

KIZILIRMAK KUMUNUN DRENAJSIZ MONOTONİK KAYMA BİRİM DEFORMASYON DAVRANIŞI

CONSOLIDATED UNDRAINED MONOTONIC SHEARING RESPONSE OF KIZILIRMAK SAND

Elife ÇAKIR¹, Kemal Önder ÇETİN²

ÖZET

Kızılırmak kumunun drenajsız kayma mukavemet davranışı konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli laboratuvar deneyleri ile incelenmiştir. Bağlı sıklıkları % 35-45-60-75 ve 80 olarak değişen ve nemli sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan numuneler 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa hücre basınçları altında konsolide edilmiş ve sonrasında drenajsız yüklemeye maruz bırakılmıştır. Deney sırasında eksenel yük, hücre basıncı, numune boşluk suyu basıncı, eksenel deformasyon değerleri izlenmiştir. Sonuçlar, deney süresince numunenin eksenel yükleme, birim deformasyon, boşluk suyu basınç birikiminin izlenmesine imkan veren ve gerilme izini yenilme zarfı ile ilişkilendirebilen 4 yönlü grafik formatı kullanılarak sunulmuştur. Bu veriler esas alınarak, Kızılırmak kumu için gerilme ve bağlı sıklık ile değişen efektif kayma mukavemet açısı değeri belirlenerek, literatürdeki mevcut veriler ile kıyaslamalı sunulmuştur. Kızılırmak kumunun köşeli dane yapısı nedeni ile belirlenen değerlerin literatürdeki değerlerin üst sınırına yaklaştığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: üç eksenli deney, konsolidasyonlu-drenajsız deney, içsel sürtünme açısı, Kızılırmak kumu

ABSTRACT

The undrained shearing response of locally available Kızılırmak sand is assessed through consolidated-undrained triaxial laboratory tests. The samples with relative densities of 35-45-60-75 ve 80 %, and prepared by wet tamping method, are consolidated under 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa cell pressures, followed by undrained loading. Throughtout testing, axial load, cell pressure, pore pressure and axial deformation responses are monitored. Test results are presented by four-way plots, which enable the individual variations of axial load, cell pressure, pore water pressure and axial deformation along with the progress of the stress path relative to failure envelope. On the basis of test results, stress and relative-density dependent effective stres based angles of shearing resistance

¹ M.Sc., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, cakire@metu.edu.tr

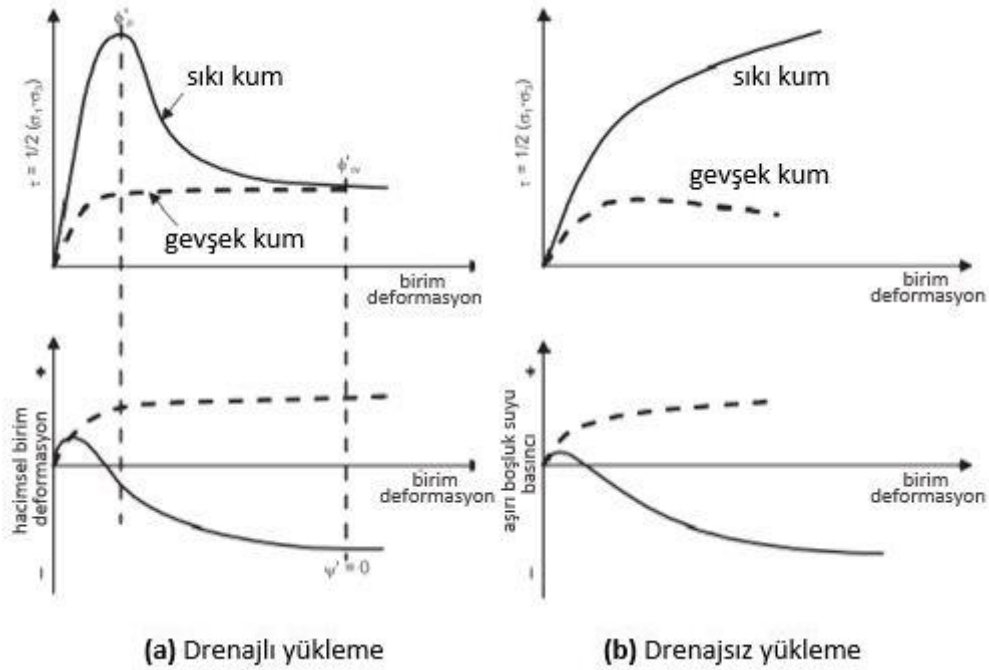
² Prof. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, ocetin@metu.edu.tr

are estimated, which are later compared with available literature. Due to their angular shape, Kızılırmak sands' angle of shearing resistance values are observed to be closer to the upper limits of available literature.

Keywords: triaxial test, consolidated-undrained triaxial test, friction angle, Kızılırmak sand

1. GİRİŞ

Zeminler değişen gerilme ve sıklık durumlarında farklı mukavemet ve rijitlik davranışları sergilerler. Gerilme ve sıklık durumları birlikte çalışarak zeminin genleşme ve oturma davranışını belirler. Gerilme ve sıklık durumlarına ek olarak yükleme ve drenaj koşulları da zeminlerde davranışa etki eder. Daneli zeminlerin sıkı veya gevşek olarak tarifenmesi ve doğal olarak bu duruma bağlı birim deformasyon tepkileri, gerilme ve sıklık durumlarına ek olarak yükleme hızı ve drenaj koşullarına da bağlıdır. Şekil 1'de farklı yükleme koşulları altında sıkı ve gevşek zemin birim deformasyon tepkileri sunulmuştur. Drenaj koşullarındaki değişikliklerle aynı sıklıktaki kum numunenin pekleşme veya yumuşama davranışı sergilemesi dikkat çekicidir.



Şekil 1. Drenajlı ve drenajsız yükleme altında gevşek ve sıkı zemin tepkileri

Drenajlı yükleme altındaki gevşek kumlarda artan gerilme ile oluşan boşluk suyu basıncı hızla dağılır ve sonrasında zeminde hacimsel küçülme gözlemlenir. Bu davranışta belli bir tepe mukavemeti gözlenmez. Zemin kritik duruma ulaşana kadar pekleşme tepkisi görülür. Öte yandan, drenajsız yükleme altında hacim değişmez; ancak pozitif değerli aşırı boşluk suyu basınçları oluşur. Aşırı boşluk suyu birikimi efektif gerilme durumunu; dolayısıyla zeminin mukavemetini ve gerilme tepkilerini kontrol eder. Drenajsız yüklemede gevşek kum bir tepe mukavemetine ulaşır ve daha sonra artan birim deformasyon ile birlikte mukavemet azalarak kritik durum seviyelerine yakınsar.

Sıkı kumlar drenajlı yükleme altında küçük birim deformasyonlarda hacimsel küçülmeye uğrarken birim deformasyonlar arttıkça genleşmeye başlar. Yükleme sırasında birim deformasyon ile birlikte önce bir tepe mukavemeti görülürken daha sonra artan birim deformasyonlarla birlikte mukavemet kritik durum mukavemetine yakınsar. Drenajsız yükleme altında ise zeminde herhangi bir hacim değişimi gözlemlenmezken negatif aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu görülür. Aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu efektif gerilmeleri kontrol ederken; efektif gerilme de zeminin mukavemet ve gerilme tepkilerini kontrol eder. Sıkı kumlar drenajsız yükleme altında iken bir tepe mukavemeti göstermezler. Artan birim deformasyon ile birlikte zemin kritik duruma ulaşana kadar pekleşme tepkisi görülür.

Bu bildiri kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda farklı bağıl sıklıklardaki ve farklı hücre basınçlarına konsolide edilen Kızılırmak kumunun drenajsız yükleme altındaki davranışı incelenmiş olup efektif kayma mukavemet açısı hesaplanmıştır.

2. DENEY PROSEDÜRÜ VE SONUÇLARI

Kızılırmak kumunun drenajsız monotonik kayma birim deformasyon davranışını incelemek için 20 adet monotonik birim deformasyon kontrollü, konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Kohezyonlu zeminler için sıklıkla kullanılan ASTM D4767-11 prosedürü kum numune için adapte edilerek kullanılmıştır. Deneyler farklı bağıl sıklıklarda nemli ve hedef altı sıkıştırma yöntemi kullanılarak hazırlanan ve farklı çevre basınçlarına konsolide edilen numuneler üzerinde yapılmış olup, deney programı Çizelge 1’de sunulmuştur. Deneylerde konsolidasyon aşamasından önceki suya doygun hale getirme işlemi, geri basınç yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Doyurma işleminden sonra numune hedeflenen hücre basıncına konsolide edilip daha sonra ise drenajsız şartlar altında kırılmıştır.

Çizelge 1. Konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli deney programı

Bağıl sıklık (D_R) / Konsolidasyon gerilmesi (σ'_c)				
	$\sigma'_c=50$ kPa	$\sigma'_c=100$ kPa	$\sigma'_c=200$ kPa	$\sigma'_c=400$ kPa
$D_R = \%35$	TRX_35-50	TRX_35-100	TRX_35-200	TRX_35-400
$D_R = \%45$	TRX_45-50	TRX_45-100	TRX_45-200	TRX_45-400
$D_R = \%60$	TRX_60-50	TRX_60-100	TRX_60-200	TRX_60-400
$D_R = \%75$	TRX_75-50	TRX_75-100	TRX_75-200	TRX_75-400
$D_R = \%80$	TRX_80-50	TRX_80-100	TRX_80-200	TRX_80-400

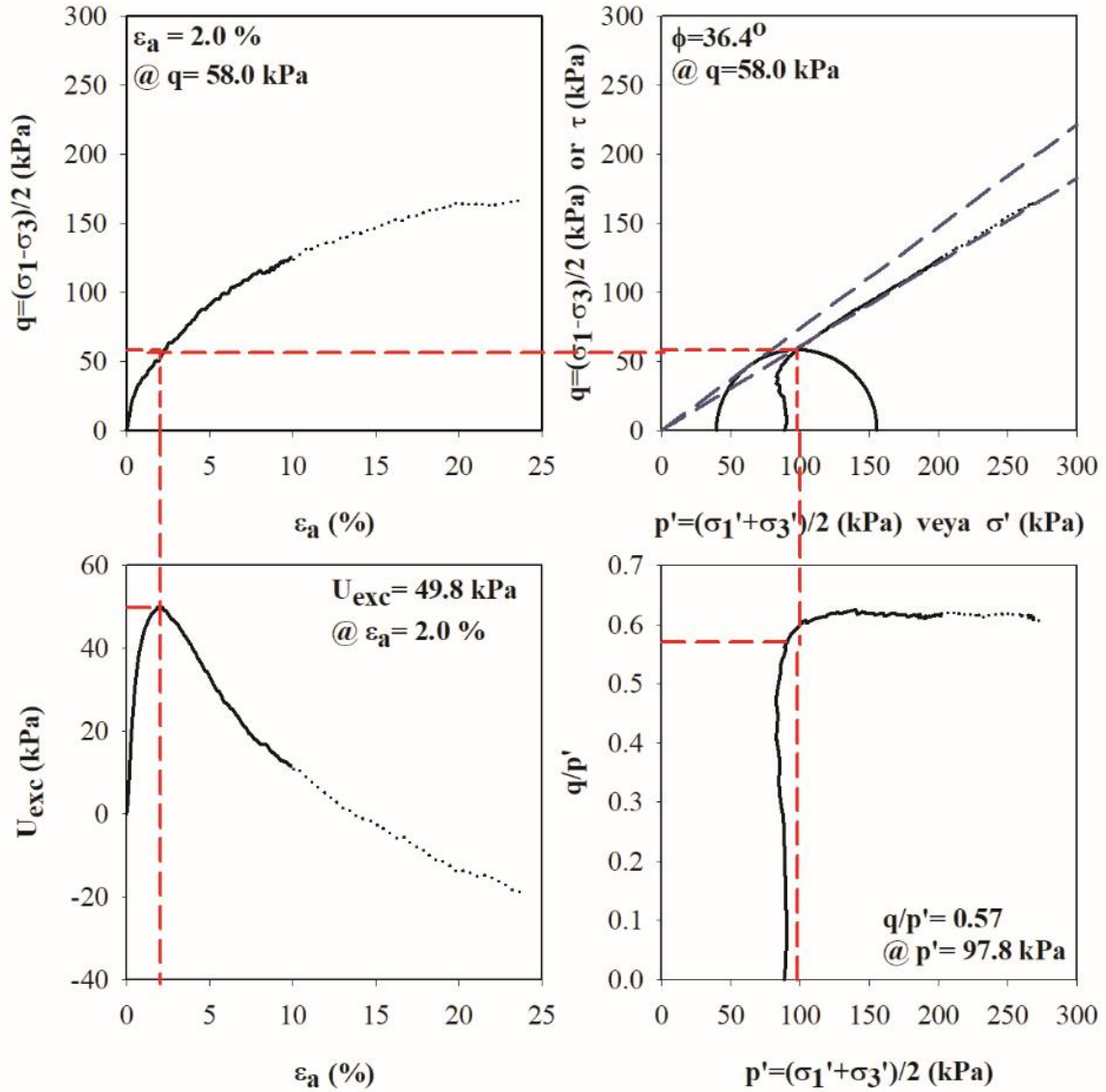
Deneysel çalışmada kullanılan Kızılırmak kumunun zemin indeks özellikleri, dane mineralojisi ve şekil bilgisi Çizelge 2’de sunulmuştur.

Çizelge 2. Kızılırmak kumunun zemin indeks özellikleri, dane mineralojisi ve dane şekil bilgisi

Özgül ağırlık, G_s	Minimum boşluk oranı, e_{min}	Maksimum boşluk oranı, e_{max}	Ortalama dane boyu, D_{50} (mm)	Üniformluk katsayısı, C_u	Eğrilik katsayısı, C_c	Küresellik, S	Yuvarlaklık, R	Baskın mineral
2.65	0.45	0.80	1.20	6.87	0.86	0.60	0.26	Quartz

Her bir deney sonucunda eksenel birim deformasyon (ϵ_a), deviatorik gerilmenin yarısı (q), ortalama efektif gerilme (p') ve aşırı boşluk suyu basıncı (u_{exc}) hesaplanarak sonuçlar dört yönlü grafik formatı kullanılarak sunulmuştur. Dört yönlü grafik formatı, deney süresince

numunenin eksenel yükleme, birim deformasyon, boşluk suyu basınç birikiminin izlenmesine imkan veren ve gerilme izini yenilme zarfı ile ilişkilendirebilen bir grafik formatıdır. Yenilme gerilmesi maksimum eğim (obliklik) kriterine göre belirlenmiştir ve yenilme kriteri olarak Mohr-Coulomb yenilme kriteri kullanılmıştır. 4 yönlü grafiğe örnek olarak % 45 bağıl sıklıkta hazırlanmış ve 200 kPa'a konsolide edilmiş Kızılırmak kumunun davranışı Şekil 2'de sunulmuştur. Tüm deneylerin dört yönlü grafikleri ise Çakır (2020)'de bulunabilir.



Şekil 2. Dört yönlü grafik örneği (TRX_45-100)

Deneysel çalışmanın sonuçları Çizelge 3'te bağıl sıklık (D_R), başlangıç boşluk oranı (e_0), konsolidasyon gerilmesi (σ'_c), konsolidasyon sonrası boşluk oranı (e_c), yenilme anındaki eksenel birim deformasyonu ($\varepsilon_{a, failure}$) ve efektif kayma mukavemet açısı (ϕ') olarak özetlenmiştir.

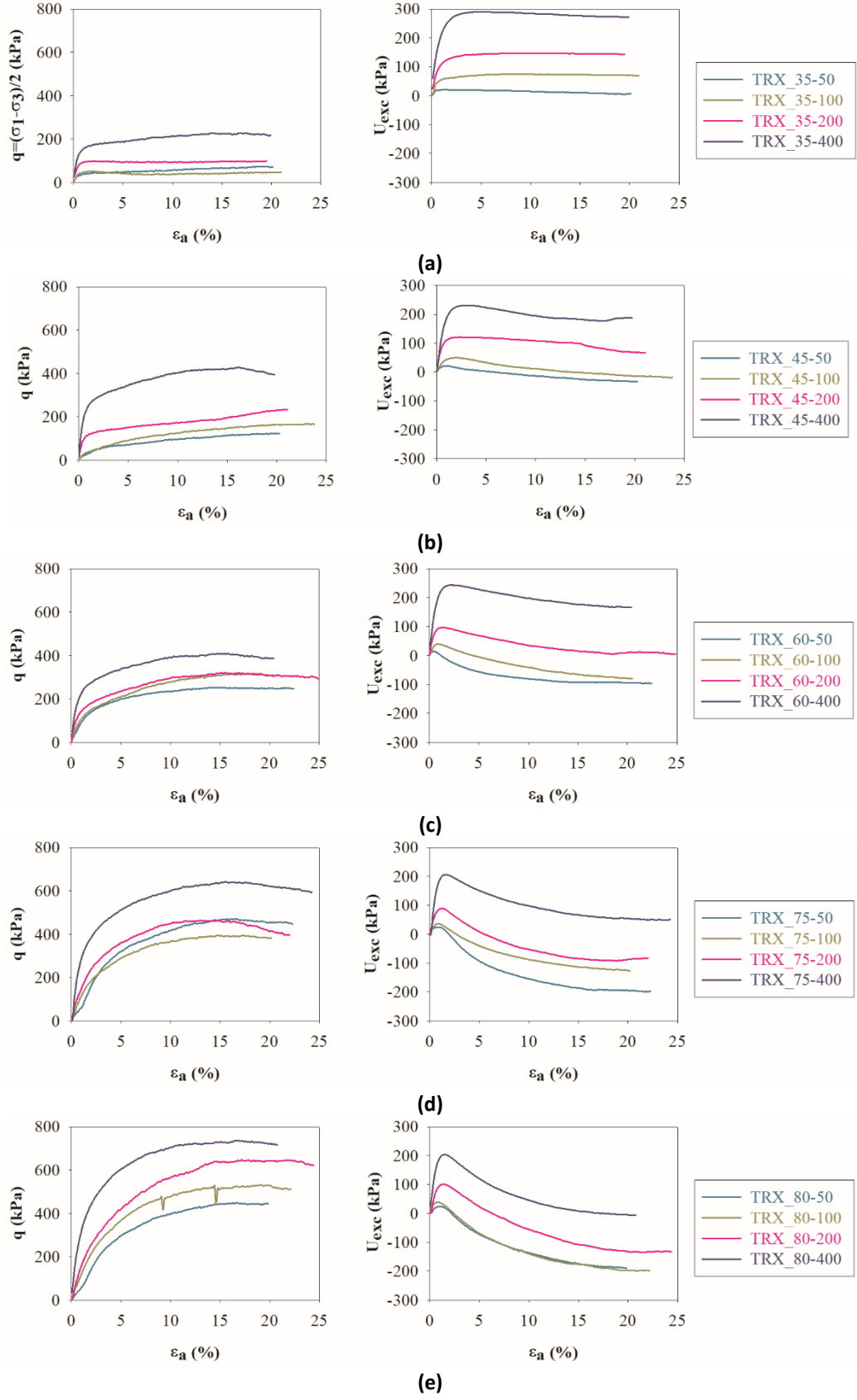
Çizelge 3. Üç eksenli deneylerin sonuçlarının özeti

Test Name	$D_R(\%)$	e_0	$\sigma'_c (kPa)$	e_c	$\varepsilon_{a,failure} (\%)$	$\phi'(^{\circ})$
TRX_35-50	34	0.681	53.5	0.672	1.3	36.4
TRX_35-100	35	0.678	97.6	0.657	2.0	36.3
TRX_35-200	36	0.674	97.6	0.640	2.0	35.4
TRX_35-400	34	0.682	398.9	0.612	4.1	38.7
TRX_45-50	46	0.641	47.7	0.634	1.5	36.2
TRX_45-100	45	0.643	88.8	0.624	2.0	36.4
TRX_45-200	47	0.636	203.1	0.607	2.0	37.8
TRX_45-400	47	0.636	397.7	0.590	2.6	40.2
TRX_60-50	59	0.595	50.7	0.589	0.8	40.5
TRX_60-100	60	0.591	99.3	0.577	1.1	40.4

Çizelge 3 (devam). Üç eksenli deneylerin sonuçlarının özeti

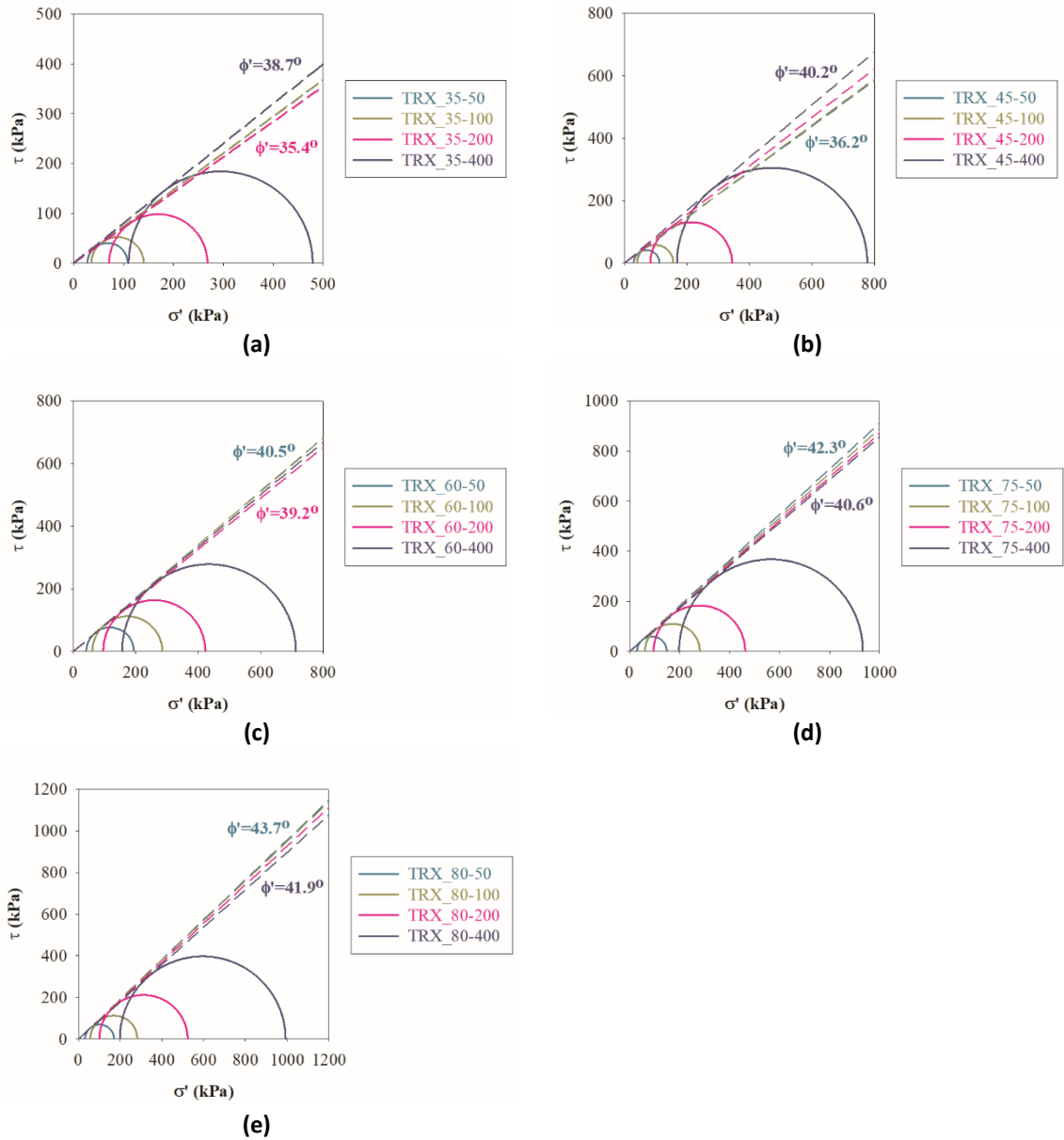
Test Name	$D_R(\%)$	e_0	$\sigma'_c (kPa)$	e_c	$\varepsilon_{a,failure} (\%)$	$\phi'(^{\circ})$
TRX_60-200	60	0.592	191.8	0.567	1.5	39.2
TRX_60-400	59	0.594	399.9	0.558	2.1	39.8
TRX_75-50	74	0.544	52.6	0.538	0.9	42.3
TRX_75-100	72	0.550	96.9	0.539	1.0	41.6
TRX_75-200	73	0.545	184.5	0.524	1.3	41.0
TRX_75-400	73	0.547	402.7	0.519	1.8	40.6
TRX_80-50	81	0.519	53.8	0.514	1.2	43.7
TRX_80-100	83	0.512	94.0	0.499	0.9	43.5
TRX_80-200	83	0.511	199.8	0.486	1.5	42.8
TRX_80-400	82	0.516	400.7	0.486	1.5	41.9

Hücre gerilmesinin kayma tepkisi üzerindeki davranışını anlayabilmek için aynı bağıl sıklıkta hazırlanmış; ancak farklı çevre gerilmelerine konsolide edilmiş numunelerin deney sonuçları birlikte incelenmiş olup ve deviatorik gerilmelerin yarısına (q) karşılık eksenel birim deformasyon (ε_a) ve aşırı boşluk suyu basıncına karşılık (u_{exc}) eksenel birim deformasyon (ε_a) grafikleri şeklinde Şekil 3'te sunulmuştur. Bu şekilden de anlaşılaçağı üzere literatürle de uyumlu olarak artan çevresel basınç ile birlikte numunenin kayma mukavemeti de artmaktadır. Aşırı boşluk suyu basıncına karşın eksenel birim deformasyon grafikleri incelendiğinde literatür ile uyumlu olarak artan çevresel basınç ile birlikte genleşme oranında bir azalma olduğu görülmektedir (Bishop, 1966; Bolton, 1986; Andersen ve Schjetne, 2013). Genleşme oranı drenajsız testte negatif boşluk suyu basıncı oluşumu ile ilişkilendirilerek bu yorum yapılmıştır.



Şekil 3. Kızılırmak kumunun a)%35, b)%45, c)%60, d)%75 ve e)%80 bağıl sıklılıklarda hazırlanmış ve 50-100-200-400 kPa çevre gerilmelerine konsolide edilmiş numunelerinin q - ϵ_a ve u_{exc} - ϵ_a grafikleri

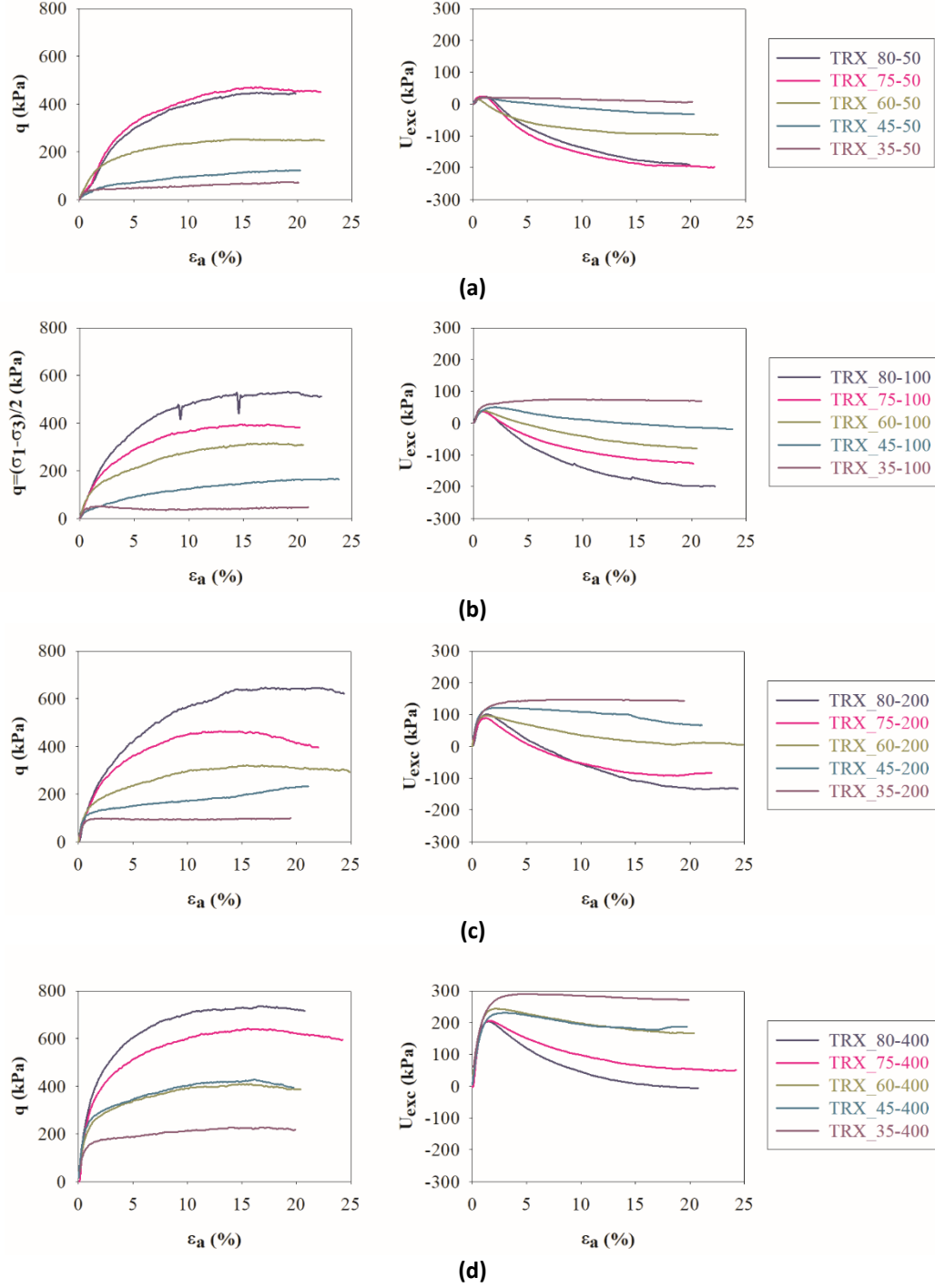
Çevresel gerilmenin kayma mukavemeti üzerindeki etkisini görebilmek adına ise aynı bağıl sıklıkta hazırlanmış ancak farklı çevre gerilmelerine konsolide edilmiş numunelerin Mohr daireleri ve Mohr-Coulomb yenilme kriteri esas alınarak bulunan yenilme zarfları birlikte incelenmiş olup Şekil 4'te sunulmuştur. Kayma mukavemet açısı artan efektif gerilmeler ile birlikte azalmaktadır. Bunun nedeni ise artan gerilmelerde dane pürüzlülüğünün azalması ve ileri gerilmelerde köşelerinin kırılmaya başlaması ve yüksek gerilmelerde genleşme davranışının bastırılması olarak gösterilmiştir (Bishop, 1966; Bolton, 1986; Andersen ve Schjetne, 2013). Kızılırmak kumunun da literatürle uyumlu olarak çoğunlukla bu davranışı gösterdiği Şekil 4'ten anlaşılmaktadır.



Şekil 4. Kızılırmak kumunun a)%35, b)%45, c)%60, d)%75 ve e)%80 bağıl sıklıklarda hazırlanmış ve 50-100-200-400 kPa çevre gerilmelerine konsolide edilmiş numunelerinin Mohr daireleri ve yenilme zarfları

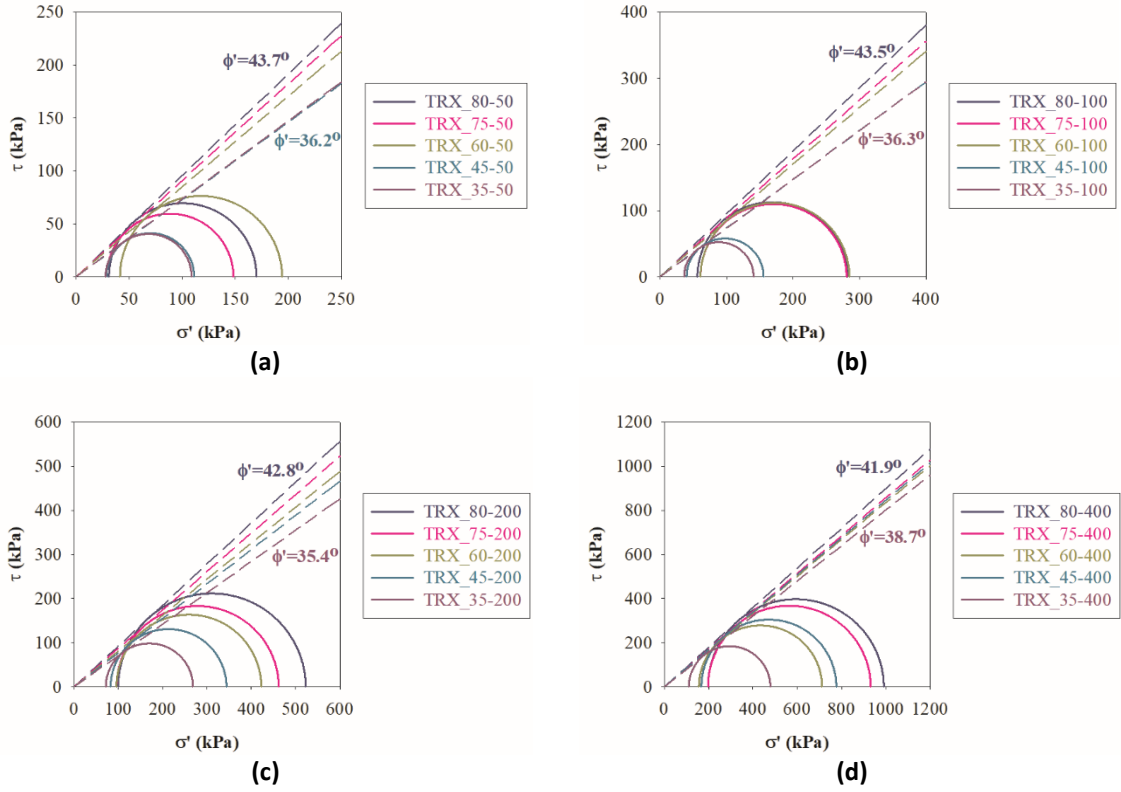
Bağıl sıklığın kayma tepkisi üzerindeki etkisini anlayabilmek için aynı çevre basıncına konsolide edilmiş; ancak farklı bağıl sıklıklarda hazırlanmış numunelerin deney sonuçları

birlikte incelenmiş ve deviatorik gerilmelerin yarısına (q) karşılık eksenel birim deformasyon (ε_a) ve aşırı boşluk suyu basıncına (u_{exc}) karşılık eksenel birim deformasyon (ε_a) grafikleri şeklinde Şekil 5'te sunulmuştur. Genleşme oranındaki artış numunenin kayma mukavemetini de artırmaktadır ve aynı çevresel basınç altında genleşme oranı bağlı sıklıkla doğru orantılıdır. Bu nedenle, şekillerden de anlaşılacağı üzere, bağlı sıklık arttıkça genleşme oranı ve dolayısıyla kayma mukavemeti artmaktadır.



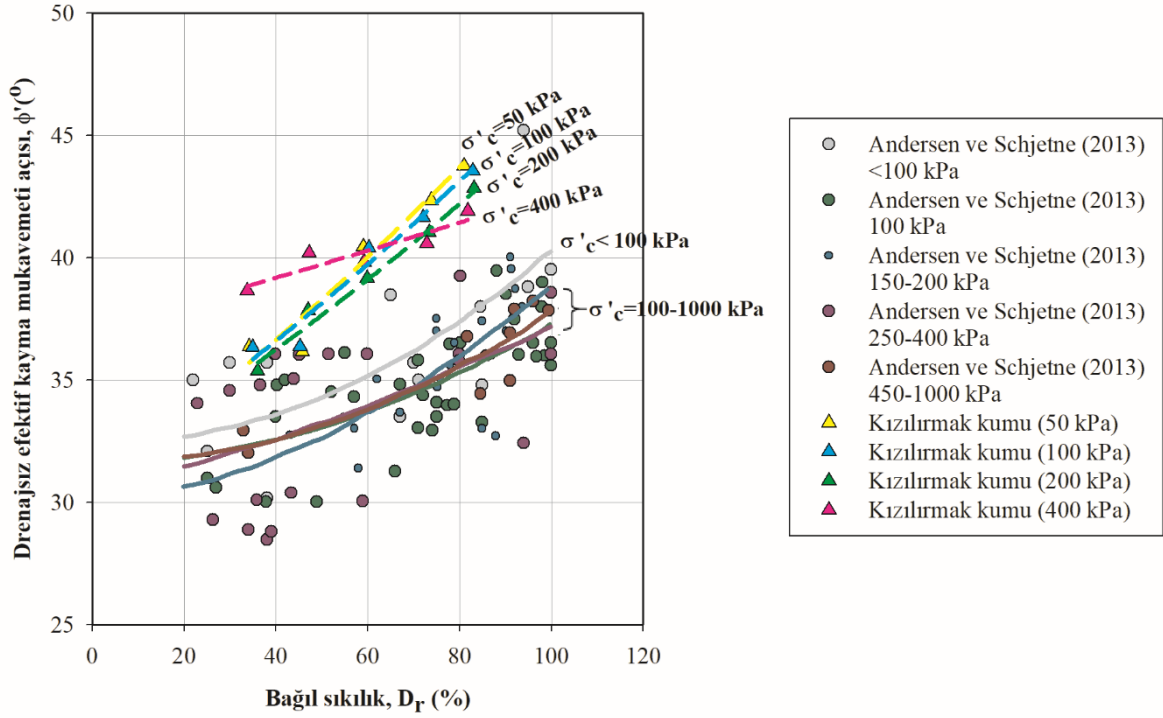
Şekil 5. Kızılırmak kumunun a)50 kPa, b)100 kPa, c)200 kPa ve d)400 kPa çevre gerilmelerine konsolide edilmiş ve %35-45-60-75-80 bağlı sıklıklarda hazırlanmış numunelerinin q - ε_a ve u_{exc} - ε_a grafikleri

Bağıl sıklığın kayma mukavemeti üzerindeki etkisini görebilmek adına ise aynı çevresel basınca konsolide edilmiş ancak farklı bağıl sıklıklarda hazırlanmış numunelerin Mohr daireleri ve yenilme zarfları birlikte incelenmiş olup Şekil 6'da sunulmuştur. Şekilden de anlaşıldığı üzere, literatürle de uyumlu olarak, kayma mukavemet açısı artan bağıl sıklıkla birlikte artmaktadır (Bishop, 1966; Cornforth, 1973; Bolton, 1986; Andersen ve Schjetne, 2013).



Şekil 6. Kızılırmak kumunun a)50 kPa b)100 kPa c)200 kPa ve d)400 kPa çevre gerilmelerine konsolide edilmiş ve %35-45-60-75-80 bağıl sıklıklarda hazırlanmış numunelerinin Mohr daireleri ve yenilme zarfları

Kızılırmak kumunun farklı bağıl sıklıklardaki ve konsolidasyon gerilmelerindeki efektif kayma mukavemet açıları Andersen ve Schjetne (2013) çalışmasında sunulan veri tabanı ile karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Andersen ve Schjetne (2013) veri tabanındaki ϕ' değerlerinin Kızılırmak kumu değerleri ile karşılaştırması

Kayma mukavemet açısı artan bağıl sıklıkla artarken, artan konsolidasyon gerilmesi bu artışı azaltmaktadır. Kızılırmak kumunun efektif kayma mukavemet açısının bağıl sıklık ve konsolidasyon gerilmesi ile değişimi literatür ile uyum göstermektedir ancak Şekil 7'den de görüldüğü gibi kayma mukavemet açısı değerleri Andersen ve Schjetne (2013)'teki efektif kayma mukavemeti değerlerine göre yüksektir. Bu yüksek kayma mukavemeti açısı Kızılırmak kumunun köşeli dane yapısı ile ilişkilendirilmiştir. Köşeli dane yapısı kesme sırasında genleşmeye neden olduğu için kayma mukavemet açısı köşeli zeminlerde daha yüksektir. Genleşme açısına ek olarak daneleri köşeli olan zeminlerin kritik durum kayma açıları da yuvarlak daneli zeminlere göre daha yüksektir (Cho vd., 2006).

3. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında Kızılırmak kumunun drenajsız monotonik kayma birim deformasyon davranışı incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda efektif kayma mukavemet açısı gevşek numuneler için 35.5° - 38.5° arasında iken sıkı numuneler için 42° - 44° aralığında hesaplanmıştır. Bu kayma mukavemet açılarının literatürde çalışılan diğer kumların kayma mukavemet açılarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Yapılan araştırmalar sonucunda bu farkın nedeninin Kızılırmak kumunun danelerinin köşeli yapısı olduğu anlaşılmıştır. Kızılırmak kumunun yuvarlaklığı Cho vd. (2006)'da önerilen yöntem ile 0.26 olarak hesaplanmıştır. Yine aynı çalışmada kritik durum açısı ile dane yuvarlaklığı ilişkilendirilmiştir ve yuvarlaklığı 0.26'ya denk gelen kritik durum açısı aralığı 37° - 39.5° olarak belirtilmiştir. Bu yüksek kritik durum açısı Kızılırmak kumunun yüksek çıkan efektif kayma mukavemeti açılarından altında yatan nedeni açıklamaktadır.

KAYNAKLAR

- Andersen, K.H. ve Schjetne, K. (2013), "Database of friction angles of sand and consolidation characteristics of sand, silt, and clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(7). doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000839.
- ASTM International (2011), "D4767–11 Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils", *ASTM Standards*. doi: 10.1520/D4767-11.2.
- Bishop, A.W. (1966), "The strength of soils as engineering materials", *Géotechnique*, 16(2). doi: 10.1680/geot.1966.16.2.91.
- Bolton, M.D. (1986), "The strength and dilatancy of sands", *Geotechnique*, 36(1). doi: 10.1680/geot.1986.36.1.65.
- Cho, G.C., Dodds, J. ve Santamarina, J.C. (2006), "Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(5). doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591).
- Cornforth, D.H. (1973), "Prediction of Drained Strength of Sands from Relative Density Measurements". Available at: www.astm.org.
- Çakır, E. (2020), "Shearing and volumetric straining response of Kızılırmak sand", M.Sc. Thesis, METU.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
τ	Kayma mukavemeti	ϕ'	Efektif kayma mukavemeti açısı
σ'	Efektif gerilme	ϕ_{cv}	Kritik durum açısı
σ_1	Maksimum asal gerilme	ϕ_p	Tepe kayma mukavemeti açısı
σ_3	Minimum asal gerilme	ψ	Genleşme açısı
σ'_1	Maksimum efektif asal gerilme	D_R	Bağıl sıklık
σ'_3	Minimum efektif asal gerilme	σ'_c	Konsolidasyon gerilmesi
G_s	Özgül ağırlık	D_{50}	Ortalama dane boyu
e_{min}	Minimum boşluk oranı	C_u	Üniformluk katsayısı
e_{max}	Maksimum boşluk oranı	C_c	Eğrilik katsayısı
S	Küresellik	R	Yuvarlaklık
ε_a	Eksenel birim deformasyon	p'	Ortalama efektif gerilme
q	Deviatorik gerilmenin yarısı	u_{exc}	Aşırı boşluk suyu basıncı
e_0	Başlangıç boşluk oranı	e_c	Konsolidasyon sonrası boşluk oranı
$\varepsilon_{a, failure}$	Yenilme anındaki eksenel birim deformasyon		

