Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

REZONANT KOLON DENEYİNDE NUMUNE YÜKSEKLİĞİNİN REZONANS FREKANSINA ETKİSİ

ZMGM 20. ULUSAL KONFERANSI

Senanur ÇELİK[1], Sabriye Banu İKİZLER[2], Kamil Bekir AFACAN[3]

ÖZET

Zeminlerin dinamik davranışının belirlenmesi geoteknik mühendisliği açısından önem taşımaktadır. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan deneysel yöntemlerden biri rezonant kolon deneyidir. Bu çalışmada, rezonant kolon deneyi kullanılarak numune yüksekliğinin ölçülen rezonans frekansı üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında 100 ile 130 mm olmak üzere iki farklı yükseklikte ve 50 mm sabit çapta ISO kumu numuneler hazırlanmıştır. Deneyler, %40 ve %80 bağıl sıkılık koşullarında, sırasıyla 98,4 ve 320 kPa izotropik çevre basıncı altında gerçekleştirilmiştir. Farklı tork çıkış genliği seviyelerinde yapılan frekans taramaları sonucunda, her iki deney koşulunda da 100 mm yüksekliğindeki numunelerin rezonans frekanslarının 130 mm yüksekliğindeki numunelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ortak tork seviyeleri dikkate alındığında, numune yüksekliğinin 100 mm'den 130 mm'ye (%30) artırılmasıyla rezonans frekansındaki azalma %40 bağıl sıkılık koşulunda %7,69–22,46 aralığında değişmiş ve ortalama %18 olarak belirlenmiştir. %80 bağıl sıkılık koşulunda ise bu azalma %5,88–18,75 aralığında olup ortalama %14 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, incelenen deney koşulları altında numune yüksekliğinin rezonant kolon deneylerinde ölçülen rezonans frekansı üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Rezonant kolon deneyi, rezonans frekansı, numune yüksekliği, bağıl sıkılık

ABSTRACT

The determination of the dynamic behavior of soils is of considerable importance in the field of geotechnical engineering. One widely used experimental method for this purpose is the resonant column test. This study investigated the effect of specimen height on the measured resonant frequency using the resonant column test. Within the scope of the study, ISO sand specimens with two different heights of 100 and 130 mm and a constant diameter of 50 mm were prepared. Tests were conducted at relative densities of 40% and 80%, under isotropic confining pressures of 98.4 kPa and 320 kPa, respectively. Frequency sweeps were performed at different torque output amplitude levels and it was determined that, under both test conditions, the resonant frequencies of the 100 mm specimens were higher than those of the 130 mm specimens. Considering the common torque levels, increasing the specimen height from 100 mm to 130 mm (30%) resulted in a decrease in resonant frequency ranging from 7.69% to 22.46% under the 40% relative density condition, with an average decrease of 18%. Under the 80% relative density condition, the decrease ranged from 5.88% to 18.75%, with an average decrease of 14%. These results suggest that specimen height significantly affects the resonant frequency measured in resonant column tests under the experimental conditions investigated.

Keywords: Resonant column test, resonant frequency, specimen height, relative density

[1] Öğr. Gör., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, senanur.celik@ogu.edu.tr (Sorumlu Yazar)
[2] Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, banuh@ktu.edu.tr
[3] Doç. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, kafacan@ogu.edu.tr

1. GİRİŞ

Zeminlerin statik yükler altındaki davranışlarının yanı sıra deprem gibi dinamik yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi geoteknik tasarım açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle, zemin tabakalarının deprem yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ve dinamik özellikleri, farklı çevre basıncı ve deprem frekansları altında yapılacak olan deneylerle belirlenmelidir. Zeminlerin dinamik davranışının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan üç parametre; maksimum kayma modülü (G_{max}), normalize edilmiş kayma modülü (G/G_{max}) ve sönüm oranı değerleridir. Dinamik yükleme koşullarını laboratuvar ortamında tanımlayabilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları Bender elemanları deneyi, rezonant kolon deneyi ve dinamik üç eksenli basınç deneyidir. Bu çalışmada rezonant kolon deneyi (RCT) kullanılmıştır. RCT, γ=%10^{-4}~10^{-1} aralığındaki düşük ve orta birim şekil değiştirmelerde (ASTM D4015-87, 2000) zeminin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yaygın bir deneydir. Cihaz mantığı doğrusal elastik titreşim teorisine dayanmaktadır (RCTS,1994-2007). Bu da cihazın düşük ve orta şekil değiştirme aralığında sınırlandırılmasının nedenini açıklamaktadır. Deneylerde kullanılan cihaz, GCTS markasına ait bir tarafı sabit diğer tarafı serbest uçlu sistemdir. Serbest-sabit uçlu deney düzeneğinde numunenin üst kısmına tahrik sistemi aracılığı ile harmonik burulma uyarısı, belirli bir frekans aralığında (start-stop) uygulanır ve buna karşılık gelen şekil değiştirme genliği okunur. Start-stop aralığı frekans taraması olarak adlandırılır ve numunenin hangi frekanslarda test edileceğini belirler. Bu genliğin maksimum olduğu noktadaki en düşük frekans, zemin numunesinin rezonans frekansını vermektedir. Rezonans frekansı, hertz (Hz) biriminde gösterilmektedir. Bu frekans test cihazının kalibresine, numunenin rijitliği ve geometrisine bağlı bir parametredir. Rezonans frekansından elde edilen değerle zeminin kayma dalgası hızı (v_S) Kelvin-Voight modeli kullanılarak elde edilir (Ishihara 1996). Zeminin kayma modülü (G), kayma dalgası hızı ve zemin yoğunluğu kullanılarak hesaplanır (bkz. Denk. 1). Sönüm oranı ise titreşim sonlandırıldıktan sonraki serbest titreşim sönümünden (free vibration decay, FVD) veya sabit durum (yarı güç bant genişliği) varsayımı altında frekans-tepki eğrisinin genişliğinden belirlenir.

$$G = \rho V_s^2 \tag{1}$$

Burada G: Kayma modülünü, ρ: Zemin numunesinin yoğunluğunu ve v_s: Kayma dalgasını göstermektedir. Zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemek için birçok araştırmacı tarafından çok sayıda çalışma yapılmıştır. (Seed vd., 1971; Mog vd., 2019; Okur vd., 2018). Umu (2013), çalışmasında aynı deney koşullarında hazırlanan farklı yüksekliklerdeki ISO kum numunelerinin rezonans frekanslarını karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda, numune yüksekliğindeki değişimin rezonans frekansında %2'lik bir oranda değişime neden olduğu ve numune yüksekliği arttıkça rezonans frekansının azaldığını bildirmiştir. Karadağ vd. (2022), yaptıkları çalışmada çelikhane cürufunun dinamik özelliklerini belirlemek için RCT deneyi yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre uygulanan hücre basıncı arttıkça rezonans frekansının da arttığı gözlemlenmiştir. Srokosz vd. (2021), geleneksel RCT sistemine ek ivmeölçerler yerleştirilerek modifiye edilmiş ve sisteme alternatif bir ölçüm yaklaşımı geliştirmiştir. Geleneksel ve modifiye sistemlerden elde edilen rezonans frekansları karşılaştırıldığında, ölçümler arasındaki ortalama bağıl farkın %8'i aşmadığı belirtilmiştir.

Bu çalışmada, RCT deneyi kullanılarak, numune yüksekliğinin ölçülen rezonans frekansı üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, aynı bağıl sıkılık (D_r) ve çevre basıncı altında hazırlanan 100 mm ve 130 mm yüksekliğinde, 50 mm çapındaki numunelerin tahrik sisteminin tork çıkış genliğine bağlı rezonans frekansları karşılaştırmalı

olarak incelenmiştir. Deneyler iki farklı bağıl sıkılık ve bunlara karşılık gelen çevre basıncı koşullarında tekrarlanarak numune yüksekliğine bağlı rezonans frekansı değişimi değerlendirilmiştir.

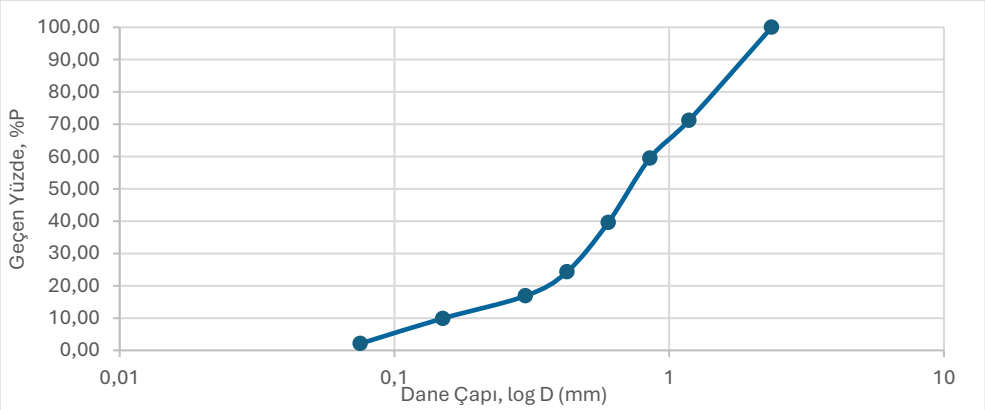
2. MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmada ISO kum numunesi kullanılmıştır. Temel indeks özelliklerinin belirlenmesi amacı ile numuneler Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında çeşitli deneylere tabi tutulmuştur. Deneysel programda D_r=%40 ve %80 olmak üzere iki farklı bağıl sıkılık koşulu dikkate alınmıştır.

2.1. İndeks özelliklerinin belirlenmesi

Numunenin dane dağılımı grafiğinin belirlemek için kuru halde hazırlanan 1 kg numune üzerinde elek analizi deneyi yapılmıştır. Ayrıca numuneye ait kuru yoğunluk, maksimum boşluk oranı, minimum boşluk oranı ve dane yoğunluğu değerleri laboratuvar ortamında belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan ISO kumunun granülometri eğrisi ve bazı laboratuvar verileri Şekil 1 ve Tablo 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. ISO kumuna ait granülometri eğrisi

Tablo 1. ISO kumuna ait laboratuvar verileri

Malzeme	G_s/ρ_s	ρ_{max} (Mg/m^3)	e_{max}	e_{min}	ρ_{kmax} (g/cm^3)	ρ_{kmin} (g/cm^3)
ISO kumu	2,64	1,67	0,73	0,42	1,86	1,52

2.2. Rezonant kolon deney koşullarının belirlenmesi

Deneylerde kullanılan RCT sisteminde sabit-serbest uçlu yöntem kullanılmıştır (Şekil 2). Tüm deneyler ASTM D4015 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Alt ucu sabit, üst ucu serbest ve tahrik sistemine bağlı olan bu deneyde yük üst başlıktaki motordan uygulanmaktadır. Rezonant kolon deneylerinde kullanılacak numunelerin sıkılık ve gerilme koşulları, Zhang vd. (2020) tarafından da kullanılan yaklaşıma benzer şekilde, temsili zemin profili esas alınarak belirlenmiştir. Temsili zemin profili Şekil 3'te verilmektedir. Şekilde taralı bölge ile gösterilen zemin tabakaları araştırma konusuna tabi tutulmuştur. Her bir

tabakanın orta noktasının temsili derinliği ile zemin tabakalarının kuru birim hacim ağırlıkları dikkate alınarak deneylerde uygulanacak çevre basınçları düşey örtü gerilmesi olarak hesaplanmıştır. Bu değer RCT'de izotropik çevre basıncı olarak uygulanmıştır. Deneylerde numune yüksekliğinin rezonans frekansı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla yüksekliği H=100 ve H=130 mm ve çapı D=50 mm olmak üzere iki farklı numune yüksekliği kullanılmıştır. Numune yükseklikleri için L/D oranları sırasıyla 2,0 ve 2,6'dır. ASTM D4015-21 standardına göre rezonant kolon deneylerinde kullanılan silindirik numunelerin minimum çapı 33 mm olmalı ve L/D oranı 2–7 arasında bulunmalıdır. Ayrıca, statik eksenel gerilmenin yanal gerilmeden büyük olduğu deney koşullarında L/D oranının 2–3 arasında olması gerektiği vurgulanmaktadır. Her iki numune geometrisi de ASTM D4015-21'de belirtilen geometrik sınırlar içerisinde yer almaktadır. Numuneler %40 ve %80 bağıl sıkılıklarda test edilmiştir. Numuneler, hedef bağıl sıkılık (D_r) değerlerine karşılık gelen kuru ağırlıklar esas alınarak hazırlanmış ve hedef numune yüksekliğine ulaşılıncaya kadar titreşim yöntemiyle kalıba yerleştirilmiştir. Rezonans frekansı, farklı tork çıkış genliği seviyelerinde gerçekleştirilen frekans taramaları ile belirlenmiştir. Deney sırasında yükleme frekansı kademeli olarak arttırılarak deformasyon genliği bulunmuştur. Artan bir tarama istendiği için başlangıç frekansı bitiş frekansından küçük seçilmiştir. Başlangıç ve bitiş aralığını belirlemek için başlangıçta her bir numune üzerinde referans aralık taraması yapılmıştır. Böylelikle ilk temel mod tespit edilmiştir. Deney sisteminde bir frekans taraması sırasında maksimum 101 ölçüm noktası tanımlanabildiğinden, başlangıç ve bitiş frekansları temel rezonans modunu kapsayacak şekilde belirlenmiştir. Numunelerin başlangıç ve bitiş frekansları Tablo 3'te verilmektedir.



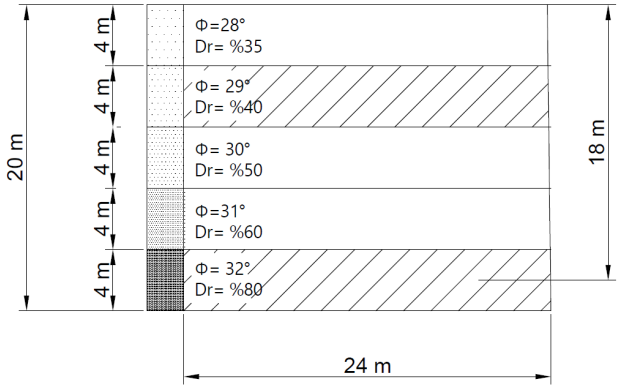
a) *b)*

Şekil 2. Rezonant kolon deney kurulumu a) Pano görünümü b) Numune yerleşimi tamamlanmış hücre görünümü

Deney sürecinde kullanılan numunelere ait özellikler Tablo 2'de verilmektedir. Numunelerin tanımlanmasında kullanılan kodlamada K kum zeminini, S bağıl sıkılığı, H ise numune yüksekliğini ifade etmektedir. Temsili zemin profilinin doğal frekansının belirlenmesinde, rezonant kolon deneylerinden elde edilen küçük şekil değiştirme seviyesindeki kayma modülü değerleri esas alınarak Tabakaların G_{maks} değerleri belirlenmiştir. Eşitlik (1) kullanılarak tabakalara ait Vs kayma dalgası hızları belirlenmiştir. Kramer (1996) tarafından önerilen yaklaşım esas alınarak doğal frekans, Eşitlik (2) kullanılarak belirlenmiştir:

$$f = \frac{v_s}{4H} \tag{2}$$

Burada V_s: kayma dalgası hızını, H ise zemin tabakasının kalınlığını ifade etmektedir. V_s değeri, tüm zemin derinliği boyunca elde edilen ortalama değer olarak seçilmiştir. Temsili zemin profilinin doğal frekansı 2,81 hz olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Temsili zemin profili

Tablo 2. Rezonant kolon deneylerinde kullanılan numunelerin özellikleri ve deney koşulları

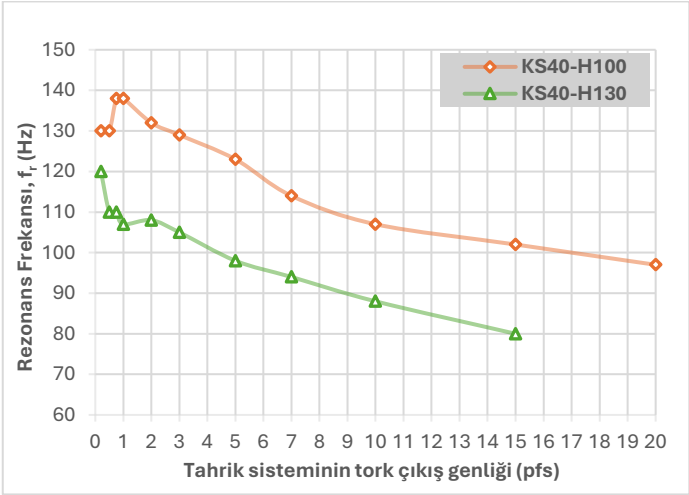
Deney Kodu	**H (mm)**	**D (mm)**	**H/D**	**D_r (%)**	**σ_c (kPa)**
KS40-H130	130	50	2,6	40	98,4
KS40-H100	100	50	2	40	98,4
KS80-H130	130	50	2,6	80	320
KS80-H100	100	50	2	80	320

Tablo 3. Numuneler için kullanılan başlangıç ve bitiş frekans aralıkları

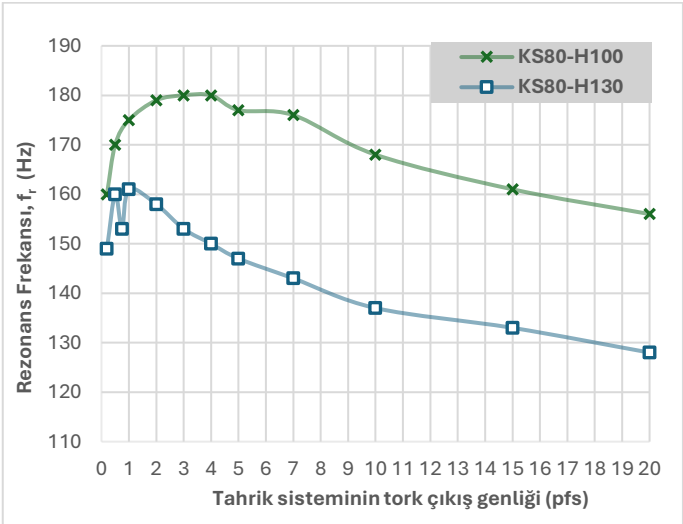
Deney Kodu	**Başlangıç frekansı (Hz)**	**Bitiş frekansı (Hz)**
KS40-H130	70	120
KS40-H100	100	150
KS80-H130	120	170
KS80-H100	130	180

3. BULGULAR VE TARIŞMA

Çalışmada, rezonant kolon deneyi kullanılarak numune yüksekliğinin rezonans frekansına etkisi %40 ve %80 bağıl sıkılık koşulları altında araştırılmıştır. RCT deney sonuçlarından elde edilen bulgular Şekil 4'te sunulmaktadır. Her iki bağıl sıkılık durumunda da 100 mm yüksekliğindeki numunelerin rezonans frekansı 130 mm yüksekliğindeki numuneye göre daha yüksek değerler almıştır. Bu sonuçlar diğer araştırmacıların sonuçları ile tutarlılık göstermektedir (Umu, 2013). Elde edilen bulgular, numune yüksekliğinin ölçülen rezonans frekansı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Ortak tork seviyeleri dikkate alındığında numune yüksekliğinin %30 artırılmasıyla rezonans frekansında D_r=%40 koşulunda %7,69–22,46 değişim aralığında (ortalama %18 oranında); D_r=%80 koşulunda ise %5,88–18,75 değişim aralığında (ortalama %14,0 oranında) azalma meydana gelmiştir. D_r = %80 ve σ_c= 320 kPa deney koşulunda, numune yüksekliğinin etkisinin artan tork seviyelerinde daha belirgin hâle geldiği görülmüştür.



a)



b)

Şekil 4. Farklı numune yüksekliklerinde tork çıkış genliği- rezonans frekansı değişimi a) D_r=%40 σ_c= 98,4 kPa b) D_r=%80 σ_c= 320 kPa

Özellikle 0,2-1 pfs tork çıkış genlikleri arasında (başlangıçta) rezonans frekansında sınırlı dalgalanmalar ve artışlar gözlenirken, belirli bir seviyeden sonra her iki numune yüksekliğinde de rezonans frekansı azalma eğilimi göstermiştir. Bu davranış hem %40 bağıl sıkılık ve 98,4 kPa çevre basıncı altında hem de %80 bağıl sıkılık ve 320 kPa çevre basıncı altında gözlenmiştir. Bunun nedenin numune ile üst başlık arasındaki temas koşullarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Aynı bağıl sıkılık ve çevre basıncı altında numune yüksekliğinin rezonans frekansını etkilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte doğal zeminlerde sıkılık ve gerilme koşullarının uniform olmaması nedeniyle, 100 veya 130 mm numuneden elde edilen frekanslardan birinin tek referans değer olarak seçilmesi yerine referans olarak seçilmesi yerine, belirlenen doğal frekans çevresinde bir frekans aralığının dikkate alınmasının daha uygun olabileceği değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, ASTM D4015'te rezonans frekansının bir frekans taraması ile belirlenmesi prensibiyle de uyumludur.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, rezonant kolon deneyi kullanılarak farklı numune yüksekliklerinde tahrik sistemi tork çıkış genliğine bağlı rezonans frekansı değişimi, iki farklı bağıl sıkılık ve bunlara karşılık gelen çevre basıncı koşullarında incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Her iki deney koşulunda da 100 mm yüksekliğindeki numunelerin rezonans frekanslarının 130 mm yüksekliğindeki numunelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Numune yüksekliğinin %30 artırılması sonucunda rezonans frekansındaki azalma, D_r=%40 ve σ_c=98,4 kPa koşulunda %7,69–22,46 aralığında değişmiş ve ortalama %18 olarak belirlenmiştir.
- D_r=%80) ve σ_c =320 kPa koşulunda ise rezonans frekansındaki azalma %5,88–18,75 aralığında değişmiş ve ortalama %14 olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen bulgular, deney koşulları kapsamında rezonant kolon deneylerinde ölçülen rezonans frekansının değerlendirilmesinde numune yüksekliğinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

ASTM D4015-87, (2000), "Standard test methods for modulus and damping of soils by the resonant-column method", American National Standards Institute.

ASTM D4015—21, (2021), "Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices. https://doi.org/10.1520/D4015-21.

Resonant Column & Torsional Shear Test Mode 1.8, (1994-2007), "Geotechnical Consulting & Testing Systems, User's Guide and Reference. "

Ishihara, K. (1996), "Soil behaviour in earthquake geotechnics, Clarendon-Oxford University Press", 385 p.

Seed, H.B. ve Idriss, I.M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No SM9, Proc. Paper 8371, 1249-1273.

Mog, K. ve Anbazhagan, P. (2019), "Dynamic Properties of Surface Liquefied Site Silty-Sand of Tripura, India", Springer Nature Switzerland AG 2019, 140-154. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01920-4_12

Okur, D.V., Umu, S.U. (2018), "Dynamic Properties of Clean Sand Modified with Granulated Rubber", Advances in Civil Engineering, Vol 2018, Article ID 5209494. https://doi.org/10.1155/2018/5209494

Güler, E., Afacan, K.B. (2020), "Düşük Deformasyon Seviyelerinde Kumların Dinamik Özelliklerinin Resonant Kolon Deneyi Yardımıyla Belirlenmesi", El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, Vol 7 (2), 572-580.

Umu, S. U., (2013), "Kum – Atık Lastik Karışımlarının Lineer Olmayan Dinamik Davranışı", Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.

Karadağ, H., Fırat, S., Işık, N., S., Okur, D., V. ve Yılmaz, G. (2022), "Yol Granüler Tabakalarında Kullanılan Çelikhane Cürufunun Maksimum Kayma Modülünün Belirlenmesi", Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 18. Ulusal Konferansı, Erciyes Üniversitesi, s: 133- 141, Kayseri. DOI:10.5505/2022zmgm.SS-13

Kramer, S. L., (1996), "Geotechnical eartquake engineering", Prentice-Hall, Upper Saddle River

Srokosz, P. E., Dyka, I., Bujko, M. ve Bochenska, M. (2021), "A Modified Resonant Column Device for In-Depth Analysis of Vibration in Cohesive and Cohesionless Soils", Energies, 14, 6647. https://doi.org/10.3390/en14206647

Zhang, X., Tang, L., Ling, X. ve Chan, A. (2020), "Critical buckling load of pile in liquefied soil", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol 135-106197. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106197

SEMBOLLER LİSTESİ

Semboller	**Açıklama**
D_r	Bağıl sıkılık
f_r	Rezonans frekansı
σ_c	Çevre basıncı
H	Numune yüksekliği
D	Numune çapı
γ	Birim şekil değiştirme
f	Doğal frekans
v_S	Kayma dalgası hızı
G_{max}	Maksimum kayma modülü
G/G_{max}	Normalize edilmiş kayma modülü