Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

KAZIK PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİNDE YENİ BİR BAKIŞ AÇISI

A NEW APPROACH IN THE EVALUATION OF PILE ROUGHNESS

Umud DAĞLI[1], Bahadır OK[2], Mustafa TOLUN[3], Mehmet Halil ÇALIM[4]

ÖZET

Kazık-zemin arayüzünde gelişen sürtünme direnci, kazıkların eksenel yük taşıma kapasitesini belirleyen temel mekanizmalardan biridir. Bu direnç, yüzey pürüzlülüğünden önemli ölçüde etkilenmektedir. Ancak literatürde yüzey pürüzlülüğü, çoğunlukla ya yüzey geometrisi ya da zemin dane boyutu esas alınarak tanımlanmakta, bu durum arayüz davranışının bütüncül olarak değerlendirilmesini sınırlandırmaktadır. Bu çalışmada, yüzey geometrisi ile zemin dane özelliklerini birlikte dikkate alan boyutsuz bir pürüzlülük parametresi önerilmektedir. Önerilen parametre, mevcut pürüzlülük tanımlarının zeminin ortalama dane çapına göre normalize edilmesine dayanmaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen kesme kutusu deneylerinde, öncelikle gevşek kum zemin ile 3B yazıcı kullanılarak üretilen ve pürüzsüz kazık yüzeyini temsil eden numune arasındaki arayüz sürtünme açısı belirlenmiştir. Ardından, iki farklı pürüzlü kazık geometrisini temsil eden yüzeyler kullanılarak arayüz sürtünme açıları ölçülmüştür. Pürüzlü yüzey geometrileri, piyasada yaygın olarak kullanılan vida kazıkların vida adımı ve yüksekliği esas alınarak modellenmiştir. Deney sonuçları, yüzey pürüzlülüğünün arayüz sürtünme açısını artırdığını göstermektedir. Ayrıca, önerilen boyutsuz pürüzlülük parametresinin farklı zemin ve yüzey koşulları altında arayüz davranışının daha tutarlı ve karşılaştırılabilir biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.
Anahtar Kelimeler: *Kazık pürüzlülüğü, Kesme kutusu deneyi, Arayüz sürtünme açısı, Kum zemin*

ABSTRACT

Frictional resistance developed at the pile–soil interface is one of the primary mechanisms governing the axial load-carrying capacity of piles. This resistance is significantly influenced by surface roughness. However, in literature, surface roughness is generally characterized based on either surface geometry or soil particle size, which limits a comprehensive evaluation of interface behavior. In this study, a dimensionless roughness parameter that simultaneously accounts for surface geometry and soil particle characteristics is proposed. The proposed parameter is based on normalizing existing roughness definitions by the mean particle size of the soil. Within the scope of the study, a series of direct shear tests were conducted. First, the interface friction angle between loose sand and a specimen representing a smooth pile surface produced using a 3D printer was determined. Subsequently, interface friction angles were measured using specimens representing two different rough pile surface geometries. The rough surface geometries were designed based on the thread pitch and height of screw piles commonly used in engineering practice. The experimental results indicate that increasing surface roughness enhances the interface friction angle. Furthermore, the proposed dimensionless roughness parameter provides a more consistent and comparable framework for evaluating interface behavior under different soil and surface conditions.
Keywords: *Pile roughness, Direct shear test, Interface friction angle, Sand soil*

[1] İnş. Yük. Müh., Adana Büyükşehir Belediyesi, umudagli@gmail.com
[2] Doç. Dr., Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, bahadirok@atu.edu.tr (Sorumlu yazar)
[3] Dr. Öğr. Üyesi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, mtolun@atu.edu.tr
[4] Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, mhcalim@ktu.edu.tr

1. GİRİŞ

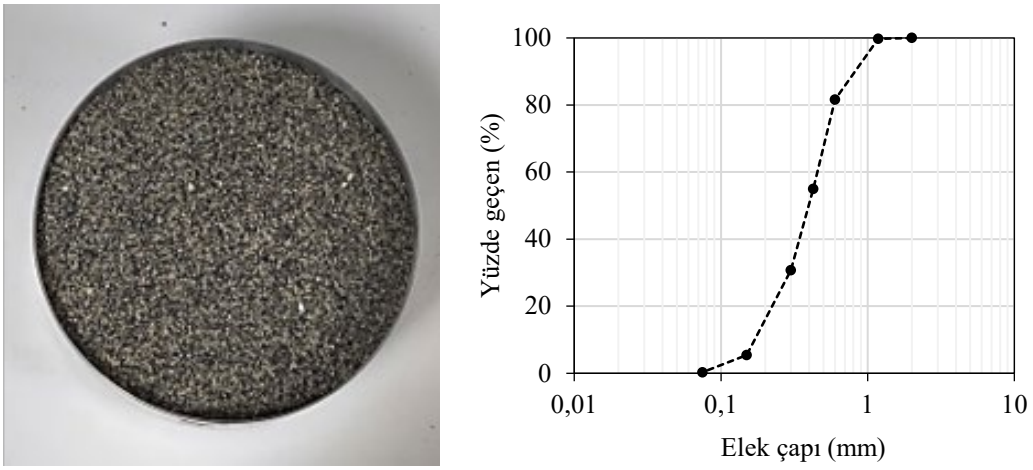
Üst yapı yükleri nedeniyle zeminde oluşan gerilme artışları, özellikle gevşek veya yumuşak zeminlerde taşıma gücü yetersizliği, aşırı oturma, sıvılaşma ve benzeri geoteknik problemlere neden olabilmektedir. Bu tür problemlerin çözümünde geoteknik mühendisleri uzun yıllardır derin temel sistemlerinden biri olan kazıkları yaygın olarak kullanmaktadır (Budhu, 2011). Zemine gömülü bir kazığın çekme kapasitesi, kazık yüzeyi ile çevresindeki zemin arasında gelişen sürtünme direnci ile kazığın kendi ağırlığına bağlıdır (Das vd., 1976; Emirler vd., 2021). Basınç kapasitesi ise uç direnci ile çevre sürtünmesinin toplam etkisi sonucunda oluşmaktadır. Ancak sağlam zemin tabakasının derinde bulunduğu durumlarda kazıkların taşıma kapasitesi büyük ölçüde çevre sürtünmesi tarafından belirlenmektedir (Das, 2021). Bu nedenle çevre sürtünmesi, kazıkların hem çekme hem de basınç kapasitesini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Çevre sürtünmesi; kazık yüzey pürüzlülüğü, zemin türü ve dane şekli gibi faktörlerden doğrudan etkilenmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar da yüzey pürüzlülüğünün çevre sürtünmesi üzerinde belirleyici bir role sahip olduğunu göstermektedir (Kim vd., 2020; Liu vd., 2023).

Kazık yüzey pürüzlülüğünün çevre sürtünmesine etkisi, birçok araştırmacı tarafından kesme kutusu deneylerinden elde edilen kazık-zemin arayüz sürtünme açısındaki (δ) değişimler dikkate alınarak incelenmiştir (Aksoy vd., 2016; Han vd., 2018; Ma vd., 2022). Daha gerçekçi karşılaştırmalar yapabilmek amacıyla araştırmacılar, kazık yüzey pürüzlülüğünü sayısal olarak ifade edebilecek farklı yöntemler önermiştir. Ancak mevcut yöntemler bazı sınırlılıklar içermektedir. Bu yöntemlerin bir kısmı yalnızca maksimum pürüz yüksekliğini zeminin ortalama dane çapına oranlayarak pürüz geometrisinin etkisini yeterince temsil edememektedir (Su vd., 2018). Diğer bir kısmı ise pürüz alanı ve hacmini ayrıntılı olarak dikkate alırken zemin dane boyutunun etkisini göz ardı etmektedir (Liu vd., 2023; Fang vd., 2023). Bu çalışmada, özellikle pürüz alanı ve hacmini dikkate alan mevcut pürüzlülük tanımlarının zeminin ortalama dane çapına göre normalize edilmesi esasına dayanan boyutsuz bir pürüzlülük parametresi önerilmiştir. Önerilen parametrenin kazık-zemin arayüz sürtünme açısı ile ilişkisini değerlendirmek amacıyla kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, pürüzsüz ve iki farklı pürüzlü kazık yüzeyini temsil eden toplam üç farklı yüzey kullanılarak arayüz sürtünme açıları belirlenmiştir. Pürüzlü yüzey geometrileri, uygulamada yaygın olarak kullanılan vida kazıkların vida adımı ve yüksekliği esas alınarak modellenmiş ve 3B yazıcı ile üretilmiştir. Elde edilen deney sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve önerilen boyutsuz pürüzlülük parametresinin arayüz davranışının yorumlanmasındaki etkinliği ortaya konulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Kum Zemin

Çalışmada kullanılmak üzere bir tip kum zemin numunesi temin edilmiştir. Numunenin geoteknik endeks özelliklerinin belirlenmesi amacıyla elek analizi, piknometre ve sıkılık deneyleri gerçekleştirilmiştir (ASTM C127-01; ASTM D854). Kum zemin numunesi ile bu zemine ait gradasyon eğrisi Şekil 1'de gösterilmektedir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre zemin, SP (Kötü Derecelendirilmiş Kum) olarak sınıflandırılmıştır (ASTM D2487-11). Kum zeminin dane birim hacim ağırlığı ise 27 kN/m³ olarak belirlenmiştir (Dağlı, 2026).



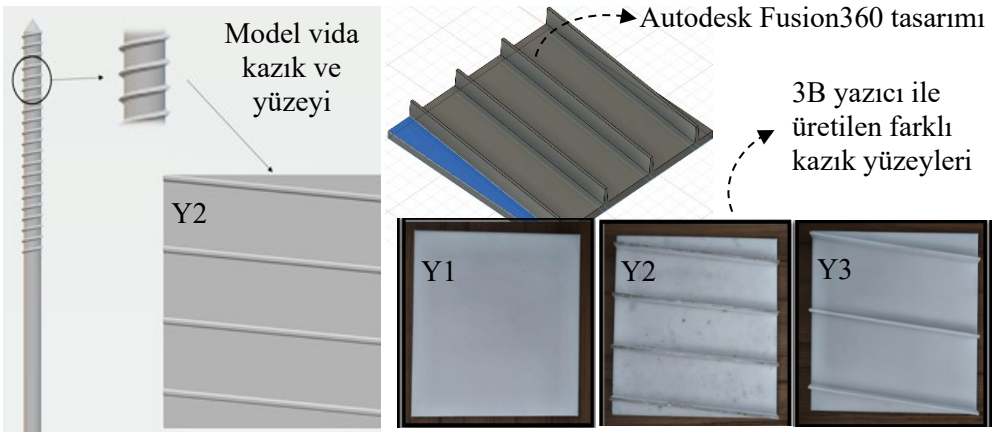
(a) (b)

Şekil 1. a) Deneylerde kullanılan kum zemin numunesi b) Kum zemine ait gradasyon eğrisi

2.2. Model Kazık Yüzeyleri

Çalışmada kullanılmak üzere biri pürüzsüz, ikisi pürüzlü olmak üzere toplam üç farklı model kazık yüzeyi Autodesk Fusion 360 yazılımında tasarlanmış ve 3B yazıcı ile üretilmiştir. Pürüzlü yüzeylerin tasarımında, uygulamada yaygın olarak kullanılan vida kazık geometrileri esas alınmıştır. Bu kapsamda, dış çapı 76 mm, diş yüksekliği 10 mm ve diş aralığı sırasıyla 40 mm ve 60 mm olan iki farklı vida kazık modeli seçilmiştir (Dağlı, 2026). Pürüzsüz yüzey Y1, diş aralığı 40 mm olan vida kazığı temsil eden pürüzlü yüzey Y2 ve diş aralığı 60 mm olan vida kazığı temsil eden pürüzlü yüzey ise Y3 olarak adlandırılmıştır.

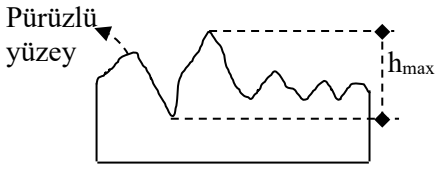
Model yüzeyler, kesme kutusu düzeneğine uygun boyutlarda tasarlanmış ve PETG (Polietilen Tereftalat Glikol) filament kullanılarak üretilmiştir. Üretim işlemi, 0,4 mm nozzle çapına sahip bir 3B yazıcı kullanılarak %100 doluluk oranı, 100 mm/s baskı hızı, 80 °C tabla sıcaklığı ve 245 °C nozzle sıcaklığı koşullarında gerçekleştirilmiştir. Her bir model yüzeyin üretimi yaklaşık 8 saat sürmüştür (Dağlı vd., 2025). Diş aralığı 40 mm olan vida kazık esas alınarak tasarlanan temsili pürüzlü yüzey (Y2) ile çalışmada kullanılan model kazık yüzeyleri Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Model vida kazık yüzeyleri

2.3. Yüzey Pürüzlülüğünün Belirlenmesi

Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesine yönelik literatürde önerilen yaklaşımlar arasında en yaygın ve en basit olanı, maksimum pürüz yüksekliğinin doğrudan pürüzlülük değeri olarak kabul edilmesidir (Li vd., 2021). Bir diğer yaygın yaklaşım ise maksimum pürüz yüksekliğinin zeminin medyan dane çapına (D_{50}) oranlanmasıyla elde edilen boyutsuz pürüzlülük parametresidir (Su vd., 2018; Tolun vd., 2023).



$$R_{max} = h_{max} \text{ veya } R_n = \frac{h_{max}}{D_{50}}$$

Şekil 3. Maksimum pürüz yüksekliğini dikkate alan pürüzlülük hesapları

Bahsi geçen iki yaklaşım da yalnızca maksimum pürüz yüksekliğini esas aldığından, yüzey geometrisinin tamamını temsil etmekte yetersiz kalabilmektedir (Şekil 3). Bu nedenle, pürüzlerin tüm geometrik özelliklerini dikkate alabilmek amacıyla pürüz boşluk hacmini esas alan farklı bir yöntem önerilmiştir (Liu vd., 2023). Bu yöntemde, pürüzler arasındaki boşluk hacimleri ayrı ayrı hesaplanarak pürüzlerin bulunduğu yüzeyin taban alanına bölünmektedir. Daha sonra Fang vd. (2023), pürüz geometrisini daha kapsamlı şekilde temsil edebilmek amacıyla alan ve hacim katsayılarını birlikte dikkate alan geliştirilmiş bir pürüzlülük yaklaşımı önermiştir. Denklem 1'de alan katsayısı (n) ve hacim katsayısının (m) hesaplanmasına ilişkin ifadeler, Denklem 2'de ise pürüzlülük parametresinin (r) hesaplanması verilmiştir.

$$m = \frac{S_a}{A_a}, \quad n = \frac{V_{boşluk}}{A_a} = \frac{V - V_{pürüz}}{A_a} \tag{1}$$

$$r = n * \ln(m) \tag{2}$$

Bu yöntemde alan katsayısı, pürüz yüzey alanının pürüz taban alanına oranı olarak; hacim katsayısı ise boşluk hacminin pürüz yüzey alanına oranı olarak hesaplanmaktadır. Her ne kadar bu yaklaşım, yalnızca maksimum pürüz yüksekliğini esas alan yöntemlere kıyasla yüzey geometrisini daha ayrıntılı temsil eden bir pürüzlülük parametresi sunsa da zeminin dane çapını dikkate almamaktadır. Bu çalışmada, Denklem 2 kullanılarak hesaplanan pürüzlülük parametresi (r), zeminin medyan dane çapına (D_{50}) bölünerek modifiye edilmiş boyutsuz bir pürüzlülük parametresi (r_m) elde edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan tüm değerlendirmeler bu yeni tanımlanan modifiye pürüzlülük parametresi (r_m) esas alınarak gerçekleştirilmiştir (Denklem 3).

$$r_m = \frac{\mathrm{r}}{D_{50}} \tag{3}$$

2.4. Kesme Kutusu Deneyleri

Çalışma kapsamında, 150 mm ×150 mm taban alanına sahip ve toplam 120 mm yüksekliğinde (60 mm yüksekliğinde alt ve üst olmak üzere iki parçadan oluşan) orta

ölçekli bir kesme kutusu kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Çalışmada tasarlanan pürüzlü ve pürüzsüz model kazık yüzeyleri kesme kutusunun alt parçasına yerleştirilmiş, üst parçaya ise kum zemin doldurularak kazık-zemin arayüz sürtünme açıları belirlenmiştir (ASTM D3080). Deneylerde kum zemin, %30 rölatif sıkılık (D_r) sağlayacak şekilde hazırlanmıştır (Dağlı ve Ok, 2026). Her bir deney, 21.8, 43.6 ve 87.2 kPa olmak üzere üç farklı normal gerilme (σ) altında ve 1 mm/dk kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında kayma kuvveti, düşey deplasman ve yatay deplasman değerleri sürekli olarak bilgisayar ortamında kaydedilmiş, elde edilen veriler kullanılarak numunelere ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri oluşturulmuştur (Dağlı, 2026).



Şekil 4. Kesme Kutusu Deney Sistemi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Parametrelerinin Karşılaştırılması

Çalışmada kullanılan model kazık yüzeylerine ait farklı pürüzlülük tanımlarına göre hesaplanan pürüzlülük değerleri Tablo 1'de sunulmuştur. Maksimum pürüz yüksekliği (R_{max}), maksimum pürüz yüksekliğinin zeminin medyan dane çapına göre normalize edilmesiyle elde edilen boyutsuz pürüzlülük parametresi (R_n) ve alan ile hacim katsayıları kullanılarak hesaplanan pürüzlülük parametresi (r) literatürde yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardır. Bu çalışmada ise alan ve hacim katsayıları kullanılarak hesaplanan pürüzlülük parametresi (r), zeminin medyan dane çapına (D_{50}) göre normalize edilerek yeni bir boyutsuz pürüzlülük parametresi (r_m) önerilmiş ve elde edilen değerler mevcut yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan kumun medyan (ortalama) dane çapı (D_{50}) 0.40 mm olarak belirlenmiştir. Pürüzlü yüzeylere ait boşluk hacimleri, kesme kutusuna uygun olarak tasarlanan model yüzeylerin oluşturulduğu CAD yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Pürüz taban alanı ise kesme kutusunun taban alanına eşit kabul edilmiştir. Model yüzeylerde temsil edilen vida kazıkların diş aralıkları sırasıyla 40 mm ve 60 mm olup, her iki modelde de diş yüksekliği sabit 10 mm'dir. Bu nedenle, diş aralıkları farklı olmasına rağmen maksimum pürüz yüksekliği (R_{max}) ve buna bağlı olarak hesaplanan (R_n) değerleri her iki yüzey için aynı olmaktadır. Başka bir ifadeyle, bu iki yaklaşım yalnızca maksimum pürüz yüksekliğini esas aldığından, aynı pürüz yüksekliğine sahip ancak farklı pürüz geometrilerine sahip yüzeyleri birbirinden ayırt edememektedir. Öte yandan, alan ve hacim katsayılarını esas alan (r) parametresi bu sınırlılığı önemli ölçüde azaltmakta ve yüzey

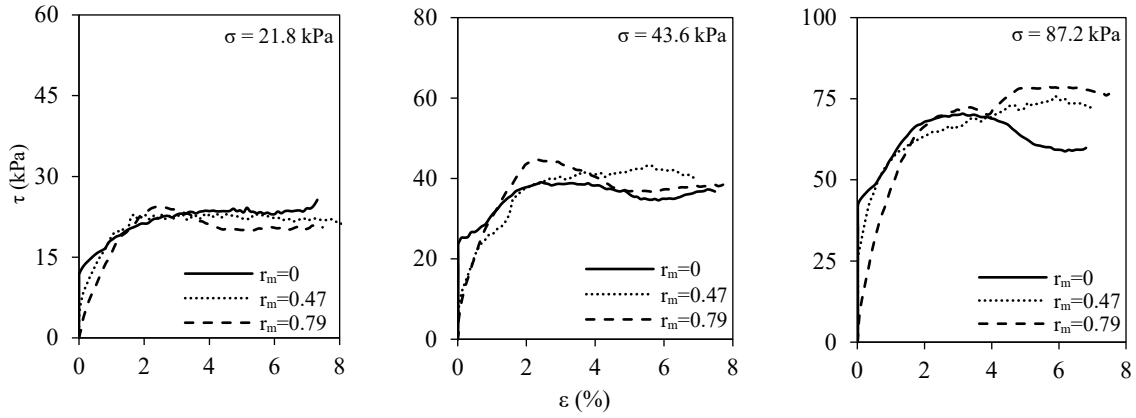
geometrisini daha ayrıntılı şekilde temsil edebilmektedir. Bununla birlikte, bu yaklaşım da zemin dane boyutunun etkisini dikkate almamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada (r) parametresi zeminin medyan dane çapına (D_{50}) göre normalize edilerek yeni bir boyutsuz pürüzlülük parametresi (r_m) önerilmiştir. Önerilen parametrenin, hem yüzey geometrisini hem de zemin dane boyutunu birlikte dikkate alması sayesinde kazık-zemin arayüz davranışının değerlendirilmesinde daha kapsamlı bir pürüzlülük tanımı sunması beklenmektedir.

Tablo 1. Yüzey pürüzlülük değerleri

Yüzey pürüzlülük tipleri	Pürüzlülük hesap yöntemleri			
	$R_{max} = h_{max}$	$R_n = \frac{h_{max}}{D_{50}}$	$r = n * \ln(m)$	$r_m = \frac{r}{D_{50}}$
Y1	0	0	0	0
Y2	10 mm	25	0.317 mm	0.79
Y3	10 mm	25	0.188 mm	0.47

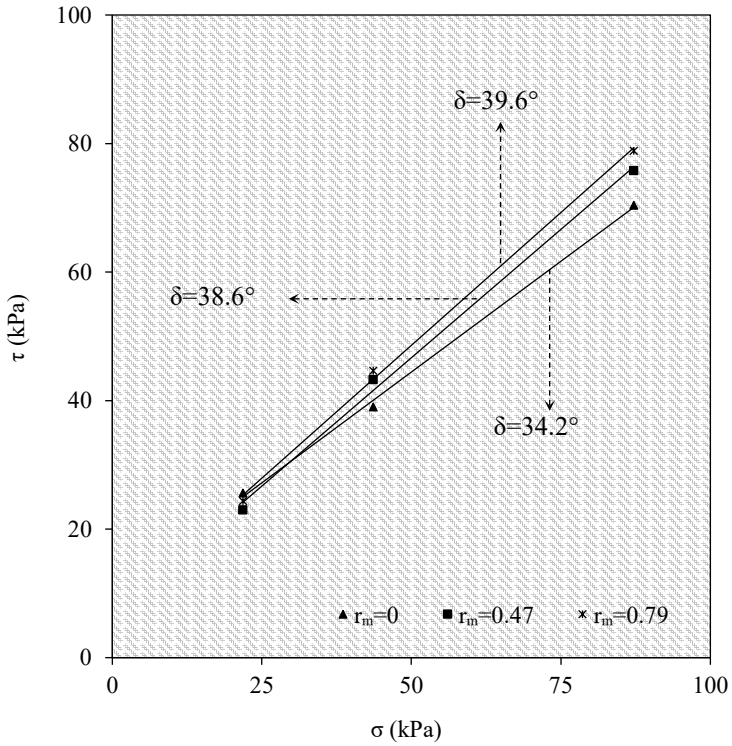
3.2. Arayüz Sürtünme Açılarının Değerlendirilmesi

Pürüzlü ve pürüzsüz yüzeyler üzerinde gerçekleştirilen kesme kutusu deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi–yüzde birim deformasyon eğrileri Şekil 5'te sunulmuştur. Düşük normal gerilme düzeyinde (21.8 kPa) tüm yüzeyler için maksimum kayma gerilmesi değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ancak normal gerilme düzeyi arttıkça, yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak maksimum kayma gerilmesi değerlerinde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Bu davranışın, artan normal gerilme altında pürüzlü yüzeylerin neden olduğu dilatasyonun daha belirgin hâle gelmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ayrıca pürüzlülük parametresinin artmasıyla birlikte bu etkinin daha da belirginleştiği gözlenmiştir. Kayma gerilmesi–yüzde birim deformasyon eğrileri incelendiğinde, 21.8 kPa normal gerilme altında r_m=0 (pürüzsüz yüzey) ile r_m=0.47 yüzeylerinin benzer davranış sergilediği görülmektedir. Buna karşılık, r_m=0.79 olan yüzeyde maksimum kayma gerilmesine ulaşıldıktan sonra kayma gerilmesinde bir azalma meydana gelmiştir. Bu davranışın, artan yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak gelişen dilatasyon etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Normal gerilme düzeyi arttıkça bu eğilim daha belirgin hâle gelmiş, 87.2 kPa normal gerilme altında ise pürüzlü yüzeylerde oluşan dilatasyon davranışının daha yüksek yüzde birim deformasyon seviyelerinde ortaya çıktığı gözlenmiştir.



Şekil 5. Kesme kutusu deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi–birim deformasyon eğrileri

Deneyler sonucunda elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerleri kullanılarak oluşturulan kayma zarfları ve bu zarflardan hesaplanan arayüz sürtünme açıları Şekil 6'da sunulmuştur. Pürüzsüz yüzey için kum zemin arayüz sürtünme açısı 34.2° olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, yüzey pürüzlülüğü (r_m) 0.47'ye yükseltildiğinde arayüz sürtünme açısı yaklaşık %13 artarak 38.6°'ye ulaşmıştır. Pürüzlülük değerinin 0.79'a çıkarılmasıyla ise arayüz sürtünme açısı yaklaşık %16 artış göstererek 39.6° olarak belirlenmiştir. Arayüz sürtünme açısındaki bu artışın, özellikle yüksek normal gerilme seviyelerinde pürüzlü yüzeylerin neden olduğu dilatasyon davranışının daha belirgin hâle gelmesi sonucunda maksimum kayma gerilmesinin artmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Diğer taraftan, literatürde yaygın olarak kullanılan R_{max} ve R_n yöntemlerine göre aynı pürüzlülük değerine sahip olarak değerlendirilen iki farklı yüzey için farklı arayüz sürtünme açıları elde edilmiştir. Bu durum, söz konusu yöntemlerin yalnızca maksimum pürüz yüksekliğini esas almaları nedeniyle yüzey geometrisindeki farklılıkları yeterince temsil edemediğini göstermektedir. Buna karşılık, bu çalışmada önerilen boyutsuz pürüzlülük parametresinin artmasıyla arayüz sürtünme açısında da 1°'lik bir artış gözlenmiştir. Bu sonuç, önerilen parametrenin yüzey geometrisinin arayüz davranışı üzerindeki etkisini daha duyarlı şekilde temsil edebildiğini göstermektedir.



Şekil 6. Farklı yüzey pürüzlülükleri için elde edilen kayma zarfları ve arayüz sürtünme açıları

4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında gevşek kum zemin ile pürüzsüz ve iki farklı pürüzlülüğe sahip model kazık yüzeyleri arasındaki arayüz sürtünme açıları ile kayma gerilmesi–yüzde birim deformasyon davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde yaygın olarak kullanılan maksimum pürüz yüksekliği (R_{max}) ve maksimum pürüz yüksekliğinin zeminin medyan dane çapına oranına (R_n) dayalı pürüzlülük tanımlarının, aynı pürüz yüksekliğine sahip ancak farklı yüzey geometrilerine sahip yüzeyleri ayırt etmede yeterli duyarlılığı

sağlayamadığını göstermiştir. Bu sınırlılığı gidermek amacıyla, alan ve hacim katsayılarına dayalı pürüzlülük parametresinin zeminin medyan dane çapına (D_{50}) göre normalize edilmesi esasına dayanan yeni bir boyutsuz pürüzlülük parametresi (r_m) önerilmiştir. Deney sonuçlarına göre en düşük arayüz sürtünme açısı pürüzsüz yüzeyde elde edilmiş, önerilen boyutsuz pürüzlülük parametresinin artmasıyla birlikte özellikle yüksek normal gerilme seviyelerinde maksimum kayma gerilmesi ve buna bağlı olarak arayüz sürtünme açısının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, önerilen boyutsuz pürüzlülük parametresinin hem yüzey geometrisini hem de zemin dane boyutunu birlikte dikkate alması sayesinde mevcut pürüzlülük tanımlarına kıyasla kazık-zemin arayüz davranışını daha temsil edici biçimde değerlendirme olanağı sunduğu ortaya konulmuştur.

Mevcut çalışmada değerlendirmeler, tek bir zemin tipi ve iki farklı pürüzlü yüzey ile sınırlı tutulmuştur. Farklı zemin tiplerini ve daha geniş bir pürüzlü yüzey yelpazesini içeren gelecekteki çalışmaların, konunun daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Aksoy, H.S., Gor, M. and Inal, E. (2016), "A New Design Chart for Estimating Friction Angle between Soil and Pile Materials", Geomechanics and Engineering, Vol 10, No 3, 315-324.

ASTM (2001), "ASTM C127-01: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate", ASTM International.

ASTM (2010), "ASTM D854-10: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", ASTM International.

ASTM (2011), "ASTM D2487-11: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)", ASTM International.

ASTM (2011), "ASTM D3080-11: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions", ASTM International.

Budhu, M. (2011), "Soil Mechanics and Foundations", 3rd Edition, John Wiley&Sons, Inc.

Dağlı, U. (2026), "Farklı Vida Kazıklarda Kazık-Zemin Arayüz Sürtünmesinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Dağlı, U., Ok, B. (2026), "Vida Kazık İle Kohezyonsuz Zemin Arayüz Sürtünme Açısının Değerlendirilmesi", Hagia Sophia 10th International Conference on Multidisciplinary Scientific Studies, Institute of Economic Development and Social Researches (İKSAD), İstanbul, 514-521.

Dağlı, U., Ok, B., ve Döner, S. (2025), "Farklı Vida Kazıklar İçin Kazık Pürüzlülüğünün Araştırılması", İnşaat Mühendisliği Alanında Araştırmalar ve Değerlendırmeler, Bölüm 3, 35-44, Gece Kitaplığı.

Das, B.M., Seeley, G.R. and Smith, J.E. (1976), "Uplift Capacity of Pile Groups in Sand", Journal of Geotechnical Engineering, Vol 102, No 3, 282-286.

Das, B.M. (2021), "Fundamentals of Geotechnical Engineering", 3rd Edition, Chris Carson.

Emirler, B., Tolun, M. and Yıldız, A. (2021), "An Experimental Study of Rough Single Pile and Pile Group under Uplift Loading in Sand", European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol 25, No 3, 557-574.

Fang, R., Wang, B., Pan, J., Liu, J., Wang, Z. and Wang, Q. (2023), "Effect of Concrete Surface Roughness on Shear Strength of Frozen Soil–Concrete Interface Based on 3D Printing Technology", Construction and Building Materials, Vol 366, 130158.

Han, F., Ganju, E., Salgado, R. and Prezzi, M. (2018), "Effects of Interface Roughness, Particle Geometry, and Gradation on the Sand–Steel Interface Friction Angle", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 144, No 12, 04018096.

Kim, G., Ham, K. and Lee, J. (2020), "Effects of Surface Roughness on Lateral Load–Carrying Capacities of Piles Embedded in Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 146, No 8, 04020064.

Li, M., Li, Y. ve Islam, M.R. (2021), "Effects of Water Content and Interface Roughness on the Shear Strength of Silt–Cement Mortar Interface", Soils and Foundations, Vol 61, No 6, 1615-1629.

Liu, S.W., Zhang, Q.Q., Ma, B., Li, Z.B., Yin, W.P. and Lou, Q.-G. (2023), "Study on Surface Roughness Effect on Shear Behavior of Concrete-Soil Interface", Engineering Failure Analysis, Vol 145, Article 107050.

Ma, J., Luo, L., Mu, T., Guo, H. and Tang, Y. (2022), "Experimental Study on Characteristics of Pile-Soil Interaction in Screw Piles", Buildings, Vol 12, No 12.

Su, L.J., Zhou, W.H., Chen, W.B. and Jie, X. (2018), "Effects of Relative Roughness and Mean Particle Size on the Shear Strength of Sand-Steel Interface", Measurement, Vol 122, 339-346.

Tolun, M., Emirler, B., Ertugrul, O.L., and Yildiz, A. (2023), "Effect of Surface Roughness Characteristics on the Uplift Capacity of Piles: A Physical Modelling Study", Marine Georesources & Geotechnology, 41(8), 935–947.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
Y1	Pürüzsüz model yüzey	D_r	Rölatif sıkılık
Y2	40 mm diş aralığına sahip model yüzey	D_{50}	Zeminin medyan dane çapı
Y3	60 mm diş aralığına sahip model yüzey	$V_{boşluk}$	Boşluk hacmi
r	Alan ve hacime dayalı pürüzlülük parametresi	$V_{pürüz}$	Pürüz hacmi
r_m	Boyutsuz pürüzlülük parametresi	V	Toplam hacim
h_{max}	Maksimum pürüz yüksekliği	S_a	Pürüz yüzey alanı
R_{max}	Maksimum pürüz yüksekliği	A_a	Yüzey taban alanı
R_n	Normalize edilmiş pürüzlülük parametresi	δ	Kazık-zemin arayüz sürtünme açısı
n	Alan katsayısı	σ	Normal gerilme
m	Hacim katsayısı	τ	Kayma gerilmesi