

KIZILIRMAK KUMUNUN HACİMSEL SIKIŞMA VE DANE KIRILMA DAVRANIŞI

VOLUMETRIC COMPRESSION AND PARTICLE CRUSHING RESPONSES OF KIZILIRMAK SAND

Elife ÇAKIR¹, Kemal Önder ÇETİN²

ÖZET

Kohezyonsuz zeminlerin yüksek gerilmeler altındaki davranışı zemin daneciklerinin bu gerilmeler altında kırılması nedeniyle ilgi çekicidir. Bu çalışma kapsamında, Kızılırmak kumunun hacimsel birim deformasyon davranışının ödometre deneyleri ile incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaca yönelik olarak, “gevşek” ve “sıkı” kum aralığına düşecek şekilde farklı bağıl sıklıklarda numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 17 kPa’dan başlayıp 33 MPa’a kadar artan ve yük kademeleri arasında boşaltılıp yeniden yüklenerek test edilmiştir. Deney sonuçları esas alınarak Kızılırmak kumunun hacimsel yenilme dayanımı ve C_c indis değerleri belirlenerek, mevcut literatürle karşılaştırılmıştır. Bu deneysel çalışmalara ek olarak, Sheng vd. (2008) çalışmasından esinlenilerek, kuma özel hacim-gerilme modeli geliştirilmiştir. Bu model bünyesinde Kızılırmak kumunun doğrusal olmayan hacimsel birim deformasyon davranışı boşluk oranı-ortalama efektif gerilme çift logaritma uzayında sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *bir-boyutlu hacimsel sıkışma, kum, dane kırılma dayanımı, Kızılırmak kumu, hacim-gerilme modeli*

ABSTRACT

The response of cohesionless soils under relatively large stress levels is a challenge due to crushing of granular particles under these stress levels. Within the confines of this study, it is intended to assess one-dimensional volumetric straining behavior of Kızılırmak sand by series of oedometer tests. For the purpose a number of samples with varying relative density levels, covering “loose” and “dense” responses, are re-constituted. The stress increments are chosen to start with 17 kPa and reach up to 33 MPa. Based on these test results, the volumetrical compression induced yielding strength of Kızılırmak sand along with stress-dependent C_c values are estimated, which are then compared with available literature. Additionally, inspired from the earlier work of Sheng et al. (2008), a material specific volume-stress model was developed. The model expresses the nonlinear

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

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

volumetric straining response in a double logarithmic space of void ratio versus mean effective stress.

Keywords: *one-dimensional volumetric compression, sand, particle crushing, Kızılırmak sand, volume-stress model*

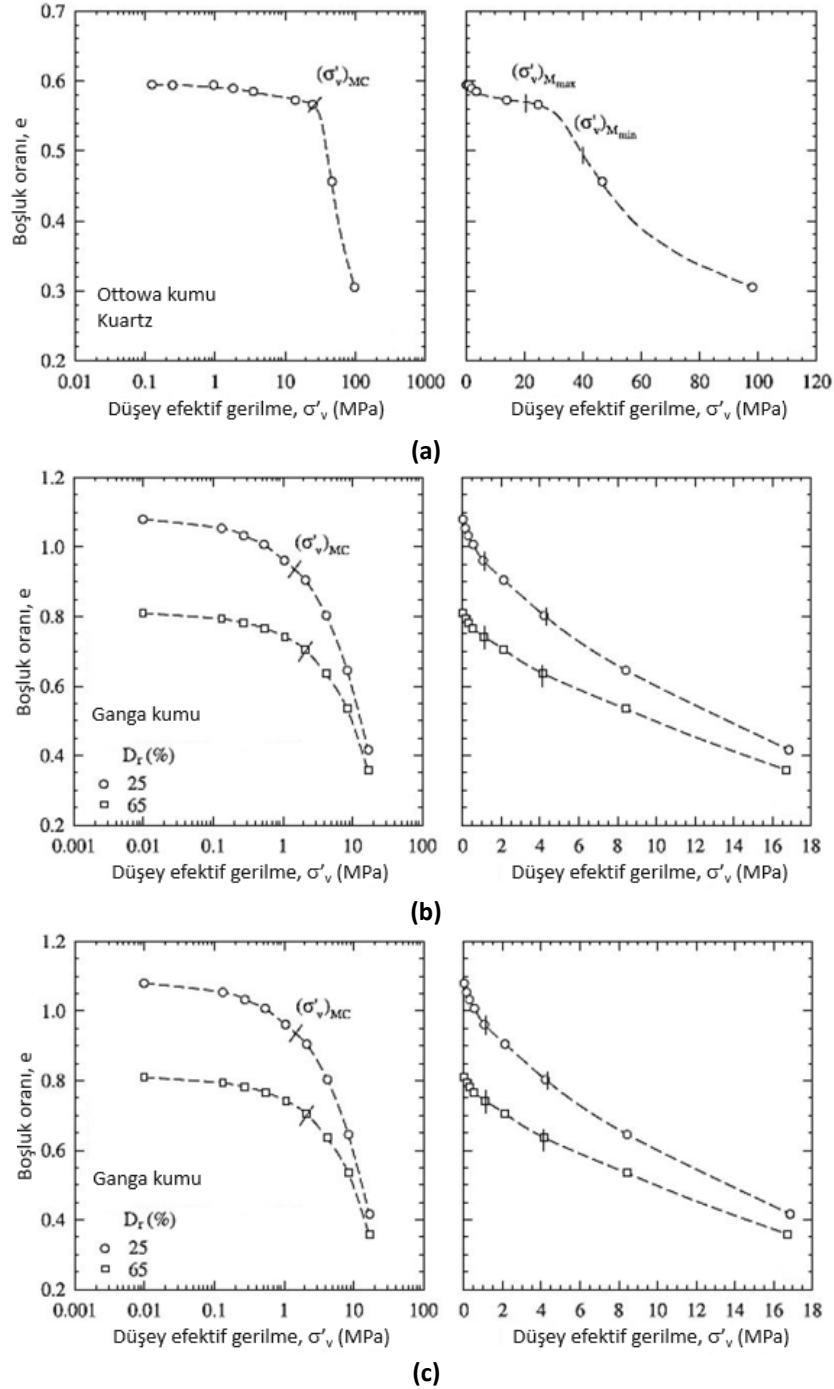
1. GİRİŞ

Efektif gerilme değişimine maruz kalan kohezyonsuz zeminlerde, daneler birbirlerine yaklaşarak, birbirleri üzerinde kayarak veya dönerek zemin iskelet yapısında değişime giderek yeniden yerleşirler. Ortaya çıkan yeni zemin iskelet yapısına göre malzemenin mukavemet ve rijitliğinde azalış veya artış gözlenebilir. Dane davranışı, i) kenetlenme ve ii) ayrışma mekanizmaları ile tariflenir. Zemin danelerinin birbirlerine yaklaşarak artan noktasal temas yükleri ile kilitlenmeleri, kenetlenme mekanizmasının temelini oluşturur. Danelerin yeniden yerleşmeleri için daneler arası kayma direncinin aşılması gereklidir. Artan yükler altında daneler arası kayma direncinin aşılması ile danelerin birbirleri üzerinde kaymaları ve dönerek yeniden yerleşmeleri hatta hasar görmeleri tetiklenir ki bu davranış ayrışma mekanizmasının temelini oluşturur. Dane hasarı üç seviyede sınıflandırılabilir: Seviye 1: dane yüzey pürüzlülüğünün aşınması; Seviye 2: dane köşelerinin kırılması; ve Seviye 3: danenin parçalanarak ezilmesi olarak nitelendirilir. (Roberts ve de Souza, 1958; Marsal, 1967; Hardin, 1985; Coop, 1990; Pestana ve Whittle, 1995; Nakata vd., 2001b; Chuhan vd., 2002; Chuhan vd., 2003).

Zeminlerin hacimsel davranışı, danelerin kenetlenme ve ayrışma mekanizmalarının net etkisi tarafından kontrol edilir. Kenetlenme mekanizması ayrışma mekanizmasına göre daha baskın ise zeminlerin hacimsel rijitlikleri artarken, ayrışma mekanizması daha baskın olduğu durumlarda hacimsel rijitlik azalır. Eğer bu iki mekanizma dengede ise rijitlikte bir değişim görülmez (Chuhan vd., 2002, Chuhan vd., 2003; Mesri ve Vardhanabhuti, 2009).

Kohezyonsuz malzemelerin hacimsel birim deformasyon davranışı birincil ve ikincil sıkışma olarak ikiye ayrılabilir. Malzemeye uygulanan efektif gerilmelerdeki artış sonucu meydana gelen ani-elastik hacimsel sıkışma birincil sıkışmayı, sabit yük altındaki zamana bağlı sıkışma ise ikincil sıkışmayı oluşturur. Bu açılardan bakıldığında kohezyonlu ve kohezyonsuz zemin davranışları arasında sanılanın aksine bir benzerlik olduğu aşikardır. Mesri ve Vardhanabhuti (2009) daneli zeminlerin birincil sıkışma davranışını Tip A, Tip B ve Tip C olarak üçe ayırır. Tip A davranışı kenetlenme mekanizmasının ayrışma mekanizmasına göre daha baskın olduğu ve rijitliğin arttığı ilk evre, ayrışma mekanizmasının kenetlenme mekanizmasına göre daha baskın olduğu ve rijitliğin azaldığı ikinci evre, ve kenetlenme mekanizmasının yeniden baskın olduğu ve rijitliğin arttığı üçüncü evre olarak tariflenir. A-tipi sıkışma davranışı genellikle yuvarlak, temiz ve yenilme gerilimi yüksek olan, kuartz kumu gibi zeminlerde görülür (Nakata vd., 2001b; Chuhan vd., 2002). B-tipi sıkışma davranışı A ve C-tipleri arasındaki geçiş davranışdır. A-tipi sıkışma davranışı gibi üç evreden oluşur. İlk evrede kenetlenme mekanizması baskın olduğundan rijitlik gerilmelerin artmasıyla artarken ikinci evrede kenetlenme ve ayrışma mekanizmaları dengede olduğundan rijitlikte bir

değişim gözlemlenmez. Son evrede ise rijitlik yeniden, gerilmelerin artışı ile birlikte artmaya başlar. (Nakata vd., 2001a; Nakata vd., 2001b; Chuhan vd., 2003). Rijitlikte bir azalış görülmemesi yönüyle C-tipi sıkışma davranışına benzemektedir. Bu geçiş sıkışma davranışı, Tip A ve Tip C ile karşılaştırıldığında daha az görünür. C-tipi sıkışma davranışında rijitlikte azalma görülmez, tüm yükleme boyunca kenetlenme mekanizması baskındır. Tip C sıkışma davranışı genellikle karbonatlı kumlar gibi köşeli ve yenilme gerilimi düşük olan zeminlerde görülür (Hardin, 1985; Chuhan vd., 2002, Chuhan vd., 2003). Şekil 1’de A, B ve C tipi sıkışma davranışlarına örnekler gösterilmiştir.



Şekil 1. a) Tip-A, b) Tip-B, ve c) Tip-C sıkışma davranışlarına örnekler (Mesri ve Vardhanabhuti, 2009’den esinlenilmiştir.)

Zemin danelerinde meydana gelen kırılma ve ufalanmalar kalıcı deformasyona neden olur; ve bu deformasyonlar da zeminin sıkışabilirliğinin artmasına neden olur. Bu nedenle danelerin kırılması yarı logaritmik uzayda çizilen gerilme-boşluk oranı grafiğinde ani bir değişime sebep olur. Grafikteki bu ani değişim noktası Roberts ve de Souza (1958) tarafından yapılan çalışmada “akma gerilmesi” olarak adlandırılırken, farklı araştırmacılar tarafından (örneğin Roberts 1964) ise “kırılma noktası” olarak da adlandırmıştır. Bu akma gerilmesi araştırmacılar tarafından zemin danelerinin kırılmaya başladığı gerilme olarak tanımlanmıştır (Chuhan vd., 2003; Nakatavd. 2001b). Dane boyutu, şekli, mineralojisi, dokusu, gerilme ve sıkılık durumları, yükleme geçmişi ve yükleme tipi danelerin kırılmasını etkileyen faktörler arasında sayılabilir (Roberts ve de Souza, 1958; Hardin, 1985; Hagerty vd., 1993; Nakata, 2001a; Nakata, 2001b).

Bu çalışmada Kızılırmak kumunun yüksek gerilmeler altındaki davranışı incelenerek dane davranış mekanizması ve bu mekanizma ile ilintili zemin hacimsel davranışı anlaşılmasına çalışılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar boşluk oranı-ortalama efektif gerilme çift logaritmik uzayında sunulmuş ve bu davranış bir hacim-gerilme bünye modeli ile ifade edilmiştir. Bu çalışmalara altlık teşkil edilen deneysel çalışma ve veriler sonraki bölümde özetlenecektir.

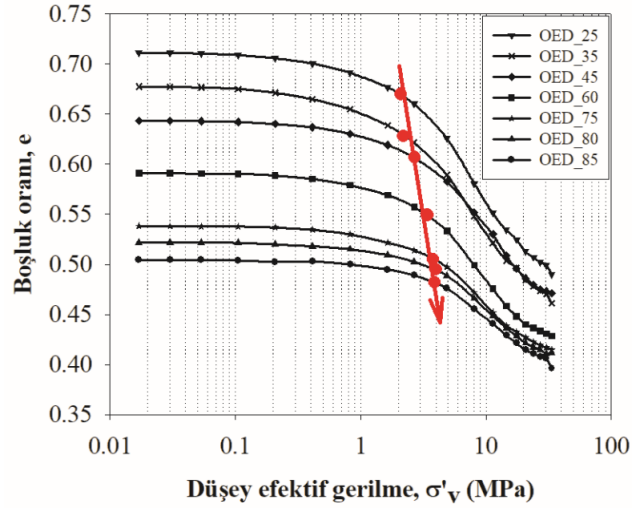
2. DENEY PROSEDÜRÜ VE SONUÇLARI

Kızılırmak kumunun hacimsel birim deformasyonunu incelemek üzere 7 adet ödometre deney setinden oluşan bir program tasarlanmıştır. Kum numuneleri % 25-35-45-60-75-80-85 bağıl sıkılıklarda hazırlanıp, 33.5 MPa düşey gerilmelere kadar yüklenmiştir. Kum numuneler istenilen bağıl sıkılıkta yağmurlama yöntemi ile hazırlanmıştır. Kohezyonlu zeminler için sıklıkla kullanılan ASTM D2435/D2435M-11 prosedürü kohezyonsuz zeminlere adapte edilerek kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler 17 kPa’dan başlayıp 33.5 MPa’a kadar artan düşey yükler altında test edilmiştir. Deney sırasında yükleme ve boşaltma tekrarları uygulanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan Kızılırmak kumunun zemin indeks özellikleri, dane mineralojisi ve şekil bilgisi Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge 1. Kızılırmak kumunun zemin indeks özellikleri, dane mineralojisi ve dane şekil bilgisi

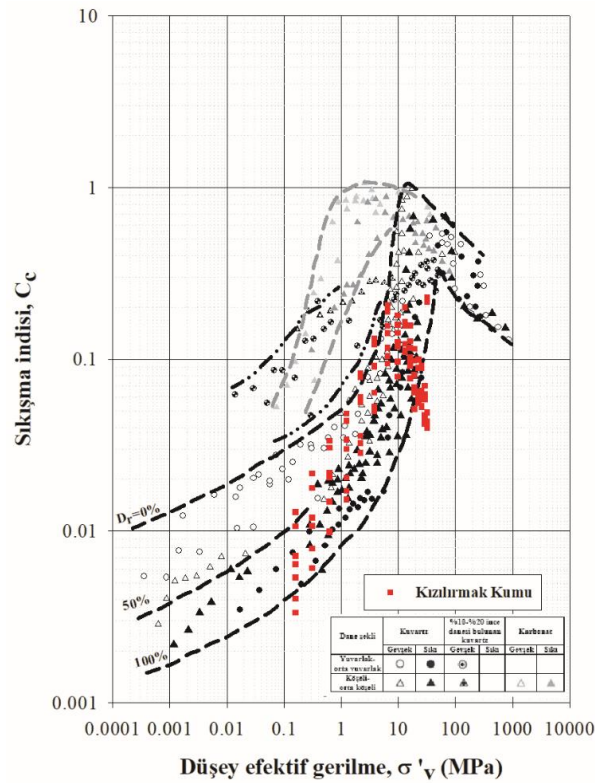
Özgül ağırlık, G_s	Minimum boşluk oranı, e_{min}	Maksimum boşluk oranı, e_{max}	Ortalama dane boyu, D_{50} (mm)	Üniformluk katsayısı, C_u	Eğrilik katsayısı, C_c	Küresellik, S	Yuvarlaklık, R	Baskın mineral
2.65	0.45	0.80	1.20	6.87	0.86	0.60	0.26	Quartz

Deney sonuçları yarı logaritmik uzayda boşluk oranına karşı efektif düşey gerilim eğrileri olarak kırmızı noktalar ile işaretlenen akma gerilmeleriyle birlikte Şekil 2’de sunulmuştur. Şekil 2’de de görüldüğü üzere akma gerilimi bağıl sıkılık arttıkça artmaktadır.



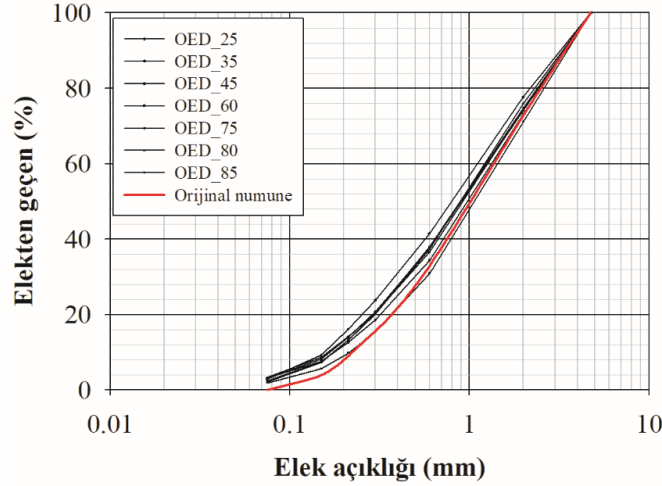
Şekil 2. Farklı bağıl sıklıklardaki boşluk oranına karşı efektif düşey gerilme eğrileri

Kızılırmak kumunun farklı bağıl sıklıklarda ve farklı düşey efektif gerilmeler altındaki sıkışma indisleri (C_c) hesaplanıp, Mesri ve Vardhanabhuti (2009) çalışmasındaki veri tabanı ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 3'te sunulmuştur. Şekilden de anlaşıldığı üzere Kızılırmak kumunun sıkışma indisi Mesri ve Vardhanabhuti (2009)'de sunulan veri tabanı ile uyumludur. Hem Şekil 2 hem de Şekil 3'ten görülebileceği üzere yaklaşık 10 MPa seviyelerinde hacimsel sıkışma azalmaya ve teğetsel rijitlik ise artmaya başlamıştır. Bu hacimsel sıkışma davranışı B-tipi sıkışma davranışı ile benzerlik göstermektedir. Ancak hacimsel sıkışmanın azaldığı bu eşik gerilme değeri Mesri ve Vardhanabhuti (2009)'de sunulan veri tabanının (15-50 MPa) alt seviyesinde kalmaktadır.



Şekil 3. Kızılırmak kumu sıkışma indislerinin Mesri ve Vardhanabhuti (2009) veri tabanı ile karşılaştırmalı sunumu

Ödometre deneyleri sonrasında dane büyüklük dağılımının değişip değişmediğinin, bir diğer ifadesi ile danelerin kırılıp kırılmadığının anlaşılabilmesi adına elek analizleri yapılmıştır. Elek analiz sonuçları yükleme öncesi durum elek analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Dane büyüklüğü dağılım eğrilerinin karşılaştırmalı sunumu

Dane büyüklüğü dağılım eğrilerinin sola ve yukarıya doğru kayması dane boyutlarındaki küçülmeye işaret etmekte olup, deney gerilmeleri altında danelerin kırıldığı anlaşılmaktadır.

3. HACİM-GERİLME MODELİ

Deney sonuçları, Sheng vd. (2008) çalışmasından esinlenilerek, hacimsel sıkışma-gerilme modeli olarak da ifade edilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen model daneli zeminlerin doğrusal olmayan hacimsel birim deformasyon davranışını, $\ln(e)$ - $\ln(p')$ uzayında sunmaktadır. Log-log uzayı yüksek gerilmelerde boşluk oranının negatif değerlere ulaşması sorununu ortadan kaldırmaktadır. Denklem 1'de sunulan ifade artan gerilmeler altında boşluk oranının e_{lim} değerine yakınsamasına imkân vermektedir.

$$\ln(e - e_{lim}) = \ln(N) - \lambda \ln(p' + p'_r) \quad (1)$$

Denklem 1'de e boşluk oranını, p' efektif ortalama gerilmeyi, p'_r izotropik gerilme eğrilerinin eğriselliğini kontrol eden öteleme gerilmesini, N birim gerilmedeki $(p' + p'_r = 1)$ boşluk oranını, λ ise izotropik gerilme eğrilerin eğimini temsil etmektedir. Bu değişkenlerden p'_r ve λ ise sırasıyla denklem 2 ve 4'te verilen bağıntılar ile hesaplanmaktadır.

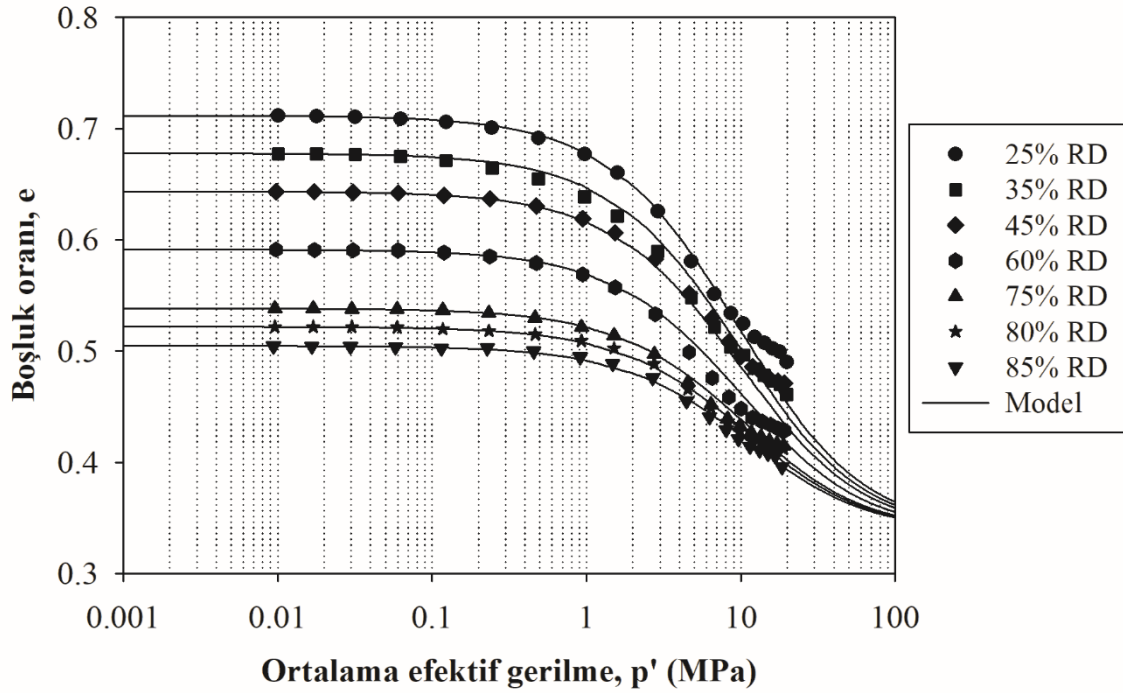
$$p'_r = \left(\frac{N}{e_0 - e_{lim}} \right)^{1/\lambda} - p'_0 \quad (2)$$

$$e_0 = \theta_1 * e_{0,test} + \theta_2 \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\theta_3}{1 + e_{0,test}} \quad (4)$$

Denklem 2’de e_0 herhangi bir bilinen p'_0 gerilmesindeki boşluk oranını temsil etmekte olup Denklem 3 ile hesaplanabilir. $e_{0,test}$ yükleme öncesi (deney başlangıcı) boşluk oranını, θ_1 , θ_2 ve θ_3 ise model sabitlerini temsil etmektedir.

Model parametreleri deneme-yanılma yöntemi kullanılarak ve Kızılırmak kumu deney sonuçları esas alınarak belirlenmiştir. Tariflenen hacimsel birim deformasyon-gerilme modeli tahminleri Kızılırmak kumu deney sonuçları kullanılarak elde edilen izotropik gerilme eğrileri ile Şekil 5’te karşılaştırılmıştır. Ortalama efektif gerilme hesaplamaları için gerekli olan yatay gerilmeler, düşey gerilmelerin sükunet toprak basıncı katsayısı (K_0) ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. Sükunet toprak basıncı katsayısı ise üç eksenli deneyler sonucunda hesaplanan içsel sürtünme açıları ile hesaplanmıştır. Kızılırmak kumu için model parametreleri Çizelge 2’de sunulmuştur.



Şekil 5. Hacim-gerilme modelinin Kızılırmak kumu deney sonuçları ile karşılaştırılması

Çizelge 2. Hacim-gerilme modelinin Kızılırmak kumu için önerilen parametreleri

N	e_{lim}	p'_0 (MPa)	θ_1	θ_2	θ_3
8	0.34	0.01	0.998	0.00097	2.10

Şekil 5’te de görüldüğü üzere hacim-gerilme modeli yaklaşık 10 MPa ortalama efektif gerilmelere kadar deney sonuçları ile mükemmel uyum içerisinde iken 10 MPa’dan daha büyük gerilmeler için bu uyum bozulmaktadır. Bu uyumsuzluk Tip B sıkışma davranışı gösteren Kızılırmak kumunun dane kırılmaları sonucunda son evreye geçişinin bu gerilim değerlerine denk gelmesi ile bağlantılıdır. Son evrede kenetlenme mekanizmasının gevşeme mekanizmasına baskın olmasıyla birlikte eğimde azalma görülmektedir ve önerilen matematiksel bağlantı bu azalmayı modellemekte yetersiz kalmaktadır.

4. SONUÇLAR

Kızılırmak kumu üzerinde gerçekleştirilen ödometre deneyleri sonucunda, kumun akma gerilmelerinin 2-4 MPa aralığında olduğu görülmüştür. Akma gerilmelerinin literatürde çalışılan diğer kumlara göre düşük olması danelerinin köşeli yapısı ile ilişkilendirilmiştir. Danelerin köşelerinin kırılması, daneleri görece yuvarlak olan zeminlerin kırılmasına göre daha düşük gerilmelerde başlamaktadır.

Hesaplanan C_c değerleri Mesri ve Vardhanabhuti (2009) veri tabanı ile karşılaştırılmıştır ve veri tabanı ile uyumlu olduğu görülmüştür. 10 MPa'dan daha yüksek gerilmelere yüklenen Kızılırmak kumu numunelerinde rijitliğin artmaya başladığı (yani C_c değerlerinin azalmaya başladığı) görülmüştür. Rijitliğin artmaya başladığı bu eşik gerilimi Mesri ve Vardhanabhuti (2009) veritabanında 15-50 MPa arasındadır. Kızılırmak kumunun hacimsel sıkışma davranışı Mesri ve Vardhanabhuti (2009)'da çalışılan Tip B davranışı ile benzerlik göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında ayrıca, Sheng vd. (2008) çalışmasında sunulan hacim-gerilme modelinden esinlenilerek geliştirilen matematiksel model ve bu modelin Kızılırmak kumu için kalibre edilmiş model parametreleri sunulmuştur. Bu parametreler kullanılarak herhangi bir bağıl sıklıktaki Kızılırmak kumu numunesinin hacim-gerilme eğrisi elde edilebilir. Model 10 MPa'dan küçük ortalama efektif gerilmelerde davranışı mükemmel yakın tahmin ederken, 10 MPa'dan (rijitliğin artmaya başladığı eşik gerilmesinden) yüksek gerilmelerde zemin davranışını ölçülenden daha sıkışabilir tahmin etmektedir.

KAYNAKLAR

- ASTM International (2011), "D2435/D2435M – 11 Standard one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading", ASTM Standards. doi: 10.1520/D2435.
- Chuhan, F.A., Kjeldstad, A., Bjørlykke ve K., Høeg, K. (2002), "Porosity loss in sand by grain crushing - Experimental evidence and relevance to reservoir quality", Marine and Petroleum Geology, 19(1). doi: 10.1016/S0264-8172(01)00049-6.
- Chuhan, F.A., Kjeldstad, A., Bjørlykke ve K., Høeg, K.(2003), "Experimental compression of loose sands: Relevance to porosity reduction during burial in sedimentary basins", Canadian Geotechnical Journal, 40(5). doi: 10.1139/t03-050.
- Coop, M.R. (1990), "The mechanics of uncemented carbonate sands", Geotechnique, 40(4). doi: 10.1680/geot.1990.40.4.607.
- Hagerty, M.M., Hite, D.R., Ullrich, C.R. ve Hagerty, D.J. (1993) "One-dimensional high-pressure compression of granular media", Journal of Geotechnical Engineering, 119(1). doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:1(1).
- Hardin, B.O. (1985), "Crushing of soil particles", Journal of Geotechnical Engineering, 111(10). doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:10(1177).
- Marsal, R.J. (1967), "Large scale testing of rockfill materials", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 93(SM2).
- Mesri, G. ve Vardhanabhuti, B. (2009), "Compression of granular materials", Canadian Geotechnical Journal, 46(4). doi: 10.1139/T08-123.

- Nakata, Y., Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Kato, Y. ve Murata, H. (2001a), "Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression", *Soils and Foundations*, 41(1). doi: 10.3208/sandf.41.69.
- Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Murata, H. (2001b), "One-dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength", *Soils and Foundations*, 41(2). doi: 10.3208/sandf.41.2_39.
- Pestana, J.M. ve Whittle, A.J. (1995), "Compression model for cohesionless soils", *Geotechnique*, 45(4). doi: 10.1680/geot.1995.45.4.611.
- Roberts, J.E. (1964), "Sand compression as a factor in oil field subsidence", Doktora tezi, MIT Teknoloji Fakültesi.
- Roberts, J.E. ve de Souza, J.M. (1958), "The compressibility of sands", *Proceedings of the American Society of Testing and Materials*, 58.
- Sheng, D., Yao, Y. Ve Carter, J.P. (2008), "A volume–stress model for sands under isotropic and critical stress states", *Canadian Geotechnical Journal*, 45(11), 1639-1645.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
C_c	Sıkışma indisi	K_0	Sükunet toprak basıncı katsayısı
C_c	Eğrilik katsayısı	N	Birim gerilmedeki boşluk oranını
C_u	Üniformluk katsayısı	p'	Efektif ortalama gerilme
D_{50}	Ortalama dane boyu	p'_r	Öteleme gerilmesi
E	Boşluk oranı	R	Yuvarlaklık
e_0	Bilinen bir ortalama efektif gerilmedeki boşluk oranı	RD, D_r	Bağıl sıklık
$e_{0,test}$	Yükleme öncesi boşluk oranı	S	Küresellik
e_{lim}	Limit boşluk oranı	λ	İzotropik gerilme eğrilenin eğimini
e_{max}	Maksimum boşluk oranı	σ'_v	Düşey efektif gerilme
e_{min}	Minimum boşluk oranı	$\theta_{1,2,3}$	Model sabitleri
G_s	Özgül ağırlık		

