

HÜCRESEL DOLGU SİSTEMİ KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMİŞ ŞERİT TEMELLERİN EKSANTRİK YÜKLEME ALTINDAKİ DAVRANIŞI

BEHAVIOR OF STRIP FOUNDATIONS REINFORCED WITH GEOCELLS UNDER ECCENTRIC LOADING

Sarper DEMİRDÖĞEN¹, Ayhan GÜRBÜZ², Kaan YÜNKÜL³

ÖZET

Bu çalışmada hücresel dolgu sistemleri ile güçlendirilmiş kumlu zeminler üzerindeki şerit temellerin performansı; yük eksantrikliği, hücresel dolgu yüksekliği ve zeminin rölatif sıklığı gibi değişken parametrelerle gerçekleştirilen bir dizi model deney ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında özellikle temel yük-oturma davranışı, yenilme mekanizmaları ve nihai taşıma kapasitesi ele alınmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, hücresel dolgu sistemleri ile güçlendirilmiş kumlu zeminler üzerindeki şerit temellerin taşıma kapasitesinin, güçlendirilmemiş zeminlere göre merkezi yükleme altında 3 katına, eksantrik yükleme altında ise 6,5 katına kadar artabileceğini ve yük-oturma eğrilerinin başlangıç eğiminde önemli artışlar olabileceğini göstermiştir. Ayrıca merkezi yükleme altında, hücresel dolgu sistemleri ile güçlendirilmiş gevşek ve sıkı kum üzerindeki şerit temellerde zımbalama veya yerel kayma yenilmesi gözlemlenirken eksantrik yükleme bu temellerde zımbalama, yerel ve genel kayma yenilmelerine neden olmuştur. Deneyler zeminin rölatif sıklığı arttıkça hücresel dolgu sistemleri ile güçlendirilmiş şerit temellerin nihai taşıma gücünün hem merkezi hem de eksantrik yükleme koşulları altında arttığını göstermiştir. Uygulamada yaygın olarak kullanılan hücresel dolgu sistemlerinde hücre yüksekliğinin artmasının taşıma gücü üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Merkezi yükleme altında, hücre yüksekliğinin 120 mm'den 150 mm'ye artması taşıma gücünü %5 oranında artırmakla birlikte eksantrik yükleme altında temelin altındaki hücre duvarlarının yerel burkulmasından dolayı taşıma gücünde artış gözlemlenmemiştir. Bu sonuçlar, hücresel dolgu sistemleri ile güçlendirilmiş temellerin tasarım ve uygulamalarında dikkate alınması gereken önemli parametreler ve sınırlamalar hakkında değerli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hücresel dolgu sistemleri, Eksantrik yükleme, Geosentetik, Şerit temel, Taşıma gücü

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

ABSTRACT

In this study, the performance of strip footings on sandy soils reinforced with geocell systems was investigated through a series of model tests involving varying parameters such as load eccentricity, geocell height, and soil relative density. The study particularly focused on the footing load-settlement response, failure mechanisms, and ultimate bearing capacity. The results of this study indicated that the bearing capacity of strip footings on sandy soils reinforced with geocell systems could increase up to three times under central loading and up to 6.5 times under eccentric loading compared to unreinforced soils, with significant increases in the initial slope of the load-settlement curves. Furthermore, under centric loading, strip footings on loose and dense sands reinforced with geocell systems exhibited punching or local shear failure, while eccentric loading caused punching, local, and general shear failures in these footings. The experiments showed that as the relative density of the soil increased, the ultimate bearing capacity of strip footings reinforced with geocell systems increased under both central and eccentric loading conditions. It was observed that increasing the height of the geocell did not have a significant impact on the bearing capacity in commonly used geocell systems. Although increasing the geocell height from 120 mm to 150 mm under centric loading increased the bearing capacity by 5%, no increase was observed under eccentric loading due to the local buckling of the cell walls beneath the footing. These results provide valuable insights into the important parameters and limitations that need to be considered in the design and application of geocell-reinforced foundations.

Keywords: Geocell, Eccentric loading, Geosynthetic, Strip footing, Bearing capacity

1. GİRİŞ

Kentleşme ve sanayileşme sonucunda düşük kayma mukavemetine sahip zeminlere yapılaşma kaçınılmaz hale gelmiştir. Bunun sonucunda da söz konusu zeminlerle ilişkili aşırı oturma veya taşıma gücü yenilmeleri gibi geoteknik sorunlar giderek artmıştır. Derin karıştırma, jet enjeksiyonu, dikey drenler, kazıklar ve geosentetikler gibi yöntemler, bu gibi zeminlerde karşılaşılan sorunların çözümünde kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden geosentetikler içerisinde yer alan ve bal peteği yapısıyla öne çıkan geoceller (hücresel dolgu sistemleri), zeminlerin mekanik özelliklerini etkin bir şekilde artırarak temellerin taşıma kapasitesinin artmasını ve oturmalarının azalmasını sağlar. ABD Ordusu Mühendisler Birliği'nin (USACE) 1970'lerin sonlarında geocell ile güçlendirilmiş sistemleri kullanmasından bu yana bu sistemlere olan talep, maliyet etkinliği ve uygulama kolaylığı nedeniyle giderek artmıştır (Sitharam vd., 2020).

Geoceller; temeller, dolgular, şev stabilizasyonu ve yollar dahil olmak üzere geniş bir uygulama alanına sahiptir. Geocell temel sistemlerinin performansı, çeşitli deneysel, analitik ve sayısal yöntemlerle detaylı bir şekilde incelenmiştir (Rea ve Mitchell, 1978; Dash vd., 2001; Pokharel vd., 2009; Gurbuz ve Mertol, 2012; Demirdogen vd., 2024a, 2024b). Söz konusu çalışmaların sonuçları geocell ile güçlendirilmiş sistemlerin taşıma gücü kayıplarını ve aşırı oturma sorunlarını çözerek önemli zemin iyileştirmesi sağladığını göstermiştir (Dash vd., 2001). Ayrıca düzlemsel geosentetiklere (geogrid, geotekstil vb.) kıyasla geocellerin

taşıma kapasitesi ve oturma açısından daha üstün performans sağladıkları görülmüştür (Koerner, 2012; Sitharam vd., 2020).

Geocell ile güçlendirilmiş temellerin davranışı hücre geometrisi, malzeme özellikleri ve zeminin rölatif sıklığına bağlıdır (Sitharam vd., 2020). Yüksek rölatif sıklık ve daha rijit geocell malzemeleri kullanımı, temel sistemlerinin yük-oturma performansını artırmaktadır (Mhaiskar ve Mandal, 1996; Fazeli Dehkordi vd., 2022). Ayrıca geocell hücre yüksekliğinin artmasıyla geocell hücreleri tarafından sınırlandırılan zemin hacminin artması, güçlendirilmiş temellerin taşıma gücünde iyileşmelere yol açmaktadır (Pokharel vd., 2009).

Literatürdeki birçok çalışma geocell ile güçlendirilmiş sistemlerin merkezi yükleme altındaki davranışına odaklanmasına rağmen eksantrik yükleme altındaki temellerin performansı yeterince araştırılmamıştır. Bu çalışmada merkezi ve eksantrik yükleme altında geocell ile güçlendirilmiş kumlu zeminlerdeki şerit temellerin davranışını değerlendirmek amacıyla bir dizi model deney gerçekleştirilmiştir. Özellikle geocell rijitliği, yüksekliği, zeminin rölatif sıklığı ve yük eksantrikliğinin nihai taşıma gücü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bulguların geocell ile güçlendirilmiş temellerin yük taşıma kapasiteleri ve yenilme mekanizmalarını ortaya koyarak geosentetik mühendisliğine katkıda bulunması beklenmektedir.

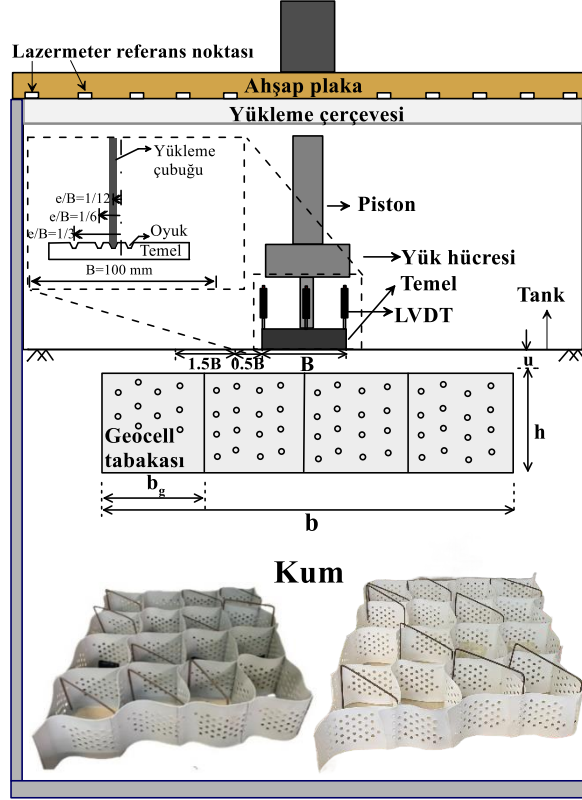
2. LABORATUVAR MODEL DENEYLERİ

Deneylerde Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (*USCS*) göre kötü derecelenmiş kum (SP) kullanılmıştır. Zeminin %35 ve %75 rölatif sıklıklardaki (D_r) içsel sürtünme açıları; 50, 100 ve 200 kPa normal gerilmeler altında yapılan doğrudan kesme deneyleri ile elde edilmiştir. Deney tankındaki kum tabakasının %35 ve %75 rölatif sıklığa ulaşmasını sağlamak için kontrollü kum doldurma ve sıkıştırma tekniği kullanılmıştır. Deneylerde %35 D_r 'ye veya 14.8 kN/m³ kuru birim ağırlığa sahip gevşek kum, belirli bir yükseklikten tank içerisine boşaltılarak sıkıştırılmadan elde edilmiştir. Sıkı kum koşullarında ise %75 D_r veya 15.7 kN/m³ birim hacim ağırlık, 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.

Bu çalışmada yüksekliği (h) 120 mm ve 150 mm, %2 birim uzama seviyelerindeki sekant modülü (E_s) 186 MPa ve 271 MPa olan dört farklı yenilikçi polimer alaşımlı (novel polymeric allow, *NPA*) geocell kullanılmıştır. *NPA* geoceller, geleneksel yüksek yoğunluklu polietilen (*HDPE*) geocellere kıyasla daha yüksek elastik modül, çekme dayanımı ve sünme direnci sağlamaktadır (Pokharel vd., 2009).

Model deneyler genişliği 1000 mm, uzunluğu 1000 mm ve yüksekliği 700 mm olan rijit bir tankta gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Deney tankının yanları ve tabanı, yan duvar sürtünme etkilerini azaltmak için cilalı pürüzsüz kontrplak levhalarla kaplanmıştır. 1000 mm x 1000 mm x 20 mm (genişlik x uzunluk x kalınlık) ebatlarındaki sunta plaka, lazer metre ölçümleri için referans düzlem sağlamak ve doğrusal değişken diferansiyel transformatörleri (*LVDT*) dikey pozisyonda tutmak için yükleme girişine yerleştirilmiştir. Çalışmada genişliği (B) 100 mm, uzunluğu (L) 996 mm ve kalınlığı (t) 20 mm olan çelik bir şerit temel kullanılmıştır.

Temel üzerine 0 (merkezi), $B/12$, $B/6$ (çekirdek sınırında) ve $B/3$ (çekirdek dışında) 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. Deney tankına 4x4 konfigürasyonunda kesilmiş 16 hücreli bir geocell tabakası yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği

Model deneylerde kullanılan cihazlar, hidrolik pres, yük hücresi, doğrusal değişken diferansiyel transformatörleri (LVDT), lazer metre ve veri kaydedici sistemden oluşmaktadır. Yüklemeye 200 kN kapasiteli hidrolik pres ile gerçekleştirilmiş olup yüklemeye hızı yaklaşık 2 mm/dakika temel oturması olarak ayarlanmıştır. Temel üzerine uygulanan normal basıncı ölçmek için 200 kN kapasiteli bir yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresi ve LVDTler, ham veriyi dijital olarak kaydetmek ve iletmek için 8 kanallı bir veri kaydediciye bağlanmıştır. Tüm deney cihazları, hassas ve doğru ölçümler almak için deneylerden önce kalibre edilmiştir.

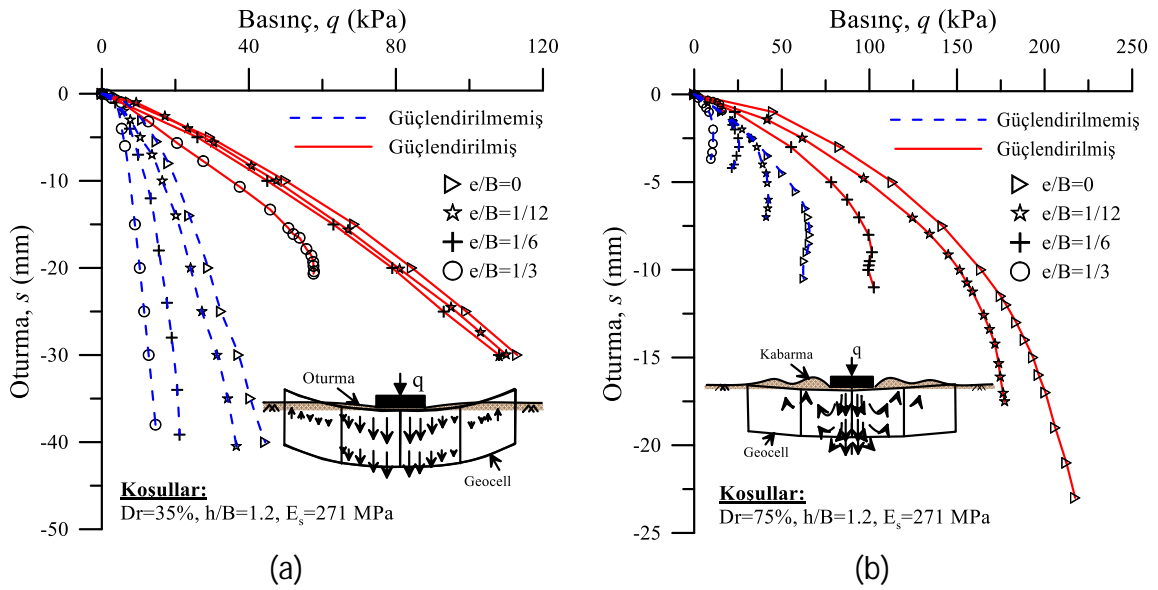
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Yük-Oturma Eğrileri

Güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş gevşek ve sıkı kum için merkezi ve eksantrik yüklemeye koşulları altındaki temel basıncı-oturma eğrileri Şekil 2'de verilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-oturma eğrileri ve başlangıç modülleri, geocell ile güçlendirilmiş kum üzerinde yer alan şerit temellerin güçlendirilmemiş zeminlerdeki temellerden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Geocell ile güçlendirilmiş gevşek zeminlerde temelin basınç-oturma eğrileri, yaklaşık 30 mm oturmaya kadar neredeyse doğrusal bir eğilim göstermiştir (Şekil 2a). Güçlendirilmiş gevşek kumda temelin çekirdek sınırı içinde ($e/B \leq 1/6$) yüklendiğinde belirgin bir yenilme basıncının gözlemlenmemesi zımbalama kayma yenilmesine işaret etmektedir. Ayrıca bu davranış gevşek kumda meydana gelen hacim azalması nedeniyle temelin yükü arttıkça gevşek kumlu zeminin birim hacim ağırlığının da kademeli arttığını göstermektedir.

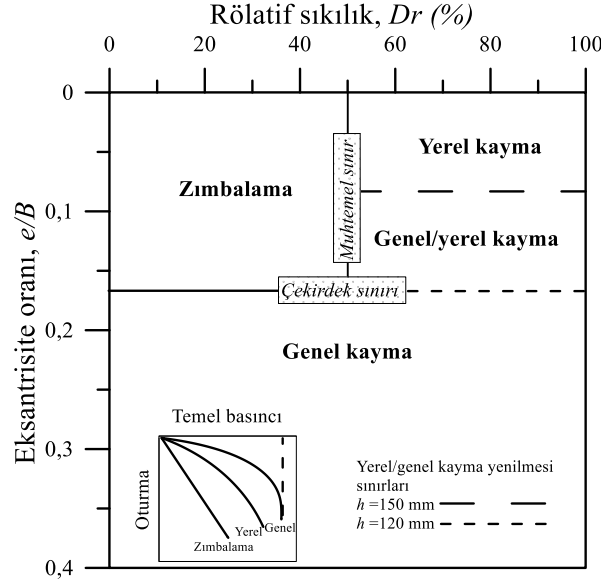
Geocell ile güçlendirilmiş sıkı kumda ise temel, özellikle merkezi yükleme altında temel basıncının artan oturma ile kademeli olarak arttığı bir pekleşme davranışı sergilemiştir. Bu davranış, yerel kayma yenilmesi meydana getirmiştir (Şekil 2b). Ancak sıkı kum üzerinde güçlendirilmiş temel, artan eksantriklik ile yerel kaymadan genel kaymaya doğru bir eğilim göstermiştir.



Şekil 2. Güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş (a) gevşek ve (b) sıkı kum için taşıma basıncı-oturma eğrileri

3.2. Yenilme Modları

Bu çalışmada geocell yüksekliği (h), geocell malzeme rijitliği (E_s), zeminin rölatif sıklığı ve yük eksantrisitesinin yenilme modu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Merkezi yükleme altında gevşek kumda temelin yenilme modu ne geocell yüksekliğinden ne de malzeme rijitliğinden etkilendiği gözlemlenmiştir. Ancak sıkı kumda geocell yüksekliğinin, geocell ile güçlendirilmiş zeminlere oturan temellerin yenilme modunu etkilediği görülmüştür. 120 mm yüksekliğindeki geoceller ile güçlendirilmiş sıkı kumda e/B oranının 0'dan 1/12'ye artmasıyla yenilme modu yerel kayma yenilmesi olarak kalmıştır. Ancak aynı e/B oranı artışında 150 mm yüksekliğindeki geoceller için yenilme modu yerel kaymadan genel kayma yenilmesine geçmiştir. Yenilme modundaki bu değişim yükleme alanı altındaki geocell hücre duvarında lokal meydana gelen burkulma etkisine atfedilebilir. Diğer yandan eksantrisitenin temel çekirdeği sınırı dışında olması durumunda tüm koşullar altında genel kayma yenilmesi meydana gelmiştir.



Şekil 3. Geocell ile güçlendirilmiş zeminlere oturan temellerin yenilme modları

3.3. Nihai Taşıma Güçleri

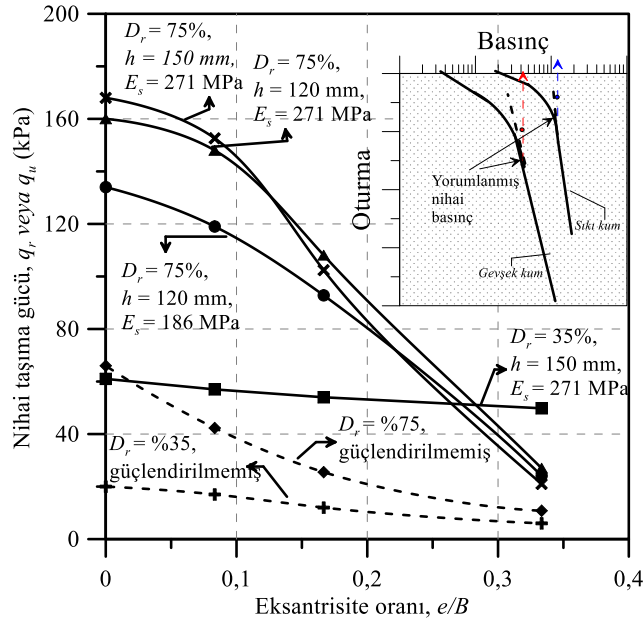
Merkezi ve eksantrik yüklemeye altında değişen h , E_s ve D_r 'ye bağlı olarak gevşek ve sıkı kumdaki nihai taşıma güçlerinin değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Geocell ile güçlendirilmiş zemin üzerindeki temellerin basınç-oturma eğrileri genellikle belirgin bir yenilme noktası göstermediği için taşıma gücü yorumlamasında yarı-logaritmik (basınç-log.) yöntemi kullanılmıştır (Demirdogen vd., 2024a). Bulgular 271 kPa modüle sahip geocellerin 186 kPa modüle sahip geocellere kıyasla tüm yüklemeye koşulları altında nihai taşıma gücünde %9 ila %25 arasında ek bir iyileşme sağladığını göstermiştir. Bu iyileşme, daha yüksek rijitliğe sahip geocellin sağladığı ek sınırlama gerilimi ve ortaya çıkan görünür kohezyona atfedilebilir (Dash vd., 2001). Ayrıca daha rijit geoceller, hücreler içindeki zemin danelerinin hareketini kısıtlayarak daha iyi bir sıkışma sağlamış; bu da zemin modülünde iyileşme ve temelin genel performansında artış ile sonuçlanmıştır. Öte yandan yük eksantrikliği temelin çekirdek sınırının dışındayken her iki rijitlik seviyesi için hesaplanan nihai taşıma kapasiteleri benzerdir.

Farklı geocell hücre yükseklikleri için hesaplanan nihai taşıma güçleri de Şekil 5'te gösterilmiştir. Geocell duvarı yüksekliğinin (h) 120 mm'den 150 mm'ye artırılması, merkezi yüklemeye altında hücreler içinde sınırlandırılan kum hacmini artırmakla birlikte bu artış, temelin nihai taşıma gücünde yalnızca yaklaşık %5 ile sınırlı kalmıştır. Bu bulgu, Dash vd. (2003) çalışmasındaki geocell yüksekliğinin 160 mm'den 200 mm'ye artırılmasının yaklaşık %10 oranında taşıma gücünde bir artış sağladığı sonuçlarıyla benzerdir. Diğer yandan eksantrik yüklemeye altında (örn., e/B oranı 1/6 veya daha fazla olduğunda) hücre yüksekliğindeki artış taşıma gücünde nispeten bir azalmaya neden olmuştur. Bu sonuçlar geocell tabakasının artan eğilme rijitliğinin özellikle eksantrik yüklemeye altında geocellin burkulma etkisi nedeniyle eğilmeye karşı daha fazla direnç sağlamadığını göstermiştir (bkz. Şekil 4).



Şekil 4. 150 mm hücre duvarı yüksekliğine sahip geocellin burkulması.

Rölatif sıklığın etkisine bakıldığında da merkezi yükleme altında daha yüksek rölatif sıklığa sahip güçlendirilmiş kumların nihai taşıma kapasitesinde %20 oranında önemli bir artış gözlenmiştir; bu da diğer araştırmacıların bulgularıyla (Dash vd., 2001, Fazeli Dehkordi vd., 2022) uyumludur. Benzer bir etki, çekirdek içinde eksantrik yükleme koşulları altında da ($e/B \leq 1/6$) gözlenmiştir; burada sıkı zeminler kısmi genişleme sergilemiştir. Zemin rölatif sıklığı arttıkça geocell duvar yüzeyine etki eden dikey sürtünme kuvvetleri artmış; bu durum temel altındaki kum içinde geocell tabakasının düşey yönlü direncini artırmıştır. Diğer yandan temel çekirdeği dışında sıkı kumda yaklaşık %2 s/B oranında, gevşek kumda ise yaklaşık %20 s/B oranında yenilme meydana gelmiştir.



Şekil 5. Merkezi ve eksantrik yükleme altında değişen geocell yüksekliği, geocell rijitliği ve zeminin rölatif sıklığına bağlı olarak gevşek ve sıkı kumdaki nihai taşıma güçlerinin değişimi.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada geocell yüksekliği, geocell rijitliği ve zeminin rölatif sıklığı gibi farklı parametrelerin merkezi ve eksantrik yükleme koşulları altında şerit temel performansı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla bir dizi laboratuvar yüklemeye deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen başlıca sonuçlar şunlardır:

- Geocell ile güçlendirilmiş temeller, temel basıncı oturma davranışı açısından güçlendirilmemiş temellere kıyasla daha üstün performans sergilemiştir. Eksantrik yüklemeye koşullarında sağlanan geocell güçlendirmesi, taşıma gücünü 6,5 kata kadar artırmıştır.
- Geocell ile güçlendirilmiş temel sistemlerindeki yenilme modları; geocell yüksekliği, zeminin rölatif sıklığı ve yük eksantrikliği gibi faktörlere bağlıdır. Merkezi yüklemeye altında güçlendirilmiş gevşek ve sıkı kumda yerel veya zımbalama yenilmesi meydana gelebilirken eksantrik yüklemeye altında zemin; genel, yerel veya zımbalama kayma yenilmelerinden herhangi biriyle sonuçlanabilir. Temel, çekirdek sınırının dışında yüklendiğinde kumun rölatif sıklığı veya geocell özelliklerinden bağımsız olarak zeminde genel kayma yenilmesi meydana gelmiştir.
- Geocell malzeme rijitliği, güçlendirilmiş temel sistemlerinin performansında kritik bir etken olup rijitliği 186 kPa'dan 271 kPa'ya çıkarmak merkez yüklemeye koşullarında %20'ye varan iyileşmeler sağlamıştır. 1/12 eksantrisite oranı altında temel yüklendiğinde, daha yüksek rijitliğe sahip malzeme kullanımı taşıma gücünde %25 artış sağlamaktadır.
- Geocell duvar yüksekliğinin 120 mm'den 150 mm'ye artırılması, merkez yüklemeye koşulları altında temelin taşıma gücünde %5'e yakın bir artışa neden olmuştur. Bu iyileşme etkisi, eksantrik yüklemeye altında 150 mm hücre duvarı yüksekliğine sahip malzemenin yerel olarak burkulması nedeniyle sınırlı kalmıştır. Saha uygulamalarında eksantrik yüklere maruz kalan temeller için geocell yüksekliğini artırmak yerine (örneğin, 120 mm'den 150 mm'ye), daha yüksek rijitliğe sahip bir malzeme kullanmak (örneğin, 187 MPa yerine 271 MPa) temel sistemleri için daha etkili olabilir.
- Geocell ile güçlendirilmiş sıkı kumlara oturan şerit temeller, gevşek kumlara oturanlarla kıyaslandığında hem merkezi hem de eksantrik yüklemeye koşulları altında daha iyi performans sergilemiştir. Bu davranış, zemin genişlemesinin temelden geocellere daha fazla yük aktarılmasına ve hücre duvarları ile zemin arasındaki yüzey sürtünmesini artırmasından kaynaklanmaktadır.

•

KAYNAKLAR

- Dash, S. K., Krishnaswamy, N. R. ve Rajagopal, K. (2001), "Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand," Geotextiles and Geomembranes, Vol 19, 235-256.
- Dash, S. K., Sireesh, S. ve Sitharam, T. G. (2003), "Behaviour of geocell-reinforced sand beds under circular footing", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, Vol 7, 111-115.

- 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.
- Koerner, R. M. (2012), "Designing with geosynthetics" (Vol. 2), Xlibris Corporation.
- Mhaiskar, S. Y. ve Mandal, J. N. (1996), "Investigations on soft clay subgrade strengthening using geocells", *Construction and Building Materials*, Vol 10, 281-286.
- Pokharel, S. K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R. L. Ve Halahmi, I. (2010), "Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 28, 570-578.
- Rea, C. ve Mitchell, J. K. (1978), "Sand reinforcement using paper grid cells", ASCE Spring Convention and Exhibit, Pittsburgh, PA, April, Preprint, 3130, 24-28.
- Sitharam, T., Hegde, A. M. ve Kolathayar, S. (2020), "Geocells: Advances and Applications."