



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



DOKTORA TEZİ

ZEMİNLERİN RİJİTLİK ve SÖNÜMLEME DAVRANIŞININ
TANIMLANMASI ve NÜMERİK MODELLEMEDE
KULLANILMASI

Sinan SARĞIN

DANIŞMAN
Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

II. DANIŞMAN
Doç. Dr. D.Volkan OKUR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma 18.03.2019 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
İnşaat Mühendisliğı Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliğı Programı Doktora Tezi olarak kabul
edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. İlknur BOZBEY
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. M.Kubilay KELEŞOĞLU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. S.Feyza ÇİNİCİOĞLU
Özyeğın Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. M.Murat MONKUL
Yeditepe Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, 2211-A numaralı “TÜBİTAK Yurtdışı Doktora Bursu” projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Lisansüstü öğrenimim boyunca, akademik ve sosyal alanda bana yol gösteren, çalışmalarımı bilgi birikimi ile yöneten ve çalışma sürecimde gösterdiği disiplin, hoşgörü ve sabır nedeniyle değerli hocam Sayın Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK'a, değerli görüş ve önerileri ile teze büyük katkı sağlayan tez izleme komitesinde bulunan çok değerli hocalarım Prof. Dr. S. Feyza ÇİNİCİOĞLU ve Prof.Dr. M. Murat MONKUL'a en içten dileklerle teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca bana deneysel çalışma fırsatı sunan ikinci danışmanım sayın Doç.Dr. Volkan OKUR'a teşekkürü borç bilirim. Son olarak, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı'nda bulunan hocalarım Prof.Dr. İlknur BOZBEY ve Doç.Dr. M.Kubilay KELEŞOĞLU'na mesleki anlamda bana vermiş oldukları katkılar için teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu süreçte beni sabırla destekleyen eşim Özge SARGİN'a ve aileme; destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli çalışma arkadaşlarım Araş. Gör. Dr. Cihan ÖSER ve Araş. Gör. Dr. Osman Hürol TÜRKAKIN'a teşekkür ederim. Tezin nümerik hesaplamalar yapılan bölümünde desteğini esirgemeyen Hidayet Kemal UYAR'a da teşekkürlerimi sunarım.

Eğitimim boyunca sağladığı finansal destek için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkürü borç bilirim.

Mart 2019

Sinan SARGİN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ.....	xiv
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xvi
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1. TEZİN BÖLÜMLERİ VE YAPISI.....	7
2. GENEL KISIMLAR.....	9
2.1. İRİ TANELİ ZEMİNLERİN BAŞLANGIÇ RİJİTLİĞİ VE SÖNÜMLEME DAVRANIŞI.....	9
2.1.1. İri Taneli Zeminlerde Başlangıç Kayma Modülü ($G_{maks}-G_0$).....	9
2.1.1.1. İri Taneli Zeminlerin Başlangıç Rijitliğini Etkileyen Parametreler.....	11
2.1.2. İri Taneli Zeminlerde Başlangıç Sönüm Oranı (D_{min}).....	15
2.1.2.1. İri Taneli Zeminlerde Başlangıç Sönüm Oranını Etkileyen Parametreler.....	17
2.2. İNCE TANELİ ZEMİNLERİN BAŞLANGIÇ RİJİTLİĞİ VE SÖNÜMLENME DAVRANIŞI.....	20
2.2.1. İnce Taneli Zeminlerde Başlangıç Kayma Modülü ($G_{maks}-G_0$).....	20
2.2.1.1. İnce Taneli Zeminlerde Başlangıç Kayma Modülünü Etkileyen Parametreler.....	20
2.2.2. İnce Taneli Zeminlerde Başlangıç Sönüm Oranı	27
2.2.2.1. İnce Taneli Zeminlerde Başlangıç Sönüm Oranını Etkileyen Parametreler.....	28
2.3. ZEMİNLERDE DEFORMASYONA BAĞLI RİJİTLİK VE SÖNÜM DAVRANIŞININ DEĞİŞİMİ.....	29
2.3.1. İri Taneli Zeminlerde Rijitlik ve Sönüm Oranının Deformasyona Bağlı Değişimine Etki Eden Parametreler.....	30
2.3.2. İnce Taneli Zeminlerde Rijitlik ve Sönüm Oranının Deformasyona Bağlı Değişimine Etki Eden Parametreler.....	34

2.4. LİTERATÜRDE ÖNERİLEN AMPRİK İFADELER.....	37
2.4.1. İri Taneli Zeminlerin Başlangıç Rijitliği ve Sönüm Oranı İçin Önerilen Eşitlikler.....	37
2.4.2. İnce Taneli Zeminlerin Başlangıç Rijitliği ve Sönüm Oranı İçin Önerilen Eşitlikler.....	41
2.4.3. İri ve İnce Taneli Zeminlerin Deformasyona Bağlı Rijitlik ve Sönüm Oranı Değişimi İçin Önerilen Eşitlikler.....	43
2.5. ZEMİNLERDE DEFORMASYON HIZININ RİJİTLİK VE SÖNÜM ORANINA ETKİSİ.....	49
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	54
3.1. VERİTABANLARININ OLUŞTURULMASI.....	54
3.2. İRİ TANELİ ZEMİNLERDE KAYMA MODÜLÜ AZALIMININ BELİRLENMESİ.....	58
3.2.1. Öztoprak ve Bolton (2013) Tarafından Önerilen Denklemler	58
3.2.2. İri Taneli Zeminlerde Deformasyon Hızı veya Frekansın Modül Azalımına Etkisi	59
3.3. İNCE TANELİ ZEMİNLERDE KAYMA MODÜLÜ VE AZALIMININ TANIMLANMASI	62
3.3.1. Başlangıç Kayma Modülünün Zemin Özelliklerine Bağlı Olarak Tayin Edilmesi	62
3.3.2. İnce Taneli Zeminlerde Kayma Modülü Azalımının Zemin Özelliklerine Göre Tanımlanması	65
3.3.3. İnce Taneli Zeminlerde Deformasyon Hızı veya Frekansın Modül Azalımına Etkisi	74
3.4. ZEMİNLERDE SÖNÜMLENME DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ.....	76
3.4.1. İri Taneli Zeminlerde Sönümlenme Davranışının Deformasyona Bağlı Değişiminin Belirlenmesi	76
3.4.2. İnce Taneli Zeminlerde Sönümlenme Davranışının Deformasyona Bağlı Değişiminin Belirlenmesi	79
3.5. DENEYSEL ÇALIŞMA	82
3.5.1. Rezonant Kolon ve Dinamik Burulmalı Üç Eksenli Deneyi.....	83
3.5.1.1. <i>Rezonant Kolon ve Burulmalı Üç Eksenli Deneylerin Teorisi ve Dinamik Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi</i>	83
3.5.1.2. <i>Test Edilen Zeminler ve Numune Hazırlanması</i>	87
3.5.1.3. <i>DeneySEL Program</i>	90
3.6. ÖNERİLEN DENKLEMLERİN NÜMERİK ANALİZLERDE KULLANIMI	93
3.6.1. Monotonik Üç Eksenli Deneyin Modellenmesi	93
3.6.2. Tek Boyutlu Dalga Yayılımı ve Tepki Spektrumu Analizi.....	95

4. BULGULAR.....	98
4.1. ÖNERİLEN AMPRİK BAĞINTILAR.....	98
4.1.1. İri Taneli Zeminlerde Deformasyon Hızına Bağlı Rijitlik Azalımı	98
4.1.2. İri Taneli Zeminlerde Sönümlenme Davranışının Belirlenmesi	100
4.1.3. İnce Taneli Zeminlerde Başlangıç Rijitliği	101
4.1.4. İnce Taneli Zeminlerde Rijitlik Azalımı	102
4.1.4.1. <i>İnce Taneli Zeminlerde Deformasyon Hızına Bağlı Rijitlik Azalımın Belirlenmesi</i>	103
4.1.5. İnce Taneli Zeminlerde Sönümlenme Davranışının Belirlenmesi	105
4.2. DENEYSEL SONUÇLAR İLE ÖNERİLEN DENKLEMLERİN DOĞRULANMASI	106
4.2.1. Literatürde Dinamik Özelliklerin Belirlendiği Deneyler ile Kalibrasyon	106
4.2.2. Rezonant Kolon ve Üç Eksenli Burulmalı Deneyler.....	113
4.3. ÖNERİLEN MODELLERİN NÜMERİK ANALİZLERDE KULLANIMI.....	118
4.3.1. Konsolidasyonlu Drenajlı Üç Eksenli Deney Modeli	118
4.3.2. Tek Boyutlu Dalga Yayınımı ile Saha Tepki Analizi	119
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	121
KAYNAKLAR.....	123
EKLER	134
ÖZGEÇMİŞ	144

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1.1: Deformasyon düzeyine göre zemin davranışını ifade eden modeller (Ishihara, 1996)	2
Şekil 1.2: Birinci yük çevrimi için zemin iskeleti eğrisi (Vucetic & Dobry, 1991)	3
Şekil 2.1: Kayma gerilmesi-deformasyon ilişkisi (Kokusho, Yashida, & Esashi, 1982)	11
Şekil 2.2: Başlangıç kayma modülünün(Gmaks) tane şekli ve boşluk oranı ile ilişkisi (Ishihara, 1996)	13
Şekil 2.3: (a) Başlangıç kayma modülünün(Gmaks) Uniformluk katsayısı (b) Ortalama Çap ilişkisi (Chang & Ko,1982)	13
Şekil 2.4: Örselenmemiş kumlu çakıl zeminlerde ortalama efektif çevre basınç başlangıç kayma modülü ilişkisi (Kokusho, 1987).....	14
Şekil 2.5: Örselenme etkisinin arazi ve laboratuvar kayma dalgası,başlangıç kayma modülü üzerinde gösterimi (Darendeli, 2001)	15
Şekil 2.6: Doğrusal, doğrusal olmayan ve plastik davranış bölgeleri ve sınırları (Darendeli, 2001)	16
Şekil 2.7: Başlangıç sönüm oranı (Dmin) – çevre basıncı ilişkisi (Darendeli, 2001).....	18
Şekil 2.8: Başlangıç sönüm oranı (Dmin) – Örselenme etkisi (Darendeli, 2001).....	18
Şekil 2.9: Farklı killere ait Gmaks değeri (Santagata, 2009)	21
Şekil 2.10: Başlangıç kayma modülü–efektif gerilme ve uygulanma süresi ilişkisi (Stokoe ve diğ. (1978).....	21
Şekil 2.11: $PI < 15$, $CC < \%5$ olan koheyonlu zeminlerde gerilme modül ilişkisi (a), $PI < 15$, $\%5 \leq CC \leq \%16$ olan koheyonlu zeminlerde gerilme modül ilişkisi (b) ve $PI > 15$, $\%22 \leq CC \leq \%86$ olan koheyonlu zeminlerde gerilme modül ilişkisi (c)	22
Şekil 2.12: Kayma Modülünün windsor kilinde ,Gmaks, çevre basıncı ve uygulama süresi ile değişimi (Kim & Novak , 1981)	23
Şekil 2.13: Kayma Modülünün hamilton siltinde ,Gmaks, çevre basıncı ve uygulama süresi ile değişimi (Kim & Novak , 1981)	23

Şekil 2.14: Killerde başlangıç kayma modülü ve boşluk oranı ilişkisi (Hardin&Black, 1968)	24
Şekil 2.15: (a)Aşırı konsolide kaolin ve (b) bentonit kilinde gerilme-boşluk oranı ve Başlangıç kayma modülü ilişkisi (Marcuson & Wahls, 1978)	25
Şekil 2.16: Örselenmiş ve örselenmemiş Londra kili numunelerinde başlangıç kayma modülü aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi (Viggiani & Atkinson, 1995)	26
Şekil 2.17: Kil numuneler üzerinde başlangıç kayma modülü aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi (Weiler,1988)	26
Şekil 2.18: Küçük deformasyon seviyesindeki kayma modülü artışı plastisite indisi ilişkisi (Kallioglou ve diğ.,2008'den alınmıştır.).....	27
Şekil 2.19: Killi zeminlerde gerilme durumu ve geçmişi- başlangıç Sönümü ilişkisi (Kokusho ve diğ., 1982).....	28
Şekil 2.20: Ortalama efektif gerilme sönüm oranı ilişkisi (Darendeli, 2001).....	28
Şekil 2.21: Başlangıç sönüm oranı Dmin- boşluk oranı ilişkisi (Kallioglou ve diğ.,2008)	29
Şekil 2.22: Zemin türünün kayma modülü azalımı ile ilişkisi (Fukutake & Imazu,1986)	30
Şekil 2.23: Farklı isotropik gerilme koşulları altındaki çakıllı kumlu zeminlerin Kayma Modülü ve Sönüm Oranını deformasyona bağlı değişimi (a) %25 çakıl muhtevası (b)%50 çakıl muhtevası (Tanaka ve diğ., 1987).....	31
Şekil 2.24: Siltli kumlarda farklı gerilme düzeyinde modül azalımı sönümleme davranışının deformasyon ile değişimi : (a) Kayma modülü-birim deformasyon, (b) Normalize kayma modülü-birim deformasyon; (c) Sönüm oranı-birim deformasyon (Darendeli, 2001)	32
Şekil 2.25: Toyura kumu boşluk oranu- zemin dinamik özellikleri değişimi (Kokusho, 1980)	33
Şekil 2.26: Tane dağılımı ve zemin dinamik özellikleri ilişkisi (Wichtmann & Triantafyllidis,2005)	34
Şekil 2.27: Literatürdeki bazı killerin kayma modülü azalım eğrileri	35
Şekil 2.28: Plastisite ile birlikte modül azalımın değişimi (Zen, 1978).....	35
Şekil 2.29: Plastisite indisinin ince taneli zeminleri sönüm oranı üzerindeki etkisi (Vucetic & Dobry,1991)	36
Şekil 2.30: Toyoura Kumu için önerilen eğri takımı (Iwasaki ve diğ., 1978)	45
Şekil 2.31: Toyoura Kumu için önerilen eğri takımı (Kokusho,1980)	45

Şekil 2.32: Doğal kumlar için önerilen ortalama ve sınır eğriler (Seed, 1986)	46
Şekil 2.33: D-log(G/Gmaks) ilişkisi (Hwang,1997)	49
Şekil 2.34: Kumların monotonik yükleme altında rijitlik değişimi (Georgiannou & Tsomokos, 2008).....	50
Şekil 2.35: İri taneli zeminlerde yükleme hızına bağlı rijitlik değişimi (Lo Presti ve diğ.,1993)	50
Şekil 2.36: İnce taneli zeminlerde yükleme hızı- rijitlik değişimi (Hicher ,1996)	51
Şekil 2.37: Yükleme hızı-zemin dinamik özellikleri (Shibuya ve diğ. ,1995).....	51
Şekil 2.38: Vardanega ve Bolton tarafından kullanılan deney eğrileri (2013)	52
Şekil 3.1: GetData Graph Digitizer ekran görüntüsü ve verilerin işlenmesi	55
Şekil 3.2:GetData Graph Digitizer ekran görüntüsünün sayısallaştırılması, Excel çalışma sayfasına veri girişi	55
Şekil 3.3: Veri birleştirmede kullanılan Matlab kodu	56
Şekil 3.4: Veritabanı için oluşturulan excel dosyası	57
Şekil 3.5: 454 deney ile elde edilen veritabanı eğrileri (Oztoprak & Bolton,2013)	58
Şekil 3.6: Quiou Kumu için eğri geçirme (Lo Presti ve diğ.,1995)	60
Şekil 3.8: Gmaks (G0)- Zemin parametreleri arası ilişkiler	64
Şekil 3.9: Başlangıç modül denkleminde kullanılması gereken boşluk oranı fonksiyonun seçimi	65
Şekil 3.10: Kayma modülünün ortalama efektif gerilmeye bağlı değişimi : (a) $\gamma = \% 0.0001$ (186 veri); (b) $\gamma = \% 0.001$ (412 veri); (c) $\gamma = \%0.01$ (523 veri) ; (d) $\gamma = \% 0.1$ (523 veri); (e) $\gamma = \% 1$ (153 veri) ; (f) $\gamma = \% 10$ (8 veri)	66
Şekil 3.11: (a) Veritabanı sınır ve ortalama eğrileri (b) Eğriler ve hiperbol parametreleri	66
Şekil 3.12: $A(\gamma)$ ve $m(\gamma)$ katsayılarının iki farklı eğri takımı ile kalibrasyonu	67
Şekil 3.13: Farklı gerilme seviyelerinde $A(\gamma)$ ve $m(\gamma)$ katsayılarının kalibrasyonu	67
Şekil 3.14: Referans deformasyon ve p'/p_a ilişkisi:	68
Şekil 3.15: Elastik eşik deformasyonu (γ_e) ve referans birim deformasyon (γ_r) ilişkisi	68
Şekil 3.16: γ_r ve a parametrelerini veritabanının her eğrisi için bulan MATLAB kodu	69

Şekil 3.17: Veritabanında bulunan farklı karakteristikteki eğrilerin hiperbol ile çakıştırılması	70
Şekil 3.18: AKO =1 olan killerde Plastisite Indisi, gerime ve Referans kayma deformasyonu ilişkisi	71
Şekil 3.19: AKO=2-4 arası olan killerde Plastisite Indisi, gerilme ve ref. kayma deformasyonu ilişkisi	71
Şekil 3.20: Mavi Boston Kilinde e_0 - γ_r ilişkisi	72
Şekil 3.21: Excel içerisindeki Solver Veri alt programı	73
Şekil 3.22: Granuler zeminler için oluşturulan veritabanına ait sayısal veriler	77
Şekil 3.23: Granüler zeminlerde D_{min} ve zemin özellikleri ilişkisi	78
Şekil 3.24: Granüler zeminlerde kayma modülü azalım eğrisinden sönüm eğrisine geçiş	79
Şekil 3.25: Kohezyonlu zeminler için oluşturulan veritabanına ait sayısal veriler.....	80
Şekil 3.26: Kohezyonlu Zeminlerde D_{min} ve zemin özellikleri ilişkisi.....	81
Şekil 3.27: İnce taneli zeminlerde kayma modülü azalım eğrisinden sönüm eğrisine geçiş	82
Şekil 3.28: Rezonant kolon numunesi ve uygulanan tork (solda), numuneye ait serbest cisim diyagramı.....	84
Şekil 3.29: Logaritmik azalım ile sönüm davranışı	86
Şekil 3.30: Yarı Güç Bant Genişliği ile Sönüm oranı hesaplanması	87
Şekil 3.31: Iso Kumu İndeks özellikleri ve tane dağılım eğrisi	88
Şekil 3.32: Toyoura Kumu İndeks özellikleri ve tane dağılım eğrisi	88
Şekil 3.33: Lut Gölü tabanı CH kil (solda); kaolin	88
Şekil 3.34: Kaolin bulamacın 50 kPa gerilme altında konsolide edilmesi.....	89
Şekil 3.35: Numune boyutlarının ölçülmesi	90
Şekil 3.36: Rezonant kolon deneyi maksimum genlik-frekans grafiği.....	91
Şekil 3.37: Logaritmik azalım yöntemi ile sönüm oranının hesaplanması	91
Şekil 3.38: Burulmalı üç eksenli deney sonunda kayma gerilmesi-kayma deformasyonu eğrisi.....	91
Şekil 3.39: Laboratuvarda yapılan CD deneyleri (Pham,2005)	94

Şekil 3.40: Yumuşamalı-Pekleşmeli Mohr Coulomb modelin kayma modülü azalım denklemleri ile güncellenmesi ve akma öncesi doğrusal davranışın değişimi.....	94
Şekil 3.41: İdealize zemin profili ve Kayma Dalgası Hızı-derinlik profili.....	96
Şekil 3.42: Analizlerde kullanılan deprem kaydı.....	96
Şekil 3.43: Sönümleme davranışının bir cut-off strain ile sınırlandırılması.....	97
Şekil 3.44: Zemin dinamik özelliklerinin girildiği EERA sayfası.....	97
Şekil 4.1: Butik veritabanından elde edilen referans birim deformasyon- hız oranı ilişkisi.....	99
Şekil 4.2: Butik veritabanından elde edilen referans eğrilik katsayısı- hız oranı ilişkisi.....	99
Şekil 4.4: İri taneli zeminlerde ölçülen ve hesaplanan başlangıç sönümü.....	101
Şekil 4.5: Başlangıç rijitliği formülü ile literatürdeki ölçülen değerlerin karşılaştırılması.....	102
Şekil 4.6: Referans kayma deformasyonu için veritabanından elde edilen denklemin performansı.....	103
Şekil 4.7: Eğrilik katsayısı için önerilen iki farklı ifadenin karşılaştırılması.....	103
Şekil 4.8: Referans birim kayma deformasyonu-deformasyon hızı ilişkisi.....	104
Şekil 4.9: Eğrilik-deformasyon hızı ilişkisi.....	104
Şekil 4.10: Önerilen eğrilerin literatürdeki deney verileri ile karşılaştırılması.....	105
Şekil 4.11: İnce taneli zeminler için önerilen Dmin denkleminin gerçek deney ölçümleri ile karşılaştırılması (331 adet deney verisi ile ilişki kurulmuştur).....	106
Şekil 4.12: Önerilen rijitlik azalımı modelinin literatürdeki deneyler ile karşılaştırılması.....	107
Şekil 4.13: Önerilen rijitlik azalımı modelinin literatürdeki deneyler ile karşılaştırılması (Devam).....	108
Şekil 4.14: İnce taneli zeminler için önerilen sönüm oranı artım eğrisinin literatür deneyleri ile karşılaştırılması.....	109
Şekil 4.15: İnce taneli zeminler için önerilen sönüm oranı artım eğrisinin literatür deneyleri ile karşılaştırılması (Devam).....	110
Şekil 4.16: Granüler zeminler için önerilen sönüm oranını tahmin edebilen eğrinin literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	111
Şekil 4.17: Granüler zeminler için önerilen sönüm oranını tahmin edebilen eğrinin literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	112

Şekil 4.17: (Devamı) Granüler zeminler için önerilen sönüm oranını tahmin edebilen eğrinin literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılması	113
Şekil 4.19: ISO kumu üzerinde yapılan deneylerden elde edilen modül azalımı ve önerilen hiperbol denklemlerinin karşılaştırılması	114
Şekil 4.20: Toyoura Kumu üzerinde yapılan RC deneyi ve literatürde benzer koşullarda yapılan çalışmalar ile karşılaştırılması	114
Şekil 4.21: Kaolin bulamacı üzerinde farklı gerilme koşullarında yapılan RC deneyi sonuçları ve önerilen model	115
Şekil 4.22: Örselenmemiş Lut gölü numuneleri üzerinde yapılan RC kolon deneyi sonuçları ve önerilen hiperbol model ile karşılaştırılması	115
Şekil 4.23: ISO kumu kayma gerilmesi-birim deformasyonu eğrisi	116
Şekil 4.24: Deformasyon hızının kayma modülü azalımına etkisi	116
Şekil 4.25: Kaolin kilinde farklı frekanslardaki burulma deneylerinin gerilme-deformasyon ilişkisi	117
Şekil 4.26: Kaolin kilinde deformasyon hızının rijitlik azalımına etkisi	117
Şekil 4.27: Deney başı ve sonunda modelin hesapladığı modüller(Çevre Basıncı : 22 kPa)	119
Şekil 4.28: Önerilen rijitlik azalımı hiperbol modeli ile üç eksenli deneyin modellenmesi	119
Şekil 4.29: Farklı yazılım ve rijitlik azalımı denklemleri ile 1 boyutlu saha tepki analizi	120
Şekil Ek. 1: Saha tepki analizi için kullanılan zemin profilinin orijinal hali (Stewart & Stewart, 1997)	140
Şekil Ek. 2: Saha tepki analizi için Plaxis 2019'da tanımlanan zemin profili.....	141

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: Örselenmemiş zeminlerde başlangıç sönüm oranı (D)-boşluk oranı ilişkisi (Hardin & Drnevich,1972b).....	19
Tablo 2.2: Sönüm oranına etkiyen zemin özellikleri ve etki dereceleri (Hardin &Drnevich,1972a)	19
Tablo 2.3: Zemin numuneler ve indeks özellikleri (Wichtmann & Triantafyllidis,2005)	34
Tablo 2.4: Dinamik Zemin Özelliklerine Etkiyen Parametreler ve Etki Dereceleri (Hardin & Drnevich,1972).....	37
Tablo 2.5: Temiz kumlar ve Çakıl zeminler için başlangıç kayma modülü (G ₀) eşitlikleri (Benz, 2006).....	39
Tablo 2.6: Temiz kumlar ve Çakıl zeminler için K ₂ değerleri (Seed ve diğ.,1986)	39
Tablo 2.7: K katsayısı ve PI ilişkisi (Hardin & Drnevich , 1968)	41
Tablo 2.8: Farklı tip killerde başlangıç kayma modülü için katsayılar (Weiler, 1988).....	42
Tablo 2.9: Killerde başlangıç kayma modülü için denklem 2.23'e göre katsayılar (Benz T. , 2006)	43
Tablo 3.1: Veritabanlarının oluşturulduğu yayın ve sayısallaştırılan eğri sayıları.....	56
Tablo 3.2: Hız düzeltmesi için oluşturulan özel veritabanında bulunan referanslar	60
Tablo 3.3: Geoteknik Mühendisliği problemleri için önerilen tipik deformasyon hızları (Quinn, 2013).....	62
Tablo 3.4: İnce taneli zeminlerde deformasyon hızı rijitlik azalımı ilişkisinin incelendiği veritabanı.....	74
Tablo 3.4 (Devam): İnce taneli zeminlerde deformasyon hızı rijitlik azalımı ilişkisinin incelendiği veritabanı.....	75
Tablo 3.5: Deney programı.....	92
Tablo 4.1: Deformasyon hızı düzeltmesi yapılmış modifiye hiperbol parametreleri.....	98
Tablo 4.2: Modifiye hiperbol denklemi parametreleri için önerilen denklemler	102

Tablo 4.3: Deformasyon hızı düzeltilmesi yapılan rijitlik azalımı parametreleri.....	104
Tablo Ek. 1: Granüler Zeminlerde sönüm oranı için oluşturulan deneysel veritabanı özeti.....	134
Tablo Ek. 2: Granüler Zeminlerde sönüm oranı için oluşturulan deneysel veritabanı özeti(Devamı)	135
Tablo Ek. 3: Kohezyonlu Zeminlerde sönüm oranı için oluşturulan deneysel veritabanı özeti.....	136
Tablo Ek. 4: Kohezyonlu Zeminlerde sönüm oranı için oluşturulan deneysel veritabanı özeti (Devamı).....	137
Tablo Ek. 5: Kohezyonlu Zeminlerde kayma modülü azalımı için oluşturulan deneysel veritabanı özeti	138
Tablo Ek. 6: Kohezyonlu Zeminlerde kayma modülü azalımı için oluşturulan deneysel veritabanı özeti(Devam).....	139
Tablo Ek. 7: Plaxis 2019’da kullanılan malzeme parametreleri	142
Tablo Ek. 8: Plaxis 2019’da kullanılan malzeme parametreleri (Devam)	143

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
C	: Rayleigh sönüm oranı
D	: Sönüm oranı
D_{maks}	: Maksimum sönüm oranı
D_{min}	: Minimum sönüm oranı
D_R	: Relatif Sıklık
D₅₀	: Ortalama Çap
E	: Elastitiste Modülü
e_{max}	: En büyük boşluk oranı
e_{min}	: En küçük boşluk oranı
e₀	: Başlangıç boşluk oranı
f	: Frekans
G	: Kayma modülü
G_{maks}	: Maksimum kayma modülü
G₀	: Başlangıç kayma modülü
G_s	: Sekant Kayma Modülü
g	: Yerçekimi ivmesi
I_D	: Relatif sıklık
I_P	: Plastisite Indisi
K	: Rijitlik matrisi
LL	: Likit limit
M	: Kütle matrisi
N	: Çevrim sayısı
N_G	: Modül azalım sabiti
N_{1,60}	: Düzeltilmiş SPT vuruş sayısı
p_a	: Atmosferik basınç
p_r'	: Referans gerilme
p₀'	: Ortalama efektif gerilme
PI	: Plastisite İndisi

PL	: Plastik Limit
R₀	: Aşırı konsolidasyon derecesi
r	: Deformasyon hızının rezonant kolon deformasyon hızına oranı
S	: Doygunluk Derecesi
S_a	: Spektral ivme
T	: Tork
U_C	: Ünifotmluk katsayısı
V_P	: Basınç dalgası hızı
V_S	: Kayma dalgası hızı
w	: Doğal su muhtevası
α	: Kütle orantılı sönüm sabiti
β	: Rijitlik orantılı sönüm sabiti
γ̇	: Deformasyon hızı
γ_c	: Tekrarlı deneyde ölçülen birim kayma deformasyonu
γ_e	: Elastik eşik birim kayma deformasyonu
γ_r	: Referans kayma birim deformasyonu
ρ	: Zemin birim hacim ağırlığının yerçekimi ivmesine oranı
σ₀'	: Ortaama efektif gerilme
σ₃'	: Çevre basıncı
τ	: Kayma gerilmesi
ω_i	: Açısız frekans

Kısaltmalar

Açıklama

AKO	: Aşırı konsolidasyon oranı
atm	: Basınç birimi, atmosfer
BE	: Bender Eleman Deneyi
CTX	: Dinamik üç eksenli deney
DSDSS	: Dinamik direkt kesme deneyi
frq	: Yükleme frekansı
Hz.	: Hertz
kPa	: Kilopaskal
MPa	: Megapaskal
psi	: inçkareye düşen basınç birimi
RC	: Rezonant kolon deneyi

RCTS : Rezonant kolon ve burulmalı üç eksenli deney seti
s : Saniye
TS : Dinamik üç eksenli burulma deneyi
TX : Üç eksenli monotonik deney



ÖZET

ZEMİNLERİN RİJİTLİK VE SÖNÜMLENME DAVRANIŞININ TANIMLANMASI VE NÜMERİK ANALİZLERDE KULLANILMASI

DOKTORA TEZİ

Sinan SARGİN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

II. Danışman : Doç. Dr. D. Volkan OKUR

Geoteknik deprem mühendisliğinde, deprem süresince açığa çıkan enerjinin basınç ve kayma dalgaları ile taban kayasından yüzeye transfer olduğu bilinmektedir. Bu dalgaların yüzeyde ve/veya zemin tabakası içerisinde oluşturduğu dinamik gerilmeler zeminde her düzeyde deformasyona sebep olmaktadır. Anakayadan yüzeye düşey olarak tek boyutlu yayıldığı kabul edilen kayma dalgalarının zeminde oluşturduğu deformasyon ve etki değişkenlik gösterebilir; çünkü zemin tabakaları depremle açığa çıkan enerjinin yüzeye kadar olan hareketinde filtre görevi görürler; bazı frekanstaki dalgaların enerjisi sönmelenirken; bazılarında anakayadaki enerji ya korunur ya da zemin büyütmesi neticesinde aynı kalır. Bu durumun oluşmasındaki en önemli sebep, sismik dalgaların zemin tabakası içerisinde yüzeye doğru hareket ederken; geçtikleri zeminlerin rijitlik ve sönmleme davranışlarıdır.

Özellikle geoteknik deprem mühendisliğinde yapılan sahaya özel tepki analizlerinde kullanılan, nümerik yöntemleri baz alan bilgisayar yazılımları anakaya ve yüzey arasında ardıllanmış zeminlerin gerilme deformasyon davranışı ile sönmleme davranışının tanımlanmasına ihtiyaç duyarlar. Zeminlerin dinamik yükler altında davranışını belirleyen iki temel parametre veya karakteristik özellik rijitlik, kayma modülü (G) ve sönm oranıdır (D). Bu parametrelerin

başlangıç değerlerinin bilinmesinin yanı sıra geoteknik problemlerde meydana gelen deformasyon düzeylerinde değişimlerinin belirlenmesi çok önemlidir.

Son yıllarda, mühendisler tarafından statik problemlerin çözümünde yapılan tasarımlarda benimsenen ve popülaritesi gün geçtikçe artan "deformasyona bağlı tasarım" ilkesi; rijitlik bir diğer adı ile zemin modülünün küçük deformasyon seviyelerinde değişiminin tanımlanmasını zorunlu hale getirmiş ve geoteknik problemlerin daha ekonomik ve efektif çözümlenmesine olanak sağlamıştır. Uygulamadaki mühendisler ve araştırmacılar, teknolojik gelişmeler neticesinde günlük hayatın bir parçası olan güçlü bilgisayarlar ile tasarımlarını modelleyebilmekte ve performansları hakkında bilgi sahibi olabilmektedirler. Bu noktada mühendis ve araştırmacıları sıkıntıya sokan en önemli husus doğru ve gerçeğe yakın zemin parametrelerini seçmek ve zeminlerin gerilme deformasyon davranışını tanımlamaktır. Bu amaçla, araştırmacılar 1930'lu yılların sonundan itibaren, dinamik zemin özellikleri olan kayma modülü (G) ve sönüm oranının belirlemek için arazi ve laboratuvar deneyleri tasarlamışlar ve literatüre geniş bir zemin yelpazesi için deneysel sonuç kazandırmışlardır. Rezonant kolon, üç eksenli burulma, dinamik üç eksenli, dinamik basit kesme ve bender eleman deneyleri bu çalışmaların vazgeçilmezi olmuş; çok küçük deformasyon seviyelerinden büyük deformasyona kadar geniş bir aralıkta zemin özelliklerini tanımlamaya yardımcı olmuşlardır.

Ancak bu cihazların hassas ve kullanıcı hatasına açık oluşu, kolay temin edilememesi, kalibrasyonu gibi zorlukları mühendis ve araştırmacıları dinamik zemin özelliklerinin tahmini kolaylaştıran amprik ifadeler arayışına sevk etmiştir. Bu çalışmanın başlıca amacı, ince ve iri taneli zeminlerde sismik ve statik yükler altında gerilme deformasyon davranışını doğrudan etkileyen rijitlik ve sönümleme değişimini zeminin maruz kaldığı gerilme koşullarına, yükleme hızına ve indeks özelliklerine bağlı olan, kullanımı pratik yeni eşitlikler belirlemektir. Belirlenen bu eşitliklerin, program kullanıcıları açısından kolay anlaşılabilir olması için sade, çoğu mühendisler ve araştırmacının hakim olduğu zemin özelliklerine dayandırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, 1960'lı yıllardan günümüze değin laboratuvarında yapılan ve zeminlerin dinamik özelliklerinin tayin edildiği laboratuvar deneylerinin sonuçlarına dayalı literatür çalışmaları taranmış, derlenmiş ve bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanında, istatistiksel çoklu regresyon analizleri yapılmış ve zeminlerin dinamik özellikleri, başlangıç gerilme durumu, deformasyon hızı ve indeks özellikleri ile ilişkilendirilmiştir.

Elde edilen eşitlikler, RC ve TS deneylerini içeren butik bir laboratuvar çalışması ile doğrulanmaya çalışılmıştır. Ayrıca, elde edilen eşitliklerin güvenilirlik ve doğruluğu literatürde daha önce sunulan deneysel çalışmaların sonuçları ile sınanmıştır. Doğruluğu hem deneysel hem de literatür karşılaştırması ile kanıtlanan denklemler; sonlu elemanlar, sonlu farklar ve tek boyutlu dalga yayılımı analiz yapabilen bilgisayar yazılımlarındaki modellere dışarıdan eklenerek, mühendislik problemlerinde kullanımlarının sonuçlara etkisi tartışılmıştır.

Şubat 2019, 167 sayfa.

Anahtar kelimeler: Sönümleme, rijitlik, zemin tepki analizi, laboratuvar deneyleri, deprem, deformasyon hızı

SUMMARY

DETERMINATION OF STIFFNESS AND DAMPING BEHAVIOUR OF SOILS AND THEIR IMPLEMENTATION IN NUMERICAL MODELING

Ph.D. THESIS

Sinan SARĞIN

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. D.Volkan OKUR

In geotechnical earthquake engineering, it is well known that energy released during the earthquake is transferred from bedrock to surface by compression (P-wave) and shear (S-wave) waves. The dynamic stresses occurred because of these waves on the soil surface or in the soil layers cause shear strains (γ) at all levels. The deformation and effect of the shear waves formed on the soil from the bedrock to the surface can vary because soil deposits act like a filter that amplifies energy at some frequency while attenuating it at others. The main reason for this situation is that the seismic shear waves move towards the surface within soil layer; the stiffness and damping behavior of the matrix soils which they pass through.

Softwares and analytical tools, which are used especially in geotechnical earthquake engineering for site specific response analysis, are based on numerical methods such as finite element (FEM) or finite difference. The two essential parameters or characteristics that determine the behavior of soils under dynamic stress are the stiffness or shear modulus (G) and

the damping ratio (D). The values of these parameters at any strain levels or initial condition are not only required but also their evolution by straining up has great importance.

Recently, the principle of performance-based design accepted by engineers who design and propose solutions for both dynamic and static problems in geotechnical engineering has made it necessary to define or select the values of moduli of soils in small to medium strain levels. Geotechnical problems have been handled economical and effectively. Engineers and researchers society are able to model their designs and experiments with computers which has powerful processors and memories and have judgement about their performance. At this point, the most challenging issues that puts them in trouble is to choose the accurate and related with soil parameters in order to defining the stress-strain behaviour of the soils. For this purpose, engineers have endeavored to develop a series of field and laboratory instruments that can measure the shear modulus and damping ratio at all shear strain levels since end of the 1930s. These efforts have provided a large of laboratory test data for statistical analyses. Resonant column, torsional shear, cyclic triaxial, cyclic simple shear and bender element tests have become indispensable for determining dynamic properties of soils for a wide strain range.

However, these laboratory tools are sensitive and open to the user error, have difficulties of sampling and calibration, performing these laboratory tests usually seems not practical. So that, some studies in geotechnical engineering have focused on developing the empirical equations of the dynamic soil properties. Regarding to this, the main purpose of this study is to propose new empirical expressions, depending on the stress condition, strain rate, index properties of both fine and coarse grained soils, to define stress deformation behavior more accurately. In this respect, in order to collect all available shear modulus degradation and damping ratio curves of both static and dynamic tests from 1960's to date, a wide trawl was done through the literature. These curves were digitised to create a database. By using basic multivariable statistical tools, regression analyzes were performed in order to obtain correlations with the initial stress state, strain rate and index properties of soils.

The proposed expressions have been tried to be verified by a unique laboratory study involving resonant column (RC) and torsional shear (TS) tests. In addition to this, the accuracy of new equations were tested with the results of experimental studies previously presented in the literature. After that, success and accuracy of new expression family have also been discussed by modeling of frequently encountered geotechnical problems both in static and dynamic loading.

February 2019, 167 pages.

Keywords: Damping, Stiffness, Site response analysis, Laboratory Tests, Earthquake, strain rate

1 GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinin ilgi alanı içinde kalan birçok problemin çözümünde veya uygulamanın yapılmasında zeminlerin rijitlik-birim deformasyon ilişkisinin belirlenmesine muhakkak ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, zemin mekaniğinin bir başka alt dalı olan geoteknik deprem mühendisliğinde, deformasyon seviyesini ve buna bağlı olarak rijitlik azalımının belirlenmesinin yanında, sönümlenme davranışının belirlenmesi de çok önemlidir. yüksek genlikli kayma birim deformasyon seviyelerinde zemin tabakalarının rijitlik azalımı ve sönümlenme davranışı sahanın sismik tepki davranışının hesaplanmasında önemli birer araçtır.

Depremler sırasında oluşan kuvvetli yer hareketlerinin neticesinde yer kabuğunda herhangi bir derinlikte bulunan faydan yüzeye doğru hareket eden sismik dalgalar oluşur. Fay yırtılmasının tipi, dalgaların yüzeye ulaşırken izledikleri yol ve yüzeye yakın derinliklerdeki jeolojik yapı yer sarsıntısının oluşturacağı hasar tipini ve derecesini çok etkilemektedir. 1985 Meksika, 1988 Ermenistan, 1989 Lome Prieta, 1999 Kocaeli, 2015 Tohoku depremleri araştırmacılara yüzeye yakın zemin ve kayaların davranışının adı geçen depremlerin bölgesel olarak yıkıcılıklarını etkilediğini göstermiştir. Aletsel ve gözlemsel olarak ölçümlerin yapıldığı bu sahalarda deprem sonrası ortaya konan araştırmaların sonuçlarından birisi de yumuşak zeminler üzerindeki sahalarda deprem dalgalarının genliği ve ivme değerleri belli frekanslarda yüzeyde büyümesiydi. Zemin büyütmesi olarak bilinen bu kavram ilgilenilen sahanın yüzeye yakın zemin tabakalanmasının gerilme deformasyon davranışının bir sonucudur. Yerel zemin özelliklerinin etkilediği ve depremin yıkıcılığını arttıran bir diğer gözlemse sarsıntı süresinin taban kayasına göre hatırısayılır bir şekilde uzamasıdır.

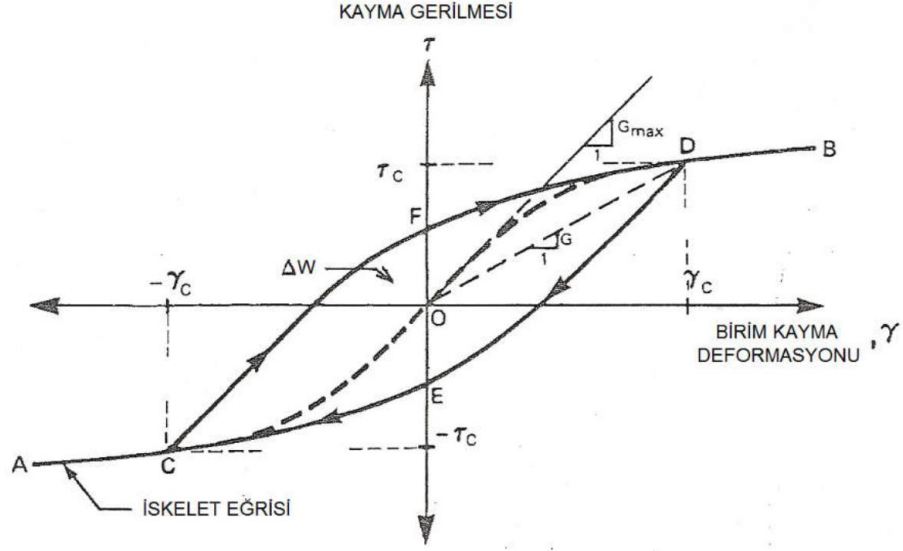
Kuvvetli yer hareketlerine karşı zemin tepki analizlerinin gerçeğe yakın yapılabilmesi için, zemin ve/veya taban kayası malzemesinin davranışının küçük, orta ve büyük deformasyon seviyelerinde yapısal bünye modelleri veya eşitlikleri ile doğru tanımlanması gerekmektedir. Bahsedilen bünye modelleri zeminlere ait, arazi ve/veya laboratuvar deneyleri ile tespit edilebilen parametre ve katsayılar içerebilmektedir. Geoteknik deprem mühendisliğinde, tekrarlı dinamik yükler ve bu yüklerin meydana getirdiği problemler, mukavemet kaybı, yüklemeye maruz kalan zeminin davranışı birim deformasyonun

magnitüdüne göre farklılık göstermektedir bu nedenle gerilme deformasyon davranışının bünye modelleri ile problemin karakteristiğine uygun bünye modelleri ile analizi son derece faydalıdır. Örneğin, zeminde özellikle sismik etkiler neticesinde oluşan titreşimler ile kayma ve sıkışma dalgalarının yayılımının meydana getirdiği problemler küçük deformasyonlu problemler olarak adlandırılırken; sıvılaşma ve zemin bloğunun stabilitesi orta ve büyük deformasyonlu problemler olarak sınıflandırılabilir. Aynı zamanda dinamik yükler altında zemin ortamında oluşan deformasyonlar ve göçme mekanizmaları zeminin tekrarlı yükleme koşulları altında göstereceği ve genel olarak zeminin mekanik özellikleriyle kontrol edilen davranış ile doğrudan ilişkilidir (Şekil 1.1). Zeminin tekrarlı yükler altında davranışının tahmin edilmesi ve modellenmesinde başvurulan parametrelere zeminin dinamik özellikleri denir. Literatürde yaygın olarak incelenen bu parametreler; kayma modülü (G), sönüm oranı (D)'dır.

Kayma Birim Def.	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	Küçük Deformasyon	Orta Deformasyon		Büyük Deformasyon	Göçme Deformasyonu	
Elastik	■					
Elasto-plastik			■			
Göçme					■	
Model	Lineer Elastik Model		Visko-elastik Model		Yükleme geçmişini takip edilen model	
Tepki Analizi Metodu	Lineer Yöntem		Eşdeğer Lineer Yöntem		Adım adım integrasyon yöntemi	

Şekil 1.1: Deformasyon düzeyine göre zemin davranışını ifade eden modeller (Ishihara, 1996)

Kayma modülü (G), zemine etkileyen kayma gerilmesi (τ) ile bu gerilme sonucunda meydana gelen birim kayma deformasyonunun (γ) oranlanması ile elde edilen bir parametre olup, zeminin kaymaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Etkileyen yükün monotonik olması durumunda kayma gerilmesi ile birim kayma deformasyonu arasındaki ilişki Şekil 1.1'de gösterilen OD eğrisi (ilk yükleme eğrisi) gibi olmaktadır. Bu eğrinin başlangıç tanjant eğimi kayma modülünün maksimum değerini (G_{maks} = Maksimum kayma modülü), orijinden D noktasına çizilen sekantın eğimi ise, bu noktaya denk gelen birim kayma deformasyonu için kayma modülünün azalan değerini (G_s = Sekant kayma modülü) vermektedir.



Şekil 1.2: Birinci yük çevrimi için zemin iskeleti eğrisi (Vucetic & Dobry, 1991)

Zeminler birçok mühendislik malzemesinde olduğu gibi bünyelerine etkiyen dalga hareketlerinin oluşturduğu elastik hareket enerjisini daneler arası sürtünme ile ısı enerjisine çevirirler. Bu enerji dönüşümü esnasında dalga hareketlerinin genliğinde azalma meydana gelmektedir ve bu enerjinin azalımı sönüm olarak nitelendirilmektedir (Kramer S. L., 1996).

Sismik dalgaların etkisinde yapı-zemin etkileşimini incelerken, zeminden yapıya iletilecek yer hareketinin doğru tahmin edilmesi gereklidir. Bu tahminin başarılı olabilmesi için şu üç başlıktaki parametrelerin dikkatlice belirlenmesi gerekmektedir (Darendeli, 2001): kuvvetli yer hareketi parametreleri (maksimum ivme, maksimum hız ve deplasman), frekans içeriği (Fourier spektrumu, tepki spektrumu, hakim periyot) ve süre. Daha önce de belirtildiği gibi yerel zemin koşulları yani dinamik zemin özellikleri (kayma modülü, G , ve sönüm oranı, D ,) tüm bu parametreleri doğrudan etkilemektedir.

Zeminlerin, özellikle de kohezyonlu zeminlerin, rijitlik ve mukavemet değişiminin yükleme hızından oldukça etkilendiği iyi bilinmektedir (Richardson & Whitman, 1963). Geoteknik mühendisliğindeki problemlerde deformasyon hızı çok geniş aralıkta yer almaktadır. Örnek vermek gerekirse, bir dolgu yapısının inşa ve servis ömrü boyunca deformasyon hızının oldukça küçük olması beklenirken, toprak kayması veya kuvvetli yer hareketleri esnasında ortaya çıkan deformasyon hızlarının göreceli olarak çok daha büyük olması tahmin edilmektedir. İnce daneli kohezyonlu zeminlerin yükleme hızına tepkisi drenajlı veya drenajsız olarak değişmektedir. Düşük deformasyon hızlarında drenajlı davranış gözlemlenirken; deprem gibi kısa süreli büyük

deformasyonların olduğu problemlerde davranış drenajsız olmaktadır. İnce daneli zeminlerin drenajsız davranış gösterdiği deformasyon hızı seviyelerinde, ilgin bir şekilde mukavemette artış gözlemlenmiştir. Ayrıca deformasyon hızı arttıkça plastik deformasyona ulaşana kadar zeminlerde rijitlik kaybının daha geç olduğu bilinmektedir.

Dinamik zemin özellikleri 1960'lı yıllardan günümüze değin laboratuvar ortamında yapılan bir takım araştırmalarda yapılan deneyler ile belirlenmektedir [(Seed & Idriss, 1970), (Hardin & Drnevich , 1972a), (Richart F. E., 1975), (Woods, 1978), Kokusho ve diğ., (1982), (Vucetic & Dobry, 1991)].Bu araştırmalar neticesinde, kayma modülü,G,ile sönüm oranının,D,nasıl değiştiğini ve bu parametreleri etkileyen faktörlerin neler olduğu konusunda bilgi birikimini arttırmıştır. Bununla birlikte, elde edilen deneysel veriler ile veritabanları kurulmuş ve dinamik zemin özelliklerini belirlemede faydalı amprik ifadeler literatürde önerilmiş ve uygulamadaki mühendislerin kullanımı sağlanmıştır. Yapılan ilk deneysel çalışmaların yetersiz kısımları yıllar içerisinde revize edilmiş ve böylece yeni ekipmanların tasarımı mümkün olmuştur. Rezonant kolon, dinamik üç eksenli basınç, burulma deneyi, bender eleman ve tekrarlı kesme deneyi ekipmanları hemen hemen her laboratuvarda araştırmacıların her deformasyon seviyesinde dinamik zemin özelliklerinin bulunmasında ve kayma dalgası, V_s , ölçülmesinde sıklıkla kullandıkları cihazlar olmuşlardır.

Bir önceki paragrafta bahsedilen ve geoteknik deprem mühendisliğinde yerel zemin tepki analizlerinde kullanılan normalize kayma modülü-deformasyon ($G/G_{maks}-\log\gamma$) ve sönüm oranı deformasyon ($D-\log\gamma$) ilişkilerinin nümerik olarak modellenmesi bu alanda çalışan araştırmacıların ilgi alanı olmuştur. Bu alanda ilk çalışma Hardin ve Drnevich (1972b) tarafından yapılmış ve her türlü zeminde $G/G_{maks}-\log\gamma$ ile $D-\log\gamma$ ilişkileri hiperbol bir denklem olarak tanımlanmıştır, ayrıca bu çalışmada bazı zemin özelliklerinin, yükleme şartlarının ve zeminin maruz kaldığı gerilme durumunun doğrusal olmayan zemin davranışını nasıl değiştirdiğini ön gören bir tablo sunmuşlardır. Bu çalışmadan etkilenerek yapılan ve günümüzde hala devam eden araştırmalar Hardin ve Drnevich'in genelleştirerek sunduğu sonuçları iyileştirmeye, özelleştirmeye çalışmaktadır. Ancak bu çalışmaların çoğunda deneysel veritabanından elde edilen birçok eğrinin ortalaması sonuç olarak sunulmuştur.

Bu çalışmanın amaçlarından ilki, Öztoprak ve Bolton (2013) tarafından iri taneli zeminler üzerine yapılan araştırmada elde edilen sonuçlarından yola çıkarak deformasyon hızının iri taneli zeminlerin modül azalmasına etkisini incelemektir. Bu nedenle, literatürde farklı kesme

hızları veya frekanslar ile çalışabilen cihazlarla aynı koşullar altındaki aynı tür zemine ait numuneler üzerinde yapılan rijitlik azalımı deneyleri bir araya getirilerek bir butik veritabanı oluşturulmuş ve kesme hızının etkisinin Öztoprak ve Bolton tarafından iri taneli zeminlerin modül azalımı eğrilerinin tahmini için önerilen formüllere nasıl adapte edilebileceği araştırılmıştır. Sonuç olarak, formüller deformasyon veya yükleme hızını göz önünde bulunduracak şekilde güncellenmiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilmeye çalışılan bir diğer sonuç da, literatürde 1970'li yıllardan günümüze kadar laboratuvarında yapılan, ince ve iri taneli zeminlerin dinamik özelliklerini tanımlamayı amaçlayan dinamik üç eksenli, burulmalı ve rezonant kolon deneylerinin sonuçlarını kullanarak geniş kapsamlı bir veri tabanı oluşturularak; ilk olarak bu veri tabanından kohezyonlu zeminlerin başlangıç rijitliği (G_{maks}) ve başlangıç sönüm oranını (D_{min}) tahmin eden ampirik ifadeler elde etmektir. Bu amaçla, zeminin indeks özellikleri ve maruz kaldığı gerilme koşullarına bağlı olarak küçük deformasyon seviyesinde ($\gamma \leq 10^{-5}$) ölçülen dinamik zemin özellikleri arasında istatistiksel korelasyonlar kurulmuş ve sade, anlaşılır denklemler önerilmiştir.

Küçük deformasyon seviyelerinde başlangıç değerleri tanımlanan dinamik zemin özelliklerinin değişimi mercek altına alınmıştır. Oluşturulan veritabanı ile literatürde birçok araştırmacının kayma modülü azalımı için önerdiği hiperbol denklemi eşleştirilmiş ve 3 parametrelilik bu denklemin her bir değişkeni ince taneli zeminler için plastisite indisi (PI), boşluk oranı (e_0) ve aşırı konsolidasyon oranı (AKO) bağlı tanımlanmıştır. Ayrıca zeminin maruz kaldığı gerilme durumunu dikkate almak için ortalama efektif gerilme değeri (p') atmosferik basınç ($p_a = 100$ kPa) ile normalize edilmiş ve denklemlere dahil edilmiştir. Son olarak deformasyon hızının ince taneli zeminlerin modül azalımı üzerindeki etkisi bilindiğinden, tıpkı iri taneli zeminlerde olduğu gibi hız etkisi araştırılmış; hız etkisi dikkate alınmadan elde edilen denklemler ince taneli zeminlerde bir kez daha revize edilmiştir. Sonuç olarak, ince taneli zeminlerde, zemin indeks özelliklerine, gerilme geçmişine, içinde bulunduğu gerilme durumuna ve deformasyon hızına bağlı olarak modifiye hiperbol denklem, istatistiksel çoklu regresyon teknikleri ile üst üste çakıştırılmıştır.

İnce ve iri taneli zeminlerin rijitlik azalımının hiperbol denklemi ile belirlenmesinin ardından, sahaya özel tepki analizleri gibi geoteknik deprem mühendisliğinin çalışma konuları olan dinamik problemlerin analizinde kullanılmak üzere zeminlerin sönümleme davranışının

deformasyonla değişiminin tanımlanması gerekmektedir. Bu tez çalışması ile, sönümlenme davranışı, kayma modülü azalımının tanımlandığı modifiye hiperbolün evrilmesi ile tekrar tanımlanmaya çalışılmıştır. Bununla birlikte, başlangıç sönüm oranı (D_{min}) önerilen ifadeye matematiksel olarak toplama işlemi ile eklenerek, sönüm oranı için elde edilen denklemin daha doğru kullanılması sağlanmıştır.

İstatistiksel çoklu regresyon ile elde edilen denklemlerin deneysel olarak doğrulanması için çok küçük deformasyon seviyelerinden ($\gamma \leq \% 10^{-5}$) orta deformasyon seviyesine ($\gamma \leq \% 1$) kadar rezonant kolon ve üç eksenli burulmalı deneylerini birlikte yapabilen GCTS firmasının TSH-100 model cihazı ile ISO ve Toyoura kumu üzerinde rezonant kolon (RC) ve dinamik burulmalı (TS) deneyleri yapılmıştır. Burulmalı deneylerde burulma için verilen gerilme sabit tutulup; frekans değiştirilerek yükleme hızının kumlu zeminlerin rijitlik azalımı ve sönümlenme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiş ve önerilen denklemlerin doğrulanması sağlanmıştır.

İnce taneli zeminler için önerilen denklemlerin deneysel doğrulanması için, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği geoteknik laboratuvarında bulunan ve indeks özellikleri belirlenen düşük plastisiteli kaolin kili üzerinde RC ve TS deneyleri yapılmış; tıpkı kumlarda olduğu gibi önerilen ampirik ifadelerin doğruluğu tartışılmıştır.

Çalışma kapsamında ele alınan son araştırma ise, deneysel veriler ile kısmen doğrulanan ve deformasyon hızını dikkate alan kayma modülü (rijitlik) azalımı ve sönümlenme davranışı ilişkilerinin pratikte kullanılması durumunda nasıl sonuç verdiğidir. Bu bağlamda, düşük deformasyon hızlarında önerilen denklemlerin performansını test etmek amacıyla bir sonlu farklar yazılımı olan FLAC 3D yazılımında gömülü olarak yer alan deformasyona bağlı yumuşayan-pekleşen Mohr-Coulomb modeli (SHS-MC) tez çalışmasının sonucu olan denklemler ile modifiye edilmeye çalışılmış; kayma mukavemeti parametrelerinin kontrolünde göçmeye kadar olan kısma etki ederek, modelin performansı arttırılmaya çalışılmıştır. Üç eksenli deney modellenerek literatürde verilen gerilme-deformasyon eğrileri yakalanmaya çalışılmıştır.Öte yandan, sahada yüzey ivme ve tepki spekturumunun ölçüldüğü bir vaka incelenmiştir. Bu inceleme kapsamında, bir sonlu elemanlar yazılımı olan PLAXIS 2019 ile “site response” analizi yapılmıştır. Ayrıca aynı problem SHAKE 2000 yazılımı ile modellenmiştir. Son olarak, bir makro eklentili Excel çalışma sayfası olan ve tek boyutlu zemin tepki analizleri için özelleşmiş EERA yazılımına bu çalışma kapsamında önerilen denklemler,

dinamik zemin özellikleri sekmesinde kullanılarak tepki analizleri yapılmış ve performansları incelenmiştir. Sonuçlar, modellerin kullanımı açısından oldukça umut verici olmuştur.

1.1. TEZİN BÖLÜMLERİ VE YAPISI

Bu tez çalışması 5 ana bölümden oluşmaktadır;

İlk bölümde tezin amacı ve elde edilenler ile ilgili bilgiler giriş olarak verilerek problem tanıtılmıştır. Kısaca yöntemlerden bahsedilerek sonuç olarak elde edilen ifadelerin pratikte hangi problemlerde çözüleceği anlatılmıştır.

Bölüm 2’de tez çalışmasının konusu kapsamında bugüne kadar yapılmış literatür çalışmaları derlenmiştir. Bu bölümde, ilk olarak iri ve ince taneli zeminlerin başlangıç rijitliği ve sönümleme davranışına etki eden parametreleri ortaya koyan çalışmalar sunulmuştur. Daha sonra, deformasyona bağlı rijitlik azalımı ve sönümleme davranışının incelendiği çalışmalar ele alınmış ve bu çalışmalarda sunulan sonuçlar tartışılmıştır. Ayrıca, tüm zemin türlerinde kayma modülü azalımı ve deformasyon ilişkisine etki eden parametreler ile ilgili sonuçlar aktarılmıştır. Literatür taramasından aktarılan bir diğer bölüm ise, bu çalışmaya benzer şekilde deneysel verileri kullanarak ampirik bağlantılar önerilen araştırmaların sonuçları olmuştur. Bu ana başlık altında literatür ile ilgili son olarak, deformasyon hızının rijitlik ve sönümleme davranışına etkisinin incelendiği çalışmalara değinilmiştir.

Tezin bir sonraki bölümünde malzeme ve yöntem ana başlığı altında rijitlik ve sönümleme davranışının tanımlanması için literatürdeki verilerin nasıl derlendiği ve sınıflandırıldığı anlatılmıştır. İstatistiksel çalışma için hazırlanan Excel sayfaları ve Matlab kodları verilmiştir. Ayrıca Matlab R2016 versiyonunda gömülü olarak bulunan “curve fitting” ve MS Office Excel 2016 içinde yer alan “Solver” uygulamaları anlatılmış ve tezde nasıl kullanıldığı özetlenmiştir. Bununla birlikte, başlangıç kayma modülü, sönüm oranı ve her ikisinin deformasyona bağlı değişiminin bulunması ile ilgili çoklu regresyonun nasıl kullanıldığı gösterilmiştir.

Bu bölümde ayrıca, tez kapsamında yapılan RC ve TS deneyleri detaylı bir biçimde anlatılmıştır. Test edilen malzemenin tanıtılması, deneysel prosedür bu kısımda aktarılmıştır. Son olarak testlerin yapıldığı gerilme durumu ve yükleme hızının gösterildiği tabloda deneysel program özetlenmiştir.

Nümerik analizler ile önerilen denklemlerin doğrulanması için takip edilen prosedür 3. bölümün son alt başlığında anlatılmıştır. Kullanılan yazılımlar ve bu yazılımlarda seçilen bünye modelleri, girdi parametrelerinin seçimi ve hesaplara nasıl dahil edildiği tezin bu bölümünde anlatılmıştır.

Tezin “Bulgular” ana başlıklı 4. bölümünde, bir önceki metod ve prosedür ile elde edilen rijitlik azalımı ve sönüm denklemleri tanıtılmış, bu denklemler ile literatürdeki deneysel çalışmaların kalibrasyon sonuçları gösterilmiş; ayrıca deneysel sonuçlar ile önerilen denklem sonuçlarının uyumu gösterilmiştir. Ayrıca, literatürden seçilen statik ve dinamik problemlerde önerilen denklemler ile analiz yapmaya uygun vakalarda elde edilen ölçümlerin önerilen yöntem ile uyumu gösterilmiştir.

Son bölümde sonuçlar ve bulgular özetlenmiş; genel olarak elde edilen veriler tartışılmıştır. Zeminlerde kayma modülü azalımı ve sönümleme davranışının inceleneceği sonraki çalışmalar için potansiyel konu başlıklarına değinilmiştir.

2 GENEL KISIMLAR

Bu bölümde, zeminlerin dinamik özellikleri ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Dinamik zemin özelliklerinin sabit ve zemin davranışının doğrusal elastik olduğu deformasyon seviyesindeki başlangıç değerlerinin hangi faktörlerden etkilendiği, bununla birlikte rijitlik azalımı ve sönümlenme davranışına orta ve yüksek deformasyon seviyelerinde hangi zemin özelliklerinin etki ettiği literatürdeki çalışmaların özetlenmesi ile anlatılmıştır. Kayma modülü (rijitlik) azalımı ve sönümlenme davranışını amprik ifadeler ile tahmin etmeye yönelik yapılan çalışmalar ve sonuçları bu bölümde incelenmiştir. Son olarak spesifik olarak deformasyon hızının zeminlerin dinamik özelliklerinin değişimine etkisini inceleyen çalışmalardan bahsedilmiştir.

2.1. İRİ TANELİ ZEMİNLERİN BAŞLANGIÇ RİJİTLİĞİ VE SÖNÜMLEME DAVRANIŞI

Zeminin tekrarlı yükler altında davranışının tahmin edilmesi ve modellenmesinde başvurulan parametrelere zeminin dinamik özellikleri denir. Literatürde yaygın olarak incelenen bu parametreler; kayma modülü (G_0 veya G_{maks}), sönüm oranı (D)' dir. Bu parametrelerin başlangıç değerleri geoteknik deprem mühendisliği problemlerinin analizinde çoğu zaman yetersiz kalmakta ve deformasyona bağlı değişimleri ($G/G_{maks}-\log\gamma$; $D-\log\gamma$) incelenmektedir. Geoteknik mühendisliği problemlerinin nümerik çözümlerinde zeminlerin rijitlik-deformasyon davranışının tespit edilmesi gereklidir. Özellikle ince daneli zeminler için drenajsız yüklemeye örnek olabilecek deprem durumunda, başlangıç kayma modülünün bilinmesi ve deformasyona bağlı olarak azalım formunun doğru tahmin edilmesi, incelenen sahanın deprem tepki analizlerinin sağlıklı sonuçlar vermesi açısından son derece önemlidir.

2.1.1. İri Taneli Zeminlerde Başlangıç Kayma Modülü ($G_{maks}-G_0$)

Zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışını belirlemede son derece önemli olan rijitlik(kayma modülü) kavramının deformasyon olmadan önceki veya çok küçük deformasyon seviyelerinde ölçülen başlangıç değeri olan G_{maks} başlangıç kayma modülü olarak adlandırılır ve laboratuvarında bender eleman deneyi ve rezonant kolon deneyleri ile tayin edilebilir (Shirley & Hampton, 1978). Başlangıç kayma modülü, G_{maks} , kayma gerilmesi(τ)-kayma deformasyonu(γ) eğrisinin lineer kısmının eğimidir (Şekil 2.1.). G_{maks} 'ın belirlenmesi amacı ile

yaygın olarak kullanılan en önemli eşitlik kayma dalgası hızı (V_s) ile ilişkili olandır ve (2.1) no.'lu eşitlikte verilmiştir.

$$G_{maks} = \rho * V_s^2 \quad (2.1)$$

Burada;

ρ : Zeminin birim hacim ağırlığının yerçekimi ivmesine oranı (g)

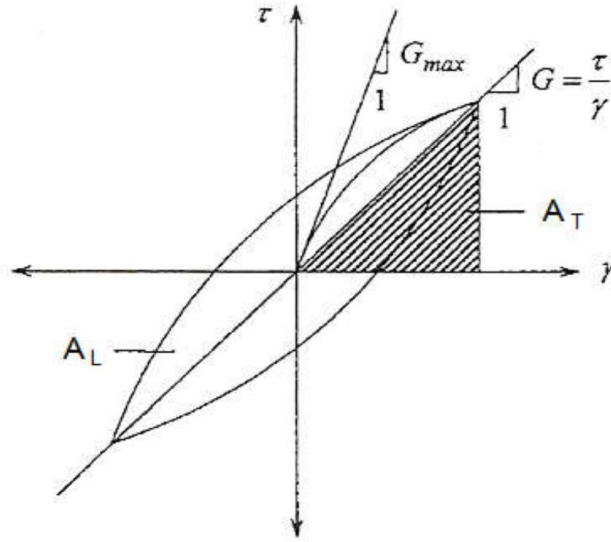
V_s : Kayma dalgası hızı olarak verilmektedir.

Kayma modülü ideal elastik bir malzemedeki deformasyon genliğinden etkilenmez ve bu nedenle de bu malzemenin sönüm oranı sıfırdır. Ancak zemin mekaniğinin konusu olan zeminlerde bu durum gerçekçi değildir. Örneğin, kum ve çakıl gibi malzemelerde doğrusal olmayan gerilme-deformasyon davranışı büyük ölçüde deformasyon genliğinden etkilenmektedir. Bu sebeple, G_{maks} için bir deformasyon seviyesi olmalıdır. Literatürde, kayma deformasyonunun 10^{-6} mertbelerinde olduğu andaki modül G_{maks} olarak kabul edilmektedir (Towhata I. , 2008).

Hardin (1973) ilk olarak serbest başlıklı rezonant kolon deney aletini kullanarak 19 adet farklı iri taneli zemin ve agrega üzerinde deney yapmış ve sonuç olarak iri taneli zeminlerde dinamik zemin özelliklerinin başlangıç boşluk oranı (e_0), ortalama efektif gerilme (p'), Tane çapı ve şekline bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Hardin'in çalışmasına benzer olarak, Chang ve Ko (1982) Drenivch tipi rezonant kolon deney aleti kullanarak Denver kumu üzerine yaptıkları deneysel çalışma sonucunda orta sıkı kumlu ve çakıllı zeminlerin küçük deformasyonlardaki kayma modülünün (G_{maks}), üniformluk (C_u) katsayısına bağlı olarak değiştiğini bulmuşlardır.

Seed ve diğ. (1986) dört farklı sahadan alınan örselenmiş çakıllı numuneler üzerinde yapılan tekrarlı dinamik üç eksenli deneyleri özetlemişler ve doğrusal olmayan kayma modülü azalımı ve sönüm oranı artım eğrileri önermişlerdir.

Bu arada Japon araştırmacılar, araziden zemin dondurma yöntemi ile aldıkları örselenmemiş çakıllı kum numuneler üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalar sonucu bu tip zeminlerin dinamik özelliklerinin kayma deformasyonu ile değişimi hakkında ilginç sonuçlara ulaşımlardır.[(Kokusho & Tanaka, 1994),Kokusho ve diğ., (1995), Hatanaka ve Uchida (1995)].



Şekil 2.1: Kayma gerilmesi-deformasyon ilişkisi (Kokusho, Yashida, & Esashi, 1982)

Çakıl boyutundaki numunelerin dinamik özelliklerini laboratuvarında belirlemek zor ve pahalı olduğundan literatürde bu tür zeminler üzerine yapılan araştırmalar oldukça sınırlıdır. Çakıllı zeminlerin dinamik davranışını büyük ölçekli rezonant kolon cihazı ile belirlemeyi amaçlayan çalışmaları kapsayan bu kategoride zemin numuneleri 15 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde silindirik numuneler hazırlanmıştır. Çakıllı zeminlerin test edilmesinde örselenmemiş numuneler üzerine Japonya'da yapılan tekrarlı üç eksenli basınç deneyleri ile küçük deformasyon seviyelerinde başlangıç rijitliği bulunmuştur (Kono ve diğ.,1994)

2.1.1.1. İri Taneli Zeminlerin Başlangıç Rijitliğini Etkileyen Parametreler

Laboratuvarında gerilme durumu, zemin tipi kullanılarak farklı tipte dinamik yükleme yapabilen cihazlar ile zeminlerin başlangıç rijitliğine etkileyen parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Başlangıç rijitliği olarak kabul edilen kayma modülü değeri ise literatürde yaygın olarak, kayma deformasyonunun $\gamma=0\%10^{-3}$ değerine eşit ve küçük olan bölgede ölçülen değerdir. Bu bölge ayrıca zeminlerin doğrusal elastik davrandığı bölge olarak kabul edilir ve kayma modülü bu bölgede ortalama efektif gerilme (p'), boşluk oranı (e_0), jeolojik yaş, tane şekli ve dağılımı ile yakından ilişkilidir.

Hardin ve Richart (1963) başlangıç kayma modülünü değiştiren faktörleri tespit etmek üzere kum zeminler üzerine yaptıkları çalışmada kayma dalgası hızının (V_s), çevre basıncının (σ_3) 1/4'üncü kuvveti ile doğrusal olarak değiştiğini bulmuşlardır. Ayrıca çok küçük

deformasyonlarda kumlu zeminlerin kayma dalgası hızlarının eşitlik 2.2 ve 2.3'teki gibi çevre basıncı ve boşluk oranına bağlı olarak hesap edilebileceğini bulmuşlardır:

$$V_S = (488 - 224.7 * e_0) * \sigma_0'^{0.25}, \sigma_0' > 2000 \text{ psf} \quad (2.2)$$

$$V_S = (342.1 - 160.9 * e_0) * \sigma_0'^{0.25}, \sigma_0' > 2000 \text{ psf} \quad (2.3)$$

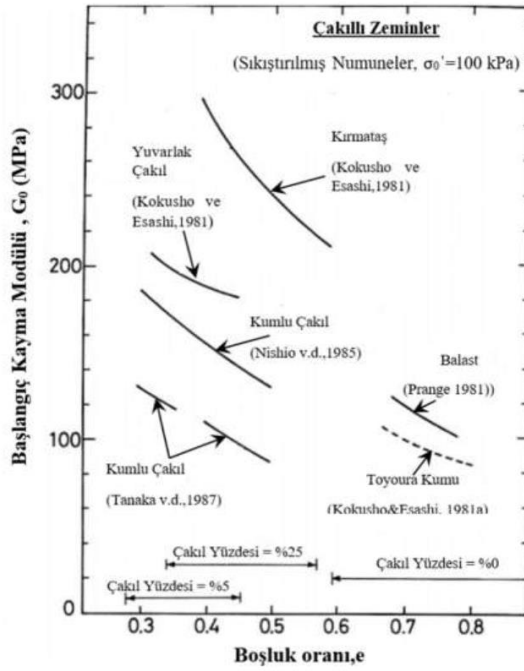
Burada kayma dalgası hızının birimi m/s'dir. Yukarıdaki eşitliklerin başlangıç kayma modülünü veren daha genel hali denklem (2.4)'teki gibi yazılabilir:

$$G_{maks} = A_G * f(e) * (\sigma_0')^{n_G} \quad (2.4)$$

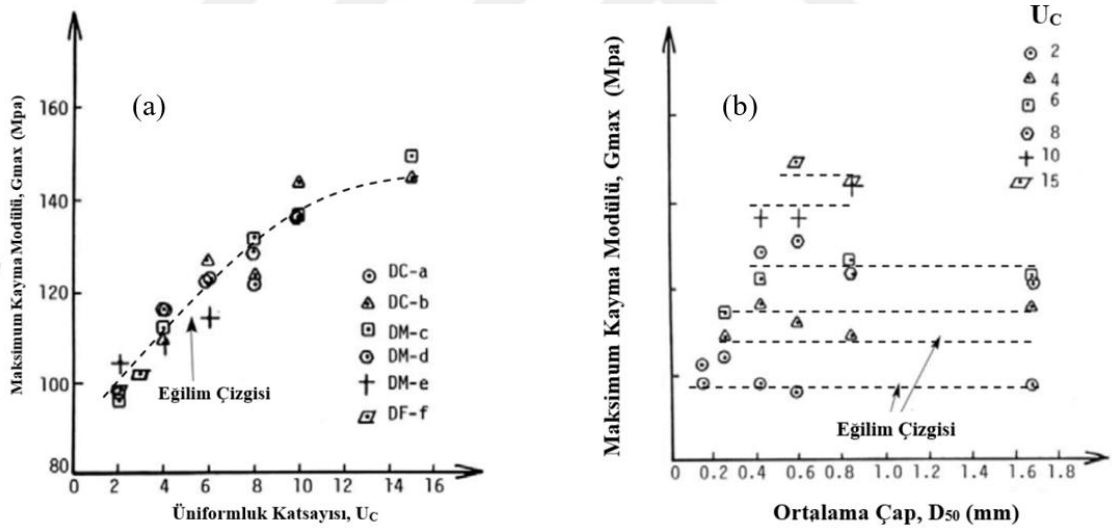
Burada A_G ve n_G birer sabit olup; G_{maks} ve σ_0' kPa birimindedir.

Gerilme ve boşluk oranı dışında iri taneli zeminlerin başlangıç kayma modülüne etkileyen bir başka parametre ise dane dağılımıdır. Tane dağılımının modül değişimine etkisi incelenirken genel olarak elek analizinden elde edilen iki parametreden faydalanılır. Bunlar uniformluk katsayısı (U_c) ve ortalama dane çapı (D_{50})'dır. Bununla birlikte, tane şeklinin etkisini incelerken iri taneli zemin grubu taneleri başlıca iki gruba ayrılır: (1) Yuvarlak taneli zeminler ve (2) köşeli zeminler. Ishihara (1996) Japonya'da kumlu ve çakıllı zeminlerde kayma modülünün laboratuvarında elde edilmesi üzerine yapılan çalışmaları özetlemiştir (Şekil 2.2).

Chang ve Ko (1982) Drenevich tipi, iki ucu serbest rezonant kolon deney aleti ile Denver kumu üzerine yaptıkları 23 adet deney ile dane dağılımının iri taneli zeminlerin dinamik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. 6 cm çapındaki numuneler $D_R = \%30$ sıklıkta gevşek olarak hazırlanmış ve ortalama çapları, D_{50} , 0.149 ila 1.68 mm arasında değişen numunelerden elde edilmiştir. Deney numunelerinin uniformluk katsayıları da 2 ila 16 arasında değiştirilmiştir. Şekil 2.3 (a) ve (b)'de görülmektedir ki orta sıkı gevşek kumlu zeminde başlangıç kayma modülü, G_{maks} , uniformluk katsayısı ile doğru orantılı olarak artarken; ortalama çap değişiminden çok fazla etkilenmemektedir. Ancak yazarlar bu çalışmanın sonucunda ortalama çap (D_{50}) değişiminin başlangıç kayma modülü üzerinde daha etkili olduğunu ileri sürmüşlerdir. İri taneli zeminlerde örselenmenin başlangıç deformasyonuna etkisi literatürde çok kapsamlı incelenememiştir. Bu duruma en önemli sebep olarak, iri taneli, özellikle çakıllı zeminlerin araziden örselenmeden alınıp test edilmesinin oldukça zor olması gösterilmektedir.

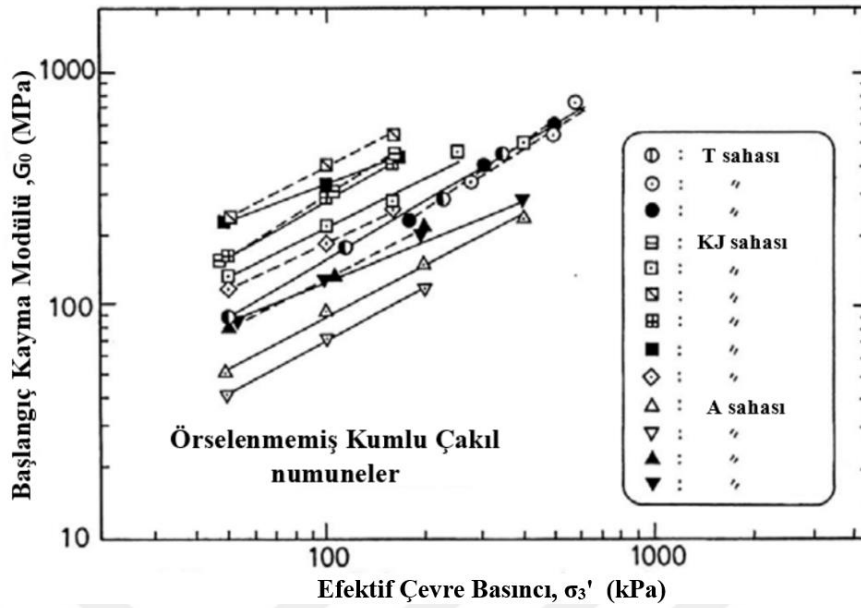


Şekil 2.2: Başlangıç kayma modülünün (G_{max}) tane şekli ve boşluk oranı ile ilişkisi (Ishihara, 1996)



Şekil 2.3: (a) Başlangıç kayma modülünün (G_{max}) Uniformluk katsayısı (b) Ortalama Çap ilişkisi (Chang & Ko, 1982)

Kokusho ve diğ., (1987) yapmış oldukları bir çalışmada ortalama efektif çevre basıncının örselenmemiş numunelerin başlangıç kayma modülü değerine önemli derecede etki ettiğini göstermiştir (Şekil 2.4).



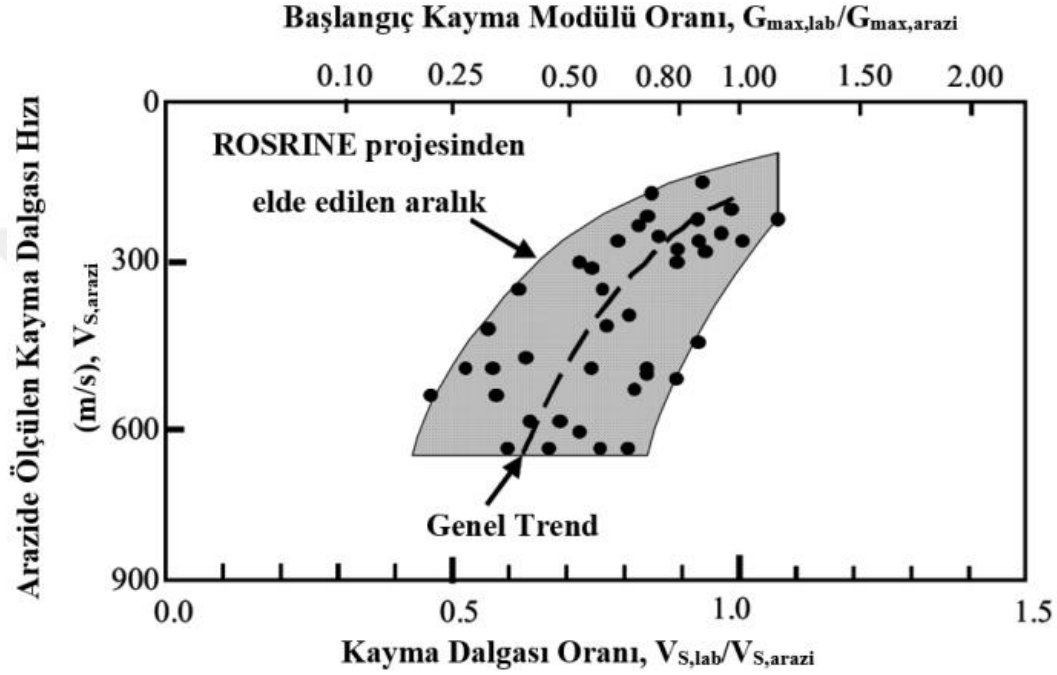
Şekil 2.4: Örselenmemiş kumlu çakıl zeminlerde ortalama efektif çevre basınç başlangıç kayma modülü ilişkisi (Kokusho, 1987)

Darendeli (2001) ROSRINE projesi kapsamında yapmış olduğu deneysel çalışmayı özetleyerek 40 numune üzerinde arazi ve laboratuvar kayma hızı, V_s değerlerini karşılaştırmıştır. Arazi ve laboratuvarda ölçülen hızların arasındaki kat farkı 0.48 ve 1.07 arasında değiştiğini bulmuştur (Şekil 2.5). Bu çalışma ile elde edilen bir başka ilgin sonuçsa daha rijit veya sıkı zeminlerde örselenme etkisinin göreceli olarak gevşek olan zeminlere göre daha fazla olmasıdır. Buna rağmen, kayma modülünün kayma dalgası hızının karesi ile orantılı olmasından dolayı örselenmenin kayma dalgasında yaratacağı %40'lık bir azalmanın başlangıç kayma modülünde %64 azalmaya sebep olacağı öngörülmüştür. Bu nedenle, Darendeli (2001) sismik etkilere karşı kritik olan bölgelerde geoteknik deprem mühendisliği hesapları yapılırken, başlangıç kayma modülünün mutlaka ölçülmesi gerektiğini önermiştir.

İri taneli zeminlerin başlangıç kayma modülü üzerine etki eden bir başka parametre literatürde jeolojik yaş olarak gösterilmiştir. Rollins ve diğ. (1998) arazide yapılan Becker penetrasyon deneylerinin literatürde verilen sonuçlarını analiz etmiş ve jeolojik yaşın granüler zeminlerin başlangıç kayma modülünü hesaplarken önemli bir faktör olduğunu göstermişlerdir. Buna göre, çakıllı ve/veya kumlu zeminlerde relatif sıkılık, D_R ondalık olarak denklem 2.5'deki gibi bulunabilir.

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{70}} \quad (2.5)$$

Burada D_R relatif sıklığı gösterirken; $(N_1)_{60}$ düzeltilmiş SPT deneyi vuruş sayısını göstermektedir.

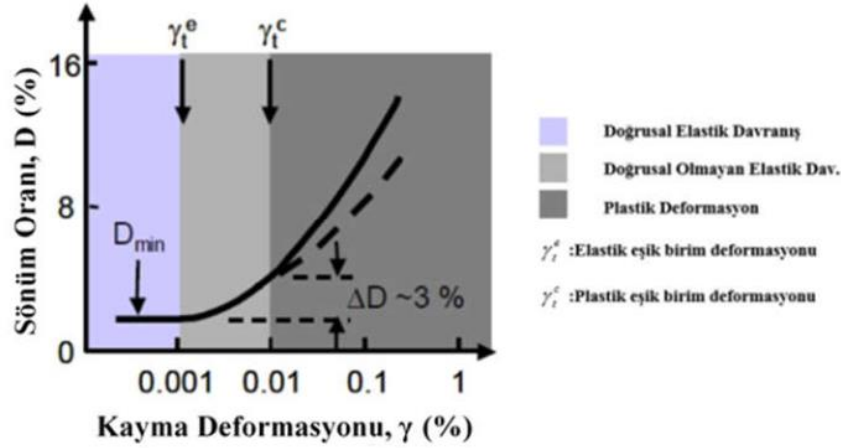


Şekil 2.5: Örselenme etkisinin arazi ve laboratuvar kayma dalgası, başlangıç kayma modülü üzerinde gösterimi (Darendeli, 2001)

2.1.2. İri Taneli Zeminlerde Başlangıç Sönüm Oranı (D_{min})

Zeminlerin dinamik yükler altında çok küçük deformasyon seviyelerinde davranışı lineer elastiktir. Ancak bu davranış, kayma deformasyon genliği arttıkça doğrusal olmayan elastik davranışa dönüşmektedir. Kayma birim deformasyonunun, $\gamma < 0.001\%$, küçük olduğu bölgede zemin doğrusal elastik davranır. Bu bölgede sönüm mekanizmasını oluşturan etmenler daneler arası sürtünme kuvveti ve/veya viskozitedir. Ayrıca bu deformasyon aralığında kayma modülü en büyük değerini G_{maks} , sönüm oranı buna bağlı olarak en küçük, D_{min} , değerini alır. Kayma modülünün en büyük değerinin %2 azaldığı birim deformasyon genliği elastik eşik deformasyonu veya doğrusal olmayan davranışa geçiş veya eşik deformasyonu adı verilir ve γ'_e ile gösterilir. Bu eşik değeri üzerinde zemin her ne kadar doğrusal olmayan davranış gösterse de deformasyonlar elastiktir. Bu değerden sonra sönüm oranı doğrusal olmayan davranıştan dolayı artmaya başlar ve bu durum başlangıç kayma modülünün genellikle %20 azaldığı

deformasyona kadar devam eder. Bu noktadan sonra zeminde plastik deformasyonlar oluşmaya başlar ve sönüm oranı başlangıçtaki değerinden (D_{min}) %3 daha büyüktür (Şekil 2.6) (Darendeli, 2001). Bu deformasyon seviyesine literatürde farklı araştırmacılar tarafından tekrarlı (plastik) sınır deformasyonu adı verilmiş ve γ_e^f ile gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Doğrusal, doğrusal olmayan ve plastik davranış bölgeleri ve sınırları (Darendeli, 2001)

Yüksek magnitüdü depremlerde zemin davranışını anlayabilmek için doğrusal olmayan tepki analizi yapmak kaçınılmazdır. Pratik ve akademik hayatta bu amaç için sıklıkla kullanılan iki metod önde gelmektedir: zemin dinamik özelliklerinin deformasyona bağlı değişimini dikkate alan ve revize eden gerçeğe yakın non-lineer yöntem ve zeminin malzeme özelliklerini sabit kabul edildiği eşdeğer lineer yöntem. Her iki metod ile analiz yaparken zemine ait sönüm oranı farklı yöntemler ile tanımlanır ve genellikle bu analizlerde tercih edilen sönüm davranışı 2 çeşittir (Yoshida, Sawada, & Nakamura, 2004). Birincisi nonlineer gerilme-deformasyon zemin davranışını dikkate alan histerik sönüm modelidir. İkincisi ise sistem hızına bağlı Rayleigh sönümüdür.

Literatürde zemin ve kayaların sönümlenme davranışının genel olarak frekanstan bağımsız; yani histerik, olduğu belirtilmektedir (Germant & Jackson, 1937) (Wegel & Walther, 1935) (Ishihara, 1996). Bununla birlikte özellikle nümerik modellemede zeminler için kullanılacak bir sönümlenme mekanizması olarak Rayleigh Sönümü önerilmiştir (ITASCA, 2012). Esas olarak Rayleigh sönümü elastik malzeme davranışı gösteren sürekli ortamların veya yapıların analizlerinde kullanılmaktadır. Rayleigh sönüm oranı denklem (2.6) ile bulunmaktadır. Rayleigh tarafından önerilen bu modelde, sönüm oranı titreşim moduna bağlı

olarak değişmektedir. H_i i'inci moddaki açısal frekansa (ω_i) sönüm oranını veren fonksiyon olarak kabul edilirse denklem (2.7) deki gibi gösterilebilir.

$$C = \alpha * M + \beta * K \quad (2.6)$$

Burada α : Kütle orantılı sönüm sabiti , β : Rijitlik orantılı sönüm sabiti'dir.

$$h_i = \frac{\alpha}{2 * \omega_i} + \frac{\beta * \omega_i}{2} \quad (2.7)$$

Denklem (2.6)'dan da görüleceği üzere rijitlikle orantılı sönüm frekans arttıkça büyümektedir ve bazen bu durum zemini aşırı sönümlü (over-damped) hale getirir [Yoshida ve diğ. (1997) Düşük genlikli tekrarlı kayma deformasyon seviyesi ve zemin ortamının uniform olması durumunda her iki yöntem ile bulunan sönümlenme davranışı birbirine yakın olmaktadır.

2.1.2.1. İri Taneli Zeminlerde Başlangıç Sönüm Oranını Etkileyen Parametreler

Zeminlerin başlangıç sönüm oranı (D_{min}) küçük deformasyon seviyesinde ($\gamma \leq 10^{-5}$) sabit ve kayma birim deformasyonundan etkilenmezken; deney hızı ($\dot{\gamma}$), yükleme frekansı (f) sönümü etkileyen baskın parametreler olarak literatürde belirtilmektedir. Shibuya ve diğ. (1995) normal konsolide killer üzerinde yaptıkları deneyler sonucunda sabit bir kayma birim deformasyonu değerinde minimum sönüm oranı değişiminin (D_{min}) frekansa bağlı değişimini şu şekilde özetlemişlerdir;

$f < 0.1$ Hz ise D_{min} frekans azaldıkça artmaktadır.

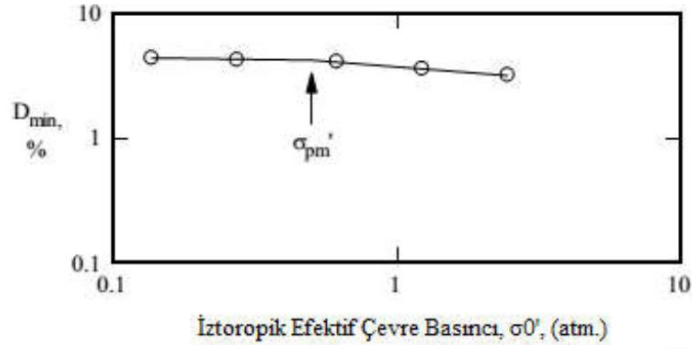
$0.1 \leq f \leq 10$ Hz ise D_{min} frekanstan bağımsızdır ve sabittir.

$f > 10$ Hz ise D_{min} artan frekansla birlikte artmaktadır.

Frekansa bağlı bu değişime U-şekilli eğri ismi verilmiştir ve Vinale ve diğ. (1995) tarafından da sıkıştırılmış siltli kum ($PI=13.7$) numuneler üzerinde yapılan çalışma ile bu eğri doğrulanmıştır.

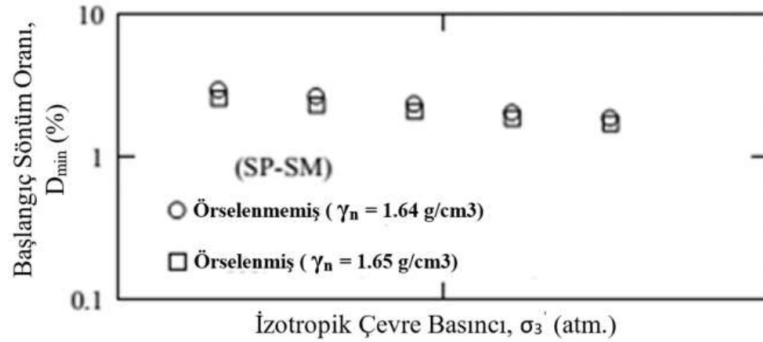
Çevre basıncının zeminin başlangıç sönüm oranı üzerindeki etkilerini inceleyen Darendeli (2001) sonucu Şekil 2.7'de verildiği gibi özetlemiştir. Buna göre, aşırı konsolide zeminler bilineer $\log D_{min} - \log \sigma_0'$ bir ilişki göstermiş ve σ_0' olarak tanımlanan bir basınç değerinde azalım eğimi artarak değişmiştir. Normal konsolide zeminlerde eğim değişimi aşırı konsolide

zeminlere göre daha büyük olmuştur. Bu bulgular daha önce literatürde sunulan başka çalışmalarla da uygunluk göstermektedir [Stokoe ve diğ., (1994); Stokoe ve diğ. (1999)]



Şekil 2.7: Başlangıç sönüm oranı (D_{min}) – çevre basıncı ilişkisi (Darendeli, 2001)

Örselenmenin zeminlerin sönümlenme davranışı üzerine etkisini inceleme amacıyla kötü derecelenmiş kum(SP-SM) numuneler üzerinde yapılan deneyler başlangıç sönüm oranı (D_{min}) örselenmeden fazla etkilenmezken(Şekil 2.8), sönüm eğrisinin davranışı ise yukarı doğru kaymakta yani aynı birim kayma deformasyonda örselenmiş numunde sönümlenme daha fazla olmaktadır.



Şekil 2.8: Başlangıç sönüm oranı (D_{min}) – Örselenme etkisi (Darendeli, 2001)

Boşluk oranının zeminlerin sönüm davranışı üzerine yapılan çalışmalar net bir bulgu elde edilemese de Tablo 2.1'de (Hardin & Drnevich,1972a) verilen bazı örselenmemiş numunelerin üzerinde yapılan rezonant kolon deneylerinin sonuçları genel eğilimin sönüm oranının artan boşluk oranı ile azaldığı yönünde olduğunu göstermektedir.

Dane boyutunun sönüm oranı üzerinde etkilerini inceleyen araştırmalar farklı bulgular elde etmişlerdir. İlk olarak Hall ve Richart (1963) granüler zeminlerde ortalama dane çapının (D_{50})

azalması ile sönüm oranında logaritmik olarak azalmanın yavaşladığı yargısını öne sürmüştür. Diğer yandan, Seed ve Idriss (1970) kayma modülünün azalımında olduğu gibi dan boyutunun değişiminin sönüm oranına kayda değer bir etkisinin olmadığını bulmuşlardır. Son olarak Iwasaki ve Tatsuoka (1977), Seed ve Idriss'in bulgularına paralel olarak tane dağılımının kumların sönüm oranı üzerinde etkisinin, kayma modülü azalımına etkisinden daha az olduğunu bildirmiştir.

Tablo 2.1: Örselememiş zeminlerde başlangıç sönüm oranı (D)-boşluk oranı ilişkisi (Hardin & Drnevich,1972b)

Zemin	Birim Deformasyon Genliği, γ_v , (% 2×10^{-2})			
	$\sigma_0' = 49$ kPa		$\sigma_0' = 196$ kPa	
	e	D(%)	e	D(%)
San Francisco Kum	0.50	8.8	0.49	7.9
Little River Kahverengi Silt	0.55	11.1	0.52	7.5
Floyd Kahverengi Kil	0.64	11.5	0.58	7.6
Virginia Kili	0.89	11.1	0.87	7.0
Rhodes Creek Kili	0.92	8.3	0.81	6.7
San Francisco Körfezi Kili	1.23	6.1	1.16	4.5
Nevada Kili	2.05	1.6	1.98	1.6

Tüm bunlara özet olarak, Hardin ve Drnevich (1972a) laboratuvarında oluşturulmuş veya örselememiş ,temiz kumlar ve kohezyonlu zeminler için yapmış oldukları deneysel çalışmanın sonucu olarak dinamik zemin özelliklerinin birçok fiziksel ve çevresel parametreden etkilendiğini ileri sürmüşlerdir. Tablo 2.2'de bu parametrelerin ne olduğu ve sönüm oranını ne ölçüde etkilediği özetlenmiştir.

Tablo 2.2: Sönüm oranına etkileyen zemin özellikleri ve etki dereceleri (Hardin & Drnevich,1972a)

Parametre	Önem Derecesi	
	Sönüm Oranı	
	Temiz Kum	Kohezyonlu Zemin
Deformasyon Genliği	Ç.Ö	Ç.Ö
Ortalama Efektif Gerilme	Ç.Ö	Ç.Ö
Boşluk Oranı	Ç.Ö	Ç.Ö
Çevrim Sayısı	Ç.Ö	Ç.Ö
Doygunluk Derecesi	A.Ö	Ç.Ö
Aşırı Konsolidasyon Oranı	G.Ö	A.Ö
Efektif Kırılma Zarfı	A.Ö	A.Ö
Oktahedral Kayma Gerilmesi	A.Ö	A.Ö
Yükleme Frekansı (>0.1 Hz)	G.Ö	A.Ö
Tiksotropi	G.Ö	A.Ö
Danelerin Fiziksel Özellikleri	G.Ö	G.Ö
Zemin Yapısı	G.Ö	G.Ö
Kayma Deformasyonu ile Oluşan Hacim Değişimi (< %0.5)	N/A	G.Ö

A.E = Az Etkili
 Ç.E = Çok Etkili
 G.E = Göreceli Etkili
 N/A = Etkisi Bilinmiyor

2.2. İNCE TANELİ ZEMİNLERİN BAŞLANGIÇ RİJİTLİĞİ VE SÖNÜMLENME DAVRANIŞI

İnce taneli kohezyonlu zeminler, yapılarında bulundurdukları silt ve kil minerallerin yapısal özelliklerine bağlı olarak dinamik yükler altında iri taneli zeminlere göre farklılık gösterebilirler. Towhata (2008) kil minerallerinin elektriksel yüklü olmalarının ortamdaki suyu absorbe etmelerinde etkili olduğuna, ince dane yüzdesinin yüksek olmasının suyun sızma hızına etkiettiğine ve çimentolaşmanın önemli bir etken olduğuna dikkat çekmiştir.

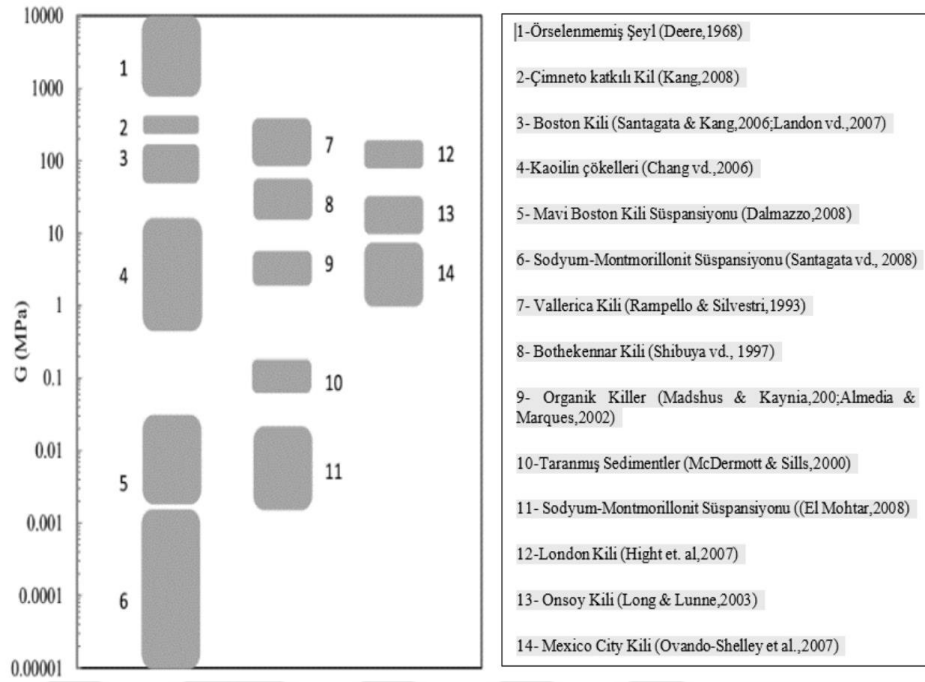
2.2.1. İnce Taneli Zeminlerde Başlangıç Kayma Modülü ($G_{maks}-G_0$)

İnce taneli zeminlerin başlangıç rijitliği birim kayma deformasyonu seviyesinin $\gamma \leq 10^{-5}$ olduğu bölgede deformasyondan bağımsız olmakla birlikte sabittir. Bu deformasyon seviyesinde başlangıç modülüne etki eden en önemli zemin özellikleri,; zemin yapısı, boşluk oranı, maruz kaldıkları ortalama efektif gerilme seviyesi olmaktadır. Jamiolkowski ve diğ. (1985) ile Hardin ve Blandford (1989) zemin ortamı içerisinde ilerleyen bir kayma dalgası, düşey doğrultuda hareket edip bu doğrultuya dik yatay ekseninde salınım yaptığında; zemine ait başlangıç kayma modülü G_{maks} 'ın ortalama efektif gerilme (p'), atmosferik basınç (p_a), boşluk oranına bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. İnce taneli kohezyonlu farklı tipteki zeminlerin laboratuvar veya arazide ölçümlerinin yapıldığı çalışmalar Santagata tarafından derlenmiş ve Şekil 2.9'daki gibi özetlenmiştir.

2.2.1.1. İnce Taneli Zeminlerde Başlangıç Kayma Modülünü Etkileyen Parametreler

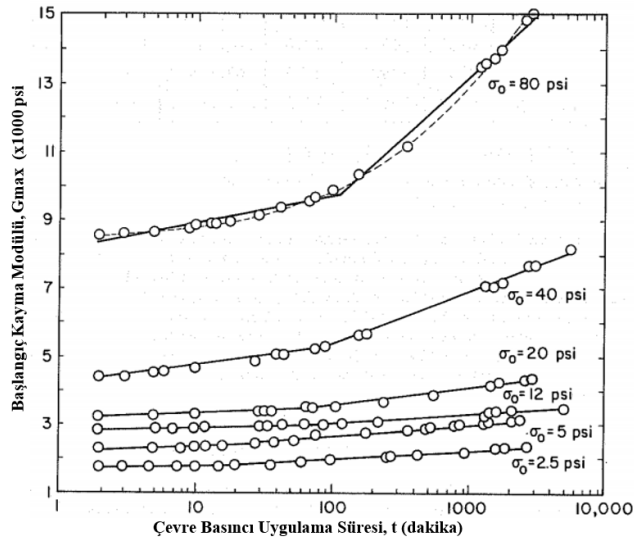
Stokoe ve diğ. (1978) San Francisco körfezi kohezyonlu zeminleri üzerine yapmış oldukları deneysel çalışmada dinamik burulmalı 3 eksenli deneyler yapmışlardır. Kallioglu ve arkadaşları gibi küçük deformasyon seviyesinde ($\gamma \leq \%0.0001$) ortalama efektif gerilme ile başlangıç kayma modülünün arttığı sonucunu ortaya koymuşlardır (Şekil 2.10). Ayrıca çevre basıncı uygulama süresinin de yine başlangıç kayma modülü üzerinde etkili olduğunu belirtmişler; bu süre uzadıkça modülde artış olduğunu söylemişlerdir.

Kallioglu ve diğ. (2008) Kıbrıs ve Yunanistan'ın farklı bölgelerinden örselenmemiş olarak elde ettikleri farklı yapı ve plastisite indisi olan doğal kohezyonlu zeminler üzerine yapmış oldukları deneysel çalışmada rezonant kolon deneyi ile kohezyonlu zeminlerin başlangıç

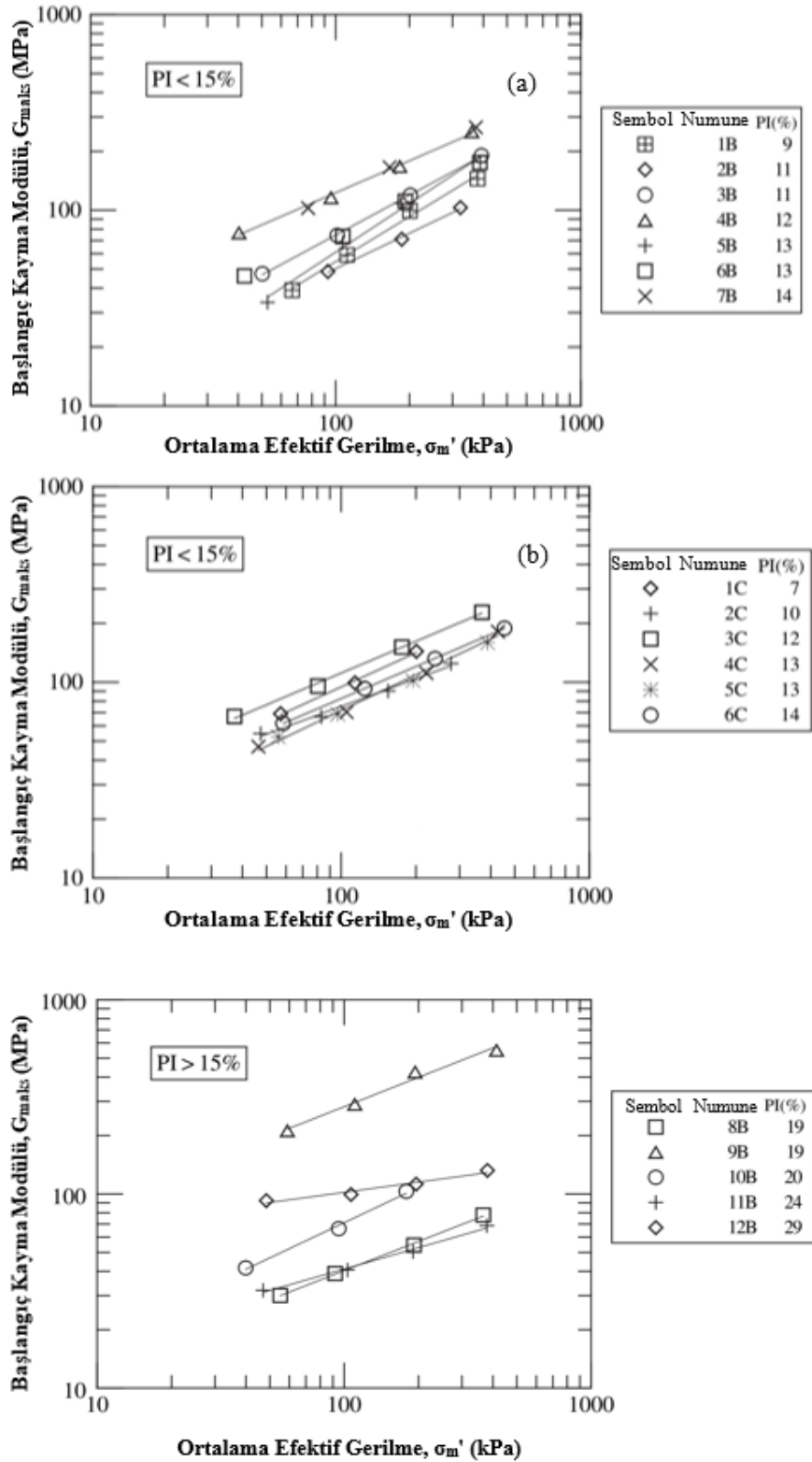


Şekil 2.9: Farklı killere ait Gmaks değeri (Santagata, 2009)

rijitliğini etkileyen parametreleri araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarına konu olan numuneleri kalsiyum karbonat (CC) yüzdelere göre sınıflandırmışlardır. Sonuç olarak CC yüzdesi ne olursa olsun tüm zemin gruplarında ortalama isotropik efektif gerilmenin başlangıç kayma modülünü arttırdığını göstermişlerdir[Şekil 2.11(a)-(b) ve (c)].

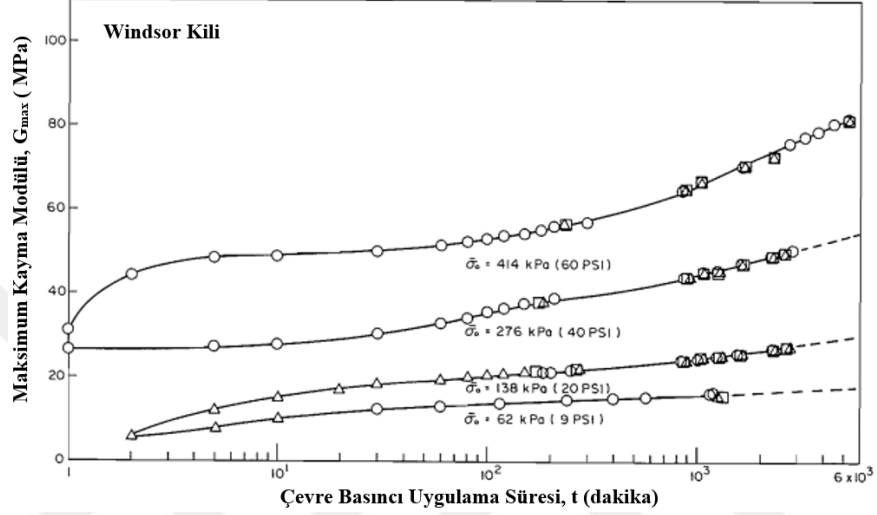


Şekil 2.10: Başlangıç kayma modülü–efektif gerilme ve uygulanma süresi ilişkisi (Stokoe ve diğ. (1978))

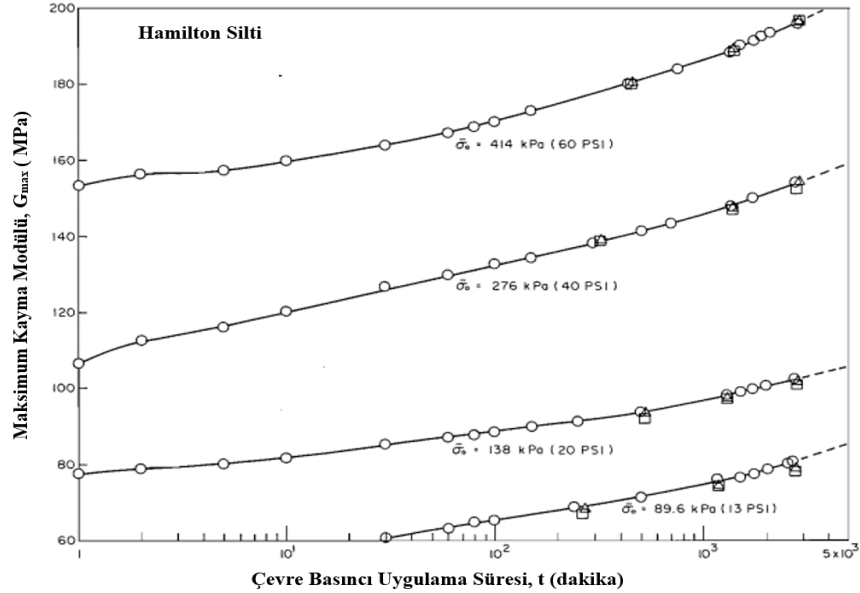


Şekil 2.11: PI<15, CC< %5 olan koheyonlu zeminlerde gerilme modül ilişkisi (a), PI<15, %5≤CC≤%16 olan koheyonlu zeminlerde gerilme modül ilişkisi (b) ve PI>15, %22≤CC≤%86 olan koheyonlu zeminlerde gerilme modül ilişkisi (c)

Stokoe ve diğ. (1978)'den sonra Ontario'nun kohezyonlu zeminlerinin dinamik özellikleri üzerine çalışmalar yapan Kim ve Novak (1981) benzer sonuca ulaşmışlardır. Aşırı konsolide (AKO=2.7,PI=30.3) olan CH tipi Windsor Kili ve düşük plasitsiteli Hamilton Silti (AKO=5.8,PI=14) nin düşük deformasyon seviyesindeki kayma modülü- gerilme ilişkisi Şekil 2.12 ve 2.13' de sırası ile verilmiştir.



Şekil 2.12: Kayma Modülünün windsor kilinde, G_{max} , çevre basıncı ve uygulama süresi ile değişimi (Kim & Novak, 1981)

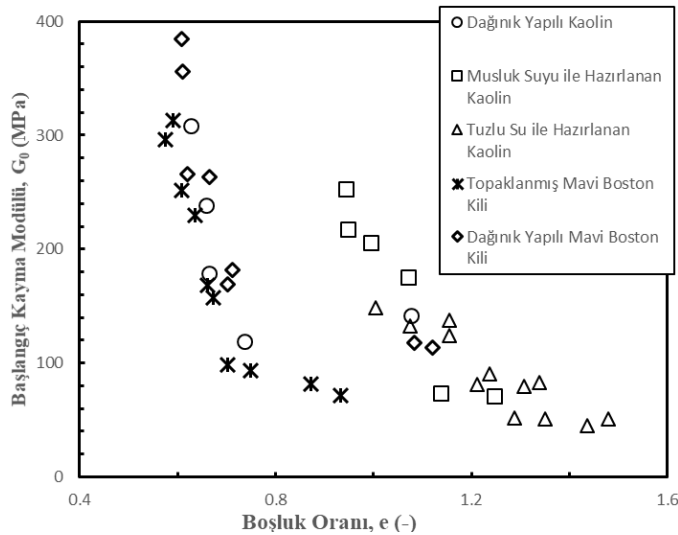


Şekil 2.13: Kayma Modülünün hamilton siltinde, G_{max} , çevre basıncı ve uygulama süresi ile değişimi (Kim & Novak, 1981)

Literatürde çevre basıncı veya ortalama efektif gerilmenin kohezyonlu zeminlerde başlangıç rijitliğini arttırdığını belirten sayısız çalışma bulunmaktadır. Ancak araştırmacıların 1970'li yıllardan beri dikkatini çeken bir başka husus da boşluk oranının başlangıç modülüne etkisi olmuştur. Genel anlamda, granüler zeminlerde olduğu gibi boşluk oranı arttıkça ters orantılı olarak modül azalmaktadır. Zeminlerin başlangıç ayma modülü veya Young modülü (E_0) ile boşluk oranı "e" arasında $F(e)$ genel bir fonksiyon ile korelasyon kurulabilir ve bu fonksiyonun iki türlü matematiksel ifadesi mevcuttur. Tezin ampirik ifadeler kısmında daha detaylı olarak bu konuya değinilecektir; ancak bu fonksiyonlardan ilki Hardin (1966) ikincisi ise Lo Presti (1989) tarafından önerilmiştir.

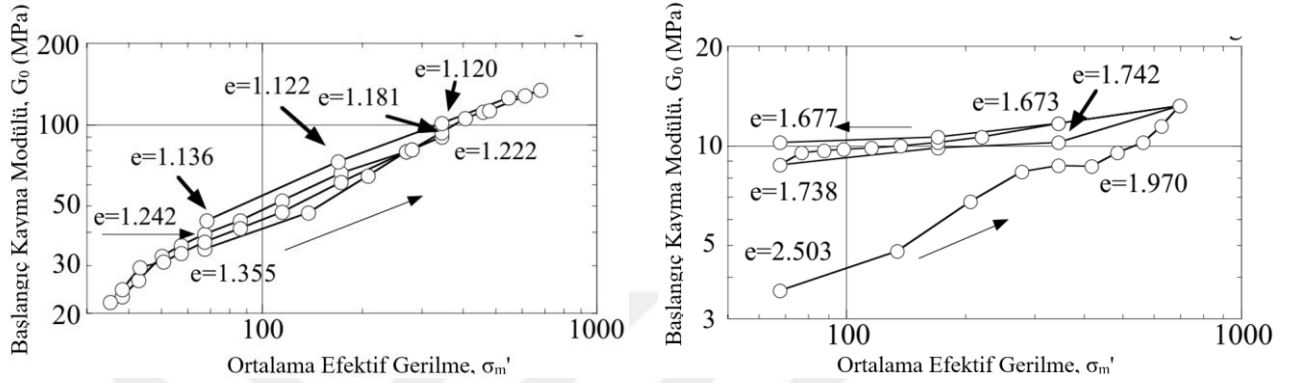
Santagata (1999) ince taneli kohezyonlu zeminlerde, granüler malzemelerde olduğu gibi boşluk oranı etkisinin tek başına incelenmesinin kolay olmadığını vurgulamış; gerilme düzeyi, aşırı konsolidasyon oranı ve zeminin orijinal yapısı gibi diğer etkenler ile değerlendirilmesi gerektiğini ileri sürmüştür.

Hardin ve Black (1968) normal konsolide killer üzerinde başlangıç kayma modülü ve boşluk oranını incelemek için farklı metodlar ile laboratuvarında hazırlanmış kaolin ve mavi Boston kili üzerinde deneyler yapmış ve aynı gerilme düzeyinde boşluk oranı arttıkça modülün azaldığını göstermişlerdir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14: Killerde başlangıç kayma modülü ve boşluk oranı ilişkisi (Hardin&Black, 1968)

Bu konuda esas teşkil edilebilecek başka bir çalışmada ise Humphries ve Wahls (1968) aşırı konsolide kaolin ve bentonit killer üzerinde çalışmalar yapmış; sonuç olarak numunenin maruz bırakıldığı gerilme ile bağlantılı olarak boşluk oranı azaldıkça başlangıç kayma modülü (G_0)nün arttığını Şekil 2.15 (a) ve (b) de göstermişlerdir.



Şekil 2.15: (a) Aşırı konsolide kaolin ve (b) bentonit kilinde gerilme-boşluk oranı ve Başlangıç kayma modülü ilişkisi (Marcuson & Wahls, 1978)

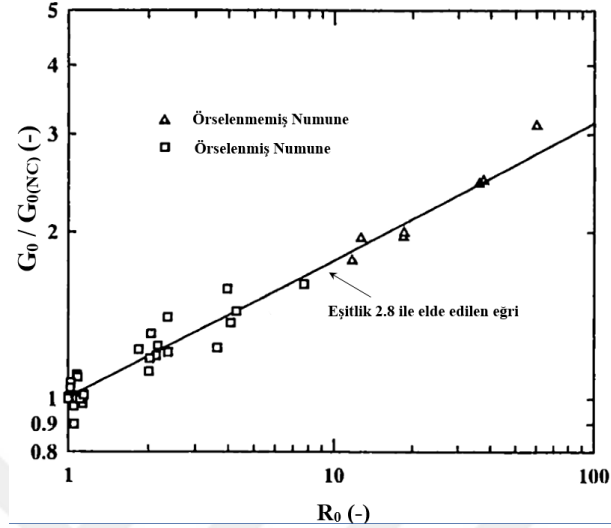
Literatürde killi zeminlerin başlangıç rijitliğine etki eden bir başka zemin özelliği gerilme geçmişi yani aşırı konsolidasyon oranı olarak gösterilmiş ancak bu etkinin limitli olduğu genel kabul görmüştür. Jamiolkowski ve diğ. (1994) bender eleman yöntemi ile ölçmüş oldukları başlangıç kayma modülünü uygun bir boşluk oranı fonksiyonu ile normalize etmişler ve aşırı konsolidasyon oranının başlangıç modülüne etki etmediği sonucuna varmışlardır.

Viggiani ve Atkinson (1995) Jamiolkowski'den daha farklı bir yaklaşım geliştirerek R_0 (efektif gerilmeler cinsinden aşırı konsolidasyon oranı) katsayısı tanımlamış; dört tip kile ait örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapmış olduğu sonuçları karşılaştırmış ve eşitlik 2.8'i önermiştir.

$$G_{\max(OC)} = G_{\max(NC)} * (R_0)^k \quad (2.8)$$

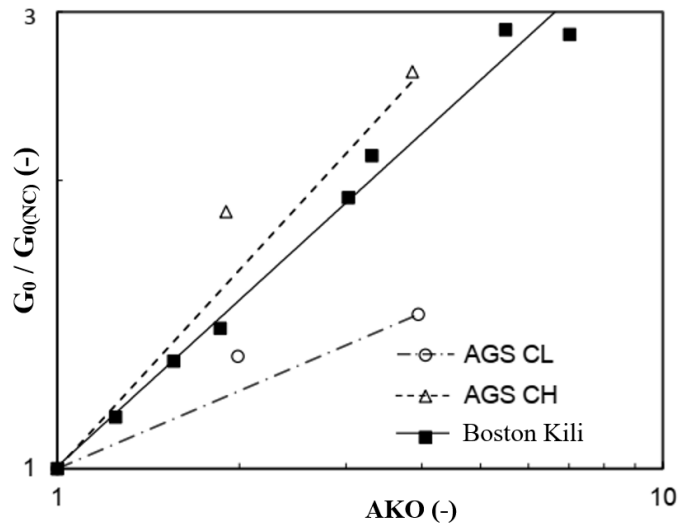
Burada $G_{\max(NC)}$ aşırı konsolide numuneler ile aynı gerilme koşullarında test edilen normal konsolide numunelerin başlangıç rijitliğini gösterirken; k en uygun korelasyon eğrisini veren denkleme ait bir üssel katsayıdır. Araştırmacıların test yaptıkları 4 tip zemine ait k değeri 0.20 ile 0.25 arasında değişkenlik göstermiştir. Ayrıca, yazarlar bu deneylerden elde ettikleri sonuçları örselenmemiş ve laboratuvarında hazırlanmış Londra kili üzerinde yaptıkları BE

deneyinin sonuçları ile karşılaştırmışlar ve k' 'nin aynı aralıkta kaldığını göstermişlerdir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16: Örselenmiş ve örselenmemiş Londra kili numunelerinde başlangıç kayma modülü aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi (Viggiani & Atkinson, 1995)

Weiler (1988) AGS kili adını vermiş olduğu CL ve CH sınıfı killi zemin numunelerine farklı konsolidasyon seviyelerinde deney yaptığında Viggiani ve Atkinson ile benzer bir sonuca ulaşmıştır (Şekil 2.17).



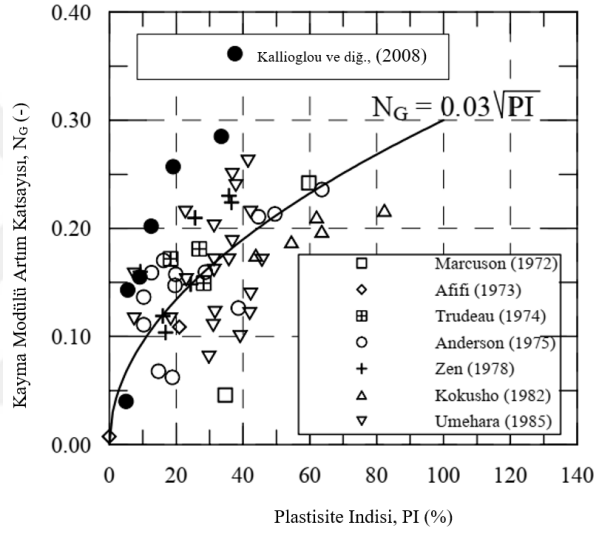
Şekil 2.17: Killi numuneler üzerinde başlangıç kayma modülü aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi (Weiler, 1988)

Killi zeminlerde küçük deformasyonlardaki başlangıç rijitliğini değiştiren önemli parametrelerden sonuncusu literatürde plastisite indisi olarak verilmiştir. Bir çok araştırmacı

farklı plastisite indislerinde deneyler yaparak başlangıç modülündeki artışı, N_G , belirleme yoluna gitmiştir. Başlangıç modülü artış katsayısı olarak da tanımlanabileceği N_G ; eşitlik (2.9) daki gibi hesaplanabilir:

$$N_G = \frac{G_t - G_{t_{p+1440}}}{\log\left(\frac{t}{t_{p+1440}}\right) * G_{t_{p+1440}}} \quad (2.9)$$

Burada, G_t herhangi bir zamanda ölçülen başlangıç kayma modülü, $G_{t_{p+1440}}$ ise konsolidasyon safhası sona erdikten 24 saat sonra ölçülen başlangıç kayma modülü olarak verilmektedir.



Şekil 2.18: Küçük deformasyon seviyesindeki kayma modülü artışı plastisite indisi ilişkisi (Kallioglou ve diğ.,2008'den alınmıştır.)

Şekil 2.18'den hareketle, Plastisite indisi (PI)'nin killerin başlangıç rijitliği üzerinde arttırıcı bir etken olduğu söylenebilir.

Literatürde kohezyonlu zeminlerin başlangıç rijitliğine en çok etki eden parametreler bu alt başlıkta özetlenmiştir. Bunun dışında deformasyon hızı, zemin tipi ve yapısal özellikler gibi etkisi tam olarak netleştirilememiş parametreler de başlangıç kayma modülüne etki etmektedir.

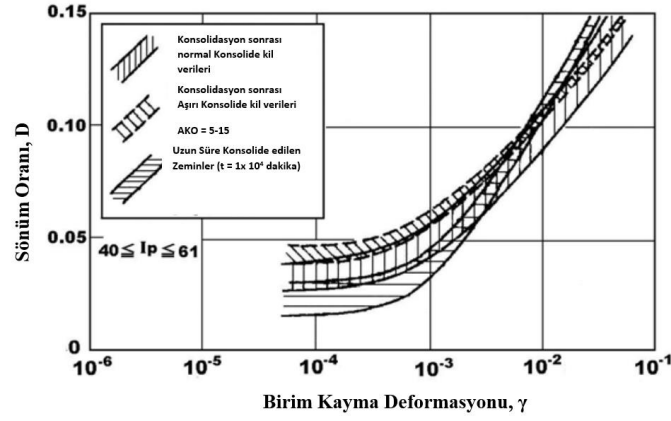
2.2.2. İnce Taneli Zeminlerde Başlangıç Sönüm Oranı

Literatürde genel olarak ince taneli kohezyonlu zeminlerde başlangıç sönüm oranının %0.5 ile %5 arasında değiştiği söylenmiştir (Vucetic & Dobry, 1991). Ayrıca yine Vucetic ve diğ.

(1998)killi zeminlerde deformasyon seviyesinin $\gamma < 5 \times 10^{-5}$ olduğu bölgede başlangıç sönüm oranının plastisite indisindeki artışa bağlı olarak arttığını gözlemlemiştir.

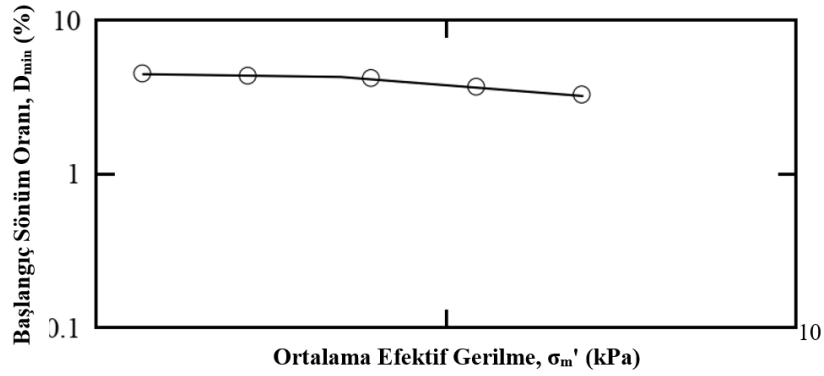
2.2.2.1. İnce Taneli Zeminlerde Başlangıç Sönüm Oranını Etkileyen Parametreler

Deneysel olarak yapılan çalışmalarda başlangıç sönüm oranının etkilendiği parametreler sınırlı olduğu için daha çok sönümlenme davranışının deformasyona bağlı değişimine bakılmıştır. Ancak, Kokusho ve diğ. (1982) örselenmemiş kil numuneler üzerinde yaptıkları çalışmada killerin maruz kaldıkları gerilme durumu ve geçmişinin başlangıç sönüm oranını (D_{min}) etkilediğini göstermiştir (Şekil 2.19).



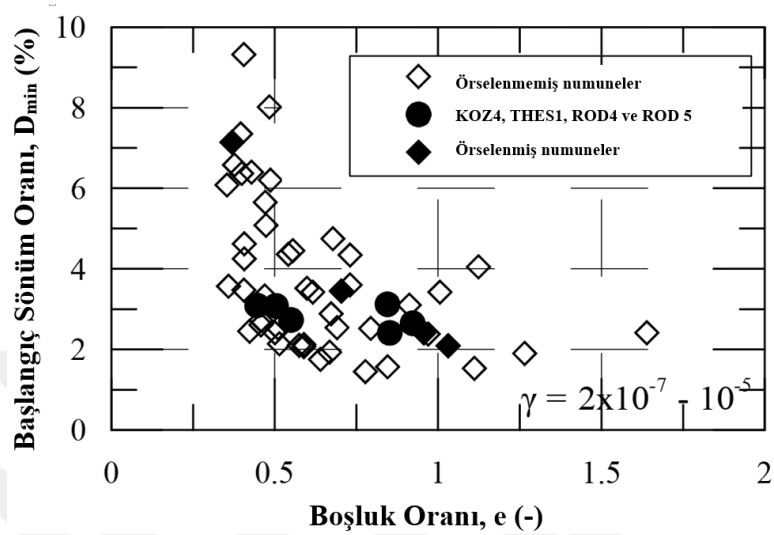
Şekil 2.19: Killi zeminlerde gerilme durumu ve geçmiş- başlangıç Sönümü ilişkisi (Kokusho ve diğ., 1982)

Darendeli (2001) doktora tezinde ortalama efektif gerilmenin artışı ile CL tipi kumlu kilde başlangıç sönüm oranının azaldığını göstermiştir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20: Ortalama efektif gerilme sönüm oranı ilişkisi (Darendeli, 2001)

Kallioglou ve diğeri (2008) çalışmaları sonucu elde ettikleri veritabanını kullanarak başlangıç kayma sönüm oranı ve boşluk oranı arasında, başlangıç kayma modülü ile olanına benzer bir ilişki bulmuşlardır.



Şekil 2.21: Başlangıç sönüm oranı D_{min} - boşluk oranı ilişkisi (Kallioglou ve diğ.,2008)

Sonuç olarak literatürdeki çalışmalar killi zeminlerde başlangıç sönüm oranının, başlangıç kayma modülüne göre daha az zemin koşulları ve gerilmeden etkilendiğini göstermektedir. Aşırı konsolidasyon oranı gibi zeminlerin gerilme geçmişi hakkında bilgi edinilen faktör ile başlangıç sönüm oranı arasında tam anlamı ile bir ilişkinin varlığı gösterilememiştir.

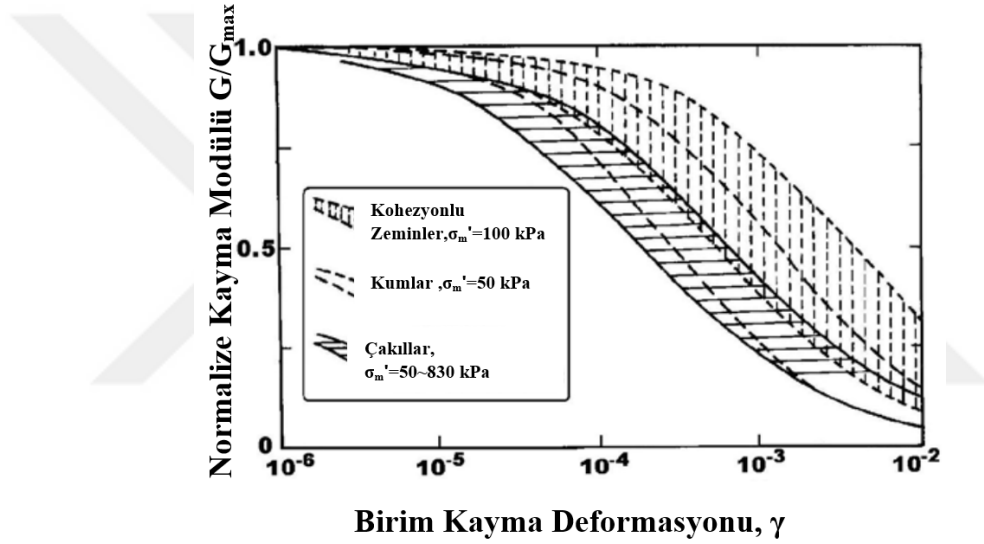
2.3. ZEMİNLERDE DEFORMASYONA BAĞLI RİJİTLİK VE SÖNÜM DAVRANIŞININ DEĞİŞİMİ

Yaklaşık son elli yıldır, dinamik zemin özelliklerinin deformasyona bağlı değişimini gözlemlemek ve bu değişimi etkileyen parametreleri bulabilmek için literatüre sayısız çalışma eklenmiştir. Çok sayıda araştırmacı bu çalışmaları birleştirerek, öncelikle deprem analizlerinde kullanmak üzere doğrusal olmayan eğri takımları farklı matematiksel formlar içerisinde önermişlerdir [Seed ve diğ., (1986); Vucetic ve Dobry (1991)]. Tezin bu bölümünde, bir önceki bölümde başlangıç değerlerinin literatürdeki yeri tartışılan dinamik zemin özelliklerinin kayma birim deformasyonuna bağlı olarak değişimi üzerinde durulacak ve değişime etki eden parametreler sunulacaktır.

2.3.1. İri Taneli Zeminlerde Rijitlik ve Sönüm Oranının Deformasyona Bağlı Değişimine Etki Eden Parametreler

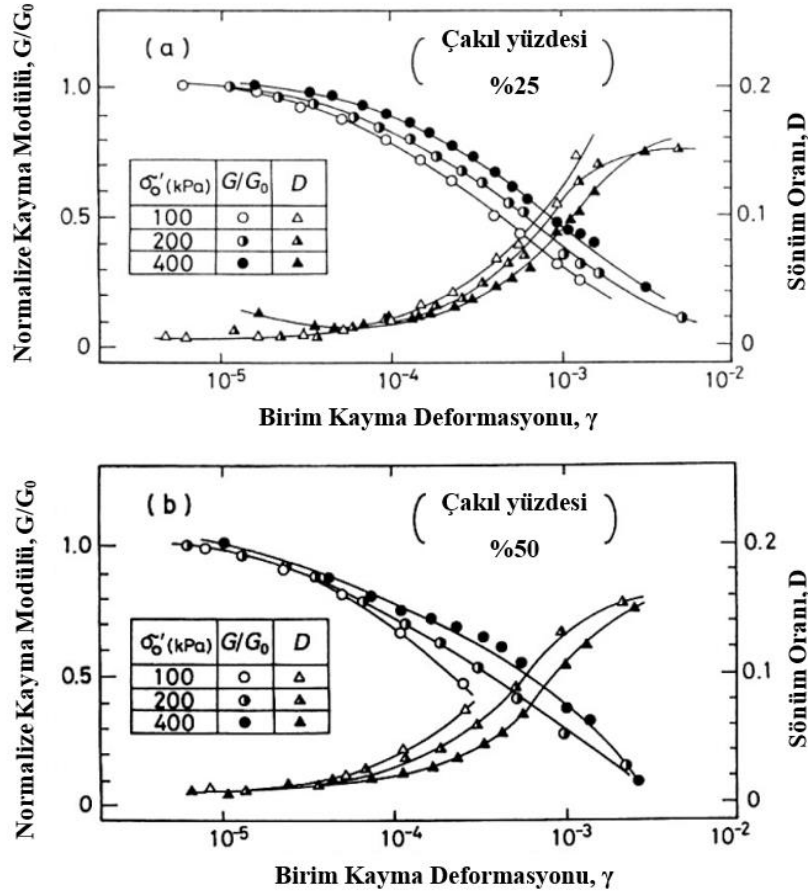
Çok küçük deformasyon seviyelerinde ($<10^{-5}$), gerilme-deformasyon yük çevrimleri neredeyse bir doğru parçası olacak şekilde döngü yaparken , zeminlerin sekant modülü $G_{sec} = \tau/\gamma$ deformasyon genliği arttıkça azalmaktadır.

Şekil 2.22’de Fukutake ve Imazu (1986) tüm zemin türleri için kayma modülü azalım eğrilerinin değiştiği aralıkları özetlemiştir. Buna göre, kohezyonlu zeminlerin kayma modülü, kum ve çakıllara göre daha yüksek deformasyon seviyelerinde azalmaktadır.



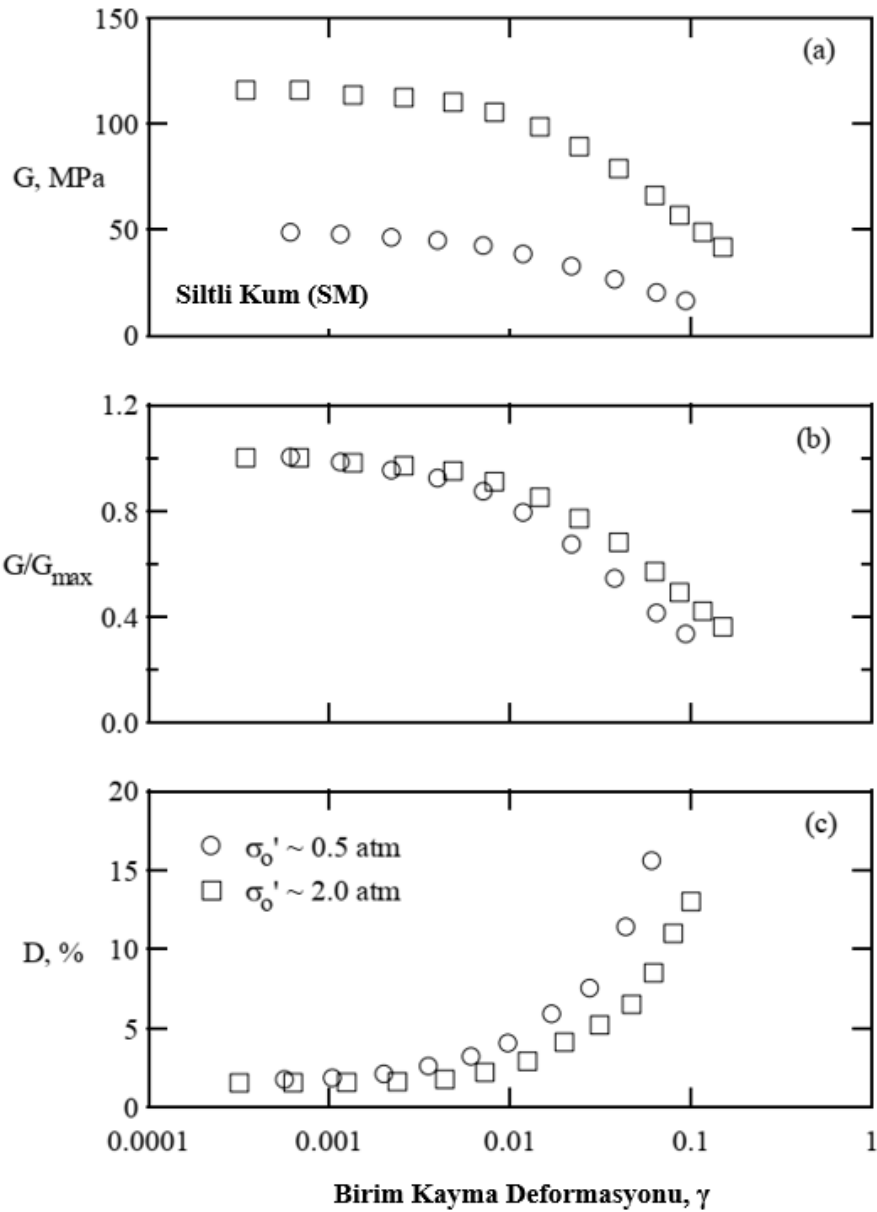
Şekil 2.22: Zemin türünün kayma modülü azalımı ile ilişkisi (Fukutake & Imazu, 1986)

İri taneli zeminlerin modül azalımı ve sönüm oranını değişimini etkileyen en önemli faktör içinde bulunduğu gerilme durumudur. Şekil 2.23 (a) ve (b)'de Tanaka ve diğ. (1987)'nin farklı yüzdelerdeki çakıllı kumlarda yapmış oldukları dinamik üç eksenli deney sonuçlarına bakıldığında efektif çevre basıncı arttırıldıkça kayma modülünün azalımı daha büyük birim kayma deformasyonlarında olmaktadır; buna bağlı olarak sönüm oranının artışı da yine daha geç olmuştur.



Şekil 2.23: Farklı isotropik gerilme koşulları altındaki çakıllı kumlu zeminlerin Kayma Modülü ve Sönüm Oranını deformasyona bağlı değişimi (a) %25 çakıl muhtevası (b) %50 çakıl muhtevası (Tanaka ve diğ., 1987)

Darendeli (2001) ROSRINE projesi kapsamında laboratuvarında dinamik zemin özelliklerinin belirlendiği zeminlerin deney sonuçlarını kullanarak bir veritabanı oluşturduğu çalışmada; parametrelerin dinamik özellikler üzerinde etkisini detaylı bir şekilde incelemiştir. Siltli kum numunesine ait 0.5 atm ve 2.0 atm çevre basınçları altında gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarına bakıldığında tıpkı Tanaka ve arkadaşlarında görüldüğü gibi normalize kayma modülü eğrisi yüksek gerilme altındaki numunede daha büyük deformasyonlarda aynı rijitlik seviyesine gelmektedir. Sönüm oranı değerleri yine daha geç deformasyonlarda artmaktadır. Bununla birlikte başlangıç kayma modülü yaklaşık olarak 2.5 kat artmaktadır [Şekil 2.24(a),(b) ve (c)].

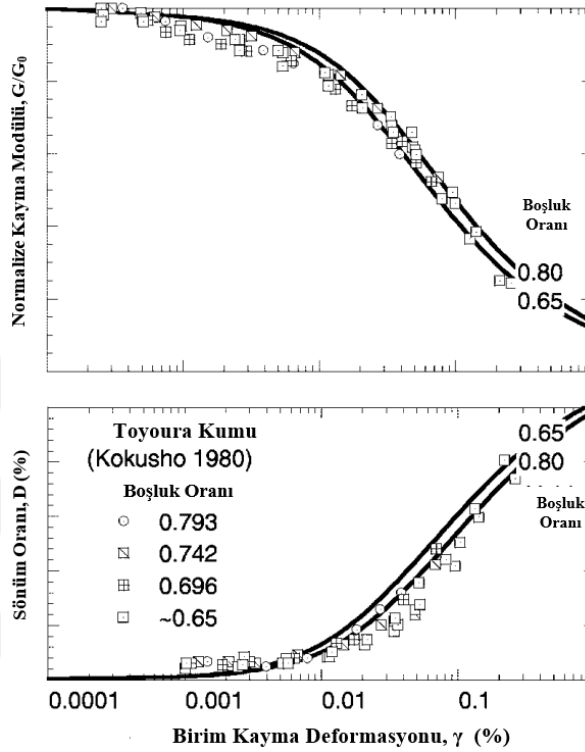


Şekil 2.24:Siltli kumlarda farklı gerilme düzeyinde modül azalımı sönümlenme davranışının deformasyon ile değişimi : (a) Kayma modülü-birim deformasyon, (b) Normalize kayma modülü-birim deformasyon; (c) Sönüm oranı-birim deformasyon (Darendeli, 2001)

İri taneli zeminlerde rijitlik azalımı ve sönüm oranı değişimini etkileyen bir başka parametre grubu da boşluk oranı ve relatif sıkılıktır. Bu iki parametre birbirleri ile aşağıda verilen eşitlik 2.10'a göre ilişkili olduğundan iri taneli zeminlerin dinamik zemin özellikleri üzerinde birlikte etki etmektedirler.

$$D_R = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} \quad (2.10)$$

Kokusho (1980) farklı sıklık ve boşluk oranında hazırlanmış olduğu Toyoura kumuna ait dinamik zemin özelliklerini incelemek istediği çalışmasında Şekil 2.25 (a) ve (b)'de sırasıyla verildiği gibi boşluk oranının sınırlı da olsa kayma modülü azalamını ve sönüm oranı artışını geciktirdiğini göstermiştir.



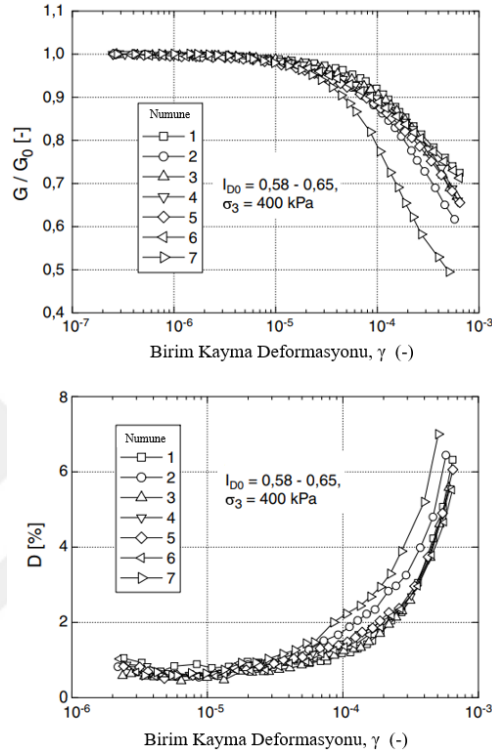
Şekil 2.25: Toyoura kumu boşluk oranı- zemin dinamik özellikleri değişimi (Kokusho, 1980)

İri taneli zemelerde modül azalımı veya sönüm oranı değişimi üzerinde etkili olan diğer parametreler tane şekli dolayısıyla tane dağılımı kısmen etkili olmaktadır. Literatürde Wichtmann ve Triantafyllidis (2005) ortalama çap (d_{50}) ve üniformluk katsayısının (U_C) değişiminin dinamik zemin özellikleri üzerine etkisini incelemişler ve çarpıcı sonuçlar elde etmişlerdir. Üniformluk katsayısı büyüdükçe zemindeki kayma modülü azalımı daha küçük deformasyonlarda başlamış ve daha hızlı gerçekleşmiştir (Şekil 2.26). Zeminlere ait ortalama çap ve üniformluk katsayısı özellikleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

İri taneli zemelerin dinamik özelliklerinin değişimine etki eden değişkenlerden biriside yükleme hızı veya dinamik deneyler anlamında frekanstır. Bu ilişki bölüm 2.5'te incelenecektir.

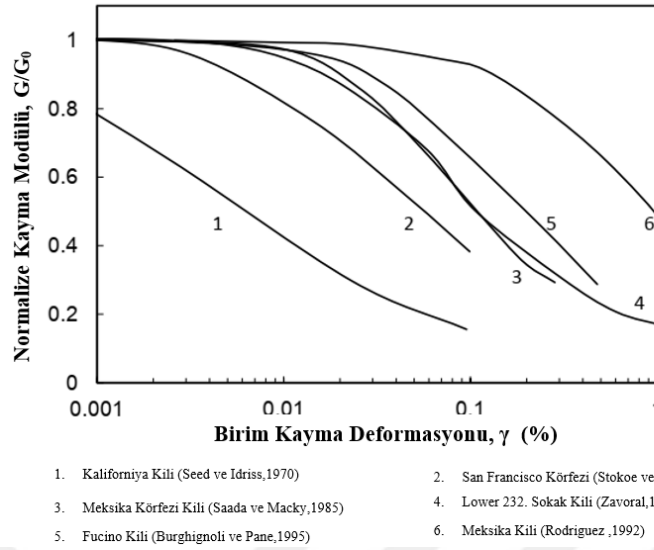
Tablo 2.3: Zemin numuneler ve indeks özellikleri (Wichtmann & Triantafyllidis,2005)

Numune No.	1	2	3	4	5	6	7
U_C (-)	1.4	1.9	1.8	1.4	1.4	1.3	4.5
d_{50} (mm)	0.15	0.35	0.55	0.84	1.45	4.4	0.52

**Şekil 2.26:** Tane dağılımı ve zemin dinamik özellikleri ilişkisi (Wichtmann & Triantafyllidis,2005)

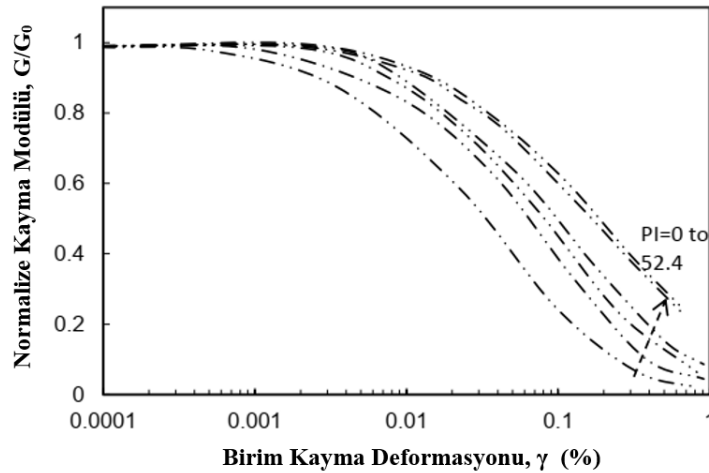
2.3.2. İnce Taneli Zeminlerde Rijitlik ve Sönüm Oranının Deformasyona Bağlı Değişimine Etki Eden Parametreler

İnce taneli zeminlerin başlangıç modül ve sönüm değerlerini etkileyen parametreler olan boşluk oranı, ortalama efektif gerilme düzeyi, aşırı konsolidasyon oranı gibi parametreler aynı zamanda dinamik zemin özelliklerinin değişim trendini de etkilemektedir. İnce taneli zeminlerde özellikle modül azalım eğrisinde çok geniş bir deformasyon aralığında farklı biçimlerde varlık göstermektedir. Bunun aksine, granüler zeminlere bu bant daha dardır. Bu farklılığa neden olan en önemli faktörler ince taneli zeminin minerolojik yapısı ve plastitesidir. Şekil 2.27’de literatürde yer alan bazı killi zeminlerin tipik modül azalım eğrileri verilmektedir.



Şekil 2.27: Literatürdeki bazı killerin kayma modülü azalım eğrileri

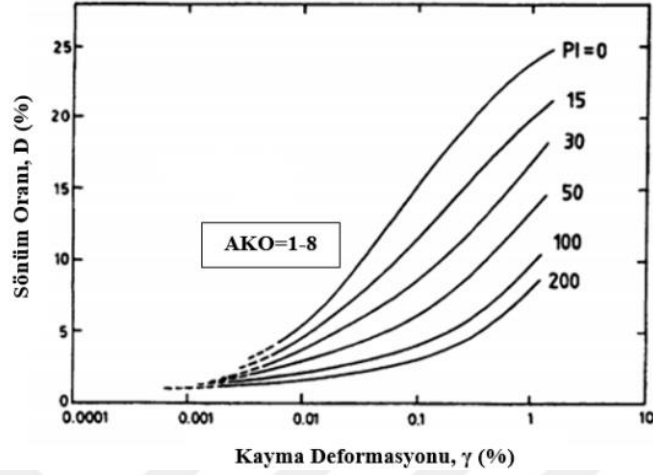
Killerin minerolojisi rijitlik azalımı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Minerolojik özellikler, dolaylı olarak plastisite indisini de etkilediğinden araştırmacılar plastisite indisinin modül azalımını nasıl değiştirdiğini inceleme yoluna gitmişlerdir. Bu bağlamda, Zen ve diğerleri (1978) plastisite indisi 0,9,4,16,2,25,1,37,1 ve 52,4 arasında değişen killerde rijitlik azalımını incelediklerinde modül azalım eğrisini sağa doğru kaydığını göstermişlerdir (Şekil 2.28).



Şekil 2.28: Plastisite ile birlikte modül azalımının değişimi (Zen, 1978)

Zen ve diğerlerinin benzeri bir çalışmayı Vucetic ve Dobry (1991) de labortuar ortamında rezonant kolon deneyleri ile yapmışlar ve benzer şekilde plastisite indisi- kayma modülü ilişkisi elde etmişlerdir. Ayrıca sönüm davranışını da inceleyen araştırmacılar aşırı konsolidasyon oranı

1 ila 89 arasında değişen kohezyonlu zeminler için Şekil 2.29'u önermişlerdir. Görüldüğü üzere, plastisite indisi arttıkça zeminlere ait sönümlenme davranışı azalmıştır.



Şekil 2.29: Plastisite indisinin ince taneli zeminleri sönüm oranı üzerindeki etkisi (Vucetic & Dobry,1991)

Literatürde zeminlerin dinamik özelliklerinin deformasyon ile değişimini etkileyen başlıca parametreler bu bölümde anlatılacaktır. Deformasyon genliği, çevrim sayısı, boşluk oranı, çevre basıncı, plastisite,relatif sıkılık, doygunluk derecesi, aşırı konsolidasyon oranı gibi zeminlerin başlıca özellikleri ile yüklemenin hızı(frekansı) kayma modülü ve sönüm oranının değişiminde çok etkili olabilmektedir. Tablo 2.4'de parametrelerin zemin özellikleri üzerine etkisi gösterilmiştir (Hardin & Drnevich, 1972).

Bu bölümde, zeminlerin dinamik özelliklerinin (G ve D) deformasyona bağlı değişimleri incelenmiş ve bu değişimi etkileyen parametrelerden bahsedilmiştir. Bu tez çalışması kapsamından veritabanına dahil edilen deneysel çalışmalardan çarpıcı olanları özetlenmiştir. Zemin türü ve etkileyen parametrelerin farklılığı istatistiksel olarak detaylı incelenmeye başladığında literatürdeki dinamik özellikleri tahmin etmeye yarayan eğrilerin güncellenebileceği yorumu yapılabilir.

Tablo 2.4: Dinamik Zemin Özelliklerine Etkiyen Parametreler ve Etki Dereceleri (Hardin & Drnevich,1972)

Parametre	Önem Derecesi	
	Kayma Modülü-Sönüm Oranı	
	Temiz Kum	Kohezyonlu Zemin
Deformasyon Genliği	Ç.Ö	Ç.Ö
Ortalama Efektif Gerilme	Ç.Ö	Ç.Ö
Boşluk Oranı	Ç.Ö	Ç.Ö
Çevrim Sayısı	Ç.Ö	Ç.Ö
Doygunluk Derecesi	A.Ö	Ç.Ö
Aşırı Konsolidasyon Oranı	G.Ö	A.Ö
Efektif Kırılma Zarfı	A.Ö	A.Ö
Oktahedral Kayma Gerilmesi	A.Ö	A.Ö
Yükleme Frekansı (>0.1 Hz)	G.Ö	A.Ö
Tiksotropi	G.Ö	A.Ö
Danelerin Fiziksel Özellikleri	G.Ö	G.Ö
Zemin Yapısı	G.Ö	G.Ö
Kayma Deformasyonu ile Oluşan Hacim Değişimi (<%0.5)	N/A	G.Ö

A.Ö : Az önemli
Ç.Ö : Çok Önemli
G.Ö : Göreceli Önemli
N/A : Etkisi bilinmiyor

2.4. LİTERATÜRDE ÖNERİLEN AMPRİK İFADELER

Dinamik zemin özelliklerinin deformasyona bağlı değişimi yıllarca incelendikten sonra araştırmacılar literatürde biriken bu bilgi birikimini geoteknik deprem mühendisliği pratiğinde kullanabilmek için amprik ifadeler türetme yoluna gitmişlerdir. Bu bölümde literatürde ve pratikte yaygın kabul görmüş amprik ifadeler yer verilecektir. Başlangıç rijitliği ve sönümü üzerine önerilen denklemlerden başlanarak modül azalımı ve sönüm artışını tahmin etmede kullanılan ifadeler anlatılacaktır.

2.4.1. İri Taneli Zeminlerin Başlangıç Rijitliği ve Sönüm Oranı İçin Önerilen Eşitlikler

Hardin ve Richart (1963) kayma dalgası hızı ve zemin parametreleri arasındaki ilişkiyi inceledikleri çalışmalarında, sonuç olarak iri taneli zeminlerin başlangıç kayma modülü için denklem 2.11'deki gibi genel bir formül önermişlerdir.

$$G_{max} = A_G * F(e) * (\sigma'_0)^{n_G} \quad (2.11)$$

Burada A_G ve n_G birer sabit olup; G_{maks} ve σ'_0 kPa birimindedir.

Maksimum kayma modülünün tayini için laboratuvar deneylerini bir araya toparlayıp amprik ifade türetme yoluna giden araştırmacılardan birisi Richart'tır (1970). Bu çalışma sonucunda

yuvarlak şekilli kum zeminler için ve köşeli şekle sahip kum zeminler için sırası ile (2.12) ve (2.13) no.'lu eşitlikler önerilmiştir:

$$G_{max} = 700 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} p'^{0.5} \quad (\text{yuvarlak taneli kum}) \quad (2.12)$$

$$G_{max} = 330 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} p'^{0.5} \quad (\text{köşeli taneli kum}) \quad (2.13)$$

Bu formülde elde edilen başlangıç kayma modülü kg/cm²'dir. Burada "e" kumlu zeminlere ait boşluk oranını gösterirken, p' ortalama efektif gerilmedir ve p'=(σ₁' + σ₂' + σ₃')/3 şeklinde hesaplanır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, amprik formül zeminin doğal yapısının ne olduğunu dikkate almamasıdır.

Tablo 2.4'de küçük deformasyon seviyesinde iri taneli zeminlerin başlangıç modülünü tahmin etmede kullanılan ve ilk olarak Hardin&Black (1978) tarafından önerilen formülün (2.14) farklı tipteki iri taneli zeminler için modifiye edilmiş versiyonları verilmiştir.

$$G_{max} = A * f(e) * AKO^K * \left(\frac{p'}{p_{ref}}\right)^m \quad (2.14)$$

Burada G₀ MPa biriminde olup başlangıç kayma modülüdür. P_{ref} referans gerilme olarak tanımlanıp 100 kPa olarak kabul edilmiştir. Tablolarda verilen eşitliklerin tümünde küçük deformasyon seviyesinde deformasyona bağlı Poisson's oranı (ν) değişimi dikkate alınmamış; basitleştirilerek sabit kabul edilmiştir. İri taneli zeminlerde, Poisson's oranı ortalama efektif gerilmeden etkilenmemekte; ancak boşluk oranı değişiminden az da olsa etkilenmektedir.

Seed ve diğ. (1986) iri taneli zeminlerde başlangıç kayma modülünün ortalama efektif gerilmenin bir fonksiyonu olduğunu göstermişler ve başlangıç kayma modülünün (G_{maks}) eşitlik 2.15'teki gibi hesaplanabileceğini bildirmişlerdir.

$$G_{max} = 1000 * (K_2)_{max} * (\sigma'_0)^{n_G} \quad (2.15)$$

Bu eşitlikten elde edilen G_{maks} değeri ve formüle girilen başlangıç efektif gerilme değeri psf birimindedir. Formüldeki (K₂)_{max} ise iri taneli zemin türüne bağlı olarak değişen bir katsayıdır. Bu katsayı için önerilen değerler zemin türleri ile birlikte Tablo 2.5'de verilmiştir.

Tablo 2.5: Temiz kumlar ve Çakıl zeminler için başlangıç kayma modülü (G0) eşitlikleri (Benz, 2006)

Test Edilen Zeminin Adı	D ₅₀ [mm]	U _C [-]	A [-]	f(e) [-]	k [-]	m [-]	Referans
Karbonatlı Kenya Kumu	0.13	1.86	101-129	$e^{-0.8}$	0	0.45-0.52	Fiovarante (2000)
Toyoura Kumu (Y.Köşeli dane)	0.16	1.46	71-87	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.41-0.51	Hoque & Tatsuoka (2004)
Toyoura Kumu (Y.Köşeli dane)	0.19	1.56	84-104	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.50-0.57	Chaudhary ve diğ. (2004)
Silisli Kum (Y.Köşeli dane)	0.2	1.10	80	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.50	Kallioglou ve diğ. (2003)
Silisli Kum (Y.Köşeli dane)	0.2	1.70	62	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.50	Kallioglou ve diğ. (2003)
Silisli Kum (Y.Köşeli dane)	0.2	1.10	62	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.50	Kallioglou ve diğ. (2003)
Toyoura Kumu (Y.Köşeli dane)	0.22	1.35	72	$e^{-1.3}$	0	0.45	Lo Presti ve diğ. (1993)
Ham Nehri Kumu (Y.Köşeli dane)	0.27	1.67	72-81	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.50-0.52	Kuwano & Jardine (2002)
Cam parçacıkları (Küresel)	0.27	1.28	64-69	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.55-0.56	Kuwano & Jardine (2002)
Hostun Kumu (Köşeli dane)	0.31	1.94	80	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.47	Hoque & Tatsuoka (2004)
Silisli Kum (Köşeli dane)	0.32	2.80	48	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.50	Kallioglou ve diğ. (2003)
Ticino Kumu (Y.Köşeli dane)	0.5	1.33	61-64	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.44-0.53	Hoque & Tatsuoka (2004)
Ticino Kumu (Y.Köşeli dane)	0.54	1.50	71	$\frac{(2.27 - e)^2}{1 + e}$	0	0.43	Lo Presti ve diğ. (1993)
Silisli Kum	0.55	1.80	275	$\frac{(1.46 - e)^2}{1 + e}$	0	0.42	Wichtmann & Triantafyllidis (2004)
Ticino Kumu (Y.Köşeli dane)	0.55	1.66	79-90	$e^{-0.8}$	0	0.43-0.48	Fiovarante (2000)
SLB Kumu (yuvarlak)	0.62	1.11	82-130	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.44-0.53	Hoque & Tatsuoka (2004)
Ottawa sand No.20-30	0.72	1.20	69	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.50	Hardin & Richart (1963)
Quiou Kumu	0.75	4.40	71	$e^{-1.3}$	0	0.62	Lo Presti ve diğ. (1993)
Kırılmış Granit	1.3	≈75	45	1	0	0.88	Jovicic & Coop. (1997)
Hime Çakılı (Yuvarlak)	1.73	1.33	53-94	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.45-0.51	Hoque & Tatsuoka (2004)
Chiba Çakılı	7.9	≈10	76	$\frac{(2.17 - e)^2}{1 + e}$	0	0.50	Hoque & Tatsuoka (2004)

Tablo 2.6: Temiz kumlar ve Çakıl zeminler için K2 değerleri (Seed ve diğ., 1986)

Zemin Türü	Zemin Tanımı	Bulunduğu Yer	Derinlik(m)	(K ₂) _{max}
Kum Zemin	Gevşek Nemli Kum	Minnesota	3	34
	Sıkı Kuru Kum	Washington	3	44
	Sıkı Suya Doymun Kum	S. California	15	58
	Sıkı Suya Doymun Kum	Georgia	61	60
	Sıkı Suya Doymun Siltli Kum	Georgia	18	65
	Sıkı Suya Doymun Kum	S. California	91	72
	Çok Sıkı Siltli Kum	S. California	38	86
Çakıl Zemin	Kum, çakıl ve blok karışımı (çok az killi)	Caracas	61	90
	Sıkı Kum ve Çakıl	Washington	46	122
	Kum ve Çakıl Karışımı (çok az killi)	Caracas	78	123
	Sıkı kum ve kumlu çakıl	S. California	53	188

Granüler zeminlerin başlangıç sönüm oranı literatürde daha çok çakıllı zeminler için incelenmiştir. Bu eşitliklerin içerisinde en güncel olanı Menq (2003) tarafından doktora tezi çalışması kapsamında kuru halde hazırlanmış granüler zeminlerin başlangıç sönüm oranı D_{min} için aşağıda 2.16'da verilen denklemi önerilmiştir.

$$D_{min} = 0.55 * C_U^{0.1} * D_{50}^{-0.3} * \left(\frac{\sigma'_0}{p_a} \right)^{-0.05} \quad (2.16)$$

Menq'ten daha önce granüler zeminler için Laird (1994) kuru kumlarda başlangıç sönümü için bir denklem önermiştir. Deneysel veritabanından elde etmiş olduğu veriler ile korelasyon ile eşitlik 2.17'yi önermiştir.

$$D_{min} = C_D * f(e) * \left(\frac{\sigma'_0}{p_a} \right)^{n_D} \quad (2.17)$$

Burada;

C_D = Boyutsuz malzeme sönüm oranı katsayısı

n_D = Efektif isotropik gerilme üssel katsayısı

$f(e) = 1/(0.3+0.7e^2)$ olarak verilmiştir.

Standart labortuvar kumu üzerinde yaptığı deneylerde Laird boşluk oranının D_{min} hesaplamada çok önemli bir girdi olmadığını belirtmiştir.

Başlangıç sönüm oranı, D_{min} , amirik olarak hesaplanmasına olanak sağlayan bir diğer çalışma yine Darendeli (2001) tarafından gerçekleştirilmiş, 1.Derece Bayesian olasılık yöntemini kullanarak, zemin özellikleri ile başlangıç sönümü arasında eşitlik (2.18) önermiştir.

$$D_{min} = (\varphi_6 + \varphi_7 * PI * AKO_{\varphi_8}) * \sigma_o'^{\varphi_9} * [1 + \varphi_{10} * \ln(\text{frq})] \quad (2.18)$$

Tüm zemin türleri için geçerli olan bu denklemde ;

PI = Plastisite İndisi (%)

AKO = Aşırı konsolidasyon oranı,

frq = Yükleme frekansı

N= Çevrim sayısı

φ_6 - φ_{12} arası = Darendeli (2001) modelinin “fitting” parametreleri olarak verilmiştir.

2.4.2. İnce Taneli Zeminlerin Başlangıç Rijitliği ve Sönüm Oranı İçin Önerilen Eşitlikler

Literatürde ince taneli kohezyonlu zeminlerin başlangıç modül ve sönüm oranını amprik ifadeler ile bulmayı mümkün kılan amprik eşitlikler de mevcuttur. Ancak killerin zamana bağlı olarak mukavemetleri çimentolaşma veya kil daneleri arasındaki elektriksel bağlar nedeni ile artmaktadır. Bu da tiksotropiye örnektir. Bu nedenle yüksek plastisiteli (PI) killer düşük plastisiteli killere göre daha tiksotropiktir. Zamana ağılı davranışlarının etkili olduğu alanlardan birisi de sismik yüklemelerdir. Eğer deformasyon genliği yüksek bir sismik hareket veya dinamik yükleme killi zeminlere uzun süre etki ederse; maksimum modül ani olarak azalabilir. Kil daneleri arasında elektiriksel yük değişimine bağlı kovalent veya iyonik bağların oluşması tahmin edilebilir ki aşırı konsolide killerde daha fazla olabilmektedir. Bu nedenle ince daneli zeminlerin başlangıç kayma modülü eşitlik (2.19) ile bulunabilmektedir (Hardin & Drnevich, 1968)

$$G_{\text{maks}} = C \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} (AKO)^K * p'^{0.5} \quad (2.19)$$

Burada e, boşluk oranı; AKO: Aşırı Konsolidasyon Oranı ve p': ortalama efektif gerilmeyi göstermektedir. K katsayısı plastisite indisine bağlı olarak Tablo 2.7'deki gibi değişmektedir. Yine amprik formülün içerisinde yer alan C katsayısı eğer ortalama efektif gerilme birimi kilopaskal ise (kPa) $3230^{0.5}$ olarak alınacaktır.

Tablo 2.7: K katsayısı ve PI ilişkisi (Hardin & Drnevich , 1968)

Plastisite Indisi, PI, (%)	K katsayısı
0	0
20	0.18
40	0.30
60	0.41
80	0.48
≥100	0.5

Shibuya ve diğ (1997). Boşluk oranının etkisini hesaba katan fonlisyonu basitleştirerek, ince daneli zeminler için başka bir formülasyonu önermişlerdir (2.20):

$$\frac{G_{\text{maks}}}{p_r'} = \frac{B}{(1 + e)^{2.4}} \left(\frac{p'}{p_r'} \right) \quad (2.20)$$

Burada p' : ortalama efektif gerilmeyi ve p_r' referans gerilmeyi göstermektedir ve 1 kPa olarak alınmıştır. n üstel katsayısı ve kil danelerinin yerleşimine göre 0.33 ile 0.50 arasında bir değer olarak tahmin edilmiştir.

Ayrıca Towhata (2008) (2.19) no.'lu eşitliğe alternatif olarak kitabında (2.21) no.'lu eşitliği önermiş ve bu formülasyonun her türlü killi zeminlerde kullanılabileceğini belirtmiştir.

$$G_{\text{maks}} = 625 \frac{AKO^K}{(0.3 + 0.7e)^2} (p_a * p')^{0.5} \quad (2.21)$$

Görüldüğü üzere ince daneli zeminlerde başlangıç boşluk kayma modülüne etki eden en önemli parametreler aşırı konsolidasyon oranı, AKO, boşluk oranı, e , ve zeminin maruz kaldığı gerilme durumu, p' , olmaktadır. Weiler (1988) küçük deformasyon seviyesinde zeminlerin dinamik davranışını incelemek üzere rezonant kolon deneyleri yaptığı çalışmasında Tablo 2.8'deki katsayıları kullanarak farklı plastisite indislerine sahip ince taneli zeminler için başlangıç kayma modülü için eşitlik 2.22'yi önermiştir.

$$G_{\text{maks}} = K * (p_a)^{1-n} * (\sigma_c')^n \quad (2.22)$$

Burada, K boyutsuz bir katsayı; σ_c' izotropik çevre basıncı Pa ise atmosfer basıncıdır ve 100 kPa olarak kabul edilmiştir.

Tablo 2.8: Farklı tip killerde başlangıç kayma modülü için katsayılar (Weiler, 1988)

Kil Türü	PI(%)	K	n	m	Referans
Alaska Körfezi	14-15	372.1	0.85	0.59	(Weiler, 1988)
AGS CL kil	16-22	436.3	0.84	0.27	(Weiler, 1988)
Mavi Boston Kili	19-23	248.2	0.86	0.6	(Weiler, 1988)
AGS CH kili	32-38	126.2	1,18	0.69	(Weiler, 1988)
Fucino Kili	40-70	75.3	0.82	-	(Burghignoli & Pane, 1995)
232. Cadde kili	20-25	292.1	0.9	0.26	(Zavoral, 1990)

İnce daneli zeminlerin başlangıç modüllerinin tahmin edilebildiği ve yukarıda verilen amprik formüllerden farklı olarak literatürde bazı araştırmacılar Hardin ve Black (1966) tarafından önerilen genel ifadeye (eşitlik 2.23) yeni katsayılar önererek bazı killer için kullanılmasını mümkün kılmışlardır. Bunlar Tablo2.9'da özetlenmiştir.

$$G_{maks} = A * f(e) * AKO \cdot K * \left(\frac{p'}{p_{ref}}\right)^m \quad (2.23)$$

Tablo 2.9: Killerde başlangıç kayma modülü için denklem 2.23'e göre katsayılar (Benz T. , 2006)

Test Edilen Zeminin Adı	PI [%]	A [-]	f(e) [-]	k [-]	m [-]	Referans
Avezzano Kili (Halosen-	10-30	74	e ^{-1.27}	NA	0.46	(Lo Presti & Jamiolkowski, 1998)
Garigliano Kili(Halosen)	10-40	44	e ^{-1.28}	NA	0.58	(Lo Presti & Jamiolkowski, 1998)
Montaldo Di Castro Kili	15-34	50	e ^{-1.29}	NA	0.4	(Lo Presti & Jamiolkowski, 1998)
Speswhite Kaolen Kil	24	40	e ^{-1.30}	0.2	0.65	(Viggiani & Atkinson, 1995)
Vallerica Kili	27	44	e ^{-1.31}	NA	0.85	Rampello et al. (1997)
Kaolen	35	45	e ^{-1.32}	NA	0.5	(Marcuson & Wahls, 1972)
Pisa Kili	23-46	50	e ^{-1.33}	NA	0.44	(Lo Presti & Jamiolkowski, 1998)
Londra Kili (Örselenmiş)	41	13	e ^{-1.34}	NA	0.76	Viggiani & Atkinson, 1995
Panigaglia Kili	44	52	e ^{-1.35}	NA	0.5	(Lo Presti & Jamiolkowski, 1998)
Fuciono Kili	45-75	64	e ^{-1.36}	NA	0.4	(Lo Presti & Jamiolkowski, 1998)
Bentonite	60	4.5	e ^{-1.37}	NA	0.5	(Marcuson & Wahls, 1972)

Literatürde ince taneli zeminlerin başlangıç sönümü için özellikle türetilmiş bir eşitlik bulunamamıştır. Ancak Darendeli (2001) tarafından önerile denklem (2.18) ile kohezyonlu zeminlerin başlangıç rijitliği hesaplanabilmektedir.

2.4.3. İri ve İnce Taneli Zeminlerin Deformasyona Bağlı Rijitlik ve Sönüm Oranı Değişimi İçin Önerilen Eşitlikler

Çok sayıda araştırmacı Hardin ve Drnevich'in (1972a ve b) çalışmasından etkilenerak ortalama kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrilerini iyileştirmek için veritabanları kullanarak uygulamada sıklıkla kullanılan matematiksel formüller önermişlerdir. Bu bölümde bu araştırmaların bazılarına yer verilecektir.

Yukarıda da değinildiği gibi modül azalımı ve sönümlenme davranışı için ilk kapsamlı çalışma Hardin ve Drnevich tarafından (1972a ve b) yapılmıştır. Bu çalışmada araştırmacılar küçük ve orta deformasyon seviyelerinde zeminlerin kayma birim defomasyonu –kayma gerilmesi ilişkisinin bir hiperbolik model ile tanımlanabileceğini ileri sürmüşlerdir. Bu hiperbolik modeli eşitlik (2.24) ile vermişlerdir.

$$\tau = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_{max}} + \frac{\gamma}{\tau_{max}}} \quad (2.24)$$

Burada, τ = kayma gerilmesi; γ = kayma birim deformasyonu; G_{maks} = başlangıç kayma modülü ve τ_{max} = zeminin kayma mukavmeti olarak verilmektedir.

Bu modelde tanımlanan başka bir parametrede referans birim deformasyondur (γ_r) ve eşitlik (2.25) ile bulunabilmektedir.

$$\gamma_r = \frac{G_{\max}}{\tau_{\max}} \quad (2.25)$$

Denklem (2.24)'ün her iki tarafı kayma birim deformasyonu γ , bölüldüğünde zemine ait sekant modülü elde edilecek denklem 2.26'ya dönüşecektir.

$$G = \frac{1}{\frac{1}{G_{\max}} + \frac{\gamma}{\tau_{\max}}} \quad (2.26)$$

Son olarak eşitlik 2.26 da, düzenleme yapıp denklem 2.25 yerine konulur ve hiperbol denklemi elde edilir(Eşitlik 2.27)

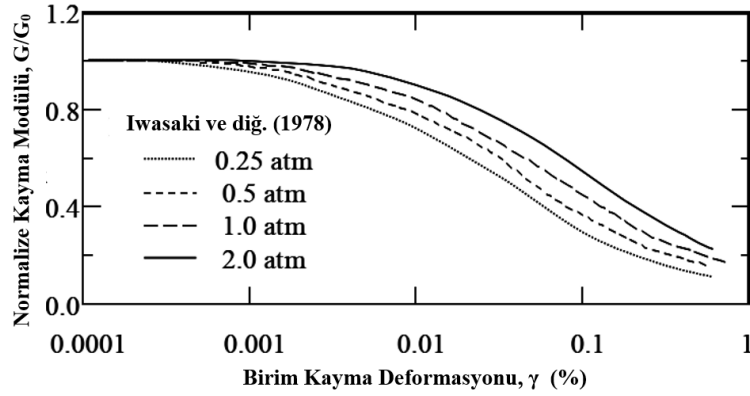
$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (2.27)$$

Hardin ve Drnevich (1972) aynı zamanda histerik sönüm davranış eğrisini tahmin edebilen bir denklemdaha önermişlerdir(Eşitlik2.28)

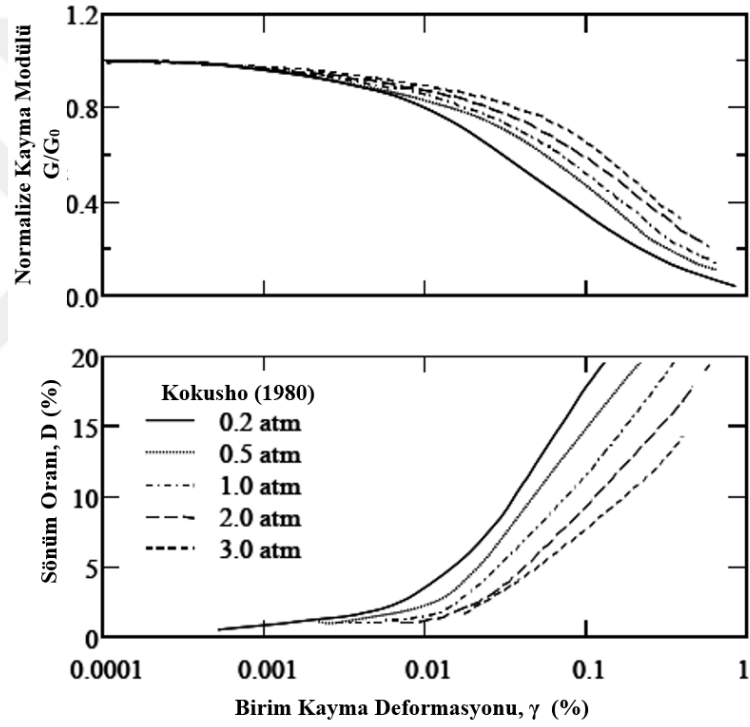
$$\frac{D}{D_{\max}} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r}}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (2.28)$$

Burada D_{\max} maksimum sönüm oranı olarak tanımlanmaktadır ve zemin tipi, çevre basıncı , çevrim sayısı gibi deneysel karakteristiklere bağlı değişmektedir.

Iwasaki ve diğ. (1978) ve Kokusho (1980) temiz, suya doymun veya kuru Toyoura kumu üzerinde yaptıkları deneylerde çevre basıncının değişiminin dinamik özelliklerin değişimine etkisini incelemişlerdir. Bu araştırmacılar hiperbol denklemler yerine eğri takımları önermişleridir (Şekil 2.30 ve 2.31).

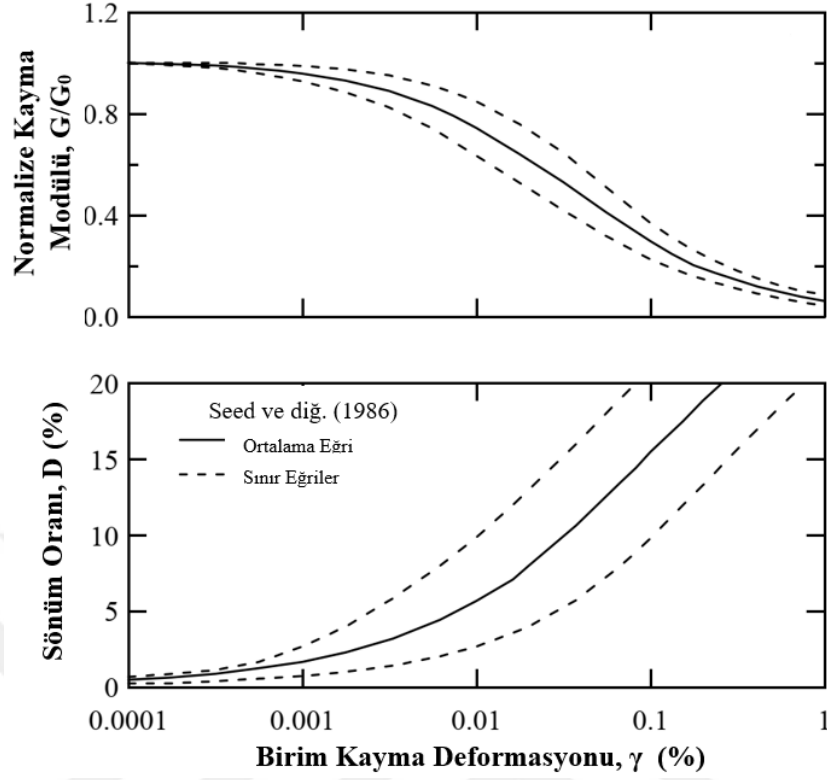


Şekil 2.30: Toyoura Kumu için önerilen eğri takımı (Iwasaki ve diğ., 1978)



Şekil 2.31: Toyoura Kumu için önerilen eğri takımı (Kokusho, 1980)

Bu çalışmaların dışında, eğri takımlarının türetildiği araştırmalar da vardır. Seed ve Idriss (1970) kumlu doğal zeminlerde yapmış olduğu araştırmanın ardından eğri takımı önermişler; ancak Seed (1986) yılında bu eğrileri revize etmiştir. Seed (1986) yılında gerçekleştirdiği çalışmada azalım eğrisinin çevre basıncına; granüler zeminin tane karakteristiklerine (şekil, boyut v.s.) bağlı olup olmadığını incelemiştir. Ayrıca, kumlarda dinamik özelliklerin deformasyona bağlı değişiminin göstergesi olan azalım eğrileri için alt sınır üst sınır ve ortalama eğrileri önermiştir (Şekil 2.32).



Şekil 2.32: Doğal kumlar için önerilen ortalama ve sınır eğriler (Seed, 1986)

Kohezyonlu zeminler için önerilen eğri takımları literatürde mevcuttur, ancak bu eğriler bu tezin bir sonraki ana başlığı malzeme ve yöntem alt başlığı altında verilecek ve elde edilen veri tabanı ile karşılaştırılacaktır.

Hiperbol modele alternatif olarak Ishibashi ve Zhang (1993) tarafından başka bir matematiksel form önerilmiştir. Kohezyonlu ve plastisite indisi yüksek olan zeminler için de kullanılacak bu formül takımının en önemli handikaplarından birisinin yüksek gerilme seviyelerinde gerçekten uzak tahminler yapması olarak önce çıkartılmıştır (Darendeli, 2001). Bu araştırmada modül azalımı eğrisi eşitlik 2.29 daki gibi tanımlanmıştır.

$$\frac{G}{G_{\max}} = K(\gamma, PI) * \bar{\sigma}_0^{m(\gamma, PI) - m_0} \quad (2.29)$$

Burada ;

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left[1 - \tanh \left\{ \ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right\} \right] * e^{-0.0145PI^{1.3}} \quad (2.30)$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left[1 + \tanh \left\{ \ln \left(\frac{0.000102 + n(PI)^{0.492}}{\gamma} \right) \right\} \right] \quad (2.31)$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 & PI = 0.0 \\ 3.37 \times 10^{-6} \times PI^{1.404} & 0 < PI < 15 \\ 7 \times 10^{-7} \times PI^{1.976} & 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} \times PI^{1.115} & PI > 70 \end{cases} \quad (2.32)$$

olarak verilmiştir. Ayrıca Ishibashi ve Zhang (1993) kayma modülü azalım eğrisi ile bağlantılı zeminlerin sönüm davranışını tahmin edebilen ilişkiyi 2.33'teki gibi önermişlerdir.

$$D = \frac{0.333 * (1 + e^{-0.0145PI^{1.3}})}{2} \left[0.586 * \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 * \left(\frac{G}{G_{max}} \right) + 1 \right] \quad (2.33)$$

Bu eşitliklerden yıllar sonra Darendeli (2001) Amerika'da ROSRINE projesi kapsamında 20 sahadan alınarak, The Universtiy of Texas at Austin'de dinamik zemin özellikleri belirlenen örselenmemiş numunelerin rezonant kolon ve burulmalı üç eksenli sonuçlarından oluşturduğu veritabanı ile günümüzde geoteknik deprem mühendisliği problemlerinde sıklıkla başvuru denkleminin önermiştir. Çalışmasında, Bayes olasılık teoreminden faydalanan araştırmacı aşağıda verilen 2.34-2.35 numaralı eşitlikleri önermiştir.

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^a} \quad (2.34)$$

$$D_{kalibre} = b * \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^{0.1} * D_{Masing} + D_{min} \quad (2.35)$$

Bu dört parametrelilik (a,b, γ_r , D_{min}) modelde bilinmeyenlerden D_{min} denklem (2.18)'de verilmiştir. a ile gösterilen parametre eğrilik parametresidir ve kayma modülü azalımı eğrisinin konkavlık veya konvekslik derecesini belirler; b sönüm oranı değişiminin çevrim sayısı ile değişimini ilişkilendiren bir parametredir. Son olarak, γ_r referans birim kayma deformasyonu olarak tanımlanır. Referans birim kayma deformasyonu normalize kayma modül eğrisi üzerinde $G/G_{maks} = 0.5$ olduğu deformasyon değeridir.

Literatürde zeminlerin sönüm oranlarının amprik olarak tahimn edilebildiği ve kayma modülü azalımlı eğrisinin evrilmesiyle elde edilmiş korelasyonlar da bulunmaktadır. Bunlardan ilki Uchida ve diğ. (1980) tarafından önerilmiştir(Denklem 2.36). Buna göre;

$$D(\%) = \left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right)^{0.1} * \left(a + b \frac{G}{G_{max}}\right) \quad (2.36)$$

a ve b birer eğri düzeltme katsayısıdır.

Zhang (1994) genelden biraz farklı olarak modül değişimi ile sönüm artımını eşitlik 2.37 ile ilişkilendirmiştir.

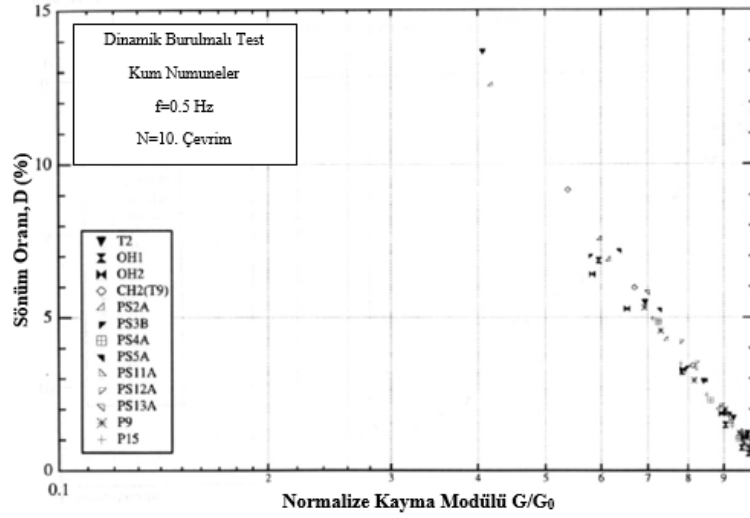
$$D(\%) = A * \exp^{-a\left(\frac{G}{G_{max}}\right)^b} \quad (2.37)$$

Burada A,a ve b birer regresyon katsayısıdır. A normalize kayma modülü eğrisinin 0 değerini aldığı noktadaki maksimum sönüm oranıdır. Zhang maksimum ve minimum sönüm oranlarını sırası ile %40 ve %0.9 olarak önermiştir.

Bir başka çalışmada ise Hwang (1997) on üç adet örselenmemiş kumlu zeminde yaptığı laboratuvar deneyleri(burulmalı kesme) neticesinde Şekil 2.33'deki gibi bir D-log(G/Gmaks) ilişkisi bulmuştur. Buradan hareketle eşitlik 2.38'i önermiştir.

$$D(\%) = S_{DG} * \log\left(\frac{G}{G_{max}}\right) + I_{DG} \quad (2.38)$$

Literatürde son dönemde spesifik olarak granuler zeminlerin incelendiği ve bu tez çalışmasının da çıkış noktası olan Öztoprak ve Bolton (2013) tarafından önerilen hiperbolik modelin ortaya çıktığı çalışmadır. Bu çalışma tezin ileriki bölümlerinde daha detaylı olarak anlatılacaktır. Benzer doğrultuda Vardanega ve Bolton (2013) geliştirilen ve kohezyonlu zeminlerin rijitlik azalımının deformasyon hızına bağlı olarak yeniden tanımlandığı çalışmanın detaylarına bir sonraki kısımda değinilecektir.



Şekil 2.33: D-log(G/Gmaks) ilişkisi (Hwang,1997)

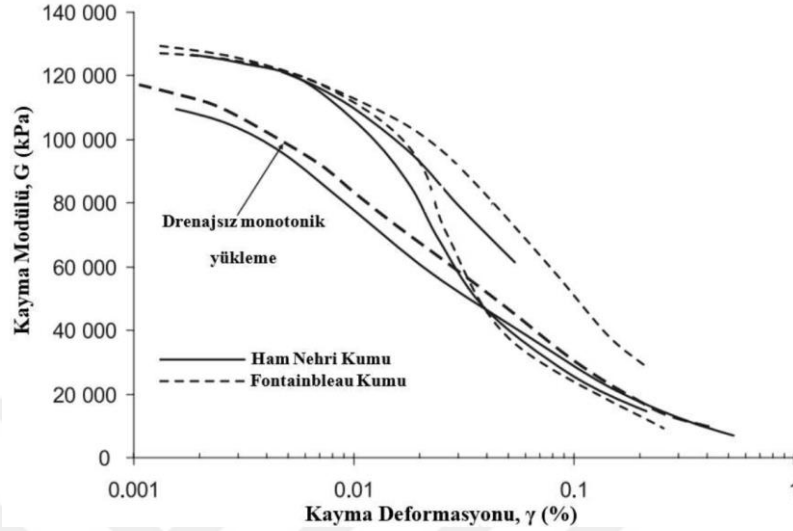
2.5. ZEMİNLERDE DEFORMASYON HIZININ RİJİTLİK VE SÖNÜM ORANINA ETKİSİ

Rijitlik-deformasyon ilişkisinin belirlenmesi veya bilinmesi geoteknik problemlerin hemen hemen hepsinde önemli bir husustur. Ancak bu problemlerin deformasyon hızları çok geniş aralıkta değişmektedir. Literatürde şu ana kadar incelenen rijitlik-birim deformasyon; sönüm oranı birim deformasyon eğrilerinin tanımlandığı çalışmalarda, deformasyon hızının modül azalmasına ve sönüm davranışına etkisi detaylı incelenmemiştir. Bu bölümde deneysel olarak deformasyon hızı -modül azalımı;sönüm davranışı-deformasyon hızı ilişkilerin inceleyen çalışmalardan birkaçına değinilecektir.

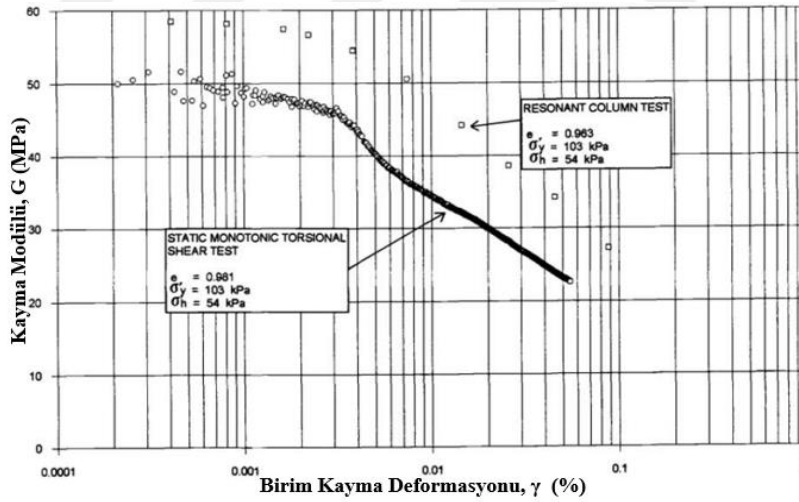
Deformasyon hızı ve rijitlik azalımı ilişkisinin farklı kumlarda etkisini inceleyen çalışmalardan biri Georgiannaou ve Tsomokos (2008) tarafından yapılmıştır yazarlar; Ham Nehri ve Fontainebleau kumu olarak bilinen kum zemin üzerinde monotonik-statik ve dinamik üç eksenli deneyler yapmışlar ve statik yükleme altında aynı koşullardaki zeminin rijitliğini daha çabuk kaybettiğini gözlemlemişlerdir (Şekil 2.34).

Kumlu zeminlerde, deformasyon hızının zeminlerin gerilme-deformasyon davranışına etkisini inceleyen bir diğer araştırmacı Lo Presti'dir (1993). Araştırmacı ekibi ile birlikte yaptığı Ticino ve Quiou kumları üzerine yaptığı çalışmalarda yüksek frekanslı rezonant kolon ve monotonik düşük hızlı burulmalı üç eksenli deney sonuçlarını karşılaştırarak yükleme hızının etkisini incelemiştir. Şekil 2.35'e bakıldığında; hem başlangıç modülünün yüksek hızlı deneyde daha

yüksek değerlerde başladığını hem de azalımın tıpkı ,Georgiannou ve Tsomokos'un çalışmasında gösterildiği gibi,daha geç olduğu görülmektedir.



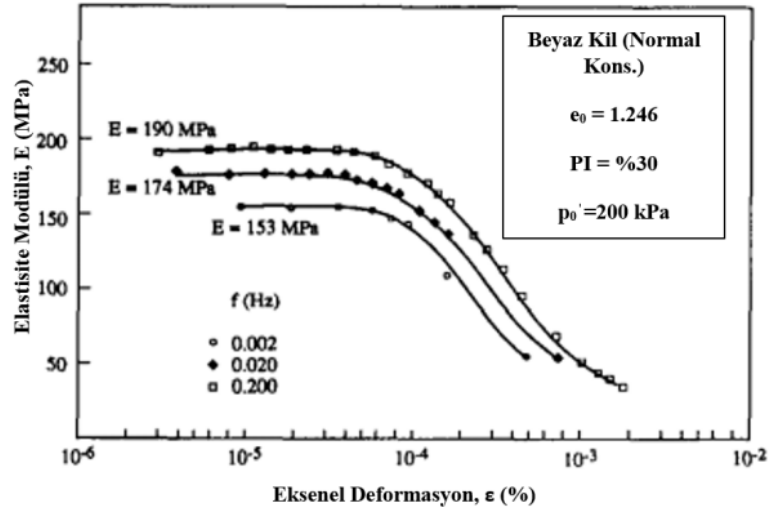
Şekil 2.34: Kumların monotonik yükleme altında rijitlik değişimi (Georgiannou & Tsomokos, 2008)



Şekil 2.35: İri taneli zeminlerde yükleme hızına bağlı rijitlik değişimi (Lo Presti ve diğ.,1993)

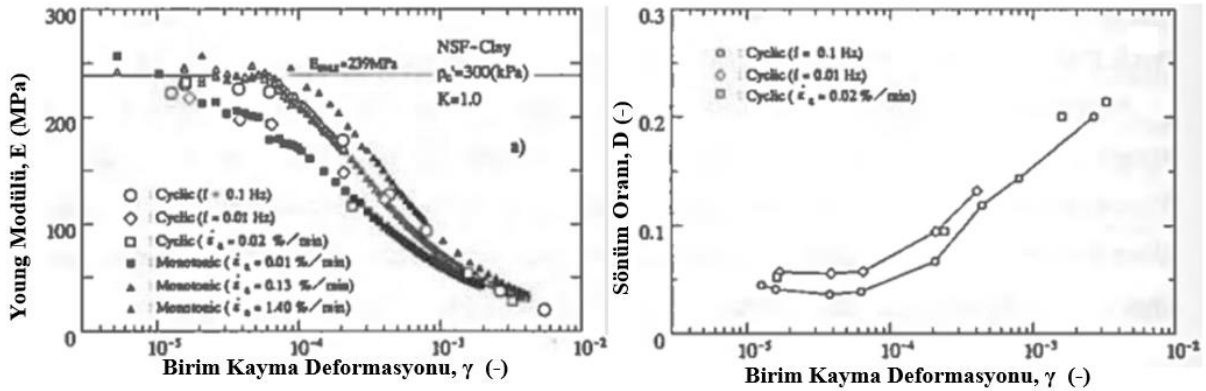
Kohezyonlu zeminlerin deformasyon hızına tepkisi, granüler zeminlere göre çok daha belirgin olmaktadır.Şekil 2.36'da Hicher (1996)tarafından killi bir zemine yapılan rijitlik-deformasyon deneyi görülmektedir.Buna göre daha yüksek frekansla yapılan deneylerde hem başlangıç rijitliği büyük olmakta hem de azalım daha büyük deformasyonlarda başlamaktadır.

Shibuya ve diğ. (1995) NSF kili adını verdikleri numuneler üzerinde hem statik hem de dinamik üç eksenli deneyler yapmışlar; dinamik üç eksenli deneylerde frekansı arttırarak deformasyon



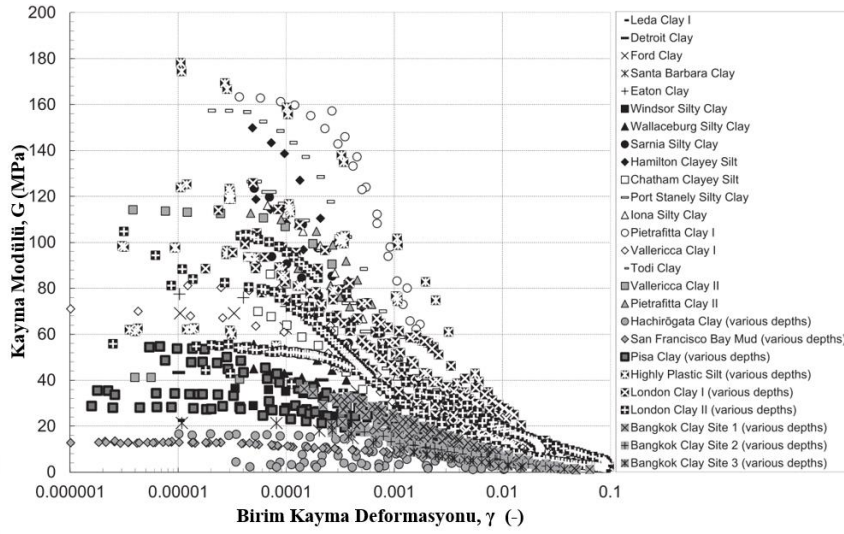
Şekil 2.36: İnce taneli zeminlerde yüklem hızı- rijitlik değişimi (Hicher ,1996)

hızının gerilme-deformasyon davranışını etkisini incelemiştir. Sonuç olarak hem kayma modülü hem de sönüm oranının değişiminin deformasyon hızına bağlı olarak grafik üzerinde sağa kaydığını yani; modül azalımının geç olduğu ve bununla birlik sönümlenme davranışının geciktiğini göstermişlerdir (Şekil 2.37).



Şekil 2.37: Yüklem hızı-zemin dinamik özellikleri (Shibuya ve diğ. ,1995)

Kohezyonlu zeminlerin literatürde yayınlanmış modül azalım eğrilerini bir araya getirerek, modül azalımı için sıklıkla kullanılan ve daha önceki kısımlarda bahsedilen hiperbolik modeli güncelleme amaçlı yapılan çalışmalardan birisi Vardanega ve Bolton (2013)'a aittir. Yirmibir farklı kil türüne ait toplam 67 test ile yapılan istatistiksel analizlerde en dikkat çekici kısım önerilen modül azalım eğrilerinin statik ve dinamik problemler için ayrı ayrı kullanımı mümkün kılabilmek için deformasyon hızı düzeltilmesi yapılması olarak gösterilebilir.



Şekil 2.38: Vardanega ve Bolton tarafından kullanılan deney eğrileri (2013)

Veritabanlarına dahil ettikleri çalışmalarda deformasyon hızı etkisi ile saçılmalar saptayan araştırmacılar; yüksek frekansta ve yüksek deformasyon hızlarında yapılan rezonant kolon deneyi ile çok yavaş yapılan bir tipik üç eksenli statik deney sonuçlarını bir arada değerlendirmek için eğrilere hız düzeltmesi yapılması gerektiğini belirtmişler ve aşağıdaki kabul ile bir prosedür uygulamışlardır. Yazarlara göre;

“Hassasiyet gözetilerek deney cihazında yerleştirilen ve standartlara uygun bir şekilde drenajsız bir monotnik bir deneyde zeminin maksimum mukavemete geldiği kayma birim deformasyonu yaklaşık %3'tür. Bu deformasyona değerine ulaşmak için geçen süre ortalama sekiz saat kabul edilirse deformasyon hızı, $\dot{\gamma} = \frac{10^{-6}}{s}$ olmaktadır. Diğer taraftan, tekrarlı kayma deformasyon genliği %0.1 olan bir rezonant kolon deneyinde rezonans frekansı 50 Hz. olarak kabul edilirse statik yüklemdeki birim deformasyon düzeyine $\dot{\gamma} = 0.3/s$ deformasyon hızı ile ulaşmaktadır ki bu statik deney deformasyon hızından $5.5 \cdot \log_{10}$ kat daha büyük bir hızdır. Bu durumda tüm deney datalarını bir arada değerlendirebilmek için ölçülmüş modül değerlerini Z gibi bir hız katsayısına bölmek gerekmektedir.” (eşitlik 2.39).

$$G = \frac{G_{ölçülen}}{Z} \quad (2.39)$$

Burada Z katsayısı için bir eşitlik daha öneren araştırmacılar, bunun için veritabanlarına inceleyerek logaritmik olarak deformasyon hızının 10 kat arttığında rijitlik (modül) değerinin yaklaşık %5 arttığını göstermişler ve sonuç olarak Z için eşitlik 2.40'ı önermişlerdir.

$$Z = \left[1 + 0.05 * \log_{10} \left(\frac{\dot{\gamma}}{10^{-6}} \right) \right] \quad (2.40)$$

Bu eşitlikte $\dot{\gamma}$, modül azalımı ölçümü yapılan deneyin deformasyon hızı olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, probleme ait deformasyon hızının statik analizlerde; tipik bir üç eksenli deneyin hızın olan ve yukarıda hesabı anlatılan 10^{-6} /s; deprem analizi gibi dinamik problemlerde 10^{-2} /s değerine normalize edilmesi yazarlar tarafından önerilmektedir.

3 MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışmasına esas olan çalışma yöntemi tanıtılacaktır. Öncelikle istatistiksel çalışmaya olanak sağlayan veritabanının nasıl kurulduğundan bahsedilecek; ardından tezin çıkış kaynağı olan Öztoprak ve Bolton (2013) tarafından önerilen ve granüler zeminler için kullanımı oldukça kolay modifiye hiperbol model anlatılacaktır. Bu modelin deformasyon hızı düzeltmesi ile güncellenmesi detaylı olarak açıklanacaktır.

Bir sonraki kısımda ince taneli, kohezyonlu zeminlerin başlangıç rijitliği ve azalım eğrisinin elde edildiği veritabanına ait istatistiksel bilgiler verilerek çoklu regresyonun nasıl yapıldığı anlatılacaktır. Yeni önerilecek olan bu denklem takımına Vardanega ve Bolton (2013) yönteminin yerini alabilecek deformasyon hızı düzeltmesinin nasıl yapıldığı anlatılacaktır. Tüm zemin türleri için başlangıç sönüm değerlerinin bağlandığı zemin parametreleri ile ilişkileri sunularak; denklemlerin ortaya çıkışı gösterilecektir.

Önerilen modellerin deneysel doğrulamasını sağlamak amacıyla sınırlı sayıda deney ile yapılan rezonant kolon ve burulmalı üç eksenli deneylerin yapım yöntemleri tanıtılacak; deney programı ve başlangıçtaki zemin koşulları verilecektir.

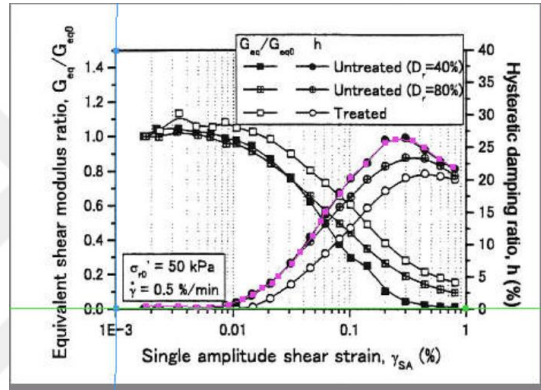
Son bölümde önerilen modellerin, nümerik uygulamasına esas teşkil eden vaka ve laboratuvar deneyi çalışmalarından bahsedilip; girdi olarak kullanılan parametreler sunulacaktır. Kullanılan yazılımlar kısaca tanıtılacaktır.

3.1. VERİTABANLARININ OLUŞTURULMASI

1960'lı yıllardan bugüne zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemek, bu özelliklerin deformasyonla değişimini incelemek ve zemin indeks özellikleri-yükleme şartlarının etkisini ortaya koymak için laboratuvarında yapılan deneylerin sonuçlarının aktarıldığı sayısız çalışma literatürde mevcuttur. Bu çalışmalarda kullanılan başlıca deney tipleri ise rezonant kolon (RC), tekrarlı eksenel (CTX) burulmalı üç eksenli (TS) ve dinamik basit kesme (DSS)'dir.

Bu bağlamda ilk olarak 1960'lı yıllardan günümüze kadar olan süreçte farklı araştırmacıların farklı deney düzenekleri ile karakteristik özellikleri ve yükleme şartları birbirinden farklı numunler üzerinde yapmış oldukları ve zeminlerin dinamik özelliklerinin ölçüldüğü deney sonuçlarını yarı logaritmik ekseninde veren eğriler "jpeg" formatında kaydedilmiştir. Kurulan

veritabanı ile ilgili taranan yayın, toplanan grafik ve dijitize edilen eğri sayıları Tablo 3.1’de verilmiştir. Literatürdeki yayınlardan elde edilen deney grafikleri dijitalleştirmek için Şekil 3.1’de arayüzü gösterilen GetData Graph Digitizer 2.26 isimli yazılımda açılmış; grafiğin yatay ve dikey eksenine ait maksimum ve minimum değerleri ile kayma deformasyonunu gösteren yatay ekseninin logaritmik olduğu belirtilmiştir. Daha sonra dinamik özellikler ile kayma deformasyonu ilişkisini gösteren deney eğrisi 22 nokta seçilerek Şekil 3.2’deki gibi sayısallaştırılmıştır. Sayısallaştırılan bu eğriler Şekil 3.4’de gösterilen Excel formatındaki dosyalara aktarılmış ve zeminlerin rijitlik -sönümlenme davranışını modellemede kullanılacak veritabanı şekillendirilmiştir.



Şekil 3.1: GetData Graph Digitizer ekran görüntüsü ve verilerin işlenmesi

Information		rx	rx-m1	rx-m2
No			rx-m1	rx-m2
Reference			Kokusho&Esashi & Sakurai_1980	Kokusho&Esashi & Sakurai_1980
Test no in ref.			S-11	S-11
Material name			Tonegawa Sand	Tonegawa Sand
Matrial descr.			SP	SP
Preparation			Recons.	Recons.
Test type			CTX	CTX
Strain Rate (%/s)			-	-
RC_TS_strain (%)			-	-
Frequency (Hz.)			0.075	0.075
Drainage			Undrained	Undrained
p'_0 (MPa)			0.10	0.20
D_{min} (%)			1.28	1.19
D_{max} (%)			11.49	8.36
Cycle (N)			10	10
σ_s (kPa)			100.0	200.0
I_p (%)			-	-
e_0			0.802	0.794
FC (%)			2.5	2.5
D_{50} (mm)			0.402	0.402
U_c			1.78	1.78
OCR			-	-
G_s			2.701	2.701
S (%)			100	100

Şekil 3.2: GetData Graph Digitizer ekran görüntüsünün sayısallaştırılması, Excel çalışma sayfasına veri girişi

Veritabanına eklenen yayınlar ile detaylı bilgi tezin “Ekler” kısmında tablolar halinde verilmiştir.

Tablo 3.1: Veritabanlarının oluşturulduğu yayın ve sayısallaştırılan eğri sayıları

Veritabanı Adı	Taranan Yayın	Toplanan	Dijitize Edilen
	Sayısı	Grafik Sayısı	Eğri Sayısı
İri Taneli Zeminlerde Sönüm Oranı	70	257	806
İnce Taneli Zeminlerde Modül Azalımı	60	271	857
İnce Taneli Zeminlerde Sönüm Oranı	75	208	701

Şekil 3.4’te verilen Excel çalışma sayfasının sarı renkli hücrelerinin olduğu bölümde, veritabanına eklenen referanslar ile ilgili yazar bilgileri, yayın yılı, zemin ismi, bu zeminin USCS’ye göre sınıfı ve numune hazırlama yöntemi bilgileri verilmiştir. Bunun yanında deney türü, deformasyon hızı, frekans ve deney esnasındaki drenaj durumu not edilmiştir. En son bölümde, deney sırası gerilme şartları, zemin indeks özellikleri ve gerilme geçmişi ile bilgiler çalışma sayfasına girilmiştir. Her kaynak için hazırlanan bu çalışma sayfaları Şekil 3.3’te verilen Matlab kodu ile birleştirilerek bir araya getirilmiştir.

```
% Bu dosya G/Gmax-ss eğrilerini bir araya toplama,duzenleme dosyasıdır
clc
clear all

%1 Klasördeki dosyaları arka arkaya okutmak
source_dir = 'F:\tez_dr\1.rapor\DSST';
dest_dir = 'F:\tez_dr\1.rapor\DSST';
cd (source_dir);
source_files = dir(fullfile(source_dir, '*.xlsx'));

boyut=length(source_files);
isim_liste=cell(1,boyut);
matris=[];
matris_b=[];
for i=1:boyut
    isim=source_files(i).name;
    isim_liste{i}=isim;

    data_cell{i}=xlsread(isim,'21lik','CT4:EI20');

    if length(data_cell{i})==41
        data_cell{i}(:,42)=NaN;
    end
    matris_b=data_cell{i};
    matris=[matris matris_b];
    for j=2:2:42
        x=data_cell{i}(:,j-1);
        y=data_cell{i}(:,j);
        semilogx(x,y,'g<');
        hold on;
    end
    fprintf('%d/%d tamamlandı\n',i,boyut);
end
```

Şekil 3.3: Veri birleştirmede kullanılan Matlab kodu

№	rx-n1	rx-n2	rx-n3	rx-n4	rx-n5	rx-n6	rx-n7	rx-n8	rx-n9	rx-n10	rx-n11	rx-n12	rx-n13	rx-n14	rx-n15	rx-n16	rx-n17	rx-n18	rx-n19	rx-n20	rx-n21
Reference	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193	LandShow_193
Test no in ref.																					
Material name	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2	RS2
Material descr.	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar	Washed Mortar
Preparation	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP
Test type	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC	RC
Strain Rate (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RC_TTS_strain (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Frequency (Hz.)	20-225	20-225	20-225	20-225	20-225	20-225	20-225	20-225	165.7	20-225	20-225	20-225	20-225	20-225	20-225	20-225	189.56	20-225	20-225	185.3	20-225
Drainage	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained	Undrained
P ₀ (MPa)	0.03	0.06	0.11	0.22	0.44	0.88	1.77	3.45	3.46	0.04	0.07	0.12	0.24	0.46	0.90	1.78	0.83	0.14	0.21	0.83	0.14
D _{min} (%)	0.70	0.34	0.35	0.25	0.24	0.21	0.18	0.14	0.14	0.46	0.40	0.21	0.26	0.18	0.19	0.15	0.16	0.37	0.24	0.32	0.43
D _{max} (%)	2.04	1.95	1.81	1.16	0.92	0.70	3.85	0.38	7.79	3.01	2.68	2.06	0.5	1.09	0.81	0.84	1.45	2.21	2.03	0.76	1.21
Cycle (N)	3	3	3	3	3	3	3	3	#N/A	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
σ ₁ (kPa)	27.6	55.2	110.0	221.0	442.0	883.0	1766.0	3458.0	3468.0	41.0	69.0	124.0	252.0	455.0	897.0	1786.0	828.0	138.0	207.0	828.0	138.0
I ₀ (%)	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
ε ₀	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.71	0.71	0.71	0.72	0.72
FC (%)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
D ₉₀ (mm)	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445	0.445
U _c	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14
OCR	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
G _s	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85
S (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

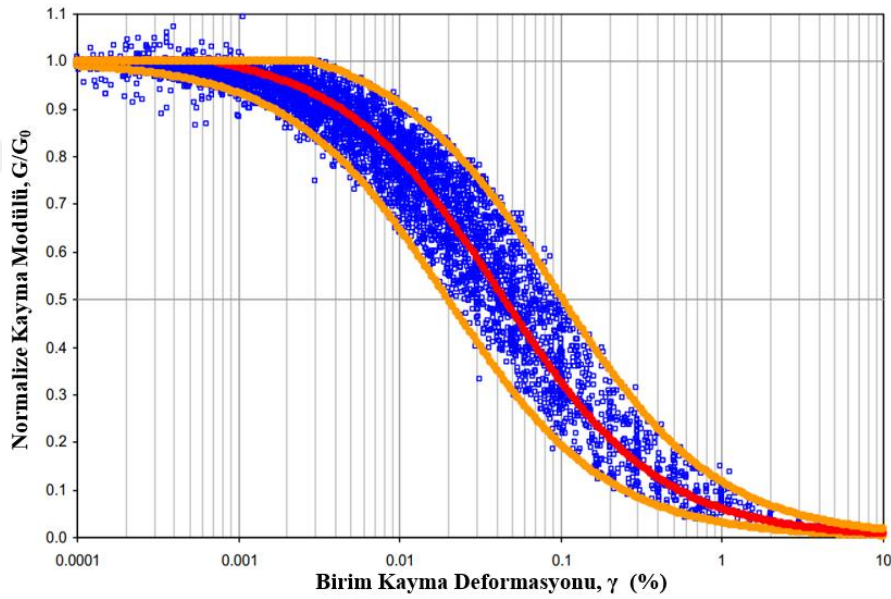
Şekil 3.4: Veritabanı için oluşturulan excel dosyası

3.2. İRİ TANELİ ZEMİNLERDE KAYMA MODÜLÜ AZALIMININ BELİRLENMESİ

Bu bölümde tez çalışmasının çıkış kaynağı olan ve literatürde kabul görmüş Öztoprak ve Bolton tarafından (2013) önerilen çalışmadan bahsedilecek; sonrasında bu tez çalışması kapsamında yükleme hızının mevcut eğri parametrelerine nasıl aktarıldığı ve formüllerin nasıl güncellendiği anlatılacaktır.

3.2.1. Öztoprak ve Bolton (2013) Tarafından Önerilen Denklemler

Öztoprak ve Bolton (2013) iri taneli kumlu zeminlerin laboratuvar ortamında dinamik üç eksenli, burulmalı ve ağırlıklı olarak rezonant kolon deney sonuçlarını bir veri tabanına toplayarak toplam 454 deney sonucu ile iri taneli zeminlerin başlangıç rijitliğinin değişimini iri taneli zeminlerin bazı indeks özellikleri ve gerilme durumuna göre güncelleyen bir hiperbol model önermişlerdir (Şekil 3.5)



Şekil 3.5: 454 deney ile elde edilen veritabanı eğrileri (Oztoprak & Bolton,2013)

Bu hiperbol modelin genel denklemi eşitlik 3.1'deki gibi verilmektedir.

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma - \gamma_e}{\gamma_r}\right)^a} \quad (3.1)$$

Burada, a hiperbol eğrinin eğrissellik katsayısı; γ_r maksimum modülün yarıya düştüğü birim deformasyon ($G/G_{maks}=0.5$); γ_e elastik deformasyon eşiği olarak adlandırılmıştır. Bu üç

değişken ile iri taneli zeminlerin rijitlik azalımı modellenilebilmekte ve bilgisayar yazılımlarında uyumlu olarak kullanılabilir. Bu üç değişken sırasıyla (3.2),(3.3) ve (3.4) eşitlikleri ile tanımlanabilmektedir.

$$a = U_C^{-0.075} \quad (3.2)$$

$$\gamma_r(\%) = 0.01 * U_C^{-0.03} * \left(\frac{p'}{p_a}\right) + 0.8 * e_0 * I_D \quad (3.3)$$

$$\gamma_e(\%) = 0.0002 + 0.012 * \gamma_r \quad (3.4)$$

Burada U_C tane dağılımı eğrisinden elde edilen uniformluk katsayısı,

p' zeminin maruz kaldığı ortalama efektif gerilme (kPa)

p_a atmosferik basınç (100 kPa)

e_0 başlangıç boşluk oranı

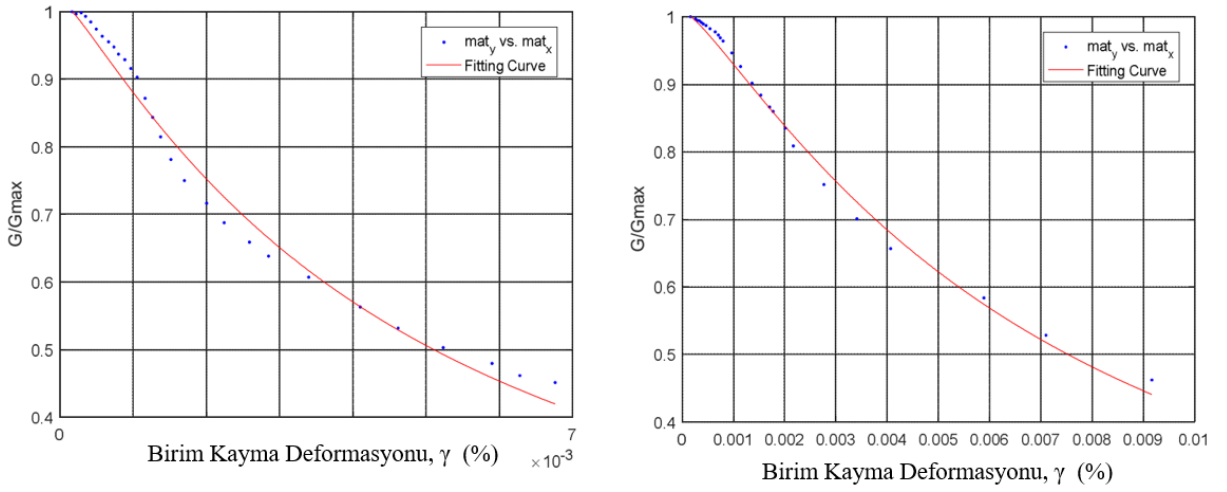
I_D relatif sıklık olarak tanımlanmaktadır.

Yazarlar çalışma kapsamında veritabanından, kumlu zeminler için başlangıç rijitliği için denklem 3.5'i önermişlerdir.

$$G_0 = \frac{5760 * p_a}{(1 + e)^3} * \left(\frac{p'}{p_a}\right)^{0.5} \quad (3.5)$$

3.2.2. İri Taneli Zeminlerde Deformasyon Hızı veya Frekansın Modül Azalımına Etkisi

İri taneli zeminlerin rijitlik azalımı modellenirken Öztoprak ve Bolton (2013) tarafından kurulan veritabanında tüm deney koşullarını sabit tutup sadece yükleme hızını değiştirerek rijitlik değişimini inceleyen araştırmacıların çalışmaları Bölüm 3.1'deki süreç uygulanarak butik bir veritabanına dönüştürülmüştür (Tablo 3.2). Bu veri tabanında bulunan deneyleri yükleme hızı yelpazesi birbirinden farklı ve çok geniş olduğundan hızları normalize edecek bir katsayı türetilmiştir. Yükleme hızlarının farklı olmasının başlıca sebebi statik üç eksenli deneyden rezonant kolona bir çok tipte deney sonucunun veritabanına eklenmesidir. Deformasyon hızının rijitlik denklemlerine eklemek amacıyla seçilen eğrilerin modifiye hiperbol parametrelerini belirleyebilmek için MATLAB yazılımının içerisinde gömülü olarak bulunan ve bir uygulama olan "curve fitting" alt programı ile Şekil 3.6'daki gibi deney noktaları ve hiperbol denklemi üst üste getirilmiştir. Hiperbol denkleminin üç bilinmeyeni olan a , γ_r ve γ_e değerleri not edilmiştir.



Şekil 3.6: Quiou Kumu için eğri geçirme (Lo Presti ve diğ.,1995)

Tablo 3.2: Hız düzeltmesi için oluşturulan özel veritabanında bulunan referanslar

Referans	Test Türü	Kum Tipi	Drenaj Durumu	Doygunluk	p' (kPa)	U _c	e ₀	I _D (%)	f (Hz)	Strain Rate, (%/s)
Lo Presti et al.,1997	CLTST	Toyoura	U	D	100	1.35	0.897	23.5	0.1	1.20E-02
Lo Presti et al.,1997	MLTST	Toyoura	U	D	101	1.35	0.897	23.5	#N/A	6.67E-04
Lo Presti et al.,1997	RCT	Toyoura	U	D	100	1.35	0.897	23.5	115	1.38E+01
Lo Presti et al.,1997	CLTST	Quiou	U	D	100	4.4	1.152	28.7	0.1	1.20E-02
Lo Presti et al.,1997	MLTST	Quiou	U	D	100	4.4	1.152	28.7	#N/A	6.67E-04
Lo Presti et al.,1997	RCT	Quiou	U	D	100	4.4	1.152	28.7	115	1.38E+01
Lo Presti et al.,1995	MLTST	Quiou	U	D	70.3	4.4	0.963	70.7	0.2	2.40E-02
Lo Presti et al.,1995	RCT	Quiou	U	D	70.3	4.4	0.963	70.7	100	1.20E+01
Georgiannaou et. al,2008	MTX	Fontainebleau	D	S	130	1.42	0.717	45.5	0.1	2.00E-01
Georgiannaou et. al,2008	CTX	Fontainebleau	D	S	130	1.42	0.717	45.5	#N/A	1.20E-02
Georgiannaou et. al,2008	CTX	Ham River Sand	U	S	130	1.78	0.735	40.0	0.1	2.00E-01
Georgiannaou et. al,2008	MTX	Ham River Sand	U	S	130	1.78	0.735	40.0	#N/A	4.00E-03
Konstadinou et. al,2013	CTX	Ottawa 20/30 Sand	U	S	120	1.35	0.683	24.8	0.1	2.00E-01
Konstadinou et. al,2013	MTX	Ottawa 20/30 Sand	U	S	120	1.35	0.683	24.8	#N/A	5.00E-03
Shibuya et. al,1992	CTX	Hamaoka Sand	D	S	53.3	1.89	0.628	93.1	0.1	2.00E-02
Shibuya et. al,1992	MTSS	Hamaoka Sand	D	S	53.3	1.89	0.628	93.1	#N/A	1.67E-04
Shibuya et. al,1992	RCT	Toyoura	D	D	98.1	1.52	0.783	52.2	50	1.00E+01
Shibuya et. al,1992	MTX	Toyoura	D	D	98.1	1.52	0.783	52.2	#N/A	8.33E-05
Shibuya et. al,1992	RCT	Toyoura	D	D	98.1	1.52	0.696	75.5	50	1.00E+01
Shibuya et. al,1992	CTX	Toyoura	D	D	96	1.52	0.696	75.5	0.1	2.00E-01
Shibuya et. al,1992	MTTS	Toyoura	D	D	97	1.52	0.696	75.5	#N/A	4.16E-03
Shibuya et. al,1992	CTX	Sengenyama	D	S	117	2.06	0.6	75.7	0.1	2.00E-02
Shibuya et. al,1992	MTX	Sengenyama	D	S	117	2.06	0.6	75.7	#N/A	8.33E-04
Tatsuoka & Kohata	MTX	Ticino Sand	U	D	49	1.33	0.64	86	#N/A	1.67E-04
Tatsuoka & Kohata	CTX	Ticino Sand	U	D	49	1.33	0.64	86	0.1	2.00E-01
Lo Presti,1991	RCT	Ticino Sand	U	D	49	1.33	0.64	86	120	2.40E+01
Tatsuoka & Kohata,1994	MTX	Toyoura	U	D	49	1.46	0.819	42	#N/A	1.67E-04
Stokoe et. al,1994	TS	Sandy Soil	U	S	600	3.73	0.86	#N/A	0.5	1.00E+00
Stokoe et. al,1994	RCT	Sandy Soil	U	S	600	3.73	0.86	#N/A	30	6.00E+00
Lo Presti et al.,1997	CLTST	Quiou	U	D	300	4.4	0.875	90.2	115	1.38E+01
Lo Presti et al.,1997	RCT	Quiou	U	D	300	4.4	0.875	90.2	0.5	6.00E-02

Bu noktada literatürde birçok araştırmacının da değindiği [Shibuya ve diğ. (1995);Lo Presti ve diğ., (1997);] dinamik deneylerin karakteristiklerinden yola çıkarak deformasyon hızının hesaplandığı eşitlikten bahsetmek doğru olacaktır (eşitlik 3.6) :

$$\dot{\gamma} = 4 * f * \gamma \quad \left[\frac{\%}{s} \right] \quad (3.6)$$

Burada;

γ : Kayma deformasyonu genliği (%)

f : Dinamik deney(rezonant kolon için maksimum genlik frekansı) frekansı (Hz.) olarak tanımlanmıştır.

Literatürde ve uygulamadaki geoteknik problemler doğası gereği farklı hızlara sahip yükleme koşullarına ve hızlarına sahiptir. Örneğin bir deprem ve temel oturmasının yükleme hızı arasında logaritmik olarak bile 4-5 kat fark olmaktadır. Bu nedenle tüm problemlere cevap verebilmesi açısından herhangi bir geoteknik problem veya laboratuvar deneyinin hızını rezonant kolon deney hızına normalize eden bir r parametresi önerilmektedir. Normalize edilen deney hızının rezonant kolon olmasının sebebi oluşturulan veritabanlarının ağırlıklı olarak rezonant kolon deneylerinden oluşmasıdır. Literatürde rezonant kolon deneyi için önerilen ortalama frekans değeri 50 Hz. (Lo Presti ve diğ. 1997; Bolton & Vardanega,2013); ve aynı zamanda bu deney türü için ideal birim kayma deformasyon aralığı genel olarak % 0.0001-1 [Towhata,2008; Stokoe, 1999; Diaz-Rodriguez, (2009)] olarak kabul edildiğinden; ortalama birim deformasyon genliği % 0.5 alınır ve rezonant kolon deneyi için deformasyon hızı eşitlik 3.6 kullanılarak şu şekilde belirlenebilir:

$$\dot{\gamma}_{RCT} = 4 * 50 * 0.5 = 100 \quad \left[\frac{\%}{s} \right]$$

Pratikteki bir problemin veya laboratuvardaki bir deneyin deformasyon hızı rezonant kolon deney hızı ile normalize edildiğine elde edilen r parametresi denklem (3.7)'deki gibi hesaplanır

$$r = \frac{\dot{\gamma}_{test}}{\dot{\gamma}_{RCT}} \quad (3.7)$$

Elde edilen r parametresi ile modifiye hiperbolün tanımlanmasına yardımcı olan a, γ_r arasında kurulan korelasyon ile Oztoprak ve Bolton tarafından bulunan denklemler revize edilmiştir. İlgilenilen geoteknik problemin deformasyon hızı bazen bilinmeyebilir veya öngörülemez; bu durumda Quinn (2013) tarafından derlenmiş Tablo 3.3 kullanılması tavsiye edilmektedir.

Tablo 3.3: Geoteknik Mühendisliği problemleri için önerilen tipik deformasyon hızları (Quinn, 2013)

Geoteknik Problem	Minimum (%/s)	Maksimum(%/s)	Ortalama (%/s)
Bina İnşaaası	1.6E-08	2.5E-08	2.0E-08
Dolgu İnşaaası	1.3E-07	1.3E-06	4.0E-07
Zemin Doldurma	1.9E-06	4.9E-06	3.0E-06
Rezonant Kolon	7.9E-06	7.8E-02	7.2E-04
Üç Eksenli (Monotonik)	1.6E-05	1.8E-04	5.4E-05
Ödometre	2.7E-05	2.8E-04	8.2E-05
Kazı İnşaaası	4.2E-05	4.1E-04	1.3E-04
Kazık Yükleme	8.0E-05	9.0E-04	8.4E-03
Trafik Yüğü	1.7E-04	1.6E-02	1.4E-03
Pressiyometre	2.1E-04	2.3E-03	6.8E-04
Statik Plaka Yükleme	3.3E-04	3.6E-03	1.0E-03
Dinamik Üç Eksenli	3.9E-02	3.9E-02	1.2E-01
Penetrometre	0.1	20	1
Kanatlı Kesici, Veyn	1	11376	86
Titreşim Üreten Cihazlar	2	36	9
Dinamik Plaka Yükleme	2	21	6
Deprem	2	19	6
Deniz altı kaymaları	10	5066	217
Kazık İmalatı	63	643	211
Düşen Koni Deneyi	102	1062	329
Zemin Sıkıştırma (15 Hz.)	229	950	447

3.3. İNCE TANELİ ZEMİNLERDE KAYMA MODÜLÜ VE AZALIMININ TANIMLANMASI

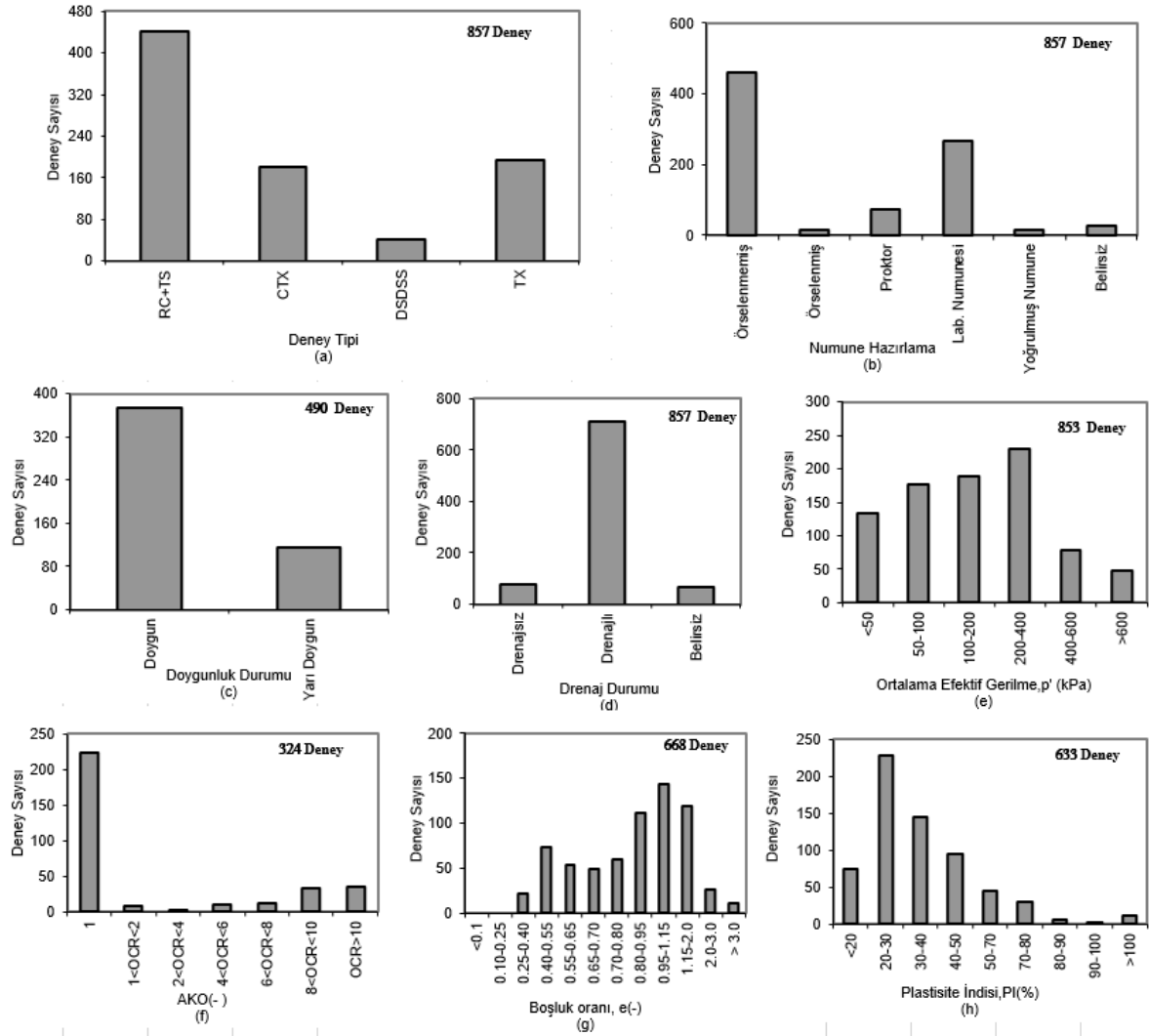
Bu kısımda tezin yeni bulgularından biri olan ince taneli kohezyonlu (killi,siltli) zeminlerde başlangıç kayma modülü ve onun azalımının nasıl modellenebileceği üzerinde durulmuştur.

3.3.1. Başlangıç Kayma Modülünün Zemin Özelliklerine Bağlı Olarak Tayin Edilmesi

Başlangıç kayma modülünün killi zeminlerdeki değişimi veya büyüklüğünü veritabanı ile ilişkilendirmeden önce; oluşturulan veritabanı ile bir takım istatistiki bilgileri vermek uygun olacaktır(Şekil 3.7)

İnce taneli zeminlerde kayma modülü ve azalımı için oluşturulan ve bilgileri bir araya getirilen veritabanından korelasyonu güçlü bir ilişki türetebilmek için başlangıç kayma modülünü etkileyen parametreler olarak ortalama efektif gerilme (p_0'), plastisite indisi (PI), boşluk oranı(e_0),tekrarlı 3 eksenli ve basit kesme deneyleri için frekans (f) , statik deneyler için kesme

hızı (γ), Doygunluk derecesi (S), Aşırı Konsolidasyon Oranı (AKO) ve ince dane oranı (İDO) seçilmiş ve bu parametreler ile başlangıç kayma modülü arasındaki ilişki incelenmiştir (Şekil 3.8).

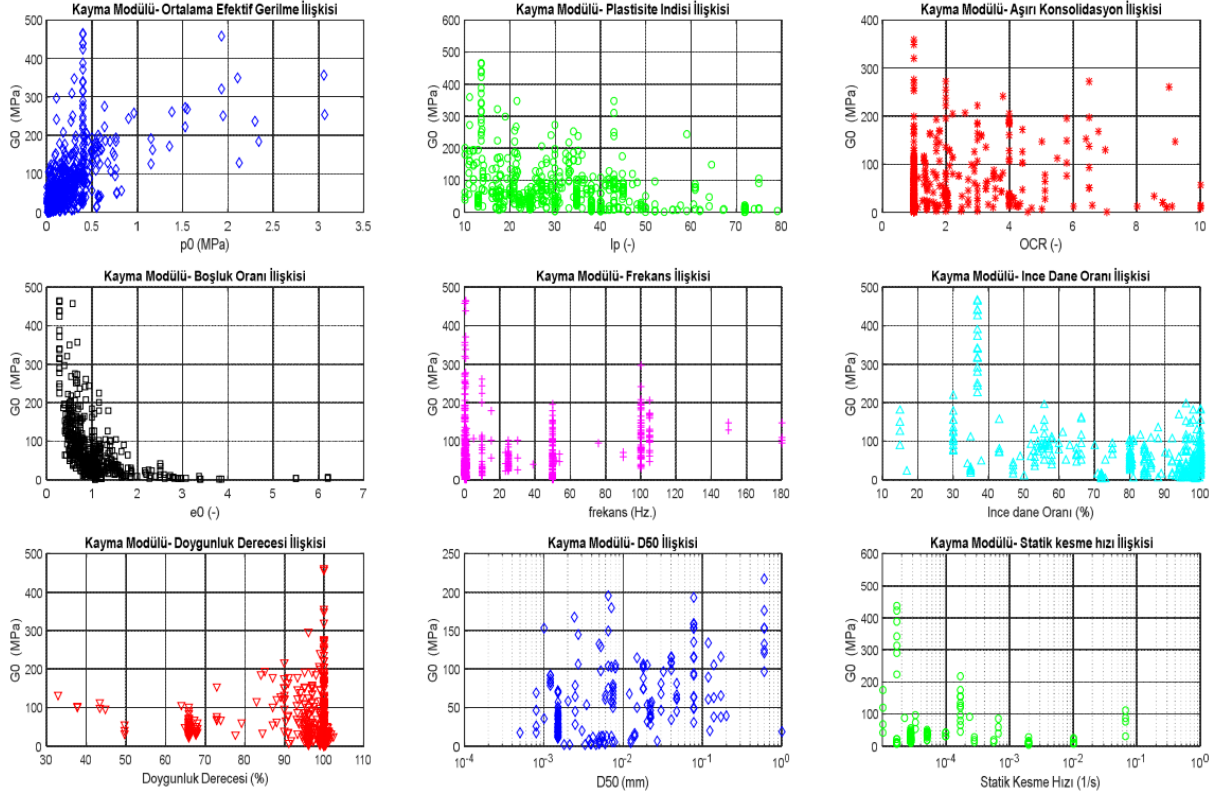


Şekil 3.7: Test sayıları ve veritabanı ile ilgili istatistiki bilgiler

Şekil 3.8'den görüleceği üzere ince taneli zeminlerde başlangıç modülü ile boşluk oranı arasında kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır. Literatürde başlangıç modülü ve boşluk oranı arasındaki ilişkiyi tanımlayabilen iki tip fonksiyon bulunmaktadır (Santagata, 1999). İlk tip fonksiyon; Hardin ve Black (1966) tarafından önerilen $f(e) = (C - e)^2 / (1 + e)$ şeklindeki polinom fonksiyondur.

Lo Presti (1989) daha geniş yelpazede zeminleri modül boşluk oranı ilişkisine cevap verebilen bir eksponansiyel fonksiyon önermiştir: $f(e) = e^{-x}$. Jamiolkowski ve diğ. (1994) altı İtalyan kili

üzerinde yapmış olduğu RC ve bender eleman deneylerine bağlı olarak fonksiyon içerisindeki x 'in 1.11 ile 1.52 arasında değiştiğini ortaya koymuşlardır.

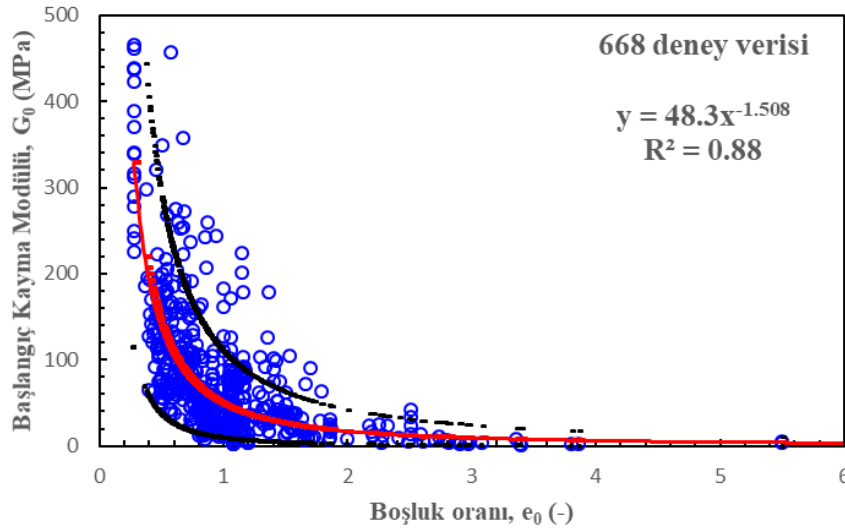


Şekil 3.8: Gmaks (G0)- Zemin parametreleri arası ilişkiler

Herhangi bir kayma birim deformasyonu seviyesinde kayma modülünü hesaplamak için aşağıdaki genel formül (eşitlik 3.8) kullanılabilir ;

$$G = \frac{A(\gamma) \cdot p_a}{f(e)} \cdot \left(\frac{p'}{p_a} \right)^{m(\gamma)} \quad (3.8)$$

Bu durumda boşluk oranı fonksiyonu için yukarıda belirtilen iki tip fonksiyondan birinin seçilmesi veya veritabanına uygun olan bulunması gerekmektedir. Şekil 3.9'da oluşturulan veritabanı içerisindeki başlangıç kayma modülünün ($\gamma \leq \% 0.0001$) boşluk oranı ile ilişkisi verilmiştir. Buna göre seçilmesi gereken boşluk oranı fonksiyonunun 2.tip olması gerektiği görülmektedir. Ancak Santagata (1998)'nın da belirttiği gibi boşluk oranı plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranı ile beraber başlangıç modülüne etkiyen bir parametredir; ve tezin ilerleyen bölümlerinde platisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranı denklem (3.8) matematiksel olarak etki ettirilerek daha güçlü bir korelasyon elde edilmeye çalışılacaktır.



Şekil 3.9: Başlangıç modül denkleminde kullanılması gereken boşluk oranı fonksiyonunun seçimi

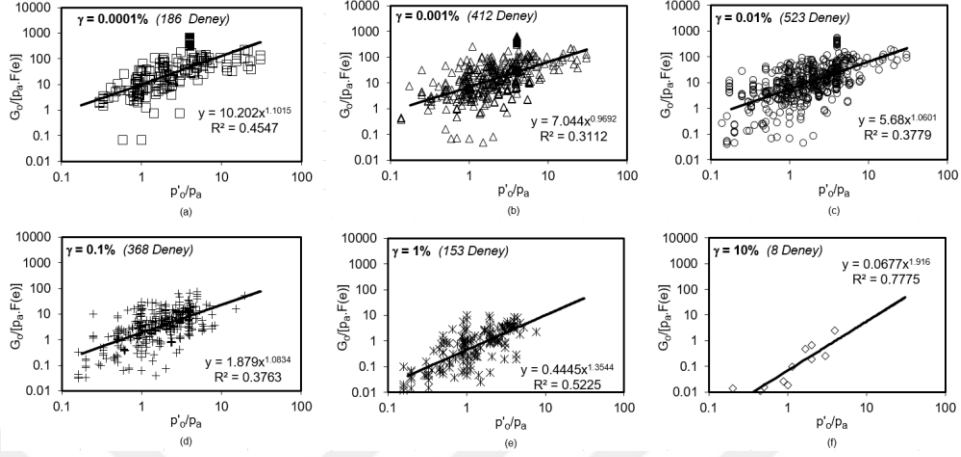
Boşluk oranı fonksiyonu belirlendikten sonra logaritmik olarak 10 kat artacak şekilde kayma deformasyonu artırılarak denklem 3.8 ile farklı deformasyonlarda kayma modülü hesaplanacaktır. Ayrıca modifiye hiperbol denklemi (eşitlik 3.1) sonuçları ve denklem 3.8'den elde edilen değerler üst üste bindirilmeye çalışılacak böylece denklem 3.8'in bilinmeyen olan $A(\gamma)$ ve $m(\gamma)$, $\gamma \leq \% 0.0001$ için elde edilecek bu değerler başlangıç kayma modülünün katsayıları olarak kabul edilecektir.

3.3.2. İnce Taneli Zeminlerde Kayma Modülü Azalımının Zemin Özelliklerine Göre Tanımlanması

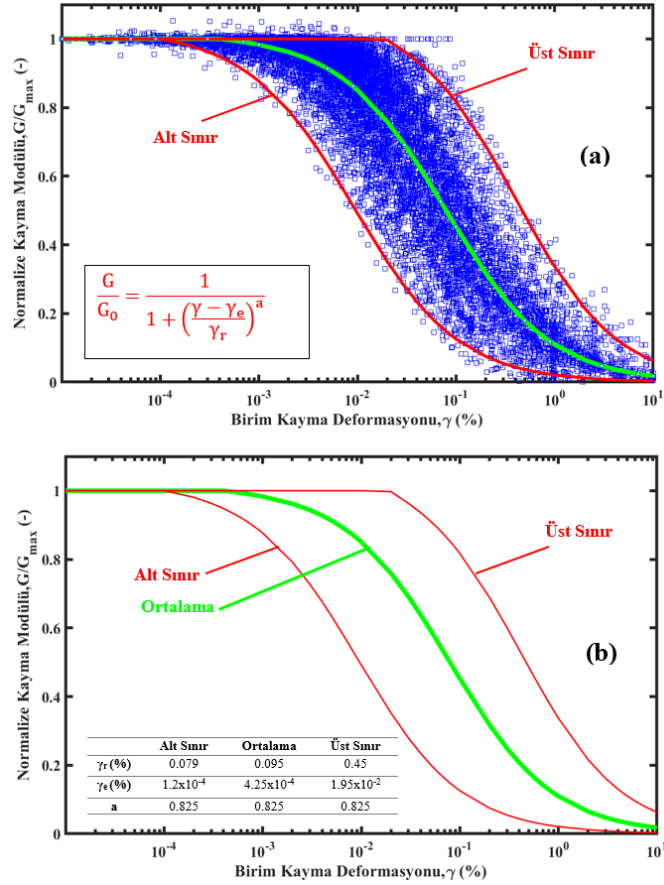
Bir önceki başlıkta değinildiği gibi bu kısımda denklem 3.1 ve denklem 3.8'in farklı gerilme düzeylerinde (p') üst üste bindirilmesi sureti ile başlangıç rijitliği büyüklüğünü hesaplanmasına olanak verecek ifadenin kalibrasyonu sağlanacaktır. Bunun için $A(\gamma)$ ve $m(\gamma)$ 'ye başlangıç değerleri atamak gerekmektedir. Bunun için $G^*f(e)/p_a - p'/p_a$ eksen takımı üzerinde farklı deformasyon düzeylerinde veritabanındaki değerlerin incelenmesi uygun olacaktır (Şekil 3.10). Şekil 3.10'daki eğilim çizgilerinin denklemlerinde yer alan x sayısının yanındaki çarpan olarak bulunan sabit sayılar, $A(\gamma)$ 'nin başlangıç değerleri; x 'in üssü olarak gösterilen sayılar ise $m(\gamma)$ 'nin başlangıç değerleri olarak kabul edilecektir.

Denklem 3.1 kayma modülü azalımını en gerçekçi şekilde tahmin etmede kullanışlı iken, Denklem 3.8 de bir o kadar kayma modülünün hangi zemin özelliklerinin değişiminden

etkilendiğini göstermektedir. Bu iki denklemin karşılaştırılması en uygun denklem katsayılarının bulunmasına olanak sağlayacaktır.

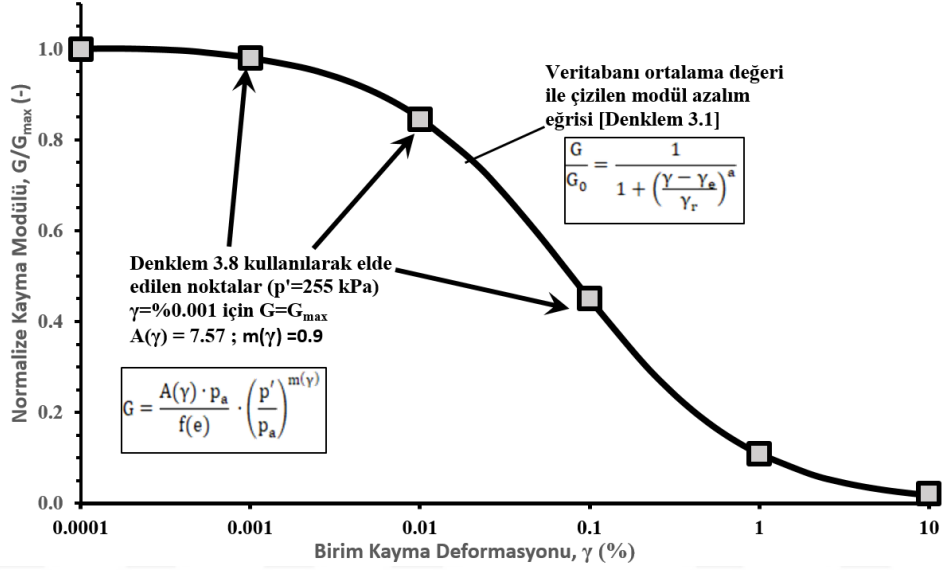


Şekil 3.10: Kayma modülünün ortalama efektif gerilmeye bağlı değişimi : (a) $\gamma = \% 0.0001$ (186 veri); (b) $\gamma = \% 0.001$ (412 veri); (c) $\gamma = \% 0.01$ (523 veri) ; (d) $\gamma = \% 0.1$ (368 veri); (e) $\gamma = \% 1$ (153 veri) ; (f) $\gamma = \% 10$ (8 veri)

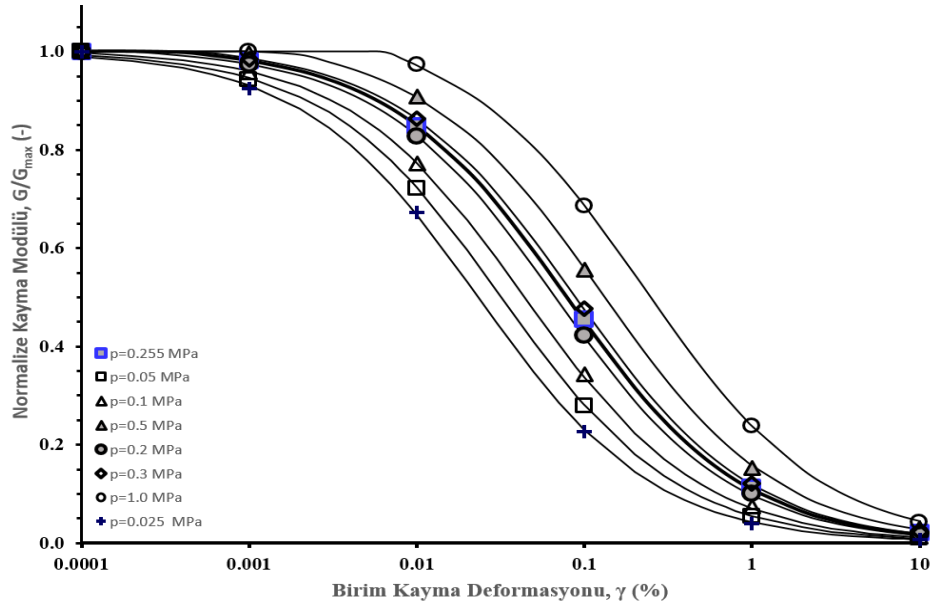


Şekil 3.11: (a) Veritabanı sınır ve ortalama eğrileri (b) Eğriler ve hiperbol parametreleri

Veritabanının alt sınır üst sınır ve ortalama eğrileri Şekil 3.11 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Şekil 13(b) ile verilen ortalama eğri; Eşitlik 3.8'in efektif gerilmeler bakımından veritabanının ortalaması olan $p' = 255$ kPa için hesaplanan modül değerlerini üst üste getiren $A(\gamma)$ ve $m(\gamma)$ katsayıları el ile aranmıştır (Şekil 3.12). Şekil 13.3'te farklı efektif gerilme düzeylerinde iki farklı eğri takımı ile Denklem 3.8'in katsayıları düzenlenmiştir.

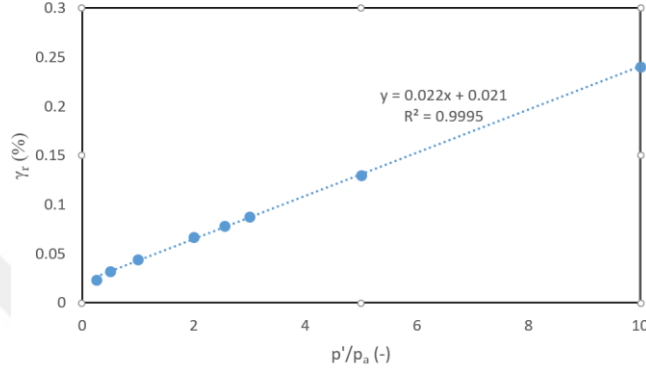


Şekil 3.12: $A(\gamma)$ ve $m(\gamma)$ katsayılarının iki farklı eğri takımı ile kalibrasyonu



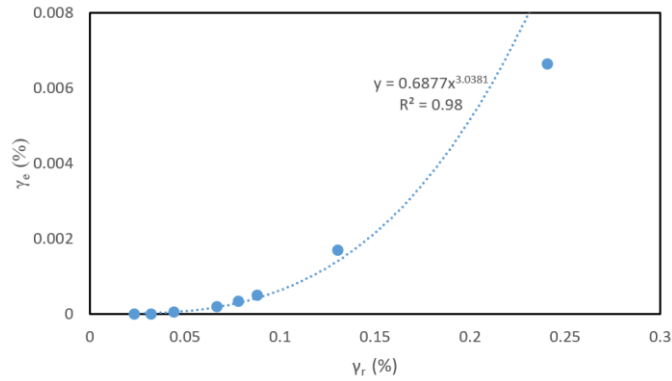
Şekil 3.13: Farklı gerilme seviyelerinde $A(\gamma)$ ve $m(\gamma)$ katsayılarının kalibrasyonu

Farklı gerilme düzeylerinde yukarıda bahsedilen iki denklemlerle kalibrasyon yapılırken; gerilme düzeyi arttıkça bu tez çalışması kapsamında killerin modül azalımı için modifiye hiperbolün denklem parametrelerinden birisi olan ve maksimum modülü yarıya düşüren değer olan referans deformasyonu, γ_r ile ortalama efektif gerilmenin atmosferik basınç ($p_a=100$ kPa) ile normalize edilen değeri (p'/p_a) arasında doğrusal bir ilişki olduğu ortaya konmuştur (Şekil 3.14)



Şekil 3.14: Referans deformasyon ve p'/p_a ilişkisi:

Bununla birlikte zeminin doğrusal elastik bölgeden doğrusal olmayan plastik bölgeye geçiş eşik deformasyonu olan elastik eşik deformasyonu γ_e ve γ_r arasında üstel korelasyon olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15: Elastik eşik deformasyonu (γ_e) ve referans birim deformasyonu (γ_r) ilişkisi

Şekil 3.14 ile verilen gerilme seviyesi-referans birim deformasyonu arasındaki ilişkinin matematiksel ifade birinci dereceden doğrusal bir polinom fonksiyondur ve genel hali eşitlik 3.9 ile gösterilebilir:

$$\gamma_r (\%) = c_1 * \left(\frac{p'}{p_a}\right) + c_2 \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'un veritabanındaki deneyler ile sınanması için eklenen deneylerin modifiye hiperbol eğrisini çizdirerek hiperbol eğrisinin trendini belirleyen üç parametreyi 857 deney için ayrı ayrı belirlemesi yapıldı. Matlab yazılımı içerisinde literatür eğrileri program içine çağrılarak Şekil 3.16'daki kod yardımı ile γ_r ve a parametreleri bulundu, elastik eşik deformasyon değeri ile referans birim deformasyon arası ilişki kullanıldı.

```

clc
clear all
close all

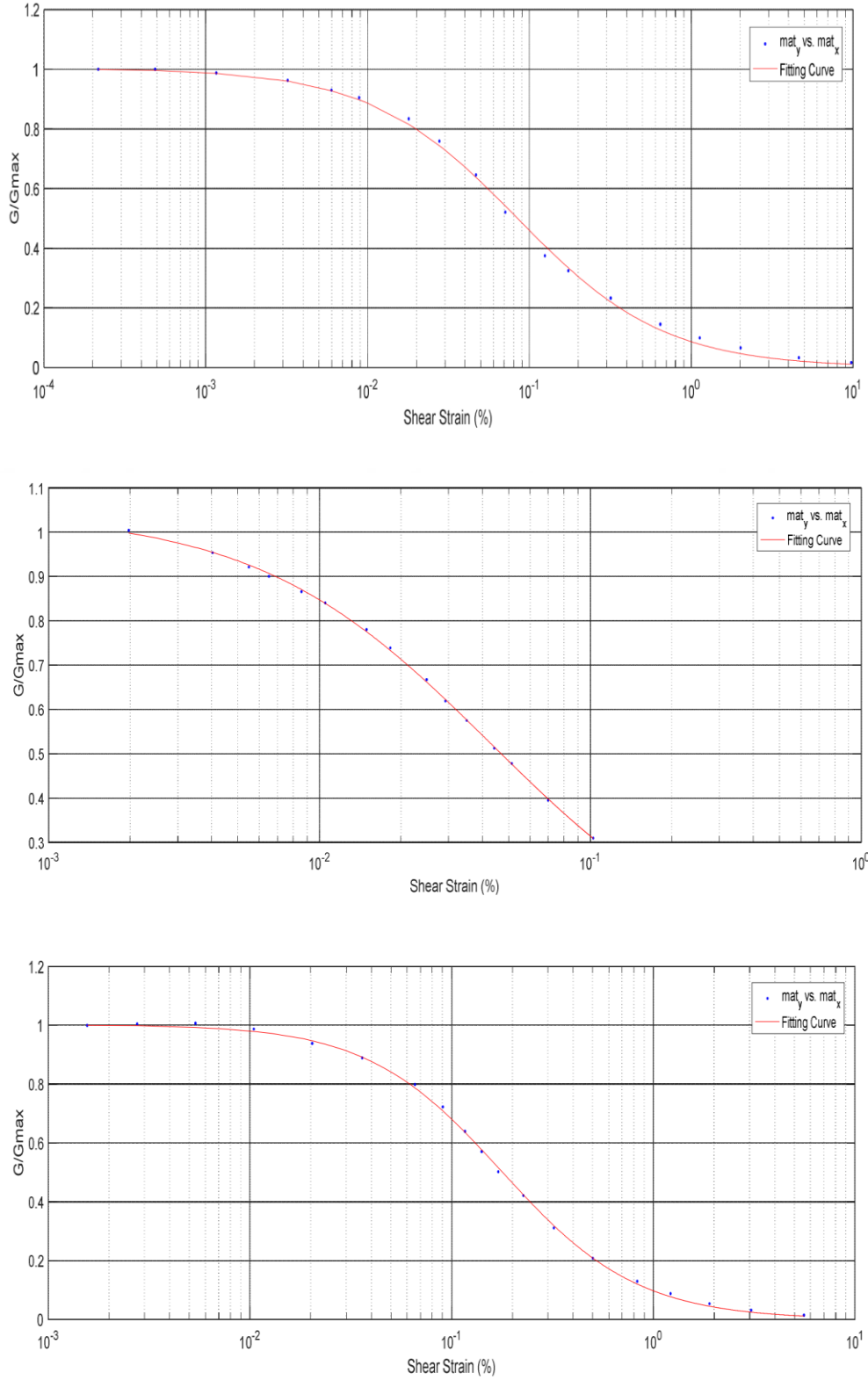
rng default%reproducibility
[numData] =
xlsread('C:\Users\sinan\OneDrive\Belgeler\Rijitlik_2017\raw_excels\Rijitlik
_OrgCurves.xlsx');
save('data.txt','numData','-ASCII');
a=load('data.txt');
i=1
    j=i+1;
    mat_x=a(:,i);
    mat_y=a(:,j);
fun=@(mat_x,a) 1/((1+(x-d)/e)^f);
lb=[4e-7,0,0];
ub=[min(mat_x),10,1.2];
x0=[4.1e-7,0.001,0.01];
x = lsqcurvefit(fun,x0,mat_x,mat_y,lb,ub);
semilogx(mat_x,mat_y,'ko',mat_x,fun(x,mat_x),'b-')
legend('Data','Fitted exponential')
title('Data and Fitted Curve')

```

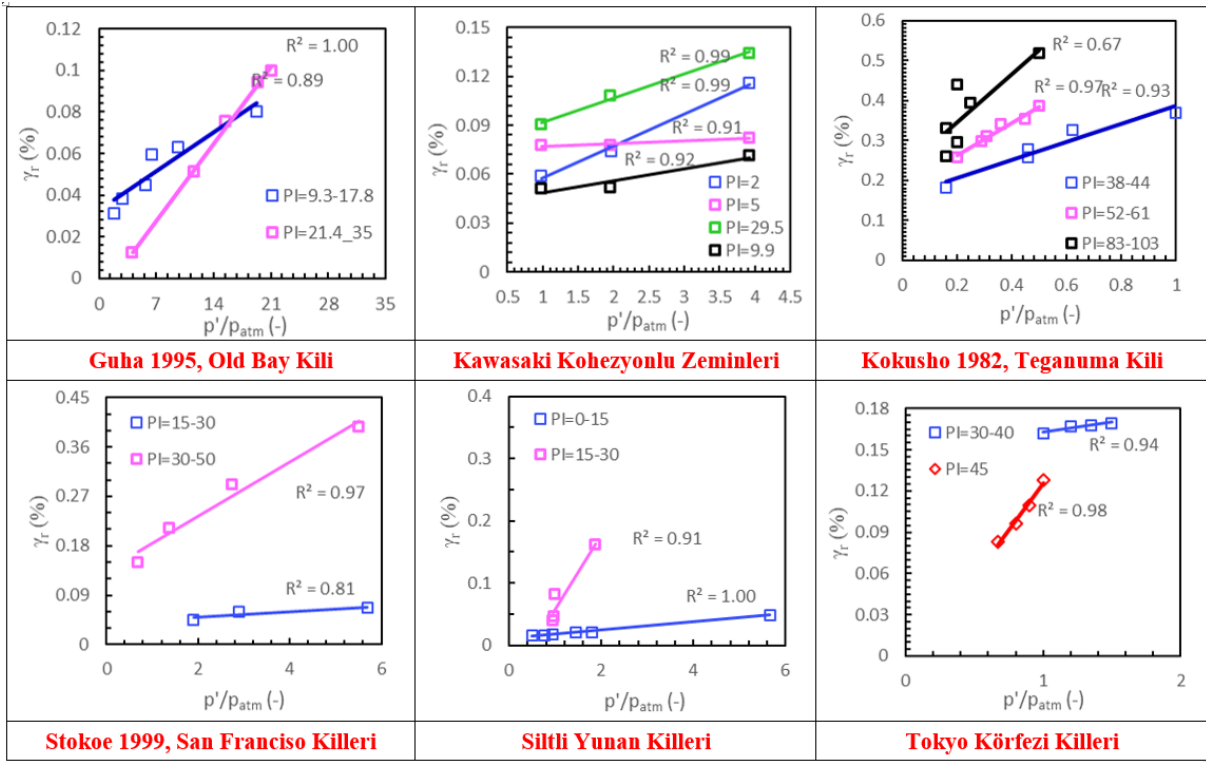
Şekil 3.16: γ_r ve a parametrelerini veritabanının her eğrisi için bulan MATLAB kodu

Şekil 3.16'daki kodun kullanılması sonucu ile MATLAB yazılımından alınan grafiklere örnek olarak Şekil 3.17 'de gösterilmiştir.

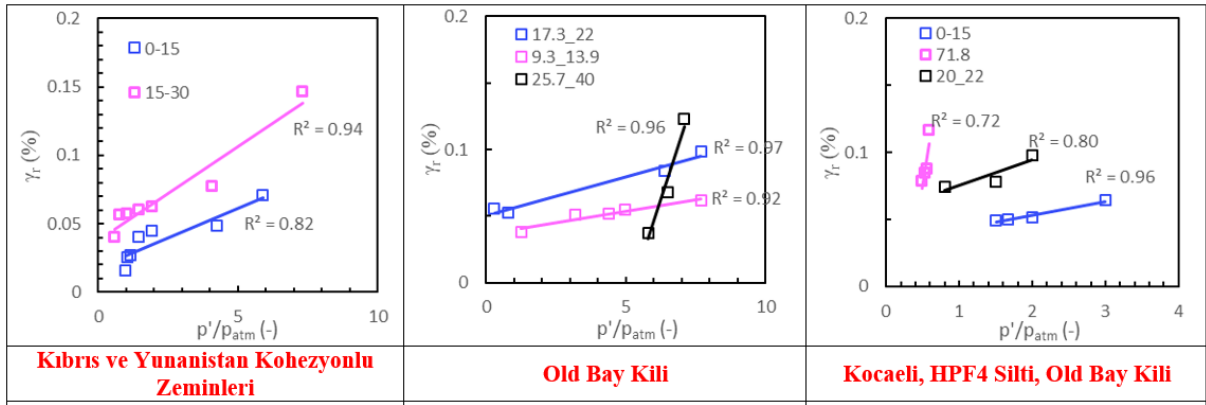
Zemin indeks ve gerilme geçmişi özelliklerinden hangisi veya hangilerinin Denklem 3.9'un içerisinde bulunan c_1 ve c_2 katsayıları ile ilişkili olabileceği bu tez çalışmasının başka araştırma konularından birisi olmuştur. Aynı şekilde a (eğrilik katsayısı) parametresinin bulunması da model parametrelerinin tanımlanması açısından gerekli olmuştur. Referans birim deformasyonun tanımlanması için zemin indeks özellikleri (PI, e_0) veya AKO'nun c_1 ve c_2 katsayılarının hangisi içerisinde olması gerektiğini anlamak üzere literatürde genel kabul gören bazı çalışmalar üzerinde dar kapsamlı özel araştırmalar yapılmıştır. Şekil 3.18'de literatürde normal komsolide killerin farklı gerilme ve plastisite değerleri altında dinamik özellikleri belirlenen bazı killere ait referans birim deformasyon ve p'/p_a ilişkisi verilmiştir. Buna göre normal konsolide killerde Plastisite indisi, γ_r-p'/p_a eğrisinin eğimini değiştirmekte; dolayısı ile



Şekil 3.17: Veritabanında bulunan farklı karakteristikteki eğrilerin hiperbol ile çakıştırılması



Şekil 3.18: AKO=1 olan killerde Plastisite Indisi, gerime ve Referans kayma deformasyonu ilişkisi

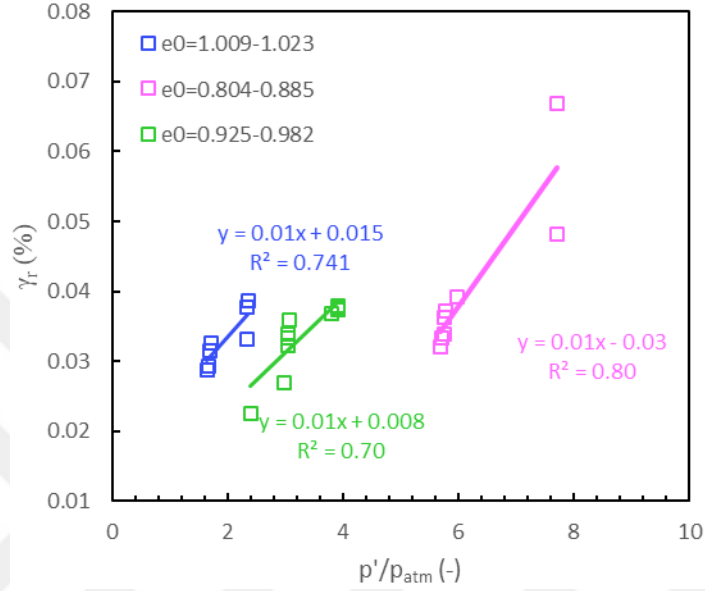


Şekil 3.19: AKO=2-4 arası olan killerde Plastisite Indisi, gerilme ve ref. kayma deformasyonu ilişkisi

Denklem 3.9'daki c1 katsayısının içerisinde olması gerekmektedir. Aşırı konsolidasyon oranı arttıkça plastisite indisinin referans kayma deformasyonu üzerine etkisi normal konsolide killerden farklı olmamıştır (Şekil 3.19)

Bir diğer zemin özelliği olan başlangıç boşluk oranının Denklem 3.9'a nasıl etkileceği incelenmek istenmiş ancak literatürde aynı plastisiteye ve gerilme geçmişine sahip farklı boşluk oranı ile deney yapılmış çalışma kısıtlı olarak bulunmuştur (Santagata,1998). Santagata doktora

tezi sırasında mavi Boston kili üzerine detaylı deneysel çalışma yapmış ve diğer tüm değişkenleri sabit tutarak boşluk oranının modül azalmasına etkisini incelemiştir. Şekil 3.20’de de anlaşılacağı üzere; boşluk oranı arttıkça; $\gamma_r - p'/p_a$ eğrisinin y-eksenini kestiği nokta yukarı kaymıştır. Bu nedenle boşluk oranı Denklem 3.9’un c_2 katsayısı içerisinde bulunmalıdır.



Şekil 3.20: Mavi Boston Kilinde e_0 - γ_r ilişkisi

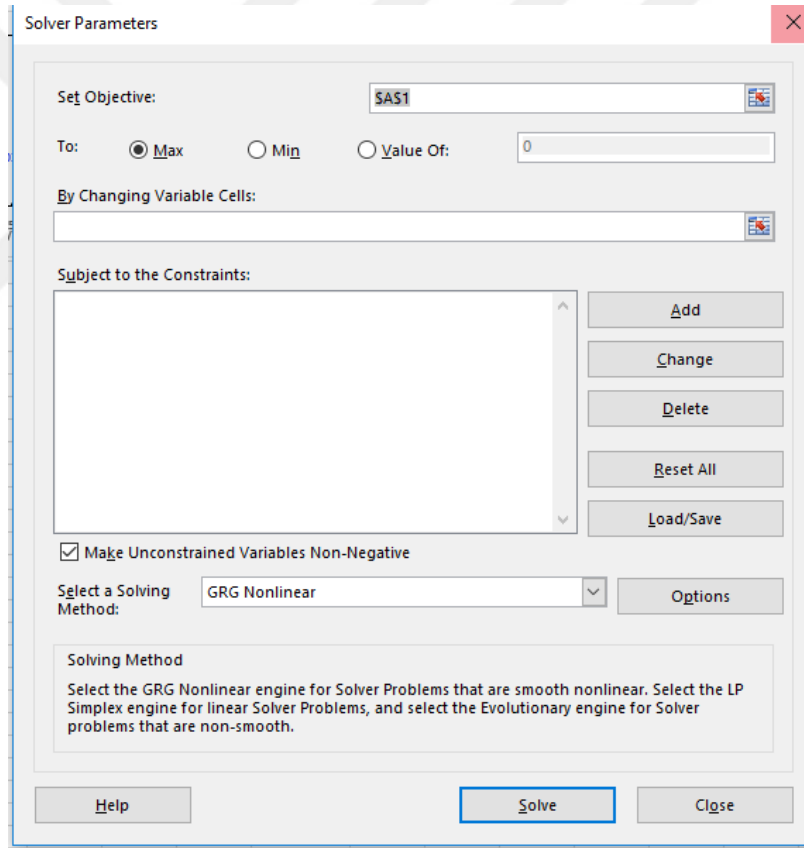
Aşırı konsolidasyon oranının referans kayma deformasyonunu nasıl değiştirdiği bu çalışma kapsamında kurulan veri tabanı ile net olarak anlaşılammıştır. Aşırı konsolidasyon derecesi zemin plastisitesi ve gerilme durumuyla birlik bakıldığında Şekil 3-18 ve 3.19’daki gibi Denklem 3.9’un c_1 katsayısı içerisinde yer alması gerektiğini göstermektedir. Ancak Excel içerisinde yer alan Solver isimli regresyon ve denklem çözücü aracı kullanılırken son aşamada AKO,denklemin daha fazla deney noktasını içerisine alabilmesi için hem c_1 hem de c_2 içerisinde yer almıştır. Bunun dışında, aşırı konsolidasyon oranının bir üssel değer alması da yine Solver ile doğrusal olmayan GRG yöntemi ile analiz yaparken ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, referans kayma birim deformasyonu için önerilen denklemin genel hali eşitlik 3.10’daki gibi olmuştur.

$$\gamma_r (\%) = a_1 * PI * AKO^k * \left(\frac{p'}{p_a} \right) + a_2 * e_0 * AKO^k \quad (3.10)$$

Bu noktada “Solver”dan ve tezde önerilen denklemlerin çoğunun son halini verirken nasıl kullanıldığından bahsedilmelidir. Solver, Excel’in Türkçe versiyonundaki ismiyle Çözücü, benzetim çözümlemesi yapılabilecek bir Excel eklentsidir. Bir veya birkaç hücredeki belirlenen

bir formülü için optimum değerleri bulmak için kullanılır. Çözücü, karar değişkenleri veya daha basit şekilde değişken hücreleri de denen ve amaç ve kısıtlama hücrelerindeki hesaplama formüllerinde kullanılan bir hücre grubuyla çalışır. Çözücü kısıtlama hücrelerindeki sınırlamaları sağlamak için karar değişken hücrelerindeki değerleri ayarlar ve amaç hücre için istediğiniz değeri oluşturur(Şekil 3.21).

Kısaca, diğer hücreleri değiştirerek bir hücrenin en yüksek veya en küçük değerini belirlemek için Çözücü kullanılır. Burada ise deneylerin ölçülen referans birim kayma deformasyonu ile denklem 3.10'dan hesaplanan referans kayma deformasyonlarının arasındaki oranın 1'e eşit olması programa hedef olarak belirtilmiş karşılığında a_1 , a_2 ve k katsayılarının optimum değerleri elde edilmeye çalışılmıştır



Şekil 3.21: Excel içerisindeki Solver Veri alt programı

Çözücü ile bu tez çalışması kapsamında önerilen ince ve iri taneli zeminler için başlangıç sönüm oranlarının (D_{min}), modifiye hiperbol denklemin parametrelerinden olan a 'nın ; katsayı ayarlamaları yukarıdaki gibi yapılarak önerilmiş ve son halleri verilmiştir.

3.3.3. İnce Taneli Zeminlerde Deformasyon Hızı veya Frekansın Modül Azalmasına Etkisi

Bölüm 3.2.2'deki prosedür aynen uygulanarak literatürde killi zeminlerin deformasyon hızına bağlı rijitlik azalmasını araştıran araştırmacıların diğer koşullar sabit tutularak sadece deformasyon hızını değiştirdikleri çalışmalardan butik veritabanı kurulmuştur. Tablo 3.4'te butik veritabanı özetlenmiştir.

Tablo 3.4: İnce taneli zeminlerde deformasyon hızı rijitlik azalımı ilişkisinin incelendiği veritabanı

Referans	Zemin Adı	PI(%)	AKO	e_0	p' (MPa)	Test Tipi	Deformasyon Hızı (%/s)
Tabata,2004	ESC	26	1	0.89	0.126	DSDSS	0.0001
							0.0003
							0.001
							0.003
Tabata,2004	Kaolinite	28	1	1.137	0.281	DSDSS	0.0027
							0.0043
							0.012
Tabata,2004	Obregon-2	18	1	0.64	0.123	DSDSS	0.0003
							0.001
							0.003
Matesic & Vucetic,2003	Kaolinite	20	1	0.945	0.3	DSDSS	0.003
							0.005
							0.009
Matesic & Vucetic,2003	Augusta-418	44	2	0.799	0.418	DSDSS	0.0007
							0.0004
Teacvursinuskun ve diğ., 2002	Bangkok Kili,MU	30	1	0.87	0.05	CTX	0.2
							2
Teacvursinuskun ve diğ., 2002	Bangkok Kili,MU	30	3	0.87	0.25	CTX	0.2
							2
Teacvursinuskun ve diğ., 2002	Bangkok Kili,KU	43	1	1.63	0.06	CTX	0.2
							2
Teacvursinuskun ve diğ., 2002	Bangkok Kili,KU	43	1.75	1.63	0.25	CTX	0.2
							2
Teacvursinuskun ve diğ., 2002	Bangkok Kili,CU	45	1	1.457	0.05	CTX	0.2
							2
Hicher,1996 white clay	White Kili	30	1	1.246	0.2	CTX	0.0008
							0.008
							0.08
Cavallaro, 2012	Via Dott. Consoli	20.1	1	0.628	0.135	RCT	30
						CLTST	0.015
Cavallaro, 2015	Augusta Hangar	40	1	0.805	0.157	RCT	40
						CLTST	0.004
Cavallaro ve diğ.,1998	Augusta Marine	42	2	0.8	0.38	RCT	0.247
						CLTST	4.20E-03
						MLTST	1.00E-04
D'Onorfio ve diğ. 1999	Vallerica Kili	26	3	0.7	0.2	RCT	0.02
						CLTST	2.10E-03
						CLTST	9.00E-06
						CLTST	1.50E-03
D'Onorfio ve diğ. 1999	Vallerica Kili	26	3	0.72	0.2	MLTST	5.00E-03
						MLTST	3.30E-05
						MLTST	3.30E-06
Gasparre, 2005	London Kili	42	16	1.97	0.26	TX	5.55E-07
						TX	4.2E-07
						TX	2.8E-05
						TX	2.8E-06
						TX	1.4E-06
						TX	5.6E-07
						TX	2.8E-06
						TX	2.8E-07
						TX	1.4E-06
						TX	1.4E-06
30	5	1.87	0.509	TX	2.8E-06		
TX	2.8E-07						
TX	1.4E-06						

Tablo 3.4 (Devam): İnce taneli zeminlerde deformasyon hızı rijitlik azalımı ilişkisinin incelendiği veritabanı

Gasparre,2014	London Kili	40	6	3.53	0.257	TX	1.7E-06
		42	16	2.78	0.253	TX	1.1E-05
		40	6	3.28	0.502	TX	2.1E-05
		36	5	3.53	0.415	TX	1.4E-05
Lefebre 1987	Grande Bailey Kili	11.7	2	1.65	0.224	TX	0.036
		11.7	2	1.65	0.224	TX	0.012
		11.7	2	1.65	0.224	TX	1.1E-03
		11.7	2	1.65	0.224	TX	2.8E-04
Lefebre 1987	Olga Kili	40	1	2.4	0.137	TX	3.4E-03
						TX	7.2E-04
						TX	8.3E-05
						TX	2.8E-05
Lo Presti 1997	Augusta Kili	29	4	0.684	0.182	RCT	6.71
						CLTST	8.3E-04
						CLTST	7.5E-04
Lo Presti 1997	Pisa Kili-Test Series 1	21	1.5	1.023	0.138	RCT	2.076
						CLTST	5.0E-04
Lo Presti 1997	Pisa Kili-Test Series 2	22	2	0.804	0.109	MLTST	1.0E-04
						CLTST	5.8E-04
Lo Presti 1997	Pisa Kili-Test Series 3	55	2	1.605	0.0856	RCT	16
						MLTST	1.67E-04
Quinn 2013	KSS-560	23	1	0.59	0.56	TX	2.78E-04
						TX	0.083
						TX	50
Quinn 2013	KSS-541	20.5	1	0.6	0.541	TX	0.000278
						TX	0.083
						TX	50
Quinn 2013	Kaolin	45	1	1	0.72	TX	2.78E-04
						TX	1.39E-03
						TX	2.78E-03
						TX	0.0834
						TX	0.5
						TX	5
						TX	50
Shibuya 1996	NSF Kili	27	1	1.16	0.3	MLTST	1.66E-04
						MLTST	2.16E-03
						MLTST	0.023
Shibuya & Mitachi, 1994	Kiyohora Silty Kili	27	3	0.707	0.3	CLTST	4.00E-03
						MLTST	8.30E-04
Shibuya & Mitachi, 1994	Hachirigota Kili					CLTST	0.1
						CLTST	1
Soga 1994	Kaolin	29	1	0.98	0.03	CLTST	0.2
						CLTST	0.01
						CLTST	0.2
						CLTST	1
						CLTST	0.2
						CLTST	1
						CLTST	0.2
						CLTST	1
Soga 1994	San Francisco	40	1.5	4.2	0.05	CLTST	0.1
						CLTST	1
Sorensen,2010	Londra Kili	37	6	0.847	0.3	TX	1.67E-06
						TX	4.44E-06
Stokoe 1980	San Francisco	23	1	1.16	0.137	RCT	1.38
						CLTST	0.2
Vaid 1979	SVJ Kili Upper Layer	16	5	1.155	0.04	TX	4.67E-03
						TX	3.33E-04
						TX	2.67E-05
Zavoral, 1994	UBC Kili	20	1	1.122	0.137	RCT	3.4
						CLTST	2
						CLTST	0.02
Zavoral, 1994	UBC Kili	30	1	1.2	0.268	RCT	15
						CLTST	0.6
						CLTST	0.006
Santagata,1998	Blue Boston Kili		1	1.07	0.111		2.78E-05
							2.78E-04
							5.56E-04
							1.10E-03
		15.5	2	0.915	0.175	TX	2.78E-05
							2.78E-04
							1.10E-03
	4	0.991	0.71		2.78E-05		
					2.78E-04		
					1.10E-03		

3.4. ZEMİNLERDE SÖNÜMLENME DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

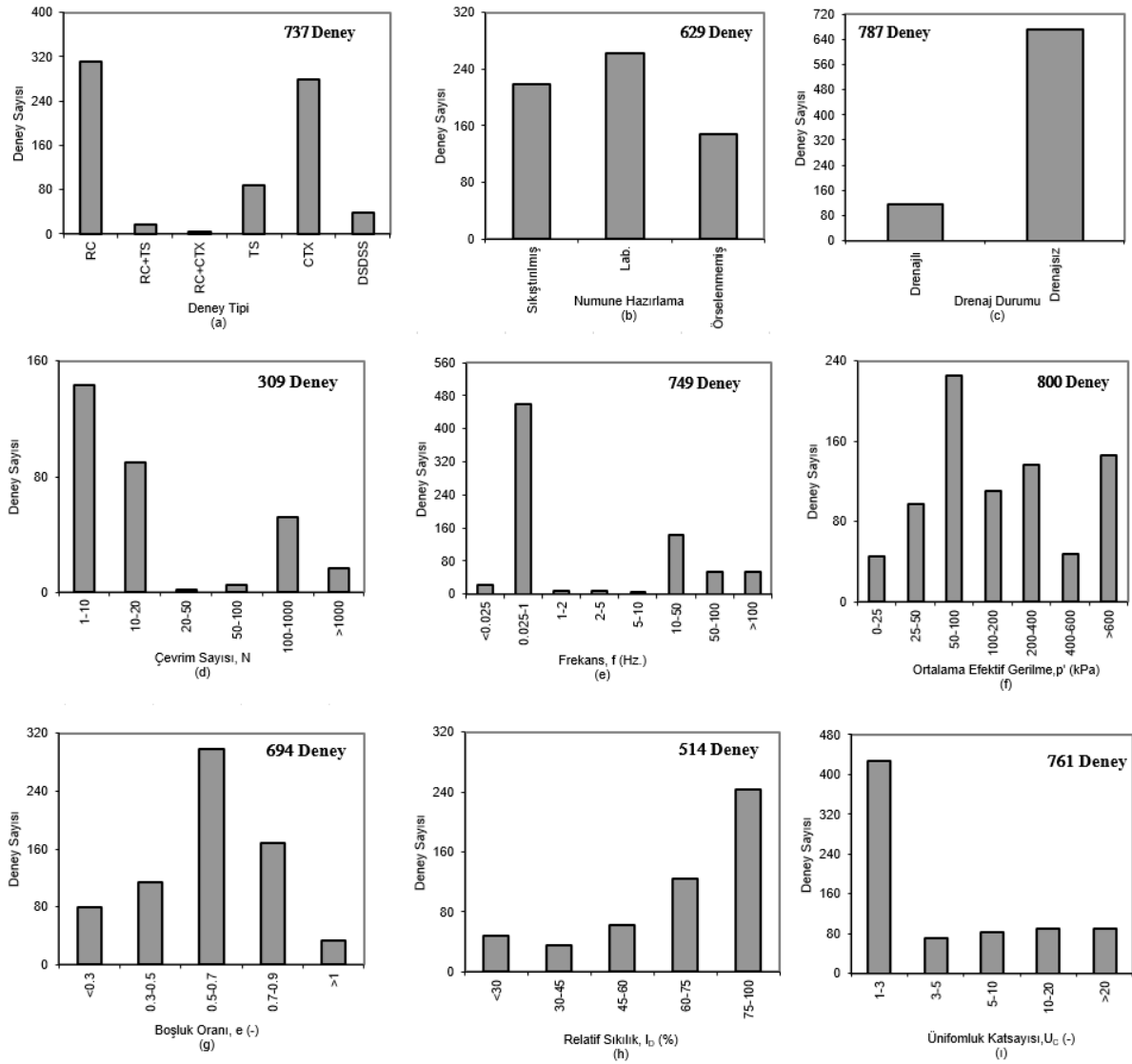
Granüler ve kohezyonlu zeminlerin başlangıç rijitliği ve deformasyona bağlı rijitlik azalım denklemi olan modifiye hiperbol eğrisi parametreleri ile tanımlandıktan sonra, geoteknik deprem mühendisliği problemlerinin(Örn. 1 boyutlu saha tepki analizi) çözümünde, özellikle bilgisayar yazılımlarının ihtiyaç duyduğu sönüm oranı ve sönüm oranının deformasyona bağlı değişim eğrisinin tanımlanması bu bölümde yapılmıştır.

Hem ince taneli hem de iri taneli zeminlerde öncelikle çok küçük deformasyon seviyesinde, yani zeminin henüz rijitliğini kaybetmediği doğrusal elastik bölgedeki başlangıç sönüm oranı (D_{min}) tanımlanmıştır. Bu büyüklük sönüm oranı (D)-birim kayma deformasyonu eksen takımında sönüm oranı eğrisinin başlangıç ordinatı olacak ve eğrinin başlangıç pozisyonunu belirleyecektir. Başlangıç sönümünün orta ve büyük deformasyonda değişimini veya arttımını ise ince taneli kohezyonlu zeminler için bölüm 3.3'te ve iri taneli zeminlerde Öztoprak & Bolton (2013) tarafından önerilen modifiye hiperbol denklemlerinin evrilmesi ile tanımlanabileceği sonucuna varılmıştır.

3.4.1. İri Taneli Zeminlerde Sönümlenme Davranışının Deformasyona Bağlı Değişiminin Belirlenmesi

İri taneli kumlu ve çakıllı zeminlerin sönüm oranı belirlemede dikkate alınması gereken ilk kısım zeminin kayma modülünün sabit olduğu doğrusal elastik davrandığı çok küçük deformasyon seviyesindeki bölümdür. Çünkü bu aralıkta ($\% \gamma < 10^{-3}$), histerik sönüm oranı zeminler için sabit kabul edilmektedir. Başlangıç sönüm oranının, veya tez içerisinde bir çok yerde aktarıldığı gibi minimum sönüm oranının (D_{min}) tanımlanması sönüm oranı artım eğrisinin başlangıç pozisyonunu belirlemede çok önemlidir. Bu bağlamda, zeminlerin dinamik davranışını belirlemek için bir hayli önemli olan bu özelliği tahmin edereken veritabanının içeriğini anlamak önemli olacaktır. Şekil 3.22'de, veritabanına eklenen referanslardaki deneylerin drenaj koşulları, deney tipleri ve numune hazırlama gibi bilgileri sayısal olarak özetlenmiştir. Aynı zamanda sönüm oranını belirlemede kullanılacak zemin karakteristiklerinin dağılımı da verilmiştir.

Şekil 3.23'de başlangıç sönüm oranına direkt etki edebilecek parametrelerin başlangıç sönüm oranı ile ilişkisi ayrı ayrı verilmiştir.

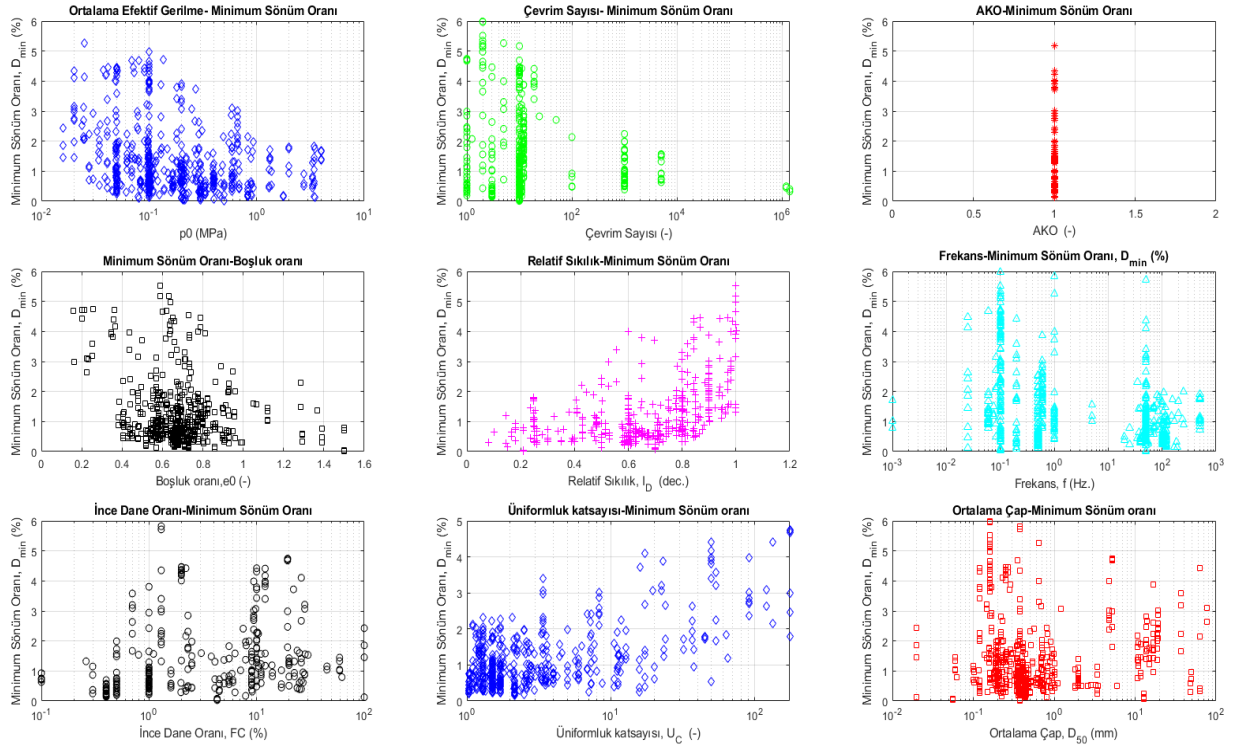


Şekil 3.22: Granüler zeminler için oluşturulan veritabanına ait sayısal veriler

Burada dikkate alınması gereken ilk nokta iri taneli zeminlerde başlangıç sönüm oranının %1 ile %6 arasında değiştiğidir. Bu grafiklerde dikkati çeken bir başka nokta da gözlemlenen korelasyonlardır: başlangıç sönüm oranı ortalama efektif gerilme ve boşluk oranının artması durumunda azalırken; tane dağılımının tanımlanmasında önemli olan üniformluk katsayısı ile relatif sıklık artarken başlangıç sönüm oranının da artmasıdır. Bu dört zemin özelliği kullanılarak Excelin Çözücü eklentisi kullanılmıştır. Sonuç olarak, başlangıç sönüm oranı ortalama efektif gerilme, boşluk oranı ve üniformluk katsayısına bağlı bir denklem ile tanımlanmıştır.

Başlangıç sönümünün zemin indeks ve gerilme özellikleri ile ilişkilendirilmesinin ardından sonra;

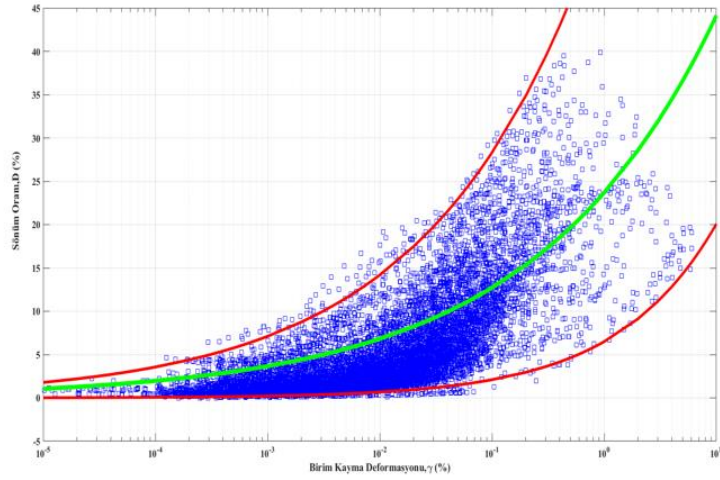
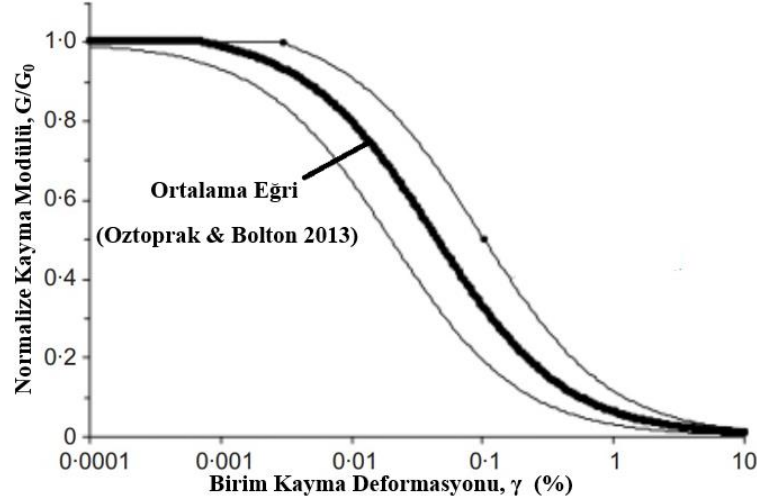
orta ve büyük deformasyon seviyelerinde sönüm davranışı eğrisinin nasıl değiştiği incelenmiştir (Şekil 3.24). Bu doğrultuda, ilk olarak veri tabanından bir eğri geçirilmesi hedeflenmiş; ancak MATLAB'ın içerisinde gömülü olan curve fitting alt programı ile uygulanabilecek hiçbir eğri türü ile istenen başarı sağlanamamıştır.



Şekil 3.23: Granüler zeminlerde D_{min} ve zemin özellikleri ilişkisi

Yeni bir eğri denklemi türetilemeyince; literatürde de sıklıkla başvurulan kayma modülü azalımı eğrisi ($G/G_{maks}-\gamma$)'nden sönüm oranının orta ve büyük deformasyonda değişimine geçebilecek bir formül bulma arayışına geçildi. Oztoprak ve Bolton'un (2013) iri taneli zeminler için kurdukları veritabanının ortalama eğrisi ile bu çalışma kapsamında kullanılan sönüm oranı veritabanının ortalama eğrisi arasında bir dönüşüm yapıp yapılamayacağına bakıldı (Şekil 3.24). Doğal logaritmik bir fonksiyon ile bu ilişki tanımlandı. Ayrıca küçük deformasyon seviyesi için tanımlanan D_{min} , elastik eşik birim kayma deformasyonuna kadar ($\gamma \leq \gamma_e$) tek başına sönüm davranışını tanımlarken; bu noktadan sonra önerilen sönüm oranı-

deformasyon eşitliğine matematiksel toplam olarak eklenmiş; böylece modelin daha doğru çalıştırılması hedeflenmiştir.

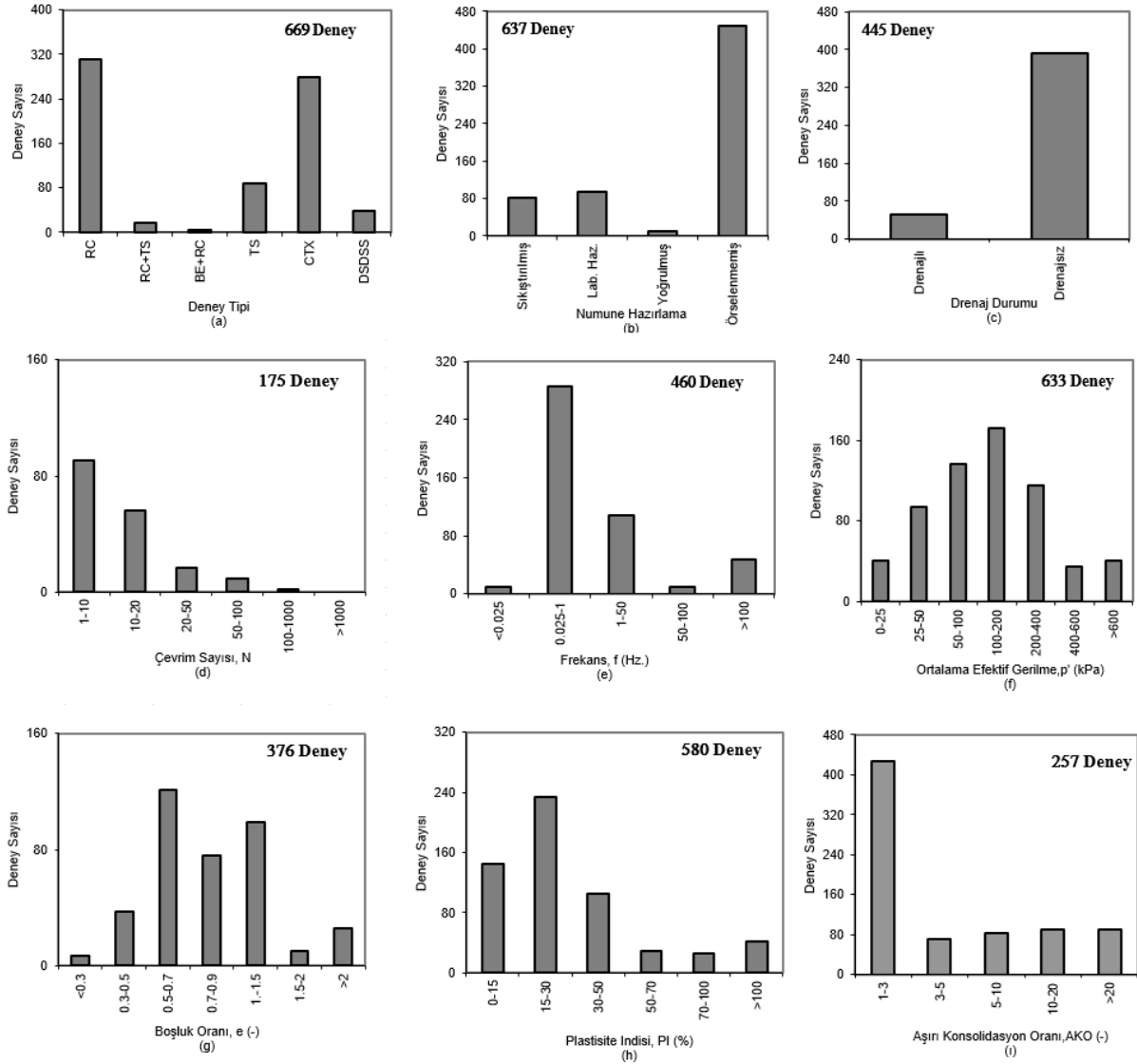


Şekil 3.24: Granüler zeminlerde kayma modülü azalım eğrisinden sönüm eğrisine geçiş

3.4.2. İnce Taneli Zeminlerde Sönümlenme Davranışının Deformasyona Bağlı Değişiminin Belirlenmesi

Tıpkı iri taneli zeminlerde olduğu gibi; kohezyonlu zeminlerin sönümlenme davranışını tanımlamaya önce doğrusal elastik bölgede sabit olarak kabul edilen başlangıç sönüm oranının değerlendirilmesi ve belirlenmesi ile başlandı. Burada iri taneli zeminlere göre belli başlı farklardan ilki; başlangıç sönüm oranının ($\gamma < \% 10^{-3}$) %0 ile % 10 arasında değişmesi olarak gösterilebilir. İnce taneli zeminlerin sönümlenme davranışı için literatürden elde edilen mevcut

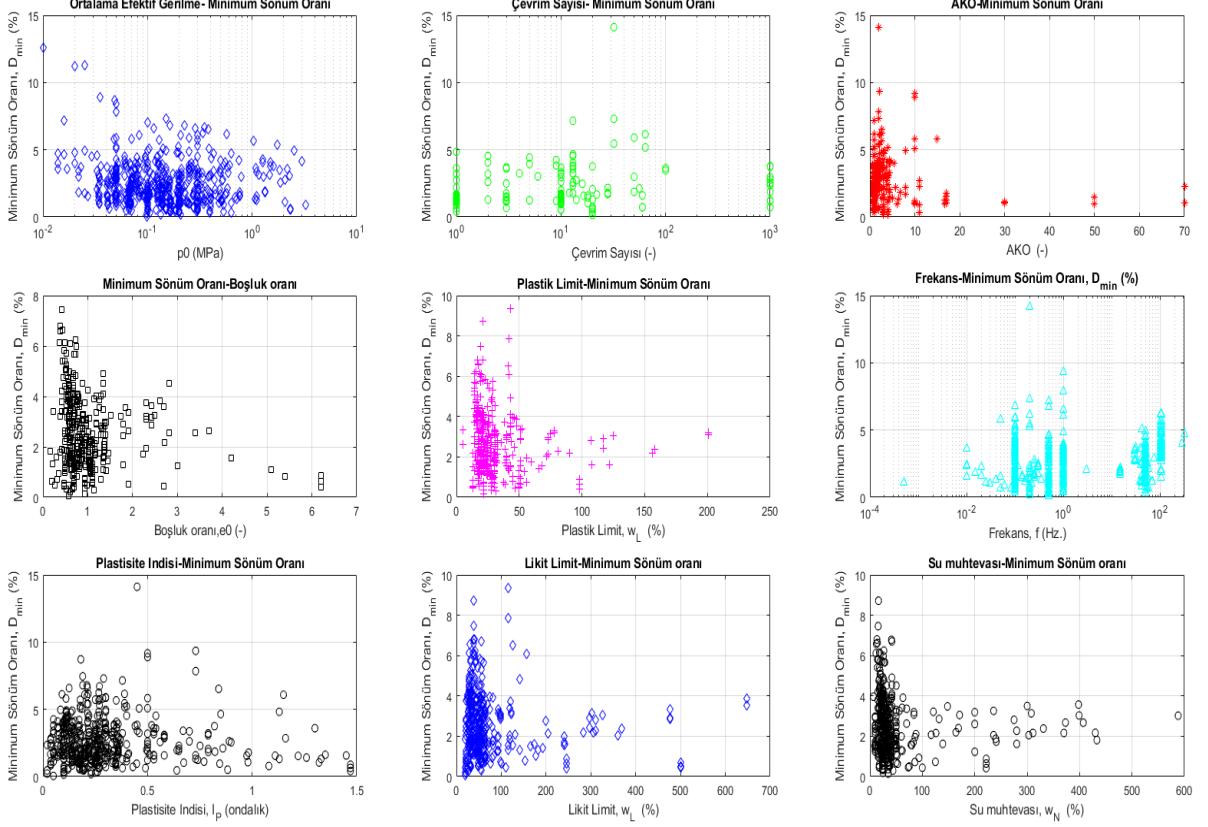
eğrilerin oluşturduğu veritabanının içeriği ile ilgili bilgi, deneylerin hangi koşullarda ve cihazlar ile yapıldığı Şekil 3.25'te verilmektedir. Yine aynı şekilde, veritabanı içindeki zemin malzemelerinin indeks ve gerilme özelliklerine bağlı istatistiksel dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.25: Kohezyonlu zeminler için oluşturulan veritabanına ait sayısal veriler

İnce taneli zeminlerde başlangıç sönümüne etki edebilecek parametre veya zemin özelliklerinin incelenmesi için Şekil 3.26'da her parametrenin bu zemin özelliği ile ilişkisi gösterilmiştir. Buradan hareketle, başlangıç sönümüne esas olarak etki eden özelliğin gerilme durumu olduğunu söylemek yanlış olmaz. Ancak yine Excel Çözücü eklentisi kullanılarak yapılan hedef arama ve denklem belirleme çalışmasında plastisite indisinin de yardımcı bir parametre olarak önerilen denklemin regresyon katsayısını ve bu denkleme uyan deney sayısını arttırdığı

gözlemlenmiştir. Bu nedenle ince taneli zeminlerde; hem gerilme düzeyine hem de plastisite indisine bağlı bir başlangıç sönüm oranı denklemi bulunmuştur.

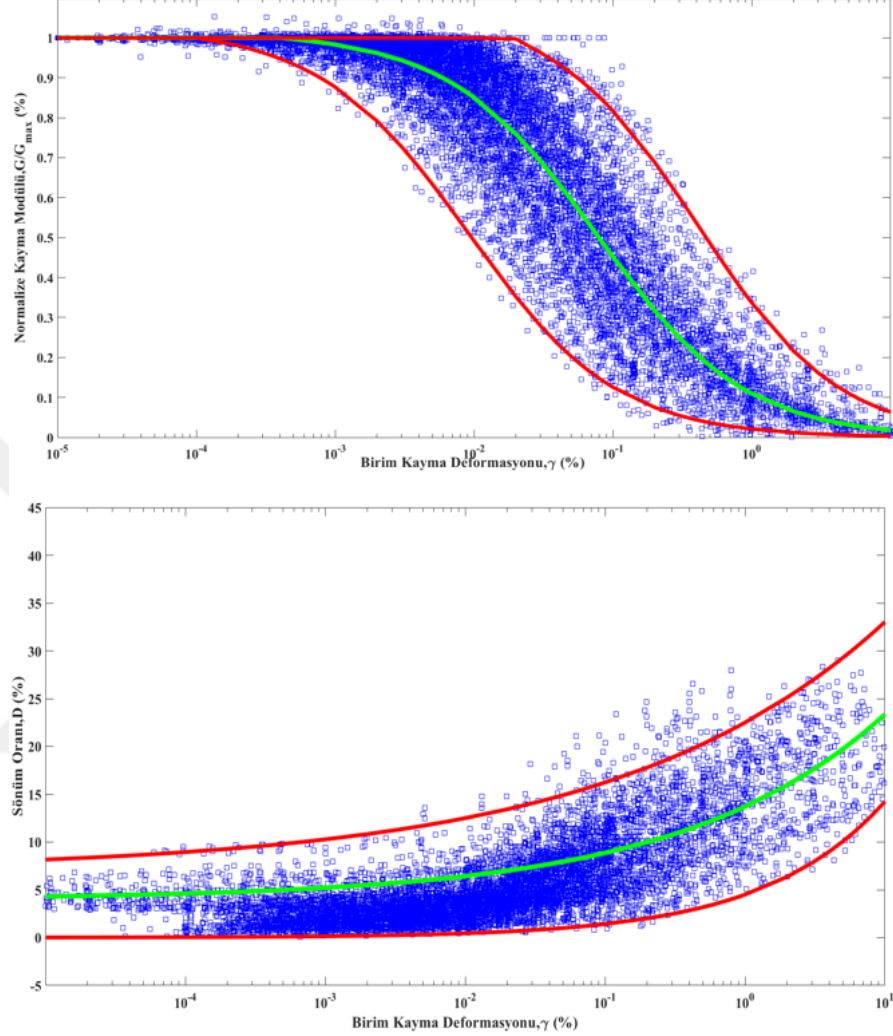


Şekil 3.26: Kohezyonlu Zeminlerde D_{min} ve zemin özellikleri ilişkisi

Şekil 3.27’de, bu çalışma kapsamında oluşturulmuş ince taneli zeminler için dinamik zemin özelliklerinin elde edilmeye çalışıldığı eğrilerin bir arada bulunduğu grafikler verilmektedir. İri taneli zeminlerden farklı olarak ince taneli zeminlerin çok büyük deformasyonlarda sönüm davranışı çok büyük olmamaktadır. İri taneli zeminlerde $\gamma \approx \%10$ seviyelerinde sönüm $\%40-45$ ’lere çıkarken kohezyonlu zeminlerde bu değer $\%25-30$ aralığındadır.

İnce taneli zeminlerin sönüm davranışının büyük ve orta deformasyondaki değişimini modelleyebilmek veya tanımlayabilmek için iri taneli zeminler için gözlemlenen durum geçerli olmuş, tanımlanan kayma modülü azalım eğrisinden geçiş yapılması daha pratik ve geçerli olmuştur. Bu nedenle, her iki eğri setinin ortalama değerlerinden geçen eğriler yan yana getirilmiş ve matematiksel bir formülasyon ile dönüşüm sağlanmıştır. Eğilim olarak yine doğal logaritmik fonksiyon içerisinde G/G_{maks} değerlerinin karesi konulmuştur. Sönüm davranışı elastik eşik birim kayma deformasyonuna kadar D_{min} ile tanımlanmış; bu deformasyon

seviyesinden sonra D_{min} ifadesi doğal logaritmik fonksiyonla tanımlanan denkleme matematiksel toplam olarak etkitirilmiştir.



Şekil 3.27: İnce taneli zeminlerde kayma modülü azalım eğrisinden sönüm eğrisine geçiş

3.5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışma kapsamında, önerilen amprik ifadelerin gerçek deneylerle doğrulanması için küçük bir deney seti hazırlanarak Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Geoteknik Mühendisliği Laboratuvarında bulunan GCTS marka TSH-100 model RC+TS deney aleti ile deneyler yapılmıştır. Bu bölümde yapılan deneysel çalışma ile ilgili bilgiler verilecektir. Test edilen numunelerin indeks özellikleri, rezonant kolon ve üç eksenli burulma deneyinin teori ve prosedürü anlatılacaktır. Yapılan deneylerin programı bir tablo ile listelenecektir.

3.5.1. Rezonant Kolon ve Dinamik Burulmalı Üç Eksenli Deneyi

Literatürde zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemede laboratuvarda sıklıkla çalışılan rezonant kolon ve burulmalı üç eksenli deneylerdir. Rezonant kolon deneyinde dolaylı yoldan çok küçük deformasyon seviyelerinde G_{maks} hesaplanmaktadır. Burulmalı üç eksenli deney ile sabit frekans ve genlik (deney esnasında arttırılabilir) altında kayma gerilmesi-birim kayma deformasyonu arasındaki ilişki deney süresince takip edilmektedir.

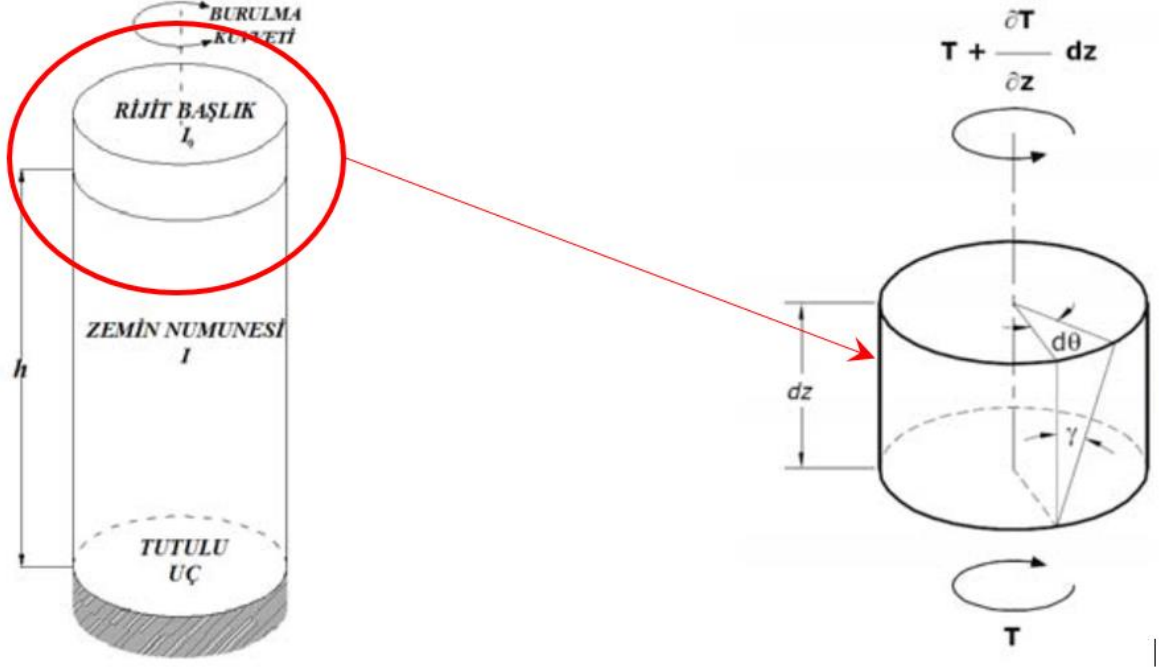
3.5.1.1. Rezonant Kolon ve Burulmalı Üç Eksenli Deneylerin Teorisi ve Dinamik Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Başlangıç ayma modülü, G_{maks} , lineer ve lineer olmayan elastik zemin davranışını tanımlamada önemli bir parametre olup, arazi veya laboratuvar ortamında kayma dalgası hızından hesaplanmaktadır. Bu amaçla kullanılan laboratuvar deneylerinden bir tanesi Rezonant kolon (RC) deney sistemidir. Deney sistemi, prizmatik çubuklarda dalga yayılım teorisine dayalı çalışmaktadır. Bu deney sistemi ile genellikle $\gamma = \%10^{-4} - 10^{-1}$ birim kayma genliği arasında ya da farklı sistem eklentileri ile daha geniş aralıktaki birim kayma genliklerinde zeminlerin dinamik özellikleri belirlenebilir.

Deneylerde kullanılan RCTS (Şekil 3.28 a ve b) test cihazı bir tarafı sabit diğer tarafı serbest olan bir sistemdir. Sistemde zemin numunesi alt başlıkta sabit, üst başlıkta ise serbesttir. Yük üst başlıktan uygulanmaktadır. Bu sistemde ilk önce zemin numunesi konsolide edilmekte ve daha sonra üst başlıktaki dinamik yükleme sistemi aracılığıyla burulmaya maruz bırakılmaktadır. Yükleme frekansı kademeli olarak, maksimum tepki (birim kayma deformasyon genliği) bulunana kadar, arttırılmaktadır. Birim kayma deformasyon genliğinin maksimum olduğu noktadaki en düşük frekans, zemin numunesinin temel frekansı olarak tanımlanmaktadır. Bu aşamada deformasyonlar sonsuza uzamaktadır. Temel frekans (rezonans frekansı), numune mukavemetinin, numune geometrisinin ve RC test cihazının bir fonksiyonudur. Malzeme sönümü ise hem serbest titreşimden, hem de yarı güç bant genişliğinden hesaplanır.

Rezonant kolon deneylerinde silindirik doğa zemin numunesi, havayla veya su ile çevre basıncı uygulanan bir sisteme membran vasıtasıyla yerleştirilir ve belirlenen gerilme seviyesi altında konsolide edilir. Frekansının ve tork kuvvetinin kontrol edildiği bir yükleme sistemi ile, silindirik numuneye serbest olan üst başlıktan genellikle normal

modların ilkinde boyuna veya burulmalı olacak şekilde, eğilme veya burulma kuvveti uygulanır. RC deneylerinde kayma birim deformasyon genlik aralığı genellikle $\gamma = \%10^{-4}-10^{-1}$ dır (ASTM D4015-87, 2000)



Şekil 3.28: Rezonant kolon numunesi ve uygulanan tork (solda), numuneye ait serbest cisim diyagramı. Burulmaya maruz bırakılan içi dolu silindirik rezonant kolon numunesinde oluşan birim kayma deformasyon genliği, numunenin merkezinde sıfır veya minimum, numunenin dış yüzeyinde ise maksimumdur (Şekil 3.28). Bu noktada kayma deformasyon genliği eşitlik 3.11 ile hesaplanır.

$$\gamma = \frac{r * \theta_{maks}}{h} \quad (3.11)$$

Bu denklemde, r; zemin kolonunun ekseninden olan mesafeyi, θ_{maks} ;maksimum dönme açısını ve h; numune yüksekliğini (boyunu) göstermektedir. Yarıçap boyunca birim kayma deformasyon genliği sabit olmadığından, tanımlanan deformasyon genliği uygulanan kayma gerilmesi için ortalama değerdir.

Bu çalışmada kullanılan deney aleti, numunenin serbest olan üst kısmındaki dönme açısını Θ_{maks} 'ı, em ivme ölçer hem de proksimetre ile ölçebilmektedir. Bu cihazlar, numune

üst başlığına r_{sensor} yarıçapına yerleştirilir. Sistemde birim kayma deformasyon genliğinin ölçümünde ivme ölçer kullanılıyorsa, ivme değerinin zamana göre integrali alınarak burulma deplasmanı, x , ölçülür. Burulma deplasmanı;

$$x = -\frac{\ddot{x}}{\omega^2} = -\frac{\ddot{x}}{4 * \pi^2 * f^2} \quad (3.12)$$

ile hesaplanır. Burada, ω ; dairesel frekansı, f ; lineer frekans değerini göstermektedir. Üst başlıktaki dönme açısı sensorlerin ölçtüğü deplasman değeri r_{sensor} değerine bölünerek hesaplanır (Denklem 3.13 ve 3.14).

$$\theta_{\text{maks}} = \frac{x}{r_{\text{sensor}}} \quad (3.13)$$

$$\gamma = \frac{r_{\text{eşdeğer}} * \theta_{\text{maks}}}{h} \quad (3.14)$$

Sönüm oranı küçük deformasyon seviyelerinde Rezonant kolon ve büyük deformasyonlarda burulmalı deneyler ile bulunabilecek bir dinamik zemin özelliğidir. Gerçek malzeme sönümünü tanımlamak oldukça zor olmakla beraber, hesaplarda genellikle eşdeğer viskoz sönüm oranı ile gerçek malzeme sönümü ifade edilmektedir. Tek serbestlik dereceli bir sisteme ait serbest sönüm davranışı aşağıdaki gibidir.

$$m * \ddot{x} + c * \dot{x} + k * x = 0 \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.15'te \ddot{x} ivme, \dot{x} hız, x ; yer değiştirme, m ; kütle, c ; viskoz sönüm katsayısı, k yay sabiti olarak tanımlanmıştır. Serbest sönümlü serbest titreşim teorisinde; viskoz sönüm oranı D , c_c ; kritik sönüm katsayısı, ω_n ; sönümlenmemiş doğal frekans olup aşağıdaki şekilde tanımlanmışlardır.

$$D = \frac{c}{c_c} \quad \text{ve} \quad c_c = 2\sqrt{k * m} \quad \omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (3.16)$$

Denklem 3.16'da verilenler Denklem 3.15'te yerine konduğunda ortaya çıkan diferansiyel denklemin genel çözümü aşağıdaki gibi olmaktadır(Eşitlik 3.17):

$$x = C * e^{-\omega_n D t} \sin(\omega_d t) + \varphi * \sin\left(\frac{\omega_n h}{v_s}\right) \quad (3.17)$$

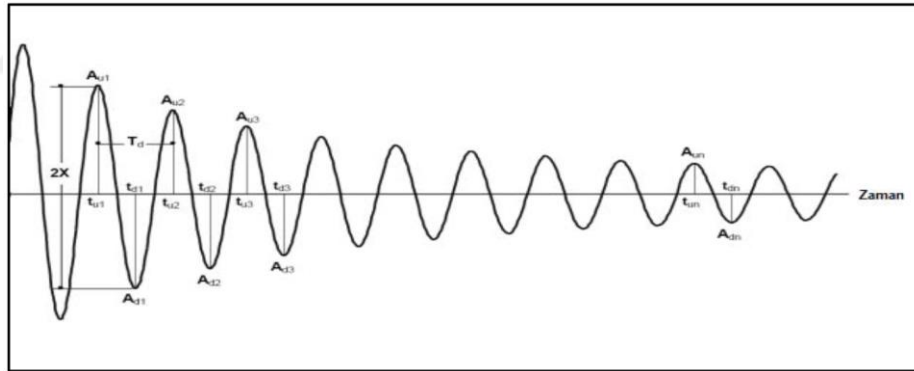
Burada C sabit, ω_d : sönümlenmiş rezonans frekansı olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.29’de verilen serbest sönüm eğrisinde, birbirini izleyen iki pik noktanın oranı aşağıdaki şekildedir:

$$\frac{x_n}{x_{n+1}} = e^{-\omega_n D(t_n - t_{n+1})} = e^{\frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}}} , t_{n+1} = t_n + \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (3.18)$$

N , çevrim sayısı olmak ve 10-50 çevrim arası koşulu ile, logaritmik azalım, δ , ile sönüm oranı hesaplanır. Logaritmik azalım, δ ise Denklem 3.18’deki ifadenini doğal logaritmasıdır. Zemine ait sönüm oranı, D eşitlik 3.19’a göre hesaplanır:

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4 * \pi + \delta^2}} \quad (3.19)$$

Sönüm oranının bu şekilde hesaplanmasına “serbest azalım sönüm davranışı ile sönüm oranı hesaplanması” denir. Tüm bu denklemlerin grafiksel gösterimi Şekil 3.29 ile verilmiştir.

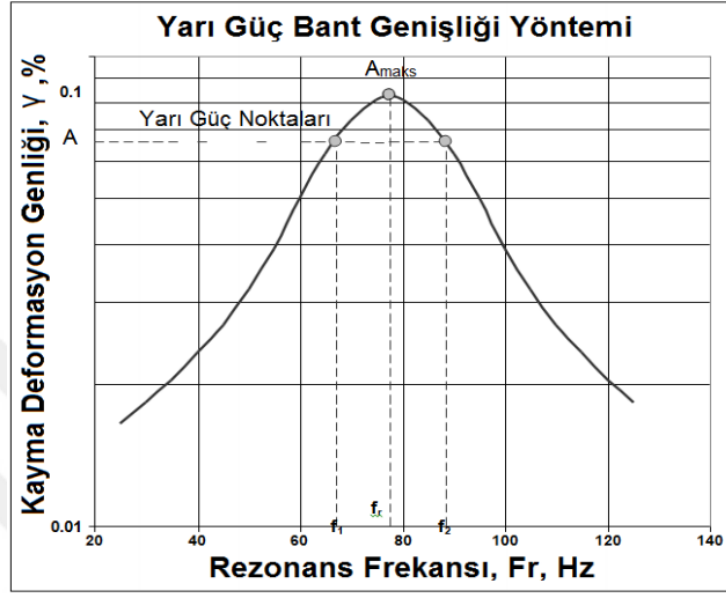


Şekil 3.29: Logaritmik azalım ile sönüm davranışı

Sönüm oranı hesabında kullanılan diğer bir çözüm ise “yarı güç bant genişliği” yöntemidir. Zorlanmış titreşim sonucu logaritmik azalım, rezonansa yakın frekans eğrisinin genişliğinden hesaplanır (Eşitlik 3.20)

$$D = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \quad (3.20)$$

Burada, f_1 : A birim kayma deformasyon genliğinin, rezonans altındaki frekansı, f_2 ise rezonans üzerindeki frekans değeri, f_r ise rezonans frekansı, D ise malzeme sönümüdür. A değeri Amaks'ın 0.707 katıdır (Şekil 3.30)



Şekil 3.30: Yarı Güç Bant Genişliği ile Sönüm oranı hesaplanması

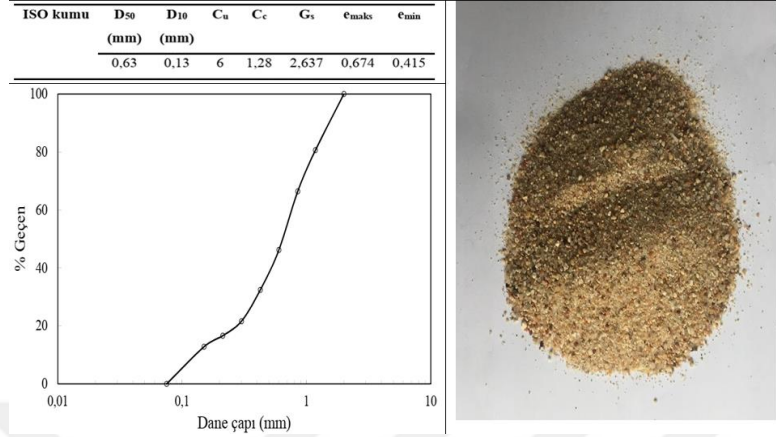
3.5.1.2. Test Edilen Zeminler ve Numune Hazırlanması

Kayma modülü azalımı ve sönümlenme davranışının tanımlanması için bu tez çalışması kapsamında önerilen denklemlerin doğrulanması için deneysel çalışmada granüler malzeme olarak ISO (BS-196'ya göre standart çimento kumu) seçildi. Ancak tez ile ilgili deneylere başlamadan önce literatürde dinamik özellikleri sayısız çalışmada yer almış Toyoura kumu ile yapılan denemeler de başarılı olunca bu çalışma içerisinde yer almıştır.

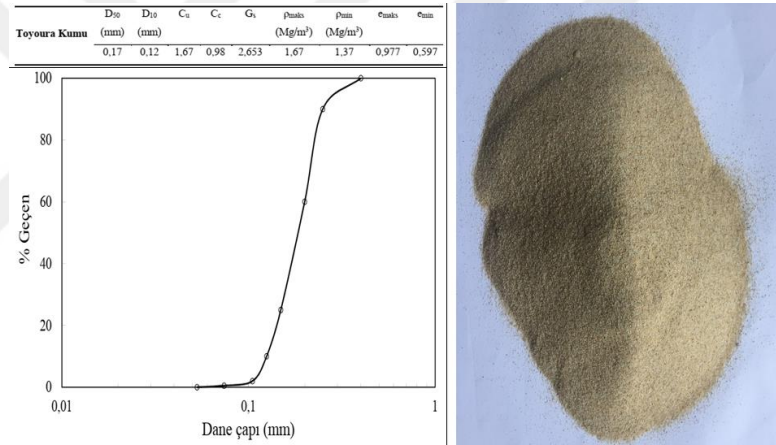
İnce taneli, kohezyonlu zeminler için seçilen malzeme ise İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği laboratuvarında bulunan non-plastik (Plastik limiti ölçülemiyor) kaolin kildir. Son olarak tez çalışması için deneylerin yapıldığı esnada, Lübnan'ın Lut Gölü tabanından getirilen suya doymuş numuneler ile yapılan Rezonant Kolon deneyleri de burada kullanılmıştır. Tüm malzemelere ait indeks özellikleri Şekil 3.31, 3.32, 3.33'te verilmiştir (Umu, 2013)

Deneyler ASTM D4015-87, 2000 standardına göre yapılmıştır. Ancak numuneleri doyurma işlemi yapılmamıştır. Kum numuneler kuru halde sisteme yerleştirilmiştir. Huni kullanılarak

serbest düşürme ile yerleştirme yapılmış teorik olarak hesaplanan relatif sıklık değerinden uzaklaşmamaya gayret edilmiştir.



Şekil 3.31: Iso Kumu İndeks özellikleri ve tane dağılım eğrisi



Şekil 3.32: Toyoura Kumu İndeks özellikleri ve tane dağılım eğrisi

Numune Adı	PI(%)	S(%)	G _s (-)	w _d (%)	e ₀ (%)	USCS
Lut Gölü	40	100	2.64	42	1.11	CH



Şekil 3.33: Lut Gölü tabanı CH kil (solda); kaolin

Kaolin numunenin hazırlanması için Soga (1994)'nın doktora tezi deneylerinde kullandığı kaolin için likit limitin 1.5 katı kadar su miktarında bulamaç yaptığı teknik kullanılmıştır. Daha sonra hazırlanan bulamaç 100 kPa'lık gerilme altında 4 gün konsolide edilmiştir (Şekil 3.34).



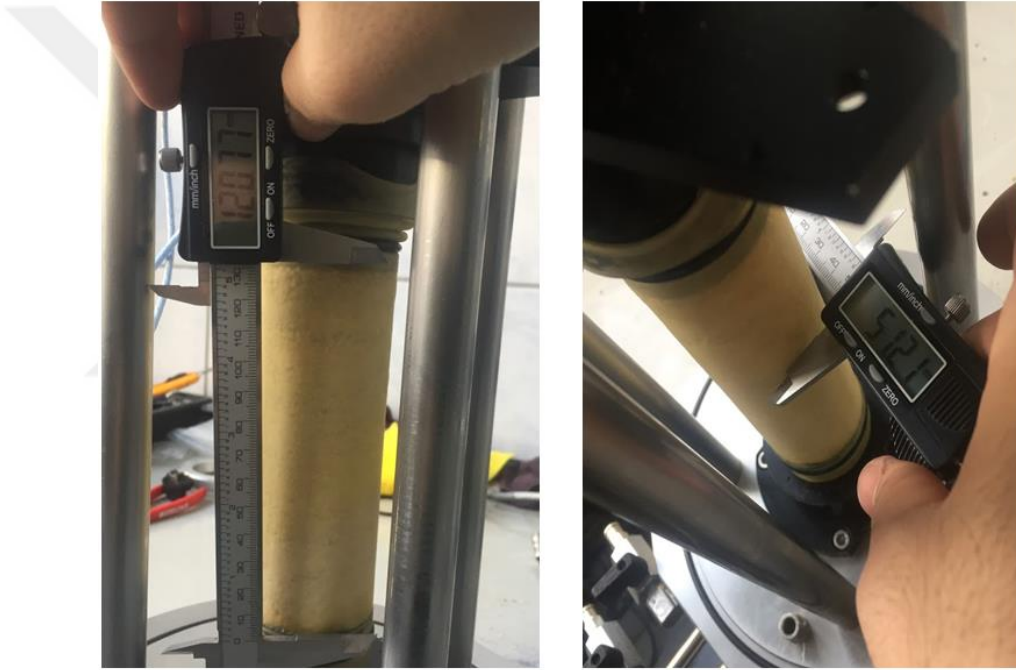
Şekil 3.34: Kaolin bulamacının 50 kPa gerilme altında konsolide edilmesi

Rezonant kolon ve burulmalı üç eksenli deneyler için başlangıç prosedürü ise şu şekilde özetlenebilir:

- Uygun zemin numunesi hazırlanır (karışım deneyleri yapılacak ise karışım numunesi hazırlanır).
- İstenilen numune miktarı, yükseklik veya boşluk oranında numune kalıp içersine sıkıştırılarak veya serbest düşürülerek yerleştirilir ve hesaplamalarda kullanılmak üzere numune yüksekliği mm cinsinden ölçülür.(Şekil 3.35)
- Numuneye 80 – 85 kPa düzeyinde vakum uygulanarak, numunenin kendi başına durması sağlanır. Aksi takdirde üzerine konulan motor ve üst başlık yüzünden numune kendi başına ayakta duramamaktadır.
- Silindirik hücre kapatıldıktan ve gerekli bağlantılar yapıldıktan sonra, 25-30 kPa çevre basıncı uygulanarak vakum kaldırıldıktan sonra numunenin tek başına ayakta kalabilmesi sağlanır.
- Frekans ve genliğin kontrol edilebildiği yükleme sisteminde, zemin kolonuna genellikle normal modların ilkinde boyuna ve burulmalı olacak şekilde eğilme veya

burulma kuvveti uygulanır. Buradaki sistemde burulma kuvveti gücü kontrol edilerek ve çeşitli oranlarda artırılarak uygulanmaktadır.

- Numunelere ayrıca yüksek birim kayma deformasyon genliklerinde ($\gamma = \%10^{-2} - \%10$) burulmalı kesme deneyi (TS) yapılır. Bu deneyde uygulanan tork miktarı kontrol edilerek belirli bir frekans değerinde numuneye uygulanır. Birim kayma deformasyon genliği kontrol edilerek ilgili çevre basıncında deformasyonlar göçme düzeyine erişinceye kadar deney devam ettirilir. Deney süresince değişen tork, çevrim sayısı, birim kayma deformasyon genliği, sönüm oranı, kayma modülü değerleri deney sisteminden alınır

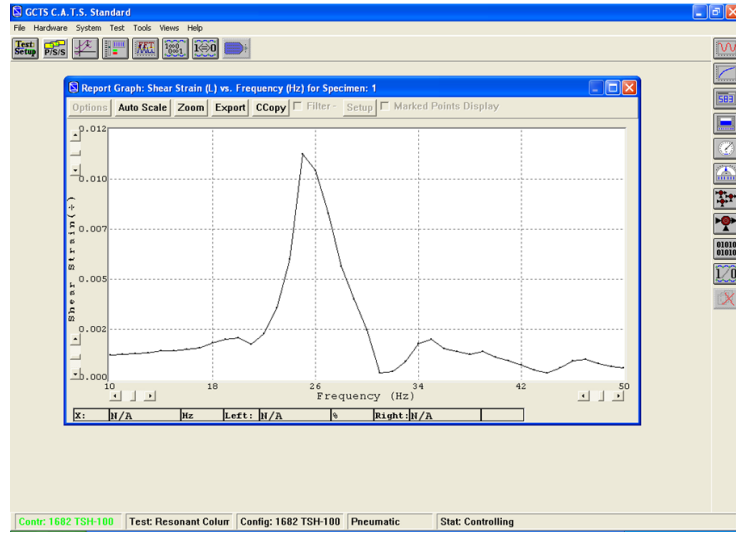


Şekil 3.35: Numune boyutlarının ölçülmesi

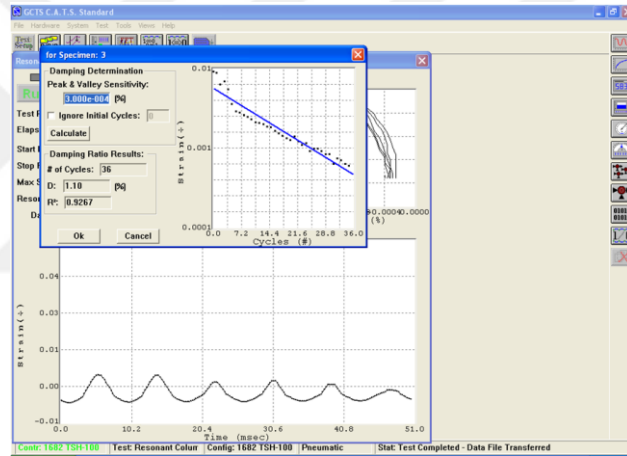
Deney sonunda herhangi bir deformasyon seviyesi için cihaza komut veren yazılımdan gerekli ölçüm ve değerler dijital olarak alınabilmektedir (Şekil 3.36, 3.37 ve 3.38)

3.5.1.3. Deneysel Program

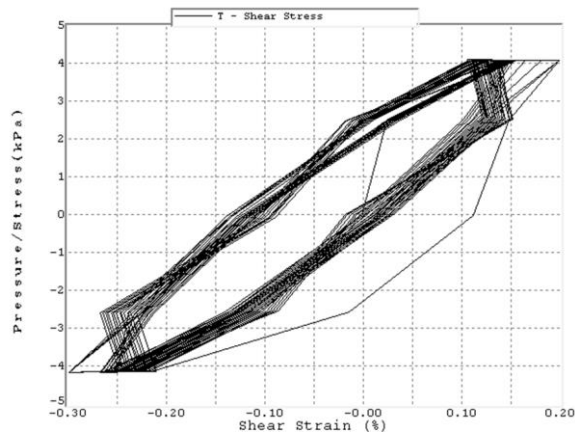
Kum ve kil numunelerin deney başı boy çap ile ilgili bilgileri Tablo 3.5'te özetlenmiştir. Deney programı içerisinde yer alan toplam deney sayısı 16'dır. Deneme rezonant kolon deneyleri ile sistem dinamikleri net olarak anlaşıldıktan sonra çalışmaya esas olan bu butik test programı uygulanmıştır.



Şekil 3.36: Rezonant kolon deneyi maksimum genlik-frekans grafiği



Şekil 3.37: Logaritmik azalım yöntemi ile sönüm oranının hesaplanması



Şekil 3.38: Burulmalı üç eksenli deney sonunda kayma gerilmesi-kayma deformasyonu eğrisi

Table 3.5: Deneý programı

Deneý No.	Deneý Tipi	Numune	p' (kPa)	frekans (Hz)	Teorik Hesap					Deneý Başı											
					ϵ_{maks}	ϵ_{min}	ϵ_0	$D_R(\%)$	G_S	W (g)	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	H ₃ (cm)	H _{ort} (cm)	D ₁ (cm)	D ₂ (cm)	D ₃ (cm)	D _{ort} (cm)	Vort (cm ³)	ϵ_0	$D_R(\%)$
1	RC	TS-196 Kum	50	-	0.674	0.415	0.5186	60	2.637	401.4	12.21	12.28	12.32	12.27	5.123	5.112	5.138	4.97433	238.454	0.53687	52.9468
2	RC	TS-196 Kum	100	-	0.674	0.415	0.5186	60	2.637	401.4	12.26	12.22	12.27	12.25	5.12	5.08	5.17	4.97333	237.969	0.53375	54.1522
3	RC	TS-196 Kum	200	-	0.674	0.415	0.5186	60	2.637	401.4	12.18	12.1	12.21	12.1633	5.122	5.109	5.18	4.987	237.586	0.53128	55.1058
4	RC	TS-196 Kum	300	-	0.674	0.415	0.5186	60	2.637	401.4	12.128	12.183	12.221	12.1773	5.125	5.11	5.247	5.01067	240.123	0.54762	48.794
5	TS	TS-196 Kum	150	0.1	0.674	0.415	0.5186	60	2.637	401.4	12.64	12.43	12.55	12.54	5.11	5.088	5.1	4.94933	241.258	0.55494	45.9699
6	TS	TS-196 Kum	150	1	0.674	0.415	0.5186	60	2.637	401.4	12.71	12.52	12.09	12.44	5.12	5.123	5.118	4.97033	241.369	0.55566	45.6927
7	TS	TS-196 Kum	150	5	0.674	0.415	0.5186	60	2.637	401.4	12.11	12.36	12.43	12.3	5.15	5.15	5.15	5	241.51	0.55637	45.3417
8	RC	Toyoura Sand	150	-	0.977	0.597	0.806	45	2.653	339.5	12.2	12.31	12.28	12.2633	5.12	5.12	5.12	4.97	237.909	0.82355	40.3814
9	RC	Kaolin	150	-	-	-	-	-	-	444	12.8	12.8	12.6	12.7333	5.13	5.13	5.13	4.98	248.022	-	-
10	RC	Kaolin	200	-	-	-	-	-	-	413	12.1	12.1	12.2	12.1333	5.13	5.13	5.13	4.98	236.335	-	-
11	RC	Kaolin	250	-	-	-	-	-	-	397	11.8	11.9	11.8	11.8333	5.13	5.13	5.13	4.98	230.492	-	-
12	RC	Lut	150	-	-	-	-	-	-	363.2	10.8	10.8	10.8	10.8	5.13	5.13	5.13	4.98	210.364	-	-
13	RC	Lut	260	-	-	-	-	-	-	374	11.1	11.1	11.1	11.1	5.13	5.13	5.13	4.98	216.208	-	-
14	TS	Kaolin	150	0.5	-	-	-	-	-	424	12.7	12.7	12.7	12.7	5.13	5.13	5.13	4.98	247.373	-	-
15	TS	Kaolin	150	1	-	-	-	-	-	435	12.6	12.8	12.8	12.7333	5.13	5.13	5.13	4.98	248.022	-	-
16	TS	Kaolin	150	5	-	-	-	-	-	407	12.1	12.2	12.2	12.1667	5.13	5.13	5.13	4.98	236.985	-	-

3.6. ÖNERİLEN DENKLEMLERİN NÜMERİK ANALİZLERDE KULLANIMI

Bu çalışma sonucu literatürde yer alacak, araştırmacı ve mühendislerin kullanımına uygun hale getirilen denklemlerin, günümüzde mühendislik problemlerinin çözümünde genellikle başvuru alan bilgisayar yazılımları test edilmesi, elde edilen sonuçların literatürle uyumu denklemlerin başarısı için çok önemlidir.

Bu sebeple, kayma modülü azalımının deformasyon hızına bağlı olarak güncellendiği ifadeler ile statik bir problem olan üç eksenli monotonik bir deneysel çalışma FLAC3D V6'da "single zone" olarak bilinen birim küp eleman üzerinde üç eksenli modellemesi yapılmıştır. Nümerik yazılımların çoğunda bir laboratuvar deneyi modeli tek bir birim eleman üzerinde modellenmektedir.

Sönümlenme ile ilgili amprik ifadelerin çalışmasını kontrol etmek, hızlı veya yüksek frekanslı bir yükleme altında amprik ifadelerin çalışmasını irdelemek için ise tek boyutlu dalga yayılımı ile sahaya özel tepki analizi yapılmıştır. Uygulamada iyi bilinen ve sıklıkla kullanılan yazılımlardaki denklemler ile çalışma sonucu önerilen ifadelerin performansı karşılaştırılmıştır.

3.6.1. Monotonik Üç Eksenli Deneğin Modellenmesi

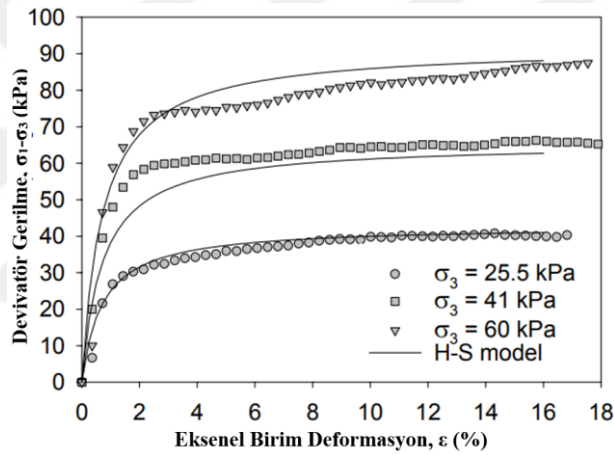
Pham (2005) doktora tezi çalışması kapsamında darbeli kırmataş kolonların etrafındaki zeminle olan etkileşimi ve yük transfer mekanizmasını incelemek amacıyla hem arazide hem de laboratuvar da deneyler yapmıştır. Böylece, kullanacağı bilgisayar yazılımında uygun bünye modelini seçip bu modelin isteklerine cevap verebilecek parametreleri bulmayı hedeflemiştir.

Bu bağlamda, darbeli kırmataş kolon zeminin civarında bulunan alüvyonal kil zemine laboratuvar da zeminin yüzeyinden 4.2 m. aşağıda bulunan kilden almış olduğu örselenmemiş numuneler üzerinde konsolidasyonlu drenajı deneyler yapmıştır. Kırılma zarfını elde edebilmek için 3 farklı çevre basıncında (25.5, 41 ve 60 kPa) bu deneyleri gerçekleştirmiştir (Şekil 3.39). Sonuç olarak zemine ait efektif kayma mukavemeti parametrelerini sırasıyla, $c'=2$ kPa ve $\phi'=24$ olarak bulmuş; PI %44 olarak verilmiştir. Bu arada zeminin laboratuvardaki üç eksenli davranışının deformasyona bağlı pekleşen bir davranış olduğunu belirtmiştir.

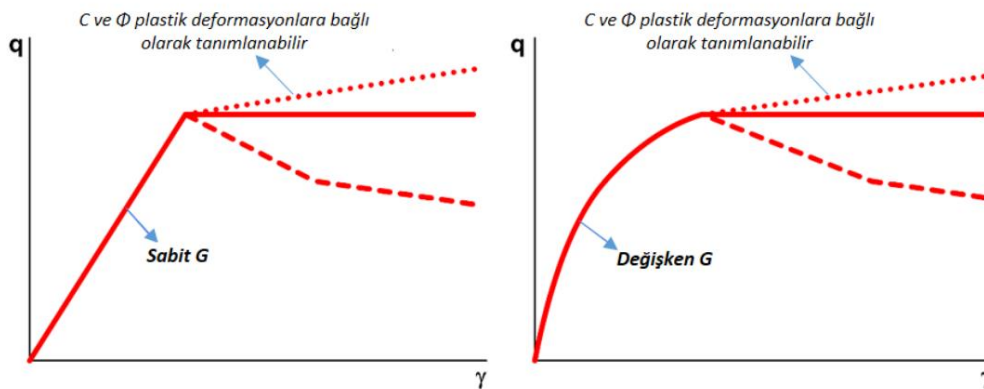
Bu laboratuvar deneyini FLAC 3D yazılımı ile modelleyebilmek için yazılım bünyesinde gömülü olarak bulunan "Strain Softening/Hardening Mohr- Coulomb" modelini modifiye etmek üzere kullanılmıştır (Şekil 3.40).

Modifiye edilmiş model, Mohr-Coulomb göçme kriteriyle çalışan; elasto-plastik, deformasyona bağlı yumuşama ya da pekleşme davranışını göz önünde bulundurabilen bir modeldir. Plastik akmadan önceki doğrusal olmayan davranış, analiz boyunca sürekli olarak kayma modülünün güncellenmesiyle sağlanmıştır. Akma sonrası yumuşama ya da pekleşme davranışı, yapılan laboratuvar deneylerinde elde edilen kayma mukavemeti deformasyon tablosundan programa okutulabilir.

Bu tez çalışması kapsamında ince taneli zeminler için önerilen kayma modülü azalım denklemleri Tablo 3.3'teki statik üç eksenli deney için önerilen ortalama deformasyon hızı göz önünde bulundurularak güncellenmiş ve modeldeki akmadan önceki davranışı modül azalımı kontrol etmiştir.



Şekil 3.39: Laboratuvarda yapılan CD deneyleri (Pham,2005)



Şekil 3.40: Yumuşamalı-Pekleşmeli Mohr Coulomb modelin kayma modülü azalım denklemleri ile güncellenmesi ve akma öncesi doğrusal davranışın değişimi

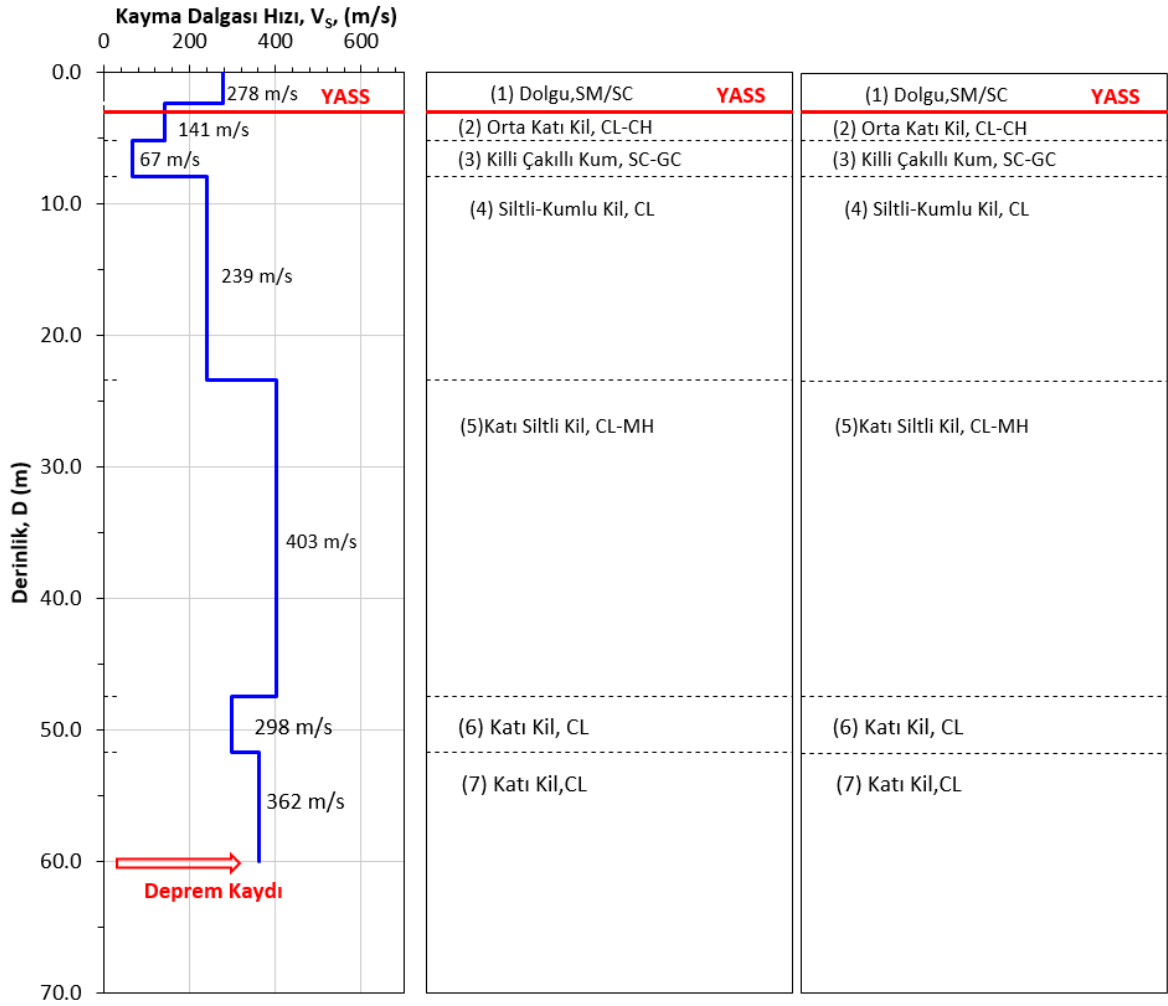
3.6.2. Tek Boyutlu Dalga Yayılımı ve Tepki Spektrumu Analizi

Bu başlık altında hem granüler hem de kohezyonlu zeminlerde rijitliğin ve sönümleme davranışının mühendislik anakayasından zemin yüzeyine transfer olan bir sismik etkinin nasıl değiştiğini gösteren bir sahaya özel tepki spektrumu analizi 1 boyutlu olarak farklı yazılımlar ile yapılacaktır.

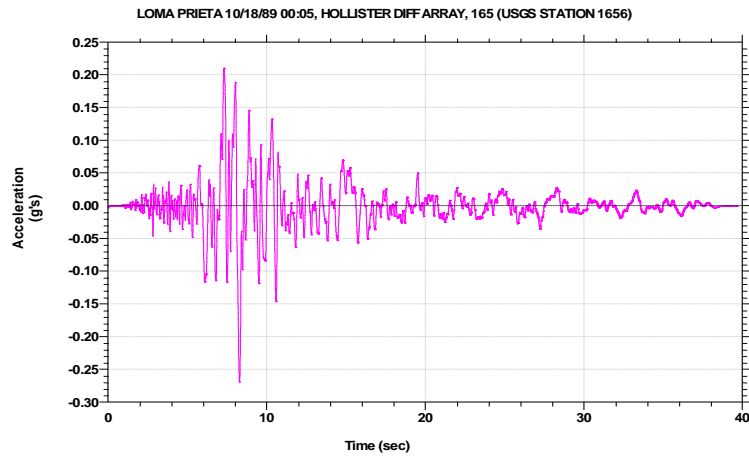
Tezin esas çıktısı olan sönümleme ve rijitlik davranışının tanımlanması ile oluşturulan sayısal modelin, halihazırda sıklıkla kullanılan yazılım ve dinamik özellikleri tahmin eden modellere karşı performansını değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, SHAKE 2000 yazılımında Darendeli (2001) tarafından önerilen denklemler kullanılarak zemin sütunu modellenmiş; aynı vakaa ve saha tepki analizi Plaxis 2019, Borehole sekmesi altındaki Site response radyo kutucuğu ile yapılmış, bu modeldeki tüm zeminler “Hardening Soil Small Strain” bünye modeli ile programa tanıtılmıştır. Malzeme parametreleri ve idealize zemin profilie Ekler kısmında sunulmuştur. Son olarak ise bu çalışmadan elde edilen denklem takımları ile elde edilen dinamik zemin özellikleri EERA makrolu çalışma sayfasındaki ilgili yere kaydedilmiş ve çalışmaya konu olan vakaa bir kez daha analiz edilmiştir.

Karşılaştırma çalışmasına konu olan saha, (Stewart & Stewart, 1997) araştırmacılar tarafından çok iyi gözlemlenmiş ve enstrümente edilmiş bir sahadır. Elli sekiz adet yapının 17 Ekim 1989 yılında manyetüdü $M_w=6.9$ olan Loma Prieta depreminin farklı kayıtları ile etkilenen sahalar göz önüne alınmış ve bazı sahalarda zemin yüzeyi, bina temeli ve bina çatısında ivme ölçerler ile kayıt alınması mümkün olmuştur. İnceleme konusu olan vakai, ilgili dokümanın A4-1 sayfasında bulunan ve saha ismi “Emeryville Pacific Park Plaza” olan incelemedir. Yazarlar buraya etkiyen en büyük yer zemini ivmesinin doğu –batı doğrultusunda olduğunu ve 0.25 g olduğunu ileri sürmüşlerdir. 31 katlı banka binasının bulunduğu sahaya ait Derinlik-Vs, Derinlik zemin özellikleri değerleri Şekil 3.41’de verilmiştir. Ayrıca sahaya en yakın istasyondan alınan ivme kaydı da Şekil 3.42’de sunulmuştur. Zemin birim hacim ağırlıkları, boşluk oranı, plastisite indisi gibi indeks özelliklerinin bulunduğu detaylı zemin profili Ekler kısmında sunulmuştur.

Sonuç olarak sahada serbest yüzeyde ölçülen ivme kaydına ait tepki spektrumu grafiği ile yazılımlar ile yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır.



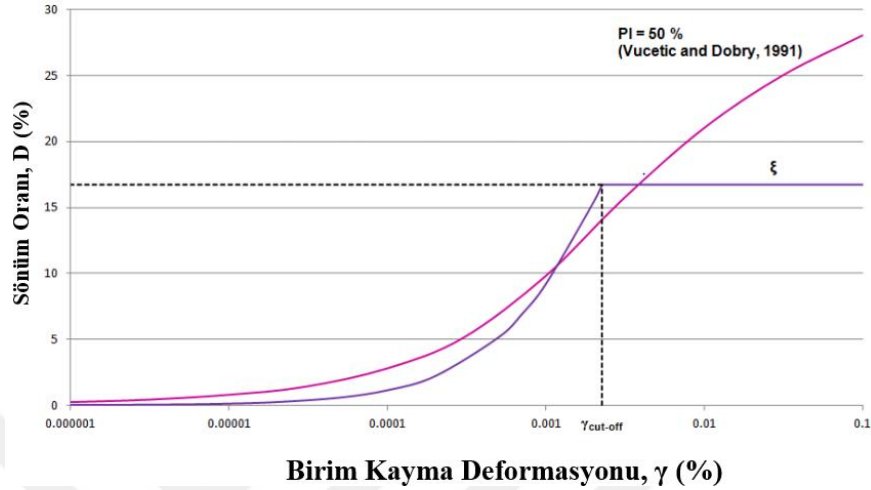
Şekil 3.41: İdealize zemin profili ve Kayma Dalgası Hızı-derinlik profili



Şekil 3.42: Analizlerde kullanılan deprem kaydı.

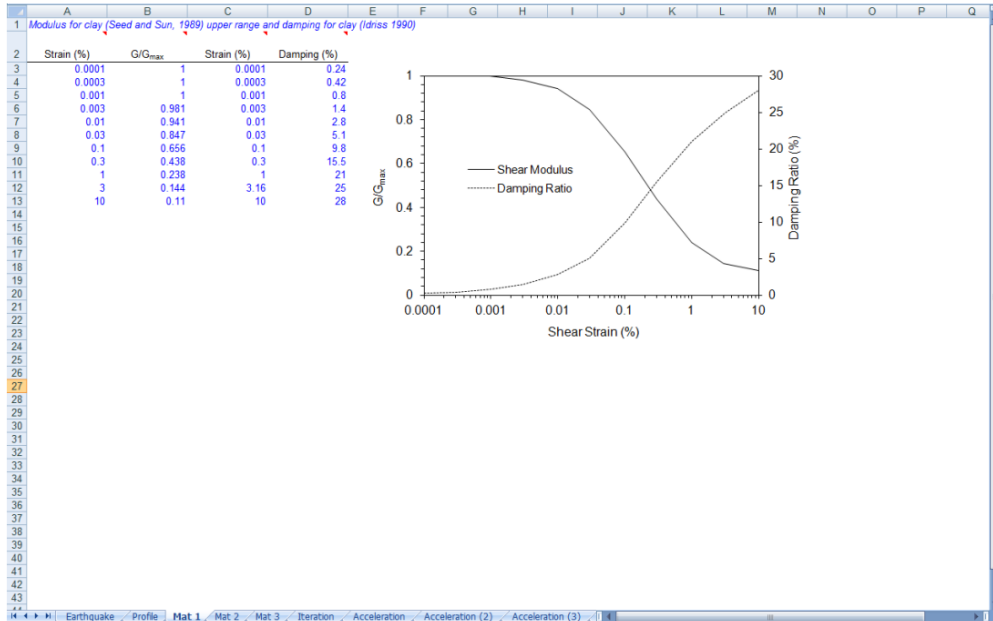
Burada atlanmaması gereken bir diğer nokta da Plaxis 2D yazılımı içerisinde gömülü olarak bulunan Hardening Soil with Small Strains bünye modelinin sönüm ve rijitlik davranışını nasıl

dikkate aldığıdır. Hardin ve Drnevich(1972) de önermiş oldukları hiperbol ve sönüm denklemlerinin dinamik zemin özelliklerinin belirlendiği yazılımda, histerik sönüm davranış bir cut-off strain ile sınırlandırılmaktadır (Şekil 3.43).



Şekil 3.43: Sönümlenme davranışının bir cut-off strain ile sınırlandırılması

EERA aslında makrolar ile özelleştirilmiş bir Excel çalışma kitabıdır. Deprem kaydı, zemin profili ve dinamik zemin özelliklerinin her biri çalışma kitabının sayfaları olup; ancak saha tepki analizi ile ilgili işlemleri otomatik olarak yapabilirler (Şeki 3.44)



Şekil 3.44: Zemin dinamik özelliklerinin girildiği EERA sayfası

4 BULGULAR

Bu tez çalışması kapsamında ilk olarak literatürde kohezyonlu zeminlerin rijitlik zılımı ve sönümlenme davranışını deneysel olarak inceleyen araştırmacıların çalışmaları derlenerek sönümlenme davranışı ve rijitlik azalımı için iki farklı veritabanı kurulmuş; çoklu regresyon ile zemin parametreleri ve dinamik özellikler arasında uygun katsayılar ile yeni amprik ifadeler geliştirilmiştir. Aynı posedür, iri taneli kumlu zeminlerin sönümlenme davranışını tanımlamada da uygulanmıştır. Bunlara ilave olarak, her iki zemin türünde deformasyon hızının kayma modülü azalımına ve sönüm davranışına etkisini inceleyen araştırmacıların verileri ile daha butik veritabanları kurularak, deformasyon hızının modifiye hierbol denklemi içerisine sokulması sağlandı. Yapılan deneyler ve nümerik analizler ile modelin validasyonu ve nümerik analizlerde kullanımı amaçlanmıştır.

4.1. ÖNERİLEN AMPRİK BAĞINTILAR

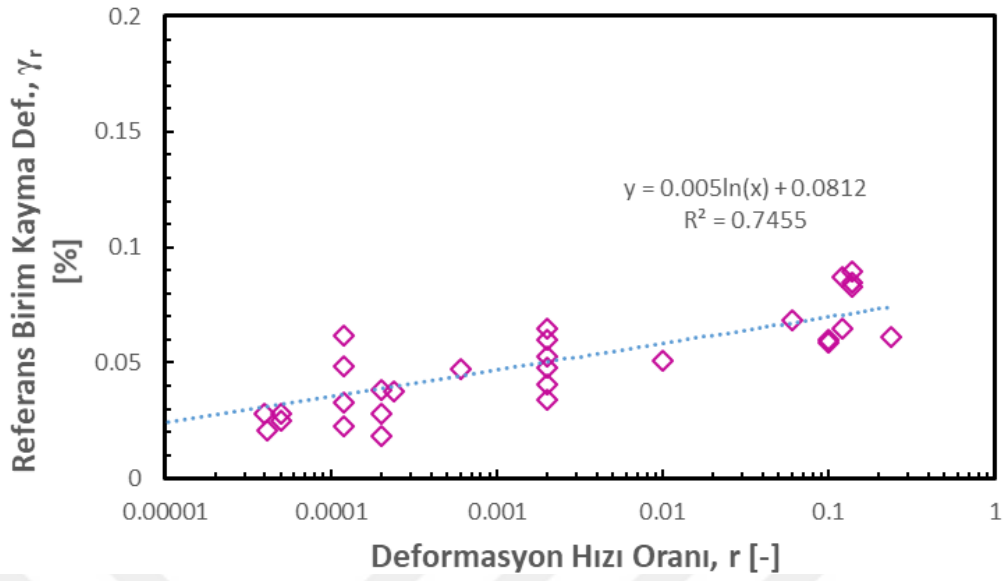
Tezin bu bölümünde veritabanından elde edilen denklemlerin son halleri sunulacak ve bu denklemlerin literatürdeki deneyleri tahmin etmedeki performansı gösterilecektir.

4.1.1. İri Taneli Zeminlerde Deformasyon Hızına Bağlı Rijitlik Azalımı

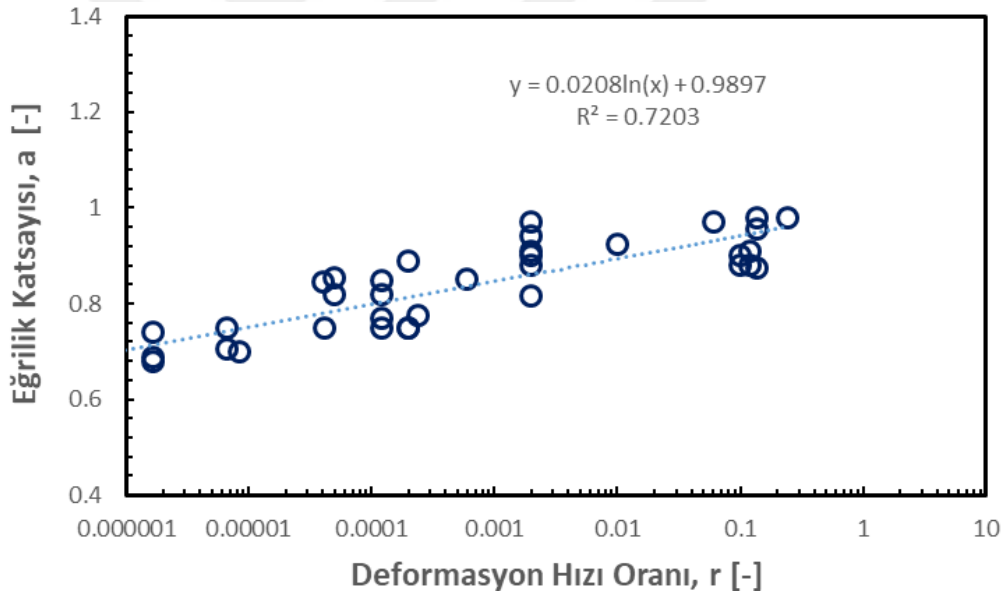
Öztoprak ve Bolton (2013) tarafından modifiye hiperbol denklemin üç esas parametresi olan referans birim deformasyon, eğrili katsayısı ve elastik eşik deformasyonu, deformasyon hızı katsayısı r ile güncellenerek daha spesifik eğrilerin elde edilmesine olanak sağlamıştır. Şekil 4.1 ve 4.2’de deformasyon hızı ile referans birim deformasyon ve eğrilik katsayısı arasındaki ilişki gösterilmektedir. Buna göre, her iki parametre de deformasyon hızı arttıkça artmaktadır; bunun sonucu olarak da zeminde rijitlik azalımı daha geç deformasyonda yarıya inerken, azalım daha dar bir kayma deformasyonu aralığında olmaktadır. Mevcut denklemlerin bu çalışma kapsamında güncellenmiş halleri Tablo 4.1’de yer almaktadır;

Tablo 4.1: Deformasyon hızı düzeltmesi yapılmış modifiye hiperbol parametreleri

Parametre	Deformasyon Hızı Düzeltmesi Yapılan İfadeler
γ_r [%]	$\left[0.01xU_c^{-0.3}x\left(\frac{p'}{p_a}\right) + 0.08 * e_0 * I_D \right] * [0.173 * \ln(r) + 2.97]$
a [-]	$U_c^{-0.075} * [0.022 * \ln(r) + 1.03]$
γ_e [%]	$0.0002 + 0.012 * \gamma_r$

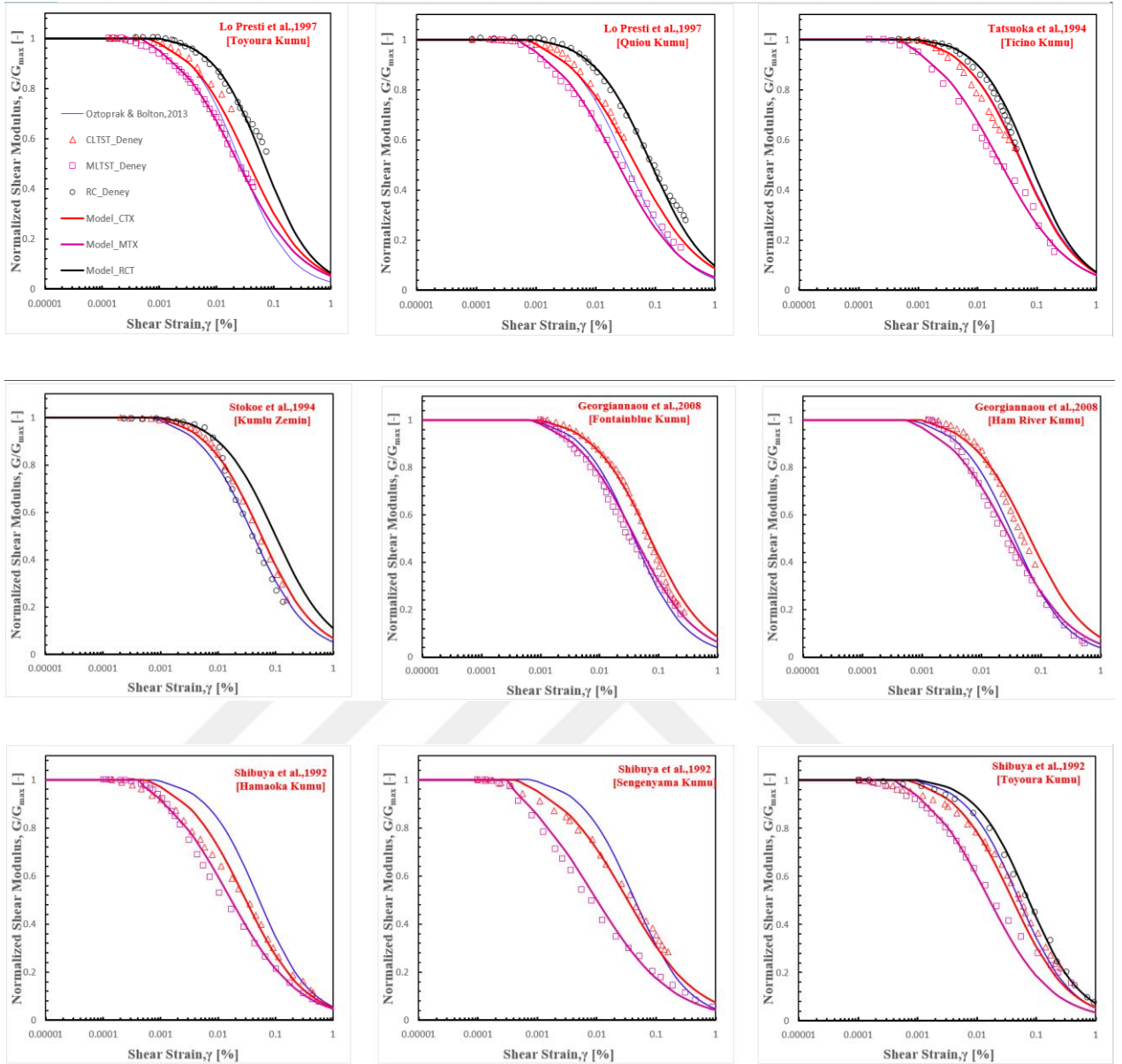


Şekil 4.1: Butik veritabanından elde edilen referans birim deformasyon- hız oranı ilişkisi



Şekil 4.2: Butik veritabanından elde edilen referans eğrilik katsayısı- hız oranı ilişkisi

Tablo 4.1’de verilen denklemler ile tekrar elde edilen eğrilerin, literatürdeki değişik karakteristikteki kumlu zeminlerdeki gerçek deney eğrilerini yakalamadaki performansı umu vadeci olarak nitelendirilebilir (Şekil 4.3). Özellikle aynı numune üzerinde hem rezonant kolon hem de monotnik üç eksenli deneyler yapan araştırmacıların deneyleri yakalaması olumludur. Bununla birlikte bazı araştırmacıların deney ile bulmuş oldukları azalım eğrisi daha keskin ve çabuk olurken model bu değişimi tam anlamıyla yakalayamamıştır.



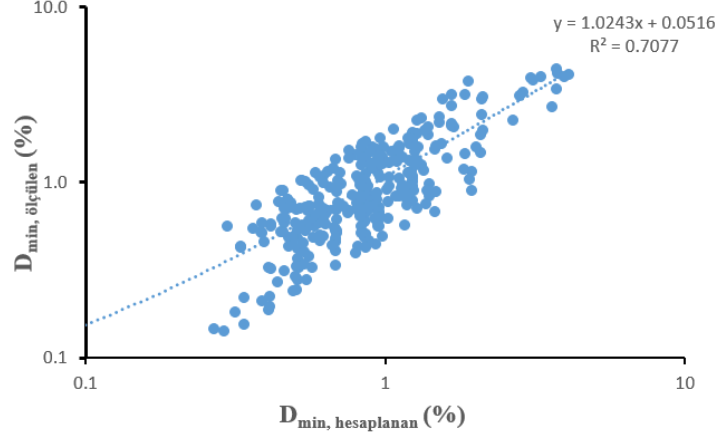
Şekil 4.3: Farklı karakteristiklere sahip kumlu zeminlerde model-deney karşılaştırması

4.1.2. İri Taneli Zeminlerde Sönümlenme Davranışının Belirlenmesi

İri taneli kumlu zeminlerde öncelikle zemin parametreleri ve başlangıç sönüm oranı arasında Excel içerisinde yer alan Solver hesaplama makrosu ile çoklu regresyon yapılmış ve sonuç olarak Denklem 4.1 önerilmiştir:

$$D_{\min}(\%) = \left[0.75 * \left(\frac{p'}{p_a} \right)^{-0.55} + 0.15 * e_0 * U_C \right] - 0.05 \quad (4.1)$$

Yukarıda verilen denklem sonucu hesaplanan başlangıç sönümü ile veritabanındaki deneylerde ölçülen başlangıç sönümü karşılaştırıldığında 332 deney noktası ve tahmin arasında $R^2=0.71$ olan bir ilişki elde edilmiştir (Şekil 4.4). İstatistiki açıdan bu değer kuvvetli bir ilişki sayılabilir.



Şekil 4.4: İri taneli zeminlerde ölçülen ve hesaplanan başlangıç sönümü

Sönümlenme davranışının yüksek deformasyondaki karşılığını bulabilmek için kayma modülü veritabanının ortalama eğrisi ile sönüm oranı veritabanının orta eğrisi arasında ilişki aranmış ve sonuç olarak denklem 4.2 önerilmektedir.

$$D(\%) = D_{\min} - 4.2 * \ln \left[\left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^{1.8} \right] \quad (4.2)$$

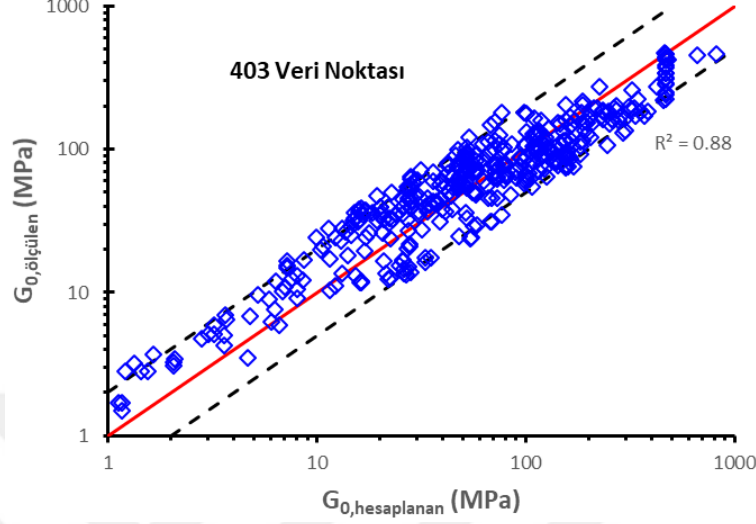
4.1.3. İnce Taneli Zeminlerde Başlangıç Rijitliği

Kohezyonlu zeminlerin başlangıç rijitliğini hesaplamak için boşluk oranı fonksiyonu belirlendikten sonra Denklem 3.8 ile Denklem 3.1'in karşılıklı sağlaması şeklinde nitelendirilebilecek üst üste çakışması gerçekleştirildi. Bunun neticesinde, killi zeminlerin başlangıç kayma modülünü hesaplamayı amaçlayan aşağıdaki gibi yeni bir denklem önerilmiştir (4.3)

$$G_{\max} = \frac{53.2}{e_0^{1.5}} * p_a^{0.1} * p'^{0.9} * [4 * PI * AKO^{0.34} + 3.5] \quad (4.3)$$

Burada en önemli detay Plastisite indisi (PI) hesaplamada ondalık değeri ile yazılacaktır ve $PI < 120$ olmalıdır. Bu denklemden elde edilen değerler ile literatürde ölçülen değerler

karşılaştırıldığında Şekil 4.5'teki durum ortaya çıkmaktadır. 2 kat hata toleransı içinde 403 noktayı $R^2 = 0.88$ gibi yüksek bir korelasyon ile denklemin çalıştığı görülmektedir.



Şekil 4.5: Başlangıç rijitliği formülü ile literatürdeki ölçülen değerlerin karşılaştırılması

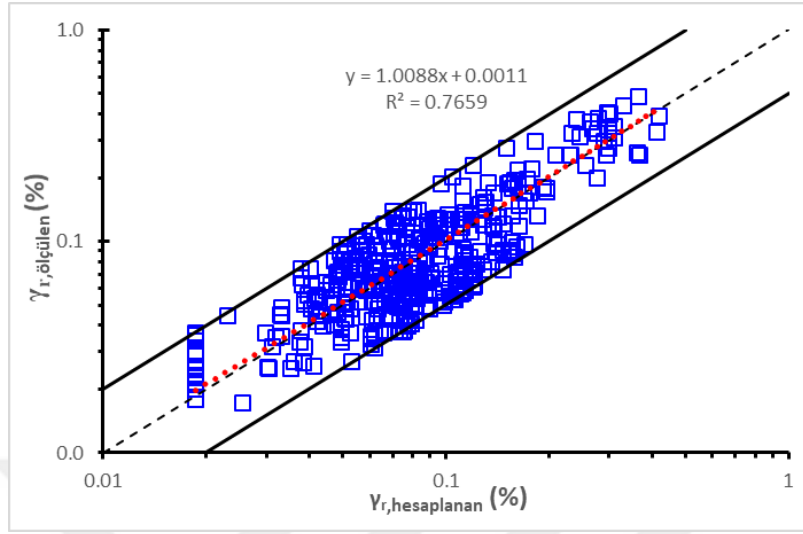
4.1.4. İnce Taneli Zeminlerde Rijitlik Azalımı

Kohezyonlu zeminlerin deformasyon hızından bağımsız rijitlik azalımını tanımlamak için modifiye hiperbol denklemin karakteristik parametreleri γ_r , γ_e ve a 'nın elde edilmesi için yapılan çoklu regresyon sonucunda bulunan denklem seti Tablo 4.2'de verilmektedir.

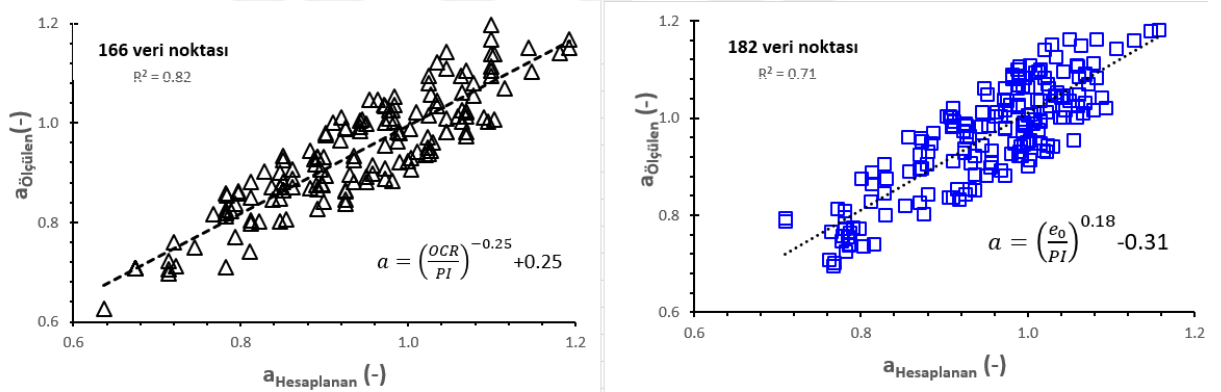
Tablo 4.2: Modifiye hiperbol denklemi parametreleri için önerilen denklemler

Parametre	Denklem
γ_r [%]	$\gamma_r(\%) = 0.003 * PI * OCR^{0.25} * \left(\frac{p'}{p_a}\right) + 0.08 * e_0 * OCR^{-0.25}$
a [-]	$a = \left(\frac{OCR}{PI}\right)^{-0.25} + 0.25$; $a = \left(\frac{e_0}{PI}\right)^{0.18} - 0.31$
γ_e [%]	$0.688 * \gamma_r^{3.04}$

Tablo 4.2'de verilen denklemlerin ölçülen değerleri bulma konusundaki performansını değerlendirmek için Şekil 4.6 ve 4.7'e bakacak olunursa; referans kayma deformasyonu 405 deney verisi ile regresyon katsayısı $R^2 = 0.77$ ile yakalanmaktadır. Bunun yanında eğrilik katsayısı için iki farklı denklem önerilmektedir, her iki eşitliğin de korelasyon katsayıları ve korelasyona soktukları deney verisi açısından performansları aynı sayılabilir.



Şekil 4.6: Referans kayma deformasyonu için veritabanından elde edilen denklemin performansı



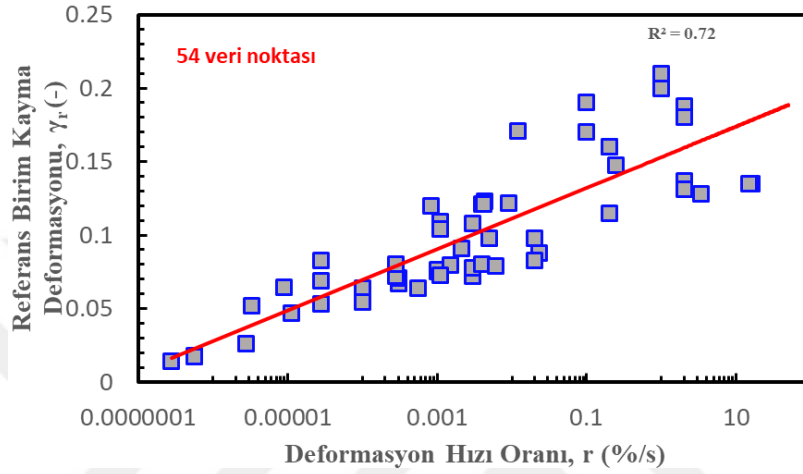
Şekil 4.7: Eğrilik katsayısı için önerilen iki farklı ifadenin karşılaştırılması

Elastik eşik deformasyona ait eşitlik Bölüm 3'te Denklem 3.1 ve Denklem 3.8'in eşleştirilmesi sonucu ortaya çıkmıştır; referans birim kayma deformasyonu ile ilişkilendirilmiştir.

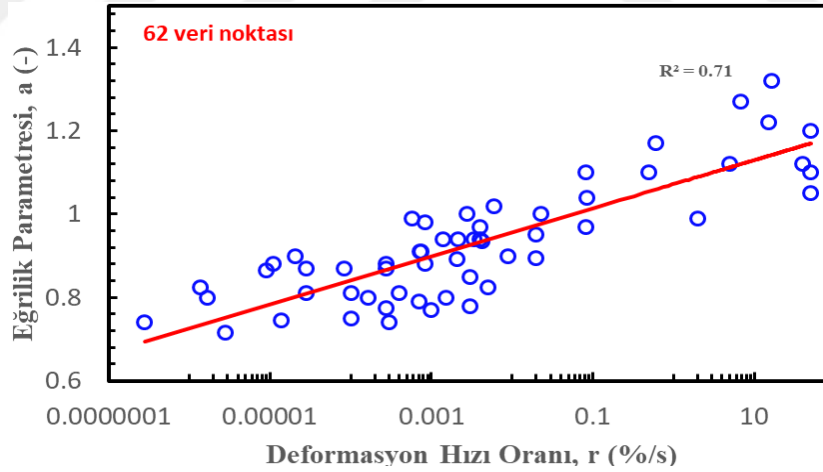
4.1.4.1. İnce Taneli Zeminlerde Deformasyon Hızına Bağlı Rijitlik Azalmanın Belirlenmesi

İnce taneli zeminlerde deformasyon hızına bağlı rijitlik azalımı denklemlerini belirleyebilmek için kumlu zeminlerde izlenen prosedürün aynısı uygulanmıştır. Rezonant kolon deneylerinin ağırlıkta olduğu veritabanında hız düzeltmesi veya normalize edilen hız değeri yine 100 %/s olmuştur. Bu kabulde referans kayma deformasyonu ve eğrilik parametresi ile deformasyon hızı arasındaki ilişki incelenmiştir. Şekil 4.8 ve 4.9'da sırasıyla deformasyon hızı ile hiperbol denklemi arasındaki ilişki gösterilmektedir. Tablo 4.3'te deformasyon hızı düzeltmesi yapılan

parametreler verilmektedir. Bu parametreler kullanılarak, literatürde killi zeminlerde rijitlik-yükleme hızı ilişkisini inceleyen araştırmacıların deneyleri yakalanmaya gayret edilmiştir (Şekil 4.10). Çok düşük hızlarda deney yapan araştırmacıların verilerini yakalamada gerçekte olandan daha geç rijitlik azalımına başlayan model; dikkate alınan bir çok araştırmacının verileri ile valide olmuştur.



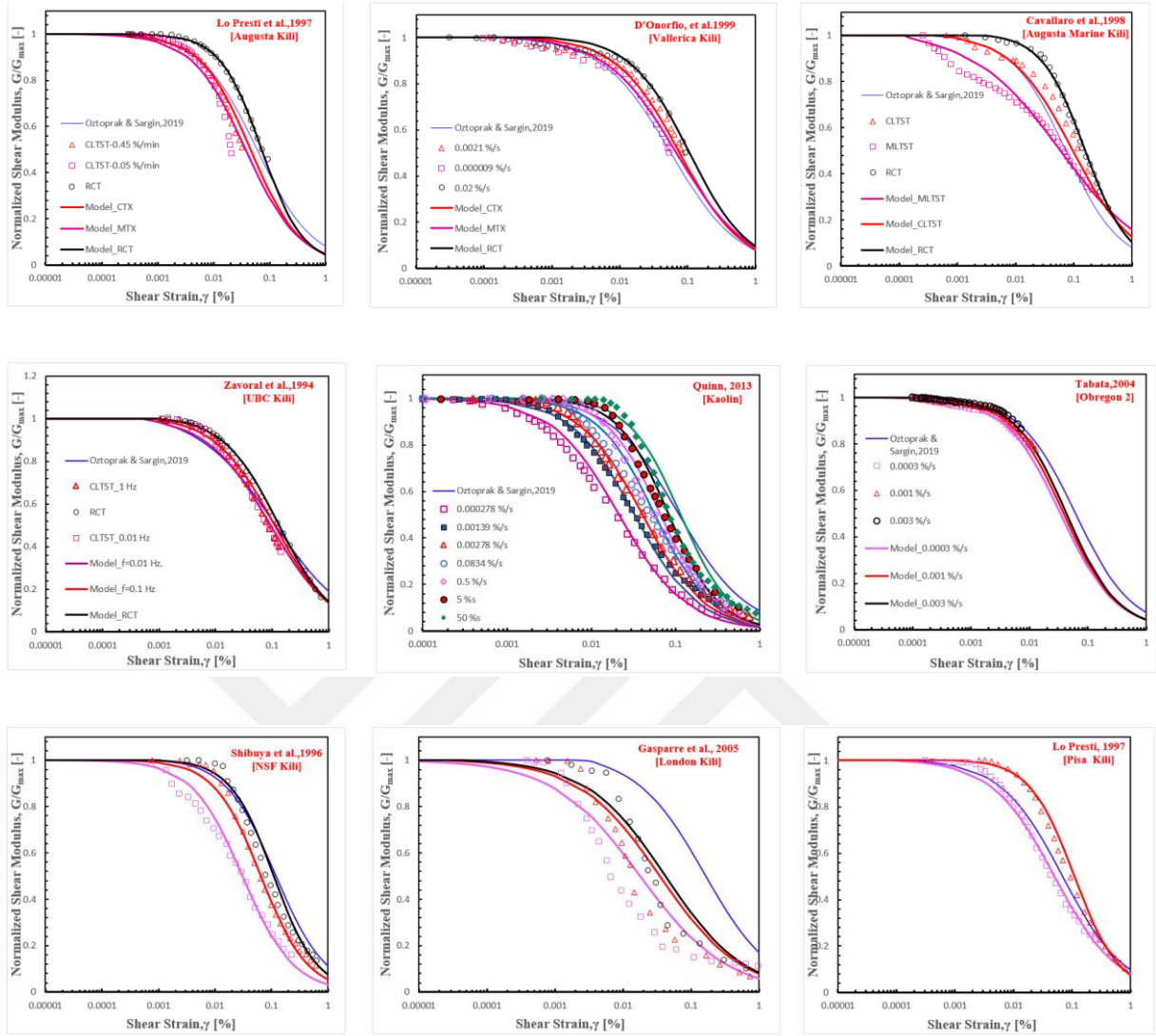
Şekil 4.8: Referans birim kayma deformasyonu-deformasyon hızı ilişkisi



Şekil 4.9: Eğrilik-deformasyon hızı ilişkisi

Tablo 4.3: Deformasyon hızı düzeltmesi yapılan rijitlik azalımı parametreleri

Parametre	Deformasyon Hızı Düzeltmesi
γ_r [%]	$0.003 * PI * OCR^{0.25} * \left(\frac{p'}{p_a}\right) + 0.08 * e_0 * OCR^{-0.25} * [0.065 * \ln(r) + 1.38]$
a [-]	$\left[\left(\frac{e_0}{PI}\right)^{0.18} - 31\right] * [0.034 * \ln(r) + 1.45]$
γ_e [%]	$0.688 * \gamma_r^{3.04}$



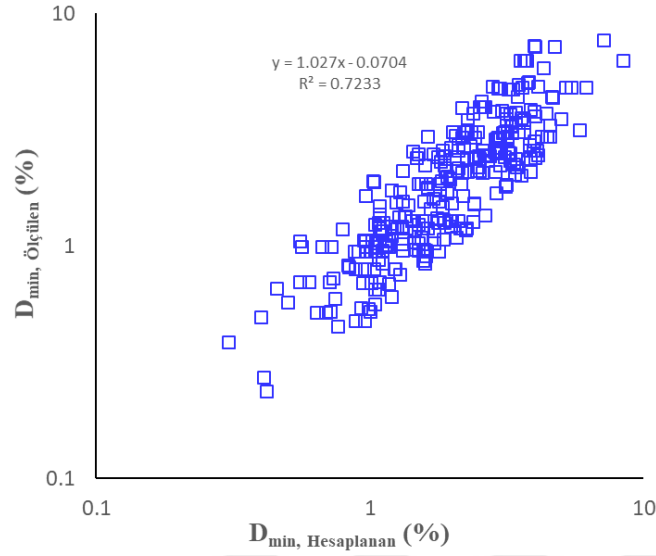
Şekil 4.10: Önerilen eğrilerin literatürdeki deney verileri ile karşılaştırılması

4.1.5. İnce Taneli Zeminlerde Sönümlenme Davranışının Belirlenmesi

İnce taneli plastisite indisi sıfırdan farklı olan zeminlerde sönümleme davranışını belirlemenin ilk adımı; yine küçük deformasyon seviyesindeki başlangıç sönüm oranını bulmak olmuştur. Bu bağlamda, tıpkı iri taneli zeminlerde olduğu gibi zemin özellikleri ve başlangıç sönümü arasında aşağıdaki denklem bulunmuştur (4.4)

$$D_{min}(\%) = [0.623 * \left(\frac{p'}{p_a}\right)^{-1} * (PI)^{-0.7}] \quad (4.4)$$

Burada PI, ondalık olarak denkleme dahil edilecektir. Denklem ile literatürde ölçülmüş başlangıç sönüm oranı ilişkisi Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11:İnce taneli zeminler için önerilen Dmin denkleminin gerçek deney ölçümleri ile karşılaştırılması (331 adet deney verisi ile ilişki kurulmuştur)

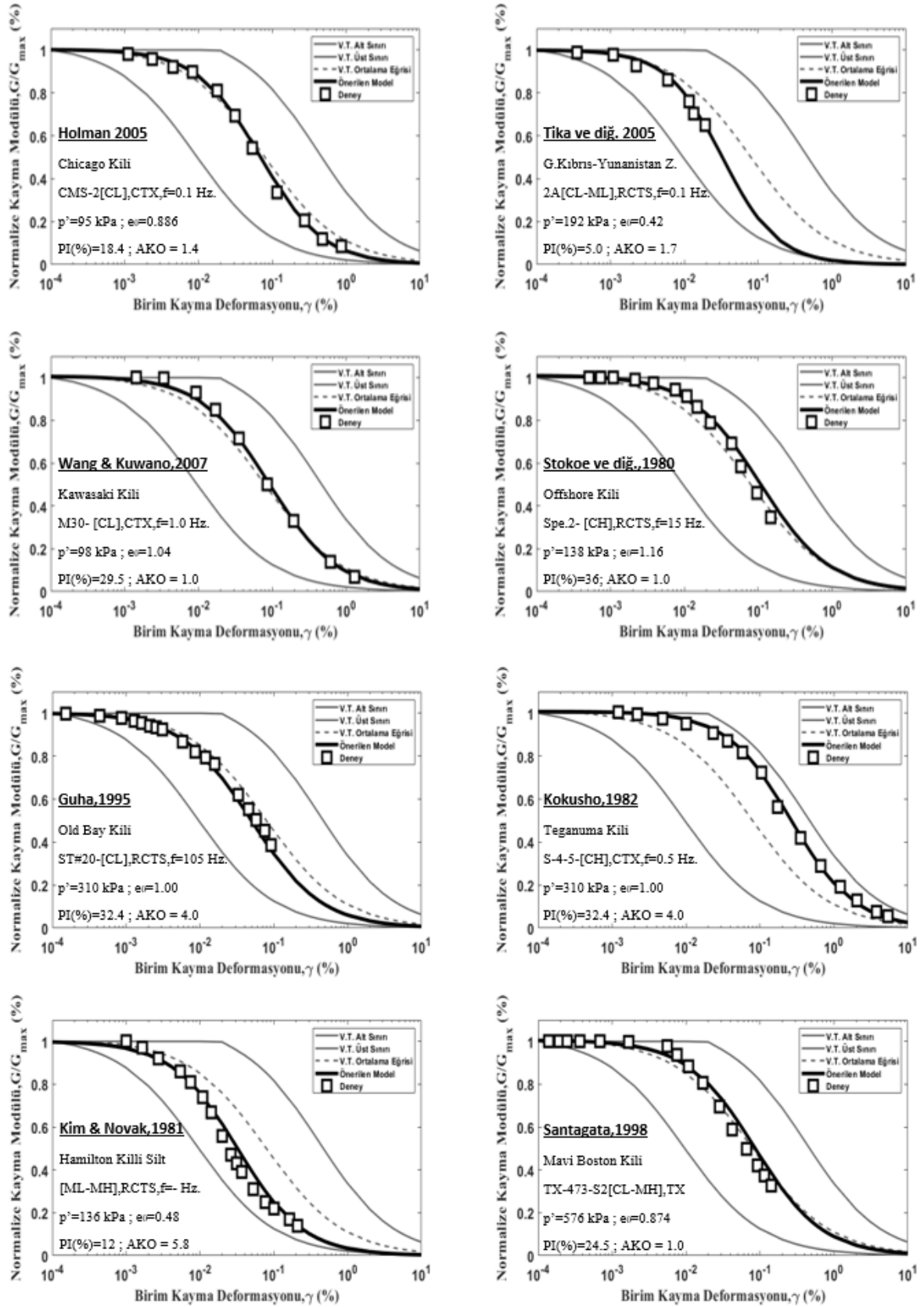
4.2. DENEYSEL SONUÇLAR İLE ÖNERİLEN DENKLEMLERİN DOĞRULANMASI

Bu bölümde çalışma kapsamında önerilen amprik ifadelerin öncelikle literatüre girmiş deneyler ile doğrulanması amaçlanmıştır. Farklı karakteristik ve gerilme koşullarına sahip numunelerin dinamik özelliklerinin belirlendiği çalışmalardan birkaçı incelenecektir. Bir sonraki adımda tez çalışması kapsamında yapılan rezonant kolon ve üç eksenli burulmalı deney sonuçları ile önerilen rijitlik azalımı ve sönüm oranı denklemlerinin bulguları karşılaştırılacaktır. Hız düzeltmesi ile ilgili kalibrasyon deneyleri bu bölümde Şekil 4.3 ve 4.10 da verilmiştir.

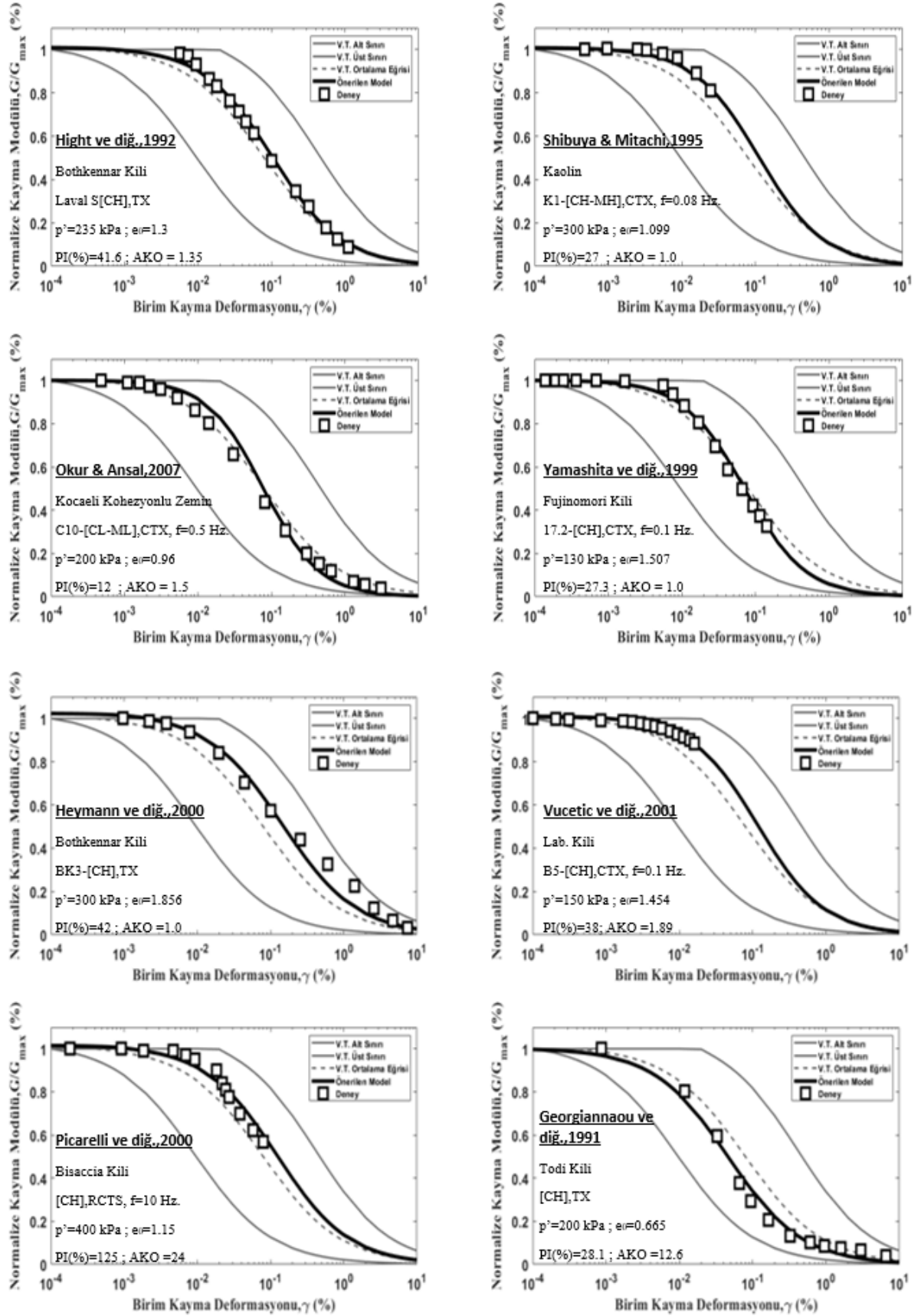
4.2.1. Literatürde Dinamik Özelliklerin Belirlendiği Deneyler ile Kalibrasyon

Bu bölümde literatürde dinamik zemin özelliklerinin belirlendiği ve farklı tipte zeminlere ait deney sonuçları ile önerilen formüllerden elde edilen modül azalım ve sönümlenme eğrileri karşılaştırılacaktır.

Şekil 4.12 ve 4.13'te başlangıçtaki gerilme koşulları, gerilme geçmişi, deney aleti tipi, deformasyon hızı, plastisite inidisi ve başlangıç boşluk oranı farklı ince daneli, kohezyonlu zeminlerin kayma modülü azalımı önerilen denklemler ile tahmin edilmiş; ve tahmin edilen azalım eğrileri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, farklı koşullarda laboratuvar deneyleri ile dinamik özellikleri ölçülen zeminlerin rijitlik azalımı çok yakın bir şekilde tahmin edilmiştir.



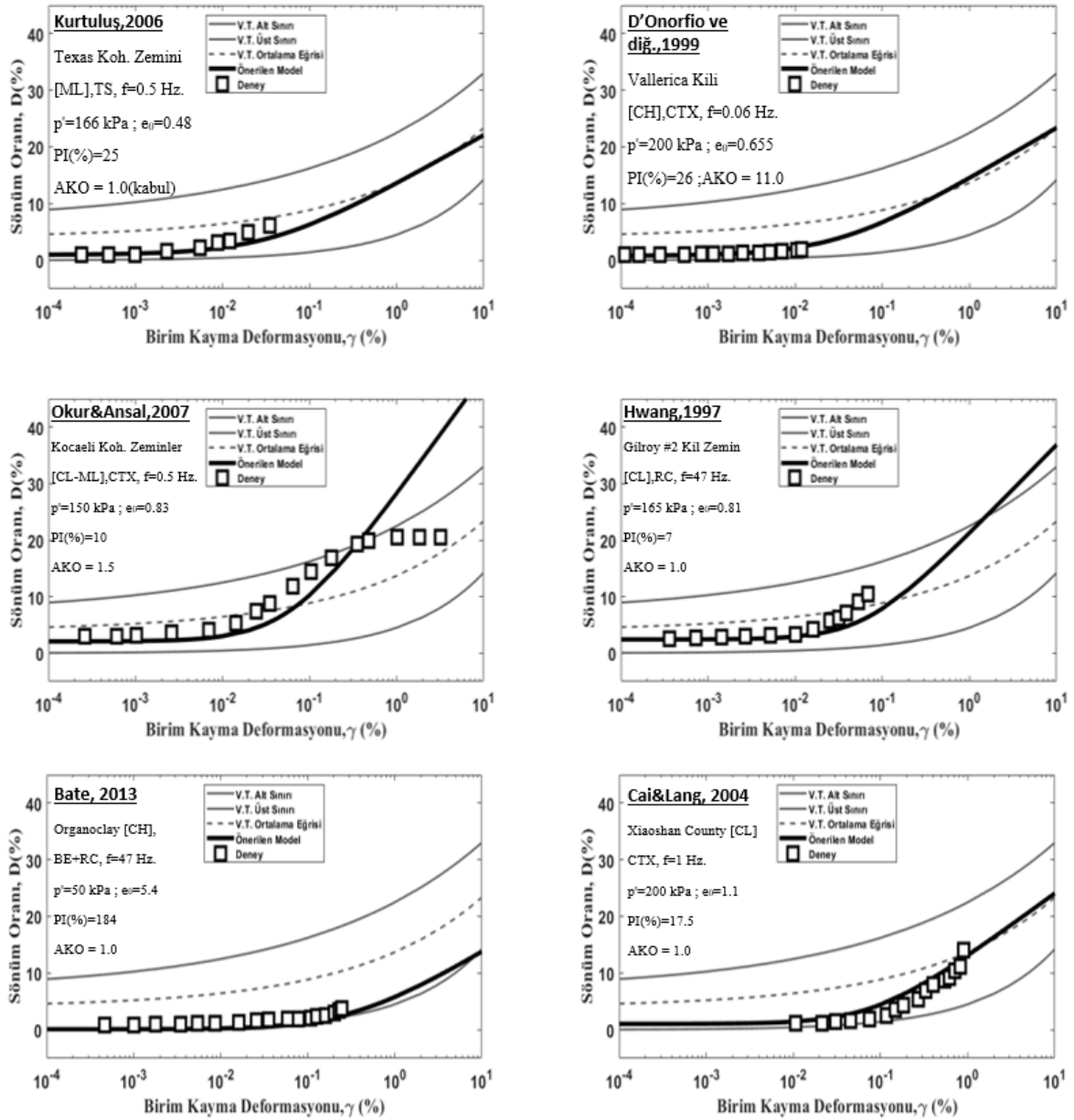
Şekil 4.12: Önerilen rijitlik azalımı modelinin literatürdeki deneyler ile karşılaştırılması



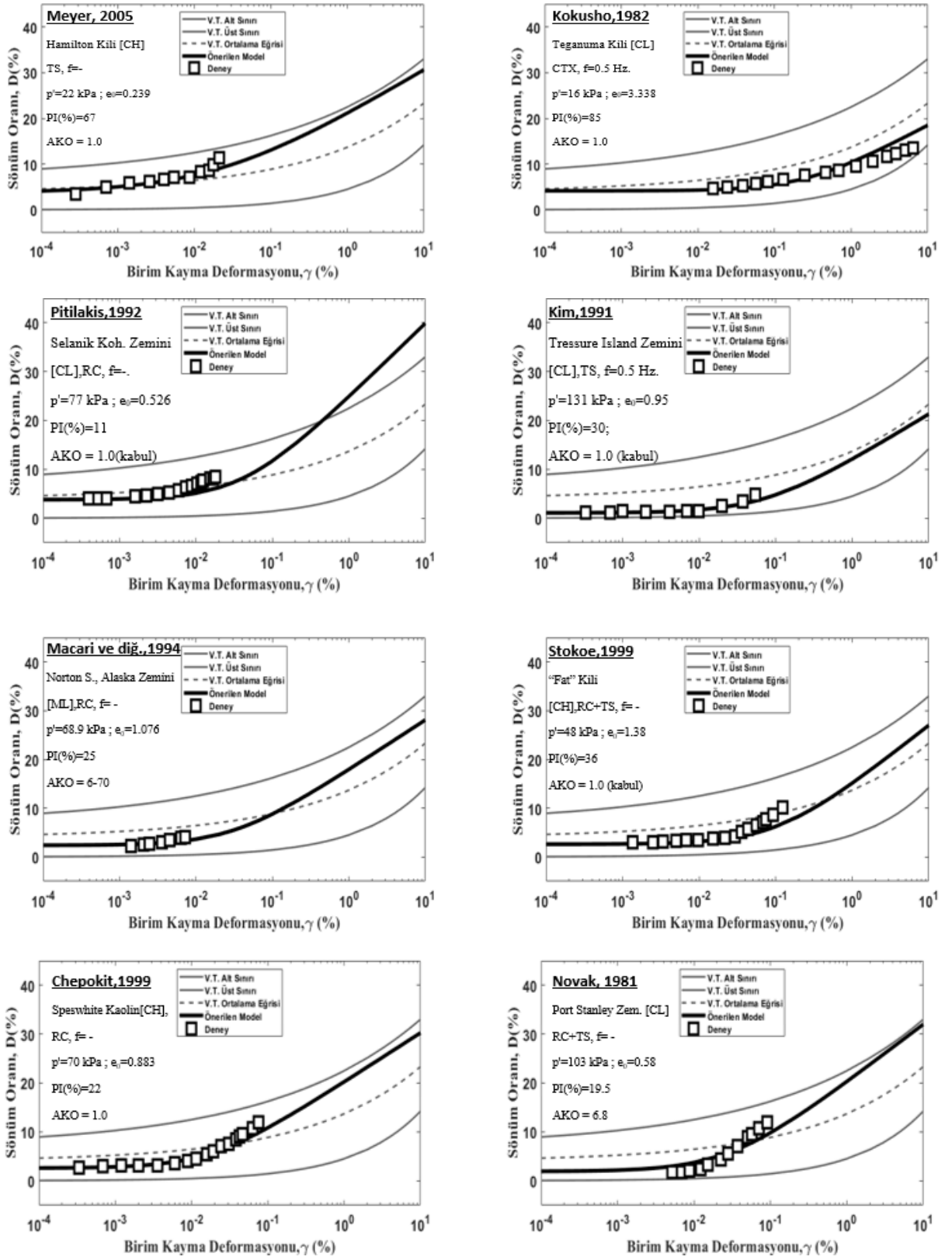
Şekil 4.13: Önerilen rijitlik azalımı modelinin literatürdeki deneyler ile karşılaştırılması (Devam)

Modül azalımında olduğu gibi önerilen denklemlerin sönüm oranı artışını tahmin etmedeki başarısını test etmek için literatürde histerik sönüm oranını deneysel yöntemler ile belirleyen araştırmacıların çalışmaları ile karşılaştırılmış, oldukça başarılı tahminler ile denklemlerin pratikte kullanımının umut verici olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.14 ve 4.15'te ince taneli zeminlerde sönüm oranı artım eğrilerinin önerilen denklem takımı ile elde edilmiş hali ve literatürdeki laboratuvar ölçümleri karşılaştırılarak verilmiştir.

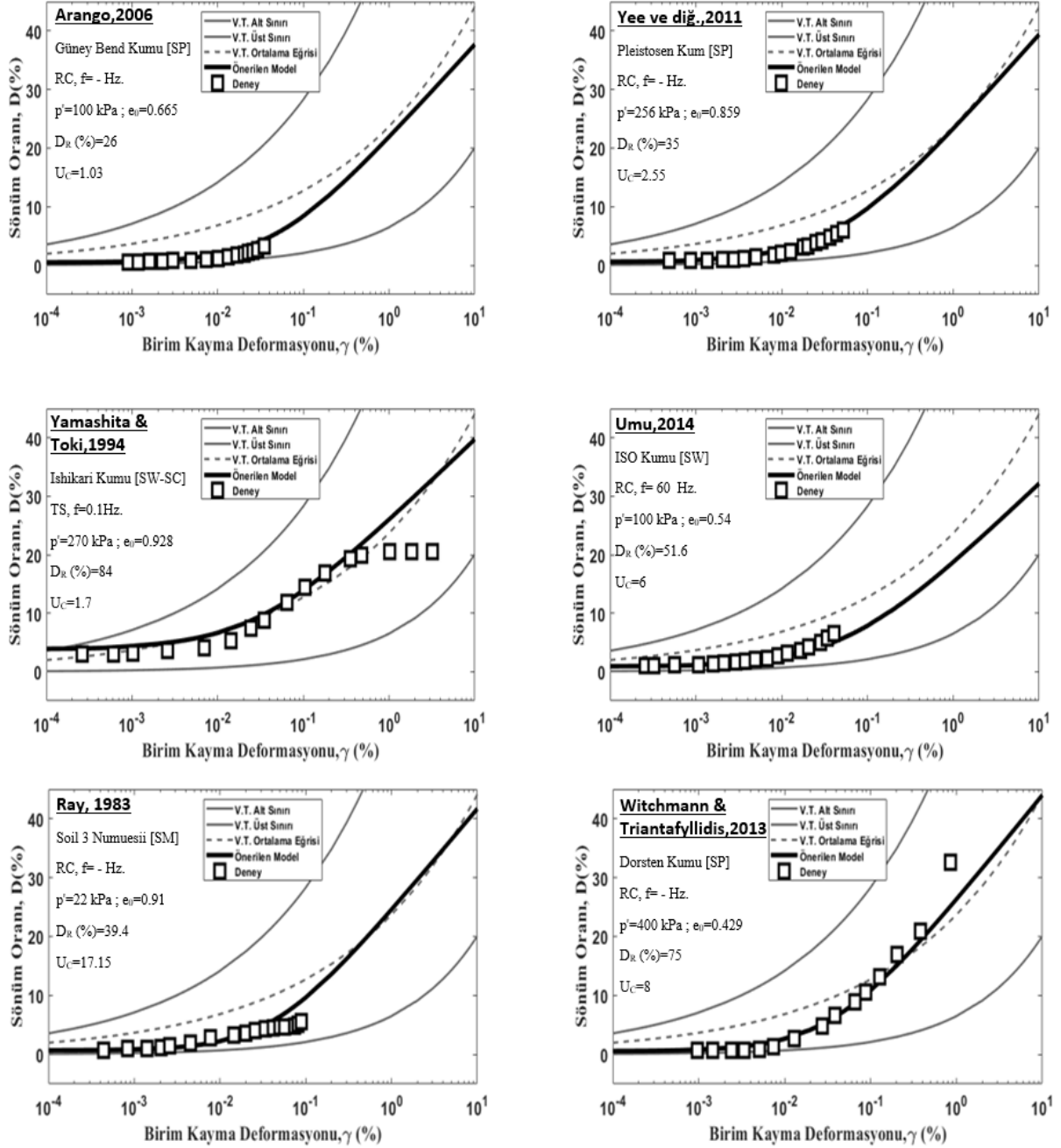


Şekil 4.14: İnce taneli zeminler için önerilen sönüm oranı artım eğrisinin literatür deneyleri ile karşılaştırılması

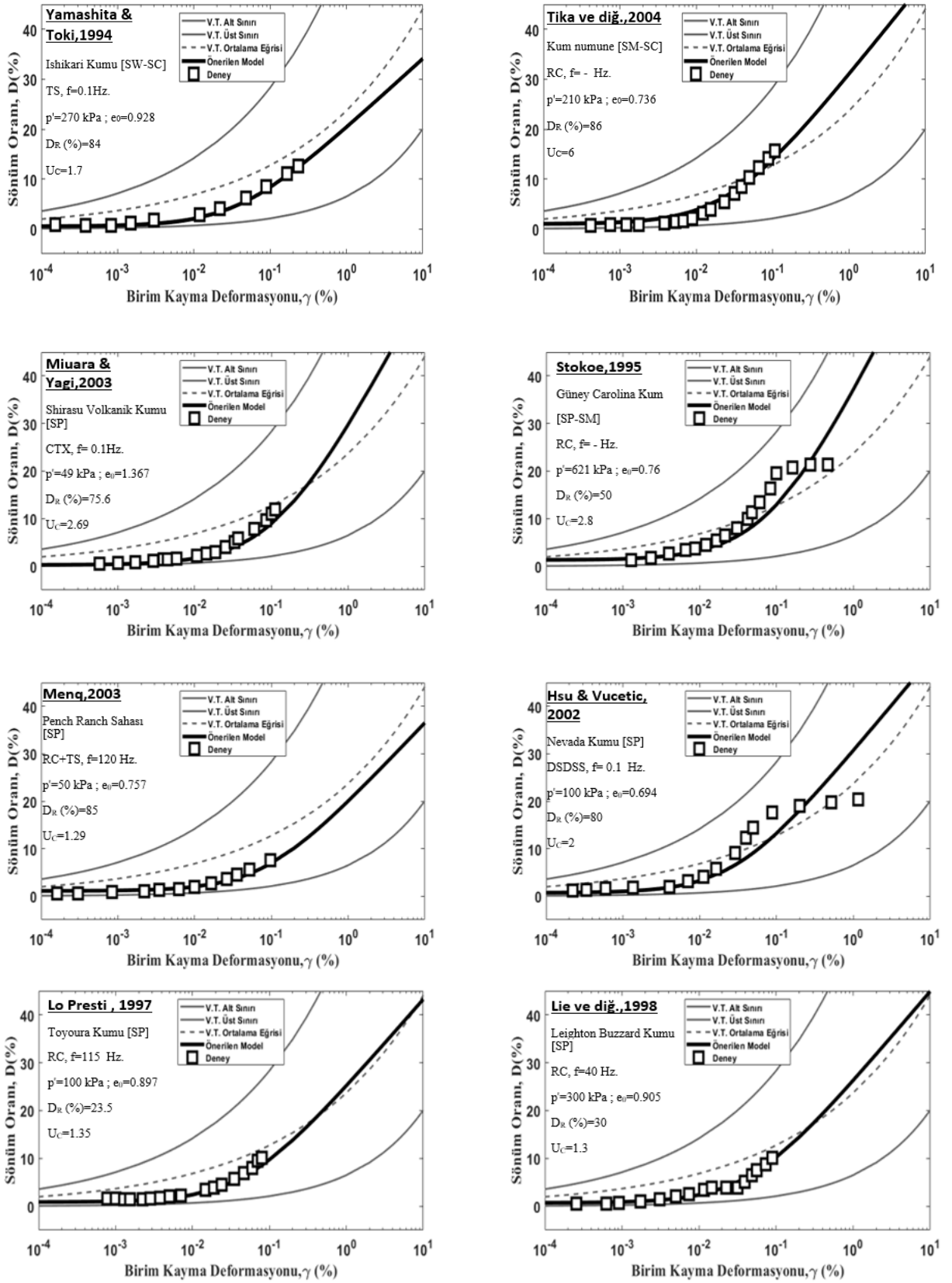


Şekil 4.15: İnce taneli zeminler için önerilen sönüm oranı artım eğrisinin literatür deneyleri ile karşılaştırılması (Devam)

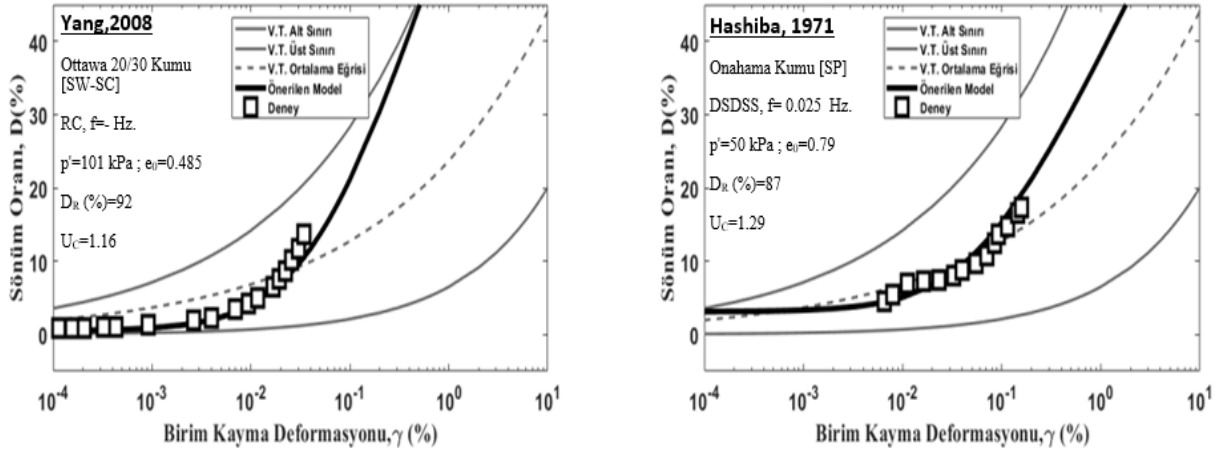
İri taneli zeminlerde sönüm oranının deformasyonla değişimini veya artışı tahmin edebilen ve modül azalım eğrisinden elde edilebilen denklemin, performansını değerlendirebilmek için literatürde başlangıç koşulları ve indeks özellikleri özenli bir şekilde sunulan deneylerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.16 ve 4.17).



Şekil 4.16: Granüler zeminler için önerilen sönüm oranını tahmin edebilen eğrinin literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılması



Şekil 4.17: Granüler zeminler için önerilen sönüm oranını tahmin edebilen eğrinin literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılması



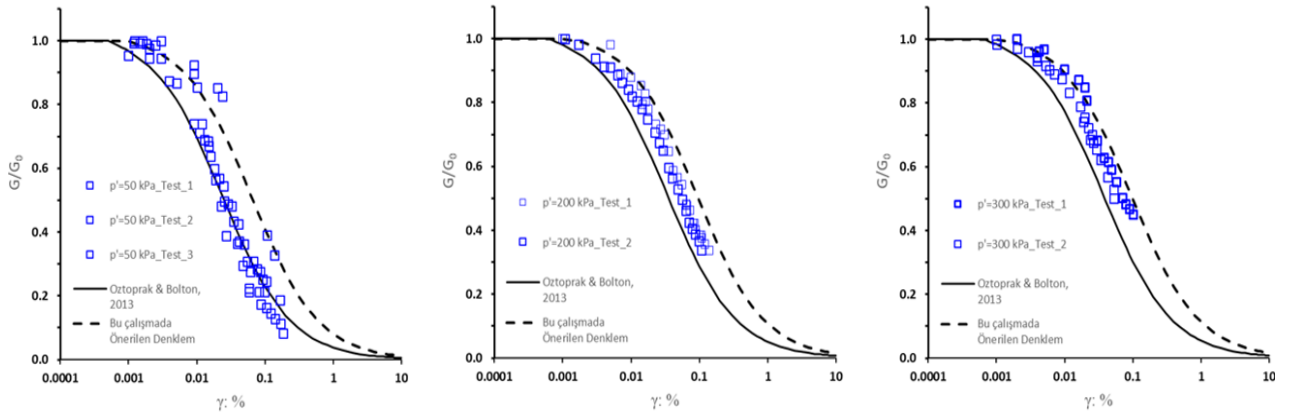
Şekil 4.18: (Devamı) Granüler zeminler için önerilen sönüm oranını tahmin edebilen eğrinin literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılması

4.2.2. Rezonant Kolon ve Üç Eksenli Burulmalı Deneyleler

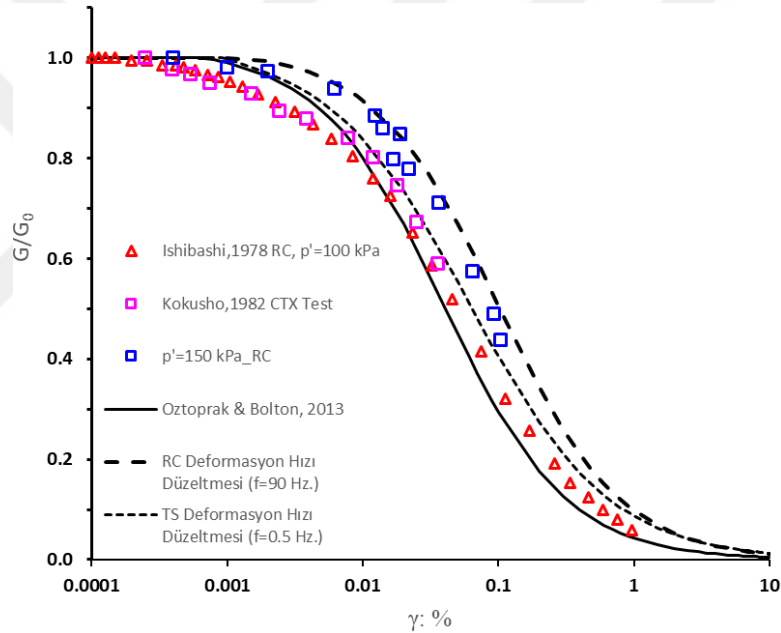
Bu bölümde, deneysel çalışma başlığı altında deneysel prosedürü ve programının verildiği rezonant kolon ve dinamik burulmalı üç eksenli deneylelere ait bir takım sonuçlar verilecektir. Öncelikle, önerilen amprik ifadelerin rezonant kolon deneyleri ile uyumu gösterilecek; sonrasında farklı frekans ve dolayısı ile deformasyon hızlarında verilen tork gücü sabit tutulan dinamik burulmalı üç eksenli deneylerde deformasyon hızının modül azalımına etkisi gösterilecektir.

ISO kumu üzerinde yapılan RC deneylerinde, zeminin maruz bırakıldığı isotropik çevre basıncı arttırıldıkça, literatürde birçok araştırmacının da belirttiği gibi modül azalımı daha büyük deformasyon seviyelerinde başlamış ve azalım eğrisi sağa kaymıştır. Şekil 4.18’de görüldüğü üzere, gerilme arttıkça modül azalım eğrisi; Öztoprak ve Bolton (2013) çalışmasında önerilen azalım eğrisinden uzaklaşarak; bu çalışma kapsamında kumlu zeminlerin rijitlik azalımını deformasyon hızına bağlı güncelleyen hiperbol denklemi eğrisine yaklaşmıştır.

Farklı bir kum numunesi olarak, Toyoura kumu üzerinde aynı gerilme ve sıklılık koşulları altında yapılan RC deneylerinin, literatürde aynı kum üzerinde benzer koşullarda yapılan çalışmalar ile karşılaştırılması Şekil 4.19’da verilmiştir. Ayrıca bu şekilde, çalışmanın sonuçlarından birisi olan deformasyon hızı düzeltilmeli hiperbol denklemi eğrisi de verilmekte ve denklemin çalıştığı görülmektedir.

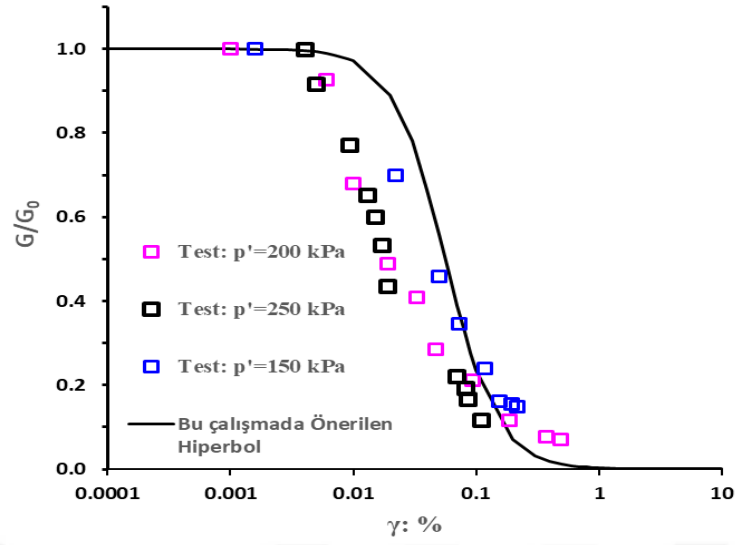


Şekil 4.19: ISO kumu üzerinde yapılan deneylerden elde edilen modül azalımı ve önerilen hiperbol denklemlerinin karşılaştırılması



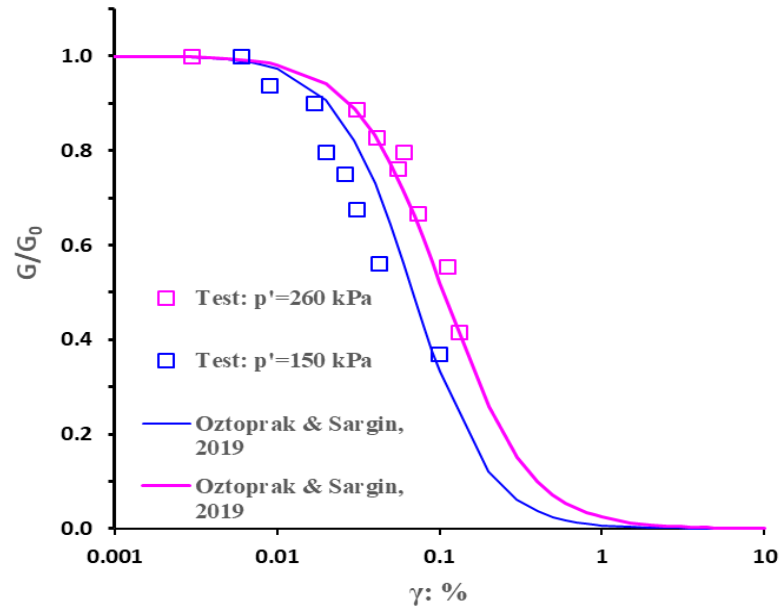
Şekil 4.20: Toyoura Kumu üzerinde yapılan RC deneyi ve literatürde benzer koşullarda yapılan çalışmalar ile karşılaştırılması

Laboratuvarda likit limitinin 1.5 katı kadar su ile bulamaç haline getirilen ve sabit bir düşey gerilme altında konsolide edilip elde edilen kaolin numuneleri üzerinde yapılan RC deneylerinin rijitlik azalımı sonuçlarına bakıldığında; numunenin maruz bırakıldığı gerilme düzeyi arttıkça modül azalım eğrisinin değişmediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.20). Bu durumun başlıca sebebi; çok yumuşak olan bulamaç üzerine numuneye tork veren motorun bulunduğu üst başlığın deney kurulumu sırasında örseleme etkisi olarak düşünülmektedir. Şekil 4.20'de bu çalışma kapsamında killerin rijitlik azalımını gösteren amprik ifade ile edilen siyah eğri, $p'=200$ kPa gerilme düzeyine göre çizdirilen eğridir.



Şekil 4.21: Kaolin bulamacı üzerinde farklı gerilme koşullarında yapılan RC deneyi sonuçları ve önerilen model

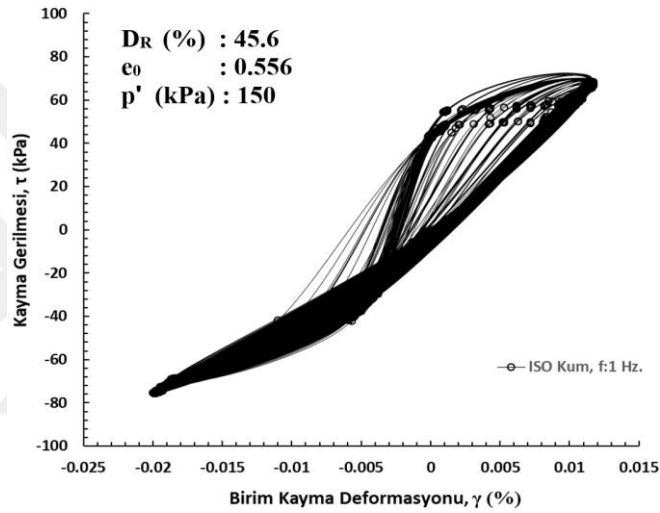
Suya doymun örselenmemiş Lut gölü tabanına ait yapılan farklı gerilme koşullarındaki iki rezonant kolon deney sonucu Şekil 4.21’de verilmiştir. Numunelerin, gerilme düzeyinden etkilendiği görülmekte ve önerilen denklemler ile deney sonucunun uyumlu olduğu gözlemlenmektedir.



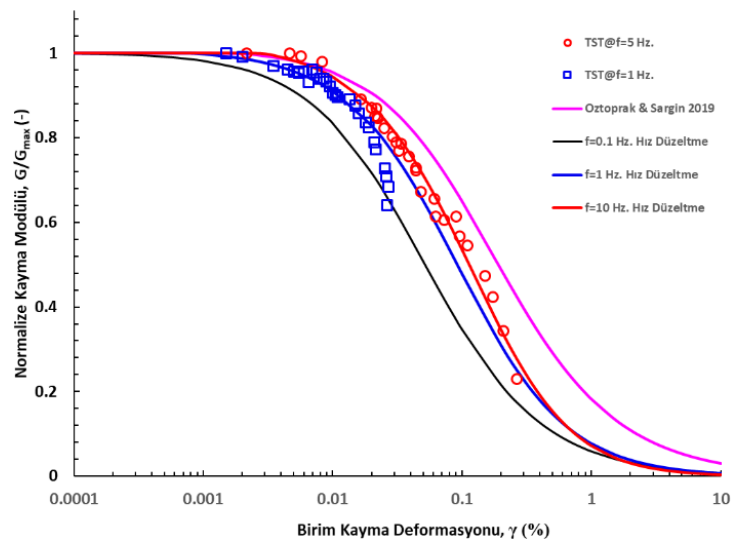
Şekil 4.22: Örselenmemiş Lut gölü numuneleri üzerinde yapılan RC kolon deneyi sonuçları ve önerilen hiperbol model ile karşılaştırılması

İnce ve iri taneli zeminlerde deformasyon hızının rijitlik azalımı üzerine etkisini incelemek amacıyla ISO kumu ve kaolin bulamacından elde edilen silindirik numuneler üzerinde frekans değiştirilip tork kuvveti sabit bırakılarak dinamik burulmalı üç eksenli deneyler yapılmıştır.

ISO kumu üzerinde yapılan burulmalı dinamik deneylere ait kayma gerilmesi-deformasyon eğrisi Şekil 4.22’de verilmiştir. Şekil 4.23’te 5 Hz. ve 1 Hz. deformasyon hızları ile yapılan deneylere ait modül azalım davranışı verilmiştir. Burada, bu tez çalışması kapsamında önerilen deformasyon hızı düzeltmeli ve düzeltmesiz eğriler karşılaştırma amaçlı deneyler ile birlikte verilmiştir.

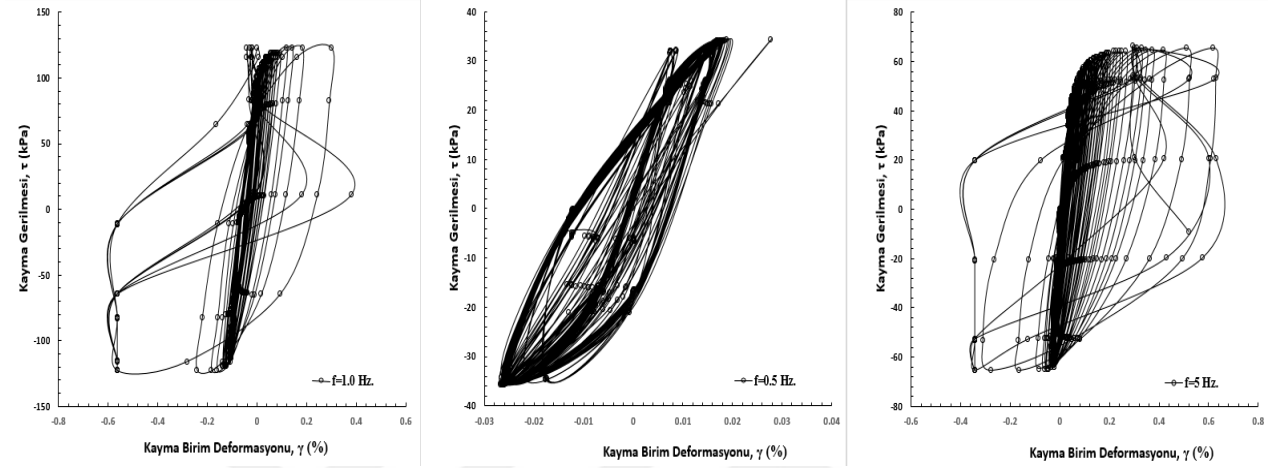


Şekil 4.23: ISO kumu kayma gerilmesi-birim deformasyonu eğrisi

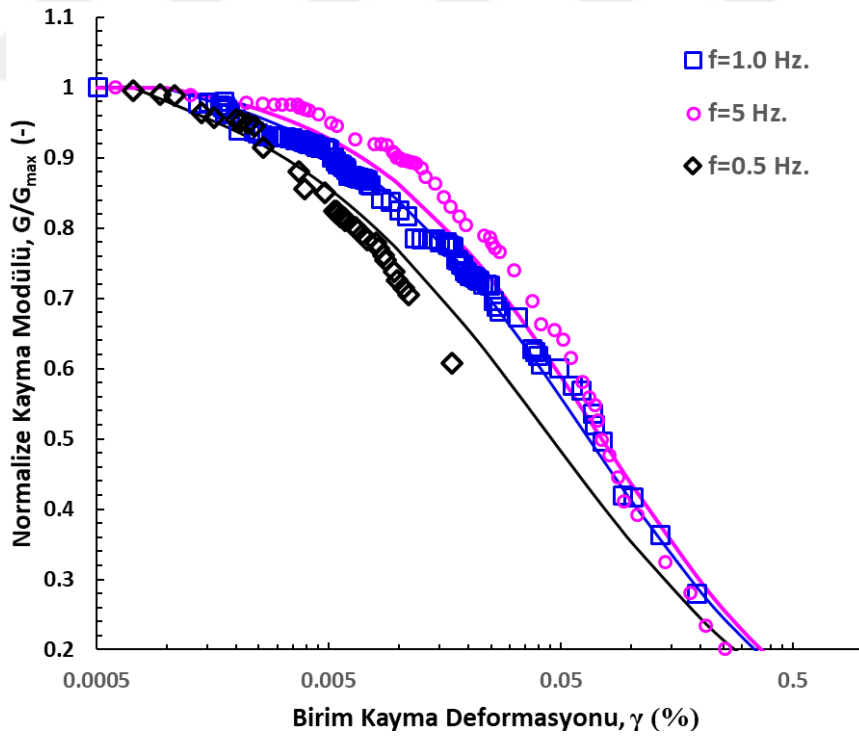


Şekil 4.24: Deformasyon hızının kayma modülü azalımına etkisi

Kaolin bulamacından elde edilen silindirik numuneler üzerinde farklı deformasyon frekanslarında (0.5, 1.5 Hz.) gerçekleştirilen burulmalı üç eksenli deneylere ait gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 4.24'te verilmiştir. Bu deneylere ait kayma modülü azalım eğrileri ve deformasyon hızının kaolin zeminin rijitlik değişimine etkisi Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4.25: Kaolin kilinde farklı frekanslardaki burulma deneylerinin gerilme-deformasyon ilişkisi



Şekil 4.26: Kaolin kilinde deformasyon hızının rijitlik azalımına etkisi

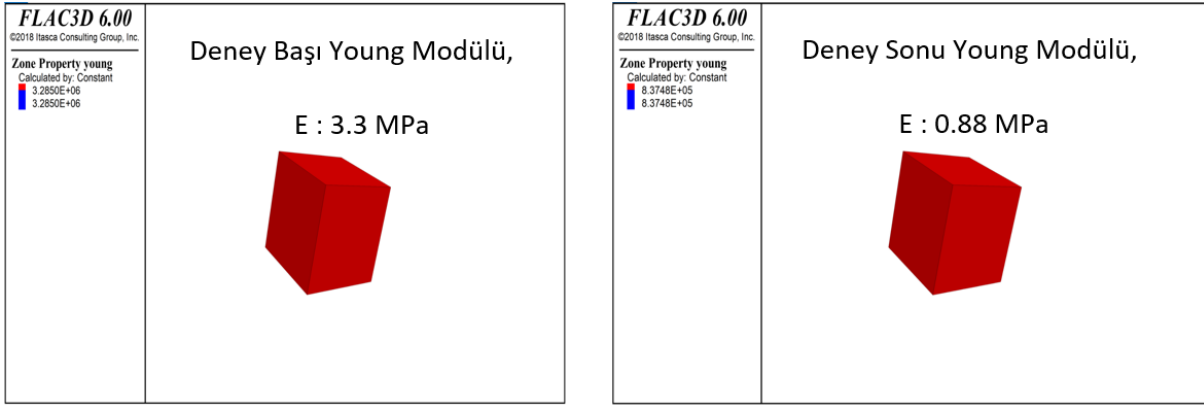
4.3. ÖNERİLEN MODELLERİN NÜMERİK ANALİZLERDE KULLANIMI

Bu bölümde, literatürdeki çalışmalar ve laboratuvarında rezonant kolon ve dinamik üç eksenli deney ile valide edilen denklemlerin yardımı ile zeminlere ait gerilme deformasyon davranışı tanımlanan iki farklı problemin sonuçlarına yer verilecektir. İlk modellenen problem daha önce de belirtildiği gibi killi bir zeminde yapılan drenajlı konsolidasyonlu (CD) üç eksenli deneye aittir. Dinamik bir problem olan sismik tepki spektrumunu belirleme konusunda sıklıkla başvurulan tek boyutlu dalga yayılım analizlerinin farklı yazılımlarla analiz edildiği model de bu bölümün 2. alt başlığıdır. Her iki problemin modellenmesinde oldukça umut verici sonuçlar elde edilmiştir.

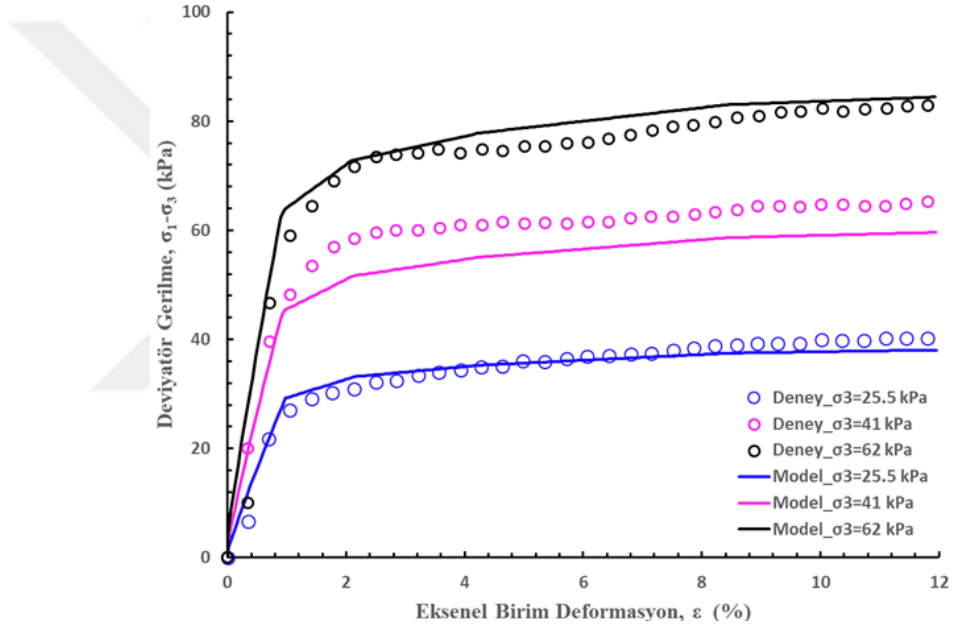
4.3.1. Konsolidasyonlu Drenajlı Üç Eksenli Deney Modeli

Bir doktora tezi kapsamında darbeli kırmataş kolonların davranışını sayısal modellemeyi amaçlayan Pham (2005) laboratuvarında alüvyonal kil üzerine yapmış olduğu konsolidasyonlu drenajlı deneyin sonuçlarını paylaşmıştır. Çevre basıncı olarak 21,41 ve 62 kPa olarak seçtiği deney setinde; efektif gerilmeler cinsinden kayma mukavemeti parametrelerinden kohezyon değerini (c') 2 kPa ve içsel sürtünme açısını (ϕ') 24° olarak vermiştir. Aşırı konsolidasyon oranı için net bir bilgi verilmezken; az aşırı konsolide olduğu belirtilmiştir, bu nedenle AKO=2 olarak kabul edilmiştir.

Bu bilgiler ile birlikte; FLAC3D'de deformasyona bağlı yumuşayan-pekleşen Mohr Coulomb modelinde, akmaya kadar zemin davranışını kontrol eden modül değerleri; zeminin o an içinde bulunduğu gerilme durumuna göre değiştirilerek hesaplamalara dahil edilmiştir. Bunu yapabilmek için FLAC3D yazılan FISH adı verilen alt program ile bünye modelinin modül değeri olarak bu tez çalışması kapsamında önerilen azalım denklemleri ile hesaplanan değerleri dikkate alması sağlanmıştır. Rijitlik azalımını programa tanımlarken deformasyon hızının etkisi de formüllere dahil edilmiştir. Ancak, tez çalışmasında deformasyon hızı ile ilgili bir bilgi verilmediğinden, bu tezin 3. Bölümünde yer alan Tablo 3.3'te monotonik üç eksenli deneyler için verilen ortalama deformasyon hızı, $1.8E-4$ %/s seçilmiştir. Bilgisayar modelinde yazılımın hesapladığı deney başı ve bitişindeki ulaşılan modül değerleri Şekil 4.26'da verilmiştir. Sonuç olarak, Şekil 4.27'da verilen grafikten de görüleceği üzere her üç gerilme seviyesi için gerçek deney başarılı bir şekilde yakalanmıştır.



Şekil 4.27: Deney başı ve sonunda modelin hesapladığı modüller(Çevre Basıncı : 22 kPa)

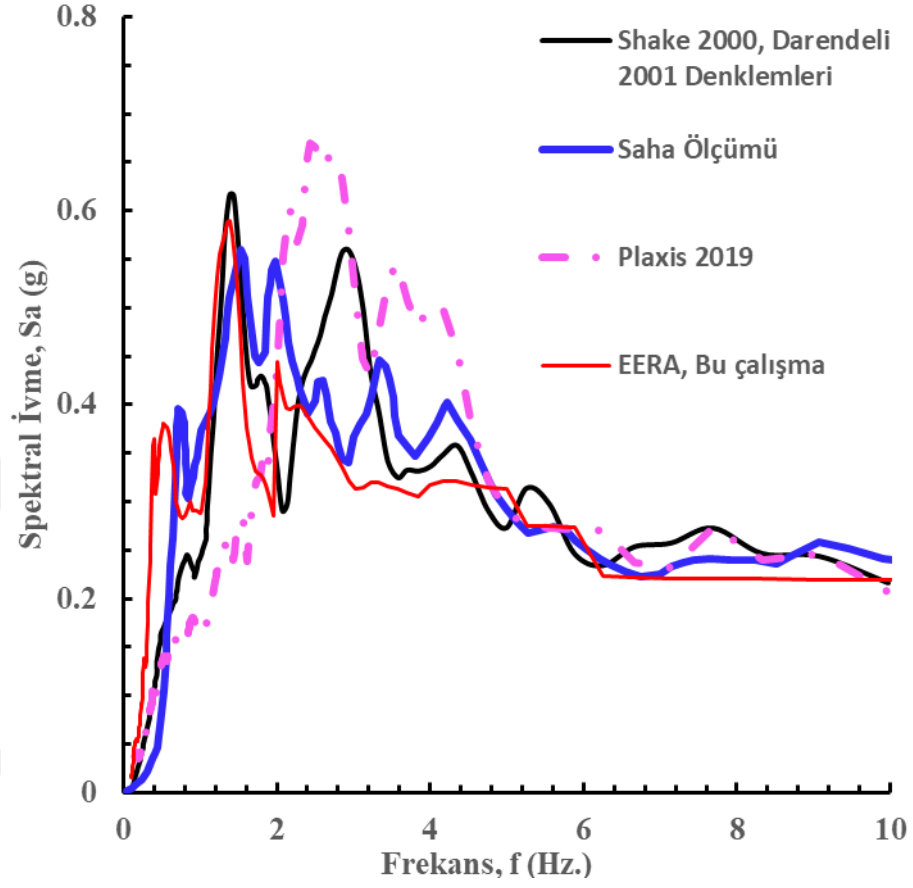


Şekil 4.28: Önerilen rijitlik azalımı hiperbol modeli ile üç eksenli deneyin modellenmesi

4.3.2. Tek Boyutlu Dalga Yayını ile Saha Tepki Analizi

Bölüm 3.6.2 'de Şekil 3.41'de idealize hali verilen zemin profili ve 3.42'deki deprem kaydı kullanılarak PLAXIS 2019, Shake 2000 ve EERA yazılımlarında koşturulan analizlerden elde edilen zemin yüzeyi tepki spektrumları Şekil 4.28'de verilmiştir. Buna göre Plaxis 2019 büyük deformasyonlarda sönüm oranına bir "cut-off" uyguladığından; uzun periyotlarda bile sönümleme davranışı kısıtlanan zemin spektral ivme değeri büyük olmaktadır. Bununla birlikte bu tez çalışması kapsamında önerilen sönüm ve rijitlik değişimi denklemleri sahaya ait dinamik özellikleri oldukça başarılı modelleyebilmektedir. Görüldüğü üzere özellikle küçük

periyotlarda sahada yapılan ölçüm ile denklemlerin kullanıldığı EERA yazılımından elde edilen sonuçlar oldukça uyumludur.



Şekil 4.29: Farklı yazılım ve rijitlik azalımı denklemleri ile 1 boyutlu saha tepki analizi

5 TARTIŞMA VE SONUÇ

Geoteknik deprem mühendisliğinin en önemli konularından biri olan sahaya özgü tepki analizlerinin gerçekleştirilmesinde olmazsa olmaz unsurlardan biri dinamik zemin özellikleri kaymamodülü ve sönüm oranıdır. Bu özelliklerden rijitliğin (kayma modülünün) belirlenmesi arazide genellikle sismik deneylerden elde edilen kayma dalgası hızına bağlı olmaktadır. Sismik deneylerin dışında geleneksel arazi deneylerinin sonuçlarının korelasyonu ile elde edilen amprik ifadeler ile hesaplanabilmektedir. Ancak tüm bu değerler zeminin başlangıç rijitliğini vermekte deformasyona bağlı değişimini hesaplayamamaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, son 40 yıldır bu durumu çözmek için laboratuvarında çeşitli deneyler yapmışlar ve sonuçları bir araya getirerek veritabanları oluşturmuşlar ve amprik ifadeler önermişlerdir. Bununla birlikte zeminlerin dinamik (sismik) etkiler altında ortaya çıkan bir diğer özelliği olan sönüm oranı (D) deneysel olarak incelenmiş ancak hangi zemin özelliklerinin başlangıç sönüm oranının asıl etkilediğini ve sönüm oranının deformasyonla artışına etkisine amprik ifade üretilmesi bakımından çok fazla değinilmemiştir. Bu bağlamda, bu tez çalışması ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir :

- (1) Geoteknik mühendisliği ve geoteknik deprem mühendisliğinin uygulamada karşılaştığı problemlerin yükleme hızları çok farklılık göstermektedir. Dinamik ya da statik problemlerin zemin üzerinde yaratacağı deformasyonları ve rijitlik kaybını gerçeğe en yakın biçimde hesaplayabilmek için başlangıç rijitliği ve azalımı ile sönüm oranı- artışı deformasyon hızına bağlı hiperbol modelin önerilmesi önemlidir. Literatürdeki kabul görmüş deneylerin gerçekleşmesinde test edilen deformasyon hızını göz önünde bulunduran model oldukça başarılı çalışmaktadır.
- (2) İnce taneli zeminlerin başlangıç rijitliğinin hesaplanmasında boşluk oranı, gerilme durumu, plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranının matematiksel ifadesi elde edildi. Zeminin maruz kaldığı gerilme düzeyi ve plastisite indisi başlangıç rijitliğini arttırırken, boşluk oranı arttıkça başlangıç rijitliği azalmaktadır.
- (3) İnce taneli zeminlerin deformasyonla azalımını modelleyen yeni bir hiperbol denklemi önerilmiştir. Bu denklemi oluşturan değişkenler zeminin gerilme durumu ve indeks

özellikleri ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca yükleme hızı da göz önünde bulundurularak modelin başarısı güçlendirilmiştir.

- (4) İnce ve iri taneli zeminlerin başlangıç sönüm oranlarını tahmin edebilen yeni bir denklem önerilmiştir. Bu denklemler ince taneli zeminlerde Plastisite indisi ve gerilme değişimine bağlıyken; iri taneli granüler zeminlerde üniformluk katsayısı, boşluk oranı ve gerilme değişimine bağlıdır.
- (5) Laboratuvarda kaolin kili ve standart çimento kumu üzerinde rezonant kolon ve burulmalı üç eksenli deneyler yapılmış; önerilen denklemlerin performansı incelenmiştir. Her iki zemin türünde de elde edilen sonuçlara bakıldığında, gerilme koşulları veya deformasyon hızı değiştikçe laboratuvar deneylerinden elde edilen ölçümler başarılı bir şekilde tahmin edilebilmektedir.
- (6) Tezden elde edilen matematiksel ifadeler ile hem statik bir problem hem de saha tepki analizi nümerik olarak bilgisayar yazılımında yapılmıştır. Sonuçlar oldukça umut vericidir.
- (7) Bu tezin sonucu olarak gelecekte yapılacak çalışmalarda, önerilen modellerin nümerik analizlerde kullanılarak başarısının irdelenmesi gerekmektedir. Elde edilen formüller, nümerik dünyanın isteklerine rahatlıkla cevap verebilecek ve yazılımlara girdi olarak eklenebilecek niteliktedir.

KAYNAKLAR

- Abrahamson, N. A., Silva, W. J. & Kamai, R., 2014, Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions. *Earthquake Spectra Vol.30*, pp. 1025-1055.
- Allman, M. A. & Atkinson, J. H., 1992, Mechanical properties of reconstituted Bothkennar soil. *Geotechnique*, 42(2), pp. 289-301.
- Al-Sanad, H. A., 1982, *Effects of Random Loading on Modulus and Damping of Sands*. Maryland: The University of Maryland.
- Amer, M. I., Aggour, M. S. & Kovacs, W. D., 1984, *Size Effect in Simple Shear Testing*, Kingston, Rhode Island: The University of Maryland.
- Amini, F., 1986, *Dynamic Soil Behavior under Random Excitation Conditions*. Maryland: The University of Maryland.
- Amorosi, A., Callisto, L. & Rampello, S., 1999, *Observed behaviour of reconstituted clay under stress paths typical of excavations*. Torino, Balkema, pp. 35-42.
- Anderson, D. G., 1974, *Dynamic Modulus of Cohesive Soils*. Ann Arbor (Michigan): Michigan Üniversitesi.
- Anderson, D. G., 2003, *Laboratory Testing of Nonlinear Soil Properties : I&II*, s.l.: University of California Berkeley.
- Araei, A. A., Razeghi, H. R., Tabatabaei, S. H. & Ghalandarzadeh, A., 2012, Loading frequency effect on stiffness, damping and cyclic strength of modeled rockfill materials. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 1-18.
- Arango, J. C., 2006, *Stress Strain Behavior and Dynamic Properties of Cabo Rojo Calcerous Sands*. Mayagüez: University of Puerto Rico.
- Benz, T., 2006, *Small-Strain Stiffness of Soils and Its Numerical Consequences*. Stuttgart: Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart.
- Biarez, J. & Hicher, P. -Y., 1994, *Elementary Mechanics of Soil Behavior*. Rotterdam: Balkema.
- Borden, H. R., Shao, L. & Gupta, A., 1996, Dynamic Properties of Piedmont Residual Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 813-820.
- Burghignoli, A. & Pane, V., 1995, Dynamic Characterization of an Italian Soft Clay. *ASCE*, pp. 587-597.
- Callisto, L. & Rampello, S., 2002, Shear strength and small-strain stiffness of a natural clay under general stress conditions. *Géotechnique*, 52(8), pp. 547-560.
- Castelli, F., Lentini, V. & Maugeri, M., 2012, *Dynamic Clay Properties by Insitu and Laboratory Tests for an Industrial Building in Catania (Italy)*. Taormina, Italy, s.n., pp. 1-13.
- Cavallaro, A., Grasso, S. & Maugeri, M., 2005, *Site Characterisation and Site Response for a Cohesive Soil in the City of Catania*. Osaka, Osaka Üniversitesi, pp. 167-174.

- Cavallaro, A., Maugeri, M., Lo Presti, D. F. & Pallara, O., 1999, *Characterising shear modulus and damping from in situ and laboratory tests for the seismic area of Catania*. Torino, Balkema, pp. 51-88.
- Chang, N. -Y. & Ko, H. -Y., 1982, *Effect of Grain Size Distribution on Dynamic Properties and Liquefaction Potential of Granular Soils*, Denver: University of Colorado at Denver.
- Chang, T. S., Vedula, V. & Chang, K. P., 2001, *Improvement of static and dynamic properties of soft clay using high pressure jet grounding*. San Diego, s.n.
- Chaudhary, S. K., Kuwano, J. & Hayano, Y., 2004, Measurement of Quasi-Elastic Stiffness Parameters of Dense Toyoura Sand in Hollow Cylinder Apparatus and Triaxial Apparatus with Bender Elements. *Geotechnical Testing Journal* 27(1), pp. 1-13.
- Chung, R. M., Yokel, F. Y. & Drnevich, V. P., 1984, Evaluation of Dynamic Properties of Sands by Resonant Column Testing. *Geotechnical Testing Journal*, 7(2), pp. 60-69..
- Çabalar, A. F., 2009, Dynamic Properties of Various Plasticity Clays. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 14(1), pp. 1-11.
- Darendeli, M. B., 2001, *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves, Doktora Tezi*. Teksas: The University of Texas at Austin.
- Dasari, G. R. & Bolton, M. D., 1998, *Comparison of field and laboratory stiffness of Gault Clay*. Londra, ThomasTelford, pp. 345-352.
- Díaz-Rodríguez, J. A., Leroueil, S. & Alemán, J. D., 1992, Yielding of Mexico City Clay and other natural clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(7), pp. 981-995.
- Diaz-Rodriguez, J. A., Martinez-Vasquez, J. J. & Santamarina, J. C., 2009, Strain-rate effects in Mexico City soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, pp. 300-305.
- Dong-Soo, K., 1991, *Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains from Cyclic Tests*. Austin(Teksas): The University of Texas at Austin.
- Doroudian, M. & Vucetic, M., 1999, *Results of geotechnical laboratory tests on soil samples from the UC Santa Barbara campus*, Los Angeles, California: UCLA İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- Drnevich, V. P., Richart, F. J. & Hall, J. J., 1967, *Effects of Amplitude of Vibration on the Shear Modulus of Sand*. Albuquerque, University of New Mexico, pp. 189-199.
- Edil, T. B. & Luh, G. F., 1978, *Dynamic Modulus and Damping Relationship for Sands*. Pasadena, s.n., pp. 394-409.
- Fiovarante, V., 2000, Anisotropy of Small-Strain Stiffness of Ticino and Kenya Sands from Seismic Wave Propagation Measured in Triaxial Testing. *Soils & Foundations, Vol. 40, No.4*, pp. 129-142.
- Gasparre, A., 2005, *Advanced laboratory characterisation of*. Londra: Imperial College.
- Gasparre, A., Hight, D. W., Coop, M. R. & Jardine, R. J., 2014, The laboratory measurement and interpretation of the small-strain stiffness of stiff clays. *Geotechnique*, 64(12), pp. 942-953.

- Gasparre, A. et al., 2007, The stiffness of natural London Clay. *Geotechnique*, 57(1), pp. 33-47.
- Georgiannou, V. N., Rampello, S. & Silvestri, F., 1991, *Static and Dynamic measurements of Undrained stiffness on natural overconsolidated clays*. Florence, s.n., pp. 91-95.
- Georgiannou, V. N. & Tsomokos, A., 2008, Comparison of two fine sands under torsional loading. *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 1659-1672.
- Guha, S., 1995, *Dynamic Characteristics of Old Bay Clay Deposits in the East San Francisco Bay Area*. s.l.:Purdue Üniversitesi.
- Hall, J. J. & Richart, F. J., 1963, Dissipation of Elastic Wave Energy in Granular Soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, Kasım, Issue 89, pp. 27-56.
- Hardin, B. & Drnevich, V., 1972, Shear modulus and damping in soil: Design equations and curves. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, Issue 98, pp. 667-692.
- Hardin, B. O., 1965a, The Nature of Damping in Sands. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 91(1), pp. 63-97.
- Hardin, B. O., 1973, *Shear Modulus of Gravel*, Kentucky: Civil Engineering Department of The University of Kentucky.
- Hardin, B. O. & Black, W. L., 1966, Sand Stiffness Under Various Triaxial. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, pp. 27-42.
- Hardin, B. O. & Black, W. L., 1968, Vibration modulus of normally consolidated clay. *Proc. ASCE*, pp. 353-369.
- Hardin, B. O. & Black, W. L., 1978, *The nature of stress-strain behavior of soils..* Pasadena, ASCE, pp. 3-90.
- Hardin, B. O. & Drnevich, V. P., 1972a, Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Haziran, Issue 98, pp. 603-624.
- Hardin, B. O. & Drnevich, V. P., 1970a, *Shear Modulus and Damping in Soils-I: Measurement and Parameter Effects*, Lexington: College of Engineering, University of Kentucky.
- Hardin, B. O. & V., P. D., 1972b, Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Div.*, pp. 667-692.
- Hardin, O. B. & Blandford, G., 1989, Elasticity of particulate materials. *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 788-805.
- Hatanaka, M. & Uchida, A., 1995, *Effect of test methods on the cyclic deformation characteristics of high quality undisturbed gravel samples*. s.l., ASCE, pp. 136-161.
- Heymann, G., 1998, *The stiffness of soils and rocks at very small strains*. s.l.:Surrey Üniversitesi.
- Hicher, P.-Y., 1996, Elastic Properties of Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 641-648.

- Hight, D. W. et al., 1997, Wave velocity and stiffness measurements of the Crag and Lower London Tertiaries at Sizewell. *Géotechnique*, 47(3), pp. 451-474.
- Hight, D. W. et al., 1992, Disturbance of the Bothkennar clay prior to laboratory testing. *Géotechnique*, June, 42(2), pp. 199-217.
- Hight, D. W., Coop, M. R., Jardine, R. J. & Gasparre, A., 2014, The laboratory measurement and interpretation of the small-strain stiffness of stiff clays. *Geotechnique*, 64(12), pp. 942-953.
- Holman, T. P., 2005, *Small Strain Behavior of Compressible Chicago Glacial Clay*. Evanston(Illinois): Northwestern Üniversitesi.
- Hoque, E. & Tatsuoka, F., 2000, *Kinematic elasticity of a granular material*. Melbourne, s.n.
- Hoque, E. & Tatsuoka, F., 2004, Effects of Stress Ratio on Small-Strain Stiffness During Triaxial Shearing. *Geotechnique*, Vol.54,No.7, pp. 429-439.
- Houlsby, G. T. & Worth, C. P., 1991, The variation of shear modulus of a clay with pressure and overconsolidation ratio. *Soils and Foundations*, 31(3), pp. 138-143.
- Humphries, W. K. & Wahls, H. E., 1968, Stress history effects on dynamic modulus of clay. *Proc.ASCE*, Vol. 94, SM2, pp. 371-389.
- Hussein, A. K., 1995, *Undrained Cyclic Behavior of Nonplastic Silt*. Ithaca(NY): Cornell Üniversitesi.
- Hwang, S. K., 1997, *Dynamic Properties of Natural Soils*. Austin(Texas): The University of Texas at Austin.
- Ibrahim, A. et al., 2011, *Laboratory determination of small strain shear modulus of Auckland residual soil*. Seul, IOS Press, pp. 232-239.
- Imazu, M. & Fukutake, K., 1986, *Dynamic shear modulus and damping ratio of gravel materials*. s.l., s.n., pp. 509-512.
- Institute, A. N. S., 2000, ASTM D4015-87. *Standard test methods for modulus and damping of soils by the resonant-column method*.
- Isao, I. & Zhang, X., 1993, Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay. *Soils and Foundations*, 33(1), pp. 182-191.
- Ishibashi, I., 1992, Discussion to Effect of soil plasticity on cyclic response by M.Vucetic and R. Dobry. *Journal of Geotechnical Engineering*, Issue 118, pp. 830-832.
- ITASCA, 2012, *FLAC 3D, Fast lagrangian analysis of continua in 3-dimensions, version 5.0, Manual*, Minnesota
- Iwasaki, T. & Tatsuoka, F., 1977, Effects of Grain Size and Grading on Dynamic Shear Moduli of Sands. *Soils & Foundations*, Mart, 18(1), pp. 39-56.
- Iwasaki, T., Arakawa, T. & Tokida, K., 1982, *Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes*. Southampton, s.n., pp. 925-939.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F. & Takagi, Y., 1978, Shear Moduli of Sands under Cyclic Torsional Shear Loading. *Soils and Foundations*, 18(1), pp. 39-56.

- Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T. & Lancellotta, R., 1985, *New developments in field and laboratory testing of soils*. San Francisco, s.n.
- Jamiolkowski, M., Lancellotta, R. & Lo Presti, D. F., 1994, *Remarks on the Stiffness at Small strains of Six Italian Clays*. Hokkaido, s.n., pp. 817-854.
- Jovicic, V. & Coop., M. R., 1997, Stiffness of coarse-grained soils at small strains. *Geotechnique*, 47(3), pp. 545-561.
- Kagawa, T., 1992, Moduli and Damping Factors of Soft Marine Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(9), pp. 1360-1375.
- Kallioglou, P., 2003, *The study of dynamic properties of soils in resonant-column apparatus*. Selanik: Selanik Aristoteles Üniversitesi.
- Kallioglou, P., Tika, T. & Pitilakis, K., 2008, Shear Modulus and Damping Ratio of Cohesive Soils. *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 879-913.
- Katagiri, M. & Imai, G., 1994, A new in-laboratory method to make homogenous clayey samples and their mechanical properties. *Soils and Foundations*, 34(2), pp. 87-93.
- Khoury, N. Q., 1984, *Dynamic Properties of Soils*. Syracuse: Syracuse University.
- Kim, T. C. & Novak, M., 1981, Dynamic Properties of some cohesive soils of Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 371-389.
- Kishida, T. et al., 2009, Dynamic Properties of Highly Organic Soils from Montezuma Slough and Clifton Court. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(4), pp. 525-532.
- Kokusho, T., 1980, Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range. *Soils and Foundations*, pp. 45-60.
- Kokusho, T., 1987, *In Situ Dynamic Soil Properties and Their Evaluation*. Kyoto, s.n., pp. 215-435.
- Kokusho, T. & Tanaka, Y., 1994, *Dynamic Properties of Gravel Layers Investigated by In-situ Freezing Sampling*. s.l., ASCE, pp. 121-140.
- Kokusho, T., Yashida, Y. & Esashi, Y., 1982, Dynamic properties of soft clay for wide strain range. *Soils and Foundations*, 22(4), pp. 1-18.
- Kokusho, T., Yoshida, Y. & Tanaka, Y., 1995, Shear Wave Velocity in Gravelly Soils with Different Particle Grading. *Static and Dynamic Properties of Gravelly Soils, Geotech. Spec. Pub. No. 56*, pp. 92-105.
- Kono, T. et al., 1994, *Gravelly Soil Properties Evaluation by Large Scale In-Situ Cyclic Shear Test*. s.l., ASCE, pp. 177-200.
- Kramer, S. L., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*. s.l.:Prentice-Hall, Inc..
- Kramer, S. L., 2000, Dynamic response of Mercer Slough peat. *Journal of the Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 126(6), pp. 504-510.
- Kung, T.-C. & Ou, C.-Y., 2004, Stress-strain characteristics of the Taipei Silty Clay at Small Strain. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 27(7), pp. 1077-180.

- Kuwano, R. & Jardine, R. J., 2002, On the application of cross-anisotropic elasticity to granular materials at very small strains. *Geotechnique Vol. 52 No.10*, pp. 727-749.
- Laird, J. P., 1994, *Linear and Nonlinear Dynamic Properties of Soil at High Confining Pressures*. s.l.:University of Texas at Austin.
- Lanzo, G. & Pagliaroli, A., 2006, *Stiffness of Natural and Reconstituted Augusta Clay at Small to Medium Strains*. Roma, pp. 1-9.
- Leong, E. C., Cahyadi, J. & Rahardjo, H., 2006, *Stiffness of Compacted Soils*. s.l., ASCE, pp. 1169-1180.
- Likitlersuang, S. et al., 2013, Small strain stiffness and stiffness degradation curve of Bangkok Clays. *Soils and Foundations*, 53(4), pp. 498-509.
- Lo Presti, D. C., 1989, *Proprieta' Dinamiche dei Terreni (Italiana)*. Torino, s.n.
- Lo Presti, D. F. et al., 1997, Shear modulus and damping of soils. *Geotechnique*, pp. 603-617.
- Lo Presti, D. F., Jamiolkowski, M. & Pepe, M., 2003, Geotechnical characterization of the subsoil of Pisa Tower. *Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, pp. 909-946.
- Lo Presti, D. F. et al., 1993, Monotonic and Cyclic Loading Behaviour of Two Sands at Small-Strains. *Geotechnical Testing Journal*, 16(4), pp. 409-424.
- Macari, E. J. & Hon-Yim, K., 1994, A Study of an Anisotropically Overconsolidated Silt by the Resonant Column Method. *Geotechnical Testing Journal*, 17(3), pp. 315-324.
- Macky, T. A. & Saada, A. S., 1984, Dynamics of Anisotropic Clays under Large Strains. *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 487-504.
- Manica, M., Ovando, E. & Botero, E., 2014, Assessment of damping models in FLAC. *Computers and Geotechnics*, Volume 59, pp. 12-20.
- Marcuson, W. F. & Wahls, H. E., 1978, Effects of time on damping ratio of clays. *Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654*, pp. 126-147.
- Masing, G., 1926, *Eigenspannungen und Verfestigung Beim Masing*, pp. 332-335.
- Massarsch, K. R., 2004, *Deformation properties of fine-grained soils from seismic tests*. Porto, s.n., pp. 133-146.
- Matesic, L. & Mladen Vucetic, 2003, Strain-Rate Effect on Soil Secant Shear Modulus at Small Cyclic Strains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 536-549.
- Meidani, M. et al., 2008, Granule Shape Effect on the Shear Modulus and Damping Ratio of Mixed Gravel and Clay. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 32(5), pp. 501-518.
- Menq, F.-Y., 2003, *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils*. s.l.:The University of Texas at Austin.
- Nagarajan, S. D., 2004, *Dynamic Response of Chemically Treated Sulfate-Rich Clay Under Cyclic Wetting -Drying*. Arlington(Texas): The University of Texas at Arlington.

- Ni, S. H., 1987, *Dynamic Properties of Sand Under True Triaxial Stress States from Resonant Column/Torsional Shear Tests*. Teksas: University of Texas at Austin.
- Nishimura, S., 2005, *Laboratory Study on Anisotropy of Natural London Clay*. Londra: Imperial College .
- Okur, D. V. & Ansal, A., 2007, Stiffness degradation of natural fine grained soils during cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 27, pp. 843-854.
- O'Rourke, T. D. & Holzer, T. L., 1992, *The Lorna Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989-Marina District*, Washington: USGS.
- Otter, L., Priest, J. A. & Clayton, C. I., 2011, *The Influence of Suction Change on the Stiffness of Railway Formations*. Seul, IOS Press, pp. 808-814.
- Öztoprak, S. & Bolton, M., 2013, Stiffness Of Sands: A Parametric Survey. *Géotechnique*, 63(1), pp. 54-70.
- Pham, H. T. V., 2005, *Support mechanism of rammed aggregate piers*. Ames (Iowa): Iowa State University .
- Picarelli, L. et al., 2003, *Structure, properties and mechanical behaviour of the highly plastic intensely fissured Bisaccia Clay Shale*. Lisse, Balkema, pp. 947-982.
- Pitilakis, K. D., Anastassiadis, A. & Raptakis, D., 1992, *Field and Laboratory determination of dynamic properties of natural soil deposits*. Madrid, Balkema, pp. 1275-1280.
- Pradhan , T. S. & Ueno, Y., 1998, *Cyclic Deformation Characteristics of Clay Under Different Consolidation Histories*. London, ThomasTelford, pp. 329-335.
- Quinn, T., 2013, *Rate Effects in Fine Grained Soils*. s.l.:The University of Dundee.
- Richardson, A. M. & Whitman, R. V., 1963, Effect of strain-rate upon undrained shear resistance of a saturated remoulded fat clay. *Geotechnique*, 47(3), pp. 475-489.
- Richart, F. E., 1975, Some Effects of Dynamic Properties on Soil-Structure Interaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, pp. 1197-1240.
- Rodriguez, I. D., 1992, *Dynamic Properties of Mexico City Clay for Wide Strain Range*. s.l., s.n., pp. 1257-1262.
- Romo, M. P., 1995, *Clay Behavior, Ground Response and Soil-Structure Interaction Studies in Mexico City*. St. Louis, s.n., pp. 1039-1051.
- S&Me Inc., 1998, *Second report of seismic analysis—Daniel Island terminal, Charleston, South Carolina*, S.C.: Mount Pleasant.
- Saada , A. S. & Macky, T. A., 1985, Integrated Testing and Properties of a Gulf of Mexico Clay. *Strength Testing of Marine Sediments: Laboratory and in-situ Measurements*.
- Santagata, M. C., 1999, *Factors affecting the initial stiffness and stiffness degradation of cohesive soils*. Cambridge(Massachusetts): Massachussets Institute of Technology.
- Saxena, S. K. & Reddy, K. R., 1989, Dynamic Moduli and Damping Ratios for Monterey No. 0 Sand By Resonant Column Tests. *Soils and Foundations*, Haziran, 29(2), pp. 37-51.

- Schnabel, P. B., Lysmer, J. & Seed, H. B., 1972, *SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*, Berkeley: Earthquake Engineering Research Center. University of California.
- Seed, H. & Idriss, I., 1970, *Soil modulus and damping factors for dynamic response analyses*, Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M. & Tokimatsu, K., 1986, Moduli and Damping factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soil. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.112, No.GT11*, pp. 1016-1034.
- Shen, C. K., Li, X. S. & Gu, Y. Z., 1985, Microcomputer Based Free Torsional Vibration Test. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(8), pp. 971-986.
- Sherif, M. A., Ishibashi, I. & Gaddah, A. H., 1977, Damping Ratio for Dry Sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(7), pp. 743-756.
- Shibuya, S., Mitachi, T., Fukuda, F. & Degoshi, T., 1995, Strain rate effects on shear modulus and damping of normally consolidated clay. *Geotechnical Testing journal*, pp. 365-375.
- Shibuya, S., 2001, *Progress Report of TC-29*. Lisse, Sweets & Zielenger, pp. 1265-1275.
- Shibuya, S., Mitachi, T., Hosomi, A. & Hwang, S. C., 1996, *Strain rate effects on stress-strain behavior as observed in monotonic and cyclic triaxial tests*. s.l., ASCE, pp. 214-227.
- Shibuya, S., Mitachi, T. & Hwang, S. C., 1999, Case studies In In-Situ Structure of Natural Sedimentary Clays. *Soils and Foundations*, 40(3), pp. 87-100.
- Shirley, D. J. & Hampton, L. D., 1978, Shear-wave measurements in laboratory sediments.. *The Journal of the Acoustical Society of America* (63), pp. 607-613.
- Silver, M. L. & Seed, B. H., 1969, *The Behavior of Sands Under Seismic Loading Conditions*, Berkeley: Earthquake Engineering Research Center of University of California.
- Silvestri, F. & Rampello, S., 1995, *Discussion*. Sapporo, Balkema, pp. 1169-1170.
- Smith, P. R., Jardine, R. J. & Hight, D. W., 1992, The yielding of Bothkennar clay. *Géotechnique*, 42(2), pp. 257-274.
- Soga, K., 1994, *Mechanical Behavior and Constitutive modelling of Structured Soils*. s.l.:University of California, Berkeley.
- Stewart, J. P. & Stewart, A. F., 1997, *Analysis of Soil-Structure Interaction Effects on building Response From Earthquake Strong Motion Recordings At 58 Sites*, Berkeley: Earthquake Engineering Research Centre.
- Stokoe II, K. H., Hwang, S., Darendeli, M. B. & Lee, N. -K. J., 1995, *Correlation Study of Nonlinear Dynamic Soil Properties: Savannah River Site, Aiken, South Carolina*, Austin: University of Texas at Austin.
- Stokoe II, K. H., Isenhower, W. M. & Hsu, J. R., 1980, *Dynamic Properties of Offshore Silty Samples*. Houston, s.n., pp. 289-295.
- Stokoe II, K. H., Isenhower, W. M. & Hsu, J. R., 1978, *Dynamic Properties of Offshore Silty Samples*. Texas, s.n., pp. 289-302.

- Stokoe II, K. & Lodde, P. F., 1978, *Dynamic Response of San Francisco Bay Mud*. Pasadena, ASCE, pp. 940-959.
- Stokoe, K. H., Darendeli, M. B., Menq, F. Y. & Choi, W. K., 2004, *Comparison of the Linear and Nonlinear Dynamic Properties of Gravels, Sands, Silts and Clays*. California , s.n., pp. 1-4.
- Stokoe, K. H. I., Darendeli, M. B., Andrus, R. D. & Brown, L. T., 1999, *Dynamic soil properties: laboratory, field and correlation studies*. Lizbon, Balkema, pp. 811-845.
- Stokoe, K. H. I., Hwang, S. K., Lee, J. N. & Andrus, R. D., 1994, *Effects of Various Parameters on the Stiffness and Damping of Soils at Small to Medium Strain*. Sapporo, s.n., pp. 785-816.
- Stokoe, K. H. I. & Santamarina , J. C., 2000, *Seismic-Wave-Based Testing in Geotechnical Engineering*. Melbourne, s.n.
- Tabata, K., 2004, *The Effects of the rate of Loading and Frequency on the Behavior of Soils at Small Monotonic and Cyclic Shear Strains*. Los Angeles(California): University of California.
- Tanaka, Y., Kudo , K., Yoshida , Y. & Ikemi , M., 1987, *A study on the mechanical properties of sandy gravel-Dynamic properties of reconstituted samples*, U87019: Central Research Institute of Electric Power Industry.
- Tatsuoka, F., Iwasaki, T. & Takagi, Y., 1978, Hysteretic Damping of Sands Under Cyclic Loading and Its Relation to Shear Modulus. *Soils and Foundations*, Haziran, Issue 18, pp. 25-30.
- Tawfiq, K. S., Aggour, M. S. & Al-Sanad, H. A., 1988, *Dynamic Properties of Cohesive Soils from Impulse Testing*,. Tokyo, Japonya, s.n., p. 277.
- Teachavorasinskun, S., Thongchim, P. & Lukkunaprasit, P., 2002, Shear modulus and damping of soft Bangkok Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 1201-1208.
- Temma, M., Shibuya , S., Mitachi, T. & Yamamoto, N., 2001, Interlink between metastability index MI(G) and undrained shear strength in aged holocene clay deposit. *Soils & Foundation*, pp. 133-142.
- Tika , T., Vaughan, P. R. & Lemos, L. J., 1996, Fast shearing of pre-existing shear zones in soil. *Geotechnique*, 46(2), pp. 197-233.
- Tika, T., Kallioglou, P. & Pitilakis, K., 1999, *Laboratory measurement of dynamic properties of natural soils*. London, Balkema, pp. 239-244.
- Tika, T., Koninis, G. & Kallioglou, P., 2005a, *Dynamic properties of natural, reconstituted and compacted soils*, Thessaloniki: SMFE Aristotle University of Thessaloniki.
- Towhata, I., 2008, *Geotechnical Earthquake Engineering*. Berlin: Springer.
- Uchida, K., Sawada , T. & Hasegawa , T., 1980, *Dynamic Properties of Sand Subjected to Initial Shear Stress*. Swansea, s.n., pp. 121-133.
- Umu, S. U., 2013, *Kum – Atık Lastik Karışımlarının Lineer Olmayan Dinamik Davranışı*. s.l.:Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.

- Vardanega, P. J. & Bolton, M. D., 2013, Stiffness of Clays and Silts: Normalizing Shear Modulus and Shear Strain. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, pp. 1575-1589.
- Viggiani, G. & Atkinson, J. H., 1995, Stiffness of Fine-Grained Soil at Very Small Strains. *Geotechnique*, pp. 249-265.
- Vinale, F. et al., 1995, *The Pre-failure behaviour of soils as continuum materials*. Torino, s.n., pp. 995-1007.
- Vrettos, C., 2009, *Discussion of the Paper ‘‘Shear Modulus and Damping Ratio of Organic Soils’’ by P. Kalligiou, Th. Tika, G. Koninis.*, s.l.:s.n.
- Vucetic, M. & Dobry, R., 1991, Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of Geotechnical Engineering*, Ocah, 117(1), pp. 89-117.
- Vucetic, M., Lanzo, G. & Doroudian, M., 1998, Damping at small strains in cyclic simple shear test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 585-594.
- Vucetic, M. M. & Dobry, R., 1988, *Cyclic degradation of normally and overconsolidated clays under simple shear loading conditions*, Troy, N.Y: Rensselaer Polytechnic Institute.
- Wang, G. X. & Kuwano, J., 1999, Modeling of strain dependency of shear modulus and damping of clayey sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 18, pp. 463-471.
- Wang, W., 1979, *Some findings in soil liquefaction*, Beijing: Water conservancy and hydroelectric power scientific research Institute.
- Wegel, R. L. & Walther, H., 1935, Internal Dissipation in Solids for Small Cyclic Strains. *Physics*, pp. 141-157.
- Weiler, W. A. J., 1988, *Small Strain Shear Modulus of Clay*. s.l., ASCE, pp. 331-345.
- Wichtmann, T. & Triantafyllidis, T., 2004, Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, Part i: cyclic and dynamic torsional prestraining. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(2), pp. 127-147.
- Wichtmann, T. & Triantafyllidis, T., 2005, On the influence of the grain size distribution curve on the dynamic and cumulative behaviour of non-cohesive soils. *Bautechnik (Almanca)*, pp. 378-386.
- Woods, R. D., 1978, *Measurement of Dynamic Soil Properties*. Pasadena, CA, ASCE, pp. 91-178.
- Yamashita, S., Toki, S. & Shibuya, S., 1995, *Standardization of laboratory test methods to determine the cyclic deformation properties of geomaterials in Japan*. Hokkaido, Balkema, pp. 741-748.
- Yasuda, S. & Yamaguchi, I., 1985, *Dynamic soil properties of undisturbed samples*. Nagoya, s.n., pp. 539-542.
- Yimsiri, S. & Soga, K., 2011, *Stiffness nonlinearity and anisotropy of stiff clays observed during isotropic consolidation*. Seoul, IOS Press, pp. 541-548.

- Yoshida , N., Suetomi, I., Kato, N. & Miura, K., 1997, *Parametric study on effectiveness of dynamic response analysis by equivalent linear method*. s.l., s.n., pp. 877-878.
- Yoshida, N., Sawada, S. & Nakamura, S., 2004, *Accuracy of Dynamic Response Analysis of Ground by Means of Damping and Nonlinear Characteristics*. Berkeley, s.n., pp. 126-133.
- Yuan-qiang, C. & Xu, L., 2004, Dynamic properties of composite cemented clay. *Journal of Zhejiang University Science*, 5(3), pp. 309-36.
- Zavoral, D., 1990, *Dynamic Properties of an Undisturbed Clay from Resonant Column Tests*. s.l.:University of British Columbia.
- Zavoral, D. Z. & Campanella, R. G., 1994, Frequency Effects on Damping/Modulus of Cohesive Soils. *Dynamic Geotechnical Testing II, ASTM STP 1213*, pp. 191-201.
- Zdravkovic, L. & Jardine , J., 1997, Some anisotropic stiffness characteristics of a silt under general stress conditions. *Geotechnique*, pp. 407-437.
- Zen, K. & Higuchi , Y., 1984, *Prediction of Vibratory Shear Modulus and Damping Ratio for Cohesive Soils*. San Francisco, ASCE, pp. 23-30.
- Zen, K., Umehara , Y. & Hamada , K., 1978, *Laboratory Tests and In-Situ Seismic Survey on Vibratory Shear Modulus of Clayey Soils with Various Plasticities*. s.l., s.n., pp. 721-728.
- Zhang, G., Robertson, P. K. & Brachman, R. W., 2002, Estimating liquefaction induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), pp. 1168-1180.
- Zhang, J., Andrus, R. D. & Juang, H. C., 2005, Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Nisan.pp. 453-464.
- Zhang, X., 1994, *Effect of Coupled Motions on the Dynamic Properties of Sands*. s.l.:The University of Maryland.

EKLER

Tablo Ek. 1: Granüler Zeminlerde sönüm oranı için oluşturulan deneysel veritabanı özeti

Referans	Zemin İsmi ve Türü	Test Tipi	İncelenen Parametreler	Deneç Sayısı	Zemin Türü Sayısı
Al-Sanad et al. (1983)	Ottawa Sand, Monterey 0# Sand	RCT	σ_3, I_p, Z Zemin Tipi	4	2
Amer et al. (1984)	Ottawa 20-30 Sand	DSST	I_p Çevrim Sayısı	6	1
Anderson (2003)	Çeşitli örselenmiş numuneler	DSST, TST	σ_3, I_p, Z Zemin Tipi, p', U_c, D_{50}	21	6
Araei et al. (2011)	Siah-Bishah Çakılı	TST	σ_3, f	28	1
Arango (2006)	Kalkerli ve silisli kum (kuru, örselenmiş)	RCT	e, p', U_c, D_{50}	20	2
Bolton & Wilson (1990)	Leighton Buzzard Kum	RCT+TST	σ_3, f, S	10	1
Cavallaro ve diğ. (2001)	Leighton Buzzard Kum	TST	-	1	1
Chien & Oh (2002)	West Taiwan Örselenmiş Numune	RCT	FC, D_{50}, U_c, G_s	8	1
Chung ve diğ. (1984)	Monterey 0# Kum	RCT	e, I_p, σ_3	14	1
Delfosse-Ribay (2004)	Fontainebleau Kum	RCT, CTX	-	1	1
Dong ve diğ. (1994)	Hime, Kaku, Osaka ve Nagoya Çakılı	CTX	e, D_{50}, U_c, G_s	4	4
D'Onofrio & Penna (2003)	Motano Antilia Siltli, Killi Kum	TST	σ_3, e, S	7	1
Georgiannou & Tsomokos (2008)	Ham River, Fontainebleau Kum	TST	$e, I_p, \sigma_3, D_{50}, U_c$	4	2
Goto ve diğ. (1992)	Tone River Çakılı	CTX	I_p, U_c, FC	4	1
Goto ve diğ. (1999)	Masado İyi derecelenmiş çakıl	CTX	D_{50}, e, p'	4	1
Hardin & Drnevich (1972)	Temiz Kuru Kum	TST	$\sigma_3, \text{Çevrim Sayısı}$	6	1
Hardin ve diğ. (1994)	Ottawa Kum, Savannah River Side Kum	RCT	e, σ_3	7	2
Hashiba (1971)	Onahama Kum	DSST	I_p, σ_3	4	1
Hatanaka ve diğ. (1988)	Tokyo Gravel	CTX	$I_p, \sigma_3, e, D_{50}, U_c$	4	1
Hsu & Vucetic (2002)	Çeşitli örselenmiş numuneler, Toyoura Kum, Nevada Kum	DSST	$\sigma_3, e, S, \text{Çevrim Sayısı}$	21	6
Kanatani ve diğ. (1994)	Toyouira Kum	CTX	σ_3	4	1
Katayama (1986)	Fujisawa Sand	TST	e_0, I_p	4	1
Khan (2008)	Temiz Kuru Kum	RCT	σ_3	4	3
Khan ve diğ. (2013)	Silika kumu	RCT	f	2	1
Kodaka ve diğ. (2005)	Toyouira Kum	TST	e	2	1
Kokusho (1980)	Toyouira Kum	CTX	$\sigma_3, e, \text{Çevrim Sayısı}$	10	1
Kokusho ve diğ. (1980)	Tonegawa Kum, Kirimataş, Yuvarlak Çakıl	CTX	$\sigma_3, e, U_c, FC, D_{50}$	49	3
Kokusho ve Esashi (1981)	Toyouira Kum, Diliyuyal Kum	CTX	$\sigma_3, e, U_c, FC, D_{50}, G_s$	14	2
Kokusho ve Tanaka (1994)	A ve K sahasına ait Çakıl	CTX	$\sigma_3, e, U_c, FC, D_{50}$	8	2
Laird & Stokoe (1993)	Yıkılmış Harç Kum, Örselenmiş Numuneler	RCT+TST	$\sigma_3, e, f, D_{50}, U_c, e, FC, S, G_s, \text{Çevrim Sayısı}$	43	4
Li ve diğ. (1998)	Leighton Buzzard Kum	RCT	$I_p, e, \text{Çevrim Sayısı}, \sigma_3$	8	1
Lin ve diğ. (2000)	Taichung Çakılı	RCT+TST	I_p, e, σ_3	9	1
Lo Presti (1997)	Toyouira Kum	RCT+TST	I_p, e, σ_3, f	4	1
Maher ve diğ. (1994)	Ottawa 20-30 Kum	RCT+CTX	I_p, e, f	3	1
Masuda ve diğ. (2001)	Tokyo Bay Kum	TST	$\sigma_3, U_c, D_{50}, FC$	13	1
Menq & Stokoe (2003)	Yıkılmış Harç Kum	RCT	σ_3	3	1
Menq (2003)	Pench Ranch, Yuca Mountain Sahası Kumlu Zemin	RCT	$e, I_p, FC, D_{50}, U_c, S$	9	2

Tablo Ek. 2: Granüler Zeminlerde sönüm oranı için oluşturulan deneysel veritabanı özeti (Devamı)

Referans	Zemin İsmi ve Türü	Test Tipi	İncelenen Parametreler	Deneysel Sayısı	Zemin Türü Sayısı
Miura & Yagi (2003)	Utanaı,Hayakita, Touthoro Çakıllı Zemini, Shirasu Volkanik Kumu	CTX	$e, I_p, FC, D_{50}, U_C, S, G_s$	13	4
Ni (1987)	Yıkılmış Harç Kumu	RCT	e, I_p, σ_3, f, p'	34	1
Ray (1983)	Ottawa 20-30 ,Mambuca Kumu, "Soil 3 Kodlu" Siltli kumu	RCT+TST	$e, I_p, FC, D_{50}, U_C, f, \sigma_3$	30	3
Saxena (1987)	Monterey 0# Kumu (%0 ve 2 Cimento katkılı)	RCT	e, I_p, FC, f, σ_3	18	2
Saxena (1989)	Monterey 0# Kumu	RCT	e, I_p, σ_3	18	1
Seed ve diğ. (1986)	İyi derecelenmiş Oroville Barajı Çakılı,Pyramid ve Livermore Çakılı	CTX	FC, U_C, D_{50}, e, G_s	3	3
Silver & Seed (1970)	Kristal Silika #20 Kum	DSST	I_p, e, S, σ_3	3	1
Sitharam ve diğ. (2004)	Bhuj Kumu	CTX	I_p, e	3	1
Spencer ve diğ. (2008)	120 Nevada Kumu	RCT	-	1	1
Stokoe ve diğ. (1995)	Güney Kaliforniya Siltli Kumu	RCT+TST	$e, FC, D_{50}, U_C, f, \sigma_3, S$	14	7
Stokoe ve diğ. (1999)	ROSRINE numunesi (örselememiş)	RCT+TST	σ_3, f, S, ζ çevrim Sayısı	5	3
Tanaka ve diğ. (1987)	Kuaterner Kumlu Çakıl	CTX	e, D_{50}, U_C, σ_3	8	1
Tanaka ve diğ. (2000)	Hualien Kumu, Çakılı, Kırmataş	CTX	$e, D_{50}, U_C, \sigma_3, G_s$	16	3
Tatsuoka ve diğ. (1978)	Toyoura Kumu, Ban-nosu Kumu,	RCT+TST	$f, \sigma_3, I_p, e, U_C, FC, G_s, S, D_{50}$	19	2
Tatsuoka ve diğ. (1979)	Toyoura Kumu	TST	Çevrim Sayısı, σ_3, I_p, e, S	36	1
Tatsuoka ve diğ. (1994)	Nagoya Çakılı	CTX	σ_3	6	1
Tika ve diğ. (2003)	Yunanistan ve Kıbrıs Rum kesiminden Doğal Kumlar	RCT	$\sigma_3, U_C, G_s, D_{50}, FC, I_p, e$	16	8
Tika ve diğ. (2004)	Labta hazırlanmış numune	RCT	$\sigma_3, U_C, G_s, D_{50}, FC, I_p, e$	14	1
Tokimatsu & Sekiguchi (2006)	JMA kum numunesi	TST	-	1	1
Ueng ve diğ. (2002)	Yuan-Lin Sahası ince kumu	TST	indeks özellikleri belli değil	3	1
Umı ve diğ. (2014)	ISO Kumu (kuru)	RCT	σ_3	5	1
Walker & Stewart (1989)	PGS-120 Siltli kum	RCT+TST	f, σ_3	4	1
Wang & Kuwano (1999)	Kawasaki Kili+ Toyoura Kumu (SC)	CTX	U_C, D_{50}, σ_3	6	1
Wichman & Triantafyllidis, (2013)	Dorsten Kumu	RCT	$\sigma_3, I_p, D_{50}, U_C, e$	26	1
Yamashita & Suzuki (1999)	Toyouura Kumu	TST	σ_3	8	1
Yamashita & Toki (1994)	Ishikari, Toyoura Kumu	TST	$\sigma_3, I_p, D_{50}, U_C, e$	21	2
Yamashita ve diğ. (1997)	Tokyo Bay Gevşek Kumu	CTX	$f, \sigma_3, I_p, D_{50}, FC, e, U_C$	12	1
Yang (2008)	Michiana Kum, Ottawa #20/30 Kum, Puerto Rico Kumu	RCT	$G_s, S, I_p, D_{50}, FC, e, U_C$	9	3
Yasuda ve diğ. (1996)	Riverbed Çakılı	CTX	$I_p, \sigma_3, G_s, U_C, FC, D_{50}$	18	1
Yasuda & Matsumoto (1993)	Toyouura Kumu, Kaya dolgu malzemesi	CTX, TST	f, σ_3, U_C, D_{50}	12	2
Yee ve diğ. (2011)	Pleistosen ve Holosen Kum	RCT+TST	f, σ_3, S, e, I_p	4	2
Zhang & Aggour (1996)	Ottawa 20-30 Kumu	RCT	σ_3 , Yüklene Şekli	9	1
Zhu ve diğ. (2014)	Baraj dolgusunda kullanılan çakıl	CTX	$I_p, \sigma_3, U_C, FC, D_{50}$	44	1

Tablo Ek. 3: Kohezyonlu Zeminlerde sönüm oranı için oluşturulan deneysel veritabanı özeti

Referans	Zemin İsmi ve Türü	Test Tipi	İncelenen Parametreler	Deney Sayısı	Zemin Türü Sayısı
Al Humaidi ve diğ. (1996)	Dondurulmuş Montreal ince daneli zemini	RC	f	4	1
Bate ve diğ. (2013)	Organoclay kil numunesi	BE+RC	Ip, e0, Vs	7	1
Borden ve diğ. (1996)	Piedmont Rezidüel Zemin	RC	p0', Ip, e0, LL, PL, w	6	3
Boulanger ve diğ. (1988)	Sherman Adası Turba	CTX	p0', çevirim (N), w, Vs	6	1
Bray ve diğ. (1990)	Puddingstone Barajı Kil Dolgu malzemesi	CTX	Ip, LL, PL, w	1	1
Brennan ve diğ. (2004)	E-kalite Kaolin	Centrifuge	p0', çevirim (N), Ip, e0, w, Vs	1	1
Cabalar (2009)	Doygun örselenmemiş kil numuneler	RC	p0'	3	3
Cai & Liang (2004)	Xioshan County Kili	CTX	p0'	12	1
Caserta ve diğ. (2012)	İnorganik Galba Turbasi	RC+TS	Ip, e0, LL, PL, w, c, Vs	3	3
Castelli ve diğ. (2012)	Catania Kili	RC	p0', Ip, e0, LL, PL, w, Vs	2	2
Cavallero ve diğ. (2012)	Via Dotto Consoli (Catania) kil numunesi	RC+TS	f, Vs	2	1
Cavallero ve diğ. (2015)	Augusta Kili	RC+TS	f, Vs	2	2
Chainuwat (2001)	Arlington (Texas) ince daneli zemini	RC	p0', p, LL, PL, w, Vs	1	1
Chepköt(1999)	Virginia İnce daneli zemini, Speswhite, Micro-sorb ES, Hydrogel bentonit, Supre gell X	RC	p0', Ip, e0, LL, PL, w, Vs	28	5
Darendeli (2001)	20 farklı sahadan gelen örselenmemiş numuneler	RC+TS	f, p0', çevirim (N), Ip, e0, LL, PL, w, Vs	15	3
DElia ve diğ. (2003)	Santa Barbara Kili	DSDSS	f	2	1
Dobry & Vucetic (1987)	VNP, VTCA, VTGB killeri	DSDSS	çevirim (N), Ip, OCR	5	3
d'Onofrio ve diğ. (1999)	Vallerica Kili	CTX	f, Vs	5	1
Doroudian & Vucetic (1999)	Santa Barbara Kili	DSDSS	f, p0', çevirim (N), Ip, e0, LL, PL, w, Vs	4	4
Erlingsson(1999)	Gotheburg Kili	RC	f, p0'	2	1
Gutha (1995)	San Francisco Olb Bay Killi Zeminleri	RC	p0', Ip, e0, LL, PL, w, OCR, c, Vs	46	12
Henke & Henke(2002)	La Cienga Bulvarı, Uni . Of Massachusetts, Tressure Adası,Auburn Üniversitesi Sahaları	TS+RC	f	2	2
Hsu & Vucetic(1995)	Tarzana-Rinaldi Sahal	DSDSS	p0', çevirim (N), Ip, e0, LL, PL, w, Vs	6	6
Hussein (1995)	Non-Plastik Silt	RC+TS	p0', OCR	9	3
Hwang (1997)	Gilroy#2, Tressure Island, Lotung (Tayvan)	RC+TS	f, p0', çevirim (N), Vs	5	3
Jingyan ve diğ. (2013)	Bohai Denizi Siltli Kili	CTX	Vs	10	1
Kagawa ve diğ. (1992)	Yumuşak Deniz Kili	RC_DSS+DSS	p0', Ip, e0, LL, PL, w	5	5
Kalliglou ve diğ. (2008)	Yunanistan Killeri	RC	p0', Ip, e0, LL, PL, w, OCR	33	33
Kim (1991)	Kompakte edilmiş kil	RC+TS	f, p0', çevirim (N), Ip, LL, PL, w, S	33	1
Kishida (2008)	Montezuma ve Clifton İnce daneli zeminleri	RC-TS + CTX	f, p0', Ip, w	8	2
Kokusho ve diğ. (1982)	Teganuma, Chiba Killi zeminleri	CTX	p0', Ip, e0	12	2
Kurtulus (2006)	Güney Austin İnce daneli zemini	RC+TS	f, p0', çevirim (N), e0, w	32	5
Lanzo ve diğ. (2009)	Punto Penna Quaternary (İtalya) zemin	DSDSS	p0', e0	2	2
Lee & Sheu (2007)	Taipei Siltli Ki	CTX	f, p0'	4	1
Lee (1996)	Savannah Nehir Kenarı Zemin	RC+TS	p0', çevirim (N), Ip, LL, PL	36	4
Lo Presti ve diğ. (1997)	Pisa ve Augusta killeri	RC+TS	Yüklenme Hızı (s)	2	2
Macari & Ko (1994)	Norton Sound Alaska İnce Daneli Zemin	RC	p0', OCR	14	1

Tablo Ek. 4: Kohezyonlu Zeminlerde sönüm oranı için oluşturulan deneysel veritabanı özeti (Devamı)

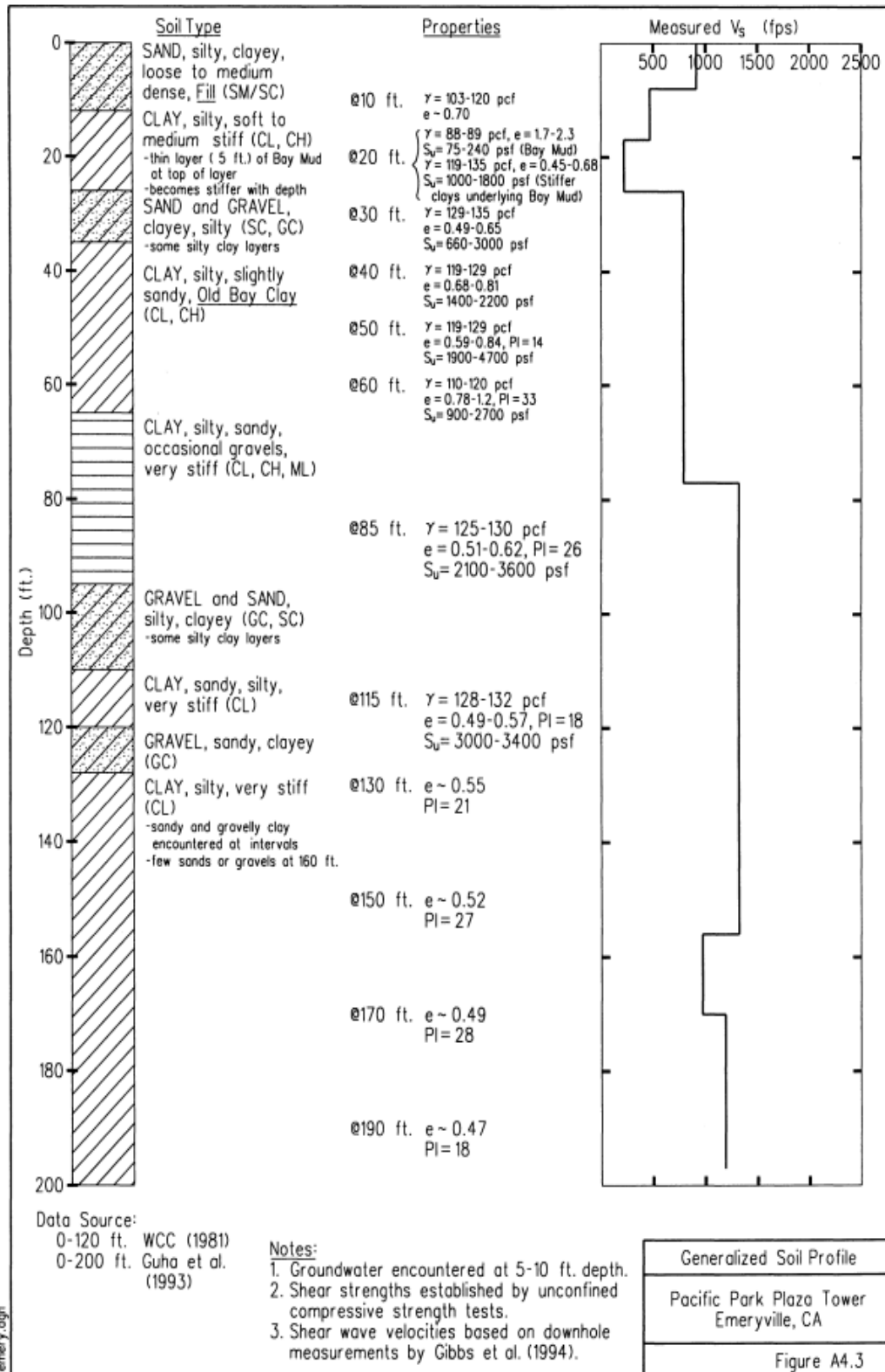
Referans	Zemin İsmi ve Türü	Test Tipi	İncelenen Parametreler	Deneysel Sayısı	Zemin Türü Sayısı
Macky & Saada (1984)	Kaolin, Aitchafalaya ve Gulf of Mexico kili	TS	Ip, LL, PL, w	3	3
Mayoral ve diğ. (2016)	Texoco Göllü Kili	RC	Ip, LL, PL, w	10	1
Medina ve diğ. (2012)	RP yağlı kili	RC	p0'	4	1
Meidani ve diğ. (2008)	Khatoon Abad, Tahran ince daneli zemini	CTX	p0', e0	3	1
Meyer ve diğ. (2005)	Tauranga, Ramarama, Hamilton sahası ince daneli zeminleri	TS	p0', Ip, e0, LL, PL, w, c, S	9	3
Nagarajan (2004)	Arlington Teksas ince daneli zemini	RC	p0'	28	1
Novak (1981)	7 tip farklı kil	RC-TS	p0', Ip, e0, LL, PL, w, OCR, S	7	7
Okur & Ansal (2007)	Türkiye'nin farklı bölgelerinden alınan killer	-	Ip	10	10
Pagliari ve diğ. (2013)	Yumuşak Roma zemini	DSDSS+RC+TS	f, p0', Ip	19	1
Papadopolou ve diğ. (2010)	Düzce zemini	CTX	p0', Ip, e0, LL, PL, w, OCR, S	6	1
Wu ve diğ. (2008)	ML ve CL zeminler	RC	p0', Ip, LL, PL	16	2
Pitlakis ve diğ. (1992)	Yunanistan zeminleri	RC+CTX	p0', Ip, e0, LL, PL, w	11	11
Pradhan & Ueno (1998)	Örselemiş ve Örselememiş kil numuneler	CTX	p0'	8	1
Romo (1995)	Mexico City Kili	CTX	p0'	3	1
Safaqah & Reimer (2004)	Kaolin ve Young Bay Kili	TS	Yükleme hızı (s)	2	2
Seed & Idriss (1970)	Killi ve Siltli Killi Zeminler	-	p0'	10	10
Shibuya ve diğ. (1996)	NSF-kili	CTX	f	3	1
Spikula & Garmon (2008)	Killi zeminler	DSDSS+RC	f, p0', Ip, LL, PL, OCR	28	4
Stokoe ve diğ. (1999)	Kumlu killer, killer	RC+TS	f, p0', çevirim (N), Ip, LL, PL, w	6	3
Stokoe ve diğ. (1980)	ML, CL ve CH tipi ince daneli zeminler	RC+TS	p0', çevirim (N), Ip, e0, LL, PL, w, S	11	6
Tabata (2004)	ROSRINE projesi kapsamında saha numuneleri ve kaolin	DSDSS	p0', Ip, e0, LL, PL, w	10	10
Teachavarasinskun ve diğ. (2002)	Bangkok kili	CTX	f, p0', çevirim (N), Ip	16	1
Tika ve diğ. (1999)	Yunanistan zeminleri	RC	Ip, e0, LL, PL, w	3	3
Toki ve diğ. (1995)	Örselemiş kil numuneler	CTX+TS	f, S	8	1
Voznesensky ve diğ. (2011)	St. Petersburg ince daneli zemini	CTX	p0', e0	4	1
Vrettos (2009)	Organik killi numunler	RC	p0'	3	1
Vucetic ve diğ. (1998)	La Cienga Bulvarı ince daneli zemini	DSDSS	p0', Ip, e0, LL, PL, w	18	1
Vucetic ve diğ. (1999)	Berkeley Kampüsü zemini	DSDSS	f, p0', Ip, e0, w	7	1
Wang & Kuwano (2010)	Kawasaki kili	CTX	p0', Ip, e0, LL	8	1
Wang & Siu (2006)	Speswhite Kaolin	RC	Yükleme hızı (s)	3	1
Wan & Yang (2013)	Hefe ince daneli zemini	RC	p0'	4	1
Wang ve diğ. (2011)	Siltli kil, kil	-	p0', Ip, e0, LL, PL	6	2
Wang ve diğ. (1995)	Siltli kil	CTX	f, p0'	1	1
Wehlin ve diğ. (2003)	Organik içerikli killer	CTX	p0', w	8	3
Yamada ve diğ. (2008)	Ariake A, B, C ; Onoda , Itsukaichi, Dejima Kili	TS	Ip	15	4
Yang (2008)	Kaolin Georgia, Bentonit Illinois	RC	Ip, e0, LL, PL, w	9	2
Zahidkhan (2007)	Maden Yatağı zemini	CTX+RC+NR	f	3	1
Zavoral & Campanella (1994)	UBC test sahası	RC+TS	f, p0', Ip, LL, PL, w	8	1

Tablo Ek. 5: Kohezyonlu Zeminlerde kayma modülü azalımı için oluşturulan deneysel veritabanı özeti

Referans	Zemin İsmi ve Türü	Test Tipi	İncelenen Parametreler	Deney Sayısı	Zemin Türü Sayısı
Allman & Atkinson,1992	Bothkennar Kili	TX	p_0', AKO	15	1
Amorosi ve diğ., 1999	Vallherica Kili	TX	Drenaj türü, p_0', OCR, S	4	1
Anderson, 1974	Detroit, Leda, Ford, Eaton, Santabarbara, BSF Kili	RCTS	Zemin türü, p_0', e_0, PI	6	6
Borden ve diğ., 1994-1996	Piedmont Silt, Saprolit, Kuzey Karolina Silt, Alabama Silt	RCTS	Zemin türü, p_0', f, PI, S	24	4
Callisto ve Rampello, 2002	Pietrafita Kili	TX	e_0	4	1
Cavallaro ve diğ., 1999	Catania Merkez Zemin	RCTS, CTX	p_0', f	4	1
Cavallaro ve diğ., 2005	Via Dott. Consofi Zemin	RCTS, CTX	p_0', f	4	1
Çabalar, 2009	Kil	RCTS	p_0', PI	6	1
Dasari ve Bolton, 1998	Gault Kili	TX	p_0'	4	1
Diaz-Rodriguez, 1992	Mexico City Kili	RCTS	p_0'	2	1
Dong-Soo, 1991	Yüksek plastik killer	RCTS	$f, PI, Zemin türü$	9	9
Doroudian & Yucetic, 1999	Santa Barbara Silt	RCTS	f, p_0'	4	1
Gaspare, 2008	London Kili	TX	-	1	1
Georgiannos ve diğ., 1991	Vallherica ve Pietrafita Kili	RCTS, TX	Deney türü, Zemin türü, p_0'	5	2
Grasso ve diğ., 2004	St. Nkaola Silt	RCTS	p_0'	3	1
Guhra, 1995	Old Bay Kili	RCTS, CTX	f, p_0', PI, e_0, AKO	56	2
Heymann ve diğ., 2000	Bothkennar Kili	TX	-	1	1
Hight ve diğ., 1992	Bothkennar Kili	TX	p_0', e_0	5	1
Hight ve diğ., 1997	Londra ve Thanet Kili	RCTS	p_0', PI	6	2
Holman, 2005	Chicago Kili	CTX	p_0', e_0, S	16	1
Houbby ve diğ., 1991	Todi Kili	RCTS, TX	Deformasyon Hzı	4	1
Hussein, 1995	PGS 120 Silt	RCTS	p_0', AKO	9	1
Hwang, 1997	Siltli, Kumlu Örselenmiş kiler	RCTS	f, p_0', e_0, PI	16	4
İbrahim ve diğ., 2011	Auckland Rezidüel Zemin -CH	TX	p_0'	4	1
Kagawa, 1992	Off-shore Kili	RCTS	p_0', e_0, PI	5	1
Kalliglou, 2003	Kabrs-Yunanistan örselenmiş kiler	RCTS	p_0', e_0, PI	22	6
Katagiri & Imai, 1994	Tokyo Körfezi Kili	CTX, TX	p_0', AKO	17	1
Kim & Novak, 1981	Hamilton Kili Silt, Windsor, Wallaceburg Siltli Kili, Chatam Silt,	RCTS	p_0', e_0, PI	18	7
Kishida ve diğ., 2009	Sarna Kili, Iona Kili, Port Stanley Kili	CTX	p_0', W_n	6	2
Kokusho ve diğ., 1982	Montezuma Bulamaç, Clifton Court Zemin	CTX	$p_0', e_0, PLAKO$	24	1
Kung & Ou, 2004	Teganuma Kili	TX	$p_0', e_0, Deformasyon Hzı$	9	1
Lanzo & Pagliaroli, 2006	Keelung Nehri Kili	CTX	$f, p_0', e_0, PLAKO$	10	1
Leong ve diğ., 2006	Augusta Kili	TX	p_0'	8	1
Lukitersuang ve diğ., 2008	Bukit Tiraah Grant CL	TX	$p_0', e_0, PLAKO$	4	2
Lo Presti ve diğ., 2003	Londra ve Gault Kili	TX	PI	3	1
Maasarch, 2004	Pisa Kili	RCTS	f, p_0', e_0, PI	8	8
Macari & Ko, 1994	Kili Kuni, Gulf, Vallen, Ska-Edeby, Norrköping, Backebol, Drannmen, Kentucky Kili	RCTS	p_0'	12	1
	Norton Sound Silt	RCTS			

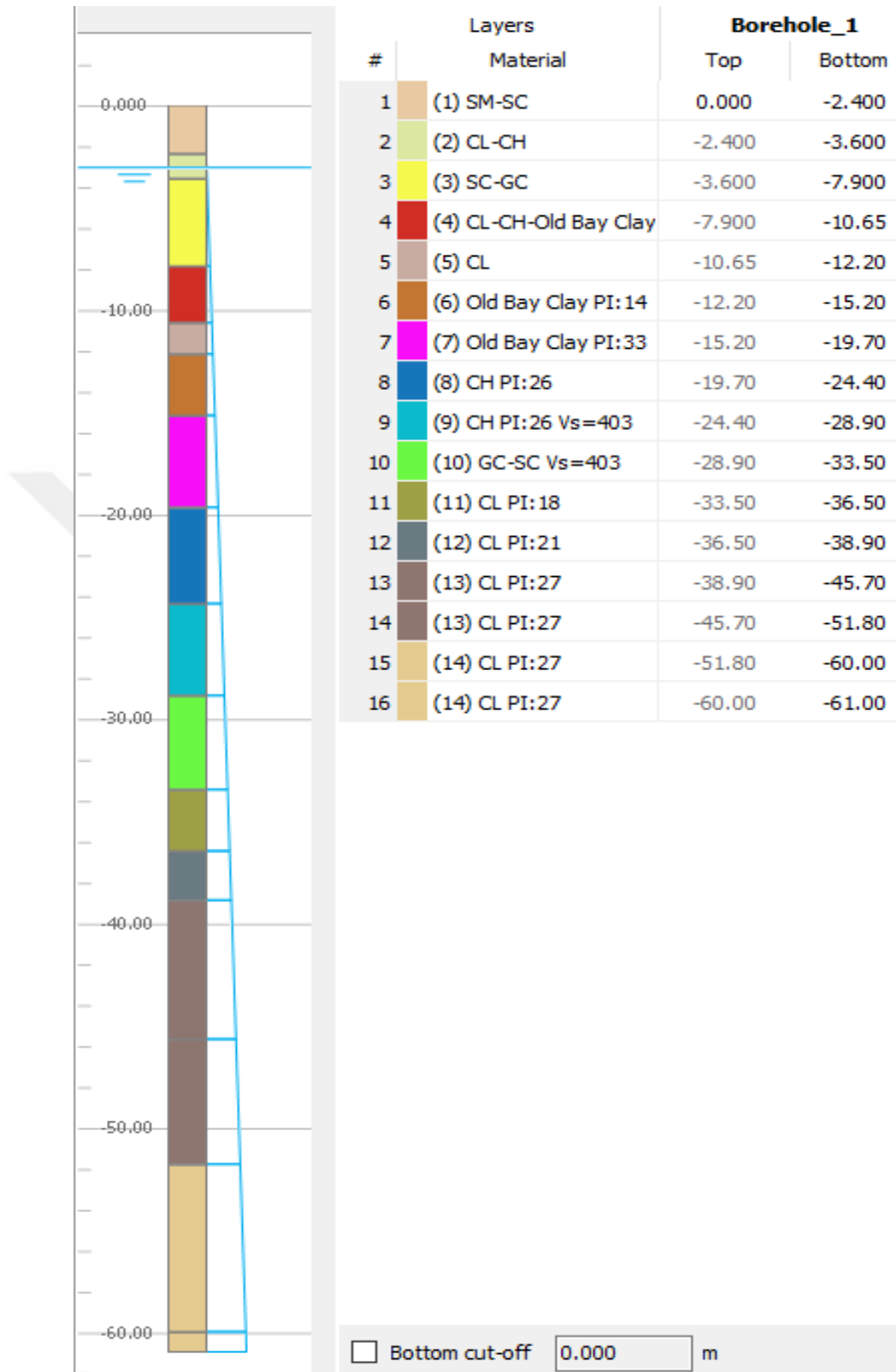
Tablo Ek. 6: Kohezyonlu Zeminlerde kayma modülü azalımı için oluşturulan deneysel veritabanı özeti(Devam)

Referans	Zemin İsmi ve Türü	Test Tipi	İncelenen Parametreler	Deneş Sayısı	Zemin Türü Sayısı
Mackey, 1982	Achalalya ve Mexico K illeri	RCTS	p_0', PI	4	2
Matesic & Vucetic, 2003	Augusta K illi, La Cienega K illi, Kao lin	DSDSS	p_0', PI, e_0	11	3
Maugeri ve diğ., 2012	Catania K illi	RCTS	p_0', PI, e_0	2	1
Mediani ve diğ., 2008	Khaton Abad K illi, Zemin	CTX	p_0', e_0	15	1
Nagarajan, 2004	Arlington Sülfürü K illi	RCTS	p_0', f	35	1
Nishimura, 2005	Londra K illi	RCTS, DSDSS, TX	Deformasyon Hz, e_0, p_0', PI	30	1
Okur & Ansal, 2007	Kocaeli Kohezyonlu Zeminleri	CTX	p_0', e_0, PI	11	1
Otter ve diğ., 2011	Güney Afrika K illi, Kuru	RCTS	p_0'	6	1
Picarelli ve diğ., 2003	Biasaccia K illi	RCTS	p_0', e_0, AKO, PI	13	1
Piliaklis ve diğ., 1992	Siltli Yunanistan K illeri	RCTS	p_0'	4	1
Pradhan ve Ueno, 1998	Tokyo Körfezi K illi	CTX, TX	p_0'	8	1
Romo, 1995	Mexico City K illi	RCTS	p_0'	3	1
S & Me, 1998	Holosen K illi Zeminler	RCTS	p_0'	13	3
Samagata, 1998	Mavi Boston K illi	TX	Deformasyon Hz, e_0, p_0', AKO, S	60	1
Shen ve diğ., 1985	Saf Silt	RCTS	p_0'	4	1
Shibuya ve diğ., 1995	Kiyohoro Siltli K illi ve Kao lin	RCTS, TX	f_{p_0', e_0}	13	2
Shibuya ve diğ., 1996	Higashi K illi	RCTS	p_0', e_0, PI	7	1
Shibuya ve diğ., 1999	NSF K illi	CTX, TX	f_{e_0}	6	1
Shibuya ve diğ., 2001	Bangkok K illi	TX	p_0', PI, e_0	5	1
Silverstri & Rampello, 1995	Valletta K illi	RCTS	p_0', e_0	16	1
Smith, 1992	Bothkennar K illi	TX	Deformasyon Hz	2	1
Stokoe & Lodde, 1978	San Francisco Körfez K illi	RCTS	p_0', PI	4	1
Stokoe ve diğ., 1980	Offshore K illeri	RCTS	f_{p_0', e_0}	4	1
Stokoe ve diğ., 1994	CL-CH kil zeminler	RCTS	$f_{p_0', e_0, PI}$	14	1
Stokoe ve diğ., 1995	Tertiary ve Savannah Nehri K illi Zeminleri	RCTS	p_0', e_0, PI	9	2
Tabata, 2004	Meibland-2, LBM-1, Oregon-2, LBM-3, ESC-4, Dayton-3, SIV-1, Kao lin	DSDSS	p_0', e_0, PLS	21	8
Tawfiq ve diğ., 1998	Kao lin	RCTS	-	1	1
Teachavorasinskun ve diğ., 2002	Bangkok K illi	CTX	p_0', e_0, PLS	10	1
Temma ve diğ., 2001	Ariake, Sutthisin, Bangkok, Bothkennar, Drammen, Louisville, Pusan	TX	p_0', PI	7	7
Tika ve diğ., 1996	Yunanistan- Kıbrıs K illeri	RCTS	p_0', e_0, PLS, OCR	8	8
Tika ve diğ., 1999	Çeşitli K illi Zeminler	RCTS	e_0, PI	3	3
Tika ve diğ., 2003a	Kao lin, Kıbrıs ve Yunanistan CH zeminleri	RCTS	p_0', e_0, PLS, OCR	16	2
USGS Raporu, 1992	Holosen, körföz kohezyonlu zeminler	RCTS	p_0', e_0, OCR	21	1
Vinale ve diğ., 2001	Metra mo Silt	RC, TX	w_{in} , emme basıncı (suction)	16	1
Vrettos & Savidis, 1999	Peloponnesse ve Preveza Zeminleri	RCTS	p_0', e_0, PI	13	2
Vucetic ve diğ., 1997	Laboratuvar killeri CH	CTX	p_0', e_0, PI, AKO	14	1
Wang & Kuwano, 1999	Kawasaki K illi	CTX	p_0', e_0, PI	11	1
Yamashita ve diğ., 1995	Laboratuvar killeri CH-MH	CTX	S	3	1
Yamashita ve diğ., 1999	Fujinomi K illi	TX, CTX, RC	Test Tipi, Deformasyon Hz,	6	1
Yasuda ve diğ., 1994	Tokyo Körfezi K illi	RCTS	p_0'	7	1
Yinsiri & Soga, 2011	Londra ve Gault K illi	TX	p_0', PI, AKO	14	2
Yuan-giang & Yu, 2004	Xiaoshan County Zemin	CTX	p_0'	3	1
Zavoral & Campanella, 1994	UBC K illi	RC	$f_{p_0', PI}$	6	1
Zdravkovic & Jardine, 1997	HIPF4 Silt	CTX	$f_{p_0', PI}$	4	1
Zen & Higuchi, 1984	Kubama ve Homouka K illeri	RC	PI	8	2



A4-9

Şekil Ek. 1: Saha tepki analizi için kullanılan zemin profilinin orijinal hali (Stewart & Stewart, 1997)



Şekil Ek. 2: Saha tepki analizi için Plaxis 2019’da tanımlanan zemin profili

Tablo Ek. 7: Plaxis 2019'da kullanılan malzeme parametreleri

Material set															
Identification number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Identification	(1) SM-SC	(2) CL-CH	(3) SC-GC	(4) CL-CH/Old Bay	(5) CL	(6) Old Bay Clay	(7) Old Bay Clay	(8) CH/PI:26	(9) CH/PI:26	(10) GC-SC	(11) CL/PI:18	(12) CL/PI:21	(13) CL/PI:27	(14) CL/PI:27	
Material model	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	
Drainage type	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	
Colour	RGB 232, RGB 220, RGB 246, RGB 208, 45, RGB 201, 1, RGB 195, 118, 50	RGB 248, 13, 248	RGB 23, RGB 11, 187, 203	RGB 107, 248, 68	RGB 158, 160, 70	RGB 106, 122, RGB 143, 117, RGB 229, 202, 143									
Comments															
General properties															
γ_{unsat}	kN/m ³	16.18	13.90	19.11	19.74	19.11	19.11	17.06	19.95	19.95	19.42	19.42	20.74	20.80	21.00
γ_{sat}	kN/m ³	17.18	14.90	20.11	20.74	20.11	20.11	18.06	20.95	20.95	20.42	20.42	21.74	21.80	22.00
Advanced															
Void ratio															
Dilatancy cut-off	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e_{int}	0.7000	2.000	0.5700	0.5700	0.7400	0.7200	0.9900	0.5600	0.5600	0.5600	0.5700	0.5300	0.5500	0.5200	0.4900
e_{min}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
e_{max}	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0
Damping															
Rayleigh α	0.01206	0.01194	0.01194	0.01194	0.01194	0.01181	0.01181	0.01181	0.04409	0.04409	0.01181	0.01181	0.04409	0.01131	0.01131
Rayleigh β	1.270E-3	1.589E-3	1.589E-3	1.589E-3	1.589E-3	1.907E-3	1.907E-3	1.907E-3	1.899E-3	1.899E-3	1.907E-3	1.907E-3	1.899E-3	3.172E-3	3.172E-3

Tablo Ek. 8: Plaxis 2019’da kullanılan malzeme parametreleri (Devam)

Material set															
Identification number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Identification	(1) SM-SC	(2) CL-CH	(3) SC-GC	(4) CL-CH-Old Bay Clay	(5) CL	(6) Old Bay Clay Pt:14	(7) Old Bay Clay Pt:33	(8) CH Pt:26	(9) CH Pt:26 Vs=403	(10) GC-SC Vs=403	(11) CL Pt:18	(12) CL Pt:21	(13) CL Pt:27	(14) CL Pt:27	
Material model	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	HS small	
Drainage type	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	
Colour	RGB 232	RGB 220	RGB 246	RGB 208, 45, 37	RGB 201	RGB 195, 118, 50	RGB 248, 13, 248	RGB 23, 1	RGB 11, 187, 21	RGB 107, 248	RGB 158, 11	RGB 106	RGB 143	RGB 229, 1	
Stiffness															
E_{30}^{ref}	81.60E3	18.03E3	8000	77.29E3	77.29E3	93.68E3	67.30E3	74.39E3	211.4E3	211.4E3	180.3E3	210.0E3	211.4E3	275.5E3	120.0E3
E_{oed}^{ref}	102.0E3	52.81E3	22.28E3	226.4E3	226.4E3	200.4E3	198.0E3	217.8E3	619.2E3	619.2E3	270.5E3	628.5E3	619.2E3	683.5E3	355.0E3
E_{ur}^{ref}	306.0E3	67.61E3	28.00E3	289.8E3	289.8E3	232.4E3	252.4E3	278.8E3	792.7E3	792.7E3	811.4E3	811.4E3	792.7E3	826.4E3	456.2E3
power (m)	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
Alternatives															
Use alternatives	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C_c	3.833E-3	0.01307	0.01620	1.595E-3	1.768E-3	1.974E-3	2.312E-3	1.648E-3	0.5795E-3	0.5795E-3	1.335E-3	0.5599E-3	0.5758E-3	0.5115E-3	0.9653E-3
C_s	1.150E-3	9.185E-3	0.01161	1.121E-3	1.243E-3	1.532E-3	1.632E-3	1.158E-3	0.4074E-3	0.4074E-3	0.4006E-3	0.3903E-3	0.4048E-3	0.3807E-3	0.6760E-3
e_{init}	0.7000	2.000	0.5700	0.5700	0.7400	0.7200	0.9900	0.5600	0.5600	0.5600	0.5700	0.5300	0.5500	0.5200	0.4900
Strength															
c_{ref}	8.000	7.800	67.00	43.00	43.00	79.00	43.00	68.00	68.00	68.00	1.000	153.0	20.00	20.00	20.00
φ (phi)	10.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	30.00	1.000	1.000	1.000	1.000
ψ (psi)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Small strain															
$\gamma_{0.7}$	0.01000	0.01000	5.000E-3	0.1000	0.1000	0.03000	0.1100	0.05000	0.05000	0.05000	0.1200	0.1200	0.05000	0.1000	0.08000
G_0^{ref}	128.0E3	28.20E3	11.68E3	120.9E3	120.9E3	117.0E3	105.2E3	116.6E3	331.3E3	331.3E3	338.1E3	338.1E3	343.4E3	344.5E3	191.0E3

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Sinan Sarğın
Doğum Yeri	Üsküdar/İstanbul
Doğum Tarihi	09.02.1985
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0535 964 61 03
E-Posta Adresi	ssargin@istanbul.edu.tr
Web Adresi	http://aves.istanbul.edu.tr/ssargin/cv



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Teknik Üniversitesi
Fakülte	İnşaat Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği Bölümü
Mezuniyet Yılı	17.06.2009

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Teknik Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Geoteknik Anabilim Dalı
Programı	Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı
Mezuniyet Yılı	24.07.2012

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler	
Erken , A., Torabi, M., Sargin, S., & Darvishi, A. ,2015, Liquefaction Resistance of Reinforced Sands, <i>6th International Geotechnical Symposium on Disaster Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions</i> , 20-23 Ocak 2015 Chennai, 86-97	
Özçep , F., Öztoprak S., Aysal , N., Bozbey , İ., Okan, T., Öser , C., & Sargin S.,2017, Ground Characterization Studies in Çanakkale Pilot Site of LIQUEFACT Studies, <i>AGU Fall Meeting</i> , 11-15 Aralık 2017 New Orleans, AGU	
Özçep , F., Öztoprak, S., Aysal , N., Bozbey , İ., Tezel, O., Öser , C., & Sargin , S.,2017, LIQUEFACT Project Studies in Canakkale Pilot Site, <i>Proc. of the 9th Congress of Balkan Geophysical Society</i> , 5-9 Eylül 2017 Antalya, 1-20	

- Öztoprak , S., Sargin, S., & Uyar, H. K. ,2016,Pressiyometre Deneyinin Modellenmesi, *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, 13-14 Ekim 2016 Erzurum, ZMGM, 1007-1016
- Öztoprak, S., Bozbey, İ., Öser, C., Sargin, S., Özçep, F., Aysal , N., . . . Almasraf, M. ,2018, Ground Characterization Of Canakkale City Center From A Liquefaction Point Of View,*16th European Conference on Earthquake Engineering. 1*, 18-21 haziran 2018 Selanik,ECEE, 45-67
- Öztoprak, S., Sargin, S., & Özkan,M.,2014, Mutual interaction between cyclic swellingshrinkage and structure of clays, *ASCE Geotechnical Special Publication. 236*, Şanghay: 26-28 Mayıs 2014 ,ASCE, 245-267
- Öztoprak, S., Sargin, S., Uyar, H. K., & Bozbey, İ. ,2018, Modeling of pressuremeter tests to characterize the sands, *Geomechanics and Engineering, 14(6)*, 509-517.
- Öztoprak, S., Sargin, S., Uyar, H. K., & Demirci, T. ,2014, Kumlu zeminlerdeki düşey yüklü kazıklı temellerde temel-kazık-zemin etkileşimi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 15. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, 16-17 Ekim Ankara: ZMGM,363-372
- Quintero, J., Saldanha, S., Millen , M., Fonseca, A. V., Sargin, S., Oztoprak , S., & Kelesoglu , K.,2018, Investigation into the Settlement of a Case Study Building on Liquefiable Soil in Adapazari, Turkey, *ASCE Geotechnical Special Publication*,10-13 Haziran 2018 Teksas,ASCE, 321-336
- Sargin, S., & Erken, A. ,2018, Cyclic behavior and liquefaciton resistance of polypropylene fiber-reinforced sand, *Bulletin International Institute of Earthquake Engineering, 52(2)*, 38-49.
- Sargin, S., Gazi, H., Alhan , C., & Öztoprak, S.,2017, Effect of soil amplification on the response of base-isolated buildings under near-fault earthquakes, *Proc of the 2nd International Conference on Structural Engineering, New Technology and Methods*, 2-4 Nisan Barselona, 4-17
- Sargin, S., Öztoprak, S., & Uyar, H. K. ,2016, Darbeli Kırmataş Kolonların Rijitlik Değişimleri Dikkate Alınarak Modellenmesi, *1.Ulusal Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 12 Ekim 2016 Erzurum, ZMGM, , 79-89
- Sargin, S., Uyar, H. K., & Öztoprak, S.,2018,Numerical Modeling of Piles Constructed Through Different Techniques in Sandy Soils, *Proc. of the 26th European Young Geotechnical Engineers Conference* ,11-14 Eylül Graz, TUGRAZ,192-201
- Sezen, A., Taşkın, B., Erken , A., Sargin, S., Nomaler, G. Ş., Yıldırım , H., & Olgun, C.,2012, 23 Ekim 2011 MW 7.1 Van Depremi ve Geoteknik Bulgular. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, 1-4 Ekim 2012 Isparta, ZMGM,205-212.
- Yıldırım, H., Uçar, M. T., & Sargin, S.,2012, Yüzeysel Temellerde Düşey Yatak Katsayısı Değerlerinin Taşıma Gücü Değerleri Ve Diğer Yöntemler Kullanılarak Elde Edilmesi Ve Karşılaştırılması, *5. Geoteknik Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 5-7 Aralık 2013 Adana, İMO Adana Şubesi ve ZMGM, 220-222.