

---

*Araştırma Makalesi / Research Article*

---

## **Alkali ile Aktive Edilmiş EPS İkameli Harçların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri ile Yüksek Sıcaklığa Karşı Dirençlerinin Araştırılması**

Halil EREN<sup>1</sup>, Serhan İLKENTAPAR<sup>1</sup>, Uğur DURAK<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye  
(ORCID: [0000-0001-6071-6009](https://orcid.org/0000-0001-6071-6009)) (ORCID: [0000-0002-9932-2899](https://orcid.org/0000-0002-9932-2899)) (ORCID: [0000-0003-2731-3886](https://orcid.org/0000-0003-2731-3886))

---

### **Öz**

Bu çalışmada alkali ile aktive edilmiş cürüflu harçlarda ırmak kumu ile EPS (Genleştirilmiş polistiren) ikame edilerek hafif harç numuneleri üretilmiştir. EPS granülleri ırmak kumu ile hacimce yüzde 20-40-60-80-100 oranlarında yer değiştirilerek karışıma dâhil edilmiştir. Çalışmada aktivatör olarak sodyum silikat kullanılmış ve üretilen numuneler 28 gün havada kür edilmiştir. Kür süresini dolduran alkali ile aktive edilmiş cürüflu harçların birim ağırlık, ultrasonik atımlı dalga hızı, ısı geçirimsizlik özellikleri ile eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca 28 gün kür süresi sonrası 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin yüksek sıcaklığa karşı dirençleri ve içyapı özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre EPS ikamesi ile numunelerin birim ağırlık, ultrasonik atımlı dalga hızı değerleri ile eğilme ve basınç dayanım değerleri düşerken, yalıtım performansının ise arttığı görülmüştür. Irmak kumu ile ikame edilen EPS miktarı arttıkça numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarında meydana gelen kayıplar artmıştır. Ayrıca EPS ikame oranı arttıkça özellikle 600°C ve 900°C sıcaklık sonrasında basınç dayanımlarında ciddi oranda kayıplar yaşanmıştır. Buna paralel olarak yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerin içyapıları daha boşluklu ve çatlaklı bir yapıya dönüşmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Cüruf, EPS, Hafif harç, Isı geçirimsizlik, Yüksek sıcaklık, Alkali ile aktive edilmiş malzeme

---

## **Investigation of Mechanical and Physical Properties and Resistance to High Temperature of Alkali Activated EPS Substituted Mortars**

---

### **Abstract**

In this study, lightweight alkali-activated slag mortar samples were produced by substituting EPS (expanded polystyrene) and river sand. EPS granules were included in the mixture by replacing them with river sand at 20%, 40%, 60%, 80%, 100% by volume. Sodium silicate was used as the activator in the study and the produced samples were cured in air for 28 days. After the curing period, the unit weight, ultrasonic pulse velocity, heat permeability properties, flexural and compressive strengths of the alkali-activated slag mortars were determined. In addition, resistance to high temperature and microstructure properties of the samples exposed to temperatures of 300°C, 600°C ve 900°C after 28 days of curing were investigated. According to the results, with EPS substitution, it was observed that the unit weight, ultrasonic pulse velocity, flexural and compressive strengths values of the samples decreased, while the insulation performance increased. As the number of EPS substituted with river sand increased, the losses in flexural and compressive strength of the samples increased. In addition, as the EPS replacement ratio increased, there were serious losses in compressive strength, especially after 600°C and 900°C temperatures. Parallel to these results, the internal structures of the samples exposed to the effect of high temperature turned into a more porous and cracked microstructure.

**Keywords:** Slag, EPS, Lightweight mortar, Heat permeability, High temperature, Alkali activated material.

---

### **1. Giriş**

Çimento üreticileri hem enerji tüketimini hem de CO<sub>2</sub> salınımını azaltmak için çimentoya mineral katkı ilavesi yapmaktadırlar [1]–[6]. Mineral katkı olarak kullanılan malzemelerden biri olan yüksek firın

---

\*Sorumlu yazar: [ugurdurak@erciyes.edu.tr](mailto:ugurdurak@erciyes.edu.tr)

Geliş Tarihi: 11.08.2021, Kabul Tarihi: 07.10.2021

cürufu çelik üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen ve genellikle çimento sistemlerinde çimento ile ikame edilerek kullanılan bir malzemedir [7], [8]. Çimento endüstrisinde yüksek miktarda yüksek fırın cürufu kullanılmasına rağmen, çimentoya alternatif bir bağlayıcı olarak kullanılması için hala geniş bir alan bulunmaktadır. Yüksek fırın cürufunun çimentolu betonlarda kullanımı düşük erken dayanımı sağlaması ile uygulamada kısıtlamalar sağlamaktadır. Bu sorun beton teknolojisinde kullanılan alkali ile aktive edilmiş cürufu harçlar ile aşılabilmektedir. Yüksek fırın cürufu ve çeşitli alkali aktivatörler ile üretilen çimentosuz betonlar düşük enerji, düşük CO<sub>2</sub> salınımı ve daha yüksek durabilite özellikleri ile önem kazanmaktadır [7], [9]. Alkali ile aktive edilmiş cürufu harçların özellikleri portland çimentolu harçlar ile kıyaslandığında kimyasal saldırı, donma-çözülme döngüleri ve yüksek sıcaklıklarda daha yüksek mukavemet ve iyi performans gösterdikleri gözlemlenmektedir. Bu nedenle yüksek fırın cürufu kullanılarak birçok çalışma yapılmış ve halen yapılmaktadır [7], [10]–[18].

Yüksek fırın cürufu kullanılarak hafif harç/beton üretimi de bu anlamda çalışılabilir konulardan biri olmaktadır. Türk standartlarına bakıldığında betonlar birim ağırlıklarına göre hafif, orta ve ağır beton olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır [19]. Hafif betonlar kendi içinde birim ağırlık veya dayanımlarına göre sınıflandırılabilir [20]. Hafif betonlar birim ağırlıklarına göre sınıflandırıldığında üç farklı sınıf ortaya çıkmaktadır. Bunlar; 1- Birim ağırlığı 300 kg/m<sup>3</sup> ile 800 kg/m<sup>3</sup> arasında olan yatılı betonları, 2- Birim ağırlığı 800 kg/m<sup>3</sup> ile 1400 kg/m<sup>3</sup> arasında olan orta mukavemetli hafif betonlar ve 3- Birim ağırlıkları 1400 kg/m<sup>3</sup>'den büyük olanlar taşıyıcı hafif betonlardır [21], [22].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde araştırmacıların hafif harç veya beton üretiminde çeşitli hafif agregaları kullandıkları gözlenmiştir. Kullanılan farklı kaynaklı hafif agregalar olarak pomza taşı, volkanik tüf, [23]–[25] yapay hafif agrega olarak üretilen perlit, genişletilmiş şeyl, vermikülit gibi malzemeler hafif beton üretiminde kullanılmaktadır [26], [27].

Önceki çalışmalarda genişletilmiş polistiren sert köpük (EPS-Expanded Polystyren Foam) kullanılarak hafif harçlar üretilmiştir. Hem çimentolu sistemlerde farklı çimento dozajında üretilen EPS ikameli hafif harçların, hem de uçucu küllü geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve ısı iletkenlik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca EPS ikameli hafif harçların yüksek sıcaklığa dayanıklılığı araştırılmıştır. Genel olarak elde edilen sonuçlara göre EPS ilavesi ile üretilen numunelerin birim ağırlıklar ve dayanımlarının azaldığı fakat buna karşın ısı yalıtım performanslarının arttığı gözlenmiştir [28]–[33].

Bu çalışmada alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçlara agrega yerine EPS ikame edilerek hafif harç üretiminin mümkün olup olmadığı ve kullanılabilirliği araştırılmıştır. Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçlara, agrega ile hacimce yüzde 20-40-60-80-100 oranlarında olacak şekilde EPS ikamesi yapılmıştır. Üretilen EPS'li hafif harçların birim ağırlık, ultrasonik atımlı dalga hızı, eğilme ve basınç dayanımları ile ısı geçirimsizlik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca üretilen harç numuneler 28 gün kür edildikten sonra 300°C, 600°C, 900°C sıcaklıklarda yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak yüksek sıcaklık sonrası numunelerin basınç dayanımları ve içyapıları incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Çalışmada İskenderun bölgesinde bulunan demir, çelik fabrikasından temin edilen yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Kullanılan yüksek fırın cürufunun görünümü Şekil 1'de sunulmuştur. Ayrıca yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonunu belirleyebilmek adına Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde XRF analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur.

**Tablo 1.** YFC kimyasal kompozisyonu

Oksit	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Diğer	KK
YFC	40,85	34,57	10,37	6,95	1,81	0,96	1,56	2,91

## 2.2. Agregası ve Su

Alkali ile aktive edilmiş harç numunelerin üretiminde tane çapı 0-4 mm olan ırmak kumu agrega olarak kullanılmıştır. Irmak kumu üzerinde TS 3530 EN 933-1'e [34] standardına göre piknometre deneyi yapılmış ve etüv kurusu tane yoğunluğu 2,58 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Karışım suyu olarak içilebilir şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

## 2.3. Genleştirilmiş Polistiren (EPS)

Çalışmada agrega ile ikame edilerek kullanılan EPS granüllerinin yoğunluğu 14 kg/m<sup>3</sup> tür. Beyaz renkli ve yuvarlak taneli olan EPS granüllerinin görünümü Şekil 1'de sunulmuştur.

## 2.4. Sodyum Silikat ve Kimyasal Katkı

Çalışmada Tekkim Kimya firmasından temin edilen ve Şekil 1'de görünümü verilen sodyum silikat aktivatör olarak kullanılmıştır. Ayrıca EPS granüllerinin alkali ile aktive edilmiş harç sistemi içerisinde homojen bir dağılımda yer almasına sağlamak ve yüzeye çıkmasını engellemek için E200P kodlu kimyasal katkı malzemesi kullanılmıştır.



Şekil 1. Yüksek fırın cürufu (a), sodyum silikat (b), EPS (c)

## 2.5. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışma kapsamında alkali ile aktive edilmiş 6 farklı karışım serisi üretilmiştir. Karışımlarda bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu ve alkali aktivatör olarak toz formunda sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) kullanılmıştır. Alkali ile aktive edilmiş harçlara (AAH) yüzde 20-40-60-80-100 oranlarında EPS, ırmak kumu ile hacimce yer değiştirilerek ilave edilmiştir. Çalışmada alkali ile aktive edilmiş harçlar için kontrol numunesini belirleyebilmek için CEM I 42,5R Portland çimentosunun yaklaşık 28 günlük dayanımını sağlayacak şekilde 0,5 su/bağlayıcı ve 3/1 kum/bağlayıcı oranına sahip farklı aktivatör miktarları ile harç numuneler üretilmiştir. Önceki çalışmalar incelendiğinde yüksek fırın cürufu kullanılan sistemlerde sodyum silikat bazlı aktivatörlerin (sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı veya sadece sodyum silikat) sadece sodyum hidroksit ve sodyum karbonat aktivatörlerine kıyasla daha iyi performansına sağladığı gözlenmiştir [10], [17], [18]. Bu nedenle bu çalışmada yüksek fırın cürufu sodyum silikat kullanılarak aktive edilmiştir.

Üretilen numuneler 23±2°C sıcaklıkta laboratuvar koşullarında havada 28 gün kür edildikten sonra dayanımları belirlenmiş ve 50 g sodyum silikat içeren numunenin 6,4 MPa eğilme ve 44,67 MPa basınç dayanımı ile kontrol numunesi olmasına karar verilmiştir. Kontrol karışımının işlenebilirliği TS EN 1015-3 [35] standardına göre ölçülmüş ve 161 mm olarak kaydedilmiştir. Belirlenen kontrol karışımına EPS granüllerinin kum ile yer değiştirilerek ikamesi yapılırken homojen bir dağılım sağlamak adına %1 oranında kimyasal katkı kullanılmıştır. EPS ilavesi ile alkali ile aktive edilmiş harç karışımların işlenebilirlik değerlerinde artış meydana gelmektedir. Bu nedenle harç numunelerin üretiminde işlenebilirlik değerlerinin 155-165 mm arasında kalmasını sağlayacak şekilde su azaltması yapılmıştır. Kontrol ve EPS ikameli harçların karışım oranları Çizelge 2'de verilmiştir.

Üretilen harç numuneler 40x40x160 mm<sup>3</sup>lük sarsma tablası kullanılarak kalıplara iki kademede yerleştirilmiştir. Üretim sonrasında 24 saat oda koşullarında bekletilen numuneler daha sonra kalıptan çıkarılarak 28 gün 23±2°C sıcaklıkta havada küre tabi tutulmuştur.

Kür süresini tamamlayan alkali ile aktive edilmiş harçların birim ağırlıkları ve ultrasonik atımlı dalga hızları 3'er adet numune üzerinde sırasıyla ASTM C 642'ye [36] ve TS EN 12504-4 [37] standardına göre ölçülmüş ve ortalama değerleri alınarak deney sonucu olarak kaydedilmiştir. Ayrıca numunelerin ısı geçirimsizlik özelliklerinin belirleyebilmek adına ısı iletkenlik katsayıları ölçülmüştür. Numunelerin eğilme ve basınç dayanımları TS EN 1015-11 [38] standardına göre belirlenmiştir. Eğilme dayanımının belirlenmesinde her bir karışım için 3 adet numuneye üç noktalı eğilme deneyi uygulanmış ve elde edilen değerlerin ortalaması eğilme deneyi olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımının belirlenmesinde ise eğilme dayanımı sonrası elde edilen her bir karışım için 40x40 mm<sup>2</sup> boyutlarında 6 adet numune kullanılmış ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması basınç dayanımı deney sonucu olarak belirlenmiştir.

Alkali ile aktive edilmiş EPS ikameli harçların yüksek sıcaklık dirençlerini belirlemek için üretilen harç numuneler 28 gün kür edildikten sonra 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa tabi tutulmuşlardır. Deneyde öngörülen sıcaklıklara 5°C/dakika sıcaklık artışı uygulanarak erişilmiş ve numuneler belirtilen sıcaklıklarda 60 dakika bekletilmiştir. Deney sonrası numuneler oda sıcaklığına gelmesi için 24 saat laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Daha sonra numunelerin eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca 300°C, 600°C ve 900°C'de yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan alkali ile aktive edilmiş hamur numunelerin alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM-Field Emission Scanning Electron Microscope) ve enerji dağılımlı X-ray analizi (EDX-Energy Dispersive X-ray Analysis) ile içyapıları incelenmiştir.

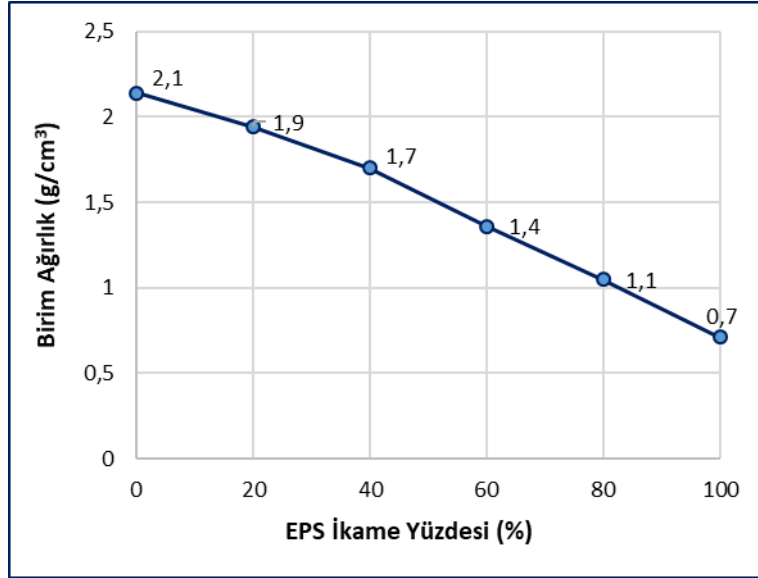
**Tablo 2.** Karışım oranları

Karışım Kodu	YFC (g)	Agrega hacmi		Aktivatör	Su / Bağlayıcı
		İrmak Kumu (%)	EPS (%)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)	
Kontrol	450	100	0	50	0,5
AAH-20E	450	80	20	50	0,4
AAH-40E	450	60	40	50	0,4
AAH-60E	450	40	60	50	0,35
AAH-80E	450	20	80	50	0,35
AAH-100E	450	0	100	50	0,35

### 3. Bulgular ve Tartışma

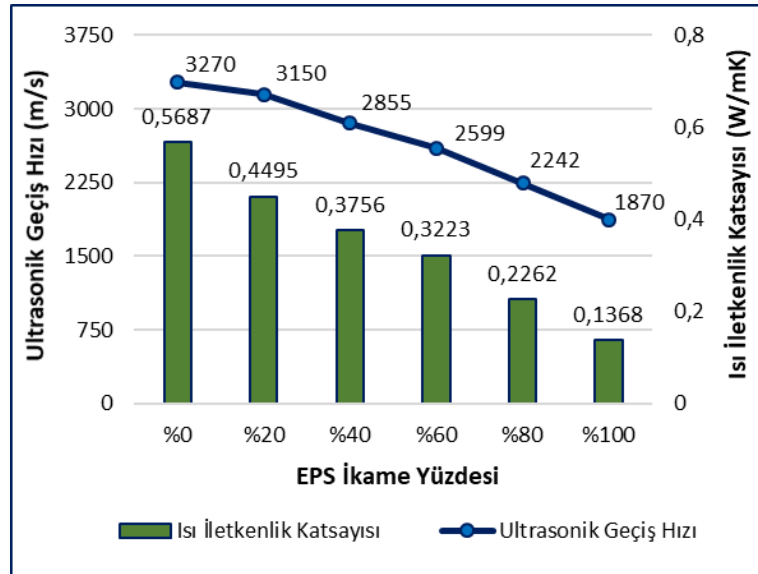
Kontrol ve EPS ikameli alkali ile aktive edilmiş harç numunelere ait birim ağırlık değerleri Şekil 2'de sunulmuştur. 28 gün havada kür edilmiş harçların birim ağırlık değerleri 0,71 ile 2,14 g/cm<sup>3</sup> arasında ölçülmüştür. Belirlenen birim ağırlık değerlerine göre %20 ve %40 oranlarında EPS ikame edilen numunelerin taşıyıcı hafif beton sınıfına girdiği, %60 ve %80 EPS içeren numunelerin orta mukavemetli hafif beton sınıfına girdiği ve %100 EPS ikame edilen numunelerin yalıtım betonu sınıfına girdiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre EPS ikamesi arttıkça birim ağırlık değerleri düşmüştür. Bu durum ırmak kumuna göre daha düşük birim ağırlığa sahip olan EPS granüllerinin ırmak kumu ile yer değiştirilerek kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

28 gün havada kür edilmiş kontrol ve EPS ikameli alkali ile aktive edilmiş harçların ultrasonik atımlı dalga hızları ve ısı iletkenlik katsayıları Şekil 3'te verilmiştir. EPS ikame oranı arttıkça ultrasonik atımlı dalga hızı ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri düşmüştür. Numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları 1870 ile 3270 m/s arasında ölçülmüştür. Taşıyıcı hafif beton sınıfına giren AAH-20E, AAH-40E kodlu harçların ultrasonik atımlı dalga hızları 3270 m/s ve 3150 m/s olarak belirlenmiştir. Orta mukavemetli hafif beton sınıfına giren AAH-60E, AAH-80E kodlu harçların ultrasonik atımlı dalga hızları 2599 m/s ve 2242 m/s olarak tespit edilmiştir. Yalıtım betonu sınıfına giren AAH-100E kodlu harcın ultrasonik atımlı dalga hızı ise 1870 m/s olarak ölçülmüştür. Harç numunelerde EPS oranının artması ile elde edilen ultrasonik atımlı dalga hızlarının düşmesi daha düşük mekanik özelliklere sahip ürünlerin ortaya çıktığını göstermektedir.



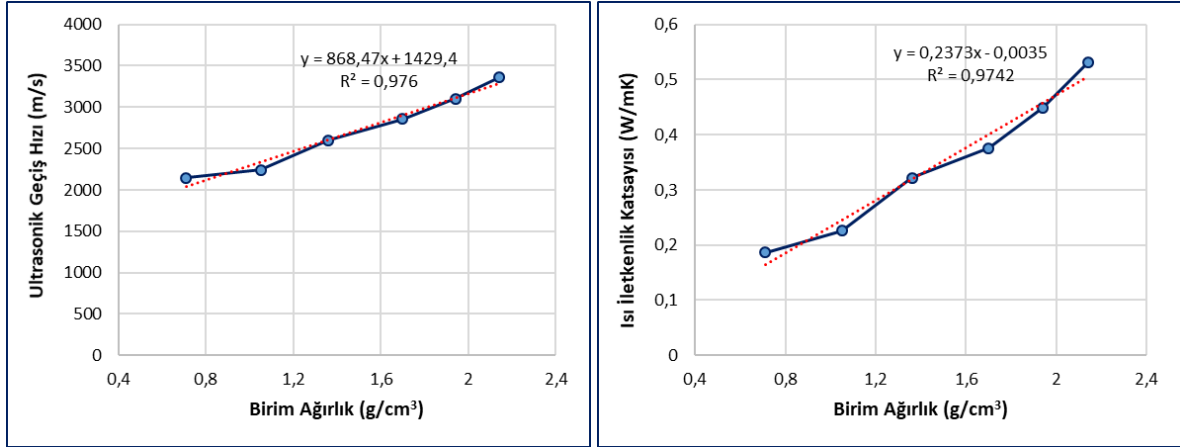
Şekil 2. Birim ağırlık değerleri

Diğer taraftan numunelerin ısı iletkenlik katsayıları 0,1368-0,5687 W/mK arasında ölçülmüştür. AAH-20E, AAH-40E kodlu harçların ısı iletkenlik katsayı değerleri 0,4495 W/mK ve 0,3756 W/mK, AAH-60E, AAH-80E kodlu harçların ısı iletkenlik katsayı değerleri 0,3223 W/mK ve 0,2262 W/mK ve AAH-100E kodlu harcın ısı iletkenlik katsayısı 0,1368 W/mK olarak belirlenmiştir. EPS ikame oranının artması ile ısı iletkenlik katsayısının düşmesi, yalıtım performansı daha yüksek ürünlerin elde edildiğini göstermektedir.



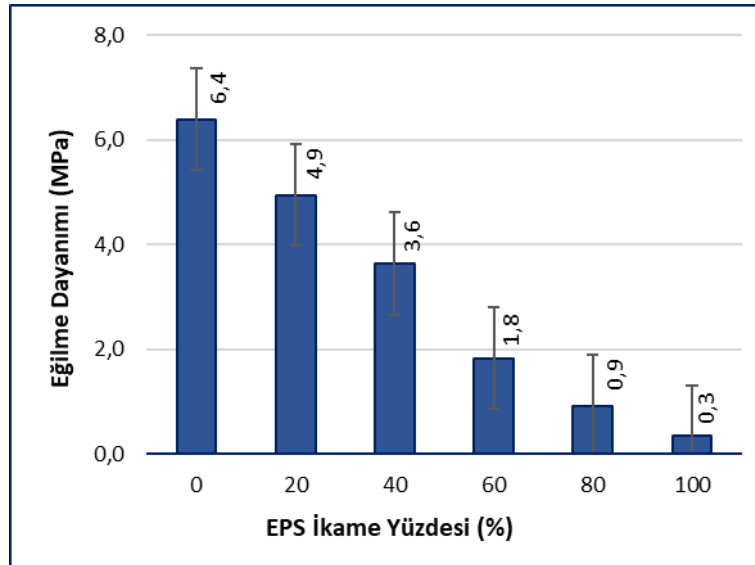
Şekil 3. Ultrasonik atımlı dalga hızları ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri

Ayrıca elde edilen ultrasonik atımlı dalga hızları ve ısı iletkenlik katsayıları ile birim ağırlık değerleri arasındaki yaklaşık  $R^2=0,98$  olacak şekilde doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Birim ağırlık ile ultrasonik atımlı dalga hızları ve ısı iletkenlik katsayıları arasındaki ilişki

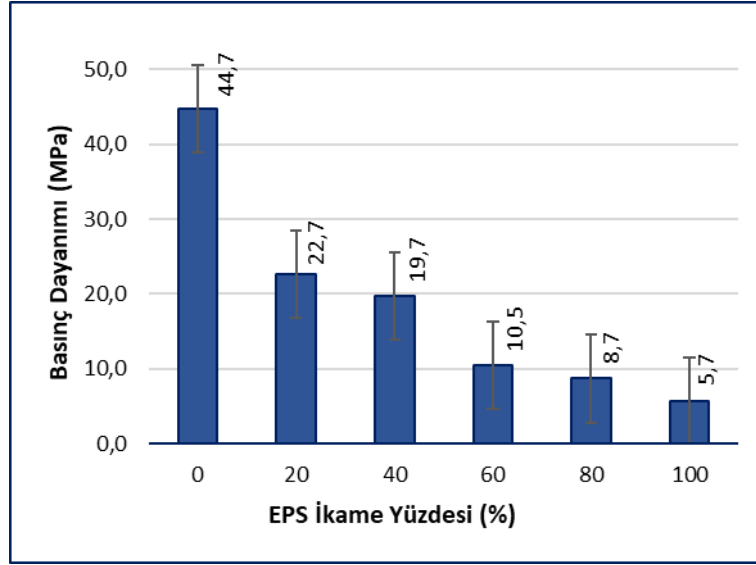
Alkali ile aktive edilmiş kontrol ve EPS ikameli harç numunelere ait 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçları şekil 5 ve 6'da sunulmuştur. Harç numunelerin eğilme dayanımları 0,3-6,4 MPa arasında, basınç dayanımları ise 5,7-44,7 MPa arasında ölçülmüştür. EPS ikame oranının artması ile numunelerin hem eğilme hem de basınç dayanımları ciddi oranda düşüş gözlenmiştir. Taşıyıcı hafif beton sınıfına giren AAH-20E, AAH-40E kodlu harç numunelerin eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla 4,9-22,7 MPa ve 3,6-19,7 MPa olarak ölçülmüştür. Orta mukavemetli hafif beton sınıfına giren AAH-60E, AAH-80E kodlu harç numunelerin eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla 1,8-10,5 MPa ve 0,9-8,7 MPa olarak ölçülmüştür. Yalıtım betonu sınıfına giren AAH-100E kodlu harcın eğilme ve basınç dayanımı ise 0,3-5,7 MPa olarak ölçülmüştür.



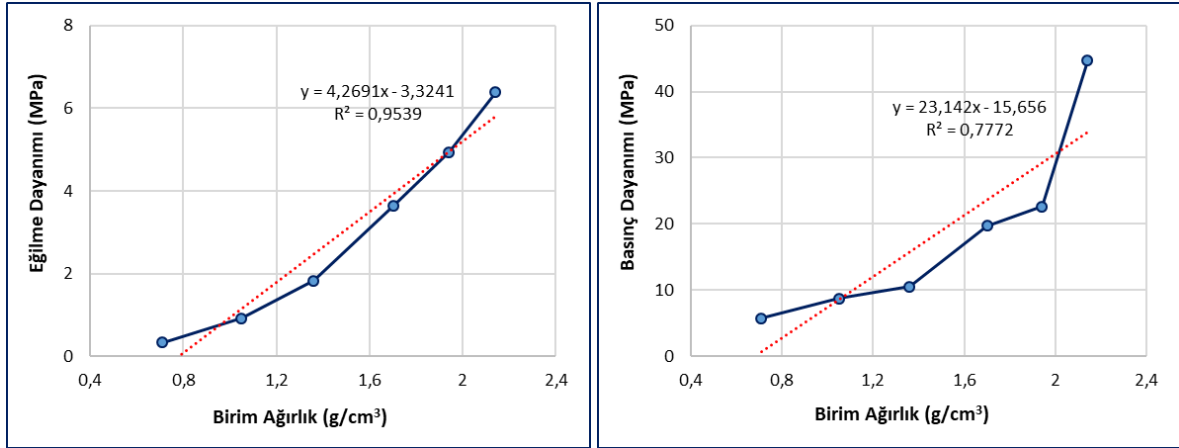
Şekil 5. Eğilme dayanımları

EPS ikame oranının %20, %40, %60, %80 ve %100 olması ile kontrol numunesine kıyasla harç numunelerin eğilme dayanımları sırasıyla %23, %43, %71, %86 ve %95'e varan oranlarda azalırken, basınç dayanımları sırasıyla %49, %56, %76, %80 ve %87'ye varan oranlarda azalmıştır. Elde edilen sonuçlar ultrasonik atımlı dalga hızı deney sonuçları ile de uyumluluk göstermektedir.

Ayrıca harç numunelerin birim ağırlık değerleri ile eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki değerlendirilmiş ve şekil 7'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre birim ağırlık ile eğilme ve basınç dayanımları arasında sırasıyla  $R^2=0,95$  ve  $R^2=0,78$  olacak şekilde doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Basınç dayanımları



Şekil 7. Birim ağırlık ile eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki

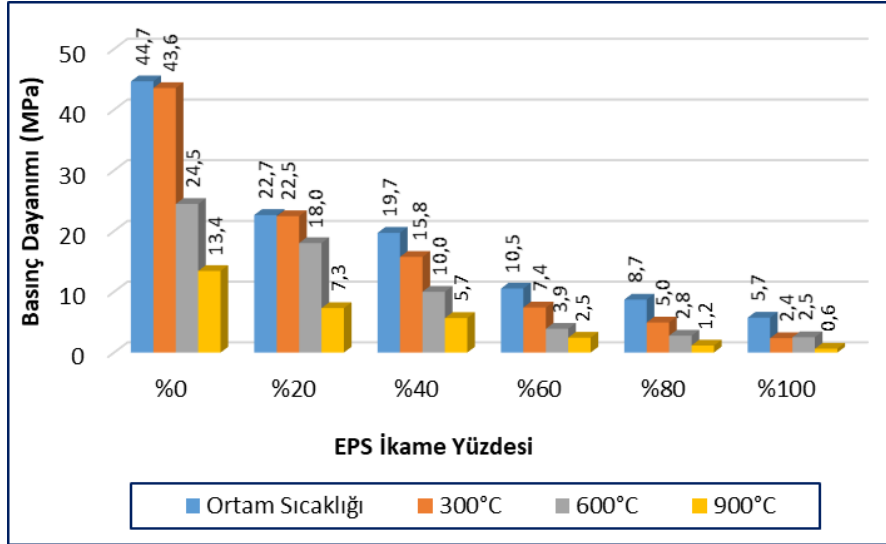
28 gün kür edilmiş numuneler kür sonrasında 300°C, 600°C ve 900°C’de yüksek sıcaklığa tabi tutulmuşlardır. Yüksek sıcaklık sonrası elde edilen basınç dayanımları Şekil 8’de sunulmuştur.

300°C sıcaklık etkisine maruz bırakılan EPS ikameli harçların basınç dayanımları incelendiğinde, taşıyıcı hafif beton sınıfına giren AAH-20E ve AAH-40E kodlu numunelerde sırasıyla 22,5 MPa ve 15,8 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Orta mukavemetli hafif beton sınıfına giren AAH-60E ve AAH-80E kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 7,4 MPa ve 5,0 MPa olarak ölçülmüştür. Yalıtım betonu sınıfına giren AAH-100E kodlu numunelerin basınç dayanımı ise 2,4 MPa olarak belirlenmiştir.

600°C sonrası sıcaklık etkisi sonrasında ise taşıyıcı hafif beton sınıfına giren AAH-20E, AAH-40E kodlu harç numunelerin basınç dayanımları 18 MPa ve 10,0 MPa olarak ölçülmüştür. Orta mukavemetli hafif beton sınıfına giren AAH-60E ve AAH-80E kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 3,9 MPa ve 2,8 MPa olarak tespit edilmiştir. Yalıtım betonu sınıfına giren AAH-100E kodlu numunelerin basınç dayanımı ise 2,5 MPa olarak ölçülmüştür.

900°C sıcaklık etkisi sonrası elde edilen basınç dayanımları incelendiğinde, taşıyıcı hafif beton sınıfına giren AAH-20E ve AAH-40E kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 7,3 MPa ve 5,7 MPa olarak ölçülmüştür. Orta mukavemetli hafif beton sınıfına giren AAH-60E ve AAH-80E kodlu numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 2,5 MPa ve 1,2 MPa olarak ölçülmüştür. Yalıtım betonu sınıfına giren AAH-100E kodlu numunelerin basınç dayanımı ise 0,6 MPa olarak ölçülmüştür.

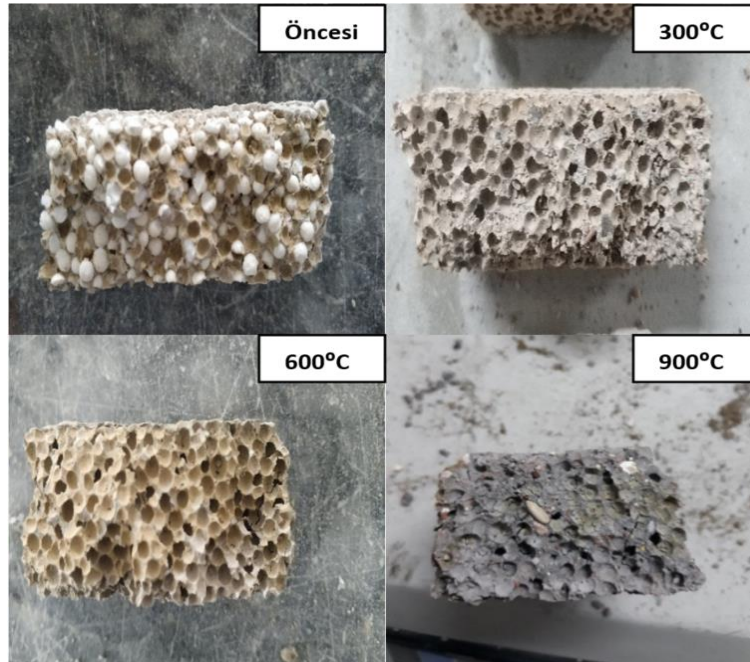




Şekil 8. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları

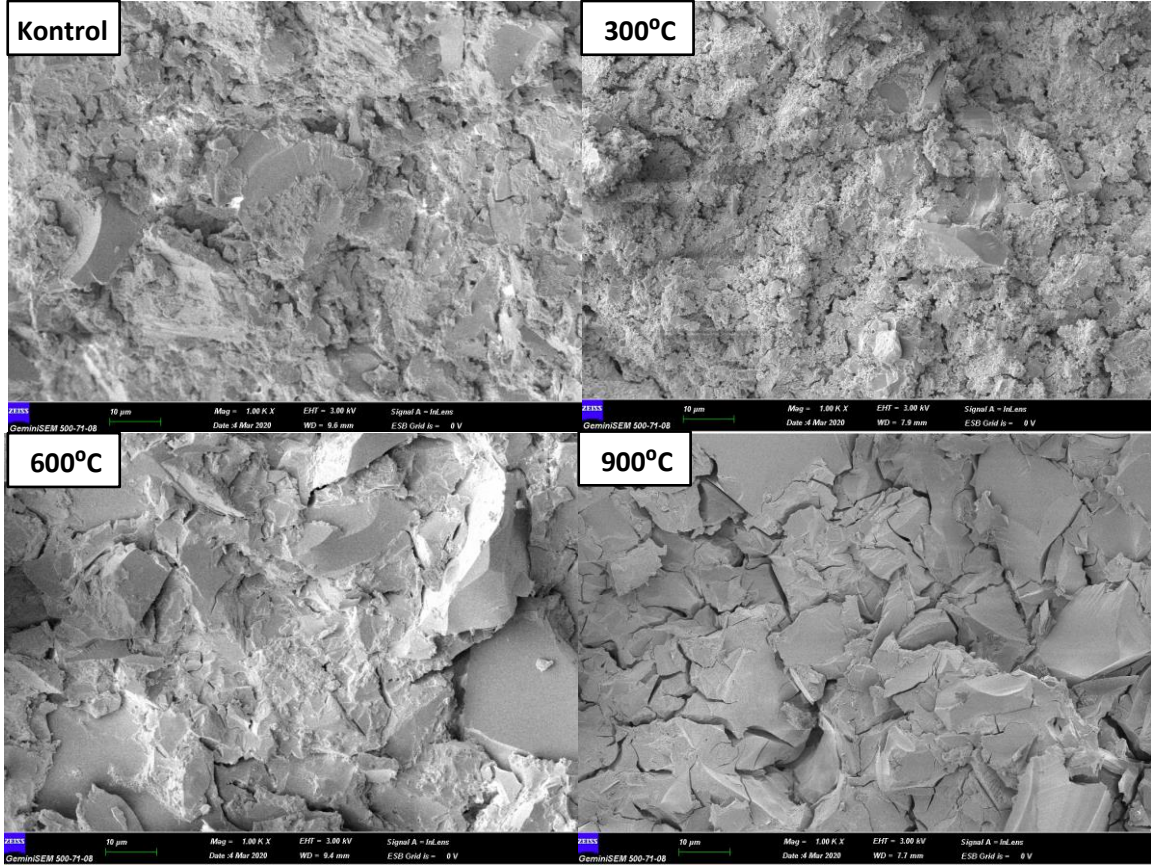
Alkali ile aktive edilmiş EPS ikameli harç numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları incelendiğinde 300°C sıcaklık etkisi sonrasında numunelerin kayda değer bir dayanım kaybı yaşamadığı gözlenmiştir. Diğer taraftan 600°C ve 900°C sıcaklık etkisi sonrasında harç numunelerin basınç dayanımlarında gözle görülür bir düşüş gözlenmiştir. Özellikle 900°C sıcaklık etkisi sonrasında numunelerin basınç dayanımlarında ciddi kayıplar yaşanmıştır. EPS oranının artması ile basınç dayanımı meydana gelen kayıpta artış gözlenmiştir.

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin genel görünümünü göstermek adına AAH-80E (%80 EPS-%20 ırmak kumu) kodlu numunenin yüksek sıcaklık sonrası görünümü şekil 9'da sunulmuştur. Şekil 9 yakından incelendiğinde 300°C sonrasında hem bağlayıcı hamuru hem de EPS granüllerinin kısmi zarar gördüğü anlaşılmaktadır. 600°C ve 900°C sıcaklık etkisi sonrasında ise EPS granüllerinin hemen hemen tamamen eridiği görülmektedir. Buna ilave olarak yüksek sıcaklık derecesinin artması ile bağlayıcı hamurunun daha fazla zarar gördüğü anlaşılmaktadır.



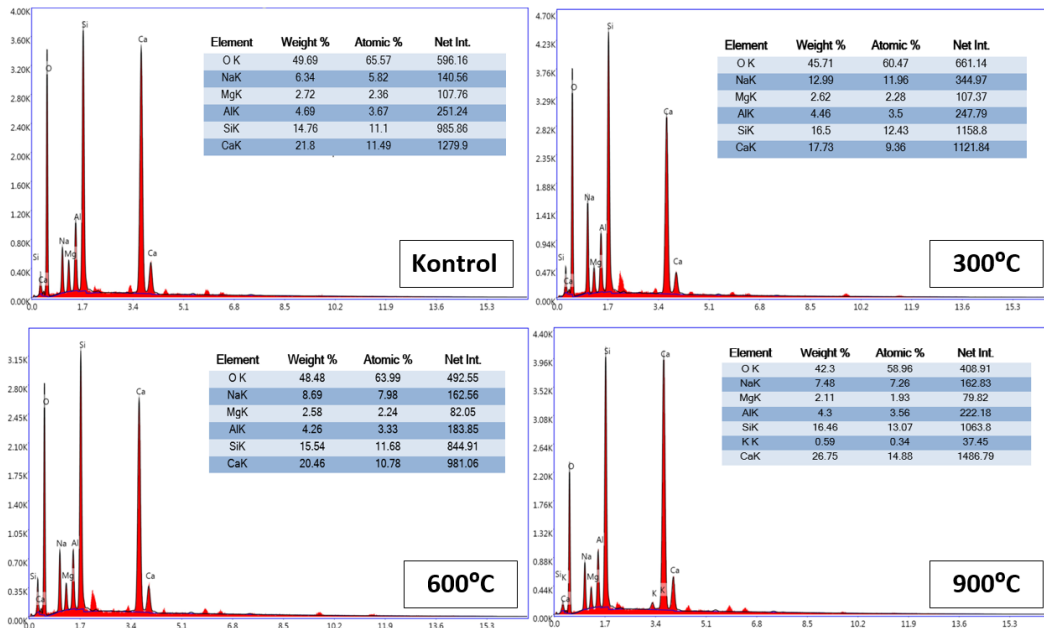
Şekil 9. Yüksek sıcaklık sonrası numune görünümü





Şekil 10. Yüksek sıcaklık sonrası FESEM görüntüleri (1000x büyütme)

Şekil 10 ve 11’de alkali ile aktive edilmiş kontrol hamurlarına ait FESEM görüntüleri ve EDX analizleri sunulmuştur. FESEM görüntülerine göre artan sıcaklık etkisi ile numunelerin daha boşluklu bir yapıya dönüştüğü gözlenmektedir. Ayrıca sıcaklık etkisinin artması ile numunelerin iç yapısındaki çatlak miktarında da artış gözlenmiştir. Bu durum artan sıcaklık etkisi ile numunelerin basınç dayanımlarında meydana gelen azalmayı açıklamaktadır. Daha boşluklu ve çatlaklı bir yapıya sahip olan numunelerin basınç dayanımlarında düşüş görülmesi olağandır. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisi sonrası numunelerin EDX analizleri incelendiğinde genel olarak ciddi bir farklılık görülmediği tespit edilmiştir.



Şekil 11. Yüksek sıcaklık sonrası EDX analizleri

#### 4. Sonuç ve Öneriler

1- EPS ikamesi ile alkali ile aktive edilmiş harçların birim ağırlıklarında düşüş gözlenmiştir. Elde edilen birim ağırlık değerlerine göre taşıyıcı ve orta mukavemetli hafif beton ile yalıtım betonu yapılabilmesi mümkün olabilmektedir.

2- EPS ikamesinin artması numunelerin ısı iletkenlik katsayısını düşürerek yalıtım performansı artmıştır. Buna karşın numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları azalmış ve mekanik özelliklerinde kayıplar meydana gelmiştir.

3- EPS ikamesinin artması ile eğilme ve basınç dayanımlarında azalmalar tespit edilmiştir. İrmak kumu ile %20, %40, %60, %80 ve %100 EPS ikamesi sonucunda eğilme dayanımları sırasıyla %23, %43, %71, %86 ve %95'e varan oranlarda azalırken, basınç dayanımları sırasıyla %49, %56, %76, %80 ve %87'ye varan oranlarda azalmıştır.

4-Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan EPS ikameli alkali ile aktive edilmiş harç numunelerin basınç dayanımlarında özellikle 600°C ve 900°C sıcaklık sonrasında ciddi oranda kayıplar yaşanmıştır. Buna paralel olarak yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerin içyapıları daha boşluklu ve çatlaklı bir yapıya dönüşmüştür.

#### Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurum (TÜBİTAK) 2209 B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri 2241 nolu proje kapsamında desteklenmiştir

#### Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye olan katkıları eşit orandadır.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### Kaynaklar

- [1] Ghrici M., Kenai S., Meziane E. 2006. Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana. *Journal of Materials Science*, 41.(21): 6965-6972.
- [2] Mehta P.K. 2004. High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development. *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, 31 (4): 3-14.
- [3] Huang C.H., Lin S. K., Chang C. S., Chen H. J. 2013. Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of class F fly ash. *Construction and Building Materials*, 46: 71-78.
- [4] Shanahan N., Markandeya A., Elnihum A., Stetsko Y. P., Zayed A. 2016. Multi-technique investigation of metakaolin and slag blended portland cement pastes. *Applied Clay Science*, 132: 449-459.
- [5] Duan P., Shui Z., Chen W., Shen C. 2013. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 44, 1-6.
- [6] Yamanel K., Durak U., İlkentapa S., İsa Atabey İ., Karahan O., Duran Atış C. 2019. Influence of waste marble powder as a replacement of cement on the properties of mortar. *Journal of Construction*, 18 (2), 290-300.

- [7] Karahan O. 2017. Transport properties of high volume fly ash or slag concrete exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 152: 898–906.
- [8] Gencil O., Karadag O., Oren O. H., Bilir T. 2021. Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. *Construction and Building Materials*, 283: 122783.
- [9] Wang S.D., Pu X.C., Scrivener K.L., Pratt P.L. 1995. Alkali-activated slag cement and concrete: A review of properties and problems. *Advances in cement research*, 7 (27): 93-102.
- [10] Bingöl Ş., Bilim C., Atiş C.D., Durak U. 2020. Durability properties of geopolymer mortars containing slag. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44 (1): 561-569.
- [11] Bingöl Ş., Bilim C., Duran Atiş C., Durak U, İlkentapar S., Karahan O. 2020. An investigation of resistance of sodium meta silicate activated slag mortar to acidic and basic mediums. *Revista de la construcción*, 19 (1): 127-133.
- [12] Puertas F., Gutiérrez R., Fernández-Jiménez A., Delvasto S., Maldonado J. 2002. Alkaline cement mortars. chemical resistance to sulfate and seawater attack. *Materiales de Construcción*, 52 (267): 55-71.
- [13] Çelikten S., Saridemir M., Özgür Deneme İ. 2019. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag + fly ash mortars exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 217: 50-61.
- [14] Bakharev T., Sanjayan J., Cheng Y.- B. 2003. Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. *Cement and Concrete research*, 33(10), 1607-1611.
- [15] Fernández-Jiménez A., Palomo J. G., Puertas F. 1999. Alkali-activated slag mortars mechanical strength behavior. *Cement and concrete research*, 29 (8): 1313-1321.
- [16] Provis J.L., Bernal S.A. 2014. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44: 299-327.
- [17] Atiş C.D., Bilim C., Çelik Ö., Karahan O. 2009. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and building materials*, 23 (1): 548-555.
- [18] Chang, J.J., Yeih W., Hung C.C. 2005. Effects of gypsum and phosphoric acid on the properties of sodium silicate-based alkali-activated slag pastes. *Cement and Concrete Composites*, 27 (1): 85-91.
- [19] TS EN 206:2013+A1, Concrete-Specification, Performance, Production and Conformity. Ankara, Turkey, 2013.
- [20] Neville A.M. 2011. *Properties of Concrete* 4th. Longman, London.
- [21] Taşdemir C. 2003. Hafif betonların ısı yalıtım ve taşıyıcılık özellikleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 5 (427): 57–61.
- [22] Taşdemir M. A. Taşıyıcı Hafif Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Doktora Tezi, 1982.
- [23] Beycioğlu A., Başıyigit C., Kılınçarslan Ş. 2010. Pomza agregalı hafif beton özelliklerine silis dumanının etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Dergisi*, 14 (2): 200–205.
- [24] Yazıcıoğlu S., Bozkurt N. 2006. Pomza ve mineral katkılı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (4): 675–680.
- [25] Ke Y., Beaucour A. L., Ortola S., Dumontet H., Cabrillac R. 2009. Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23 (8): 2821-2828.
- [26] Akçaözöğlü S., Atiş C.D., Akçaözöğlü K. 2010. An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste management*, 30 (2): 285-290.
- [27] Koksall F., Gencil O., Kaya M. 2015. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 88: 175-187.
- [28] Kılıç F. M. 2018. Hafif Şap ile Normal Şap Uygulamasının Özelliklerinin Karşılaştırılması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- [29] İlkentapar S., Eren H. 2020. EPS ile ikame edilmiş uçucu küllü geopolimer hafif harcın fiziksel, mekanik ve ısı geçirimsizlik özelliklerinin incelenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 9 (1): 28-38.
- [30] Babu K.G., Babu D. S. 2003. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete

- containing silica fume, *Cement and Concrete Research*, 33 (5): 755-762.
- [31] Babu D.S., Babu K.G., Wee T.H. 2005. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cement and Concrete Research*, 35 (6): 1218-1223.
- [32] Cook D. J. 1983. *Concrete Technology and Design, New Concrete Materials*, Vol. 1. Surrey University Press, Surrey.
- [33] Liu N., Chen B. 2014. Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 68: 227-232.
- [34] TS EN 933-1, Tests for Geometrical Properties of Aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method. Ankara, Turkey: TSE, 2012.
- [35] TS EN 1015-3, Methods of Test for Mortar for Masonry: Part 3. Determination of Consistence of Fresh Mortar (by flow table). Ankara, Turkey: TSE, 2000.
- [36] ASTM C 642-13, Standard Test Method for Density , Absorption, and Voids in Hardened Concrete. American Society for Testing and Material, 2013.
- [37] TS EN 12504-4, Testing concrete - Part 4: Determination of Ultrasonic Pulse Velocity. Ankara, Turkey: TSE, 2012.
- [38] TS EN 1015-11, Mortar Testing Method, Part 11. Measurement of Compressive and Flexural Tensile Strength of Mortar. Ankara, Turkey: TSE, 2000.