



## EPS VE ATIK POLİÜRETAN İLE ÜRETİLMİŞ HAFİF HARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN, ISI GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİNİN VE YÜKSEK SICAKLIĞA KARŞI DİRENÇLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

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

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Hafif Harç, Atık Poliüretan, EPS, Mekanik Özellikler, Isı İletkenlik, Yüksek Sıcaklık.</i>	<p>Bu çalışmada endüstriyel işlem sonrası açığa çıkan atık poliüretanın hafif harç imalatında kullanımı araştırılmıştır. Hali hazırda hafif harç üretiminde kullanılan EPS (Expanded polystyren foam) ve atık poliüretan kullanılarak hafif harç numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler eşdeğer birim ağırlıklarına göre karşılaştırılarak, atık poliüretanın hafif harç imalatında kullanımı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında EPS ve atık poliüretan agrega ile hacimce %20, %40, %60, %80, %100 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmış ve 40x40x160 mm'lik prizmatik harç numuneler üretilmiştir. Üretilen harç numunelerin birim ağırlık değerleri, ultrasonik atımlı dalga hızları, ısı iletkenlik katsayıları ile eğilme ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Ayrıca hem EPS hem de atık poliüretan ile üretilmiş harç numuneler 300°C, 600°C, 900°C'de yüksek sıcaklığa tabi tutulmuş ve sonrasında numunelerin mekanik dayanımları ile içyapıları incelenmiştir. İçyapı incelemeleri hamur numuneler üzerinde FESEM görüntüleri ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilere göre hem orta mukavemetli hafif beton sınıfına giren harçlarda, hem de taşıyıcı hafif beton sınıfına giren harçlarda atık poliüretan ile imal edilen harçların EPS'li harçlara göre daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Özellikle yüksek sıcaklık sonrası mekanik dayanımlar incelendiğinde atık poliüretanlı harç numunelerin, EPS'li numunelere oranla daha yüksek eğilme ve basınç dayanımları verdiği tespit edilmiştir.</p>

### COMPARISON OF THE MECHANICAL PROPERTIES, HEAT PERMEABILITY CHARACTERISTICS AND RESISTANCE AGAINST HIGH TEMPERATURE OF LIGHT MORTARS MADE WITH EPS AND WASTE POLYURETHANE

Keywords	Abstract
<i>Light Mortar, Waste Polyurethane, EPS, Mechanical Properties, Thermal Conductivity, High Temperature.</i>	<p>In this study, the use of waste polyurethane released after industrial processing in light mortar production has been investigated. Lightweight mortar samples were produced using EPS (Expanded polystyren foam) and waste polyurethane, which are currently used in lightweight mortar production. The produced samples were compared according to their equivalent unit weights and the use of waste and polyurethane in light mortar production was examined. Within the scope of the study, 40x40x160 mm prismatic mortar samples were produced by replacing 20%, 40%, 60%, 80%, 100% by volume with EPS and waste polyurethane aggregate. The unit weight values, ultrasonic pulsed wave velocities, thermal conductivity coefficients and flexural and compressive strengths of the produced mortar samples were measured. In addition, mortar samples produced with both EPS and waste polyurethane were subjected to high temperatures at 300°C, 600°C, 900°C, and then the mechanical strength and microstructures of the samples were examined. Microstructure studies were performed on dough samples with FESEM images. According to the data obtained, it has been concluded that mortars produced with waste polyurethane perform better than mortars with EPS in both medium strength lightweight concrete mortars and mortars in the carrier light concrete class. Especially when the mechanical strengths after high temperature are examined, it</p>

\* İlgili yazar / Corresponding author: ugurdurak@erciyes.edu.tr, +90-0352-207-6666

has been determined that waste polyurethane mortar samples give higher flexural and compressive strengths compared to EPS samples.

#### Alıntı / Cite

Eren H., İlkentapar S., Durak U., (2022). Eps ve Atık Poliüretan ile Üretilmiş Hafif Harçların Mekanik Özelliklerinin, Isı Geçirimsizlik Özelliklerinin ve Yüksek Sıcaklığa Karşı Dirençlerinin Karşılaştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 360-370.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)		Makale Süreci / Article Process	
H. Eren,	0000-0001-6071-6009	<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	10.05.2021
S. İlkentapar,	0000-0002-9932-2899	<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	27.10.2021
U. Durak,	0000-0003-2731-3886	<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	15.12.2021
		<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	30.06.2022

## 1. Giriş (Introduction)

Endüstriyel üretim süreçleri çok miktarda atık ürün açığa çıkmasına neden olmaktadır. Açığa çıkan bu atık ürünlerin çoğu ya dolgu malzemesi olarak kullanılmakta ya da kısıtlı alanlarda kullanılabilir. Bu yüzden ortaya çıkan endüstriyel atıkların zararlı etkilerini azaltmak için uygun geri dönüşüm işlemleri uygulanarak kullanım alanlarının oluşturulması önem arz etmektedir. Endüstriyel üretim sonucu açığa çıkan bu atıklardan birisi de imalat, yapı ve özellikle otomotiv sektöründe kullanılan poliüretan köpüklerdir. Atık olarak ortaya çıkan poliüretan köpük paneller, küçük parçalara bölünerek hafif malzeme üretiminde kullanılabilir. Atık poliüretan köpükler uygun boyutlara getirilerek beton ve harç sistemlerine dahil edilebilir ve hafif yapı malzemeleri elde edilebilir (Gadea vd., 2010; Gutt ve Nixon, 1979; Zevenhoven, 2004). Hafif harç ve beton farklı hafif malzemelerin agrega ile yer değiştirilerek kullanılması ile elde edilebilir. Kullanılan agrega kaynakları doğal hafif agrega olarak pomza taşı, volkanik tüf, (Beycioğlu vd., 2010; Gönen ve Yazıcıoğlu, 2020; Ke vd., 2009; Yazıcıoğlu ve Bozkurt, 2006; Yılmaz vd., 2018) yapay hafif agrega olarak üretilen perlit, genleştirilmiş şeyl, vermikülit (Akçaözöğlü vd., 2010; Alshihri vd., 2009; Gönen, 2009; Koksall vd., 2015) olarak öne çıkmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalar da genleştirilmiş polistiren sert köpük (EPS-Expanded Polystyrene Foam) kullanımı ile hafif harçların imalatı yapılmış ve çeşitli özellikleri (fiziksel, mekanik, yalıtım v.b.) incelenmiştir (Davraz vd., 2011, 2020; Kılınçarslan vd., 2019). İnşaat sektöründe hali hazırda firmalar tarafından üretilen ve satışı yapılan EPS agregalı hafif şap harçları yapının ölü yükünü azaltması ve bunun yanında ses ve ısı yalıtımı sağlayabilmesi sebebiyle tercih edilen bir ürün haline gelmiştir (Kılıç, 2018).

TS EN 206'ya göre beton mevcut yoğunluklarına göre farklı üç gruba ayrılmaktadır. Buna göre normal beton, etüv kurusu durumdaki birim hacim kütlesi (yoğunluğu), 2000 kg/m<sup>3</sup> 'ten büyük olup 2600 kg/m<sup>3</sup> 'ü geçmeyen betondur. Hafif beton etüv kurusu durumdaki yoğunluğu, 800 kg/m<sup>3</sup> veya daha büyük olup 2000 kg/m<sup>3</sup>'ü geçmeyen betondur. Ağır beton ise etüv kurusu durumdaki yoğunluğu, 2600 kg/m<sup>3</sup>'ten daha büyük olan betondur (TS EN 206:2013+A1, 2013). Hafif betonlar ise birim ağırlıklarına göre üç gruba ayrılmıştır. Birim ağırlığı 300 kg/m<sup>3</sup> ile 800 kg/m<sup>3</sup> arasında olanlar yalıtım betonu, 800 kg/m<sup>3</sup> ile 1400 kg/m<sup>3</sup> arasında olanlar orta mukavemetli hafif beton, 1400 kg/m<sup>3</sup> den büyük olanlar ise taşıyıcı hafif beton olarak sınıflandırılmıştır (Taşdemir, 2003).

Bu çalışmada endüstride açığa çıkan atık poliüretan köpüğünün, ince agrega boyutlarına getirilerek hafif harç üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çimento bağlayıcılı harçlarda, agrega ile hacimce %20, %40, %60, %80, %100 oranlarında granül EPS ve atık poliüretan (AP) ayrı ayrı ikame edilmiştir. Özellikle piyasada üretilen EPS'li hafif harçlar referans alınarak, atık poliüretan ikameli harçların fiziksel, mekanik ve ısı geçirimsizlik özellikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca üretilen harç numuneler 28 gün kür edildikten sonra 300°C, 600°C ve 900°C'de yüksek sıcaklığa tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin eğilme ve basınç dayanımları ile içyapıları incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

### 2.1. Portland Çimentosu (Portland Cement)

Çalışmada TS EN 197-1'e (TS EN 197-1, 2012) uygun 42,5R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Portland çimentosu Kayseri Bünyan ÇİMSA çimento fabrikasından temin edilmiştir. Çimentonun özgül ağırlığı ve özgül yüzey alanı üreti firma tarafından sırasıyla 3.15 ve 3410 cm<sup>2</sup>/gr olarak bildirilmiştir. Ayrıca çimentoya kimyasal analiz yapılmış ve sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Çimento kimyasal kompozisyonu (%) (Chemical composition of cement)

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>	Na <sub>2</sub> O+ 0.66K <sub>2</sub> O	Serbest CaO	CI	KK	ÇK
Çimento	62.55	18.54	5.51	3.01	2.59	2.41	0.47	0.92	0.03	3.02	0.95

## 2.2. Agrega ve su (Aggregate and Water)

Çalışmada agrega olarak tane çapı 0-4 mm aralığında olan ırmak kumu kullanılmıştır. Irmak kumuna TS 3530 EN 933-1'e (TS EN 933-1, 2012) göre piknometre deneyi yapılmış ve etüv kurusu tane yoğunluğu 2.58 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Su olarak ise içilebilir şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

## 2.3. Genleştirilmiş Polistiren (EPS) (Expanded Polystyrene)

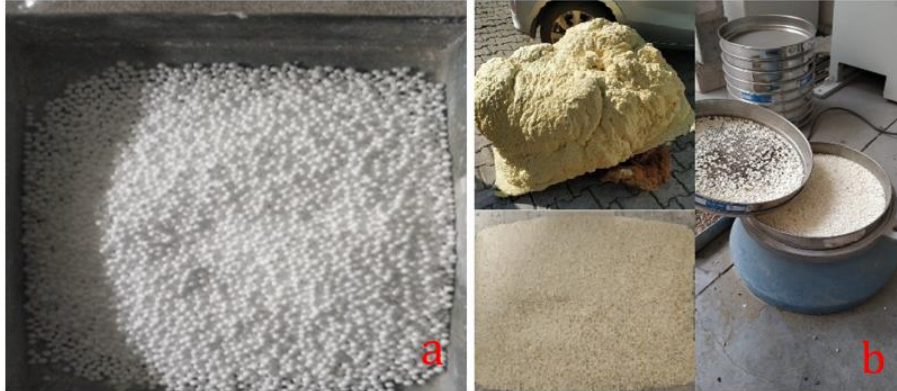
Çalışmada EPS olarak yoğunluğu 14 kg/m<sup>3</sup> olan beyaz görümlü yuvarlak taneli ürün kullanılmıştır. Kullanılan EPS'nin görünümü Şekil 1-a'da verilmiştir.

## 2.4. Kimyasal Katkı (Chemical Additive)

Çimentolu hafif harç imalatında EPS ile çimento hamuru arasında daha homojen bir bağ oluşturması ve EPS granüllerinin çimento hamurunun yüzeyine çıkmaması için Çözüm Beton ve İnşaat Malzemeleri firmasından temin edilen E200P kodlu kimyasal katkı kullanılmıştır.

## 2.5. Atık Poliüretan (AP) (Waste Polyurethane)

Çalışmada hafif harç üretimi için yüksek mekanik özellikleri ve yangın dayanımı ile bilinen poliüretan köpük atığı kullanılmıştır. Atık poliüretan, harç üretiminde kullanılmadan önce el ile rende kullanılarak öğütülmüş ve 4 mm elekten elenmiştir. Atık poliüretanın görünümü ve öğütülme sonrası durumu Şekil 1-b'de sunulmuştur.



Şekil 1. EPS (a), Atık poliüretanın atık hali ve öğütülmüş hali (b) (EPS (a), Waste polyurethane (b))

## 2.6. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

Çalışma kapsamında 11 grup karışım serisi üretilmiştir. Tüm karışımlarda bağlayıcı olarak %100 çimento kullanılmıştır. Referans çimentolu harç numunesinin ağırlıkça su/bağlayıcı oranı 0,5 ve kum/bağlayıcı oranı 3 olarak belirlenmiştir. Referans numune karışım oranları belirlendikten sonra harç karışımlarına agrega ile hacimce %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında EPS ikame edilmiştir. Granül EPS'nin daha homojen dağılmasını sağlamak için bağlayıcı miktarının kütlece % 1'i kadar kimyasal katkı kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkının su miktarı toplam karışım suyundan düşürülmüştür. EPS ikamesi ile karışımların işlenebilirlik değerinde yüksek oranda artış meydana gelmiştir. Bu nedenle EPS ikameli bütün harç karışımların işlenebilirlik değerleri 155 mm ile 165 mm arasında kalacak şekilde su/bağlayıcı oranları revize edilmiştir. Aynı işlemler atık poliüretan köpük kullanılan numuneler için de uygulanmıştır. EPS'li ve atık poliüretanlı harçlara ait karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.

Üretilen taze harç karışımlarının işlenebilirlikleri TS EN 1015-3 (TS EN 1015-3, 2000) standardına göre mm cinsinden belirlenmiştir. Daha sonra imal edilen harçlar 40x40x160 mm'lik kalıplara iki aşamada yerleştirilerek sıkıştırılmış ve numune üretimi tamamlanmıştır. Üretimi yapılan numuneler 24 saat oda sıcaklığında laboratuvar ortamında bekletilmiştir. 24 saat sonrasında tüm numuneler 28 güne kadar 23±2°C sıcaklıkta su kürüne tabi tutulmuştur.

28 gün su kürü sonrasında harç numunelerin birim ağırlıkları ASTM C 642'ye (ASTM C 642-13, 2013), ultrasonik atımlı dalga hızları TS EN 12504-4 (TS EN 12504-4, 2012) standardına ölçülerek belirlenmiştir. Her iki deneyde de üçer adet numune üzerinde ölçümler yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması deney sonucu olarak kaydedilmiştir. Ayrıca numunelerin ısı geçirimsizlik özellikleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (TAUM) yer alan Thermtest markalı cihaz ile 40x140x160 mm boyutlarındaki plakalar üzerinde ölçülerek belirlenmiştir.

Harç numunelerin 28 gün su kürü sonrası eğilme ve basınç dayanımları ise TS EN 1015-11 (TS EN 1015-11, 2000) standardına göre belirlenmiştir. Eğilme dayanımı deneyinde, her bir karışım için 40x40x160 mm boyutlarındaki 3 adet numune üzerinde tek noktadan eğilme deneyi yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması eğilme dayanımı olarak kaydedilmiştir. Basınç dayanımı deneyinde ise her bir karışım için eğilme deneyi sonrasında elde edilen 6 adet numune parçası ile 40x40 mm plaka üzerinde ölçümler yapılmış ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması basınç dayanımı deney sonucu olarak kaydedilmiştir.

Numunelerin yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığını belirlemek adına 5°C/dakika sıcaklık artışı sağlayarak numunelerin ayrı ayrı 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara erişmeleri sağlanmış ve erişilen bu sıcaklıklarda numuneler 60 dakika süre ile bekletilmişlerdir. Bekleme süresini tamamlayan harç numuneler fırından çıkartılmış ve laboratuvar koşullarında oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiştir. Oda sıcaklığına erişen numunelere eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin içyapısını incelemek için hamur numuneler üretilmiştir. Üretilen hamur numuneler 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara tabi tutulduktan sonra kırık yüzey FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) görüntülemesi ve EDX (Energy Dispersive X-ray Analysis) analizleri yapılmıştır.

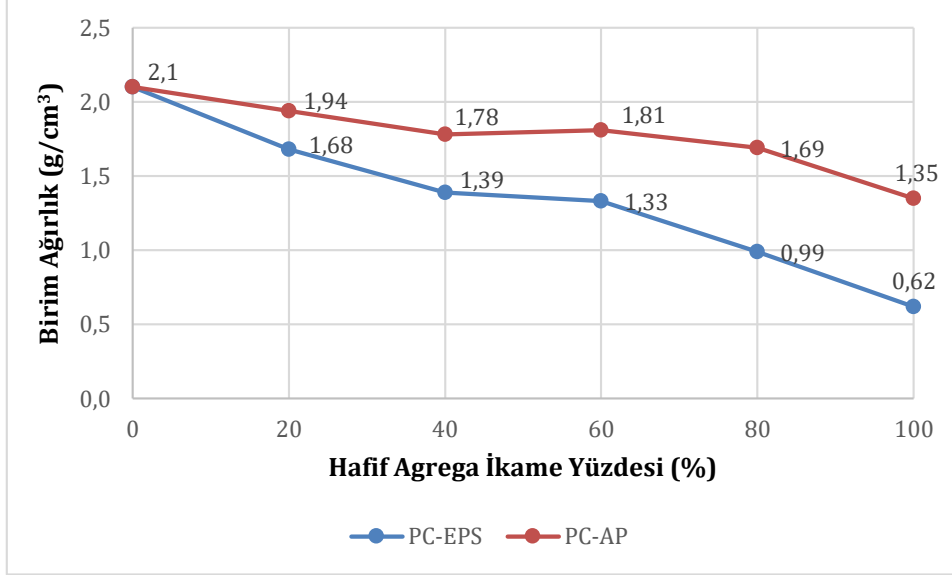
**Tablo 2.** EPS'li ve atıkpoliüretanlı harçların karışım oranları (Mixing ratios of EPS and waste polyurethane mortars)

Karışım Kodu	Portland Çimentosu (g)	Toplam agregası hacmi			Water / Binder (%)
		İrmak Kumu (%)	EPS (%)	Atık Poliüretan Köpük (%)	
PC (Referans)	450	100	0	-	0.5
PC-20E	450	80	20	-	0.4
PC-40E	450	60	40	-	0.4
PC-60E	450	40	60	-	0.35
PC-80E	450	20	80	-	0.35
PC-100E	450	0	100	-	0.35
PC-20AP	450	80	-	20	0.4
PC-40AP	450	60	-	40	0.4
PC-60AP	450	40	-	60	0.35
PC-80AP	675	20	-	80	0.35
PC-100AP	900	0	-	100	0.35

### 3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

EPS ve atık poliüretan ikameli hafif harçlara ait birim ağırlık deney sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. 28 gün kür edilmiş EPS'li harç numunelerin birim ağırlık değerleri 0.62 g/cm<sup>3</sup> ile 1.68 g/cm<sup>3</sup> arasında iken, atık poliüretanlı harçların birim ağırlık değerlerinin 1.35 g/cm<sup>3</sup> ile 1.94 g/cm<sup>3</sup> arasında olduğu belirlenmiştir. Her iki hafif agregalı harç sisteminde de hafif agregası oranı arttıkça birim ağırlık değerleri azalmaktadır. Ancak hafif agregası ikamesi ile artan işlenebilirlik değerini belirli aralıktaki tutabilmek için su/bağlayıcı oranının azaltılması, birim ağırlık değerlerinde artış gözlenmesine sebep olmuştur. %60 oranında hem EPS hem de atık poliüretan ikamesinde, su/bağlayıcı oranının 0,40'dan 0,35'e düşürülmesi ile numunelerin birim ağırlık değerleri bir miktar artmıştır. EPS'li ve atık poliüretanlı hafif harç numuneler kıyaslanırken, kıyaslanmanın kullanılan agregası hacmine göre değil, 28 günlük birim ağırlık değerlerine göre yapılması uygun görülmüştür. Buna göre, birim ağırlığı 800 kg/m<sup>3</sup> ile 1400 kg/m<sup>3</sup> arasında olan orta mukavemetli hafif beton sınıfına giren PC-40E (1.39g/cm<sup>3</sup>) ve PC-60E (1.33 g/cm<sup>3</sup>)

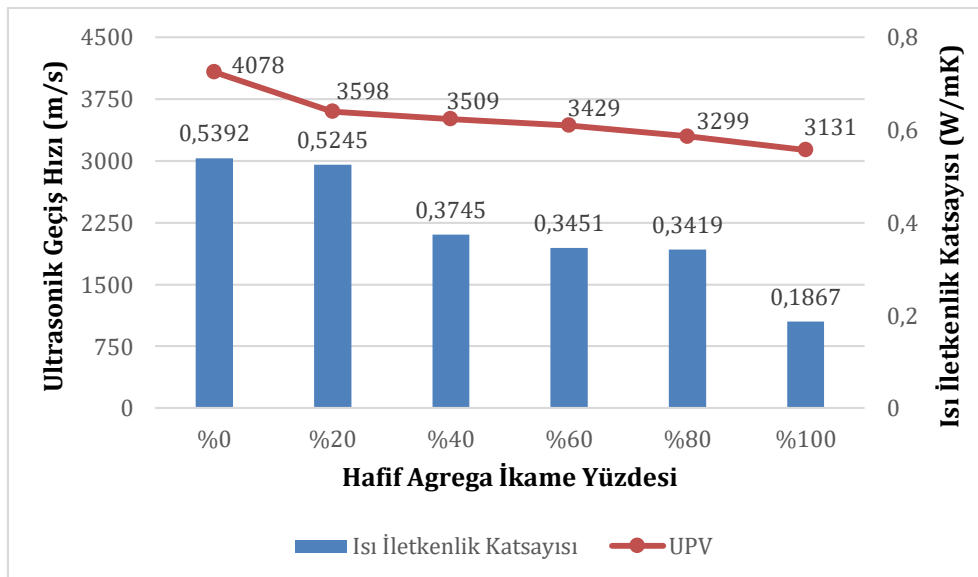
ile PC-100AP(1.35 g/cm<sup>3</sup>) kıyaslanmıştır. Diğer taraftan birim ağırlığı 1400 kg/m<sup>3</sup> den büyük olan taşıyıcı hafif beton sınıfına giren PC-20E (1.68 g/cm<sup>3</sup>) ile PC-40AP (1,75 g/cm<sup>3</sup>) ve PC-80AP (1.69 g/cm<sup>3</sup>) kıyaslanmıştır.



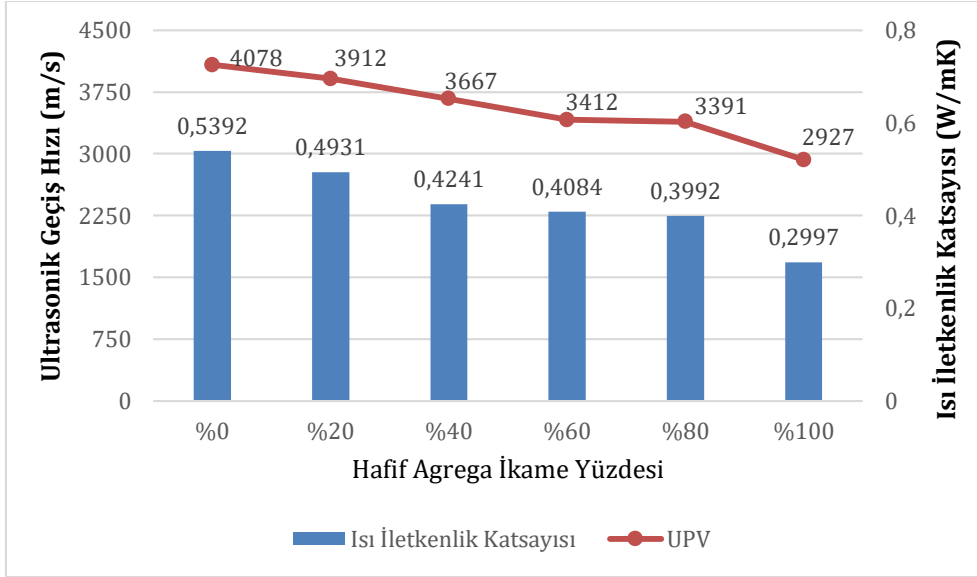
Şekil 2. 28 günlük EPS ve AP ikameli numunelerin birim ağırlık değerleri (Unit weight values of 28-day EPS and AP substituted samples)

28 gün kür edilmiş EPS'li ve atık poliüretanlı harç numunelere ait ultrasonik atımlı dalga hızları ve ısı iletkenlik katsayıları sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'de sunulmuştur. EPS ikameli harç numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızlarının 3598 ile 3131 m/s arasında, ısı iletkenlik katsayılarının ise 0.5245 ile 0.1867 W/mK arasında olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde atık poliüretan ikameli harç numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları 3912 ile 2927 m/s arasında, ısı iletkenlik katsayıları ise 0.4931 ile 0.2997 W/mK arasında ölçülmüştür.

Orta mukavemetli hafif beton sınıfında PC-40E, PC-60E ile PC-100AP kodlu numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları ve ısı iletkenlik katsayıları sırasıyla 3509, 3429, 2927 m/s ve 0.3745, 0.3451, 0.2997 W/mK olarak belirlenmiştir. Elde edilen değerlere göre eşdeğer birim ağırlık değerinde, atık poliüretan ikameli numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri, EPS ikameli numunelere oranla daha düşük çıkmıştır. Benzer şekilde, taşıyıcı hafif beton sınıfında PC-20E, PC-40AP ve PC-80AP kodlu numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları ve ısı iletkenlik katsayıları sırasıyla 3598, 3667, 3391 m/s ve 0.5245, 0.4241, 0.4084 W/mK, olarak ölçülmüştür. Elde edilen değerlere göre eşdeğer birim ağırlık değerinde atık poliüretan ikameli numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları ile EPS ikameli numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları birbirine oldukça yakın olurken, atık poliüretan ikameli numunelerin ısı iletkenlik katsayısı değerleri, EPS ikameli numunelere oranla daha düşük çıkmıştır.

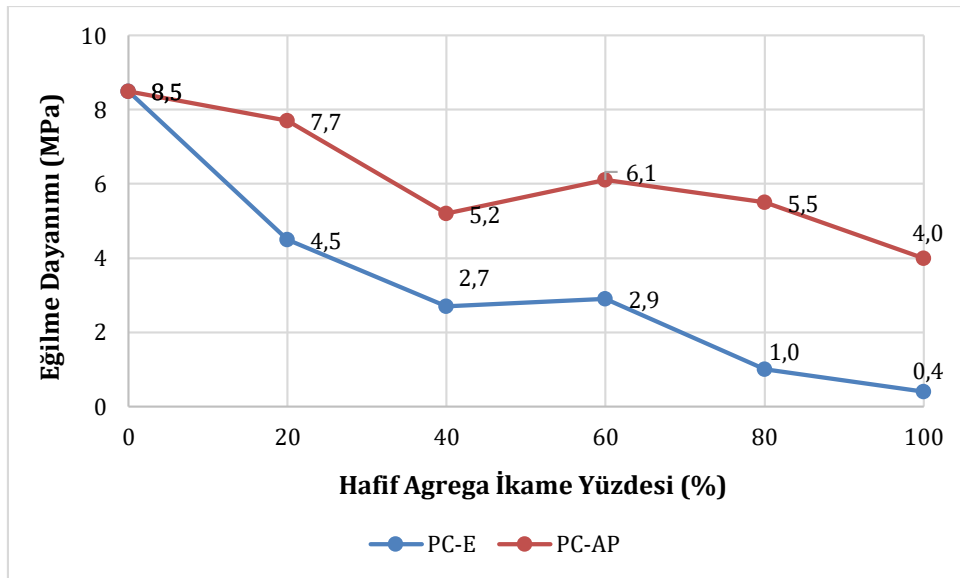


Şekil 3. EPS ikameli numunelerin ısı iletkenlik katsayıları ve ultrasonik geçiş hızları (Thermal conductivity coefficients and ultrasonic pulse velocities of EPS substituted samples)



Şekil 3. EPS ikameli numunelerin ısı iletkenlik katsayıları ve ultrasonik geçiş hızları (Thermal conductivity coefficients and ultrasonic pulse velocities of EPS substituted samples)

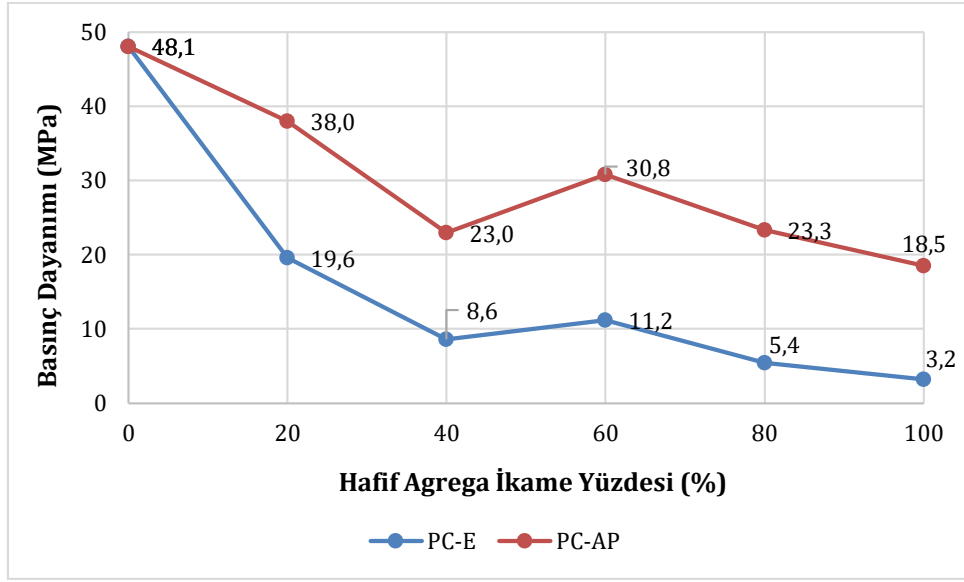
EPS ve AP ikameli harç numuneler için 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları Şekil 5’de verilmiştir. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde EPS ikameli harçların eğilme dayanımlarının 0.4-4.5 MPa arasında, atık poliüretan ikameli harçların eğilme dayanımlarının ise 4.0-7.7 MPa arasında olduğu görülmüştür. Hem EPS’li hem de atık poliüretanlı harçlarda %40 hafif agrega içeriğinden %60 hafif agrega içeriğine çıktığında eğilme dayanımında artış olmuştur. Bu artış belirli aralıkta işlenebilirliği sağlayabilmek için yapılan su/bağlayıcı oranının azaltılması ile ilişkilendirilmektedir. 28 günlük eğilme dayanımları orta mukavemetli hafif beton sınıfında yer alan PC-40E, PC-60E ve PC-100AP için sırası ile 2.7, 2.9 ve 4.0 MPa olarak tespit edilmiştir. Diğer taraftan taşıyıcı hafif beton sınıfında yer alan PC-20E, PC-40AP ve PC-80AP için eğilme dayanımları ise sırası ile 4.5, 5.2 ve 5.5 MPa olarak ölçülmüştür. Eşdeğer birim ağırlık değerine göre kıyaslama yapıldığında hem orta mukavemetli beton sınıfında hem de taşıyıcı beton sınıfında atık poliüretan ikamesi, EPS ikamesine göre eğilme dayanımına nispeten daha fazla katkı sağlamıştır.



Şekil 5. 28 günlük numunelerin eğilme dayanımı değerleri (28 days flexural strength values)

EPS ve AP ikameli harç numuneler için 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 6’da sunulmuştur. Basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde elde edilen bulgular eğilme dayanımı sonuçları ile benzerlik göstermektedir. EPS ikameli numunelerin basınç dayanımları 3.2-19.6 MPa arasında olurken, atık poliüretan ikameli numunelerin basınç dayanımlarının 18.5-38.0 MPa arasında olduğu görülmüştür. 28 günlük basınç dayanımları orta mukavemetli hafif beton sınıfında yer alan PC-40E, PC-60E ve PC-100AP için sırasıyla 8.6, 11.2 ve 18.5 olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan taşıyıcı hafif beton sınıfında yer alan PC-20E, PC-40AP ve PC-80AP için basınç dayanımları ise sırasıyla 19.6, 23.0 ve 23.3 olarak belirlenmiştir. Eşdeğer birim ağırlık değerine göre

kıyaslama yapıldığında hem orta mukavemetli beton sınıfında hem de taşıyıcı beton sınıfında yer alan numunelerde atık poliüretan içeren numunelerin basınç dayanımlarının EPS ikameli numunelerden daha yüksek olduğu gözlenmiştir.



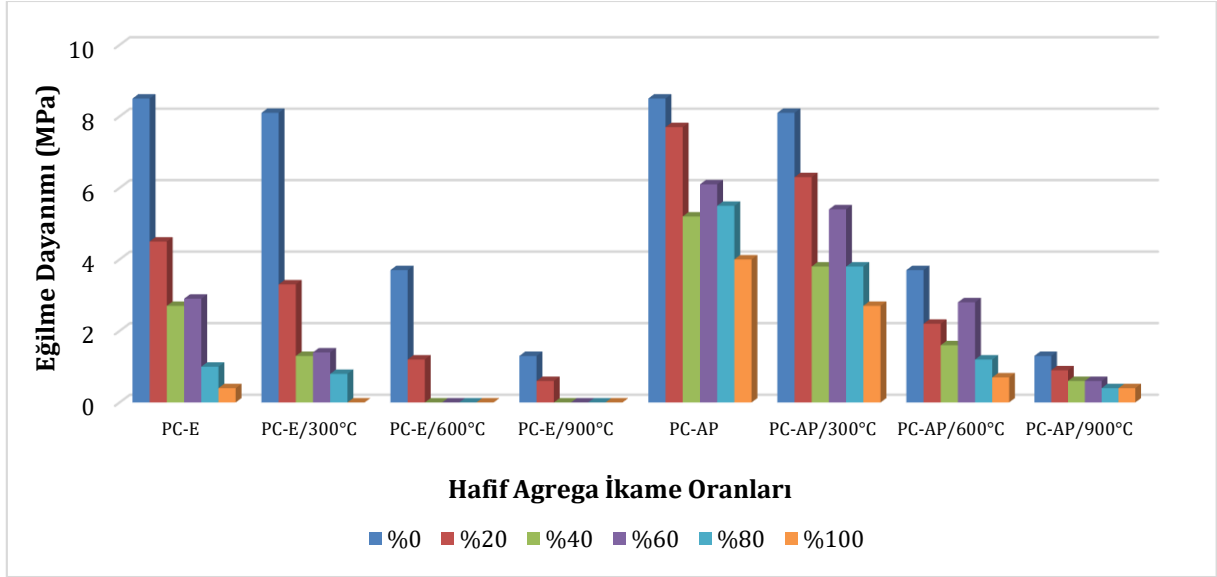
Şekil 6. 28 günlük numunelerin basınç dayanımı değerleri (28 days compressive strength values)

28 gün kür edilen harç numuneler kür sürelerini tamamladıktan sonra 300°C, 600°C ve 900°C'de yüksek sıcaklığa tabi tutulmuşlardır. Yüksek sıcaklık sonrası elde edilen eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de sunulmuştur. Yüksek sıcaklık sonrası dayanımlar incelendiğinde EPS'li ve atık poliüretanlı harçların farklı davranışlar gösterdikleri gözlenmiştir.

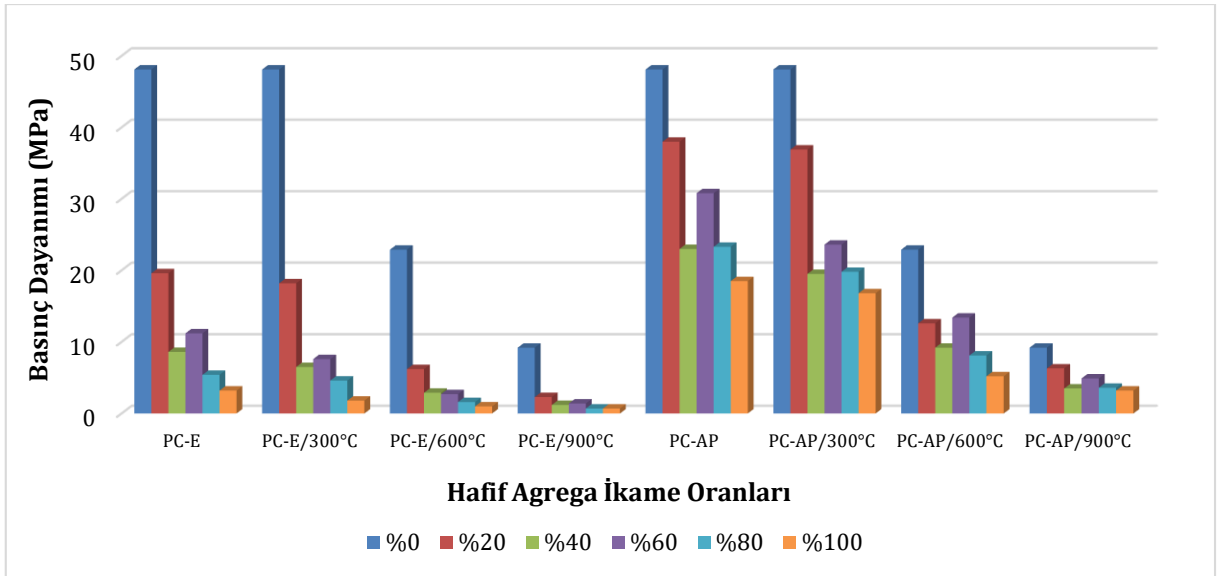
300°C sonrası eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde EPS ikameli harçların eğilme dayanımlarının 0.8-3.3 MPa arasında, basınç dayanımlarının ise 3.2-19.6 MPa arasında değiştiği, atık poliüretan ikameli harçların eğilme ve basınç dayanımlarının ise sırasıyla 2.7-6.3 MPa ile 2.5-18.5 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. 300°C sonrası orta mukavemetli hafif beton sınıfında yer alan PC-40E, PC-60E ve PC-100AP için eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla 1.3, 1.4, 2.7 MPa ve 6.5, 7.6, 16.8 MPa olarak belirlenmiştir. Taşıyıcı hafif beton sınıfında yer alan PC-20E ile PC-40AP ve PC-80AP için eğilme ve basınç dayanımları ise sırasıyla 3.3, 3.8, 3.8 MPa ve 18.2, 19.5, 19.8 MPa olarak ölçülmüştür.

600°C sonrası eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde; EPS ikameli harçlarda sadece %20 EPS içeren numunelerde 1.2 MPa eğilme dayanımı ölçülebilenken daha yüksek oranda EPS içeren numunelerde eğilme dayanımı ölçülememiştir. EPS ikameli numunelerde 600°C sonrası basınç dayanımları ise 3.2-19.6 MPa arasında elde edilmiştir. Atık poliüretan ikameli harçların eğilme ve basınç dayanımlarının ise sırasıyla 0.7 - 2.2 MPa ve 5.2-12.6 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. 600°C sonrası orta mukavemetli hafif beton sınıfında yer alan PC-40E ve PC-60E kodlu numunelerde eğilme dayanımı elde edilemezken, sırasıyla 2.9 ve 3.7 MPa olarak basınç dayanımı elde edilebilmiştir. Diğer taraftan PC-100AP kodlu numunede 0.7 MPa eğilme dayanımı ve 5.2 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Taşıyıcı hafif beton sınıfında yer alan PC-20E ile PC-40AP ve PC-80AP kodlu numunelerde eğilme dayanımları sırasıyla 1.2, 1.6 ve 1.2 MPa ve basınç dayanımları ise 6.2, 9.2 ve 8.1 MPa olarak belirlenmiştir.

900°C sonrası eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde EPS ikameli harçlarda yine sadece % 20 EPS içeren harç numunelerde 0.6 MPa eğilme dayanımı ölçülebilmıştır. EPS ikameli numunelerde 900°C sonrası basınç dayanımları ise 0.7-2.3 MPa arasında elde edilmiştir. Atık poliüretan ikameli harçların eğilme ve basınç dayanımları ise sırasıyla 0.4-0.9 MPa ve 3.2-6.3 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. 900°C sonrası orta mukavemetli hafif beton sınıfında yer alan PC-40E ve PC-60E kodlu numunelerde eğilme dayanımı elde edilemezken, sırasıyla 1.2 ve 1.4 MPa olarak basınç dayanımı elde edilmiştir. Diğer taraftan PC-100AP kodlu numunede 0.4 MPa eğilme dayanımı ve 3.2 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Taşıyıcı hafif beton sınıfında yer alan PC-20E ile PC-40AP ve PC-80AP kodlu numunelerde eğilme ve basınç dayanımları ise sırasıyla 0.6, 0.6, 0.6 MPa ve 2.3, 3.5, 3.6 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 7. Yüksek sıcaklık sonrası elde edilen eğilme dayanımları (Flexural strengths after elevated temperature)

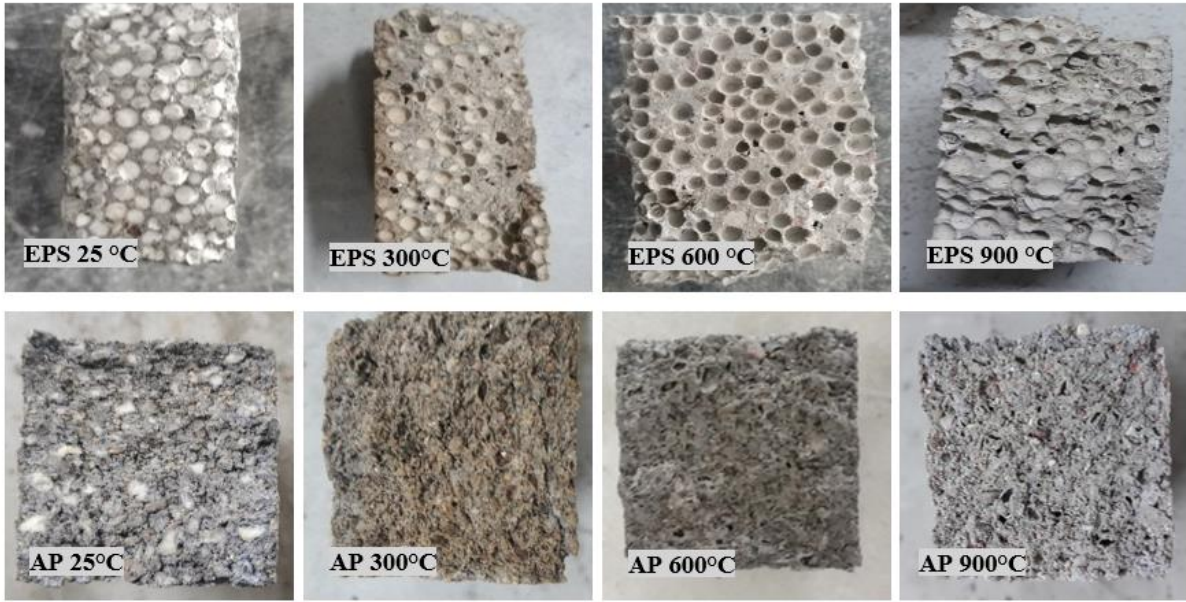


Şekil 8. Yüksek sıcaklık sonrası elde edilen basınç dayanımları (Compressive strengths after elevated temperature)

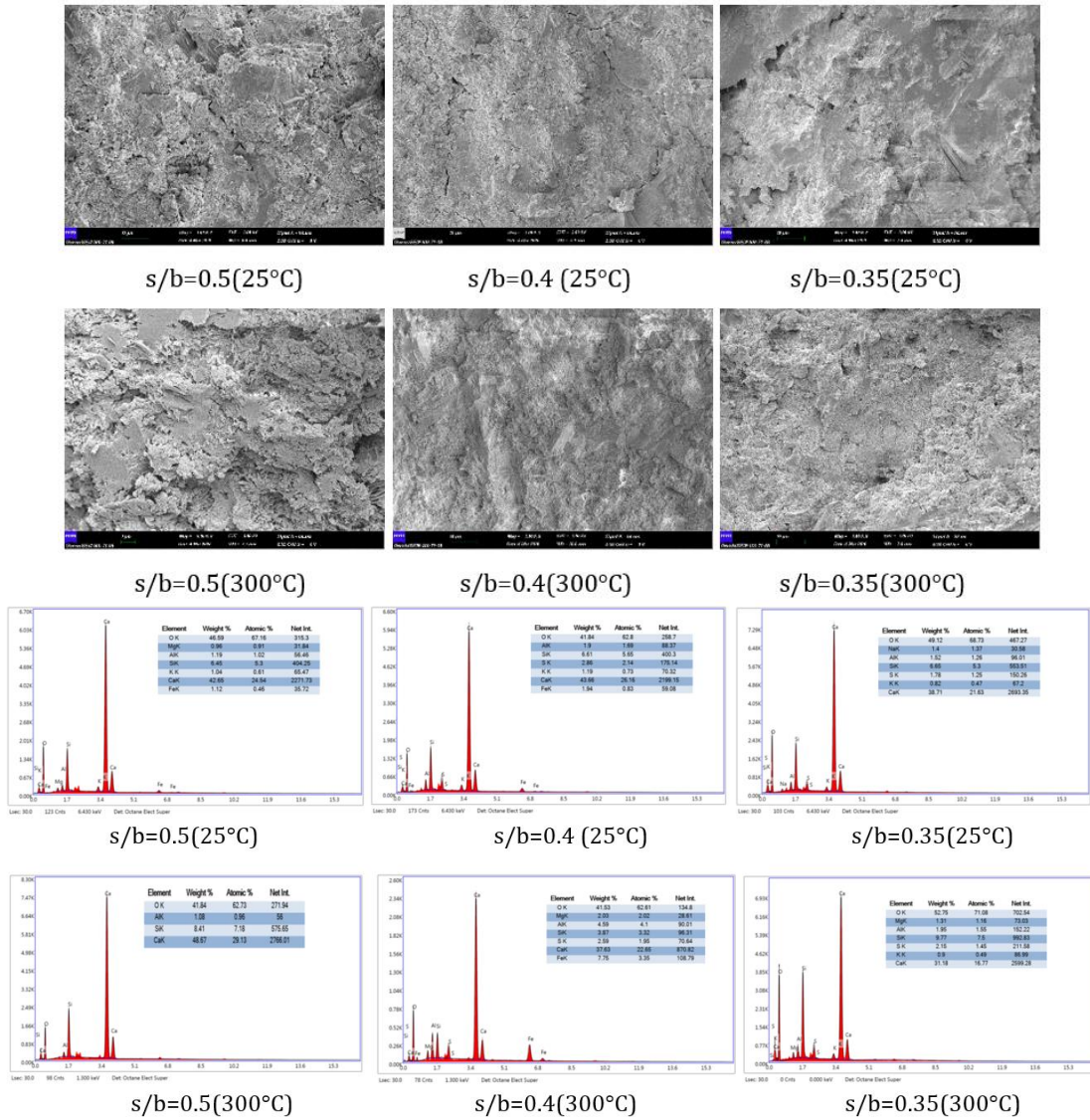
Yüksek sıcaklık sonrası atık poliüretan içeren numunelerin hem eğilme hem de basınç dayanımlarının EPS ikameli numunelere oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum poliüretan köpüğün yüksek sıcaklığa dayanıklı olması açıklanmaktadır. Ayrıca Şekil 8'de EPS ve atık poliüretan içeren hafif harç numunelerin yüksek sıcaklık sonrası fotoğrafları sunulmuştur. Elde edilen görseller incelendiğinde yüksek sıcaklık sonrası EPS'li harç numunelerde yüksek oranda boşluk ve gözenek oluşurken, atık poliüretanlı köpüklerde bu boşluklar oluşmamaktadır.

Şekil 10'da çimento harçlarına ait FESEM görüntüleri ve EDX analizleri sunulmuştur. Buna göre harç karışımlarında uygulanan su/bağlayıcı oranının 0.35, 0.4 ve 0.5 olmasına uygun olarak, çimento hamur numuneleri de aynı su/bağlayıcı oranlarında incelenmiştir. 300°C sıcaklık sonrası çimento hamurlarının dağılması nedeniyle görüntü alınamamıştır. Su/bağlayıcı oranının azalması nedeniyle hamur yapısında boşlukların azaldığı ve daha yoğun bir yapının oluştuğu görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının azalması ile oluşan yoğun ve boşluksuz yapı 300°C yüksek sıcaklık sonrasında çimento hamurunun yapısını korumasına yardımcı olmuştur.





Şekil 9. Yüksek sıcaklık öncesi ve yüksek sıcaklık sonrası (300°C, 600°C ve 900°C) numune görünümleri (The appearance of specimens before and after elevated temperatures (300°C, 600°C ve 900°C))



Şekil 10. Çimento hamurlarına ait FESEM görüntüleri ve EDX analizleri (FESEM images and EDX analyzes of cement pastes)

#### 4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

EPS'li ve atık poliüretanlı harçların birim ağırlık değerleri karşılaştırıldığında, EPS'li numunelerin daha düşük birim ağırlık değerlerine ulaştığı belirlenmiştir.

Hafif harç numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları incelendiğinde hem orta mukavemetli hafif beton sınıfında hem de taşıyıcı hafif beton sınıfında atık poliüretan ikameli numunelerin, EPS ikameli numunelere oranla daha düşük ısı iletkenlik katsayısını sahip olduğu tespit edilmiştir. Ultrasonik atımlı dalga hızları incelendiğinde ise EPS ikameli numunelerin, atık poliüretan ikameli numunelere oranla daha yüksek ultrasonik dalga hızlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Hafif harç numunelerinin eşdeğer birim ağırlık değerlerinde eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde özellikle orta mukavemetli hafif beton sınıfında atık poliüretan ikamesi, EPS'li numunelere göre eğilme ve basınç dayanımına daha fazla katkı sağlamıştır. Orta mukavemetli hafif beton sınıfında atık poliüretanlı numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları EPS'li numunelere kıyasla sırasıyla %38 ve %65'e varan oranlarda artış göstermiştir.

Yüksek sıcaklık sonrası (300°C, 600°C, 900°C) atık poliüretan ikameli harçların eğilme ve basınç dayanımlarının EPS ikameli harçlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu proje Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurum (TÜBİTAK) 2209 B Sanayiye yönelik lisans araştırma projeleri 2241 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

#### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

#### Kaynaklar (References)

- Akçaözöğlü, S., Atış, C. D., & Akçaözöğlü, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*, 30(2). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>
- Alshihri, M. M., Azmy, A. M., & El-Bisy, M. S. (2009). Neural networks for predicting compressive strength of structural light weight concrete. *Construction and Building Materials*, 23(6). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.003>
- ASTM C 642-13. (2013). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. American Society for Testing and Material. <https://doi.org/10.1520/C0642-13.5>
- Beycioğlu, A., Başyigit, C., & Kılınçarslan, Ş. (2010). Pomza Agregalı Hafif Beton Özelliklerine Silis Dumanının Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(2), 200–205.
- Davraz, M., Gökçe, Y., Koru, M., & Akdağ, A. E. (2020). Çimento esaslı köpük sıvanın fiziksel, mekanik ve termal özellikleri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1). <https://doi.org/10.21923/jesd.567408>
- Davraz, M., Gündüz, L., & Başpınar, E. (2011). Lightweight Aggregated Foam Plaster for Thermal Insulation in Buildings. *Journal of Engineering Science and Design*, 1(3), 150–155.
- Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P. L., Garabito, J., & Calderón, V. (2010). Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, 32(9). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.017>
- Gönen, T. (2009). Kendiliğinden yerleşen pomza ve perlit agregalı hafif harçların mekanik özellikleri. *E-Journal of New World Sciences Academy*, 4(2).
- Gönen, T., & Yazıcıoğlu, S. (2020). Pomza agregalı kendiliğinden yerleşen hafif betonların donma çözülme direncine mineral katkıların etkisi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.31202/ecjse.778058>
- Gutt, W., & Nixon, P. J. (1979). Use of waste materials in the construction industry - Analysis of the RILEM Symposium by Correspondence. *Matériaux et Constructions*, 12(4). <https://doi.org/10.1007/BF02473543>
- 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). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.038>
- Kılıç, F. M. (2018). *Hafif şap ile normal şap uygulamasının özelliklerinin karşılaştırılması*. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Kılınçarslan, Ş., Davraz, M., & İşildar, N. (2019). Genleştirilmiş Polistrenin Uçucu Kül İçeren Köpük Beton Özellikleri Üzerine Etkileri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 224–231. <https://doi.org/10.21923/jesd.476358>
- Koksal, 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.021>
- Taşdemir, C. (2003). Hafif Betonların Isı Yalıtım ve Taşıyıcılık Özellikleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 5(427), 57–61.
- TS EN 1015-11. (2000). *Mortar Testing Method, Part 11. Measurement of Compressive and Flexural Tensile Strength of Mortar*.

TSE.

TS EN 1015-3. (2000). *Methods of test for mortar for masonry: Part 3. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. TSE.

TS EN 12504-4. (2012). *Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. TSE.

TS EN 197-1. (2012). *Cement-composition, specifications and conformity criteria-part 1: common cements*. TSE.

TS EN 206:2013+A1. (2013). *Concrete - Specification, performance, production and conformity*.

TS EN 933-1. (2012). *Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method*. TSE.

Yazıcıoğlu, S., & Bozkurt, N. (2006). Pomza ve mineral katkı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(4), 675–680.

Yılmaz, H., Sallı Bideci, Ö., & Bideci, A. (2018). Pomza agregalı hafif beton özelliklerine kalsiyum alüminat çimentosunun etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. <https://doi.org/10.21923/jesd.400770>

Zevehoven, R. (2004). *Treatment and disposal of polyurethane wastes: options for recovery and recycling*.