



## A scale effect on the geogrids produced with three-dimensional printer technology

Eren Güleç<sup>ID</sup>, Burak Evirgen\*<sup>ID</sup>

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Eskişehir Technical University, 26555, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye

### Highlights:

- Six types of geogrid printouts were produced with different quality and scale.
- The effects of variables on the tensile strength and shear strength behavior were investigated.
- The required coefficients were presented for scaled experimental studies which three-dimensional outputs were used.

### Keywords:

- Geogrid
- Three dimensional printers
- Tension test
- Shear box test
- Scale effect

### Article Info:

Research Article  
Received: 04.04.2021  
Accepted: 27.08.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.909508

### Correspondence:

Author: Burak Evirgen  
e-mail: burakevirgen@eskisehir.edu.tr  
phone: +90 222 213 8171

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, a unique printing process was applied during the production of scaled geogrids with respect to real dimensions. The effect of scaling value was investigated in terms of tensile strength and shear strength capacities (Figure A).

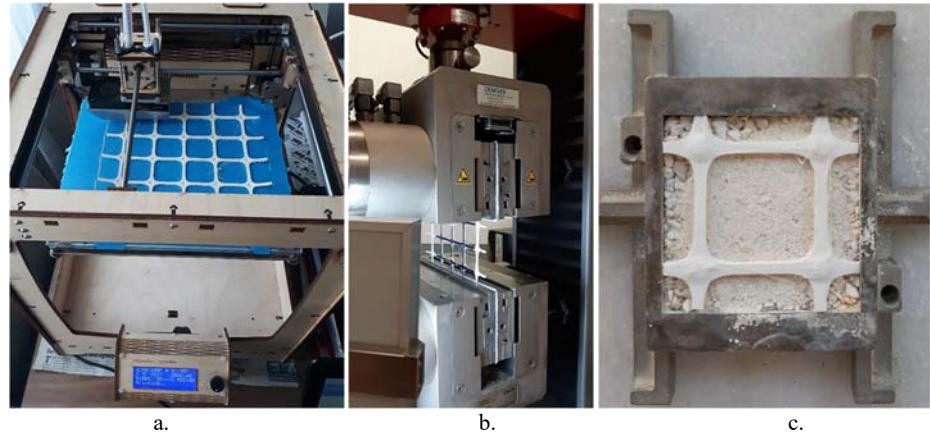


Figure A. Printing process, b. Tensile strength test device and c. Shear box cell

### Purpose:

The aim of this study is to present the required coefficients and the change in ultimate values of mechanical properties of printed geogrids, in addition to evaluate the usability of three-dimensional printing technology within a field of reinforced soil or mechanically stabilized earth walls.

### Theory and Methods:

Firstly, six types of geogrids were printed, which have 1/1, 1/2 and 1/4 scaling factors and two printing quality, via specified properties of printer due to requirements. Moreover, coupon specimens were produced to determine the tensile capacity of raw material. Then, all of them were subjected to tension tests as specified in ASTM D4595-17 [25]. Finally, shear box test were realized to obtain the shear strength parameters due to ASTM D3080 [26].

### Results:

It has been conducted that tensile strength capacity is decreased with the decrease in scale factor since the critical cross section against tension forces reduced. The tension force scaling coefficients were proposed between 0.15 and 0.41 due to printing quality and scale factor. The tensile strength of ABS filament was calculated around 14.6 MPa at 1.45% strain level. Although there is no significant difference in the average normal stress values at failure state, shear strength values of printed geogrids increased about 5%-15% within shear box tests with respect to original geogrids.

### Conclusion:

The three dimensional printing technology can be used confidently to produce of geosynthetic reinforcements. However, the change in mechanical properties must be noted according to essential parameters such as raw material of filament, details of producing stage, size of geosynthetics and interactions between soils.



## Üç boyutlu yazıcı teknolojisi ile üretilen geogridlerde ölçek etkisi

Eren Güleç<sup>ID</sup>, Burak Evirgen\*<sup>ID</sup>

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26555, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Farklı kalite ve ölçeğe sahip altı tip geogrid çıktısı üretilmiştir
- Değişkenlerin çekme mukavemeti ve kayma dayanımı davranışına etkileri incelenmiştir
- Üç boyutlu çıktılarının kullanıldığı ölçekli deneysel çalışmalar için gereken katsayılar sunulmuştur

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 04.04.2021  
Kabul: 27.08.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.909508

### Anahtar Kelimeler:

Geogrid,  
Üç boyutlu yazıcı,  
çekme testi,  
kesme kutusu deneyi,  
ölçek etkisi

### ÖZ

Son dönemlerde tıp, güzel sanatlar, makine, havacılık ve hatta yiyecek sektörüne kadar birçok alanda üç boyutlu yazıcı teknolojisi uygulama yeri bulmaktadır. Bu çalışmada, her türlü katı cismin yazdırılmasına imkan tanıyan söz konusu teknolojinin geoteknik alanında kullanılabilirliğini değerlendirmek için üç boyutlu çıktılarını alan geogridlerde ölçek etkisine odaklanılmıştır. Özellikle laboratuvarında gerçekleştirilen ölçekli çalışmalarda küçültülen zemin hücresi oranında geogridlerin de küçültülmesi gerekmektedir. Aksi halde, deneylerde yapılan kabuller ve sınır koşulları arazideki gerçek durumu yansıtamamaktadır. Bu amaçla, referans olarak adlandırılan orijinal geogridler ile birlikte 1:1, 1:2 ve 1:4 ölçeklerinde üretilen geogridler, çekme testi ve kesme kutusu deneylerine tabii tutulmuştur. Çıktı ham maddesi olan ABS filamentinin ortalama çekme mukavemeti %1,45 birim şekil değiştirme değerinde 14,6 MPa hesaplanmıştır. 0,1 mm ve 0,2 mm katman kalınlığına sahip baskı kalitesinin çekme mukavemeti üzerinde ciddi bir etkisi olmamasına rağmen, ölçek oranı azaldıkça nihai çekme mukavemeti ve birim şekil değiştirme değerleri azalmaktadır. Diğer taraftan, üç boyutlu geogrid çıktılarını içeren kesme kutusu deneylerinde orijinal geogrid donatılı deneylere kıyasla kayma gerilmesi değerlerinde ortalama %10 artış gözlenmiştir.

## A scale effect on the geogrids produced with three-dimensional printer technology

### HIGHLIGHTS

- Six type of geogrid printouts were produced with different quality and scale
- The effects of variables on the tensile strength and shear strength behavior were investigated
- The required coefficients were presented for scaled experimental studies which three dimensional outputs were used

### Article Info

Research Article  
Received: 04.04.2021  
Accepted: 27.08.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.909508

### Keywords:

Geogrid,  
three-dimensional printer,  
tension test,  
shear box test,  
scale effect

### ABSTRACT

Recently, three-dimensional printing technology has been used in many areas such as medicine, fine arts, machinery, aeronautics and even food industry. In this study, a scale effect on the printed geogrids was focused in order to evaluate the usability of mentioned technology that allows printing of all type of solid matters, in geotechnical area. Especially, geogrids should be scaled with respect to proportion of reduced soil cell, within the scaled studies in laboratory. Otherwise, the assumptions and the boundary conditions of experiments cannot represent the real situations in the field. Therefore, geogrids produced in 1:1, 1:2 and 1:4 scales were subjected to tensile strength tests and shear box tests in addition to original geogrids called as reference ones. The average tensile strength of an ABS filament, which is the raw material of printouts, was calculated as 14.6 MPa at 1.45% strain level. Although the printing quality as a 0.1 mm and 0.2 mm layer thickness does not have a serious effect on the tensile strength, the ultimate tensile strength and related strain values decrease when the scale ratio decreases. On the other hand, an average of 10% increase in shear stress was observed in three-dimensional geogrid printouts containing shear box experiments, if these are compared with original geogrid reinforced tests.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : erengulec@eskisehir.edu.tr, \*burakevirgen@eskisehir.edu.tr /  
Tel: +90 222 213 8171

## 1. Giriş (Introduction)

Geoteknik mühendisliği alanında hem sahada gerçekleştirilen projeler açısından hem de akademik açıdan ciddi bir uygulama alanına sahip olan petrol esaslı geogridler, yüksek çekme mukavemetleri ve uzun ömürleri sayesinde zemin iyileştirmelerde kullanılmasının yanı sıra asfalt donatısı olarak da kabul görmektedir. Geotekstil ve geogrid gibi endüstriyel ürünleri ifade etmek için kullanılan "geosentetik" ismi; polipropilen, polyester, polietilen gibi sentetik malzemelerden üretildiklerinden dolayı "sentetik" ile zemin-yer anlamındaki Latince "geo"nun birleşmesi sonucu oluşur [1]. Donatılı zemin uygulamasındaki temel prensip; heterojen ve karmaşık yapısından dolayı birçok belirsizlik içeren zemin davranışının, çelikten üretilen donatı, polietilen esaslı geogrid veya polyester esaslı geogrid kullanımı ile iyileştirilmesidir. Bu malzemelerin düşük özgül ağırlığına rağmen yüksek çekme dayanımına sahip olmaları, donatı kullanımı için ön plana çıkmalarını sağlamaktadır [2]. Donatılı zeminler; uygulama kolaylığı, yerleştirme sırasında işçilik veya malzeme kusurlarının oldukça az görülmesi, uygun gradasyona sahip granüler zemin kullanımı sayesinde arazide sadece mekanik stabilizasyon gerekliliğine bağlı olarak son derece ekonomik ve hızlı bir alternatif oluşturmaktadır. Geosentetik malzemeler hafifliği, örtü basıncını azaltması ve yanal toprak basıncına karşı gösterdiği etkili performans ile inşaat piyasasında kendine önemli bir yer edinmiştir [3]. Mohr-Coulomb göçme kriterine göre granüler zeminlerdeki kayma dayanımı içsel sürtünme açısı ve kenetlenme etkisinden kaynaklanmaktadır. Geogridlerde ise bahsi geçen parametrelere ek olarak adezyon kuvveti ile sürtünme direnci oluşmaktadır [4]. Bu yüzden literatürdeki çalışmalar genellikle farklı koşullar altındaki zemin donatılarının sıyırılma direnci veya kopma mukavemetini incelemeye yöneliktir. Pant vd. [5] enine ve boyuna doğrultuda eklenen harici elemanların polyster geogridin çekme direncine etkisini araştırmak için, söz konusu elemanların dört farklı yerleşiminde taban küllü ile uçucu küllü dolgululu deneysel çalışmada bir dizi çekme testi uygulamışlardır. Tavakoli Mehrjardi ve Khazaei [6] geogrid takviyeli zeminlerdeki ölçek etkisini araştırmak amacıyla 36 adet tekrarlı plaka yükleme testi gerçekleştirmişlerdir. Artan yükleme plakası çapı ve zemin dane boyutunun oturma miktarlarını azalttığını belirtilerek, geogridler açısından en efektif göz açıklığının zemin ortalama dane büyüklüğünün yaklaşık 4 katı olması gerektiği vurgulanmıştır. Mousavi vd. [7] asfaltsız bir yol kaplamasında geogrid donatı kullanılması durumunda en yüksek verimliliği sağlamak amacıyla yerleştirilmesi gereken konumu değerlendirmişlerdir. Liu vd. (8) tarafından hareket doğrultusuna dik nervürlerin geogrid - kum ara yüz davranışına etkisini incelemek amacıyla, malzeme mukavemeti, açıklık yüzdesi ve açıklık dizilimi değişkenlerine göre farklı tipteki polyster geogridler direkt kesme deneyine tabii tutulmuştur. Kum - nervür arasındaki sürtünme ve göz açıklığındaki kum daneleri arasındaki etkileşime ek olarak enine nervürlerin genel ara yüz direncine ayrıca katkı sağladığı vurgulanmıştır. Geogrid çekme mukavemeti ve rijitliği bu katkıya pozitif yönde etki ederken, göz açıklığı oranının artmasıyla ara yüz direncinin azaldığı belirtilmiştir. Makkar vd. [9] doğrudan kesmeye maruz kalan zemin ve 3 boyutlu geogrid arasındaki etkileşimi araştırmışlardır. Geogrid takviyeli ince kumun ara yüzey kayma mukavemeti katsayısının yine geogrid takviyeli orta kuma göre daha az olduğu gözlenmiştir. Fan [10] tarafından farklı boyutlardaki çelik-plastik geogrid kombinasyonlarına çekme testleri uygulanmıştır. Bu çalışmalara ek olarak geogrid donatılarının statik veya dinamik yükler altında zemin tabakaları, yol kaplaması, demir yolu altı balast uygulamalarına ilişkin çok sayıda deneysel veya analitik çalışmalarla karşılaşılmaktadır [11-14].

Üç boyutlu yazıcıların kullanıldığı çalışmalar ise son birkaç yılda ön plana çıkmaktadır. Stathas vd. [15] tarafından santrifüj testlerinde

kullanmak amacıyla üç boyutlu yazıcıda üretilen küçük ölçekli geogrid kullanımının %5 birim şekil değiştirme değerine kadar olan çekme davranışı değerlendirilmiştir. Reçine esaslı foto polimer ham maddeleri ile üretilen numunelerin 1/10 ölçeğinde model testlerde kullanılmak üzere gerçek dayanımın 1/10'u ile 1/100'ü oranlarında ve kabul edilebilir seviyelerde çekme dayanımı sağlandığı belirtilmiş olmakla birlikte, farklı ölçeklerin değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Diğer bir çalışmada Uragan ve Huvaj [16] tarafından PLA ve ABS ham maddeleri ile alınan üç boyutlu geosentetik çıktılar üzerinde ekstenel çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca direkt kesme kutusu deneyi sonucunda granüler malzeme tipinin zemin kayma parametrelerine etkileri incelenmiştir. Hanaor vd. [17] tarafından keskin veya düz yapıdaki dane özelliklerini içeren granüler malzeme yerine geçebilecek üç boyutlu çıktılar çeşitli yöntemlerle üretilmiştir. Bu malzemelerin hem yapı hem de geoteknik sektörlerinde tamamlayıcı nitelikte kullanılabileceği vurgulanmıştır. Lin vd. [18] tarafından sunulan bir diğer çalışmada ise, ince danelerin boyut, şekil ve incelik modülünün üç boyutlu yazıcı sisteminde kullanılan çimento bazlı harçların performansına etkileri araştırılmıştır. Jiang vd. [19] doğal kayaçların çatlak ve fisürlerini modelledikleri çalışmalarında üç boyutlu tarama ve sonrasında üç boyutlu yazdırma işlemlerini kullanmışlardır. Yenilikçi bu yaklaşım sayesinde geoteknik alanının yanı sıra farklı yüzey çeşitliğine sahip homojen birçok malzemenin direkt olarak bilgisayar destekli yazılımlara aktarıldıktan sonra kolaylıkla çıktısının alınabileceği vurgulanmıştır.

Özellikle ulaştırma yapılarının çevresinde donatılı zemin kullanımının giderek yaygınlaşması ile uygulama kolaylığı, ekonomik olması ve hızlı inşa edilmesi gibi avantajlarına bağlı olarak Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından sıklıkla tercih edilmesi donatılı zemin elemanlarının verimliliğinin artırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, deneysel çalışmalarda kullanılan deney hücreleri, zemin dane çapı, istinat yapısı ve temel elemanları gibi unsurların sınır şartları dahilinde ölçeklenmesi gerekmektedir. Benzer şekilde ölçekli deneysel modellerde kapsamlı orijinal boyutlarına göre küçültülerek üretilen geogridlerin kullanımı gerekmektedir. Fakat piyasadaki seri üretim platformları bu denli küçük boyutlardaki üretime imkan sağlamamaktadır. Bu çalışmada, ölçekli deneysel modellerde kullanılmak üzere üç boyutlu yazıcılar yardımıyla orijinal çift doğrultulu ekstrüde geogride oranla 1/1, 1/2 ve 1/4 ölçeklerinde üretilen geogridler için hem çekme mukavemeti hem de kayma dayanımı açısından katsayıların sunulması amaçlanmıştır. Bu sayede sonraki çalışmalarda kullanılacak ölçekli geogridlerde söz konusu katsayılar göz önünde bulundurularak tasarım yapılacaktır.

## 2. Üç Boyutlu Çıktılar (Three Dimensional Outputs)

Üç boyutlu baskı; çıktı alınacak elemanın üç boyutlu eleman modeli oluşturulduktan sonra plastik, toz ve çelik gibi hammaddeler kullanılarak katı formda basılması işlemidir. Yazdırma sistematğinde ise sırasıyla yazılımdan gelen çizime ait veriyi noktasal koordinatlara dönüştürerek, üç eksenle hareket edebilen kafa sayesinde ham madde olarak kullanılan filament eritilip ısı yatağında ilgili noktaya bırakılmaktadır. Isı yatağı, basılan ürünlerin daha pürüzsüz ve kusursuz olmasını sağlamakta olup eğrilme ve bükülmeyi önlemektedir. Genel itibarıyla üç boyutlu çıktılarda tercih edilen iki temel filament ABS ve PLA'dır. ABS (Akrilonitril Butadin Stiren) plastik enjeksiyon sektöründe de oldukça sık kullanılan hafif ama sert bir termoplastik polimerdir. Çıktı alınan ürünler 20°C ile 80°C arasında kullanılabilir. Yüksek mukavemet ve darbe direnci ile tercih edilen bir üründür. PLA (Polilaktik Asit) ise daha düşük sıcaklıklarda işlenebilir olması ile tercih sebebidir. PLA, ABS'den farklı olarak petrolden değil nişasta içeren ürünlerden (mısır, şeker kamışı vs.) elde

edilir. Bu nedenle sağlık açısından ABS'den üstün olmasına rağmen daha düşük mukavemete sahiptir. Yük taşıyacak ürünler için ABS ham maddesinin tercih edilmesi daha uygun bir seçim olacaktır. Bu yüzden üretimlerde petrol esaslı ABS filamentleri kullanılmıştır. Piyasada satılan; 34 mm x 34 mm net göz açıklığı, 40 mm x 40 mm dıştan dışa birim hücre boyutu, %74,35 açıklık oranı ile 3 mm nervür (lif) genişliği ve 2 mm nervür kalınlığına sahip polyster esaslı çift doğrultulu ekstrüde geogrid çalışmada orijinal geogrid olarak adlandırılmaktadır. Orijinal geogrid hücresinden kumpas yardımıyla gerçek ölçüler alınmış ve gerçek donatıdaki birleşim noktalarında bulunan bağlantı detayları da birebir modellenmiştir. SketchUp programı kullanılarak tasarımlar ve çizimler yapılmış olup, gerçek boyuta oranla 1/1, 1/2 ve 1/4 oranlarında küçültme ölçeği uygulanarak net göz açıklıkları sırasıyla 34 mm x 34 mm, 17 mm x 17 mm ve 8,5 mm x 8,5 mm olan çıktılar alınmıştır (Şekil 1). Ölçeklendirme işlemi sonrasında 1/2 ve 1/4 ölçekli numunelerde sırasıyla 1,5 mm ve 0,75 mm nervür genişliği, 1 mm ve 0,5 mm nervür kalınlığı ile %75,17 ve %79,82 açıklık oranları elde edilmiştir. Dolayısıyla, gerçek boyutlu geogridin tüm bileşenlerine aynı ölçek uygulandığında ciddi bir açıklık oranı farkı oluşmamaktadır. Yazdırma işlemi açık kaynaklı yazılım programı olan Cura adlı yazılım ile gerçekleştirilmiştir.

Üç boyutlu çıktıların alınması sırasında karşılaşılan en büyük sorun filamentin baskı tablasına yapışmamasından kaynaklanan hatalar olmuştur. Bu hataların çözümü için yazılımın ve üç boyutlu yazıcının kullanımını irdelemek amacıyla ilk aşamada temel geometrik şekiller üzerinde yazılım dahilindeki nozül sıcaklığı, ilk katman kalınlığı, fan hızı, yazdırma hızı, baskı tablası sıcaklığı gibi bazı ayarlar özelleştirilerek denemeler yapılmıştır. Buna ek olarak, baskı tablası ile filament arasındaki adezyon kuvvetini arttırmak amacıyla baskı tablası üzerine özel bant uygulaması yapılmıştır. 240°C nozül sıcaklığı, 100°C tabla sıcaklığı, 50 mm/s baskı hızı ve %40 fan hızı kullanılarak kesin çıktılar alınmıştır. Projede gerçekleştirilecek deneyler göz önünde bulundurulduğunda kesme kutusu deneyleri için cihaz kalıbı içerisine sığabilmesi adına 60 mm x 60 mm boyutlarında ve çekme testlerinin gerçekleştirilebilmesi için de üç boyutlu yazıcının basım alanı sınırları dahilinde 200 mm x 200 mm

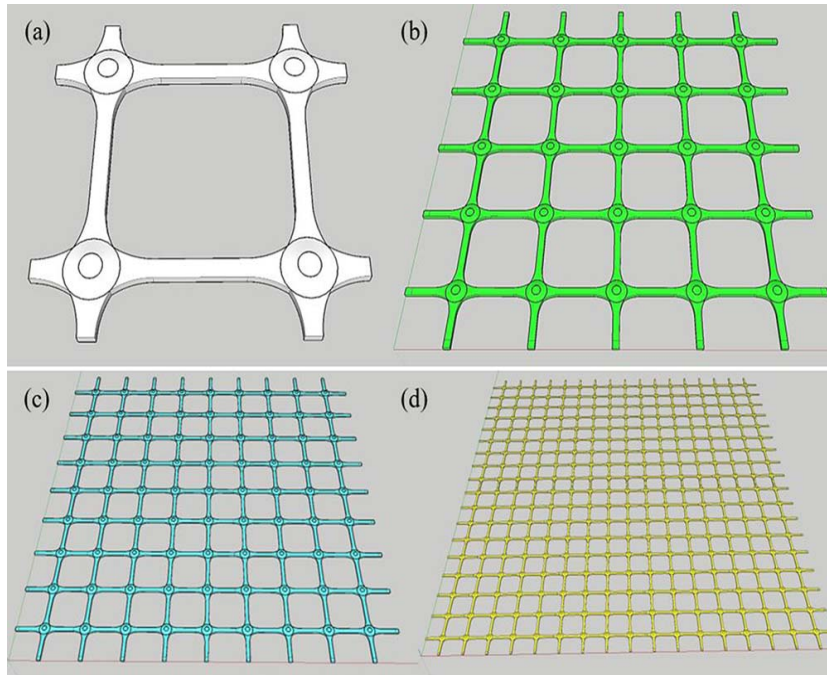
boyutlarında numuneler 2 farklı baskı kalitesinde ve 3 farklı ölçekte üretilmiştir. ABS esaslı 2,85 mm çapındaki filament beslemesiyle nozül çıkışında 0,4 mm lif çapına düşürülen eriyik daha az katman yüksekliğinde daha fazla lif sayısı ile malzeme üretimini sağlamaktadır. Dolayısıyla, katman yüksekliğinin azalması baskı hassaslığını yani kaliteyi artırırken aynı zamanda basım süresi ve kullanılan ham madde miktarını da arttırmaktadır. Tüm baskılar %100 dolulukta alınmış olup, 0,1 mm katman yüksekliğinde işlenen çıktılar 1. kalite olarak adlandırılırken, 0,2 mm katman yüksekliğinde üretilen numuneler 2. kalite olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca ABS malzemesinin çekme mukavemetini öğrenmek amacıyla kupon numunelerine ihtiyaç duyulmuştur. Kupon veya fiyonk numuneleri; çekme testlerinde kullanılmak üzere genellikle düz plaka, sac veya dairesel malzemelerden şeritler kesilmek suretiyle üretilen elemanlardır. ASTM A370 [20] standardında tanımlanan limitler dahilinde genişlik, kalınlık, pah yarıçapı, tam uzunluk, azaltılmış kesit uzunluğu, kavrama uzunluğu ve kavrama genişliği değerleri sırasıyla, 40 mm, 2 mm, 13 mm, 200 mm, 74 mm, 50 mm ve 66 mm seçilerek 2 farklı kalitede toplam 6 adet kupon numunesi üretilmiştir (Şekil 2).

### 2.1. Zemin Özellikleri (Properties of Soil)

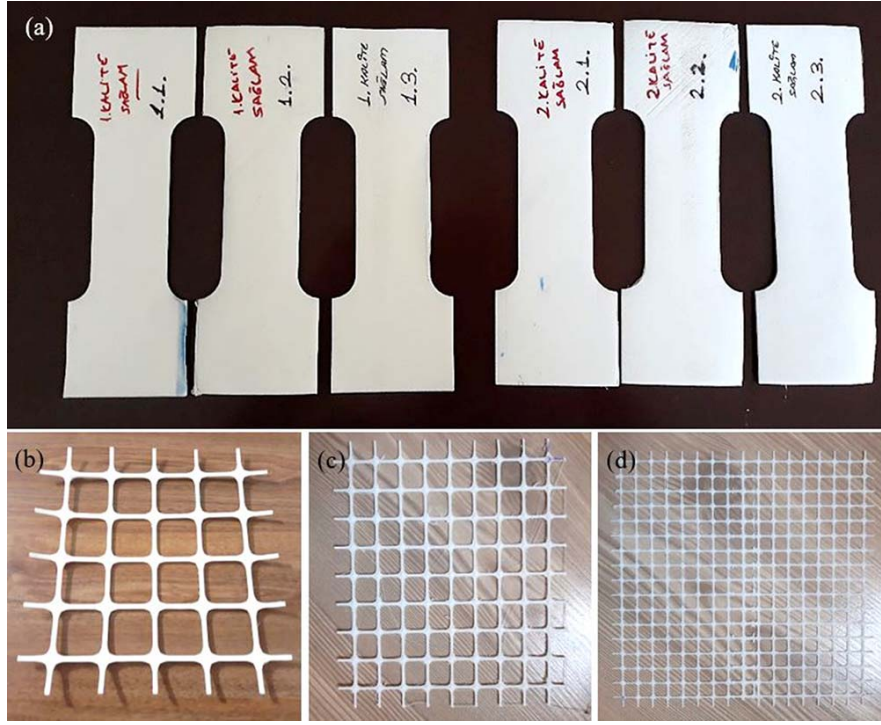
Kesme kutusu deneyinde kullanılan kumlu dolgu zemini için ilgili standartlara [21, 22] göre yapılan elek ve hidrometre analizleri sonucunda elde edilen dane-boyut dağılımı Şekil 3'te verilmiştir. SM tipi zeminde, %80,9 oranında kum bulunurken, silt ve kil içeriği ise sırasıyla %17,2 ve %1,9 civarındadır. ASTM D854-14'ye [23] göre gerçekleştirilen özgül ağırlık deneyi sonucunda dane özgül ağırlığı 2,78 olarak belirlenmiştir. Hacmi sabit kalıp içerisine gevşek ve sıkı durumlarda yerleştirilen kuru numunenin en düşük ve en yüksek birim hacim ağırlık değerleri ise sırasıyla, 17,95 kN/m<sup>3</sup> ve 21 kN/m<sup>3</sup> seviyelerindedir [24].

### 3. Test Metotları (Test Methods)

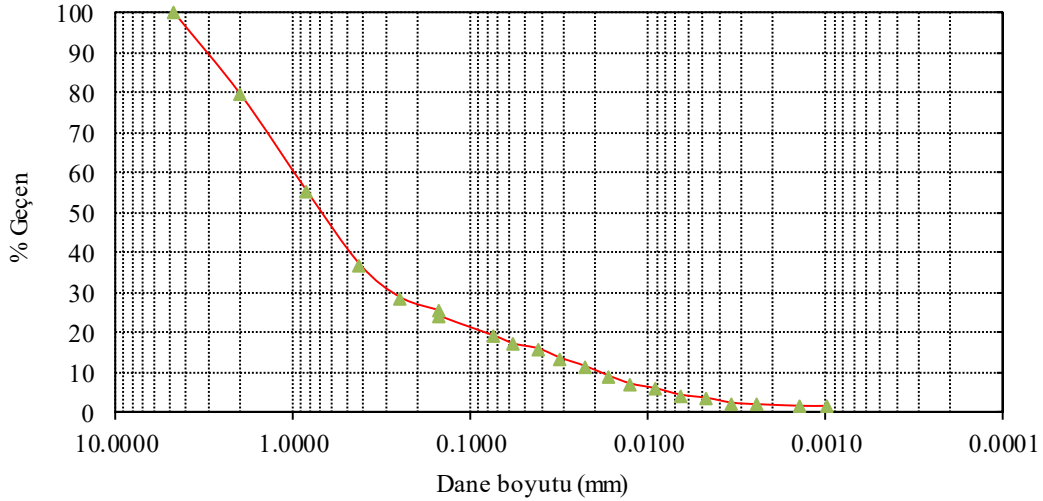
Çalışma kapsamında orijinal numuneler olarak adlandırılan çift doğrultulu ekstrüde geogridlere ek olarak, orijinal boyutlara oranla



Şekil 1. Üç boyutlu modeller. a) Birim hücre, b) 1/1 ölçekli geogrid, c) 1/2 ölçekli geogrid, d) 1/4 ölçekli geogrid (Three dimensional models. a) Unit cell, b) 1/1 scaled geogrid, c) 1/2 scaled geogrid, d) 1/4 scaled geogrid)



Şekil 2. Üç boyutlu çıktılar. a) Kupon numuneleri, b) 1/1 ölçekli geogrid, c) 1/2 ölçekli geogrid, d) 1/4 ölçekli geogrid (Three dimensional printouts. a) Coupon specimens, b) 1/1 scaled geogrid, c) 1/2 scaled geogrid, d) 1/4 scaled geogrid)



Şekil 3. Zemine ait dane-boyut dağılım eğrisi (Grain-size distribution curve of soil)

1/1, 1/2 ve 1/4 ölçekli üretilen üç boyutlu çıktılar üzerinde üç farklı ölçek, iki farklı baskı kalitesi ve her numuneden 3' er adet olmak üzere toplamda 21 adet çekme testi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ABS filamentli ile üretilen 0,1 mm (1. kalite) ve 0,2 mm (2. kalite) katman yüksekliğine sahip toplam 6 adet kupon numunesi de ASTM D4595-17 [25] standardına göre 50 kN kapasiteli cihaz yardımıyla çekme testlerine tabii tutulmuştur. Dijital ekstansometrenin deformasyon değerlerini ölçebilmesi için 20 cm x 20 cm boyutlu numuneler üzerinde 6 cm aralıklı ölçüm mesafesi belirlenerek işaretlenmektedir. Test cihazının çeneleri arasında numuneler yerleştirilirken zarar görmesini engellemek amacıyla keçe yerleştirilerek ön germe uygulanmakta ve sonrasında %20 birim şekil değiştirme/dakika hızla çekme testi başlatılmaktadır (Şekil 4a). Kesme kutusu testleri ise 6 cm x 6 cm metal hücre içerisine yerleştirilen kuru siltli kumun ortalama

19,5 kN/m<sup>3</sup> birim hacim ağırlık değeri için 28, 57 ve 85 kPa düşey gerilme altında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4b). Geogridler, kesme kutusu deney cihazının metal kalıplarının hareketini engellemeyecek biçimde yarısı alt kalıpta kalacak şekilde kuru kum içerisine yerleştirilmiştir. ASTM D3080 [26] standardına göre 0,45 mm/dk hız ile yatay hareket altında kestirilen geogrid içeren zeminde kayma mukavemeti ve ara yüz sürtünme açısı belirlenmiştir. Yine 3 adet orijinal geogride ek olarak; 2 basım kalitesi, 3 geogrid ve her birinde 3 farklı yüklemeye olmak üzere toplamda 21 deney yapılmıştır. Çalışma kapsamında 6 cm x 6 cm boyutlarındaki kesme kutusunun kullanılmasından dolayı olası sınır koşullarının etkilerini en aza indirmek amacıyla ilerleyen çalışmalarda 10 cm x 10 cm boyutlarında veya daha büyük kesme kutusu deneylerinin yapılması önerilmektedir.



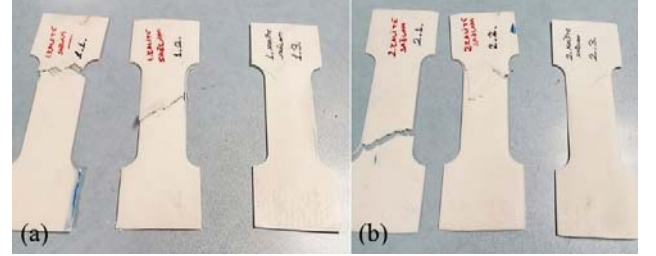
Şekil 4. a) Çekme testi cihazı, b) Kesme kutusu test cihazı  
(a) Tensile strength test device, b) Shear box test device)

#### 4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

##### 4.1. Kupon Testleri (Coupon Tests)

Kupon numunelerine ait yük - birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 5'te arka planda noktalı çizgilerle verilirken, ortalama eğilim çizgileri polinom dağılımı ile ifade edilmiştir. 1. ve 2. kalite numunelerin her birinden 3'er adet olmak kaydıyla toplam 6 adet kupon numunesi kopma gerçekleşinceye kadar çekme testine tabii tutulmuş ve ortalama nihai çekme kuvveti 1,17 kN/m seviyelerinde aynı değere ulaşmıştır. Pik kuvvete karşılık gelen ortalama birim şekil değiştirme değerleri ise yine her iki tip için de %1,45 mertebelerindedir. Düşük katman kalınlığında ince lifler daha sık konumlandırılırken, yüksek katman kalınlığında lif aralığı açılmasına rağmen daha kalın liflerle dokuma sağlanmaktadır. Bu durum, ABS tipi filament ile üretilen plaka tipi numunelerde 0,10 mm - 0,2 mm arasındaki katman kalınlığı değişiminin çekme davranışı üzerinde etkisi olmadığını ve bahsi geçen sınırlar dahilinde lif kalınlığı ile lif aralıkları arasındaki farklılığın dengelendiğini göstermektedir. 40 mm genişlik ve 2 mm kalınlığa sahip kupon numunelerinde, 80 mm<sup>2</sup> çekmeye karşı çalışan

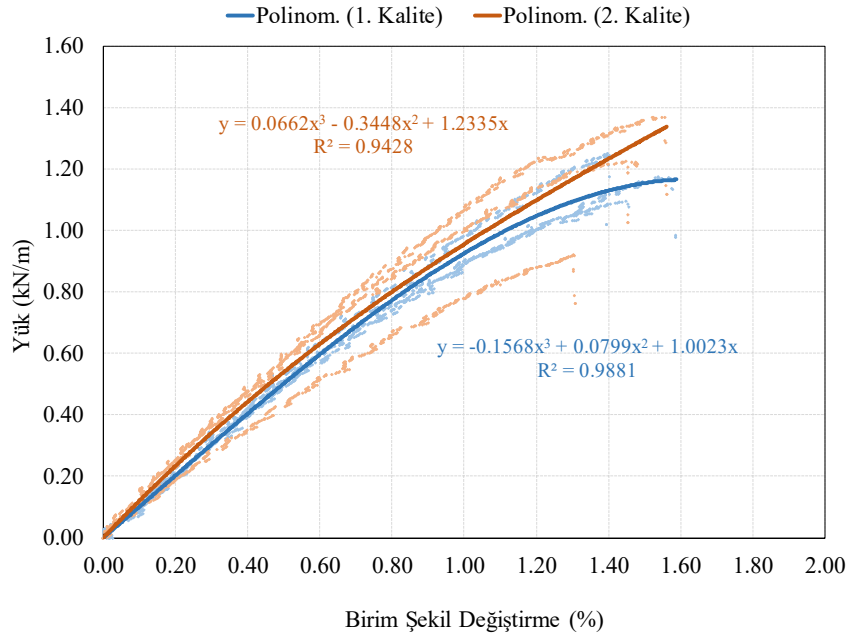
net kesit dikkate alındığında ABS filamentinin çekme mukavemeti ortalama 14,6 MPa olarak hesaplanmıştır. Numunelerin deney sonu liflerdeki kopma sonucunda 45°'lik açı ile meydana gelen göçme modlarına ait fotoğraflar Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Kupon numunelerinin göçme modları. a) 1. Kalite numuneler, b) 2. Kalite numuneler  
(Failure modes of coupon specimens. a) 1st quality specimens, b) 2nd quality specimens)

##### 4.2. Geogrid Çekme Testleri (Geogrid Tension Tests)

Her numune tipine ait yük - birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 7'de arka planda verilirken, ortalama eşdeğer eğilimler polinom fonksiyonları biçiminde sunulmuştur. Orijinal geogrid numunesinin çekme dayanımı 25 kN/m civarında iken, 1/1 ölçekli çıktılarının dayanımı üretim yöntemi ve ham madde farkından dolayı %73 oranında bir düşüşle 7 - 7,5 kN/m mertebelerine ulaşmaktadır. Tüm numunelerde kopma biçiminde göçme durumu gözlenmiştir. Çekme testi sonrasında orijinal ve 1/1 ölçekli geogridlerde tek noktada kopma meydana gelirken, daha küçük ölçek değerlerinde birden fazla sayıda lif kopması ile bazı bölgelerde baskı liflerinde açılmalar gözlenmiştir (Şekil 8). Geogrid numunelerinin nihai çekme kuvvetleri ve bu yüklere karşılık gelen birim şekil değiştirme değerlerinin kıyaslamalı sayısal sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Orijinal numunelerle yapılan kıyaslamalar referans başlığı altında verilirken, 1/1 ölçekli çıktılarla

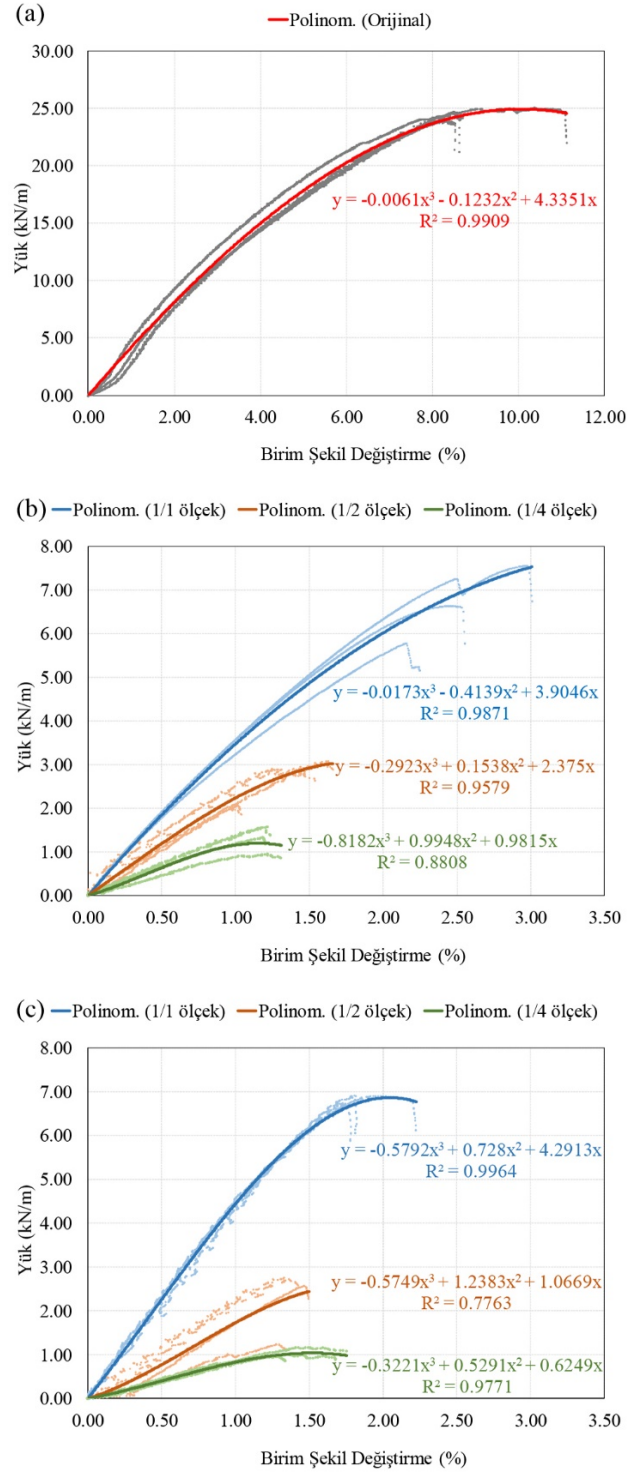


Şekil 5. Kupon numunelerine ait çekme testi sonuçları (Tensile strength test results of coupon specimens)

yapılan kıyaslamalar ölçek etkisi başlığı altında sıralanmıştır. 1/1 ölçekli üç boyutlu çıktılara ait numuneler eş boyutlardaki orijinal numunelerle karşılaştırıldığında, çekme dayanımı ve birim şekil değiştirme değerlerinin sırasıyla ancak %27-28 ve %20-28 seviyelerine ulaşabildiği görülmektedir. 1/2 ve 1/4 ölçek değerlerinde kesit azalmasına bağlı olarak çekme mukavemetinde yaklaşık 10 ila 21 kat azalma gözlenirken, birim şekil değiştirme açısından ortalama 6,8 katlık azalma sonucunda benzer değişim elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan 25 kN/m çekme mukavemetine sahip orijinal numune ile gözlenen söz konusu fark ham madde ve üretim yönteminden kaynaklanan beklenen bir davranıştır. Diğer taraftan, kalite farkından bağımsız olarak 1. ve 2. kalite numunelerin ortalamaları alındığı takdirde 1/2 ölçekli çıktılar 1/1 ölçekli çıktılarla karşılaştırıldığında çekme dayanımında %64, birim şekil değiştirme değerinde %38 oranında azalma meydana gelmiştir. Benzer şekilde 1/4 ölçekli çıktılar ise 1/1 ölçekli çıktılarının çekme dayanımında ortalama %83, birim şekil değiştirmede %41 azalma olduğu görülmüştür. Diğer taraftan kalite etkisi nihai çekme kuvveti açısından 1/1 ölçekte bir farklılık oluşturmazken, kalitenin azalması 1/2 ölçekte yaklaşık %19 ve 1/4 ölçekte yaklaşık %18 mukavemet kaybı meydana getirmektedir. Çalışmanın hedefini temsil eden ve 1/1 çıktı değerlerine oranla ifade edilen ölçek katsayısı değerleri kuvvet cinsinden 0,15 ile 0,41 arasında, birim şekil değiştirme cinsinden ise 0,48 ile 0,74 arasında değişmektedir. Söz konusu değerler çalışmada kullanılan geogridler için geçerlidir, aynı boyutlarda ve farklı kapasitelerdeki polyester esaslı orijinal geogridler ve farklı filament ile üretilen çıktılar için farklı katsayıların belirlenmesi gerektiği unutulmamalıdır.

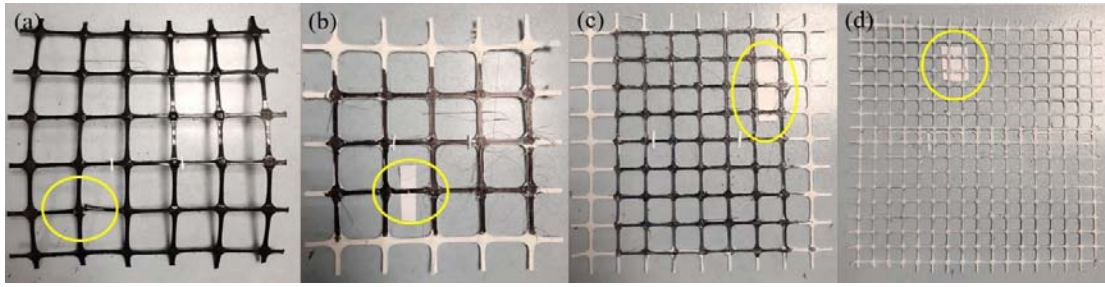
#### 4.3. Kesme Kutusu Testleri (Shear Box Tests)

Deneysel sonuçlarda elde edilen kayma gerilmesine bağlı yatay deplasman grafikleri Şekil 9'da verilirken, kayma mukavemeti ve nihai değere karşılık gelen ilgili deplasmanlar Tablo 2'de sunulmuştur. 1/1 ölçekli geogrid kullanılan deneylerde gözlenen kayma gerilmelerinin diğer ölçekli çıktılara ve hatta orijinal numunelere kıyasla daha düşük deplasman seviyelerinde yüksek değerlere ulaştığı sonucuna varılmıştır. 1/2 ve 1/4 ölçekli üç boyutlu geogrid içeren numunelerdeki kayma mukavemetleri ve deplasman davranışlarının ise kendi arasında benzer eğilimde olduğu görülmüştür. Tablo 2'de verilen sayısal değerler dikkate alındığında orijinal numunelerden elde edilen verilere oranla 1/1, 1/2 ve 1/4 ölçeğe sahip 1. kalite üç boyutlu geogrid donatı içeren durumlarda nihai kayma mukavemeti açısından sırasıyla ortalama %16,5, %7,2 ve %8,2 artış gözlenmiştir. Diğer taraftan, tüm göçme durumları için düşey yükleme artışından dolayı doğal olarak artan eksenel gerilme değerleri her bir yükleme adımında yaklaşık olarak aynı pik değerlere sahipken, 2. kalite geogridler içeren numunelerde göçme anında daha yüksek düşey deplasmanlara ulaşılmıştır. Buna ek olarak, 2. kalite çıktılar ile 1. kalite çıktılar karşılaştırıldığında ise aynı ölçeklendirme değerleri için kayma mukavemetinde %1,9 ile %4 arasında azalma meydana gelmiştir. Üç boyutlu yazılardan alınan çıktılarının zemin içerisinde kullanılması durumunda elde edilen kayma mukavemeti değerlerinin orijinal geogride göre daha yüksek çıkmasının temel sebebi; çalışmada da kullanılan eriyik yığıma prensibine dayanan üç boyutlu yazıcılarda filament liflerinin katmanlı üretiminden dolayı çıktılardaki yüzey pürüzlülüğünün, ekstrüzyon yöntemiyle pürüzsüz üretilen orijinal geogridlere göre daha fazla olmasıdır. Ayrıca ölçek küçüldükçe azalan göz açıklığı kumlu zemin içerisindeki kilitleme etkisini arttırmaktadır. Ölçek etkisinden bağımsız olarak kalite farkı numunelerin çekme dayanımında ciddi bir fark oluşturmazken, 2. kalite olarak üretilen numunelerin 1. kalite numunelere oranla daha gevrek bir malzeme davranışı gösterdiği söylenebilir.



**Şekil 7.** Geogrid numunelerine ait çekme testi sonuçları. a) Orijinal, b) 1. kalite, c) 2. kalite numuneler (Tensile strength test results of geogrid specimens. a) Original, b) 1st quality, c) 2nd quality specimens)

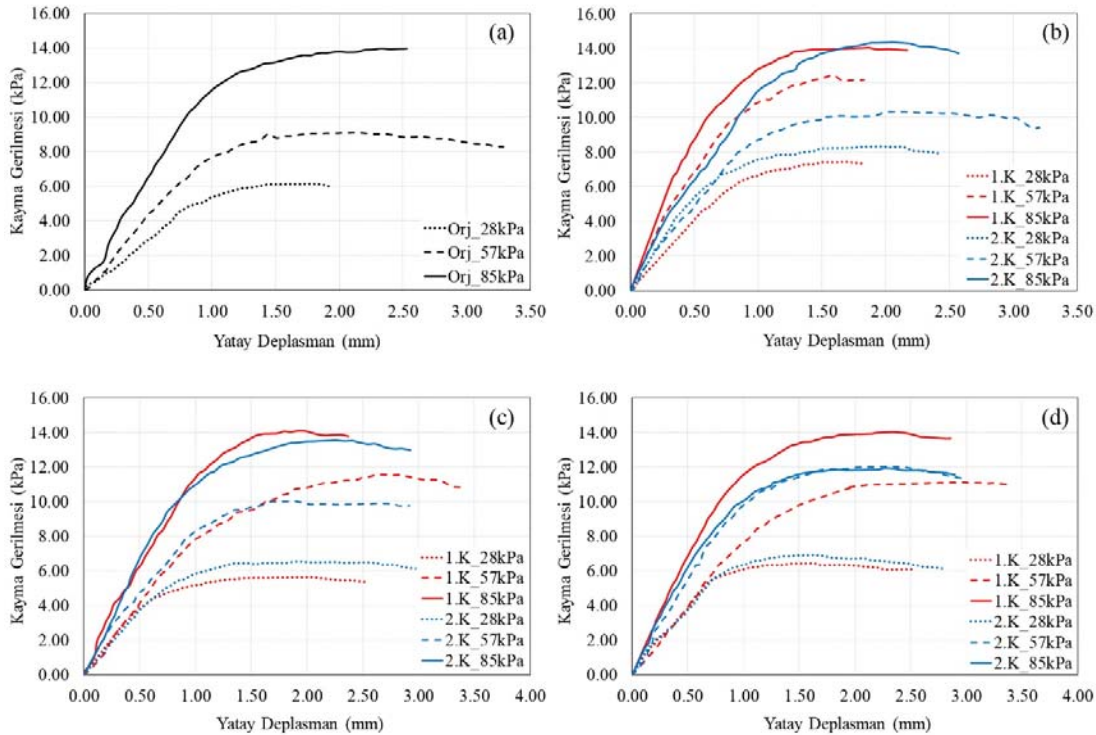
Kesme kutusu deneyleri sırasında kuru kum kullanılmasından dolayı, zeminin içsel sürtünme açısı kayma mukavemetini belirleyen ana unsur olarak ön plana çıkmaktadır. Bu yüzden, Şekil 10'da sunulan kayma zarflarının eğimleri dikkate alınarak zemin - geogrid ara yüz sürtünme açısının değişimi incelenmiştir. Orijinal geogridli



**Şekil 8.** Geogrid numunelerinin göçme modları. a) Orijinal numuneler, b) 1/1 ölçekli çıktı, c) 1/2 ölçekli çıktı, d) 1/4 ölçekli çıktı  
(Failure modes of geogrid specimens. a) Original specimen, b) 1/1 scaled printout, c) 1/2 scaled printout, d) 1/4 scaled printout)

**Tablo 1.** Kıyaslamalı çekme testi sonuçları (Comparative tensile strength test results)

	Orijinal Numune		1/1 Ölçek		1/2 Ölçek		1/4 Ölçek	
	Nihai Çekme Kuvveti (kN/m)	Birim Şekil Değişirme (%)	Nihai Çekme Kuvveti (kN/m)	Birim Şekil Değişirme (%)	Nihai Çekme Kuvveti (kN/m)	Birim Şekil Değişirme (%)	Nihai Çekme Kuvveti (kN/m)	Birim Şekil Değişirme (%)
1. Kalite	24,55	9,05	6,65	2,53	2,71	1,37	1,28	1,21
2. Kalite			6,85	1,85	2,20	1,36	1,05	1,36
Referans Oranı (%)								
1. Kalite			27,09	27,96	11,04	15,14	5,21	13,37
2. Kalite			27,90	20,44	8,96	15,03	4,28	15,03
Ölçek Katsayısı								
1. Kalite					0,41	0,54	0,19	0,48
2. Kalite					0,32	0,74	0,15	0,74



**Şekil 9.** Kesme kutusu deney sonuçları. a) Orijinal numuneler, b) 1/1 ölçekli çıktılar, c) 1/2 ölçekli çıktılar, d) 1/4 ölçekli çıktılar  
(Shear box test results. a) Original specimens, b) 1/1 scaled printouts, c) 1/2 scaled printouts, d) 1/4 scaled printouts)

numunelerdeki  $16,8^\circ$ 'lik ara yüz sürtünme açısı değeri 1. kalite ve 2. kalite üç boyutlu çıktılarda sırasıyla  $18,2^\circ$  ve  $17,4^\circ$ 'ye ulaşmıştır. 1/1,

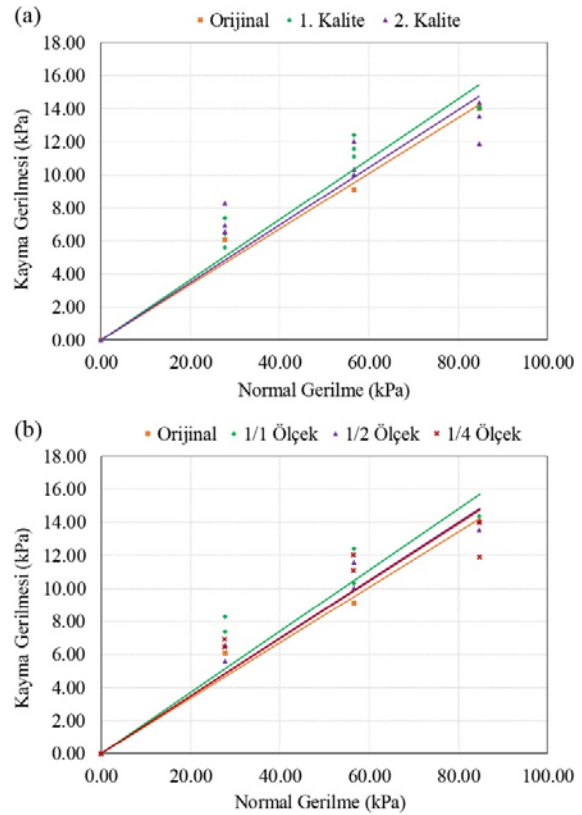
1/2 ve 1/4 ölçekli çıktılar kullanılması durumunda ise sırasıyla  $18,5^\circ$ ,  $17,5^\circ$  ve  $17,4^\circ$ 'lik açılar elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada kuru kum



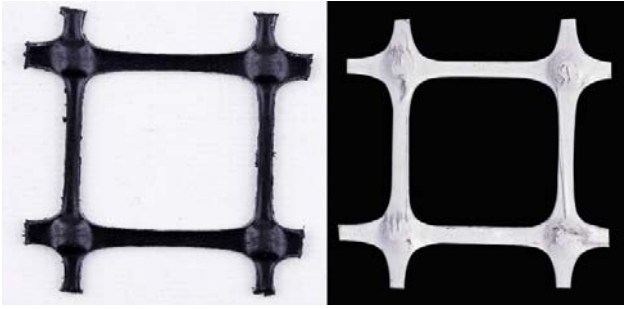
**Tablo 2.** Kıyaslamalı kesme kutusu sonuçları (Comparative shear box test results)

Normal Gerilme (kPa)	Üç Boyutlu Çıktı Alınan Geogridler							
	1/1 Ölçek		1/2 Ölçek		1/4 Ölçek		Orijinal Numune	
	Kayma Mukavemeti (kPa)	Yatay Deplasman (mm)	Kayma Mukavemeti (kPa)	Yatay Deplasman (mm)	Kayma Mukavemeti (kPa)	Yatay Deplasman (mm)	Kayma Mukavemeti (kPa)	Yatay Deplasman (mm)
	1. Kalite							
28	7,4	1,69	5,6	2,04	6,4	1,56	6,1	1,79
57	12,4	1,59	11,6	2,69	11,1	2,97	9,1	2,14
85	14,0	1,87	14,1	1,92	14,0	2,34	14,0	2,18
<i>Ort</i>	<i>11,3</i>	<i>1,72</i>	<i>10,4</i>	<i>2,22</i>	<i>10,5</i>	<i>2,29</i>	<i>9,7</i>	<i>2,04</i>
<i>Değişim (%)</i>	<i>+16,5</i>	<i>-15,7</i>	<i>+7,2</i>	<i>+8,8</i>	<i>+8,2</i>	<i>+12,2</i>	-	-
	2. Kalite							
28	8,3	1,98	6,6	1,95	6,9	1,63		
57	10,3	2,14	10,0	1,89	12,0	2,32		
85	14,3	2,06	13,5	2,26	11,9	2,28		
<i>Ort</i>	<i>11,0</i>	<i>2,06</i>	<i>10,0</i>	<i>2,03</i>	<i>10,3</i>	<i>2,08</i>		
<i>Değişim (%)</i>	<i>+13,4</i>	<i>+0,9</i>	<i>+3,0</i>	<i>-0,5</i>	<i>+6,2</i>	<i>+2,0</i>		

tercih edildiği için kısmi kohezyon değerleri göz ardı edilen her bir kesme kutusu deneyinde, kuru kumda ve orijinal geogridli durumlarda  $10,3^\circ$  seviyesinde olan ortalama içsel sürtünme açısı değerleri üzerinde baskı kalitesinin herhangi bir etkisi olmamakla birlikte, 1/1, 1/2 ve 1/4 ölçekli geogrid çıktıları içeren deneylerde sırasıyla  $12,2^\circ$ ,  $10,8^\circ$  ve  $11,3^\circ$  seviyelerine ulaşılmıştır. Dolayısıyla, kalite ve ölçek oranlarının azalmasıyla ara yüz sürtünme açısı ve paralel biçimde kayma mukavemeti azalırken; içsel sürtünme açısı kaliteden bağımsız olarak hem orijinal geogridli numunelere hem de geogridsiz kumlu numunelere kıyasla artmaktadır. Liu vd. [8] tarafından önerilen ve geosentetik donatılı kayma mukavemetinin, geosentetik içermeyen kumun kayma mukavemetine oranı biçiminde ifade edilen ara yüz kayma mukavemeti katsayısı ( $\alpha$ ) hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geogrid içermeyen kuru kumun ortalama kayma mukavemeti 10,1 kPa hesaplanırken, ara yüz sürtünme açısı yaklaşık  $18,0^\circ$  bulunmuştur. Orijinal geogridli numunelerde ara yüz kayma mukavemeti katsayısı 0,97 civarındadır. 1. kalite çıktıları 1/1 ölçekli numunelerde 1,12 mertebesinde hesaplanan bu katsayı, 1/2 ve 1/4 ölçekli çıktıları 1,04 değeriyle aynı seviyede kalmıştır. 2. kalite çıktıları ise ölçek değerinin azalmasıyla birlikte ortalama 1,09, 1,00 ve 1,02 değerine ulaşmıştır. Orijinal geogridli deneylerde ara yüz mukavemetinde kısmi bir azalma görülmesine rağmen üç boyutlu geogrid çıktısı içeren tüm durumlarda artış meydana gelmiştir. Diğer bölümlerde de belirttiği üzere bu durum; eriyik yığılma modeli ile çalışan üç boyutlu yazıcılarıdaki lifli üretim tekniğinin oluşturduğu yüzey pürüzlülüğünün, ekstrüzyon yöntemiyle üretilen geogridlerin düz yüzeyine kıyasla daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 11). Diğer taraftan 0,97 ile 1,09 arasında değişen söz konusu ara yüz değerlerinin, Liu vd. [8] tarafından 450 mm boyutlarındaki büyük ölçekli kesme kutusu deneylerinde sunulan 0,92 - 1,01 aralığındaki değerlerle tutarlı olduğu görülmektedir. Ancak göz açıklığı, boşluk oranı ve lif geometrisi gibi değişkenlerin sınır koşullarında meydana getirebileceği olası farklılıklar sebebiyle kesme kutusu deneylerinin üç boyutlu geogrid çıktılarıyla büyük boyutlu düzende tekrarlanması önerilmektedir.



**Şekil 10.** Kayma zarflarının değişimi. a) Çıktı kalitesine göre, b) Ölçek değerine göre  
(The change in shear envelopes. a) Due to quality of printout, b) Due to scaling value)



**Şekil 11.** Ekstrüzyon yöntemiyle üretilen siyah geogrid ile eriyik yığma modeliyle üç boyutlu çıktısı alınan beyaz geogrid arasındaki yüzey pürüzlülüğü farkı  
(The difference between the surface roughness of black geogrid produced by extrusion and the white 3D geogrid produced by the fused deposition modeling)

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışma kapsamında; ölçekli laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere piyasada 34 mm x 34 mm boyutlarında net açıklığa sahip örnek bir geogridin 3 boyutlu yazıcı teknolojisi ile üretilen farklı ölçeklerdeki çıktıları değerlendirilmiştir. Çekme testleri ve kesme kutusu deneyleri tamamlanan 1/1, 1/2 ve 1/4 ölçekli çıktıların orijinal numuneye kıyasla elde edilen değişimler ve ilgili katsayılar sunulmuştur.

ABS filamentinin çekme testlerindeki kopma mukavemetini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen kupon testlerinde baskı kalitesinden bağımsız olarak üzere ortalama 14,6 MPa dayanım ve %1,45 mertebelerinde birim şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Genel eğilim açısından ölçek oranının azalmasıyla kritik çekme kesitlerindeki azalmaya bağlı olarak nihai çekme yükü ve birim şekil değiştirme değerleri azalmaktadır. Baskı sürecindeki katman kalınlığını ifade eden kalite farkı numunelerin çekme dayanımında ciddi bir fark oluşturmazken, 1. kalite numuneler 2. kalite numunelere göre geneli itibarıyla daha sünek bir davranış sergilemektedir.

Kesme kutusu deneyleri neticesinde geogrid donatı içermeyen kumlu zeminde ortalama 10,1 kPa seviyesinde olan kayma mukavemeti, yüzeyi pürüzsüz orijinal ekstrüde geogrid kullanılması durumunda 9,7 kPa değerine düşmektedir. Üç boyutlu geogrid çıktıları içeren durumlarda ise kayma gerilmesi değerleri orijinal geogride göre %5 ile %15 arasında artmaktayken, nihai kayma gerilmelerinin elde edildiği yatay deplasman seviyelerinde de artış gözlenmektedir. Kayma gerilmesi ve normal gerilme değerlerine göre hesaplanan ara yüz sürtünme açıları da baskı kalitesi ve ölçek değerine göre %3,4 ile %10,1 arasında artış gözlenmiştir. Bu durumun eriyik yığma tekniğine göre üretilen üç boyutlu elemanlardaki lifli yüzeyin oluşturduğu pürüzlü yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, üç boyutlu yazıcı ile üretilen geogridlere küçültme ölçeği uygulanması durumunda 1/1 ölçekli çıktılara kıyasla net kesitlerdeki azalmayla birlikte çekme mukavemetinde ciddi oranda azalmanın yanı sıra nihai kayma mukavemetinde azalma ve ilgili yatay deplasman değerinde artış meydana gelmektedir. Donatısız zemine göre kayma mukavemeti artışını temsil eden ara yüz kayma mukavemeti katsayısı dikkate alındığında da üç boyutlu çıktı içeren tüm durumlarda ara yüz sürtünmesinde artış olmakta ve ölçek değerinin azalmasıyla birlikte söz konusu artış miktarları azalmaktadır. Ayrıca farklı ölçeklerde üretilen çıktılarda %74,35 ile %79,82 arasında değişen değerlerde yakın açıklık oranları elde edilmesine rağmen, donatısız ve orijinal ekstrüde geogridli durumlara göre içsel sürtünme açısına bağlı kayma mukavemeti artışı, kesme

doğrultusuna dik nervürlerin pasif direnci arttırdığını doğrular niteliktedir. Piyasa koşullarında standart formda üretilen büyük açıklıklı geogridlerin laboratuvar ortamındaki deney düzeneklerinin kısıtlı boyutlarından kaynaklanan sınır şartlarını etkileme olasılığı var ise, bu çalışmada sunulan kayma parametreleri ve çekme mukavemetindeki değişimler dikkate alınarak küçültme ölçeğine göre önerilen katsayılar göre tasarım yapıldıktan sonra üç boyutlu geogrid çıktıları tercih edilebilir. Bu sayede sınır etkilerinin azaltılması amacıyla deney hücrelerini büyütme yerine, ölçekli zemin donatıları kullanılarak süre, işçilik ve maliyet açısından avantaj sağlanabilir. Gelecek çalışmalar açısından geometri, boyut, kalite ve filament çeşitliliği gibi değişkenlerle üç boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilen geogridlerin, farklı dane çapına sahip zemin tiplerinde değişken yüklenme koşulları altındaki ölçekli davranışları incelenmelidir. Ölçek etkisinin geogrid sıyrılma davranışı üzerindeki etkisi makale kapsamı dışında tutulduğu için ayrıca incelenmesi gerekmektedir.

## Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-B programı kapsamında İstanbul Teknik İnşaat San. ve Tic. A.Ş.'nin sanayi danışmanlığında desteklenmiştir.

## Kaynaklar (References)

- Özdemir B., Evirgen B., Tuncan A., Onur M.İ., Tuncan M., Zemin donatıları ile güçlendirilmiş şevlerin değerlendirilmesi, 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2015.
- Çetin Karagül B., Yol dolgularının geogrid kullanılarak iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- Karadağ M.B., Evirgen B., Tuncan M., Çiftlikköy ilçesi gençlik caddesindeki heyelanın vaka analizi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7, 640-649, 2019.
- Onur M.İ., Tuncan M., Evirgen B., Özdemir B., Tuncan A., Behavior of soil reinforcements in slopes, Procedia Engineering, 143, 483-489, 2016.
- Pant A., Datta M., Ramana G.V., Bansal D., Measurement of role of transverse and longitudinal members on pullout resistance of PET geogrid, Measurement, 148, 106944, 2019.
- Tavakoli Mehrjardi Gh., Khazaei M., Scale effect on the behaviour of geogrid-reinforced soil under repeated loads, Geotextiles and Geomembranes, 45, 603-615, 2017.
- Mousavi H., Gabr M.A., Borden R.H., Optimum location of geogrid reinforcement in unpaved road, Canadian Geotechnical Journal, 54, 1047-1054, 2017.
- Liu C.N., Zornberg J.G., Chen T.C., Ho Y.H., Lin B.H., Behavior of geogrid-sand interface in direct shear mode, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135, 1863-1871, 2009.
- Makkar F.M., Chandrakaran S., Sankar N., Performance of 3-D geogrid-reinforced sand under direct shear mode, International Journal of Geotechnical Engineering, 13, 227-235, 2019.
- Fan P.F., Study on tensile property of the steel-plastic geogrid, Journal of The Balkan Tribological Association, 22, 28-31, 2016.
- Touahmia M., Rouili A., Boukendakdji M., Achour B., Experimental and numerical analysis of geogrid-reinforced soil systems, Arabian Journal for Science and Engineering, 43, 5295-5303, 2018.
- Al-Hedad A.S.A., Hadi M.N.S., Effect of geogrid reinforcement on the flexural behaviour of concrete pavements, Road Materials and Pavement Design, 20, 1005-1025, 2019.
- Yu Z., Woodward P.K., Laghrouche O., Connolly D.P., True triaxial testing of geogrid for high speed railways, Transportation Geotechnics, 20, 100247, 2019.
- Badakhshana E., Noorzada A., Zamani S., Eccentric behavior of square and circular footings resting on geogrid-reinforced sand, International Journal of Geotechnical Engineering, 14, 151-161, 2020.
- Stathas D., Wang J.P., Ling H.I., Model geogrids and 3D printing, Geotextiles and Geomembranes, 45, 688-696, 2017.
- Urgan S., Huvaj N., Üç boyutlu yazıcı ile üretilen geosentetiklerin özellikleri ve kullanım potansiyelleri, Zemin Mekaniği ve Geoteknik

- Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2018.
17. Hanaor D.A.H., Gan Y., Revay M., Airey D.W., Einav I., 3D printable geomaterials, *Géotechnique*, 66, 323-332, 2016.
  18. Lin J.C., Wu X., Yang W., Zhao R.X., Qiao L.G., The influence of fine aggregates on the 3D printing performance, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 292, 012079, 2018.
  19. Jiang Q., Feng X., Gong Y., Song L., Ran S., Cui J., Reverse modelling of natural rock joints using 3d scanning and 3d printing, *Computers and Geotechnics*, 73, 210-220, 2016.
  20. ASTM A370 - 20, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, American Society for Testing Materials, ASTM International, West Conshohocken, US, 2020.
  21. ASTM D6913/D6913M-17, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, American Society for Testing Materials, ASTM International, West Conshohocken, US, 2021.
  22. ASTM D7928 – 21, Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, American Society for Testing Materials, ASTM International, West Conshohocken, US, 2021.
  23. ASTM D854-14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, American Society for Testing Materials, ASTM International, West Conshohocken, US, 2014.
  24. ASTM D7263-21, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density and Unit Weight of Soil Specimens, American Society for Testing Materials, ASTM International, West Conshohocken, US, 2021.
  25. ASTM D4595-17, Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method, American Society for Testing Materials, ASTM International, West Conshohocken, US, 2017.
  26. ASTM D3080, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, US, 2012.

