

ZEMİN VE KAYAÇLARDA EMNİYET GERİLMESİNİN SİSMİK YÖNTEM İLE BELİRLENMESİ

Semih S. TEZCAN^{1*}, Ali KEÇELİ² ve Zuhal ÖZDEMİR³

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Boğaziçi Üniversitesi, Bebek, İstanbul

²İstanbul Üniversitesi, Emekli Jeofizik Profesörü

³Kandilli Rasathanesi, Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli, İstanbul

Özet

Jeofizik zemin incelemelerine dayalı olarak, sıg temellerin zemin emniyet gerilmesinin hızlı ve etkin olarak tayini için ampirik bir formül önerilmiştir. Önerilen ifadenin klasik teori ile tutarlılığının yanında, hızlı ve güvenilir olduğu ispat edilmiştir. Verilen formülasyon, yerinde ölçülen kayma dalgası hızı ile zeminin birim hacim ağırlığına bağlıdır. Zeminin birim hacim ağırlığı ise, boyuna dalga hızı yardımı ile yeterli derecede doğru olarak, başka bir ampirik ifade ile tayin edilmiştir. Sismik dalga hızının kullanıldığı bu yöntem pratikte killi ve kumlu zeminler ile kaya zeminlerde ekonomi ve zaman tasarrufu sağlamaktadır. Önerilen formülün doğruluk ve isabet derecesi, 373 ayrı şantiyede ayrıntılı zemin etüdlerine, laboratuvar deneylerine ve klasik yöntemle dayanılarak elde edilmiş sonuçlar ile test edilmiştir. Bu çalışmada, ayrıca sismik dalga hızları yardımı ile, zeminin kayma ve elastisite modüllerinin, yataklanma katsayısının hesaplanmasına yarayan bir seri formüllere yer verilmiştir.

Anahtar kelimeler : Taşıma gücü, Kayma dalgası hızı, Sıg temeller, Sismik yöntem, Zemin emniyet gerilmesi.

SEISMIC TECHNIQUE to DETERMINE the ALLOWABLE BEARING PRESSURE for SHALLOW FOUNDATIONS in SOILS and ROCKS

Abstract

Based on a variety of case histories of site investigations, including extensive bore hole data, laboratory testing and geophysical prospecting, an empirical formulation is proposed for the rapid determination of allowable bearing capacity of shallow foundations. The proposed expression corroborates consistently with the results of the classical theory and is proven to be rapid and reliable. It consists of only two soil parameters, namely, the insitu measured shear wave velocity, and the unit weight. The unit weight may be also determined with sufficient accuracy, by means of another empirical expression, using the P-wave velocity. It is indicated that once the shear and P-wave velocities are measured insitu by an appropriate geophysical survey, the allowable bearing capacity as well as the coefficient of subgrade reaction and many other elasticity parameters may be determined rapidly and reliably through a single step operation, not only for soils, but also for rock formations. Such an innovative approach, using the seismic wave velocities only, is considerably cost and time-saving, in practice.

Key words : Bearing capacity, Shear wave velocity

* E-posta: tezokan@gmail.com

1. Giriş

Çok değerli, Zemin Mekaniği ve Temel İnşaatı bilim adamı Profesör Schulze (1943) [1] aynen şunları yazmaktadır: “Klasik yöntemlerde zeminden örselenmemiş zemin numuneleri almak gerekir. Sismik metod’da ise, temel zemininin muayenesi, yerinde ve tabakaların orijinal durumu ve özelliğine ilişilmeden yapılır. DEGEBO (Deutsche Forschungsgesellschaft Für Bodenmechanik) metodunda, zemin bir darbe veya vibratör vasıtasıyla titreşim haline sokulur. Makinenin gücünden titreşimin genliği ve titreşimin frekansı vasıtasıyla zeminin özgül titreşim sayısı bulunur. Özgül titreşim sayısı ise, zeminin makina yerindeki taşıma gücü hakkında önemli bir ölçüdür. Bundan başka titreşimin kayma dalgası yayılış hızı da bulunur. Bu da ölçü yapılan zemin profili boyunca zeminin ortalama taşıma gücü hakkında önemli bir fikir verir. Bu iki sayı, a) zeminin özgül titreşim sayısı ve b) titreşimlerin kayma dalgası yayılma hızı yardımı ile zeminin taşıma gücü tayin edilir. ”

O günden bu güne, geoteknik problemlerin çözümünde, jeofizik araştırmalar sayesinde önemli gelişmeler olmuştur. Örneğin, boyuna dalga hızı, zeminin serbest basınç mukavemetini belirlemede Coates (1970) [2] tarafından kullanılmıştır. Hardin ve Black (1968) [3], daha sonra Hardin ve Drnevich (1972) [4] geniş deneysel araştırmalar neticesinde, kayma dalgası hızı ile zemin boşluk oranı ve zemin kayma rijitliği arasında vazgeçilmez bağıntılar geliştirmişlerdir. Yine benzer olarak, Ohkuba ve Terasaki (1976) [5], su muhtevası, serbest basınç mukavemeti ve elastisite modülü arasında çeşitli bağıntılar elde etmişlerdir.

Jeofizik yöntemlerin temel mühendisliğinde kullanımı, Imai ve Yoshimura (1976) [6], Tatham (1982) [7], Willkens vd (1984) [8], Phillips vd (1989) [9], Keceli (1990) [10], Jongmans (1992) [11], Sully ve Campanella (1995) [12] ve Pyrak-Nolte vd (1996) [13] tarafından kapsamlı olarak çalışılmıştır. Campanella ve Stewart (1992) [14] çeşitli zemin parametrelerini dijital sinyal işleme yöntemi ile belirlerken, Butcher ve Powell (1995) [15] yine çeşitli zemin parametrelerini elde etmek amacı ile, pratik jeofizik teknikler geliştirmişlerdir.

Bu konuyla ilgili olarak Teknik Komite TC 16, IRTP, ISSMGE (1999) [16] ve Sieffert (2000) [17] tarafından bir çok kılavuz ilkeler belirlenmiştir.

Geniş ölçüde örnek olay incelemeleri yapıp, kayma dalgası hızını kullanarak, Turker (2004) [18], zemin taşıma gücünü veren çok yararlı bir ifade sunmuştur. Massarsch (2004) [19] ise, ince daneli zeminlerin deformasyon özelliklerinin, sismik dalga hızları ile bulunması konusunda çalışmalar yapmıştır.

Bu sunumda, yumuşak ve sert zeminlerin, hatta kayaçların zemin emniyet gerilmesinin hızlı bir şekilde belirlenmesi için sismik bir yöntem önerilmektedir. Esasen, bu çalışma, yazarların daha önceki bir yayınının (2006) [22] uzantısı olarak, formülasyonun teorik tabanını açıklamaya dönük olup, ayrıca temel boyutları ile ilgili düzeltme faktörlerini ve özellikle kayaçların taşıma güçlerini içermektedir. Jeofizik sismik kırılma yöntemine ek olarak, kayma dalgası hızının ölçümü için Stokoe ve Woods (1972) [20], Tezcan vd (1975) [21], Butcher vd (2005) [23] tarafından önerilen daha başka bir çok metod vardır.

Bu çalışmanın en önemli sonucu, tek başına yerinde ölçülen kayma dalgası hızının, laboratuarda yapılan deneylerden bulunan bir sürü zemin kayma mukavemeti parametrelerinden çok daha etkin ve güvenilir olarak gerçek zemin özelliklerini temsil ettiğini ispatlamaktır.

Yerinde ölçülen kayma dalgası hızı, zemin boşluk oranının, zemin efektif gerilmesinin, zeminin gerilme tarihçesinin, zemin kayma ve basınç mukavemetlerinin, zeminin jeolojik yaşının v.b. özelliklerinin fotoğrafını son derece gerçekçi olarak çizer. Daha sonra görüleceği gibi, kayma dalgası hızı, zeminin emniyet gerilmesini, yataklanma katsayısını ve çeşitli elastisite modüllerini belirlemede en rahat, en ekonomik, en güvenilir ve en doğru yöntem olarak mühendislere yardımcı olur.

2. Teorik Düşünceler

Yüzeyden derinliği H olan, sığ bir temel altındaki zeminin en genel formdaki zemin taşıma gücü q_f ve zemin emniyet gerilmesi q_a için, temel tabanı üzerinde H – yüksekliğindeki bir zemin sütununun ağırlığı ile uyumlu olarak;

$$q_f = \gamma H \quad (1 \text{ a})$$

$$q_a = q_f/n = \gamma H / n \quad (1 \text{ b})$$

yazılabilir. Burada, γ = zemin birim ağırlığı (kN/m^3), n = güvenlik (*emniyet*) katsayısıdır. Dalga hızının tarifinden giderek H = temel derinliğini, V_s = kayma dalgası hızı ile t = zaman parametresinin çarpımı olarak ifade edebiliriz.

$$H = V_s t \quad (2a)$$

Bu ifade yukarıda *Denk.1a* ve *Denk.1b* formül numaraları ile verilen taşıma yükü ve zemin emniyet gerilmesi formüllerinde yerine konulursa,

$$q_f = \gamma V_s t \quad (3a)$$

$$q_a = \gamma V_s t / n \quad (3b)$$

elde edilir. Bu formül, sert bir kayaç için literatürde bilinen kayma dalgası hızı ve zemin emniyet gerilmesi değerleri kullanılarak kalibre edilebilir. Sert bir kayaç için, $q_a = 10\ 000\ kN/m^2$, $\gamma = 35\ kN/m^3$, $V_s = 4\ 000\ m/sn$ ve güvenlik katsayısı $n = 1.4$ alınır, zamanı temsil eden parametre *Denk. 3b* yardımı ile, $t = 0.10\ sn$ olarak elde edilir:

$$q_a = 35 (4000) t / 1.4 = 10\ 000\ kN/m^2$$

Dolayısı ile,

$$H = 0.1 V_s \quad (2b)$$

ifadesi bulunur. Bu ifade, *Denk.1a* ve *Denk.1b*'de yerine konulursa,

$$q_f = 0.1 \gamma V_s \quad (4a)$$

$$q_a = 0.1 \gamma V_s / n \quad (4b)$$

elde edilir. Çeşitli zemin tipleri için, n = güvenlik katsayıları ve q_a = zemin emniyet gerilmesi ifadeleri *Tablo 1*'de verilmiştir.

Tablo 1.- Zeminler ve kayaçlar için n = güvenlik katsayıları

Zemin tipi	V_s aralığı (m/sn)	n	q_a (kN/m^2)
'Sert' kayaç	$V_s \geq 4\ 000$	$n = 1.4$	$q_a = 0.071 \gamma V_s$
'Yumuşak' zayıf kayaçlar ⁽¹⁾	$750 \leq V_s \leq 4\ 000$	$n = 4.6 - 0.0008 V_s$	$q_a = 0.1 \gamma V_s / n$
Zeminler	$750 \geq V_s$	$n = 4.0$	$q_a = 0.025 \gamma V_s \beta$

⁽¹⁾'Yumuşak' zayıf kayaçlarda $750 \leq V_s \leq 4\ 000\ m/sn$ için $n=4.0$ ile $n=1.4$ arasında doğrusal enterpolasyon yapılır.

3. Temel Genişliğinin Etkisi

Terzaghi ve Peck (1967) [24], temel genişliği arttıkça, zemin emniyet gerilmesinde bir azalma yapılması gereğine işaret etmişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada *N-SPT*'ye bağlı olarak verilen zemin emniyet gerilmesi eğrilerinde, temel genişliğinin büyümesi halinde, zemin emniyet gerilmesinin azaldığı açıkça görülmektedir.

Bu azalmayı temsil etmek üzere, bir $\beta =$ azaltma çarpanı tarif edilebilir. Bu takdirde, sadece kayma dalgası hızı $V_s \leq 750$ m/sn olan zemin formasyonları için, Denk.4b'de verilen zemin emniyet gerilmesi ifadesi, $n = 4$ alınarak;

$$q_a = 0.025 \gamma V_s \beta \quad (V_s \leq 750 \text{ m/sn}) \quad (5)$$

şeklini alır. Bu ifadede görülen $\beta =$ azaltma çarpanı, temel genişliği B 'nin 0 ila 12 metre arasındaki değerleri için aşağıda verilmiştir:

$$\left. \begin{array}{l} (0 \leq B \leq 1.20 \text{ m}) \text{ için } \beta = 1.00 \\ (1.2 \leq B \leq 3.00 \text{ m}) \text{ için } \beta = 1.13 - 0.11 B \\ (3.0 \leq B \leq 12.0 \text{ m}) \text{ için } \beta = 0.83 - 0.01 B \end{array} \right\} \quad (6)$$

4. Birim Şekil Değiştirme Mertebesi

Hardin ve Drnevich (1976) [4] ile Massarsch (2004) [19] tarafından ayrıntılı bir şekilde incelendiği üzere, kayma birim şekil değiştirme değerlerinin artması halinde, zeminin kayma modülünün ve kayma dalgası hızının değerlerinde önemli azalmalar olur. Dolayısı ile, kayma dalgası hızı arazide ölçülürken, kayma birim şekil değiştirmesinin hangi mertebede olduğunun bilinmesinde yarar vardır. Deprem halinde ve temel altı zemininde kayma yüzeyleri oluşurken, şüphesiz kayma birim şekil değiştirilmelerinin mertebesi ($\gamma = 10^0$ ilâ 10^{-3} gibi) oldukça yüksek değerlerdedir.

Sığ bir temelin tabanındaki emniyetle taşınabilen zemin gerilmelerine tekabül eden kayma birim şekil değiştirmelerinin mertebesi ise ($\gamma = 10^{-4}$ ilâ 10^{-7} gibi) oldukça küçük değerlerdedir. Arazide kayma dalgası hızı ölçülürken yaratılan küçük ölçekteki (*balyoz darbeleri veya dinamit patlatma gibi*) enerji de, aynı şekilde küçük ölçekte kayma birim şekil değiştirmeleri oluşturur. İşte bu nedenle, arazide ölçülen kayma dalgası hızı ile, bu hızdan gidilerek hesaplanan zemin emniyet gerilmesi ve zemin kayma modülü değerleri tam bir uyum ve mutabakat halindedir.

Zeminin suya doygun olması halinde, klâsik yöntemle göre (*Terzaghi ve Peck, 1967*) [24], zemin emniyet gerilmesini hesaplamak için bazı azaltmalar ve iki katı bulan özel emniyet katsayıları kullanmak gerekir. Halbuki, kayma dalgası hızı ile hesap yaparken, böyle tahminlere dayanan yaklaşık yöntemlere hiç gerek kalmaz. Çünkü, suya doygun zeminlerde ölçülen kayma dalgası hızları zaten bu doygunluğu ve zayıflığı gerçekçi bir şekilde temsil edecek ve yansıtacak tarzda küçük olur.

5. Zemin Yataklanma Katsayısı

Zeminin elastisite modülü (E) ile , oturma miktarı (d) ve yataklanma kat sayısı (k_s) arasındaki ilişkiyi belirlemek üzere, Şekil 1' de gösterildiği gibi, düşey yüke (P) maruz , en kesit alanı (A) ve yüksekliği (H) olan bir zemin sütunu veya bir zemin çubuğu düşünelim. Bu zemin çubuğunun aksenal $P -$ yükü veya $q_f = P/A$ zemin taşıma gücü gerilmesi altında yapacağı oturma, mukavemet derslerinden bilinen formül yardımı ile,

$$d = PH / AE = q_f H / E \quad (m) \quad (7)$$

olarak yazılabilir. Öte yandan, k_s - yataklanma katsayısı veya kısaca zeminin yay katsayısı, birim en kesit alanındaki bir zemin sütununa **birim** oturma yaptırtabilmek için gerekli $q_f =$ zemin gerilmesi olarak tarif edilir. Oturma miktarı **birim** değil d - kadar oluşmuş ise birim en kesit alanındaki zemin sütununa etkiyen düşey gerilme

$$q_f = k_s d \quad (kN/m^2) \quad (8)$$

olur. Denk. 7 yardımı ile, $q_f = Ed / H$ yazılır ve Denk.8 ile eşitlenirse

$$E = H k_s \quad (kN/m^2) \quad (9)$$

elde edilir. Zeminlerin taşıma güçleri q_f ile, yataklanma katsayısı k_s arasındaki ilişkinin ne olduğu, Bowles (1982) [25] tarafından incelenmiş ve

$$k_s = 40 q_f \quad (\text{kN/m}^3) \quad (10)$$

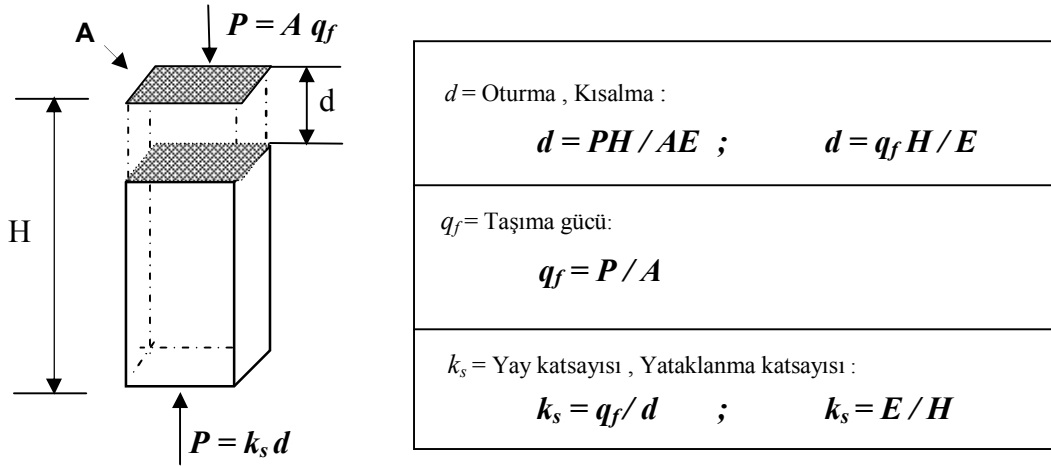
şeklinde bir ampirik formül önerilmiştir. Dolayısı ile, Denk 4a ile verilen q_f ifadesi Denk.10'da yerine konulursa,

$$k_s = 40 q_f = 40 (0.1) \gamma V_s = 4 \gamma V_s \quad (\text{kN/m}^3) \quad (11)$$

elde edilir. Böylece, Denk 4a, Denk. 8 ve Denk. 11 yardımı ile, elastik oturmalar için;

$$d = q_f / k_s = 0.1 \gamma V_s / 4 \gamma V_s = 0.025 \text{ m}$$

bulunur. Görülüyor ki, kayma dalgası hızına bağlı olarak tayin edilen zemin emniyet gerilmesi formülü, maksimum deplasmanları daima $d = 0.025 \text{ m}$ mertebesinde tutmaktadır. Bu değer, esasen tekil veya mütemadi sığ temeller için, zemin mekaniğinde yaygın bir şekilde kabul görmüş geleneksel bir sınır değerdir (Terzaghi, ve Peck 1967) [24].



Şekil 1. Oturma, d , yataklanma katsayısı, k_s

6. Birim Ağırlığın Tayini

Bir zemin tabakasının ortalama boyuna dalga hızı (V_p) ile, o zeminin ortalama birim ağırlığı (γ) arasında doğrudan bir ilişki vardır. Yazarlar (2006) [22] tarafından yüzlerce şantiyede yapılan boyuna dalga hızı (V_p) ölçümleri ile, aynı şantiyelerden alınan zemin numunelerinin laboratuvarında tayin edilen birim hacim ağırlıkları arasında aşağıda verilen ampirik ilişkilerin bulunduğu saptanmıştır:

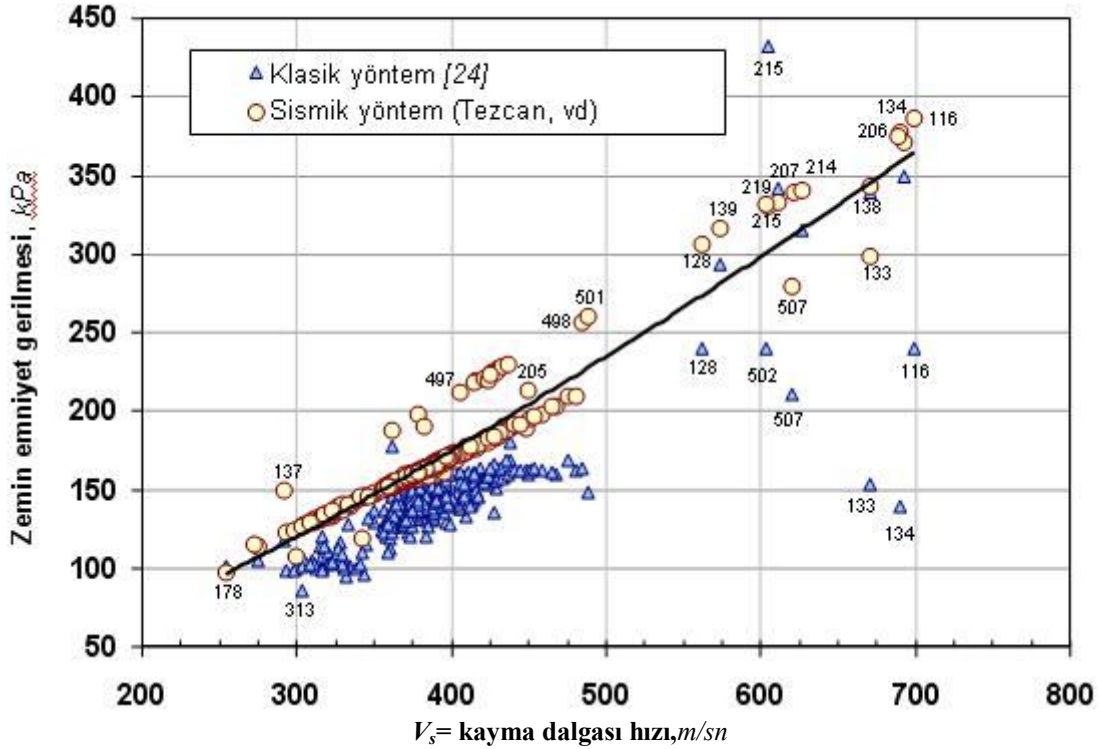
$$\gamma_p = \gamma_o + 0.002 V_p \quad (12)$$

$$\gamma_p = 3.2 V_p^{0.25} \quad (13)$$

Burada, γ_p = boyuna dalga hızına bağlı olarak bulunan birim ağırlık (kN/m^3), γ_o = birim ağırlığın referans değeri (kN/m^3) ve V_p = boyuna dalga hızı (m/sn)'dir. Referans birim ağırlıklar, çeşitli zemin sınıfları için aşağıda verilmiştir:

- $\gamma = 16$ gevşek kum, silt ve killi zeminler,
- $\gamma = 17$ sıkı kum ve çakıllı zeminler,
- $\gamma = 18$ kil taşı, kireç taşı ve konglomera sınıfı kayalar,
- $\gamma = 20$ çatlaklı kumtaşı, tuf, grovak ve şist cinsi çatlaklı kaya,
- $\gamma = 24$ sağlam kayalar.

Boyuna dalga hızı ve yukarıda Denk 12'de verilen ampirik formül yardımı ile bulunan birim ağırlık değerleri, aynı zemin nümuneleri için laboratuvar ortamında elde edilen değerler ile üst üste düşmektedir (Tezcan ve ark., 2006) [22]. Zemin sondajlarının ve laboratuvar deneylerinin yapılmadığı durumlarda, eğer boyuna dalga hızı (V_p) ölçülmüş ise, bu ampirik formül ile bulunan birim ağırlıklar, ilk yaklaşım için oldukça güvenilir sonuçlar vermektedir. Öyle ki, hiçbir zemin sondajı yapılmamış olsa bile, boyuna (V_p) ve kayma dalgası hızları (V_s) sismik yöntemler ile yerinde ölçülebilirse, Denk.12 ve Denk.13 yardımı ile zemin birim ağırlığını (γ_p) ve Tablo 1 yardımı ile de, ister yumuşak zemin isterse kayalık olsun, sığ temellere ait zeminin emniyet gerilmesini (q_a) çok çabuk, ekonomik ve çok güvenilir bir şekilde tayin etmek kabildir.



Şekil 2. Klasik ve sismik yöntem sonuçlarının karşılaştırılması
(Kocaeli ve çevresinden 373 farklı şantiye sonuçlarını içerir)

7. Kayma ve Hacim Modülleri

Arazide, V_p ve V_s sismik hız değerleri ölçüldükten sonra, zeminin Kayma modülü (G), Elastisite modülü (E), Sıkışma modülü (E_c), Hacimsel modül (E_k) ve Poisson oranı (μ) gibi bir çok elastisite parametresini elde etmek kabildir. Dalga mekaniğindeki bağıntılardan yararlanılarak, kayma ve sıkışma modülleri için

$$G = \rho V_s^2 \quad (14)$$

$$E_c = \rho V_p^2 \quad (15)$$

yazılabilir. Burada, $\rho = \gamma/g$ = birim kütedir. Üç boyutlu elastisite denklemlerinden bilindiği üzere, Elastisite modülü (E) ile, Sıkışma modülü (E_c) arasında aşağıdaki ilişkiler geçerlidir :

$$E = E_c (1 + \mu) (1 - 2\mu) / (1 - \mu) \quad (16)$$

$$E = 2(1 + \mu)G \quad (17)$$

Denk.15 yardımı ile ve α oranı kullanılarak, Denk.16 ve 17'den

$$\alpha = E_c / G = (V_p / V_s)^2 \quad (18)$$

$$2(1 + \mu) = \alpha(1 + \mu)(1 - 2\mu) / (1 - \mu) \quad (19)$$

yazılabilir. Buradan, $\mu = \text{Poisson oranı}$ için

$$\mu = (\alpha - 2) / 2(\alpha - 1) \quad (20a)$$

$$\text{veya } \alpha = (2\mu - 2) / (2\mu - 1) \quad (20b)$$

elde edilir. Aynı şekilde, kayma modülü için

$$G = \gamma V_s^2 / g \quad (21)$$

yazılır. Dolayısı ile, Elastisite modülü, Denk. 17 ve Denk.20a yardımı ile,

$$E = (3\alpha - 4)G / (\alpha - 1) \quad (22)$$

olarak elde edilir. Aynı şekilde,

$$E_c = \alpha E / 2(3\alpha - 4) \quad (23)$$

yazılabilir. Hacimsel modülün, elastisite teorisindeki tarifinden gidilerek,

$$E_k = E / 3(1 - 2\mu) \quad (24)$$

yazılır. Denk 20a yardımı ile μ yok edilirse

$$E_k = (\alpha - 1)E / 3 = \gamma(V_p^2 - 4V_s^2 / 3) / g \quad (25)$$

elde edilir. Bu çalışmada yer verilen sismik dalga hızları yardımı ile zeminin çeşitli elastisite parametrelerini elde etmeğe yarayan formüller, kolayca erişilebilir olması için toplu bir halde *Tablo 2*'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Çeşitli elastisite parametrelerinin bulunuşu

Notasyon	İsmi	Denklemi	Denklemler No.
G	Kayma Modülü	$G = \gamma V_s^2 / g$	Denk. 21
E	Elastisite Modülü	$E = k_s H = 4 \gamma H V_s$ (Alternatif yöntem) $E = (3\alpha - 4)G / (\alpha - 1) = 2(1 + \mu)G$	Denk. 9 Denk. 22
E_c	Sıkışma Modülü (Constraint modulus)	$E_c = (1 - \mu)E / (1 + \mu)(1 - 2\mu)$ $E_c = \alpha E / 2(3\alpha - 4)$	Denk. 16 Denk. 23

E_k	Hacimsel Modül (Bulk modulus)	$E_k = E/3(1-2\mu) = 2(1+\mu)G/3(1-2\mu)$ $E_k = (\alpha-1)E/3 = \gamma(V_p^2 - 4V_s^2/3)/g$	Denk. 24 Denk. 25
μ	Poisson Oranı	$\mu = (\alpha-2)/2(\alpha-1)$ $\alpha = 2(\mu-1)/(2\mu-1)$	Denk. 20a Denk. 20b
k_s	Yataklanma Katsayısı	$k_s = 4 \gamma V_s = 40 q_f$	Denk. 11
q_a	Zemin Emniyet Gerilmesi	$q_a = q_f/n = 0.1 \gamma V_s \beta/n$	Denk. 5

$$\alpha = E_c / G = (V_p/V_s)^2$$

β = Temel genişliği düzeltme faktörü (Denk.6) sadece $V_s \leq 750$ m/sn olan zeminler içindir.

8. Sayısal Örnek

Sayısal örnek olarak, bir sığ temelin altında, derinliği $H = 15$ m olan killi bir zemin tabakasının mevcudiyetini düşünelim. Yerinde ölçülen sismik dalga hızları $V_s = 200$ m/sn ve $V_p = 700$ m/sn olsun. Zeminin özgül ağırlığı, emniyetli taşıma kapasitesi, yataklanma katsayısı, elastisite modülü ve temel altı maksimum oturma miktarı, önerilen ampirik formüller yardımı ile hesaplanmış ve tüm hesaplamalar Tablo 3'de özetlenmiştir. Bu örnek zemin için, klasik geoteknik sondaj ve laboratuvar deneyleri yapılmış ve çok yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3. Sayısal örneğin hesap şekli ($H=15$ m, $V_p = 700$ m/sn, $V_s=200$ m/sn)

Formül	Denklemler No.	Sayısal Hesap	Sonuç	Birim
$\gamma = 3.2 V_p^{0.25}$	Denk.13	$\gamma = 3.2 (700)^{0.25}$	16.5	kN/m ³
$\gamma = \gamma_0 + 0.002 V_p$	Denk.12	$\gamma = 16 + 0.002 (700)$ $\gamma = 17.2^{(2)}$	17.4* 17.2**	kN/m ³
$n = 4$	Tablo 1	$V_s \leq 700$ m/sn olan zeminler	4	-
$q_f = 0.1 \gamma V_s$	Denk. 4a	$q_f = 0.1 (17.4) 200$	348 (322)***	kN/m ²
$q_a = q_f/n$	Denk. 1b	$q_a = 348/4$	87 (92)***	kN/m ²
$k_s = 40 q_f$	Denk. 10	$k_s = 40 (348)$	13 920	kN/m ³
$E = k_s H$ (Alternatif)	Denk. 9	$E = 13 920 (15)$	208 800	kN/m ²
$G = \gamma V_s^2/g$	Denk. 21	$G = 17.4 (200)^2/9.81$	70 948	kN/m ²
$\alpha = (V_p/V_s)^2$	Denk. 18	$\alpha = (700/200)^2$	12.25	-
$\mu = (\alpha-2)/2(\alpha-1)$	Denk. 20	$\mu = (12.25-2)/2(11.25)$	0.456	-
$E = 2(1+\mu)G$	Denk. 17	$E = 2(1.456) 70 948$	206 537	kN/m ²

$E_c = \alpha E / 2 (3\alpha - 4)$	<i>Denk. 23</i>	$206\ 537 (12.25) / 2 (32.75)$	$38\ 627$	kN/m^2
$E_k = E / 3 (1-2\mu)$	<i>Denk. 24</i>	$206\ 537 / 3 (1-0.91)$	$774\ 510$	kN/m^2
$E_k = E (\alpha - 1) / 3$	<i>Denk. 25</i>	$206\ 537 (12.25-1) / 3$	$774\ 510$	kN/m^2
$d = \text{oturma miktarı}$	<i>Denk. 7 ve 8</i>	$d = q_f / k_s = 348 / 13920$ $d = 0.025\ m$ (Sabit)	0.025	m

* Tablonun geri kalan tüm hesaplarında, *Denk. 12*'den bulunan $\square = 17.4\ kN/m^3$ kullanıldı.

** Laboratuvar deney sonucu $\square\square = 17.2\ kN/m^3$

*** Terzaghi ve Peck, 1967 Yöntemi ile : $q_f = 322\ kN/m^3$, $q_a = q_f / 3.5 = 92\ kN/m^3$

9. Sonuçlar

İstanbul ve civarındaki 19 şantiyede, Kocaeli ve çevresindeki 373 şantiyede zemin emniyet gerilmeleri önce, Terzaghi ve Peck (1967) [24]' in önerdiği geoteknik sondaj ve laboratuvar deneylerini içeren klasik yöntem ile ve daha sonra, burada önerilen sismik metod ile ayrı ayrı hesaplanmıştır. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak *Şekil 2*'de görülmektedir. Sismik metod sonuçlarının, klasik yöntemle nispetle, birbirleri ile çok uyumlu ve sistematik bir şekilde istikrarlı olduğu görülmüştür.

Ayrıca, zeminin kayma dalgası hızı, zemin emniyet gerilmesini, boşluk oranını, kayma rijitliğini, kohezyonu v.b. geoteknik zemin özelliklerini temsil edebilen son derece güçlü ve etkin bir zemin parametresidir.

Temel altındaki zeminin kayma ve boyuna dalga hızları mümkün olduğu kadar dikkatli ölçüldüğü takdirde, geniş ve zahmetli sondaj ve laboratuvar çalışmalarına gerek kalmayacaktır. Zemin emniyet gerilmesi, taban yataklanma katsayısı, elastisite modülü ve zemin birim ağırlığı, basit ampirik ifadeler kullanılarak kolayca hesaplanabilmektedir.

Kocaeli'nde 373'den fazla örnek durum çalışmasından görüleceği üzere, sismik yöntem, klasik yöntemle kıyasla son derece daha kararlı, istikrarlı, güvenilir, hızlı ve ekonomik çözümler vermektedir.

10. Teşekkür

İlk partide İstanbul ve civarında 19-şantiyenin geoteknik sondaj ve laboratuvar deneylerine dayanan ve özellikle klasik yöntem ile tayin edilmiş zemin emniyet gerilmeleri ile sismik ölçüm sonuçlarını sağlayan *Geoteknik* firmasına ve sahibi Sayın *Tufan Durgunoğlu*'na, daha sonra Kocaeli Bölgesinde 373 ayrı şantiye'den benzer bilgileri bize ileten ve makalemizin geliştirilmesine büyük destek veren Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Deprem Araştırma Dairesi Başkanı *Y.Müh. Mustafa Cevher*'e, bilimsel katkıları ve düzeltmeleri için Süleyman Demirel Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi *Prof. Dr. Osman Uyanık*'a candan teşekkür ederiz.

11. Kaynaklar

- [1] W.E. Schulze, "Grundbau", *Deutsche Forschungsgesellschaft Für Bodenmechanik*, 7th Ed., B.G. Taubner Publishers, Leipzig, Germany. Also Available: Technical University Of Istanbul, Issue 48, No DK624-15, Uçler Printing House, Istanbul, Turkiye. (1943).
- [2] D.F.Coates, "Rock Mechanics Principles: Mines Branch Monographs", No. 874. (1970)
- [3] B. O.Hardin, And W.L.Black, "Vibration Modulus Of Normally Consolidated Clays". *Journal Of The Soil Mechanics And Foundation Division*, ASCE, Vol.94, No. SM2, Pp. 353-369. (1968).
- [4] B.O.Hardin, And V.P.Drnevich, "Shear Modulus And Damping In Soils". *Journal Of The Soil Mechanics And Foundation Division* ASCE, Vol. 98, No. SM7, Pp.667-69(1972).
- [5] T.Ohkubo, And A.Terasaki, "Physical Property And Seismic Wave Velocity Of Rocks". *OYO Corporation*, Tokyo, Japan, (Internal Publication), www.Geophysical.Com, <Prosight@Oyonet.Oyo.Co.Jp>, Phone: 001. - 603. 983 11 09, Fax: 001. 603. 889 39 84(1976)

- [6] T.Imai, And M.Yoshimura, "The Relation Of Mechanical Properties Of Soils To P And S- Wave Velocities For Soil Ground In Japan. Urana Research Institute" *OYO Corporation*, Tokyo, Japan , (Internal Publication), <Www.Geophysical.Com>, <Prosight@Oyonet.Oyo.Co.Jp>, Phone: 001. - 603. 983 11 09, Fax: 001. 603. 889 39 84. (1976)
- [7] R.H.Tatham, *Vp / Vs And Lithology*. Geophysics, 47:336-344 (1982).
- [8] R.Willkens, G. Simmons & L.Caruso,"The Ration Vp / Vs As A Discriminant Of Composition For Siliceous Limestones" Geophysics, 49(11) 1850-1860.(1984)
- [9] D. E.Phillips, D. H. Han, & M. D.Zoback,"Empirical Relationships Among Seismic Velocity, Effective Pressure, Porosity, And Clay Content In Sandstone".Geophysics, 54:(1) 82-89.(1989)
- [10] A. D.Keçeli,"Zemin Emniyet Gerilmesinin Sismik Metodlar Ile Tayini",*Jeofizik Dergisi*, Ankara, Turkiye, 4, 83-92. (1990)
- [11] D.Jongmans,"The Application Of Seismic Methods For Dynamic Characterization Of Soils".*Bulletin Of International Association Of Engineering Geology*. 46:63-69.(1992).
- [12] J. P. Sully, & R.G.Campanella,"Evaluation Of Insitu Anisotropy From Crosshole And Downhole Shear Wave Velocity Measurements". Geotechnique, 45(2):267-282.(1995)
- [13] Pyrak-Nolte, L. J., S.Roy,& B.L.Mullenbach,"Interface Waves Propagated Along A Fracture"*Journal Of Applied Geophysics*, (35):79-87.(1996).
- [14] R.G. Campanella, And W.P. Stewart, "Seismic Cone Analysis Using Digital Signal Processing For Dynamic Site Characterization", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, No.3, June 1992,Pp.477-486.(1992)
- [15] A.P. Butcher, And J.J.Powell,"Practical Considerations For Field Geophysical Techniques To Used Assess Ground Stiffness" *Proc. Int. Conf. On Advances In Site Investigation Practice*, ICE London, March 1995. Thomas Telford, Pp 701-714.(1995)
- [16] IRTP, 1999:ISSMGE *Technical Committee TC16 Ground Property Characterization From In-Situ Testing*, 1999. International Reference Test Procedure (IRTP) For The Cone Penetration Test (CPT) And The Cone Penetration Test With Pore Pressure (CPTU). Proc. Xiith ECSMGE Amsterdam. Balkema. Pp 2195-2222.
- [17] J. G.Sieffert, And Bay-Gress,"Comparison Of The European Bearing Capacity Calculation Methods For Shallow Foundations". *Geotechnical Engineering, Institution Of Civil Engineers*, Vol. 143, Pp. 65-74, England. Ch, 2000.
- [18] E.Turker,"Computation Of Ground Bearing Capacity From Shear Wave Velocity". *Continuum Models And Discrete Systems*, Eds. D. Bergman, Et. Al., Netherlands, Pp. 173-180.(2004)
- [19] K. R. Massarsch,"Deformation Properties Of Fine-Grained Soils From Seismic Tests". *Keynote Lecture, International Conference On Site Characterization, ISC'2*, 19-22 Sept. 2004, Porto, 133-146.(2004)
- [20] K. H.Stokoe, And R.D."Woods, Insitu Shear Wave Velocity By Cross-Hole Method".*Journal Of The Soil Mechanics And Foundation Divison*, ASCE, Vol. 98, No.SM5, Pp.443-460.(1972)
- [21] S. S.Tezcan, S. M.,Erden, And H. T.Durgunoğlu,"Insitu Measurement Of Shear Wave Velocity At Boğaziçi University Campus".*Proceedings Of The International Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering*, Vol. 2, April 1975, Pp. 157-164, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkiye . (1975)
- [22] S. S.Tezcan, Z.Ozdemir, And A.Keçeli,"Allowable Bearing Capacity Of Shallow Foundations Based On Shear Wave Velocity".*Journal Of Geotechnical And Geological Engineering*, 24: Pp. 203-218, DOI 10.1007 / S.10706-004-1748-4, Netherlands, Springer, Www.Springerlink.Com.(2006)
- [23] A.P.Butcher, R.G.Campanella, A.M.Kaynia, And K. R.Massarsch,"Seismic Cone Downhole Procedure To Measure Shear Wave Velocity". A Guideline Prepared By ISSMGE TC10: Geophysical Testing In Geotechnical Engineering . *Proceedings Of The Xvith International Conference On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering*, May 2006, 5p., Osaka, Japan. (2005)
- [24] K.Terzaghi, And R.B.Peck, *Soil Mechanics In Engineering Practice*. 2nd Ed., John Wiley & Sons, London.(1967)
- [25] J.E.Bowles,"*Foundation Analysis And Design*" 3rd Ed., Mcgraw-Hill Book Company, New York.(1982)