



Assessment of soil-geocell interaction behavior by laboratory pullout tests

Adem Işık*^{ID}, Ayhan Gürbüz^{ID}, Özgür Anıl^{ID}

Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ankara, 06570, Turkey

Highlights:

- The performing laboratory pullout tests
- The distribution of the displacement and deformation along the geocell
- The change of pullout force according to the geocell sizes

Keywords:

- Geocell
- Pullout force
- Displacement
- Deformation
- Pullout interaction factor

Article Info:

Research Article
Received: 19.02.2018
Accepted: 08.08.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.639893

Graphical/Tabular Abstract

In this study, soil-geocell interaction behavior was investigated by using the large scale laboratory pullout test box (1500 mm length, 1000 mm wide and 700 mm height) was designed and built in laboratory. The soil was poorly graded sand with the average particle size (D_{50}) of 1.6 mm, and the maximum and minimum dry unit weights of the sand were found to be 14.52 and 18.10 kN/m³, respectively. The model pullout tests were performed at relative density of 50% and the internal friction angle of the sand this relative density determined from direct shear tests was 39°.

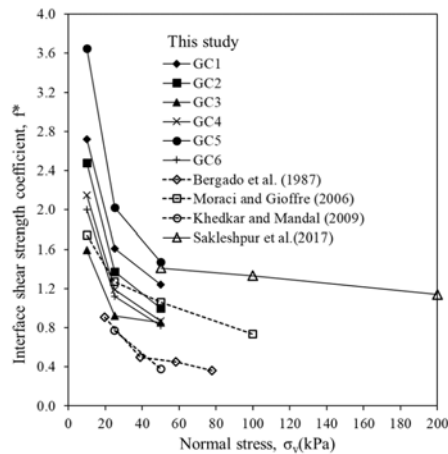


Figure A. The interface shear strength coefficient under different vertical loads

Acknowledgement:

This study is supported by the Gazi University Scientific Research Committee with Project No. BAP.06/2018-21. The authors would like to thank Dr. Ozgur Anil, Sadik Serefoglu, Dr. Mustafa Sahmaran, Kaan Yunkul, Tahsin Budak and Aydin Gokce for their contributions to the work presented in this paper

Correspondence:

Author: Adem Işık
e-mail:
isikadem@gazi.edu.tr
phone: +90 312 582 3208

Purpose: This paper investigates the interaction behavior of soil-geocell by using large scale pullout test box.

Theory and Methods:

The soil was compacted in the pullout box by manual tamping. The geocell specimen was placed into its position at the middle of the test box. The strain gauges and four LVDTs were placed the surface of geocell along length before the geocell specimen was placed into its position in the test box. The clamping plates to grip geocell materials to be pulled were positioned front of sleeve and outer of box. Finally, the steel plate was placed on top layer of compacted soil and soil uniformly was loaded from hydraulic jack.

Results:

The results show that the distribution of displacements and deformations on the geocell reach higher values at the near of frontal wall of the test box. To determine the effect of sizes of geocell elements on the pullout force the variation of SxL (number of cell x length) is expressed. It is founded that there is a good correlation between values of SxL and pullout forces. Moreover, as shown Figure A the interface shear strength factor (F^*) between the soil and geocell was determined and compared the planar geosynthetic (geogrid)-soil interface shear strength factor in the literature.

Conclusion:

The interface shear strength coefficients between the soil-planar geosynthetics (geogrid) and the interface shear strength coefficients of the soil-geocells were found to be generally close. However, some geocell specimens (GC5 and GC1) the interface shear strength coefficient values were found to be higher than planar reinforcements. This can be explained by the fact that the height of the geocell is greater than the other geosynthetic reinforcements.



Zemin-hücresele dolgu elemanlarının sürtünme davranışlarının laboratuvarda yapılan çekme deneyleri ile belirlenmesi

Adem Işık*^{ID}, Ayhan Gürbüz^{ID}, Özgür Anıl^{ID}

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06570, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Laboratuvar çekme deneylerinin yapılması
- Deplasman ve deformasyonların eleman boyunca dağılımı
- Çekme kuvvetlerinin eleman boyutlarına göre değişimi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 19.02.2018
Kabul: 08.08.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.639893

Anahtar Kelimeler:

Hücresele dolgu elemanı,
çekme kuvveti,
deplasman,
deformasyon,
ara yüzey sürtünme katsayısı

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, zemin-hücresele dolgu elemanı arasındaki sürtünme davranışları laboratuvarda yapılan büyük ölçekli çekme deney düzeneği ile belirlenmiştir. Büyük ölçekli çekme deney kutusu (1500 mm uzunluk, 1000 mm genişlik ve 700 mm yükseklik) zemin-hücresele dolgu elemanı arasındaki davranışları belirlemek için Gazi Üniversitesi laboratuvarında tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Toplam olarak 18 adet çekme deneyi 10, 25 ve 50 kPa üniform düşey yükler altında yapılmıştır. Kullanılan zemin malzemesi kötü derecelendirilmiş kum olup özgül ağırlığı (G_s) 2,67, ortalama dane çapı (D_{50}) 1,6 mm, maksimum ve minimum boşluk oranları sırasıyla 0,79 ve 0,43, maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlıkları ise sırasıyla 18,10 ve 14,52 kN/m³ olarak belirlenmiştir. Model deney düzeneğinde sıkıştırılmış olarak yerleştirilen kum malzemesinin %50 rölatif sıklıkta kayma mukavemeti açısı 39° olarak kesme kutusu deneyi ile belirlenmiştir. Hücresele dolgu elemanı boyunca oluşan deplasmanlar ve deformasyonlar kutu ön yüzünde daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Bu çalışmada, artan düşey basınç ile çekme kuvvetleri artmıştır. Bu çalışma kapsamında, geocell elemanların boyutlarının çekme kuvveti üzerine etkisini belirlemek amacıyla ifade edilen SxL (hücre sayısı x uzunluk) parametresinin çekme kuvvetleri ile değişimi belirlenmiştir. Artan SxL değeri ile çekme kuvvetinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca artan düşey basınçla hücresele dolgu elemanı-zemin arasındaki ara yüzey sürtünme katsayılarının düştüğü belirlenmiştir.

Assessment of soil-geocell interaction behavior by laboratory pullout tests

H I G H L I G H T S

- The performing laboratory pullout tests
- The distribution of the displacement and deformation along the geocell
- The change of pullout force according to the geocell sizes

Article Info

Research Article
Received: 19.02.2018
Accepted: 08.08.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.639893

Keywords:

Geocell, pullout force,
displacement,
deformation,
pullout interaction factor

ABSTRACT

In this study, soil-geocell interaction behavior was investigated by using the large scale laboratory pullout test box. The large scale pullout box (1500 mm length, 1000 mm wide and 700 mm height) was designed and built to determine the behavior of the soil-geocell interaction. A total of 18 pullout tests were conducted under 10, 25 and 50 kPa vertical uniform pressure. The soil used in this study was poorly graded sand with specific gravity (G_s) of 2.67, the average particle size (D_{50}) of 1.6 mm, maximum and minimum void ratios were 0.79 and 0.43, correspondingly. The maximum and minimum dry unit weights of the sand were found to be 14.52 and 18.10 kN/m³. The model pullout tests were performed at relative densities of 50%. The internal friction angle of the sand at relative density of 50% determined from direct shear tests was 39°. The displacements and deformations were measured to obtain the distribution of stress on the geocell. The results show that the displacements and deformations reach higher values at the near of front wall of the test box. In this study, as we expected that increase in vertical load results in increase in the pullout forces. Within the scope of this study, the variation of the SxL (cell number x length) parameter, which is expressed to determine the effect of the dimensions of geocell elements on the pulling force, on pullout forces is determined. It is concluded that there is a correlation between values of SxL and pullout forces in soils. Moreover, pullout interaction factor for geocells reinforcement decrease with increasing normal pressure.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: isikadem@gazi.edu.tr, agurbuz@gazi.edu.tr, oanil@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 582 3208

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geoteknik mühendisliği uygulamalarında, sıklıkla kullanılan geosentetikler maliyet ve estetik açısından geleneksel yöntemlere göre daha uygun çözümler sunmaktadır. Zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan geosentetikler, son yıllarda büyük gelişim kaydetmiştir. Taşıma gücü kapasitesinin artırılmasında, şev stabilizasyonunda ve istinat duvarlarının stabilitesinin artırılmasında geosentetikler günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle geosentetik donatılı istinat duvarları tasarımında kullanılan geosentetikler yapım tekniği, hızlı inşa süresi ve kısıtlı alanlarda hızlı çözümler üretmesi nedeniyle tercih edilmektedir [1-5]. Donatı elemanları ile zemin arasındaki ara yüz sürtünme dirençlerinin belirlenmesi geosentetik donatılı istinat yapılarının tasarımı için önemlidir. Hücresel dolgu elemanları üç boyutlu ve birbirleriyle kenetlenmiş gözenekli bir yapıya sahiptir. İyileştirilecek zemin ortamında zemini içine hapsederek veya zeminin etrafını sararak gözenek içerisindeki zeminin kompozit bir malzeme gibi davranmakta ve yanal deformasyonları azaltmaktadır [1]. Diğer geosentetik malzemelere göre yüksek eğilme rijitliğine (EI) sahip olması nedeniyle uygulanan yükü alt zemine daha düşük oranlarda aktarılmasını sağlamaktadır [2, 3]. Hücresel dolgu elemanları güçlendirme elemanı olarak geoteknik mühendisliği uygulamaları olan şevlerin stabilizasyonunda, yumuşak zeminlerin taşıma kapasitesinin artırılmasında ve istinat yapılarında kullanımı oldukça yaygındır. Hücresel dolgu elemanı ile güçlendirilmiş zeminlerde temellerin taşıma kapasitelerinin önemli bir şekilde iyileştirildiği belirlenmiştir [6-9]. Dolgu şevlerinin güçlendirilmesinde kullanılan hücresel elemanlar yüksek eğilme rijitliği nedeniyle tercih edilmektedir [10, 11]. Ayrıca geosentetik donatılı istinat duvarlarında duvar elemanı olarak ağırlık istinat duvarları gibi kullanılmaktadır [12-14]. Bathurst ve Karpurapu [15] araştırmalarında zemin ve hücresel elemanla güçlendirilmiş kompozit numuneler üzerinde üç eksenli basınç deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda hücresel eleman-zemin kompozit malzemesi ile güçlendirilmemiş zemin numunesinin kayma mukavemeti açısı (θ) eşit olduğu belirlenmiştir. Ancak hücresel eleman-zemin kompozit malzemesinde görünür kohezyon (c) olduğu belirlenmiş ve kayma mukavemeti açısından kohezyona bağlı olarak bir iyileşme olduğu ortaya çıkmaktadır.

Geosentetik donatılı istinat yapıları tasarımında zemin-geosentetik donatı arasındaki sürtünme davranışının belirlenmesi çok önemlidir. Zemin-geosentetik donatı arasındaki sürtünme davranışı elemanın boyutlarına, geometrisine ve zeminin mühendislik özelliklerine bağlıdır. Bu davranış, laboratuvarında yapılan çekme ve kesme kutusu deneyleri ile birçok araştırmacı tarafından belirlenmeye çalışılmıştır [16-26]. Diğer geosentetik elemanları gibi hücresel dolgu elemanları da yapı yükleri altında genellikle çekme kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Dolayısıyla bu elemanların çekme kuvvetleri altındaki davranışlarının

belirlenmesi hala çalışma kapsamında olup şu ana kadar kısıtlı sayıda araştırmacılar tarafından belirlenmeye çalışılmıştır [27-33]. Bu çalışmalar zemin-hücresel dolgu elemanı arasındaki sürtünme davranışı tam olarak ortaya koymamakta veya yeterli olmamaktadır. Mohidin ve Alfaro [28] laboratuvarında yaptığı çekme deneyleri ile zemin-hücresel dolgu elemanı arasında bir sürtünme açısı (θ) ve kohezyon değeri (c) belirlemişlerdir. Ancak bu çalışmalarda bir diğer ara yüz sürtünme parametresi olan ara yüz sürtünme katsayısına (f^*) değinilmemiştir. Bilindiği gibi ara yüz parametrelerinin belirlenmesi istinat yapı tasarımında oldukça önem taşımaktadır. Dolayısıyla zemin-hücresel dolgu elemanları arasındaki çekme kuvvetlerinin ve bu kuvvetlerin eleman boyunca dağılımı ve ara yüz sürtünme parametrelerinin belirlenmesi çok önem teşkil etmektedir. Bu çalışma kapsamında, zemin-hücresel dolgu elemanı arasındaki ara yüz davranışı büyük ölçekte inşa edilen çekme deney kutusu kullanılarak araştırılacaktır.

2. LABORATUVAR ÇEKME DENEYİ (LABORATORY PULLOUT TEST)

2.1. Deney Ekipmanları (Test Apparatus)

Laboratuvarlarda kullanılan çekme deney düzeneği genellikle yüzeysel donatı elemanları olan geogrid, geotekstil ve geomembran için kullanılmaktadır (ASTMD-6706-01, 2001). Fakat üç boyutlu güçlendirme elemanı olan hücresel dolgu elemanları için geliştirilmiş ve standardize edilmiş çekme deney düzeneği hala geliştirme aşamasında olup yeterli düzeyde değildir. Hücresel dolgu elemanları üç boyutlu olan hücre elemanlarının bir araya gelmesi ile oluşturulmuştur. Bu durumda zemin-hücresel dolgu elemanları arasındaki sürtünme davranışının laboratuvarında çekme deneyi ile belirlenmesi oldukça zorlu olmakta ve üç boyutlu geometrisi dolayısıyla özel deney aparatlarına gereksinim duyulmaktadır. Dolayısıyla standartta (ASTMD-6706) da belirtildiği gibi cidarlarda sürtünmenin minimize edilmesi için kutu genişliği en az D_{85} ' in (%85 geçen yüzdesine karşılık gelen dane çapı) 20 katı, kutu boyu tek bir hücresel dolgu elemanın gözenek açıklığının en az 5 katı ve geosentetik elemanın altındaki ve üstündeki kutu yüksekliği ise D_{85} ' in en az 6 katı olacak şekilde kutu boyutları belirlenmiştir. Bu nedenle büyük ölçekli çekme deney düzeneği (1500 mm uzunluk, 1000 mm genişlik ve 700 mm yükseklik) Gazi Üniversitesi laboratuvarında tasarlanmış ve inşa edilmiştir.

Çekme deney düzeneğine ait genel bir fotoğraf ve şematik gösterimi sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. Çekme deney düzeneğinde 10 mm kalınlığında çelik plakalar kullanılmış olup yükleme plağı yine 10 mm kalınlığındaki çelik plaka üzerine destek çubukları konularak rijit bir eleman şeklinde imal edilmiştir. Deney düzeneğinin iç cidarları ile zemin arasında oluşacak olan sürtünmenin oluşmaması veya en aza indirilmesi için cidarlar kutu imalatı aşamasında teflon boya ile boyanmıştır. Hücresel dolgu elemanının zemin ortamında çekme deney kutusundan

çekilmesi esnasında çekme yönünde kutu ön yüzünde gerilme yığılması oluşmaması için uzunluğu 200 mm olan ve kutu ön yüzüne monteli açıklık bulunmaktadır. Ayrıca kutunun her iki yanında kolayca boşaltma işlemi yapmak için kapaklar yapılmıştır. Hem yükleme hem de çekme anında oluşacak olan kuvvetleri ölçmek için iki adet yük hücresi kullanılmıştır. Çekme anında hücresel dolgu elemanı üzerinde boyunca oluşacak olan deplasmanlar ve birim deformasyonları ölçmek için deplasman ölçerler (LVDT) ve birim deformasyon ölçerler (strain gauge) kullanılmıştır.

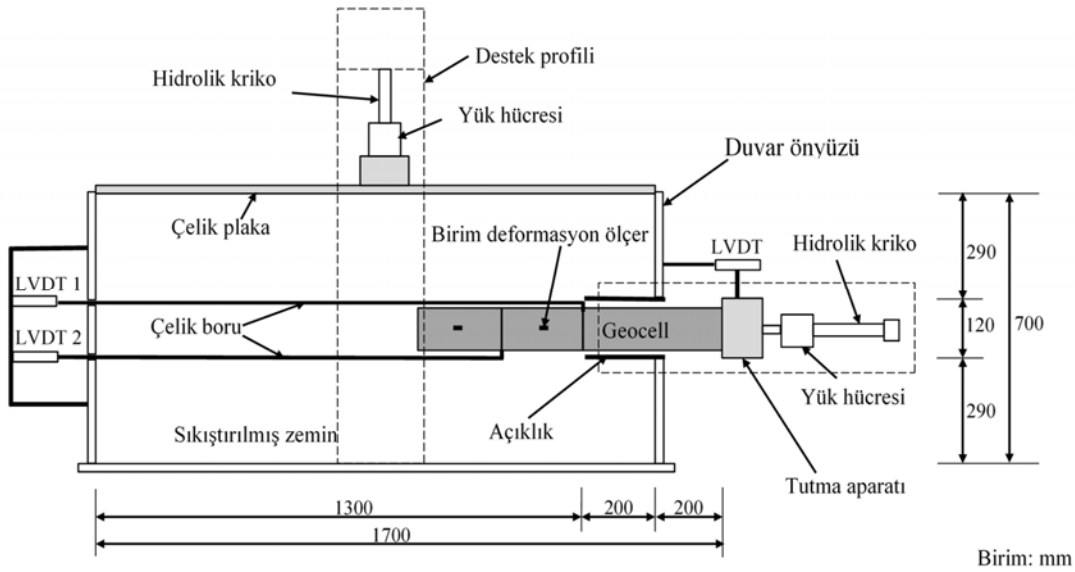
Çekme anında eleman boyunca oluşacak olan deplasmanları belirlemek için kullanılan deplasman ölçerler kutu arkasında açılan açıklık bölgesine yerleştirilmiştir. Kutu içerisinden hücresel dolgu elemanlarının düğüm noktalarına bağlanan ve kutu arkasına doğru uzatılan çelik çubuklar (çapı 4 mm) deplasman ölçerlere bağlanarak deney sırasında düğüm noktalarında oluşacak deplasmanlar belirlenmiştir. Burada düşey yük altında çelik çubuklar üzerinde de sürtünme direncinin oluşmaması için çelik çubuklar çapı daha büyük ve 8 mm olan çelik borular içerisinde deplasman ölçerlere bağlanmıştır. Çelik boru içerisinde de herhangi bir ilave sürtünme direnci oluşmaması için de ayrıca boru içleri her deney öncesi yağlanmıştır. Deneylerde kullanılan birim deformasyon ölçerler hücresel dolgu elemanına yerleştirilmeden eleman üzeri zımpara kâğıdı ile iyice zımparalanmış ve yapıştırma işleminin sağlıklı yapılabilmesi için aseton ile iyice temizlenmiştir. Hücre duvarının tam ortasına yerleştirilen birim deformasyon ölçerler daha sonra zemin sıkıştırma ve çekme deneyi sırasında zarar görmemesi için üzerleri süngerli bantlarla kaplanarak koruma altına alınmıştır. Fakat yükleme durumunda yükleme plağında meydana gelecek olan düşey deplasman ölçümleri veri toplama cihazında bulunan kanal sayısının yeterli sayıda olmamasından alınamamıştır. Deneylerde kullanılan tüm ölçüm cihazları elektronik ortamda veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayar ortamında kaydedilmiştir.



Şekil 1. Çekme deney düzeneğinin genel görünüşü (General view of the pullout test box)

2.2. Deney Yöntemi (Test Method)

Deneylerde kullanılan granüle zemin deney kutusuna istenilen sıklıkta tokmak ile sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi yedi eşit parça halinde yapılmış olup her eşit parça için önceden belirlenmiş olan 125 tokmak vuruş sayısı ile yaklaşık olarak %50 rölatif sıklık değeri elde edilmiştir. Deney kutusu yarıya kadar zemin ile sıkıştırıldıktan sonra hücresel dolgu elemanı konumuna yerleştirilmiş ve deplasman ve deformasyon ölçümleri için gerekli ölçüm cihazlarının bağlantıları yapılmıştır. Daha sonra kutunun kalan kısmı yine rölatif sıklık %50 olacak şekilde zeminle doldurularak sıkıştırılmıştır. Kutu doldurma ve sıkıştırma işlemi bittikten sonra kutu önyüzünden 20 cm uzaklıktan hücresel dolgu elemanı tutma aparatına bağlanmıştır. Tüm bağlantı işlemleri tamamlandıktan sonra düşey olarak üniform yükleme yapmak için kullanılan yükleme plağı zemin yüzeyine yerleştirmiştir. Daha sonra manuel hidrolik

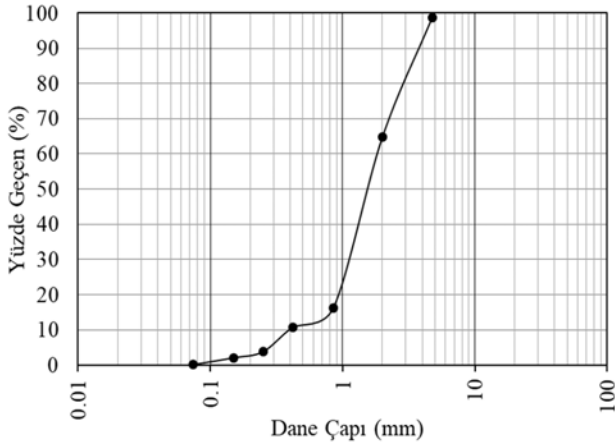


Şekil 2. Çekme deney düzeneğinin şematik görünüşü (The schematic diagram of pullout box)

kriko yardımıyla istenilen yük altında çekme işlemi yapılmış elde edilen veriler toplanmıştır. Yükleme ve çekme işlemi manuel hidrolik sistemler yardımı ile yapıldığından özellikle çekme işleminde standarda uygun çekme hızında işlem yapılamamıştır. Manuel olarak yapılan çekme işleminde çekme hızı yaklaşık olarak 8 mm/dk olarak belirlenmiştir.

2.3. Malzeme (Material)

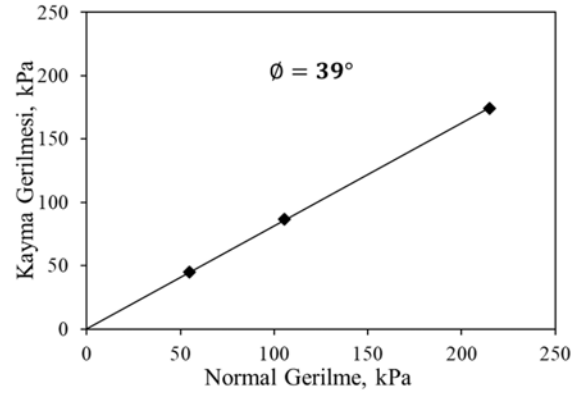
Bu çalışma kapsamında kötü derecelendirilmiş orta kum kullanılmıştır. Kumun ortalama dane çapı (D_{50}) 1,6 mm; eğrilik katsayısı (C_c) 1,1; ve üniformalık katsayısı (C_u) 3,2 olarak belirlenmiştir (ASTM D2487-16). Maksimum ve minimum boşluk oranları sırasıyla 0,79 ve 0,43 (ASTM D4253-16), maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlıkları ise sırasıyla 14,52 ve 18,10 kN/m³ olarak belirlenmiştir. Kum malzemesine ait dane dağılım eğrisi Şekil 3'te gösterilmiştir. Malzeme üzerinde 50, 100 ve 200 kPa normal gerilme altında yapılan kesme kutusu deneylerinden (ASTM D6243-16) yaklaşık olarak %50 rölatif sıklıkta kayma mukavemeti açısı 39° olarak belirlenmiştir. Şekil 4'te kum malzemesinin kayma mukavemeti açısına ait grafik verilmiştir.



Şekil 3. Dane dağılım eğrisi (The grain size distribution)

Hüresel dolgu elemanına ait fiziksel mekanik özellikler Tablo 1'de verilmektedir. Elemana ait fiziksel ve mekanik özellikler üretici firma tarafından yapılan testler ile belirlenmiş ve Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca elemana ait mekanik özelliklerin belirlenmesinde Cancelli vd.[34] tarafından önerilen yöntemlerle tekrar laboratuvarında belirlenmiş ve üretici firma ile elde edilen değerler ile örtüştüğü belirlenmiştir.

Delikli olarak imal edilen hüresel dolgu elemanın yüksekliği 100 mm olup hücrelerinin yerleşimi dikdörtgen olarak yapılmıştır (Şekil 5). Dikdörtgen hücrelerin uzunluğu 170 mm ve genişliği ise 130 mm olarak olup tutma aparatına olan uzaklığı ve üzerindeki birim deformasyon ölçerlerin konumunu gösteren şematik bir çizim ise Şekil 6'da verilmiştir. Boyutlarının etkisinin anlamak için farklı genişliklerde, uzunluklarda ve dolayısıyla farklı hücre sayılarında elemanlar oluşturulmuştur.



Şekil 4. Kum malzemesine ait kayma mukavemeti açısı grafiği (The direct shear test results of sand)

Tablo 1. Hüresel dolgu elemanının fiziksel ve mekanik özellikleri (The physical and mechanical properties of geocell)

Özellikler	Değerler
Malzeme	Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)
Hücre genişliği (b_i)	130 mm
Hücre uzunluğu (l_i)	170 mm
Hücre yüksekliği (h)	100 mm
Polimer yoğunluğu	0,965 g/cm ³
Kalınlık	1,5 mm
Çekme dayanımı	18 kN/m
Kaynak dayanımı	18 kN/m



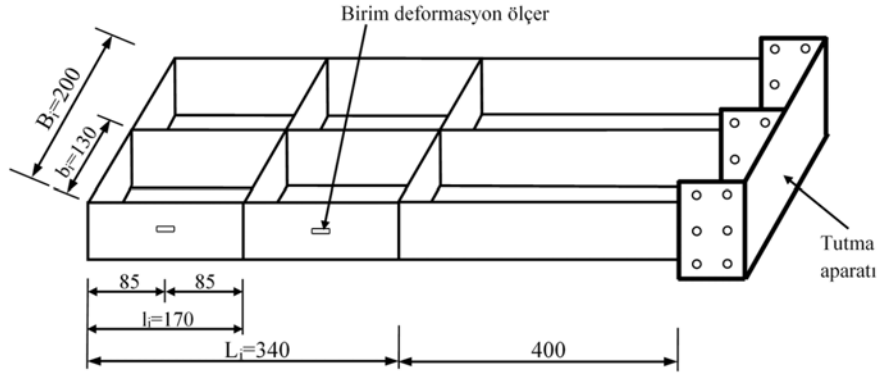
Şekil 5. Hüresel dolgu elemanı (Geocell)

Bu çalışma kapsamında, laboratuvarında çekme deneyleri yapılarak zemin-hüresel dolgu elemanı arasındaki sürtünme davranışının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Dolayısıyla 18 adet çekme deneyi 10, 25 ve 50 kPa üniform düşey yük altında farklı eleman boyutlarında yapılmıştır. Palmeira [21] tarafından polimer geogridler üzerinde yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinden de görüleceği üzere 50 ve 75 kPa düşey yük altında çekme kuvvetleri birbirine yakın değerler vermekte olup 75 kPa düşey yük altında malzeme dayanım sınırını aşmaktadır. Bu durum bu çalışma kapsamında dikkate alınmış ve maksimum düşey basıncın 50 kPa olarak uygulanması belirlenmiştir. Bu amaçla deneysel çalışmaya ait çalışma programı Tablo 2'de verilmiştir.

3. DENEY SONUÇLARI (TEST RESULTS)

Çekme kuvvetlerine karşı eleman boyunca oluşan deplasman ölçümleri kutu önyüzünde ve hücre başlarında olmak üzere sırasıyla LVDT 1 ve LVDT 2 yardımıyla ölçülmüştür. Tek hücre üzerinde yapılan çekme deneyine ait çekme kuvveti ve LVDT 1’den alınan deplasman ölçümleri arasındaki ilişkiler 10, 25 ve 50 kPa üniform yükler altında Şekil 7’de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere beklendiği gibi düşey yük arttıkça çekme kuvvetleri de artmıştır. Şekil 7’de çekme kuvvetlerini pik değeri net olarak gözükmemektedir. Bu durum hücresel dolgu elemanın deformasyona uğraması ile açıklanabilir. Daha rijit bir elemanda çekme kuvvetinin pik değerinin daha belirgin olması beklenebilir. Tüm elemanlar üzerinde yapılan çekme deneyleri sonuçları göstermiştir ki çekme kuvveti önemli bir şekilde uygulanan düşey yük ve eleman boyutlarına bağlı olarak değişmektedir.

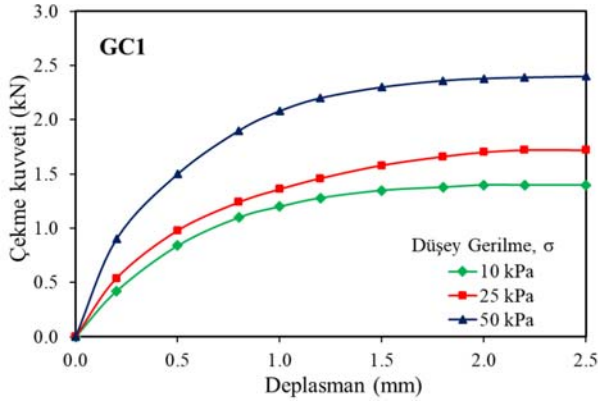
Şekil 8’de bir hücresel dolgu elemanın çekme anında farklı düşey basınçlar altında oluşan birim deformasyonlar verilmiştir. Hücre duvarı üzerine yerleştirilen gerinim pulları ile belirlenen birim deformasyonların düşey basınç arttıkça arttığı belirlenmiştir. Her hücre üzerinde ölçülen birim deformasyonlar ile elemanlar üzerindeki gerilme dağılımını belirlenmiştir. Hücresel dolgu elemanları boyunca yerleştirilen deplasman ölçerler yardımı (Şekil 2) ile eleman boyunca oluşan deplasmanlar belirlenmiştir. Şekil 9a, Şekil 9b ve Şekil 9c’de görüldüğü üzere maksimum çekme anında oluşan deplasmanlar genel olarak artan düşey yük ile artmıştır. Ayrıca kutu önyüzünde elemanın yaptığı deplasmanlar eleman boyunca oluşan deplasman değerlerine göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir.



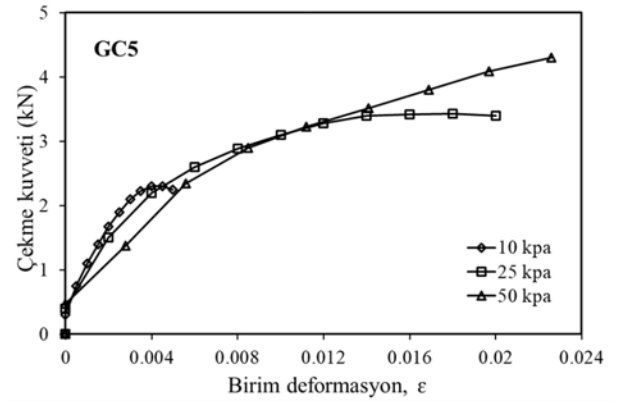
Şekil 6. Hücresel dolgu elemanın şematik bir gösterimi (The schematic diagram of geocell)

Tablo 2. Deneysel çalışma programı (The experimental test program)

Hücresel dolgu elemanı	Eleman genişliği, B_s (mm)	Eleman boyu, L_s (mm)	Düşey yük (kPa)	Genişlik boyunca hücre sayısı, n_1	Uzunluk boyunca hücre sayısı, n_2	Toplam hücre sayısı, $S=n_1 \times n_2$
GC1	130	170	10	1	1	1
GC1	130	170	25	1	1	1
GC1	130	170	50	1	1	1
GC2	260	170	10	2	1	2
GC2	260	170	25	2	1	2
GC2	260	170	50	2	1	2
GC3	390	170	10	3	1	3
GC3	390	170	25	3	1	3
GC3	390	170	50	3	1	3
GC4	260	340	10	2	2	4
GC4	260	340	25	2	2	4
GC4	260	340	50	2	2	4
GC5	130	340	10	1	2	2
GC5	130	340	25	1	2	2
GC5	130	340	50	1	2	2
GC6	390	340	10	3	2	6
GC6	390	340	25	3	2	6
GC6	390	340	50	3	3	6

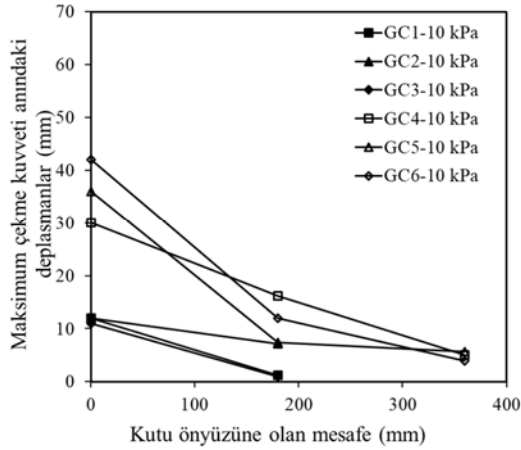


Şekil 7. Tek hücreye ait çekme kuvveti deplasman arasındaki ilişkisi (The load-displacement curve for single cell)
Çünkü hüresel elemanın serbest olduğu kısım yani zeminle temas etmeyen ve herhangi bir düşey yüke maruz kalmayan bölgesinde deplasmanların daha yüksek olması beklenmelidir.

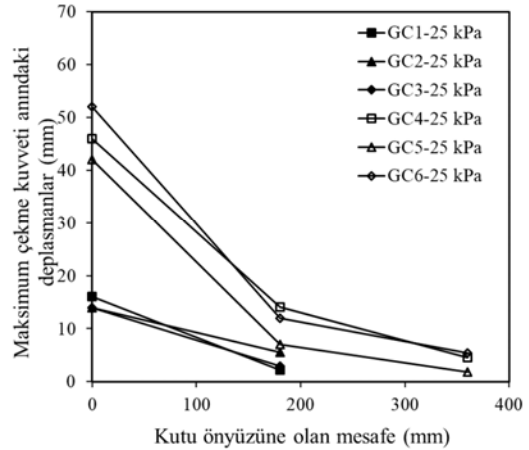


Şekil 8. GC5 elemanına ait birim deformasyon çekme kuvveti ilişkisi
(Unit deformation tensile force relation of GC5 element)

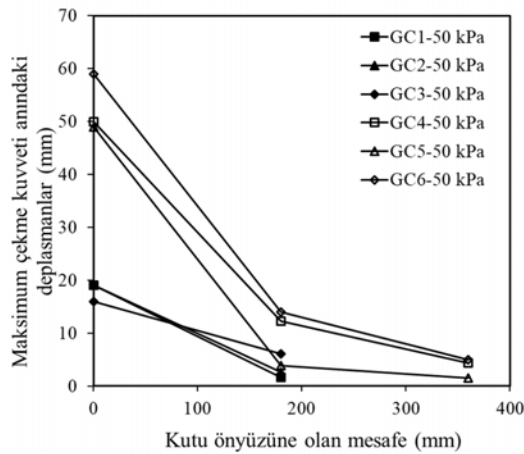
Çekme anında oluşan sürtünme direnci eleman boyunca farklılık göstermektedir. Elemanlar üzerine boyunca



a)

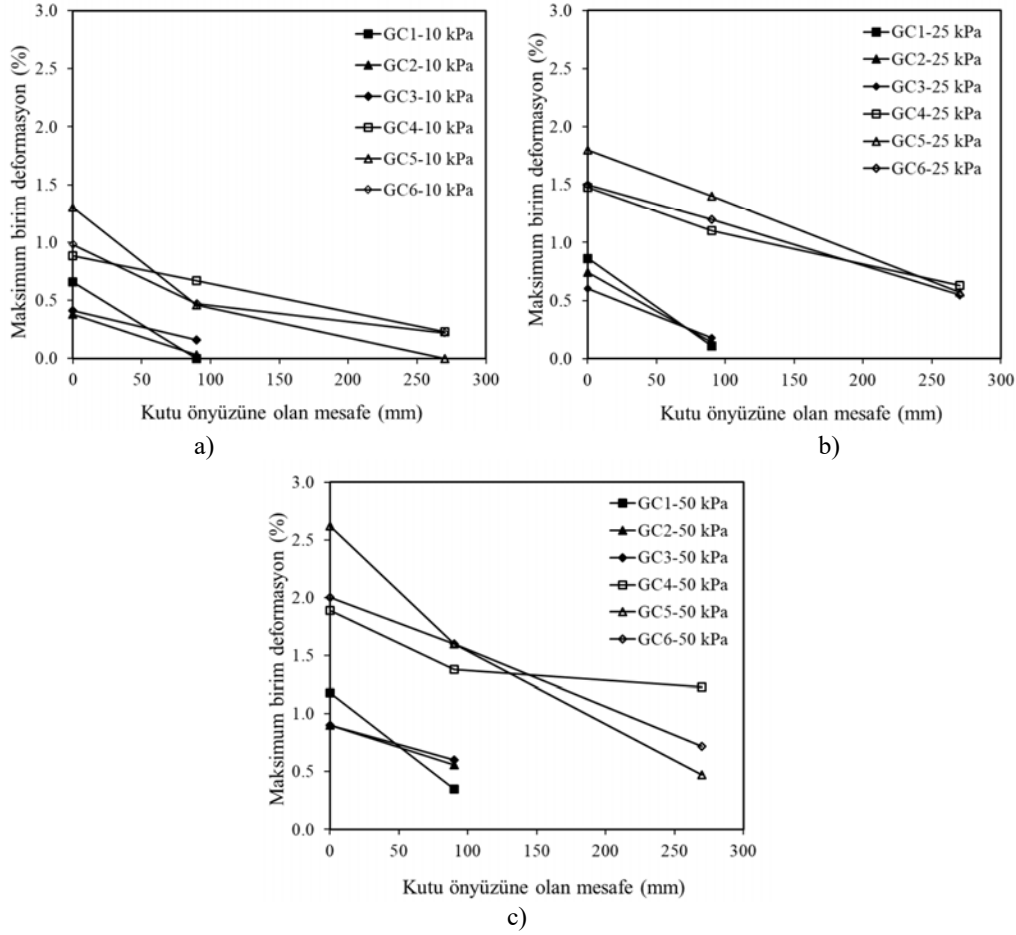


b)



c)

Şekil 9. Maksimum çekme anındaki deplasmanların hüresel eleman boyunca farklı yükler altında değişimi
(The variation of maximum displacements along the geocell under different vertical loads)



Şekil 10. Maksimum birim deformasyonların eleman boyunca farklı yükler altında değişimi
(The variation of maximum strains along the geocell under different vertical loads)

Tablo 3. Ölçülen çekme kuvvetleri (Measured pullout force)

Hüresel dolgu elemanı	Eleman boyu, L , (mm)	Toplam hücre sayısı, S	$S*L$ (m)	Düşey yük (kPa)		
				10 kPa	25 kPa	50 kPa
				P_F (kN)	P_F (kN)	P_F (kN)
GC1	170	1	0,17	0,95	1,72	2,40
GC2	170	2	0,34	1,74	2,28	2,74
GC3	170	3	0,51	1,65	2,40	3,56
GC4	340	4	1,36	2,60	4,38	5,68
GC5	340	2	0,68	2,55	3,60	5,20
GC6	340	6	2,04	3,80	6,00	7,90

yerleştirilen gerinim pulları ile maksimum çekme kuvvetinde birim deformasyonlar belirlenmiş olup deneylere ait maksimum birim deformasyon değerleri Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 10a, Şekil 10b ve Şekil 10c'den de görüldüğü gibi maksimum birim deformasyonlar duvar önyüzünde oldukça yüksek değerlere ulaşmakta olup eleman boyunca azalmaktadır. Ayrıca düşey yük arttıkça eleman üzerinde oluşan birim deformasyonlarda artmaktadır. Hüresel dolgu elemanın boyutlarının etkisini dikkate alan genel bir ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla eleman boyunu (L) ve hücre sayısını (S) dikkate alınarak yapılan çalışmada, çekme kuvveti ile SxL değerlerine ait bilgiler

Tablo 3'te ve bu değerler arasındaki ilişkiler ise farklı düşey basınçlar altında sırasıyla Şekil 11'de verilmiştir.

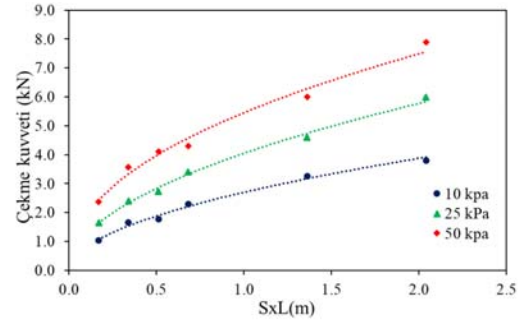
3.1. Ara Yüzey Sürtünme Davranışı (Pullout Interaction Behavior)

Zemin-geosentetik ara yüzey sürtünme davranışı geosentetik donatı elemanlarının çekme direncini önemli ölçüde etkilemektedir. Ara yüzey sürtünme davranışı zeminin kayma mukavemeti parametrelerine (kayma mukavemeti açısı ve kohezyon) ve geosentetik donatı elemanın geometrisine bağlıdır.

Çekme direnci, temel olarak enine elemanlar üzerinde oluşan pasif direnç ile boyuna elemanlar üzerinde oluşan sürtünme direncinin toplamına eşittir (Jewell, 1985). Genel olarak çekme direncini ifade edecek olursak, çekme direnci zemin ile geosentetik donatı elemanı arasındaki ara yüzey kayma direnci (τ_a) olarak da tanımlanabilir. Dolayısıyla ara yüzey kayma direncinin belirlenmesi çekme direncinin belirlenmesi açısından önemlidir. Buna göre zemin-geosentetik ara yüzey kayma direnci;(Eş. 1)

$$\tau_a = \frac{P_F}{2A_{düz}} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada P_F çekme kuvveti $A_{düz}$ ise geosentetik elemanın maksimum çekme kuvveti anındaki düzeltilmiş yüzey alanıdır. Ara yüzey kayma direncini ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri açısından Eş. 2'deki gibi ifade edilebilir.

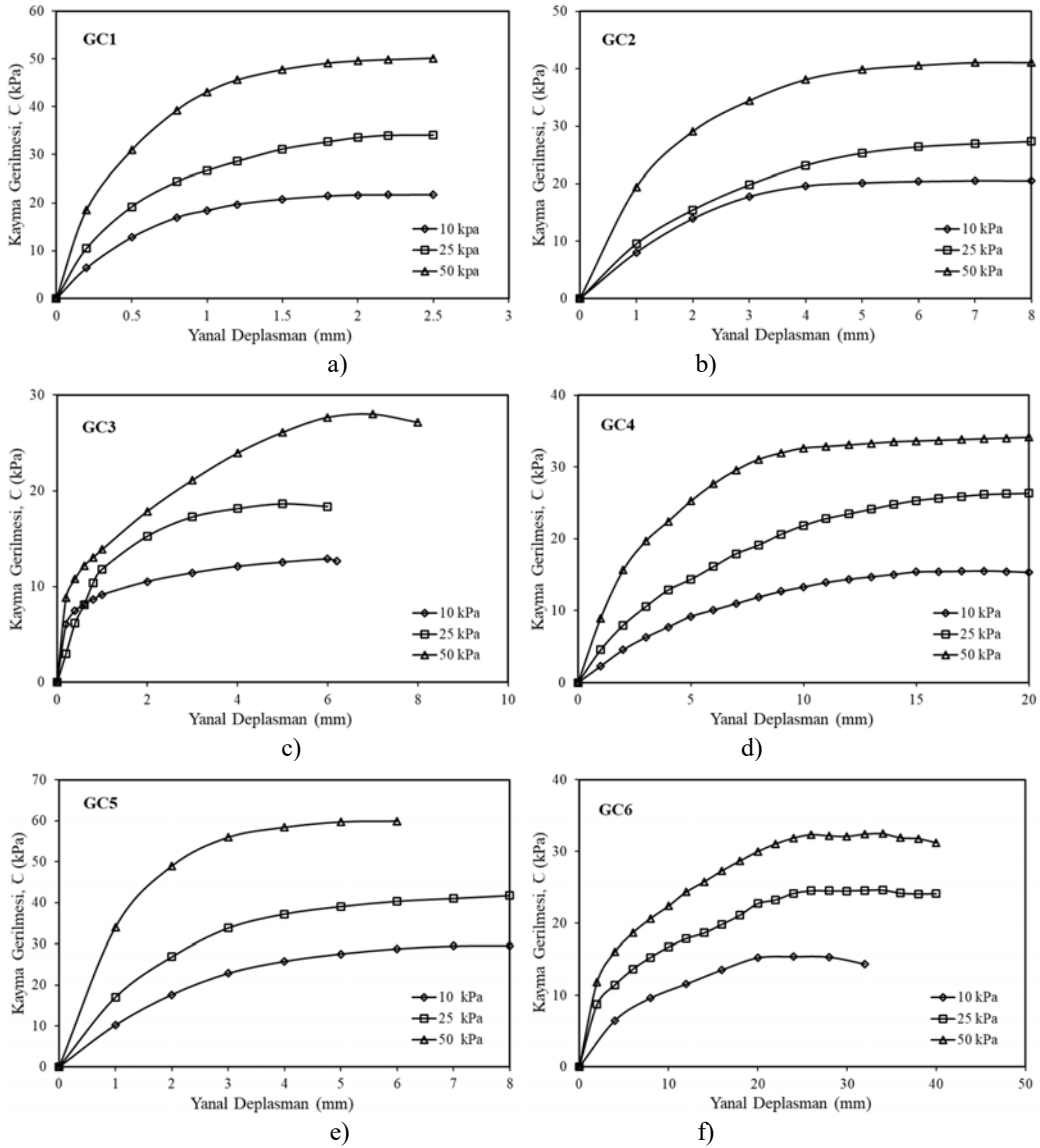


Şekil 11. Pik çekme kuvvetlerinin farklı yükler altında SxL ile değişimi

(The variation of peak pullout force with SxL under different vertical loads)

$$\tau_a = \sigma_v \tan \delta + c_a \quad (2)$$

Böylelikle çekme direnci,(Eş. 3)



Şekil 12. Farklı dikey basınçlar altında tüm elemanlara ait ara yüzey kayma gerilmesi yanıl deplasman eğrileri
(The variation of interface shear stress with lateral displacement under different vertical loads)

$$P_F = 2(\sigma_v \tan \delta + c_a)A_{düz} \quad (3)$$

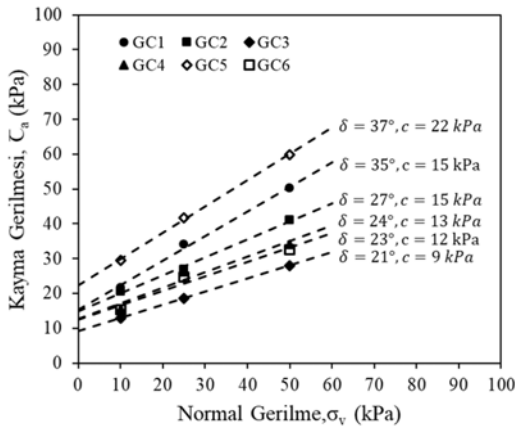
şeklinde ifade edilebilir. Burada, σ_v düşey gerilme, δ zemin ile geosentetik donatı arasındaki ara yüzey kayma mukavemeti açısı ve c_a ise ara yüzey kohezyon direncidir.

Zemin ile geosentetik donatı elemanı arasındaki sürtünme davranışını ifade eden ara yüzey sürtünme katsayısı (f^*) laboratuvarında yapılan çekme ve kesme kutusu deneyleri ile belirlenmektedir. Genel olarak ara yüzey sürtünme katsayısı kayma mukavemeti parametreleri (ara yüzey sürtünme açısı ve kohezyonu) açısından çekme deney sonuçlarına göre Eş. 4 yardımı ile,

$$f^* = \frac{\sigma_v \tan \delta + c_a}{\sigma_v \tan \phi + c} \quad (4)$$

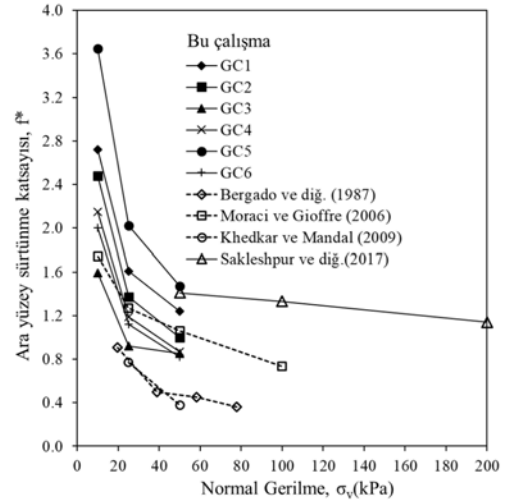
ara yüzey sürtünme katsayısı belirlenebilir. Ara yüzey sürtünme katsayısı farklı boyutlardaki hücreselelemanları için 10, 25 ve 50 kPa düşey yük altında yukardaki eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 12’de tüm deneylere ait ara yüzey kayma gerilmeleri ile yanal deplasman eğrileri farklı düşey basınçlar altında verilmiştir.

Şekil 12’de verilen kayma gerilmeleri eğrilerinden ara yüzey kırılma zarfları çizilerek ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir. Şekil 13’te tüm deneyler ait ara yüzey kırılma zarfları görülmektedir. Şekil 13’ten de görüleceği üzere 6 farklı geometriye sahip elemanların tümünde ara yüzey kayma parametresi olan görünür kohezyon ortaya çıkmıştır. Bu durum daha önce bahsedildiği gibi hücreselelemanın boyutları ile ilgili olup enine elemanlar üzerinde oluşan pasif dirençlerden kaynaklandığı söylenebilir. Sonuç olarak Ara yüzey sürtünme katsayısı farklı boyutlardaki hücreselelemanları için 10, 25 ve 50 kPa normal gerilme altında yukardaki eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır.



Şekil 13. Kırılma zarfları (Shear stress chart against normal stress) Ara yüzey sürtünme katsayısı farklı boyutlardaki hücreselelemanları için 10, 25 ve 50 kPa düşey yük altında yukardaki eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır. Ara yüzey sürtünme katsayıları literatürde yapılan çalışmalar [35-38] ile karşılaştırılmış olup Şekil 14’te gösterilmiştir.

Bu çalışma kapsamında belirlenen hücreseleleman-zemin ara yüzey sürtünme katsayısı (f^*), yukarıda ki şekilde de görüldüğü gibi bambu gridi [35], polietilen malzemeden yapılan geogrid [36], yüksekliği 20 mm olan çelik plakalar ile yapılan hücreselele dolgu elemanı [37] ve kesme kutusunda yapılan yüksek düşey basınçlar altında çakıl ile geogrid [38] için belirlenen ara yüzey sürtünme katsayıları ile karşılaştırılmıştır. Tüm elemanlarda benzer bir şekilde düşey basınç arttıkça ara yüzey sürtünme katsayısı da azalmaktadır. Ayrıca ara yüzey sürtünme katsayıları bu çalışma kapsamında kullanılan bazı hücreselelemanlarda (GC5 ve GC1) daha yüksek olduğu da görülmektedir. Bu durum, hücreselele elemanın yüksekliğinin diğer geosentetik elemanların yüksekliğinden büyük olması nedeniyle açıklanabilir. Fakat genel olarak zemin-hücreselele elemanların ara yüzey sürtünme katsayıları diğer geosentetik elemanların ara yüzey sürtünme katsayıları ile yakın değerlerde olduğu görülmüştür.



Şekil 14. Farklı düşey basınçları altında ara yüzey sürtünme katsayıları (f^*)

(The interface shear strength coefficient under different vertical loads)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Zemin-hücreselele elemanı arasındaki sürtünme davranışı laboratuvarında yapılan büyük ölçekli çekme deneyleri incelenmiştir. Elemanlar üzerinde oluşan deplasman ve deformasyonlar eleman boyunca değişiklik göstermekte ve eleman boyunca azalmaktadır. Deplasmanlar ve deformasyonlar kutu ön yüzüne yakın bölgelerde daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Ayrıca düşey yük arttıkça kutu ön yüzüne yakın bölgelerde deplasmanlar ve deformasyonlar artmaktadır. Çekme deney sonuçlarına göre hücreselele dolgu elemanların boyutlarının veya hücre sayısının artması ile çekme kuvvetleri de artmıştır. Çünkü hücre sayısının artması enine elemanlar üzerinde oluşan pasif dirençleri artıracığından çekme kuvvetleri de artacaktır. Ayrıca eleman boyutlarının artması eleman üzerinde oluşan sürtünme alanında artıracığından çekme kuvvetleri de artacaktır. Eleman boyunca oluşan deplasmanlar ve deformasyonlar tüm elemanlar için duvar önyüzünde en

yüksek değerine ulaşmakta ve gömme derinliğince azalmaktadır. Hücresel eleman-zemin arasındaki ara yüzey sürtünme davranışını ifade eden ara yüzey sürtünme katsayısı, düşey basınç arttıkça azaldığı belirlenmiştir. Zemin-yüzeysel geosentetik elemanlar (geogrid) arasındaki ara yüzey sürtünme katsayıları ile zemin-hücresel dolgu elemanların ara yüzey sürtünme katsayıları genel olarak yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir. Fakat bazı hücresel elemanların (GC5 ve GC1) ara yüzey sürtünme katsayı değerleri yüzeysel donatı elemanlarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum hücresel elemanın yüksekliğinin diğer geosentetik elemanlardan daha büyük olması ile açıklanabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından BAP.06 / 2018-21 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar, bu makalede sunulan çalışmalara katkılarından dolayı Sadık Şerefoglu, Dr. Mustafa Şahmaran, Kaan Yünkül, Tahsin Budak ve Aydın Gökçe'ye teşekkürlerini sunar

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Zhou, H., Wen, X., 2008. Model studies on geogrid- or geocell-reinforced sand cushion on soft soil. *Geotextiles and Geomembranes* 26, 231-238.
- Dash, S.K., Rajagopal, K., Krishnaswamy, N.R., 2007. Behaviour of geocell reinforced sand beds under strip loading. *Canadian Geotechnical Journal* 44, 905-916.
- Pokharel, S.K., Han, J., Leshchinsky, D., Parsons, R.L., Halahm, I., 2010. Investigation of factors influencing behavior of single geocell-reinforced bases under static loading. *Geotextiles and Geomembranes* 28 (6), 570e578.
- Ingold, T.S. 1983. Laboratory pullout testing of grid reinforcements in sand, *Geotechnical Testing Journal*, 6(3):101-111
- Jewell, R. A., Milligan, G. W. E., Sarsby, R. W. & Dubois, D. 1985. Interaction between soil and geogrids, *Symposium on Polymer Grid Reinforcement*, London, UK, Thomas Telford, London, UK, pp. 18-30.
- Tanyu, B.F., Aydilek, A.H., Lau, A.W., Edil, T.B., Benson, C.H., 2013. Laboratory evaluation of Geocell-reinforced gravel subbase over poor subgrades. *Geosynth. Int.* 20 (2), 47-61.
- Gurbuz, A. and Mertol, H.C. (2012). Interaction between assembled 3-D honeycomb cells (geocell =geonet) produced from high density polyethylene and a cohesionless soil. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(828-836).
- Biabani, M.M., Indraratna, B., Ngo, N.T., 2016. Modelling of geocell-reinforced sub ballast subjected to cyclic loading. *Geotext. Geomembranes* 44, 489-503.
- Hegde, A., Sitharam, T.G., 2017. Experiment and 3D-numerical studies on soft clay bed reinforced with different types of cellular confinement systems. *Transp. Geotech* 10, 73-84.
- Madhavi Latha G, Rajagopal K. Parametric finite element analyses of geocell-supported embankments. *Can Geotech J* 2007;44(8):917-27
- Mehdipour I, Ghazavi M, Moayed RZ. Numerical study on stability analysis of geocell reinforced slopes by considering the bending effect. *Geotextile and Geomembrane* 2013;37:23-34.
- Ling HI, Liu H, Kaliakin VN, Leshchinsky D. Analyzing dynamic behavior of geosynthetic-reinforced soil retaining walls. *J Eng Mech* 2004;130(8):911-20.
- Chen, R.H., Chiu, Y.M., 2008. Model tests of geocell retaining structures. *Geotextiles and Geomembranes* 26 (1), 56-57
- Song, F., Liu, H.B., Ma, L.Q., Hu, H.B., 2018. Numerical analysis of geocell-reinforced retaining wall failure modes. *Geotext. Geomembranes* 46, 284-296.
- Bathurst, R.J., Karpurapu, R., 1993. Large-scale triaxial compression testing of geocellreinforced granular soils. *Geotech. Test J.* 16 (3), 296-303.
- Koerner R.M. 1986. Direct shear/pull-out tests on geogrids, Report No. 1, Department of Civil Engineering, Drexel University, Philadelphia.
- Farrag, K., Acar, Y.B., Juran, I. 1993. Pull-out resistance of geogrid reinforcements. *Geotextiles and Geomembranes* 12 (2), 133-159.
- Bergado, D.T., Chai, J.C. 1994. Pullout force-displacement relationship of extensible grid reinforcement. *Geotextiles and Geomembranes*, 13 (5), 295-316.
- Raju, D.M. 1995. Monotonic and Cyclic Pullout Resistance of Geosynthetic. Ph.D. thesis, University of British Columbia, Canada.
- Perkins, S.W., Cuelho, E.V. 1999. Soil-geosynthetic interface strength and stiffness relationships from pullout tests, *Geosynthetics International*, 6 (5), 321-346.
- Palmeira, E.M. 2004. Bearing force mobilization in pull-out tests on geogrids, *Geotextiles and Geomembranes*, 22 (6), 481-509.
- Moraci, N., Recalcati, P.G. 2005. Factors affecting the pullout behavior of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil, *Geotextiles and Geomembranes* 24 (4), 220-242.
- Palmeira, E.M. 2009. Soil-geosynthetic interaction: modelling and analysis. *Geotextile and Geomembrane*, 27 (5), 368-390.
- Ezzein, Fawzy M., Bathurst, Richard J. 2014. A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(3), 246-255
- Wang, Z., Jacobs, F., Ziegler, M. 2016. Experimental and DEM investigation of geogrid-soil interaction under pullout loads. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), 230-246.
- Vangla, P., Latha Gali, M. 2016. Effect of particle size of sand and surface asperities of reinforcement on their interface shear behavior. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), 254-268
- Kiyota, T., Soma, R., Munoz, H., Kuroda, T., Ohta, J., Harata, M., and Tatsuoka, F. 2009. Pullout behaviour of

- geo-cell placed as reinforcement in backfill, *Geosynthetics Engineering Journal*, 24(0), 75-82. (In Japanese).
28. Mohidin, N. & Alfaro, M., C. 2011. Soil-geocell reinforcement interaction by pullout and direct shear tests, 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference, Toronto, Ontario, Canada.
 29. Han, X., Kiyota, T. and Tatsuoka, F. 2013. Interaction mechanism between geocell reinforcement and gravelly soil by pullout tests, *Bulleting of Earth Resistance Structures*, 46, 53-62.
 30. Manju, GS & Latha, Gali. 2013. Internal friction properties of geocell reinforced sand. *Proceedings of International Conference on Energy and Environment*, Kerala, India, p. 25-31.
 31. Han, Xinye. 2014. Development of a New Type of Geocell as Tensile Reinforcement for GRS RWs, Doctor of Philosophy, Department of Civil Engineering University of Tokyo, Tokyo, Japan
 32. Haussner, C., Kiyota, T., Xu, Z. 2016. Effect of spacing of transverse members on pullout resistance of a square-shaped geocell embedded in sandy and gravelly backfill materials. *The 6th Japan-Korea Geotechnical Workshop*, 109-114.
 33. Işık, A., Gürbüz, A., 2018. Assessment of behavior of soil-geocell pullout capacity, 11th International Conference on Geosynthetics, Seoul, Korea
 34. Cancelli, A., Rimoldi, A., Montanelli, F., 1993. Index and performance tests for geocells in different applications. *Geosynthetic Soil Testing Procedures*, ASTM STP 1190, 64–75.
 35. Bergado, D.T., Bukkanasuta, A. and Balasubramaniam, A. S. (1987). "Laboratory pull-out tests using bamboo and polymer geogrids including a case study." *Geotextiles and Geomembranes*, 5(3), 153–189.
 36. Moraci, N., Gioffre', D., 2006. A simple method to evaluate the pullout resistance of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil. *Geotextiles and Geomembranes* 24 (2), 116–128.
 37. M. Khedkar & J. Mandal (2009) Pullout response of cellular reinforcement under low normal pressures, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 3:1, 75-87,
 38. V.A. Sakleshpur, M. Prezzi, R. Salgado, N.Z. Siddiki, Y.S. Choi, Large-scale direct shear testing of geogrid-reinforced aggregate base over weak subgrade, *Int. J. Pavement Eng.* 1–10 (2017).