

Kuru Kumlarda Dane Çapı Dağılımının İçsel Sürtünme Açısına Etkisinin Kesme Kutusu Deneyleri ile Belirlenmesi

Eyyüb KARAKAN^{1*}, Zelal EBREN²

ÖZET: Laboratuvardaki içsel sürtünme açısını ve kohezyon değerlerini belirlemek için yapılan en yaygın deneylerden biri direk kesme testidir. Bu çalışma için, tamamen kuru zeminlerin dayanım parametrelerinin, farklı rölatif sıklıklar ve normal gerilmelerdeki değişimleri incelenmiştir. Deneysel çalışma direk kesme testi, beş farklı normal gerilme ve sabit numune hacmi altında yapılmıştır. Kumun kohezyonunun sıfır olduğu varsayımı ile karşılaştırma yalnızca içsel sürtünme açısına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kayma mukavemeti açısı değerleri ile rölatif sıklık ve normal gerilme ilişkisi, zemin tane çapı değişimi parametresi de göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Numunelerin test edildiği rölatif sıklıklarda, içsel sürtünme açısı gibi fiziksel özelliklerin artışı normal gerilmedeki artışla birlikte maksimum ve artık kayma gerilmesinde de bir artış olduğu görülmüştür. Ayrıca elde edilen sonuçlar, zeminin dane çapı dağılımının içsel sürtünme açısını nasıl etkilediğini göstermiştir.

Anahtar kelime: Kayma dayanımı, kesme kutusu deneyi, içsel sürtünme açısı, dane çapı dağılımı.

Determination of the Effect of Grain Size Distribution on the Internal Friction Angle in Dry Sands by Direct Shear Test

ABSTRACT: One of the most common experiments to determine the internal friction angle and cohesion values in the laboratory is the direct shear test. For this study, the changes of strength parameters of completely dry soils in different relative densities and normal stresses were investigated. The direct shear test was performed under five different normal stresses and constant sample volumes. The comparison with the assumption that the cohesion of the sand is zero was made only based on the internal friction angle. The obtained shear strength angle values and the relative density and normal stress relationship were examined by considering the soil grain size distribution. The relative density in which the samples were tested showed an increase in the maximum and residual shear stress as well as the increase in normal stress, including the increase in physical properties such as the internal friction angle. In addition, the results showed how the grain size distribution of the soil affects the internal angle of friction.

Key words: Shear strength, direct shear test, internal friction angle, grain size distribution.

¹Eyyüb KARAKAN (Orcid ID: 0000-0003-2133-6796), Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kilis, Türkiye

²Zelal EBREN (Orcid ID: 0000-0003-0461-6323), Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Eyyüb KARAKAN, e-mail: eyyubkarakan@kilis.edu.tr

GİRİŞ

Zeminlerin, kayma mukavemeti parametreleri arazideki yükleme koşullarına uygun olarak belirlenebilmesi geoteknik mühendisliği'nin en önemli konusudur. Derin ve sığ temellerin taşıma kapasitesi, şev stabilitesi, istinat duvarının tasarımı ve doğrudan olmasa da yol kaplaması tasarımı gibi konularda stabiliteyi etkileyen en önemli zemin parametresi kayma mukavemeti parametresidir. Yapı ve şevler olması beklenen maksimum yükleme şartları altında göçmeye karşı sağlam yani kararlı durabilmelidirler (Holtz ve ark., 2015). Zeminin yapısal yükler altında kütlelerinin stabilitesini kontrol eden temel mühendislik özelliği, kesme mukavemeti olarak tanımlanır. Zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri (iç sürtünme açısı ve kohezyonu), yapıların tasarımında büyük önem taşır. Zeminin içsel sürtünme açısı ve kohezyonu hem laboratuvar hem de arazi deneyleri ile belirlenebilir. Laboratuvardaki içsel sürtünme açısını ve kohezyon değerlerini belirlemek için en yaygın deneylerden biri direk kesme testidir.

Zeminin tane çapı dağılımının geoteknik malzemelerin mekanik davranışları üzerinde önemli bir etkisi vardır (Kokusho ve ark., 2004; Wichtmann ve Triantafyllidis, 2009; Cabalar, 2011; Yan ve Dong, 2011; Wang ve ark., 2013; Wichtmann ve Triantafyllidis, 2013; Wang ve ark., 2017, 2018a, 2018b). Dafalla (2013) kil içeriği ve su içeriğinin kil-kum karışımlarının kayma mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Su içeriği arttıkça, kil-kum karışımlarının kohezyonu ve içsel sürtünme açısı azalmıştır. Muawia (2013) farklı kil içerikleri ve farklı su içerikleri için direk kesme testinin yeterli bir kesme gerilimi kullanarak, kullanılmasının güvenilirliğini araştırmıştır. Elde ettiği sonuç, karışımın uyumunun kil içeriğinin artmasıyla tutarlı bir şekilde arttığını göstermiştir. Dey (2015) çalışmasında, dört farklı rölatif sıklıkta hazırlanan kuru kohezyonsuz zeminlerde yapılan direk kesme testlerine dayanarak gerilme hızının etkisini göstermektedir. Deney sonuçları, tepe ve kalıcı içsel sürtünme açısının, gerilme oranındaki değişikliklerden gözle görülür şekilde etkilendiğini ve gevşek kumlarda daha belirgin etkilerin ortaya çıktığını ortaya koydu. Vallejo ve ark., (2000) çeşitli kil muhtevasına sahip kaolinit kil-kum karışımlarının kayma mukavemetini ve ince dane oranının etkisini ölçmüştür. Karışımların kayma mukavemeti %25'in altındaki kil içeriğinde kum ile yönetilirken, %60'ın üzerindeki kil içeriğinde ise kil ile yönetildiği sonucuna ulaşmıştır.

Doğrudan kesme testini, Fannin ve ark., (2005); Asadzadeh ve Soroush, (2009); ve Nam ve ark., (2011) çalışmalarında granüler zeminlerin kesme mukavemetini elde etmek için kullanmışlardır. Simoni ve Houlsby, (2006) zeminin dane çapı dağılımı kayma mukavemetini etkileyebileceğini göstermiştir. Edinçliler ve ark., (2004) kauçuk tozunun, ağırlıkça %5, %10, %20 ve %30 kullanımının yanı sıra tamamen kum ve kauçuk kullanımı ile karışımlarda kumlu zeminlerin kayma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kauçuk toz karışımları büyük ölçekli doğrudan kesme testi yapılarak elde edilmiştir. Çalışma sırasında yapılan deneyler sonucunda, kauçuk tozu kullanımının içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri üzerinde düzenli bir etkisi olmadığı görülmüştür. En yüksek kohezyon değeri %20 kauçuk içeren sette 15.5 kPa ve en yüksek içsel sürtünme açısı değeri kum setinde 33° olarak bulunmuştur. Gotteland ve ark., (2005) çalışmalarında atık kauçuk parçacıklarının yatay ve dikey yönlerde ağırlıkça %14 ve %22 oranında kum zemin içeriğinin karıştırılarak büyük ölçekli bir doğrudan kesme testi uygulanarak, kauçuk parçacıklarının kum zeminler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Buna ek olarak, tamamen kum ve tamamen kauçuk kullanılarak deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda, 50 kPa ile %22 lastik içeriğinde en yüksek kohezyon değerini ve %14 lastik içeriğinde 42,6° en yüksek içsel sürtünme açısını elde ettiler. Elde edilen veriler incelendiğinde, optimum mukavemetin %14-%22 lastik içeriği olduğu sonucuna vardılar. Saito ve ark., (2006) kohezyonlu zeminlerde kayma mukavemeti ve kayma hızı arasındaki ilişkiyi göstermişlerdir. Deneyler, silis kumu, silis kumu-illit karışım numunesi

ve silis kumu-bentonit karışım numunesi üzerinde halkalı kesme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, etkili nihai sürtünme açısının kesme hızına bağımlılığı illit veya bentonit karışımı örneğinde tanımlanmıştır. Ölçülen etkin nihai sürtünme açısı değerlerine göre, kesme modunun kesme hızıyla değiştiği görülmektedir. Kesme modundaki bu değişiklik, hız mekanizmasının kohezyonlu zeminin kesme mukavemeti üzerindeki etkisi olarak kabul edilir. Ayrıca, Skempton (1985), kesme hızının kohezyonlu zeminlerin nihai mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Çanakçı ve Güllü (2007) düşük plastisiteli kile %5, %15, %30, %50, ve %70, kötü derecelenmiş kumla karıştırılmış, sabit su içeriğindeki içsel sürtünme açısının değişimini deneysel olarak incelemiştir. Saf kilin plastik limit seviyesinde içsel sürtünme açısının 30° olduğu, %15 kum içeren karışımın içsel sürtünme açısının 8° 'ye düştüğü ve kum oranının %70 olduğu takdirde 40° ye yükseldiğini göstermiştir. Şekercioğlu (2015) yaptığı deneysel çalışmada geosentetik kullanımının kumlu zeminler üzerindeki mekanik ve potansiyel faydalarını tespit etmek için iki tür zemin üzerinde kolay bulunabilen 6 çeşit geosentetik ile farklı rölatif sıklıklarda 78 tane kesme kutusu deneyi gerçekleştirmiştir. Arayüz davranışına etkisi olabilecek çeşitli parametreler incelenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre donatılı zeminlerdeki kesme dayanımı donatısız zeminlere göre genel olarak daha yüksek değerler aldığı saptanmıştır. Sezer ve ark., (2011), yaptıkları çalışmada kumların dane çapı dağılımı ve şeklinin kayma dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlarla, tanecik şeklinin tane çapı dağılımına kıyasla kumların içsel sürtünme açısı üzerinde sınırlı bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur sonucuna varmışlardır. Ayrıca parçacık şeklindeki düzenliliğin azalmasının kumların içsel sürtünme açısının artmasına neden olduğu bulmuşlardır.

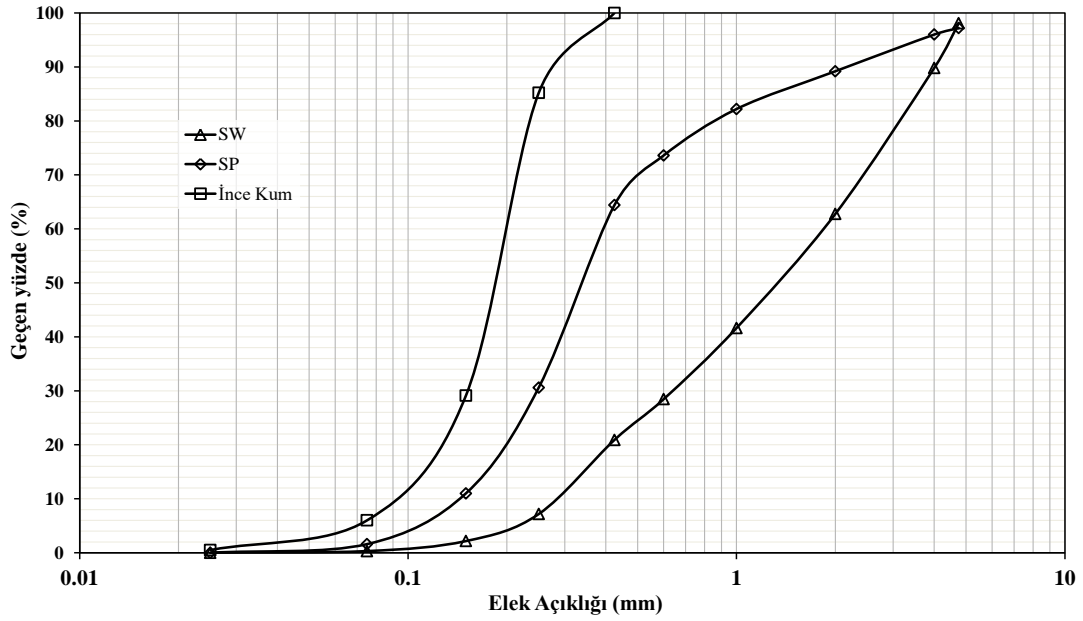
Zeminler sadece doygun halde değil, aynı zamanda kısmen doygun veya kuru halde bulunabilir. Bu durum, zeminlerin kayma dayanımı parametrelerinde fark yaratır. Bu amaçla, çalışma kapsamında üç farklı dane çapı dağılımına sahip kum zeminin farklı rölatif sıklıklar ($D_r = \%30, \%50, \%80$) ve normal gerilmeler (50, 100 ve 150 kPa) altında tamamen kuru kum zeminlerin dayanım parametrelerinin değişimi direk kesme cihazı kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmada tane çapı dağılımının kuru kum zeminlerin kayma mukavemeti üzerindeki etkileri de araştırılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

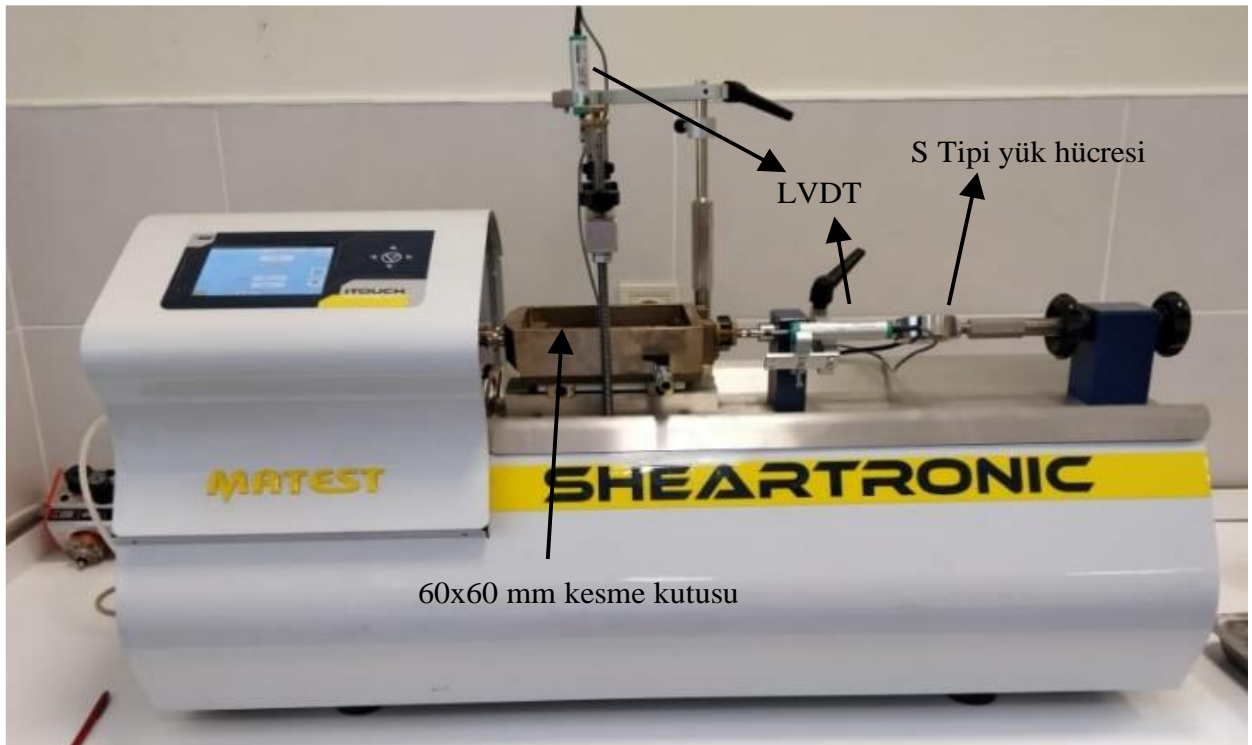
Çalışma kapsamında üç farklı dane çapı dağılımına sahip kum numunesi, tamamen kuru halde kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan zeminlerin (Şekil 1), dane çapı dağılım eğrisi Şekil 2'de gösterilmiştir. Zeminlerin temel geoteknik özelliklerinin ayrıntılı sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Doğrudan kesme testi için, dikdörtgen kesme kutusunun iç ebadı plan olarak 60 x 60 mm ve yüksekliği 20 mm'dir (Şekil 3). Üç farklı zemin, üç farklı rölatif sıklık (30, 50 ve 80) ve üç farklı normal gerilme altında yirmi yedi doğrudan kesme testi yapılmıştır. Çalışma kapsamındaki deneylerin hepsi Kilis 7 Aralık Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bulunan pnömatik kontrollü tam otomatik direk kesme deney cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Deneyler, yatay yükleme oranı 1 mm/dak olacak şekilde uygulanmıştır (ASTM D3080-90). Çalışma kapsamında yapılan minimum boşluk oranı deneyi ASTM D-4254-00 (2006), maksimum boşluk oranı deneyi ASTM D-4253-00 (2006) göre yapılmıştır. Deneyler zeminin %20'ye karşılık gelen 12 mm deformasyon seviyesine gelene kadar gerçekleştirilmiştir (ASTM D3080-90).



Şekil 1. Farklı tane boyutlarında kum partikülleri. Her fotoğraf 100 gr zemin numunesi içerir.
*SW= iyi derecelenmiş kum SP= kötü derecelenmiş kum, FS= ince kum



Şekil 2. Kuru kumların tane çapı dağılım eğrileri



Şekil 3. Pnömatik tam otomatik kesme kutusu deney cihazı ve ekipmanları

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan zeminlerin indeks özellikleri

Zemin Türü	D ₁₀	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	C _c	C _u	e _{min}	e _{mak}	G _s
SW	0.26	0.647	1.396	1.869	0.861	7.19	0.3	0.6	2.63
SP	0.14	0.245	0.34	0.41	1.5	2.93	0.485	0.787	2.69
İnce Kum	0.088	0.152	0.187	0.205	1.281	2.84	0.668	0.986	2.72

*USCS'e göre sınıflandırma yapılmıştır ve SW - SP - FS (İnce kum). * D₁₀ - D₃₀ - D₆₀: Efektif çap, (mm). * D₅₀: Medyan çap, (mm). * C_u: Üniformluk katsayısı. * C_c: Eğrilik katsayısı. * e_{min}: Minimum boşluk oranı, * e_{mak}: Maksimum boşluk oranı

Kayma testleri çok gevşekten orta sıkı ve sıkı zeminler için yapıldı (Dr = %30, %50, %80). En yüksek zemin kesme dayanımı, teğetsel ve normal gerilmelerin azami oranına göre belirlenmiştir. Geleneksel doğrudan kesme testi prosedürleri, ASTM D3080 (2004) takip edildi. Her test için deney sırasında anlık olarak kayma gerilimi-kayma yer değiştirme tepkisi sürekli izlendi. Devamında, doğrudan kesme testlerinden elde edilen kayma gerilmesi, farklı normal gerilmeler altında kuru kumun mekanik davranışı üzerindeki etkisini analiz etmek için sunulmuştur. Farklı rölatif sıklıklar ve normal gerilmelerde kayma mukavemeti ölçülmüş ve deneylerden elde edilen sonuçlar kayma gerilmesine göre karşılaştırılmıştır. Ek olarak, normal gerilmenin kayma dayanımı üzerindeki etkisi deneysel olarak elde edilen grafikler kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmada gerçekleştirilen doğrudan kesme deneyi için test tablosu Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Doğrudan kesme deneyi için test tablosu

Zemin Türü	Rölatif Sıklık (Dr, %)	Normal Gerilme (σ , kPa)
SW	30	50
SP	50	100
FS	80	150

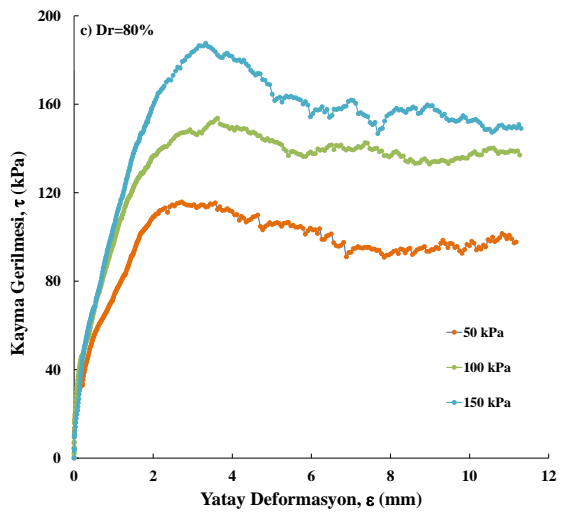
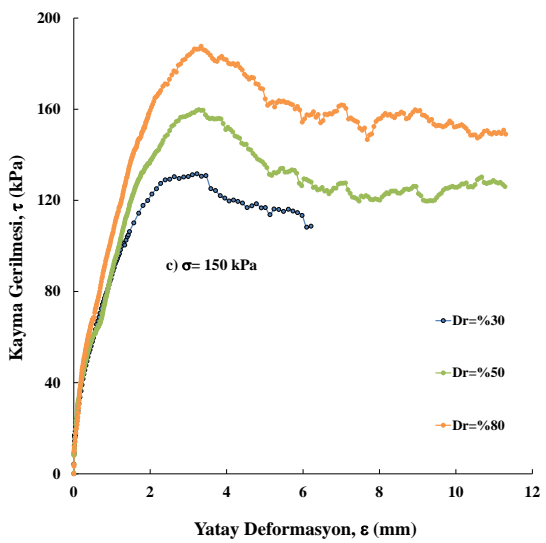
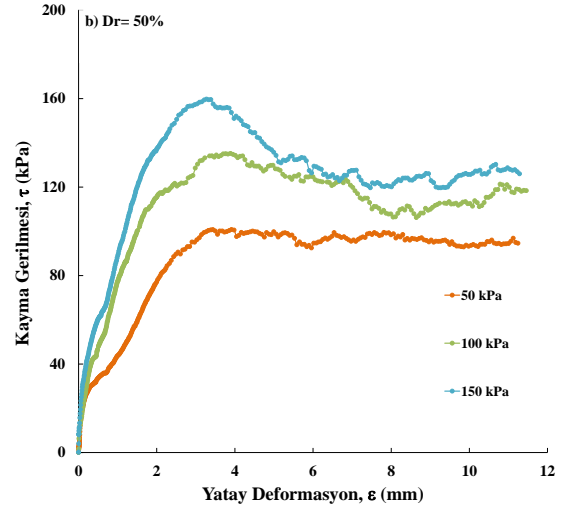
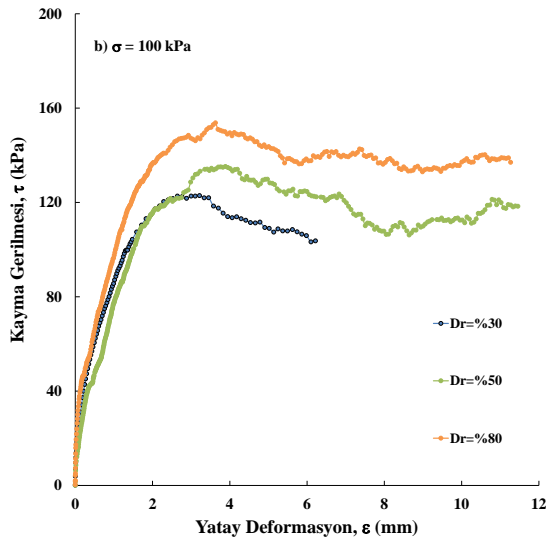
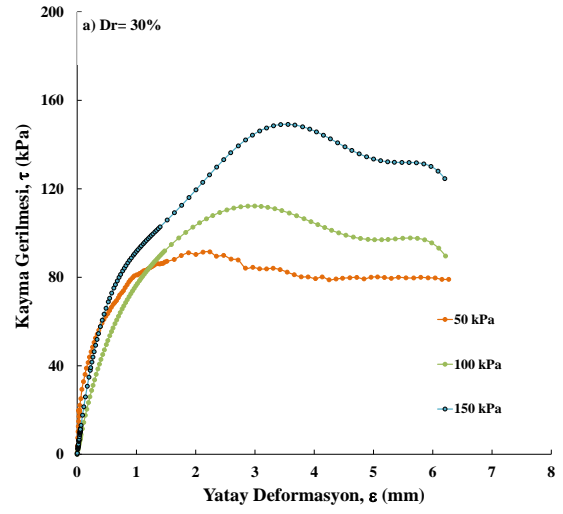
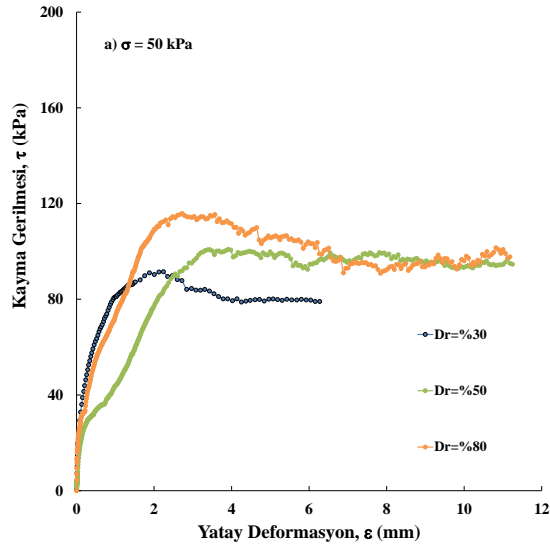
SW= iyi derecelendirilmiş kum, SP= kötü derecelendirilmiş kum, FS=ince kum

BULGULAR VE TARTIŞMA

İyi Derecelendirilmiş Kumun (SW) Kesme Kutusu Deney Sonuçları

İlk olarak, normal gerilmenin kuru kumun mekanik davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 3'te 50, 100 ve 150 kPa normal gerilme altında ve farklı rölatif sıklıklar için doğrudan kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. 50 kPa normal stres ve 3 farklı göreceli yoğunluk altında gerçekleştirilen deneylerin sonuçları, Şekil 3-a'da gösterilmiştir. Şekil 3-a'da gösterildiği gibi, Dr=%30 için minimum kayma gerilmesi değeri elde edilirken, aynı gerilime göre en yüksek kayma gerilmesi değeri Dr=%80 için elde edilmiştir. Şekil 3-a'da gösterilen minimum kayma gerilmesi değeri, Dr=%30 için 91.5 kPa ve maksimum kayma gerilmesi, Dr=%80 için 115.8 kPa'dır. Deneysel sonuçlardan beklendiği gibi, maksimum kayma gerilmeleri rölatif sıklıklar arttıkça artmıştır. Bununla birlikte, tüm normal gerilmeler altında elde edilen deney sonuçları incelendiğinde, rölatif sıklığın gevşekten (Dr=%30) sıkıya (Dr=%80) doğru gidildikçe, maksimum kayma gerilmesinde de bir artış görülmüştür.

Şekil 4'te SW kumu için sabit rölatif sıklıklarda zeminin kayma gerilmesi yatay deformasyon grafikleri gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, yatay deformasyon 2-4 mm arasında iken maksimum kayma gerilmesinin elde edildiği görülmüştür. 6 mm yatay deformasyon seviyesinden sonra gerilmelerin sabitlenerek kalıcı gerilmelerin oluştuğu gözlenmiştir. Zeminin en yüksek kayma gerilmeleri 150 kPa normal gerilme altında, rölatif sıklığın gevşekten sıkıya doğru olması durumunda sırasıyla 149.11 kPa, 159.58 kPa ve 186.32 kPa olarak bulunmuştur. Aynı normal gerilme için 6 mm yatay deformasyondan sonra elde edilen kalıcı kayma gerilmeleri ise, yine rölatif sıklığın gevşekten sıkıya doğru olması durumunda sırasıyla 124.58 kPa, 126.20 kPa ve 149.04 kPa olarak elde edilmiştir. Yapılan deneyler kuru zeminlerin kalıcı gerilme değerlerinin de yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 3. SW kumu için kayma gerilmesi – yatay deformasyon karşılaştırılması

Şekil 4. SW kumu için sabit rölatif sıkılıklarda normal gerilme etkisi.

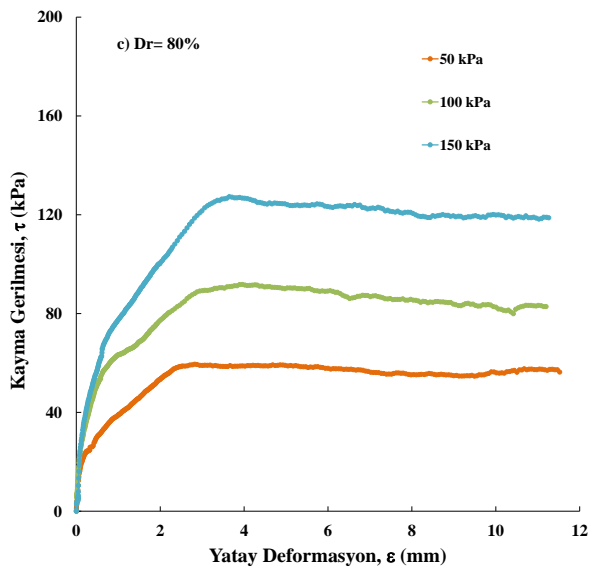
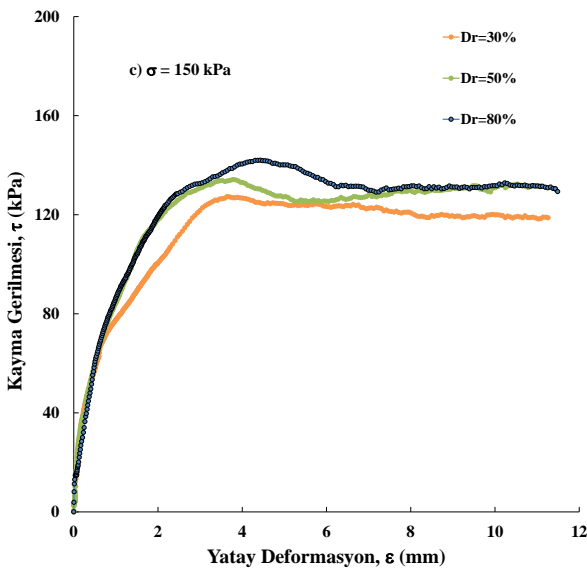
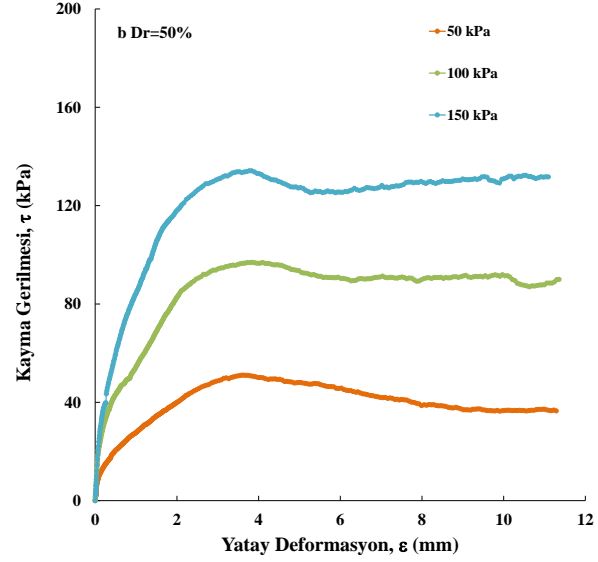
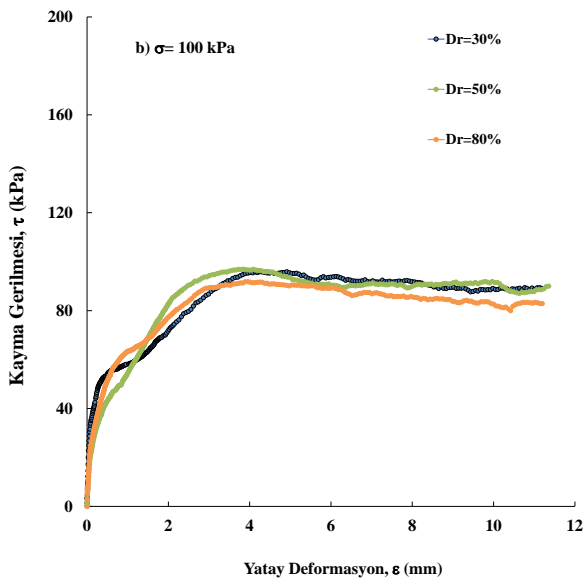
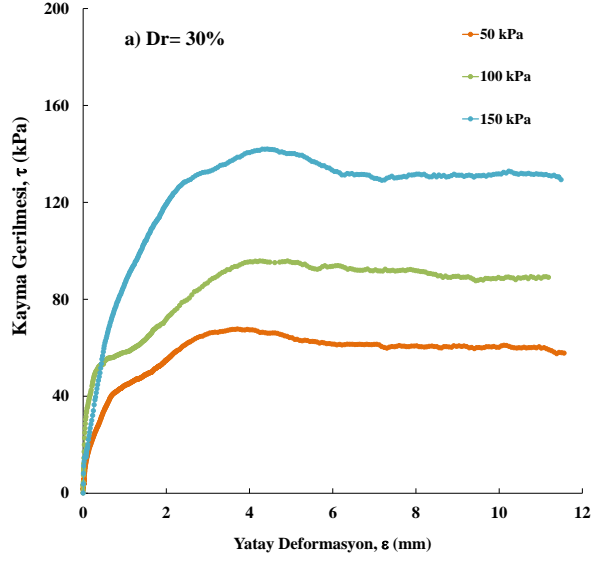
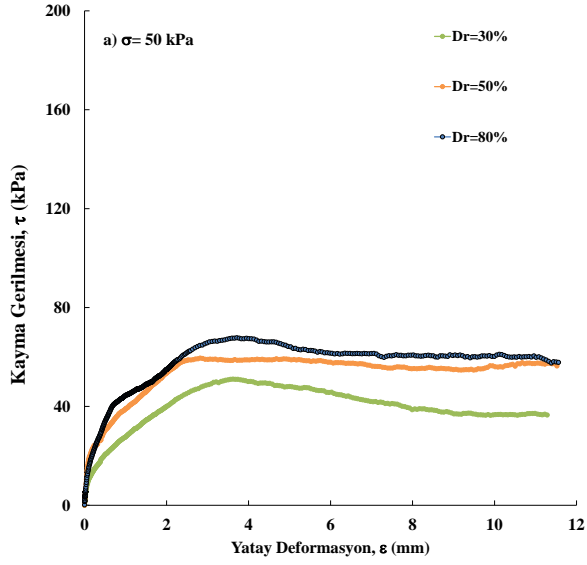
Kötü Derecelendirilmiş Kumun (SP) Kesme Kutusu Deney Sonuçları

Kötü derecelenmiş kuru kum için 50, 100 ve 150 kPa normal gerilme altında yapılan deney sonuçları Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 5-a'da $D_r=30\%$ için minimum kayma gerilmesi değeri elde edilirken, $D_r=80\%$ için aynı normal gerilme altında en yüksek kayma gerilmesi elde edilmiştir. Şekil 5-a'da gösterilen minimum kayma gerilmesi değeri, $D_r=30\%$ için, 50 kPa normal gerilme altında 67.77 kPa'dır. Şekil 5-c, 150 kPa'lık normal gerilme altında 3 farklı rölatif sıklık altında gerçekleştirilen deney sonuçları sunulmuştur. Deneylerdeki en yüksek kesme gerilimi, $D_r=80\%$ rölatif sıklık ve 150 kPa'lık normal gerilim için elde edildi. Şekil 5'de kötü derecelenmiş kum zeminin sabit normal gerilmede rölatif sıklık etkisinin daha az olduğu görülmüştür. Elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde, Şekil 5-b görüldüğü üzere sabit bir normal gerilme altında (100 kPa) elde edilen maksimum kayma gerilmesi her üç rölatif sıklık için de birbirine çok yakın bulunmuştur. Benzer deney sonuçları Şekil 5-c'de de gözlemlenmiştir. Şekil 5-a'da elde edilen 50 kPa normal gerilme için ortalama maksimum kayma gerilme değeri 59 kPa olarak bulunmuştur. Şekil 5-b'de 100 kPa normal gerilme için ortalama maksimum kayma gerilmesi 95 kPa elde edilirken, Şekil 5-c'de 150 kPa normal gerilme için ortalama maksimum kayma gerilmesi ise 135 kPa'dır. Ortalama kayma gerilmesi, normal gerilme 50 kPa'dan 100 kPa'ya yükseldiğinde %61 oranında, 100 kPa'dan 150 kPa'ya yükseldiğinde ise %42 oranında artmıştır. Şekil 6'da gösterilen deney sonuçları %30, %50 ve %80 olmak üzere 3 farklı rölatif sıklıkta gerçekleştirildi. Şekil 6'da sabit rölatif sıklıkta normal gerilmenin değişimi çok daha belirgin bir şekilde elde edilmiştir. Örneğin Şekil 6-a'da görüldüğü üzere, gevşek ($D_r=30\%$) durumdaki SP kumu için 50.34 kPa maksimum gerilme, en düşük normal gerilme ($\sigma=50$ kPa) değeri için elde edilirken, sıkı durumda ($D_r=80\%$) ise 141.96 kPa maksimum gerilme, en yüksek normal gerilmede ($\sigma=150$ kPa) bulunmuştur. Benzer davranış SP kumunun Şekil 6-b ve 6-c'de gösterilen orta sıkı ve sıkı örnekler üzerinde de elde edilmiştir. Artan normal gerilmeler altındaki en sıkı durumda SP kumunun (Şekil 6-c), maksimum kayma gerilmeleri sırasıyla 50.98 kPa, 96.36 kPa ve 133.68 kPa'dır. Bu durumda atış oranları %89 ve %38.7 olarak bulunur.

İnce Kumun (FS) Kesme Kutusu Deney Sonuçları

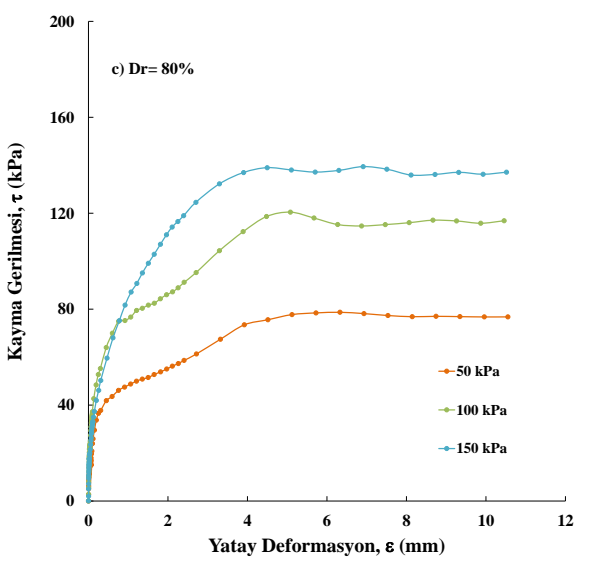
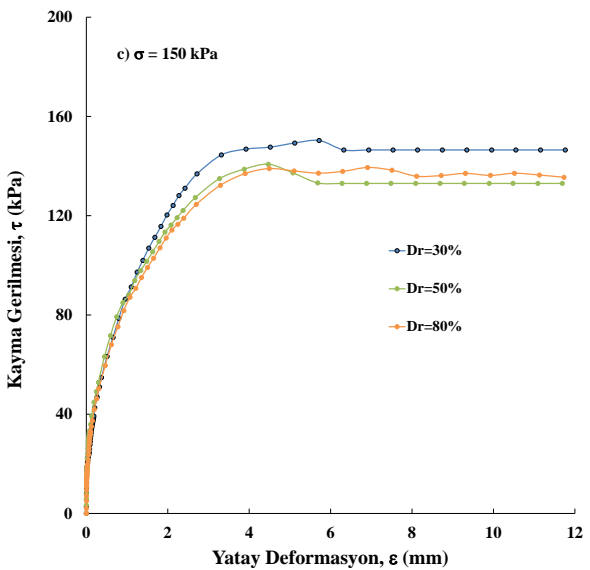
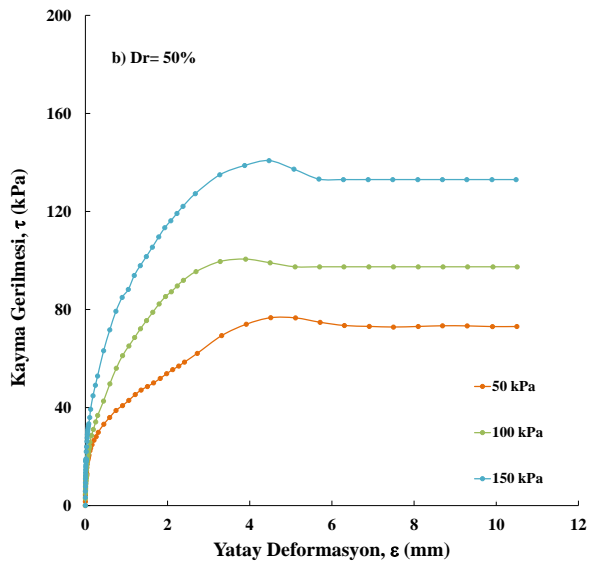
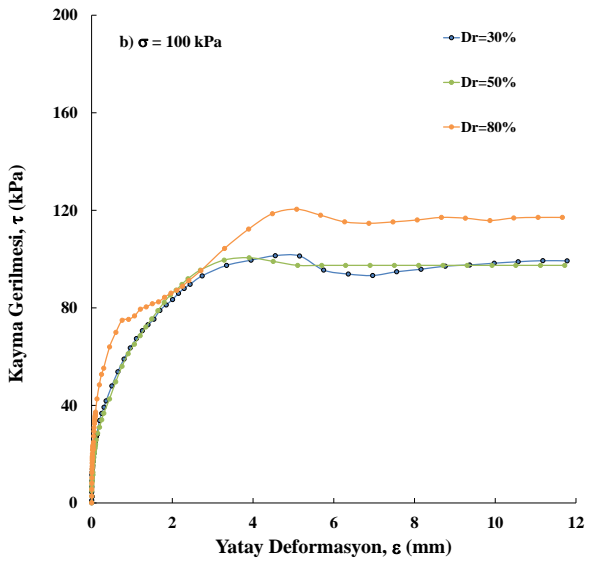
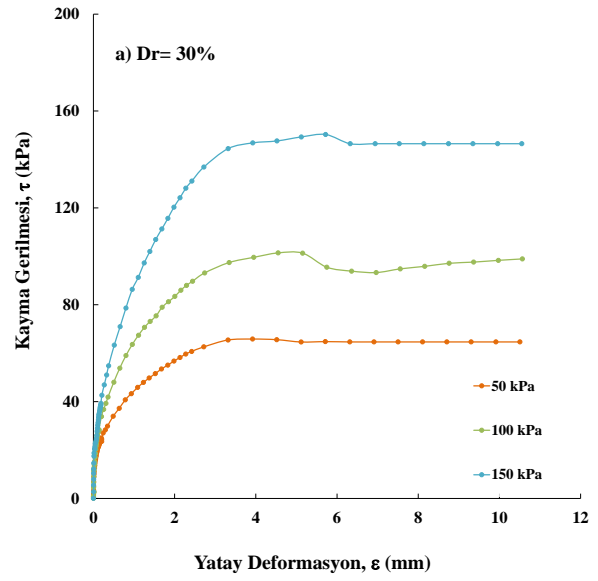
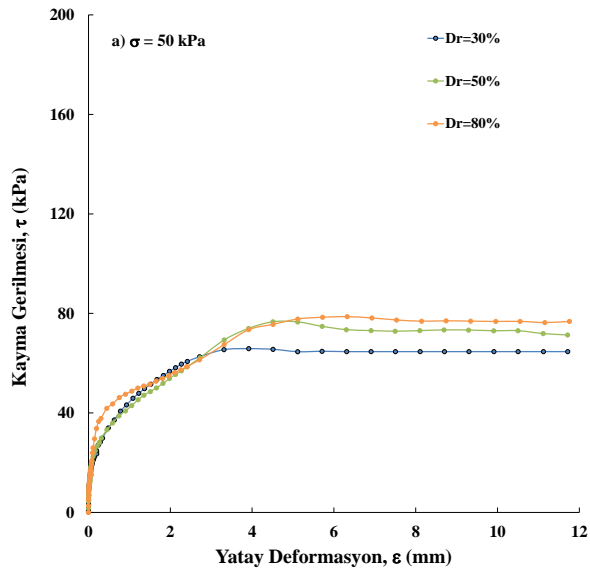
Kötü derecelendirilmiş ince kum (FS) için yapılan kesme kutusu deney sonuçları Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil 7'de rölatif sıklık sabit tutularak normal gerilmeler karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına bağlı olarak minimum kayma dayanımı beklendiği üzere %30 rölatif sıklıkta ve 50 kPa normal gerilme altında elde edilmiştir. Maksimum kayma dayanımı ise yine beklendiği gibi %80 rölatif sıklıkta 150 kPa normal gerilme altında elde edilmiştir.

Test sonuçları kullanılarak, kuru kumun içsel sürtünme açıları Şekil 7'de gösterildiği gibi farklı rölatif sıklıklar için oluşturulmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen şekiller incelendiğinde, kuru kumun yatay deformasyona ulaşmaya kadar dayanımının arttığı görülmektedir. Tepe noktasından sonra kayma gerilmesinin çok az miktarda azaldığı gözlenmektedir. Zeminin kayma mukavemetinin normal gerilmenin artmasıyla arttığı görülmektedir. Zeminin göçmesi için daha yüksek gerilmelerin gerektiği gözlenmiştir. Bunun nedeni taneler üzerindeki gerilmenin, tanelerin birbiri üzerindeki hareketini zorlaştırması ve birlikte sıkılaştırılmalarına neden olmasıdır. Bu durumda, zeminin nihai duruma geçmesi için yüksek gerilmelerde, daha fazla dayanım göstermesine neden olmuştur. Ayrıca Şekil 7-a, 7-b ve 7-c'de, 50 kPa normal gerilmede ortalama kalıcı kayma gerilmesi 71.34 kPa, 100 kPa normal gerilme için ortalama kalıcı kayma gerilmesi 102.10 kPa ve son olarak 150 kPa normal gerilmede 140.40 kPa elde edilmiştir. Şekil 8-a, 8-b ve 8-c'de görüldüğü üzere FS kumunun maksimum ve kalıcı kayma gerilme değerleri gevşek, orta sıkı ve sıkı zeminler için benzer davranış şekli göstererek birbirine yakın değerlerden oluşmaktadır. Bu durum FS kumunun Şekil 2'de gösterilen dane çapı dağılımı eğrisinde, maksimum ve minimum tane çaplarının birbirine çok yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Mesela, Şekil 8-b'de orta sıkı ($D_r=50\%$) numuneler için, 50 kPa normal gerilmede, maksimum kayma gerilmesi 76.65 kPa iken kalıcı kayma gerilmesi ise 73.05 kPa'dır. Aynı grafikte 150 kPa normal gerilme altında maksimum kayma gerilmesi 140.75 kPa bulunurken, kalıcı kayma gerilmesi ise 133.01 kPa bulunmuştur.



Şekil 5. SP kumu için kayma gerilmesi-yatay deformasyon karşılaştırması

Şekil 6. SP kumu için aynı rölatif sıklıklarda normal gerilme etkisi.



Şekil 7. FS kumu için kayma gerilmesi-yatay deformasyon karşılaştırılması

Şekil 8. FS kumu için aynı rölatif sıklıklarda normal gerilme etkisi.

Çizelge 3'te deneysel çalışma kapsamında kullanılan zemin numunesinin sıkı (%80) ve gevşek (%30) rölatif sıklıklarda, minimum (50 kPa) ve maksimum (150 kPa) normal gerilmeler altında elde edilen kayma gerilmesine (τ), bağlı olarak bulunan içsel sürtünme açısı gösterilmektedir. Çizelgede gösterilen verilere bağlı olarak yapılacak yorumlar şu şekildedir:

- Zemin türleri gevşek (D_r =%30) rölatif sıklıkta ve minimum normal gerilme altında (σ =50 kPa) minimum kayma dayanımı ve içsel sürtünme açısı elde etmiştir.
- Zemin türleri sıkı (D_r =%80) rölatif sıklıkta ve maksimum normal gerilme altında (σ =150 kPa) maksimum kayma dayanımı ve içsel sürtünme açısı elde edilmiştir.
- En yüksek kayma dayanımı ve buna bağlı olarak elde edilen içsel sürtünme açısı iyi derecelenmiş zemin (SW) için elde edilmiştir. Bunun nedeni, SW kumunun diğer zemin tiplerine kıyasla kaba ve köşeli bir yapıya sahip olması ve bu nedenle zemin tanelerinin birbiri üzerindeki hareketinin daha zor olmasıdır.
- Daneler arası boşluk oranı (Δe) arttıkça, içsel sürtünme açısının arttığı görülmüştür.
- Kötü derecelendirilmiş ince kum olarak sınıflandırılan (FS), kötü derecelendirilmiş kuma (SP) göre daha ince daneli olmasına karşın daha yüksek kayma dayanımı ve içsel sürtünme açısı meydana getirmiştir. Bunun nedeni ise kötü derecelendirilmiş ince kum (FS) zeminin daneler arası boşluk oranının SP zemin türüne göre daha küçük olmasıdır.

Çizelge 3. Kum zeminlerin sıkı ve gevşek sıklık durumlarındaki içsel sürtünme açıları

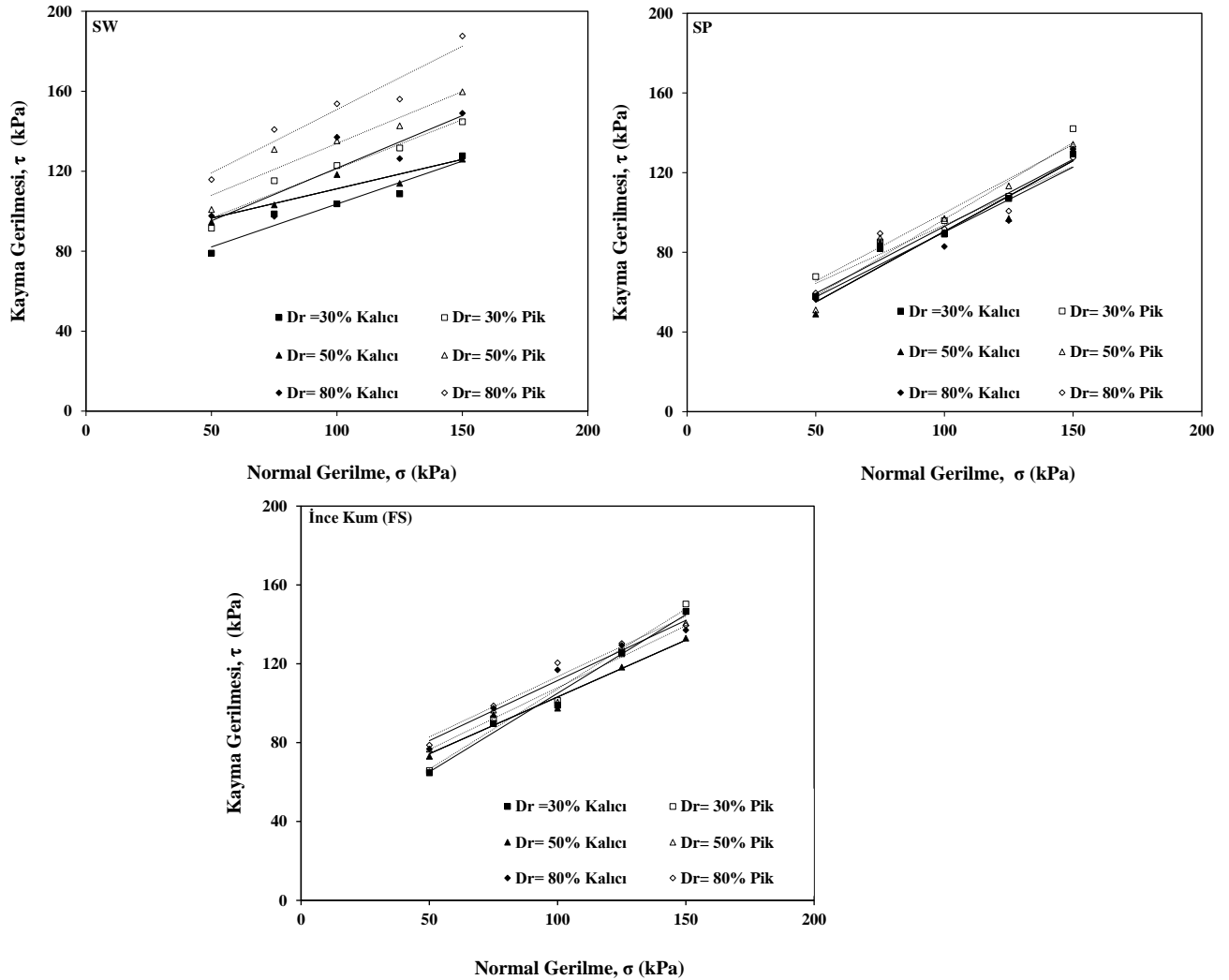
Zemin Türü	Rölatif Sıklık (D_r , %)	Düşük Normal Gerilme (50 kPa)	Yüksek Normal Gerilme (150 kPa)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ , °)
SW	30	91.5	114.74	42.12
SW	80	115.84	187.61	47.09
SP	30	67.77	142.04	39.44
SP	80	59.55	127.37	43.34
FS	30	65.83	150.29	41.68
FS	80	78.16	139.43	45.06

Şekil 9'da gevşek (D_r =%30), orta sıkı (D_r =%50) ve sıkı (D_r =%80) zemin farklı rölatif sıklıkları için pik ve kalıcı kayma gerilmeleri üç farklı normal gerilme altında (σ =50, 100 ve 150 kPa) karşılaştırılmıştır. SW kumu için her üç rölatif sıklık için de elde edilen pik kayma gerilmeleri, kalıcı kayma gerilmelerinden belirgin şekilde büyüktür. FS kumu için ise her üç rölatif sıklık için pik ve kalıcı kayma gerilmeleri arasındaki fark çok çok azalmıştır. Bu durum zeminlerin dane çapı dağılımının pik ve kalıcı kayma dayanımlarında önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada, farklı zemin türlerinin farklı rölatif sıklıklar ve normal gerilmelerde kayma mukavemeti parametreleri (içsel sürtünme açısı, maksimum ve nihai kayma gerilmesi) üzerindeki etkisi direkt kesme deneyi kullanılarak araştırılmıştır. Rölatif sıklığın numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini anlamak için iyi derecelendirilmiş kum (SW), kötü derecelendirilmiş kum (SP) ve kötü derecelendirilmiş-ince kum (FS) numuneleri üzerinde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Doğrudan kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar, iyi derecelendirilmiş kumun içsel sürtünme açısının aralığının kötü derecelendirilmiş kumdan daha yüksek olduğunu göstermektedir. Zeminlerin içsel sürtünme açısının düşük ve yüksek gerilmeler altında değişimleri de belirlenmiştir. İçsel sürtünme açısının tane büyüklüğü, kum tipi, rölatif sıklık ve uygulanan normal gerilmeye bağlı olarak değiştiği

görülmüştür. Numunelerin test edildiği kuru yoğunluklarda, içsel sürtünme açısı gibi fiziksel özelliklerin artmasını içeren, normal gerilimdeki artışla birlikte maksimum ve artık kesme geriliminde bir artış olduğu elde edilmiştir.



Şekil 9. Pik - kalıcı kayma mukavemeti - normal gerilme değişimi.

KAYNAKLAR

- Asadzadeh M, Soroush A, 2009. Direct Shear Testing on a Rockfill Material, The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol.34, No.2B.
- ASTM, 1990. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, ASTM D3080-90. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D-4253-00, 2006. Standard Test Methods for Maximum Indeks Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D-4253-00, 2006. Standard Test Methods for Minimum Indeks Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
- Cabalar AF, 2011. Direct Shear Tests on Waste Tires–Sand Mixtures, Geotech. Geol. Eng. 29:411–418.
- Çanakçı H, Güllü H, 2007. Kil-Kum Karışımı Zeminlerde Karışım Oranının İçsel Sürtünme Açısı Üzerine Etkisinin İncelenmesi, 2. Geoteknik Sempozyumu, Adana, s. 430-436.
- Dafalla MA, 2013. Effects of clay and moisture content on direct shear tests for clay–sand mixtures. Adv Mater. Sci Eng 2013:562726.

- Dey A, Mamo BG, Banoth KK, 2015. Effect of strain rate on shear strength parameter of sand. 50th Indian Geotechnical Conference 17th – 19th December 2015, Pune, Maharashtra, India.
- Edinçliler A, Baykal G, Dengili K, 2004. Determination of Static and Dynamic Behavior of Recycled Materials for Highways. *Resources Conservation and Recycling*, 42: 233-237.
- Fannin RJ, Eliadorani A, Wilkinson JMT, 2005. Shear strength of cohesionless soils at low stress. *Géotechnique*, 55(6): 467-478.
- Gotteland P, Lambert S, Balachowski L, 2005. Strength Characteristics of Tyre Chips-Sand Mixtures. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 17: 1-2.
- Holtz RD, Kovacs WD, 2015. *Geoteknik Mühendisliğine Giriş 2.Cilt*, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 540.
- Kokusho T, Hara T, Hiraoka R, 2004. Undrained Shear Strength of Granular Soils with Different Particle Gradations, *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130(6): 621-629.
- Muawia AD, 2013. Effects of Clay and Moisture Content on Direct Shear Tests for Clay-Sand Mixtures. *Journal of Advances in Materials Science and Engineering*, pp. 1-8, December, 21.
- Nam S, Gutierrez M, Diplas P, Petrie J, 2011. Determination of the shear strength of unsaturated soils using the multistage direct shear test. *Engineering Geology*, 122(3-4): 272-280.
- Saito R, Fukuoka H, Sassa K, 2006. Experimental Study on the Rate Effect on the Shear Strength, Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides.
- Vallejo LE, Mawby R, 2000. Porosity influence on the shear strength of granular material–clay mixtures. *Eng Geol.* 58(2):125–136.
- Sezer A, Altun S, Göktepe AB, 2011. Relationships between shape characteristics and shear strength of sands, *Soils and Foundations*, Vol. 51, No. 5, 857–871.
- Simoni A, Houlsby GT, 2006. The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24: 523-549.
- Şekercioğlu S, 2015. Kumlu Toprakların Geoteknik Özelliklerinin Geotekstil Kullanılarak İncelenmesi. Balıkesir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, Ocak
- Wang JJ, Zhang H, Tang S, Liang Y, 2013. Effects of particle size distribution on shear strength of accumulation soil, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 139, no. 11, pp.1994–1997.
- Wang HL, Cui YJ, Lamas-Lopez F, Dupla JC, Canou J, Calon N, Saussine G, Aïmedieu P, Chen RP, 2017. Effects of inclusion contents on resilient modulus and damping ratio of unsaturated track-bed materials. *Can. Geotech. J.* 54 (12): 1672–1681. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0673>.
- Wang HL, Cui YJ, Lamas-Lopez F, Calon N, Saussine G, Dupla JC, Canou J, Aïmedieu P, Chen RP, 2018a. Investigation on the mechanical behavior of track-bed materials at various contents of coarse grains. *Constr. Build. Mater.* 164 (Mar): 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.209>.
- Wang HL, Cui YJ, Lamas-Lopez F, Dupla JC, Canou J, Calon N, Saussine G, Aïmedieu P, Chen RP, 2018b. Permanent deformation of track-bed materials at various inclusion contents under large number of loading cycles. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 144 (8): 04018044. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001911](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001911).
- Wichtmann T, Triantafyllidis T, 2009. Influence of the grain-size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus G_{max} . *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 135 (10): 1404 – 1418. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000096](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000096).
- Wichtmann T, Triantafyllidis T, 2013. Effect of uniformity coefficient on G/G_{max} and damping ratio of uniform to well-graded quartz sands. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 139 (1): 59–72. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000735](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000735).