

Farklı açılarda yerleştirilen atık maskelerin ayırık daneli zeminlerin kayma mukavemeti üzerindeki etkileri

The effects of different-angled placements of waste face masks on the shear strength of granular soils

Muhammet İkbâl GENÇ^{*1}, Ahmet Şahin ZAIMOĞLU², Alperen TUĞAL³

¹Kafkas Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 36100, Kars

²Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25100, Erzurum

³Bağımsız Araştırmacı, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 21.11.2025

• Kabul tarihi / Accepted: 16.04.2026

Öz

Özellikle COVID-19 pandemisi sonrası tek kullanımlık yüz maske atıklarının artışı ciddi oranda çevresel sorunlara yol açtı. Bu çalışma doğrudan kesme kutusu testleriyle zeminlerde yüz maskelerinin takviye malzemesi olarak yeniden kullanım potansiyelini araştırmaktadır. Ayrıca belirli açılarda kullanılan maske literatürde yeterince aydınlatılmayan geosentetiklerin farklı yönelimlerini aydınlatmayı amaçlamaktadır. Üç katlı atık yüz maskesinin dış katmanı, 60 X 60 mm kareler halinde zemin numunesinin ortasına merkezden yatayla farklı açılarda (0°, 5°, 10°, 15°, 20° ve 25°) yerleştirilmiştir. Testler, %60 ve %80 rölatif sıklıkta hazırlanan kötü derecelenmiş kum (SP) zeminlerde gerçekleştirilmiştir. Bulgular hem rölatif sıklığın hem de atık maske açısının zemin mukavemetini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Özellikle, kullanılan atık maskenin eğimli yerleştirilmesi zemin-atık maske etkileşimini harekete geçirmede eğimin etkisini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, atık maske malzemeleri zemin iyileştirmesinde sürdürülebilir geosentetikler olarak yeniden değerlendirilebilir. Bu yaklaşım, pandemi süreciyle beraber daha da artan atıkların geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması açısından çevre dostu bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Atık yüz maskesi, Kayma dayanımı, Kesme kutusu, Takviye yönelimi, Zemin güçlendirme

Abstract

Following the COVID-19 pandemic, the rapid increase in single-use face mask waste has led to significant environmental concerns. This study investigates the potential reuse of face masks as a reinforcing material in soils through direct shear tests. In addition, the masks placed at specific angles aim to shed light on the influence of different orientations of geosynthetics, which has not been sufficiently addressed in the literature. The outer layer of a three-ply disposable face mask was cut into 60 × 60 mm squares and embedded at the mid-height of the soil specimen with various orientations relative to the horizontal (0°, 5°, 10°, 15°, 20°, and 25°). The tests were conducted on poorly graded sand (SP) specimens prepared at relative densities of 60% and 80%. The findings indicate that both relative density and mask orientation significantly affect the shear strength of the soil. In particular, the inclined placement of the waste mask highlights the role of orientation in mobilizing soil–reinforcement interaction. Overall, waste face masks can be repurposed as sustainable geosynthetic materials for soil improvement. This approach offers an environmentally friendly solution for recycling and reusing the increased volume of waste generated during the pandemic period.

Keywords: Waste face mask, Shear strength, Direct shear test, Reinforcement orientation, Soil reinforcement

1. Giriş

1.1. Introduction

Hızla artan dünya nüfusu ve gelişen sanayileşmeye bağlı olarak dünya üzerinde yapı stoğunda artış meydana gelmektedir. Bu yapılar, zemin üzerine inşa edilmektedir. Fakat her zemin üzerine inşa edilecek yapıyı güvenle taşıyabilecek kapasiteye sahip değildir. Bu tür zeminlere belirli iyileştirme veya güçlendirme yöntemleri uygulanarak taşıma gücü daha iyi duruma getirilebilmektedir. Zemin güçlendirme kavramı ilk kez 1966 yılında Fransız H. Vidal tarafından ortaya konmuştur. Güçlendirmenin amacı mukavemetin artırılması ve

*Muhammet İkbâl GENÇ; ikbal.genc@kafkas.edu.tr

deformasyonların azaltılması gibi zemin özelliklerini iyileştirmektir. Zemin, üzerindeki basınç gerilmelerini taşıyabilirken çekme gerilmelerini taşıyamaz. Bu nedenle inşaat uygulamalarında zemin genellikle kesme etkisinde başarısız olur. Örneğin kumlu zeminler sıvılaşma sonucu kayma direncini kaybedebilmektedir (Abdelkader vd., 2016). Bu tür zeminler, farklı şekil, doku ve sertlikteki sentetik veya doğal malzemelerle daha yüksek kayma direnci ve daha sünek davranış gösterebilirler (Latha & Murthy, 2006; Pradhan vd., 2012; Singh, 2013). Bu bağlamda en yaygın kullanılan güçlendirme malzemelerinden biri de yüksek çekme direncine sahip olan geosentetiklerdir. Geosentetikler, zemin veya diğer geoteknik malzemelerle beraber kullanılan sentetik veya doğal polimerik kaynaklı malzemelerdir (Wu vd., 2020).

Geotekstiller insanlık tarihinin bilinen ilk tekstil ürünlerinden biridir. Eski Mısır bölgelerindeki araştırmalarda çim ve ketenden yapılmış hasırların kullanıldığı bilinmektedir. Geotekstiller, Firavunlar döneminde yol inşaatlarında stabilizasyon amaçlı kullanılıyordu (Agrawal, 2011). Diğer taraftan geotekstil uygulaması olarak bir kumaş malzemesine ilişkin en eski çalışma Beckham ve Mills (1935)'in kaplamasız bir yolda ayırma ve güçlendirme amacıyla dokuma pamuklu kumaş kullanmalarıdır. 1985 yılında J.P. Giroud tarafından üretilen ve sonraki yıllarda filtre kumaşları, sentetik kumaşlar, inşaat bezi gibi kavramlarla anılan geotekstillerin (Koerner, 2016) günümüzde, yumuşak zeminlerin iyileştirilmesi, şev stabilitesi, karayolu ve demiryolu gibi altyapı sistemlerinde dolgu ve istinat duvarı inşası gibi uygulamalarda ayırma (Kamalzare & Ziaie moayed, 2011), güçlendirme (Tavangar & Shooshpasha, 2020), drenaj, filtrasyon (Muthukumaran & Ilamparuthi, 2006; Miszkowska, 2017; Liu vd., 2018), erozyon koruma (Guerra vd., 2015) gibi amaçlarla kullanımı oldukça yaygındır. Yüksek mukavemet, düşük maliyet ve kolay kullanım gibi özellikleriyle geotekstillerin zemine ilavesi; zemini mukavemet, süneklik ve geçirimsizlik gibi birçok özelliğinin daha iyi olduğu kompozit bir malzeme haline getirir (Agrawal, 2011; Kamalzare & Ziaie moayed, 2011; Cardile & Pisano, 2020). Geotekstillerin temel malzemesi esas olarak sentetik elyafır. Polipropilen; düşük maliyeti, düşük yoğunluğu, yeterli gerilme özellikleri ve kimyasal inertliği nedeniyle geotekstiller için en yaygın kullanılan elyaflardan biridir (Guerra vd., 2015; Prambauer vd., 2019). Ayrıca, düşük maliyetinin yanı sıra geri dönüştürülebilir ve kolay bertaraf edilebilir yapısıyla polipropilen, dokunmamış kumaş sektöründe kullanımı en yaygın olan polimerdir (Dönmez vd., 2021). Avrupa'da dokuma geotekstiller 1960'lı yılların başında kıyı korumada kullanıldı, 1968'de ise asfaltsız yollarda ayırma ve stabilizasyon amacıyla dokunmamış geotekstillerin kullanımı başladı (Koerner, 2016). Dokuma geotekstillerle karşılaştırıldığında, dokunmamış geotekstillerin en önemli avantajlarından birisi yüksek esnekliktir ve dokunmamış geotekstiller izotropik özellikleri nedeniyle daha fazla kullanılır (Abdi & Safdari Seh Gonbad, 2019; Tavangar & Shooshpasha, 2020).

Son yıllarda sürdürülebilirlik yaklaşımlar doğrultusunda, hızla artarak çevresel sorun haline gelen çeşitli atık malzemelerin (örneğin kullanılmış araç lastikleri vb.) zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla geoteknik uygulamalarda değerlendirilmesi dikkat çekmektedir (Aksoy vd., 2021). Pandemi süreci ile yüz maskelerinin tek kullanımlık ömürleri ve yüksek üretim miktarları nedeniyle ciddi bir çevresel atık problemine dönüşmüştür (Aragaw & Mekonnen, 2021; Anicetus vd., 2022). Üç katmanlı yüz maskelerinin dokunmuş ve dokunmamış sentetik yapısı geoteknik uygulamalarda güçlendirme amacıyla yeniden kullanım potansiyeline sahiptir. Atık maskelerin farklı formlarının zemin mekanik özelliklerine etkisi literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Zhao vd. (2024), yüz maskelerinin lif, geotekstil tabaka ve geocell formlarını kum zeminde kullanarak zemin-geosentetik etkileşimini araştırmıştır. Araştırmada, maske takviyesinin kayma gerilmesini daha geniş alana yayarak zeminin kayma dayanımını artırdığı ve zemine görünür kohezyon kazandırdığı bildirilmiştir. Yine atık maskelerin lif halinde zemine ilave edilmesini araştıran Han vd. (2023) ve Wang vd. (2023) maske takviyesinin zemin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini bildirmiştir. Barforoush vd. (2025), kum zemine ilave ettikleri parçalanmış ve tabaka maske formlarının zeminin kayma dayanım parametrelerini iyileştirdiğini bildirmiştir. Atık maskelerin kum zeminde şerit halinde kesilerek kullanımını inceleyen çeşitli araştırmacılar (Xu vd., 2022; Ghadr vd., 2022; Said & Rahhal, 2022; Zhang vd., 2025; MolaAbasi vd., 2025) çalışmalarında maske takviyesinin zemin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Xu vd. (2022), atık maske parçalarının zemin taneleriyle kenetlenerek tanelerin yer değiştirmesini sınırlandırdığını ve dokunmamış maske yüzeyindeki liflerin bu kenetlenmeyle güçlü bir zemin-maske bağı oluşturarak kayma dayanımını %22,3'e kadar artırdığını bildirmiştir. Literatürde atık maskelerin lif/şerit halinde kullanımına kıyasla doğrudan maske katmanının tabaka halinde kullanımına yönelik çalışmalar sınırlıdır.

Diğer taraftan geleneksel zemin takviyesi çalışmalarında takviyeler çoğunlukla kesme yüzeyine paralel yani yatay olarak yerleştirilmiştir. Ancak literatürde takviye elemanının eğimli yerleştirilmesinin zemin kayma dayanımını etkileyebileceği belirtilmektedir (Palmeira & Milligan, 1989; Palmeira, 2009). Moayed vd.

(2010), geogrid takviyenin kayma düzlemine göre maksimum çekme kuvvetlerini mobilize edecek şekilde kesme kutusuna nasıl yerleştirilmesi gerektiğini araştırmıştır. Çalışma sonuçları, 45°-60° yerleşimde maksimum kayma dayanımının elde edildiğini göstermiştir. Benzer şekilde Sayao ve Sieira (2012), güçlendirilmiş şevlerde geogrid takviyenin en uygun konumunu belirlemek amacıyla kesme kutusu içerisinde zemine farklı eğimlerde geogrid yerleştirmiş ve maksimum dayanımın 60° yerleşim açısında elde edildiğini bildirmiştir. Kum zemine 0°, 45° ve 90° açılarla yerleştirilen iki geosentetik türünün zemin-takviye etkileşimini inceleyen El-Hanafy (2024), kayma düzlemine paralel yerleşim yerine açılı yerleşimin kayma anında donatının çekme kapasitesini daha etkin şekilde mobilize ederek kayma dayanımını önemli ölçüde artırdığını vurgulamış; ayrıca geosentetik türünün elde edilen dayanım artışları üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu bildirmiştir.

Bu nedenle farklı açılarda yönlendirilen takviye elemanlarının zemin davranışına etkisinin incelenmesi önem arz etmektedir. Ancak literatürde yönelmenin dayanıma etkisini inceleyen çalışmalar 30°, 45°, 60°, 90° ile sınırlı kalmaktadır. Athanasopoulos (1993), kesme kuvvetinin donatı düzlemine dik olarak etki etmesinin zemin-geosentetik davranışını belirlemede saha koşullarını daha doğru yansıttığını belirtirken, Infante vd. (2016), ise donatının dik yönünün zemin kütleğinde maksimum donatı etkisini elde etmek için optimum yönelimi temsil etmediğini belirtmiştir. Bu durum, donatı yerleşim açısının optimum değerine ilişkin literatürde tam bir görüş birliği bulunmadığını göstermektedir.

Çalışmada, üç katlı tek kullanımlık yüz maskesinin dokunmamış katmanı 60 mm × 60 mm boyutlarında kesilerek, kötü derecelenmiş kum (SP) numunelerine farklı eğimlerde (0°, 5°, 10°, 15°, 20° ve 25°) yerleştirilmiş ve ASTM D3080 standardına uygun doğrudan kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, iki farklı rölatif sıklık (%60 ve %80) ve üç farklı normal gerilme (50, 100 ve 200 kPa) altında yürütülmüştür. Çalışmanın temel amacı, atık maske malzemelerinin kum zeminlerin kayma mukavemetine katkısını değerlendirmek, farklı rölatif sıklık koşullarının etkisini ortaya koymak ve takviye elemanlarının farklı açılarda yerleştirilmesinin dayanım performansına olan etkisini incelemektir.

Bu çalışmanın temel özgünlüğü, literatürde çoğunlukla lif veya parçalanmış/şerit formunda kullanılan atık maskenin düzlemsel tabaka şeklinde takviye olarak değerlendirilmesi ve takviye elemanın kayma düzlemiyle yalnızca paralel değil, farklı açılarda yönlendirilerek kesişim açısının donatı verimliliğine etkisinin incelenmesidir. Bu yaklaşım, literatürde genellikle geogridler için çalışılan yüksek açılar aksine, esnek ve lifli yapıdaki atık maskelerin düşük açılarda sergilediği maksimum verimlilik potansiyelini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, hem geoteknik açıdan yenilikçi sonuçlar sunmakta hem de pandemi sonrası artan plastik atıkların sürdürülebilir biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

2.1. Granüler zemin

2.1. Granular soil

Deneysel çalışmada kullanılan kum zemin özel bir firmadan temin edilmiştir. Kum zeminin geoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, özgül ağırlık, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve minimum kuru birim hacim ağırlık testleri sırasıyla ASTM D6913 (2017), ASTM D854 (2023), ASTM D4253 (2016) ve ASTM D4254 (2016) standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kum zemin tek bir parti malzemeden temin edilmiş olup tüm numunelerde aynı eleme ve titiz bir karıştırma prosedürü uygulanarak dane dağılımının deneylerde sabit kalması sağlanmıştır. Kum zemine ait elde edilen bazı geoteknik özellikler Tablo 1’de verilmiş olup, kumlu zemine ait tane boyutu dağılım eğrisi Şekil 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kum zemine ait bazı geoteknik özellikler

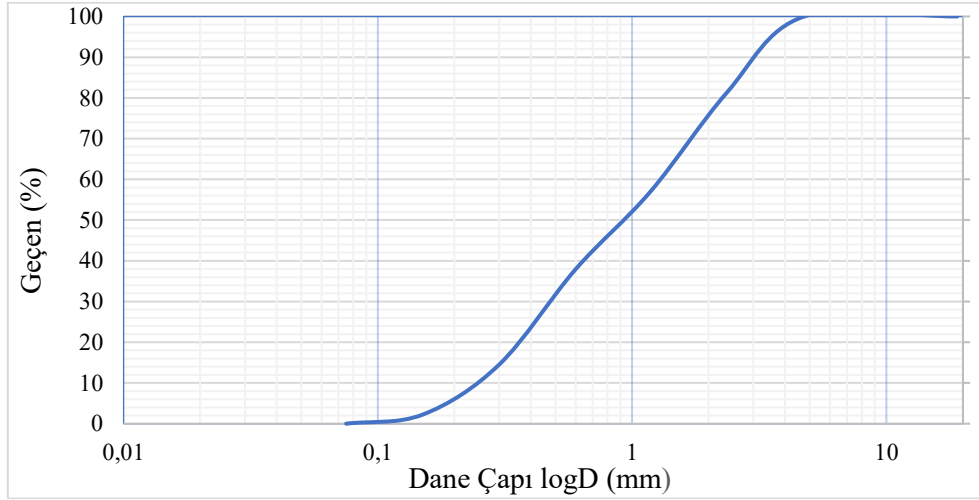
Table 1. Some geotechnical properties of sandy soil

Özellik	Değer
Efektif çap D_{10} (mm)	0,24
D_{30} (mm)	0,48
D_{60} (mm)	1,3
Üniformluk katsayısı (C_U)	5,53

Tablo 1. Devamı
Table 1. Continued

Özellik	Değer
Eğrilik katsayısı (C_c)	0,75
Özgül ağırlık (G_s)	2,71
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) (kN/m^3)	18,6
Minimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmin}) (kN/m^3)	14,9
Maksimum boşluk oranı (e_{max}) (%)	82
Minimum boşluk oranı (e_{min}) (%)	46
Zemin Sınıflandırması*	SP

*Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)



Şekil 1. Kum zemine ait dane dağılım eğrisi.
Figure 1. Grain size distribution curve of the sandy soil.

2.2. Atık maske

2.2. Waste mask

Geotekstil takviye elemanı olarak kullanılan atık maske; Şekil 2' deki gibi kulak tutunma lastikleri ve metal tel çıkarıldıktan sonra 3 katmanlı temiz yüz maskesinin en dış katmanından elde edilmiştir. 3 katmanlı maskenin her bir katmanının farklı mikroyapısal ve mekanik özellikleri nedeniyle zemin-takviye etkileşiminin daha net gözlenmesi ve tekrar edilebilirliği açısından mekanik özellikleri daha belirgin olan dış katman seçilmiştir. Genellikle 15-25 gr/m² gramaj ağırlığındaki bu katman (TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 2020); spunbond yöntemiyle imal edilmiş dokunmamış (non-woven) Polipropilen kumaştan imal edilmiş olup, deneyde kullanılmak üzere 60 mm x 60 mm boyutlarında kesilmiştir. Yüz maskesinin genel fiziksel özellikleri Saberian vd. (2021) çalışmasından alınmış olup Tablo 2'deki gibidir.



Şekil 2. Deneyde kullanılan atık maskenin hazırlanması.
Figure 2. Preparation of the waste mask used in the experiment.

Tablo 2. Yüz maskesinin genel fiziksel özellikleri (Saberian vd., 2021)**Table 2.** General physical properties of the face mask (Saberian et al., 2021)

Fiziksel özellikler	Yüz maskesi
Özgül ağırlık	0,91
Erime noktası (C)	160
24 saatlik su emme oranı (%)	8,9
Çekme dayanımı (MPa)	4,25
Kopmada çekme dayanımı (MPa)	3,97
Kopma uzaması (%)	118,9

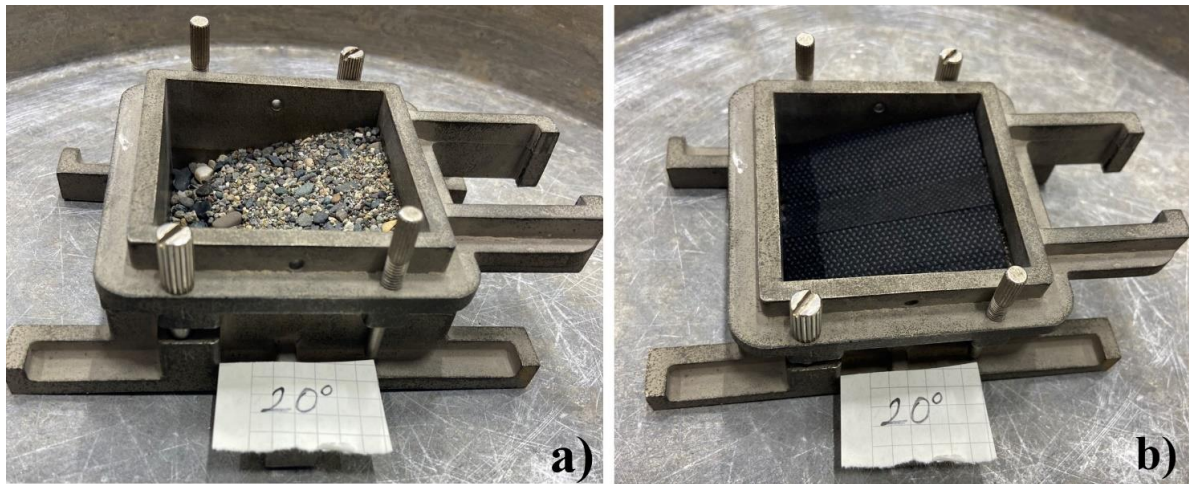
2.3. Deney yöntemi

2.3. Experimental method

Kum zemin ve içerisinde farklı açılarda yerleştirilen atık maske ile hazırlanan farklı rölatif sıklıklardaki numunelerin kayma mukavemeti parametreleri ASTM D3080 (2011) standartlarına göre 60mmx60mmx25mm boyutlara sahip doğrudan kesme deney aletinde belirlenmiştir. İlgili rölatif sıklık (D_r) için kesme kutusu deney aleti haznesine yerleştirilecek kum kütlesi belirlenmiştir. Kesme kutusu deneyinde normal gerilmeler; 50, 100, 200 kPa olarak alınmıştır. Veriler doğrudan bilgisayara aktarılan DTF Veri kaydedicisi kullanılarak elde edilmiştir.

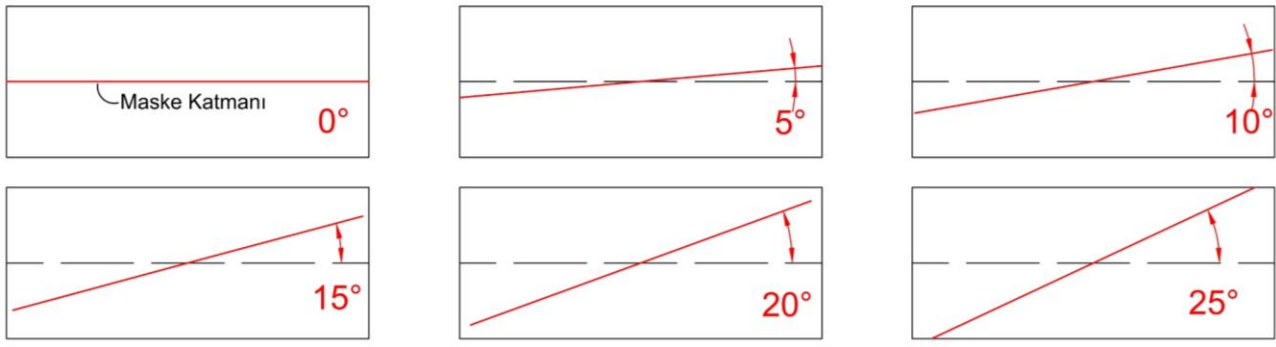
Literatürde kayma düzlemi ile açılı yerleştirilen geosentetik takviye elemanları genellikle 30° ve üzerindeki açılara odaklanmıştır. Ancak, takviye elemanının kayma düzlemine yakın konumlandığı düşük açılarda gerilme aktarım mekanizmalarının ve çekme mobilizasyonunun farklı gelişebileceği değerlendirilmektedir. Bu nedenle çalışmada düşük açılı yerleşim davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca deneylerde kullanılan 60 mm X 60 mm doğrudan kesme kutusu deney düzeneğinin geometrik sınırları, takviye elemanının yüksek açılarda yerleştirilmesi durumunda kesme kutusu alt ve üst sınırlarına temas ederek deney sonuçlarını hatalı etkileyebileceğinden deney programı 0° - 25° arasında sınırlandırılmıştır.

Atık maske kesme kutusu haznesine istenen açıda yerleştirmek için önce kesme kutusu haznesinin alt ve üst yarısı birleştirilerek kesme kutusu içerisinde hedeflenen açı işaretlenmiş ve tabakalara ayrılmıştır. Numune hacmi ve kumun maksimum-minimum indeks yoğunlukları kullanılarak her tabaka için gereken kum miktarı hassas terazi ile tartılmıştır. Kayma düzlemine göre belirlenen açıda yerleştirilecek atık maske altına belirlenen rölatif sıklıkta kum zemin istenen açıda hazneye yerleştirilmiştir (Şekil 3a), daha sonra atık maske zemin üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3b) ve üst tabakalara tartılan kum atık maske formunu bozmayacak şekilde düşük enerjide sıkıştırılarak hedef hacme ulaşılmıştır. Deneyde kullanılan tüm yerleştirme açılarının tasarımı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Kum zeminin ve atık maskenin yerleştirilmesi: a) belirlenen rölatif sıklıkta istenilen açıyla zeminin yerleştirilmesi b) zemin üzerine atık maske yerleştirilmesi.

Figure 3. Placement of the sandy soil and waste mask: (a) placement of the soil at the specified relative density and desired orientation, and (b) placement of the waste mask on the soil.



Şekil 4. Atık maskenin kesme kutusu haznesine yerleştirilmesi (0° , 5° , 10° , 15° , 20° ve 25°).

Figure 4. Placement of the waste mask into the shear box at orientations of 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , and 25° .

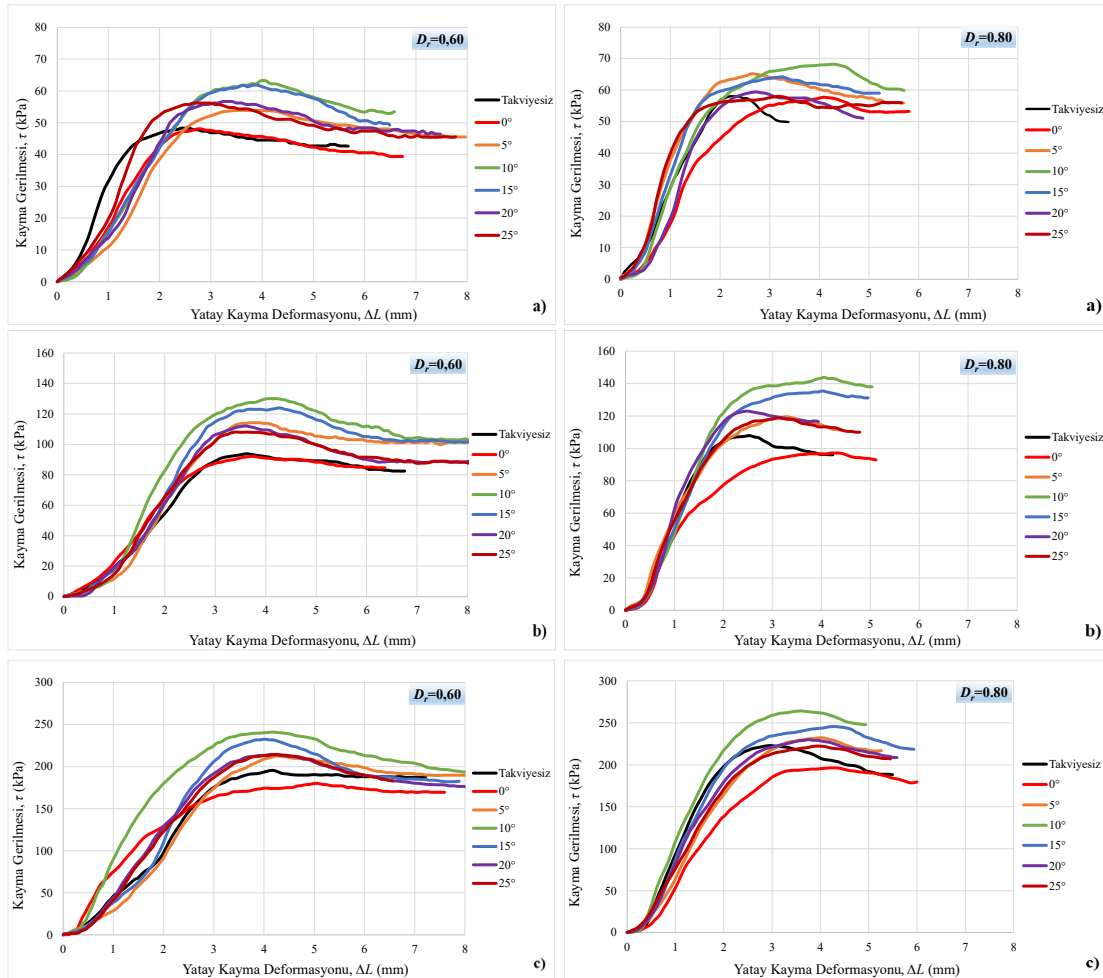
3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

3.1. Gerilme-yatay kayma deformasyon ilişkisi

3.1. Stress–horizontal shear strain relationship

Farklı açılarda (0° , 5° , 10° , 15° , 20° ve 25°) atık maske yerleştirilen kum zemin numunelerinin, iki farklı ($D_r=0,60$, $D_r=0,80$) rölatif sıkılık ve $\sigma_n=50$ kPa, $\sigma_n=100$ kPa, $\sigma_n=200$ kPa düşey gerilme altında elde edilen kayma gerilmesi-yatay kayma deformasyon ilişkileri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Kayma gerilmesi-yatay kayma deformasyon ilişkisi: a) $\sigma_n=50$ kPa, b) $\sigma_n=100$ kPa, c) $\sigma_n=200$ kPa).

Figure 5. Shear stress–horizontal shear strain relationship: (a) $\sigma_n=50$ kPa, (b) $\sigma_n=100$ kPa, (c) $\sigma_n=200$ kPa.

Gerilme-yatay kayma deformasyon ilişkileri, atık maske ile güçlendirilmiş tüm SP kum zemin örneklerinde pik dayanımdan sonra bir dayanım kaybı meydana geldiğini göstermektedir. Bu davranış sıkı kum zeminlerde tipik olan gerinim yumuşaması (strain softening) davranışını yansıtmaktadır.

Takviyesiz zemin örneklerinin yatay yer değiştirmesi iki rölatif sıklık değerinde de 2,4 – 4,2 mm arasında iken atık maske takviyesi sonrası bu değerlerin yerleşim açısına, rölatif sıklığa ve normal gerilmeye bağlı olarak 4,1 – 5,1 mm aralığına ulaştığı gözlenmiştir. Bu artış özellikle 10° ve 15° derecelik açılarda daha belirgin olmakla birlikte, tüm yükleme koşulları için genellenebilir değildir. Atık maske elemanının esnek yapısı nedeniyle çekme direncinin devreye girebilmesi için belirli bir deformasyon seviyesine ihtiyaç duyulması, bazı durumlarda daha yüksek yer değiştirme değerlerinin elde edilmesine neden olmuştur. Benzer şekilde Zhao vd. (2024), yaptıkları çalışmada, kum zemine geotekstil takviye olarak kullandıkları atık yüz maskelerinin pik gerilmeye ulaşmak için gereken yer değiştirmeyi artırdığını ifade etmişlerdir.

Buna karşılık 20° ve 25° yerleşim açılarında gözlenen düzensizlikler, maske-zemin arayüzündeki ankraj ve kayma mekanizmalarının normal gerilme ve rölatif sıklık koşullarında farklı derecede etkin olmasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde 0° yerleşim açısında takviye elemanın kayma düzlemine paralel konumlanması, çekme gerilmelerinin etkin biçimde devreye girmesini geciktirerek belirli normal gerilme seviyelerinde daha yüksek deformasyon oluşumuna yol açabilmektedir.

İki rölatif sıklık durumunda da normal gerilmenin artmasıyla pik dayanımlar artmıştır. Aynı zamanda tüm normal gerilme koşullarında $D_r:0,80$ rölatif sıklığına sahip zemin örnekleri $D_r:0,60$ rölatif sıklığına sahip zemin örneklerinden daha yüksek pik dayanım sergilemiştir.

3.2. Göçme zarfı

3.2. Failure envelope

Geosentetik takviyeli zemin kompozitlerinin kayma mukavemetinin elasto-plastik model ve Coloumb yenilme kriterine uyduğu, zemin kayma dayanımının davranışına benzer olduğu varsayılabilir (Infante vd., 2016).

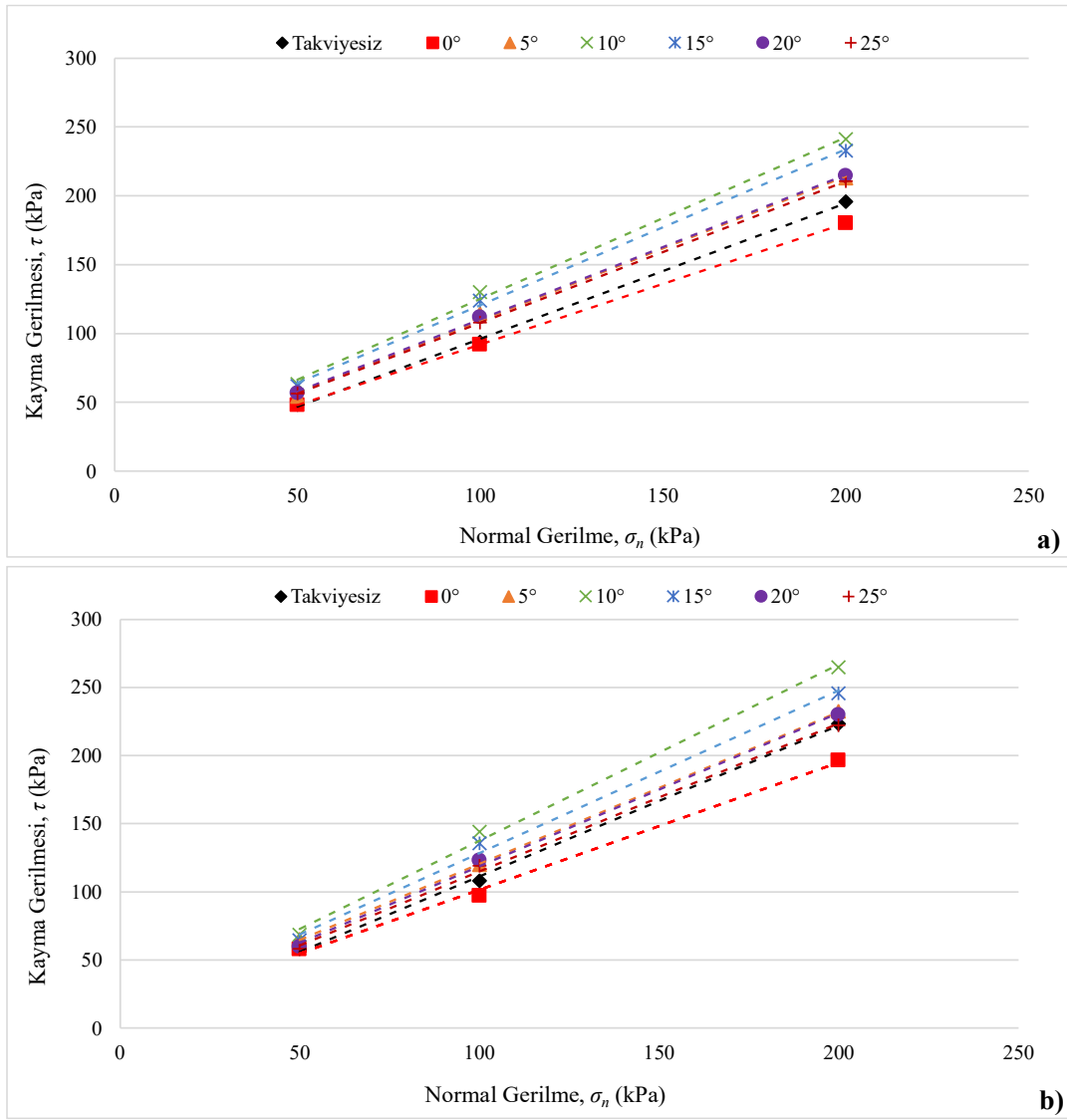
Geosentetiklerle güçlendirilmiş zemin kompozitlerindeki kayma mukavemeti aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\tau = c_{m-z} + \sigma_n \cdot \tan \phi_{m-z} \quad (1)$$

Burada; τ , maske-zemin kompozitinin kayma mukavemeti; c_{m-z} , maske-zemin kompozitinin görünür kohezyonu; σ_n , normal gerilme ve ϕ_{m-z} , maske-zemin kompozitinin sürtünme açısını ifade etmektedir.

Hazırlanan tüm numuneler için kesme kutusu deneyleri 50, 100 ve 200 kPa olmak üzere 3 farklı normal gerilme (σ_n) altında gerçekleştirilmiş ve bu normal gerilmelere karşılık gelen kayma gerilmeleri (τ) belirlenmiştir. Göçme zarfları, tüm numuneler için normal gerilmelere denk gelen kayma gerilmelerinin birleştirilmesiyle doğrusal eğilimi hesaplanarak oluşturulmuştur. Atık maske yerleştirme açısı ve rölatif sıklığa göre çizilen kayma gerilmesi-normal gerilme ilişkileri Şekil 6'da gösterilmiştir. Göçme zarflarının eğiminden, ϕ_{m-z} ve y eksenini kestiği noktadan, c_{m-z} dayanım parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 3'te toplu halde verilmiştir.

Şekil 6 incelendiğinde orta rölatif sıklıkta ($D_r:0,60$) hazırlanan numunelerde, atık maske yerleşimiyle görünür kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinde genel olarak kum zemine nazaran artış görülmektedir. Takviyesiz kum zemin numunelerinde kohezyonun ihmal edilebilir düzeyde olması beklenir. Atık maske ilavesi sonrasında elde edilen görünür kohezyon ise gerçek kohezyondan farklı olarak atık maske katmanının dokunmamış rastgele lif yapısı ile kum daneleri arasında gelişen mekanik kilitlenme ve ara yüz sürtünmesi etkisinden kaynaklanmaktadır. Lifli yapı, kum danelerinin lifli yapıya kısmen nüfuzuna izin vermekte ve yükleme etkisiyle liflerin çekme direncinin devreye girmesiyle kayma dayanımına ilave katkıda bulunmaktadır. Bu katkı Mohr-Coulomb kayma parametrelerinden görünür kohezyon artışı olarak temsil edilmektedir.



Şekil 6. 50, 100 ve 200 kPa normal gerilmeler altında 0°, 5°, 10°, 15°, 20° ve 25° açılarla yerleştirilen atık maske takviyesi için elde edilen doğrusal göçme zarfları: a) $D_r=0.60$, b) $D_r=0.80$

Figure 6. Linear failure envelopes obtained for the waste mask reinforcement placed at angles of 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, and 25° under normal stresses of 50, 100, and 200 kPa: (a) $D_r = 0.60$, (b) $D_r = 0.80$.

Tablo 3. Kesme kutusu dayanım parametreleri

Table 3. Direct shear test strength parameters

θ (°)	$D_R, 0,60$		$D_R, 0,80$	
	c_{m-z} (kPa)	ϕ_{m-z} (°)	c_{m-z} (kPa)	ϕ_{m-z} (°)
0	4,0	41,3	8,0	43,1
5	4,7	46,3	8,9	48,1
10	7,7	49,6	8,0	52,3
15	7,4	48,5	9,2	50,0
20	5,4	46,1	6,0	48,4
25	4,9	46,4	6,3	47,4

Bu rölatif sıkılıkta kum zemine göre en yüksek içsel sürtünme açısı ve en yüksek görünür kohezyon değerleri sırasıyla 7,7 kPa ve 49,6° ile 10° açılı atık maske yerleşim durumunda elde edilmiştir. Daha büyük açılarda (15°, 20° ve 25°) görünür kohezyon değerindeki azalmanın yüksek eğimlerde arayüz temas etkinliğinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Takviye elemanının kayma düzlemi ile oluşturduğu açının optimum değerden uzaklaşması liflerin çekme direncinin etkinliğini sınırlandırmakta ve dolayısıyla görünür kohezyon değerinin azalmasına neden olmaktadır.

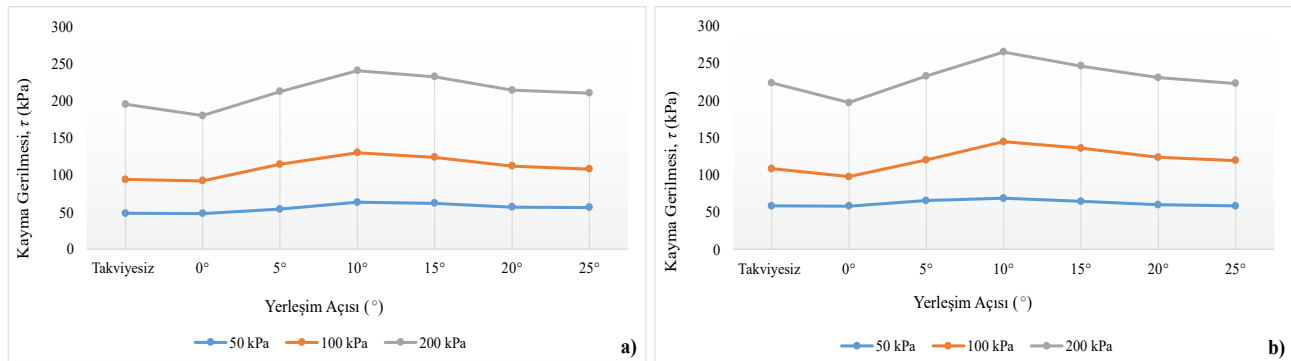
Şekil 6'dan yüksek rölatif sıkılıkta ($D_r:0,80$) hazırlanan numunelerde de atık maske yerleşimiyle görünür kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin genel olarak kum zemine nazaran artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Yüksek rölatif sıkılıkta genel olarak daha yüksek pik kayma dayanımı ve dolayısıyla daha dik kırılma zarfları elde edilmiştir. Bu rölatif sıkılıkta kum zemine göre en yüksek içsel sürtünme açısı değeri $52,3^\circ$ olarak 10° açılı atık maske yerleşim durumunda elde edilirken en yüksek görünür kohezyon değeri 9,2 kPa ile 15° açılı atık maske yerleşim durumunda elde edilmiştir. Bu durum, yüksek rölatif sıkılık durumunda taneler arası ve tane-atık maske arasındaki temas yüzeyi alanının artması ile tanelerin ve atık maskenin yük aktarmada daha etkin olmasından kaynaklanmaktadır. Benzer sonuca literatürde kum zeminde geotekstil takviyesini araştıran çoğu araştırmacılar (Tuna & Altun, 2012; Infante vd., 2016; Barforoush vd., 2025) tarafından da ulaşılmış ve çalışmalarında yüksek rölatif sıkılık durumunda daha yüksek kayma mukavemeti parametreleri oluşacağını ifade etmişlerdir.

Atık maske ile hazırlanan numunelerin, kum zemin numunelerine nazaran genel olarak hem kohezyonun hem de sürtünme açısı değerlerinin daha yüksek olduğu Şekil 6 ve Tablo 3' te görülmektedir. Benzer sonuçlar literatürde de belirtilmiş olup (Latha & Murthy, 2006; Infante vd., 2016; Said & Rahhal, 2022; Zhao vd., 2024; Zhang vd., 2025) bu sonuçlar atık maskenin kum zeminin kayma mukavemetini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

3.3. Kayma gerilmesi-atık maske yerleşim açısı ilişkisi

3.3. Shear stress–waste mask placement angle relationship

Her bir numunenin 50, 100 ve 200 kPa normal gerilmelere karşılık gelen kayma gerilmeleri doğrudan kesme kutusu deneyinden elde edilmiştir. %60 ve %80 rölatif sıkılıklarda hazırlanan numunelere ait kayma gerilmesi-atık maske yerleşim açısı ilişkisi Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Kayma gerilmesi-atık maske yerleşim açısı ilişkisi: a) $D_r=0,60$, b) $D_r=0,80$

Figure 7. Shear stress–waste mask placement angle relationship: (a) $D_r = 0,60$, (b) $D_r = 0,80$.

Şekil 7a incelendiğinde 0,60 rölatif sıkılıkta 50, 100 ve 200 kPa normal gerilmelerinde en yüksek kayma gerilmesi değerlerinin sırasıyla 63,1 kPa, 130,0 kPa ve 241,0 kPa olarak 10° açılı yerleşimde elde edildiği görülmektedir. Benzer şekilde 0,80 rölatif sıkılık durumunda da 50, 100 ve 200 kPa normal gerilmelerde en yüksek kayma gerilmesi değerleri sırasıyla 68,3 kPa, 144 kPa ve 264,4 kPa olarak 10° açılı yerleşimde elde edilmiştir.

Literatürde takviye elemanının kesme düzlemine belirli açılarda yerleştirilmesinin kompozit zeminin kayma dayanımını etkilediği belirtilmektedir. Kum zemine geogrid takviyesinde kayma dayanımı üzerinde optimum açının 30° – 45° olduğunu belirten Moayedı vd. (2010) ve yine geogrid takviyesinde kayma dayanımı üzerinde optimum açısının 60° olduğunu bildiren Sayao ve Sieira (2012) çalışmalarına kıyasla, elde edilen sonuçlar geotekstil takviyesinin daha düşük açılarda (10°) yerleştirilmesinin dayanım artışında daha etkili olabileceğini göstermektedir. Bu durum kullanılan geotekstil malzemenin (atık maske) esneklik ve yüzey sürtünme özelliklerinin geogrid malzemeye nazaran daha farklı olmasından kaynaklanmaktadır. 10° ye kadar kompozit zeminin kayma direnci artış göstermekte ve bu dereceden sonra azalma eğilimine geçmektedir. Bunun sebebinin maske ile kum daneleri arasındaki dayanım parametrelerinin değişiminden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Geogridler, yüksek rijitliği ve açık gözlü yapısıyla zemine güçlü direnç ve ankraj sağlayabilmektedir. Bu nedenle kayma düzlemi ile daha büyük açılarda (30° - 60°) yerleştirildiğinde optimum performans gösterebilmektedir. Buna karşılık bu çalışmada kullanılan ince ve esnek lifli yapıya sahip atık maske takviye elemanı, düşük açılarda yerleştirildiklerinde kayma deformasyonları ile çekme mobilizasyonunun daha etkin şekilde gelişmesini sağlayabilmektedir. 10° yerleşim açısında atık maske kayma düzlemi ile yeterli kesişimi sağlayarak çekme gerilmelerinin daha etkin devreye girmesini sağlarken, yüksek açıdaki lokal burkulma, kıvrılma ve temas kaybı gibi olumsuzlukları da minimize eder. Ancak kayma düzlemiyle artan açıda takviye elemanının kayma düzlemini daha dik açılarda kesmesi nedeniyle aderans mekanizması değişmekte ve kıvrılma, burkulma gibi davranışlarla çekme mobilizasyonu azalabilmektedir. Bu nedenle yüksek açılarda atık maske malzemesinin dayanım iyileştirme etkisinin azalabileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte literatürde rijit malzemelerle yapılan çalışmalarda 30° - 60° açılarda optimum değerlerin sunulmuş olması optimum açının deney koşullarına ve malzeme özelliklerine bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir.

Dayanımdaki artış özellikle yüksek normal gerilmelerde daha belirgin olmaktadır. 0,80 rölatif sıklıktaki zemin numuneleri, 0,60 rölatif sıklıktaki zemin numunelerine göre daha yüksek dayanım sergilemiştir. Aynı normal gerilme koşullarında, rölatif sıklık artışına bağlı olarak dayanım artış oranı %3,2 ile %20,1 arasında kaydedilmiştir. Aynı yerleşim açısında 0,80 rölatif sıklıkta normal gerilme artışındaki kayma gerilmesi artışı daha belirgin olmuştur. Benzer şekilde, Yelvi ve Abdullah (2020) çalışmasında; dokunmamış geotekstilin farklı rölatif sıklılıklardaki kum zemin kayma dayanımına etkisini incelemiş ve yüksek rölatif sıklıkta geotekstil ilavesinin daha yüksek dayanım değeri verdiğini bildirmiştir.

İki rölatif sıklık değerinde de tüm yerleşim açılarında kum zemine göre daha yüksek kayma dayanımı elde edilirken 0° yerleşim açısında dayanımda azalma gözlenmiştir. 50, 100 ve 200 kPa normal gerilmelerde dayanımdaki azalma 0,60 rölatif sıklık durumunda sırasıyla %0,5, %2 ve %7,9; 0,80 rölatif sıklık durumunda ise sırasıyla %0,5, %10 ve %11,9 olarak kaydedilmiştir. Görüldüğü üzere normal gerilmedeki artışla dayanım kaybı yüzdesi artmıştır. Benzer şekilde aynı normal gerilmede genel olarak artan sıklıkla dayanım kaybı yüzdesi artmıştır.

Atık maskenin 0° yerleşiminde dayanım kaybının muhtemel sebebi, yük aktarımının sınırlı kalmasının yanı sıra, atık maskenin kayma düzlemiyle paralel (0°) konumlanarak potansiyel bir ara yüzey oluşturmasıdır. Bu durumda maske, zemin içerisinde çekme gerilmelerini etkin olarak devreye sokmak yerine, kayma düzlemi boyunca süresiz bir ara yüzey davranışına sebebiyet vermektedir. Dolayısıyla 0° yerleşimde takviye elemanı, güçlendirici bir eleman olarak çalışmak yerine zayıf bir düzlem gibi davranabilmektedir. Benzer şekilde El-Hanafy (2024) ve Moayed vd. (2010) kayma düzlemiyle paralel (0°) geosentetik yerleşiminin takviyesiz duruma kıyasla daha düşük kayma dayanımına yol açtığını bildirmiştir. Bu bulgular, mevcut çalışmada gözlenen davranış ile uyumludur.

Artan yerleşim açılarında ise takviye elemanı potansiyel kayma yüzeyiyle kesişerek etkin şekilde çekme gerilmelerinin oluşumuna izin verir ve ara yüzey boyunca kayma davranışı yerine kum tanelerinin atık maske yüzeyindeki lifli yapıya tutunduğu tane-lif kilitleme mekanizması gelişir.

Genel olarak atık maske takviyesi, takviyesiz kum zeminin kayma dayanımını artırmıştır. Dayanım artışında en etkili yerleşim açısı, 10° olarak belirlenmiştir.

Bu sonuçlar geometrik ilişki çerçevesinde değerlendirildiğinde, arazide donatılar yatay yerleştirilse bile, potansiyel göçme yüzeyi donatıları yatay olarak değil belirli açıyla kesebilmektedir. Laboratuvar ortamında uygulanan açılı yerleşim senaryosu, sahadaki bu kesişim durumunu temsil etmektedir. Dolayısıyla 0° deney sonucu arazi uygulamalarının yanlış olduğu fikrini vermemeli aksine eğimli deney sonuçları arazideki geometrik ilişkinin yani donatı-göçme düzlemi açısının önemini atık maske üzerinden doğrulamaktadır.

3.4. Güçlendirme verimliliği

3.4. Reinforcement efficiency

Bu çalışmada, atık maske içeren zeminin kayma dayanımındaki iyileşmeyi tahmin etmek amacıyla Denklem (2) deki güçlendirme verimliliği (η) kullanılmıştır. Bu indeks takviyeli zemin kompozitlerindeki kesme dayanımının, aynı yük koşulundaki takviyesiz zeminin kayma dayanımına oranı olarak tanımlanır (Kamalzare & Ziaie moayed, 2011; Infante vd., 2016).

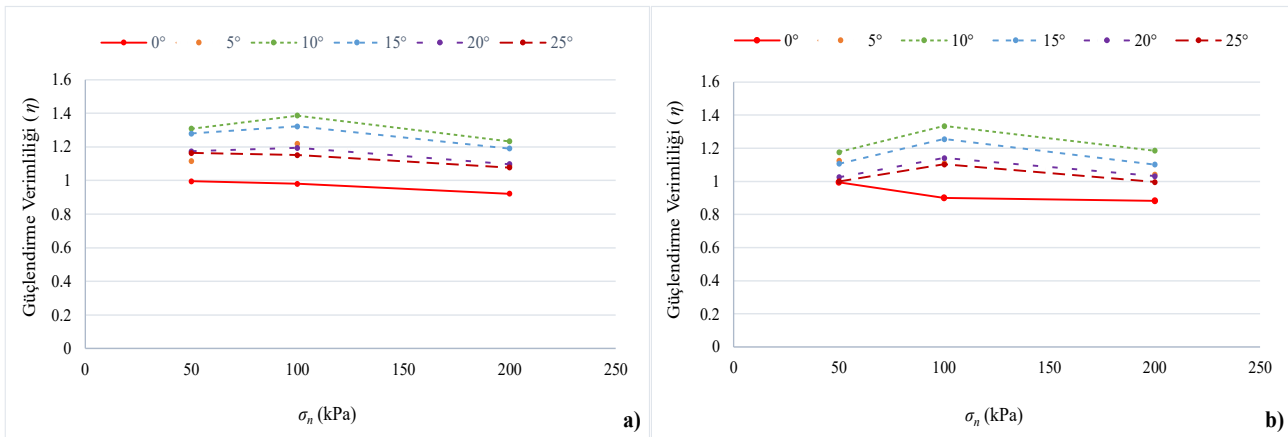
Kohezyonlu zeminin kesme dayanımı için güçlendirme verimliliği şu şekilde tanımlanır:

$$\eta = c_{m-z} + \sigma_n \cdot \tan \phi_{m-z} / c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (2)$$

Granüler zeminler için ise:

$$\eta = \tan \phi_{m-z} / \tan \phi \quad (3)$$

Burada η güçlendirme verimliliği, c_{m-z} maske-zemin kompozitinin görünür kohezyonu, c donatısız zeminin kohezyonu, σ_n normal gerilme, ϕ_{m-z} maske-zemin kompozitinin içsel sürtünme açısı ve ϕ donatısız zeminin içsel sürtünme açısıdır. Atık maske ile hazırlanan zemin numunelerinin çoğu görünür kohezyona sahiptir, bu nedenle Denklem (2) donatılı zemin kompozitlerinin kayma dayanımı iyileştirmesini hesaplamak için kullanılır. Her bir numune için belirlenen güçlendirme verimliliği-düşey gerilme ilişkileri Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Güçlendirme verimliliği-düşey gerilme (η - σ_n) ilişkisi: a) $D_r=0,60$ b) $D_r=0,80$

Figure 8. Reinforcement efficiency-vertical stress (η - σ_n) relationship: (a) $D_r = 0,60$, (b) $D_r = 0,80$.

Şekil 8 incelendiğinde atık maske ile hazırlanan numunelerin güçlendirme verimliliği D_r ve atık maske yerleşim açısına bağlı olarak 0,88-1,39 arasında değişmektedir. η değerleri 0° açılı yerleşim dışında tüm açılarda 1'den yüksek çıkmıştır. Bu durum atık maske ile hazırlanan numunelerin kum zemine göre dayanımı artırdığını göstermektedir. 0° yerleştirme açısında η değeri 1'den küçük çıkmaktadır.

Çalışmamızda kullanılan atık maske gözenek açıklığı kum zemin ortalama tane çapından ($D_{50}=0.92$ mm) daha küçük olduğundan, zemin tanelerinin maske içine nüfuz etmesi beklenmemektedir. Bununla birlikte, Sayeed vd. (2014), dokunmamış geotekstiller ile kum zemin arasındaki etkileşimin sadece penetrasyon ile değil aynı zamanda yüzeysel mekanik kilitlenme ile gerçekleştiğini bildirmiştir. Köşeli ve belirli bir dane dağılımına sahip kum taneleri normal gerilme altında dokunmamış tekstilin yüzeyine basınç uygulayarak bir mekanik kilitlenme yaratır ve bu da maske dokusunun kum tanelerinin serbestçe kaymasını engellemesine neden olmaktadır. Benzer şekilde Xu vd. (2022) ve Wang vd. (2024), maske-zemin etkileşimini mikro ölçekte incelemiş ve maskenin rastgele dağılmış lifli yapısının zemin daneleriyle kenetlenerek kayma dayanımını artırdığını ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, SP kum tanelerinin maske yüzeyinde mikro seviyede kilitlenmesi, Sayeed vd. (2014) tarafından bildirilen yüksek temas verimliliğini desteklemektedir. Atık maskenin kayma düzlemine eğimli yerleşimiyle bu artan temas verimliliği, kum zeminin kayma dayanımında belirgin bir artışa yol açmaktadır.

Her iki rölatif sıklık durumunda da en belirgin artış 100 kPa normal gerilmede gerçekleşirken en yüksek η değeri 10° yerleştirme açısında elde edilmiştir.

Atık maske takviyesinin kesme dayanımı üzerindeki güçlendirme verimliliği rölatif sıklığın azalmasıyla daha belirgin olmuştur. 0,60 rölatif sıklık durumunda η değeri 0,92-1,39 aralığında değer alırken 0,80 rölatif sıklık durumunda 0,88-1,33 aralığında değer almaktadır.

4. Uygulamalar ve sınırlamalar

4. Applications and limitations

Uygulamada atık maskeler, sterilizasyon sonrası iğneleme (needle punching) veya ısı bağlama (thermal bonding) yöntemleriyle birleştirilerek sürekli rulolar halinde üretilir. Daha sonra geomat benzeri veya ince geotekstil tabakalar şeklinde geniş alan uygulamalarında kullanılabilir. Daha küçük ölçekli uygulamalarda ise maskeler bindirmeli olarak yerleştirilebilir.

Çalışmada incelenen açılı yerleşim senaryosu, atık maskelerin sahada belirli açıda yerleştirilmesi gerekliliğini ifade etmemektedir. Bu yaklaşım, yatay yerleştirilen düzlemsel takviye elemanlarının potansiyel kayma yüzeyiyle yaptığı kesişim açısının mekanik davranış üzerindeki etkisini modellemek amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, takviye elemanının kayma düzlemiyle yaptığı açının performans üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve özellikle şev stabilitesi tasarımlarında takviye elemanın daha etkin performans sergileyebileceği bölgelerin öngörülmesine yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmada deneyler, 60x60x25 mm boyutlu küçük ölçekli doğrudan kesme kutusunda gerçekleştirilmiştir. Literatürde, geotekstil-zemin etkileşiminin daha gerçekçi biçimde temsil edilebilmesi için büyük ölçekli kesme kutularının kullanımı önerilmektedir. Küçük ölçekli kesme kutularında, takviye elemanının numune boyutuna nazaran nispeten büyük kalması sınır koşulların gerilme dağılımı üzerindeki etkisini artırarak mekanik davranış etkileyebilmektedir. Bununla birlikte Infante vd. (2016), numune büyüklüğünün geosentetik donatılı zemin kompozitlerinin kayma mukavemeti parametreleri üzerinde önemli derecede etkisi olmadığını bildirmiştir. Ayrıca tüm deneylerin aynı standart geometrik koşullarda gerçekleştirilmiş olması, farklı yerleşim açılarının göreceli olarak karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Gelecekteki çalışmalarda, daha büyük ölçekli deney düzeneklerinin kullanılması bu tür esnek takviye elemanlarının davranışını değerlendirmede ölçek etkilerinin daha kapsamlı biçimde incelenmesine katkı sağlayacaktır.

5. Sonuçlar

5. Conclusions

Bu çalışmada, COVID-19 pandemi süreciyle artan tek kullanımlık atık maske sorununa geoteknik alanında sürdürülebilir bir yaklaşımla çözüm sunmak ve geoteknik alanında zemin takviye elemanının belirli eğimlerle yerleştirilmesinin potansiyeli araştırılmıştır. Kötü derecelenmiş (SP) kum zeminlerde farklı açılarda (0°, 5°, 10°, 15°, 20° ve 25°) yerleştirilen atık maskelerin kayma mukavemeti üzerindeki etkileri, iki farklı rölatif sıklık (0,60 ve 0,80) altında doğrudan kesme kutusu deneyleriyle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

1. Atık maske takviyesi genel olarak kum zeminlerin kayma mukavemetini artırmıştır. Kompozit zeminin kayma dayanımı parametreleri: c_{m-z} ve ϕ_{m-z} üzerinde olumlu bir etki gözlenmiştir. Takviyesiz kumda kohezyon gözlenmezken takviye elemanı ile zemin-takviye kenetlenmesiyle kum zeminde görünür kohezyon oluşmuştur.
2. Atık maske yerleşim açısının kayma mukavemeti üzerinde etkin parametre olduğu belirlenmiştir. 0° yerleşim açısında zemin-takviye arayüzünde kayma yüzeyi boyunca zayıflama gerçekleşmiş ve dayanımda azalma gözlenmiştir. İki rölatif sıklık durumunda da optimum sonuç 10° yerleştirme açısında elde edilmiştir.
3. Rölatif sıklıktaki artış kayma dayanımını yükseltmiştir. Rölatif sıklıktaki artışla dayanımdaki artış oranı %3,2-%20,1 aralığında gerçekleşmiştir. Bu durum sıkı kumlarda tane arası kilitlemenin artması ve takviye elemanının yük aktarmadaki etkin rolüne bağlanmaktadır.
4. Normal gerilmedeki artışla beraber pik kayma dayanımı değerleri yükselmiştir. Yüksek normal gerilme koşullarında takviye elemanının etkinliği daha belirgin olmuştur.
5. Güçlendirme verimliliği (η), 0° yerleşim açısı dışında tüm yerleştirme açılarında 1'den büyük kaydedilmiştir. En yüksek verimlilik değeri 10° yerleşim açısında elde edilmiştir. Bu bulgu geotekstil takviye elemanının kayma düzlemiyle yaptığı açının, zemin-atık maske etkileşiminde ve çekme direncinin mobilizasyonunda kritik rol oynadığını göstermiştir. Literatürde rijit geogridler için elde edilen 30°-60° optimum açılara kıyasla, atık maske gibi esnek ve ince takviye elemanlarının çok daha küçük açılarda (10°) dahi maksimum verimliliğe ulaşabildiği belirlenmiştir. Saha uygulaması açısından bu sonuç; atık maske

takviyesinin sahada eğimli yerleştirilmesinden ziyade, atık maske takviyesinin zeminde kritik kayma yüzeyiyle yaklaşık 10° açı yapacak şekilde projelendirilmesiyle maksimum dayanımın elde edileceğini belirtmektedir.

Genel olarak atık maskenin dokunmamış polipropilen kumaş yapısı zeminle yüzey sürtünmesi/kenetlenmesi oluşturduğu ve atık maskelerin geotekstil benzeri davranış göstererek, atık maskelerin düşük maliyetli ve çevre dostu alternatif bir takviye elemanı olarak geoteknik uygulamalarda kullanılabileceği belirlenmiştir. İlerideki çalışmalarda farklı tane boyu dağılımlarına sahip zeminlerde ve çok katmanlı takviye durumlarında bu malzemenin performansının değerlendirilmesi önerilmektedir.

Yazar katkısı

Author contribution

Muhammet İkbal Genç: Kavramsallaştırma, literatür incelemesi, metodoloji, deneysel çalışma, veri analizi, görselleştirme, yazım, gözden geçirme ve düzenleme. Ahmet Şahin Zaimoğlu: Denetim, kavramsallaştırma, yazım, gözden geçirme ve düzenleme. Alperen Tuğal: literatür incelemesi, deneysel çalışma, veri analizi.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Abdelkader, B., Ahmed, A., Mostéfa, B., & Isam, S. (2016). Laboratory study of geotextiles performance on reinforced sandy soil. *Journal of Earth Science*, 27(6), 1060–1070. <https://doi.org/10.1007/s12583-015-0621-0>
- Abdi, M. R., & Safdari Seh Gonbad, M. (2018). Studying the effect of roughness on soil–geotextile interaction in direct shear test. *Journal of Engineering Geology*, 12(5), 1–30. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.12.5.1>
- Agrawal, B. J. (2011). Geotextile: Its application to civil engineering overview. *National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology*, 13–14 May 2011, B.V.M. Engineering College, V. V. Nagar, Gujarat, India (ss. 1–6).
- Aksoy, H. S., Taher, N., & Awlla, H. (2021). Shear strength parameters of sand-tire chips mixtures. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 713–720. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.865490>
- Anicetus, H., Manyele, S., Saria, J., Habtu, M., Saguti, G., Yoti, Z., & Machugu, M. (2022). Improper disposal of waste water and masks during COVID-19, and the associated increased cycle of infection to human health in developing countries: A case study of Tanzania. *Journal of Environmental Protection*, 13, 842–855. <https://doi.org/10.4236/jep.2022.1311053>
- Aragaw, T. A., & Mekonnen, B. A. (2021). Current plastics pollution threats due to COVID-19 and its possible mitigation techniques: A waste-to-energy conversion via pyrolysis. *Environmental Systems Research*, 10(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00217-x>
- ASTM. (2023). *ASTM D854: Standard test methods for specific gravity of soil solids by the water displacement method*. ASTM International. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2016). *ASTM D4253: Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table*. ASTM International. West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM International. (2016). *ASTM D4254: Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density*. ASTM International. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM International. (2017). *ASTM D6913/D6913M-17: Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis*. ASTM International. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2011). *ASTM D3080/D3080M: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. ASTM International. West Conshohocken, PA.
- Athanasopoulos, G. A. (1993). Effect of particle size on the mechanical behaviour of sand–geotextile composites. *Geotextiles and Geomembranes*, 12(3), 255–273. [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(93\)90029-N](https://doi.org/10.1016/0266-1144(93)90029-N)
- Barforoush, A. R., Almustafa, M., Shooshpasha, I., MolaAbasi, H., & Nehdi, M. L. (2025). Triaxial drained behaviour of disposable face mask fibre reinforced sand. *Geomechanics and Geoengineering*, 20(2), 390–406. <https://doi.org/10.1080/17486025.2024.2404114>
- Cardile, G., & Pisano, M. (2020). Advances in soil reinforcement with geosynthetics: From laboratory tests to design practice. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 54, 52–82. <https://doi.org/10.19199/2020.3.0557-1405.052>
- Dönmez, U., Sevim, M., Nozoğlu, H., Nacar, C. Y., Akgül, D., & Ersoy, A. (2021). Polipropilen esaslı meltblown nonwoven kumaşların üretim koşullarının değiştirilmesi ile bazı özelliklerinin incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 209–218. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.688232>
- El-Hanafy, A. M. (2024). Shear strength behavior for reinforced soil with geosynthetic at different inclination angles. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 52(1), 1–16. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2023.221832.1243>
- Ghadr, S., Chen, C.-S., Liu, C.-H., & Hung, C. (2022). Mechanical behavior of sands reinforced with shredded face masks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(8), 317. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02810-z>
- Guerra, A., Rodrigues Bezerra, J., Fullen, M., Mendonça, J., & Oliveira Jorge, M. (2015). Correction to: The effects of biological geotextiles on gully stabilization in Sao Luis, Brazil. *Natural Hazards*, 79, S315–S315. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1878-4>
- Han, Y., Chen, Y., Chen, R., Liu, H., & Yao, X. (2023). Effect of incorporating discarded facial mask fiber on mechanical properties of MICP-treated sand. *Construction and Building Materials*, 395, 132299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132299>
- Infante, D. J. U., Martinez, G. M. A., Arrua, P. A., & Eberhardt, M. (2016). Shear strength behavior of different geosynthetic reinforced soil structure from direct shear test. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(2), 17. <https://doi.org/10.1007/s40891-016-0058-2>
- Kamalzare, M., & Ziaie-Moayed, R. (2011). Influence of geosynthetic reinforcement on the shear strength characteristics of two-layer sub-grade. *Acta Geotechnica Slovenica*, 8, 39–49.
- Koerner, R. M. (2016). Early background and history of geotextiles. In R. M. Koerner (Ed.), *Geotextiles* (pp. 3–15). Woodhead Publishing.
- Latha, M. G., & Murthy, V. S. (2006). Investigations on sand reinforced with different geosynthetics. *Geotechnical Testing Journal*, 29(6), 474–481. <https://doi.org/10.1520/GTJ100439>
- Liu, Y., Sun, W., Du, B., & Liu, J. J. (2018). The physical clogging of the landfill leachate collection system in China: Based on filtration test and numerical modelling. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 318. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020318>
- Miskowska, A., Lenart, S., & Koda, E. (2017). Changes of permeability of nonwoven geotextiles due to clogging and cyclic water flow in laboratory conditions. *Water*, 9(9), 660. <https://doi.org/10.3390/w9090660>
- Moayed, H., Huat, B. B., Kazemian, S., & Asadi, A. (2010). Optimization of tension absorption of geosynthetics through reinforced slope. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15(2), 93–104.

- MolaAbasi, H., Jamshidi Chenari, R., & Payan, M. (2025). An experimental study on the effect of disposable COVID-19 face masks on the mechanical properties of cement-stabilized sand. *Environment, Development and Sustainability*, 27(6), 14023–14043. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04519-3>
- Muthukumaran, A. E., & Ilamparuthi, K. (2006). Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(4), 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.03.002>
- TMMOB Makina Mühendisleri Odası. (2020). *Yüz maskeleri: Covid-19 krizi dönemi genel bilgilendirme*. Ankara, Türkiye.
- Palmeira, E. M. (2009). Soil–geosynthetic interaction: Modelling and analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5), 368–390. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.03.003>
- Palmeira, E. M., & Milligan, G. W. E. (1989). Large scale direct shear tests on reinforced soil. *Soils and Foundations*, 29(1), 18–30. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.29.18>
- Pradhan, P. K., Kar, R. K., & Naik, A. (2012). Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(1), 15–25. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9445-6>
- Prambauer, M., Wendeler, C., Weitzenböck, J., & Burgstaller, C. (2019). Biodegradable geotextiles: An overview of existing and potential materials. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(1), 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.09.006>
- Saberian, M., Li, J., Kilmartin-Lynch, S., & Boroujeni, M. (2021). Repurposing of COVID-19 single-use face masks for pavements base/subbase. *Science of the Total Environment*, 769, 145527. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145527>
- Said, S., & Rahhal, M. E. (2022). Improving the compaction properties and shear resistance of a sand reinforced with COVID-19 waste mask fibers. *Heliyon*, 8(12), e12129. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12129>
- Sayao, A., & Sieira, A. C. C. F. (2012). Evaluation of direct shear tests on geogrid reinforced soil. *Soils and Rocks*, 35, 65–74. <https://doi.org/10.28927/SR.351065>
- Sayeed, M. M. A., Ramaiah, B. J., & Rawal, A. (2014). Interface shear characteristics of jute/polypropylene hybrid nonwoven geotextiles and sand using large size direct shear test. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(1), 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.12.001>
- Singh, H. P. (2013). Strength and stiffness of soil reinforced with jute geotextile sheets. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 3(3), 1143–1146.
- Tavangar, Y., & Shooshpasha, I. (2020). Impacts of a nonwoven geotextile arrangement on load-bearing capacity of reinforced sand: A laboratory study. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1), 8. <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0253-9>
- Tuna, S. C., & Altun, S. (2012). Mechanical behaviour of sand–geotextile interface. *Scientia Iranica*, 19(4), 1044–1051. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.06.009>
- Wang, H., Zentar, R., Wang, D., Dong, L., & Sun, D. (2024). Recycling single use surgical face mask waste for reinforcing cement-treated/untreated dredged marine sediments: Strength, deformation and micro-mechanisms analysis. *Construction and Building Materials*, 449, 138450. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138450>
- Wang, Z., Zhang, W., Wei, M., Wang, P., & Li, D. (2023). Mechanical and deformation behavior of clay reinforced by discarded mask fibers. *Journal of Cleaner Production*, 428, 139485. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139485>
- Wu, H., Yao, C., Li, C., Miao, M., Zhong, Y., Lu, Y., & Liu, T. (2020). Review of application and innovation of geotextiles in geotechnical engineering. *Materials*, 13(7), 1774. <https://doi.org/10.3390/ma13071774>
- Xu, W., Yin, Z. Y., Wang, H. L., & Wang, X. (2022). Experimental study on the monotonic mechanical behavior of completely decomposed granite soil reinforced by disposable face-mask chips. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131528. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131528>

- Yelvi, A. S., Salimah, A., & Abdullah, V. (2020). Laboratory study on shear strength of soil using woven and non-woven geotextiles. In *Proceedings of the 9th Annual Southeast Asian International Seminar (ASAIS 2020)* (ss. 58–64). SCITEPRESS – Science and Technology Publications.
- Zhang, L., Sun, Z., Liu, B., Zhang, Z., & Zhang, J. (2025). Experimental study on mechanical properties of mask-improved calcareous sand. *Sustainability*, 15(9), 4888. <https://doi.org/10.3390/app15094888>
- Zhao, Y., Lu, Z., Liu, J., Zhang, J., Tang, C., Zhang, R., & Yao, H. (2024). Utilization of single-use face masks for sand reinforcement: Insight from experimental and numerical studies. *Environmental Earth Sciences*, 83(15), 453. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11605-2>