

## 3B KAYA BENZERİ ÇIKTILARDA DOLGU ORANINA BAĞLI BASINÇ DAVRANIŞININ GEOGRİD SARGI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

### IMPROVING THE COMPRESSIVE BEHAVIOR DEPENDING ON THE FILL RATIO OF 3D ROCK LIKE PRINTOUTS WITH GEOGRID CONFINEMENT

İlayda Bengisu KÜÇÜK<sup>1</sup>, Taşkın KUYUSUZ<sup>2</sup>, Burak EVİRGEN<sup>3</sup>

#### ÖZET

Günümüzde çeşitli disiplinlerin Ar-Ge projelerinde sıklıkla kullanılan üç boyutlu (3B) baskı teknolojisi, inşaat mühendisliğinde de özellikle karmaşık geometrilere ve büyük boyutlara sahip detaylı çalışmaların yürütülmesinde gerek kolay üretimi gerekse düşük maliyeti nedeniyle tercih edilmektedir. Üç boyutlu baskı teknolojisinin en çok tercih edilen baskı tipi olan FDM (Eriyik Biriktirmeli Modelleme), heterojen ve çatlaklı bir yapıya sahip kaya numunelerinin araştırılmasında ciddi bir potansiyele sahiptir. Yapısal düzensizliklerin gözlemlendiği zayıf kayalar nedeniyle kazık veya temel elemanlarındaki düşük taşıma kapasitelerinin geogrid sargı uygulamasıyla iyileştirilebileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada, üç boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak hızlı, efektif ve mukavemetli çıktı alınmasına olanak sağlayan baskı ayarları (sıcaklık, hız, katman kalınlığı) ve dolgu tipine karar verilmesinin ardından ABS filamentliyle %20, %40, %60, %80, %100 olmak üzere 5 farklı dolgu oranında basılan referans silindir numuneler ile aynı koşullarda basılan ve etrafına çift doğrultulu örgülü geogrid malzemesi sarılarak güçlendirilen, toplamda 30 numune tek eksenli basınç testine tabi tutulmuştur. Gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerine göre geogridli numunelerde basınç dayanımının geogridsiz numunelere kıyasla artışı doluluk oranlarına göre sırasıyla; %100 için %1,46; %80 için %23,05; %60 için %23,85; %40 için %12,69 ve %20 için %4,86 olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, 3B çıktılarla modellenen farklı gözenek yapısındaki kayaç formasyonlarında geogrid sargısı ile güçlendirmenin olumlu etki sağladığını göstermektedir.

*Anahtar Kelimeler: 3B yazıcı, Kaya mekaniği, Basınç testi, Geogrid, Eksenel deformasyon*

<sup>1</sup> İnş. Müh., Eskişehir Teknik Üniversitesi, ilaydabengisu334@gmail.com (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> İnş. Müh., Eskişehir Teknik Üniversitesi, taskinkuyusuz@ogr.eskisehir.edu.tr

<sup>3</sup> Doç. Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, burakevirgen@eskisehir.edu.tr



## ABSTRACT

Three-dimensional (3D) printing technology, which is frequently used in R&D projects of numerous disciplines, is preferred in civil engineering for conducting detailed studies with complex geometries and large dimensions due to its ease of production and low cost. The most preferred type of 3D printing technology, Fused Deposition Modeling (FDM), has significant potential in the investigation of heterogeneous and fractured rock mechanics. It is thought that low bearing capacities of piles or foundation elements due to weak rock formations having structural irregularities, can be improved by the application of geogrid confinement. In this study, reference cylinder specimens are printed at 5 different filling ratios to be 20%, 40%, 60%, 80%, 100% with ABS filament and identical ones printed under the same conditions reinforced by confining bi-directional woven geogrid material around them, 30 specimens in total were subjected to compression tests, after deciding on the printing settings (temperature, speed, layer thickness) and filler type that enable fast, effective and strong printouts using three-dimensional printing technology. According to stress-strain graphs, cylinder specimens with geogrid have higher compression strength than the reference specimens. Results are as follows according to the infill ratios: 1.46% for 100%, 23.05% for 80%, 23.85% for 60%, 12.69% for 40%, and 4.86% for 20%. The study results indicate that geogrid has a positive effect on rock formations of different pore structures modeled with 3D-printing.

*Keywords: 3D printer, Rock mechanics, Compression test, Geogrid, Axial deformation*

## 1. GİRİŞ

Ar-Ge projelerinde sıklıkla kullanılmaya başlayan üç boyutlu (3B) baskı teknolojisi, tıp, mühendislik gibi pek çok alanda bilimsel çalışmalara yön vermektedir. Bunlara örnek olarak Princeton Üniversitesinde bulunan bilim insanları radyo frekanslarını duyabilen yapay kulak oluşturulması verilebilir (Sullivan, 2013). Başka bir örnekte püskürtme teknolojisini içeren toz tabanlı bir 3B yazıcı kullanılmış ve toz alçı malzemesiyle silindir numune baskısı yapılarak, baskı özelliklerinin numune mukavemetine etkisi incelenmiştir (Fereshtenejad ve Song, 2016). Kullanım alanlarındaki çeşitlilik nedeniyle inşaat mühendisliği çalışmalarında da baskı teknolojisinin önemi artmaktadır (Gültekin ve Evirgen, 2021; Amran vd., 2022; Güleç ve Evirgen, 2023; Aktaş ve Evirgen, 2024). 3B baskı teknolojisi, karmaşık geometriye sahip kayaçların gerek kolay modellenmesi gerek hızlı üretilmesi gerekse düşük maliyetli üretimi nedeniyle özellikle temel sistemlerinde yenilikçi iyileştirme metodlarının geliştirilmesinde kullanılmaktadır (Uygunoğlu, 2019). Ayrıca kaya mühendisliğindeki potansiyeli de araştırmacıların dikkatini çekmektedir.

Yüksek çekme dayanımına sahip olan ve farklı grid tiplerine (kare, üçgen, dikdörtgen) sahip olan geogridler uzun ömürlü olmaları, yüksek aşınma dirençleri, kolay imalatı, kolay taşınabilmesi ve katlanabilmesi gibi özellikleri nedeniyle geoteknik mühendisliğinde iyileştirme yöntemlerinden biri olarak kullanılmaktadır (Jiang vd., 2016). Gu vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, geogrid malzemesi kullanılarak, geogrid sertliği, kolon uzunluğu, kolon çapı ve agrega boyutunun kolonların davranışı üzerindeki etkisi

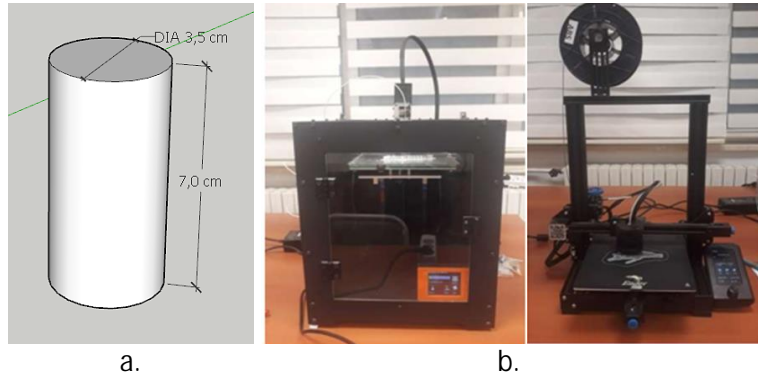


araştırılmıştır. Jiang vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, kaya mekaniği laboratuvar çalışmalarının zorlukları ele alınmış ve alternatif olarak 3B baskı teknolojisi değerlendirilmiştir. Baskı numuneleri ile kayaç numunelerinin verdikleri benzer sonuçlar, yöntemin kullanılabilirliğinin bu çalışmada araştırılması için bir basamak olmuştur. Dolayısıyla, bu çalışmada farklı dolgu oranlarına sahip 3B silindirik kayaç türevi modellerin geogrid kullanımı ile basınç davranışlarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

3B baskının temeli, katmanların eklenmesi prensibine dayanmaktadır ve birden fazla baskı metodu bulunmaktadır. Bu metodlara örnek olarak FDM (Fused Deposition Modeling Printing), SLA (Stereolithography), SLS (Selective Laser Sintering), LOM (Laminated Object Manufacturing) ve CJP (Color-Jet Printing) gibi yöntemler verilebilir. En çok tercih edilen ise FDM tekniğidir. Teknik; makaraya sarılmış bir inşaat malzemesi olan termoplastik malzemenin cihazı beslemesi ve nozula iletilerek belirlenen sıcaklıkta eritilmesi neticesinde yarı eriyik forma getirilen filament nozuldan akıtılıp katmanları oluşturması adımlarını içermektedir (Sönmez vd., 2018).

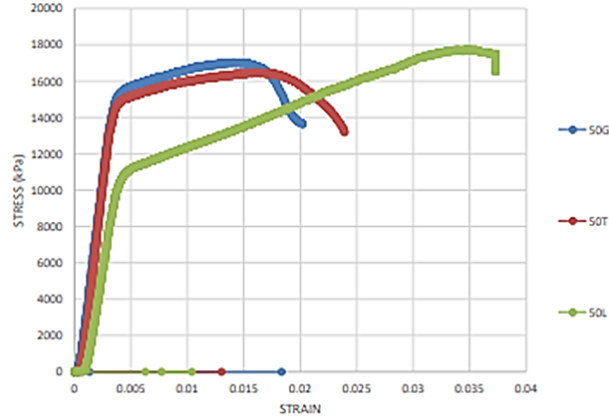
Numune hazırlanması sürecinde öncelikle çapı 35 mm ve yüksekliği 70 mm olan silindirik numuneler "SketchUp" programı ile çizilmiş (Şekil 1a), ardından yazıcılarda basıma gönderilmek üzere G-code formatına çevrilmiştir. Çalışma kapsamında Ti-bot Mars4 ve Ender-3 V2 olmak üzere iki farklı yazıcı kullanılmıştır (Şekil 1b).



Şekil 1. a. Numune modeli ve b. 3B yazıcılar

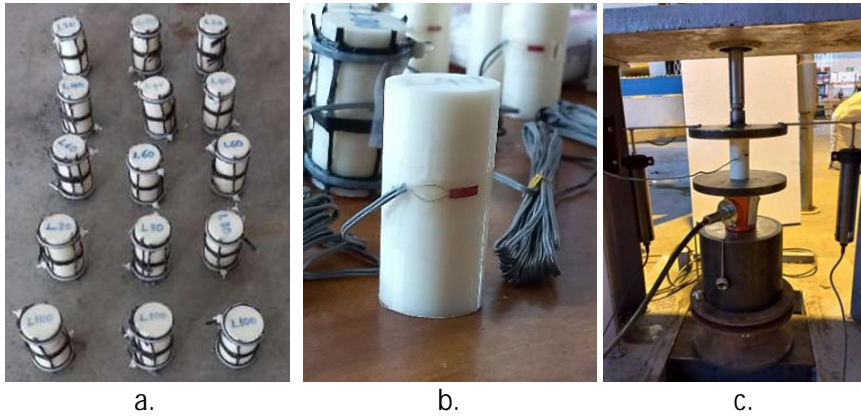
Basımda diğer filamentlere kıyasla daha yüksek mukavemete sahip petrol esaslı ABS (akrilonitril bütadien stiren) filamentini tercih edilmiştir. Kullanılan ABS filamentini için üretici tarafından önerilen nozul sıcaklığı (220-240°C), tabla sıcaklığı (80-100°C) ve baskı hızı (80-100mm/sn) değerleri dikkate alınarak yapılan denemeler sonucunda ilgili parametreler sırasıyla 230°C, 85°C ve 100mm/sn seçilmiştir. Optimum dolgu tipinin belirlenmesi amacıyla %50 doluluk oranlarında 3 farklı dolgu tipinde üçer adet silindir numune üretilmiş ve tek eksenli basınç deneyine tabii tutulmuştur. Elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerine (Şekil 2) göre "Grid-G", "Triangles-T" ve "Lines-L" dolgu tiplerine göre sırasıyla 17.03 MPa, 16.48 MPa ve 17.73 MPa basınç dayanımı elde edildiği için basımlarda kullanılma üzere dolgu tipi olarak en yüksek mukavemete sahip "Lines" seçilmiştir.





Şekil 2. Dolgu tipinin belirlenmesi için yapılan tek eksenli deneylerine ait eğriler

Tek dolgu tipi ve %20-40-60-80-100 olmak üzere 5 farklı dolgu oranı için her birinden 6 adet, toplamda 30 numunenin basımı gerçekleştirilmiştir. Numunelerin 3'er tanesi geogrid ile sarılırken, kalan üçer tanesi ise sargısız şekilde referansları tespit etmek üzere tek eksenli basınç deneyine tabii tutulmuştur. 30x30mm göz açıklığına sahip çift yönlü polipropilen geogridlerin numune yüzeyine kenetlenmesinin sağlanması için birkaç farklı yöntem denenmiştir. Bunlardan en başarılı performansı veren yöntem tüm numunelere uygulanmıştır. Öncelikle numune çevresinde iki göz bindirme sağlanarak geogrid lifleri zımbalanıp, üst ve alt bölgelerden kelepçe ile silindire sarılmıştır. Bu şekilde sentetik reçineye daldırılan numunelerin kurumması beklenmiştir (Şekil 3a). Ayrıca, numunelerde oluşacak yanıl genişleme değerlerinin ölçülebilmesi adına her numunenin ortasına bir adet gerinim pulu yapıştırılmıştır (Şekil 3b). Deneyin gerçekleştirilmesi amacıyla hidrolik piston, yük hücresi ve karşılıklı konumlandırılmış 2 adet 50 mm kapasiteli deplasman ölçerden oluşan 100 kN'luk basınç düzeneği kurulmuştur (Şekil 3c).



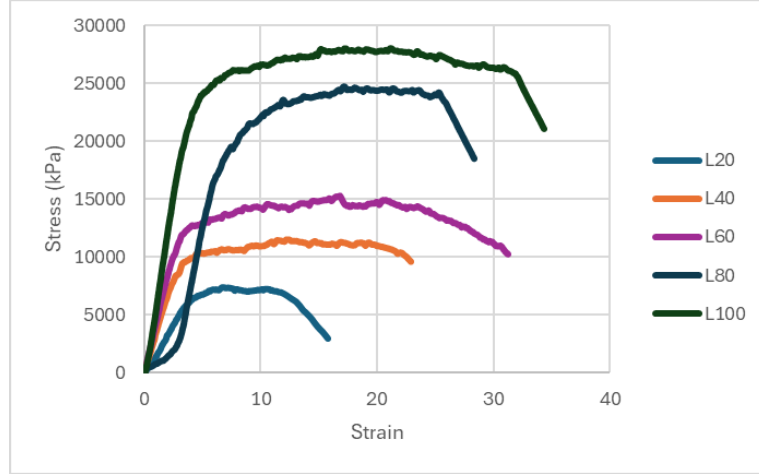
Şekil 3. a. Geogrid sargılı silindir numuneler, b. Gerinim pulu ve c. Deney düzeneği

### 3. DENEY SONUÇLARI

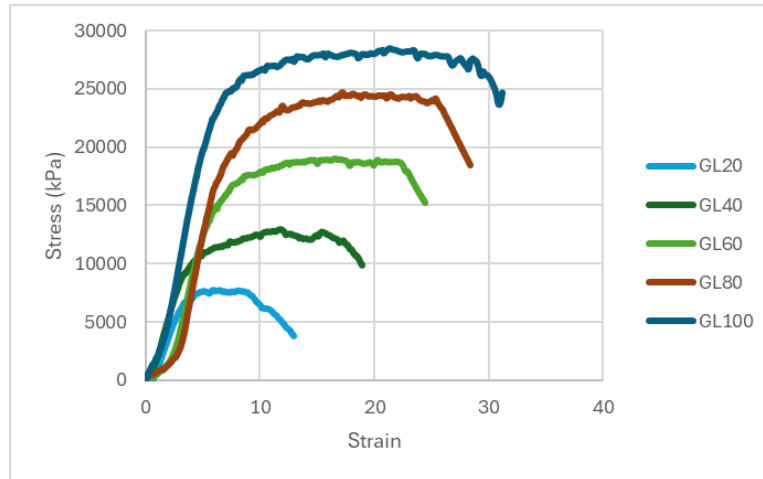
Elde edilen gerilme-birim şekil değişirme sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Dolgu oranının artması ile basınca karşı koyan kesite denk gelen filament miktarı arttığı için basınç dayanımındaki artış görülmektedir. isimlendirme sistematüğinde dolgu tipi ve dolgu oranı



sıralaması kullanılırken, geogrid sargılı numunelerde ayrıca ismin başına "G" kısaltması eklenmiştir. Dolayısıyla, yüzde 20 dolu geogridli numunelerin isimlendirilmesi "GL20" olacak şekilde örneklendirilebilir. Basınç dayanımında geogridsiz numunelere kıyasla artış %100 için %1,46; %80 için %23,05; %60 için %23,85 %40 için %12,69ve %20 için %4,86'dır. Geogridlerin basınç dayanımına etkisi %60 dolgu oranına sahip numuneler için en yüksek performansı sergilemiştir.



a.



b.

Şekil 4. 3B silindir numunelerde dolgu oranına bağlı gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri; a. Geogridsiz numuneler ve b. Geogrid sargılı numuneler

Tablo 1'de geogrid sargılı ve sargısız numunelerde gözlenen aksenal nihai gerilme değerleri ve bu noktadaki aksenal birim şekil değiştirmeleri ile yanal uzamaları verilmiştir.



Tablo 1. Maksimum gerilmeler ve bu gerilmelere karşılık gelen birim şekil değiştirme ve yanal uzamalar

|                                  | L20  | L40   | L60   | L80   | L100  |
|----------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Maksimum gerilme (MPa)           | 7,37 | 11,51 | 15,33 | 21,02 | 28,06 |
| Eksenel birim şekil değiştirme   | 6,71 | 12,40 | 16,8  | 18,8  | 21,2  |
| Yanal uzama ( $\times 10^{-4}$ ) | 3,2  | 5,5   | 6,6   | 12,0  | 15,0  |
|                                  | GL20 | GL40  | GL60  | GL80  | GL100 |
| Maksimum gerilme (MPa)           | 7,72 | 12,97 | 18,99 | 25,86 | 28,47 |
| Eksenel birim şekil değiştirme   | 5,94 | 11,75 | 16,6  | 17,2  | 21,37 |
| Yanal uzama ( $\times 10^{-4}$ ) | 0,88 | 3,0   | 2,8   | 6,5   | 0,38  |

#### 4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında kayaçların modellenmesi amacıyla farklı dolgu oranlarında silindirik numuneler 3B yazıcılar yardımıyla üretilmiştir. Basınç dayanımı en yüksek olan "Lines" dolgu tipi ile %20, %40, %60, %80 ve %100 dolgu oranlarında üretilen sargısız ve geogrid sargılı numunelerin tek eksenli basınç deneyleri sonucunda, dolgu oranlarının artmasıyla birlikte dayanımın arttığı görülmüştür. Eksenel gerilme değerleri, geogridli numunelere kıyasla L100, L80, L60, L40 ve L20 numuneler için sırasıyla 1,02, 1,18, 1,24, 1,13, 1,05 kat artış göstermiştir. Numunelerde genel olarak geogridin sağladığı sargı etkisinin yanal uzamayı ciddi seviyede azalttığı görülmüştür. Geogridsiz numunelerde en büyük yanal uzama L100 numunesinde  $15 \cdot 10^{-4}$  olarak tespit edilirken, geogridli numunede bu oran  $0,38 \cdot 10^{-4}$  olarak hesaplanmıştır. Deneyler sırasında bazı numunelerdeki deformasyonların gerinim ölçer noktalarında meydana gelmesi sebebiyle anlamsız veriler gözlenmiştir. Her ne kadar tüm sargılı numunelerin basınç dayanımında artış gözlenmiş olsa da reçinenin sadece geogride uygulanması sebebiyle önemli mertebelere ulaşamamıştır. Gelecek çalışmalarda reçinenin tüm yüzeye uygulanması, numune sayılarının artırılması, farklı dolgu tiplerinin de incelenmesi ve alternatif filamentlerin hesaba katılması önerilmektedir.

#### TEŞEKKÜR

*Bu çalışma 'TÜBİTAK 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri Desteği Programı' kapsamında İstanbul Teknik A.Ş. Ar-Ge Merkezi tarafından desteklenmiştir.*

#### KAYNAKLAR

- Aktaş, S. and Evirgen, B. (2024), "Geotechnical Properties of Artificially Produced Soils", Recent Research on Geotechnical Engineering, Remote Sensing, Geophysics and Earthquake Seismology, Proceedings of the 1st MedGU, 7-10.
- Amran, M., Abdelgader, H.S., Onaizi, A.M., Fediuk, R., Ozbakkaloglu, T., Rashid R.S.M. and Murali, G. (2022). "3D-Printable Alkali-Activated Concretes for Building Applications: A Critical Review", Construction and Building Materials, Vol319, 126126.



- Fereshtenejad, S. and Song, J.J. (2016), "Fundamental Study on Applicability of Powder-Based 3D Printer for Physical Modeling in Rock Mechanics", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol49, 2065-2074.
- Gu, M., Han, J. and Zhao, M. (2016), "Three-dimensional DEM Analysis of Single Geogrid-Encased Stone Columns Under Unconfined Compression: A Parametric Study", Acta Geotechnica, Vol12, 559-572.
- Güleç, E. ve Evirgen, B. (2023), "A Scale Effect on the Geogrids Produced with Three-Dimensional Printer Technology", Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Vol38, 1793-1803.
- Gültekin, A.A ve Evirgen, B. (2021), "The Effect of Various Fences on the Geogrid Performance", 6th International Mediterranean Science and Engineering Congress.
- Jiang, Q., Feng, X., Song, L., Gong, Y., Zheng, H. and Cui, J. (2016), "Modeling Rock Specimens Through 3D Printing: Tentative Experiments and Prospects", Acta Mechanica Sinica, Vol32, 101-111.
- Sönmez, S., Kesen, U. ve Dalgıç, C. (2018), "3 Boyutlu Yazıcılar", 6. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, 471-481.
- Sullivan, J. (2013), "Printable 'Bionic' Ear Melds Electronics and Biology", Office of Engineering Communications, Princeton University.
- Uygunoğlu, T. (2019), "3D Teknolojisi ile Yapı Malzemesi Üretimindeki Gelişmeler", International Journal of 3d Printing Technologies and Digital Industry, Vol3, 279-288.

