ATIK KAUÇUK KATKISININ KUM-GEOMALZEME ARAYÜZEY KAYMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ

EFFECTS OF RUBBER INCLUSION ON SHEAR RESPONSE OF SAND-GEOMATERIAL INTERFACE

Abdulmuttalip ARİ[1], Suat AKBULUT[2]

ÖZET

Bu çalışma, sürdürülebilir bir geoteknik malzeme olan atık kauçuk danelerinin kum-geomalzeme arayüzey davranışı üzerindeki etkilerini makro ve mezo ölçekte incelemektedir. Çalışma kapsamında, kauçuk danelerinin etkileri iki farklı senaryo ile test edilmiştir: kum ile homojen şekilde karıştırılma ve doğrudan geomalzeme yüzeyine ara tabaka olarak yerleştirilme. Deneyler; farklı kauçuk içerikleri ve geomalzeme yüzey pürüzlülük derecesi için gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, özel tasarlanmış şeffaf kesme kutusu düzeneği kullanılmış ve dijital görüntü korelasyonu analizleri yapılmıştır. Makro ölçekte tepe ve rezidüel kayma mukavemetleri ile genleşme açısı değerlendirilirken; mezo ölçekte dane kayma bandı kalınlığı parametreleri analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, karışım senaryosunda tüm yüzey pürüzlülükleri için %1 oranında kauçuk kullanımının optimum mukavemet artışı sağladığını göstermektedir. Görüntü analizleri kauçuk içeriği arttıkça kayma bandının daha dar bir bölgeye hapsolduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, kauçuk kullanımının pürüzsüz yüzeylerde mukavemeti artırıcı bir rol oynadığı, pürüzlü yüzeylerde ise pürüzlülüğün baskın etkisini sönümlediği ve kesme kuvvetlerini sönümlediği gözlemlenmiştir.
Anahtar Kelimeler: *Kum-kauçuk karışımı, Arayüzey kayma direnci, dijital görüntü işleme*

ABSTRACT

This study investigates the effects of waste rubber particles, a sustainable geotechnical material, on the sand-geomaterial interface behavior at both macro and meso scales. Within the scope of the study, the effects of rubber particles were tested under two different scenarios: as a homogeneous mixture with sand and as an intermediate layer placed directly on the geomaterial surface. Experiments were conducted for various rubber contents, and geomaterial surface roughness levels. In the research, a custom-designed transparent shear box assembly was utilized, and digital image correlation analyses were performed. While peak and residual shear strengths and dilation angle were evaluated at the macro scale; shear band thickness parameter was analyzed at the meso scale. The findings indicate that in the mixture scenario, a 1% rubber content provides an optimum increase in strength for all surface roughnesses. Image analyses revealed that as the rubber content increases, the shear band is confined to a narrower region. Furthermore, it was observed that the use of rubber plays a strength-enhancing role on smooth surfaces, while it dampens the dominant effect of roughness on rough surfaces.
Keywords: *Sand-rubber mixture, Interface shear strength, Digital image correlation*

1. GİRİŞ

Kum-geomalzeme arayüzey davranışı, geosentetik donatılar, kazıklar ve diğer zemin-yapı etkileşimi problemlerinde kritik rol oynayarak geoteknik mühendisliğinde temel bir konu

[1] Arş. Gör. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, talipari@yildiz.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Prof. Dr, Yıldız Teknik Üniversitesi, sakbulut@yildiz.edu.tr

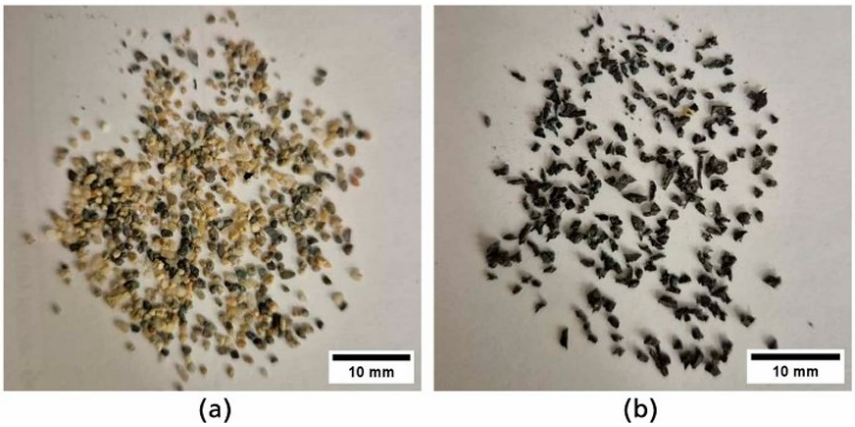
teşkil etmektedir (Moraci et al., 2014; Uesugi and Kishida, 1986). Son yıllarda araştırmacılar, farklı tasarım gereksinimlerini karşılayan optimize edilmiş malzeme özelliklerini belirlemeye giderek daha fazla yönelmektedir. Bu doğrultuda; statik yükler altında yüksek arayüzey dayanımı birincil tercih olurken, tekrarlı yükler altında enerji sönümleme kapasitesini yükseltmek amacıyla süneklik davranışı öne çıkmaktadır (DeJong et al., 2003; Rui et al., 2021). Ek olarak, kazıkların yerleştirilmesi aşamasında çevre zeminin bütünlüğünü korumak adına düşük arayüzey dirençlerinin üretilmesi hedeflenmektedir (Martinez et al., 2019; O'Hara and Martinez, 2020). Bu bağlamda, arayüzey problemine kauçuk danelerinin dahil edilmesi, arayüzeylerin verimliliğini artırmak adına yeni bir perspektif sunacağı öngörülmektedir. Kum-kauçuk karışımlarının içsel kayma davranışı kapsamlı şekilde incelenmiş olsa da, yumuşak kauçuk danelerinin arayüzey davranışını nasıl etkilediğini araştıran çalışmalar oldukça sınırlıdır (Gao et al., 2024; Madani et al., 2023; Manohar and Anbazhagan, 2021).

Önceki çalışmalarda, kum–geogrid arayüzeyine kauçuk daneleri ilave edilmiştir. Elde edilen bulgular, kauçuk danelerinin eklenmesinin süneklik eğilimini arttırdığını göstermiştir. Sonuç olarak zemin–geogrid sistemi, hem dayanım hem de enerji sönümleme kapasitesi açısından daha yüksek bir verimlilik sergilemiştir (Liu et al., 2025; Tanchaisawat et al., 2010). Izgara ve hücresel donatılı arayüzeyler, zemine çekme mukavemeti ve hapsetme etkisi sağlayarak kompozit kayma dayanımını artırır. Bu nedenle, dane–donatı yüzey temaslarının genel mekanik davranışa katkısı ihmal edilebilir düzeydedir. Buna karşın çelik, beton ve geomembran gibi sürekli ortam oluşturan yüzeylerde arayüzey davranışı esas olarak dane–yüzey etkileşimleri tarafından kontrol edilmekte ve yüzey pürüzlülük özellikleri kayma davranışında baskın faktör olarak öne çıkmaktadır (Ari and Akbulut, 2024; David Frost et al., 2012). Dolayısıyla, yumuşak kauçuk danelerinin sürekli yüzeylerle oluşturulan arayüzey davranışına etkisini değerlendirmek için özgün bir yaklaşım gerekmektedir.

Bu çalışmanın özgünlüğü, literatürde sınırlı düzeyde ele alınan kauçuk katkısının kum–geomalzeme arayüzeylerinin kayma davranışına etkilerini çok ölçekli bir değerlendirmeyle sunmasında yatmaktadır. Çalışmada kauçuk danelerinin etkisi iki farklı yerleşim senaryosu altında incelenmiştir: (1) kauçuğun kum daneleriyle homojen şekilde karıştırılması ve (2) kauçuk danelerinin doğrudan geomalzeme yüzeyine yerleştirildiği senaryo. Her iki senaryoda da kauçuk oranı ve yüzey pürüzlülük biçiminin etkisini incelemek amacıyla arayüzey kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Arayüzey bölgesindeki lokal deformasyonların ölçülmesini sağlamak amacıyla şeffaf kesme kutusu tasarlanmıştır. Makro ölçekli davranış için pik ve rezidüel kayma dayanımları ile genleşme açısı, kayma gerilmesi–yatay yer değiştirme grafiklerinden belirlenmiştir. Meso ölçekli arayüzey davranışı için ise kayma bandı kalınlığı hesaplanmıştır. Makro ve meso ölçekli yanıtlar arasındaki karşılıklı etkileşim; kauçuğun konumu, oranı ve geomalzeme yüzey pürüzlülüğünün etkisi dikkate alınarak analiz edilmiştir.

2. MALZEMELER

Bu çalışmada, birer çeşit kum ve kauçuk, iki farklı yüzey yapısına sahip geomalzeme kullanılarak arayüzeyler oluşturulmuştur. Şekil 1a'da sunulan kum, 0.8–1.4 mm dane boyutu aralığında yer almakta ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre kötü derecelenmiş kum (SP) sınıfına girmektedir. Kumun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Şekil b'de verilen kauçuk, kum ile aynı dane boyutuna sahip kırıntı parçacıklarından oluşmaktadır. Kauçuk danelerinin özgül ağırlığı 1.13 ile 1.16 arasında değişmektedir.



Şekil 1. (a) Kum ve (b) Kauçuk daneleri

Tablo 1. Kumun indeks özellikleri

Özellik	**Değer**
Özgül ağırlık	2.64
Medyan dane boyutu	1.0 mm
Maksimum boşluk oranı	0.81
Minimum boşluk oranı	0.56

Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün arayüzey davranışına etkilerini araştırmak amacıyla iki farklı yüzey kullanılmıştır (Şekil 2): Düz/pürüzsüz bir yüzey (H1) ile pürüzlü yüzey (H2). Pürüzler, tüm yüzey boyunca homojen bir geometri elde etmek amacıyla düzenli nervürler şeklinde tasarlanmıştır. Yüzey pürüzlülüğünü sağlayan nervür yüksekliği, ortalama dane boyutundan ($d_{50} = 1.0$ mm) daha küçük olacak şekilde 0.5 mm, nervür uzunluğu ise 5.0 mm olarak belirlenmiştir.

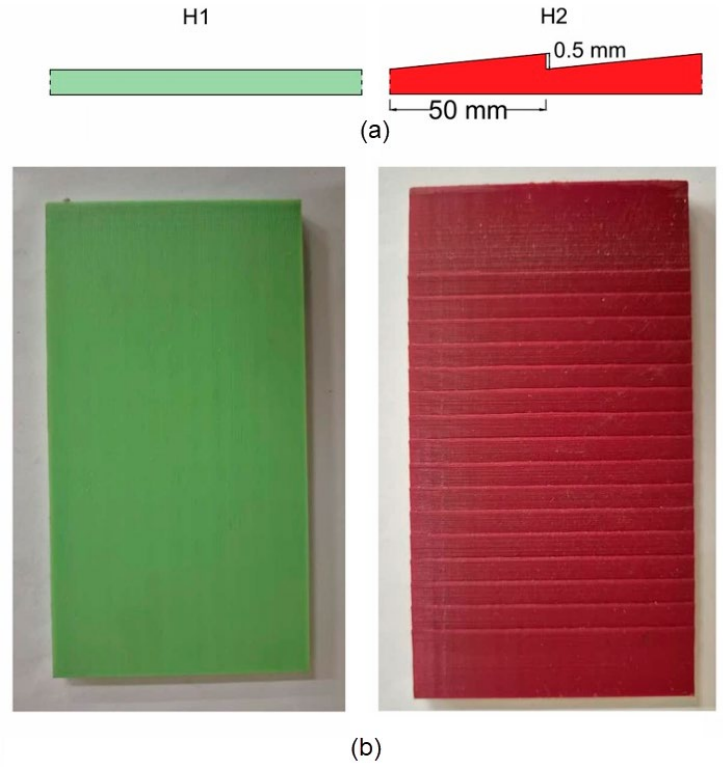
Yüzeyler, hedeflenen geometrilere uygun olarak üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojisiyle üretilmiştir. Arayüz kesme kutusunun boyutları dikkate alınarak yüzey ebatları 60 mm genişlik ve 110 mm uzunlukta hazırlanmıştır. Tasarımı ilk olarak AutoCAD ortamında gerçekleştirilen yüzeylerin basımında Polilaktik Asit (PLA) filamentler kullanılmıştır. Üretilen yüzeyler Şekil 2(b)'de gösterilmektedir.

3. ARAYÜZEY KESME DENEYLERİ

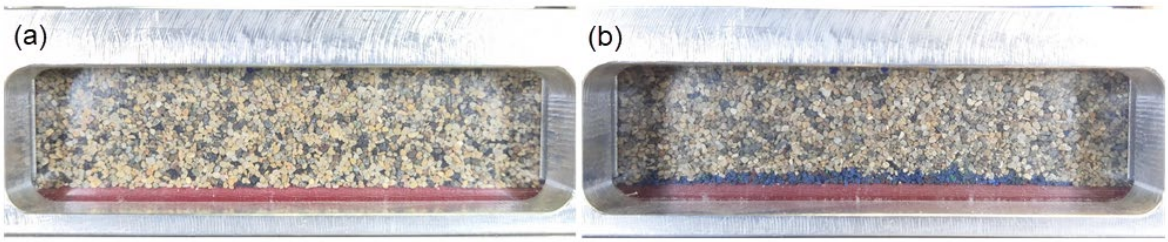
Arayüzey bölgesinde kesme süresince görüntü alınabilmesi amacıyla, geleneksel direkt kesme kutusu modifiye edilmiştir. Bu doğrultuda özel tasarlanmış şeffaf bir kesme kutusu imal edilmiş; sisteme gözlem penceresi ve ayarlanabilir platform gibi yeni aparatlar eklenmiştir. Şeffaf kesme kutusunun bir kenarı pleksiglas, diğer üç kenarı ise alüminyum malzemeden oluşmaktadır (Şekil 3). Kutunun iç boyutları 60 mm genişlik, 100 mm uzunluk ve 30 mm yüksekliktedir. Yüzeyler, kelepçeler yardımıyla hareketli platforma sabitlenmiştir. Kutunun tabanında, yüzey ebatlarıyla uyumlu özel bir kanal bırakılmış ve yüzeylerin bu kanal boyunca hareket etmesi sağlanmıştır. Bu önlem, yüzey ile kesme kutusu arasında oluşabilecek olası sürtünme kuvvetlerini ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca Şekil 2b'de görüldüğü gibi, sınır etkilerinin ölçülen parametreler üzerindeki olumsuzluğunu en aza indirmek amacıyla yüzeylerin kenarlarında pürüzsüz bölümler bırakılmıştır. Yüzeyin hareket ettiği yönde yer alan sağ taraftaki pürüzsüz bölümün uzunluğu daha fazla tutulmuştur.

Deneyler sırasında kesme kutusu sabit kalmış, yüzey 1.0 mm/dak kayma hızıyla hareket ettirilmiştir. Deneyler sırasında düşey deplasman, yatay deplasman ve kesme kuvveti

değerleri anlık olarak kaydedilmiştir. Kesme işlemi boyunca numuneye 55 kPa sabit düşey gerilme uygulanmıştır. Çalışmada kauçuk, kuma iki farklı senaryo kapsamında dahil edilmiştir. İlk senaryoda kum ile homojen bir karışım oluşturulmuş, ikinci senaryoda ise kauçuk daneleri doğrudan yüzey üzerine serilmiştir. Karışım senaryosunda kauçuk oranı (RC), kum numunesinin ağırlığı esas alınarak %1, %2 ve %5 olarak belirlenmiştir. Yüzey üstü senaryosunda ise kauçuk oranı %0.5, %1 ve %2 olarak seçilmiştir. Her iki duruma ait numune durumları Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 2 Geomalzeme yüzeyleri: (a) pürüz yapısı ve (b) 3B yazıcı üretimi

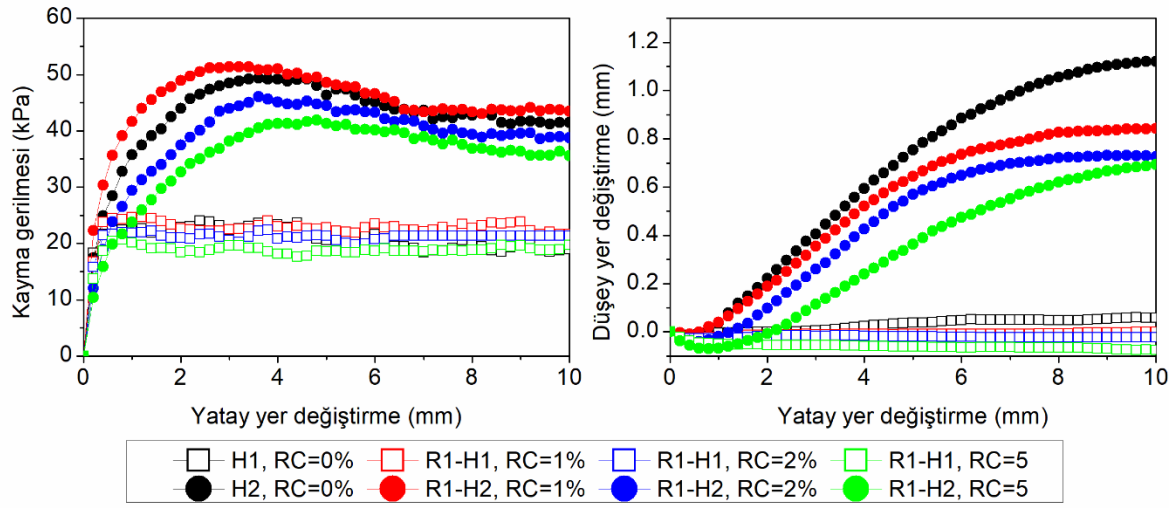


Şekil 3 Kauçuk danelerinin dahil edilme senaryoları: (a) homojen karışım ve (b) yüzeye serme

3.1. Makro Ölçek Kayma Davranışı

Şekil 4, kauçuk danelerinin homojen karışım senaryosuna ait arayüzey kesme deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi–yer değiştirme grafiklerini sunmaktadır. Düşey deplasman grafiklerinde genleşme pozitif işaretle gösterilmiştir. Tüm kauçuk oranlarında yüzey pürüzlülüğünün davranışı belirgin şekilde etkilediği görülmektedir. Kauçuksuz referans deneylerde (Şekil 4a), H2 pürüzlülüğü en yüksek kayma gerilmesine ve genleşme hacim

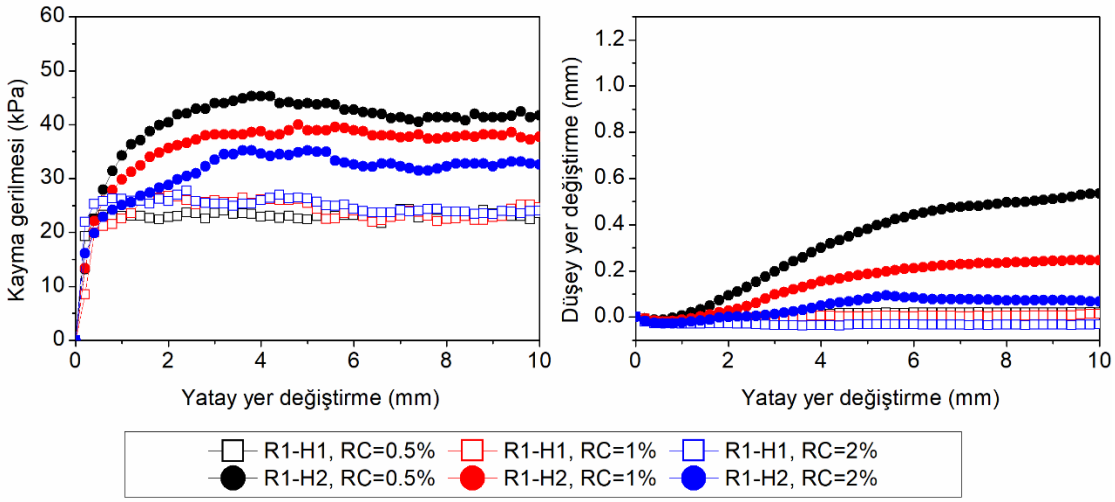
değişimine yol açmıştır. Buna karşın H1 düz yüzeyinde elde edilen kayma gerilmesi ve düşey deplasman değerleri, pürüzlü yüzeye kıyasla oldukça sınırlı kalmıştır. Ayrıca H2 yüzeyi, belirgin pik değerlere ulaştıktan sonra daha net bir mukavemet azalması (yumuşama) eğilimi sergilemektedir. Şekil 5, kauçuk danelerinin doğrudan geomalzeme yüzeyine yerleştirildiği durumdaki arayüzey kayma davranışını göstermektedir. Yüzeydeki kauçuk oranı arttıkça, pürüzlülüğün davranış üzerindeki etkisinin giderek kaybolduğu görülmektedir. Ayrıca karışım senaryosuyla (Şekil 4) kıyaslandığında, artan kauçuk oranıyla birlikte hacim değişiminin belirgin şekilde oturma tipine yöneldiği dikkat çekmektedir. Makro ölçek davranışı nicel parametrelerle değerlendirmek adına; pik ve rezidüel mukavemetler ile genleşme açısının değişimi, hem karışım hem de yüzeye serme senaryoları için Şekil 6'da sunulmuştur. Pik ve rezidüel mukavemet değerleri, kayma gerilmesinin sabit düşey gerilmeye (55 kPa) oranını temsil eden gerilme oranı kullanılarak türetilmiştir. Genleşme açısı ise düşey ve yatay deplasman grafiğinin en dik bölgesindeki eğimi (teğeti) ifade etmektedir.



Şekil 4 Homojen karışım senaryosunda arayüzey kayma gerilmesi ve düşey yer değiştirmenin yatay yer değiştirmeye bağlı değişimi

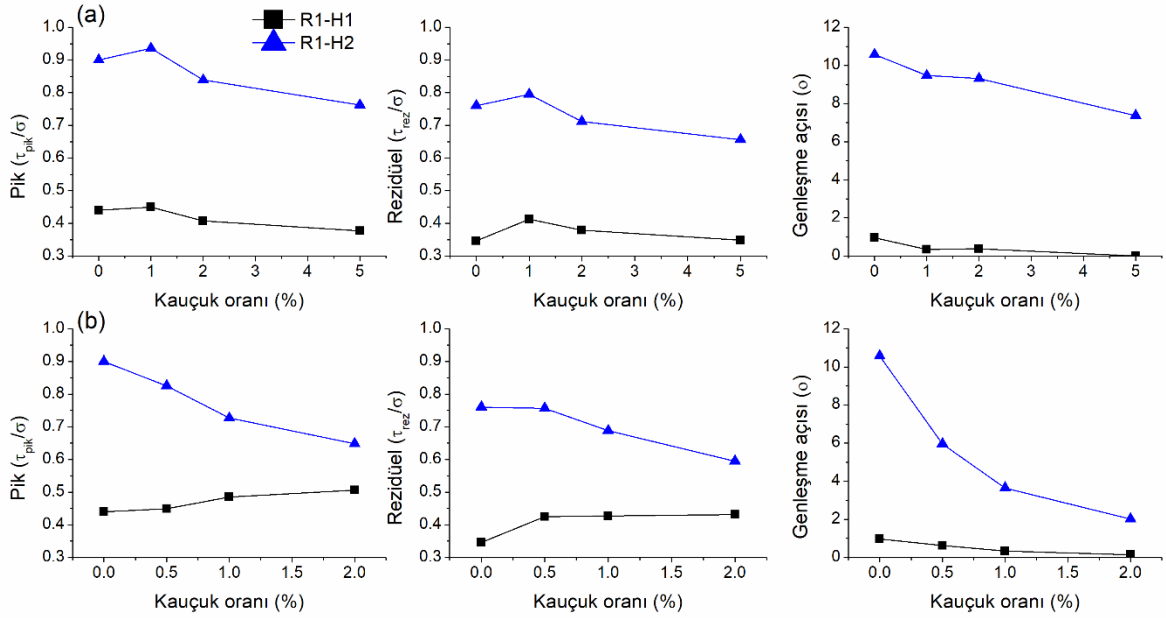
Şekil 6, kauçuksuz referans deneylerde ($\boldsymbol{RC} = \%\mathbf{0}$) en yüksek ve en düşük pik kayma gerilme oranlarının sırasıyla H2 yüzeyinde $\mathbf{0.90}$, H1 yüzeyinde ise $\mathbf{0.44}$ olarak elde edildiğini göstermektedir. Şekil 6a'da görüldüğü üzere kuma $\%\mathbf{1}$ oranında kauçuk ilave edildiğinde, tüm numune gruplarında pik mukavemet değerleri artış kaydetmiştir. H2 yüzeyinde $\%\mathbf{1}$ kauçuk oranında pik mukavemet $\mathbf{0.94}$'e ulaşmıştır. Kauçuk oranının daha da artırılmasıyla pik mukavemet düşüş eğilimine girmiş; $\boldsymbol{RC} = \%\mathbf{5}$ seviyesine ulaşıldığında H2 yüzeyindeki pik mukavemet $\mathbf{0.76}$ değerine gerilemiştir. Pürüzsüz yüzeyde (H1) ise $\%\mathbf{5}$ kauçuk içeriğindeki pik kayma mukavemeti $\mathbf{0.38}$ olarak ölçülmüştür. Bu durum, kauçuk oranının etkisinin pürüzlü yüzeyde çok daha belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, kauçuk danelerinin kuma homojen şekilde karıştırıldığı durumda, pik kayma mukavemeti açısından optimum kauçuk oranı $\boldsymbol{RC} = \%\mathbf{1}$ olarak gerçekleşmektedir. Benzer eğilimler arayüzeylerin rezidüel kayma mukavemetlerinde de gözlemlenmiştir. Şekil 6a, kauçuk oranı arttıkça arayüzey genleşme açısının sürekli bir düşüş sergilediğini göstermektedir. Bu davranış, yumuşak kauçuk danelerinin etkisiyle sistemin daha fazla oturma tipi hacim değişimine yöneldiğini ifade eder. En yüksek genleşme açıları H2 yüzeyinde elde edilmiştir. Kauçuksuz deneylerde H2 yüzeyi $\mathbf{10.68}^\circ$ genleşme açısı

üretirken; en düşük değer $\mathbf{1.08}^{\circ}$ ile H1 yüzeyinde kaydedilmiştir. Kauçuk oranı $\%\mathbf{5}$'e çıkarıldığında, H2 için genleşme açısı $\mathbf{5.98}^{\circ}$ seviyesine düşmüştür.



Şekil 5 Yüzeye serme senaryosunda arayüzey kayma gerilmesi ve düşey yer değiştirmenin yatay yer değiştirmeye bağlı değişimi

Şekil 6b, kauçuk danelerinin doğrudan geomalzeme yüzeyine serildiği duruma ait kayma parametrelerini göstermektedir. H2 yüzeyinde pik kayma mukavemeti tüm kauçuk oranlarında sürekli azalmış ve $\%\mathbf{2}$ seviyesinde $\mathbf{0.65}$ değerine düşmüştür. Karışım durumuna (Şekil 6a) kıyasla, pik kayma mukavemetindeki düşüş trendi yüzeye serilme senaryosunda çok daha dramatik gerçekleşmiştir. Pürüzlü yüzeyin aksine, H1 pürüzsüz yüzeyi kauçuk katkısıyla pik mukavemetinde sürekli bir iyileşme sergilemiştir. Geomalzeme yüzeyindeki kauçuk miktarı arttıkça pürüzlülüğün etkisinin zayıfladığı dikkat çekicidir. Rezidüel kayma mukavemetlerinde, H2 yüzeyi için mukavemet değeri düşüş eğiliminde olmuştur. H1 pürüzsüz yüzeyindeki mukavemet artış eğilimi rezidüel değerlerde de korunmuştur. Şekil 6b, kauçuk danerinin yüzeye serilme durumunun genleşme açıları üzerindeki etkilerini de sunmaktadır. Karışım senaryosuna kıyasla, yüzeye serim durumunda genleşme açısındaki düşüş oranı oldukça yüksektir. En belirgin düşüş pürüzlü H2 yüzeyinde yaşanmıştır; H2 arayüzey kombinasyonunda genleşme açısı $\mathbf{10.68}^{\circ}$'den $\mathbf{1.88}^{\circ}$'ye kadar gerilemiştir. Özetle arayüzey kesme deneyleri; makro ölçekli davranışın pürüzlülük, kauçuk oranı ve kauçuğun sisteme dahil edilme biçiminden doğrudan etkilendiğini ortaya koymuştur. Bu etkilerin altında yatan temel mekanizmaları kavramak adına, Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) analizleri kullanılarak mezo ölçekli kayma bandı kalınlığı parametresi incelenmiştir.



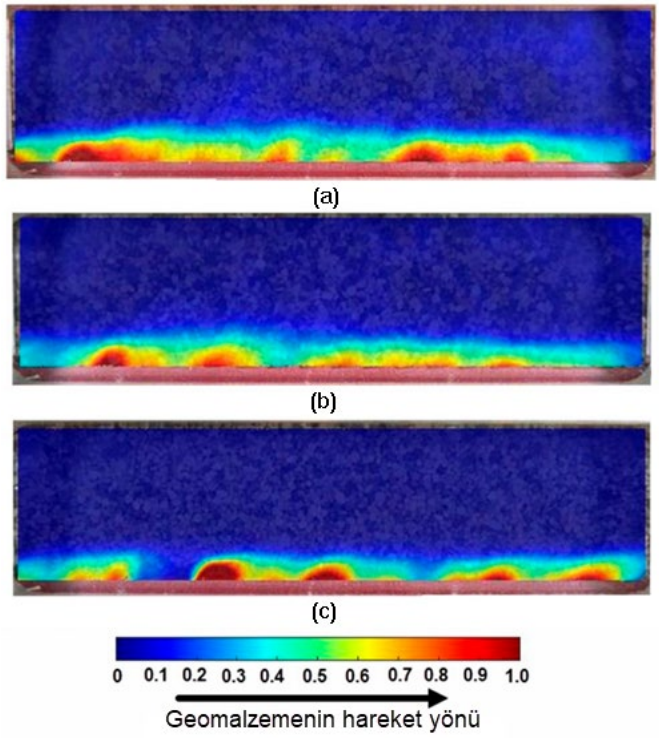
Şekil 6 Pik, rezidüel kayma dayanımının ve genleşme açısının değişimi: (a) karışık kauçuk senaryosu ve (b) yüzey kauçuk senaryosu

3.2. Mezo Ölçek Kayma Davranışı

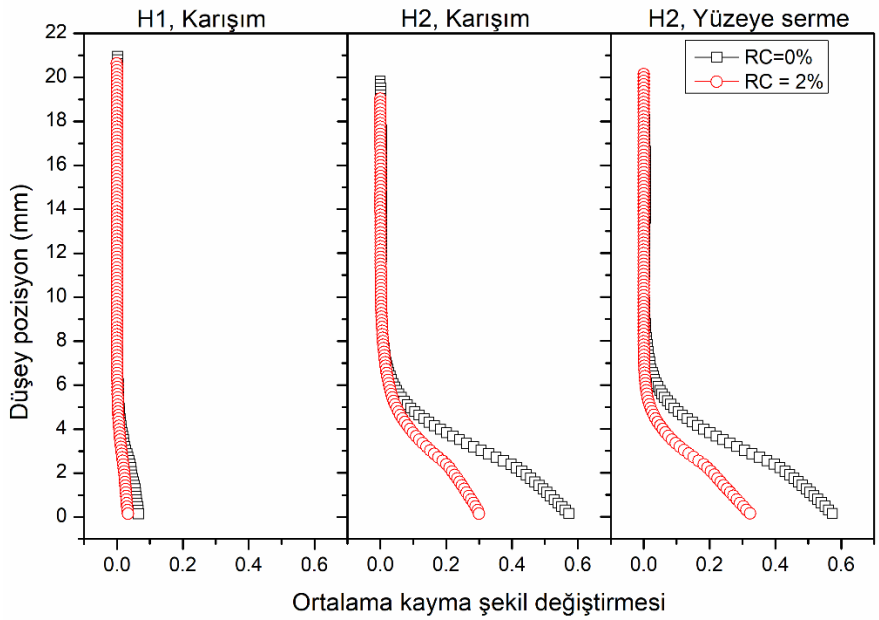
Arayüzeylerin mezo ölçekli davranışı, DIC analizleriyle elde edilen lokal deformasyonlar üzerinden incelenmiştir. Şekil 7, kauçuk ilavesinin kayma şekil değişmesinin dağılımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Görseller H2 yüzeyi esas alınarak üretilmiştir. Kauçuksuz deneydeki dane deplasmanları ($\boldsymbol{RC} = \%\mathbf{0}$) dikkate alındığında (Şekil 7a), $\%\mathbf{2}$ oranında kauçuk katılmasıyla birlikte şekil değiştirme seviyesinin düştüğü anlaşılmaktadır. Buradan hareketle, arayüzey bölgesindeki danelerin kayma eğiliminin kauçuk karışımı tarafından teşvik edildiği söylenebilir. Bu değişim, yumuşak kauçuk danelerinin kuvvet zincirlerindeki rolüne bağlanabilir. Yüzeye serilme durumunda (Şekil 7c), gerek kauçuksuz referans deneye (Şekil 7a) gerekse karışım senaryosuna (Şekil 7b) kıyasla kayma şekil değişmelerinin oldukça azaldığı dikkat çekmektedir. Bu durum, danelerin yüzey üzerinde ağırlıklı olarak kayma hareketi sergilediğine işaret eder. Bunun yanı, Şekil 7c'de kayma deformasyonlarının yerel olarak meydana geldiği; Şekil 7a ve 7b'nin aksine numune genişliği boyunca belirgin bir kayma bandının oluşmadığı görülmektedir.

Kayma bandı kalınlığını nicel değerlerle değerlendirmek amacıyla numune kalınlığı boyunca ortalama kayma şekil değiştirme profilleri belirlenmiştir. Şekil 8, dane kayma şekil değiştirme profillerinin değişimini sunmaktadır. Bu profiller, geomalzemenin $\mathbf{9.0}$ mm'lik yer değiştirmesi sonucunda elde edilmiştir. Şekil 8'den anlaşılacağı üzere yüzeyin üzerindeki daneler, arayüzey kesme etkisine bağlı olarak bir kayma bölgesi (zamanla gelişen bir kayma bandı) oluşturmaktadır. Pürüzlü yüzey daha fazla daneyi indüklediği için kayma bandı daha belirgindir. Arayüzey bölgesindeki kayma birim deformasyonu değerleri, kum numunesine kauçuk daneleri eklendikçe azalmaktadır. Bu durum, kauçuksuz referans deneylerde daha fazla sayıda danenin harekete geçtiğini ve deformasyona katıldığını ifade eder. Kesme kuvvetlerinin daneler aracılığıyla yüzeyden ne kadar uzağa iletildiğini değerlendirmek amacıyla, kayma şekil değiştirmesi profillerinden yararlanılarak kayma bandı kalınlığı belirlenmiştir. Profillerde, deformasyon lokalizasyonunun başladığı dönüm noktası yaklaşık

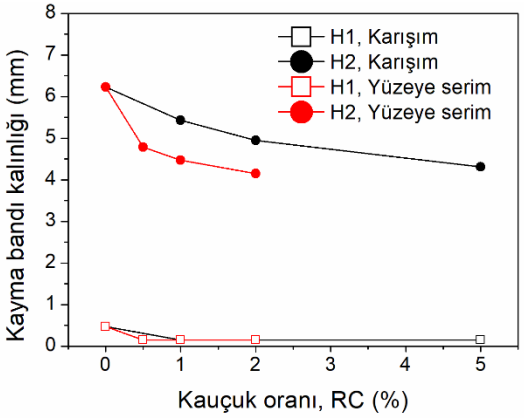
0.05 değerine karşılık gelmektedir. Bu nedenle, 0.05 değerine karşılık gelen kalınlık ($\boldsymbol{h_t}$), kayma bandı kalınlığı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 7 Kayma şekil değiştirmelerinin kauçuk katkısına göre H2 yüzeyi üzerinde dağılımı: a) *RC* = %0, b) homojen karışım, *RC* = %2 ve c) yüzeye serilmesi, *RC* = %2



Şekil 8 Ortalama kayma şekil değiştirme profilleri



Şekil 9 Kayma bandı kalınlığının değişimi

Şekil 9, kayma bandı kalınlığının arayüzey parametreleriyle olan değişimini sunmaktadır. Kauçuk oranı arttıkça bant kalınlığının azaldığı görülmektedir. Kauçuk ilavesi, daha ince kayma bantlarının oluşmasına yol açmıştır. En düşük kalınlık değerleri H1 yüzeyinin üzerinde gözlenmiş olup $\mathbf{0.47}$ mm ile $\mathbf{0.15}$ mm arasında değişmektedir. En kalın kayma bantları H2 yüzeyinin üzerinde meydana gelmiştir. Homojen karışım olarak kauçuk eklendiğinde, $\boldsymbol{RC = \%0}$ durumunda başlangıçta $\mathbf{6.23}$ mm olarak ölçülen kalınlık, kauçuk oranı $\%\mathbf{5}$'e çıktığında $\mathbf{4.31}$ mm değerine düşmüştür. Şekil 9, kayma bandı kalınlığının kauçupun yüzeye serildiği senaryodaki değişimide sunmaktadır. Kauçuğun doğrudan yüzeye uygulanması, karışım senaryosuna kıyasla kayma bandı kalınlığında çok daha belirgin bir azalmaya neden olmuştur.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kauçuk danelerinin kum–geomalzeme arayüzey kayma davranışına etkileri makro ve mezo ölçekli üzerinden incelenmiştir. Bu doğrultuda, şeffaf kesme kutusunda bir dizi arayüzey kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar; kauçuğun sisteme dahil edilme biçimi (karışım ve yüzey üstü senaryoları), kauçuk oranı ve yüzey pürüzlülüğü dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen ana sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- H1 düz yüzeyi en düşük arayüzey kayma mukavemetini ve genleşmeyi sergilerken, H2 pürüzlü yüzeyi en yüksek değerleri üretmektedir.

- Kauçuğun karıştırılarak eklendiği senaryoda, kauçuk oranı ile kayma mukavemeti parametreleri arasında çan eğrisi şeklinde bir dağılım eğilimi ortaya çıkmaktadır. En yüksek kayma mukavemeti değeri %1 kauçuk oranında ($RC = \%1$) gözlenmektedir. Kauçuğun homojen karıştırıldığı durum, yüzeye serildiği duruma kıyasla daha yüksek mukavemet değerleri üretmektedir.

- Kauçuğun doğrudan yüzeye uygulandığı senaryoda makro ölçek davranış; geomalzeme pürüzlülüğü ve kauçuk oranı etkileri açısından karışım durumuna kıyasla farklı bir gelişim göstermiştir. Pürüzlü H2 yüzeyinde en yüksek kayma mukavemeti %0.5 kauçuk içeriğinde ($RC = \%0.5$) gözlenmiş, kauçuk oranının daha da artmasıyla mukavemet belirgin şekilde düşmüştür. Buna karşın H1 düz yüzeyi, kauçuk katkısıyla birlikte kayma mukavemetinde sürekli bir iyileşme sergilemiştir.

- Mezo ölçek davranış açısından, en düşük kayma bandı kalınlığı H1 düz yüzeyinde meydana gelmektedir. En yüksek bant kalınlığı ise H2 pürüzlü yüzeyinde ortaya çıkmaktadır.

- Yüzeye serilme senaryosu, karışım durumuna kıyasla daha küçük bant kalınlığı üretmektedir.

KAYNAKLAR

Ari, A., Akbulut, S., 2024. Multiscale evaluation of sand-geomaterial interface shear response in terms of material geometry effects. Constr. Build. Mater. 450, 138765. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138765

David Frost, J., Kim, D., Lee, S.-W., 2012. Microscale geomembrane-granular material interactions. KSCE J. Civ. Eng. 16, 79–92. https://doi.org/10.1007/s12205-012-1476-x

DeJong, J.T., Randolph, M.F., White, D.J., 2003. Interface load transfer degradation during cyclic loading: A microscale investigation. Soils Found. https://doi.org/10.3208/sandf.43.4_81

Gao, J., Zhu, G., Wang, J., Yang, Y., Li, Y., 2024. Study on the dynamic characteristics of geogrids combined with rubber particles reinforced with calcareous sand. Acta Geotech. 19, 7031–7047. https://doi.org/10.1007/s11440-024-02368-y

Liu, F., Fu, J., Zhang, X., Ying, M., 2025. Analysis of Macroscopic and Mesoscopic Shear Characteristics of the Interface between a Geogrid and a Rubber–Sand Mixture under Normal Cyclic Loading. J. Mater. Civ. Eng. 37. https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-18372

Madani, N., Hosseinpour, I., Payan, M., Senetakis, K., 2023. Cyclic and Postcyclic Interface Characteristics of Geotextile-Embedded Sand-Rubber Composites. J. Mater. Civ. Eng. 35. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004590

Manohar, D.R., Anbazhagan, P., 2021. Shear strength characteristics of geosynthetic reinforced rubber-sand mixtures. Geotext. Geomembranes 49, 910–920. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.12.015

Martinez, A., Palumbo, S., Todd, B.D., 2019. Bioinspiration for Anisotropic Load Transfer at Soil–Structure Interfaces. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 145. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002138

Moraci, N., Cardile, G., Gioffrè, D., Mandaglio, M.C., Calvarano, L.S., Carbone, L., 2014. Soil Geosynthetic Interaction: Design Parameters from Experimental and Theoretical Analysis. Transp. Infrastruct. Geotechnol. 1, 165–227. https://doi.org/10.1007/s40515-014-0007-2

O'Hara, K.B., Martinez, A., 2020. Monotonic and Cyclic Frictional Resistance Directionality in Snakeskin-Inspired Surfaces and Piles. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 146. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002368

Rui, S., Wang, L., Guo, Z., Cheng, X., Wu, B., 2021. Monotonic behavior of interface shear between carbonate sands and steel. Acta Geotech. 16, 167–187. https://doi.org/10.1007/s11440-020-00987-9

Tanchaisawat, T., Bergado, D.T., Voottipruex, P., Shehzad, K., 2010. Interaction between geogrid reinforcement and tire chip–sand lightweight backfill. Geotext. Geomembranes 28, 119–127. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.07.002

Uesugi, M., Kishida, H., 1986. Influential factors of friction between steel and dry sands. Soils Found. https://doi.org/10.3208/sandf1972.26.2_33