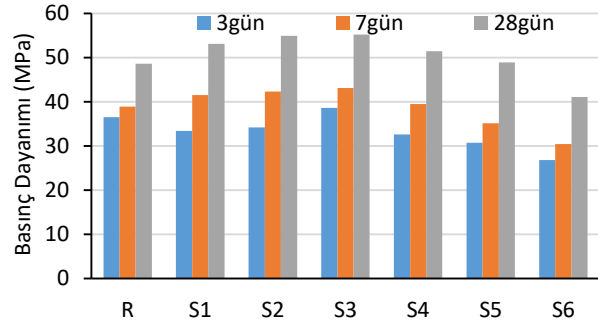
3.5. Basınç dayanımı

Afşin-Elbistan uçucu külü-amorf silis katkılı harçların ve katkısız referans harç numunelerinin basınç dayanım değerleri Şekil 8’de verilmiştir. Harç numunelerinin 3 günlük basınç dayanım değerlerinin 26,8-38,6MPa arasında olduğu görülmektedir. En yüksek basınç dayanım değerini referans numunesine göre %5 oranla S3 nolu numuneden elde edilmiştir. Harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanım değerleri incelendiğinde 30,4-43,1MPa arasında değiştiği görülmektedir. Katkılı harç numunelerinden S1, S2, S3 ve S4 referans numunesinden sırasıyla %6, %9, %11, ve %2 oranlarında basınç dayanım değerlerine ulaşırken, S5 ve S6 sırasıyla %8 ve %21 oranlarında daha düşük basınç dayanım değerleri

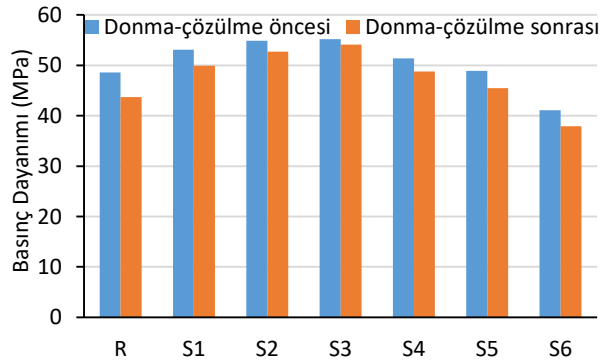
vermişlerdir. 28 günlük harçların basınç dayanım değerleri ise 41,1-55,2MPa arasında değerler vermişlerdir. Katkı içeriklerine göre referans numunesine göre S1-%9, S2-%13, S3-%14 ve S4-%6 oranlarında daha yüksek basınç dayanımı, S5-%1 ve S6-%14 oranlarında daha düşük basınç dayanım değeri göstermişlerdir. TS EN 197-1 standardında belirtilenlere göre Cem I 42,5R çimento katkılı harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanım değerlerinin min.42,5-max.62,5MPa arasında olması şartı aranmaktadır. Üretilen harç numunelerinin içerisinde karışım oranlarına göre S6 nolu numune dışında tüm harç numunelerinin ilgili standartta belirtilen dayanım değerleri arasında olduğu belirtilmiştir. Katkılı harç numunelerinin basınç dayanım değerleri yüksek çıkan S1-S2-S3 ve S4 nolu numunelerin Şekil 7’de belirtilen eğilme dayanım değerlerinin de yüksek çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca katkılı ve katkısız harç numunelerinin Şekil 7’de eğilme dayanım değerlerinde olduğu gibi basınç dayanım değerlerinde de kür süresine bağlı olarak basınç dayanımlarının arttığı görülmektedir.

3.6. Donma-Çözülme

Harç numuneleri donma-çözülme çevrimine maruz bırakıldıktan sonra elde edilen basınç dayanım değerleri Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 8. Basınç dayanımı



Şekil 9. Donma-çözülme basınç dayanımı

Sonuçlar standartlara uygun olarak deneye tabi tutulan üç numunenin ortalaması alınarak verilmiştir. Şekil 9’da verilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere en fazla dayanım kaybı %10 ile referans numunesinde

gerçekleşmiştir. Katkı oranına bağlı olarak referans numunesine göre en az dayanım kaybına %2 ile S3 nolu numune uğramıştır. Diğer katkıli numunelerin referans numunesine göre donma-çözülme sonrası basınç kaybı S1-%6, S2-%4, S4-%5, S5-%7, S8-%9 oranlarında elde edilmiştir. Katkıli numunelerin tümü donma-çözülme sonrası basınç dayanım kayıplarının katkısız referans numunesine göre az olduğu gözlemlenmiştir. Mineral katkıların eklenmesi ile katkıli numunelerin katkısız numunelere oranla boşluk miktarının azaldığı, geçirimsizliğin arttığı ve donma-çözülme gibi durabilite sorunlarına karşı performanslarının artmasına olanak sağladığı ifade edilmiştir (Mardani vd. 2014).

3.7. Kapiler su emme

Kılcal su emme grafiği Çizelge 5 incelendiğinde ilk dakikalarda su emme oranı artmış, ancak ilerleyen zamanlarda tüm numunelerde azalma eğilimi göstermiştir. Referans numune, ilk 20 dakikada en yüksek

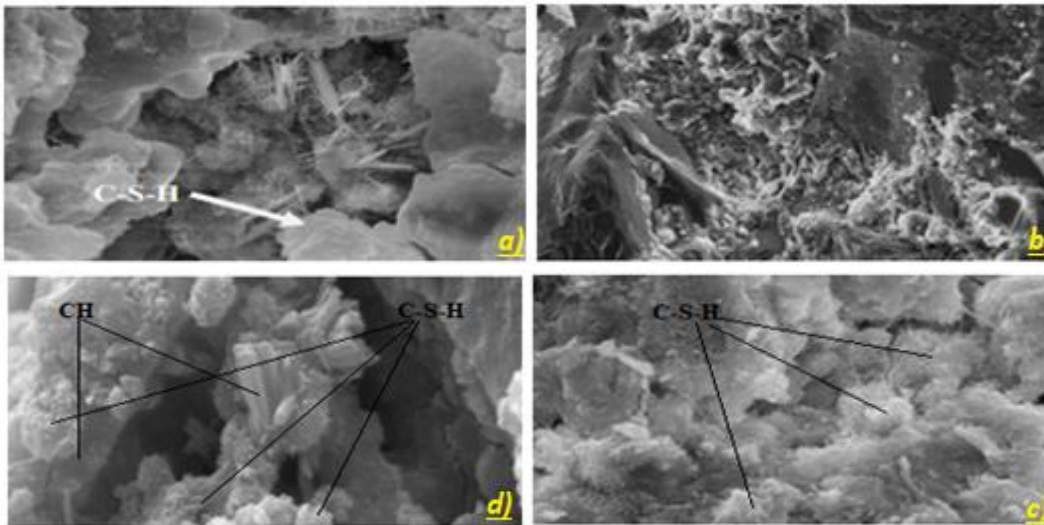
kılcallık katsayısına sahiptir. Katkıli harç numuneleri arasında kılcallık katsayısı en düşük olan numuneler S1, S3, S4 ve S5 nolu numunelerdir. Üretilen harç numuneleri kapiler su emme değerleri incelendiğinde katkı oranına bağlı olarak kılcallık katsayısının arttığı gözlemlenmektedir. Katkı oranının artması porozite oranını arttırmakta ve su emme değerinin de artmasına neden olmaktadır.

3.8. Mikro yapı incelemeleri

Üretilen harç numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir. Katkıli harçların SEM görüntüleri (Şekil 10) incelendiğinde katkısız R betona göre daha yoğun bir mikroyapıya sahip olduğu görülmektedir. Çalışmada kullanılan puzolanik malzemelerin ikamesi ile C-S-H jellerinin farklı boyutlarda ve rast gele dizilimi ile boşlukları doldurduğu gözlemlenmiş ve basınç dayanımına olumlu katkısı meydana gelmiştir.

Çizelge 5. Kapiler su emme sonuçları

Numuneler	0 dk	5 dk	10 dk	20 dk	30 dk	60 dk	180 dk	360 dk	720 dk	1440 dk
R	546.19	556.12	556.42	556.73	556.9	557.47	559.43	561.97	565.91	560.15
S1	544.92	555.27	555.48	555.63	555.64	555.83	556.37	557.12	558.39	558.30
S2	536.15	545.04	545.27	545.61	545.82	546.31	548.26	550.61	554.55	554.21
S3	525.08	527.76	528.19	528.49	528.68	529.17	530.79	533.11	537.23	547.35
S4	538.81	541.05	541.3	541.48	541.55	541.83	542.64	543.92	545.81	558.67
S5	546.11	551.87	552.03	553.13	553.20	551.40	551.80	552.19	553.44	560.10
S6	526.8	530.12	530.43	530.63	530.87	531.35	532.75	534.86	538.26	567.68



Şekil 10. R (a-b) ve S3 (c-d) numunelerinin 7 ve 28 günlük SEM görüntüleri

4. Sonuçlar ve Tartışma / Conclusions

Afsin-Elbistan sınıfsız külüne amorf silis ikamesi ile sınıflı hale getirilmesi ile ilgili yapılan değerlendirmeler aşağıda listelenmiştir.

- Harç numunelerinin blaine değeri amorf silis ikame oranı arttıkça artmaktadır. Katkılı harçlardan en düşük blaine değerine sahip %5 katkılı S1 numunesi R numunesinden %6,5 oranında yüksek, en yüksek blaine değerine sahip %30 katkılı S6 numunesi R numunesinden %19,9 oranında yüksek bulunmuştur.
- Katkılı harç numunelerinden priz başlama süresini R numunesine göre % 78 oranında S6 numunesi uzatmıştır. Priz sona erme süresini R numunesine göre % 75 oranında uzatan S6 numunesi olmuştur. En düşük priz başlama ve sona erme süresi R numunesinden ölçülmüştür.
- Hamur numunelerinden elde edilen genleşme değerlerinin ilgili TS EN 197-1 standardında belirtilen değerlerin altında olduğu ve uygun olduğu belirtilmiştir. Harç numunelerinin 14 günlük genleşme değerlerinde S1-S2-S3-S4 nolu numuneler referans numunesinden düşük değerler vermişlerdir.
- Harç numunelerinin eğilme dayanım değerleri incelendiğinde 3, 7 ve 28 günler sonunda en yüksek dayanıma S3 nolu numuneden elde edilmiştir. Katkı oranına bağlı olarak katkı oranı arttıkça eğilme dayanım değerlerinin düşük değerler verdiği ve S5-S6 nolu numunelerin en düşük eğilme dayanım değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.
- Üretilen harç numunelerin 3, 7 ve 28 gün sonundaki incelenen basınç dayanım değerleri sonucunda en yüksek basınç dayanım değerine 55,2 MPa ile S3 numunesinden elde edilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda AEFA-AS %15 karışım oranının optimum karışım olduğu belirlenmiştir.
- Katkılı harç numuneleri arasında kılcallık katsayısı en düşük olan numuneler S1, S3, S4 ve S5 nolu numunelerdir. Amorf silis ikamesinin geçirimsizliğe katkı sağladığı belirlenmiştir.
- Donma-çözülme deneyi sonucu katkı tüm harç numuneler katkısız R numunesine oranla daha az basınç kaybı ve ağırlık kaybı değerlerine ulaşmıştır. En az ağırlık kaybı %0,26 S3 nolu numunesinden ölçülürken, en yüksek ağırlık kaybı %0,41 ile R numunesinden ölçülmüştür.
- SEM görüntüleri elde edilen veriler ile oluşan C-S-H jellerinin mekanik sonuçları destekleyici yönde bağdaştığı ifade edilmektedir.

Sonuç olarak; Çalışmada doğal amorf silis malzemesinden %5-%30 oranlarında eklenmesi ile sınıflı hale getirilerek

üretilen katkılı numunelerin harçların fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerine önemli derecede olumlu katkı sağladığı belirlenmiştir. Elbistan termik santrali sınıfsız uçucu külüne amorf silis malzemesi ilave edilerek C sınıfı uçucu kül olarak değerlendirilmesi ile doğal kaynakların korunmasına ve çevresel problemlerin önüne geçilmesinde önemli bir aşama kaydedilecektir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Mustafa Eken: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak
Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Ela Avşaroğlu: Kaynaklar, Araştırma, Deneyleme, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak,

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Teşekkür / Acknowledgement

Bu araştırma Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje No: 2021/2-1).

5. Kaynaklar / References

- Ali, M. B., Saidur, R., Hossain, M. S., 2011. A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252–2261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>
- Amran, M., Murali, G., Fediuk, R., Vatin, N., Vasilev, Y., Abdelgader, and H., 2021. Palm oil fuel ash-based eco-efficient concrete: A critical review of the short-term properties. *Materials (Basel)*. **14**, 1–33. <https://doi.org/10.3390/ma14020332>
- ASTM C 618-17a, 2017. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1293-08b, 2008. Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. PA, USA.
- ASTM C666, 1998. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing". Pennsylvania, USA.
- Barbuta, M., Bucur, R., Serbanoiu, A.A., Scutarasu, S., and Burlacu, A., 2017. Combined Effect of Fly Ash and

- Fibers on Properties of Cement Concrete. *Procedia Eng.* **181**, 280–284.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.390>
- Bektas, F., Turanlı, L., Topal, T., and Goncuoğlu, M.C., 2004. Alkali reactivity of mortars containing chert and incorporating moderate-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*. **34**, 2209–2214.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.007>
- Bideci, Ö. S., Bideci, A., 2018. Öğütülmüş Kolemanit Katkısının Çimento Harçlarına Etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. **30(1)**, 133-138.
- Binici, H., Eken, M., Uslu, K., 2021. Properties Of Mortars Produced With Classless Afşin-Elbistan Fly Ash And Waste Ground Glass. *Konya Journal of Engineering Sciences*. **9(2)**, 416-427.
<https://doi.org/10.36306/konjes.825996>
- Brooks, J.J., Megat Johari, M.A., and Mazloom, M., 2000. Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. *Cem. Concr. Compos.* **22 (4)**, 293–301.
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00025-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00025-1)
- Çelik, Ö., 2004. Farklı İnceliklerdeki Tras ve Uçucu Külün Çimento Dayanımlarına Etkisi. *Pamukkale University Engineering Journal of Engineering Sciences*. **10 (3)**, 333-337.
- Dave, N., Misra, A.K., Srivastava, A., Kaushik, S.K., 2016. Experimental Analysis Of Strength And Durability Properties Of Quaternary Cement Binder And Mortar. *Construction and Building Materials*. **107**, 117-124.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.195>
- Davraz, M., ve Gündüz, L., 2003. Isparta Yöresi Amorf Silika Kayacının Katkı Maddesi Olarak Beton Dayanımına Etkisi. 3. *Ulusal Kırmataş Sempozyumu Kitabı*. 35-42, 3-4 Aralık, İstanbul.
- Demirörs, N. 2009. Suudi Arabistan Damad Barajında Uçucu Kül Yerine Puzolanik Madde Olarak Taş Unu Kullanımı ve Proje Ekonomisine Etkisi. *ARCEA-Association of Turkish Consulting Engineers and Architects 7th Engineering Consultancy Congress*, Ankara.
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B., Uçar, A., 2009. Yüksek Fırın Cürufunun Çimento Yüzey Özelliklerine ve Hidratasyona Etkileri. *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. **19**, 47-58.
- Erdoğdu, Ş., Arslantürk, C., Kurbetci, Ş. 2011. Influence of fly ash and silica fume on the consistency retention and compressive strength of concrete subjected to prolonged agitating. *Construction and Building Materials*. **25(3)**, 1277-1281.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.024>
- Fayomi, G.U., Mini, S.E., Fayomi, O.S.I., and Ayoola, A.A., 2019. Perspectives on environmental CO₂ emission and energy factor in Cement Industry. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **1**, 331.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/331/1/012035>
- Fernandez-Jimenez, A., Garcia-Lodeiro, I., and Palomo, A., 2007. Durability of alkali-activated fly ash cementations materials. *Advances In Geopolymer Science & Technology*. **42**, 3055–3065.
<https://doi.org/10.1007/s10853-006-0584-8>
- Filho, J.H., Medeiros, M.H.F., Pereira, E., Helene, P., and Isaia, G.C., 2013. High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test. *J. Mater. Civ. Eng.* **25 (3)**, 411–418.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000596](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000596)
- Harish, K.V., and Rangaraju, P.R., 2013. Decoupling the Effects of Chemical Composition and Fineness of Fly Ash in Mitigating Alkali-Silica Reaction. *Cement and Concrete Composites*. **43**, 54-68.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.06.009>
- International Energy Agency (IEA) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), Cement Technology Roadmap 2009–Carbon Emissions Reductions up to 2050, 2009.
- Islam, M.M., Alam, M.T., and Islam, M.S., 2018. Effect of fly ash on freeze–thaw durability of concrete in marine environment. *Aust. J. Struct. Eng.* **19 (2)**, 146–161.
<https://doi.org/10.1080/13287982.2018.1453332>
- Jena, T., and Panda, K.C., 2018. Mechanical and durability properties of marine concrete using fly ash and silpozz. *Adv. Concr. Constr.* **6 (1)**, 47–68.
<https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.1.047>
- Kumar, S., Murthi, P., Awoyera, P., Gobinath, R., and Kumar, S., 2022. Impact Resistance and Strength Development of Fly Ash Based Self-compacting Concrete. *Silicon*. **14**, 481–492.
<https://doi.org/10.1007/s12633-020-00842-2>
- Latawiec, R., Woyciechowski, P., and Kowalski, K.J., 2018. Sustainable concrete performance CO₂ emission. *Environ. MDPI* **5 (2)**, 1–14.
<https://doi.org/10.3390/environments5020027>
- Li, G., Liu, S., Niu, M., Liu, Q., Yang, X., Deng, M. 2020. Effect of granulated blast furnace slag on the self-healing capability of mortar incorporating crystalline

- admixture. *Construction and Building Materials*. **239**, 117818.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117818>
- Mahyar, M., Erdogan, S.T., 2015. Phosphate-activated high-calcium fly ash acid-base cements. *Cem. Concr. Compos.* 96–103.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.09.002>
- Marceau, M.L., Gajda, J., and VanGeem, M., 2002. Use of Fly Ash in Concrete: Normal and High Volume Ranges. *Portland Cement Association*. 2604.
- Mardani, A., Sezer, G.İ., and Ramyar, K., 2014. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*. **70**, 17-25.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.089>
- McCarthy, M.J., and Dyer, T.D., 2019. Pozzolanas and Pozzolanic Materials, 5th ed., Elsevier Ltd.
- Medepalli, S., Sharma, M., and Bishnoi, S., 2020. Blending of Fly Ashes to Reduce Variability in the Heat of Hydration and Compressive Strength. *J. Mater. Civ. Eng.* **32** (4), 04020046.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.00031](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.00031)
- Mondal, P., Shah, S. P., Marks, L. D., Gaitero, J. J. 2010. Comparative study of the effects of microsilica and nanosilica in concrete. *Transportation Research Record*. **2141**(1), 6-9.
<https://doi.org/10.3141/2141-02>
- Montgomery, D.G., Hughes, D.C., and Williams, R.I.T., 1981. Fly ash in concrete - a microstructure study. *Cem. Concr. Res.* **11** (4), 591–603.
- Mukhopadhyay, K.A., and Liu, W.K., 2015. Application of nanotechnology to control ASR in Portland cement concrete. *Nanotechnol. Constr.* 465–471.
- Nie, Q., Zhou, C., Shu, X., He, Q., and Huang, B., 2014. Chemical, mechanical, and durability properties of concrete with local mineral admixtures under sulfate environment in Northwest China. *Materials (Basel)*. **7** (5), 3772–3785.
<https://doi.org/10.3390/ma7053772>
- Nocun-Wczelik, W., 2001. Heat evolution in hydrated cementitious systems admixed with fly ash. *J. Therm. Anal. Calorim.* **65** (2), 613–619.
- Ondova, M., Stevulova, N., and Estokova, A., 2012. The study of the properties of fly ash based concrete composites with various chemical admixtures. *Procedia Eng.* **42**, 1863–1872.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.582>
- Paliwal, G., and Marua, S., 2017. Effect of fly ash and plastic waste on mechanical and durability properties of concrete. *Adv. Concr. Constr.* **5** (6), 575–586.
- Patil, A.G., and Anandhan, S., 2015. Influence of planetary ball milling parameters on the mechano-chemical activation of fly ash. *Powder Technol.* **281**, 151-158.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.078>
- Peker, S.N., 2006. Lignite-fired thermal power plants and SO₂ pollution in Turkey. *Energy Policy*. **34**, 2690–2701.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.03.006>
- Praveen Kumar, V.V., and Ravi Prasad, D., 2019. Influence of Supplementary Cementitious Materials on Strength and Durability Characteristics of Concrete. *Adv. Concr. Constr.* **7** (2), 75–85.
<https://doi.org/10.12989/acc.2019.7.2.075>
- Ramyar, K., Dönmez, H., ve Andiç, Ö., 2002. Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı ile Kontrol Altına Alınması. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*. Çimento Endüstrisi-Üniversite İş birliği Araştırma Projesi Raporları, Rapor No:9, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- Sadrmomtazi, A., Tahmouresi, B., and Khoshkbijari, R.K., 2018. Effect of fly ash and silica fume on transition zone, pore structure and permeability of concrete. *Mag. Concr. Res.* **70** (10), 519–532.
<https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00537>
- Schneider, M., 2015. Process technology for efficient and sustainable cement production. *Cem. Concr. Res.* **78**, 14-23.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.014>
- Sottili, L., and Padovani, D., 2011. Effect of grinding aids in the cement industry. *ZKG International*. **54** (3), 146-151.
<https://doi.org/doi:10.1088/1742-6596/1082/1/012091>
- Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., Sönmez, R., 2003. Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimsizliği. 5. *Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi*, İstanbul, 75-85.
- Şimşek, O., 2000. Yapı malzemesi II. Ankara Üniversitesi Basımevi, Ankara, Türkiye.
- Tampus, R. M., Lardizabal, J. R., Acena, D. L. M., Uy, M. A. M., and Arcenal, K. V. R., 2020. Proportion and property specifications and strength behavior of mortar using wood ash as partial replacement of lime. *International Journal*. **18** (70), 49-55.
<https://doi.org/10.21660/2020.70.5757>

- Thomas, M.D.A., 2007. Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete. *Portl. Cem. Assoc.* **24**, 5420.
- Topçu, İ.B., Bilir, T., Uygunoğlu, T., 2009. Effect Of Waste Marble Dust Content As Filler On Properties Of Self-Compacting Concrete. *Construct. Build. Mat.*, **23 (5)**, 1947-1953.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.007>
- Tosun, K., Felekoğlu, B., Baradan, B., and Altun, İ. A., 2009. Portland Calcareous Cement Part I - Preparation of Cements. *IMO Technical Journal*. **309**, 4717-4736.
- TS 4045, 1985. Determination of Capillary Water Absorption in Building Materials, Turkish Standards Institute, Ankara.
- TS EN 196-1, 2016. Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength.
- TS EN 196-3, 2002. Cement Test Methods - Part.3: Setting time and expansion determination, Turkish Standards Institute, Ankara.
- TS EN 196-3, 450-1, 459-2; TS EN ISO 9597 2002. Le Chatelier molds; It is used with Le Chatelier Water Bath to measure the expansion volume change of fly ash and lime used in cement, concrete.
- TS EN 196-6, 2020. Çimento deney yöntemleri- Bölüm 6: İncelik tayini.
- TS EN 197-1, 2011. Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- TS EN 450-1, 2012. Fly ash for concrete- Part 1: Definition, specification and conformity criteria, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Turgut, P., and Demir, F., 2019. The influence of disposed fly ash on Ca²⁺ leaching and physico-mechanical properties of mortars. *J. Clean. Prod.* **226**, 270–281.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.105>
- Türker, P., Erdogan, B., Kantas, F., and Yeginobalı, A., 2003. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*. 20-34, Ankara.
- Varun, B.K., Harish, B.A., 2018. Effect of Addition of Flyash and Ggbs on Cement Concrete in Fresh and Hardened State. *Int. J. Adv. Eng. Res. Dev.* **5** 91–100.
<https://doi.org/10.17577/IJERTCONV6IS11023>
- Wang, L., Jin, M., Guo, F., Wang, Y.A.N., and Tang, S., 2021. Pore structural and fractal analysis of the influence of fly ash and silica fume on the mechanical property and abrasion resistance of concrete. *Fractals* **29 (2)**, 1–18.
<https://doi.org/10.1142/S0218348X2140003X>
- Xu, O., Han, S., Liu, Y., and Li, C., 2020. Experimental investigation surface abrasion resistance and surface frost resistance of concrete pavement incorporating fly ash and slag. *Int. J. Pavement Eng.* 1–9.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1726348>
- Zeidan, M., and Said, M. A., 2016. Effect of colloidal nano-silica on alkali-silica mitigation. *J. Sustainable Cem. - Based Mater.* **6 (2)**, 126–138.
<https://doi.org/10.1080/21650373.2016.1191387>

İnternet kaynakları

1-<http://www.holcim.com>. (02.02.2015)