

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOTEKNİK BİLİM DALI**

**YER TEPKİ ANALİZLERİ İÇİN ZEMİN KAYMA MODÜLÜ VE
SÖNÜM ORANI İLİŞKİLERİ**

Burak YAKICI

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ender BAŞARI**



MANİSA-2020

**Burak
YAKICI**

**YER TEPKİ ANALİZLERİ İÇİN ZEMİN KAYMA MODÜLÜ VE
SÖNÜM ORANI İLİŞKİLERİ**

2020

TEZ ONAYI

Burak Yakıcı tarafından hazırlanan "**YER TEPKİ ANALİZLERİ İÇİN ZEMİN KAYMA MODÜLÜ VE SÖNÜM ORANI İLİŞKİLERİ** " adlı tez çalışması 22.09.2020 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ender BAŞARI
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Seda DURUKAN
Manisa Celal Bayar Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Rifat KAHYAOĞLU
Manisa Muğla Sıtkı Koçman Celal Üniversitesi



TAAHHÜTNAME

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Burak YAKICI



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ	IV
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR	VIII
ÖZET	IX
ABSTRACT	X
1. GİRİŞ	1
2. GENEL TANIM VE BİLGİLER	3
2.1. Zeminlerin Kayma Dayanım Parametreleri (Kayma Deformasyonu, Kayma gerilmesi, En Büyük Kayma Modülü) ve Tanımları	3
2.1.1. Zeminlerin Kayma Dayanım Parametreleri Tanımları: Kayma Gerilmesi (τ), Kayma Deformasyonu (γ), G Kayma Modülü	3
2.1.2. En Büyük Kayma Modülü (G_0)	4
2.1.3. Referans Kayma Deformasyonu (gr)	4
2.1.4. Omurga Eğrisi	5
2.1.5. Kayma Modülü Azalım Eğrisi ve Normalize Kayma Modülü Azalım Eğrisi	6
2.1.6. Sönüm Oranı	7
2.1.7. Sönüm Oranı Eğrisi	8
2.2. Normalize Modül Azalım Eğrileri (G/G_0) ve Sönüm Eğrilerini (D) Etkileyen Zemin Özellikleri ve Çevre Koşulları	8
2.2.1. Modül Azalım Eğrilerini (G/G_0) Etkileyen Zemin Özellikleri ve Çevre Koşulları	8
2.2.2. Sönüm Oranı Eğrileri (D) Etkileyen Zemin Özellikleri ve Çevre Koşulları	15
3. KAYMA MODÜLÜ AZALIM EĞRİLERİNİN VE SÖNÜM ORANI EĞRİLERİNİN BELİRLENME YÖNTEMLERİ	19
3.1. Kayma Modülü Azalım Eğrilerinin ve Sönüm Oranı Eğrilerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi	19
3.1.1. Dinamik Üç Eksenli Basınç Deneyi	19
3.1.2. Rezonant Kolon Deneyi	20
3.1.3. Tekrarlı Basit Kesme Deneyi	21
3.1.4. İçi Boş Silindir Deneyi	21
3.1.5. Bender Eleman Deneyi	22

3.2.	Normalize Kayma Modülü Azalım Eğrilerinin (G/G_0) ve Sönüm Oranı Eğrilerinin (D) Önceki Çalışmalara Dayanılarak Belirlenmesi	23
3.2.1.	En Büyük Kayma Modülü (G_0) Değerinin Geçmiş Çalışmalara Dayanılarak Belirlenmesi	25
3.2.2.	Normalize Kayma Modülü Azalım Eğrilerinin (G/G_0) ve Sönüm Eğrilerinin (D) Geçmiş Çalışmalara Dayanılarak Benzeşim ile Doğrudan Belirlenmesi	28
3.2.3.	Normalize Kayma Modülü Azalım Eğrilerinin (G/G_0) ve Sönüm Eğrilerinin (D) Geçmiş Çalışmalara Dayanılarak Ampirik İlişki ve Korelasyonlar ile Belirlenmesi	32
4.	METOT	35
4.1.	Hiperbolik – Üstel Model	35
4.2.	Ramberg – Osgood Model (R – O Model)	41
5.	MATERYAL	44
6.	ÖNERİLEN KAYMA MODÜLÜ AZALIM EĞRİLERİ (G/G_0) ve SÖNÜM ORANI EĞRİLERİ (D)	50
7.	TARTIŞMA	56
8.	SONUÇLAR	57
	KAYNAKÇA	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

G	Dinamik zemin kayma modülü
$G_{\max} - G_o$	Maksimum dinamik zemin kayma modülü
$G/G_{\max} - G/G_o$	Normalize dinamik zemin kayma modülü
D	Dinamik zemin sönüm oranı
γ	Kayma birim deformasyonu
γ_r	Referans kayma birim deformasyonu
IP	Plastisite indisi
e	Boşluk oranı
D_r	Göreceli (rölatif) sıklık
σ_c, σ_3	Çevre basıncı
σ_v	Düşey gerilme
σ_m	Ortalama efektif gerilme
ϕ	İçsel sürtünme açısı
τ	Kayma gerilmesi
τ_a	Kayma gerilmesi amplitüdü
τ_f	Göçme kayma gerilmesi
γ_a	Kayma deformasyon amplitüdü
γ_c	Devirsel kayma deformasyonu (Cyclic shear strain)
OCR	Ön yükleme basıncı
K_o	Geostatik yanal zemin basıncı katsayısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1.	Kayma deformasyonu ve kayma modülü. 3
Şekil 2.2.	a: Sinüzoidal yükleme ve b: Loop (histerisiz döngüsü) 4
Şekil 2.3.	En büyük kayma modülü. 4
Şekil 2.4.	Referans kayma deformasyonunun gösterimi [1] 5
Şekil 2.5.	(a) Farklı deformasyon genlikleri için looplar, (b) loopların tepe noktalarından geçen omurga eğrisi. 5
Şekil 2.6.	(a) Kayma Modülü Azalım Eğrisi, (b) Normalize Kayma Modülü Azalım Eğrisi. 6
Şekil 2.7.	Sönüm oranı. 7
Şekil 2.8.	Kayma deformasyon seviyesine göre sönüm oranının değişimi. 8
Şekil 2.9.	Kohezyonlu ince daneli zeminlerde zemin özelliklerinden plastisite indisinin (PI) kayma modülü azalım eğrisi üzerindeki etkisi [7]. 9
Şekil 2.10.	Zemin özelliklerinden boşluk oranı (e) ve rölatif sıklığın (D_r) kayma modülü azalım eğrileri üzerindeki etkisi [8, 9]. 10
Şekil 2.11.	Çevre basıncının kumlu zeminler için kayma modülü azalım eğrisi üzerindeki etkisi [10, 12]. 12
Şekil 2.12.	Çevre basıncının San Francisco körfezi çamuru kayma modülü azalım eğrisi üzerindeki etkisi [13]. 13
Şekil 2.13.	Farklı plastisite özelliklerine sahip killerin normalize kayma modülü azalım eğrileri üzerinde ortalama efektif gerilmenin etkisi [3]. 13
Şekil 2.14.	(a) Devirsel yükleme frekansının [19] ve (b) çevrim sayısının – N kayma modülü azalım eğrisi üzerindeki etkisi [7]. 14
Şekil 2.15.	Kumlu zeminlerde sönüm oranı eğrisinin rölatif sıklık (boşluk oranı) ile ilişkisi [8]. 15
Şekil 2.16.	Kumlu zeminlerde sönüm oranı eğrisinin çevre basıncı ile ilişkisi. [10]. 16
Şekil 2.17.	Farklı dane çapı dağılımına sahip kumlu zeminlerin sönüm oranları [8]. 16
Şekil 2.18.	Kohezyonlu ve ince daneli zeminlerde plastisite indisinin ve çevre basıncının sönüm eğrisi üzerindeki etkisi [4, 7]. 17

Şekil 3.1.	Dinamik Üç eksenli basınç deney aleti [20].	19
Şekil 3.2.	Rezonant kolon deney aletinin önden görünümü [20].	20
Şekil 3.3.	Rezonant kolon deney aleti üstten görünümü [20].	20
Şekil 3.4.	Tekrarlı basit kesme deney aleti [20].	21
Şekil 3.5.	İçi boş silindir deney aleti. [20].	22
Şekil 3.6.	Bender eleman deneyi [1].	23
Şekil 3.7.	Çakıllar için G/G_0 eğrisinin değişimi [8].	28
Şekil 3.8.	Çakıllar için sönüm (D) eğrisinin pozisyonu ve değişimi [8].	29
Şekil 3.9.	Kumlar için normalize kayma modülü azalım eğrilerinin (G/G_0) pozisyonları ve değişim aralığı [8].	29
Şekil 3.10.	Kumlar için sönüm eğrilerinin (D) boşluk oranı ve doygunluk durumuna göre değişimi [8].	30
Şekil 3.11.	Kumlar için sönüm eğrilerinin (D) içsel sürtünme açısı ve geostatik yanal zemin basıncı katsayısına göre değişimi [8].	30
Şekil 3.12.	İnce malzemeli zeminlerin plastisite indisine bağlı olarak (a) G/G_0 ve (b) D eğrilerinin değişimi [7].	31
Şekil 3.13.	Kallioglou ve ark. (2008) [18] tarafından kohezyonlu zeminler için plastisite indisine bağlı olarak önerilen normalize kayma modülü azalım eğrileri.	34
Şekil 4.1.	Zeminlerin kayma deformasyonu – kayma gerilmesi eğrisi.	36
Şekil 4.2.	Omurga eğrisinden histerisis loopun türetilmesi.	39
Şekil 5.1.	Kumlu zeminler için çalışmada kullanılan ve sayısallaştırılmış $G/G_0 - g$ değerleri.	45
Şekil 5.2.	Kumlu zeminler için farklı zemin özellikleri ve koşullarda gerçekleştirilmiş ve literatürde yer almış örnek kayma modülü azalım eğrileri deney sonuçları.	46
Şekil 5.3.	Kohezyonlu zeminler için farklı zemin özellikleri ve koşullarda gerçekleştirilmiş ve literatürde yer almış örnek kayma modülü azalım eğrileri deney sonuçları.	47
Şekil 5.4.	Zeminlerin dinamik sönüm oranı için literatürde yer almış çalışmalara örnekler.	48
Şekil 6.1.	Literatürde yer alan çalışmaların değerlendirilmesi neticesinde kumlu zeminler için önerilen	51

Şekil 6.2.	Kumlu zeminler için önerilen sönüm oranı eğrileri.	52
Şekil 6.3.	Geçmiş çalışmaların değerlendirilmesi neticesinde ince daneli zeminler için önerilen kayma modülü azalım eğrileri.	54
Şekil 6.4.	Önceki çalışmaların değerlendirilmesi neticesinde ince daneli zeminler için önerilen sönüm oranı eğrileri.	55



TABLO DİZİNİ

	Sayfa No
Tablo 3.1. Normalize kayma modülü azalım eğrilerinin (G/G_0) bazı zemin özelliklerine, çevre koşullarına ve yükleme özellikleri ile ilişkisi [5].	24
Tablo 3.2. En büyük kayma modülünün (G_0) bazı zemin özelliklerine, çevre koşullarına ve yükleme özellikleri ile ilişkisi [5].	25
Tablo 3.3. En büyük kayma modülü için arazi deneylerine dayalı önerilen ilişki örnekleri [21 - 29].	26
Tablo 3.4. En büyük kayma modülü için boşluk oranı (e) ve plastisite indisine (PI) dayalı önerilen ilişki örnekleri [30].	27
Tablo 5.1. Bu çalışmada yararlanılan geçmiş çalışmalar.	44
Tablo 5.2. Yukarıda verilen deneysel çalışmalara ilaveten sayısal olarak grafiklerden çıkartılmış kayma modülü – plastisite indisi değerleri.	49

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ender BAŞARI'ya ve öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Burak YAKICI
Manisa, 2020



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YER TEPKİ ANALİZLERİ İÇİN ZEMİN KAYMA MODÜLÜ VE SÖNÜM ORANI İLİŞKİLERİ

Burak YAKICI

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ender BAŞARI

Zeminlerin kayma modülü eğrilerinin karakteristikleri birçok etkene bağlıdır. Bu etkenlerden bazıları zeminin plastisitesi, çevre basıncı, boşluk oranı olarak söylenebilir. Kayma modülü eğrilerinin doğrudan deneysel olarak belirlenmesi maliyetli ve zahmetli olduğundan, çoğu zaman korelatif yöntemlerle belirlenmektedir. Geoteknik mühendisliğinde çalışılan konulardan birisi de kayma modülü eğrilerinin temel zemin özelliklerine ve gerilme koşullarına bağlı ve dolaylı olarak tahmin edilmesidir. Bu çalışmada, zeminlerin plastisite indisi, boşluk oranı ve çevre basıncı gibi parametrelere bağlı olarak kayma modülü eğrileri ve sönüm oranı eğrilerinin tahmin edilmesi yapılmıştır. Bu amaçla, kurulan ilişkilerde literatürde yer alan açık ve erişilebilir deney sonuçları kullanılmıştır. Literatürde yer alan deneysel çalışmalardan elde edilmiş kayma modülü eğrileri ile zemin özellikleri ve gerilme koşulları (çevre basıncı) derlenmiştir. Daha sonra bu veriler kullanılarak kum ve kil zeminler için kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: kayma modülü, kayma modülü eğrisi, sönüm oranı, kil, kum, boşluk oranı, plastisite indisi.

2020, 65 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

NORMALIZED SHEAR MODULUS AND MATERIAL DAMPING RATIO RELATIONSHIPS FOR GROUND RESPONSE ANALYSIS

Burak YAKICI

**Manisa Celal Bayar University
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ender BAŞARI

The characteristics of the shear modulus curves of soils depend on many factors. Some of these factors can be stated as soil plasticity, confining pressure and void ratio. It is often costly and laborious to determine the shear modulus curve experimentally, therefore preferred it is estimated with correlative and empirical methods. One of the major studied subjects of geotechnical engineering is the prediction of shear modulus curves based on basic soil properties and stress conditions. In this study, the shear modulus curves, and damping ratio curves were estimated depending on parameters such as plasticity index, void ratio and confining pressure of soils. For this purpose, open and accessible results of experimental study in the literature were used in the established relationships. The shear modulus curves obtained from experimental studies in the literature, soil properties and stress conditions (confining pressure) were compiled. Then, using with compiled data, shear modulus curves and damping ratio curves were proposed for the sand and clay soils.

Keywords: Shear modulus, shear modulus curve, damping ratio, clay, sand, void ratio, plasticity index.

2020, 65 pages

1. GİRİŞ

İnsan yapılarının neredeyse tamamı zemin ile etkileşim içindedir. Bundan dolayı yapıların güvenli bir şekilde imal edilmesi ve istenen fonksiyonu yerine getirebilmesi için etkileşim içinde olduğu zeminin davranışının iyi anlaşılması ve analizlerde matematiksel olarak doğru bir şekilde modellenmesi gerekir. Zemin katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç farklı fazdan oluştuğundan matematiksel modelini oluşturmak ve zemin davranışını tahmin etmek oldukça güç ve zahmetlidir. Bilhassa zeminlerin deprem gibi dinamik yükler altındaki davranışlarını ve yapılara etkilerini tahmin etmek bilgi ve tecrübe gerektiren bir iştir.

Son yüzyıl içinde zeminlerin dinamik davranışlarını anlayabilmek için birçok deneysel çalışmalar (dinamik üç eksenli basınç deneyi, dinamik üç eksenli kayma deneyi, rezonant kolon deneyi, içi boş silindir deneyi, basit kesme deneyi, bender eleman deneyi, arazide kayma dalgası hız ölçümleri vb.) yürütülmüştür. Yapılan bu çalışmaların sonuçları literatürde yer almıştır. Literatürde yer alan araştırma sonuçlarına dayalı olarak zeminlerin dinamik davranışlarını modellemek için birçok araştırmacı tarafından yöntem ve yaklaşımlar önerilmiştir. Zeminlerin dinamik davranışları matematiksel olarak kayma modülü azalım eğrisi (omurga eğrisi), sönüm eğrisi ve maksimum kayma modülü ile tanımlanmaktadır. Literatürde yer alan deneysel çalışma sonuçlarının gün geçtikçe artması ve yeni hesap teknikleri ile önerilen dinamik zemin davranış modellerinin doğruluğu daha da artmakta ayrıca zemin özelliklerine göre (kil, silt, kum, önyüklemeli, normal konsolide vb.) daha da özelleşmektedir.

Deneysel çalışmalar, zemin rijitliğinin; boşluk oranı, çevre basıncı ve plastisite indisinden büyük ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Belirli bir seviyede tekrarlı birim kayma deformasyon genlikleri için yükleme döngülerinin (loopların) ortalama eğimleri, söz konusu kayma deformasyon seviyesi için kayma modülüne karşılık gelir. Kayma modülünün kayma deformasyon seviyesi ile değişimini gösteren eğriler literatürde kayma modülü azalım eğrisi olarak adlandırılır. Kayma modülü azalım eğrisindeki kayma modülü değerleri maksimum kayma modülü değerine oranlanarak normalize edilirler. Normalize edilmiş kayma modülü azalım eğrileri zeminlerin

dinamik yüklemeler altındaki davranışlarını tahmin etmek için kullanılan matematiksel modellerin en önemli parçasıdır. Kayma modülü azalım eğrilerinin doğru tanımlanması ve tahmin edilmesi, ilgili zemin tabakalarının dinamik yükler altındaki temel matematiksel modelini oluşturur. Bu çalışmada belirli zemin özelliklerini temsil eden parametreler ile (plastisite indisi, boşluk oranı vb.) kayma modülü azalım eğrileri sönüm eğrileri arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır.



2. GENEL TANIM VE BİLGİLER

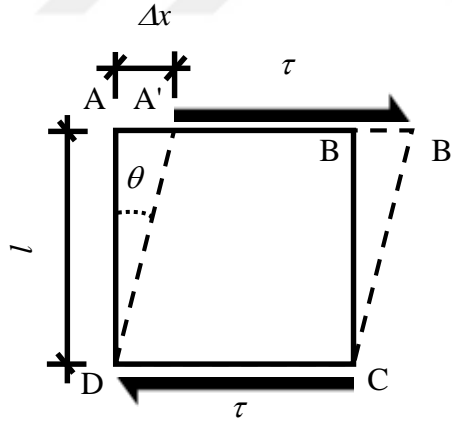
2.1. Zeminlerin Kayma Dayanım Parametreleri (kayma deformasyonu, kayma gerilmesi, En Büyük Kayma Modülü) ve Tanımları

2.1.1. Zeminlerin Kayma Dayanım Parametreleri Tanımları : Kayma Gerilmesi (τ), Kayma Deformasyonu (γ), Kayma Modülü (G)

Şekil 2.1'de görülen kayma birim deformasyonu (γ), denklem 2.1'de gösterildiği gibi ΔX 'in l 'ye oranıdır. Diğer bir deyiş ile " γ " Şekil 2.1'de gösterilen " θ " açısının tanjantını ifade eder. Kayma modülü (G) ise denklem 2.2'de gösterildiği gibi bir birimlik kayma deformasyonuna (γ) karşılık gelen kayma gerilmesi (τ) olarak tarif edilir.

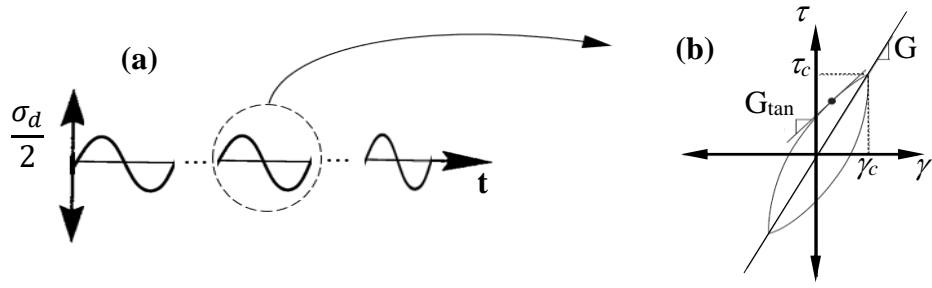
$$\gamma = \tan \theta = \frac{\Delta x}{l} \quad (2.1)$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.2)$$



Şekil 2.1. Kayma deformasyonu ve kayma modülü.

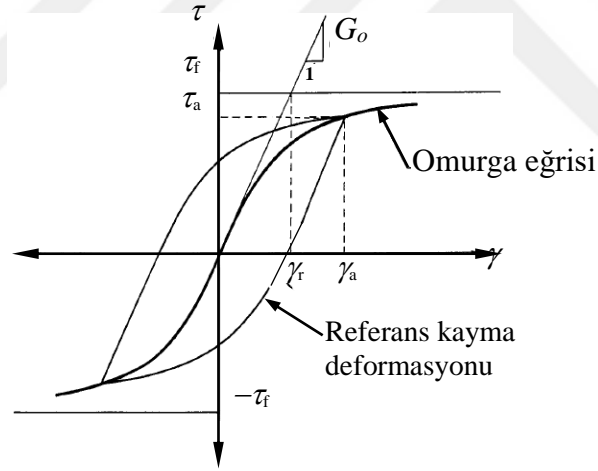
Şekil 2.1 de gösterildiği gibi bir zemin malzemesine, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi sinüzoidal olarak devirsel bir kayma gerilmesi uygulandığında, Şekil 2.2.b'de gösterilen loop şeklindeki kayma deformasyon eğrisi elde edilir. Kayma modülü (G) bu loopun ortalama eğimini gösterir. Herhangi bir anda loop eğrisinin üzerindeki bir noktanın eğimi ise G_{\tan} olarak tanımlanır.



Şekil 2.2. (a) Sinüzooidal yükleme ve (b) Loop (histerisiz döngüsü).

2.1.2. En Büyük Kayma Modülü (G_o)

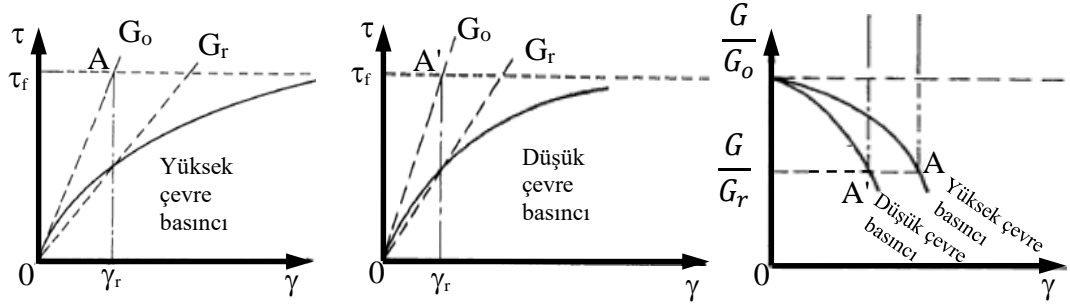
Gerilme birim deformasyon davranışının en belirleyici olan parametrelerinden birisi en büyük kayma modülü (G_o) değeridir. En büyük kayma modülü zeminde meydana gelen en küçük deformasyon seviyelerine karşılık gelen kayma modülüdür (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. En büyük kayma modülü.

2.1.3. Referans Kayma Deformasyonu (γ_r)

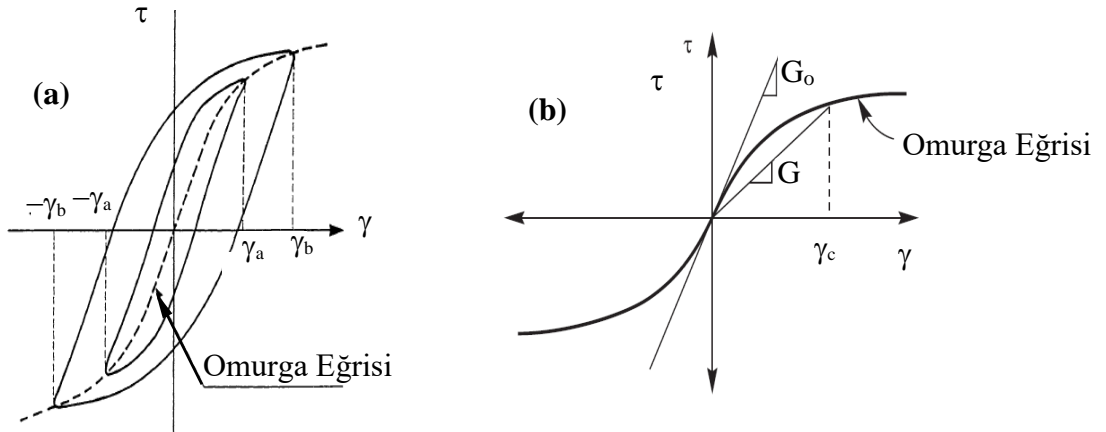
Referans kayma deformasyonu; malzemenin elastik davranması durumunda göçmenin meydana geleceği kayma gerilmesini işaret eder. En büyük kayma modülü (G_o) doğrusunun, yatay çizilen kayma dayanım doğrusunu kestiği noktadaki kayma deformasyonudur (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Referans kayma deformasyonunun gösterimi [1].

2.1.4. Omurga Eğrisi

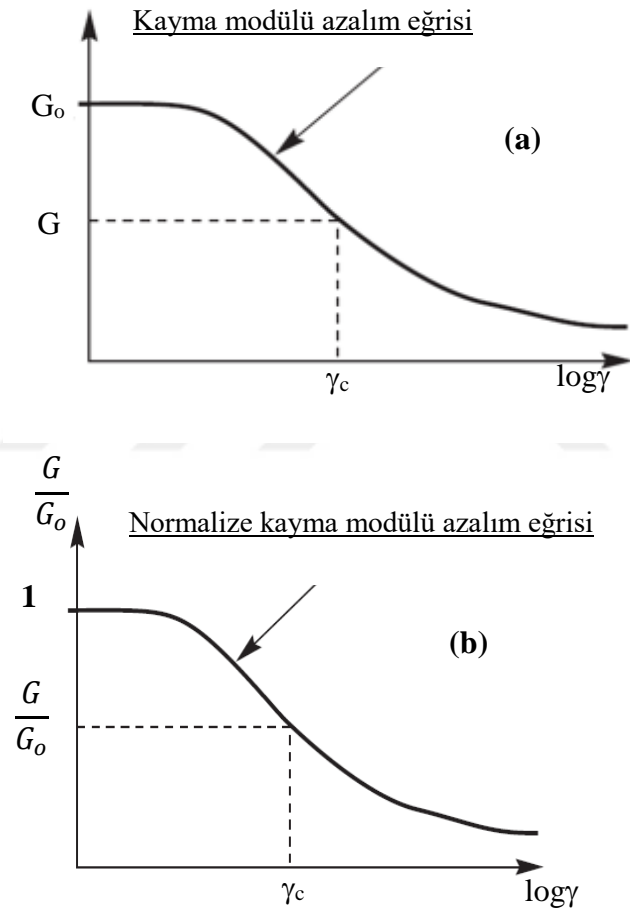
Şekil 2.5'te gösterilen yükleme durumunda $-\gamma_a$ ile γ_a ya da $-\gamma_b$ ile γ_b arasındaki kayma deformasyon farkı kayma deformasyon genliği olarak tanımlanır. Aynı özelliklere sahip zeminler için, aynı çevre basıncı altında, Şekil 2.1'de gösterilen kayma gerilmesinin farklı genliklerde uygulanması durumunda Şekil 2.5.a'da gösterildiği gibi farklı looplar oluşabileceği deneysel çalışmalardan gözlemlenmiştir [1]. Farklı kayma gerilme seviyelerine – diğer bir deyiş ile farklı deformasyon genliklerine ait loopların uçlarından geçen eğri omurga eğrisi olarak adlandırılır (Şekil 2.5.b). Omurga eğrisinin orijin noktasındaki eğimi en büyük kayma modülü olarak tarif edilir ve G_0 veya G_{\max} (G_{\max}) olarak gösterilir.



Şekil 2.5. (a) Farklı deformasyon genlikleri için looplar, (b) loopların tepe noktalarından geçen omurga eğrisi.

2.1.5. Kayma Modülü Azalım Eğrisi ve Normalize Kayma Modülü Azalım Eğrisi

Kayma modülünün (G), kayma deformasyon genliği ile değişimini gösteren eğriler, Kayma Modülü Azalım Eğrileri olarak tanımlanırlar (Şekil 2.6.a). Kayma modülü azalım eğrileri genelde Şekil 2.6.b'de gösterildiği gibi en büyük kayma modülü değerine oranlanarak – normalize edilerek (G/G_0 ya da G/G_{maks} ya da G/G_{max}) gösterilirler. G/G_0 eğrileri normalize kayma modülü eğrileri olarak adlandırılırlar.



Şekil 2.6. (a) Kayma Modülü Azalım Eğrisi, (b) Normalize Kayma Modülü Azalım Eğrisi.

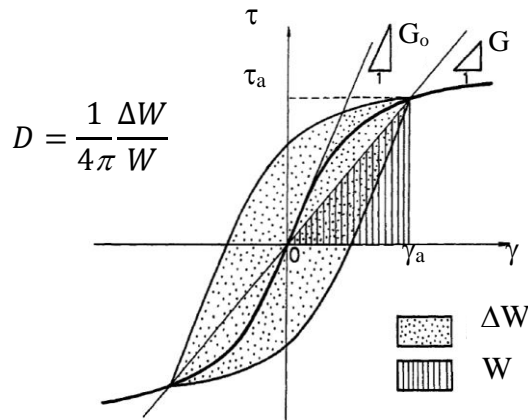
Literatürde yer almış geçmiş çalışmalar, kayma modülü azalım eğrilerinin boşluk oranı, plastisite indisi, dane çapı dağılımı, doygunluk seviyesi, geçirgenlik, malzemenin mineralojik özellikleri gibi zemin özellikleri ile düşey efektif gerilme,

yatay efektif gerilme, çevre basıncı, yükleme frekansı, yükleme devir sayısı (laboratuvar ortamındaki deneylerde) gibi koşullara bağlı olarak, farklı mertebelerde etkilenebileceğini göstermiştir.

2.1.6. Sönüm Oranı

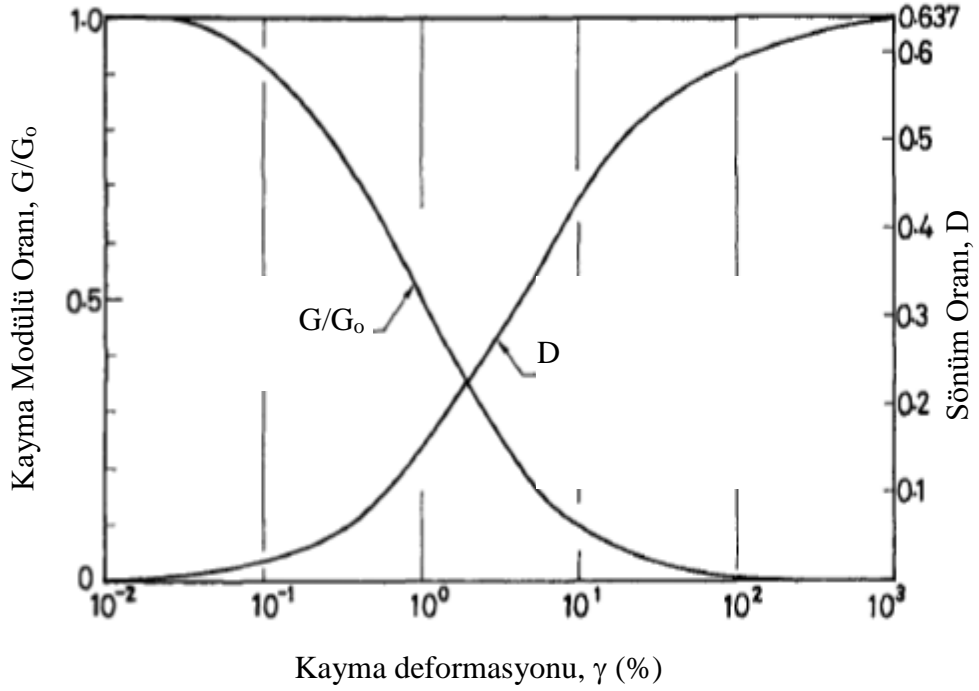
Yüklemeye maruz kalmış bilhassa tekrarlı yükleme altındaki zeminlerde şekil değiştirmeler (deformasyonlar) meydana gelir. Zeminde meydana gelen bu deformasyonlar esnasında zemini oluşturan materyaller (dane, su, gaz) arasında ve bilhassa daneler arasında sürtünme meydana gelir ve meydana gelen bu sürtünme neticesinde yüklemekten dolayı oluşan kinetik enerjinin bir kısmı ısı olarak kaybolur. Yükleme esnasında toplam enerji miktarında meydana gelen bu azalma miktarı (oranı) sönüm oranı olarak tanımlanır ve literatürde genellikle D , ζ , ψ gibi semboller ile gösterilir.

Sönüm oranı yaklaşık olarak birim şekil değiştirme ve kayma gerilmesi grafiğindeki loop (devrinsel yükleme) eğrisinin içinde kalan alanın, döngünün ucunun birim şekil değiştirme eksenine iz düşümünden elde edilen üçgeninin alanına oranı şeklinde hesaplanır (Şekil 2.7). Şekil 2.7'den de görüldüğü gibi zeminlerdeki sönüm, devrinsel yükleme sonunda azalan enerjinin ölçüsü olarak ifade edilebilir. Deprem yükü etkisi altında zeminin nasıl davranacağını tahmin edebilmek için zeminlerin sönüm özelliklerinin bilinmesi önemlidir ve hesaplarda büyük fayda sağlar.



2.1.7. Sönüm Oranı Eğrisi

Yükleme koşulları esnasında oluşan kayma deformasyonunun genliği (büyüklüğü) oluşan loopun formunu değiştirir. Diğer bir deyiş ile devirsel yüklemeye esnasında kaybolan enerji miktarı deformasyon mertebesine göre değişkenlik arz eder. Kaybolan enerji oranının kayma deformasyonu seviyesi ile birlikte gösterildiği eğrilere sönüm oranı eğrisi denir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Kayma deformasyon seviyesine göre sönüm oranının değişimi.

2.2. Normalize Modül Azalım Eğrileri (G/G_0) ve Sönüm Eğrilerini (D) Etkileyen Zemin Özellikleri ve Çevre Koşulları

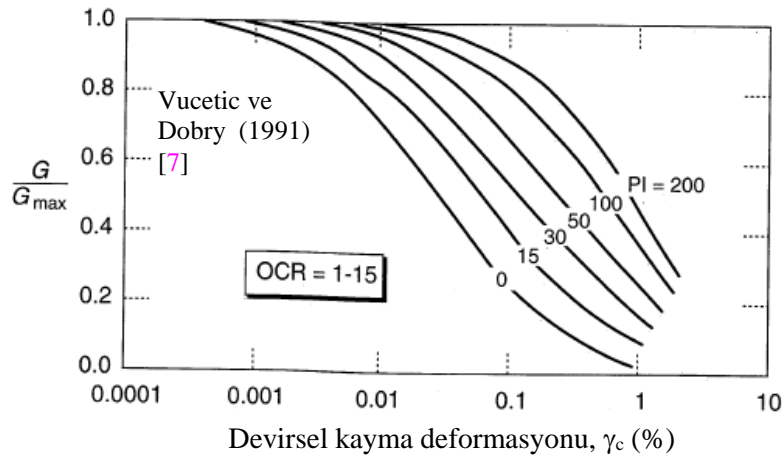
2.2.1. Modül Azalım Eğrilerini (G/G_0) Etkileyen Zemin Özellikleri ve Çevre Koşulları

Geoteknik deprem mühendisliğinin gelişimin başlarında azalım eğrilerinin karakteristikleri kaba ve ince daneli zeminler olarak ayrı ayrı gruplandırılmıştır [2]. Günümüzde de bu ayrım birçok araştırmacı tarafından göz önünde bulundurulmakta ve uygulanmaktadır. Bu ayrımın yapıyor olmasına karşın geoteknik mühendisliğinin

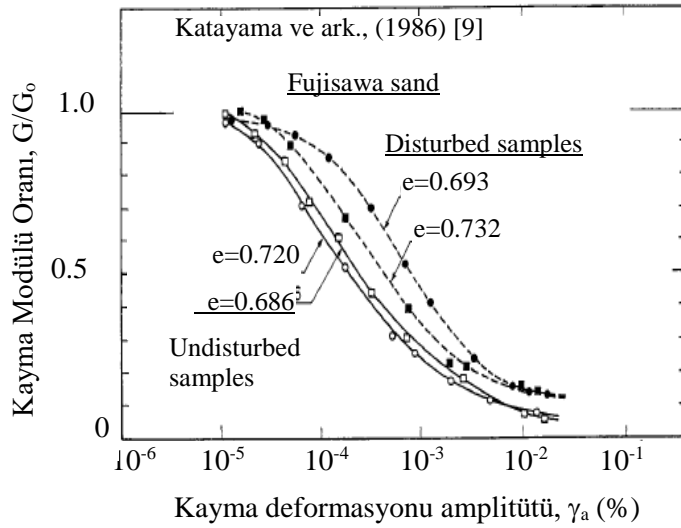
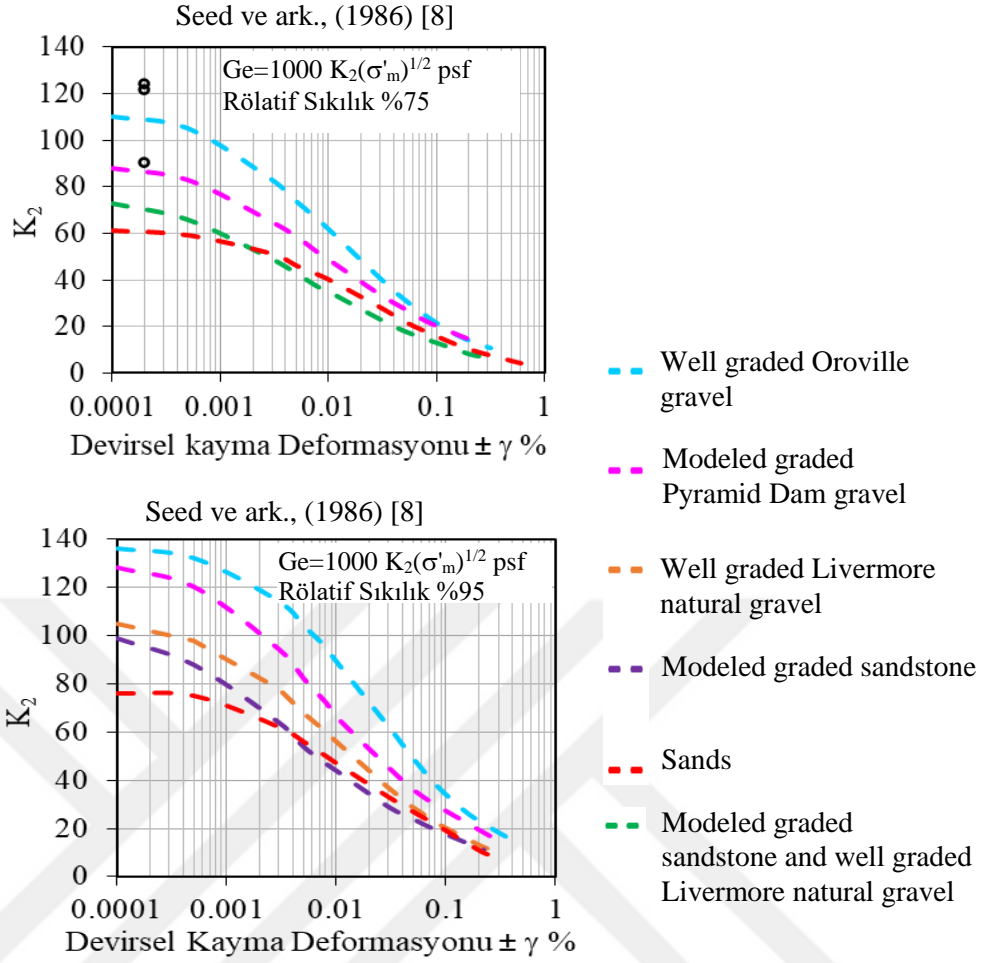
ilerleyen dönemlerinde modül azalım eğrilerinin non-plastik kaba ve ince plastik zeminler için kademeli bir geçiş gösterdiğini ortaya konulmuştur [3].

Zen ve ark. (1978) [3], Kokushu ve ark. (1982) [4], Dobry ve Vucatic (1987) [5], Sun ve ark. (1988) [6] gibi araştırmacıların yaptığı çalışmalarda, kohezyonlu ince malzemelerden oluşan zeminlerde kayma modülü azalım eğrisi formunun diğer parametrelerden ziyade plastisite indisi (PI) gibi parametrelerden daha çok etkilendiği ve değiştiğini gözlemlemişlerdir. Yüksek plastisiteli kohezyonlu zeminlerin kayma modülü azalım eğrileri, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi düşük plastisiteli kohezyonlu zeminlerin kayma modülü azalım eğrisinden daha yukarıda ve daha yumuşak (smooth) bir forma sahip olduğu, deneysel çalışma sonuçları ile ortaya konulmuştur [7].

Kum ve çakıl gibi non-plastik olan iri ve daneli zeminlerde ise hâkim ve baskın faktör olarak plastisite indisi yerini boşluk oranı ya da diğer bir deyiş ile rölatif sıklık almaktadır. Diğer koşulların aynı kalması durumunda, kayma modülü azalım eğrisinin formu üzerinde boşluk oranı diğer etkenlere nazaran daha etkili olmaktadır [8, 9]. Şekil 2.10'da farklı boşluk oranlarındaki ve sıklık değerleri için örselenmemiş ve örselenmiş iri daneli zeminlere ait kayma modülü azalım eğrileri verilmiştir. Şekil 2.10'da boşluk oranının etkisinin yanında zemin dokusunun diğer bir deyiş ile daneler arası çimentolanma özelliklerini de kayma modülü azalım eğrilerinin pozisyonu ve konumu üzerinde etkisinin olduğu görülebilir [9].



Şekil 2.9. Kohezyonlu ince daneli zeminlerde zemin özelliklerinden plastisite indisinin (PI) kayma modülü azalım eğrisi üzerindeki etkisi [7].



Şekil 2.10. Zemin özelliklerinden boşluk oranı (e) ve rölatif sıklığın (D_r) kayma modülü azalım eğrileri üzerindeki etkisi [8, 9].

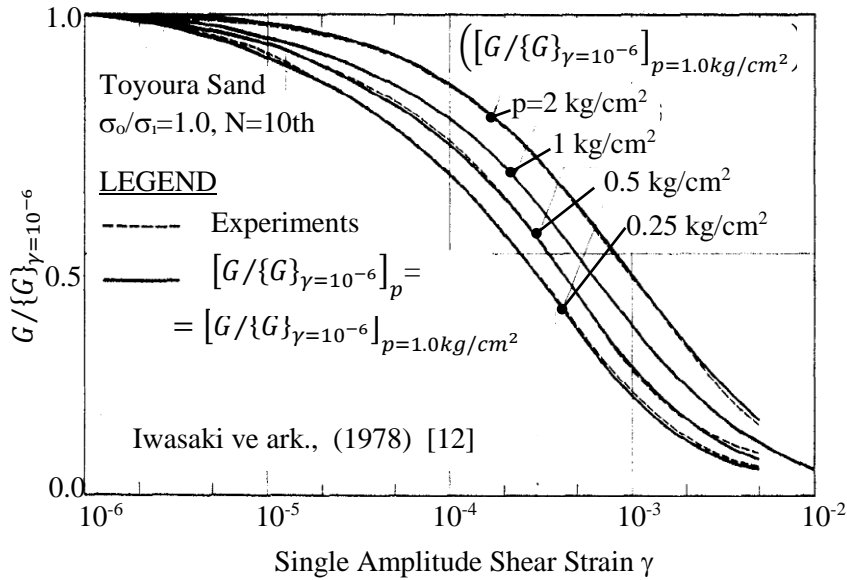
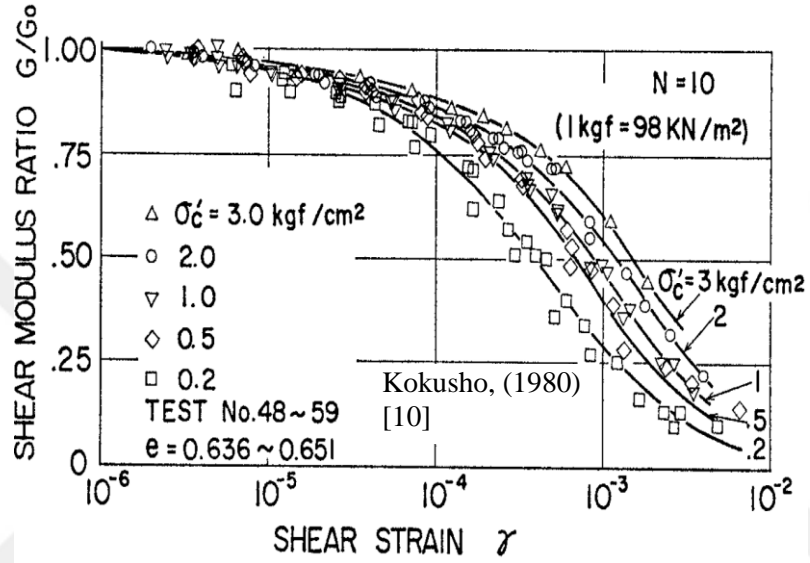
Kum ve çakıl gibi iri daneli ve kohezyonlu ince daneli malzemelerden oluşan zeminlerin her ikisinin kayma modülü ve normalize kayma modülü eğrileri zemin özellikleri haricinde çevre koşullarından da etkilenebilmektedir. İri daneli zeminler için kayma modülü eğrileri üzerinde en etkin çevre koşulu gerilme koşulları (çevre basıncı – confining pressure / ortalama efektif gerilme) olmaktadır. Laboratuvarında test edilen numuneler için genelde gerilme koşulu olarak çevre basıncı (σ_3), saha zeminleri için ise ortalama efektif gerilme ($\sigma_m=[2\sigma_h+K_o\sigma_v]/3$) dikkate alınmaktadır. Yürütülen deneysel çalışmalar neticesinde kayma modülü azalım eğrisinin pozisyonu ve formu üzerinde çevre basıncının / ortalama efektif gerilmenin önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Diğer faktörlerin etkisinin ise çevre basıncının / ortalama efektif gerilmenin etkisine nazaran düşük olduğu birçok araştırmacı tarafından yaptıkları deneysel çalışmalarda gözlemlenmiştir [8 – 12]. İri daneli bilhassa kumlu zeminlerin kayma modülü azalım eğrilerinin konumu ve formunda çevre basıncının etkisi Şekil 2.11 ile verilmiştir.

Kohezyonlu zeminlerde ise ilk yapılan çalışmalarda çevre basıncının San Fransisco çamurunun kayma modülü azalım eğrilerinin pozisyonu üzerinde düşük boşluk oranlarındaki ($e\approx 0.6$) etkisi (Şekil 2.12) Stoke ve Lodde (1978) [13] tarafından gösterilmiştir. Buna ilaveten Zen ve ark. (1978) [3] tarafından çevre basıncının kohezyonlu malzemelerin kayma modülünün pozisyonu ve formu üzerindeki etkisinin plastisite indisinin artması ile birlikte azaldığı belirtilmiş ve Şekil 2.13 ile verildiği gibi bulgulanmıştır. Bu çalışmalara karşın, birçok araştırmacı tarafından kohezyonlu zeminler için çevre basıncının kayma modülü azalım eğrisinin pozisyonu üzerindeki etkisinin oldukça sınırlı olduğu gözlemlenmiş ve rapor edilmiştir [6, 14, 15].

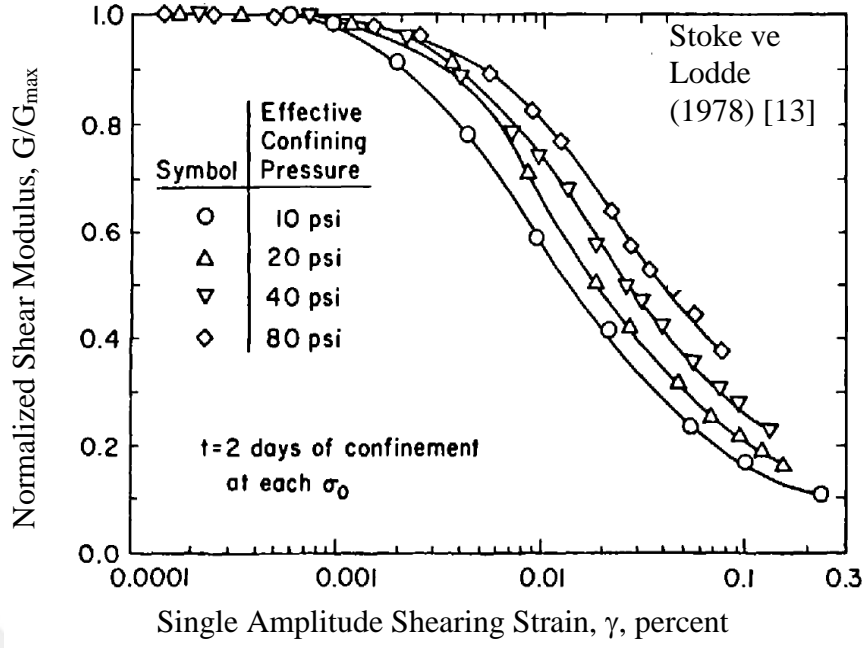
İlerleyen yıllarda Darendeli (2001) [16], Stoke ve ark. (2004) [17], Kallioglu ve ark. (2008) [18] gibi araştırmacıların yaptıkları çalışmalarda kohezyonlu zeminlerin kayma modülü azalım eğrilerinin belirlenmesinde çevre basıncını göz önünde bulundurmuşlardır.

Kokusho ve ark. (1982)'de [4] kohezyonlu zeminler üzerinde yürüttükleri deneysel çalışmalarda 40'tan fazla test gerçekleştirmişlerdir. Yürüttükleri deneysel çalışmada kayma modülü azalım eğrilerinin pozisyonu ve formunda zeminin gerilme

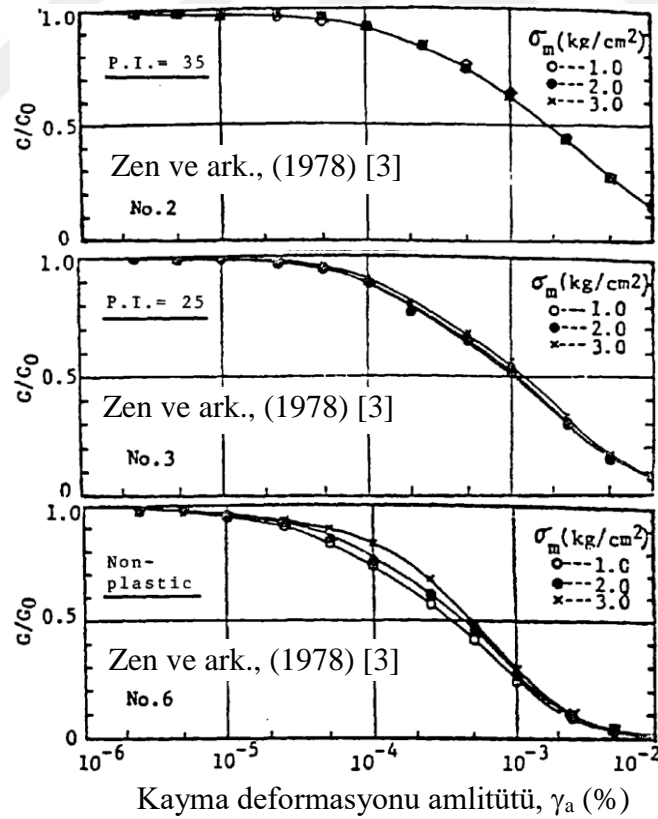
geçmişinin diğer bir deyiş ile ön yükleme basıncının (OCR), çevre basıncı gibi yüksek mertebede bir etkiye sahip olmadığını gözlemlemişlerdir. Ön yükleme basıncı oranının 5 – 15 arasında değişen numunelerin kayma modülü azalım eğrilerinin dar bir bantta gerçekleştiğini ve ön yükleme basıncının kohezyonlu zeminlerin normalize kayma modülünün pozisyonu ve formu üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı sonucuna ulaşmışlardır (Şekil 2. 14).



Şekil 2.11. Çevre basıncının kumlu zeminler için kayma modülü azalım eğrisi üzerindeki etkisi [10, 12].

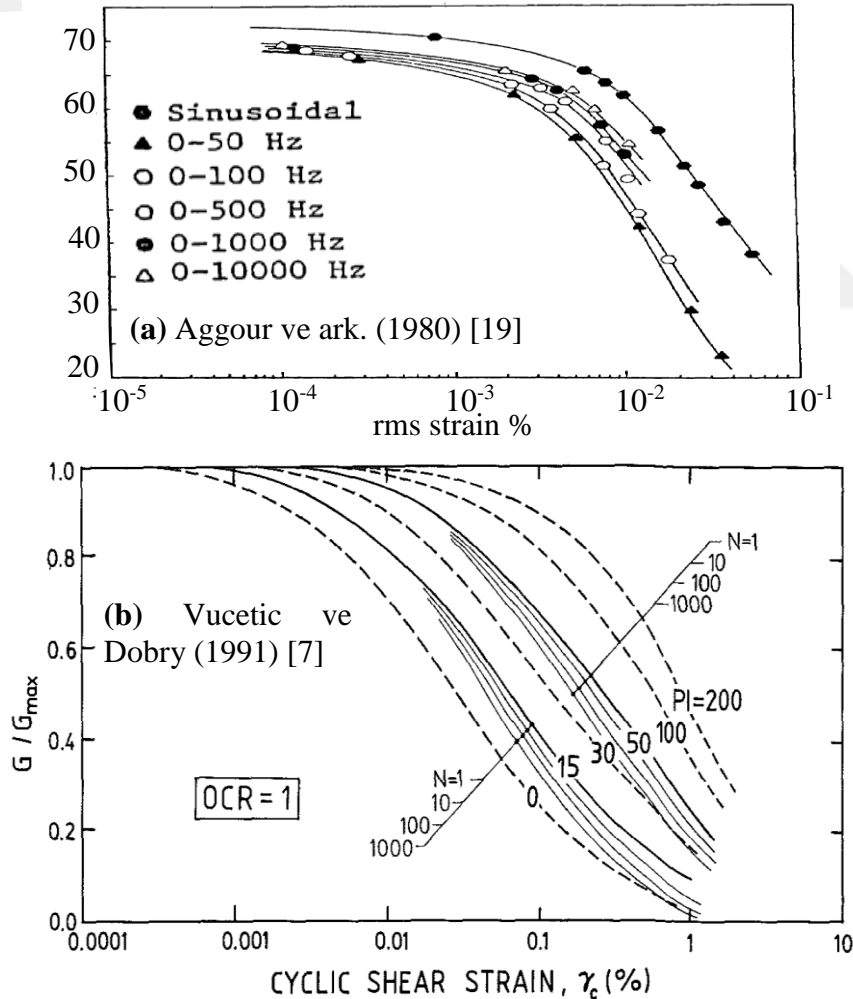


Şekil 2.12. Çevre basıncının San Francisco körfezi çamuru kayma modülü azalım eğrisi üzerindeki etkisi [13].



Şekil 2.13. Farklı plastisite özelliklerine sahip killerin normalize kayma modülü azalım eğrileri üzerinde ortalama efektif gerilmenin etkisi [3].

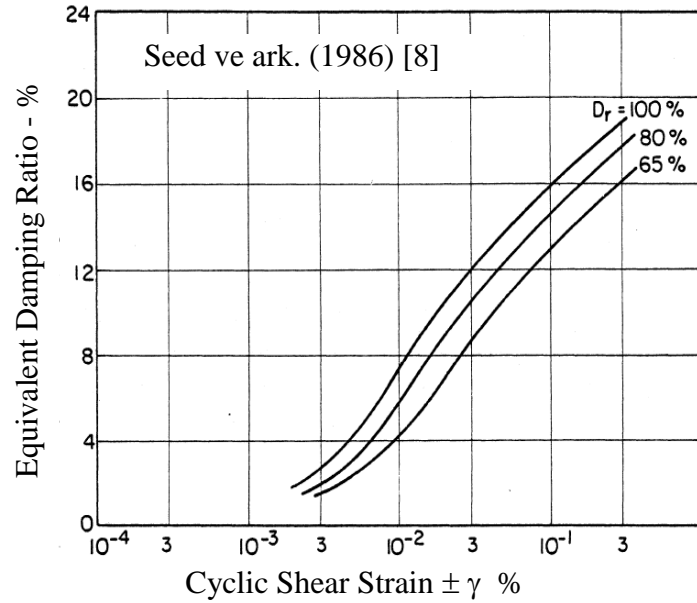
Kohezyonlu zeminlerin kayma modülü azalım eğrilerinin konumu ve formu üzerinde devirsel yüklemenin frekansı ve devirsel yüklemdeki çevrim sayısının da etkisi mevcuttur. Aggour ve ark. (1980)'de [19] yaptıkları çalışmada 50 Hz üzerindeki devirsel yüklemelerin belirgin bir etkisinin olduğunu belirlemişlerdir (Şekil 2.14.a). Ancak geoteknik mühendisliğinin ilgi alanına giren deprem yüklemelerinin çoğu 0.1 Hz ile 30 Hz arasındadır. Dolayısı devirsel yüklemenin frekans etkisi ihmal edilebilir bir etki olmaktadır [6]. Devirsel yüklemdeki çevrim sayısının (N) kayma modülünün konumu ve formu üzerindeki etkisi ise Vucetic ve Dobry, (1991) [7] tarafından Şekil 2.14.b de verildiği gibi olduğu belirtilmiştir. Düşük çevrim sayılarındaki aralıklar (10-15) göz önüne alındığında çevrim sayısının kayma modülü üzerindeki etkisi de nispeten sınırlı kalmaktadır.



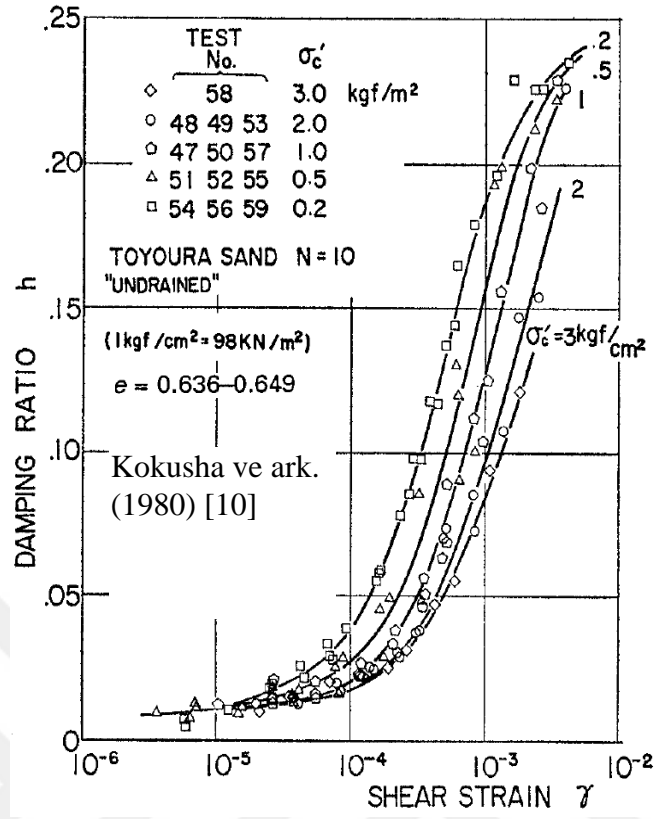
Şekil 2.14. (a) Devirsel yüklem frekansının [19] ve (b) çevrim sayısının – N kayma modülü azalım eğrisi üzerindeki etkisi [7].

2.2.2. Sönüm Oranı Eğrileri (D) Etkileyen Zemin Özellikleri ve Çevre Koşulları

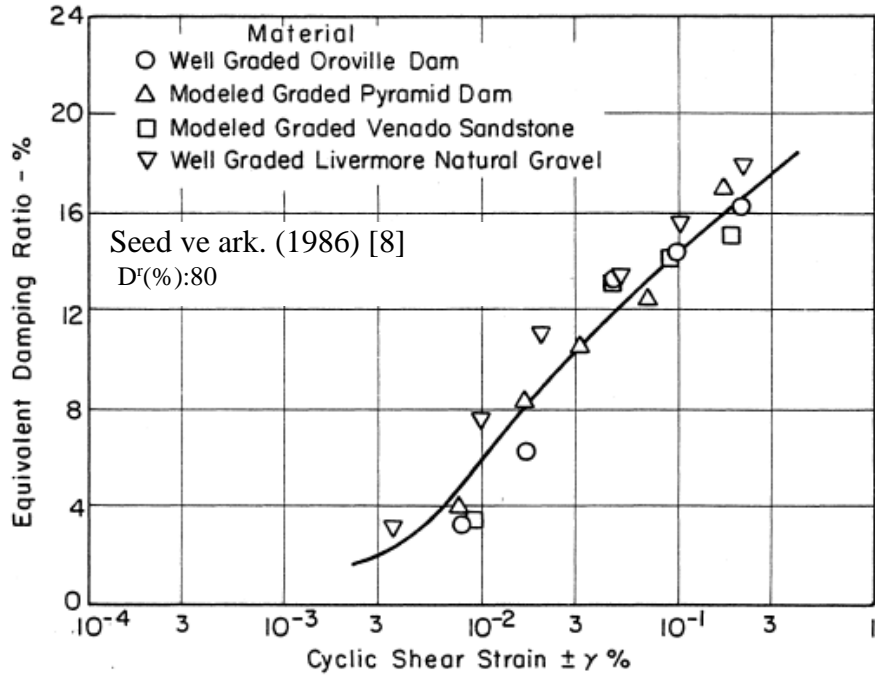
Dinamik yüklemelerde zeminlerde kaybolan enerjinin göstergesi olan sönüm oranı küçük deformasyon mertebeleri için oldukça küçük mertebelerde gerçekleşmektedir. Yükleme esnasında oluşan kayma deformasyonlarının mertebesi arttıkça sönüm oranı da artmaktadır. Seed ve ark. (1986) [8] kumlu zeminlerde boşluk oranı azaldıkça ya da diğer bir deyiş ile rölatif sıkılık arttıkça sönüm oranının da artacağını belirtmişlerdir. Seed ve ark. (1986) [8] yaptıkları çalışmada kumlu zeminler için rölatif sıkılık (D_r) ile sönüm oranı eğrisinin pozisyonunun ve formunun değişimini Şekil 2.15 de ki gibi vermişlerdir. Kokusha ve ark., (1980) [10] yaptıkları çalışmada kumlu zeminlerin sönüm oranı eğrisinin pozisyonu ve formu ile çevre basıncı arasındaki ilişkiyi Şekil 2.16 ile verildiği gibi elde etmişlerdir. Seed ve ark. (1986) [8] farklı dane çapı dağılımına sahip numuneler üzerinde yaptıkları deneysel çalışma neticesinde kumlu zeminler için sönüm oranı eğrisinin Şekil 2.17’de gösterildiği gibi malzemenin gradasyonundan (dane çapı dağılımından) belirgin bir şekilde etkilenmediğini rapor etmişlerdir. Aynı çalışmada, sönüm oranı eğrisinin pozisyonunun ve formunun, düşük deformasyon seviyelerinde ve belirli bir eşik çevrim sayısına kadar (yaklaşık 60 çevrim), çevrim sayısından belirgin bir şekilde etkilenmediğini de belirtmişlerdir [8].



Şekil 2.15. Kumlu zeminlerde sönüm oranı eğrisinin rölatif sıkılık (boşluk oranı) ile ilişkisi [8].

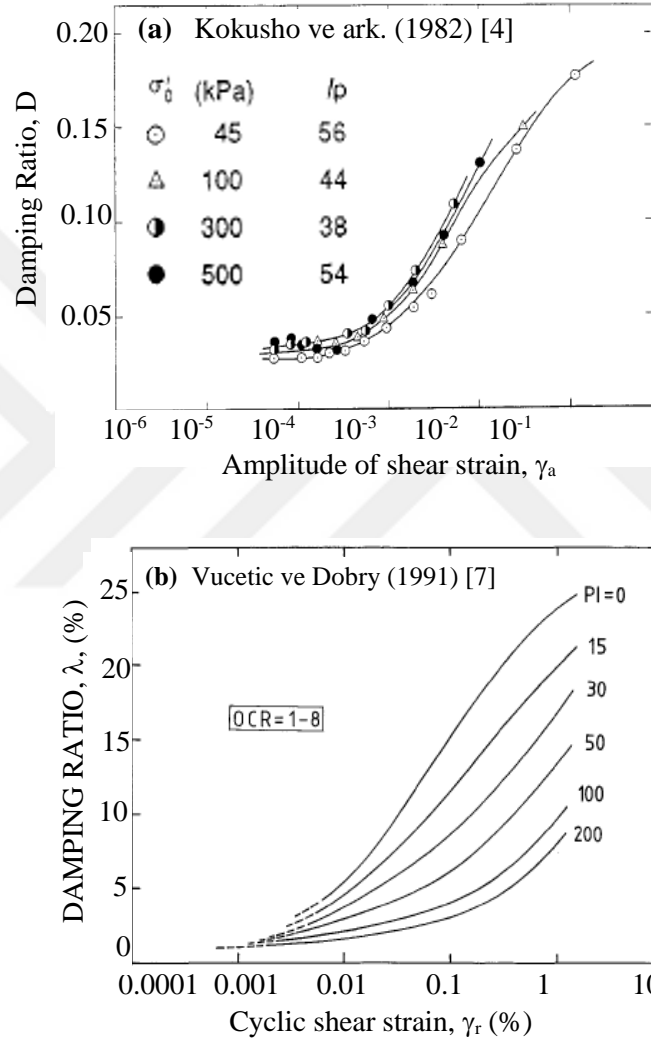


Şekil 2.16. Kumlu zeminlerde sönüm oranı eğrisinin çevre basıncı ile ilişkisi. [10].



Şekil 2.17. Farklı dane çapı dağılımına sahip kumlu zeminlerin sönüm oranları [8].

Kokusho ve ark. (1982) [4], Seed ve ark. (1986) [8], Vucatic ve Dobry (1991) [7] gibi araştırmacılar kohezyonlu zeminlerin sönüm oranının plastisite indisinden etkilendiğini dikkate almışlar ve ilişkilendirmişlerdir (şekil 2.18). Söz konusu araştırmacılar, kohezyonlu zeminlerin sönüm oranı eğrisi için diğer parametre ve özellikler ile bir ilişki önermemişler ve tavsiye etmemişlerdir.



şekil 2.18. Kohezyonlu ve ince daneli zeminlerde plastisite indisinin ve çevre basıncının sönüm eğrisi üzerindeki etkisi [4, 7].

Yukarıda sayılanların haricinde dane şekli, dane mineralojisi, danelerin dizilimi, devirsel yüklemenin tekerrürü (depremlerin tekerrür sıklığı) gibi bazı zemin özelliklerinin ve yükleme koşullarının da kayma modülü azalım eğrisi ve sönüm oranı

üzerinde etkisinin olduğu söylenebilir ancak bu etkilerin yorumlanabilmesi için literatürde yeterince bilgi mevcut değildir. Bundan dolayı sayılan bu etkilerin kayma modülü azalım eğrisi ve sönüm eğrisi üzerindeki etkileri bu çalışmada ele alınmamıştır.

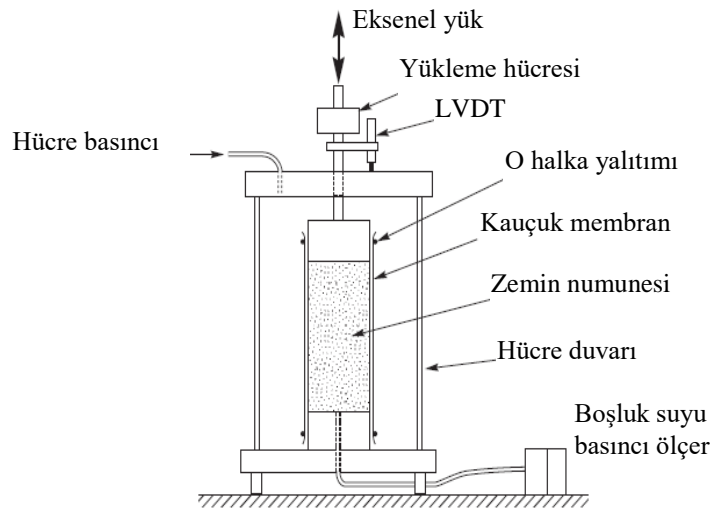


3. KAYMA MODÜLÜ AZALIM EĞRİLERİNİN VE SÖNÜM ORANI EĞRİLERİNİN BELİRLENME YÖNTEMLERİ

3.1. Kayma Modülü Azalım Eğrilerinin ve Sönüm Oranı Eğrilerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi

3.1.1. Dinamik Üç Eksenli Basınç Deneyi

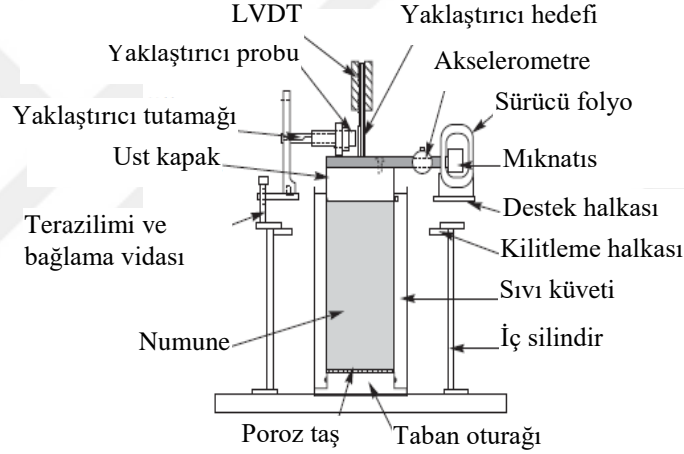
Zemin dinamik yükler altındaki deformasyon davranışlarını belirlemek için laboratuvarında en sık kullanılan deney yöntemlerinden biridir. Bir üç eksenli deney düzeneği Şekil 3.1’de verilmiştir. Zemin örneği üç eksenli deney için silindirik şekle getirilir ve etrafına membran geçirilir ve daha sonra yükleme başlıkları arasına yerleştirilir. Hücre içindeki silindirik zemin numunesine önce hücre basıncı uygulanır. Hücre basıncı sıvı ya da gaz marifeti ile zemin numunesine etkir. Üç eksenli basınç deney sistemlerinde gerilme (deviatör gerilme: eksenel ve hücre basıncı arasındaki fark) ya da deformasyon kontrollü olarak iki farklı şekilde uygulanabilir. Deformasyon ya da deviatör gerilme genliği sinüzoidal, üçgen veya kare formunda değişken ve tekrarlı (devirsel) olarak uygulanır. Tekrarlama frekansı genelde 1 Hz olarak uygulanmak ile birlikte uygulama frekansı 0.1~10 Hz arasında değişebilir. Deney esnasında hücre basıncı sabit tutulur.



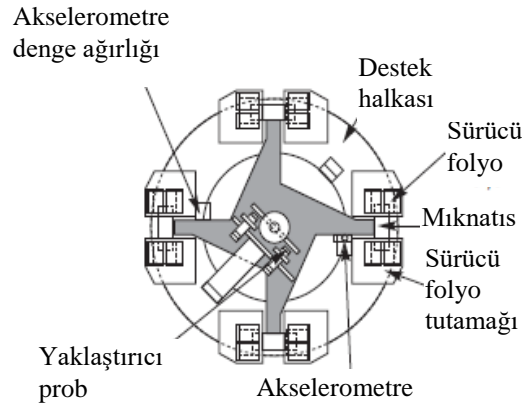
Şekil 3.1. Dinamik üç eksenli basınç deney aleti [20].

3.1.2. Rezonant Kolon Deneyi

Rezonant kolon deneyi zeminin niteliklerini düşük deformasyon seviyelerinde ölçmek için tercih edilen bir deney yöntemidir. Elektromanyetik düzenek sayesinde içi dolu veya içi boş silindir formunda olan zemin örneklerine aksel doğrultuda devirsel basınç veya burulma etkisi altında devirsel kayma gerilmeleri uygulanır. Çoğunlukla genlik ve frekansın denetlenebildiği harmonik yükler ve yükleme düzenekleri kullanılır. Deney düzeneğinde tekrarlı yükleme uygulanmadan önce zemin numunesi konsolide edilir. Zemin örneğinin frekansı, numune üzerindeki birim deformasyon genliklerinin yerel olarak en yüksek seviyeye ulaştığı en düşük yükleme frekansıdır. Rezonant kolon deney aletinin önden görünümü ise Şekil 3.2’de, üstten görünümü Şekil 3.3’de, gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Rezonant kolon deney aletinin önden görünümü [20].

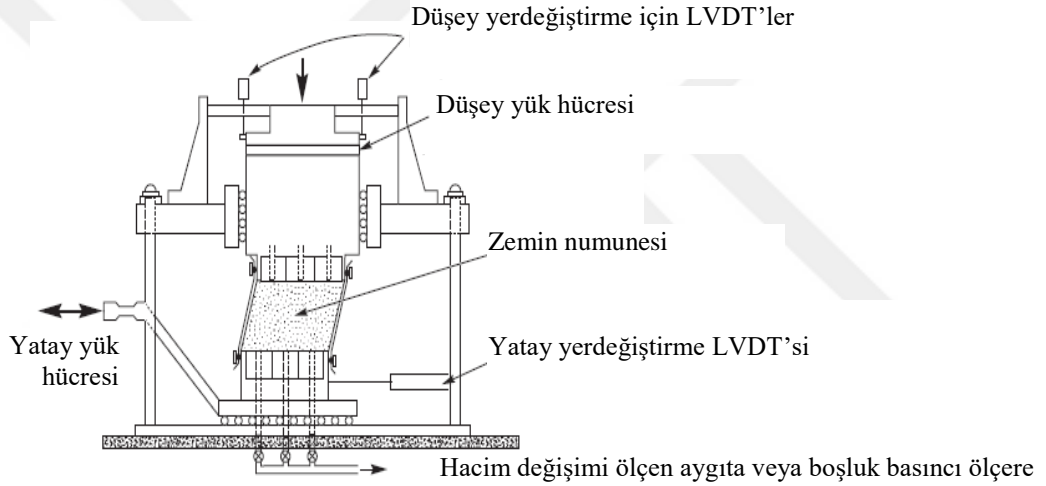


Şekil 3.3. Rezonant kolon deney aleti üstten görünümü [20].

3.1.3. Tekrarlı Basit Kesme Deneyi

Bu test sıvılaşma için uygulanan en basit deneylerden biridir. Bu teste deprem gerilme şartları diğer deneylere nazaran daha doğru şekilde hesaplanabilmektedir. Zemin örneğinin altına ve üstüne tekrarlı yatay kayma gerilmeleri etki ettirilir. Deneyde kullanılan zemin örneğinin deformasyonu kayma (S) dalgası etkisindeki numune ile hemen hemen aynı deformasyona sahiptir.

Öte yandan bu deneyde kayma gerilmesi zemin örneğinin yalnızca altına ve tepesine etki ettirilir. Tekrarlı basit kesme aletinin görünümü, parçaların şekilleri ve isimleri Şekil 3.4’de verilmiştir.

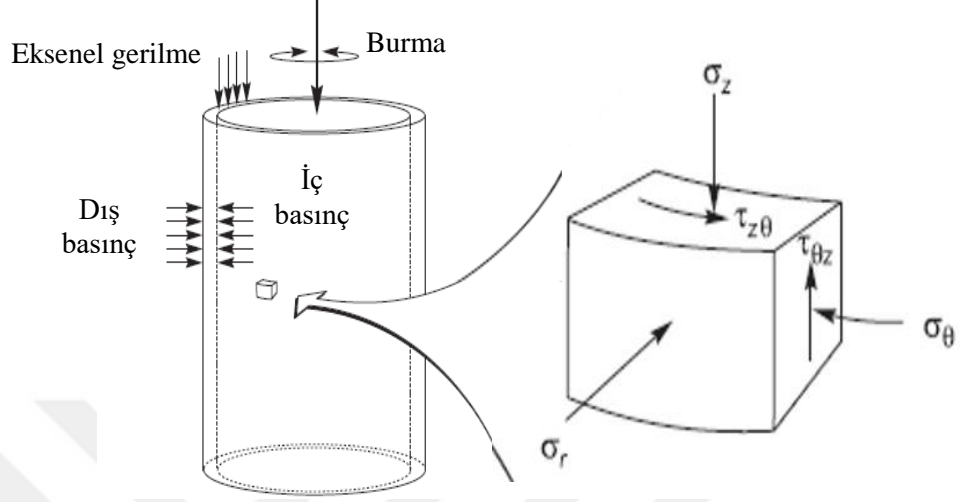


Şekil 3.4. Tekrarlı basit kesme deney aleti [20].

3.1.4. İçi Boş Silindir Deneyi

İçi boş silindir testi zeminde görülen tüm temel gerilime koşullarını bir deney düzeneği üzerinde oluşturabilmek için geliştirilmiştir. İçi boş silindir testi, zeminin sıvılaşma potansiyeli, dinamik kayma mukavemeti ve sönümlenme gibi dinamik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılır. Bu deneylere ilaveten test ekipmanı ile yukarıda sayılan dinamik üç eksenli basınç ve standart monotonik üç eksenli deneyleri de gerçekleştirilebilir. İçi boş silindir testi, içi boş silindir şeklindeki zemin numunesine üç farklı gerilme uygulanabilir. Bu üç gerilmenin her biri ayrı ayrı kontrol edilebilir. Test sırasında bu üç gerilmenin her birini kontrol ederek farklı

gerilme izlerinin zeminin kayma mukavemeti üzerindeki etkileri belirlenebilir. İçi boş silindir deney aletinin görünümü Şekil 3.5’de gösterilmiştir.

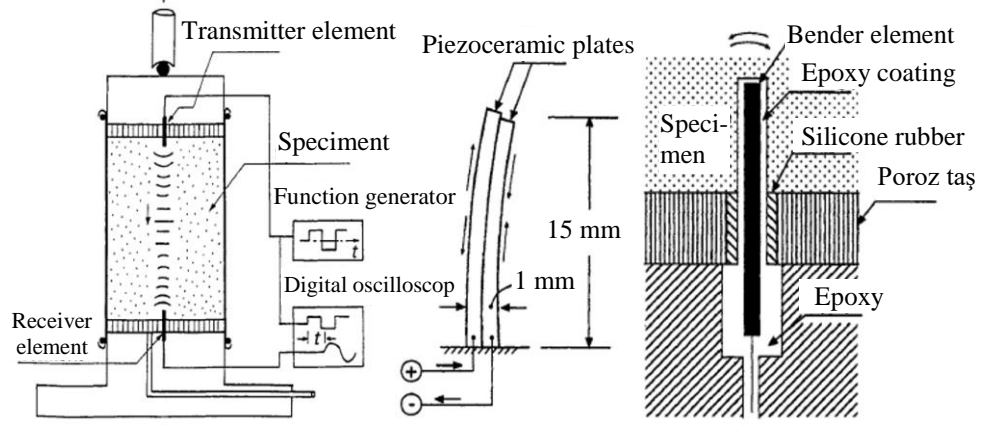


Şekil 3.5. İçi boş silindir deney aleti. [20].

3.1.5. Bender Eleman Deneyi

En büyük kayma modülü için küçük deformasyon seviyelerinin ölçülmesi gerekmektedir. Mevcut dinamik üç eksenli deney aletlerinde G_o 'a karşılık gelecek uygun yüklemelerin yapılması ve buna karşılık gelen deformasyon miktarlarının ölçülmesi mümkün olmadığından, G_o değeri çoğunlukla kayma dalgasının (V_s) zemin içinde ilerleme hızının belirlenmesi ile hesaplanır. En büyük kayma modülü (G_o) ile kayma dalgası hızı (V_s) arasında denklem 3.1 ile verilen ilişki mevcuttur. Laboratuvar ortamında kayma dalgasının hızı (V_s) Şekil 3.6’da tasvir edilen bender eleman deneyi ile belirlenir. Arazide ise zeminlerin kayma dalgası hızı sismik ölçüm deneyleri oldukça güvenilir bir şekilde belirlenebilmektedir.

$$G_o = \rho V_s^2 \quad (3.1)$$



Şekil 3.6. Bender eleman deneyi [1].

3.2. Normalize Kayma Modülü Azalım Eğrilerinin (G/G_0) ve Sönüm Oranı Eğrilerinin (D) Önceki Çalışmalara Dayanılarak Belirlenmesi

Normalize kayma modülü azalım eğrilerinin (G/G_0) ve sönüm oranı eğrilerinin (D) deneysel olarak belirlenmesinde birçok zorluk mevcuttur. Arazi deneyleri üzerinde yapılacak deneysel bir çalışma için uygun kalitede dokusunu koruyan, örselenmemiş numunelerin hazırlanması karşılaşılan güçlüklerin başında gelir. Bilhassa çakıllı, kumlu ve non-plastik zeminlerde dokusunu koruyan örnekler üzerinde deneysel çalışmaların yapılabilmesi son derece güç ve zahmetlidir. Normalize kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm oranı eğrilerinin belirlenmesine yönelik yapılması gereken deneyler için ihtiyaç duyulan ekipmanlar zemin mekaniği sahasındaki oldukça sofistike cihazlarındandır. Gönümüzdeki gelişmiş teknoloji ile birlikte bu cihazlara erişim artmakla birlikte henüz yeterince yaygın değildir. İlaveten deney ekipmanlarının kullanımı, deneylerin idame ettirilmesi ve değerlendirilmesi ileri düzeyde tecrübe, bilgi ve yetişmiş personel gerektirmektedir. Benzer zorluklar laboratuvar ortamında oluşturulan numuneler için de geçerli olup deney numunelerinin hazırlanması, deney başlangıç koşullarının oluşturulması gibi ilave zorluklar da mevcuttur.

Normalize kayma modülü azalım eğrilerinin (G/G_0) ve sönüm oranı eğrilerinin (D) deneysel olarak belirlenmesinde karşılaşılan zorluklardan dolayı G/G_0 ve D eğrilerinin belirlenmesi çoğu zaman deneysel olarak yapılamamaktadır. Bu durumda geçmişte yapılmış deneysel çalışma ve gözlem sonuçları referans alınarak mevcut

durum için öngörü ve tahminler yapılmaktadır. Geçmiş çalışmalara dayanılarak yapılan tahminlerde, bazen referans alınan çalışmadaki sonuçlar doğrudan ya da enterpolasyon yapılarak normalize kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm oranı eğrilerinin belirlenmesi yapılabilmekte, bazen de geçmiş çalışmalara dayanılarak geliştirilmiş ampirik ve/veya korelatif ilişkiler yardımı ile normalize kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm oranı eğrilerinin belirlenmesi yapılabilmektedir. Normalize kayma modülü azalım eğrilerinin bazı zemin özelliklerine, çevre koşullarına ve yükleme özellikleri ile ilişkisi Tablo 3.1’de aşağıda gösterilmiştir [5].

Tablo 3.1. Normalize kayma modülü azalım eğrilerinin (G/G_0) bazı zemin özelliklerine, çevre koşullarına ve yükleme özellikleri ile ilişkisi [5].

Factör (artımı)	G/G_0
Efektif çevre basıncı	Çevre basıncı ile artar : Plastisite indisinin artışı ile azalır
Boşluk oranı	Artar
Jeolojik yaş	Artma eğilimindedir
Çimentolanma	Artma eğilimindedir
Önyükleme basıncı	Etkisi yoktur
Plastisite indisi	Artar
Devirsel kayma deformasyonu	Azalır
Kayma deformasyon oranı	G artar ancak G/G_0 muhtemelen etkilenmez
Yükleme devir sayısı	Azalır

Kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm oranı eğrilerinin dolaylı olarak belirlenmesi kadar olmamakla birlikte en büyük kayma modülü değerinin belirlenmesi de geçmiş çalışmalara ve bazı ampirik ilişkilere dayanılarak yapılabilmektedir. Kayma dalgısı hızının ölçümü arazi ve laboratuvar koşullarında belirlenmesi nispeten kolay ve yaygın olmak ile birlikte yukarıda sayılan zorlukların nispeten var olmasından dolayı en büyük kayma modülü değerinin belirlenmesinde de ampirik ve korelatif ilişkiler kullanılabilir.

3.2.1. En Büyük Kayma Modülü (G_o) Değerinin Geçmiş Çalışmalara Dayanılarak Belirlenmesi

En büyük kayma modülünün (G_o) arazide ve laboratuvarında kayma dalgası hızı (V_s) ölçümüne yönelik arazi deneyleri ya da bender eleman deneyleri gibi deneyler ile doğrudan belirlenebilmektedir. Ancak literatürde birçok araştırmacı tarafından önerilmiş ve kabul görmüş olan en büyük kayma modülünün (G_o) tahmini için sıklıkla kullanılan ampirik ilişkilerde mevcuttur [21 – 29]. En büyük kayma modülünün (G_o) bazı zemin özelliklerine, çevre koşullarına ve yükleme özellikleri ile ilişkisi Tablo 3.2 ile verilmiştir [5]. Arazi zeminleri için geliştirilen ampirik ilişkiler çoklukla standart penetrasyon testi (SPT), koni penetrasyon testi (CPT), dilatometre testi (DMT), presyometre testi (PMT) gibi arazi test ve deneylerine dayanmaktadır (Tablo 3.3) [21 – 29]. Laboratuvar ortamında oluşturulan numunelerden elde edilen ölçüm ve gözlem sonuçlarından boşluk oranı (e) ve plastisite indisi (PI) gibi zemin parametrelerine dayanan ampirik ilişkiler geliştirilmiştir (Tablo 3.4).

Tablo 3.2. En büyük kayma modülünün (G_o) bazı zemin özelliklerine, çevre koşullarına ve yükleme özellikleri ile ilişkisi [5].

Factör (artımı)	G_o
Çevre basıncı	Çevre basıncı ile artar
Boşluk oranı	Azalı
Jeolojik yaş	Artar
Çimentolanma	Artar
Önyüklem basıncı (OCR)	Artar
Plastisite indisi	OCR=1 için sabit kalır OCR>1 için artar
Devirsel kayma deformasyonu	Non-plastik zeminler için etkisizdir
Yüklem çevrim sayısı	Azalı

Tablo 3.3. En büyük kayma modülü için arazi deneylerine dayalı önerilen ilişki örnekleri [21 – 29].

Saha Testi	İlişki	Zemin tipi	Kaynak	Açıklama
SPT	$\bar{G}_o = 20000(N_1)_{60}^{0.333}(\sigma'_m)^{0.5}$	Kum	Ohta ve Goto (1976)	G_o ve σ'_m lb/ft ²
	$G_o = 325N_{60}^{0.68}$	Kum	Seed ve ark. (1986)	G_o kips/ft ²
CPT	$G_o = 1634(q_c)^{0.250}(\sigma'_v)^{0.375}$	Kuartz kumu	Imai ve Tonouchi (1982)	G_o, q_c, σ'_v : kPa
	Grafiksel ilişki	Silika kumu	Rix ve Stokoe (1991)	İtalyadaki arazi deneylerine ve kalibrasyon chamber testlerine dayanmaktadır.
DMT	$G_o = 406(q_c)^{0.695}e^{-1.130}$	Kil	Baldi ve ark. (1986)	G_o, q_c, σ'_v : kPa İtalyadaki arazi deneylerine dayanmaktadır.
	$G_o/E_d = 2.72 \mp 0.59$	Kum	Mayne ve Rix (1993)	G_o, q_c, σ'_v : kPa Dünya genelinde arazi deneylerine dayanmaktadır.
	$G_o/E_d = 2.72 \mp 0.7$	Kum	Baldi ve ark. (1986)	Kalibrasyon chamber testlerine dayanmaktadır.
	$G_o = \frac{530}{(\sigma'_v/p_a)^{0.25}} \frac{\gamma_D/\gamma_w - 1}{2.7 - \gamma_D/\gamma_w} K_o^{0.25} (p_a \sigma'_v)^{0.5}$	Kum, silt, kil	Belloti ve ark. (1986)	Arazi deneylerine dayanmaktadır
PMT	$3.6 \leq \frac{G_o}{G_{ur,c}} \leq 4.8$	Kum	Hryciw (1990)	$G_o; P_a; \sigma'_v$ aynı birim γ_d : Dilometre deneylerindeki zeminin birim hacim ağırlığı
	$G_o = \frac{1.68}{\alpha_p} G_{ur}$	Kum	Belloti ve ark. (1986)	$G_{ur,c}$ devrinsel PMT deneyindeki yüklem-boşaltma için düzeltilmiş değer
			Byrne ve ark. (1991)	G_{ur} : PMT deneyinde yüklem-boşaltma için modül değeri; α_p : yüklem-boşaltma gerilme koşullarına bağlı faktör katsayısı; Arazi ve teorik ilişki ve arazi deneylerine bağlıdır.

Tablo 3.4. En büyük kayma modülü için boşluk oranı (e) ve plastisite indisine (PI) dayalı önerilen ilişki örnekleri [30].

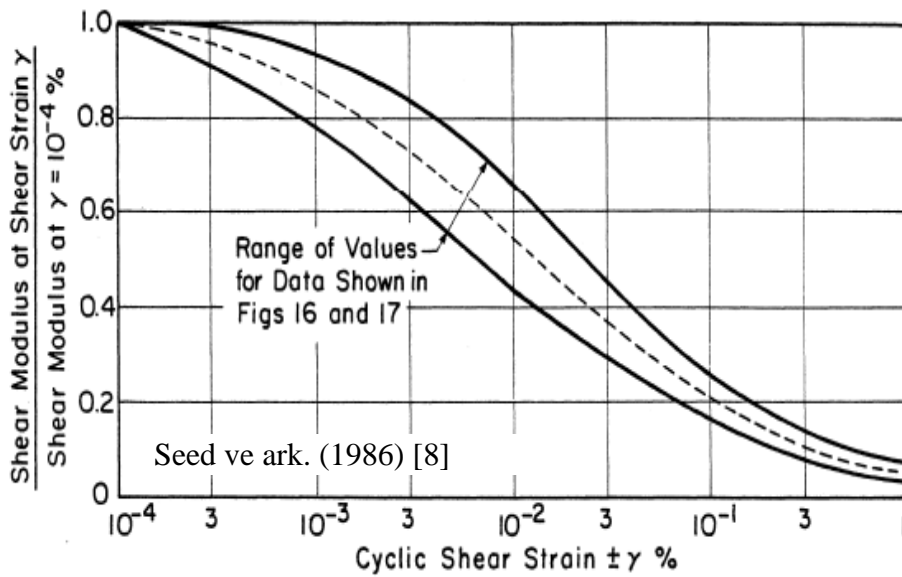
Kaynak	A	F(e)	n	Zemin Materyali	Test Metodu
Hardin - Richart (1963)	7000	$(2.17-e)^2/(1+e)$	0.5	Yuvarlak daneli Ottawa kumu	Resonant kolon deneyi
Shibata-Soelamo (1975)	3300	$(2.97-e)^2/(1+e)$	0.5	Köşeli öğütülmüş kuartz kumu	Resonant kolon deneyi
Iwasaki ve ark. (1978)	42000	$(0.67-e)/(1+e)$	0.5	Üç farklı temiz kum	Ultrasonik puls
Kokusho (1980)	9000	$(2.17-e)^2/(1+e)$	0.5	Onbir farklı temiz kum	Resonant kolon deneyi
Yu-Richart (1984)	8400	$(2.17-e)^2/(1+e)$	0.5	Toyoura kumu	Dinamik Üçekslenli deneyi
Hardin-Black (1968)	7000	$(2.17-e)^2/(1+e)$	0.5	Üç farklı temiz kum	Resonant kolon deneyi
Marcuson-Wahls (1972)	3300	$(2.97-e)^2/(1+e)$	0.5	Kaolin vb.	Resonant kolon deneyi
Zen-Umehara (1978)	4500	$(2.97-e)^2/(1+e)$	0.5	Kaolin, PI=35	Resonant kolon deneyi
Kokusho ve ark. (1982)	450	$(4.4-e)^2/(1+e)$	0.5	Bentonit, PI=%60	Resonant kolon deneyi
	2000~4000	$(2.97-e)^2/(1+e)$	0.5	Yoğrulmuş kil, PI=0~50	Resonant kolon deneyi
	141	$(7.32-e)^2/(1+e)$	0.6	Örselenmemiş kil, PI=40~85	Dinamik Üçekslenli deneyi

σ'_o : kPa; G_o : kPa; PI: Plastisite indisi; $G_o=A.F(e)(\sigma'_o)^n$

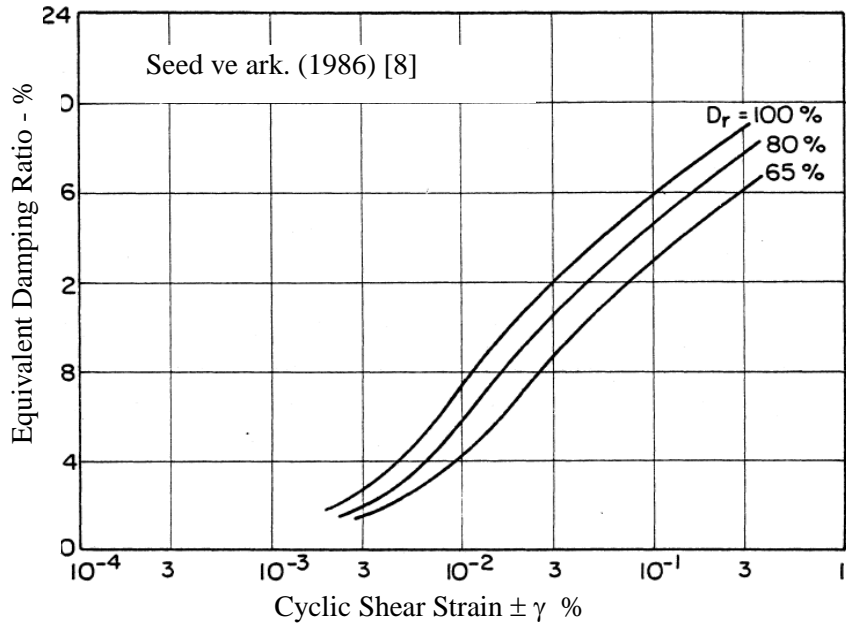
3.2.2. Normalized Kayma Modülü Azalım Eğrilerinin (G/G_0) ve Sönüm Eğrilerinin (D) Geçmiş Çalışmalara Dayanılarak Benzeşim ile Doğrudan Belirlenmesi

Normalized kayma modülü azalım eğrilerinin (G/G_0) ve sönüm eğrilerinin (D) geçmiş çalışmalara dayanılarak benzeşim ile doğrudan ya da enterpolasyon yöntemi ile tahmin edilmesi hem kum ve çakıllı zeminler için hem de kohezyonlu kil ve siltler için sıklıkla başvurulan yöntemlerdendir.

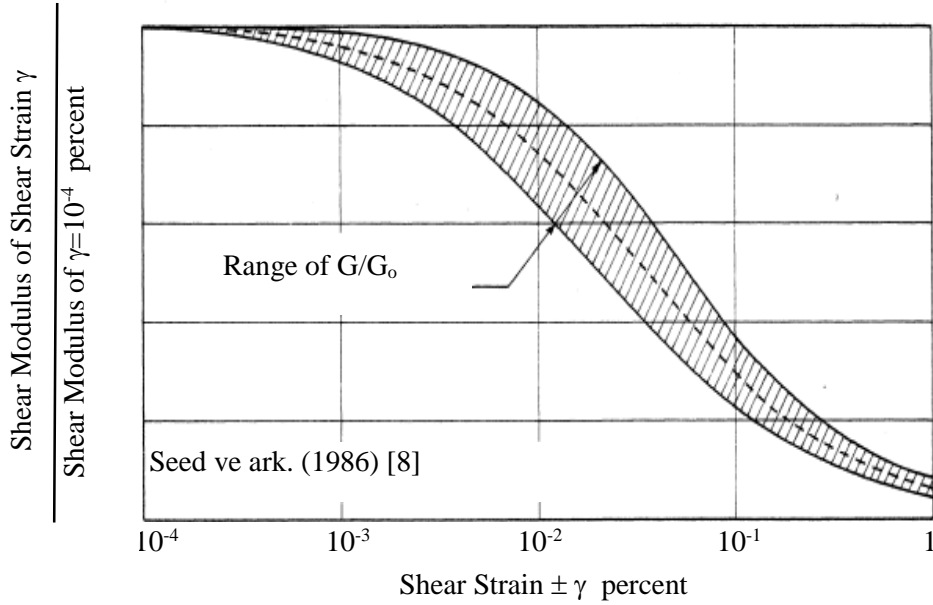
Seed vd. (1986) [8] yaptıkları çalışmada, o tarihe kadar çakıllı ve kumlu zeminler için gerçekleştirilmiş önemli çalışmaların bir kısmı [2, 10, 31 – 39] ile kendi yaptıkları çalışmaları birlikte değerlendirmişlerdir. Seed ve ark. (1986) [8] tarafından yapılan çalışma, çakıllı ve kumlu zeminler için benzeşim ile doğrudan ya da enterpolasyon yapılarak günümüzde de kumlu ve çakıllı zeminlerin kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm eğrilerinin tahmininde başvurulan bir çalışmadır. Seed ve ark. (1986) [8] çalışmasında çakıl içeren zeminler için önerilen normalize kayma modülü azalım eğrileri (G/G_0) ve sönüm eğrileri (D) Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 ile verilmiştir. Seed ve ark. (1986) [8] çalışmasında kumlar için önerilen normalize kayma modülü azalım eğrileri (G/G_0) ve sönüm eğrileri (D) ise sırası ile Şekil 3.9 ve Şekil 10 – Şekil 11 ile verilmiştir.



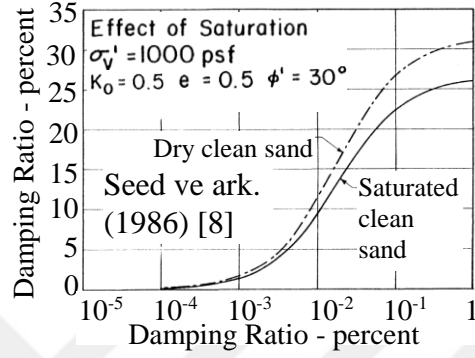
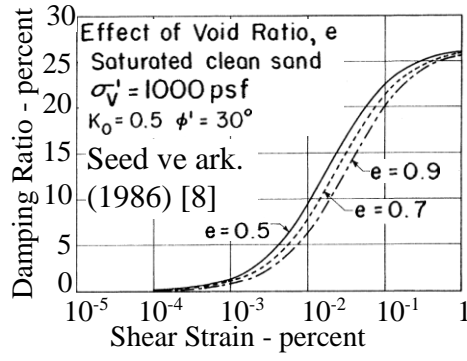
Şekil 3.7. Çakıllar için G/G_0 eğrisinin değişimi [8].



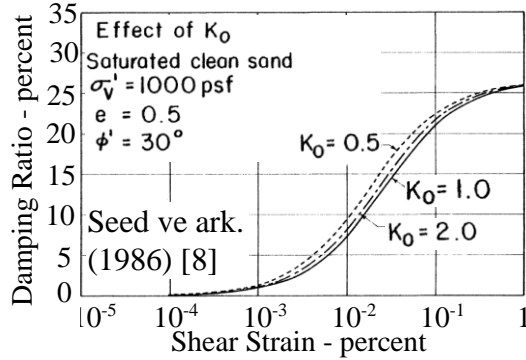
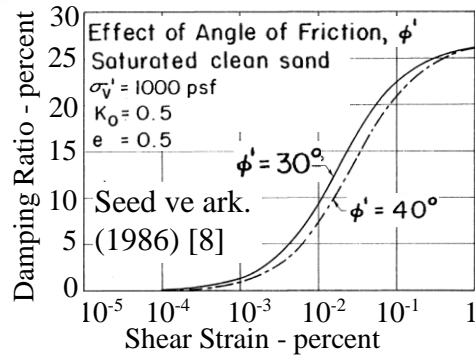
Şekil 3.8. Çakıllar için sönüm (D) eğrisinin pozisyonu ve değişimi [8].



Şekil 3.9. Kumlar için normalize kayma modülü azalım eğrilerinin (G/G_0) pozisyonları ve değişim aralığı [8].

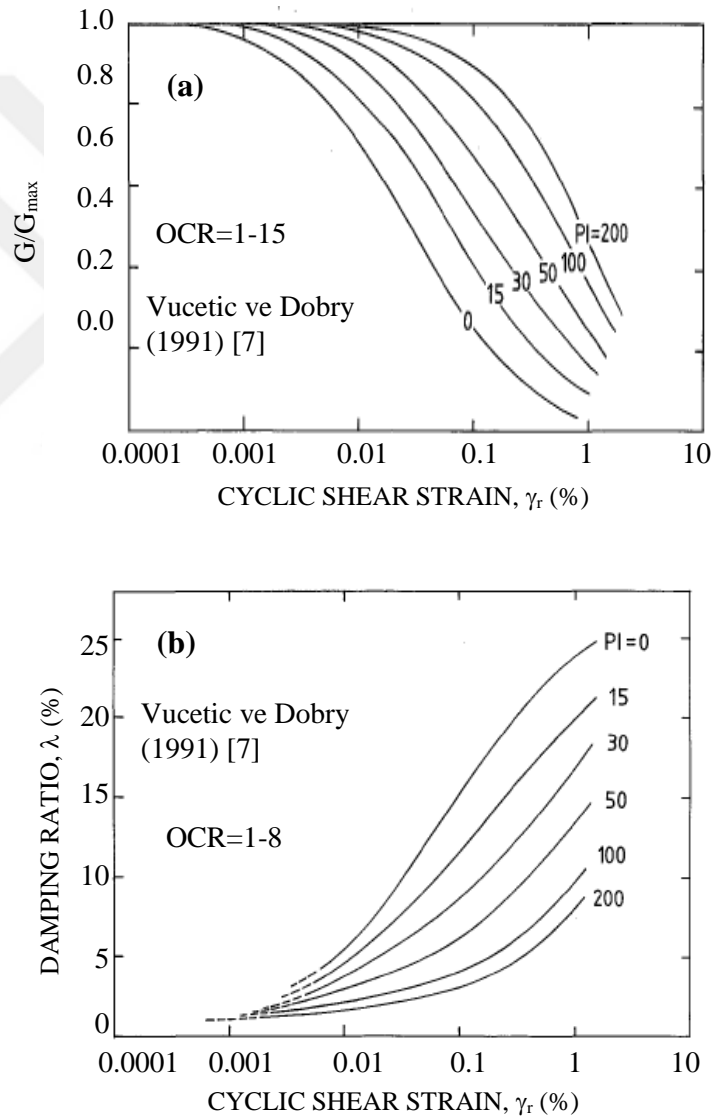


Şekil 3.10. Kumlar için sönüm eğrilerinin (D) boşluk oranı ve doygunluk durumuna göre değişimi [8].



Şekil 3.11. Kumlar için sönüm eğrilerinin (D) içsel sürtünme açısı ve geostatik yanal zemin basıncı katsayısına göre değişimi [8].

Kumlu zeminlerde olduğu gibi kohezyonlu zeminler içinde literatürde doğrudan ya da benzeşim yaparak kayma modülü azalım eğrilerinin tahmin edilmesi için önerilmiş çalışmalar mevcuttur [3 – 6, 12, 18]. Kohezyonlu zeminlerin normalize kayma dayanımı azalım eğrilerinin ve sönüm eğrilerinin tahmini için en çok başvurulan çalışmalardan biri de Vucetic ve Dobry (1991) [7] dir. Vucetic ve Dobry (1991) [7]'nin yaptığı çalışmada ince malzemelerin kayma modülü azalım eğrisi ve sönüm eğrilerinin plastisite indisine (PI) bağlı olarak değişimi Şekil 3. 12 ile verilmiştir.



Şekil 3.12. İnce malzemeli zeminlerin plastisite indisine bağlı olarak (a) G/G_0 ve (b) D eğrilerinin değişimi [7].

3.2.3. Normalized Kayma Modülü Azalım Eğrilerinin (G/G_o) ve Sönüm Eğrilerinin (D) Geçmiş Çalışmalara Dayanılarak Ampirik İlişki ve Korelasyonlar ile Belirlenmesi

Geoteknik mühendisliğinde bilhassa 1980 öncesi çalışmalarda ve kısmen günümüzde de geçerliliğini koruyan bir yaklaşım mevcuttur. Bu yaklaşımda iri ve kaba daneli zeminler için kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrileri ayrıştırılarak ele alınmaktadır. 1980'li yıllardan sonra yapılan çalışmalar ile kayma modülü azalım eğrileri (G/G_o) ve sönüm eğrilerinin (D) kaba daneli zeminlerden ince daneli zeminler arasında kademeli bir geçişe sahip olduğu ve süreklilik arz ettiği gösterilmiştir [3, 4, 6, 40 – 42]. Kohezyonsuz iri (kaba) daneli zeminler ile kohezyonlu ince daneli zeminler arasında G/G_o ve D eğrilerinin kademeli bir geçişe ve sürekliliğe sahip olmasına dayalı olarak kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm oranı eğrilerinin tahmini için ampirik bazı yöntemler önerilmiştir [6, 16, 17, 43 – 45]. Kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm eğrilerinin tahmini için çokça başvurulan Zhang vd., 2005 [45] çalışmasında zeminlerin kayma modülü azalım eğrilerin tahmini için denklem 3.2 ile verilen hiperbolik model tercih edilmiştir. Yöntemde hiperbolik modelde yer alan referans kayma deformasyonunun (γ_r) tahmini zeminlerin jeolojik geçmişi ve oluşumu göz önüne alınarak yapılmaktadır. Referans kayma deformasyonunun (γ_r) tahmini için ihtiyaç duyulan katsayılar (γ_{r1} , α , k , a , b ...) ve değerler (denklem 3 – 7); gerilme koşullarına (σ'_m), zeminlerin plastisite indisine (PI) ve jeolojik özelliklerine bağlı olarak belirlenebilmektedir. Benzer şekilde sönüm oranı (D) eğrisi de zeminlerin jeolojik özellikleri, gerilme koşulları ve plastisite indisi (PI) göz önüne alınarak tahmin edilebilmektedir. Söz konusu yöntem için ihtiyaç duyulan katsayılar ve belirlenme prosedürü Zhang vd., 2005 [45] detaylı olarak verilmiştir.

$$\frac{G}{G_o} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^\alpha\right]} \quad (3.2)$$

$$\gamma_r = \gamma_{r1} \left(\frac{\sigma'_m}{P_a}\right)^k \quad (3.3)$$

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3} \quad (3.4)$$

$$D - D_{min} = f\left(\frac{G}{G_o}\right) = 10.6 \left(\frac{G}{G_o}\right)^2 - 31.6 \left(\frac{G}{G_o}\right) + 21 \quad (3.5)$$

$$D_{min} = D_{min1} \left(\frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^{\frac{-k}{z}} \quad (3.6)$$

$$D_{min1} = a(PI) + b \quad (3.7)$$

Benzer şekilde Darendeli (2001) [16] yaptığı detaylı çalışmasında bol miktarda deneysel veri kullandığını ifade etmekte ve kullandığı verilere ait zemin özelliklerini vermektedir. Darendeli (2001) [16] yaptığı istatistiksel çalışmasında ve önerdiği ilişkilerle zeminlerin kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm oranı eğrilerin tahmini, zeminlerin plastisite indisine (PI), boşluk oranı, çevre basıncı, ön yükleme basıncı oranı, yükleme frekansı, devirsel yüklemdeki çevrim sayısı parametrelerine bağlı olarak yapılmaktadır. Darendeli (2001) [16] yönteminde kayma modülü azalım eğrilerinin tahmini için hiperbolik denklem modeli esas alınmıştır. Normalize kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm eğrilerinin tahmini için önerilen hiperbolik denklem modeli ve denklem katsayıları aşağıdaki denklem 3.8 – 3.13 bağıntılarında verilmiştir. Bağıntılardaki katsayıların tahmini ve hesap prosedürü Darendeli (2001) [16]'de detaylı olarak açıklanmaktadır.

$$\frac{G}{G_o} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^a} \quad (3.8)$$

$$\gamma_r = (\phi_1 + \phi_2 x PI x OCR^{\phi_3}) x \sigma_o'^{\phi_4} \quad (3.9)$$

$$a = \phi_5 \quad (3.10)$$

$$D_{Adjusted} = b x \left(\frac{G}{G_o} \right)^{0.1} x D_{Masing} + D_{min} \quad (3.11)$$

$$D_{min} = (\phi_6 + \phi_7 x PI x OCR^{\phi_5}) x \sigma_o'^{\phi_9} x [1 + \phi_7 x \ln(frq)] \quad (3.12)$$

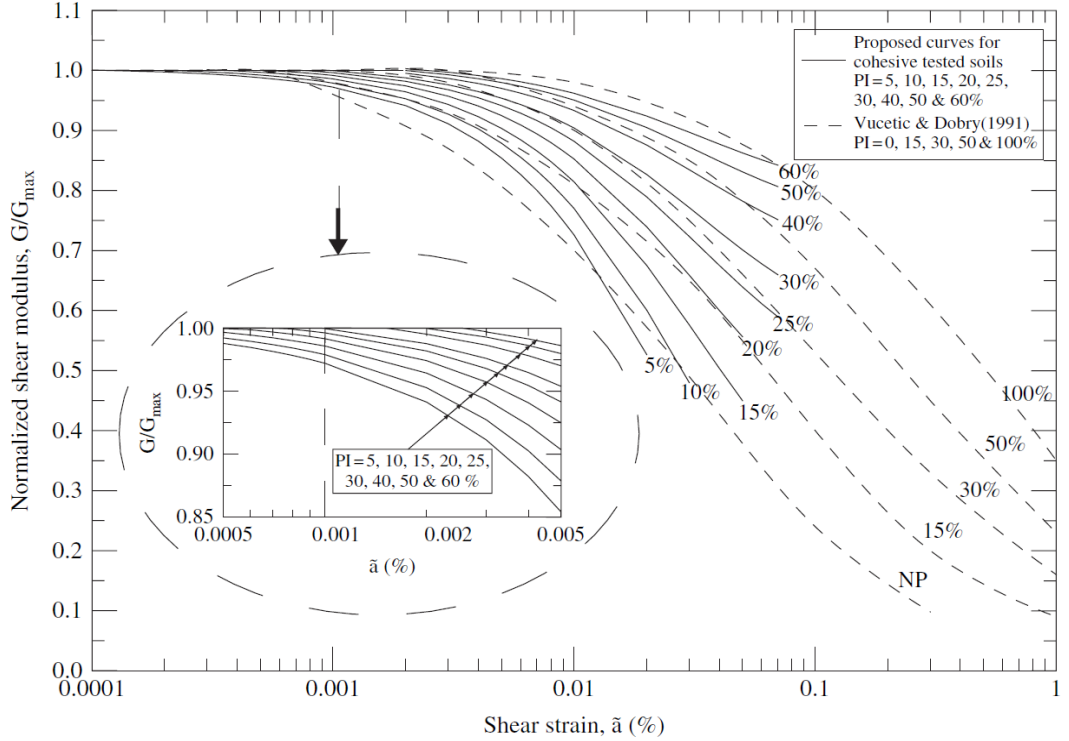
$$b = \phi_{11} + \phi_{12} x \ln(N) \quad (3.13)$$

Öztoprak ve Bolton, (2013) [40] yaptıkları çalışmada kumlu zeminlerin normalize kayma modülü eğrilerinin tahmini için denklem 3.14 ile verilen hiperbolik denklem modelini kullanmışlardır. Geçmiş çalışmalardan derledikleri veriler üzerinde

gerçekleştirdikleri kapsamlı istatistiksel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Öztoprak ve Bolton, (2013) [40] tarafından önerilen yöntemde temel olarak zeminlerin boşluk oranı ve gerilme koşullarına ($\sigma'_m = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$) bağlı olarak kayma modülü azalım eğrisi tahmin edilebilmektedir.

$$\left(\frac{G}{G_o}\right) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma - \gamma_e}{\gamma_r}\right)^a\right]} \quad (3.14)$$

Kallioglu ve ark. (2008) [18] yaptıkları çalışmada laboratuvar ortamında oluşturulan yapay numuneler ile araziden alınmış örselenmemiş kil numuneler üzerinde rezonant kolon deneyi gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmaları küçük, orta (degradation) ve yüksek deformasyon seviyeleri için ele alınarak azalım eğrileri titizlikle belirlenmiştir. Çalışma sonucunda killi zeminler için zemin özelliklerine ve gerilme koşullarına bağlı ilişkiler ve aşağıda Şekil 3.13 ile verilen plastisite indisine bağlı normalize kayma modülü azalım eğrileri önermişlerdir.



Şekil 3.13. Kallioglou ve ark. (2008) [18] tarafından kohezyonlu zeminler için plastisite indisine bağlı olarak önerilen normalize kayma modülü azalım eğrileri.

4. METOT

Geoteknik mühendisliğinde farklı zemin türleri için önerilmiş ve literatürde yer almış kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrileri uzun süredir ve hala günümüzde dinamik zemin tepki analizleri için kullanılmaktadır. Literatürde yaygın olarak kullanılan kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrileri sınırlı sayıda olup Sun ve ark. (1988) [6], Vucetic ve Dobry (1991) [7], Seed ve ark. (1984) [8], Iwasake ve ark. (1978) [12], Darendeli (2001) [16], Kallioglou ve ark. (2008) [18], Öztoprak ve Bolton, (2013) [40], Zhang ve ark. (2005) [45], Rollins ve ark. (1998) [46] gibi sınırlı sayıda araştırmacı tarafından sunulmuş eğrilerdir.

Yukarıda bahsedilmiş olan literatür çalışmalarında, kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrileri genelde kohezyonsuz (kum, çakıl vb.) ve kohezyonlu zeminler için ayrı ayrı önerilmektedir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi kohezyonsuz kum ve çakıl gibi iri daneli zeminler için boşluk oranı (e), rölatif sıklık (D_r), çevre basıncı ya da ortalama efektif gerilme koşullarına bağlı olarak önerilmektedir. Kohezyonlu zeminler için ise daha çok zeminlerin plastisite indisine bağlı olarak önerilmektedir.

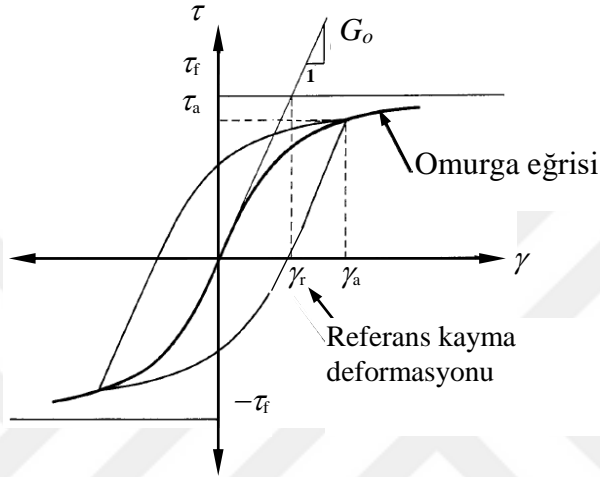
Kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrilerinin pozisyonu ve konumu üzerinde etkisinin nispeten düşük olduğu kabul edilen ön yükleme basıncı oranı, devirsel yükleme sayısı, yükleme frekansı, dane çapı dağılım özellikleri gibi faktörleri de dikkate alan ve eğrilerin tahmininde referans alan çalışmalarda mevcuttur [3, 16, 18].

Normalize kayma modülü azalım eğrileri gibi zemin malzeme modelleri için sıklıkla iki matematiksel model tercih edilmektedir [1]. Tercih edilen matematiksel modellerden ilki iki parametre ile temsil edilen *hiperbolik - üstel modeldir*. Diğeri ise dört parametre ile temsil edilen *Ramberg – Osgood modelidir*.

4.1.Hiperbolik – Üstel Model

Zeminlerdeki gerilme – deformasyon eğrileri Şekil 4.1’de görüldüğü gibi iki doğru ile sınırlandırılmaktadır, doğrulardan ilki elastik modülü (G_o) temsil eden küçük

deformasyon seviyelerindeki kayma gerilmesi – kayma deformasyonu tanjant doğrusu diğeri ise eğrinin yatay olan kayma dayanım (τ_f) doğrusudur. Büyük kayma deformasyonu seviyelerinde kayma gerilmesi – deformasyon eğrisi (omurga eğrisi) kayma dayanım doğrusuna asimtotlaşmaktadır. Bu iki doğru ile sınırlandırılan gerilme deformasyon eğrisi diferansiyel olarak aşağıdaki denklem 4.1’de olduğu gibi ifade edilebilir.



Şekil 4.1. Zeminlerin kayma deformasyonu – kayma gerilmesi eğrisi.

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = G_o \left(1 - \frac{\tau}{\tau_f}\right)^n \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de n keyfi bir sayıdır. Denklem $\tau = 0$ için küçük kayma gerilmesi ve deformasyon seviyeleri için kayma modülü tanjantı G_o değerine eşit olur. Kayma gerilmesi arttıkça kayma modülü tanjant değeri giderek azalır ve $\tau = \tau_f$ için sıfıra eşit olur. Denklem 4.1 n=1 durumu hariç olmak üzere denklem 4.2’de verildiği gibi $\gamma = 0$, $\tau = 0$ sınır koşulu için integrali alınabilir.

$$\gamma = \frac{\gamma_r}{n-1} \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{\tau}{\tau_f}\right)^{n-1}} - 1 \right] \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de ki γ_r daha önceki bölümlerde tanımlanmış olup (Şekil 2.4) referans kayma deformasyonu olarak tarif edilir. *Hiperbolik modelde* kayma gerilmesi – kayma deformasyon eğrisi $n=2$ için denklem 4.2 ile aşağıda denklem 4.3 ile verildiği gibi elde edilebilir. Denklem 4.3’te verilen kayma gerilmesi – kayma deformasyonu ilişkisi Kondner ve Zelasko (1963) [47], Duncan ve Chang (1970) [48] gibi araştırmacılardan bu yana uzun süredir kullanılan bir hiperbolik denklem modelidir. Denklem 4.3 yardımı ile sekant kayma modülü (G/G_o – normalize kayma modülü) denklem 4.4 ve 4.5 de verildiği gibi ifade edilir. Denklem 4.4 denkleminde $\gamma_a=\gamma_r$ için $G/G_o = 0.5$ olmakta diğer bir deyiş ile γ_r ’ye karşılık gelen kayma modülü değeri en büyük kayma modülü (G_o) değerinin yarısı olmaktadır.

$$\tau = \frac{G_o \gamma}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (4.3)$$

$$\frac{G}{G_o} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma_a}{\gamma_r}} \quad (4.4)$$

$$G = \frac{\tau_a}{\gamma_a} \quad (4.5)$$

Kullanılan bir diğer model ise denklem 4.1’in $n=1$ için çözümünden elde edilen ve denklem 4.6 ve denklem 4.7 ile verilen *üstel modeldir*.

$$\tau = \tau_f \left(1 - e^{-\frac{\gamma}{\gamma_r}} \right) \quad (4.6)$$

$$\frac{G}{G_o} = \frac{\gamma_r}{\gamma_a} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_a}{\gamma_r}} \right) \quad (4.7)$$

Belirli bir deformasyon seviyesindeki devirsel bir yükleme için sönüm oranı tanımı ve gösterimi Şekil 2.7 ile verilmiş olup sayısal karşılığı denklem 4.8’de verildiği

gibi ifade edilmiştir. Denklemdaki "W" depolanan maksimum enerjiyi göstermektedir. Doğrusal olmayan davranışlar için depolanan enerji farklı şekillerde tarif edilebilmekle birlikte genellikle Şekil 2.7 ile verilen üçgenin alanı (▭ ile gösterilen alan) olarak tanımlanmaktadır. Bu tanım ile belirli bir kayma deformasyon amplitüt (γ_a) seviyesi için sistemde depolanan enerji (W) denklem 4.9 ile ifade edilmektedir.

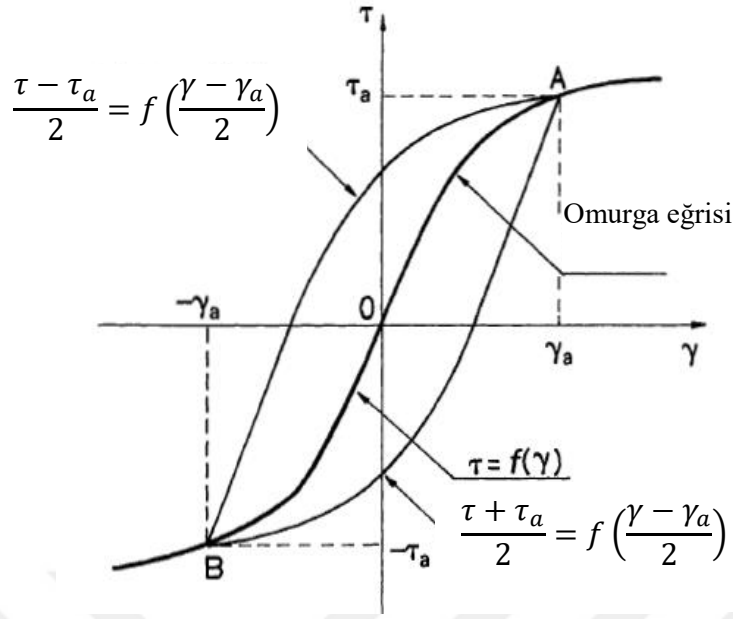
$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (4.8)$$

$$W = \frac{1}{2} \gamma_a f(\gamma_a) \quad (4.9)$$


Masing kuralına göre aşağıda denklem 4.10 ve denklem 4.11 ile tanımlanan ve Şekil 4.2'de gösterilen histerisis loopun üst eğrisi (BEA), bir looptaki (çevrimdeki, döngüdeki) omurga eğri (skeleton curve) parçasının (BOA) üst yarısının (OCA eğrisi) iki katına uzatılması (genişletilmesi – stretch edilmesi) ile elde edilir. Histerisis loopun üst kısmı için omurga eğrisinden türetilen bu eğrinin A noktası yine A noktasına tekabül edecek şekilde eksen takımına konumlandırılır. Benzer şekilde histerisis loopun alt eğri parçası ise bir looptaki omurga eğri (skeleton curve) parçasının (BOA) alt yarısının (BO eğrisi) iki katına uzatılması (genişletilmesi – stretching) ile elde edilir. Histerisis loopun alt kısmı için omurga eğrisinden türetilen bu eğrinin B noktası yine B noktasına tekabül edecek şekilde eksen takımına konumlandırılır. Histerisis loopu alt ve üst kısımları için omurga eğrisinden türetilen bu eğriler geometrik olarak omurga eğrisine benzer ancak iki katıdır. Histerisis loopun anlatılan şekilde türetilmesinin matematiksel tanımı ve karşılığı loopun üst kısmı ve alt kısmı için sırasıyla denklem 4.10 ve denklem 4.11'da verilen ilişkilerdir.

$$\frac{\tau - \tau_a}{2} = f\left(\frac{\gamma - \gamma_a}{2}\right) \quad (4.10)$$

$$\frac{\tau + \tau_a}{2} = f\left(\frac{\gamma - \gamma_a}{2}\right) \quad (4.11)$$



Şekil 4.2. Omurga eğrisinden histerisis loopun türetilmesi.

Devirsel yüklemenin bir devrinde (döngüde) kaybolan enerji "DW" ile ifade edilmekte olup Şekil 2.7'de verilen histerisis loopun içinde kalan alana ( ile gösterilen alana) karşılık gelmektedir. Loopun üst ve alt eğrileri için yukarıda denklem 4.10 ve denklem 4.11 ile verilen ilişkiler dikkate alındığında loopun içinde kalan alan (ΔW : kaybolan enerji) denklem 4.12'de verildiği gibi hesaplanır. Denklem 4.8, denklem 4.9 ve denklem 4.12 bağıntılarının yardımı ile sönüm oranı (D) için denklem 4.13 elde edilir. Denklem 4.13 ile verilen ilişki denklem 4.14 ile gösterilen formda yazılabilir.

$$\Delta W = 8 \left[\int_0^{\gamma_a} f(\gamma) d\gamma - W \right] \quad (4.12)$$

$$D = \frac{2}{\pi} \left[\frac{2 \int_0^{\gamma_a} f(\gamma) d\gamma}{\gamma_a f(\gamma_a)} - 1 \right] \quad (4.13)$$

$$\left(1 + \frac{\pi}{2} D\right) \gamma_a f(\gamma_a) = 2 \int_0^{\gamma_a} f(\gamma) d\gamma \quad (4.14)$$

Yukarıda histerisis loop eğrilerinin türetilme yönteminden dolayı belirli bir deformasyon seviyesi için sönüm oranı (D) omurga eğrisine (denklem 4.1) bağlıdır, Denklem 4.13 için sönüm oranı (D) büyük kayma deformasyon değerleri için sabit bir değer (D_o) olmaktadır. Büyük deformasyon değerlerinde sönüm oranı (D) yerine sabit değer (D_o) konulduğunda denklem 4.14 denklem 4.15'e dönüşür. $\tau=\tau_a$, $\gamma=\gamma_a$ için denklem 4.1 ve denklem 4.2, denklem 4.15'te yerine konduğunda denklem 4.16 elde edilir. Tanım gereği $f(\tau_a)=\tau_a$ ve $f'(\gamma_a)=d\tau/d\gamma$ dir. Çok büyük kayma deformasyonları için $\tau_a=\tau_f$ olur (Şekil 2.3). $\tau_a=\tau_f$ denklem 4.16'da yerine konulduğunda denklem 4.17'de ki gibi $D_o=2/\pi = 0.637$ olur.

$$\left(1 - \frac{\pi}{2}D_o\right) f(\gamma_a) = \left(1 + \frac{\pi}{2}D_o\right) \gamma_a f'(\gamma_a) \quad (4.15)$$

$$1 - \frac{\pi}{2}D_o = \frac{\gamma_r}{n-1} \frac{G_o}{\tau_o} \left(1 + \frac{\pi}{2}D_o\right) \left[\left(1 - \frac{\tau_a}{\tau_f}\right) - \left(1 - \frac{\tau_a}{\tau_f}\right)^n \right] \quad (4.16)$$

$$D_o = \frac{2}{\pi} = 0.637 \quad (4.17)$$

Hiperbolik model için sönüm oranı denklemi (denklem 4.18), omurga eğrisine (denklem 4.3) masing kuralı uygulanarak elde edilebilir. Denklem 4.18 G/G_o için tekrar düzenlendiğinde denklem 4.19 elde edilir.

$$D = \frac{4}{\pi} \left[1 + \frac{1}{\gamma_a/\gamma_r} \right] \left[1 - \frac{\ln(1 + \gamma_a/\gamma_r)}{\gamma_a/\gamma_r} \right] - \frac{2}{\pi} \quad (4.18)$$

$$D = \frac{4}{\pi} \frac{1}{1 - G/G_o} \left[1 + \frac{G/G_o}{1 - G/G_o} \ln\left(\frac{G}{G_o}\right) \right] - \frac{2}{\pi} \quad (4.19)$$

Hyperbolik – üstel modeldeki sönüm ve normalize kayma modülü azalım eğrileri incelendiğinde; G/G_o ve D eğrilerin karakteristiği (formu) genel olarak (γ_r) ile kontrol edildiği görülebilir. Hiperbolik – üstel modelde zemini temsil edecek G/G_o ve D eğrileri çoğu zaman γ_r 'nin tahmini ile yapılabilmektedir.

4.2. Ramberg – Osgood Model (R – O Model)

İleri modellemeler için kayma deformasyonu kayma gerilmesinin bir fonksiyonu olarak denklem 4.20’de ki gibi tanımlanabilir. Bu tanım hiperbolik – üstel modeldeki yaklaşımın tersidir (hiperbolik – üstel modelde: $\tau=f(\gamma)$ dır). Denklem 4.20’deki tanım ve hiperbolik – üstel modeldeki yaklaşımlar O – R model için de tatbik edildiğinde kayma modülü (G) ve sönüm oranı (D) sırası ile denklem 4.21 ve denklem 4.22’de verilen ifadelere ulaşılır.

$$\gamma = g(\tau) \quad (4.20)$$

$$G = \frac{\tau_a}{\gamma_a} = \frac{\tau_a}{g(\tau_a)} \quad (4.21)$$

$$D = \frac{2}{\pi} \left[1 - \frac{2 \int_0^{\tau_a} g(\tau) d\tau}{\tau_a g(\tau_a)} \right] \quad (4.22)$$

Ramberg – Osgood modelde omurga eğrisi için kayma gerilmesi – kayma deformasyon ilişkisi denklem 4.23 ile verildiği gibi tarif edilir. Denklemde α ve r sabit katsayılar olup, τ_y ve γ_y sırasıyla uygun olarak seçilmiş kayma gerilmesi ve kayma deformasyonudur. R – O modeldeki denklemin dört parametre içermesi eğrinin deneysel verilere daha iyi uydurulmasını ve temsil etmesine imkân tanır. Idris ve ark. (1978) [49] ve Hara (1980) [50] gibi araştırmacılar tarafından çoklukla τ_y ve γ_y için sırasıyla τ_f ve γ_f seçilmesi tavsiye edilir. Denklem 4.23’te τ_y ve γ_y için yerine τ_f ve γ_f konulduğunda ve tekrar düzenlendiğinde denklem 4.24 elde edilir. Devirsel yükleme durumunda denklem 4.24’te $\tau=\tau_a$, $\gamma=\gamma_a$ konularak ve $\tau_a=G\gamma_a$ ($G=\tau_a/\gamma_a$) ilişkisi de kullanılarak sekant modülü (normalize kayma modülü) kayma deformasyonuna bağlı olarak denklem 4.25 yazılabilir.

$$\frac{\gamma}{\gamma_y} = \frac{\tau}{\tau_y} \left[1 + \alpha \left| \frac{\tau}{\tau_y} \right|^{r-1} \right] \quad (4.23)$$

$$\tau = \frac{G_o \gamma}{1 + \alpha \left| \frac{\tau}{\tau_y} \right|^{r-1}} \quad (4.24)$$

$$\frac{G}{G_o} = \frac{1}{1 + \alpha \left| \frac{G}{G_o} \frac{\gamma_a}{\gamma_r} \right|^{r-1}} \quad (4.25)$$

Denklem 4.24, omurga eğrisini tanımlayan denklem 4.20'ün bir formudur. Bu ilişki ve denklem 4.22 kullanılarak hiperbolik – üstel modelde takip edilen adımlar da tatbik edilerek R – O model için denklem 4.26 ile verilen sönüm oranı ilişkisi elde edilebilir.

$$D = \frac{2r - 1}{\pi r + 1} \alpha \frac{\left| \frac{G}{G_o} \frac{\gamma_a}{\gamma_r} \right|^{r-1}}{1 + \alpha \left| \frac{G}{G_o} \frac{\gamma_a}{\gamma_r} \right|^{r-1}} \quad (4.26)$$

Denklemlerdeki a parametresinin belirlenmesi için Hara (1980) [50] denklem 4.24, göçme durumundaki sınır koşulunu belirten $\tau=\tau_f$ ve $\gamma=\gamma_f$ değerleri ve Şekil 2.4 ile tarif edilen γ_r tanımı ($G_o=\tau_f/\gamma_r$) kullanılarak α için denklem 4.27 ilişkisi elde edilir. Benzer şekilde sönüm oranı ilişkisinde γ_a/γ_r elimine edilmesi için gereken adımlar tatbik edildiğinde sönüm oranı için denklem 4.28 elde edilir. $G_f=\tau_f/\gamma_f$ tanımı yardımı ile ve temel olarak sönüm ilişkileri kullanılarak r parametresi için denklem 4.29 ilişkisi elde edilebilir.

$$\alpha = \frac{\gamma_f}{\gamma_r} - 1 \quad (4.27)$$

$$D = \frac{2r - 1}{\pi r + 1} \left(1 - \frac{G}{G_o} \right) \quad (4.28)$$

$$r = \frac{1 + \frac{\pi D_o}{2} \frac{1}{1 - \frac{G_f}{G_o}}}{1 - \frac{\pi D_o}{2} \frac{1}{1 - \frac{G_f}{G_o}}} \quad (4.29)$$

Ramberg – Osgood modelinde sönüm ve normalize kayma modülü eğrilerinin formunun daha iyi kontrol edilebilmesi amacı ile birden fazla parametre mevcut olmakla birlikte eğrilerin tahmini esas olarak γ_r 'nin belirlenmesine indirgenebilmektedir.

5. MATERYAL

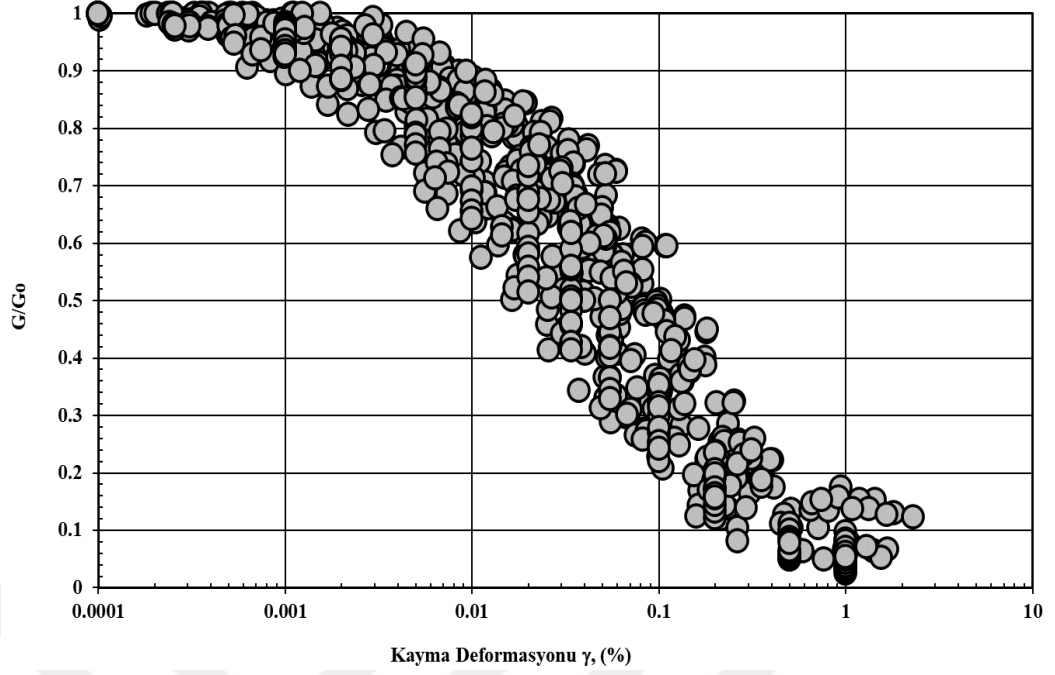
Bu çalışmada geçmiş çalışmalardan yararlanılarak, zemin özelliklerine bağlı olarak kayma modülü azalım eğrisi ve sönüm oranı eğrisi tahmin ve önerileri yapılmıştır. Geçmişte kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm oranı eğrilerinin belirlenmesi için yapılan deneysel çalışma ve sonuçları, bu çalışmanın materyalini teşkil etmektedir.

Sönüm eğrileri ve kayma modülü azalım eğrileri ya da normalize kayma modülü azalım eğrilerinin deneysel olarak belirlenmesi için yürütülen çalışmalar çoğu zaman belirli bir zemin için yapılmaktadır. Literatürde yer almış ve bu çalışmada kaynak olarak kullanılmış olan çalışmalar aşağıda Tablo 5.1 ile listelenmiştir.

Tablo 5.1 Bu çalışmada yararlanılan geçmiş çalışmalar.

SN	Çalışma	SN	Çalışma	SN	Çalışma			
1	Ishihara (1996)	[1]	23	Delfosse-Ribay ve ark. (2004)	[56]	45	Lo Presti ve ark. (1993)	[78]
2	Zen ve ark. (1978)	[3]	24	Dong ve ark. (1994)	[57]	46	Lodde (1982)	[79]
3	Kokusha ve ark. (1980)	[4]	25	Donovan (1969)	[58]	47	Matsushita ve ark. (1967)	[80]
4	Vucetic ve Dobry (1991)	[7]	26	Drnevich ve ark. (1966)	[59]	48	Nishigaki (1971)	[81]
5	Seed ve ark. (1984)	[8]	27	Ellis ve ark. (2000)	[60]	49	Ohsaki (1980)	[82]
6	Katayama ve ark. (1986)	[9]	28	ERTEC (1981)	[61]	50	Ohsaki ve ark. (1978)	[83]
7	Kokusho (1980)	[10]	29	Fioravante ve ark. (1994)	[62]	51	Porovic ve Jardine (1994)	[84]
8	Iwasaki ve ark. (1978)	[12]	30	Goto ve ark. (1992)	[63]	52	Ray ve Woods (1988)	[85]
9	Stokoe ve Lodde (1978)	[13]	31	Hara ve Kiyota, (1977)	[64]	53	Saxena ve Reddy (1989)	[86]
10	Isenhower ve Stoke (1981)	[15]	32	Hardin ve Drnevich (1972a)	[65]	54	Shen ve Gu (1985)	[87]
11	Kallioğlu ve ark. (2008)	[18]	33	Hardin ve Drnevich (1972b)	[66]	55	Silver ve Seed (1969)	[88]
12	Seed ve ark. (1986)	[22]	34	Hardin ve Kalinski (2005)	[67]	56	Stoke ve ark. (1980)	[89]
13	Kokushu (1987)	[30]	35	Hatanaka ve ark. (1988)	[68]	57	Tatsuoka ve ark. (1978)	[90]
14	Hardin (1965)	[34]	36	Idriss ve ark. (1976)	[69]	58	Taylor ve Parton (1973)	[91]
15	Kishida ve Tokano (1970)	[37]	37	Ito ve ark. (1999)	[70]	59	Tokimatsu ve Hosaka (1986)	[92]
16	Zhang ve ark. (2005)	[45]	38	Iwasaki ve ark. (1978)	[71]	60	Tokimatsu ve ark. (1986)	[93]
17	Rollins ve ark. (1998)	[46]	39	Kim ve Novak (1981)	[72]	61	Umehara ve ark. (1982)	[94]
18	Alarcon-Guzman ve ark. (1989)	[51]	40	Koutsoftas ve Fischer (1980)	[73]	62	Vucetic (1994)	[95]
19	Anderson ve Richart (1976)	[52]	41	Lanzo ve ark. (1997)	[74]	63	Wang ve Tsui (2009)	[96]
20	Andreasson (1981)	[53]	42	Li ve ark. (1998)	[75]	64	Yu (1988)	[97]
21	Brennan ve ark. (2005)	[54]	43	Li ve Cai (1999)	[76]	65	Weissman ve Hart (1961)	[98]
22	Chung ve ark. (1984)	[55]	44	Lo Presti ve ark. (1997)	[77]	66	Yokota ve ark. (1980)	[99]

Kohezyonsuz kumlu zeminler için zemin verileri ve normalize kayma modülü azalım bilgileri literatürden açık kaynaklardan değerlendirilmek üzere derlenmiştir. Kohezyonsuz zeminler için derlenen normalize kayma modülü azalım eğrilerine ait veriler Şekil 5.1’de toplu olarak gösterilmektedir.

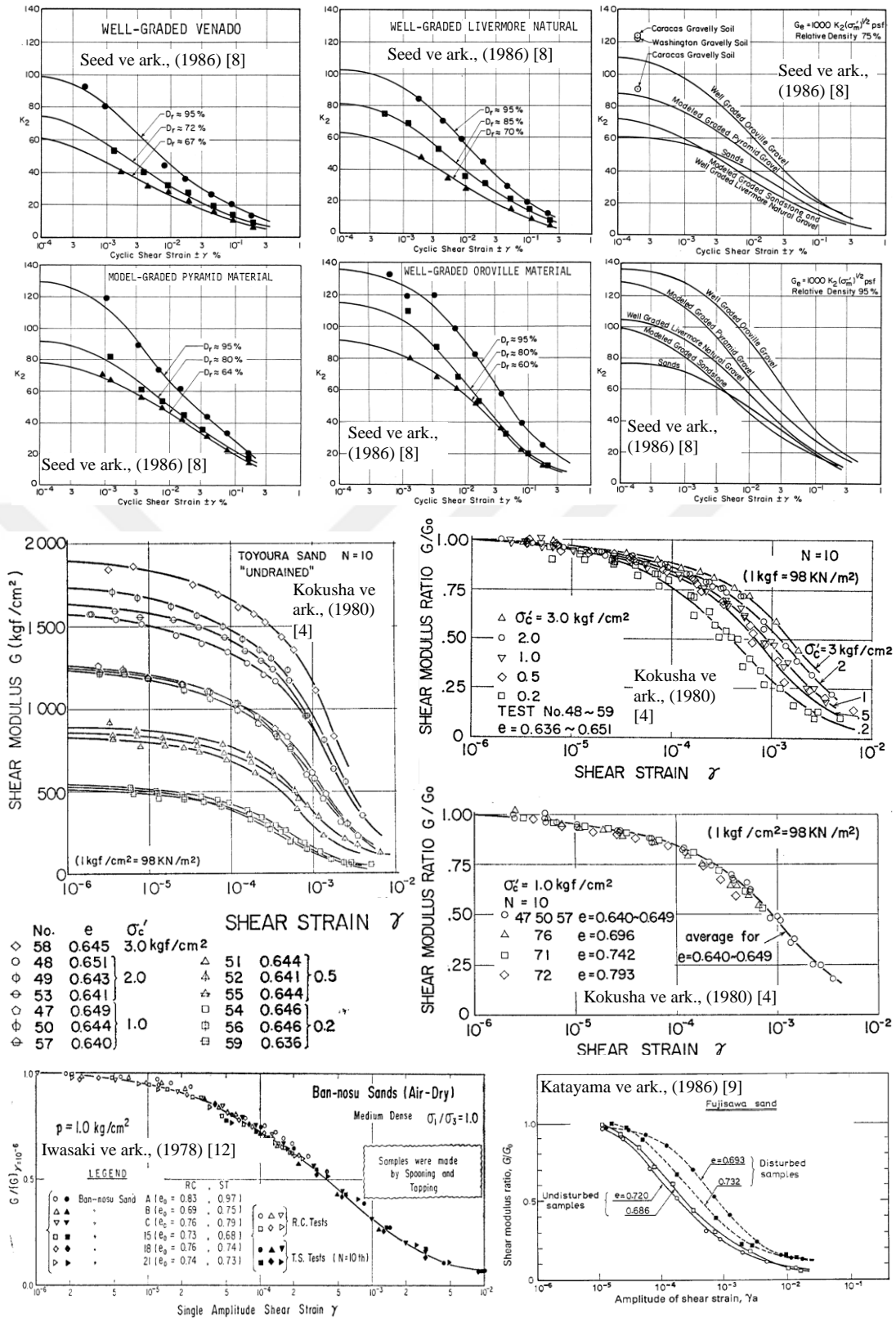


Şekil 5.1. Kumlu zeminler için çalışmada kullanılan ve sayısallaştırılmış $G/G_0 - \gamma$ değerleri.

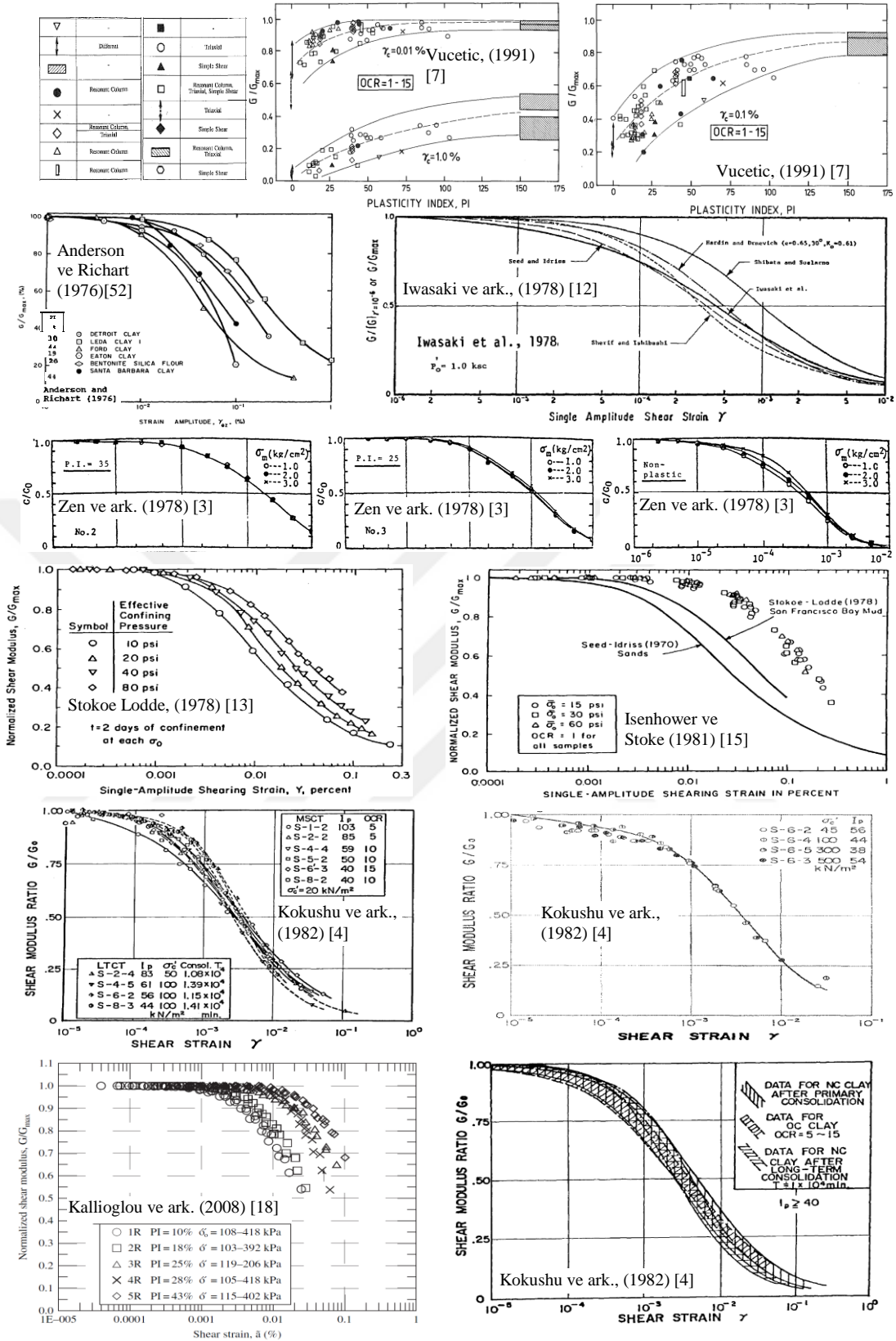
Literatürde yer almış ve bu çalışmada sayısallaştırılarak kullanılmış olan deneysel çalışma sonuçlarına ait örnekler Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir.

Kohezyonlu zeminler için literatürde yer almış açık kaynaklardan derlenmiş olan sayısal veri örnekleri ise Tablo 5.2'de verilmiştir. Tablo 5.2'de kohezyonlu zeminler için belirli deformasyon değerleri için deneysel çalışmalardan belirlenmiş (derlenmiş) normalize kayma modülü değerleri ve zeminlerin plastisite indisi (PI) bilgileri birlikte verilmiştir.

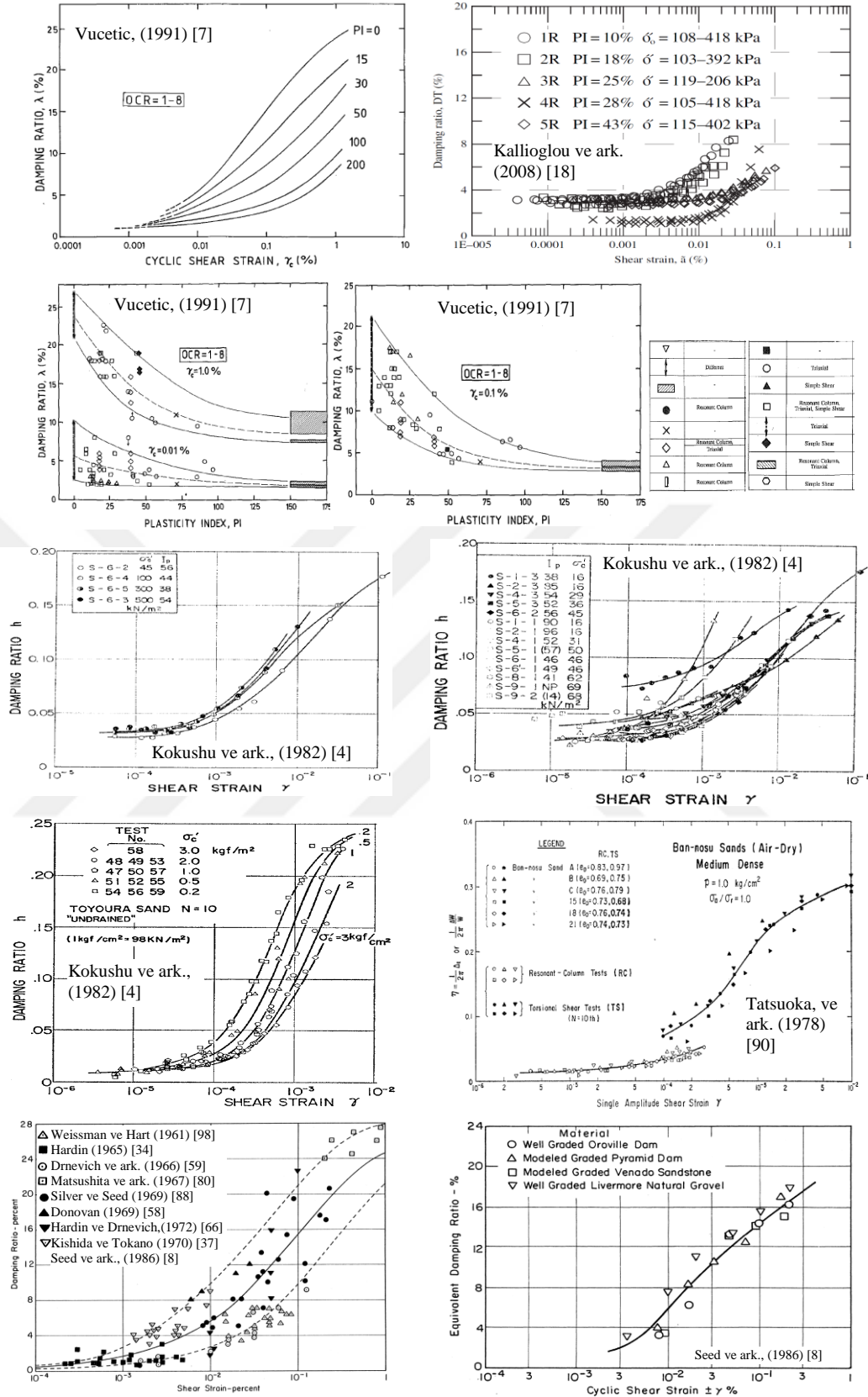
Literatürde yer almış ve Tablo 5.1'de verilen deneysel çalışma sonuçları diğer zemin parametreleri ve bilgileri ile birlikte derlenmiştir. Daha sonra literatürde yer almış bu kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrilerine ait deneysel çalışma sonuçları derlenen zemin özellikleri ve parametreleri ile birlikte değerlendirilmiştir.



Şekil 5.2. Kumlu zeminler için farklı zemin özellikleri ve koşullarda gerçekleştirilmiş ve literatürde yer almış örnek kayma modülü azalım eğrileri deney sonuçları.



Şekil 5.3. Kohezyonlu zeminler için farklı zemin özellikleri ve koşullarda gerçekleştirilmiş ve literatürde yer almış örnek kayma modülü azalım eğrileri deney sonuçları.

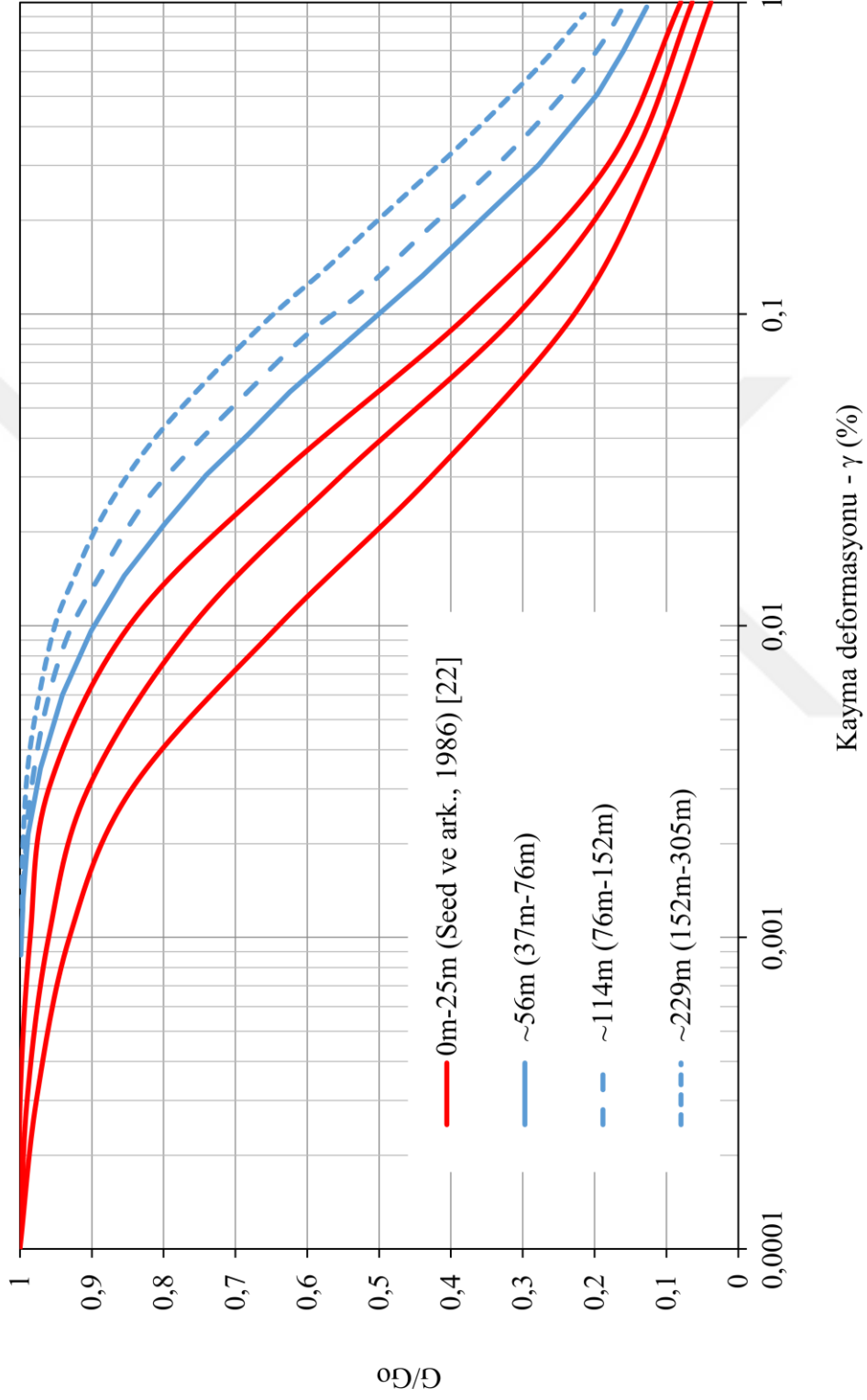


Şekil 5.4. Zeminlerin dinamik sönüm oranı için literatürde yer almış çalışmalara örnekler.

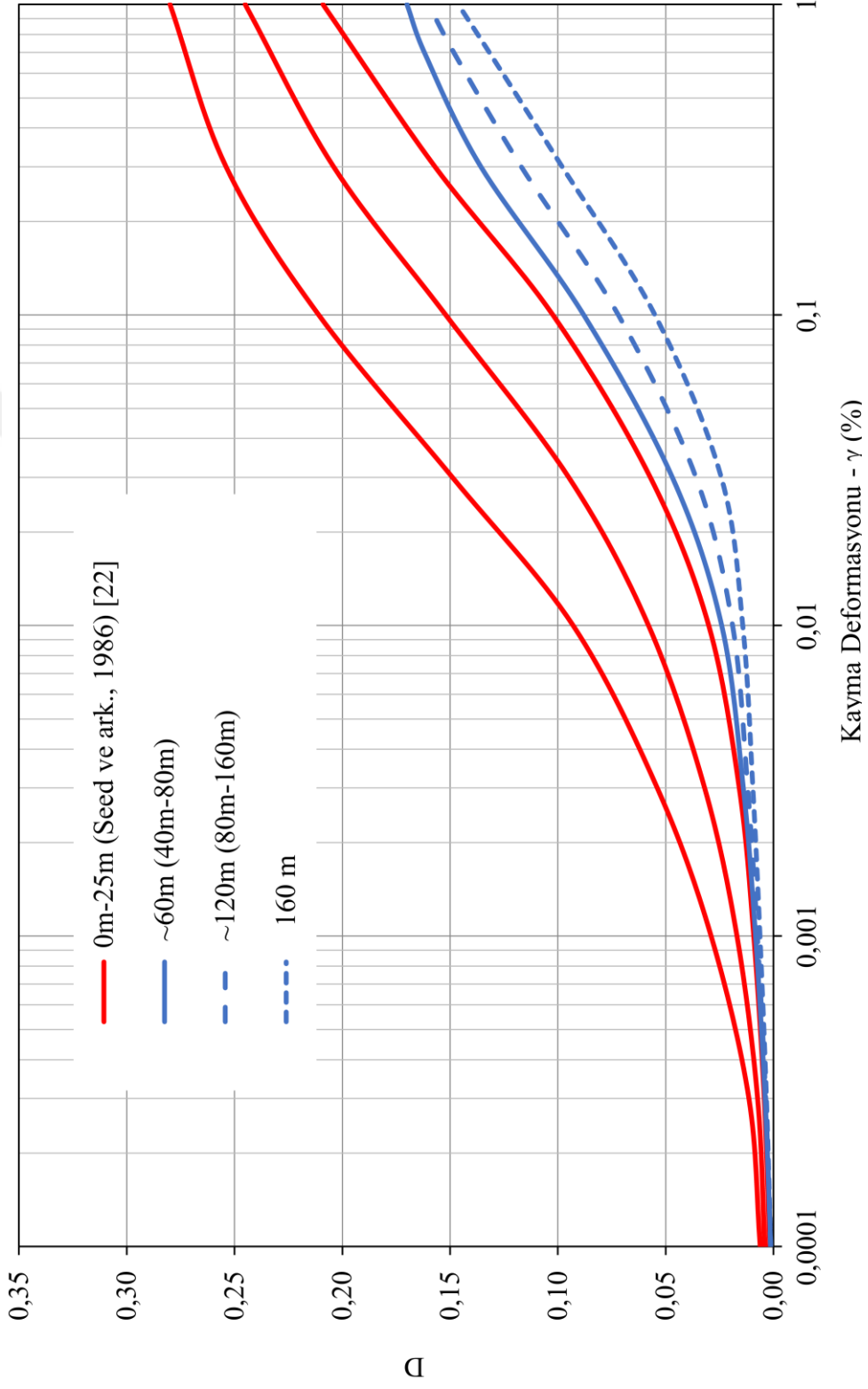
6. ÖNERİLEN KAYMA MODÜLÜ AZALIM EĞRİLERİ (G/Go) ve SÖNÜM ORANI (D) EĞRİLERİ

Seed ve Idriss (1970) [2], Seed ve ark. (1984) [8], Kokusho (1980) [10], Iwasaki ve ark. (1978) [12], Seed ve ark. (1986) [22], Hardin ve Drnevich (1972) [65] gibi araştırmacılar bir dizi çalışmayı gözden geçirmişlerdir. Literatürde yer alan ve bu çalışma kapsamında değerlendirilen çalışmalar neticesinde kumların kayma modülü azalım eğrilerinin boşluk oranı, efektif çevre basıncı ve deformasyon genliğine bağlı olduğu ancak kayma modülü eğrilerinin dane boyutu özelliklerinden önemli derecede etkilenmediği neticesine ulaşılmıştır. Kokusho (1980) [10], Iwasaki ve ark. (1978) [12], Seed ve ark. (1986) [22], Hardin ve Drnevich (1972) [66], Prakash ve Puri (1981) [100] gibi araştırmacıların da bulguladığı gibi düşük efektif gerilme basınçları için kumların kayma modülü azalım eğrilerinin aynı genel bant içinde kaldığını bulgulamışlardır. EPPRI (1993 a – e) [101 – 105], Roblee ve Chiou (2004) [106] gibi derin seviyelerdeki kum zeminleri kapsayan çalışmalar da göz önüne alındığında kayma modülü azalım eğrilerinin değişim bandı bir miktar daha genişlemektedir. Literatürde yer alan çalışmaların değerlendirilmesi neticesinde kumlu zeminler için önerilen kayma modülü azalım eğrileri Şekil 6.1’de verilmiştir.

Sönümlenme oranı eğrileri efektif çevre basıncından, dane çapı özelliklerinden, doygunluk derecesinden, içsel sürtünme açısından gibi zemin özelliklerinden bir miktar etkilendiği Seed ve Idriss (1970) [2], Seed ve ark. (1986) [8], Hardin ve Drnevich (1972) [65] gibi araştırmacıların çalışmalarında gösterilmiştir. Ayrıca EPRI (1993 a–e) [101 – 105] kumlu zeminler için derinliğe bağlı olarak sönüm eğrileri önermiştir. EPRI (1993) tarafından önerilen eğriler ilk olarak 1979 – Coyote Gölü, 1989 – Loma Prieta ve 1984 – Morgan Hill depremlerinden sonra geliştirilmiştir. Daha sonra önerilen eğriler Northridge 1994 depreminden sonra revize edilmiştir. Bu çalışmalara ilaveten Roblee ve Chiou (2004) [106] gibi derin seviyelerdeki kumları kapsayan çalışmalarda mevcuttur. Geçmiş çalışmalar göz önüne alınarak kumlu zeminler için önerilen sönüm oranı eğrileri Şekil 6.2’de verilmektedir.



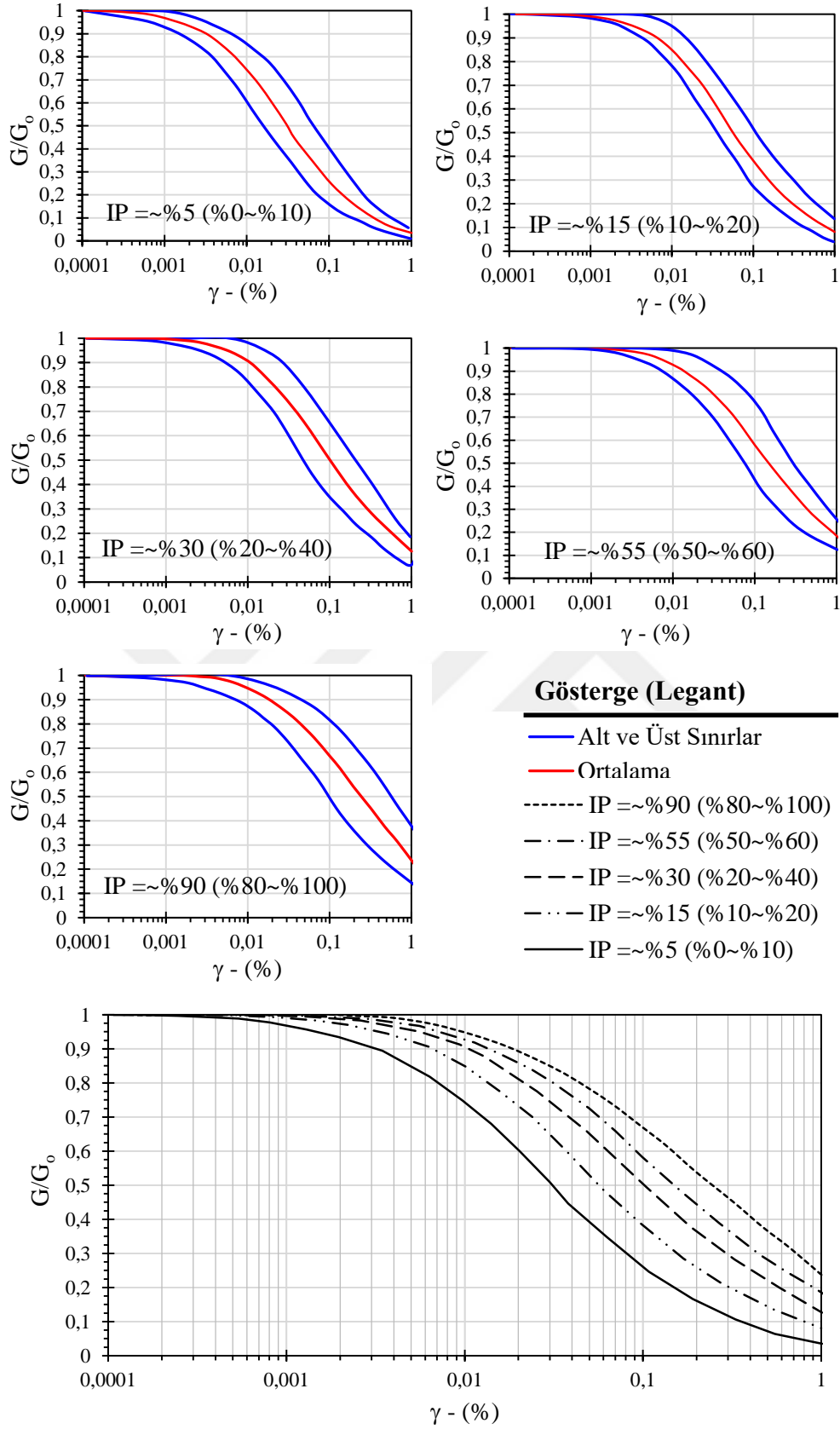
Şekil 6.1. Literatürde yer alan çalışmaların değerlendirilmesi neticesinde kumlu zeminler için önerilen kayma modülü azalım eğrileri.



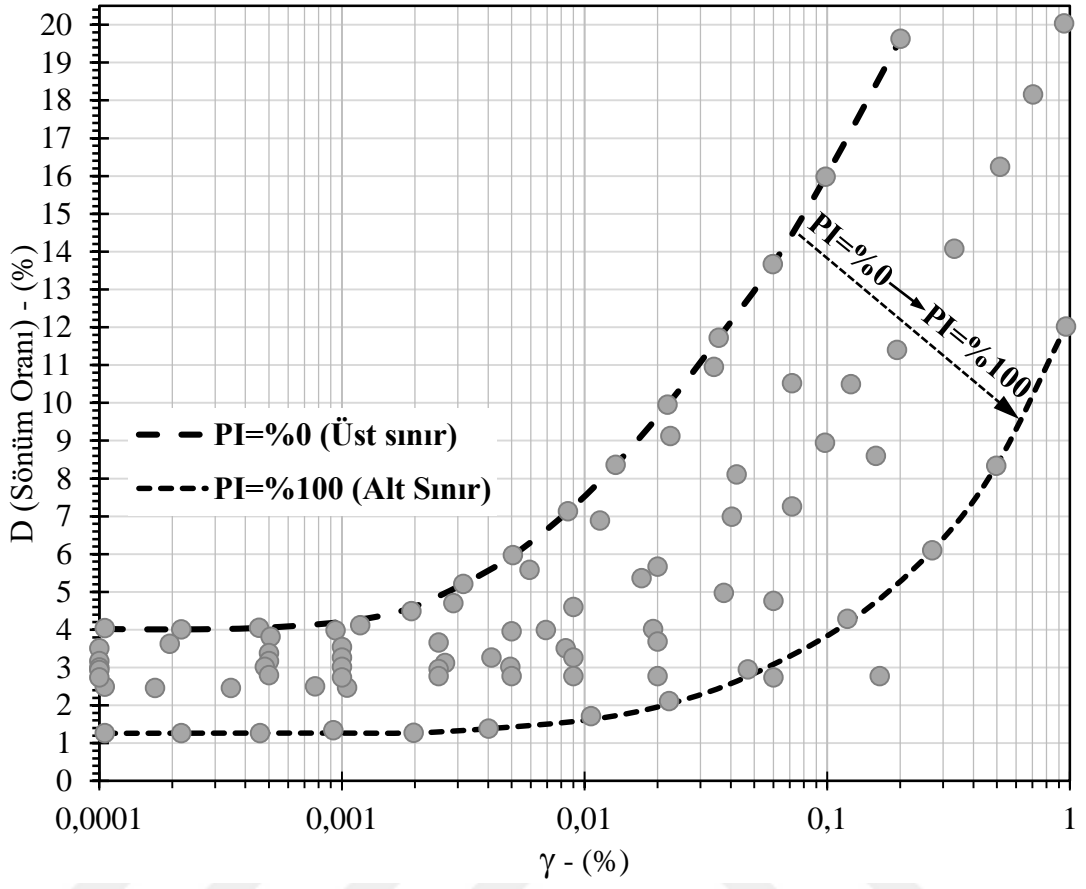
Şekil 6.2. Kumlu zeminler için önerilen sönüm oranı eğrileri.

İnce daneli zeminler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar literatürde bolca bulunmakla birlikte kumlu zeminler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar kadar bol değildir. Ancak ince daneli zeminler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar arazi numunelerini temsili etmesi bakımından daha avantajlıdır. Zira ince daneli zeminlerde örselenmemiş arazi numuneleri, iri daneli zeminlere nazaran nispeten daha kolay ve daha bolca alınabilmektedir.

Sun ve ark.(1988) [6], Vucetic ve Dobry [7], Darendeli (2001) [16], Zhang ve ark. (2005) [45] gibi çalışmalarda daha önceki dönemlerde, Zen ve ark. (1978) [3], Kokushu ve ark., (1982) [4], Iwasaki ve ark., (1978) [12], Stokoe Lodde, (1978) [13], Isenhowe ve Stoke (1981) [15] gibi ince daneli zeminler üzerinde yapılmış deneysel çalışmalar irdelenmiş ve bu irdemelerin neticesinde normalize kayma modülü azalım eğrilerinin karakteristiği üzerinde boşluk oranı, içsel sürtünme açısı, kohezyon gibi malzeme özelliklerinden ziyade plastise indisinin belirleyici rol oynadığı tespit edilmiştir. Kumlu zeminlere benzer olarak ince daneli zeminler için de EPRI (1993 a – e) [101 – 105] derinliğe bağlı olarak kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrileri önermiştir. Benzer şekilde geçmiş çalışmalardan ön yükleme basıncının OCR 1-5 arasında belirgin bir etki göstermediği sonucuna varılmıştır. İnce daneli zeminler için geçmiş çalışmalar göz önüne alınarak önerilen kayma modülü azalım eğrileri Şekil 6.3 ile, sönüm oranı eğrileri ise Şekil 6.4 ile verilmiştir.



Şekil 6.3. Geçmiş çalışmaların değerlendirilmesi neticesinde ince daneli (killi) zeminler için önerilen kayma modülü azalım eğrileri.



Şekil 6.4. Önceki çalışmaların değerlendirilmesi neticesinde ince daneli zeminler için önerilen sönüm oranı eğrileri.

7. TARTIŞMA

Zeminlerde normalize kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm eğrilerinin deneysel olarak belirlenmesi esas olması gerekmektedir. Ancak eğrilerin deneysel olarak belirlenmesinin güçlüğü ve maliyeti nedeniyle çoğu zaman gerekli dinamik zemin mekaniği deneyleri yürütülmeden, zemin özelliklerine ve gerilme koşullarına bağlı olarak tahmin edilmektedir. Böyle durumlarda normalize kayma modülü ve sönüm eğrilerinin çok dikkatli bir biçimde belirlenmelidir. Belirlenen kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm eğrilerinin sahayı temsil edip etmediği geçmiş dönemlere ait deprem ivme kayıtları ile kullanılarak teyit edilmelidir. Belirlenen kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrilerinin geçmiş deprem ivme kayıtları ile test edilip makul sonuçlara ulaşılmamasından sonra yeni deprem ivme kayıtları ile saha için yer tepki analizlerinin yapılması durumunda gerçekçi ve tutarlı tahminlerde bulunulabilir. Aksi durumda belirlenen kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm eğrilerinin geçmiş ivme kayıtları ile teyit edilmeden doğrudan kullanılması ciddi derecede yanlış tahminlere ve yanlışlara yol açabilir.

Bu çalışmada ve literatürdeki birçok çalışmada olduğu gibi kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrilerinin tahmini için yapılan öneriler çakıl, kum, silt, kil gibi belirli zemin sınıfları için yapılmaktadır. Doğada zeminler çoğunlukla bu malzemelerin karışımları halinde bulunmaktadır. Hatta tanımlama ve sınıflandırma bakımından sınır ya da geçiş durumunda zeminler bulunabilmektedir. Günümüzde gelişen teknolojiye paralel olarak geçmişe nazaran dinamik zemin mekaniği deneylerinin yapılma imkân ve olanağının artmış olduğu göz önünde bulundurulduğunda, tahminlerin güçleştiği durumlarda mümkünse kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm eğrilerinin belirlenmesi için dinamik zemin mekaniği deneylerini içeren deneysel çalışmaların tercih edilmesi daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır.

8. SONUÇLAR

Kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrileri hakkında yapılan geçmiş çalışmalardan;

- Kumlu zeminlerin normalize kayma modülü azalım eğrilerinin dane boyu dağılımı özelliğinden belirgin bir şekilde etkilenmediği,
- Düşük gerilme koşullarında kumlu zeminlerin normalize kayma modülü azalım eğrilerinin karakteristiği üzerinde zemin özellikleri bakımından boşluk oranının hakîm rol oynadığı,
- Nispeten derin olmayan seviyeleri temsil eden kumlu zeminlerin normalize kayma modülü azalım eğrilerinin karakteristiği üzerinde zemin özellikleri bakımından boşluk oranının hakîm rol oynadığı ve kayma modülü azalım eğrilerinin dar bir bant içinde kaldığı,
- Nispeten derin seviyelerdeki kum zeminlerin koşulları dikkate alındığında kayma modülü azalım eğrilerinin karakteristiği efektif çevre basıncından etkilendiği
- İnce daneli zeminlerin normalize kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm oranı eğrilerinin karakteristiği üzerinde zemin özelliklerinden Plastisite İndisinin belirleyici rol oynadığı,
- İnce daneli zeminlerin normalize kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm oranı eğrilerinin karakteristiği üzerinde boşluk oranı, içsel sürtünme açısı, kohezyon gibi malzeme özelliklerinin Plastise İndisi kadar hâkim rol oynamadığı nispeten daha düşük bir rol oynadığı,
- İnce daneli zeminlerin normalize kayma modülü azalım eğrilerinin ve sönüm oranı eğrilerinin karakteristiği üzerinde ön yükleme basıncının OCR 1-5 arasında belirgin bir etki göstermediği,

sonuçlarına varılmıştır.

KAYNAKÇA

- [001], Ishihara K. "Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. Oxford University Press". *Oxford University Press. Oxford, İngiltere*, 1996, 341.
- [002], Seed H.B., Idriss I.M. "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis". *Report No. UCB/EERC-70/10, University of California, Berkeley, December*, 1970.
- [003], Zen K., Umehara Y., Hamada K. "Laboratory Tests and In-Situ Seismic Survey on Vibratory Shear Modulus of Clayey Soils with Various Plasticities". *Proceedings, Fifth Japan Earthquake Engineering Symposium, Tokyo, Japan, November*, 1978, 721–28.
- [004], Kokusho T., Yoshida Y., Esashi Y. "Dynamic Properties of Soft Clay for Wide Strain Range". *Soils and Foundations* 22, sayı 4 (1982): 1–18.
- [005], Dobry R., Vucetic M. "Dynamic Properties And Seismic Response Of Soft Clay Deposits". *International Symposium on Geotech. Eng. Of Soft Soils, Mexico* 2 (1982): 51–87.
- [006], Sun J.I., Golesorkhi R., Seed H.B. "Dynamic Moduli And Damping Ratios For Cohesive Soils". *Earthquake Engineering Research Center - Report No. Ucbteelc-8811 5 August 1988 (College Of Engineering University Of California At Berkeley)*, 1988, 56.
- [007], Vucetic M.I., Dobry R. "Effect Of Soil Plasticity On Cyclic Responseg". *Journal of Geotechnical Engineering* 117, sayı 1 (1991): 89–107.
- [008], Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M., Tokimatsu K. "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils". *Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-84/14 September*, 1984, 1–40.
- [009], Katayama I., Fukui F., Satoh M., Makihara Y., Tokimatsu K. "Comparison Of Dynamic Soil Properties Between Undisturbed And Disturbed Dense Sand Samples". *Proc. 21st Ann. Conv. Japan. Soc. Soil Mech. Found. Engng, Sapporo*, 1986, 583–84.
- [010], Kokusho T. "Cyclic Triaxial Test Of Dynamic Soil Properties For Wide Strain Range". *Soils and Foundations* 20, sayı 2 (1980): 45–60.
- [011], Yoshimi Y., Richart F.E., Prakash S., Barkan D.D., Ilyichev V.A. "Soil Dynamic and Its Application to Foundation Engineering". *State-of-the-art Report, Ninth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo* 2 (1977): 605–50.
- [012], Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., Yoshida S. "Dynamic Modulus of Alluvial Cohesive Soils by Resonant Column and Dynamic Triaxial Tests". *Proceedings, Thirteenth Japanese National Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1978, 569–72.
- [013], Stokoe K.H., Lodde P.F. "Dynamic Response Of San Francisco Bay Mud". *Earthquake Engineering and Soil Dynamics--Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference, June 19-21, Pasadena* 2 (1978): 940–59.
- [014], Isenhowe W.M. "Torsional Simple Shear/Resonant Column Properties of San Francisco Bay Mu". *M.Sc. thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Tex.*, 1979.
- [015], Isenhowe W.M., Stokoe K.H. "Strain-Rate Dependent Shear Modulus of San Francisco Bay Mud". *First International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, University of*

- Missouri-Rolla, April 2 (1981): 597–602.*
- [016], Darendeli M.B. “Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves.” *University of Texas, PhD dissertation, Austin, TX, ABD. Civil, Architectural, and Environmental Engineering.*, 2001, 362.
- [017], Stokoe K.H., Darendeli M.B., Gilbert R.B., Menq F.Y., Choi W.K. “Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves”. *Proceedings, NSF/PEER International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and their Impact on Modeling Dynamic Soil Response, University of California at Berkeley, Berkeley, Calif, 2004.*
- [018], Kallioglou P., Tika T., Pitilakis K. “Shear Modulus and Damping Ratio of Cohesive Soils”. *Journal of Earthquake Engineering* 12, sayı 6 (2008): 879–913.
- [019], Aggour M.S., Tawfiq K.S., Amini F. “Effect of Frequency Content on Dynamic Properties of Cohesive Soils”. *Developments in Geotechnical Engineering* 42, sayı C (1987): 31–39.
- [020], Kramer S.L. “Geotechnical Earthquake Engineering”. *Prentice Hal, New Jersey, ABD, 1996, 643.*
- [021], Ohta Y., Goto N. “Estimation of S-Wave Velocity in Terms of Characteristic Indices of Soil”. *Butsuri-Tanko* 29, sayı 4 (1976): 34–41.
- [022], Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M., Tokimatsu K. “Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils”. *Journal of Geotechnical Engineering* 112, sayı 11 (1986): 1016–32.
- [023], Imai T., Tonouchi K. “Correlation of N Value With S-Wave Velocity and Shear Modulus”. *Penetration Testing. Proc. 2nd European Symposium, Amsterdam, 1982, 67–72.*
- [024], Rix G.J., Stokoe K.H. “Correlation of Initial Tangent Modulus and Cone Penetration Resistance”. *Calibration chamber testing, Proceedings of the First International Symposium on Calibration Chamber Testing/ISOCCTI, Potsdam, New York., 1991, 351–62.*
- [025], Baldi G., Bellotti R., Ghionna V., Jamiolkowski M., Marchetti S., Pasqualini E. “Flat Dilatometer Tests in Calibration Chambers”. *Proc. In Situ '86 ASCE Spec. Conf. on “Use of In Situ Tests in Geotechn. Engineering” . Virginia Tech, Blacksburg, VA, June 23- 25, 1986. ASCE Geotechn. Special Publ., 1986, 431–46.*
- [026], Mayne P.W., Rix G.J. “G max- q_c Relationships for Clays”. *Geotechnical Testing Journal* 16, sayı 1 (1993): 54–60.
- [027], Bellotti R., Ghionna V., Jamiolkowski M., Lancellotta R., Manfredini G. “Deformation Characteristics of Cohesionless Soils from In Situ Tests”. *Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Geotechnical Special Publication No. 6, ASCE, S. P. Clemence, ed., 1986, 47–73.*
- [028], Hryciw R.D. “Small-Strain-Shear Modulus of Soil by Dllatometer”. *Journal of Geotechnical Engineering* 116, sayı 11 (1990): 1700–1716.
- [029], Byrne P.M., Salgado F., Howie J.A., Salgado R., Howie J.A. “Gmax from Pressuremeter Tests - Theory, Chamber Tests and Measurements”. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. 23 Vol. 1 (1991): 57–63.*
- [030], Kokusho T. “In-Situ Dynamic Soil Properties and Their Evaluations”. *Proceedings of The 8th Asian Regional Conference On Soil Mechanics And*

- Foundations Engineering, Kyoto 2* (1987): 215–435.
- [031], Wong R.T., Seed H.B., Chan C.K. “Liquefaction of Gravelly Soils Under Cyclic Loading Conditions”. *Report No. EERC 74-11, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Calif*, 1974.
- [032], Marschi N.D., Chan C.K., Seed H.B. “Evaluation of Properties of Rockfill Materials”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 1* (98M.S.): 95–114.
- [033], Hall J.R., Richart F.E. “Effects of Vibration Amplitude on Wave Velocities in Granular Materials”. *Proceedings, Second Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering 1* (1963): 145–62.
- [034], Hardin B. “The Nature of Damping in Sands”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 91*, sayı 1 (1965): 63–97.
- [035], Hardin B., Richart F. “Elastic Wave Velocities in Granular Soils”. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 89*, sayı SM1 (1963): 33–65.
- [036], Iwasaki T., Tatsuoka F., Takagi Y. “Dynamic Shear Deformation Properties of Sand for Wide Strain Range”. *Report of Civil Engineering Institute, No. 1085, Ministry of Construction, Tokyo, Japan.*, 1976.
- [037], Kishida H, Takano A. “The Damping in the Dry Sand”. *The proceeding of 3rd Japan earthquake engineering simposium, Tokyo, Japan*, 1970.
- [038] Krizek R.J., McLean F G., Giger M.W. “Effect of Particle Characteristics on Wave Velocity”. *Journal of the Geotechnical Engineering Divisions, American Society of Civil Engineers 100*, sayı GT1 (1974): 89–94.
- [039], Kuribayashi E., Iwasaki, T., Tatsuoka F. “Effects Of Stress-Strain Conditions On Dynamic Properties Of Sands”. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. Japan Society of Civil Engineers.* 242 (1974): 105–104.
- [040], Oztoprak S., Bolton M.D. “Stiffness of Sands Through a Laboratory Test Database”. *Geotechnique 63*, sayı 1 (2013): 54–70.
- [041], Yasuda N., Matsumoto N. “Dynamic Deformation Characteristics of Sands and Rockfill Materials”. *Canadian Geotechnical Journal 30*, sayı 5 (1993): 747–57.
- [042], Tan K., Vucetic M. “Behavior Of Medium And Low Plasticity Clays Under Cyclic Simple Shear Conditions”. *Proc. Fourth Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Soil Dynamics and Liquefaction, Mexico City.*, 1989, 131–41.
- [043], Zen K., Higuchi Y. “Prediction Of Vibratory Shear Modulus And Damping Ratio For Cohesive Soils”. *Proceedings, Eighth International Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, July, 3* (1984): 23–30.
- [044], Ishibashi I., Zhang X. “Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay”. *Soils and Foundations 33*, sayı 1 (Mart 1993): 182–91.
- [045], Zhang J., Andrus, R.D., Juang C.H. “Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 131*, sayı 4 (2005): 453–64.
- [046], Rollins K.M., Evans M.D., Diehl N.B., William D.D. “Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 124*, sayı 5 (1998): 396–405.
- [047], Kondnor R.L., Zelasko J.S. “Hyperbolic Stress-Strain Folnzulatiort Of Sands”. *Proceedings 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1963, 289–324.
- [048], Duncan J.M., Chang C.Y. “Nonlinear Analysis Of Stress And Strain In Soils”. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div 96*, sayı 5 (1970): 1629–52.

- [049], Idriss I.M., Dobry R., Singh R.D. “Nonlinear Behavior Of Soft Clays During Cyclic Loading”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 104, sayı GT12 (1978): 1427–47.
- [050], Hara A. “Dynamic Deformation Characteristics Of Soils And Seismic Response Analyses Of The Ground”. *University of Tokyo, Tokyo, Japan*, 1980.
- [051], Guzman A.A., Chameau J.L., Leonards G.A., Frost J.D. “Shear Modulus and Cyclic Undrained Behavior of Sands”. *Soils and Foundations* 29, sayı 4 (1989): 105–19.
- [052], Anderson D.G., Richart F.E. “Effects Of Stratining On Shear Modulus Of Clays”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 102, sayı GT9 (1976): 975–87.
- [053], Andréasson B. “Dynamic Deformation Characteristics of a Soft Clay”. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 1981.
- [054], Brennan A.J., Thusyanthan N.I., Madabhushi S.P. “Evaluation of Shear Modulus and Damping in Dynamic Centrifuge Tests”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131, sayı 12 (Aralık 2005): 1488–97.
- [055], Chung R.M., Yokel F.Y., Drnevich V.P. “Evaluation of Dynamic Properties of Sands by Resonant Column Testing”. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ* 7, sayı 2 (1984): 60–69.
- [056], Ribay D.E., Maigre I.D., Cabrillac R., Gouvenot D. “Shear Modulus And Damping Ratio Of Grouted Sand”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, sayı 6 (01 Ağustos 2004): 461–71.
- [057], Dong J., Nakamura K., Tatsuoka F., Kohata Y. “Deformation Characteristics Of Gravels İn Triaxial Compression Tests And Cyclic Triaxial Tests”. *International Symposium On Pre-Failure Deformation Characteristics Of Geomaterials*, 1994, 17–23.
- [058], Donovan N.C. “Research Brief-Soil Dynamics Specialty Session”. *Soil Dynamics Specialty Session, 7th International Conferance on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico Cit (1969).
- [059], Drnevich V.P., Hall J.R., Richart F.E. “Large Amplitude Vibration Effects on the Shear Modulus of Sand.” *University of Michigan Report to Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, US. Army Contract DA-22-079Eng340, October, 1966.*
- [060], Ellis E.A., Soga K., Bransby M.F., Sato M. “Resonant Column Testing of Sands with Different Viscosity Pore Fluids”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126, sayı 1 (2000): 10–17.
- [061], Ertec Western Inc. “Nonlinear Response of Soft Clay Sediments to High-Strain Earthquake Ground Motions.” *Pepered for U.S. Geological Survey, Office of Earthquake Studies, Contract No. USGS-14-08-0001-19106*, 1981, 127.
- [062], Fioravante V., Jamiolkowski M., Lo Presti D.C.F. “Stiffness Of Carbonate Quiou Sand”. *Proceedings Of The 13th International Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering, New Delhi, India*, 1994, 163–67.
- [063], Goto S., Suzuki Y., Nishio S., Hiroshi O.O. “Mechanical Properties Of Undisturbed Tone-River Gravel Obtained By Insitu Freezing Method”. *Soils and Foundations* 32, sayı 3 (1992): 15–25.
- [064], Hara A., Kiyota Y. “Dynamic Shear Test of Soils for Seismic Analyses”. *Proceedings, Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan 2 (1977): 247–50.*

- [065], Hardin B.O., Drnevich V.P. "Shear Modulus And Damping In Soils: Measurement And Parameter Effects". *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.* 98, sayı sm6 (1972): 603–24.
- [066], Hardin B.O., Drnevich V.P. "Shear Modulus And Damping In Soils: Design Equations And Curves". *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.* 98, sayı sm7 (1972): 667–92.
- [067], Hardin O.B., Kalinski M.E. "Estimating the Shear Modulus of Gravelly Soils". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131, sayı 7 (2005): 867–75.
- [068], Hatanaka M., Suzuki Y., Kawasaki T., Endo M. "Cyclic Undrained Shear Properties of High Quality Undisturbed Tokyo Gravel". *Soils and Foundations* 28, sayı 4 (1988): 57–68.
- [069], Idriss I.M., Dobry R., Doyle E.H., Singh R.D. "Behavior of soft clays under earthquake loading conditions". *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference 1976-May* (1976): 605–16.
- [070], Ito K., Goto Y., Ishihara K., Yasuda S., Yoshida N. "Detailed In-Situ And Laboratory Tests On The Improved Ground In Port Island". *International Conference On Earthquake Geotechnical Engineering, Lisboa*, 1999, 47–52.
- [071], Iwasaki T., Tatsuoka F., Takagi Y. "Shear Moduli Of Sands Under Cyclic Torsional Shear Loading". *Soils and Foundations* 18, sayı 1 (1978): 39–59.
- [072], Kim T.C., Novak M. "Dynamic Properties Of Some Cohesive Soils Of Ontario". *Canadian Geotechnical Journal* 18, sayı 3 (1981): 371–89.
- [073], Koutsoftas C.D., Fischer J.A. "Dynamic Properties Of Two Marine Clays". *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 106, sayı GT6 (1980): 645–57.
- [074], Lanzo G., Vucetic M., Doroudian M. "Reduction of Shear Modulus at Small Strains in Simple Shear". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123, sayı 11 (1997): 1035–42.
- [075], Li X.S., Yang W.L., Shen C.K., Wang W.C. "Energy-Injecting Virtual Mass Resonant Column System". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124, sayı 5 (1998): 428–38.
- [076], Li X.S., Cai Z.Y. "Effects of Low-Number Previbration Cycles on Dynamic Properties of Dry Sand". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125, sayı 11 (1999): 979–87.
- [077], Lo Presti D.C.F.L., Jamiolkowski M., Pallara O., Cavallaro A., Pedroni S. "Shear Modulus And Damping Of Soils". *Geotechnique* 47, sayı 3 (1997): 603–17.
- [078], Presti D.L., Pallara O., Lancellotta R., Armandi M., Maniscalco R. "Monotonic And Cyclic Loading Behavior Of Two Sands At Small Strains". *Geotechnical Testing Journal* 16, sayı 4 (1993): 409–24.
- [079], Lodde P.F. "Dynamic Response of San Francisco Bay Mud". *M.S. Thesis.. University of Texas at Austin*, 1982.
- [080], Matsushita K., Kishida H., Kyo K. "Experiments on Damping of Sands". *Transactions of The Architecture Institute of Japan, summaries of Technical Papers (Annual Meeting of AIJ, 1967)*, 1967, 166.
- [081], Nishigaki Y. "Young's Modulus Change Of Clay Due To Strain Level". *Proceedings, Twenty-Sixth Convention of Japanese Society of Civil Engineer* 3 (1971): 93–95.
- [082], Ohsaki Y. "Some Notes On Masing's Law And Non-Linear Response Of Soil Deposits". *Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo* ,

- Ser. B; ISSN 0563-7937. (Department of Architecture, University of Tokyo).*
35, sayı 4 (1980): 513–36.
- [083], Ohsaki Y., Hara A., Kiyota Y. “Stress-Strain Model of Soils for Seismic Analysis”. *Proceedings, Fifth Japan Earthquake Engineering Symposium, Tokyo, Japan, November, Japanese, 1978, 697–704.*
- [084], Porovic E., Jardine R. “Some Observations On The Static And Dynamic Shear Stiffness Of Ham River Sand”. *1st Nternational Symposium On Pre-Failure Deformation Characteristics Of Geomaterials 1 (1994): 25–30.*
- [085], Ray R.P., Woods R.D. “Modulus And Damping Due To Uniform And Variable Cyclic Loading”. *Journal of Geotechnical Engineering 114, sayı 8 (1988): 861–76.*
- [086], Saxena S.K., Reddy K.R. “Dynamic Moduli And Damping Ratios For Monterey No. 0 Sand By Resonant Column Tests”. *Soils and Foundations 29, sayı 2 (1989): 37–51.*
- [087], Shen C.K., Li X.S., Gu Y.Z. “Microcomputer Based Free Torsional Vibration Test”. *Journal of Geotechnical Engineering 111, sayı 8 (1985): 971–86.*
- [088], Silver M.L., Seed H.B. “The Behavior Of Sands Under Seismic Loading Conditions”. *Report No. EERC 69-16, California Univ Berkeley Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, Calif., 1969.*
- [089], Stokoe K.H., Isenhower W.M., Hsu J.R. “Dynamic Properties of Offshore Silty Samples”. *Proceedings, 12th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC 3771, May, 1980, 289–302.*
- [090], Tatsuoka F., Iwasaki T., Takagi Y. “Hysteretic Damping Of Sands Under Cyclic Loading And Its Relation To Shear Modulus”. *Soils and Foundations 18, sayı 2 (1978): 25–40.*
- [091], Taylor P.W., Parton I.M. “Dynamic Torsion Testing of Soils”. *Proceedings, Eight International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow 1 (1973): 425–32.*
- [092], Tokimatsu K., Hosaka Y. “Effects of Sample Disturbance on Dynamic Properties of Sand”. *Soils and Foundations 26, sayı 1 (1986): 53–64.*
- [093], Tokimatsu K., Yamazaki T., Yoshimi Y. “Soil Liquefaction Evaluations by Elastic Shear Moduli”. *Soils and Foundations 26, sayı 1 (1986): 25–35.*
- [094], Umehara Y., Zen K., Higuchi Y., Ohenda H. “Laboratory Tests And In-Situ Seismic Survey On Vibratory Shear Moduli Of Cohesive Soils”. *Proceedings, Sixth Japan Earthquake Engineering Symposium, Tokyo, Japan, December., 1982, 577–84.*
- [095], Vucetic M. “Cyclic Threshold Shear Strains in Soils”. *Journal of Geotechnical Engineering 120, sayı 12 (1994): 2208–28.*
- [096], Wang Y.H., Tsui K.Y. “Experimental Characterization of Dynamic Property Changes in Aged Sands”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135, sayı 2 (2009): 259–70.*
- [097], Yu P. “Discussion of ‘Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils’ by H. Bolton Seed, Robert T. Wong, I. M. Idriss, and K. Tokimatsu (November, 1986, Vol. 112, No. 11)”. *Journal of Geotechnical Engineering 114, sayı 8 (1988): 954–57.*
- [098], Weissman G.F., Hart R.R. “The Damping Capacity Of Some Granular Soils”. *ASTM Special Tech. Pub. No. 305, Symposium on Soil Dynamics, 1961, 45–54.*
- [099], Yokota K., Imai T., Konno M. “Dynamic Deformation Characteristics of Soils Determined by Laboratory Tests”. *Proceedings, Fifteenth Japanese National*

- Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1980, 13–37.
- [100], Prakash S., Puri V.K. “Dynamic Properties of Soils From In-Situ Tests”. *Geotech Eng Div ASCE* 7 (107M.S.): 943–64.
- [101], Electric Power Research Institute (EPRI). “Guidelines for Determining Design Basis Ground Motions”. *Volume 1: Method and Guidelines for Estimating Earthquake Ground Motion in Eastern North America / TR-102293 1* (1993): 1–488.
- [102], Electric Power Research Institute (EPRI). “Guidelines for Determining Design Basis Ground Motions”. *Volume 2: Appendices for Ground Motion Estimation / TR-102293 2* (1993): 1–528.
- [103], Electric Power Research Institute (EPRI). “Guidelines for Determining Design Basis Ground Motions”. *Volume 3: Appendices for Field Investigations / TR-102293 3* (1993): 3–560.
- [104], Electric Power Research Institute (EPRI). “Guidelines for Determining Design Basis Ground Motions”. *Volume 4: Appendices for Laboratory Investigations / TR-102293 4* (1993): 1–1044.
- [105], Electric Power Research Institute (EPRI). “Guidelines for Determining Design Basis Ground Motions -”. *Volume 5 : Quantification of Seismic Source Effects* 5 (1993): 1–50.
- [106], Roblee C., Chiou B. “A Proposed Geindex Model for Design Selection of Non-Linear Properties for Site Response Analyses”. *International Workshop On Uncertainties In Nonlinear Soil Properties And Their Impact On Modeling Dynamic Soil Response, PEER Headquarters, UC Berkeley*, 2004, 1–29.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Burak YAKICI
Doğum Yeri ve Yılı : İstanbul, 1993
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dil : İngilizce
E-posta : burak.yakici.53@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Şişli lisesi, 2011
Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2016
Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği
Anabilim Dalı, Geoteknik Bölümü, 2020