

TEKRARLI YÜK ETKİSİNDE KİL ZEMİNLERİN LİNEER OLMAYAN ELASTİK DAVRANIŞI

Volkan OKUR¹, Atilla ANSAL²

ÖZET: Zemin tabakaların dinamik yükler altındaki davranışı, tekrarlı yükleme genliğine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Bu çalışmada, İstanbul Avcılar Bölgesinden alınan örselenmemiş kil zemin numuneler üzerinde, gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyler yapılmıştır. Normal konsolide olarak hazırlanan numuneler 0,1 Hz frekansında, farklı tekrarlı gerilme genliklerinde yüklenmiştir. Yükleme sonucu maksimum kayma modülü, sönüm oranı değerleri belirlenmiştir. Lineer olmayan elastik davranış sınırı kayma modülü oranının yaklaşık % 90 değerine denk gelmektedir. Bu sınır aşıldıktan sonra malzemenin tekrarlı yük altında davranışı, özellikle plastisite indisinden büyük oranda etkilenmektedir. Deney sonuçlarından, maksimum kayma modülünü belirlemeye yönelik pratik amaçlar için kullanılacak bağıntılar önerilmiştir. Ayrıca arazi deneylerinden elde edilen kayma dalgası hızından yola çıkarak laboratuvar ve arazi kayma modülü ve sönüm oranı arasındaki ilişki belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Başlangıç kayma modülü, sönüm oranı, dinamik üç eksenli.

NON-LINEAR ELASTIC RESPONSE OF CLAY SOILS UNDER CYCLIC LOADINGS

ABSTRACT: Response of soil deposits under dynamic loadings differs with the cyclic loading amplitudes. In this study, stress controlled cyclic triaxial tests were conducted on the specimens taken from the Istanbul Avcilar District. Normally consolidated specimens were cyclically loaded under different stress amplitudes at a frequency of 0.1 Hz. Maximum shear modulus and damping ratio values determined. Loading cycles showed that the non-linear elastic shear modulus is approximately equal to 90% of shear modulus ratio. After this threshold it's observed that the material response under cyclic loading is greatly influenced from plasticity index of the soil. From the test results empirical relationships proposed for determining the maximum shear modulus for practical purposes. Furthermore, a correlation for field conditions is also presented by using in situ shear wave velocities between laboratory and in-situ shear modulus and damping ratio values.

Keywords: Initial shear modulus, damping ratio, dynamic triaxial

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480 Eskişehir

²Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Çengelköy, 34688 İstanbul

I. GİRİŞ

Yeraltı ve yerüstü yapılarının, farklı yöntemlerle yapılan dinamik analizlerinde önemli ortak konulardan birisi, zeminin tekrarlı yükler altında gerilme-birim şekil değiştirme ve mukavemet davranışının modellenmesidir. Oluşturulacak model, zeminin tekrarlı yükler altındaki davranışını, önceden belirlenmiş birim kayma genliği aralıklarında mümkün olduğunca gerçeğe yakın tekrarlamalıdır.

Tekrarlı yükleme genliğine bağlı olarak, zemin davranışı da farklılıklar göstermektedir. Düşük genlikli titreşimlerin oluşturduğu dalga yayılımı problemlerinde elastik davranış gözlenirken, deprem ve patlamalar gibi büyük genlikli tekrarlı yüklemelerde, dane temas yüzeylerinde oluşan kaymalardan kaynaklanan plastik şekil değiştirmeler söz konusu olup, özellikle depremler sonrası oluşan yapısal hasarlar, zeminlerin tekrarlı yüklemeler karşısında gösterdikleri davranıştan büyük ölçüde etkilenmektedir.

Tekrarlı yükler altında kil zeminlerin davranışı karmaşık bir problem oluşturmaktadır. Tekrarlı yük etkisi altında zemin taşıma kapasitesi ya da deformasyonların hesaplanmasına yönelik temel bir yöntem geliştirilebilmiş değildir. Bunun bir nedeni de, tekrarlı yük özellikleri, (yükleme frekansı ve süresi, yükleme yönü) zemin özellikleri (gerilme geçmişi, çimentolanma, çevre basıncı, zemin yapısı vb), yer altı suyu gibi birçok faktörün davranışa etki ediyor olmasıdır. Tekrarlı yükleme tipi deprem gibi yüksek genlik ve kısa süreli ya da dalga, trafik yükü yada makine temel titreşimi gibi kısa genlik ve uzun süreli olabilir. Zemin davranışı ve zemin-yapı etkileşimi analizlerinde adı geçen faktörlerin etkisi büyük önem taşımaktadır.

Zeminlerin, tekrarlı yükler altında gerilme-birim şekil değiştirme parametreleri maksimum kayma modülü G_{maks} , ($\gamma \leq 5 \times 10^{-4} \%$), maksimum (başlangıç) kayma modülü, sekant modülü, G ve sönüm oranı, D değerleridir. G_{maks} değeri laboratuvar ve arazide elastik dalga yayılımıyla ilgili deneylerden hesaplanabilmektedir. Diğer modül değerleri sekant kayma modülü ve sönümlenen enerji miktarını gösteren sönüm oranı tekrarlı yükleme sonucu elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrisinden hesaplanmaktadır (Şekil 1).

1.2. Maksimum Kayma Modülü

Simetrik tekrarlı yükleme uygulanmış bir zemin elemanına ait gerilme-birim şekil değiştirme davranışı (histerisis ilmeği olarak adlandırılır) Şekil 1’de verilmiştir. Histerisis ilmeği, (ABCD eğrisi) belirli tekrarlı birim kayma, γ_a değeri ve tekrarlı kayma gerilmesi, τ_a değeri için çizilmiştir. A ve C ilmeğin uç noktaları olup, uç noktalar arasındaki eğri (EAOCF eğrisi), omurga eğrisi olarak tanımlanır. Lineer olmayan gerilme-birim şekil değiştirme davranışı, omurga eğrisi ve histerisis ilmeğinin tanımlandığı iki fonksiyondan meydana gelmektedir. Omurga eğrisi, birim kayma genliğinin bir fonksiyonu olup, statik yükleme sonucu elde edilen fonksiyon ile aynıdır. A noktasında, yüklemenin yönü tersine döndüğünde, $\gamma=\gamma_a$ ve $\tau=\tau_a$ olacağından histerisis ilmeği için;

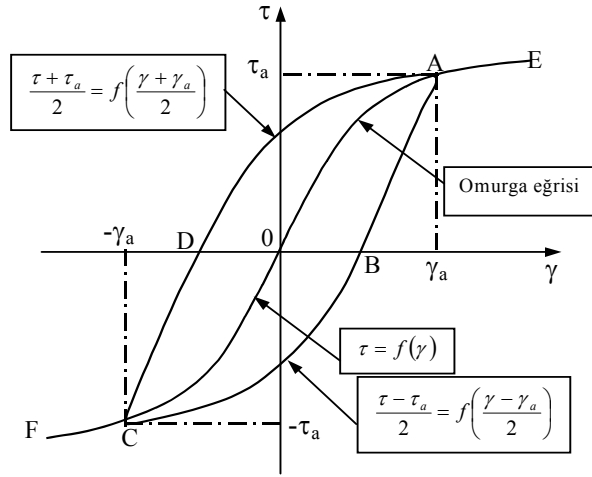
$$\frac{\tau - \tau_a}{2} = f\left(\frac{\gamma - \gamma_a}{2}\right) \quad (1)$$

tekrar yükleme için ise;

$$\frac{\tau + \tau_a}{2} = f\left(\frac{\gamma - \gamma_a}{2}\right) \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. (2) bağıntısı ile tanımlanmış olan yeniden yükleme eğrisi, omurga eğrisini A noktasında kesmektedir. (1) ve (2) fonksiyonları zeminin lineer olmayan davranışını modellemektedir [1].

Bu eğrinin karakteristik iki özelliği, ilmeğin eğimi ve alanıdır. Eğim, zeminin rijitliğine bağlı bir büyüklük olup, herhangi bir noktadaki tanjant değeri, kayma modülü, G_{tan} olarak tanımlanmaktadır.

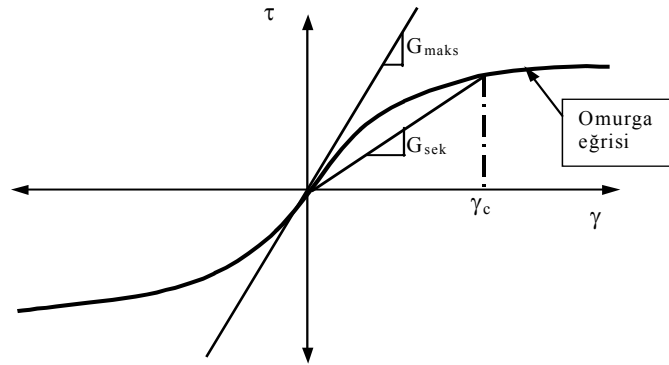


Şekil 1. Tekrarlı yükleme sonucu gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi [1].

Bir çevrim boyunca bu değer sürekli değişeceğinden, ortalama bir değer olarak sekant kayma modülü,

$$G_{sec} = \frac{\tau_a}{\gamma_a} \quad (3)$$

tanımlanmıştır. τ_a tekrarlı kayma gerilmesi, γ_a tekrarlı birim kayma genliğidir. G_{sec} histerisis ilmiğinin ortalama eğimidir ve kayma modülü olarak adlandırılır. Omurga eğrisine orijinden teğet geçen doğrunun eğimi, maksimum kayma modülü, G_{maks} olarak tanımlanır (Şekil 2).



Şekil 2. Maksimum kayma modülü, sekant kayma modülü

Belirli birim kayma genliği değerine zeminlerin lineer-elastik ve lineer olmayan elastik davranış gösterdiği kabul edilmektedir. Bu aralıkta kayma modülü değeri en büyük değerinde olup, sabittir. Diğer taraftan, laboratuvar ve arazi deneyleri, birim kayma genliğinin 10^{-5} veya daha az olması durumunda kayma dalgası hızının da sabit kaldığını göstermektedir. Buradan hareketle, maksimum kayma modülü arazi sismik deneyler kullanılarak kayma dalgası hızından,

$$G_{maks} = \rho v_s^2 \quad (4)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bağlıntıdaki, ρ zeminin yoğunluğu, v_s kayma dalgası hızıdır. Maksimum kayma modülü, statik analizlerde kullanılan kayma mukavemetine benzer bir anlam taşımaktadır. Bir zemine ait tek bir mukavemet değeri olamayacağı gibi tek bir maksimum kayma modülü değeri de yoktur. Maksimum kayma modülüne etkiyen faktörler,

$$G_{maks} = f(\sigma_o', e, H, \tau_o, C, A, F, T, \theta, K) \quad (5)$$

şeklinde bir fonksiyonla ifade edilmiştir [2]. Bu fonksiyonda, σ_o' efektif normal gerilme, e boşluk oranı, H gerilme geçmişi, S doyumluk derecesi, τ_o kayma gerilmesi, C dane özellikleri, A titreşimin genliği, F titreşimin frekansı, T zamana bağlı (ikincil konsolidasyon) etkiler, θ zemin yapısı, K sıcaklık olarak tanımlanmıştır. Yapılan deneylerde maksimum kayma modülü boşluk oranı ve çevre basıncına bağlı olarak;

$$G_{maks} = A \cdot F(e) \cdot (\sigma_o')^n \cdot (AKO)^m \quad (6)$$

formunda ifade edilmiştir. Bağlıntıda A , zeminin rijitliğine bağlı bir katsayı, n ve m indisleri ise çevre basıncı ve gerilme geçişine bağlı sabitlerdir. σ_o' efektif ortalama asal gerilme, AKO aşırı konsolidasyon oranı (σ_p' / σ_o') 'dir.

Maksimum kayma modülü üzerine, farklı deney sistemleri ve farklı kil numuneler kullanılarak yapılan benzer çalışmalar da (6) bağıntısı formundadır [3-8].

Maksimum kayma modülünü etkileyen diğer bir önemli faktör de örselenmedir [9-13]. Örselenme üzerine yapılan çalışmalarda, arazi ve laboratuvar deney sonucu bulunan maksimum

kayma modülleri karşılaştırdığında, %50'ye varan farklılıklar gözlemlenmiştir [14]. Ancak yüksek kalitede numuneler alınıp, arazi gerilme değerlerinde konsolide edilirse, bulunan dinamik kayma modülleri arazi değerlerine yakın çıkabilmektedir [15].

II. KULLANILAN MALZEME VE YÖNTEM

Deneylerde İstanbul Avcılar bölgesinde yapılan sondajlardan elde edilmiş numuneler kullanılmıştır. Konsolidasyon deney sonuçlarına göre numuneler normal ve hafif aşırı konsolidedir (AKO=1-1,5). Statik yükleme koşulları altında zemin özelliklerini belirlemek için kullanılan klasik üç eksenli deney sistemi benzeri, tekrarlı yükleme koşulları altında zemin davranışını incelemek için kullanılan deney sistemlerinden bir tanesi dinamik üç eksenli deneydir. Çalışmada kullanılan deney sistemi gerilme kontrollü olup eksenel yük, pnömatik veya servohidrolik bir sistem kullanılarak sağlanmaktadır. Deney sırasında yük, deformasyon, boşluk suyu basıncı ve hacim değişimi değerleri ölçülebilmektedir. Eldeki deney sonuçlarından numunelerin ilk olarak elastisite modülleri hesap edilmiştir. Kayma modülü ise,

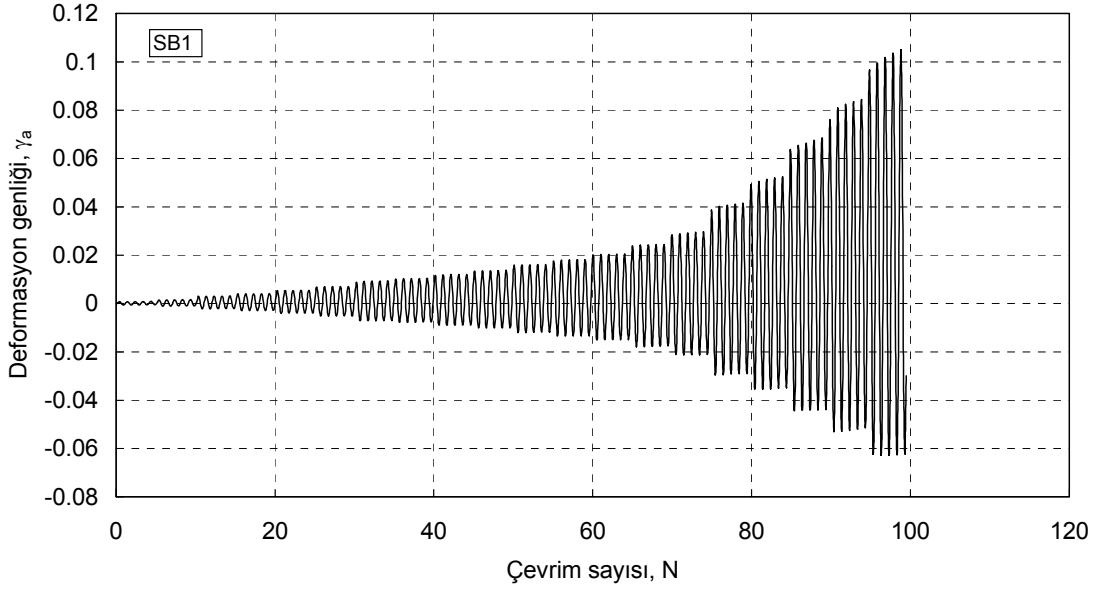
$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (7)$$

bağıntısı kullanılarak bulunabilir. Bu bağıntıda μ , Poisson oranı olup suya doymuş yumuşak zeminler için 0.5 alınabilir. Ancak, zeminin rijitliği arttıkça bu değer azalmaktadır [16]. Birim şekil değiştirme ε_a ile birim kayma γ_a arasındaki bağıntı ise elastisite teorisinde,

$$\gamma_a = (1 + \mu)\varepsilon_a \quad (8)$$

olarak tanımlanır.

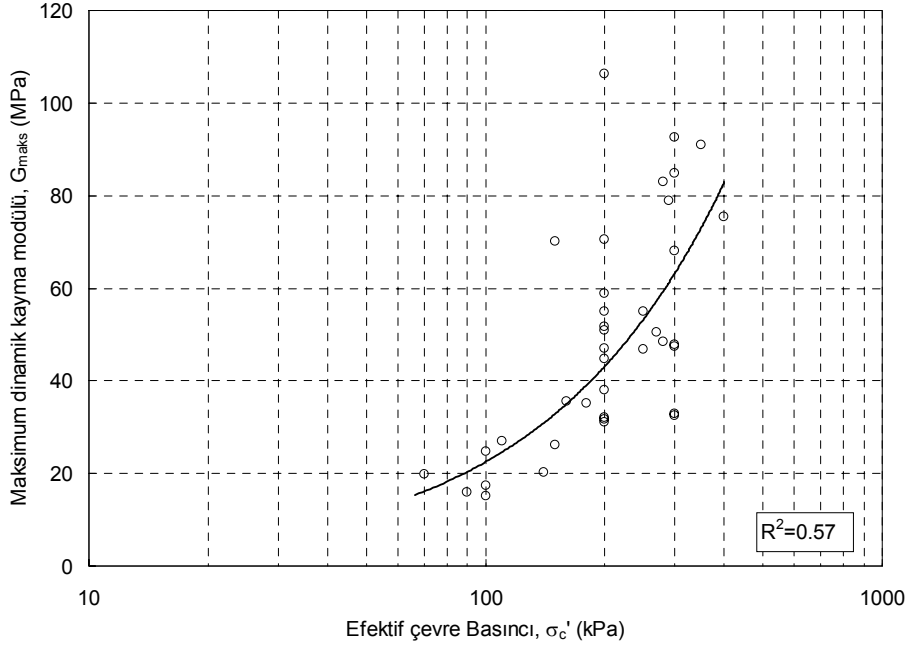
Numuneye tekrarlı yükler düşey yönde uygulanmakta ve bu sürede çevre basıncı sabit tutulmaktadır. Sınır koşullarından dolayı, numunede oluşan en büyük asal gerilmenin yönünün, her yükleme çevrimi için 90°'lik bir dönme gösterdiği ve orta asal gerilmenin değerinin, yükleme çevriminin basınçta kalan kısmında, en küçük asal gerilmenin değerine ve çekmede



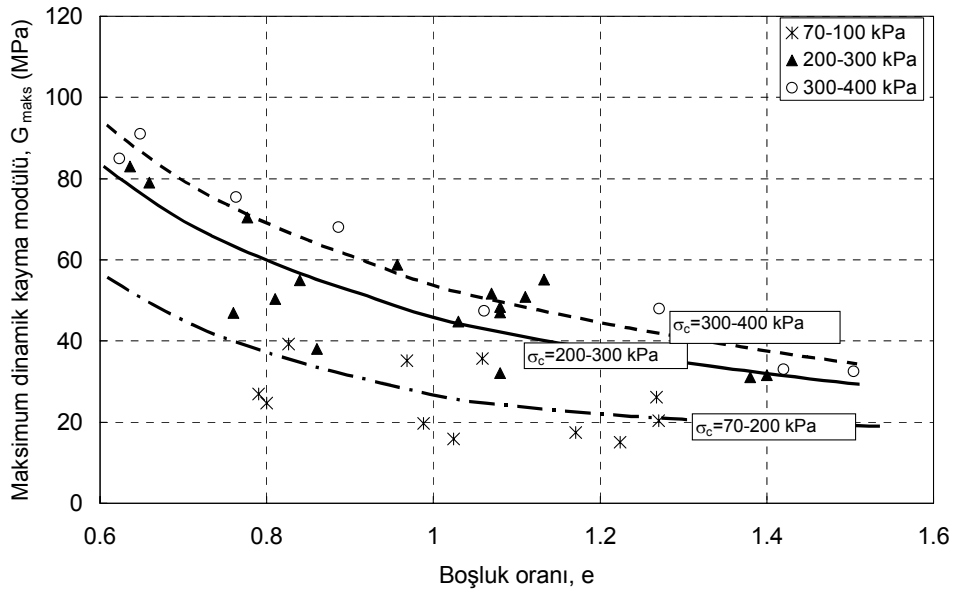
Şekil 4. Deformasyon genliği çevrim sayısı ilişkisi

II. 1. Maksimum Dinamik Kayma Modülü ve Etki Eden Faktörler

Yapılan deneylerde maksimum dinamik kayma modülüne boşluk oranı, çevre basıncı, plastisite indisi, likidite indisi ve kaba dane oranı etkileri incelenmiştir. Deneye tabi tutulan numunelerin tabii su muhtevaları $w_o = \% 25-30$, likit limit değerleri, $LL = \% 40-55$, plastisite indisleri $PI = \% 10-30$, boşluk oranları $e_o = 0,72-1,2$, uygulanan çevre basınçları $\sigma'_c = 70-250$ kPa, arasında değişmektedir. Geliştirilmiş Birleştirilmiş zemin sınıflandırmasına göre kullanılan numuneler yüksek plastisiteli kil (CH), siltli kil sınıflarına girmektedirler. Maksimum kayma modül değerleri, malzemede yumuşamanın meydana gelmediği ilk 5 yada 10 çevrimdeki gerilme genlikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 5'te çevre basıncı ve maksimum kayma modülü ilişkisinde çevre basıncı ile hesaplanan maksimum kayma modülü arasında bir oran olduğu görülmektedir. Farklı boşluk oranına sahip numuneler için hesaplanan maksimum kayma modül değişimleri ise Şekil 6'da verilmiştir. Şekildeki eğriler, ortalama çevre basıncı değerleri için, boşluk oranı ile maksimum kayma modülü değeri herhangi bir çevre basıncında, maksimum dinamik kayma modülü, boşluk oranı arttıkça azalmaktadır.



Şekil 5. Çevre basıncı maksimum dinamik kayma modülü ilişkisi



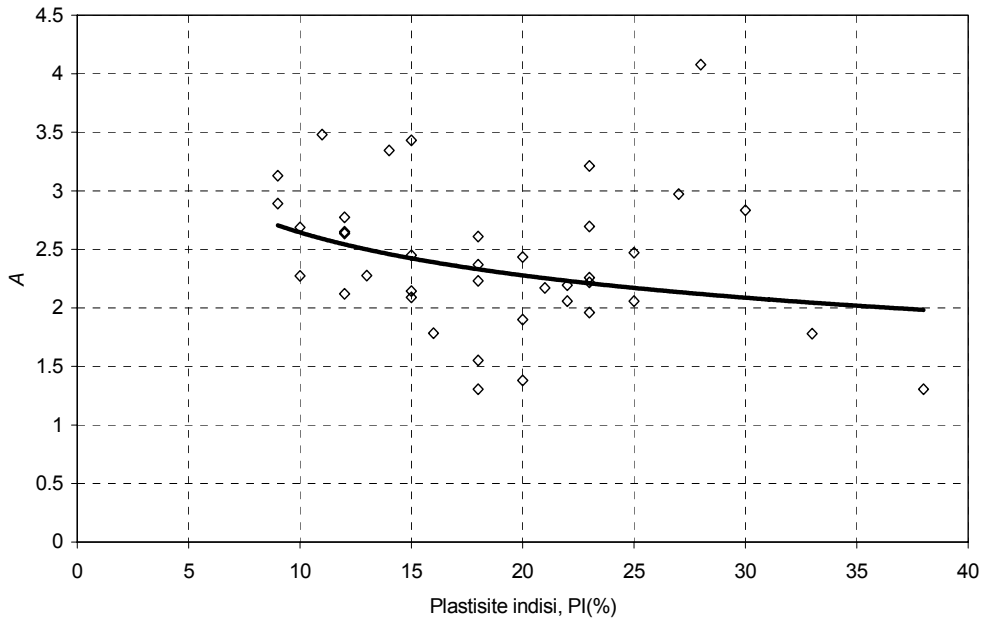
Şekil 6. Boşluk oranı maksimum dinamik kayma modülü değişimi

(6) bağıntısında, maksimum kayma modülünün, zemin iskeletinin yapısına diğer bir deyişle rijitliğine (A katsayısı), çevre basıncına, gerilme geçmişine, dolayısıyla n ve m katsayılarına bağlı olduğu görülmektedir. Yapılan deneylerden A katsayısının plastisite indisine göre değişimi Şekil 7’de verilmiştir. Plastisite indisi arttıkça zemin yapısındaki rijitlik azalmaktadır.

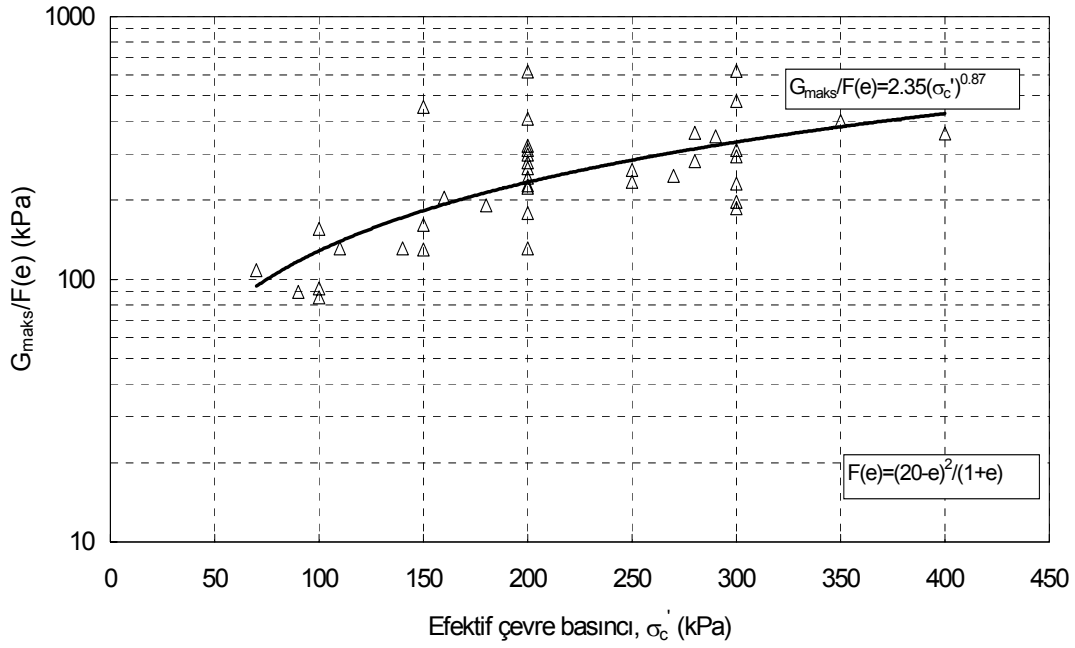
Bu çalışmada, 1×10^{-5} seviyesinde ölçülmüş, düşük-orta plastisiteli normal konsolide ince daneli zeminler için maksimum dinamik kayma modülü, boşluk oranı ve çevre basıncının bir fonksiyonu olarak, kPa cinsinden,

$$G_{maks} = 2.35 \frac{(20-e)^2}{(1+e)} (\sigma'_c)^{0.87} \quad (9)$$

şeklinde bulunmuştur. Bağıntıda e boşluk oranı, σ'_c kPa cinsinden efektif çevre basıncıdır. Şekil 8’de maksimum kayma modülü, boşluk oranı fonksiyonu ile normalize edilmiş ve efektif çevre basıncına göre değişimi gösterilmiştir.

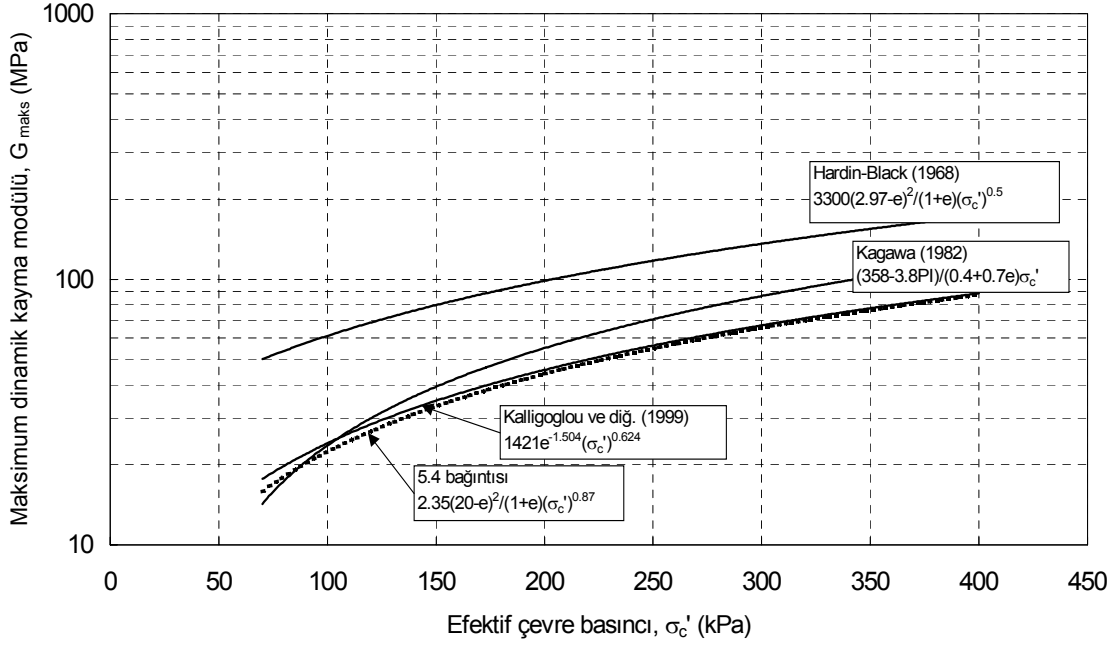


Şekil 7. *A rijitlik katsayısının plastisite indisi ile değişimi*



Şekil 8. Normalize maksimum dinamik kayma modülü efektif çevre basıncı ilişkisi

Şekil 9'da diğer araştırmacılar tarafından önerilen bağıntıların, (9) bağıntısıyla karşılaştırması görülmektedir. [2] Black, bağıntısı katı kıvamlı kaolin kili için geliştirmişlerdir. [3] Kagawa, çalışmasında örselenmemiş killer için maksimum dinamik kayma modülünü plastisitenin bir fonksiyonu olarak önermiştir. Ancak önerilen bağıntı, birincil konsolidasyon sonrası bulunmuş maksimum kayma modüllerinden çıkarılmıştır. (9) bağıntısıyla uyum gösteren bağıntılardan birisi de [18] Kallioglou, tarafından örselenmemiş killer için önerdikleri bağıntıdır. Boşluk oranı fonksiyonu, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak $F(e)=e^{-\beta}$ şeklinde tanımlanmaktadır. Kullanılan deney sistemi rezonant kolon olup, çalışmadaki zemin cinsleri ve endeks özellikleri bu çalışmada kullanılanlar ile benzeşmektedir. Elde edilen eğrilen yakınlığı dinamik üç eksenside ölçülen başlangıç kayma modüllerinin, rezonant kolon deneyindeki kadar hassas olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. (9) bağıntısının literatürdeki bağıntularla karşılaştırılması

Önceden büyük tekrarlı gerilme genliklerine yüklenen numune üzerinde gerilme genliği azaltılıp tekrar artırılınca, numune rijitliği daha önceden yüklendiği en büyük gerilme genliğinden itibaren azalmaya başlamaktadır. Örselenmenin bir sonucu olan bu olay arazi şartları için de benzer şekilde geliştirilebilir. Numunenin araziden laboratuvarında deney aşamasına kadar hiçbir şekilde örselenmediği düşünülürse,

$$\frac{G}{(G_{maks})_{arazi}} = \frac{G}{(G_{maks})_{lab}} \quad (10)$$

olmalıdır. Ancak örselenme sonucu (10) bağıntısı,

$$\frac{G}{(G_{maks})_{arazi}} = \psi \frac{G}{(G_{maks})_{lab}} \quad (11)$$

şeklini alır. ψ örselenme faktörü olarak tanımlanmıştır. Benzer şekilde, arazi kayma dalgası için örselenme faktörü;

$$S_D = \left[\frac{v_s(arazi)}{v_s(lab)} \right]^2 = \frac{G_{arazi}}{G_{lab}} \quad (12)$$

şeklinde tanımlanmıştır [19]. Literatürde arazi ve laboratuvar deneylerinin korelasyonu sonucu elde edilen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [14, 20-22].

Arazi kayma dalgası hızları bu çalışmada, [23] tarafından standart penetrasyon değerleri için önerilen,

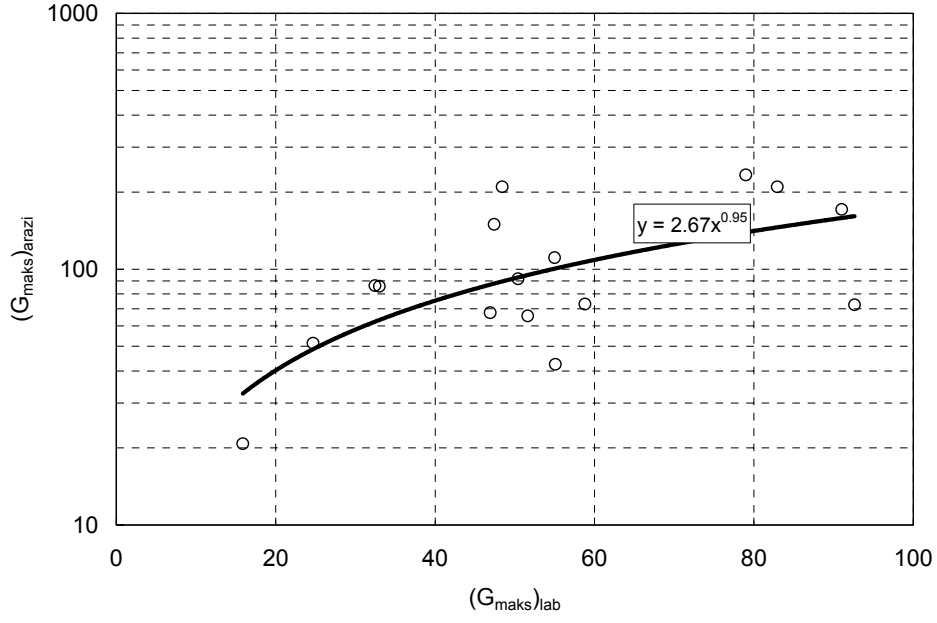
$$v_s = 51.5 \times N^{0.516} \quad (13)$$

bağıntısından hesaplanmıştır. Bağıntıdaki N düzeltilmemiş SPT sayısıdır. (13) bağıntısı ve laboratuvar deneyleri sonucu bulunan maksimum dinamik kayma modülleri karşılaştırmalı olarak Şekil 10'da verilmiştir. Laboratuvar da elde edilen sonuçlar arazide elde edilenlerin yaklaşık %40 değerindedir. Dolayısıyla arazi ve laboratuvar arasında

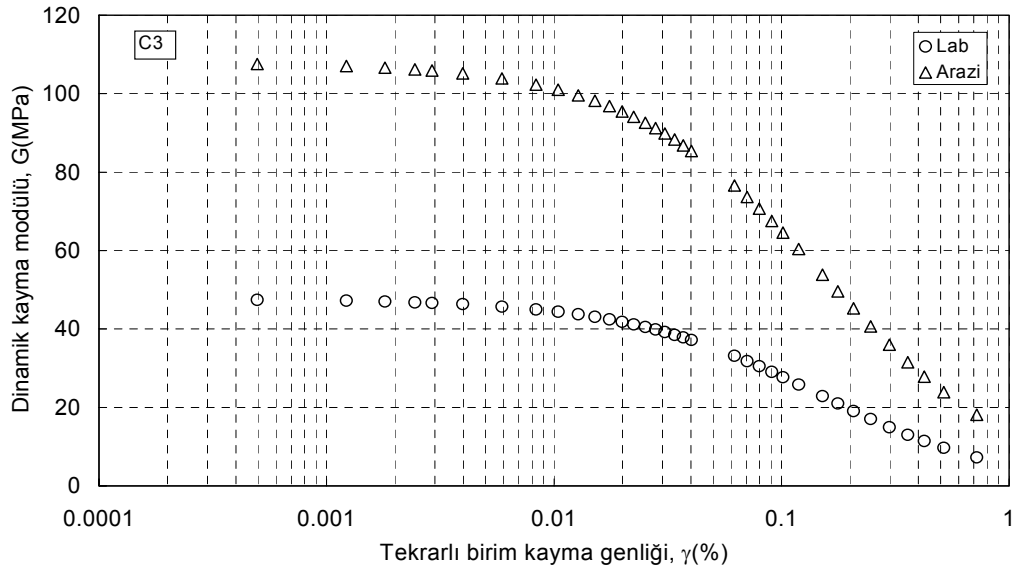
$$(G_{maks})_{arazi} = 2.67 \times (G_{maks})_{lab}^{0.95} \quad (14)$$

şeklinde bir bağıntı tanımlanabilir.

(14) bağıntısı kullanılarak elde edilen arazi kayma modülünün ve laboratuvar kayma modülünün birim kayma genliğine göre değişimi C3 deneyi için Şekil 11'de görülmektedir. Şekil 11'de dikkat edileceği gibi arazi ve laboratuvar sonuçları arasında yaklaşık 2,5 kat fark vardır. Bu farkın nedeninin, numune hazırlama sırasında meydana gelen örselenmeler ve deney sisteminin sınır şartları olduğu düşünülmektedir.



Şekil 10. Arazi ve laboratuvar başlangıç kayma modülleri



Şekil 11. Arazi ve laboratuvar dinamik kayma modülünün değişimi

III. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kil zeminlerin başlangıç kayma modülü ve sönüm davranışlarının incelenmesi amacıyla, dinamik üç eksenli deneyler yapılmıştır. Çalışmada kullanılan numuneler, İstanbul Avcıları bölgesinden alınmış sondajlardan oluşmaktadır. Numunelerin fiziksel özellikleri, alındıkları derinliklere göre farklılıklar göstermektedir. Deneyler izotropik gerilme koşulları altında ve 0,1 Hz. frekansında gerçekleştirilmiştir. Maksimum kayma modülü değeri çevre basıncı ile orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Plastisite indisinin, lineer olmayan elastik davranış aralığında maksimum kayma modülüne bir etkisi olmamakla birlikte bu eşik değerinden sonra en önemli faktör olarak gözlenmiştir. Maksimum kayma modülü için pratikte kullanılabilecek bir bağıntı önerilmiştir. Ayrıca arazi ve laboratuvar da elde edilen deney sonuçlarının karşılaştırılmasında, arazi maksimum dinamik kayma modülünün, laboratuvar da elde edilen sonuçlardan yaklaşık 2,5 kat daha büyük çıktığı görülmektedir. Bunun bir nedenin numune hazırlanırken meydana gelen örselenme ve deney sisteminin sınır şartlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

IV. KAYNAKLAR

- [1] K. Ishihara, "Soil Behavior in Earthquake Geotechnics", Clarendon Press, 1996, Oxford.
- [2] B.O. Hardin, W.L. Black, "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*", ASCE, Vol. 94, pp. 353-369, 1968.
- [3] T. Kagawa, "Moduli and damping factors of soft marine clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, pp. 1360-1375, 1992.
- [4] W.F. Marcuson, H.E. Wahls, "Time Effects on Dynamic Shear Modulus of Clays", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, Vol. 98, pp. 1359-1379, 1972.
- [5] K. Zen, Y. Umehara, K. Hamada, "Laboratory tests and in-situ seismic survey on vibration shear modulus of clayey soils with various plasticities", *Proceedings of the 5th Japanese Earthquake Engineering Symposium*, Japan, pp. 721-728, June 1978.
- [6] T. Kokusho, Y. Yoshida, Y. Esashi, "Dynamic properties of soft clay for wide strain range, *Soils and Foundations*", Vol. 22, pp. 1-18, 1982.

- [7] A.M. Ansal, H. Yıldırım, "Killerin tekrarlı yükler altında kayma mukavemeti", *II. Ulusal Kil Sempozyumu*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 24-27 Eylül 1985 , s. 329-341.
- [8] G. Viggiani, J.H. Atkinson, "Stiffness of fine-grained soil at very small strains", *Geotechnique*, Vol. 45, pp. 249-265, 1995.
- [9] H.B. Seed, I.M. Idriss, "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses", *College of Engineering, University of California Technical Report*, EERC 70-10, Berkeley, California, 1970.
- [10] F. Tatsuoka, S. Shibuya, "Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests", *Proceedings of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics*, Bangkok, 9-13 December, Thailand pp.101-170, 1992.
- [11] M. Jamiolkowski, R. Lancellotta, D.C.F. Presti, "Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays", *Proceedings of the International Symposium on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Sapparo, 12-14 September, Japan, pp. 135-144, 1994.
- [12] D.W. Hight, V.N. Georgiannou, "Effects of sampling on the undrained behavior of clayey sands", *Geotechnique*, Vol. 45, pp. 237-247, 1995.
- [13] S. Guha, V.P. Drenevich, J.D. Bray, "Dynamic characteristics of Old Bay Clay", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 20, pp. 383-393, 1997.
- [14] R.W. Cunney, Z.B. Fry, "Vibratory in-situ and laboratory soil moduli compared", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 99, pp. 1022-1076, 1973.
- [15] J.D. Bray, M.E. Riemer, W.B. Gookin, "On the dynamic characterization of soils", *Proceedings of 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisbon, 21-25 June, Portugal, pp. 847-856, 1999.
- [16] K. Ishihara, "Approximate forms of wave equations for water-saturated porous materials and related dynamic modulus", *Soils and Foundations*, Vol. 10, pp. 10-38, 1970.
- [17] C.C. Ladd, R. Foott, "New design procedure for stability of soft clays", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, GT7, pp.763-786, 1974.
- [18] P. Kalliolglou, T.H. Tika, K. Pitilakis, Dynamic characteristics of natural cohesive soils, *Earthquake Geotechnical Engineering*, Vol. 17, pp. 113-117, 1999.

- [19] T.J. Larkin, P.W. Taylor, "Comparison of down hole and laboratory shear wave velocities", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 16, pp. 152-162, 1979.
- [20] K.H. Stokoe, F.E. Richart, "In-situ and laboratory shear wave velocities", *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, June 1973, Russia, pp. 403-409, 1973.
- [21] Y. Ohta, N. Goto, "Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 6, pp. 123-135, 1978.
- [22] K. Yokota, M. Konno, "Comparison of soil constants obtained from laboratory tests and in-situ tests", *Proceedings of Symposium on Evaluation of Deformation and Strength of Sandy Grounds*, Special Publication of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 145-162, 1985.
- [23] R. İyisan, "Geoteknik özelliklerin belirlenmesinde sismik ve penetrasyon deneylerin karşılaştırılması", *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1994.