



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Geri Dönüştürülmüş Atık EPS'nin Yüksek Dayanımlı Hafif Şap Üretiminde Kullanımının Araştırılması

 İsmail İsa ATABEY^{a,*},  Zehra ALMAZ ÖZCAN^b,  Serhan İLKENTAPAR^c,  Uğur DURAK^c,  Okan KARAHAN^c,  Cengiz Duran ATIŞ^c

^a İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, TÜRKİYE

^b İnşaat Bölümü, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Meslek Yüksekokulu, Kayseri Üniversitesi, Kayseri, TÜRKİYE

^c İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ismailatabey@nevsehir.edu.tr

DOI:10.29130/dubited.1069044

ÖZ

Bu çalışmada, atık genleştirilmiş polistiren (EPS) agregası dere kumu ile yer değiştirerek yüksek dayanımlı hafif şap harçları üretilmiştir. Kaplama ve tesviye amacı ile kullanılan şap harçlarında, atık EPS kullanarak harçların birim hacim ağırlığının azaltılması, ısı performanslarının artırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, bir grup geleneksel şap harcı ve beş grup atık EPS içeren, 400 kg/m³ -500 kg/m³ arasında değişen çimento dozajlarına sahip hafif şap harcı hazırlanmıştır. Atık EPS agregaları, dere agregası ile hacimce %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranında yer değiştirilmiştir. Geleneksel ve hafif şap harçlarının yayılma çapı, birim ağırlık, su emme oranı, görünür boşluk oranı, kılcal su emme, basınç ve eğilme dayanımı, aşınmaya karşı direnç ve ısı iletkenlik performansı ölçülmüştür. Atık EPS içeren harçların birim hacim ağırlıkları 750 kg/m³ -1950 kg/m³ arasında belirlenerek hafif ağırlıklı şap harcı elde edilmiştir. Ayrıca geleneksel şap harcının ısı iletkenlik katsayısı 0,6617 W.m/K'dan tamamen atık EPS ikamesi ile 0,2553 W.m/K'ya düşerek %61 daha düşük ısı iletkenlik elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar atık EPS agregasının yer değişim oranına bağlı olarak 6,1 MPa-43,4 MPa aralığında hem orta dayanımlı hem de taşıyıcı hafif beton sınıfında hafif şap harçlarının elde edilebildiğini ortaya koymuştur. Harçlardaki birim ağırlığın düşmesi, yapı ağırlığının azalmasına ve ısı yalıtım özelliğinin iyileşmesine katkı sunmaktadır. Böylece deprem yükü, yalıtım özellikleri ve atık EPS'nin geri dönüşümü açısından sürdürülebilir hafif şap harcı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık EPS, Hafif şap, Geri dönüşüm, Yüksek dayanım, Isıl iletkenlik

Investigation of the Use of Recycled Waste EPS in the Production of High Strength Lightweight Screed

ABSTRACT

In this study, high-strength lightweight screed mortars were produced by replacing waste-expanded polystyrene (EPS) aggregate with river sand. It is aimed to reduce the unit weight and increase the thermal performance of the screed mortars produced for surface coating and leveling purposes by using waste EPS. For this purpose, a light screed mortar with cement dosages varying between 400-500 kg/m³, containing one group of conventional screed mortar and five groups of waste EPS was prepared. Waste EPS aggregates were replaced by river sand at the ratios of 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, and 100% by volume. The flow table test, unit weight, water absorption, apparent porosity, capillary water absorption, compressive and flexural strength, abrasion resistance, and thermal

conductivity properties of conventional and light screed mortars were measured. The unit weight of the mortars containing waste EPS was determined between 750-1950 kg/m³ and lightweight screed mortars were obtained. In addition, the thermal conductivity coefficient of conventional screed mortar decreased from 0.6617 W.m/K to 0.2553 W.m/K with waste EPS replacement, resulting in 61% lower thermal conductivity. Experimental results show that depending on the replacement ratio of the waste EPS aggregate, light screed mortars can be obtained in both medium strength and load-bearing lightweight concrete classes with different physical and mechanical properties. With the decrease in the unit weight of mortars, the thermal insulation property increases and it contributes to the decrease in the weight of the building. Thus, sustainable lightweight screed mortar was obtained in terms of earthquake load, insulation properties, and recycling of waste EPS.

Keywords: Waste EPS, Lightweight screed, Recycling, High strength, Thermal conductivity

I. GİRİŞ

Modern inşaat uygulamalarının çoğunda ekonomik ve hafif yapılar elde etmek için hafif betona olan talep artmaktadır. Hafif betonların binalarda kullanıldığı durumlarda, ısı iletkenlik özelliği normal betonlara göre daha düşük olduğu için enerji tüketimini azaltır ve binalarda taşıma özelliği gerektirmeyen yerlerde dolgu amaçlı olarak kullanılabilir [1], [2].

Yapı harcı genellikle yapı mühendisliğinde taş ve tuğlaları birleştirmek, sıva yapmak, duvardaki boşlukları ve panellerin derzlerini vb. doldurmak, taş ve fayansları döşemek için kullanılır. Yapı harcı; duvar harcı, yüzey harcı ve ısı ve ses yalıtımı gibi özel uygulamalar için harçlar olarak sınıflandırılabilir [3].

Son yıllarda agrega olarak kullanılan malzemeler ile atık yapı malzemelerinin yer değiştirdiği harçların davranışlarını belirleyen çalışmalar artmaktadır. Atık malzemelerin kullanılması fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerine etki ederken çevresel ve ekonomik de faydalar sunmaktadır [4].

Genleştirilmiş polistiren köpük (EPS), kapalı hücreli yapıya sahip termoplastik bir polimerdir. Dünyada, ısı ve ses yalıtımında, ambalajlamada, gıdaların yeniden kullanılmasında ve depolanmasında artan kullanım nedeniyle atık EPS miktarı artmaktadır [5]. Atık EPS, agrega ile yer değiştirdiğinde hafif harç elde edilebilmektedir. Genel olarak, deprem ivmesi ve büyüklüğü bir yapının ağırlığından önemli ölçüde etkilendiğinden, hafif elemanlar ile deprem hasarı riskini azaltma, düşük yoğunluk ile düşük ısı iletkenlik katsayıları ve ses izolasyon özellikleri elde edilmesi, normal harçlara göre hafif betonun avantajları olarak kabul edilmektedir [6]. Hafif beton/harç üretiminde doğal agregaların kısmen veya tamamen atık EPS ile değiştirilmesi atık bertarafı sorununa çözüm sunmakta ve doğal agregaların korunmasına da yardımcı olmaktadır [7].

Hafif agregalar betonlarda, harçlarda ve şaplarda geleneksel mineral agregaların yerini almak, ağırlıklarını azaltmak, termal ve akustik performansı iyileştirmek için kullanılır. Çimento esaslı kompozitlerde hafif agrega kullanımı bina maliyetlerini düşürür ve çevrecidir. Son yıllarda çeşitli ülkelerde doğal ve yapay (veya sentetik) hafif agregalı çimento esaslı veya çimentosuz harçlar üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. [8], [9]. Ancak endüstriyel ürünlerin atıklarının hafif harç yapımında kullanımına dair çalışmalar hem bina yükü hem de çevresel etkiler açısından üzerinde durulması gereken konulardandır.

Sayadi ve ark. [6] EPS kullanılarak üretilen köpük betonların yangın direnci, ısı geçirimsizliği ve basınç dayanımlarını incelemişlerdir. EPS hacminin artırılmasının betonun ısı iletkenliğinde ve basınç dayanımında önemli bir azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir. Eren ve ark. [10], EPS içeren geopolimer harçların özelliklerini araştırdıkları çalışmada EPS ikamesinin harcın yalıtım performansını iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Altuncu ve ark. [11] şap harçları üzerinde genleştirilmiş cam agregaları ve genleştirilmiş perlit agregaları ile birim ağırlığın azaltılarak, ses ve ısı yalıtım özelliklerinin geliştirilmesi için çalışma yapmışlardır. Kum yerine hafif agrega ikame edilerek şap üretiminin, çevre dostu hafif yapı malzemesi elde edilebileceği sonucuna ulaşmışlardır. Ali ve ark. [12], atık EPS'nin briket üretiminde kullanımını araştırmışlardır. Yük taşımayan duvarlarda kullanılan

briketlerde atık EPS boşluklu blokların mukavemeti, tokluğu ve dayanıklılığı göz önüne alındığında dış ve iç taşıyıcı olmayan duvar uygulamaları için uygun olabileceğini belirtmişlerdir.

Bu deneysel çalışmada, binalarda kullanılan geleneksel şap harçlarının yalıtım ve ısı geçirgenlik direncini geri dönüştürülmüş atık EPS ile iyileştirerek hafif şap harcı için fiziksel, mekanik ve ısı özellikler incelenmiştir. Atık EPS %0, %20, %40, %60, %80, %100 oranlarında dere kumu ile yer değiştirilerek 400 kg/m^3 - 500 kg/m^3 aralığında çimento dozajı ile yüksek dayanımlı hafif harçlar üretilmiştir. Tüm harç gruplarına yayılma çapı, birim ağırlık, su emme oranı, görünür boşluk oranı, kılcal su emme, basınç ve eğilme dayanımı, aşınmaya karşı direnç ve ısı iletkenlik testleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

II. MALZEME VE METOT

A. MALZEME

A. 1. Çimento

Hafif şap harcı üretiminde TS EN 197-1 [13] standartlarına uygun CEM I 42,5 R Portland Çimentosu kullanılmış, fiziksel ve dayanım özellikleri Tablo 1’de, kimyasal özellikleri Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 1. Çimentonun fiziksel ve dayanım özellikleri

Özellikler	Değerler
Blaine (cm^2/gr)	3468
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	3,15
İncelik (90 Mikron), (%)	0,9
Priz Başı (<i>dak</i>)	162
Priz Sonu (<i>dak</i>)	215
Hacim Genleşmesi (<i>mm</i>)	1,0
2 günlük dayanım (<i>MPa</i>)	26,5
7 günlük dayanım (<i>MPa</i>)	39,0
28 günlük dayanım (<i>MPa</i>)	49,7

Tablo 2. Çimentonun kimyasal özellikleri

Bileşenler	Değerler (%)
CaO	62,90
SiO ₂	18,80
Al ₂ O ₃	5,81
Fe ₂ O ₃	2,61
MgO	1,73
SO ₃	3,57
Cl	0,02
Na ₂ O	0,38
K ₂ O	0,93
LOI	1,87
Çözünabilir kalıntı	1,00

A. 2. Atık EPS

Atık EPS, Koyuncu Kimya Ltd. Şti.'den temin edilerek hafif agrega olarak kullanılmıştır. Atık EPS genel olarak Şekil 1 'de görülen üretim esnasında kırılan parçalar öğütücü ile 0-4 mm çapında ince atık EPS köpük agregaya geri dönüştürülmüştür. Atık EPS yoğunluğu 12 kg/m^3 dür.



Şekil 1. Atık EPS'lerin geri dönüşümü

A. 3. Kum

Çalışmalarda agrega olarak tane büyüklüğü 0-4 mm dere kumu kullanılmıştır. Dere kumu için TS EN 933-1:2012 [14]'e göre tane dağılımı analizi yapılmış ve Tablo 3'de verilmiştir. İncelik modülü 1,88 olan dere kumunun piknometre deneyi ile kuru yoğunluğu 2,60 ve su emme değeri %1,70 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Kumun tane boyutu dağılımı

Elek Çapı	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25	Tava
Geçen (%)	100	82,4	66,6	47,0	16,1	0,0

A. 4. Ajan ve Su

Atık EPS agregalı hafif şap üretiminde EPS granülleri ile çimento harç arasında bağ kurması amacıyla ajan adı verilen kimyasal katkı kullanılmıştır. Ajan olarak Koyuncu Kimya Dış Tic. İnş. Elektr. Elektronik. San. Ltd. Şti.'den temin edilen İtalyan Edilteco firmasına ait çimento ile uyum sağlayan, ileriki yaşta mukavemet kaybı oluşturmayan, çatlamaya dirençli E 200P kodu ile sınıflandırılmış katkı kullanılmıştır. Ajanın teknik özellikleri aşağıdaki Tablo 4 'te özetlenmiştir. Hafif şap üretiminde, şehir şebekesinden alınan TS EN 1008 [15] standardına uygun içilebilir musluk suyu kullanılmıştır.

Tablo 4. E 200P ajanın teknik özellikleri

Özellikler	Değerler
Görünüş	Sıvı
Renk	Kahverengi
Özgül Ağırlık	1,15
pH	7,0
Çözünürlük	Sınırsız
Donma derecesi	-10°C
Yangın reaktifliği	Yanmaz

B. METOT

Bu çalışmada atık EPS agregalı hafif şap betonları, geleneksel şap betonlarında ince agrega olarak kullanılan dere kumu ile %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 olacak şekilde hacimce değiştirilmiştir. Üretilen harçların hafif şap olarak kullanılabilirliğini sağlamak amacıyla hafif harçlarda yüksek dayanım hedefi belirlenmiştir. Böylece su ve çimento miktarları artırılarak yayılma çapı değeri iyileşirken dayanım değerinin de düşmesinin önüne geçilmiştir. Atık EPS agregalı şap üretiminde yoğunluğu 16 kg/m^3 olan atık EPS kullanılmıştır. Karışım oranları Tablo 5’de [16] sunulmuştur.

Tablo 5. Atık EPS agregalı harçların karışım oranları

Karışım	S/Ç	Su (kg/m^3)	Çimento (kg/m^3)	Kum (kg/m^3)	Atık EPS (kg/m^3)	Ajan (kg/m^3)
M0	0,5	200	400	1723	0,0	0,0
M20	0,5	210	420	1437	1,17	0,11
M40	0,5	220	440	1126	2,44	0,24
M60	0,5	230	460	786	3,84	0,38
M80	0,5	240	480	412	5,37	0,53
M100	0,5	250	500	0,0	7,06	0,69

Deneyisel çalışmalar için, Hobart mikserinde TS EN 196-1 [17]’e uygun harç karışımları hazırlanmıştır. Tüm harç grupları kalıplara sıkıştırma işlemi yapılarak yerleştirilip ertesi gün kalıptan alınarak suda kür uygulanmıştır. M0 grubu harçlar tamamen dere kumu ile üretilen kontrol grubu harcıdır. Harçlarda atık EPS ikame oranına göre karışım kodlaması yapılmıştır. Örneğin M20 grubu harçlar, %20 atık EPS %80 dere kumu içeren hafif şap harcıdır.

Üretilen harçlardan farklı boyutlarda $40 \times 40 \times 160$ mm ebatlarında prizma harç numuneleri, $71 \times 71 \times 71$ mm boyutlarında aşınma için küp numuneler ve $50 \times 50 \times 5$ cm boyutlarında ısıl iletkenlik için plakalar hazırlanmıştır. Hazırlanan ısıl iletkenlik numunelerine ait fotoğraflar Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Isıl iletkenlik numunelerinin görünümü

Hazırlanan numuneler, sıcaklığı $21 \pm 1^\circ\text{C}$ olan kür havuzunda 7 ve 28 gün boyunca kür edilmiştir. Taze harçlar üzerinde yayılma tablası ve sertleşmiş numuneler üzerinde birim hacim ağırlık ölçümü, su emme ve görünür boşluk oranı, basınç ve eğilme dayanımı, aşınma direnci ve kılcal su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca atık EPS içeren hafif agregalı şap numunelerinin ısıl iletkenlik katsayıları ölçülmüştür. Deneyisel araştırmaların sonucunda, atık EPS hafif agregalı harçlar, kontrol şap betonu olan geleneksel kumlu şap betonları ile karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Çalışmada üretilen şap harçlarına, TS EN 1015-3 [18] standardına göre kıvam deneyi olarak bilinen yayılma tablası yöntemi uygulanmıştır. Sertleşmiş atık EPS içeren hafif şap numunelerine 7 ve 28 gün

ıslak kür uygulandıktan hemen sonra 24 saat 105°C’de etüvde kurutulup, ardından oda sıcaklığına soğutulup havadaki ağırlıkları tartılmış ve numunenin görünen hacmine ağırlıkları bölünerek birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Su emme ve görünür boşluk oranlarının tayini ise TS EN 480-11 [19]’e uygun olarak 7 ve 28 gün ıslak kür edilen 40×40×160 mm’lik prizmatik harç numunelerine uygulanmıştır. Dayanım deneyleri için; eğilme dayanımı deneyi gerçekleştirilip ortadan ikiye bölünen numunelerin kalıptan çıkan düzgün yan yüzeylerine TS EN 1015-11 [20] standardına uygun olarak basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Harç numunelerin aşınmaya karşı dayanımları, böhme aşındırma cihazı ile 71×71×71 mm’lik küp numuneler üzerinde TS 699 [21] ve TS 2824 EN 1338 [22]’e uygun olarak belirlenmiştir. Kılcallık deneyi için, numuneler önce etüvde kurutulmuş daha sonra sadece alt yüzeyi suya değecek şekilde alüminyum folyo bandı ile kaplanmıştır. Kılcal su emme katsayısı ise ASTM C 1585 [23]’e göre 1, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 240, 300 ve 360. dakikalarda ve 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8. günlerde su emme miktarları ölçülerek belirlenmiştir. Isıl iletkenlik katsayısı; bir malzemenin ısı iletkenlik değeri, TS ISO 8302 [24] “Plaka metodu ile Isı İletkenliğinin Tayini” standardında ön görülen prensiplere göre ölçümü yapılmıştır. Isı iletim katsayısı cihaz tarafından plaka yöntemi ile hesaplanmıştır. Isıl iletkenlik katsayısı W/m.K birimi, homojen ısı özellikleri incelenmek istenen bir malzemenin denge durumunda iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının 1°C olduğu zaman 1 m² alanda ve bu alana dik yönde ve 1 m kalınlığından 1 saatte geçen ısı miktarıdır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. YAYILMA ÇAPI

Çalışmada üretilen kontrol grubu dere kumu ile üretilen harçların yayılma çapı 110 mm elde edilirken atık EPS agregalı hafif şapların yayılma değerleri ise 118-225 mm arasında ölçülmüştür (Tablo 6). Atık EPS oranındaki artışın taze harç kıvamlarını arttırma eğiliminde olduğu görülmüştür. Kum miktarının azalması atık EPS miktarının artması ile yüzey alanı azalmış ve EPS’nin homojen dağılımı için kullanılan ajan, harçların yayılma çapı değerlerini arttırmıştır.

Tablo 6. Harçların yayılma çapı değerleri

Karışımlar	M0	M20	M40	M60	M80	M100
Yayılma Çapı (mm)	110	118	172	210	222	225

B. BİRİM AĞIRLIK

Atık EPS agregalı hafif şapların ve kontrol harcının birim hacim ağırlıkları 720 kg/m³ – 2040 kg/m³ arasında değişmiştir (Tablo 7). Hafif şapların 7 ve 28 günlük birim hacim ağırlıkları birbirine yakın olduğu görülmüştür. Atık EPS miktarı arttıkça kuru yoğunluğu 2,64 g/cm³ olan kumun azalması ve yerine 16 kg/m³ yoğunluklu hafif EPS agregası girmesiyle birim ağırlık değerlerinde azalma görülmüştür. Hafif şap harcının 28 günlük M100 numunelerinin birim ağırlıkları M0 karışımına göre %63 daha düşüktür. EPS içeriğinin artması ile birim ağırlıklardaki düşüş önceki çalışmalarla da uyumludur [10], [25].

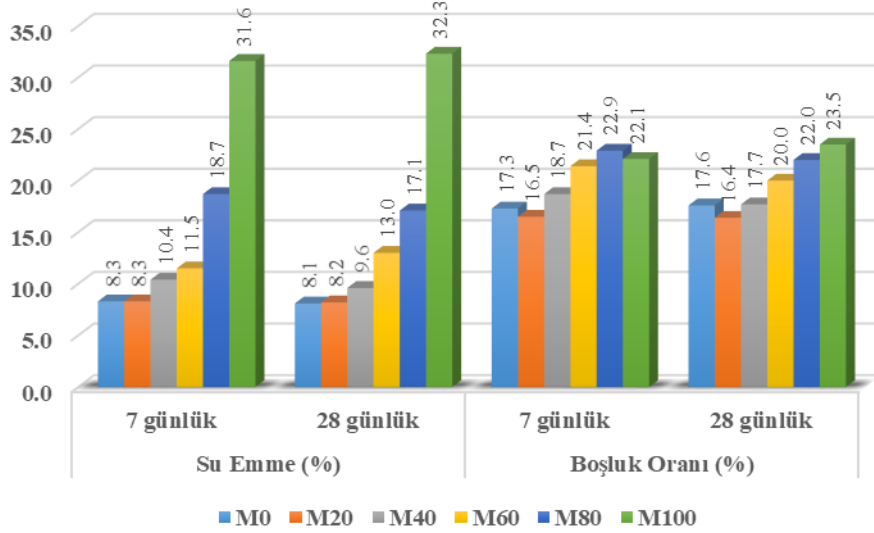
Tablo 7. Harçların birim hacim ağırlık değerleri

Karışımlar	7 günlük	28 günlük
	BHA (kg/m³)	
M0	2030	2040
M20	1940	1950
M40	1790	1830
M60	1630	1550

M80	1210	1240
M100	720	750

C. SU EMME VE GÖRÜNÜR BOŞLUK ORANI

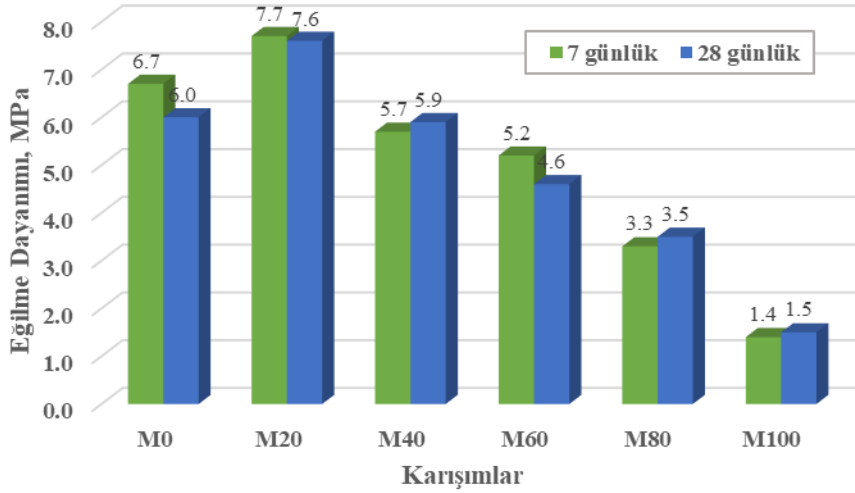
Atık EPS agregalı hafif şap harçlarının su emme ve görünür boşluk oranı değişimi Şekil 3’de verilmiştir. Harçların 28 günlük su emme değerleri M0, M20, M40, M60, M80 ve M100 için sırasıyla %8,1, %8,2, %9,6, %13,0, %17,1 ve %32,3’tür. M0’dan M100’e harçların su emme oranları yaklaşık %300 artmıştır. Ancak M60 grubu harçlarda artış yaklaşık %60’tır. M0, M20, M40, M60, M80 ve M100 grubu numunelerin görünür boşluk oranı değerleri ise sırasıyla %17,6, %16,4, %17,7, %20, %22 ve %23,5’dur. M0’dan M100’e harçların görünür boşluk oranları yaklaşık %34 artarken M0’dan M60’a yaklaşık %14 artmıştır. Hem su emme hem görünür boşluk oranı M20, M40 ve M60 için kontrol grubuna yakın veya bir miktar üstündedir. 7 ve 28 günde atık EPS miktarı arttıkça su emme ve görünür boşluk oranları da artmıştır. Ancak su emme ve görünür boşluk oranlarında 7 günde en yüksek değere ulaştığı 28 günlüklere yakın sonuçlar elde edilmiştir. EPS’nin boşluklu yapısı suyu bünyesine alarak kısa sürede yüksek su emme kapasitesine ulaşmıştır. EPS’nin yüksek su emme kapasitesini destekleyen bir çalışmada Köksal vd. vermikülit ile EPS içeren hafif harçların özelliklerini karşılaştırmışlardır. EPS’nin daha fazla su emme kapasitesine sahip olduğunu vurgulamışlardır [3].



Şekil 3. Harçların su emme ve görünür boşluk oranları

D. EĞİLME DAYANIMI

Sertleşmiş harç numunelerin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları Şekil 4’de sunulmuştur. Harçların 7 günlük eğilme dayanımları 6,7 MPa ile 1,4 MPa arasında değişirken, 28 günlük eğilme dayanımları 6,0 ile 1,5 MPa arasındadır. Eğilme dayanımları atık EPS oranı arttıkça azalmıştır. Harçların 28 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre M0’dan M40 grubuna kadar yaklaşık %23 gibi bir dayanım kaybı oluşurken M100’e geldiğinde %75’e ulaşmıştır. Düşük EPS oranlarında eğilme dayanımında kayıplar daha azdır. Ayrıca M20 grubunda bir miktar artış gözlemlenmiş bu da EPS’nin daha elastik yapısının rijit harç içinde bir miktar iyileştirme yapmasına bağlanabilir. Ancak yüksek oranda EPS kullanımı dere kumu arasında oluşan güçlü bağı azaltarak eğilme dayanımının düşmesine sebep olmuştur. Atık EPS oranı arttıkça eğilme dayanımında düşüşün artmasına EPS’lerin tane büyüklüğünün de katkısı olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan EPS 4 mm’den küçük ancak 4 mm’ye daha yakın tane boyutu ağırlıktadır. Bu da dayanım kaybını arttırmıştır. Daha önceki çalışmalarda da bu durum vurgulanmıştır. Liu ve Chen, [25] 1 mm + 5 mm EPS partiküllü EPS betonun eğilme mukavemetini sadece 1 mm EPS partiküllü betona göre daha düşük bulmuşlardır. Bu da büyük boyutlu EPS partiküllerinin eğilme mukavemetini büyük ölçüde zayıflattığını göstermektedir [25].

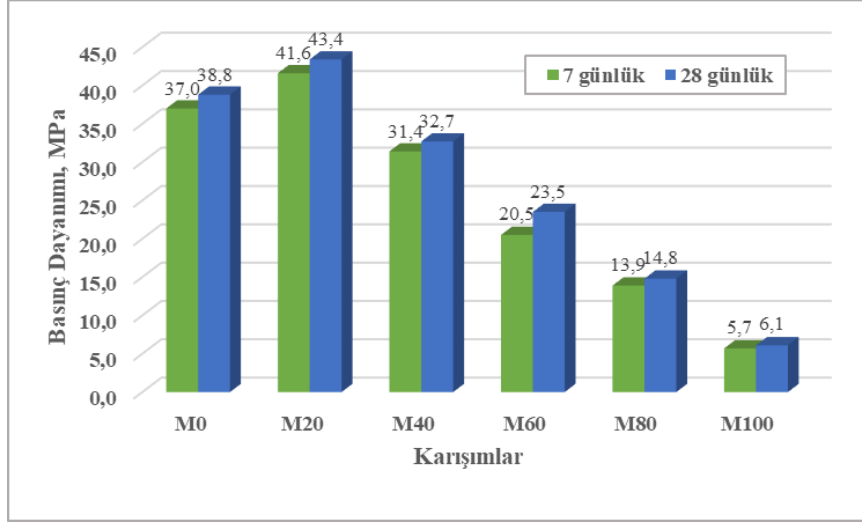


Şekil 4. Harçların 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları

E. BASINÇ DAYANIMI

Atık EPS esaslı harçların basınç dayanımları Şekil 5’de verilmiştir. M0-M100 arası harçların basınç dayanımı değerleri 7 günlük 41,6 MPa ile 5,7 MPa, 28 günlük 43,4 MPa ile 6,1 MPa arasında değişmektedir. Eğilme dayanımında olduğu gibi en yüksek basınç dayanımı M20 grubunda elde edilirken en düşük M100 grubunda elde edilmiştir. M0 grubu kontrol harçlarına kıyasla M40 grubunda yaklaşık %16 dayanım kaybı oluşmuştur. Harçlar basınç dayanımını büyük oranda 7 günde kazanmıştır. M0 harcı 7 günden 28 güne %5 artarken, M100 harcı ise yaklaşık %7 artmıştır. EPS agregalı harçların birim ağırlıklarındaki düşüş ile basınç dayanımlarındaki düşüş orantılıdır. M0 grubunda birim ağırlık 2040 kg/m³ iken basınç dayanımı 38,8 MPa’dır. M80 grubunda ise 28 günlük birim ağırlık 1240 kg/m³ iken basınç dayanımı 14,8 MPa ölçülmüştür. Bu çalışma ile uyumlu olarak Liu ve Chen EPS agregalı hafif beton ürettikleri çalışmalarında 1300 kg/m³ yoğunluğa sahip numunelerin basınç dayanımı yaklaşık 12 MPa elde etmişlerdir [25].

Atık EPS’nin %20 yer değişiminde kontrol harcına göre bir miktar basınç dayanım artışı görülmüştür. M0’da 38,8 MPa olan basınç dayanımı M20’de 43,4 MPa çıkmıştır. Bu durum iki sebebe bağlanabilir; birincisi, hacimce yer değişimi yapıldığından karışımdan çıkan dere kumu tane dağılımı daha ince olduğu için daha fazla yüzey alanı çıkarılmıştır. Yerine ilave edilen EPS miktarının daha az yüzey alanına sahip olması ile karışımda kalan dere kumu çimento hamuru ile daha sıkı bir yapı oluşturmuştur. İkinci ise; karışımda su/çimento oranı sabit tutulması için M20 karışımına 20 kg fazla çimento eklenmiştir. Aynı oranda 10 kg su da eklenmiştir ancak atık EPS boşluklu yapısı nedeni ile suyu bünyesine alarak karışımın su/çimento oranını düşürmüştür. Bu da düşük oranda EPS ikamesinin dayanım artışı olarak oluşmuştur.



Şekil 5. Harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

Hafif betonlar ısı yalıtım özellikleri açısından sınıflandırıldığında birim ağırlıkları 300 kg/m³-800 kg/m³ arasında ise yalıtım betonları, 800 kg/m³-1400 kg/m³ arasında ise orta mukavemetli hafif betonlar, 1400 kg/m³'den büyük olan betonlar ise taşıyıcı hafif betonlar olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca 7 MPa-14 MPa arasında basınç dayanımına sahip olan betonlar orta dayanımlı betonlar, 17 MPa-41 MPa basınç dayanımına sahip olanlar ise taşıyıcı hafif beton olarak sınıflandırılmaktadır [26]. Atık EPS ile üretilen farklı çimento dozajlarına sahip hafif harçlarda 28 günde yaklaşık 6 MPa-43 MPa arasında basınç dayanımı belirlenerek hem orta dayanımlı hem de taşıyıcı hafif beton sınıfında hafif şap harcı elde edilmiştir. Bu durum 28 günlük numunelerin birim ağırlık deney sonuçları ile desteklenmektedir. Böylece üzerine gelecek kaplama ve hareketli yükleri taşıyabilecek hafif şap harcı üretilmiştir.

F. AŞINMA DİRENCİ

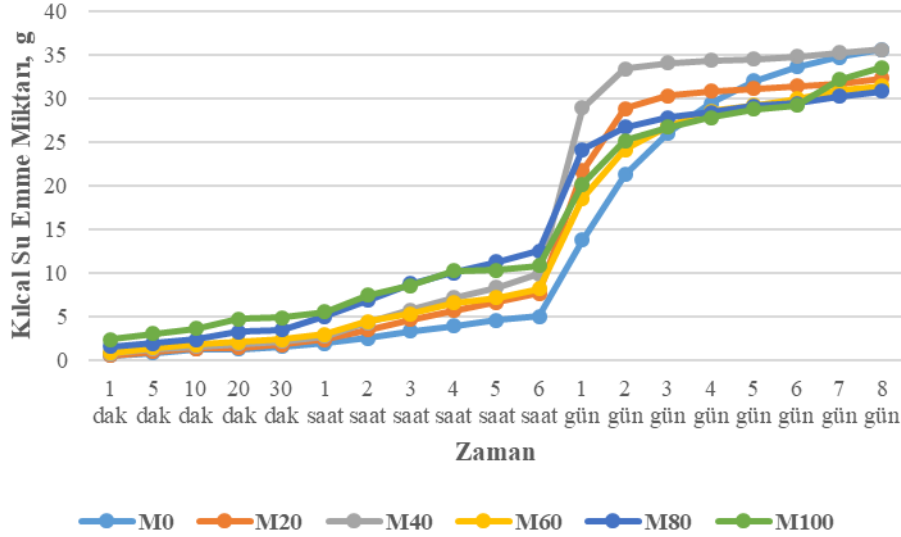
Atık EPS agregalı harçların kütle kayıpları M0, M20, M40, M60, M80 ve M100 karışımları için sırasıyla 26,0, 25,8, 29,5, 34,4, 41,0 ve 54,7 gram olarak ölçülmüştür (Tablo 8). Hacim kayıpları ise kütle kayıplarına benzer bir şekilde artmıştır. Özellikle hacim kayıplarının kütle kayıplarından daha net bir şekilde daha büyük farkta arttığı görülmüştür. Atık EPS agregalı harçların aşınma direncinde EPS oranının artışı ile oldukça önemli ve ciddi anlamda düşüş gözlenmiştir. Elde edilen aşınmadaki düşüş basınç dayanım sonucu ile anlamlı ve doğrudan ilişkilidir. Dayanımı yüksek olan malzemenin aşınmasının da düşük olması normal olarak beklenen bir durumdur. Hafif harçlarda %20 oranında atık EPS kullanımının aşınma direnci açısından kontrol numunesine benzer aşınma değerleri göstermiştir. Aşınma direnci basınç dayanımı ile bağlantılı olarak benzer hacim kaybı oluşturmuştur. M0'dan M100'e basınç dayanımı %84 kayıp oluştururken aşınma direnci %77 hacim kaybına sahiptir.

Tablo 8. Harçların aşınma direnci değerleri

EPS Oranı (%)	Yüksek Dayanımlı	
	Kütle Kaybı (g)	Hacim Kaybı (mm ³ /5000mm ²)
M0	26,0	13765
M20	25,8	12732
M40	29,5	16215
M60	34,4	21459
M80	41,0	31400
M100	54,7	60196

G. KILCAL SU EMME

Atık EPS içeren hafif şapların zamanla kılcal su emme değerleri Şekil 6’da görüldüğü gibi 6 saatlik kayıpları M0, M20, M40, M60, M80 ve M100 karışımları için sırasıyla 5,0, 7,6, 9,8, 8,1, 12,5 ve 10,8 gram olarak ölçülmüştür. 8 günlük ise sırasıyla 35,6, 32,3, 35,6, 31,4, 30,8 ve 33,5 gram olarak ölçülmüştür. Atık EPS oranı arttıkça hafif şap numunelerinin 8 gün sonunda kılcal su emme değerleri birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ancak 6 saatlik kılcal su emme değerinde M0, M100’den yaklaşık %100 daha fazla su emerken 8. Gün sonunda birbirine yakın değerlerde 35,6 ve 33,5 gr su emmişlerdir. EPS içeren hafif şap harçları ve dere kumu ile üretilen geleneksel harçlar 8. Gün sonunda benzer kılcal su emme değerine ulaşmıştır.



Şekil 6. Harçların kılcal su emme miktarları

H. ISIL İLETKENLİK KATSAYISI

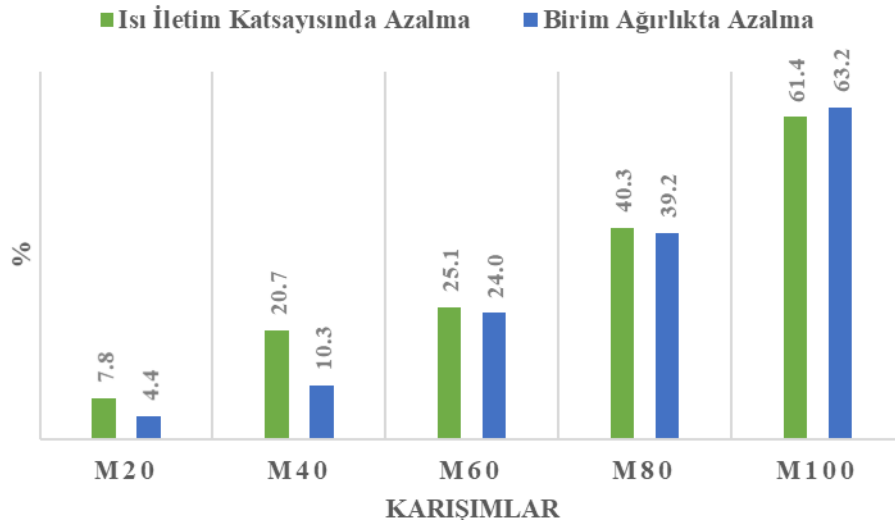
Atık EPS içeren 50×50×5 cm boyutlarındaki hafif şap numunelerinin plaka yöntemi ile ölçülen ısı iletkenlik katsayısı değerleri Tablo 9’da verilmiştir. Şap harçlarının EPS içermeyen kontrol grubu M0’ın ısı iletkenlik katsayısının değeri 0,6617 W/m.K olduğu görülmüştür. EPS agregalı hafif şap harçlarının içerisindeki kum oranı azalıp EPS oranı arttıkça M20, M40, M60, M80 ve M100 için sırasıyla ısı iletkenlik katsayıları 0,6099 W/m.K, 0,5244 W/m.K, 0,4957 W/m.K, 0,3953 W/m.K ve 0,2553 W/m.K olarak ölçülmüştür. Genel olarak atık EPS agregalı hafif şapların ısı iletkenlik değerlerinin M20 grubundan sonra önemli oranda düştüğü belirlenmiştir. Isıl iletkenlik değerindeki azalma M0 grubu kontrol harcına kıyasla M20, M40, M60, M80 ve M100 için sırasıyla yaklaşık %8, %21, %25, %40, %61’dir. Geleneksel şaplara kıyasla EPS ilavesi tüm oranlarda ısıl özelliklerini iyileştirmektedir. Bu çalışmaya benzer sonuçlar İlkentapar ve Eren’in [8] hazırlamış olduğu harçlarda da görülmektedir. EPS ve dere kumu değişimi ile ürettikleri geopolimer harcında %100 EPS ile dere kumu değişiminde ısıl iletkenlik yaklaşık %78 oranında azaldığını belirtmişlerdir.

Şaplar için, üzerine gelen kaplama yükleri ve hareketli yükler de göz önüne alındığında %20’den fazla atık EPS içermesi hem basınç dayanımı hem de ısıl iletkenlik özellikleri açısından olumlu sonuç vermektedir. %100 atık EPS ile üretilen harçlar ısıl özellikleri açısından %61’lik daha az ısı iletimi sağladığı için düşük yük etkisinde kalacak döşemeler için uygun şap karışımıdır. Moreira ve ark., [27] çalışmalarında hafif şap harcının ısıl özelliklerinin iyileştirilmesi ile enerji maliyetlerinde de azalmalar olacağı için avantajlı olduğunu vurgulamaktadırlar.

Tablo 9. Harçların ısı iletkenlik katsayısı sonuçları

Karışımlar	M0	M20	M40	M60	M80	M100
Isı İletkenlik Katsayısı (λ) W/m.K	0,6617	0,6099	0,5244	0,4957	0,3953	0,2553

Atık EPS içeren hafif şap harçlarında EPS oranının %20'den %100'e kadar yer değişiminde birim hacim ağırlık ile ısı iletkenlik katsayısındaki azalma özellikle M60 grubu harçlardan sonra daha kararlı bir şekilde gerçekleşmiştir. M60, M80 ve M100 için birim ağırlıktaki azalma sırasıyla %24, %39,2 ve %63,2 iken ısı iletkenlik katsayısında azalma %25,1, %40,3 ve %61,4'tür (Şekil 7). Bu durum Ferrándiz-Mas ve ark. [4] tarafından yapılan çalışma ile de desteklenmektedir. EPS içeren hafif çimento harçları düşük yoğunluğa ve düşük ısı iletkenliğine sahip olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 7. Atık EPS içeren harçların birim ağırlık-ısı iletkenlik katsayısı karşılaştırması

IV. SONUÇ

Atık EPS'nin dere kumu ile %, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranında yer değişimi ile üretilen yüksek dayanımlı şap harçlarının mekanik, fiziksel ve ısı özelliklerine ait aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Atık EPS ile üretilen harçlar artan EPS oranı ile beraber yayılma çapını %105'e kadar arttırmıştır.
- Geleneksel normal agregalı şap harçları %20 ve üzerinde atık EPS ilavesi ile birim ağırlığı 2000 kg/m³'den düşük hafif harçlar elde edilmiştir.
- EPS taneciklerinin boşluklu yapısı sebebi ile su emme ve görünür boşluk oranı değerleri genel olarak artış göstermekte ancak %20 ve %40 oranında EPS ikamesi kontrol harcına yakın su emme ve boşluk oranına sahiptir.
- Basınç ve eğilme dayanımı değerleri %40 ve üzeri atık EPS ikamesi ile azalmaktadır. Ancak M20-M40 ve M60 grubu harçlarda, 1400 kg/m³ üzerinde birim ağırlık değerlerine sahip yüksek dayanımlı hafif şap harcı elde edilmiştir.
- Hafif şap harçlarında atık EPS miktarının artması ile aşınma direncinin azalması beklenen bir durumdur. Ancak %40' a kadar ikame oranlarında aşınma direnci kontrol karışımına yakın değerlerdedir.

- Atık EPS ikame edilen harçlar kısa süreli (6 saat) kılcal su emme özelliği geleneksel şaplardan yüksek olsa da uzun süreli (8 gün) kılcal su emme değerleri yakındır.
- Birim ağırlık ve basınç dayanımı birlikte değerlendirildiğinde orta dayanımlı ve taşıyıcı hafif beton sınıfında şap harçları elde edilmiştir.
- Üretilen hafif şapların tesviye şapı olarak kullanılması uygun olacağı özellikle %20 hatta %40 oranlarında atık EPS agregasının hafif şap uygulamalarında kullanılabileceği gerek yapı ağırlığının azaltılması gerekse ısı yalıtımı yönüyle faydalı olacağı belirlenmiştir. Ancak kullanım alanlarına göre %60-%100 atık EPS içeren harçlar da ısıl özellikler ve deprem yükü açısından olumlu özellikler sergilemektedir.

Bu çalışmanın sonuçları, atık EPS kullanılarak sürdürülebilir hafif şap harçlarının üretilebileceğini göstermektedir. Bu harçların, iç mekân uygulamalarında, yapısal olmayan bileşenler olarak deprem yükü ve ısı yalıtımı açısından yapı endüstrisinde kullanılacak umut verici harçlar olduğu söylenebilir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışmanın yürütülmesine FBA-2014-5191 nolu proje ile destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine ve Atık EPS temininde destek veren Koyuncu Kimya Ltd. Şti.'ye teşekkür ederiz.

V. KAYNAKLAR

- [1] A. Bicer, "Investigation of waste EPS foams modified by heat treatment method as concrete aggregate," *Journal of Building Engineering*, vol. 42, no. 102472, pp. 1-7, 2021.
- [2] M. Kaya, Z. B. Yıldırım, F. Köksal, A. Beycioğlu, and I. Kasprzyk, "Evaluation and multi-objective optimization of lightweight mortars parameters at elevated temperature via box-behnken optimization approach," *Materials*, vol. 14, no. 23, pp. 1-19, 2021.
- [3] F. Köksal, E. Mutluay and O. Gencil, "Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene," *Construction and Building Materials*, vol. 236, no. 117789, pp. 1-13, 2020.
- [4] V. Ferrándiz-Mas, T. Bond, E. García-Alcocel, and C. R. Cheeseman, "Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash," *Construction and Building Materials*, vol. 61, pp. 285-292, 2014.
- [5] V. Corinaldesi, G. Gnappi, G. Moriconi, and A. Montenero, "Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars," *Waste Management*, vol. 25, no. 2, pp. 197-201, 2005.
- [6] A. A. Sayadi, J. V. Tapia, T. R. Neitzert, and G. C. Clifton, "Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 716-724, 2016.
- [7] B. A. Herki, and J. M. Khatib, "Valorisation of waste expanded polystyrene in concrete using a novel recycling technique," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 21, no. 11, pp. 1384-1402, 2017.
- [8] S. İlkentapar, ve H. Eren, "EPS ile ikame edilmiş uçucu küllü geopolimer hafif harcın fiziksel, mekanik ve ısıl geçirimsizlik özelliklerinin incelenmesi," *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, c. 9, s.1, ss. 28-38, 2021.

- [9] M. Sarıdemir, and S. Çelikten, “Investigation of fire and chemical effects on the properties of alkali-activated lightweight concretes produced with basaltic pumice aggregate,” *Construction and Building Materials*, vol. 260, no. 119969, 2020.
- [10] H. Eren, S. İlkentapar, ve U. Durak, “Alkali ile aktive edilmiş eps ikameli harçların mekanik özelliklerinin, ısı geçirimsizlik özelliklerinin ve yüksek sıcaklığa karşı dirençlerinin araştırılması,” *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 10, s. 4, ss. 1515-1526, 2021.
- [11] Y. T. Altuncı, C. Öcal, K. Saphioğlu, H. H. İnce ve M. Çevikbaş, “Genleştirilmiş cam agregalı ve genleştirilmiş perlit agregalı şap harçlarının performans özellikleri,” *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, c.8, no. 1, ss. 11-20, 2021.
- [12] Y. A. Ali, E. H. Fahmy, M. N. AbouZeid, Y. B. Shaheen, and M. N. A. Mooty, “Use of expanded polystyrene wastes in developing hollow block masonry units,” *Construction and Building Materials*, vol. 241, no. 118149, pp. 1-14, 2020.
- [13] *Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 197-1, 2012
- [14] *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 933-1:2012(EN), 2012.
- [15] *Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 1008, 2003.
- [16] O. Karahan, Z. Almaz, ve İ. İ. Atabey, “Atık eps agregalı hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması,” Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, Türkiye, FBA-2014-5191, 2016.
- [17] *Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-1, 2016.
- [18] *Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 1015-3, 2000.
- [19] *Kimyasal katkıları- Beton, harç ve şerbet için- Deney metotları- bölüm 11: Sertleşmiş betonda hava boşluğu özelliklerinin tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 480-11, 2008.
- [20] *Kagir harcı- Deney yöntemleri- Bölüm 11: Sertleşmiş harcın eğilmede çekme ve basınç dayanımının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 1015-11, 2020.
- [21] *Doğal yapı taşları- İnceleme ve laboratuvar deney yöntemleri*, Türk Standartları Enstitüsü, TS 699/T1, 2016.
- [22] *Zemin döşemesi için beton kaplama blokları- Gerekli şartlar ve deney metotları*, Türk Standartları Enstitüsü TS 2824 EN 1338/AC, 2009.
- [23] *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*, ASTM C1585-13, 2013.
- [24] *Isı yalıtımı- Kararlı halde ısı direncin ve ilgili özelliklerin tayini- Mahfazalı sıcak plaka cihazı*, Türk Standartları Enstitüsü TS ISO 8302, 2002.

- [25] N. Liu, and B. Chen, "Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 227-232, 2014.
- [26] C. Taşdemir, "Hafif betonların ısı yalıtım ve taşıyıcılık özellikleri," *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, c. 427, ss. 57-61, 2003.
- [27] A. Moreira, J. António, and A. Tadeu, "Lightweight screed containing cork granules: Mechanical and hygrothermal characterization," *Cement and Concrete Composites*, vol. 49, pp. 1-8, 2014.