4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

SIVILAŞABİLİR SİLT NUMUNEDE TABAKALANMA DURUMUNUN BOŞLUK SUYU BASINCINA ETKİSİ

Rüveyda EYÜPLER[1], Aşkın ÖZOCAK[2], Ertan BOL[2], Sedat SERT[2], Eylem ARSLAN[3]

ÖZET

Zeminlerin mühendislik davranışlarının değerlendirilebilmesi için kayma direnci parametreleri olan kohezyon ve kayma direnci açısının belirlenmesi önem taşımaktadır. Zemin davranışı, yüklemenin drenajlı veya drenajsız koşullarda gerçekleşmesine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Kil ve silt gibi ince daneli zeminlerin suya doygun olduğu durumlarda ani yükleme ve drenajsız koşullarda oluşan aşırı boşluk suyu basıncı, efektif gerilmeyi düşürerek dayanım ve rijitlik kaybına neden olabilmektedir. Laboratuvar ortamında kayma direnci parametreleri, üç eksenli hücre kesme deneyleri ile toplam gerilmeler ve efektif gerilmeler cinsinden değerlendirilebilmektedir. Zeminler doğada çoğunlukla katmanlı yapıdadır. Bu sebeple çok tabakalı zeminlerde boşluk suyu basıncının gelişimi ve dağılımı, tek tabakalı zeminlere kıyasla değişebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, Adapazarı bölgesinden alınan kil ve silt numunelerinin hem tek hem üç tabakalı durumda statik yükleme altında aşırı boşluk suyu basıncının gelişimi incelenmiştir. Laboratuvarda her biri için üçer adet hazırlanan kil, silt, silt-kil-silt numuneleri konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyine tabi tutulmuştur. Deneyde kesme esnasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncındaki değişim numunenin altından ve üst başlığından ölçülmüştür. Deneyler farklı hücre basınçları altında tekrarlanmıştır. Deneyler sonucunda, zemin türünün ve tabaka konumunun drenajsız yükleme altında boşluk suyu basıncı üzerinde belirleyici etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak kayma direnci parametrelerinin zeminin türüne, uygulanan çevre basıncına ve tabaka konumuna bağlı değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Boşluk suyu basıncı, efektif gerilme, kayma direnci, tabakalı zeminler, üç eksenli hücre kesme deneyi.*

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Sakarya Üniversitesi, ruveyda.eyupler2@ogr.sakarya.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Profesör Doktor, Sakarya Üniversitesi, aozocak@sakarya.edu.tr, ebol@sakarya.edu.tr, sert@sakarya.edu.tr
[3] Araştırma Görevlisi, Sakarya Üniversitesi, eylemarslan@sakarya.edu.tr

ABSTRACT

The determination of shear strength parameters-namely cohesion and the internal friction angle-is essential for evaluating the engineering behavior of soils. Soil behavior varies depending on whether loading occurs under drained or undrained conditions. In saturated fine-grained soils such as clay and silt, excess pore water pressure generated under rapid loading and undrained conditions can reduce effective stress, leading to a loss of strength and stiffness. In laboratory conditions, shear strength parameters can be evaluated in terms of total and effective stresses using triaxial compression tests. Soils in nature generally exhibit a layered structure. Therefore, in multilayered soils, the development and distribution of pore water pressure may differ from those in single-layer soils. Within the scope of this study, the development of excess pore water pressure under static loading conditions was investigated for clay and silt samples obtained from the Adapazarı region, in both single-layer and three-layer configurations. In the laboratory, three specimens each of clay, silt, and a silt-clay-silt combination were prepared and subjected to consolidated-undrained triaxial compression tests. During the tests, changes in excess pore water pressure generated during shearing were measured from both the bottom and top caps of the specimens. The experiments were repeated under different confining pressures. The results indicated that soil type and layer configuration have a significant influence on pore water pressure behavior under undrained loading. Consequently, it was determined that shear strength parameters vary depending on soil type, applied confining pressure, and layer arrangement.

Keywords:*Pore water pressure, effective stress, shear strength, layered soils, triaxial shear test.*

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir tasarımlar gerçekleştirilebilmesi, zeminlerin mühendislik özelliklerinin doğru şekilde belirlenmesine bağlıdır. Zeminlerin yük etkisi altında sergilediği davranışın doğru yorumlanması; taşıma gücü, oturma miktarı, deformasyon özellikleri ve şev stabilitesi gibi birçok mühendislik probleminin çözümünde temel gerekliliktir (Mitchell ve Soga, 2005).

Özellikle suya doygun ince daneli zeminlerde yükleme esnasında meydana gelen boşluk suyu basıncı değişimleri, zeminin mekanik davranışını doğrudan etkileyen önemli parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir. Drenajsız yükleme koşullarında dış yüklerin önemli bir bölümü başlangıçta boşluk suyuna aktarılmakta, bunun sonucunda aşırı boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. Oluşan boşluk suyu basıncı, daneler arasındaki efektif gerilmeyi azaltmakta ve buna bağlı olarak zeminin kayma dayanımında belirgin azalmalar meydana gelmektedir.

Efektif gerilmenin azalması, özellikle deprem yükleri ve kısa süreli yüklemeler sırasında ani dayanım kayıplarına ve stabilite problemlerine neden olabilmektedir (Terzaghi, 1943; Skempton, 1954). Bu nedenle drenajsız koşullarda boşluk suyu basıncı gelişiminin ve kayma direnci parametrelerinin doğru şekilde belirlenmesi, geoteknik tasarımın güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Boşluk suyu basıncı ile efektif gerilme arasındaki ilişkinin açıklanması, zemin mekaniğinin gelişiminde önemli bir dönüm noktası olmuştur.

Terzaghi'nin efektif gerilme prensibinin ortaya konulmasının ardından, doygun zeminlerin dayanım ve deformasyon davranışlarının büyük ölçüde boşluk suyu basıncı değişimlerinden etkilendiği anlaşılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen üç eksenli hücre kesme deneyleri ve gerilme izi analizleri, drenajsız davranışın belirlenmesinde temel araştırma yöntemleri

arasında yer almıştır (Wood, 1990). Bununla birlikte, doğal zeminlerin çoğu homojen özellik göstermemekte; farklı mühendislik özelliklerine sahip tabakaların oluşturduğu heterojen yapılar halinde bulunmaktadır. Bu durum, araştırmaların son yıllarda tabakalı zemin sistemlerinin davranışına yönelmesine neden olmuştur (Duncan ve ark., 2014).

Katmanlı zeminlerde farklı sıkışabilirlik, geçirgenlik ve rijitlik özelliklerine sahip tabakaların birlikte bulunması, drenajsız yükleme sırasında boşluk suyu basıncının homojen zeminlerden farklı biçimde gelişmesine neden olmaktadır. Tabakaların diziliş sırası ve konumu yalnızca boşluk suyu basıncı dağılımını değil, aynı zamanda gerilme aktarımını ve deformasyon mekanizmasını da önemli ölçüde etkilemektedir. Deneysel araştırmalar, özellikle geçirimliliği düşük tabakaların varlığında boşluk suyu basıncının tabakalar arasında farklı büyüklüklerde oluşabildiğini ve bunun efektif gerilme dağılımında önemli değişikliklere yol açtığını göstermektedir (Schiffman ve Stein, 1970).

Alüvyal alanlar, delta ortamları ve mühendislik dolguları gibi heterojen zemin koşullarında tabakalı yapının drenajsız davranış üzerindeki etkisinin belirlenmesi uygulama açısından büyük önem taşımaktadır. Farklı zemin türlerinin üst üste bulunduğu sistemlerde kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncı her tabakada aynı düzeyde gelişmemekte, bunun sonucunda tabakalar arasında farklı gerilme ve deformasyon davranışları ortaya çıkmaktadır. Buna karşın literatürde, aynı zemin malzemelerinin yalnızca tabaka yerleşim sırasının değiştirilmesiyle boşluk suyu basıncı gelişiminin nasıl etkilendiğini deneysel olarak karşılaştıran çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Özellikle üst ve alt tabakalardaki zemin türünün değiştirilmesinin drenajsız davranış üzerindeki etkisinin sistematik olarak değerlendirilmesi, geoteknik mühendisliği açısından araştırılması gereken önemli konular arasında yer almaktadır.

Özener ve ark. (2009), tabakalı kum zeminlerde gerçekleştirdikleri sarsma tablası deneylerinde düşük geçirgenlikli ara tabakaların ve gevşek-sıkı tabaka düzeninin boşluk suyu basıncı oluşumu ile sıvılaşma davranışı üzerinde belirleyici etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde Ayoubi ve Pak (2017), deprem etkisi altındaki iki tabakalı zeminlerde sığ temellerin davranışını sayısal yöntemlerle inceleyerek rijit veya sıkı tabakaların oturmaları homojen sıvılaşabilir zeminlere göre önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Ayrıca statik yükleme altında gerçekleştirilen laboratuvar çalışmaları da tabaka diziliminin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile boşluk suyu basıncı gelişimini doğrudan etkilediğini göstermektedir (Zhifu ve ark., 2023).

Bu çalışma kapsamında, Adapazarı bölgesinden alınan kil ve silt zeminlerin tek tabakalı ve üç tabakalı sistemlerde drenajsız davranışları deneysel olarak araştırılmıştır. Laboratuvar ortamında bulamaç yöntemi kullanılarak hazırlanan tek tabakalı kil ve silt numuneleri ile üç tabakalı silt-kil-silt numuneleri üzerinde konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli hücre kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Kesme işlemi sırasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncı, numune üstünden ve altından eş zamanlı olarak ölçülmüş; deneyler farklı çevre basınçları altında tekrarlanarak konsolidasyon gerilmesinin etkisi değerlendirilmiştir. Böylece tabaka türü ve tabaka konumunun drenajsız yükleme altındaki boşluk suyu basıncı gelişimi ile kayma direnci parametreleri üzerindeki etkilerinin deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır.

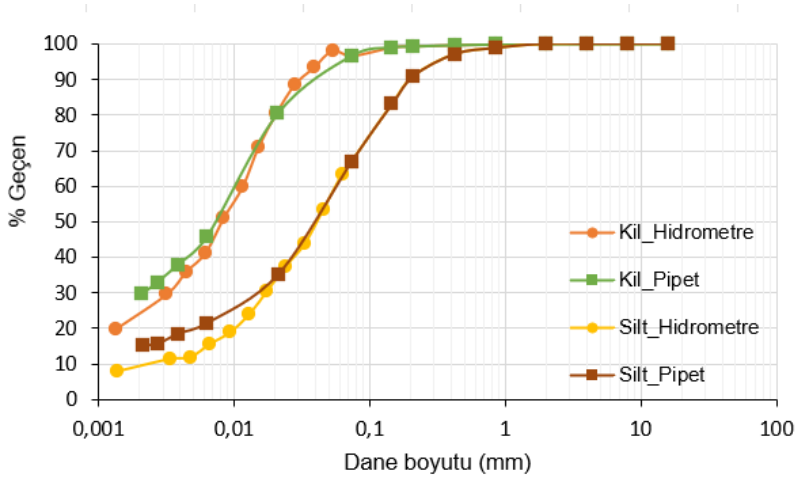
2. MALZEMELER VE METOT

2.1. Malzemeler

Bu çalışmada, Adapazarı bölgesinden temin edilen doğal kil ve daha önceki çalışmalarda sıvılaşabilir olduğu gösterilen Adapazarı silti kullanılmıştır (Önalp ve ark., 2024). Numunelerin mühendislik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla öncelikle kapsamlı fiziksel zemin deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda likit limit hem Casagrande hem de koni penetrasyon deneyi ile ölçülmüş; plastik limit, özgül ağırlık ve dane boyu dağılımı deneyleri yapılmıştır. Dane boyu dağılımı, ince danaler için hidrometre ve pipet yöntemleri, iri daneler için ise elek analizi kullanılarak belirlenmiştir. Tüm fiziksel deneyler Türk Standardı TS 1900-1'e uygun olarak yürütülmüş, deney sonuçlarına bağlı olarak zeminlerin sınıflandırılması TS 1500 standardına göre yapılmıştır. Elde edilen fiziksel özellikler ve zemin sınıfları Tablo 1'de sunulmuştur. Hidrometre ve pipet deneylerinden elde edilen dane dağılım eğrileri ise Şekil 1'de verildiği gibidir. Sonuçlara göre kil numunesi CI (orta plastisiteli kil), silt numunesi ise ML (düşük plastisiteli silt) zemin sınıfında yer almakta olup, plastisite, ince dane oranı ve mühendislik davranışı bakımından birbirinden belirgin şekilde farklı özellikler sergilemektedir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan zeminler ve özellikleri

Özellik	Adapazarı Kili	Adapazarı silti
Likit Limit, Casagrande (%)	45	29
Likit Limit, Koni (%)	44	32
Plastik Limit (%)	25	NP
Plastisite İndisi (%)	20	NP
Özgül Ağırlık	2.668	2.657
İnce Dane Oranı (%)	97	67
Kum Oranı (%)	3	33
Kil Oranı, hidrometre (%)	24	9
Kil Oranı, pipet (%)	30	15
Zemin Sınıfı (TS1500, 2000)	CI	ML



Şekil 1. Hidrometre ve pipet deneylerinden elde edilen dane boyutu dağılımları

2.2. Metot

Bu çalışmada zemin numuneleri hem tek tabakalı hem de üç tabakalı olacak şekilde hazırlanarak konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli hücre kesme deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışmada üçü tek tabakalı, diğer üçü üç tabakalı olmak üzere toplamda 6 adet numune değerlendirilmiştir. Kullanılan numuneler çapları 5 cm, yükseklikleri 10 cm olarak hazırlanmıştır. Üç tabakalı numunelerde tabaka yüksekliklerinin üst-orta ve alt için eşit olmasına dikkat edilmiştir. Deneyler sonucunda numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkileri belirlenmiş, kesme süreci boyunca numunenin üst ve alt kısımlarında gelişen aşırı boşluk suyu basınçları eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Böylece tabaka düzeninin drenajsız davranış ve boşluk suyu basıncı gelişimi üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

CU deneyleri için numuneler bulamaç yöntemi ile laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Bu yöntemde zeminler, doğal çökelme koşullarını temsil edecek şekilde su ile karıştırılarak homojen bir hale getirilmiştir. Numuneler likit limit değerinin yaklaşık 1.5 katı su muhtevasında hazırlanmış ve karışım içerisindeki hava kabarcıklarının uzaklaştırılması amacıyla desikatörde havası alınmıştır. Hava içermeyen bu bulamaç, pleksiglas ön konsolidasyon hücresine bir huni yardımıyla dökülerek boşluksuz ve homojen yerleşim sağlanmıştır. Numune yerleştirildikten sonra, konsolidasyonun gerçekleşmesine olanak tanıyan bu düzenek içerisinde 100 kPa düşey gerilme altında ön konsolidasyona tabi tutulmuştur.

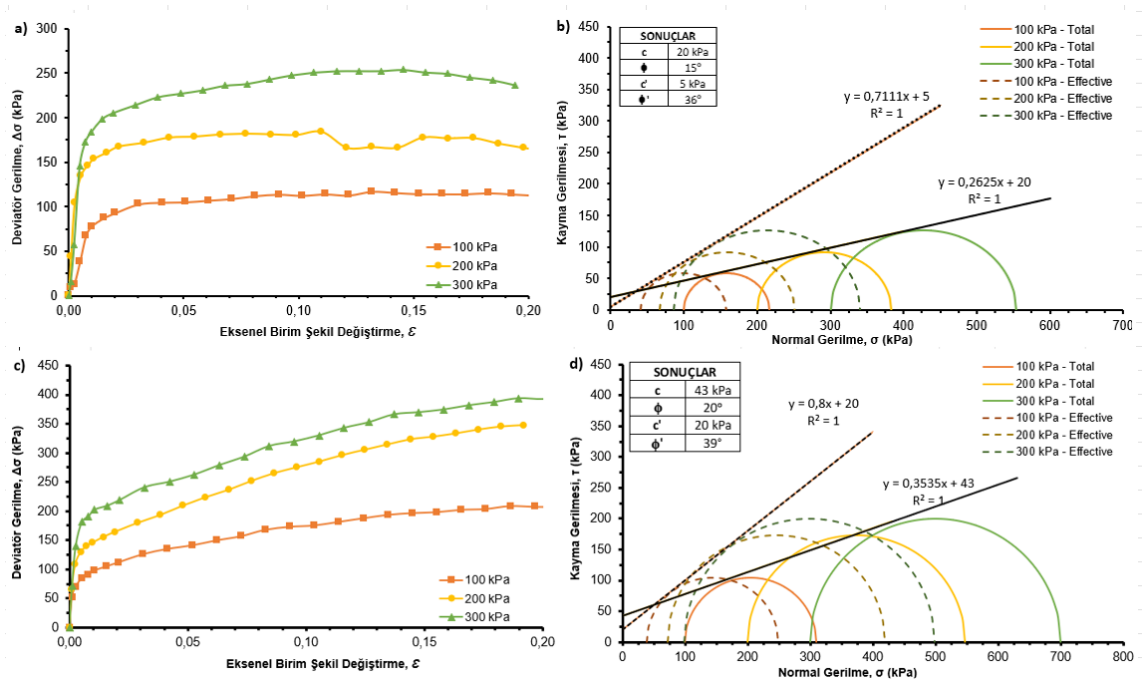
Üç tabakalı zemin numunelerinde ise aynı işlem tabaka tabaka uygulanmıştır. İlk tabaka yerleştirilip ön konsolidasyon süreci başlatılıp bitirildikten sonra ikinci ve üçüncü tabaka da aynı prosedür izlenerek oluşturulmuş, daha sonra tüm sistem birlikte konsolide edilmiştir. Bu yöntem, ince daneli zeminlerin su ortamında çökelmesiyle oluşan doğal flüvyal (akarsu kaynaklı) çökelme koşullarını temsil etmeyi amaçlamaktadır.

Ön konsolidasyonu tamamlanan tek tabakalı ve üç tabakalı zemin numuneleri daha sonra üç eksenli hücreye alınarak konsolidasyonlu drenajsız CU kesme deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler, farklı efektif gerilme seviyelerinde zemin davranışının belirlenebilmesi amacıyla 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa hücre basınçları altında gerçekleştirilmiştir. Her deneyde numuneler öncelikle ilgili hücre basıncı altında konsolide edilmiş, ardından drenaj kapatılarak drenajsız kesme aşamasına geçilmiştir. Kesme aşaması sabit deformasyon kontrollü olarak yürütülmüş ve eksenel yükleme hızı 0.2 mm/dk olarak uygulanmıştır. Deney süresince eksenel yük, deformasyon ve gerilme-şekil değiştirme ilişkileri sürekli olarak kaydedilmiştir. Bununla birlikte drenajsız yükleme sırasında gelişen aşırı boşluk suyu basınçlarının numune boyunca dağılımını belirleyebilmek amacıyla boşluk suyu basınçları numunenin hem altından hem de üstünden eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Bu sayede tabaka düzeninin boşluk suyu basıncı gelişimi üzerindeki etkisi ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir.

2.3. Bulgular

Konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli hücre kesme deneyleri sonucunda öncelikle tek tabakalı kil ve silt numunelerinin gerilme-şekil değiştirme davranışı ile toplam ve efektif gerilmeler cinsinden kayma dayanımı parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2'de sunulmaktadır. Şekil 2a ve 2b sırasıyla kil numunesinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini ve kırılma zarfını, Şekil 2c ve 2d ise silt numunesine ait karşılık gelen sonuçları göstermektedir. Şekil 2a incelendiğinde, kil numunesinde deviatör gerilmenin eksenel şekil değiştirme ile birlikte başlangıçta hızlı bir artış gösterdiği, ardından belirli bir şekil

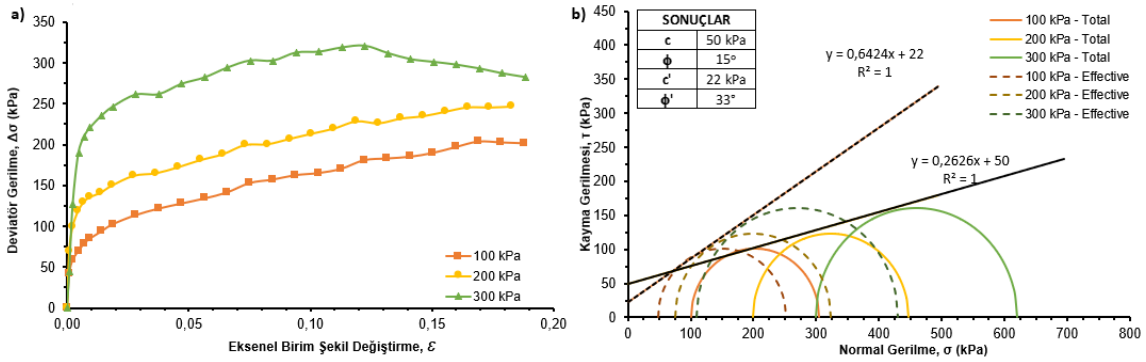
değiştirme seviyesinden sonra yaklaşık sabit bir değere ulaştığı görülmektedir. Bu durum, killi zeminin belirgin bir dayanım tepe noktasından sonra plastik akma davranışı sergilediğini göstermektedir. Artan çevre basıncı ile birlikte maksimum deviatör gerilmenin yükseldiği ve numunenin daha yüksek gerilme seviyelerinde kesmeye karşı daha dirençli hale geldiği gözlenmiştir. Şekil 2b'de verilen kırılma zarfına göre kil numunesi için toplam gerilmeler cinsinden kohezyon değeri 20 kPa ve kayma direnci açısı 15° olarak belirlenirken, efektif gerilmeler cinsinden kohezyon 5 kPa ve içsel sürtünme açısı 35° olarak elde edilmiştir. Toplam ve efektif parametreler arasındaki bu fark, drenajsız kesme sırasında gelişen aşırı boşluk suyu basınçlarının efektif gerilmeyi azaltıcı etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır. Silt numunesine ait gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 2c'de verilmiştir. Kil numunesine kıyasla siltte deviatör gerilmenin şekil değiştirme ile birlikte daha sürekli ve belirgin bir artış eğilimi gösterdiği, belirgin bir tepe dayanımı oluşmadan sertleşme karakterine yakın bir davranış sergilendiği görülmektedir. Bu durum, daha düşük plastisiteli ve nispeten daha iri daneli yapıdaki siltin kesme sırasında daha kademeli bir dayanım gösterdiğini düşündürmektedir. Şekil 2d'de verilen kırılma zarfına göre silt numunesi için toplam gerilmeler cinsinden kohezyon 43 kPa ve içsel sürtünme açısı 20° olarak belirlenirken, efektif gerilmeler cinsinden kohezyon 20 kPa ve içsel sürtünme açısı 39° olarak elde edilmiştir. Silt numunesinin hem toplam hem de efektif gerilmeler altında kil numunesine göre daha yüksek sürtünme açısı değerleri göstermesi, daha iri dane oranı ve daha düşük plastisiteye bağlı olarak sürtünme bileşeninin daha baskın olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Kil ve siltin CU deney sonuçları; **a)** Kil gerilme şekil değiştirme ilişkisi, **b)** Kil kırılma zarfı, **c)** Silt gerilme şekil değiştirme ilişkisi, **d)** Silt kırılma zarfı

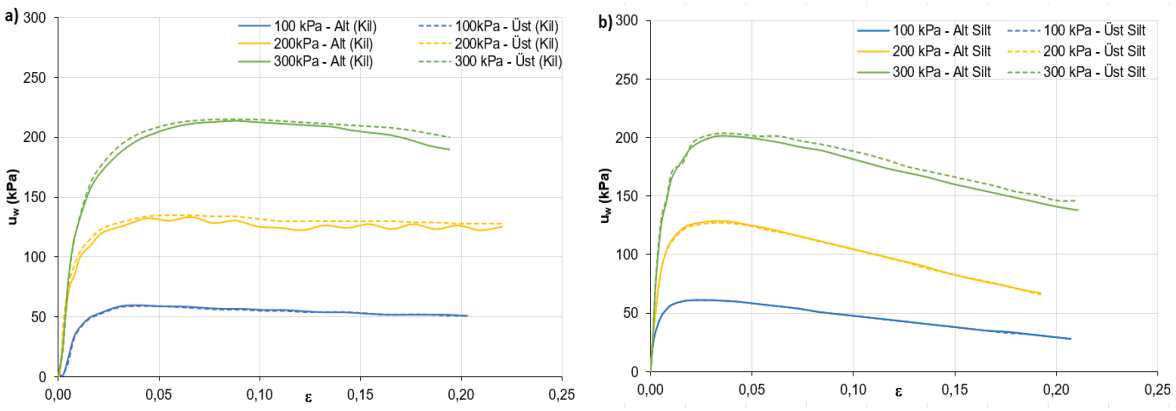
Şekil 3'te üç katmanlı silt-kil-silt numunelerine ait konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli deney sonuçları sunulmaktadır. Şekil 3a silt-kil-silt numunesine ait gerilme-şekil değiştirme davranışı, 3b ise kırılma zarflarını göstermektedir. Şekil 3a incelendiğinde, silt-kil-silt düzeninde deviatör gerilmenin eksenel şekil değiştirme ile birlikte hızlı bir başlangıç artışı gösterdiği ve daha sonra kademeli olarak yükselmeye devam ettiği görülmektedir. Buna karşılık Şekil 3b'de verilen kırılma zarfına göre bu tabakalanmada toplam gerilmeler

cinsinden kohezyon 50 kPa ve içsel sürtünme açısı 15°, efektif gerilmeler cinsinden ise kohezyon 22 kPa ve sürtünme açısı 33° olarak belirlenmiştir. Özellikle efektif kohezyonun oldukça düşük olması, kesme sırasında gelişen boşluk suyu basınçlarının efektif gerilme üzerindeki etkisinin belirgin olduğunu göstermektedir. Tek tabakalı ve üç tabakalı sistemler karşılaştırıldığında, silt-kil-silt durumunda daha yüksek dayanım ve daha büyük efektif kohezyon değerleri elde edilmiştir. Buna karşın kayma direnci açısının efektif gerilmeler cinsinden her iki tabakalanma düzeninde benzer mertebelerde olması, sürtünme bileşeninin zemin türünden çok gerilme izi ve drenajsız koşullara bağlı olduğunu düşündürmektedir. Sonuçlar, tabaka konumunun drenajsız kesme davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ve özellikle dayanım parametrelerinin yalnızca zemin türüne değil, tabakalanma düzenine de bağlı olarak değiştiğini açıkça ortaya koymaktadır.



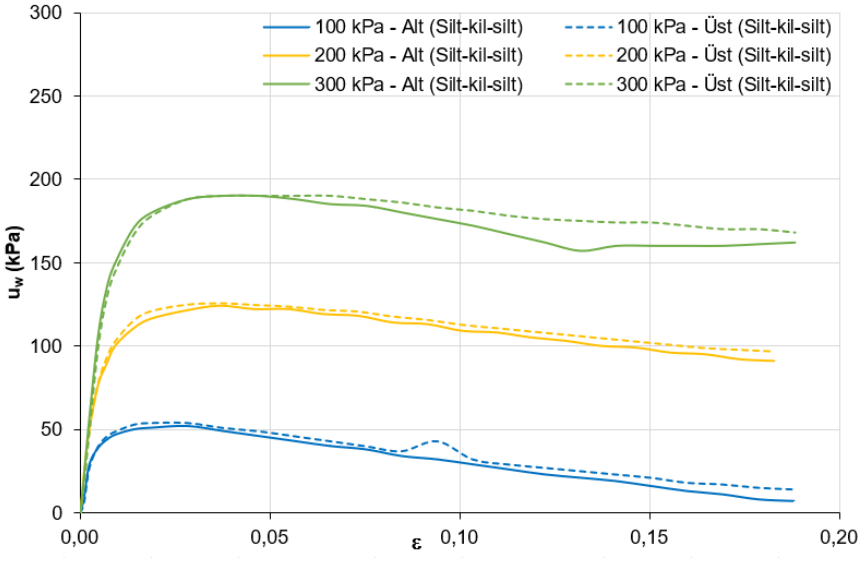
Şekil 3. Üç katmanlı silt-kil-silt numunesinin CU deney sonuçları; **a)** Silt-kil-silt numunesinin gerilme şekil değiştirme ilişkisi, **b)** Silt-kil-silt numunesinin kırılma zarfı

Şekil 4'te tek tabakalı kil ve silt numunelerinde drenajsız kesme sırasında gelişen aşırı boşluk suyu basınçlarının numunenin üst ve alt noktalarındaki değişimi gösterilmektedir. Şekil 4a kil, Şekil 4b ise silt numunesine ait sonuçları sunmaktadır. Şekil 4a incelendiğinde, kil numunesinde boşluk suyu basıncının kesmenin başlangıcında hızla arttığı, ardından belirli bir şekil değiştirme seviyesinden sonra yaklaşık sabit bir değere ulaştığı görülmektedir. Bu davranış, kilin düşük geçirgenliği nedeniyle kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncının numune içinde korunma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Üst ve alt ölçüm noktalarından elde edilen değerlerin birbirine oldukça yakın olması, numune boyunca boşluk suyu basıncı dağılımının büyük ölçüde homojen olduğunu ve drenajsız koşullar altında suyun yeniden dağılımının sınırlı kaldığını göstermektedir. Çevre basıncının artmasıyla maksimum boşluk suyu basıncı değerlerinin de arttığı açıkça görülmektedir. Şekil 4b'de verilen silt numunesine ait sonuçlar ise farklı bir eğilim ortaya koymaktadır. Siltte boşluk suyu basıncı kesmenin başlangıcında hızla artmakla birlikte, şekil değiştirme ilerledikçe belirgin bir azalma eğilimi göstermektedir. Bu durum, siltin kile kıyasla daha yüksek geçirgenliğe sahip olması nedeniyle kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncının zamanla yeniden dağıldığını ve kısmen sönümlendiğini göstermektedir. Ayrıca silt numunesinde üst ve alt ölçüm noktaları arasında kilden daha belirgin farklar gözlenmesi, boşluk suyu basıncının numune boyunca daha heterojen dağıldığını ve drenajsız koşulların yerel ölçekte farklı şekilde gelişebildiğini göstermektedir.



Şekil 4. Kil ve siltin boşluk suyu basıncı dağılımı; **a)** Kil, **b)** Silt

Şekil 5'te üç katmanlı silt-kil-silt numunelerinde drenajsız kesme sırasında gelişen aşırı boşluk suyu basınçlarının numunenin üst ve alt noktalarındaki değişimi verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, üstte yer alan silt tabakasında ölçülen boşluk suyu basınçlarının alttaki silt tabakasından ölçülen boşluk suyu basınçları ile önemli bir fark olmadığını göstermektedir. Şekil değiştirme ilerledikçe boşluk suyu basıncının daha belirgin şekilde azalması, siltin drenaj eğiliminin daha yüksek olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Silt tabakasında boşluk suyu basıncı daha erken azalma eğilimi göstermekte, bu da daha geçirgen yapıya bağlı olarak suyun daha kolay yeniden dağıldığını işaret etmektedir. Tek katmanlı silt tabakası ile üç katmanlı silt-kil-silt sistemi karşılaştırıldığında, silt-kil-silt numunesinde boşluk suyu basıncının tek tabakalı silt numunesine oranla daha yavaş sönümlenmesinin görülmesi, silt tabakaları arasında bulunan kil tabakasının düşük geçirgenlikli olmasının etkisi olarak yorumlanmıştır. Boşluk suyu basıncının büyüklüğü ve dağılımının yalnızca gerilme seviyesine değil, tabaka konumuna ve zemin türlerinin geçirgenlik farkına güçlü biçimde bağlı olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5. Üç tabakalı silt-kil-silt numunesinin boşluk suyu basıncı dağılımı

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada Adapazarı kili ve silti tek tabakalı ve üç tabakalı düzenlerde hazırlanarak konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli hücre kesme deneylerine tabi tutulmuş, gerilme-şekil değiştirme davranışı, kayma dayanımı parametreleri ve kesme sırasında numunenin üst ve alt noktalarında gelişen aşırı boşluk suyu basıncı değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tek tabakalı durumda kilin daha belirgin plastik akma davranışı ve homojen boşluk suyu basıncı dağılımı sergilediğini, siltin ise daha sürekli dayanım artışı ve zamanla azalan boşluk suyu basıncı ile daha geçirgen bir davranış gösterdiğini ortaya koymuştur. Katmanlı numunelerde ise tabaka konumunun hem drenajsız dayanım parametrelerini hem de boşluk suyu basıncı dağılımını doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Silt-kil-silt tabakalanma düzeninde daha yüksek dayanım ve daha büyük efektif kohezyon değerleri görülmüştür. Boşluk suyu basıncı dağılımı incelendiğinde düşük geçirgenliğe sahip kil tabakasının bulunduğu konumda basıncın daha fazla biriktiği, silt tabakasında ise daha hızlı sönümlendiği görülmüştür. Ayrıca tabakalı yapıda kilin silt ile birlikte bulunması kilde gelişen boşluk suyu basıncını bir miktar azaltırken, silt tabakasında sınırlı bir artışa neden olmuştur. Sonuç olarak zemin türü kadar tabaka konumunun da drenajsız kesme davranışı ve boşluk suyu basıncı gelişimi üzerinde belirleyici olduğu açıkça ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

Ayoubi P, Pak A 2017. Liquefaction-induced settlement of shallow foundations on two-layered subsoil strata. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 94: 35-46.

Duncan JM, Wright SG, Brandon TL 2014. Soil strength and slope stability, 2nd ed. Hoboken: Wiley.

Mitchell JK, Soga K 2005. Fundamentals of soil behavior, 3rd ed. Hoboken: Wiley.

Önalp, A,. Özocak, A., Bol, E., Sert, S., Arslan, E., Ural, N. An investigation into dynamic behaviour of reconstituted and undisturbed fine-grained soil during triaxial and simple shear. Bull Earthquake Eng 22, 5599–5618 (2024). https://doi.org/10.1007/s10518-024-01980-3

Özener TP, Özaydın K, Berilgen MM 2009. Investigation of liquefaction and pore water pressure development in layered sands. Bulletin of Earthquake Engineering, 7: 199-219.

Schiffman RL, Stein JR 1970. One-dimensional consolidation of layered systems. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE.

Skempton AW 1954. The pore-pressure coefficients A and B. Geotechnique, 4(4): 143–147.

Terzaghi K 1943. Theoretical soil mechanics. New York: Wiley.

Türk Standardları Enstitüsü (TSE) 2006. TS 1900-1: İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri – Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini. Ankara: TSE.

Türk Standardları Enstitüsü (TSE) 2000. TS 1500: Zeminlerin sınıflandırılması. Ankara: TSE.

Wood DM 1990. Soil behaviour and critical state soil mechanics. Cambridge: Cambridge University Press.

Zhifu S, Qier X, Lingyu Z, Zhihua W, Hongmei G 2023. Experimental study on static triaxial shear behavior of artificially prepared interlayered soil. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 45(4): 840-846.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
σ	**Normal gerilme (kPa)**	**ϕ**	**Kayma direnci açısı (°)**
σ'	**Efektif gerilme (kPa)**	**c**	**Kohezyon (kPa)**
τ	**Kayma direnci (kPa)**	**c'**	**Efektif kohezyon (kPa)**
ε	**Birim şekil değiştirme (%)**	**u_w**	**Boşluk suyu basıncı (kPa)**