

## Tekrarlı trafik yükleri altında farklı kil içeriklerine sahip orta-sıkı kum-kil karışımlarının esneklik modülünün incelenmesi

### Investigation of resilient modulus of medium-dense sand-clay mixtures with different clay contents under repeated traffic loads

Halil İbrahim Fedakar<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Abdullah Gül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 38080, Kayseri Türkiye

#### Özet

Esneklik modülü, tekrarlı trafik yükleri altında yol temel tabakalarının uzun dönem deformasyon performansının tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, bu malzeme özelliğinin doğru tayini yol tasarımlarında büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada, orta sıkı kum-kil karışımlarının esneklik modülü, dinamik üç eksenli ve kalp şekli gerilme izleri ile araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20 kil içeren kum-kil numuneleri %50 başlangıç rölatif sıklıkta hazırlanmış ve yarıklı silindirik deney cihazı kullanılarak test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre kum-kil karışımlarının esneklik modülü değerleri dinamik üç eksenli gerilme izi ile daha fazla tahmin edilmektedir. Bu durum ise orta-sıkı kum-kil karışımlarının trafik yükleri altındaki deformasyon davranışının kalp şekli gerilme izine kıyasla daha düşük tahmin edilmesine sebep olmaktadır. Bu çalışmanın bulgularına dayanarak, kum-kil karışımlarının esneklik modülünün yol tasarımları için daha doğru bir şekilde tahmin edilmesinde kalp şekli gerilme izinin göz önüne alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Esneklik modülü, Kum-kil karışımı, Kalp şekli gerilme izi, Dinamik üç eksenli gerilme izi

#### 1 Giriş

Esneklik modülü ( $M_r$ ), zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışını tanımlayan temel malzeme özelliklerinden biridir. Bundan dolayı tekrarlı trafik yüklerine maruz kalan zeminlerin deformasyon davranışını tahmin etmek için mekanik-ampirik yol tasarımlarında ana girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Yol temel tabakalarında (temel (base), alt temel (subbase) ve taban zemini (subgrade)) kullanılacak olan zeminlerin esneklik modülünün doğru bir şekilde belirlenmesi, daha dayanıklı ve ekonomik yol tasarımları için büyük önem arz etmektedir. Bundan dolayı zeminlerin esneklik modülünün laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi konusu yoğun olarak çalışılmaktadır [1-7]. Yapılan bu çalışmalarda, daha çok dinamik üç eksenli deneyleri kullanılmıştır.

Zemin daneleri, hareketli tekerlek yüklerinden dolayı asal gerilme dönmelerine (principal stress rotation) maruz kalmaktadır. Bu gerilme durumu, laboratuvar ortamında kalp şekli gerilme izi (heart-shaped stress path) ile başarılı bir şekilde simüle edilebilmektedir [3, 8-11]. Ancak geleneksel dinamik üç eksenli deneyleri, trafik yüklerinden dolayı yol zemin tabakalarının maruz kaldığı bu gerilme durumunu simüle edememektedir [8, 12]. Bu nedenle kalp şekli gerilme izi gibi kompleks gerilme izini laboratuvar ortamında simüle etmek için daha gelişmiş deney sistemlerine ihtiyaç

#### Abstract

Resilient modulus is commonly used in prediction of long-term deformation performances of pavement foundation layers under repeated traffic loads. For this reason, the determination of this material property accurately has a great importance in pavement designs. In this study, resilient modulus of medium-dense sand-clay mixtures was investigated through cyclic triaxial and heart-shaped stress paths. For this purpose, sand-clay specimens having a clay content as 0%, 5%, 10%, and 20% by weight were prepared at an initial relative density of 50% and tested using hollow cylinder testing apparatus. According to the test results, the resilient modulus values of sand-clay mixtures are overestimated by cyclic triaxial stress path, which results in the underestimation of deformation behavior of medium-dense sand-clay mixtures under traffic loads compared to heart-shaped stress path. Based on the findings of this study, it is concluded that a heart-shaped stress path should be taken into consideration for a more accurate prediction of resilient modulus of sand-clay mixtures for pavement designs.

**Keywords:** Resilient modulus, Sand-clay mixture, Heart-shaped stress path, Cyclic triaxial stress path

duyulmaktadır. Yarıklı silindirik deneyi (hollow cylinder test), bu amaç için başarılı bir şekilde uygulanan deneylerdendir [3, 8-14]. Kalp şekli gerilme izi ile yapılan çalışmalara göre zeminlerin trafik yükleri altındaki deformasyon davranışı geleneksel üç eksenli gerilme izi ile daha düşük tahmin edilmektedir.

Zeminlerin esneklik modülü, su içeriği ve maruz kalınan gerilme durumlarının yanı sıra zemin türüne bağlı olarak da değişmektedir. Yumuşak ince daneli zeminler, dinamik yükler altında yüksek sıkışma ve deformasyon davranışı gösterdiği için yol uygulamalarında daha çok iri daneli zeminler kullanılmaktadır. Ancak doğal zeminler genellikle iri ve ince daneli zeminlerin karışımından oluşmaktadır. Bundan dolayı kum-kil karışımlarının mühendislik özellikleri yoğun olarak araştırılmaktadır [15-19]. Farklı oranlarda kil içeren kum-kil karışımları üzerine yapılan çalışmalarda, kumun taşıma kapasitesi, hidrolik geçirgenlik ve deformasyon davranışı gibi mühendislik özelliklerinin kil içeriğine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Simpson ve Evans [15]'a göre kum-kil karışımları için kritik bir kil içeriği bulunmaktadır. Bu kritik kil içeriğinde, kum daneleri deplasman yaşamadan kum-kil karışımlarında minimum boşluk oranı meydana gelmektedir. Böylelikle kritik kil içeriğine kadar kil içeren kum-kil karışımlarında yük altında daha çok iri daneli zeminin davranışı hakim olmaktadır [15].

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: halilibrahim.fedakar@agu.edu.tr (H. İ. Fedakar)  
Geliş / Received: 21.11.2020 Kabul / Accepted: 05.01.2021 Yayınlanma / Published: 15.01.2021  
doi: 10.28948/ngmuh.829513

Bundan dolayı düşük oranlarda kil içeren kum-kil karışımları da yol uygulamalarında kullanılmaktadır.

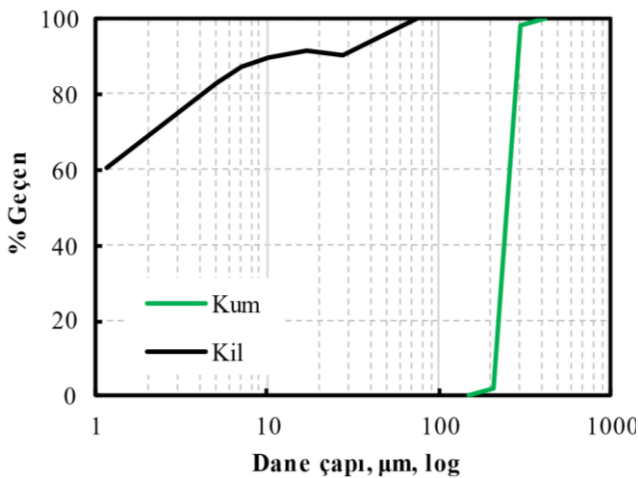
Düşük rölatif sıklığa ( $D_r$ ) sahip zeminler yük altında daha fazla deformasyon davranışı sergilemektedir. Bundan dolayı taşıma gücünü artırmak ve deformasyon davranışını iyileştirmek için zemin tabakaları yol mühendisliği uygulamalarında daha yüksek rölatif sıklıkta sıkıştırılmaktadır. Ancak uygulanan bu kompaksiyon enerjisinin zemin tabakalarının rölatif sıklık değerine etkisi derinlikle azalmaktadır [20]. Bundan dolayı artan derinliklerde daha az rölatif sıklık değeri elde edilmektedir.

Literatür araştırmasına göre düşük miktarlarda kil içeren orta-sıkı kum-kil karışımlarının esneklik modülü kalp şekli gerilme izi ile araştırılmamıştır. Bu çalışmanın amacı, saha şartlarında asal gerilme dönmesine maruz kalan orta-sıkı kum-kil karışımlarının esneklik modülünün dinamik üç eksenli ve yarı silindirik deneyleri ile daha doğru bir şekilde belirlenmesidir. Dinamik üç eksenli deneyleri ile, kum-kil numuneleri sadece tekrarlı eksenel gerilmeye (cyclic axial stress,  $\sigma_c^{cyc}$ ) maruz kalmaktadır. Diğer yandan kalp şekli gerilme izini laboratuvar ortamında simüle edebilmek için tekrarlı eksenel gerilmenin yanı sıra burulmalı kayma gerilmesi (torsional shear stress,  $\tau_{\theta}$ ) de yarı silindirik deneyleri ile kum-kil numunelerine uygulanmıştır. Elde edilen dinamik üç eksenli ve yarı silindirik deney sonuçları asal gerilme dönmelerinin zeminlerin esneklik modülüne etkilerini daha iyi tanımlayabilmek için birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

## 2 Materyal ve metot

### 2.1 Malzemeler

Bu çalışmada, Ottawa kumu ve kaolin kili kullanılmıştır. Bu zeminlere ait dane çapı dağılımları Şekil 1'de sunulmuştur. Ayrıca bu zeminlerin bazı mühendislik özellikleri de Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'deki bilgilere göre bu çalışmada kullanılan iri daneli ve ince daneli zeminler Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)'ne göre sırası ile kötü derecelenmiş kum (SP) ve yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 1 Bu çalışmada kullanılan zeminlerin dane çapı dağılımları

Tablo 1. Zeminlerin bazı mühendislik özellikleri

Mühendislik Özellikleri	Kum	Kil
Eğrilik katsayısı ( $C_c$ )	0.97	-
Üniformluk katsayısı ( $C_u$ )	1.22	-
Maksimum boşluk oranı ( $e_{maks}$ )	0.78	-
Minimum boşluk oranı ( $e_{min}$ )	0.61	-
Likit limit ( $LL$ ) (%)	-	62
Plastik limit ( $PL$ ) (%)	-	41
Özgül ağırlık ( $G_s$ )	2.65	2.65

### 2.2 Numune hazırlama ve deney prosedürleri

Bu çalışmada kullanılacak olan kil içeriğini belirlemek için ağırlıkça %0, %5, %10, %20 ve %30 oranlarında kil içeren kum-kil karışımlarının minimum boşluk oranları sırası ile 0.61, 0.60, 0.55, 0.53 ve 0.66 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara dayanarak bu çalışmadaki kritik kil içeriği %20 olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı düşük kil içeriğine sahip kum-kil karışımlarını temsil etmek için bu çalışmada ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20 kil içeren kum-kil numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bütün numuneler yarı silindirik şeklinde olup 200 mm yüksekliğe, 100 mm dış çapa ve 60 mm iç çapa sahiptir. Deneye tabi tutulacak kum-kil karışımları önceden belirlenen oranlarda kuru olarak bir kap içerisinde dikkatlice karıştırılarak elde edilmiştir. Elde edilen bu karışımlar kuru çökeltme (dry deposition) yöntemi ile yarı silindirik şeklindeki deney kalıplarına huni kullanarak önceden belirlenen miktarlarda on tabaka olarak dökülmüş ve bu tabakalar her bir numune %50 başlangıç rölatif sıklık değerine sahip olacak şekilde tokmak yardımıyla sıkıştırılmıştır.

Bir sonraki aşamada, numunelerin dik durabilmesi için vakum basıncı (20 kPa) uygulanmış ve numuneler yarı silindirik deney sistemine yerleştirilmiştir. İç ve dış hücreler havası alınmış saf su ile doldurulduktan sonra numunelere iç (inner) ve dış (outer) hücre basınçları (30 kPa) uygulanmıştır. Hücre basınçlarından hemen sonra numuneye uygulanan vakum basıncı salıverilmiştir. Bu aşamadan sonra numunelerin içerisindeki havayı çıkartmak için havası alınmış saf su numunenin içerisinde aşağıdan yukarıya doğru dolaştırılmıştır. Numunelerin içerisindeki hava çıkarıldıktan sonra iç ve dış hücre basınçları ve geri basıncı kademeli olarak sırasıyla 320 kPa ve 300 kPa değerlerine artırılmıştır. Bu basınç değerlerinde numunelerin suya doyurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin suya doygunluğu ise Skempton'un  $B$  katsayısına göre belirlenmiştir. Suya doyurma işleminden sonra bütün numuneler 0.95'ten daha yüksek  $B$  değerleri vermiştir. Bu durum uygulanan basınçlar altında numunelerin suya doygun hale geldiğini göstermektedir. Suya doyurma işleminden sonra numuneler konsolidasyon işlemine tabi tutulmuştur. Bu aşamada uygulanan geri basıncı sabit tutulurken, eksenel gerilme ve iç/dış hücre basınçları kademeli olarak sırasıyla 360 kPa ve 330 kPa değerlerine artırılmış ve numuneler bu basınç değerlerinde anizotropik olarak ( $K_0=0.5$ ) konsolide edilmiştir. Konsolidasyon aşamasının hemen sonrasında numuneler Tablo 2'de belirtilen deney programına uygun olarak dinamik eksenel gerilme ve burulmalı kayma gerilmelerine maruz bırakılmıştır.

Trafik yükünün gerçek frekansı 0.5 Hz ile 5 Hz arasında değişmektedir [10]. Bundan dolayı trafik yükünü simüle

etmek için bu çalışmadaki numuneler 1 Hz yüklem frekansına tabi tutulmuştur [3, 12, 21]. Ayrıca tekrarlı yüklemeye maruz kalan zeminlerde meydana gelen toplam deformasyon gelişiminin büyük bir kısmı ilk 1000 tekrarlı yüklemeye sayısında gerçekleşmektedir [11-13]. Bu nedenle kum-kil numuneleri bu çalışmada 5000 tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır.

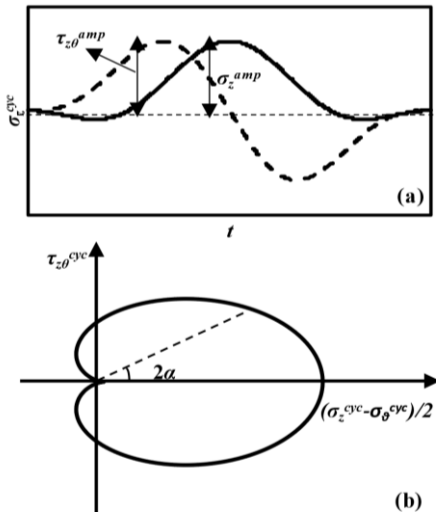
**Tablo 2.** Deney programı

Deney	Kum (%)	Kil (%)	$\sigma_z^{cyc}$ (kPa)	$\tau_{z\theta}^{cyc}$ (kPa)
Üç eksenli	100	0	12	0
	95	5		
	90	10		
	80	20		
Yarı silindirik	100	0	12	4
	95	5		
	90	10		
	80	20		

### 2.3 Kalp şekli gerilme izi

Yukarıda da bahsedildiği üzere hareketli tekerlek yükünden dolayı yol zemin tabakaları asal gerilme dönmelerine maruz kalmaktadır. Böylesi gerilme durumu ise kalp şekli gerilme izi ile başarılı bir şekilde simüle edilebilmektedir. Bir kalp şekli gerilme izi deviatorik gerilme uzayında ( $\tau_{z\theta}$  vs  $(\sigma_z - \sigma_\theta)/2$ ,  $\sigma_\theta$ : çevresel gerilme (Denklem (1)), aksel gerilme ( $\sigma_z$ ) ve burulmalı kayma gerilmesinden ( $\tau_{z\theta}$ ) oluşmaktadır. Denklem (1)'deki  $p_o$ ,  $p_i$ ,  $r_o$  ve  $r_i$ , sırasıyla dış hücre basıncı, iç hücre basıncı, dış yarıçap ve iç yarıçapı temsil etmektedir. Gerilme dalgaformlarının ve kalp şekli gerilme izinin tipik örneği ise Şekil 2'de gösterilmiştir.

$$\sigma_\theta = \frac{p_o r_o - p_i r_i}{(r_o - r_i)} \quad (1)$$



**Şekil 2** (a) Gerilme dalgaformları ve (b) kalp şekli gerilme izi

Şekil 2'de gösterilen  $\alpha$  ise en büyük asal gerilmenin düşey eksen ile yaptığı açıyı ifade etmektedir. Kalp şekli gerilme izi için uygulanacak olan gerilme dalgaformlarının matematiksel ifadeleri Denklem (2) ve (3)'te verilmiştir.

Denklem (2) ve (3)'te yer alan  $t$  ve  $T$  ifadeleri sırasıyla yüklem süresi ve periyodu ifade etmektedir.

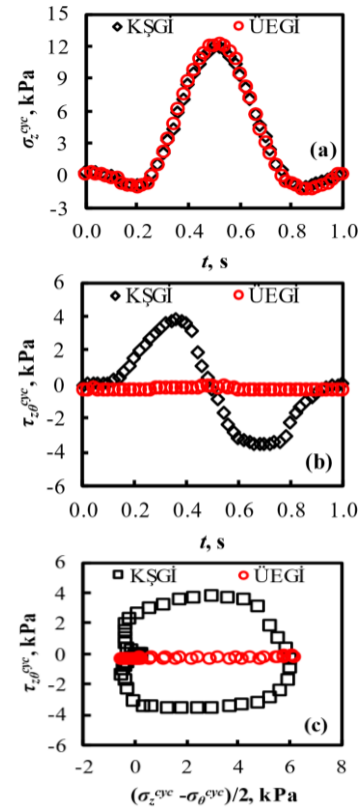
$$\sigma_z^{cyc} = 0.5\sigma_z^{amp} \left[ \frac{1}{2} \cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{1}{2} \right] \quad (2)$$

$$\tau_{z\theta}^{cyc} = 0.77\tau_{z\theta}^{amp} \left[ \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{4\pi}{T}t\right) \right] \quad (3)$$

## 3 Bulgular ve tartışma

### 3.1 Gerilme izi

Tablo 2'de sunulan deney programına göre üç eksenli gerilme izini (ÜEGİ) yarı silindirik deney sisteminde simüle etmek için numuneler sadece tekrarlı aksel gerilmeye maruz kalmıştır. Diğer yandan kalp şekli gerilme izini (KŞGİ) simüle etmek için ise tekrarlı aksel gerilmenin yanı sıra tekrarlı burulmalı kayma gerilmesi de kum-kil numunelerine uygulanmıştır. Uygulanan aksel gerilme ve burulmalı kayma gerilmesine ait dalgaformlarının ve elde edilen gerilme izlerinin örnekleri Şekil 3'te sunulmuştur.



**Şekil 3** Uygulanan (a) tekrarlı aksel gerilme ( $\sigma_z^{cyc}$ ) ve (b) tekrarlı burulmalı kayma gerilmesine ( $\tau_{z\theta}^{cyc}$ ) ait örnek dalgaformları ve çalışmada uygulanan (c) gerilme izleri

Şekil 3'e göre Tablo 2'de belirtilen aksel gerilme ve burulmalı kayma gerilmesine ait genlik (amplitude) değerleri üç eksenli ve yarı silindirik deneylerinde başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Ayrıca uygulanan kalp şekli ve üç eksenli gerilme izleri de bu çalışmada başarılı bir şekilde üretilmiş ve uygulanmıştır. Şekil 3'te sunulan deney verilerine göre bu deneysel çalışmada KŞGİ ve ÜEGİ başarılı bir şekilde

simüle edilmiştir. Bundan dolayı bu çalışmada elde edilen deney sonuçlarının kabul edilebilir bir güvenilirliğe sahip olduğu söylenebilir.

### 3.2 Esneklik modülü ve şekil değiştirme davranışı

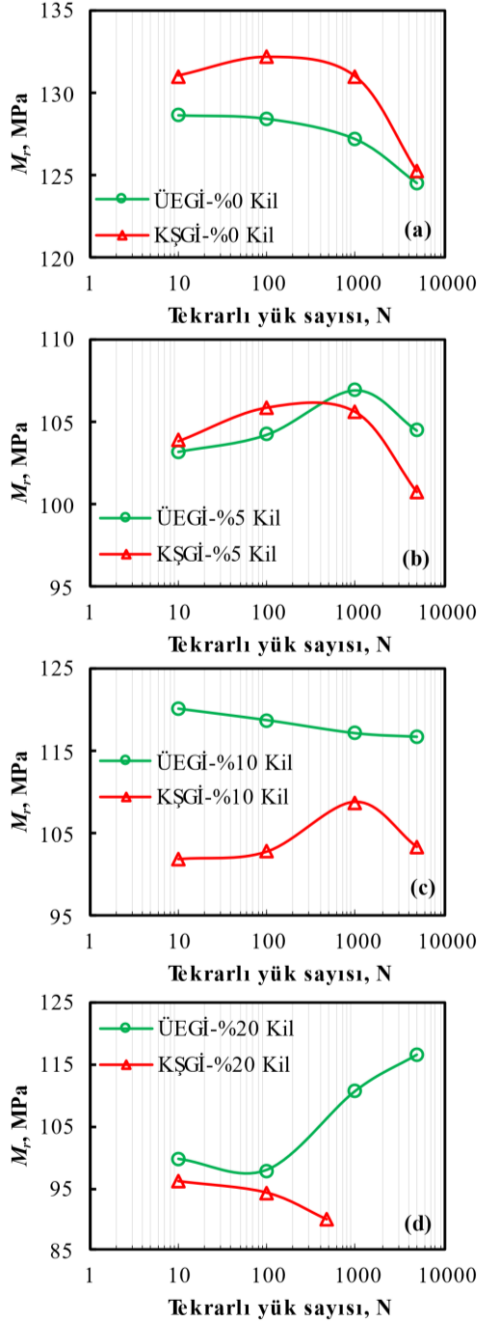
Bu çalışmada, KŞGİ-%20 Kil numunesi (kalp şekli gerilme izi ve %20 kil) haricindeki diğer numuneler uzun dönemli davranışı analiz etmek için 5000 tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Bu numunelerde, esneklik modülünün tekrarlı yüklemeye sayısı ile değişimini incelemek için farklı tekrarlı yüklemeye sayılarında (N=10, 100, 1000 ve 5000) hesaplanan esneklik modüllerinin değişimi Şekil 4'te sunulmuştur. Diğer yandan KŞGİ-%20 Kil numunesi 478 tekrarlı yüklemeye göçtüğü için ( $\varepsilon_z^p \geq 5\%$ ) bu numunenin esneklik modülünün tekrarlı yüklemeye sayısı ile değişiminde N=10, 100 ve 478 tekrarlı yüklemeye sayıları kullanılmıştır (Şekil 4(d)). Guo vd. [3] yumuşak zeminler üzerinde yaptıkları yarık silindir deneylerinde esneklik modülünü ( $M_r$ ) maksimum gerilme farkının ( $\Delta\sigma_z^{maks}$ ) elastik şekil değiştirmeye ( $\varepsilon_z^r$ ) oranı olarak tanımlamışlardır ( $M_r = \Delta\sigma_z^{maks} / \varepsilon_z^r$ ). Farklı tekrarlı yüklemeye sayılarında ve gerilme izlerinde kum-kil numunelerinde ölçülen maksimum aksel gerilme farkı ve elastik aksel şekil değiştirme değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Ayrıca yukarıda belirtilen farklı tekrarlı yüklemeye sayılarında ölçülen elastik aksel şekil değiştirmenin bu tekrarlı yüklemeye sayılarındaki toplam aksel şekil değiştirmeye oranı ( $\varepsilon_z^r / \varepsilon_z^t$ ) da Tablo 3'te verilmiştir. Esneklik modülünün farklı tekrarlı yüklemeye sayılarında ve gerilme izlerinde kümülatif kalıcı aksel şekil değiştirmeye ( $(\varepsilon_z^p)_{kümülatif}$ ) etkisi de Şekil 5'te gösterilmiştir.

Şekil 4'te açıkça görüldüğü üzere kum zeminin esneklik modülü değerleri her iki gerilme izi (ÜEGİ ve KŞGİ) altında artan kil içeriği ile azalmaktadır. Kum numunelerde, (%0 kil) 1000 tekrarlı yüklemeye kadar esneklik modülü değerlerinde çok az bir değişim olmaktadır (Şekil 4(a)). Ancak 1000 tekrarlı yüklemeye sonra bu numunelerin esneklik modülü değerleri daha fazla azalmaktadır. Bundan dolayı kum zemin kullanan yol yapılarının daha güvenli ve ekonomik tasarımı için nihai esneklik modülü değerleri kullanılmalıdır. Kum numunelerde, KŞGİ altında daha az aksel gerilme farkı ölçülmüştür (Tablo 3). Buna rağmen kum numune KŞGİ altında daha yüksek esneklik modülü değeri vermektedir. Bu durum ise kum numunenin KŞGİ altında daha az elastik şekil değiştirme davranışı sergilemesinden kaynaklanmaktadır (Tablo 3). Ayrıca 1000 tekrarlı yüklemeye sayısından sonra esneklik modülünde meydana gelen azalma KŞGİ altında daha fazla olmaktadır. Şekil 5(a)'ya göre 1000 tekrarlı yüklemeye sayısından sonra KŞGİ'ne maruz kalan kum zeminin esneklik modülünde meydana gelen daha fazla azalma 1000 tekrarlı yüklemeye sayısından sonra bu numunede daha fazla kalıcı deformasyonun gelişimine sebep olmaktadır. 1000 tekrarlı yüklemeye sayısına kadar ise kum zeminde farklı gerilme izlerinden dolayı meydana gelen kalıcı şekil değiştirme performansları benzer sonuçlar vermiştir. 5000 tekrarlı yüklemeye sayısında ise kum numuneler her iki gerilme izi altında benzer esneklik modülü davranışı sergilemektedir. Şekil 4(a)'daki sonuçlara göre bu çalışmada uygulanan farklı gerilme izleri kum zeminlerin

uzun dönem esneklik modülü değerlerinde benzer sonuçlar vermektedir. Buna göre kum numunelerin bu çalışmada maruz kaldıkları gerilme durumlarında asal gerilme dönmesinin esneklik modülü değerine etkisi çok az olmaktadır. Ancak Şekil 5(a)'daki sonuçlar da göz önüne alındığında kum zeminlerin esneklik modülünün belirlenmesinde KŞGİ'nin göz önüne alınması gerektiği sonucuna da varılabilmektedir. Ayrıca her iki gerilme izi altında yukarıda belirtilen tekrarlı yüklemeye sayılarında meydana gelen toplam şekil değiştirmenin büyük kısmını elastik şekil değiştirme oluşturmaktadır ( $\varepsilon_z^r / \varepsilon_z^t > 98$ ) (Tablo 3).

**Tablo 3.** Farklı tekrarlı yüklemeye sayılarında (N) ölçülen maksimum aksel gerilme farkı ( $\Delta\sigma_z^{maks}$ ), elastik şekil değiştirme ( $\varepsilon_z^r$ ) ve elastik şekil değiştirme/toplam şekil değiştirme oranı ( $\varepsilon_z^r / \varepsilon_z^t$ ) sonuçları

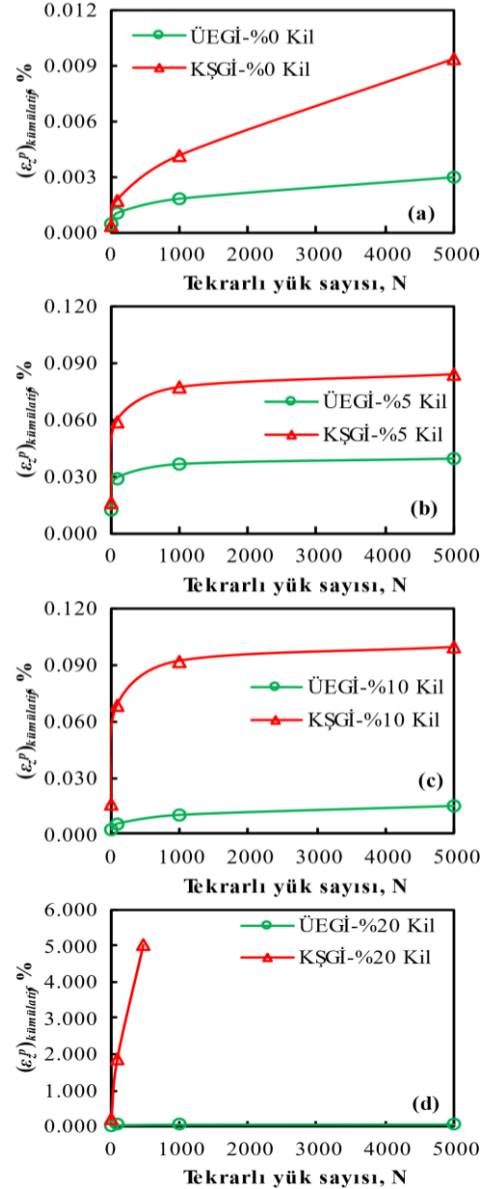
Numune	N	$\Delta\sigma_z^{maks}$ (kPa)	$\varepsilon_z^r$ (%)	$\varepsilon_z^r / \varepsilon_z^t$ (%)
ÜEGİ-%0	10	11.9668	0.00930	99.47
	100	11.8826	0.00925	100.00
	1000	11.9588	0.00940	99.47
	5000	12.2656	0.00985	99.49
KŞGİ-%0	10	11.7947	0.00900	99.45
	100	11.7640	0.00890	98.89
	1000	12.1839	0.00930	100.00
	5000	12.0878	0.00965	100.00
ÜEGİ-%5	10	11.6086	0.01125	94.14
	100	11.8837	0.01140	99.56
	1000	11.8762	0.01110	100.00
	5000	11.8611	0.01135	100.00
KŞGİ-%5	10	11.3229	0.01090	88.98
	100	11.9167	0.01125	98.25
	1000	11.6242	0.01100	100.00
	5000	11.5407	0.01145	99.57
ÜEGİ-%10	10	11.8961	0.00990	98.51
	100	11.9403	0.01005	100.00
	1000	11.9033	0.01015	99.51
	5000	12.0937	0.01035	99.52
KŞGİ-%10	10	11.1052	0.01090	89.71
	100	11.6148	0.01130	98.26
	1000	11.5352	0.01060	100.00
	5000	11.5246	0.01115	100.00
ÜEGİ-%20	10	12.2158	0.01225	93.16
	100	12.1456	0.01240	99.20
	1000	12.2816	0.01110	99.55
	5000	12.5826	0.01080	99.54
KŞGİ-%20	10	9.7979	0.01020	30.00
	100	10.2206	0.01085	43.14
	478	10.2015	0.01135	65.61



Şekil 4. Esneklik modülünün tekrarlı yüklemeye sayısı (N), kil içeriği ve gerilme izi ile değişimi

%5 kil içeren kum-kil numunelerde ise kum numunelerde olduğu gibi 1000 tekrarlı yüklemeye sayısına kadar esneklik modülü değerlerinde çok az bir değişim olmaktadır ve 1000 tekrarlı yüklemeye sayısından sonra esneklik modülü değerlerinde meydana gelen azalma KŞGİ altında daha fazla olmaktadır (Şekil 4(b)). Ayrıca 5000 tekrarlı yüklemeye sayısında %5 kil içeren kum-kil numunesi KŞGİ altında daha düşük esneklik modülü değeri vermiştir. Tablo 3'te görüldüğü üzere bu kum-kil numunelerinde meydana gelen şekil değiştirmenin büyük bir kısmı elastik şekil değiştirmedir ( $\epsilon_z^f/\epsilon_z^t > 88$ ). Ancak küçük tekrarlı yüklemeye sayılarında %5 kil içeren kum-kil numunelerinde KŞGİ'den dolayı daha fazla kalıcı şekil değiştirme meydana

gelmektedir (Tablo 3 ve Şekil 5(b)). Artan tekrarlı yüklemeye sayılarında ise KŞGİ'ne maruz kalan numunede meydana gelen elastik aksenal şekil değiştirmenin oranı artmaktadır (Tablo 3). Bu durum kil zeminin KŞGİ altında daha fazla sıkışma davranışı göstermesinden kaynaklanmaktadır. Artan tekrarlı yüklemeye sayılarında ise bu numune daha stabil bir davranış sergilemektedir (Şekil 5(b)). Şekil 4(b)'ye göre %5 kil içeren orta-sıkı kum-kil numunelerinin tasarım esneklik modülü belirlenirken tekrarlı yüklemeye sayısı ve KŞGİ göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 5 Farklı tekrarlı yüklemeye sayılarından (N) sonra kum-kil numunelerinde ölçülen kümülatif kalıcı aksenal şekil değiştirme sonuçlarının  $((\epsilon_z^f)_{kümülatif} \%)$ , gerilme izleri (ÜEGİ ve KŞGİ) ve kil içeriği ile değişimi

%10 kil içeren numunelerde gerilme izinin esneklik modülüne etkisi daha belirgin olmaktadır. Şöyle ki, KŞGİ altında bütün tekrarlı yüklemeye sayılarında daha düşük esneklik modülü değerleri elde edilmiştir (Şekil 4(c)). Bu

durum %10 kil içeren numunede KŞGİ altında daha az aksel gerilme farkı ve daha fazla elastik şekil değiştirmenin elde edilmesinden kaynaklanmaktadır (Tablo 3). Ayrıca tekrarlı yükleme sayıları ile esneklik modülünde meydana gelen değişim de bu numunede çok az olmaktadır (Şekil 4(b)). Ancak %10 kil içeren numune %5 kil içeren numuneye kıyasla ÜEGİ altında daha fazla esneklik modülü vermektedir (Şekil 4(b) ve 4(c)). Bu durum ise %5 kil içeren numunede daha az aksel gerilme farkı ölçülmesine rağmen %10 kil içeren numunede daha az elastik şekil değiştirmenin meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır (Tablo 3). Ayrıca başlangıç tekrarlı yükleme sayılarında KŞGİ'ne maruz kalan numunede daha fazla kalıcı şekil değiştirme meydana gelmiştir (Tablo 3). Artan tekrarlı yükleme sayıları ile elastik aksel şekil değiştirmenin toplam aksel şekil değiştirmeye oranı da artmakta ve bundan dolayı her iki numune de daha stabil bir aksel şekil değiştirme davranışı sergilemektedir (Tablo 3 ve Şekil 5(c)). %10 kil içeren kum-kil numunelerinin tasarım esneklik modülü belirlenirken tekrarlı yükleme sayısı ve KŞGİ göz önünde bulundurulmalıdır.

%20 kil içeren numunelerde, KŞGİ altında daha düşük esneklik modülü elde edilmektedir. Elde edilen esneklik modülü değerleri ise tekrarlı yükleme sayısı ile azalmaktadır. Ancak ÜEGİ'ne maruz kalan numunede, esneklik modülü değerleri artan tekrarlı yükleme sayısı ile artmaktadır (Şekil 4(d)). Bunun nedeni ise bu numunede daha fazla aksel gerilme farkının ölçülmesidir (Tablo 3). Küçük tekrarlı yükleme sayılarında ( $N \leq 100$ ), %20 kil içeren numuneler her iki gerilme izi altında benzer sonuçlar vermektedir. Bunun nedeni KŞGİ'ne maruz kalan numunede, kalıcı aksel şekil değiştirmenin daha hızlı gelişmesi ve buna bağlı olarak daha düşük aksel gerilme farklarının elde edilmesidir (Tablo 3). ÜEGİ altındaki numunede ise aksel şekil değiştirmenin büyük bir kısmı elastik olarak gerçekleşmektedir ( $\epsilon_z'/\epsilon_z' > 93$ ). Ancak KŞGİ altındaki numunede ise kalıcı aksel şekil değiştirme daha fazla gerçekleşmekte ve bundan dolayı düşük tekrarlı yükleme sayılarında göçme meydana gelmektedir (Tablo 3 ve Şekil 5(d)). KŞGİ'ne maruz kalan numunede kalıcı aksel şekil değiştirmenin hızlı bir şekilde gelişmesi ve buna bağlı olarak göçmenin meydana gelmesi, KŞGİ yükleme koşullarında kritik kil içeriğine sahip olan bu karışımda kum daneleri arasındaki kenetlenmenin olumsuz etkilenmesi ve ince daneli zeminin yük altındaki davranış özelliklerinin bu karışımda daha baskın hale gelmesi ile açıklanabilir. Diğer kil içeriklerinde bu durumun etkisi çok az görülmüştür. Şekil 4(d) ve Şekil 5(d)'ye göre %20 kil içeren kum-kil karışımlarının esneklik modülü KŞGİ hesaba katılarak belirlenmelidir. Aksi takdirde trafik yüklerinden dolayı yol yapısında meydana gelecek olan aksel şekil değiştirme davranışı çok daha düşük tahmin edilmektedir.

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20 oranlarında kil içeren ve tekrarlı trafik yüklerine maruz kalan orta-sıkı kum-kil karışımlarının esneklik modülü parametreleri kalp şekli gerilme izi (KŞGİ) ve üç aksel gerilme izi (ÜEGİ) ile araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, her iki gerilme izi de yarı silindirik deney

cihazı kullanılarak kum-kil numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Kum-kil numuneleri ÜEGİ altında sadece tekrarlı aksel gerilmeye maruz kalmıştır. Ancak KŞGİ'ne maruz kalan kum-kil numunelerinde ise bu gerilme izini ve asal gerilme dönmesini simüle etmek için tekrarlı aksel gerilme ve burulmalı kayma gerilmesi aynı anda uygulanmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre asal gerilme dönmesinin kum zeminin (%0 kil) esneklik modülü parametresine etkisi çok az olmaktadır. Ayrıca artan tekrarlı yükleme sayısı ile esneklik modülünde azalma meydana geldiği için kum zeminin tasarım esneklik modülü belirlenirken nihai ( $N=5000$ ) esneklik modülü değeri kullanılmalıdır. Diğer yandan kum zeminin esneklik modülü artan kil içeriği ile azalmaktadır. Artan kil içeriği ile asal gerilme dönmesinin ve KŞGİ'nin esneklik modülüne etkisi daha belirgin olmaktadır. Şöyle ki, KŞGİ'ne maruz kalan ve %5'ten daha fazla kil içeren kum-kil numuneleri daha düşük esneklik modülü değerleri vermiştir. Bu durum ise bu numunelerde daha fazla kalıcı aksel şekil değiştirmenin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bundan dolayı orta-sıkı kum-kil karışımlarının kullanıldığı yol yapılarının tasarımında tasarım esneklik modülü belirlenirken KŞGİ ve asal gerilme dönmesinin etkileri göz önüne alınmalıdır. Aksi takdirde, elde edilen deney sonuçlarına göre tekrarlı trafik yüklerinden dolayı yol yapılarında meydana gelecek olan kalıcı aksel şekil değiştirmeler daha düşük tahmin edilmektedir. Bu durum ise özellikle yol bakım maliyetlerinin önemli miktarda artmasına sebep olabilir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK yurt dışı doktora sonrası araştırma bursu (2219) ile Iowa Eyalet Üniversitesi İnşaat, Yapı ve Çevre Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında Dr. Cassandra Rutherford ve Doç. Dr. Bora Çetin'in bilgileri dahilinde gerçekleştirilmiştir.

#### Çıkar çatışması

Bu çalışmada, herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %4

#### Kaynaklar

- [1] Md. Jibon, D. Mishra and E. Kassem, Laboratory characterization of fine-grained soils for Pavement ME Design implementation in Idaho. Transportation Geotechnics, 25, 100395, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100395>.
- [2] G. Ma, H. Li, B. Yang, H. Zhang and W. Li, Investigation on the deformation behavior of open-graded unbound granular materials for permeable pavement. Construction and Building Materials, 260, 119800, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119800>.
- [3] L. Guo, Y. Cai, R. J. Jardine, Z. Yang and J. Wang, Undrained behaviour of intact soft clay under cyclic paths that match vehicle loading conditions, Canadian Geotechnical Journal, 55, 90–106, 2018. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0636>.

- [4] A. Cetin, Z. Kaya, B. Cetin and A. H. Aydilek, Influence of laboratory compaction method on mechanical and hydraulic characteristics of unbound granular base materials. *Road Materials and Pavement Design*, 15 (1), 220-235, 2014. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.869505>.
- [5] I. Haider, Z. Kaya, A. Cetin, M. Hatipoglu, B. Cetin and A. H. Aydilek, Drainage and mechanical behavior of highway base materials. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140 (6), 04014012, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.19434774.0000708](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.19434774.0000708).
- [6] S. H. He, Z. Ding, T.D. Xia, W. H. Zhou, X. L. Gan, Y. Z. Chen and F. Xia, Long-term behaviour and degradation of calcareous sand under cyclic loading. *Engineering Geology*, 276, 105756, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105756>.
- [7] N. Venkatesh, M. Heeralal and R. J. Pillai, Resilient and permanent deformation behaviour of clayey subgrade soil subjected to repeated load triaxial tests. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24 (9), 1414-1429, 2020. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1472041>.
- [8] Y. Cai, Q. Sun, L. Guo, C. H. Juang and J. Wang, Permanent deformation characteristics of saturated sand under cyclic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 52, 795-807, 2015. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0341>.
- [9] L. Guo, J. Chen, J. Wang, Y. Cai and P. Deng, Influences of stress magnitude and loading frequency on cyclic behavior of  $K_0$ -consolidated marine clay involving principal stress rotation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84, 94-107, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.01.024>.
- [10] J. G. Qian, Y. G. Wang, Z. Y. Yin and M. S. Huang, Experimental identification of plastic shakedown behavior of saturated clay subjected to traffic loading with principal stress rotation. *Engineering Geology*, 214, 29-42, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.09.012>.
- [11] Y. Q. Cai, L. Guo, R. J. Jardine, Z. X. Yang and J. Wang, Stress-strain response of soft clay to traffic loading. *Géotechnique*, 67(5), 446-451, 2017. <https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P.224>.
- [12] H. I. Fedakar, W. Cai, C. J. Rutherford and B. Cetin, Evaluation of deformation behavior of sand-clay mixture under traffic loads. *Geo-Congress 2020, ASCE Geotechnical Special Publications (GSP 317)*, sayfa 201-209, Minneapolis, Minnesota, ABD, 25-28 Şubat 2020.
- [13] Y. Cai, T. Wu, L. Guo and J. Wang, Stiffness degradation and plastic strain accumulation of clay under cyclic load with principal stress rotation and deviatoric stress variation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144 (5), 04018021, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001854](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001854).
- [14] Q. Yang, Y. Tang, B. Yuan and J. Zhou, Cyclic stress-strain behaviour of soft clay under traffic loading through hollow cylinder apparatus: effect of loading frequency. *Road Materials and Pavement Design*, 20 (5), 1026-1058, 2019. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1428219>.
- [15] D. C. Simpson and T. M. Evans, Behavioral thresholds in mixtures of sand and kaolinite clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142 (2), 04015073, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001391](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001391).
- [16] H. Choo, W. Lee and C. Lee, Compressibility and small strain stiffness of kaolin clay mixed with varying amounts of sand. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21 (6), 2152-2161, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-1787-4>.
- [17] M. Cubrinovski and S. Rees, Effects of fines on undrained behaviour of sands. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, ASCE Geotechnical Special Publications (GSP 181)*, sayfa 1-11, Sacramento, California, ABD, 18-22 Mayıs 2008.
- [18] P. V. Lade, C. D. Liggio and J. A. Yamamuro, Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 21 (4), 336-347, 1998. <https://doi.org/10.1520/GTJ11373J>.
- [19] A. Miftah, A. H. B. Garoushi and H. Bilsel, Effects of fine content on undrained shear response of sand-clay mixture. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6 (10), 2020. <https://doi.org/10.1007/s40891-020-0193-7>.
- [20] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, CT, ABD, 2010.
- [21] C. Chazallon, P. Hornych and S. Mouhoubi, Elastoplastic model for the long-term behavior modeling of unbound granular materials in flexible pavements. *International Journal of Geomechanics*, 6 (4), 279-289, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1532-3641\(2006\)6:4\(279\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1532-3641(2006)6:4(279)).

