

GEOFOAM BLOK ARAYÜZEY BASINÇLARININ ÖLÇÜMÜNDE ÇEŞİTLİ ALGILAYICI SİSTEMLERİN KULLANILMASI

THE USE OF VARIOUS SENSING SYSTEMS IN THE MEASUREMENT OF THE GEOFOAM BLOCK INTERFACE PRESSURES

Sezgin SARAK¹, A. Yasin BÜYÜKASLAN², Emre AKINAY³,
Hande Işık ÖZTÜRK⁴, A. Tolga ÖZER⁵

ÖZET

Geoteknik mühendisliği tasarımlarında dolgu ve benzeri yapıların yük dağıtım mekanizmasının doğru tahmini önem arz etmektedir. Servis yükleri altında bu mekanizmaları belirlemek için çeşitli algılayıcı sistemler kullanılmaktadır. Geoteknik mühendisliği uygulamalarında, bu sistemlerden toplam basınç plakası ve dokunsal algılayıcılar tercih edilmektedir. Toplam basınç plakaları ortalama gerilmeleri ölçen aygıtlar olup, dokunsal algılayıcılar ise bünyesindeki çok sayıda algılayıcı sayesinde basınç haritalaması yapabilen ve esnek yapısıyla düzensiz geometrik arayüzlerde de kullanılabilen aygıtlardır. Genleştirilmiş polistiren (EPS) blok (geofoam blok) dolgularının iç stabilite analizlerinde arayüzey basınç dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, toplam basınç plakası ve dokunsal algılayıcının geofoam blok arayüz basınçlarını belirlemedeki performansları laboratuvar ölçeğinde test edilmiştir. Prototip geofoam blokları temsil etmek amacı ile deneylerde 50 x 100 x 5 cm boyutlarında ve 30 kg/m³ yoğunluğunda EPS levhalar kullanılarak çeşitli konfigürasyonlar oluşturulmuştur. EPS levha arayüzlerinde oluşan basınçlar ayrıca iki boyutlu nümerik analizler ile hesaplanmış olup, ölçülen ve hesaplanan arayüz basınçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Laboratuvar ölçekli deneylere ve nümerik modellere dayanan bu çalışma, geleneksel toplam basınç plakasının ve dokunsal algılayıcının EPS levha arayüzey basınçlarının belirlenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir. Deney sonuçları, bu algılayıcıların prototip geofoam blok dolguların arayüzlerinde kullanılabilmelerine ışık tutmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Arayüzey, basınç, dokunsal algılayıcı, basınç plakası

¹ Araştırma Görevlisi, Gebze Teknik Üniversitesi, sezginsarak@gtu.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Yüksek Lisans Öğrencisi, Gebze Teknik Üniversitesi, a.buyukaslan2021@gtu.edu.tr

³ Projelendirme Yöneticisi, İstanbul Teknik İnşaat, emreakinay@istanbulteknik.com

⁴ Doç. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, ozturkha@metu.edu.tr

⁵ Doç. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, tolgaozer@gtu.edu.tr

ABSTRACT

Accurate estimation of the load distribution mechanism of embankments and similar structures is important in geotechnical engineering designs. Various sensor systems are used to capture these mechanisms under service loads. The total earth pressure cell and tactile sensors are preferred among these systems in geotechnical engineering applications. While the total earth pressure cells designed to measure the average stresses, the tactile sensors allow pressure mapping thanks to the many sensing points in their body and can also be used in irregular geometric interfaces with their flexible structure. Interface pressure distribution needs to be predicted for the internal stability analysis of expanded polystyrene (EPS) block (geofoam block) embankments. In this study, the performances of the total earth pressure cell and the tactile sensor in quantifying the geofoam block interface pressures were tested on laboratory-scale. In order to represent the prototype geofoam blocks, different configurations were tested by using EPS boards with the dimensions of 50 cm x 100 cm x 5 cm and density of 30 kg/m³. The pressures measured at the interfaces of EPS boards were also estimated by two-dimensional numerical analyses, and compared with measured values. Based on laboratory-scale experiments and numerical models, this study showed that conventional total earth pressure cells and tactile sensors can be used to capture interface pressures in between EPS boards. The experimental results shed light on the use of these sensors at the interfaces of prototype geofoam block embankments.

Keywords: *Interface, pressure, tactile, total earth pressure cell*

1. GİRİŞ

Temas halindeki iki unsurun birbiri ile etkileşimi sonucunda bir temas alanı ve bu alan üzerinde gerilme meydana gelmektedir. Oluşan gerilmenin ve temas alanının belirlenebilmesi için farklı mühendislik dalları farklı yöntemlere başvurmaktadır. Bu yöntemler; ince kağıt film, toplam basınç plakası ve dokunsal algılayıcılar olarak sınıflandırılabilir (Sümer, 2019). İki katı cisim arasına yerleştirilen ince kağıt filmler, yük etkisi altında meydana gelen renk yoğunluğu ve değişimi ile yükün mertebesini belirlemede kullanılır. Ancak bu ölçüm yöntemi, yalnızca etkiyen yükün maksimum değerini sağladığı ve herhangi bir yazılıma entegre edilemediği için kullanımı zorluklar içermektedir. Bununla birlikte, toplam basınç plakası ve dokunsal algılayıcılar, tekrarlanabilir okuma alımına elverişli olması, dijital ortamda veri alınabilmesi ve arşivlenebilmesi gibi avantajları nedeni ile daha çok tercih edilmektedir (Olmstead ve Fischer, 2009).

Geleneksel geoteknik mühendisliği uygulamalarının bir örneği olarak, Miura vd. (2003) toplam basınç plakalarının boyut etkisini granüler zeminlerde incelemişlerdir. Çalışmaları kapsamında dört farklı boyutta toplam basınç hücresi hem kum hem de çakıl ağırlıklı granüler malzemelerde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, uygun basınç plakası boyutu dane çapının bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

Ruttanaporamakul (2014) biri EPS altı tesviye kumu üzerine, biri EPS dolgunun üzerine gömülü olarak, ikisi ise köprü yaklaşım kenar ayaklarına yatay ve düşey yerleştirmek suretiyle dört adet toplam basınç plakasını arayüzey basınç ölçümü için kullanmıştır. Puppala vd. (2019) Cleburne, Texas eyaletinde köprü yaklaşım döşemesinde meydana gelen

aşırı oturmaların EPS Geofom blok ile iyileştirme çalışmaları kapsamında toplam basınç plakalarını kullanarak arayüz basınç okumaları gerçekleştirilmiştir. Bu okumalardan elde edilen sonuçları nümerik analizler ile karşılaştırarak güvenilir sonuçlar elde ettiğini belirtmişlerdir.

Dokunsal algılayıcıların kullanımı ile ilgili olarak Palmer vd. (2009) kayma kuvvetlerinin baskın olduğu yapı-zemin etkileşimini değerlendirmek üzere laboratuvar ölçeğinde bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma neticesinde algılayıcıların, oluşan yüklerden hasar alabileceği ve hatalı sonuçlar verebileceği için algılayıcı etrafı koruma katmanı gerekliliğini ortaya koymuşlardır. Koruma katmanı kullanımı ile elde edilen test sonuçlarına dayanarak dokunsal basınç algılayıcılarının büyük ölçekli laboratuvar ve zemin-yapı etkileşiminin santrifüj testlerinde normal gerilmelerin güvenilir ölçümü için uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Gillis (2013) dokunsal algılayıcıları, geoteknik santrifüj modelleriyle kalibre etmek amacı ile iki kalibrasyon yöntemi üzerinde çalışmıştır. Benzer şekilde Paikowsky vd. (2006) dokunsal algılayıcıların geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanımının, ürünün inovasyonu nedeni ile kalibrasyon gerektirdiğini ortaya koymuş ve buna yönelik farklı yöntemler ile kalibrasyon çalışmaları yapmıştır. Gao ve Wang (2013) ise kısa ve uzun dönem yükleme koşullarında, zemin-zemin arayüzünde dokunsal algılayıcının kalibrasyonu üzerine çalışmıştır.

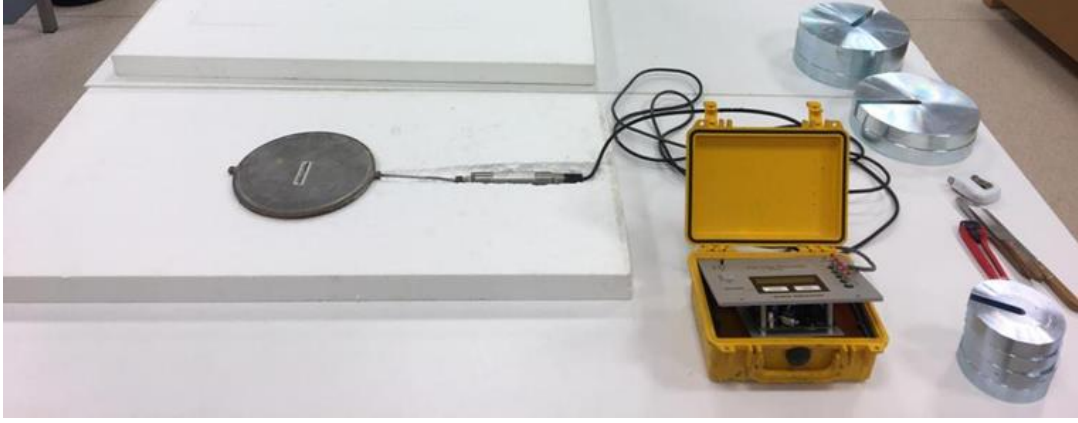
Taşıma gücü ve oturma problemlerine karşı otoyol projelerinde hafif dolgu olarak sıklıkla uygulanan geofom blok dolgularının; servis yüklerini güvenli bir şekilde taşıyabilmesi için inşaat süresince ve ekonomik ömrü boyunca meydana gelen deformasyonların izin verilebilir sınırlar içerisinde olması, iç duraylılık tasarımının ana hedefidir (Stark vd., 2004a). İç stabilize hesaplarının güvenle yapılabilmesi için ise, üst yapı tabanında (geofom blok dolgu yüzeyinde) ve geofom blok dolgu bünyesinde (her bir geofom blok sırasında) yük aktarım mekanizmalarının ortaya konması gerekmektedir. Amerikan Ulusal Otoyol Araştırma Programı Birliği (NCHRP), farklı üst yapı sistemleri için, uygulanan teker yüküne karşılık üst yapı tabanındaki düşey gerilme artışını veren tasarım abakları sunmaktadır (Stark vd., 2004b). NCHRP tarafından önerilen abaklar; elastik teoriye dayanmasının yanı sıra, üst yapıdan aktarılan teker yükünün, bir eşdeğer dikdörtgen alana etki ettiği varsayımına da dayanmaktadır. Ayrıca, üst yapı tabanında bir eşdeğer dikdörtgen alan üzerine etki ettiği varsayılan düşey yükün, geofom blok dolgu içerisinde 1Y:2D eğimle dağıldığı varsayılmaktadır. Frydenlund ve Aabøe, (2001) ise laboratuvar ölçeğinde inşa edilen bir geofom blok dolgunun üzerine statik düşey yük uygulamak suretiyle, uygulanan düşey yükün dolgu tabanına 1Y:1.8D eğimle dağıldığı ortaya koymuşlardır. Dolayısı ile etkiyen düşey yükün geofom blok bünyesindeki dağılım mekanizmasının belirlenmesi hem laboratuvar hem de prototip ölçekli çalışmaların gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, geofom blok arayüz basınçlarının belirlenmesinde toplam basınç plakası ve dokunsal algılayıcı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen laboratuvar ölçekli deneylerde ölçülen malzeme tepkisini ve yük dağıtım mekanizmasını değerlendirmek amacı ile iki boyutlu sayısal modeller oluşturulmuştur. DeneySEL ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçların ışığında, toplam basınç plakalarının ve dokunsal algılayıcıların EPS levha arayüz basınçlarının tayininde kullanılabilirliği tartışılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Toplam Basınç Plakası

Toprak dolgular, barajlar, gömülü boru hatları, kazı duvarları, menfezler, tüneller ve demiryolu hatları gibi birçok mühendislik tasarımında toplam basınç plakasının kullanılabilirliği birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur (Miura vd., 2003; Talesnick vd., 2013). Toplam basınç plakaları, zemin-zemin ve zemin-yapı arayüzlerine ek olarak EPS-EPS ve EPS-zemin arayüzlerinde de kullanılmıştır. Sağladığı güvenilir sonuçların yanı sıra ölçüm; zeminin ve basınç plakasının rijitlik farkından, zemin ortalama dane çapından, plakanın boyutlarından ve yerleşim yönteminden etkilenmektedir (Miura vd., 2003).



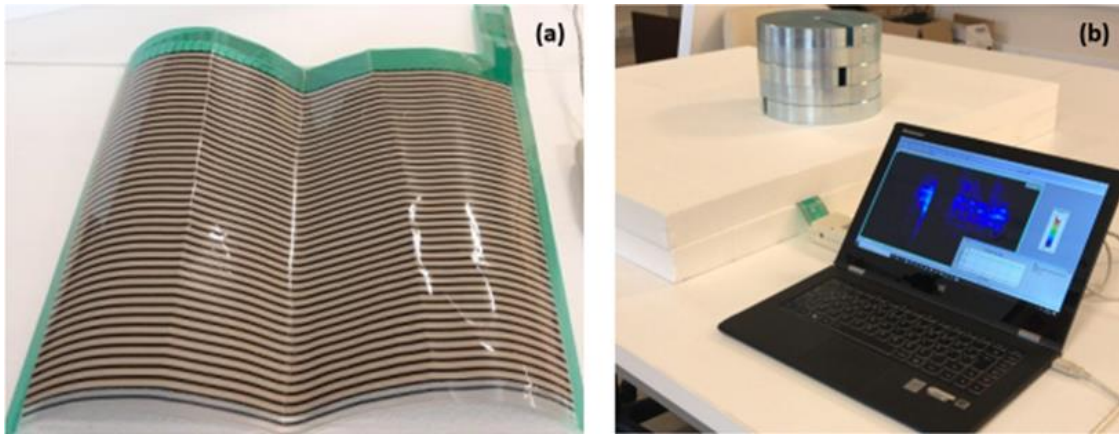
Şekil 1. Toplam basınç plakasının EPS-EPS arayüzündeki performansını incelemek için yapılan laboratuvar çalışması

Bu çalışmada kullanılan toplam basınç plakası ve veri toplayıcı Şekil 1’de sunulmuştur. Toplam basınç plakası; titreşen tel dönüştürücülü (vibrating-wire transducer) tip basınç plakasıdır. Bu basınç plakası; arasında bir hidrolik sıvı yer alan iki adet 22 cm çaplı, paslanmaz, rijit çelik plakadan ve bu plakalara bağlı bir dönüştürücü kutusundan oluşmaktadır. Dönüştürücü hidrolik sıvıdaki basıncı frekansa dönüştürür. Titreşen tel frekansları bir kablo aracılığı ile veri toplayıcıya aktarılır. Veri toplayıcının sunduğu frekans (Hz) ve temas yüzeyi sıcaklığı (°C) değerlerinin kalibrasyonu ile basınç tahmini gerçekleştirilir. Deneysel çalışmada; düzgün, rijit bir yüzey üzerine bir adet EPS levha ve bu levhanın üzerine de toplam basınç plakası yerleştirilmiştir. Toplam basınç plakasının üzerine ise; EPS yük aktarım mekanizmasının incelenmesi amacı ile 5, 10 ve 20 cm olmak üzere üç farklı kalınlıkta EPS yerleştirilmiştir. Yük, Şekil 1’de görülen geleneksel konsolidasyon deney ağırlıkları ile uygulanmış olup, uygulanan yüke karşı plaka üzerine etkileyen basınç gerilmesi veri toplayıcı tarafından toplanan frekans ve sıcaklık değerlerine göre elde edilmiştir.

2.2. Dokunsal Algılayıcılar

Toplam basınç hücrelerine alternatif olarak günümüzde genellikle robotik, otomasyon, otomotiv ve makine endüstrilerinde kullanılan; uygulama özelinde çeşitli boyutlarda ve şekillerde üretilebilen; gerinim ölçer (strain gauge) benzeri esnek, ince plaka formunda;

bünyesinde binlerce algılama noktası bulunan dokunsal (tactile) basınç algılayıcılar geliştirilmiştir. Bünyesindeki binlerce algılama noktası sayesinde, algılayıcı yüzey alanına etkiyen gerilmelerin haritalanması, algılayıcıya bağlı bir yazılım kullanılarak kolaylıkla yapılabilmektedir. Dokunsal basınç algılayıcıları, geleneksel basınç hücrelerine göre çok daha ince, esnek ve geniş olması sayesinde; geleneksel basınç hücreleri ile ölçümün olanaklı olmadığı farklı, düzensiz geometrilere sahip birçok yüzeyde basınç ölçümünü olanaklı kılmaktadır. Toplam basınç hücrelerine göre yukarıda değinilen avantajlarından dolayı, dokunsal basınç algılayıcıları geoteknik mühendisliği uygulamalarında statik ve dinamik basınçların ve bunun yanı sıra arayüzey basınçlarının da haritalanmasında başarı ile kullanılmaktadırlar (Gills vd., 2015; Gillis, 2013; Gao ve Wang, 2013; Tessari vd., 2010; Palmer vd., 2009; Olmstead ve Fischer, 2009; Paikowsky vd., 2006).



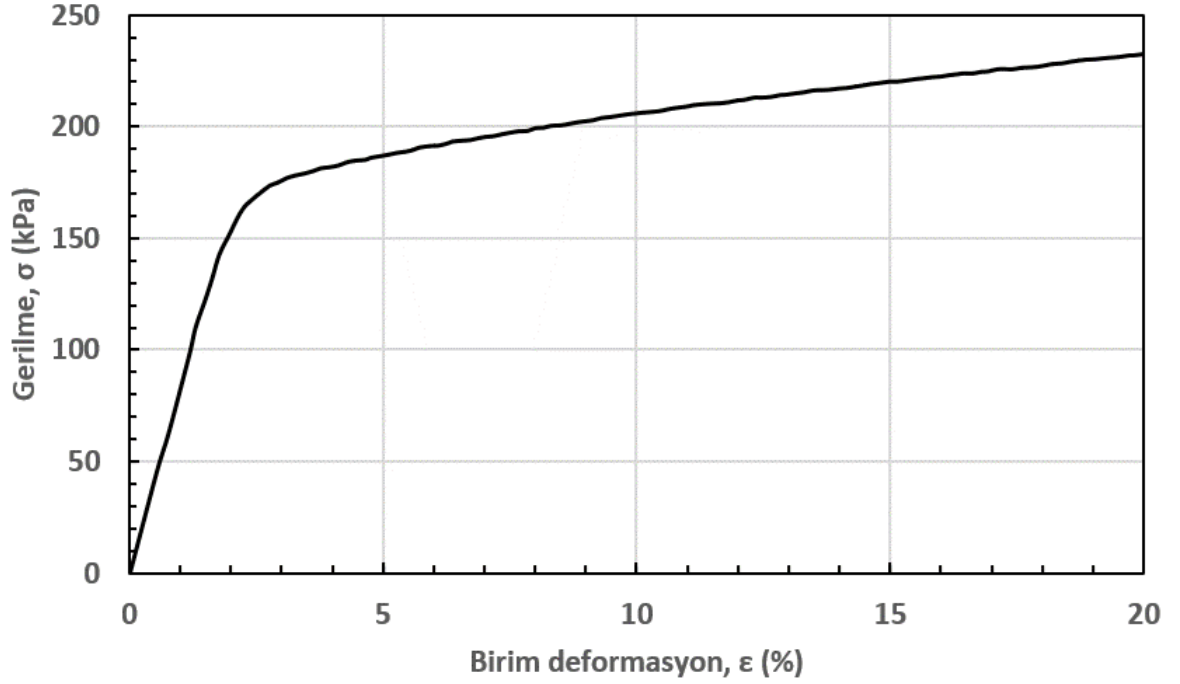
Şekil 2. Dokunsal algılayıcının EPS-EPS arayüzündeki performansını incelemek için yapılan laboratuvar çalışması (a) dokunsal algılayıcı (b) düşey yük uygulaması

Bu çalışmada, Şekil 2’de verilen 46.5 cm (en) x 46.5 cm (boy) x 0.03 cm (kalınlık) boyutlarında bir adet dokunsal basınç algılayıcısı üzerine, her biri 10 kgf ağırlığında olan 5 adet geleneksel konsolidasyon deney ağırlığı ile toplam 5 x 10 = 50 kgf büyüklüğünde bir statik düşey yük uygulanmıştır. Aynı deney konfigürasyonları için arayüzey basınçları dokunsal algılayıcılar ile de ölçülmüş ve ölçülen değerler hem toplam basınç plakası ölçümleri hem de sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2.3. EPS Geofoam

Prototip geofoam blokları temsil etmek amacı ile deneylerde 50 x 100 x 5 cm boyutlarında ve 30 kg/m³ yoğunluğunda EPS levhalar kullanılmıştır. Farklı konfigürasyonlar elde etmek için toplam basınç plakası ve dokunsal algılayıcı üzerindeki EPS kalınlığı değiştirilmiştir. EPS levha kalınlığı 5 cm olduğundan, algılayıcı üzerinde 5, 10 ve 20 cm kalınlıklar elde etmek amacı ile sırasıyla 1, 2 ve 4 adet levha kullanılmıştır. Kullanılan EPS levha malzemesine ait fiziksel ve mekanik özellikler için asgarî performans kriterleri ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi, Tablo 1 ve Şekil 3’te verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan EPS levha malzemesinin asgarî fiziksel ve mekanik özellikleri

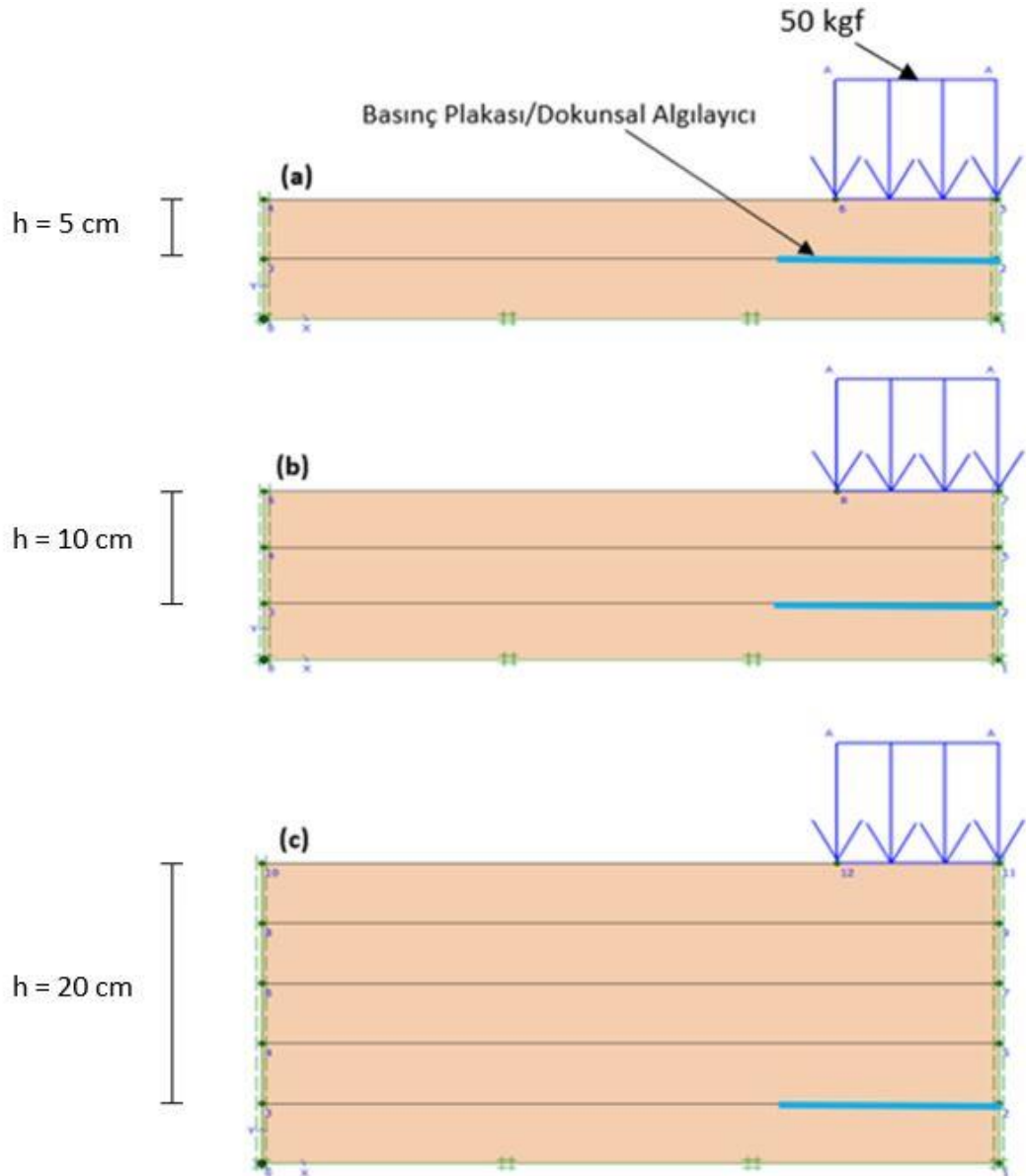
Şekil 3. 30 kg/m³ yoğunluklu EPS levhanın gerilme-birim şekil değiştirme performansı

2.4 Sayısal Analizler

Laboratuvar ölçeğinde toplam basınç plakası ve dokunsal algılayıcı kullanılarak gerçekleştirilen yükleme deneylerindeki yük dağıtım mekanizmasını değerlendirmek amacı ile PLAXIS 2D yazılımı ile iki boyutlu sayısal modeller oluşturulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Yükleme koşulları ve sistem geometrisi simetrik olduğundan, sistem eksenel simetrik olarak modellenmiştir. EPS levhanın altında yer alan düzgün, rijit yüzeyi temsil etmek amacı ile model tabanında düşey deplasmanı engelleyecek ve model yan sınırlarında ise düşey harekete izin verecek şekilde sınır koşulları atanmıştır. Yükleme deneylerinde EPS için tanımlanmış olan elastik deformasyon limiti (%1 birim boy kısalmadaki basınç dayanımı, Tablo 1, Şekil 3) üzerinde bir yükleme yapılmamıştır. Bu nedenle, EPS davranışının modellenmesi için doğrusal elastik malzeme modeli seçilmiştir. EPS için girilen doğrusal elastik malzeme parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 4’te üç farklı konfigürasyon için oluşturulmuş EPS levha katmanları ($h = 5, 10$ ve 20 cm) ile birlikte yükleme ve sınır koşulları verilmiştir. Düşey yük, laboratuvar deneylerinde uygulanan adımlar ile modele uygulanmıştır. Toplam basınç plakası ve dokunsal algılayıcı yerleşimi ise temsilen şekil üzerinde gösterilmiştir.

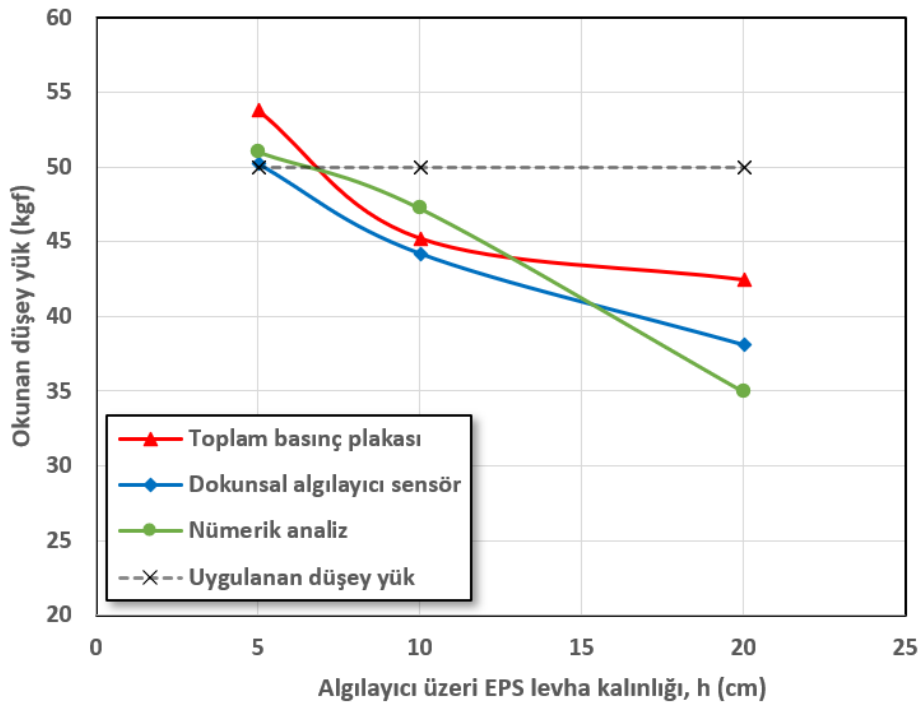
Tablo 2. Nümerik analiz malzeme parametreleri

Malzeme modeli	Lineer elastik
Doğal birim hacim ağırlık, γ_n (kN/m ³)	0,282
Doygun birim hacim ağırlık, γ_{sat} (kN/m ³)	0,282
Elastisite modülü, E (kN/m ²)	7500
Poisson oranı, ν	0,120
$R_{arayüzey}$	1,000



3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Laboratuvar deneylerinde her bir konfigürasyon için ($h = 5, 10$ ve 20 cm) EPS-EPS arayüzeyinde oluşan basınç artışları okunmuş ve oluşturulan sayısal modellerin çalıştırılması ile arayüzeyde ve model bünyesinde oluşan gerilmeler hesaplanmıştır. Algılayıcılardan alınan okumalar ve sayısal analizlerden hesaplanan değerler Şekil 5'te sunulmuştur. Farklı ölçüm yöntemleri ile elde edilen tüm yük değerlerinin EPS levha katman kalınlığıyla azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla EPS dolgu içerisinde sönümlenmesi beklenen düşey yük, tüm ölçüm yöntemlerinde (toplam basınç plakası, dokunsal algılayıcı ve sayısal analiz) beklenene paralel şekilde elde edilmiştir. Bununla birlikte, $h = 5$ cm durumunda algılayıcılar uygulanan yükten daha yüksek bir değer vermiştir. Bir adet EPS levhanın (50 cm x 100 cm x 5 cm x 30 kg/m³) $0,75$ kgf olduğu düşünüldüğünde, algılayıcı üzerinde bir sıra levha yer alması durumunda, basınç plakası ve dokunsal algılayıcı için, uygulanan yükten (50 kgf) daha büyük yüklerin okunması makul karşılanabilir. Öte yandan, algılayıcı üzerinde iki ve dört sıra EPS levha yer alması durumunda sırasıyla $1,50$ ve $3,00$ kgf ilave malzeme yükü olmasına rağmen, yükün EPS içerisinde sönümlenerek yayılması nedeni ile daha düşük değerler okunmuştur. Bu durum, sayısal analiz sonuçlarıyla da eşleşmektedir. Önem arz eden diğer bir husus ise, her bir yöntemin aynı konfigürasyonda verdiği sonuçlar arasındaki ilişkidir. Öyle ki, tüm sonuçlar görece küçük EPS dolgu kalınlığı ($h = 5$ cm ve $h = 10$ cm) için birbirine oldukça yakın iken (sonuçlar arasındaki fark %5'ten küçük), EPS levha kalınlığının görece yüksek olduğu ($h = 20$ cm) durumda birbirinden uzaklaşmaktadır (sonuçlar arasındaki fark yaklaşık %20 mertebesinde). Bununla birlikte, sayısal analiz hariç tutularak toplam basınç plakası ve dokunsal algılayıcı okumaları birbiriyle karşılaştırıldığında, algılayıcı üzerindeki katman kalınlığına bağlı olarak, tüm konfigürasyonlarda okunan değerler arasındaki fark %10'u geçmemiştir. Yani iki yöntem sonuçları %90 üzerinde eşleşmiştir.



Şekil 5. Laboratuvar deneyleri ve nümerik analizlerin karşılaştırması

4. SONUÇLAR

EPS-EPS arayüz basınçlarını farklı algılayıcı sistemleri ile prototip ölçeğinde tahmin etmek amacı ile gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ve gerçekleştirilen sayısal analizler, her iki algılayıcı sisteminin de arayüz basınç tahmininde iyi bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar; bu sistemlerin prototip ölçeğinde, EPS Blok-EPS Blok ve EPS Blok-zemin arayüzlerinde de kullanılabilirliğine ışık tutmaktadır. Düzensiz geometrilerde kullanım ve basınç haritalama gereksinimi olan projeler için dokunsal algılayıcılar daha avantajlı iken özellikle granüler zeminlerde köşeli daneli malzemelerin yırtma etkisinden etkilenmemesi nedeni ile toplam basınç plakası, dayanıklılığı sayesinde avantajlı olabilmektedir. Deney sonuçları; EPS dolgu bünyesindeki yük dağılım mekanizmasının doğrudan ortaya konulamayacağını, buna karşın, algılayıcıların EPS dolgu içerisindeki sönümleme mekanizmasını açıkça ortaya koyduğunu göstermektedir. Dahası, özellikle küçük EPS dolgu kalınlığı ($h = 5$ cm ve $h = 10$ cm) durumunda elde edilen değerlerin hem birbiriyle hem de sayısal analiz sonuçlarıyla uyumu, arayüz basınçlarının ölçümünde algılayıcı kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, görece daha kalın EPS dolgularında; hem algılayıcı çalışma mekanizmasının daha iyi kavranması hem de yük dağılım ilişkisinin ortaya konulması, yükün kademeli olarak yüklendiği ve daha yüksek mertebelere ulaştığı prototip ölçekli saha deneyleri gerektirmektedir.

KAYNAKLAR

- ASTM International. (2017), "D6817/D6817M-17 Standard specification for rigid cellular polystyrene geofoam", West Conshohocken, PA; ASTM International.
- Frydenlund, T. E., Aabøe, R. (2001), "Long term performance and durability of EPS as a lightweight filling material", In: 3rd Conference International EPS Geofoam.
- Gao, Y., Wang, Y.H. (2013), "Calibration of Tactile Pressure Sensors for Measuring Stress in Soils", Geotechnical Testing Journal, 36 (4).
- Gillis, K. M. (2013), "Tactile Pressure Sensor Calibration Methods and Data Analysis for Geotechnical Centrifuge Modeling", M.Sc. Thesis, University of Colorado at Boulder.
- Gillis, K. M., Dashti, S., ve Hashash, Y. M. A. (2015), "Dynamic calibration of tactile sensors for measurement of soil pressures in centrifuge", Geotechnical Testing Journal, 38 (3), 261-274.
- Miura, K., Otsuka, N., Kohama, E., Supachawarote, ve C., Hirabayashi, T. (2003), "The size effects of earth pressure cells on measurement in granular materials", Soils and Foundations, 43 (5), 133-147.
- Olmstead, T., Fischer, E. (2009), "Estimating Vertical Stress on Soil Subjected to Vehicular Loading", US Army Corps of Engineers, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, ERDC/CRREL TR-09-2 Report.
- Paikowsky, S. G., Parmer, C. J., ve Rolwes, L. E. (2006), "The Use of Tactile Sensor Technology for Measuring Soil Stress Distribution", Proceedings of Geo Congress 2006-Geotechnical Engineering in the Information Technology Age, Atlanta, GA, D. J. DeGroot, J. T. DeJong, D. Frost and L. G. Baise, Eds., ASCE, Reston, VA, 518-523.

- Palmer, M. C., O'Rourke, T. D., Olson, N. A., Abdoun, T., Ha, D., ve O'Rourke, M. J. (2009), "Tactile Pressure Sensors for Soil-Structure Interaction Assessment", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (11), 1638–1645.
- Puppala, A.J., Ruttanapornmakul, ve P., Congress, S.S.C. (2019), "Design and construction of lightweight EPS geofoam embedded geomaterial embankment system for control of settlements", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 47, 295-305.
- Ruttanapornmakul, P. (2014), "Evaluation of lightweight geofoam for mitigating bridge approach slab settlements", PhD. Thesis, The University of Texas at Arlington, USA.
- Sümer, B. (2019), "Piezodirenç Dokunsal Algılayıcı Karakteristikleri Hakkında Kapsamlı Bir Çalışma", *Fen Bilimleri Dergisi*, Part C, 7(2): 344-358.
- Stark, T. D., Arellano, D., Horvath, J. S., ve Leshchinsky, D. (2004a), "Geofoam applications in the design and construction of highway embankments", NCHRP Web Document 65 (Project 24-11).
- Stark, T. D., Arellano, D., Horvath, J. S., ve Leshchinsky, D. (2004b), "Guideline and recommended standard for geofoam applications in highway embankments", NCHRP Report 529, Transportation Research Board, Washington, DC, USA.
- Talesnick, M.L., Ringel, M., ve Avraham, R. (2013), "Measurement of contact soil pressure in physical modelling of soil–structure interaction", *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol 14, Issue 1, 3-12.
- Tessari, A., Sasanakul, I., ve Abdoun, T. (2010), "Advanced sensing in geotechnical centrifuge models", *Proceedings of 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, Zurich, Switzerland, S. Springman, J. Laue, and L. Seward, Eds., CRC Press, Boca Raton, FL, 395-400.

SEMBOL LİSTESİ

γ_n	Doğal birim hacim ağırlık	ν	Poisson oranı
γ_{sat}	Doygun birim hacim ağırlık	R	Etkileşim katsayısı
E	Elastisite modülü		