



KÖPÜK DOLGULU HAFİFLETİLMİŞ DONATILI ZEMİN PANELLERİNİN DAVRANIŞI

Burak EVİRGEN^{1*}, Onur TUNABOYU¹, Barış BÜYÜK², Gizem Tuğçe ÇİL²

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

² İstanbul Teknik İnşaat A.Ş., Ar-Ge Merkezi, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Prekast Panel,
Donatılı Zemin,
Kaplama Elemanı,
Hafif Panel,
Eps Köpük.

Öz

Eğimli veya dik arazilerdeki yanal toprak basıncı ve yüzey duraylılığı gibi etkilere karşı kullanılan ağır prekast betonarme paneller hem şantiyeye iletim hem de yerleştirme sırasında ciddi sorunlara neden olmaktadır. Üretim aşamasında daha hafif elemanların kullanılması arazideki montaj kolaylığına ek olarak işçilik gereksinimini azaltmakta ve uygulama hızını arttırmaktadır. Bu sebeple çalışma kapsamında, gerçek boyutlu donatılı beton numuneler ve genişletilmiş polistren köpük (EPS) elemanlar yardımıyla boşluklu kesitlerle üretilen hafif numunelerin deneysel davranışı incelenmiştir. Özel olarak tasarlanan deneysel düzeneklerde söz konusu numuneler üzerinde düzlem içi diyagonal kesme testleri (panel testleri) ve üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirildikten sonra yük - deplasman değişimleri sunulmuştur. Çelik donatılı numunelere kıyasla yaklaşık %13 mertebesinde daha hafif olan EPS köpüklü numuneler eğilme testlerinde benzer davranış sergilerken, panel testlerinde farklı göçme durumları ön plana çıkmaktadır. Alternatif hafif kompozit panellerin kullanılmasıyla konvansiyonel donatılı beton panellerin toplam maliyetinin düşürülebileceği açıkça görülmektedir. Çalışma sonucunda mekanik stabilize donatılı duvarlarda ve donatılı zeminlerde kullanılan konvansiyonel kaplama elemanlarına alternatif özgün bir ürün önerilmiştir.

BEHAVIOR OF THE LIGHTENED REINFORCED SOIL PANELS FILLED WITH POLYSTYRENE FOAM

Keywords

Prekast Panel,
Reinforced Soil,
Facing Member,
Lightweight Panel,
Eps Foam.

Abstract

Heavy precast reinforced concrete panels, which are used against the effects of active lateral earth pressure and surface stability on inclined or vertical slopes, cause serious problems during both transportation to the construction site and installation. The use of lighter elements in the production phase reduces the requirement of workmanship and increases the speed of application in addition to the ease of installation in site. Therefore, the experimental behavior of real-sized reinforced concrete specimens and lightweight specimens were investigated, which have been produced with hollow sections via expanded polystyrene foam (EPS). The load-displacement changes of specimens were presented after the completion of in-plane diagonal shear tests (panel tests) and three-point bending tests on mentioned specimens in specially designed experimental setups. EPS foam included specimens are lighter than steel-reinforced ones around 13%, which showed similar behavior in bending tests, but different failure modes stood out in panel tests. It is clearly seen that the total cost of conventional reinforced concrete panels can be reduced by a usage of alternative lightweight composite panels. As a result of the study, an alternative unique product was proposed to the conventional facing members used in mechanically stabilized earth walls and reinforced soils.

Alıntı / Cite

Evirgen, B., Tunaboyu, O., Büyük, B., Çil, G.T., (2022). Köpük Dolgulu Hafifletilmiş Donatılı Zemin Panellerinin Davranışı, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1315-1324.

* İlgili yazar / Corresponding author: burakevirgen@eskisehir.edu.tr, +90-222-213-8171

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
B. Evirgen, 0000-0003-4202-5479	Başvuru Tarihi / Submission Date	29.12.2021
O. Tunaboyu, 0000-0001-6858-4290	Revizyon Tarihi / Revision Date	30.06.2022
B. Büyük, 0000-0002-1988-8260	Kabul Tarihi / Accepted Date	09.08.2022
G.T. Çil, 0000-0001-6899-5188	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Eğimli veya dik açılı şevlerin teşkil edildiği karayolu ve demiryolu kenarlarında sıklıkla kullanım alanı bulan donatılı zeminlerde hem yanal toprak basınçlarının karşılanması hem de geosentetik veya çelik zemin donatılarının sabitlenmesi amacıyla prekast betonarme paneller kullanılmaktadır. Prekast betonlar; darbe, aşınma ve yıpranma etkilerine karşı dayanıklı olmasının yanı sıra minimum onarım ve bakım gerektirmesi sebebiyle ön plana çıkmaktadır. Ancak konvansiyonel betonarme panellerin ağır olması, yerleştirilmesi sürecinde can ve mal güvenliği açısından riskler meydana getirmektedir. Ayrıca zati ağırlığı sebebiyle uzun dönemde yüzeyden kopma ve sıyrılmalar görülebilmektedir. Bu yüzden yapısal elemanların imalatlarında kullanılan beton ve çelik gibi ağır bileşenler yerine genişletilmiş polistren köpük (EPS) gibi daha hafif malzemelerle üretilen elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürde yapı yükünün azaltılmasının yanı sıra yalıtım özelliklerine de katkı sağlayan malzemelerden biri olan EPS ile üretilmiş beton veya harçların kullanıldığı deneysel çalışmalara rastlanmaktadır (Sayil ve Gürdal 1999; Ferrándiz-Mas vd. 2014; Chen vd. 2015). Babu ve Babu (2003) tarafından EPS küreleri ve silis dumanı kullanılarak üretilen 1500 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında yoğunluğa sahip beton numunelerinde; beton yaşı, EPS hacmi, EPS küre boyutu, hafif agrega dayanımı ve normal agrega boyutları gibi değişkenlere bağlı etkiler incelenmiştir. Kan ve Demirboğa (2009) tarafından geri dönüştürülmüş EPS köpükler beton içerisinde agrega olarak kullanılmış ve silindirik numuneler ile yapılan deneysel çalışmalarda olumlu sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. Assaad ve El Mir (2020) EPS köpüklü ve stiren-butadiyen kauçuk lateks numunelerle 1870 kg/m^3 ile 2360 kg/m^3 arasında değişen yoğunlukta üretilmiş hafif betonun dayanıklılığını incelemişlerdir.

Malzeme özelliklerinin belirlendiği aksenal basınç deneyleri dışında, kesit ve yükleme tipine bağlı davranış özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. O'Hegarty ve Kinnane (2020) kompozit veya kompozit olmayan prekast beton panellerin yük taşıma davranışını incelemek için literatürdeki en yaygın testlerin üç noktalı veya dört noktalı eğilme testleri ile diyagonal yükleme uygulanan kesme testleri olduğunu belirtmektedir. Beton dayanımının artırılması ve aynı zamanda yoğunluğun azaltılmasına yönelik çeşitli köpük, polimer, fiber ile kimyasal katkı içeren kiriş, plak ya da panel tipi kompozit beton elemanlarda katkı oranları, kür koşulları, geometrik özellikler gibi değişkenlerin incelendiği eğilme deneyleri, bu tip narin elemanların noktasal yükleme koşulları altındaki davranışlarını yansıtmaktadır (Chen ve Liu, 2004; Chen ve Liu 2007; Lee vd. 2018; Hou vd. 2019; Saheed vd. 2021). Ayrıca katkılı beton veya harçlar ile fiber donatılarla güçlendirilmiş betonların mekanik özelliklerinin belirlenmesi sürecinde de eğilme testleri yapılmaktadır (Cengiz vd. 2020; Acar vd. 2020). Wibowo vd. (2017) bambu ve strafor köpük kullanarak ürettikleri numunelerde yaptıkları eğilme deneylerinde %20 daha hafif bir tasarımla birlikte dayanımda %15'lik bir azalmanın verimlilik açısından iyi bir performans olduğunu belirtmişlerdir.

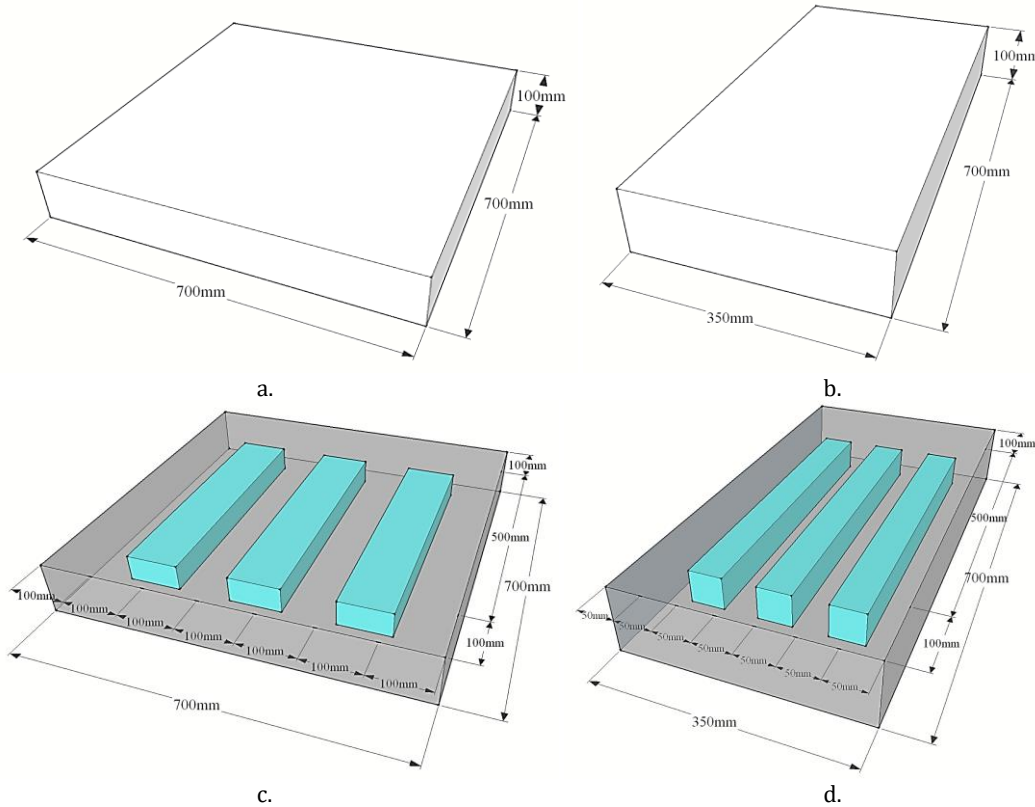
Sandviç panellerdeki deneysel çalışmalarda ise rüzgar yükleri ve sismik yükler (Assaad vd. 2018) ile düzlem içi davranışın (Benayoune vd. 2007; Mohamad vd. 2011; Ahmad ve Singh 2021) dikkate alındığı aksenal basınç ve panel deneyleri yapılmaktadır. Morales-Alonso vd. (2011) tarafından betonarme panellerde ani yükleme etkisi altında oluşan hasarlarda, basınç dayanımı yerine çekme dayanımının belirleyici etken olduğu belirtilerek patlama ve çarpma gibi ani yüke maruz kalabilecek elemanlarda yüksek mukavemetli beton kullanmak yerine çekme dayanımını artıracak şekilde tasarımlar yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Naito vd. (2012) içinde EPS bulunan sandviç panellerde kesme bağları kullanarak numunelerin kesme performanslarına etkilerini belirlemek için deneysel metod geliştirmişlerdir. Xiong vd. (2018) deneysel çalışmalarla doğrulanan iki boşluklu prekast panellere dayalı yeni bir beton perde duvar sistemi önermişlerdir. Corradi vd. (2008) tarafından yapılan $900 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ boyutlarındaki panellerdeki kesme etkilerini içeren diyagonal basınç testleri sonucunda depremler sırasında kompozit duvarlarda görülen tipik hasarın katmanlar arasındaki bağın yitilmesiyle dış kaplamanın parçalanması biçiminde olduğu belirtilmektedir. Sorunun çözümüne yönelik çimento - su şerbeti enjeksiyonu farklı bir güçlendirme tekniği olarak sunulmaktadır. Farklı tipteki harçlarla inşa edilen yığma panel duvarların kesme kapasitesinin GFRP ile güçlendirilmesi durumunda yanal yük kapasitesinde %7 ile %117 arasında bir artış sağlarken, kesme kapasitesinde ise %57 ile %115 arasında arttığı bildirilmiştir (Borri vd. 2016). Del Zoppo vd. (2019) literatürdeki farklı duvar özellikleri, donatı tipi, güçlendirme düzeni ve harç özelliklerine göre inorganik kompozitlerle güçlendirilmiş donatısız yığma duvarların düzlem içi kesme kapasitesini konu alan diyagonal basınç testlerine ilişkin çalışmaları incelemişlerdir. Buna göre basınç dayanımı 10-15 MPa seviyesine ulaşan kompozit yapıların kesme kapasitesindeki artışın diğer sistemlere kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Longo vd.

(2020) tarafından hafif geopolimer esaslı harçların farklı katkıları ve tekstil donatıları ile birlikte binalarda yapısal açıdan güçlendirme amaçlı kullanıma yönelik yapılan deneysel çalışmada, yapısal elemanların zati ağırlığının %40 oranında azaltılabileceği belirtilmiştir. Corradi vd.'nin (2021) duvar panellerinin düzlem içi göçme durumunda kesme donatısı üzerine yaptıkları çalışmada; epoksi reçineyle kaplanan tekstil, bazalt, bambu, kenevir fiber donatılı harç, mineral esaslı kompozitler veya hasırlarla panellerin güçlendirilmesi durumunda sismik performanslarının artırıldığı vurgulanmıştır.

Literatürde farklı güçlendirme elemanlarıyla sargılanan kompozit panel veya çok katmanlı prekast elemanların mekanik davranışlarına yönelik deneysel çalışmalarla karşılaşılmamasına rağmen, donatılı zemin panel üretimi sırasında beton içine yerleştiren köpüklerle boş hacim oluşturulmasını içeren bir çalışma bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada, donatılı zeminlerle inşa edilen mekanik stabilize istinat yapılarının yüzey kaplaması olan standart betonarme panellere ek olarak, ağırlığın azaltılabilmesi için genişletilmiş polistren köpük (EPS) dolgu kullanılarak üretilen prekast elemanların panel ve eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. İmalat aşamasında kullanılan daha hafif elemanların hem iş gücünü azaltarak maliyeti düşürmesi hem de şantiyedeki imalat hızını artırması beklenmektedir.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Donatılı zeminlerde genellikle çelik şeritlerin sabitlendiği betonarme paneller şeritlerin bağlantı noktalarından eğilme davranışına maruz kalırken, birbirlerine temas yüzeyleri doğrultusunda kesme gerilmeleri oluşmaktadır. Dolayısıyla, bu iki davranışın tespitine yönelik yapılan düzlem içi diyagonal yükleme testleri (panel testleri) ve eğilme testlerinde farklı boyutta iki tip numune kullanılmıştır. Panel testleri için 700 mm × 700 mm boyutlarında ve 100 mm kalınlığında betonarme prekast panel elemanları hazırlanırken, eğilme testlerinde kullanılmak üzere 350 mm × 700 mm boyutlarında ve 100 mm kalınlığında numuneler üretilmiştir (Şekil 1). Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) kriterlerine göre donatılı betondan üretilen numuneler Tip-1 olarak adlandırılırken, çalışmanın ana hedefini ortaya koyan hafiflik unsurunu sağlamak amacıyla Tip-2 numunelerde panel ve eğilme testleri için numune boyutuna oranla sırasıyla 100 mm ve 50 mm genişliğinde EPS köpükleri kullanılarak boşluklar bırakılmıştır. Bu çalışmada test edilen toplam 12 adet numuneye ait detaylar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Numune boyutları (Dimensions of the specimens)

2.1. Test Numunelerinin Hazırlanması (Preparation of the test specimens)

Numunelerin hazırlanmasında kolaylık sağlanması için modüler çelik kalıplar kullanılmıştır. Karayolları Teknik Şartnamesi (2013) esaslarına uygun biçimde üretilen kalıplar içerisine tabandan 2,50 cm pas payı bırakılmıştır

(Şekil 2). Q131/131 tipi tek sıra hasır çelik donatı ve C30 beton ile üretilen Tip-1 numunelerinin donatılı zemin uygulama projelerinde kullanılan standart numuneler olması amaçlanmıştır. Buna ek olarak, sahadaki prekast panellerin ağırlıklarını azaltmak için beton kütlesi içerisinde boşlukların oluşturulması hedeflenmiştir. Bu amaçla, Tip-2 numunelerin alt ve üst kısımlarından yine 2,50 cm boşluk bırakılarak pas payı oluşturulmuş ve Şekil 3'te görüldüğü gibi kalıplar hazırlanmış, hasır çeliklerin üzerinde öngörülen konumlara 5,00 cm kalınlığında 16-18 dansite EPS köpükler sabitlenerek beton dökümü sağlanmıştır.



Şekil 2. Standart numunelerin modüler çelik kalıpları (Modular steel molds of standard specimens)

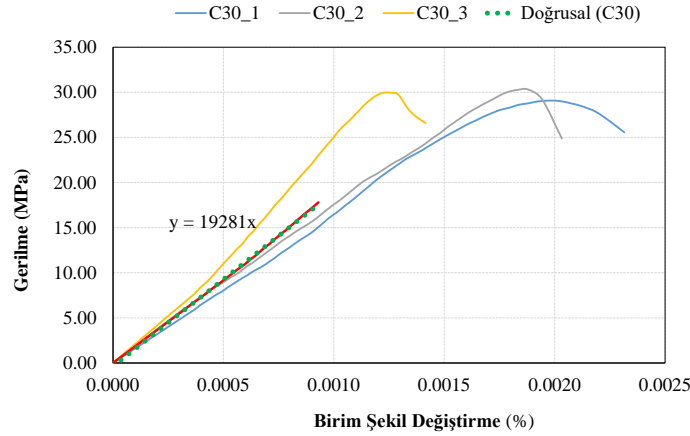


Şekil 3. EPS dolgulu numunelerin modüler çelik kalıpları (Modular steel molds of EPS infilled specimens)

Karayolları Teknik Şartnamesi'ne (2013) göre donatılı zeminlerde kullanılan standart paneller için verilen kriterler doğrultusunda beton firmasından temin edilen C30 sınıfındaki hazır beton kullanılmıştır. Kalıplara dökülen betonlar vibratör ile yerleştirilmiş ve sonrasında masterlama ile perdelama işlemleri uygulanmıştır. Dökülen betonun karakteristik basınç dayanımının tespit edilebilmesi için döküm esnasında numuneler alınmıştır. Şartname uyarınca 12 MPa beton basınç dayanımı değerine ulaşması için gereken 3 günün sonunda kalıplardan çıkarılan tüm numuneler toplam 28 gün aynı koşullar ve kür şartlarında bekletilmiştir. 28 günün ardından havuzlardan çıkarılıp kuruması beklenen 100 mm x 200 mm boyutlarındaki silindirik numuneler, 0,6 MPa/sn yükleme hızıyla beton basınç testlerine tabii tutulmuş ve gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri elde edilerek öngörülen C30 beton dayanımı doğrulanmıştır (Şekil 4). FEMA 356'ya (2000) göre nihai gerilme değerinin %60'ı mertebesine kadar olan ortalama değerlerin doğrusal eşdeğer eğilim çizgisi çizdirilmiş ve eğim değeri hesaplanmıştır. Bu doğrultuda betona ait elastisite modülü 19300 MPa civarında hesaplanırken, betonun ortalama karakteristik basınç dayanımı 29,52 MPa olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Üretilen numune detayları (Details of the test specimens)

NUMUNE TİPİ	DENEY TİPİ	NUMUNE SAYISI	DETAY
TİP1	Panel deneyi	3	Donatılı beton panel
TİP2		3	EPS köpük dolgulu donatılı beton panel
TİP1	Eğilme deneyi	3	Donatılı beton panel
TİP2		3	EPS köpük dolgulu donatılı beton panel



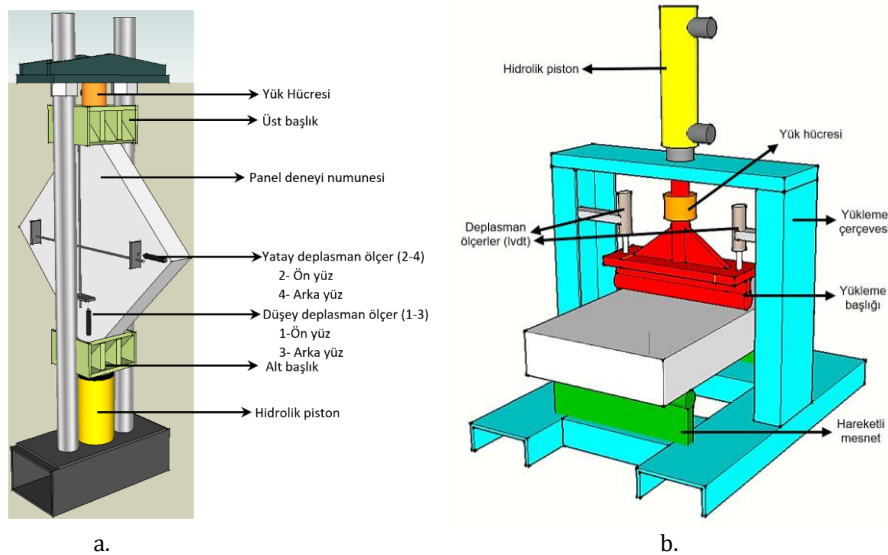
Şekil 4. Betonun aksenal gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri (Axial stress - strain curves of concrete)

2.2. Panel Deneyleri (Panel tests)

Donatılı zeminlerde yüzey kaplaması olarak kullanılan prekast panellerin statik veya dinamik yükleme koşullarına maruz kalması durumunda komşu panel üzerinde zorlanmalara sebebiyet vermektedir. Söz konusu etki neticesinde panellerde meydana gelen kesme davranışının tespitine yönelik ASTM E519/E519M-21 (2021) standardında yer alan düzlem içi diyagonal yükleme testleri yapılmaktadır. Çalışmadaki panellerin diyagonal yükleme testlerindeki yük-deformasyon davranışını belirlemek için literatürde kompozit paneller, prekast betonarme plaklar veya yığma duvarlarda kullanılan ilgili deney düzeneği ve yükleme başlıkları üretilmiştir (Corradi vd., 2008; Roca ve Araiza, 2010; Tunaboyu, 2017; Longo vd., 2021; Manos vd., 2021). Düzenek 1000 kN kapasiteli yük hücresi, 300 kN kapasiteli hidrolik piston ve 4 adet 25 mm'lik deplasman ölçerlerden (LVDT) oluşmaktadır (Şekil 5.a). Prekast panel numunelerinin köşegenlerinden uygulanan basınç kuvveti doğrultusundaki kılma ve buna karşı diğer doğrultudaki uzama miktarları sisteme bağlanan yük hücresi ve deplasman ölçerler ile belirlenmiştir. Panel numuneleri üzerine epoksi tamir harcı ile sabitlenen civatalar arasında ortalama 600 mm net açıklık bırakılarak şekil değiştirme ölçümleri kaydedilmiştir.

2.3. Eğilme Deneyleri (Bending tests)

İki uçtan 500 mm net açıklığa sahip hareketli mesnetler üzerine yerleştirilen prekast deney numunelerine, orta kısımda tek noktadan düşey yük uygulanmış ve dolayısıyla 3 noktalı eğilme testi prosedürü gerçekleştirilmiştir (ASTM C293/C293M - 16, 2016). Deney sırasında pistonla sabitlenen 100 kN kapasiteli yük hücresi sayesinde yük verileri toplanırken, sabit platforma monte edilen 2 adet 50 mm kapasiteli deplasman ölçer vasıtasıyla deplasman verileri eş zamanlı kaydedilmiştir (Şekil 5.b).

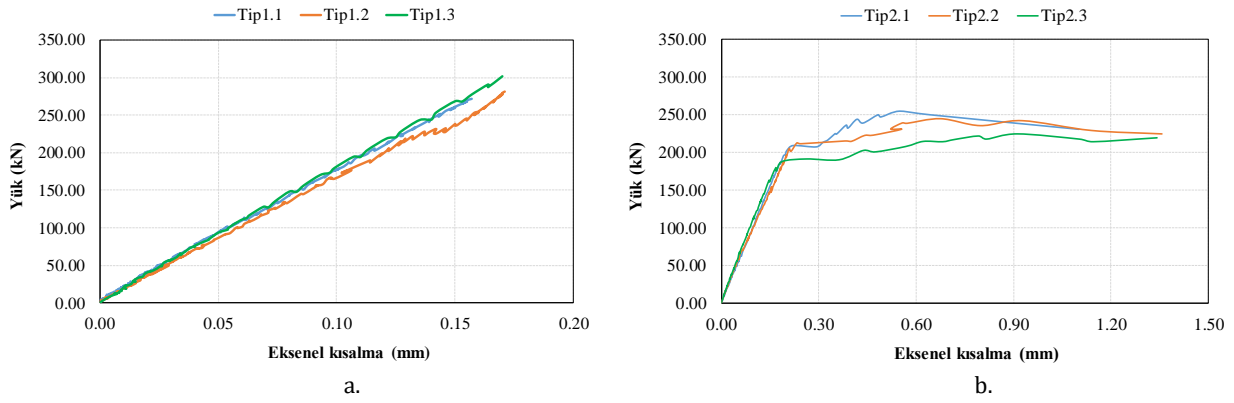


Şekil 5. Test düzenekleri; a. Panel deneyi düzeneği ve b. Eğilme deneyi düzeneği (Test setups; a. Panel test setup and b. Bending test setup)

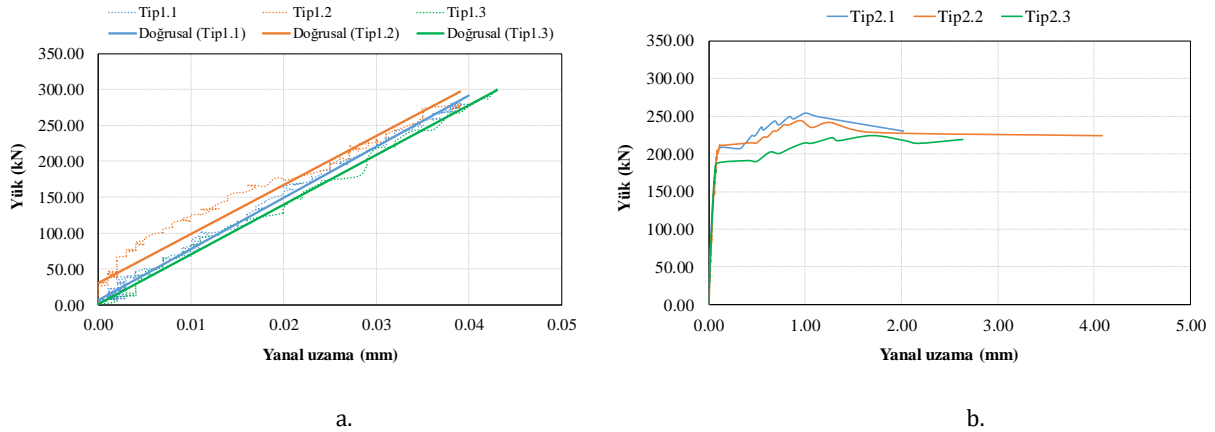
3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

3.1. Panel Deneyi Sonuçları (Results of panel tests)

Panel testleri tamamlandıktan sonra, hem aksel kılma (Şekil 6) hem de yanal uzamayı içeren yük - deplasman grafikleri hazırlanmıştır (Şekil 7). Tip-1 ve Tip-2 numunelerin panel performans testlerinde hem aksel kılma hem de yanal uzama açısından rijit bir davranış ile numuneler arasında tutarlı veriler elde edilmiştir. Tip-1 numunelerde başlıklarda meydana gelen ciddi beton ezilmelerinden dolayı 300 kN civarındaki yük değerlerine ulaşıldığında deneyler kesilmiş olmakla birlikte bu seviyeye kadar doğrusal artış görülmüştür. Her ne kadar Tip-1 numunelerdeki düzlem içi diyagonal kesme kapasitesine ulaşamamış olsa da donatılı zeminlerde çelik şeritlerin sabitleneceği bu panellerin köşe noktalarındaki ezilmeler, çelik şerit - panel bağlantısı açısından sorun teşkil edeceği için yorumlar bahsi geçen göçme durumuna göre yapılmıştır. EPS köpük dolgu Tip-2 numunelerinde ise yaklaşık 200 kN yük değerine kadar doğrusal ve elastik bir artış, sonrasında kısmi artış gözlenen yataya yakın bir davranış elde edilmiştir. Anlamlı grafiklerin çizilebilmesi amacıyla Tip-1 numunelerinin yanal uzama grafiklerinde eşdeğer eğilim çizgileri eklenmiştir.



Şekil 6. Panel testleri için yük-eksel kılma eğrileri; a. Standart numuneler, b. EPS dolgu numuneler (Load-axial shortening curves of the panel tests; a. Standard specimens, b. EPS infilled specimens)



Şekil 7. Panel testleri için yük-yanal uzama eğrileri; a. Standart numuneler, b. EPS dolgu numuneler (Load-lateral elongation curves of the panel tests; a. Standard specimens, b. EPS infilled specimens)

Panel testlerine ait genel sonuçlar ve gözlenen numune göçme davranışları sırasıyla Tablo 2 ve Şekil 8'de verilmiştir. Elastik sınırlar içerisinde ciddi ezilmeler meydana geldiği için Tip-1 numunelerinde 0,17 mm aksel kılma miktarına karşılık düzlem içi diyagonal kesme kapasitesi 288,01 kN olarak değerlendirilmiştir. Tip-2 numuneleri için ilgili aksel kılma seviyesinde ortalama 173,63 kN yük mertebesine ulaşılrken, maksimum basınç yükü 241,06 kN olarak belirlenmiştir. Önceki çalışmalardaki düzlem içi diyagonal basınç testlerinde panel tipi elemanlarda katmanlar arasındaki bağın yitirilmesiyle dış kaplamanın parçalanması, dönme, mesnet kayması, diyagonal ve çoklu çatlak oluşumu ve ezilme türü göçme tiplerinin görülebileceği belirtilmiştir (Corradi vd., 2008; Roca ve Araiza, 2010; Longo vd., 2021). Köpük içermeyen Tip-1 panel numunelerinin başlık bölgelerinde gözlenen ciddi ezilme ve kopmalar modüler panelleri kullanılamaz hale getirmiştir. Tip-2 numuneleri ise aksel yüklemeye doğrultusunda aşamalı çatlak oluşumu sonrasında çapraz çatlak gelişimiyle birlikte taşıma kapasitesinde kısmen azalma göstermiş ve daha sünek bir davranış sergilemiştir. Manos vd. (2021) tarafından belirtildiği gibi panellerde geniş çapraz çatlakların oluşma seviyesine kadar beton ve köpük arasında ayrışmanın gözlenmediği tespit

edilmiştir. Tip-2 panellerde yanal uzama miktarının 1 mm'yi aşmasından sonra bu seviyeye ulaşılmaktadır. Diğer taraftan, projenin temel amacı olan ağırlık faktörü göz önüne alındığında panel numuneleri içerisine EPS köpük eklenmesiyle birlikte prekast elemanlar %14,6 seviyesinde hafifletilmiştir.

Tablo 2. Panel testlerine ait genel sonuçlar (Average ultimate values obtained in panel tests)

NUMUNE TİPİ	AĞIRLIK (kg)	DİYAGONAL BASINÇ YÜKÜ (kN)	EKSENEL KISALMA (mm)	YANAL UZAMA (mm)
TİP-1	122,38	288,01	0,169	0,040
TİP-2	104,44	241,06	0,712	1,221



a.

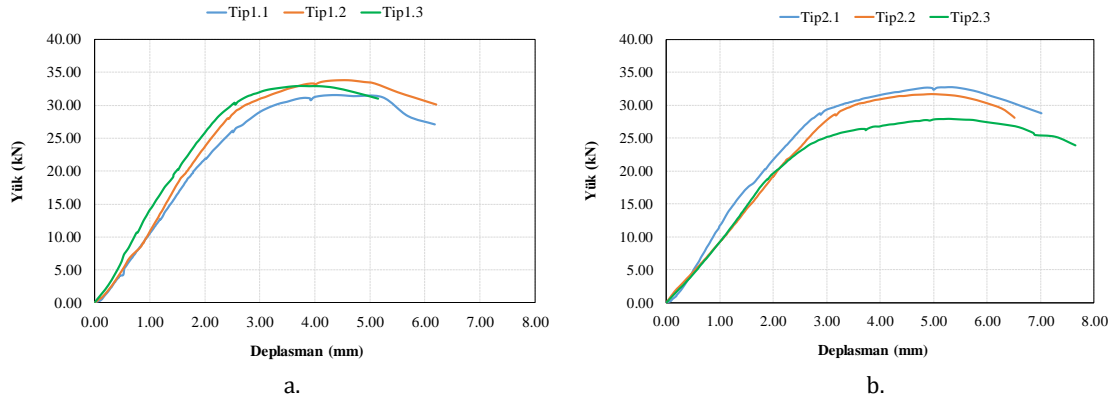


b.

Şekil 8. Panel testlerinde gözlenen numune göçme davranışları; a. Standart panel numuneleri, b. EPS dolgulu panel numuneleri (Featured failure modes of specimens after panel tests; a. Standard specimens, b. EPS infilled panel specimens)

3.2. Eğilme Deneyi Sonuçları (Results of Bending Tests)

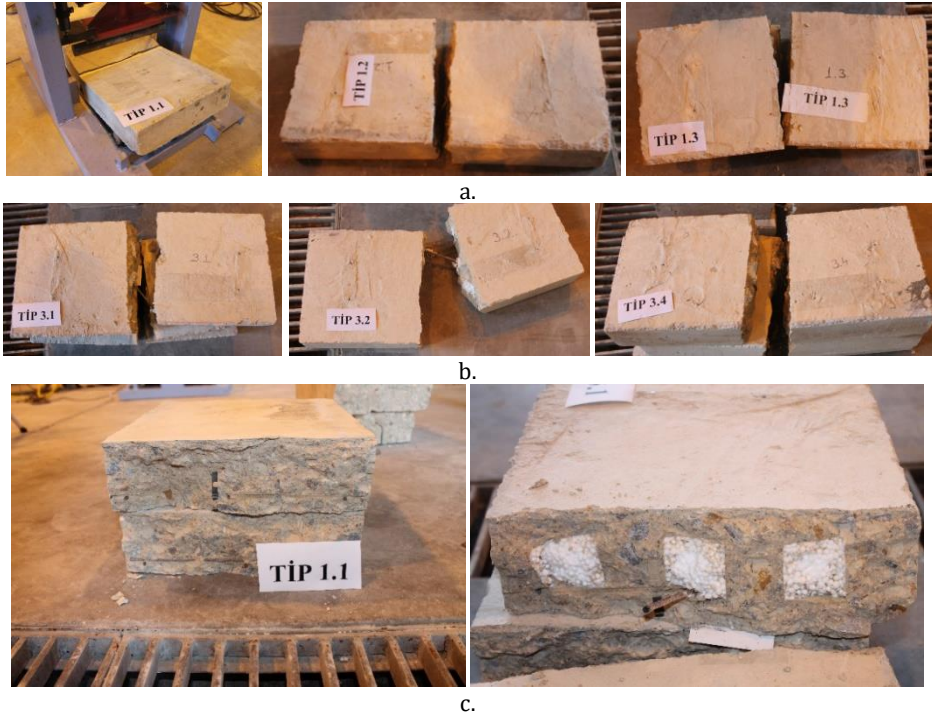
Şekil 9'da verilen Tip-1 ve Tip-2 numunelerine ait sonuçlarının benzer çıkması, EPS köpüğün eğilme davranışı açısından yaklaşık %12'lik bir ağırlık avantajı ile benzer performans değerine ulaştığını göstermektedir. Eğilme testlerine ait genel sonuçlar ve gözlenen numune göçme davranışları sırasıyla Tablo 3 ve Şekil 10'da verilmiştir. Standart ve EPS köpüklü numunelerin eğilme kapasiteleri arasındaki 2 kN'luk farkın EPS köpüklerle bırakılan boşluklar nedeni ile olduğu yorumlanmaktadır. Eğilme deneyi sonucunda Tip-1 ve Tip-2 numunelerde Şekil 10.c'de görüldüğü gibi çelik donatıların kopmasıyla göçme durumu oluşmakta ve kapasite sınırına ulaşılmaktadır. Maksimum eğilme yüküne karşılık gelen deplasmanlar dikkate alındığında EPS köpüklü Tip-2 numuneleri Tip-1 numunelerine kıyasla %23,5 daha fazla deplasman göstererek, daha sünek bir davranış sergilemiştir.



Şekil 9. Eğilme testleri için yük - deplasman grafikleri; a. Standart numuneler, b. EPS dolgulu beton numuneleri (Load-axial deformations curves of the bending tests; a. Standard specimens, b. EPS infilled concrete specimens)

Tablo 3. Eğilme testlerine ait genel sonuçlar (Average ultimate values obtained in bending tests)

NUMUNE TİPİ	AĞIRLIK (kg)	MAKSİMUM EĞİLME YÜKÜ (kN)	DEPLASMAN (mm)
TİP-1	59,75	32,77	4,21
TİP-2	52,63	30,78	5,20



Şekil 10. Eğilme testlerinde gözlenen numune göçme davranışları; a. Standart numuneler, b. EPS dolgulu beton numuneleri ve c. Hasar sonrası kesitler (Featured failure modes of specimens after bending tests; a. Standard specimens, b. EPS infilled concrete specimens and c. Damaged cross sections.)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Söz konusu çalışma ile karayolları veya demiryolları bünyesinde inşa edilen yol, köprü, tünel veya donatılı zemin projelerinde kullanım yeri bulan betonarme prekast panellerin yerine geçebilecek ikame ürün niteliğinde daha hafif ve benzer performanslı panellerin üretilmesi amaçlanmıştır. Sahaya nakil ve sahada daha kolay bir şekilde yerine yerleştirebileceği seviyede hafif ve şartname koşullarını sağlayan panellerin üretilmesi hedeflenmiştir.

Literatürde bir ilk niteliğinde olan bu özgün çalışma kapsamında, beton içerisine EPS köpükler yerleştirilerek üretilen modüler prekast paneller sayesinde, ağır betonarme paneller yerine donatılı zemin projelerindeki farklı yük mertebelerinde kullanılacak yeterli performansa sahip hafif paneller üretilerek gerçekleştirilen performans testleri neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- C30 beton kullanılan EPS dolgulu numuneler (Tip-2), Karayolu Teknik Şartnamesinde önerilen çelik donatılı ve C30 beton sınıfına sahip numuneler (Tip-1) ile kıyaslandığında ağırlık açısından ortalama %13,0 kazanç sağlamaktadır.
- Panel testlerinde Tip-1 numunelerde 0,17 mm eksenel kısalma seviyesinde 288,01 kN düzlem içi diyagonal kesme kapasitesi elde edilmiştir. Aynı eksenel kısaltma için Tip-2 numunelerde ortalama 173,63 kN yük mertebesine ulaşılırken, göçme seviyesindeki maksimum basınç yükü 241,06 kN olarak belirlenmiştir.
- Tip-1 panel numuneleri yaklaşık 0,04 mm yanal deplasmana maruz kaldığında başlık bölgelerinde ciddi ezilme ve kopma tipi lokal göçme seviyelerine ulaşarak modüler paneller kullanılamaz hale gelmiştir. Tip-2 panellerde ise eksenel yükleme doğrultusunda aşamalı çatlak ve çapraz çatlak gelişimiyle birlikte yanal uzama miktarının 1 mm'yi aşmasından sonra parçalanma gözlenmiştir.
- Üç noktalı eğilme testlerinde Tip-1 ve Tip-2 numunelerinde sırasıyla 32,77 kN ve 30,78 kN maksimum eğilme yükü altında göçme seviyesine ulaşılmaktadır. EPS köpük içeren Tip-2 numuneler %23,5 oranında daha fazla deplasman göstererek, daha sünek davranmaktadır.
- Sonuç olarak hem düzlem içi diyagonal kesme kapasitesi hem de eğilme performansı açısından EPS köpüklü kompozit panellerin yukarıda bahsi geçen limit değerlere kadar geoteknik proje ihtiyaçları doğrultusunda alternatif yüzey kaplaması olarak kullanılabilmesi kanıtlanmıştır. Ayrıca, gelecek çalışmalarda panellerdeki çarpma etkilerini sönmek için araçların olası çarpma yüksekliğine kadar harici donatılarla güçlendirilmesi, farklı özelliklerdeki köpüklerin beton içerisine farklı konumlarda yerleştirilmesi, katkılı bitüm veya kauçuk esaslı elastomer ile kaplanarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma üniversite-sanayi iş birliği kapsamında Eskişehir Teknik Üniversitesi ve İstanbul Teknik A.Ş. ile birlikte yapılan 62177 numaralı proje ile 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)

- Acar, M.C., Şener, A., Özbayrak, A., Çelik, A.I., (2020). The Effect of Zeolite Additive on Geopolymer Mortars. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 8(3), 820-832.
- Ahmad, A., Singh, Y., (2021). In-plane Behaviour of Expanded Polystyrene Core Reinforced Concrete Sandwich Panels. *Construction and Building Materials*, 269, 121804.
- Assaad, J., Chakar, E., Zéhil, G.P., (2018). Testing and Modeling the Behavior of Sandwich Lightweight Panels Against Wind and Seismic Loads. *Engineering Structures*, 175, 457-466.
- Assaad, J.J., El Mir, A., (2020). Durability of Polymer-Modified Lightweight Flowable Concrete Made Using Expanded Polystyrene. *Construction and Building Materials*, 249, 118764.
- ASTM C293/C293M - 16, (2016). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading). American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.
- ASTM E 519 - 15, (2021). Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.
- Babu, K.G., Babu, D.S., (2003). Behaviour of Lightweight Expanded Polystyrene Concrete Containing Silica Fume. *Cement and Concrete Research*, 33, 755-762.
- Benayoune, A., Samad, A.A.A., Abang Ali, A.A., Trikha, D.N., (2007). Response of Pre-cast Reinforced Composite Sandwich Panels to Axial Loading. *Construction and Building Materials*, 21, 677-685.
- Borri, A., Corradi, M., Sisti, R., Buratti, C., Belloni, E., Moretti, E., (2016). Masonry Wall Panels Retrofitted with Thermal-Insulating GFRP-Reinforced Jacketing. *Materials and Structures*, 49, 3957-3968.
- Cengiz, S., Kamanlı, M., Ünal, A., (2020). Investigation of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Produced with Self Compacting and Normal Concrete. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 8(2), 429-438.
- Chen, B., Liu, J., (2004). Properties of Lightweight Expanded Polystyrene Concrete Reinforced with Steel Fiber. *Cement and Concrete Research*, 34, 1259-1263.
- Chen, B., Liu, J., (2007). Mechanical Properties of Polymer-Modified Concretes Containing Expanded Polystyrene Beads. *Construction and Building Materials*, 21, 7-11.
- Chen, W., Hao, H., Hughes, D., Shi, Y., Cui, J., Li, Z.X., (2015). Static and Dynamic Mechanical Properties of Expanded Polystyrene. *Materials & Design*, 69, 170-180.
- Corradi, M., Mustafaraj, E., Speranzini, E., (2021). Sustainability Considerations in Remediation, Retrofit, And Seismic Upgrading of Historic Masonry Structures. *Environmental Science and Pollution Research*, <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17490-7>.

- Corradi, M., Tedeschi, C., Binda, L., Borri, A., (2008). Experimental Evaluation of Shear and Compression Strength of Masonry Wall Before and After Reinforcement: Deep Repointing. *Construction and Building Materials*, 22, 463-472.
- Del Zoppo, M., Ludovico, M.D., Prota, A., (2019). Analysis of FRCM and CRM Parameters for The In-Plane Shear Strengthening of Different URM Types. *Composites Part B*, 171, 20-33.
- FEMA356, (2000). Prestandards and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Virginia: Federal Emergency Management Agency.
- Ferrándiz-Mas, V., Bond, T., García-Alcocel, E., Cheeseman, C.R., (2014). Lightweight Mortars Containing Expanded Polystyrene and Paper Sludge Ash. *Construction and Building Materials*, 61, 285-292.
- Hou, H., Ji, K., Wang, W., Qu, B., Fang, M., Qiu, C., (2019). Flexural Behavior of Precast Insulated Sandwich Wall Panels: Full-Scale Tests and Design Implications. *Engineering Structures*, 180, 750-761.
- Kan, A., Demirboğa, R., (2009). A Novel Material for Lightweight Concrete Production. *Cement and Concrete Composites*, 31, 489-495.
- Karayolu Teknik Şartnamesi, (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Lee, J.H., Kang, S.H., Ha, J.Y., Hong, S.G., (2018). Structural Behavior of Durable Composite Sandwich Panels with High Performance Expanded Polystyrene Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12, 21.
- Longo, F., Cascardi, A., Lassandro, P., Aiello, M.A., (2021). Thermal and Seismic Capacity Improvements for Masonry Building Heritage: A Unified Retrofitting System. *Sustainability*, 13, 1111.
- Longo, F., Lassandro, P., Moshiri, A., Phatak, T., Aiello, M.A., Krakowiak, K.J., (2020). Lightweight Geopolymer-Based Mortars for The Structural and Energy Retrofit of Buildings. *Energy & Buildings*, 225, 110352.
- Manos, G.C., Melidis, L., Katakalos, K., Kotoulas, L., Anastasiadis, A., Chatziastrou, C., (2021). Masonry Panels with External Thermal Insulation Subjected to In-Plane Diagonal Compression. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00538.
- Mohamad, N., Omar, W., Abdullah, R., (2011). Precast Lightweight Foamed Concrete Sandwich Panel (PLFP) Tested under Axial Load: Preliminary Results. *Advanced Materials Research*, 250-253, 1153-1162.
- Morales-Alonso, G., Cendón, D.A., Gálvez, F., Erice, B., Sánchez-Gálvez, V., (2011). Analysis of the Fracture of Reinforced Concrete Flat Elements Subjected to Explosions. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 28, 433-438.
- Naito, C., Hoemann, J., Beacraft, M., Bewick, B., (2012). Performance and Characterization of Shear Ties for Use in Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels. *Journal of Structural Engineering*, 138, 52-61.
- O'Hegarty, R., Kinnane, O., (2020). Review of Precast Concrete Sandwich Panels and Their Innovations. *Construction and Building Materials*, 233, 117145.
- Roca, P., Araiza, G., (2010). Shear Response of Brick Masonry Small Assemblages Strengthened with Bonded FRP Laminates for In-Plane Reinforcement. *Construction and Building Materials*, 24, 1372-1384.
- Saheed, S., Amran, Y.H.M., El-Zeadani, M., Aziz, F.N.A., Fediuk, R., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., (2021). Structural Behavior of Out-of-plane Loaded Precast Lightweight EPS-Foam Concrete C-Shaped Slabs. *Journal of Building Engineering*, 33, 101597.
- Sayil, B., Gürdal, E., (1999). The Physical Properties of Polystyrene aggregated Gypsum Blocks. *Durability of Building Materials and Components*, 8, 496-504.
- Tunaboyu, O., (2017). Kısa Kolon Oluşumuna Neden Olabilecek Boşluksuz Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçeve Davranışının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle İrdelenmesi. Doktora Tezi. Anadolu Üniversitesi, Türkiye.
- Wibowo, A., Wijatmiko, I., Nainggolan, C.R., (2017). Bamboo Reinforced Concrete Slab with Styrofoam Lamina Filler as Solution of Lightweight Concrete Application. *Matec Web Conferences*, 101, 05012.
- Xiong, C., Chu, M., Liu, J., Sun, Z., (2018). Shear Behavior of Precast Concrete Wall Structure Based on Two-Way Hollow-Core Precast Panels. *Engineering Structures*, 176, 74-89.