

3B-BASKILI HÜCRESEL DOLGU SİSTEMİ İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ ŞERİT TEMELLERİN FARKLI YÜKLEME KOŞULLARI ALTINDAKİ DAVRANIŞI

BEHAVIOR OF STRIP FOUNDATIONS REINFORCED WITH 3D-PRINTED GEOCELLS UNDER VARYING LOADING CONDITIONS

Sarper DEMİRDÖĞEN¹, Ayhan GÜRBÜZ², Kaan YÜNKÜL³

ÖZET

Laboratuvar deneylerinde ölçeklenmemiş hücresel dolgu sistemlerinin kullanılmasından dolayı, model deneylerden elde edilen sonuçların sahaya nasıl uyarlanacağı geosentetik mühendisliğinde uzun süredir var olan bir sorundur. Bazı araştırmalarda kağıt ve dokusuz geotekstil gibi daha düşük mukavemetli alternatif malzemeler kullanılarak hücresel dolgu sistemleri ölçeklenmeye çalışılsa da bu durum malzeme rijitliğinin ölçeklenmesindeki zorluklar nedeniyle kapsamlı şekilde ele alınmamıştır. Bu çalışma kapsamında hücresel dolgu geometrisi ve malzeme modülü, üç boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak ölçek yasasına uygun şekilde ölçeklenmiştir. Mevcut çalışmada fabrikasyon veya 3B-baskılı hücresel dolgu sistemleri ile güçlendirilmiş şerit temellerin yük-oturma ve iyileştirme katsayısı açısından performansı ele alınmıştır. Çalışma sonuçları, küçük ölçekli deneylerde bulunan 9 kata kadar olan iyileştirme faktörünün aksine, büyük ölçekli deneylerle uyumlu olarak iyileştirme katsayısının yaklaşık 1.5-2 olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, küçük ölçekli model deneylerde hücresel dolgu sistemlerin ölçeklenmesi konusunda uzun süredir devam eden zorluklara çözüm getirmekte ve 3B-baskılı hücresel dolgu sistemlerinin geoteknik mühendisliğinde uygulanması ve optimize edilmesi için yeni bakış açıları sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hücresel dolgu sistemleri, 3-B baskı, Geosentetik, Şerit temel, Ölçek etkisi

ABSTRACT

The use of non-scaled geocell systems in laboratory experiments has long posed a challenge in geosynthetic engineering regarding how to adapt the results of model tests to field conditions. Although some studies have attempted to scale geocell systems using lower strength alternative materials such as paper and non-woven geotextile, this issue has not been comprehensively addressed due to the difficulties in scaling material stiffness. In this study, geocell geometry and material modulus were scaled in accordance with scaling laws

¹ Doktora adayı, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, sarper.demirdogen@gazi.edu.tr

² Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, agurbuz@gazi.edu.tr (Sorumlu yazar)

³ Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, Türkiye, kaanyunkul@gmail.com

using three-dimensional printing technology. The performance of strip footings reinforced with either fabricated or 3D-printed geocell systems was evaluated in terms of load-settlement behavior and improvement factor. The study results revealed that, contrary to the improvement factors up to 9-fold found in small-scale experiments, the improvement factor was approximately 1.5-2, consistent with large-scale experiments. These findings address the longstanding challenges of scaling geocell systems in small-scale model tests and offer new perspectives for the application and optimization of 3D-printed geocell systems in geotechnical engineering.

Keywords: Geocell, 3D-printing, Geosynthetic, Strip footing, Scale effect

1. GİRİŞ

Geocellerin zeminleri iyileştirmedeki rolü, sürdürülebilir inşaat ve altyapı geliştirme alanında önemli bir konu olarak ortaya çıkmıştır. Bal peteği yapısına sahip olan geocell, zeminlerin mekanik özelliklerini etkili bir şekilde iyileştirerek temellerin taşıma gücünü artırır ve oturmalarını azaltır. Bu iyileştirme zemin danelerinin yanal hareketini sınırlandırma, temel basıncını daha geniş bir alana dağıtma ve zemin daneleri ile geocell duvar yüzeyi arasındaki sürtünmeyi artırmayla sağlanır (Gurbuz ve Mertol, 2012; Sitharam vd., 2020). Geocellin bu avantajlarına rağmen laboratuvar deney sonuçlarının prototip veya büyük ölçekli saha uygulamalarına yansıtılmasındaki ölçeklendirme sorunu, geocell güçlendirilmiş temel sistemlerinin davranışının ve iyileştirme etkilerinin tam olarak anlaşılmasında önünde büyük bir engeldir.

Model deneyler gerçekleştirirken her bir elemanın geometrik olarak ölçeklenmesi önemlidir. Ancak benzerlik yasasına göre sadece boyutların ölçeklendirilmesi yeterli değildir; malzeme özelliklerinin, örneğin çekme dayanımı ve modülünün de ayarlanması gerekir. Geocellerle ilgili yapılan son araştırmalar ve hazırlanan şartnameler, hammadde ve geometrik özelliklerin güçlendirme etkisindeki en önemli faktörler olduğunu göstermektedir (Vega vd., 2018; Sitharam vd., 2020). Dolayısıyla model deneylerde geocell ile güçlendirilmiş sistemleri araştırırken hem malzeme özelliklerinin hem de geometrinin ölçeklendirilmesi gerekir. Literatürdeki birkaç çalışma (Chen ve Chiu, 2008; Kargar ve Hosseini, 2017) daha düşük dayanımlı alternatif malzemeler kullanarak geocelleri ölçeklendirmeye çalışmış olsa da geocell ile güçlendirilmiş temel sistemlerinde hem geometriyi hem de malzeme modülünü kapsamlı bir şekilde inceleyen bir araştırma yapılmamıştır.

1980'lerin ortalarında ortaya çıkan üç boyutlu (3B) baskı, devrim niteliğinde bir teknolojik yenilik olarak kabul edilmiştir. 3B baskı teknolojisinin ortaya çıkışı, geoteknik mühendisliğini önemli ölçüde etkileyerek geosentetik malzemelerin geliştirilmesi ve özelleştirilmesini sağlamıştır. Son zamanlarda 3B baskı, prototip davranışını simüle etmek için geosentetik araştırmalarda da kullanılmaktadır. Stathas vd. (2017) küçük ölçekli laboratuvar deneyleri için geometrik ve çekme mukavemeti açısından uygun şekilde ölçeklendirilmiş model geogridleri incelemişlerdir. Arab vd. (2020) biyolojik 3B baskılı bal peteği geogridlerin model deneylerdeki iyileştirme faktörlerine olan etkisini ele almıştır. Zhang vd. (2023) ise yol alt temel tabakalarında hem güçlendirme hem de deformasyon izleme için yenilikçi fiber Bragg

kafesli (FBG) 3B baskılı geogridler kullanmıştır. Öte yandan 3B baskılı geocellerin ölçeklendirme amaçları için kullanılmasına yönelik çalışmalar sınırlı sayıdadır.

Bu çalışmanın temel amacı 3B baskılı geoceller ile güçlendirilmiş şerit temellerin ölçeklendirme sorununu ele almaktır. Burada öncelikle hem geometri hem de geocell malzeme modülü, benzerlik yasası ile ölçeklendirilerek 3B baskı teknolojisi ile üretilmiştir. Daha sonra fabrikasyon ve 3B baskılı geoceller ile güçlendirilmiş temellerin performansını değerlendirmek için küçük ölçekli deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler özellikle temel yük-oturma performansını ve iyileştirme faktörlerine odaklanmıştır. Geocellerin ölçeklendirilmesi, bu malzemelerin saha uygulamalarını daha doğru bir şekilde temsil etmesini sağlayarak bu araştırmanın geocell güçlendirme alanında önemli katkılar sunmasına olanak tanıyacaktır.

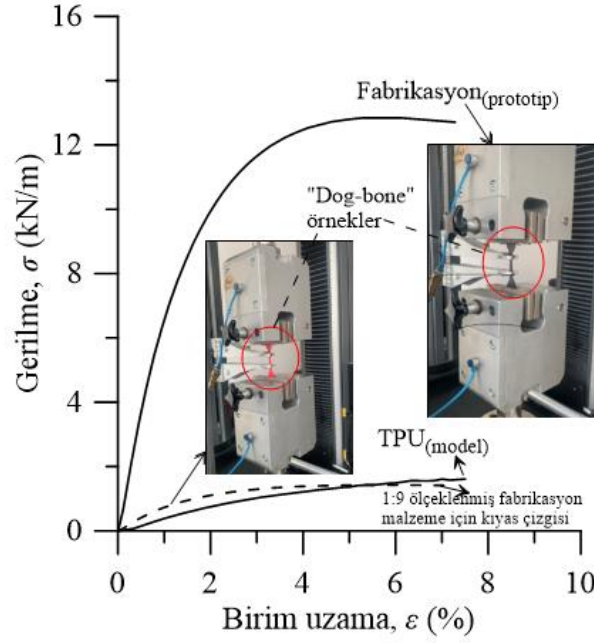
2. BOYUT ANALİZİ VE ÖLÇEK KATSAYISI

Küçük ölçekli laboratuvar deneyleri, hızlı sonuçlar elde edilmesi ve davranışa hakim parametrelerin belirlenmesine olanak tanıdığı için büyük ölçekli deneylere tercih edilmektedir. Ancak ölçek etkisi nedeniyle küçük ölçekli model deney sonuçları, büyük ölçekli deneylerden farklılık gösterebilir. Bu etkiyi azaltmak ve prototip performansını öngörmek için boyutsal analiz ve ölçek yasası detaylı bir şekilde incelenir (Iai, 1989; Wood, 2004; Demirdöğen vd., 2024b). Genellikle model deney sonuçlarının prototip sonuçları açısından yorumlamak için boyutsal analiz yapılmaktadır.

Bu çalışmada model deneylerde ölçek katsayısı 3 ($n=3$) seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ölçeklendirme yöntemi, model deneylere kıyasla geometrik olarak üç kat ($n=3$) ve geocellin sekant modülü açısından dokuz kat ($n^2=9$) daha büyük prototip yapıları temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Örneğin bu çalışmada 100 mm genişliğindeki (B) temel ve 50 kN/m sekant modülünü geocell, genişliği 300 mm ($B = 100 \text{ mm} \times 3$) ve 450 kN/m ($E_s = 50 \text{ kN/m} \times 9$) sekant modülüne sahip geocell ile güçlendirilmiş prototip yapıyı (örneğin, sığ şerit temel veya istinat duvarı temeli) temsil etmektedir.

3. MODEL GEOCELL VE 3B-BASKI

Geometrik ve malzeme özellikleri açısından geocellerin ölçeklendirilmesi için 220 x 220 x 250 mm baskı hacmine, 1.75 mm filament boyutuna, 0.4 mm tek nozüle ve 180 mm/s maksimum baskı hızına sahip bir 3B yazıcı kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında HDPE geocellerin davranışına benzer, ancak ölçek katsayısı gereği çok daha düşük mukavemete sahip bir filament seçmek amacıyla birçok filament türü denenmiştir. Sonuç olarak ticari olarak temin edilebilenler arasında en düşük çekme mukavemetine sahip filament olan Termoplastik Poliüretan (TPU) tercih edilmiştir.



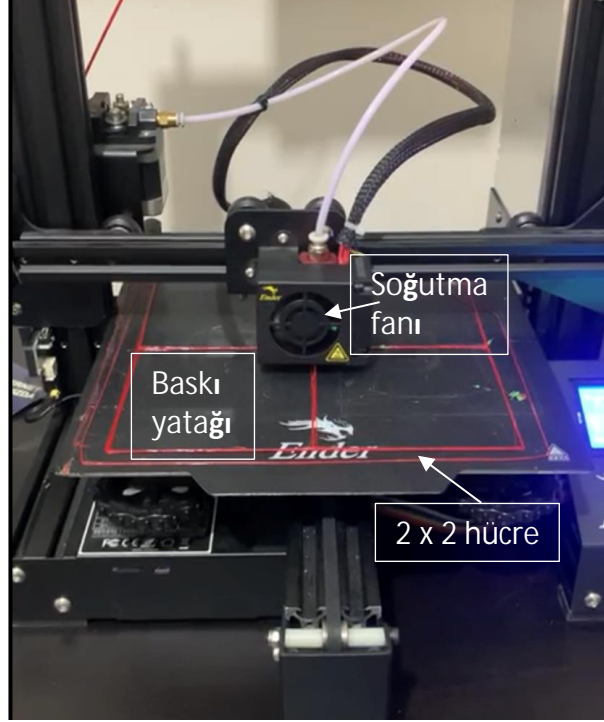
Şekil 1. "Dog-bone" örneği üzerinde gerçekleştirilen çekme deneyleri

Prototip malzemeden kesilmiş ve 3B-baskılı ile oluşturulmuş köpek kemiği şekilli numuneler için çekme gerilmesi-birim uzama eğrileri, 1:9 ($1:n^2$) ölçekli prototipin referansıyla birlikte Şekil 1'de gösterilmiştir. Mevcut malzemeleri çekme gerilmesi-birim uzama ilişkileri belirgin bir elastik bölge göstermediğinden mevcut literatürde önerildiği gibi üretilmiş malzemenin sekant çekme modülü ($E_{s(prototip)}$) ve 3B-baskılı model malzemenin (TPU) sekant çekme modülü ($E_{s(model)}$) karşılaştırılmıştır Koerner, 2012). Sonuçlar $E_{s(prototip)}/E_{s(ölçeklenmiş)}$ oranının %2 uzamada 9 ve %5 uzamada 7.3 olduğunu göstermiştir. Ayrıca TPU model malzemesinin davranışı, 1:9 ölçeklendirme yapıldığında prototipin davranışına benzerdir.

4. LABORATUVAR DENEYLERİ

Model deneylerde Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre kötü derecelenmiş kum (SP) kullanılmıştır. Kullanılan zeminin %35 ve % 75 rölatif sıklığa sahip pik içsel sürtünme açıları sırasıyla 31° ila 36° . Deney tankındaki kum tabakasının %35 ve %75 rölatif sıklığa ulaşmasını sağlamak için kontrollü kum doldurma ve sıkıştırma tekniği kullanılmıştır. Deneylerde %35 D_r 'ye sahip gevşek kum, belirli bir yükseklikten tank içerisine boşaltılarak sıkıştırılmadan elde edilmiştir. Sıkı kum koşullarında ise %75 D_r , ahşap bir tokmak ile ön deneylerde belirlenen sayıda zemine vuruş yapılarak elde edilmiştir. Her bir zemin tabakasının rölatif sıklığı, alüminyum örnek kapları kullanılarak değerlendirilmiş ve gözlemlenen değişim genellikle $\pm\%2-3$ aralığındadır.

Öncelikle bir CAD yazılımı kullanılarak 1:3 ölçekli 3B-baskılı geocellerin modelleri oluşturulmuştur. Model geocell, Şekil 2'de gösterildiği gibi 3B yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Her bir baskıda yaklaşık 140 x 164 mm boyutlarında, 2 x 2 paterninde 4 hücre üretilmiştir. Prototip geocell ile aynı tabaka genişliğine sahip olacak şekilde toplamda 2 x 2 paterninde 16 hücre üretilmiştir. Bu hücreler epoksi yapıştırıcı kullanılarak birbirine yapıştırılmıştır.



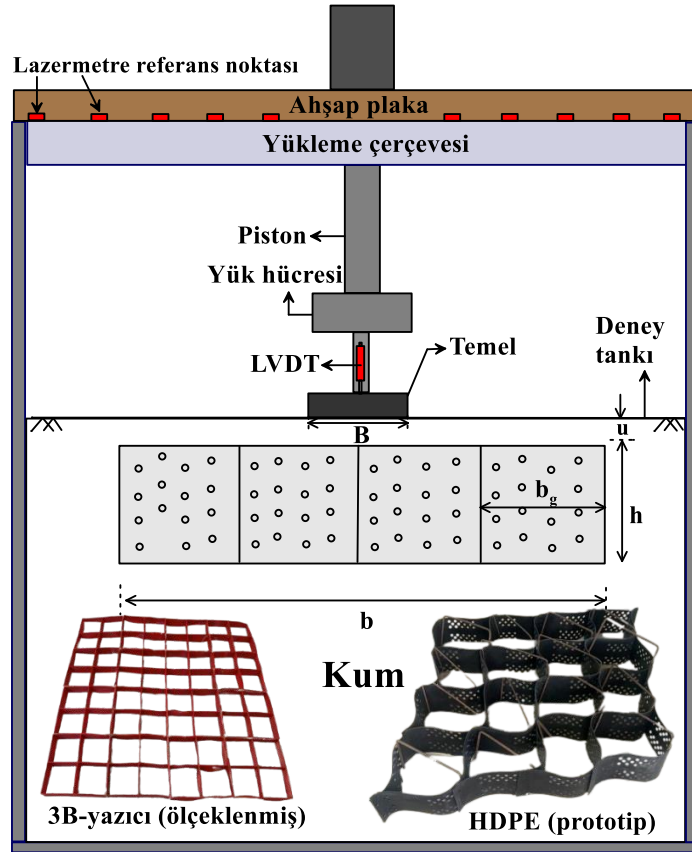
Şekil 2. Üç boyutlu baskı ile üretilen geocell

Deneylerde kullanılan HDPE prototip ve 3B-baskılı model geocellerin özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Üretim kolaylığı açısından geoceller dikdörtgen olarak basılmıştır. Ancak 3B baskılı dikdörtgen şeklindeki geoceller ile prototip bal peteği formunda geoceller arasındaki etkili açıklık alanı farkı önemsizdir. Bu sebeple geometrik farkın güçlendirilmiş temellerin basınç-oturma davranışına etkisinin ihmal edilebilir olduğu kabul edilmiştir (Sherin vd., 2017). Özetle 1:3 ölçekli model geocell; görünüm, boyutlar ve sekant modülleri açısından prototip malzemenin iyi, ancak mükemmel olmayan bir geometrik ve mekanik ölçeklemesini temsil etmektedir.

Tablo 1. Prototip ve ölçeklenmiş malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri

Tür	Hücre duvarı yüksekliği (mm)	Hücre genişliği ve uzunluğu (mm x mm)	%2 birim uzama seviyelerindeki yaklaşık sekant modülü (kN/m)	Patern
HDPE prototip	100	210 x 245	450	Bal peteği
Ölçeklenmiş 3B-baskı	33	70 x 82	50	Dikdörtgen

Model deneyler genişliği 1000 mm, uzunluğu 1000 mm ve yüksekliği 700 mm olan bir tankta gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Çalışmada genişliği (B) 100 mm, uzunluğu (L) 996 mm ve kalınlığı (t) 20 mm olan çelik bir şerit temel kullanılmıştır. Deney tankının yanları ve tabanı, yan duvar sürtünme etkilerini azaltmak için cilalı pürüzsüz kontrplak levhalarla kaplanmıştır. Temel üzerine 0 (merkezi), ve B/6 (çekirdek sınırında) yük eksantrisitelerinin uygulanmasını sağlamak amacıyla konik şekilli oluklar açılmıştır. Ayrıca temel uçları ile deney tankı arasında istenmeyen sürtünme etkilerinden kaçınmak için 2 mm'lik bir boşluk bırakılmıştır.

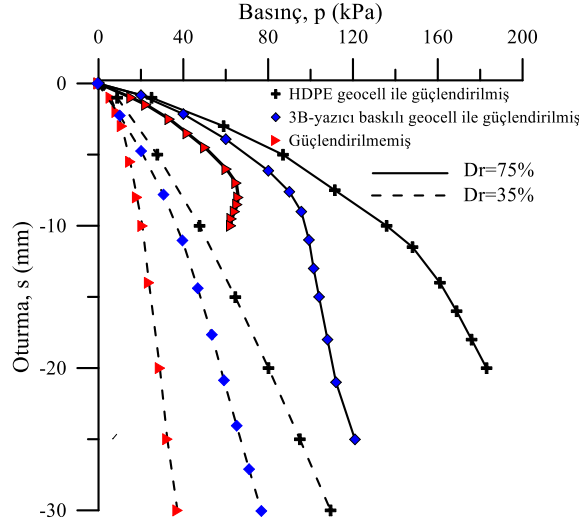


Şekil 3. Deney düzeneği

Model deneylerde hidrolik pres, yük hücresi, doğrusal değişken diferansiyel transformatör (LVDT) ve veri kayıt sistemi kullanılmıştır. Yükleme 200 kN kapasiteli hidrolik pres ile temel üzerine normal basınç uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan basıncı ölçmek için 200 kN kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Temel oturması hareket kapasitesi 100 mm olan LVDT ile izlenmiştir. Tüm cihazlar 8 kanallı bir veri kaydediciye bağlanmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Hem güçlendirilmemiş hem de 3B baskılı (ölçeklenmiş) veya fabrikasyon (prototip) geocell ile güçlendirilmiş gevşek ve sıkı kumlarda laboratuvar deneylerin elde edilen yük-oturma eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Sonuçlar fabrikasyon geocell ile güçlendirilmiş kumlu zemin üzerindeki şerit temelin 3B-baskılı geocell ile güçlendirilmiş olanlara göre daha iyi basınç taşıma performansı ve başlangıç rijitliği sergilediğini ortaya koymuştur. Bunun nedeni ölçeklendirilmiş geocell modellerin sekant modülü (E_s), geocell yüksekliği (h) ve hücre genişliğindeki (b_g) azalmadır. Ayrıca küçülen geometrik boyutlar nedeniyle geocell ile zemin daneleri arasındaki sürtünme yüzey alanının küçülmesi sonucunda 3B-baskılı geocell ile güçlendirilmiş temel sistemlerinin basınç taşıma kapasitesi daha da düşmüştür.



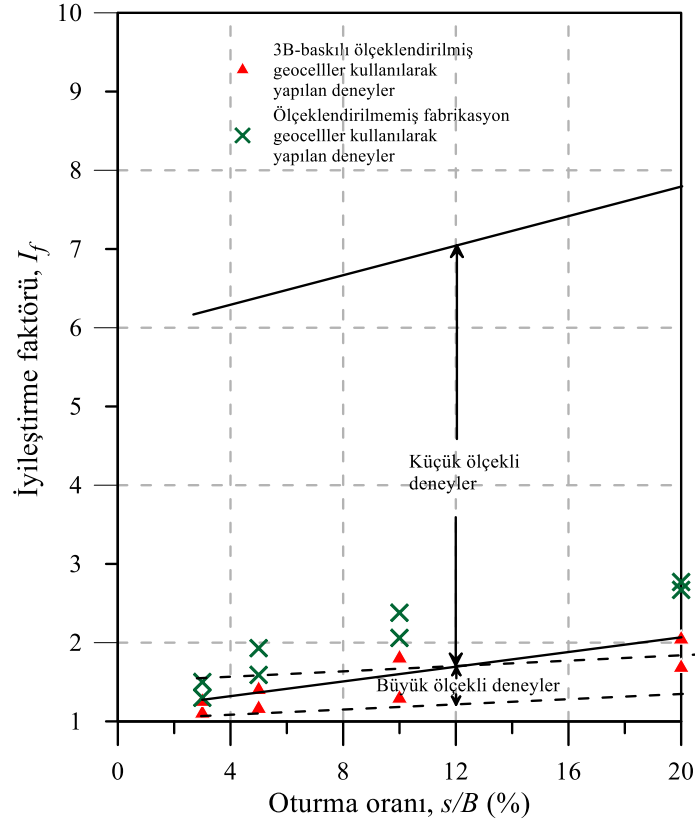
Şekil 4. Gevşek ve sıkı kumlarda güçlendirilmemiş ve 3D baskılı veya HDPE geocell ile güçlendirilmiş temeller üzerindeki şerit temeller için basınç-oturma eğrileri

Temel performansındaki geocell güçlendirme etkisini değerlendirmek ve deney sonuçlarının daha kolay karşılaştırılabilmesi amacıyla bu çalışmada iyileştirme faktörü (I_f) kullanılmıştır. iyileştirme faktörü Eşitlik (1)'de şu şekilde tanımlanmıştır

$$I_f = \frac{q_r}{q_u} \quad (1)$$

Burada q_r ve q_u sırasıyla aynı rölatif sıkılıkta ve belirli bir oturma seviyesinde güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş zeminler için taşıma basınçlarını temsil etmektedir.

Mevcut literatürden elde edilen verilere dayanarak geocell ile güçlendirilmiş temellerin iyileştirme faktörlerinin yaklaşık üst ve alt sınırları Şekil 5'te gösterilmiştir. İncelenen literatürde büyük ölçekli veya saha deneyleri için I_f değerleri genellikle 1,1 ila 1,6 aralığında değişmekle birlikte küçük ölçekli deneylerde bu değerler önemli ölçüde daha yüksek ve dağınıktır (örn., s/B %20 oranında $I_f = 7,5$). Bu çalışmada 3B-baskılı geoceller kullanılarak elde edilen I_f değerleri, literatürde bildirilen büyük ölçekli deneyler için verilen aralıktadır. Bu sonuçlar ölçek etkisi ve benzerlik yasası dikkate alındığında iyileştirme faktörlerinin aşırı tahmin edilmeden daha doğru şekilde öngörülebileceğini göstermektedir.



Şekil 5. Elde edilen iyileştirme faktörlerinin literatürdeki küçük ve büyük ölçekli deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada ölçeklendirme sorununu ele almak amacıyla hem fabrikasyon hem de 3B baskılı ölçeklenmiş geoceller ile güçlendirilmiş şerit temellerin performansı sistematik olarak araştırılmıştır. 3B baskı teknolojisi hem geometrik hem de malzeme özellikleri açısından 1:3 ölçekli geocellerin üretilmesine olanak sağlamıştır. Bu yenilik, 3B baskılı geocellerin özelleştirme ve hızlı prototipleme açısından sunduğu önemli avantajları ortaya koymaktadır.

Mevcut literatürde küçük ölçekli deneylerden elde edilen iyileştirme faktörleri genellikle büyük ölçekli deneylerde elde edilenlerden çok daha yüksektir. Bu bulgular ölçek etkileri düzgün bir şekilde dikkate alınmadığında geocell güçlendirme etkisinin ne kadar abartılabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada 3B baskılı geoceller kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde gözlemlenen yük-oturma eğrileri ve iyileştirme faktörleri, literatürdeki büyük ölçekli deneylerle uyumludur. Diğer yandan model deneylerde fabrikasyon geoceller ile güçlendirilmiş temeller hem gevşek hem de sıkı zeminde 3B baskılı geocellere kıyasla %65'e kadar daha yüksek iyileştirme faktörleri vermiştir.

3B baskı teknolojisi, model deneylerde geosentetiklerin ölçeklendirilmesi için gelecekteki araştırmalara yeni yollar açmaktadır. Bu kapsamda geocellerin fiziksel ve mekanik özelliklerini daha kapsamlı bir şekilde ele alabilmek için 3B baskıda kullanılabilecek daha

geniş bir malzeme yelpazesinin değerlendirilmesi gerekir. Ayrıca farklı temel türleri, zemin koşulları ve yükleme senaryolarını içeren ölçek araştırmalarının genişletilmesi de önemlidir.

KAYNAKLAR

- Arab, M.G., Omar, M., Alotaibi, E., Mostafa, O., Naeem, M., Badr, O. (2020), "Bio-inspired 3D-printed honeycomb for soil reinforcement", In Proceeding of Geo-Congress 2020 Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Chen, R.H., Chiu, Y.M. (2008), "Model tests of geocell retaining structures", Geotextiles and Geomembranes; Vol 26, 56-70.
- Demirdöğen, S., Gürbüz, A. ve Yünkül, K. (2024a), "Performance of eccentrically loaded strip footings on geocell-reinforced soil", Geotextiles and Geomembranes, Vol 52, 421-434.
- Demirdöğen, S., Gürbüz, A., ve Yünkül, K. (2024b), "3D-printed geocells in footing systems: A comprehensive physical and numerical studies on scaling and performance under centric and eccentric loading scenarios", Transportation Geotechnics, Vol 45, 101214.
- Fazeli Dehkordi, P., Ghazavi, M. ve Karim, U. F. (2022), "Bearing capacity-relative density behavior of circular footings resting on geocell-reinforced sand", European journal of environmental and civil engineering, Vol 26, 5088-5112.
- Gurbuz, A. ve Mertol, H. C. (2012), "Interaction between assembled 3D honeycomb cells produced from high density polyethylene and a cohesionless soil", Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol 31, 828-836.
- lai, S. (2020), "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field", Soils and Foundations, Vol 29, 105-118.
- Kargar, M., Hosseini, S.M.M.M (2017), "Effect of reinforcement geometry on the performance of a reduced-scale strip footing model supported on geocell-reinforced sand", Scientia Iranica, Vol 24, 96-109.
- Sitharam, T.G., Hegde, A.M., ve Kolathayar, S. (2020), "Geocells: advances and applications", Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering.
- Stathas, D., Wang, J.P., Ling, H.I. (2017), "Model geogrids and 3D printing", Geotextiles and Geomembranes, Vol 45,688-696.
- Vega, E., Van Gurp, C. ve Kwast, E. "Geosynthetics for reinforcement of unbound base and subbase pavement layers", SBRCURnet (CROW), Netherlands, CRW C1001; 2018 (in Dutch).
- Wood, D.M. (2004), "Geotechnical modelling", CRC Press, London, UK.
- Zhang, M., Zhu, H., Yang, J., Qiu, C., Javadi, A.A. (2023), "Experimental study of a 3D printed geogrid embedded with FBG sensor for reinforcement of subgrade with underlying cave", Geotextiles and Geomembranes, Vol 51, 81-92.