

MAKSİMUM KAYMA MODÜLÜNE GERİLME KOŞULLARININ ETKİSİ: DENEYSEL BİR YAKLAŞIM

STRESS DEPENDENCY IN MAXIMUM SHEAR MODULUS: A LABORATORY- BASED APPROACH

Moutasem Zarzour¹, Kemal Önder Çetin²

ÖZET

Zeminlerin küçük birim deformasyon altındaki kayma modülü (G_0), statik ve dinamik yükleme koşullarında zemin davranışını belirleyen önemli bir parametredir. Mevcut literatürde maksimum kayma modülünün başlangıç çeper gerilmesi ile değişimi hususunda farklı görüşler mevcuttur. Bu farklılıklar siltli zeminlerde daha da öne çıkmaktadır. Bu araştırma çalışması kapsamında temiz kumlar, siltli kumlar ve siltler için ayrı ayrı olmak üzere G_0 değerinin gerilme ile nasıl değiştiği araştırılacaktır. Bu amaca yönelik olarak, mevcut deney ekipmanlarına kolayca yerleştirilebilmesi sebebiyle piezoelektrik seramik elemanların kullanılması planlanmıştır. Piezoelektrik seramik elemanlar yerleştirilmiş bir üç eksenli deney sistemi geliştirilmiştir. Bu düzenek kullanılarak 50-800 kPa gerilme aralığına konsolide edilmiş temiz kum, siltli kum ve silt örnekler üzerinde bir dizi rezonant kolon deneyi yapılmıştır. G_0 değerinin gerilme ile normalize edilmesine yönelik basitleştirilmiş bir olasılıksal model önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *En büyük kayma modülü, Bükücü elmanlar, çeper gerilmesi, üç eksenli deney.*

ABSTRACT

Small strain shear stiffness (G_0) of soils governs the soil behaviour under monotonic and dynamic loading conditions. In the literature there are different recommendations on how to assess the dependency of G_0 on initial confining stress. These differences are more pronounced for silty soil mixtures. Within the confines of this research study, stress dependency in G_0 will be investigated separately for clean sands, silty sands, and silts. For this purpose, due to their ease of installation to existing conventional soil testing systems, piezoelectrical ceramic elements (bender-extender elements) were used. A conventional triaxial system was equipped with bender elements. This apparatus was used to perform small strain shear modulus (G_0) tests on clean sand, silt, and clay soil samples. Samples were consolidated to initial confining pressures varying in the range of 50 kPa to 800 kPa.

¹ Doktora Adayı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Moutasem.zarzour@metu.edu.tr (Sorumlu yazar)

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

A simplified probability-based model is proposed for the normalization of G_0 with initial confining effective stress.

Keywords: Bender elements – Dynamic properties of soils- Small strain shear stiffness.

1. GİRİŞ

Zeminlerin küçük birim deformasyon altındaki ($\gamma_s < 10^{-6}$) ölçülen maksimum kayma modülü (G_0), statik ve dinamik yükleme koşullarında zemin davranışını belirleyen, ve ayrıca çoğu geoteknik deprem mühendisliği probleminin analizinde kullanılan önemli bir girdi parametresidir. G_0 parametresinin nasıl ölçüleceği ve etki eden faktörler birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Goudarzy vd., 2017; Hardin ve Black, 1966; H.B. Seed ve I.M. Idriss, 1970; Seed ve Idriss, 1970; T. Wichtmann ve Th. Triantafyllidis, 2009; VP Drnevich, 1978; Wichtmann vd., 2015). Hardin ve Drnevich (1972)'in önerdiği, literatürde de yaygın olarak kullanılan, G_0 eşitliği (1) numaralı denklemde verilmiştir. Bu eşitlik boşluk oranı (e), ortalama efektif konsolidasyon gerilmesi (σ'_m), aşırı konsolidasyon oranı (OCR) ve plastisite indisindeki değişiklikleri göz önüne almaktadır. Denklemdeki (a) değeri ise malzemeye özel bir katsayıdır.

$$G_0 = 14760 \frac{(2.973-e)^2}{1+e} (OCR)^a (\sigma'_m)^{0.5} \quad (1)$$

Buna ek olarak Seed ve Idriss (1970)'in kumlu zeminlerde G_0 hesaplamak için önerdiği eşitlik, denklem (2)'de verilmiştir. Bu denklemde gerilme değeri kPa olarak kullanılmalıdır.

$$G_0 = 218.8 K_{2,max} (\sigma'_m)^{0.5} \quad (2)$$

$K_{2,max}$, boyutsuz bir parametre olup, değeri gevşek kum için 30'dan başlayıp sıkı kum için 75'e kadar çıkmaktadır (Seed vd., 1986). Ortalama efektif gerilme üssel parametre (m) değeri, kumlu zeminler için 0.5 olarak kullanılırken, literatürde killi zeminlerde bu katsayı sıklıkla 1.0 olarak kullanılır (Cetin ve Ozan, 2009; Robertson, 2009). Bununla birlikte zeminin sıklığı, plastisite indisi, derecelendirme eğrisi, dane şekli ve ince dane içeriği vb. gibi faktörler de m değerine etki etmektedir (Boulanger ve Idriss, 2004; Bui, 2009; Cha et al., 2014; T. Wichtmann ve Th. Triantafyllidis, 2009; Wichtmann et al., 2015). Kumlar ve killer için bu değer nasıl seçilmesi gerektiği hususunda bir görüş birliği bulunmakla birlikte silt ve siltli kum karışımları için literatürde farklı görüşler sunulmaktadır. Değer (2014), bu değer 0.5'ten küçük olacağı yönünde öneride bulunurken, (Moss, 2003), 0.3-1.0 gibi geniş bir aralığa işaret eder. Cetin ve Ozan (2009), ise arazi verileri ve zemin bünye model sonuçlarının esas alarak üssel katsayısının 0.5-1.0 aralığında değişeceğine işaret etmektedir.

Devam eden bu araştırma çalışması kapsamında, bu fikir ayrılıklarının ortadan kaldırılması ve tartışılan etkenlerin kum, siltli kum ve silt zeminlerde m parametresine olan etkisinin anlaşılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, geleneksel üç eksenli test düzeneğini rezonant kolona çevirmek adına, numune başlıklarına bükücü elemanlar eklenmiştir. Bu sayede geleneksel üç eksenli deney düzeneğinde kayma dalga hızı ölçümü yapabilmek mümkün olmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Zeminin küçük birim deformasyon altındaki kayma modülüne (G_0) ve ortalama efektif gerilme üssüne (m) etki eden faktörler mevcut literatürde araştırılıp, bu bölümde bu araştırmanın kısa bir özeti sunulmaktadır.

Bui (2009), doktora tez çalışmasında daneli zeminler için danelerin şeklinin ve boyutunun zeminin küçük birim deformasyon davranışına etkisini rezonant kolon deneyi gerçekleştirilerek araştırmıştır. Çalışma sonucunda, danelerin şeklinin zeminin küçük birim deformasyonunu ciddi ölçüde etkilediği raporlanmıştır. Danelerin formu ve de yuvarlaklığı, bir boşluk oranı fonksiyonu $F(e)$ ile oranlanarak G_0 değeri belirlenmiştir. Oranlanmış G_0 değeri, danelerin artan küreselliği ve yuvarlaklığı ile artar. Aynı boşluk oranında, efektif gerilme üssü (m), elastik eşik birim deformasyonu (γ_c), kayma modülü azalım (G/G_0), küresellik ve yuvarlaklıktaki artışla azalır. Aynı zamanda, artan küresellik ve yuvarlaklık ile malzeme sönüm oranı da artar. Danelerin sabit olarak kabul edilen karakteristik katsayısı (C_p) Denklem 3'te verilmiştir.

$$C_p = \frac{G_0}{((1+e)^{-3}(\sigma'_m)^m)} \quad (3)$$

T. Wichtmann ve Th. Triantafyllidis (2009), 25 farklı derecelendirme eğrisine sahip, ana minerali kuvarts olan kumlu zeminlerde 163 adet rezonant kolon testi yapmıştır. Bu çalışmada, aynı boşluk oranına sahip ve D_{50} değeri 0.1 ile 6 mm aralığında olan, C_u (D_{60}/D_{10}) değeri 1.5 ve 8 aralığında değişen zeminlerde G_0 'ın, ortalama dane boyutuna (D_{50}) bağlı olmadığı belirtilmiştir. Ek olarak zeminin üniformite katsayısının (C_u) artması ile G_0 'ın azaldığı gözlemlenmiştir.

Cha vd. (2014), zemin kayma dalgası hızına (V_s) etki eden faktörleri incelemek adına bir veri tabanı derlemiştir. Bu veri tabanı ince daneli zeminlerden kaba daneli zeminlere, doğal zemin örselenmemiş numunelerinden, yeniden yapılandırılmış numunelere, normal konsolide'den aşırı konsolide zeminlere uzanan geniş bir aralığı kapsamaktadır. Bu çalışmada sunulan ve polarizasyon düzlemi üzerinde kayma dalgası hızını (V_s) ortalama efektif gerilme ile ilişkilendiren bağıntı Denklem (4)'te verilmiştir.

$$V_s = \alpha (\sigma'_m)^\beta \quad (4)$$

Bu eşitlikte, α 1 kPa çeper gerilmesi altındaki kayma dalgası hızını (V_s), β ise dane temas yüzeyinin etkisini modellemek üzere önerilmiş olup, β ve α arasında ters bir orantı raporlanmıştır. İlişki Denklem 5'te verilmiştir.

$$\beta = 0.73 - 0.27 \log(\alpha/(m/s)) \quad (5)$$

Wichtmann vd. (2015) P dalgası ölçümleriyle yaklaşık 130 rezonant kolon (RC) testi yaparak, kohezyonsuz zeminlerin ince dane içeriğinin küçük birim deformasyon kayma modülüne (G_0), kayma modülü azalımına (G/G_0), sönüm oranına ve elastik eşik birim deformasyonuna (γ_c) olan etkisini incelemiştir. Farklı ince dane içeriklerinde ($0 < FC < 20\%$) hazırlanan kuvarz kumu karışımlarından, C_u değerleri 1.5 ile 50 arasında değişen numuneler farklı bağıl sıklıkta hazırlanmış ve değişen efektif gerilmeler altında test edilmiştir. DeneySEL

çalışmanın sonucunda ince dane içeriği arttıkça G_0 'da önemli bir düşüş gözlemlenirken, G/G_0 'ın ince dane içeriğinden oldukça bağımsız olduğu bulunmuştur.

Denklem 1'de verilen ve Denklem 6'da parametrik olarak tekrar edilen ampirik çözümün sabitleri güncellenerek, daneli zeminlerin derecelenme yapısı da göz önüne alınarak, Denklem 7-9'da sunulmuştur.

$$G_0 = A \frac{(a-e)^2}{1+e} \left(\frac{p}{P_{atm}} \right)^n P_{atm} \quad (6)$$

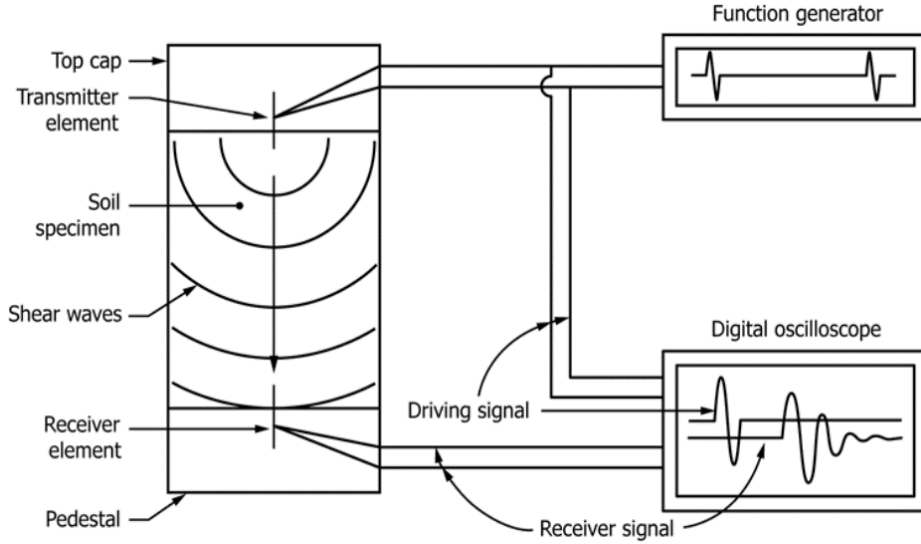
$$a = 1.94 \exp(-0.066C_u) \exp(0.065FC) \quad (7)$$

$$n = 0.4C_u^{0.18} (1 + 0.116 \ln(1 + FC)) \quad (8)$$

$$A = 0.5 (1563 + 3.13C_u^{2.98}) (\exp(-0.30FC^{1.10}) + \exp(-0.28FC^{0.85})) \quad (9)$$

3. BÜKÜCÜ ELEMAN (REZONANT KOLON) DENEYİ

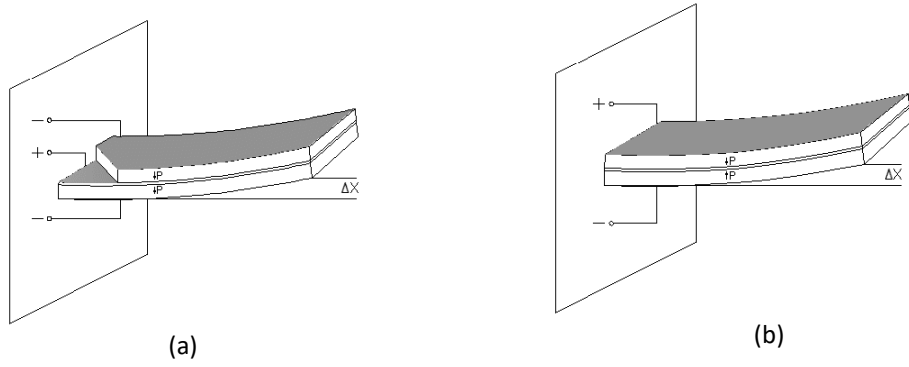
Bu çalışma kapsamında, daneli zeminler için G_0 'a etki eden parametrelerin değişimini araştırmak üzere geleneksel üç eksenli deney düzeneğine bükücü elemanlar eklenerek kayma hızı (V_s) ölçme kabiliyeti kazandırılmıştır. Bükücü elman testinde, numunenin iki ucuna biri verici diğeri alıcı olan iki adet piezoelektrik elman yerleştirilir. Bu düzende verici piezoelektrik elemanın sinyal üretici ile genellikle sinüs dalgası formunda titreştirilmesi sağlanır. Bu titreşimin karşı alıcı elemanda ürettiği titreşimler ise osiloskop kullanılarak kaydedilir. Böylece verici ve alıcıdaki iki sinyali karşılaştırabilmek mümkün olur (Şekil 1).



Şekil 1. Bükücü Elemanı Test Kurulumunun Şematik Diyagramı, (ASTM-D8295).

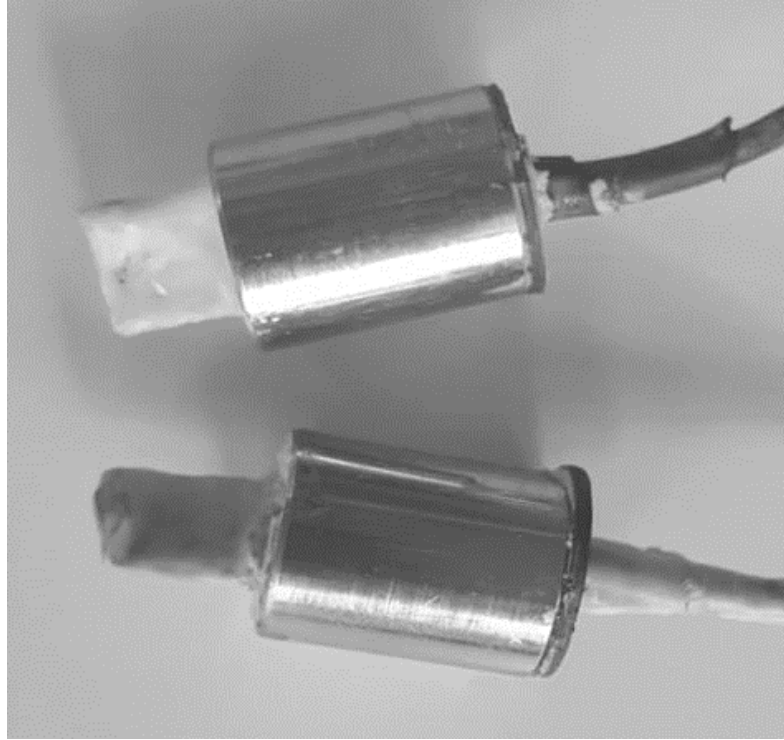
3.1. Bükücü elemanlar:

Bir bükücü eleman, elektrik enerjisini mekanik enerjiye, mekanik enerjiyi de elektrik enerjisine çevirebilen ve aksına dik deforme olabilen bir piezoelektrik dönüştürücüdür. Her eleman, ince bir metal levha ile ayrılmış bir çift seramik plakadan oluşur. Piezoelektrik seramik plaka polarizasyonuna (x-kutuplu veya y-kutuplu) göre sırasıyla seri veya paralel şeklinde kablolar takılması gerekmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Bükücü eleman kabloları, polarizasyonu ve deformasyonu, (a) paralel (Y-kutuplu) (b) seri (X-kutuplu) kabloları (Piezo Systems, Inc).

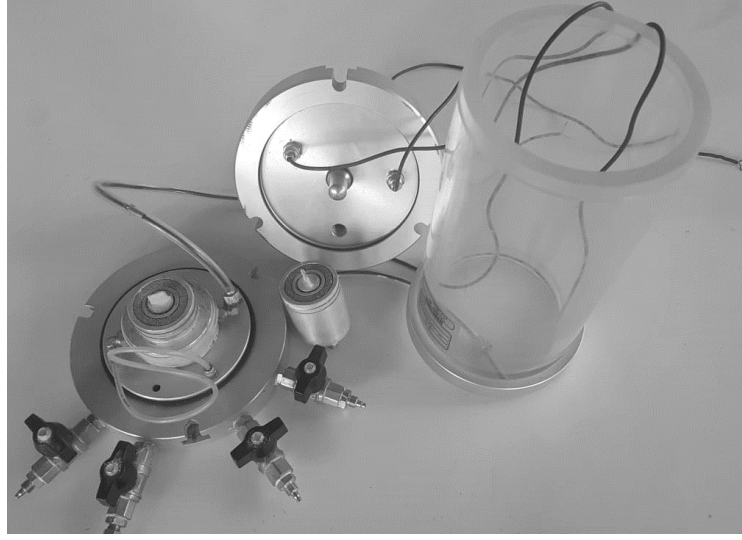
Bükücü elemanlar elde edebilmek için bir piezoelektrik seramik levhası (80 x 40 x 0.5 mm), 5 cm çapındaki üç eksenli düzenek numune başlıkları içerisine sığabilmesi için daha küçük levhalara (35 x 10 x 0.5 mm) kesilip, paralel bir şekilde iletken kablolarla bağlanır. Levhalar su ve mekanik darbelere karşı dayanıklılık kazanması için epoxy ile kaplanıp, küçük plastik veya alüminyum silindir hücreler içinde elemanın serbest boyu 13 mm kalacak şekilde sabitlenir (Şekil 3).



Şekil 3. Alüminyum silindir muhafaza içine yerleştirilmiş bükücü elemanlar.

3.2. Bükücü eleman deneyi

Geleneksel üç eksenli deney düzeneği, 5 cm çapındaki başlıkların bükücü elemanlara ev sahipliği yapabilmesi için özel olarak değiştirilmiş olup, Şekil 4'te bu sistem gösterilmektedir.



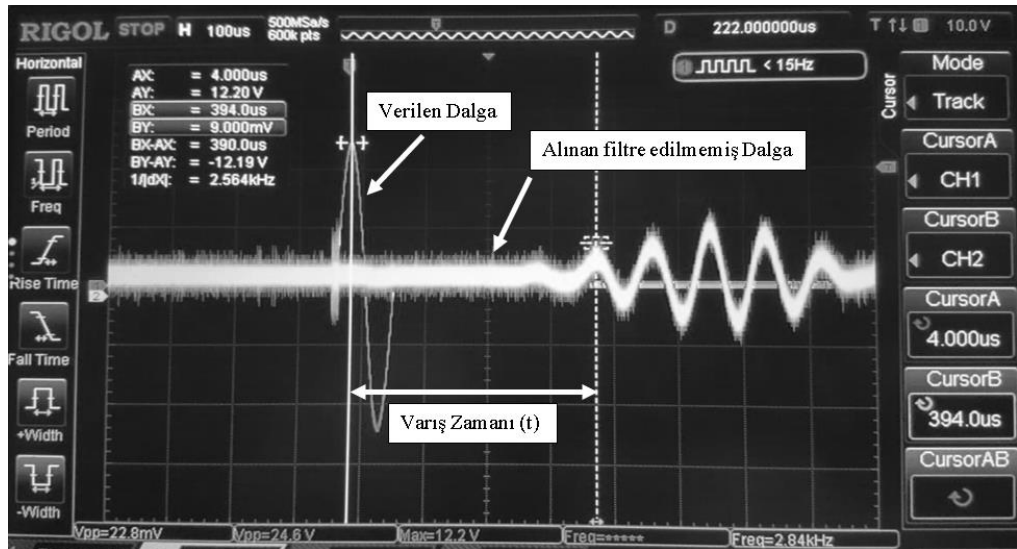
Şekil 4. Bükücü eleman deneyi yapabilmek için değiştirilmiş üç eksenli deney hücresi.

3.3. Bükücü eleman deney verilerinin işlenmesi:

Bükücü eleman testinde, verilen dalga ile alınan dalganın varış zamanları arasındaki fark (t) osiloskop kullanarak elde edilen sinyallerden belirlenir. Bununla birlikte verici ve alıcı elemanların tepelerinin arasındaki mesafe (L) hassas şekilde ölçülerek kayma hızı Denklem-10'da verildiği üzere hesaplanır.

$$V_s = \frac{L}{t} \quad (10)$$

Bükücü elman testlerinin dezavantajı, dalganın varış zamanını tayin etmek için standart bir metodun olmamasıdır. Bu çalışmada, (ASTM-D8295)'te önerilen sinyal tepeleri karşılaştırılarak varış zamanının belirlenmesi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde dalga varış zamanı, zaman uzayındaki sinyal tepeleri karşılaştırılarak elde edilir (Şekil 5).



Şekil 5. Bükücü eleman deneylerinde sinyal tepeleri karşılaştırma yöntemi ile dalga ilerleme süresinin tayini.

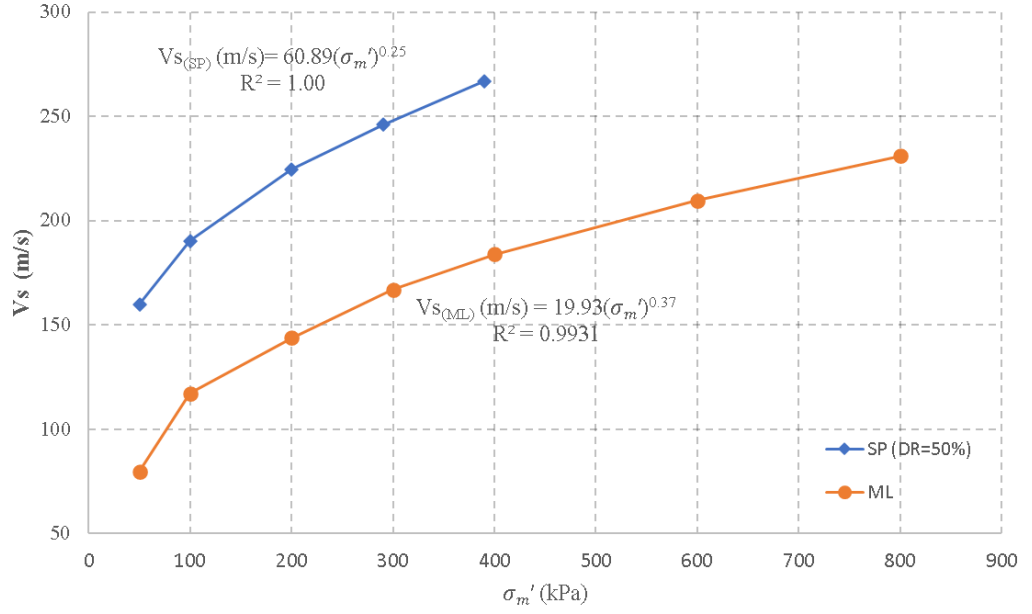
4. DENEY PROGRAMI VE ÖNCÜ SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, daneli zeminlerin bağıl sıklığının (D_R %), ince dane içeriğinin (FC), üniformite katsayısının (C_u), ortalama dane boyutunun (D_{50}), danelerin yuvarlaklığının (R), ve küreselliğinin (S), üssel gerilme katsayısına (m) etkisinin araştırılması planlanmıştır. Bu amaçla, numunelerin 50 kPa ile 800 kPa arasında değişen izotropik efektif gerilmelere konsolide edilerek, kayma dalga hızlarının (V_s) bükücü eleman deneyi ile ölçülmesi planlanmıştır. Deney programı Çizelge 1’de sunulmaktadır. Halen devam eden araştırmaların öncü sonuçları paylaşılabacaktır. Bu kapsamda kötü (SP) derecelenmiş temiz kum numunesine ek olarak plastik olmayan bir silt (ML) numune üzerinde gerçekleştirilmiş deneylerin öncü sonuçları tartışılacaktır.

Çizelge 1. Deney Programı

Zemin Tipi	DR (%)	FC (%)
SP	35	0-2
	50	
	65	
	80	
	95	
SW	35	0-2
	50	
	65	
	80	
	95	
SP-SM	35	15
	50	
	65	
	80	
	95	
SM	35	35
	50	
	65	
	80	
	95	
ML	-	100

Şekil 6’da kötü derecelenmiş kum (SP) ve plastik olmayan silt (ML) numunelerde elde edilen kayma hızı (V_s) ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Kum (SP) için elde edilen V_s kayma hızı değerleri literatürde yaygın olarak kullanılan efektif gerilme üssel değeri olan 0.25 ile uyumlu bulunmuştur (Seed ve Idriss, 1970). Bununla beraber, silt (ML) numunesinin efektif gerilme üssünün G_o uzayındaki değeri 0.74 olarak hesaplanmış olup, hesaplanan bu değer (Cetin ve Ozan, 2009) tarafından önerilen ve 0.5-1.0 aralığında değişen değerlerle uyum göstermekte olup, Değer (2014), tarafından siltler için 0.5’ten küçük olarak kullanılması önerilen üssel katsayı değeri ile uyumsuzdur. Çalışma sonuçları öncü niteliğinde olduğundan daha detaylı değerlendirmelerin yapılması deney programının tamamlanması sonrasında bırakılmıştır.



Şekil 6. Kum (SP) ve Silt (ML) numunelerden elde edilen Kayma hızı (Vs) değerlerin karşılaştırılması.

KAYNAKLAR

- ASTM International. 2019. Standard Test Method for Determination of Shear Wave Velocity and Initial Shear Modulus in Soil Specimens Using Bender Elements. ASTM D8295–19. West Conshohocken, PA: ASTM International, approved November 1, 2019. <https://doi.org/10.1520/D8295-19>
- Boulanger, R., ve Idriss, I. (2004). *Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays*.
- Bui, M. T. (2009). *INFLUENCE OF SOME PARTICLE CHARACTERISTICS ON THE SMALL STRAIN RESPONSE OF GRANULAR MATERIALS*. University of Southampton.
- Cetin, K. O., ve Ozan, C. (2009). CPT-Based Probabilistic Soil Characterization and Classification. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(1), 84–107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:1\(84\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:1(84))
- Cha, M., Santamarina, J. C., Asce, A. M., Santamarina, ; J Carlos, Asce, M., Kim, ; Hak-Sung, ve Cho, G.-C. (2014). Small-strain stiffness, shear-wave velocity, and soil compressibility. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 140(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001157](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001157)
- Deger, T. (2014). *Overburden stress normalization and rod length corrections for the standard penetration test (SPT)*. University of California, Berkeley.
- Goudarzy, M., Rahemi, ; Negar, Rahman, ; Md Mizanur, Asce, M., ve Schanz, T. (2017). Predicting the Maximum Shear Modulus of Sands Containing Nonplastic Fines. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(9), 06017013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001760](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001760)
- Hardin, B. O., ve Black, W. L. (1966). Sand Stiffness Under Various Triaxial Stresses. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92(2), 27–42. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000865>

- Hardin, B. O., ve Drnevich, V. P. (1972). Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects (Terzaghi Lecture). *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(6), 603–624. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001756>
- H.B. Seed, ve I.M. Idriss. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. In *Technical Report EERC 70- 10, Earthquake Engineering Research Center*. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10022026877/>
- Moss, R. (2003). *CPT-based probabilistic assessment of seismic soil liquefaction initiation* [University of California, Berkeley].
- Robertson, P. K. (2009). Interpretation of cone penetration tests — a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), 1337–1355. <https://doi.org/10.1139/T09-065>
- Seed, H. B., ve Idriss, I. M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. *Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., ve Tokimatsu, K. (1986). Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(11), 1016–1032. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:11\(1016\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:11(1016))
- T. Wichtmann, ve Th. Triantafyllidis. (2009). On the influence of the grain size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus Gmax. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 135(10), 1418. http://torsten-wichtmann.de/paper/journal/2009-ASCE-JGGE-Gmax_Cu.pdf
- VP Drnevich. (1978). Resonant-column testing—Problems and solutions. *Dynamic Geotechnical Testing. ASTM International*. https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/PAGES/STP35687S.htm
- Wichtmann, T., Navarrete Hernández, M. A., ve Triantafyllidis, T. (2015). On the influence of a non-cohesive fines content on small strain stiffness, modulus degradation and damping of quartz sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 69, 103–114. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2014.10.017>

