

**SİSMİK ETKİLER ALAN İNCE DANELİ ZEMİNLERİN RİJİTLİK PARAMETRELERİ
AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlhan Burak DURAN

0709071001

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 07.06.2010
Tezin Savunulduğu Tarih: 30.06.2010

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Akın ÖNALP
Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN
Doç. Dr. Recep İYİSAN

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın konusu sismik etkiler alan ince daneli zeminlerin rijitlik parametreleri açısından değerlendirmesidir.

Çalışmamın başından itibaren bana her konuda yardımcı olan, hiçbir zaman bilgisini ve yardımını esirgemeyen, kendisinden her türlü desteği gördüğüm ve öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyduğum danışman hocam Prof. Dr. Akın Önalp'e teşekkür ederim.

Tüm çalışmam süresince desteklerini esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Ersin Arel'e ve Sakarya Üniversitesi Geoteknik Anabilimdalı öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Sedat Sert, Yrd. Doç. Dr. Aşkın Özocak, Yrd. Doç. Dr. Ertan Bol'a , İstanbul Kültür Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarından çalışma arkadaşlarım Suat Yakut, Aykut Aydın, Yeşim Yekte, Ozan Bilal ve Emre Erbek'e teşekkür ederim.

Ayrıca eğitim hayatım süresince maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Haziran 2010

İlhan Burak DURAN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iii
TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
2. KAYMA MODÜLÜ VE SÖNÜM ORANI	2
2.1. Düşük Deformasyonlu Deneyler	2
2.2. Yüksek Deformasyon Deneyleri	3
2.3. Tekrarlı Yüklemelerde Zemin Davranışı	4
2.3.1. Eşdeğer Doğrusal Modeller	4
2.3.2. Tekrarlı Doğrusal Olmayan Modeller	6
2.3.3. İleri Yapıcı Modeller	7
2.4. Zeminlerin Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkileri	7
3. SIVILAŞMA	16
3.1. Silt ve Genel Tanımı	17
3.2. Zeminlerin Dinamik Davranışını Etkileyen Fiziksel Özellikleri	18
3.2.1. Boşluk Oranı	18
3.2.2. Plastisite İndisi	18
3.2.3. Sıvılık İndisi	19
3.2.4. Doygunluk Derecesi	20

3.2.5.	Dane Boyutu	20
3.2.6.	Aşırı Konsolidasyon Oranı	22
3.3.	Doku ve Dinamik Davranışa Etkisi	23
4.	YÖNTEM	25
5.	DENEYSEL ÇALIŞMA	28
5.1.	Deney Numunelerinin Hazırlanması	28
5.1.1.	Deney Numuneleri İçin Silt Temini	28
5.2.	DSS ve CTX'in Kalibrasyonu	30
5.2.1.	Silikon ile Kalibrasyon	30
5.2.2.	Monterey No.0 Kumu ile Kalibrasyon	32
5.3.	Karışım Numuneleri ve Fiziksel Özellikleri	35
5.3.1.	Bentonit Karışımları Dinamik Deney Sonuçları	37
5.3.2.	Kaolinit Karışımları Dinamik Deney Sonuçları	46
5.4.	İnce Daneli Zeminlerin Sıvılaşma Tanısında Şekil Değiştirmeye Bağlı Değerlendirme	52
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	58
7.	SÖZLÜK	59
8.	KAYNAKÇA	61
9.	EKLER	63
10.	ÖZGEÇMİŞ	66

KISALTMALAR

DSS	: Dinamik kesme kutusu
CTX	: Dinamik üç eksenli
CSR	: Çevrimsel gerilme oranı
LSC	: Limit durum eğrisi
PHRI	: Japonya Kıyı ve Liman Araştırma Enstitüsü
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1: Monterey No.0 kumunun temel özellikleri.....	30
Tablo 5.2: Karşılaştırmalı Monterey No.0 Kumu dinamik deney sonuçları.....	32
Tablo 5.3: Kaolinit ve bentonit karışımlarının fiziksel özellikleri	36
Tablo 5.4: Bentonit karışımları dinamik deney sonuçları.....	37
Tablo 5.5: Kaolinit karışımları dinamik deney sonuçları.....	46
Tablo 5.6: Deformasyona bağlı sıvılaşmanın tanımlanmasında kullanılan grafikler için simgelerin açıklaması.....	54

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Omurga Eğrisi, G_{maks} ve G_{sec}	5
Şekil 2.2: Masing Kuralı.....	5
Şekil 2.3: Deformasyon Bölge Şeması.....	7
Şekil 2.4: Sönüm oranı tanımı.....	8
Şekil 2.5: Rijitlik – Deformasyon İlişkisi.....	9
Şekil 2.6: Boşluk suyu basıncı ve sönüm oranının deformasyon ile ilişkisi.....	10
Şekil 2.7: Aşırı konsolide bentonit ve kaolinit için G_{maks} değerleri.....	10
Şekil 2.8: Test numunelerinin konsolidasyon verileri.....	11
Şekil 2.9: Kaolinitte zamana bağlı G_{maks} artışı.....	11
Şekil 2.10: Kayma modülü-OCR ilişkisi için k parametresi.....	12
Şekil 2.11: Plastiste indisine bağlı G_{maks} artışı değişimi.....	13
Şekil 2.12: Efektif gerilmenin sönüm oranı üzerindeki etkisi.....	13
Şekil 2.13a: Plastisite indisinin G/G_0 üzerindeki etkisi.....	14
Şekil 2.13b: Farklı zemin türleri için G/G_0	14
Şekil 2.14: Efektif gerilmenin G/G_0 üzerindeki etkisi.....	14
Şekil 2.15: Plastisite indisinin G/G_{maks} ve sönüm oranı üzerindeki etkisi.....	15
Şekil 3.1: Doygun kumda dane diziliminin dinamik yüklemeye etkilenmesi.....	17
Şekil 3.2: Dinamik Gerilme Oranına Plastisitenin Etkisi.....	19
Şekil 3.3: Plastisite indisinin dinamik dirence etkisi.....	19
Şekil 3.4: Sıvılaşmanın olduğu çevrim sayısına doygunluk derecesinin etkisi.....	20
Şekil 3.5: Sıvılaşabilir zeminlerin dane dağılımı.....	21
Şekil 3.6: Düşük plastisiteli incelerin, kumların sıvılaşması üzerindeki etkisi.....	22
Şekil 3.7: CSR-Ncyc arasındaki ilişki.....	22
Şekil 3.8: OCR'nin sıvılaşmaya etkisi.....	22
Şekil 3.9: Doku boşlukların şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.10: Kum ile %15 bentonit,%15 kaolinit ve %15 illitin dinamik yüklemeye davranışı.....	24
Şekil 4.1: Kayma deformasyonuna dayalı problem çözümü için kullanılacak deney sistemi.....	25

Şekil 4.2: DSS (<i>dynamic direct simple shear</i>) ve deney numunesi	26
Şekil 4.3: CTX (<i>cyclic triaxial test</i>) ve sistem elemanları.....	26
Şekil 4.4: Hazırlanmış bulamaca ön konsolidasyon basıncının uygulanması	27
Şekil 5.1: Adapazarı Silti Doğal durumda ve işlem sonrası dane dağılım eğrileri	28
Şekil 5.2: Bentonit ve kaolinitin dane dağılım eğrisi	29
Şekil 5.3a: Bentonit LL grafiği.....	29
Şekil 5.3b: Kaolinit LL grafiği	29
Şekil 5.4: Silikonun yatay ve düşey deformasyonlarının belirlenmesi	31
Şekil 5.5: DSS'den alınan silikonun kayma modülü.....	31
Şekil 5.6: Monterey No.0 Kumu CTX-DSS karşılaştırmaları.....	33
Şekil 5.7: CSR- $N_{ru=1}$ CTX ve DSS karşılaştırması	34
Şekil 5.8: CTX ve DSS'in Monterey No.0 Kumu karşılaştırmalı kalibrasyonu.....	35
Şekil 5.9: Bentonit karışımlarının CTX ve DSS deneylerinde farklı değişkenlere göre incelenmesi.....	38
Şekil 5.10: %9 ve %18 bentonit karışımlarının SEM görüntüleri	39
Şekil 5.11: Kayma modülü (G_{sec}) hesabı	40
Şekil 5.12: Hesaplanan ve DSS den alınan çevrim sayısına göre kayma modülü değerleri karşılaştırması	40
Şekil 5.13: Bentonit karışımları DSS kayma modüllerinin çevrim sayısına göre değişimi.....	41
Şekil 5.14: Normalize edilmiş kayma modülü azalımı	42
Şekil 5.15: 5. çevrim için histeresis ilmekleri.....	42
Şekil 5.16: Bentonit karışımlarının sönüm oranları	43
Şekil 5.17: CTX de giriş elastisite modülü hesabı	43
Şekil 5.18: %12 bentonitin çevrim sayısına göre γ/ϵ_z değişimi	45
Şekil 5.19: Kaolinit karışımları CTX ve DSS deney sonuçlarının farklı değişkenlere göre incelenmesi	47
Şekil 5.20: Kaolinit karışımları DSS kayma modüllerinin çevrim sayısına göre değişimi.....	48
Şekil 5.21: Kaolinit karışımlarının normalize edilmiş kayma modülü azalımları	49
Şekil 5.22: Kaolinit karışımları sönüm oranları.....	49
Şekil 5.23: %12 Kaolinit karışımı γ/ϵ_z oranının çevrim sayısına göre değişimi	50
Şekil 5.24: %100 yıkama silt ve %100 kaolinitin DSS deney sonuçları.....	51
Şekil 5.25 : CTX-Kaolinit Karışımları	54

Şekil 5.26: CTX-Bentonit Karışımları	55
Şekil 5.27: DSS-Bentonit Karışımları	55
Şekil 5.28: İlk 15 çevrim için DSS-Bentonit kayma modülü azalım eğrileri	56
Şekil 5.29: DSS-Kaolinit Karışımları.....	57
Şekil 5.30: İlk 15 çevrim için DSS-Kaolinit kayma modülü azalım eğrileri.....	57

SEMBOL LİSTESİ

G	: Kayma modülü
G_{max}	: Maksimum kayma modülü
G_{sec}	: Kiriş kayma modülü
τ	: Kayma gerilmesi
γ	: Kayma birim şekil değiştirmesi
η	: Sönüm oranı
r_u	: Boşluk basıncı oranı
σ₀'	: Efektif gerilme
σ₃	: Çevre basıncı
ε_z	: Eksenel birim kısalma
E	: Elastisite modülü
E_{sec}	: Kiriş elastisite modülü
v	: Poisson oranı
K₀	: Sükunette yanal toprak basıncı katsayısı
P_a	: Atmosfer basıncı
N	: Çevrim sayısı
N_{r_u=1}	: Boşluk suyu basıncı oranının 1 olduğu çevrim sayısı
N_{%±5ε_z}	: Toplam eksenel birim şekil değiştirmesinin %10 olduğu çevrim sayısı
N_{%±5 γ}	: Toplam kayma birim şekil değiştirmesinin %10 olduğu çevrim sayısı
f	: Frekans
w_n	: Doğal su muhtevası
w_L	: Likit limit
w_P	: Plastik limit
I_P	: Plastisite indisi
I_L	: Sıvılık indisi
D₅₀	: Ortalama çap
e	: Boşlukoranı

G_s : Özgöl ağırlık
%FC : Yüzde ince içeriği
%C : Yüzde kil içeriği

ÖZET

İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı Programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın amacı; laboratuvar ortamında hazırlanmış ince daneli zeminlerin, dinamik üç eksenli hücre (CTX) ve basit kesme (DDSS≡DSS) gibi iki farklı dinamik deney sisteminde tekrarlı yükler altındaki birim şekil değiştirmeler ile rijitlik parametreleri arasındaki ilişkinin incelenmesi ve sıvılaşmanın şekil değiştirmeye dayalı tanımlaması için tesbitler yapmaktır.

Deneysel çalışmalara başlamadan önce her iki cihazın dinamik yükleme altında davranışı bilinen özel numuneler (silikon ve Monterey No.0 kumu) ile kalibrasyonları yapılmıştır. Deney numunesi olarak farklı bentonit ve kaolinit yüzdelere sahip silt karışımları hazırlanmıştır. DSS ve CTX deneylerinin tümünde frekans $f=0.50$ Hz ve çevrimsel gerilme oranı $CSR=0.35$ olup DSS için normal gerilme, CTX için ise çevre basıncı 100 kPa'dır. Ayrıca her bir numunenin sınıfı, kıvam limitleri, dane dağılımı gibi fiziksel özellikleri belirlenmiş bu özelliklerin de dinamik davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda; lineer elastik malzemeler için DSS ve CTX'de oluşan birim şekil değiştirmeler arasında $\gamma/\varepsilon_z \approx 2$ gibi bir orandan bahsetmenin mümkün olduğu görülmüştür. Ancak, tez çalışmasında kullanılan yapay zemin numuneleri için bu oranın sabit olmayıp çevrim sayısına (N) göre 2 ile 0.4 arasında değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Deneylerde kullanılan cihazların çalışma prensiplerine bağlı olarak üzere, numunelerin sıvılaşması için her iki sistemde uygulanması gereken çevrimsel gerilme oranı (CSR) eğrilerinin benzer eğilim içerisinde olduğu belirlenmiştir. Numunelerin rijitlik parametresi (G:kayma modülü) açısından değerlendirmede, DSS'den doğrudan hesaplanan sonuçlar ile CTX'den dolaylı olarak elde edilen sonuçların birbirleriyle uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Plastisite indisi arttıkça, çevrim sayısına karşı ΔG değeri ve numunelerin sönüm oranı azalmaktadır. Ayrıca, ince daneli zeminlerin dinamik yüklemeye karşı direncini kil yüzdesinden ziyade kil mineralinin fiziksel veya kimyasal özelliğinin belirlediği gibi bir izlenim edinilmiştir. İnce daneli zeminlerde sıvılaşmanın deformasyona bağlı tanımlanmasında, $\pm 5\%$ çift yönlü deformasyon genliği ve bu deformasyonun ölçüldüğü çevrim sayısının, yapay numunelerde sıvılaşma yenilmesinin başladığı ve plastik duruma geçtiği sınır değeri olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler : Silt, yapay karışım, DDSS, CTX, bentonit, kaolinit, birim şekil değiştirme, kayma modülü, sönüm oranı

ABSTRACT

The purpose of this master's thesis is to implement a comparative study of the results obtained in cyclic triaxial (CTX) and cyclic simple shear (DDSS≡DSS) tests using homogeneous silt-clay mixtures prepared by slurry consolidation method. The study concentrates on deformations under dynamic loads to arrive at judgements of rigidity and resulting liquefaction failure.

The CTX and the DSS systems were calibrated by dummy tests on aged silicone compound and Monterey No.0 standard sand, used by several investigators and both were found to comply with the findings in the literature.

Samples for testing were constituted by mixing the notorious Adapazari silt with increasing percentages of commercially available kaolin and bentonite. The samples were prepared by consolidating the slurries to 100 kPa, a standard value.

Dynamic testing was performed at constant values of normal/cell pressure of $\sigma = 100$ kPa, frequency ($f = 0.50$ Hz), and cyclic stress ratio ($CSR = 0.35$) to minimise the number of variables. Measurements of consistency limits, grain size distribution were also made to evaluate their influence on seismic behaviour.

A comparison of shear strains and axial strains on linearly elastic material showed that the ratio is constant at $\gamma/\varepsilon_z \approx 2$, whereas this ratio was found to be variable between 2 and 0.4 for artificial silt-clay mixtures. The evaluation of rigidity indices, the shear modulus and damping ratio (G and η) in the CTX and DSS tests showed close agreement. The values of ΔG and η were found to decrease by the increases in the plasticity index (I_p). An impression was further gained that the physico-chemical properties of the clay mineral involved, has a pronounced effect on the dynamic rigidity of the fine grained mixtures.

It was also found that 5% double amplitude strain (DSA) and the corresponding number of cycles (N) is a more realistic indicator of the initiation of plastic behaviour and the resulting failure in reconstituted silt-clay mixtures compared to other criteria.

Keywords: Silt, artificial mixture, slurry deposition, dynamic simple shear, cyclic triaxial shear, bentonite, kaolinite, strain, shear modulus,

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Bu tezin amacı; laboratuvar ortamında hazırlanmış ince daneli zeminlerin, üç eksenli hücre (CTX) ve basit kesme (DSS) gibi iki farklı dinamik deney sisteminde tekrarlı yükler altındaki şekil değiştirme ile rijitlik parametreleri aralarındaki ilişkinin incelenmesi ve olası sıvılaşmanın şekil değiştirmeye dayalı tanımlamasını yapmaktır.

2. KAYMA MODÜLÜ ve SÖNÜM ORANI

Zemin dinamiği ve deprem mühendisliği açısından zeminlerin deformasyon karakteristiği ve temel davranışı kayma modülü (G) ve sönüm oranı (η) ile ifade edilmektedir. Bu parametreler gerek zeminin, gerekse zemin-yapı etkileşiminin dinamik yükler (deprem, trafik yükü, makine titreşim etkisi veya patlama) altında davranışının tahmini için önem taşımaktadır.

Özellikle deprem yüklerinin neden olduğu tekrarlı kayma gerilmelerinin zeminin fiziksel özelliklerine bağlı olarak oldukça farklı boyutlarda şekil değiştirmelere yol açtığı, bundan dolayı zeminin kayma mukavemetinin azaldığı ve gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin değiştiği bilinmektedir. Fakat zemin türü gibi sonucu baştan öngörülebilir bir etkene gelmeden önce üzerinde çalışılan deformasyon seviyesinin rijitlik üzerinde daha etkili olduğu yakın zamanlarda anlaşılmaya başlanmıştır (Burland 1989). Hatta dinamik veya statik problemler için, düşük seviye (*small-strain level*) olarak sayılan 10^{-5} ve orta seviye aralığı (*intermediate-strain level*) olan 10^{-5} - 10^{-3} kayma birim şekil değiştirme (γ) aralığında doğru ölçümlerin alınmasının önemi son yıllarda fark edilmiştir.

Düşük deformasyon değerleri için kayma modülü ve sönüm oranı hem arazi ortamında hem de laboratuvar ortamında ölçülebilir. Ancak büyük deformasyon değerleri için bu parametreler genelde laboratuvar ortamında belirlenebilmektedir. Laboratuvar ortamında yaygın olarak kullanılan deneyler; dinamik kesme kutusu, dinamik üç eksenli, rezonant kolon ve burulmalı içi boş silindirdir.

2.1. Düşük Deformasyonlu Deneyler

Zeminin dinamik özelliklerini düşük deformasyon düzeyinde tanımlayan deneyler; rezonant kolon deneyi (*resonant column test*), ultrasonik sinyal deneyi (*ultrasonic pulse test*) ve pizoelektrik bender elemanı deneyi (*piezoelectric bender element test*) olarak özetlenebilir. En sık kullanılan rezonant kolon deneyi ile silindirik numuneler elektromanyetik yükleme sistemi vasıtasıyla harmonik burulma veya eksenel

yükleme yapılır. Deneyde zemin rijitlik ve sönümlenme özellikleri ölçülerek, efektif çevre basıncı, birim deformasyon genliği ve zaman etkileri incelenir. Ultrasonik sinyal deneyi ile numune ucuna ultrasonik alıcı ve verici yerleştirilerek oluşturulan gerilmeye bağlı olarak dalga yayılma hızları bulunur. Genellikle deniz tabanı çökelleri gibi yumuşak zeminlerde kullanılmaktadır. Kayma dalgası hızlarını ölçmede kullanılan piyezoelektrik bender elemanı deneyi ile numunenin her iki ucuna zıt uçlar batırılıp, S dalgaları üretilir ve hız ölçümü yapılır.

2.2. Yüksek Deformasyon Deneyleri

Yüksek kayma birim deformasyonu genliklerinde zeminlerde hacim değişimi oluşmaktadır. Drenajlı yüklemelerde koşullarında hacimsel birim deformasyon gözlenirken, drenajsız yüklemelerde şartlarında boşluk suyu basınçlarında ve efektif gerilmelerde değişimler olmaktadır. Yüksek deformasyon eleman deneyleri; tekrarlı üç eksenli hücre kesme deneyi, tekrarlı doğrudan basit kesme ve tekrarlı burulmalı deneyleridir.

Tekrarlı üç eksenli deneyde (CTX, *cyclic triaxial test*), silindirik bir zemin numunesi ince kauçuk bir kılıf ile kuşatılmış olarak iki yüklem plakası arasına yerleştirilir ve çevre basıncı ile eksenel gerilme uygulanır. Deneyde deviatör gerilme havalı ya da hidrolik yükleyici ile gerilme kontrollü veya mekanik yükleyici ile deformasyon kontrollü olarak uygulanır. Tekrarlı üç eksenli deneyde çoğunlukla çevre basıncı sabit olup, eksenel yükler ise 1 Hz frekanslarda tekrarlı olarak uygulanmaktadır. Deneyler izotrop veya anizotrop konsolidasyon koşullarında tekrarlanabilmektedir. İzotrop koşulda konsolide edilen deneyler kayma gerilmelerinin sıfır olduğu düz yüzeyli sahaları temsil etme amacıyla uygulanır. Başlangıç anında statik kayma gerilmelerinin mevcut olduğu yamaç şartlarını modellemek için anizotrop konsolide edilmiş üç eksenli deneyler tercih edilir. Bazı durumlarda hücre basıncı tekrarlı uygulanarak, S dalgalarına benzer şekilde Mohr dairesi etrafında gerilme izleri belirlenir. Üç eksenli basınç deneyinde ölçülen gerilme ve birim deformasyonlar kayma modülü ve sönüm oranını hesaplamada kullanılabilir. İri kum ve çakıllar üzerinde uygulanan deneylerde kılıf (membran) penetrasyon etkileri dikkate alınmalı ve efektif gerilmelerin, rijitlik ve sönüm oranı ölçümlerinde hatalara sebep olması engellenmelidir. Tekrarlı basit kesme deneyi (DSS, *dynamic simple shear test*) ile deprem gerilme şartları daha gerçekçi olarak modellenebilmekte ve bu

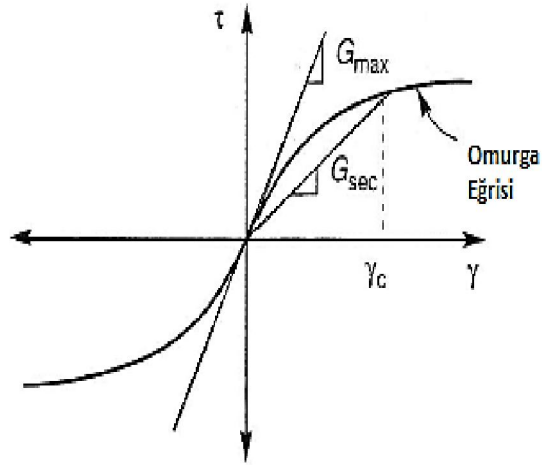
nedenle sınırlama potansiyelini belirlemede en sık kullanılan yöntem olarak uygulanmaktadır. Silindirik numune rijit sınır plakaları veya üst üste yığılmış halkalar ile sınırlandırılarak, tekrarlı yatay kayma gerilmelerine maruz bırakılır. Bu halkalar sayesinde numune etrafında K_0 etkisi kadar çevre basıncı oluşturulur. Numune tabanı veya tepesine uygulanan kayma gerilmeleri sonucu S dalgalarına maruz kalan zeminlere benzer şekilde numunelerde deformasyonlar oluşur. Deneyde kayma gerilmelerinin yalnızca taban ve üst yüzeylere uygulanması uniform olmayan gerilmelere sebep olur. Ancak uniform olmayan gerilme etkileri numunenin çap/yükseklik oranı artırılarak azaltılabilir. Tekrarlı burulmalı deney sistemi ile izotrop veya anizotrop gerilme şartlarına izin verilerek yatay düzlemde tekrarlı kayma gerilmeleri uygulanır. Geniş bir aralığa sahip deformasyon düzeyi içerisinde rijitlik ve sönümlenme özellikleri tespit edilir.

2.3. Tekrarlı Yüklemlerde Zemin Davranışı

Dinamik zemin özellikleri yoğunluk ve gerilme şartlarına ek olarak zemin yapısı, yaşı, gerilme deformasyon tarihçesi ve çimentolanma gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Zemin rijitliğinin tekrarlı birim deformasyon genliği, boşluk oranı, ortalama asal efektif gerilme, plastisite indisi, aşırı konsolidasyon oranı ve tekrarlı yük sayısı gibi faktörlere bağlı olduğu laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlarla ortaya konmuştur. Ancak tekrarlı yükler altında zemin davranışının daha iyi açıklanabilmesi amacıyla üç tip model geliştirilmiştir. Bu modeller; eşdeğer doğrusal modeller, tekrarlı doğrusal olmayan modeller ve ileri yapıcı modellerdir.

2.3.1. Eşdeğer Doğrusal Modeller

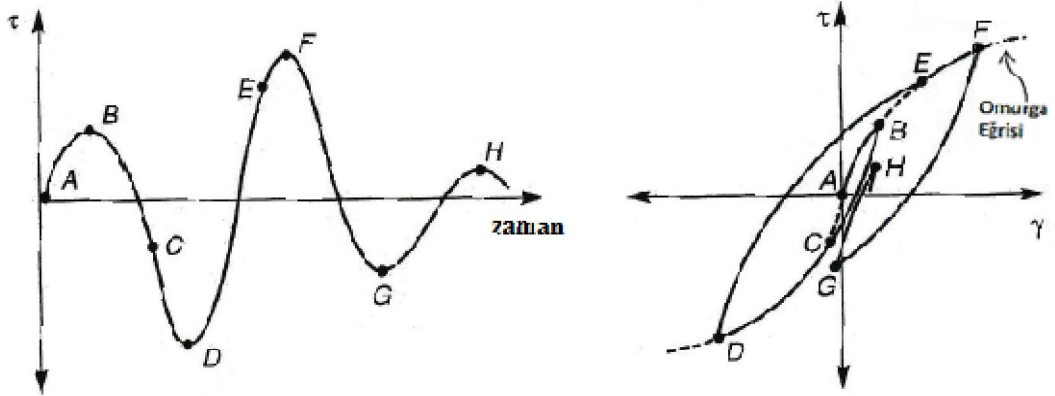
Eşdeğer doğrusal modeller, simetrik tekrarlı yüklemeye maruz zeminlerin histeresis döngüsü sergilediğini ve bu döngünün iki önemli özelliğinin eğim ve genişlik olduğunu belirtmektedir. Döngünün eğimi zeminin rijitlik derecesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ayrıca farklı tekrarlı birim deformasyon genliklerinin histeretik döngülerinin uç noktaları birleştirilerek omurga eğrisi oluşturulur. Elde edilen omurga eğrisinin orijindeki eğimi maksimum kayma modülü G_{maks} 'ı ifade eder (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Omurga Eğrisi, G_{maks} ve G_{sec} (Kramer, 1995)

İlk yükleme eğrisi biliniyorsa histeresis ilmikleri şu yaklaşımlarla oluşturulabilir (Masing Kuralı Şekil 2.2):

1. Her yük tersinmesinde kayma modülü G , omurga eğrisinin başlangıç teğet modülüne eşit bir değer alır.
2. Yükleme- boşaltma eğrilerinin biçimi omurga eğrisi gibi, ancak onun iki katı ile büyümüş olarak belirir.
3. Bir önceki çevrimde kayma birim şekil değiştirmenin maksimum genliği γ aşılmış ise yükleme-boşaltma eğrileri omurga eğrisini izlerler.
4. En son yeniden yükleme-boşaltma eğrisi önceki benzer eğrileri keserse τ - γ bağıntısı bir önceki eğriyi izler.



Şekil 2.2: Masing Kuralı (Kramer, 1995)

Çevrimsel yükleme A noktasından başlar ve A'dan B'ye kadar olan başlangıç durumunda omurga eğrisini takip eder, bu bölge için hesaplanan kayma modülü maksimum kayma (G_{maks}) modülüdür. B noktasından itibaren yükleme yön değiştirir ve 2. kurala uygun olarak gerilme-deformasyon eğrisi devam eder. Boşaltma eğrisi 3. kurala uygun olmak üzere C noktasında omurga eğrisi ile kesişir ve yüklemenin tekrar yön değiştirdiği D noktasına kadar omurga eğrisini takip eder. Geri yükleme eğrisi D noktasından 2.kurala uygun olarak F noktasına kadar geri çıkar ve aynı prosedürler tekrarlayarak devam eder.

Zemin rijitliği yükleme sırasında herhangi bir noktada teğet kayma modülü G_{tan} olarak tanımlanmaktadır. Döngünün genel eğimi G_{sec} olarak kabul edilir ve τ_c kayma gerilmesi, γ_c kayma birim deformasyon genliği olmak üzere;

$$G_{sec} = \tau_c / \gamma_c \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Bir elemanın kiriş kayma modülü (G_{sec}) tekrarlı kayma birim deformasyon genliğine bağlı olarak değişmektedir. Ancak bu değişim ters orantılı olup birim deformasyon genliği artarken sekant kayma modülü azalmaktadır.

Tekrarlı eşik kayma deformasyonunun altındaki birim deformasyonlarda enerjinin histeresis sönümlemesinin teorik olarak beklenmemesine karşın deneysel araştırmalar sonucunda düşük birim deformasyon değerlerinde de enerji sönümlenmeleri gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu araştırmalar sönüm oranının sıfır olmadığı ve birim deformasyon genliği ile arttığını göstermiştir.

2.3.2. Tekrarlı Doğrusal Olmayan Modeller

Tekrarlı doğrusal olmayan modeller zemin kayma dayanımını boşluk suyu basınçlarıyla birlikte, drenajsız tekrarlı yükleme altında efektif gerilmedeki değişimleri de ortaya koyabilmektedir. Omurga eğrisi, boşaltma-yükleme davranışı ve rijitlik düşüşü gibi ortak temeller üzerine kurulan bu modellerde düzensiz yükleme, yoğunlaşma, boşluk suyu basıncı değişimi gibi etkiler modellenmeye çalışılmıştır. Zemin tepkisini hesaplama modellerinde kullanıldığında, deprem sırasında boşluk suyu basıncı oluşumunun, değişiminin ve sönümlenmesinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

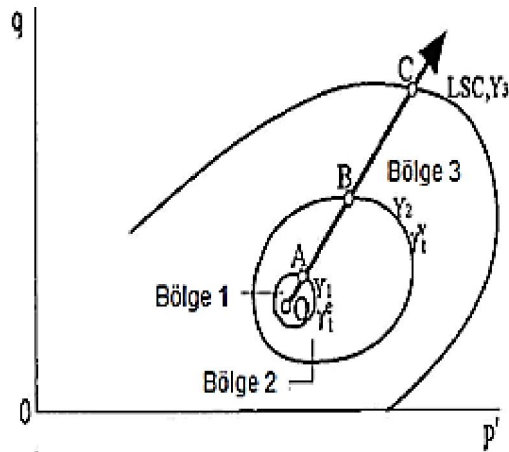
2.3.3. İleri Yapıcı Modeller

İleri yapıcı modeller genel başlangıç gerilme şartları, gerilme izleri, asal gerilme eksenleri, tekrarlı yükleme, birim deformasyon hızları, drenajlı ve drenajsız zemin davranışı ilkeleri üzerine geliştirilmiştir. İleri yapıcı modeller zeminlerin tekrarlı yükleme davranışlarını genelleştirmeye imkân vermesine karşın çok fazla parametreye ihtiyaç olduğundan kullanımı sınırlıdır.

2.4. Zeminlerin Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkileri

Zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını, bir başka ifadeyle dinamik özelliklerini, tanımlarken bunları gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri olarak iki gruba ayrılabilir (Altun ve diğerleri, 2003). Gerilme-şekil değiştirme özellikleri olarak genellikle dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin ve bunların birim şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimlerinin bulunması anlaşılır. Mukavemet özellikleri olarak da göçmeye veya büyük şekil değiştirmelere neden olan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayıları kullanılır. Bu iki grup özelliklerin bulunması için çoğunlukla aynı tür deney sistemlerinden faydalanılır.

Literatürde birçok çalışmada belirtildiği gibi, zeminin davranışı (limit durum eğrisi LSC (*limit state curve*) içinde kalmak şartıyla) lineer elastik durumdan plastik durumuna kadar üç bölgeye ayrılmaktadır, Şekil 2.3 (Jardine, 1992; Hight ve Higgins, 1995).

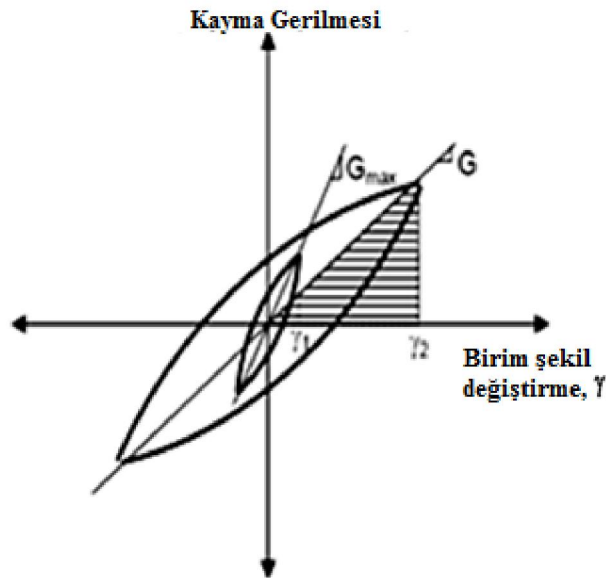


Şekil 2.3: Deformasyon Bölge Şeması (Jardine, 1992)

Düşük deformasyon değerleri ($\gamma < 10^{-5}$) için (bölge 1 de) lineer bir gerilme-deformasyon ilişkisi görülmektedir. Bu bölgede kayma modülü maksimum değere, sönüm oranı ise minimum değere sahiptir. Bu bölge için istenilen özelliklerin

belirlenmesinde “lineer elastik teori”ye uygun modellerin kullanımı daha doğru olmaktadır. Bu şekil değiştirme seviyesinde zemin davranışının modellenmesinde “kayma modülü” en önemli parametredir. Yine bu bölge için, Şekil 2.3’de görüldüğü gibi γ_t^c değeri lineer elastik kayma deformasyonunun eşik değeridir ve zeminin türüne bağlı olarak değişir.

Şekil değiştirme seviyesinin yaklaşık olarak 10^{-3} den düşük olması durumunda veya gerilme izi eğrisi Y1 (A noktası) yenilme düzleminden geçip Y2 (B noktası) seviyesine ulaşana kadar gerilme-deformasyon ilişkisi lineer olmayan davranış sergilediğinden zemin davranış özellikleri “elasto-plastik teori”ye daha uygun olmaktadır. Bu bölgedeki deformasyonunun en üst limiti olan değeri hacimsel kayma deformasyonu eşik değeri, γ_t^v olarak ifade edilmektedir. Bu şekil değiştirme aralığına ise orta deformasyon adı verilir. Bu deformasyon seviyesinden itibaren numune rijitliğinin birim azalım miktarı ve şekil değiştirmeler artmaya başlar. Yine bu seviye ile tekrarlı yüklemelerle beraber enerji kayıpları oluşur ve zeminin bu soğurma özelliğini temsil etmek için kullanılan sönüm oranından bahsedilmeye başlanabilir. Şekil 2.4’de gösterilen taralı alan zemin tarafından soğurulan enerjinin büyüklüğünü göstermektedir.

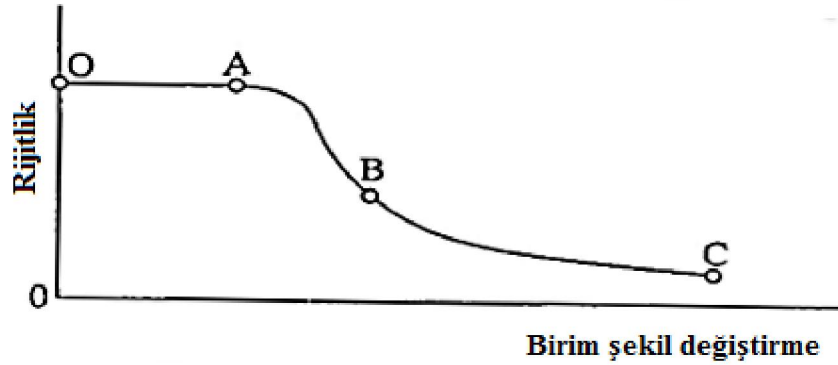


Şekil 2.4: Sönüm oranı tanımı

Sönüm oranı taralı alanın bir fonksiyonu olarak denklem (2.2) ile ifade edilir. Bu denklemde, A_L histeresis ilmeğinin alanını, A_T grafik altında kalan taralı alanı, η ise yüzde cinsinden sönüm oranını göstermektedir.

$$\eta = \frac{A_L}{4\pi A_T} * 100 \quad (2.2)$$

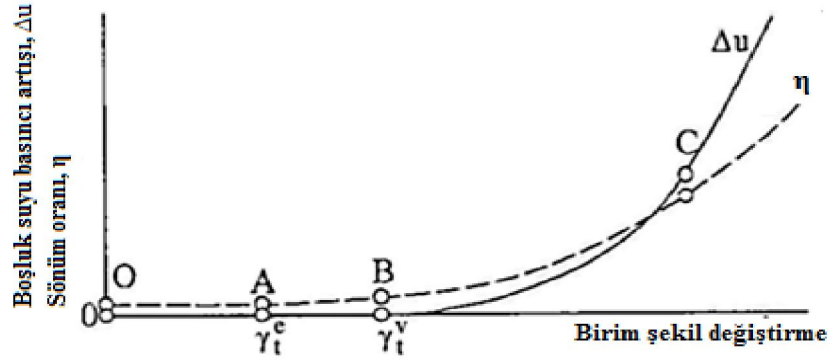
Bu deformasyon seviyesine kadar şekil değiştirmelerin henüz yeterince küçük olduğu ve zemin özelliklerinde kalıcı değişikliklerin oluşmadığı kabul edilir. Ayrıca, kayma modülünün ve sönüm oranının da tekrarlı yüklemeler sonucu değişmediği de kabul edilir. Bu sabit seviyeli zemin davranışı “azalmayan histeresis türü” (*undegraded hysteresis type*) olarak isimlendirilir. Bu tür zemin davranışlarını bünyesel olarak modelleyebilmek için en uygun seçim lineer visko-elastik teori olmaktadır (Kelvin, Maxwell). Lineer olmayan, çevrimden bağımsız model çalışmalarında ise yine enerji kayıplarıyla beraber lineer olmayan deformasyonların dikkate alınabildiği modellerle (Hiperbolik, Ramberg-Osgood) gerilme-deformasyon eğrileri ve dolayısıyla zeminin kayma modülü ve sönüm oranı elde edilebilmektedir. Sonuç olarak, kalıcı deformasyonların oluşmadığı orta deformasyon seviyesindeki zemin davranışını temsil eden en önemli parametreler kayma modülü ve sönüm oranıdır denilebilir.



Şekil 2.5:Rijitlik – Deformasyon İlişkisi(Kallioglou vd, 2008)

Birim kayma deformasyonunun 10^{-2} den büyük olması durumunda tekrarlı yüklemeler altındaki zeminde oluşan şekil değiştirmelerin kalıcı olduğu söylenebilir. Bu seviyeden sonra kayma modülü ve sönüm oranı tekrarlı yüklemeler ile birlikte değişimlerini sürdürürler. Bu durumda zeminin davranışı “azalan histeresis türü” (*degraded hysteresis type*) olarak isimlendirilir. Bu deformasyon seviyesi için de şekil değiştirmelerin “plastik teori”ye uygun olduğu kabul edilerek model çalışmaları yapılabilmektedir. Şematik olarak açıklamak gerekirse, gerilme izi eğrisi Y2 yüzeyinden geçtiği zaman (B ve C noktaları arasındaki Bölge3 Şekil 2.3) inelastik gerilme-deformasyon davranışı gözlenmeye başlanır. Rijitlik azalımı ve

sönüm oranı artışı devam ederken plastik deformasyonlar oluşur. Ayrıca γ_t^v değerinden sonra boşluk suyu basıncı da artmaya başlar (Şekil 2.6).

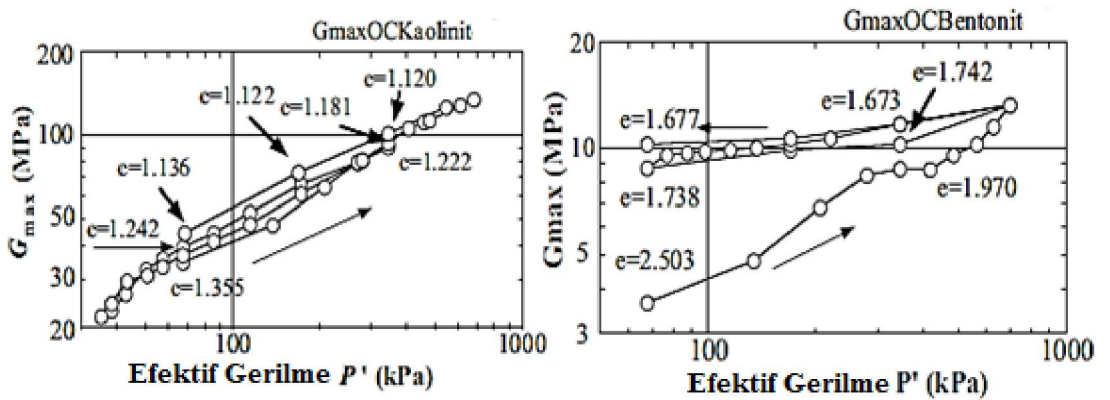


Şekil 2.6:Boşluk suyu basıncı ve sönüm oranının deformasyon ile ilişkisi (Kallioglu vd, 2008)

Hardin ve Black (1968), normal konsolide killerin kayma modülü değerlerini boşluk oranlarına göre incelemiştir. G_{maks} değeri boşluk oranı ve ortamda etkiyen izotrop konsolidasyon basıncı cinsinden ifade edilmiştir.

$$G_{maks} = 3230 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \sqrt{\sigma_0'} \quad (2.3)$$

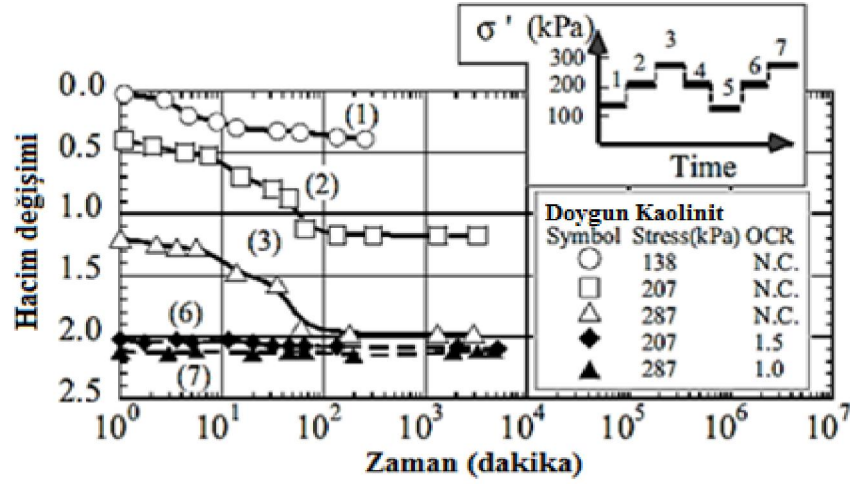
Formüldeki 3230 ve 2.973 değerleri boyutsuz parametreler olup numunenin sınıfına bağlı olarak değişmektedir. Araştırmacılar ayrıca, aşırı konsolide kaolinit ve bentonit yükleme-boşaltma durumları için G_{maks} değişimini incelemiş ve kaolinitin bentonite göre daha elastik bir davranışa sahip olduğunu savunmuşlardır (Şekil2.7).



Şekil 2.7: Aşırı konsolide bentonit ve kaolinit için G_{maks} değerleri (Hardin vd, 1968)

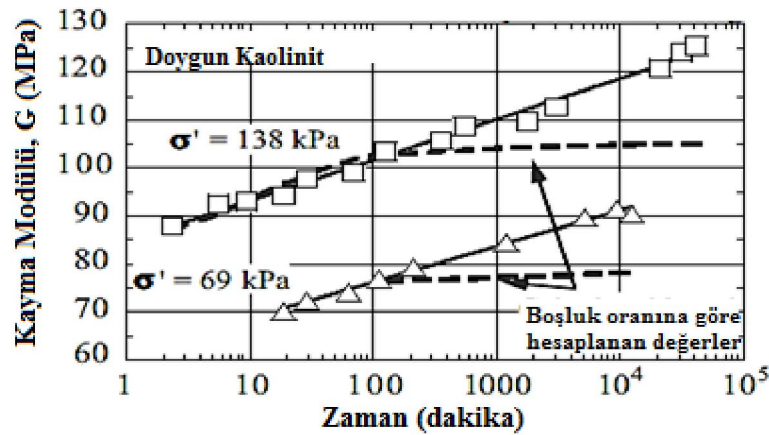
Afifi ve Richart (1973), çalışmalarında rezonant kolon deney sistemini kullanarak zamanın kayma modülü üzerindeki etkisini incelemiştir. Şekil 2.8'de

numunelerin sıkışma eğrileri ve uygulanan yükleme ve boşaltma eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Test numunelerinin konsolidasyon verileri (Afifi vd, 1973)

Numuneler birincil konsolidasyonlarını yaklaşık olarak 100 dakika civarlarında tamamlamışlardır. Şekil 2.9'da normal konsolide kaolinit numunesi için G_{maks} değerinin zamanla arttığı görülmektedir. Bu grafikte dikkat çeken özellik birincil konsolidasyonunun tamamlandığı 100 dakikadan sonra G_{maks} değerinin artmaya devam etmesidir. Bu nedenle araştırmacılar 100 dakikadan sonraki G_{maks} artışının, konsolidasyon sıkışmasından değil, yaşlanmadan kaynaklandığını savunmuşlardır.

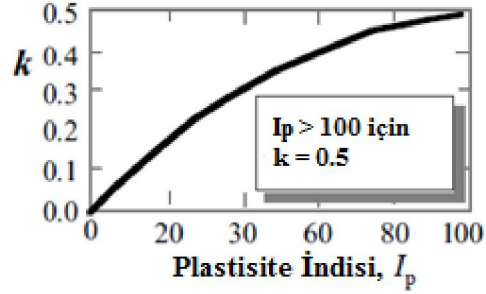


Şekil 2.9: Kaolinitte zamana bağlı G_{maks} artışı (Afifi vd, 1973)

Hardin (1978), OCR değerinin kayma modülü üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla killi numuneler üzerinde yapmış oldukları deneyler sonucunda, çok küçük kayma deformasyonu aralığında kalmak şartıyla maksimum kayma modülü değeri olan G_{maks} için;

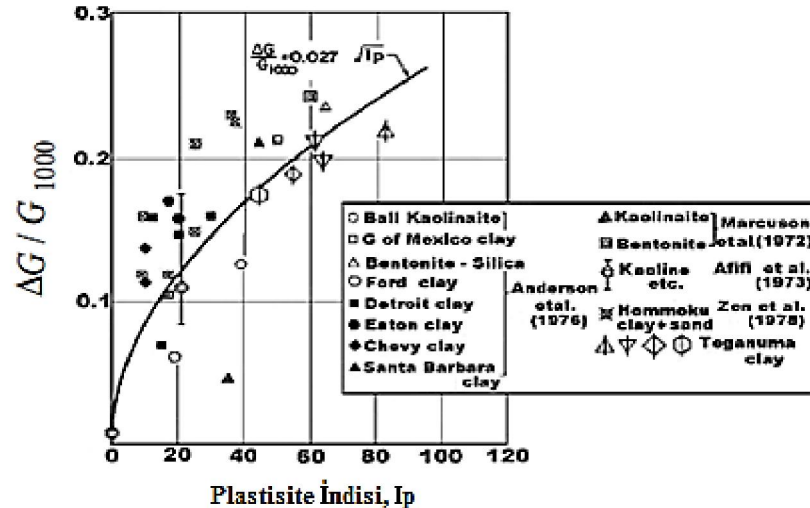
$$G_{\max} = 625 \frac{OCR^k}{0.3 + 0.7e^2} \sqrt{P_a P'} \quad (2.4)$$

eşitliğinin kullanılabileceğini ifade etmiştir. P_a , ortamda etkiyen atmosfer basıncını, P' ortalama efektif asal gerilmeyi ($(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')/3$), k parametresi ise plastisite indisine bağlı olan bir katsayıyı göstermektedir (Şekil 2.10).



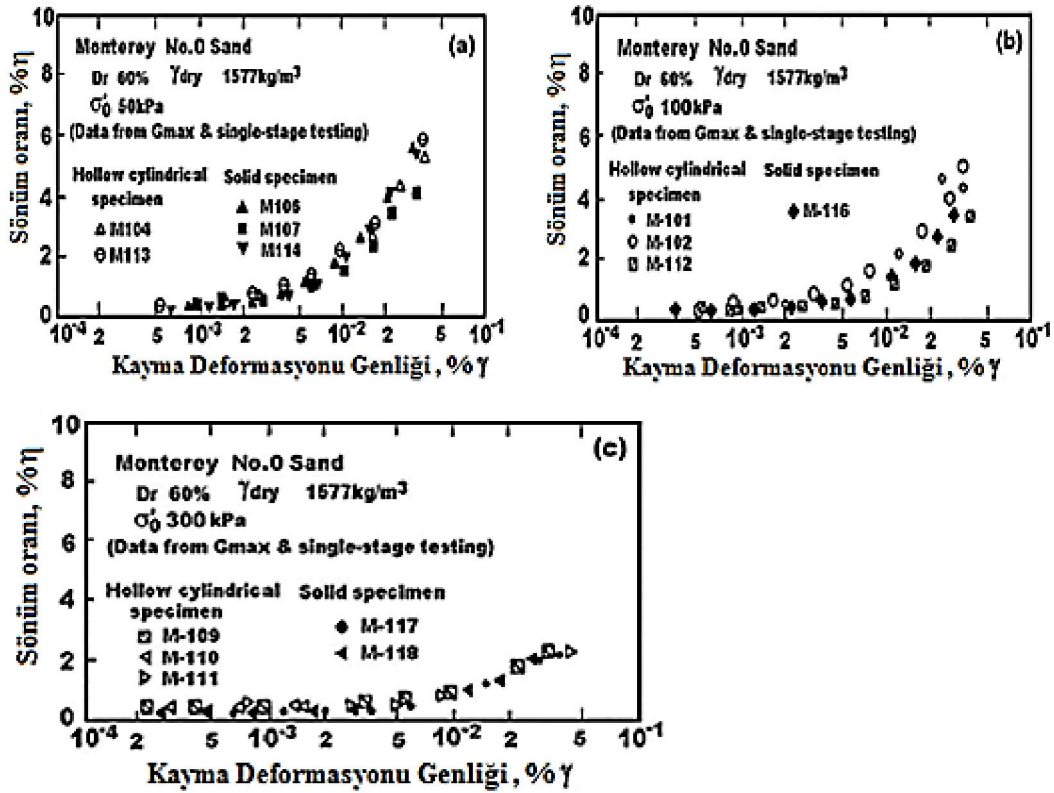
Şekil 2.10: Kayma modülü-OCR ilişkisi için k parametresi (Hardin, 1978)

Kokusho (1982), Tegunuma kili üzerinde yapmış olduğu çalışmada kayma modülü ve sönüm oranının çevrim sayısının artmasıyla azaldığını belirtmiştir. Plastisite indisi yüksek numunelerin düşük kayma modülü değişimine ve sönüm oranlarına sahip olduğunu söylemiş, ayrıca düşük sönüm oranına sahip numunelerin daha elastik bir davranış sergilediğini belirtmiştir. Elde ettiği sonuçları Afifi ve Richart (1973) ile Anderson ve Woods (1976)'un G_{1000} , 1000. dakikada ölçülen $G = G_{1000}$ ve ΔG (G 'nin her logaritmik zaman çevrimindeki, örneğin; 1000 dakikadan 10000 dakikaya kadarki değişim) değerleri ile de karşılaştırmıştır. Özellikle ince yüzdesi yüksek olan numunelerde ΔG 'nin daha büyük olduğunu ve bunun nedeni olarak ise daneler arasında oluşan bağ kuvvetlerinin etkisini ve yaşlanmayı göstermişlerdir (Şekil 2.11).



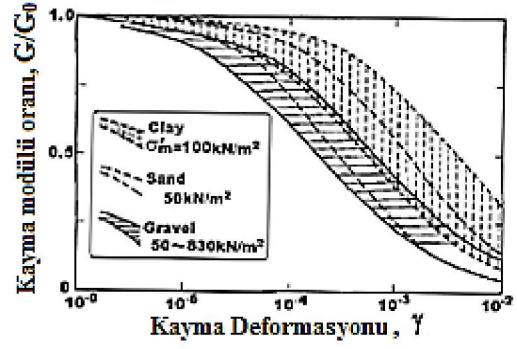
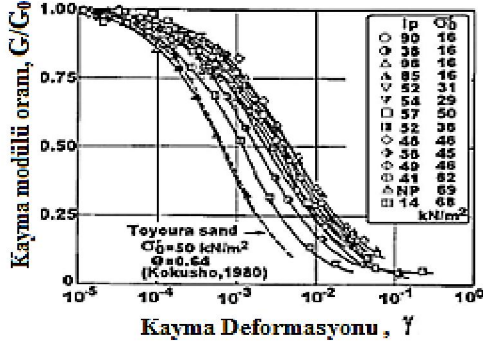
Şekil 2.11 :Plastiste indisine bağlı G_{maks} artışı değişimi

Chung ve diğerleri (1984), Monterey kumu (No.0) kullanarak efektif gerilmenin sönüm oranına üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 50, 100 ve 300 kPa efektif gerilme altında yapmış oldukları deneylerde efektif gerilmenin düşük olduğu deneylerde sönüm oranının en yüksek değerleri aldığını belirtmişlerdir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12:Efektif gerilmenin sönüm oranı üzerindeki etkisi(Chung vd, 1984)

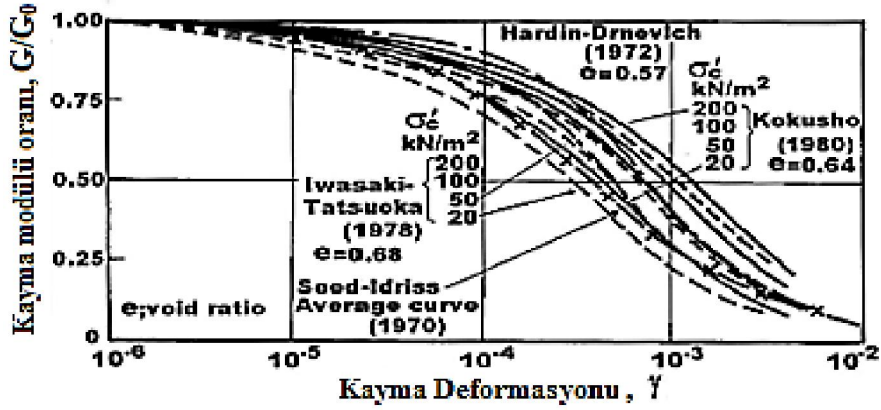
Imazu ve Fukutake (1986), farklı plastisite indisine sahip killi numuneler üzerinde deneysel bir çalışma yapmışlardır. Plastisite indisi yükseldikçe G/G_{maks} 'ın yüksek deformasyon genliklerinde bile daha büyük değerler aldığını belirtmişlerdir (Şekil 2.13a). Kokusho (1987), Imazu ve diğerlerinin elde ettikleri sonuçlarla kumlu ve çakıllı numuneler üzerinde yapmış olduğu deneyleri birleştirerek farklı zemin sınıfları için G/G_{maks} eğrilerini oluşturmuştur (Şekil 2.13b). Sonuç olarak, daneler arasında görünür kohezyonun az olduğu kumlu ve çakıllı numuneler için deformasyon genliğinin etkisi daha belirgin görünmektedir.



Şekil 2.13a:Plastisite indisinin G/G_0 etkisi (Imazu vd, 1986)

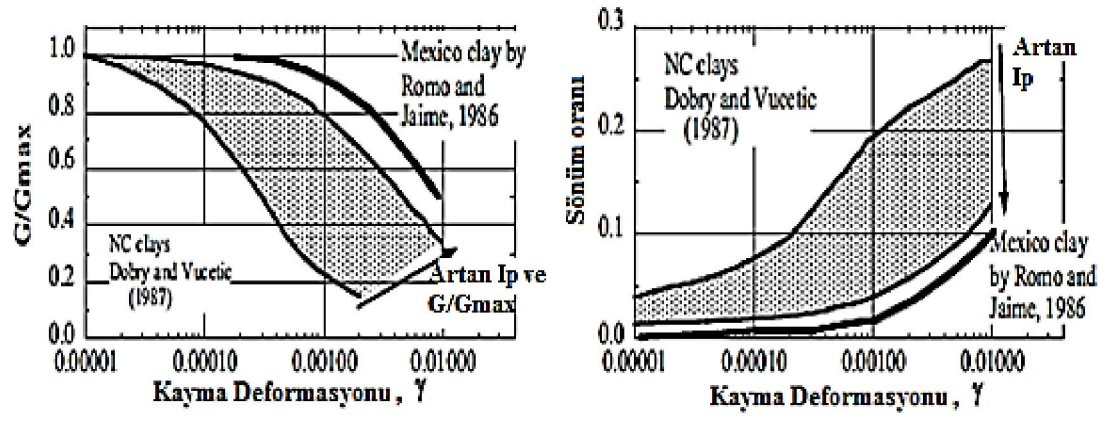
Şekil 2.13b:Farklı zemin türleri için üzerindeki G/G_0 (Kokusho, 1987)

Kokusho (1987) temiz kumlar üzerinde yapmış olduğu çalışmasında G/G_{maks} değerindeki azalmanın, deformasyon genliğinin artmasıyla arttığını ve azalımdaki eğilimin özellikle yüksek efektif gerilmeler altında daha belirgin olduğunu savunmuştur. Ayrıca kumlar üzerine yapılmış olan birçok çalışmada deney şartlarının birbirinden farklı olmasına rağmen G/G_{maks} eğrilerinin benzer olduğunu belirtmiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14:Efektif gerilmenin G/G_0 üzerindeki etkisi (Kokusho, 1987)

Dobry ve Vucetic (1987), plastisite indisinin G/G_{maks} ve sönüm oranına olan etkisi üzerine çalışmışlardır. G/G_{maks} değerinin plastisite indisinin artması ile arttığını, sönüm oranının ise azaldığını göstermişlerdir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15:Plastisite indisinin G/G_{maks} ve sönüm oranı üzerindeki etkisi (Dobry vd, 1987)

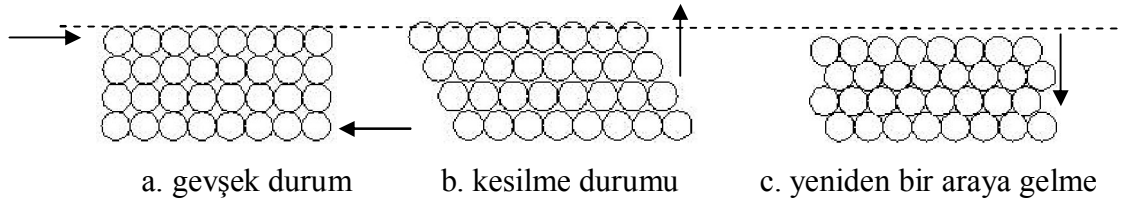
3. SIVILAŞMA

Tekrarlı yükler etkisinde zeminlerin davranışının incelenmesine ilk kez 1964 yılında Japonya-Niigata ve Kuzey Amerika-Alaska depremlerinde sıvılaşmaya bağlı olarak gözlenen zemin hareketleri ve yapısal hasar nedeni ile, kumlu zeminlerin depremler sırasındaki davranışlarının belirlenmesiyle ilgili araştırmalarla başlanmıştır. Bu aşamada sıvılaşmanın, sadece temiz kumlarda oluşabileceği düşünülüyordu. Bu konuyla ilgili ilk çalışmalar laboratuvarında hazırlanmış kum numuneler üzerinde olmuştur (Peacock ve Seed 1968, Finn 1971, Ishihara ve Li 1972, Mulilis 1975). Ancak, daha sonraki yıllarda gerçekleşen depremlerde sıvılaşmanın ince daneli zeminlerde de olduğu görülmüş ve birçok araştırmacı (Wang (1979), Tohno ve Yasuda (1981), Ishihara (1984), Miura ve diğerleri (1995)) tarafından çalışmalar bu yönde de yapılmış olup ince daneli zeminlerin kıvam limitleri, kil yüzdesi, doğal su muhtevası gibi fiziksel özelliklerinin sıvılaşma üzerinde etkisi incelenmiştir.

Sıvılaşma sözcüğü, genellikle suya doymuş gevşek kumlarda dinamik etki ile efektif gerilmelerin sıfıra düşmesi şeklinde algılanır. Bu tanıma göre, bir aşamada zeminin kayma direnci kaybolmakta ve sıvı gibi davranmaya başlamaktadır. Zemin tabakalarına deprem veya bir başka sismik kuvvet geldiğinde kum daneleri arasındaki denge bozulmakta ve ince taneler su ile birlikte yukarıya hareket ederek zemin yüzeyine çıkmaktadır. Bu tür bir etki geldiğinde doymuş ve gevşek zemin daneleri daha sıkı duruma geçme eğilimine girerler. Görece drenajsız koşulda gerçekleşecek bu hacimsel azalmaya daneler arasındaki su engel olmaya çalışmakta, suyun sıkışabilirliği düşük olduğundan boşluk suyu basıncı hızla artmaktadır. Boşluk suyu basıncının artmasıyla daneler birbirinden ayrılma eğilimine girmekte, daneler su içinde askıda kaldığından sıvı gibi davranmaya başlamaktadır.

Sıvılaşma özellikle kum ve siltli, gevşek ve jeolojik olarak genç çökellerin bulunduğu ve yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu zeminlerde kum fışkırması, kum krateri veya kum volkanı şeklinde yüzeylenebilmektedir.

Depremden dolayı, danelerin oluşan kayma gerilmesini almadan önceki, kayma gerilmesini aldığı durumda ve kayma gerilmesini aldıktan sonraki dizilimi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Şekil 3.1a’da gevşek kumun depremden önceki dane dizilimi görülmektedir. Şekil 3.1b’de depremden kaynaklanan kayma gerilmesi etkisi ile daneler arası temasın kaybolduğu görülmektedir. Bu evreye kadar danelerin dokunması ile aktarılmakta olan gerilmeler şimdi su tarafından karşılanma durumunda olacaktır. Sıvılaşıma olarak nitelendirilen bu aşamada kayma direnci sıfır olan su sistemdeki gerilmeleri karşılayamadığından ortamın birim hacim ağırlığının doygun zemininkine eşit bir sıvıya dönüşmesi kaçınılmaz olmaktadır. Şekil 3.1c’de görüldüğü gibi, dinamik yüklemenin durmasından sonra denge yeniden sağlansa da yüzeyde önemli oturmalar belirecektir. Bu boy değiştirmenin süreçte dışarıya kaçan suyun hacmine eşdeğer olduğu söylenebilir (PHRI, 1997)



Şekil 3.1: Doygun kumda dane diziliminin dinamik yüklemeye etkilenmesi (Japan Port and Harbor Research Institute (PHRI), 1997)

3.1. Silt ve Genel Tanımı

Bu tezde, özellikle siltin dinamik yüklemeye altındaki rijitlik parametreleri ve bu parametrelere bağlı sıvılaşıma davranışı incelenmiştir. Bu nedenle öncelikle silt hakkında genel bilgi verilmesi faydalı olacaktır.

Silt kelimesi sözlükte, akarsuyla gelen ince zemin veya çamur birikintisi, ince toprak çökeli olarak tanımlanmaktadır. Farklı kaynaklarda, su vasıtasıyla sık sık taşınan çok ince daneli zeminler ve sediment olarak adlandırılan birikintiler olarak veya genellikle suda süspansiyon halinde taşınan, kaya veya zeminden ayrılan ince malzemeden oluşan gevşek çökel olarak tanımlanmıştır.

Siltin dane boyutu 2 mikron ile 20 mikron arasındadır. Siltler farklı şekilde oluşabilir. Bunlar kayaların aşınması, havayla aşınma ve nehir kenarlarında görülen erozyon’dur. Silt daneleri yeterince küçük olduklarından çok uzaklara, su veya hava

yoluyla kolayca taşınabilirler. Rüzgarla taşınmış kalın silt malzemelerinin çökelleri lös (*loess*) olarak adlandırılır.

Ana kaya, çevre koşulları ve kendi özelliklerine bağlı olarak ayrışma ve yıpranma mekanizmalarınca toprağa yönelen bir sürece girmektedir. Anakayanın yıpranma/ayrışması ile oluşan malzemelerin büyük çoğunluğu su, rüzgar, yerçekimi ve buzullar tarafından taşınarak farklı uzaklıklarda birikmektedirler. Farklı şekilde taşınarak biriken malzemeleri; akarsu çökelleri, rüzgarla taşınarak oluşan birikintiler, göllerde çökme, buzul çökelleri olarak ayırabiliriz.

3.2. Zeminlerin Dinamik Davranışını Etkileyen Fiziksel Özellikleri

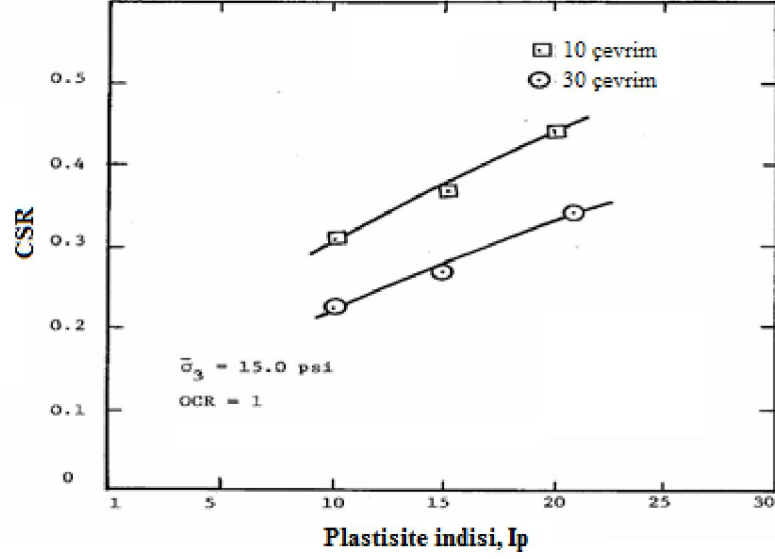
İnce daneli zeminlerde, dinamik yüklemekten dolayı oluşan etkiler zeminin çeşitli fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

3.2.1. Boşluk Oranı

Boşluk oranının dinamik davranış üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Iwasaki ve diğerleri (1978) ile Kokusho (1980) farklı boşluk oranlarına sahip (0.640 ile 0.793 arasında değişen) Toyoura Kumu numuneleri üzerinde yaptıkları dinamik üç eksenli deneyleri sonucunda kayma modülü azalım eğrilerinin üst üste geldiğini ve boşluk oranı değişiminden etkilenmediğini göstermişlerdir. Ayrıca sıvılaşma açısından düşünüldüğünde, zeminin doğal boşluk oranının kritik boşluk oranına göre durumuna bakılabilir. Kritik boşluk oranı, numunenin değişmez deviator gerilmede hacim değişimi göstermeden kesildiği dane dizilimi olarak tariflenir. Bu tarif, doğal boşluk oranının kritik boşluk oranından küçük olduğu zeminlerde sıvılaşmanın oluşmadığı gözlemlenmiştir.

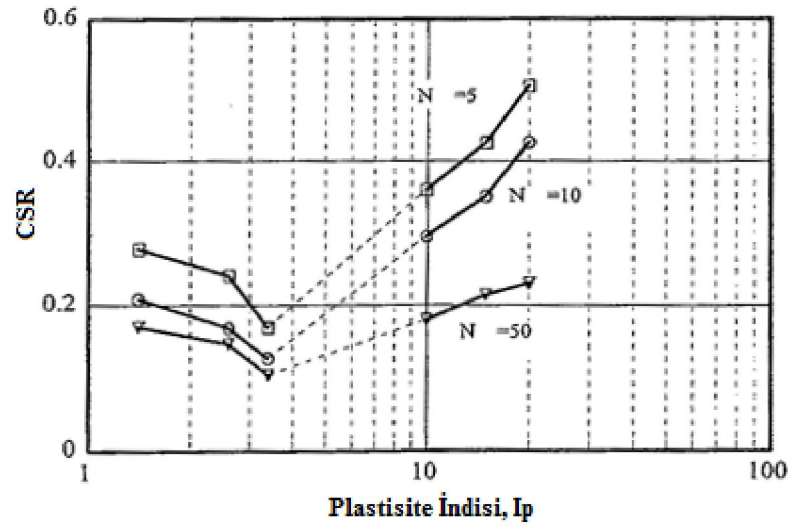
3.2.2. Plastisite İndisi

Plastisite indisinin artması durumunda numunelerin çevrimsel gerilme dirençlerinin arttığı bilinmektedir. Puri (1984) plastisite indisinin artmasıyla zeminin yenilmesi için gerekli kayma gerilmesinin veya CSR (çevrimsel gerilme oranını) değerinin arttığını dinamik üç eksenli deneylerle göstermiştir (Şekil 3.2). Elde etmiş olduğu deney sonuçlarında yenilme kriteri olarak %5 çift yönlü aksenal deformasyon değerleri ölçüt alınmıştır.



Şekil 3.2: Dinamik Gerilme Oranına Plastisitenin Etkisi (Puri 1984)

Prakash ve diğerleri (2003), çalışmalarında farklı yüzdelerde kil içeriğine sahip silt karışımlarının dinamik davranışını incelemiştir. Sonuç olarak kil içeriğinin artmasıyla yükselen plastisite indisinin dinamik kayma direnci açısından bir eşik değerine sahip olduğunu, düşük değerleri için zeminin dinamik direncini azalttığını büyük değer aralıklarında ise dinamik direnci artırıcı yönde etkisi olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Plastisite indisinin dinamik dirence etkisi (Parakash ve diğerleri 2003)

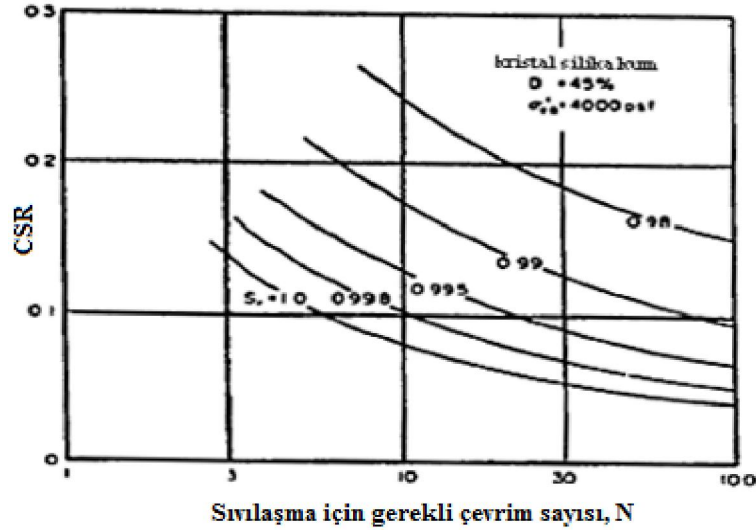
3.2.3. Sıvılık İndisi

Sıvılık indisinin 1.0 olması zeminin arazide likit limite eşit su muhtevasını, sıfır olması plastik özelliklerin alt limitini, sıfırdan küçük olması ise kuruluk yani aşırı

konsolide özelliği yansıtır. Bu değerin 1 den büyük olması o zeminde dinamik yükler altında ciddi problemlerin oluşabileceğini göstermektedir. Adapazarı killi siltlerinde I_L değeri 1.5'e kadar yükselebilmektedir. Ayrıca geliştirilen birçok sıvılaşma kriteri yaklaşımında sıvılık indisi etkili rol oynamaktadır. Örneğin Adapazarı Sıvılaşma Kriteri'nde $I_L \geq 0.9$ durumunda sıvılaşma olabileceği, $0.75 \leq I_L < 0.9$ durumunda test bölgesinde olduğu, $I_L < 0.75$ durumunda ise sıvılaşmanın gözlemlenmeyeceği belirtilmiştir (Önalp ve diğerleri, 2006).

3.2.4. Doygunluk Derecesi

Yapılan araştırmalar numunelerin doygunluk derecesinin artmasıyla tekrarlı yükleme sonuçlarında özellikle sıvılaşmaya veya yumuşamaya karşı hassasiyetin arttığını belirtmişlerdir. Şekil 3.4'de uygulanan gerilme oranı (CSR) ile çevrim sayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Doygunluk derecesinin düşmesi fiziksel anlamda boşluk hacminde havanın artan varlığını göstermektedir. Havanın sıkışabilirliğinin suyunkine oranla oldukça yüksek olması, dinamik yükleme sırasında zeminde oluşabilecek hacim değişimleri lehine etki etmektedir. Bunun sonucunda aynı çevrim sayıları için boşluk suyu basıncı artışlarında azalmaya sebep olmaktadır.

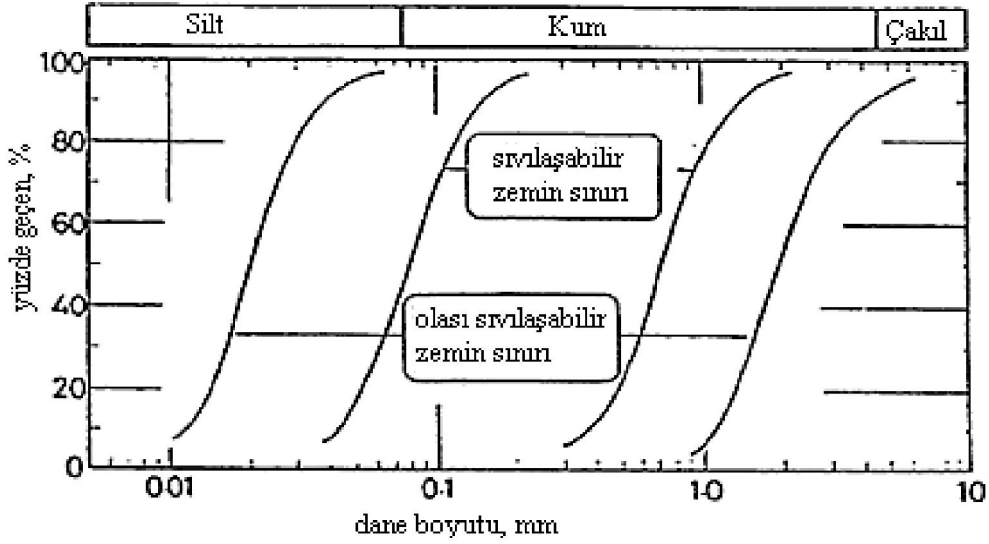


Şekil 3.4: Sıvılaşmanın oluştuğu çevrim sayısına doygunluk derecesinin etkisi

3.2.5. Dane Boyutu

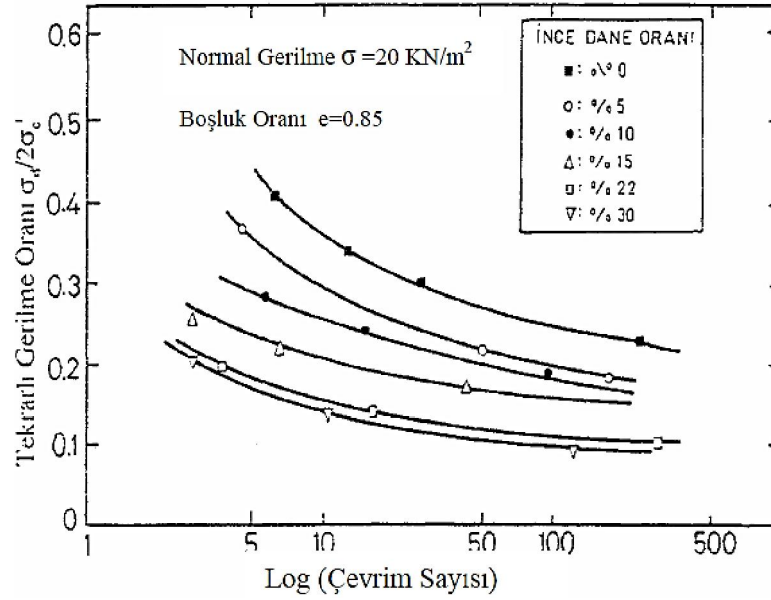
Tsuchida (1970) geçmiş depremlerde sıvılaşan veya sıvılaşmayan zeminlerin dane boyutunu çalışmış ve Şekil 3.5'de sıvılaşma sınır eğrilerini vermiştir. Özellikle bu

bağlamda yapılmış olan birçok çalışmada D_{50} değeri üzerinde durulmuştur. Literatürde kabul görmüş olan birçok sınıflama kriterinde de D_{50} değeri değerlendirme yapılan parametreler arasında yer almaktadır. Sandoval ve diğerleri (1968), Seed ve Idriss (1971), Wang (1979) dane boyutu arttıkça, numunenin sınıflaması için uygulanması gereken kayma gerilmesinin de artmakta olduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 3.5 : Sıvılaştırılabilir zeminlerin dane dağılımı

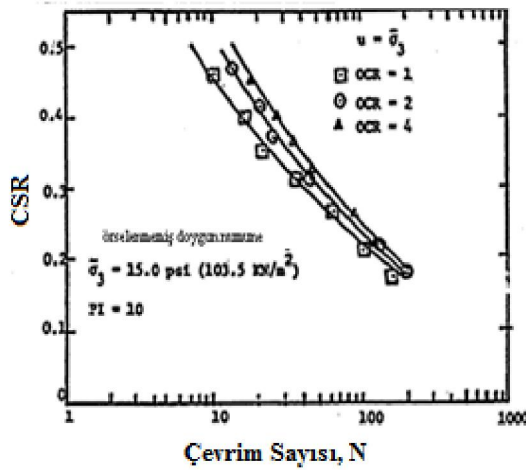
Ayrıca dane boyutu büyüdüğünde zeminin geçirimsizliği artmakta ve buna bağlı olarak boşluk suyu basıncı oluşumları azalmaktadır. Troncoso ve Verdugo (1985), tarafından dinamik üç eksenli deney aletinde düşük plastisiteli siltler üzerinde yapılan deney sonuçları Şekil 3.6'da verilmiştir. Zeminde, plastik olmayan ince dane oranı arttıkça, dinamik yüklemelere karşı direncin azaldığı görülmektedir.



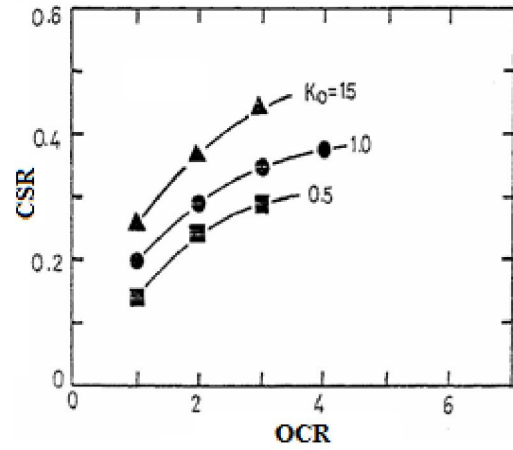
Şekil 3.6 :Düşük plastisiteli incelerin, kumların sıvılaşması üzerindeki etkisi

3.2.6. Aşırı Konsolidasyon Oranı

Aşırı konsolidasyonun derecesi ve zeminin jeolojik yaşı ince daneli zeminlerin dinamik davranışında doğrudan etkilidir. İlk defa Seed ve Peacock (1971) aşırı konsolidasyon oranının etkisini araştırmış ve OCR arttıkça direncin arttığını gözlemlemişlerdir. Ishihara (1978) aşırı konsolidasyon oranının etkisini alüvyon siltli kum ve kumlu siltlerde incelemiştir. Ayrıca kumdaki ince dane içeriğinin artmasıyla bu etkinin belirginleştiğini söylemiştir. Finn (1981), Puri (1984)'de aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla kayma gerilmesinin arttığını belirtmişlerdir. Şekil 3.7'de Puri (1984) çalışmasının sonuçları dinamik gerilme ile çevrim sayısı arasındaki grafik olarak verilmiştir. Ishihara (1977) aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla sıvılaşmaya karşı direncin arttığını belirtmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.7: CSR-Ncyc arasındaki ilişki

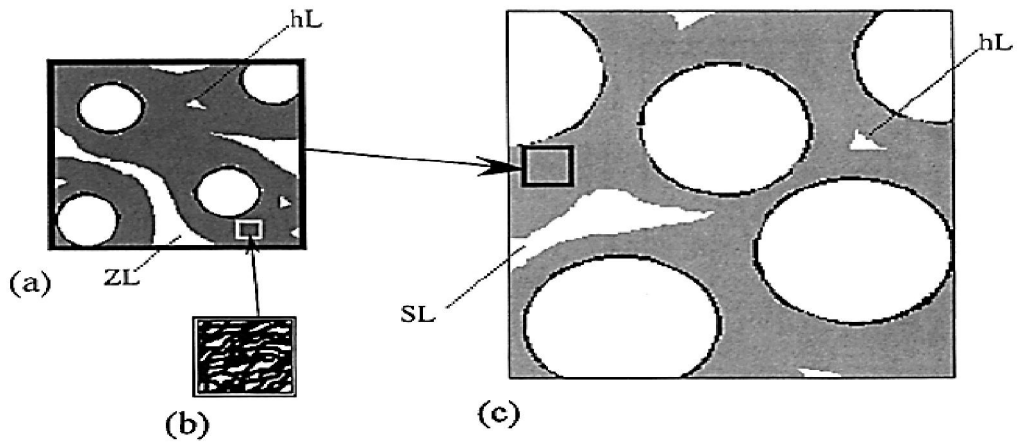


Şekil 3.8: OCR'nin sıvılaşmaya etkisi

3.3. Doku ve Dinamik Davranışa Etkisi

Özellikle siltlerin ve kumların gerek dinamik gerekse statik yüklemeler altındaki davranışını ortamda bulunan kil pulcuklarının daneler arasında oluşturdukları köprüler ve matris içerisinde bulunan boşluklar doğrudan etkilemektedir.

Gratchev ve diğerlerinin (2006) yapmış oldukları çalışmada kullandıkları %7 ve %15 bentonit içerikli karışımlardan almış oldukları SEM fotoğrafı sonuçlarına göre; %7 bentonit içeren karışımlarda ortamda bulunan kil pulcukları daha çok kum danelerinin yüzeylerinde toplanarak daneler arasında kil köprüleri kurmuşlardır. Bunun sonucunda iskelet sisteminde büyük boşluklar oluşmuştur. Bu sistem “açık mikrofabrik” (*open microfabric*) yapı olarak adlandırılmaktadır. Fies ve diğerleri (1999) civa porozimetresi yöntemini kullanarak oluşan bu boşluk yapıları üzerine çalışmışlardır. Civa porozimetresi prensip olarak, çeşitli sıcaklıklarda uygulanan basınç değişimleri ile katılar içine nüfuz eden civa hacminin belirlenmesine dayanmaktadır. Dokudaki boşlukları genel olarak iki grup altında toplanmıştır; 1)iskelet yapısını oluşturan danelerin farklı geometrik yapıya sahip olmalarından kaynaklanan veya bu iskeletteki kum-silt daneleri aralarını dolduran veya yüzeylerini kaplayan kil pulcukları arasındaki büzülmeden dolayı oluşan boşluklar 2) kil pulcuklarının farklı istiflenme (*packing*) biçimlerinden dolayı kil dokusunda oluşan boşluklar (Şekil 3.9).

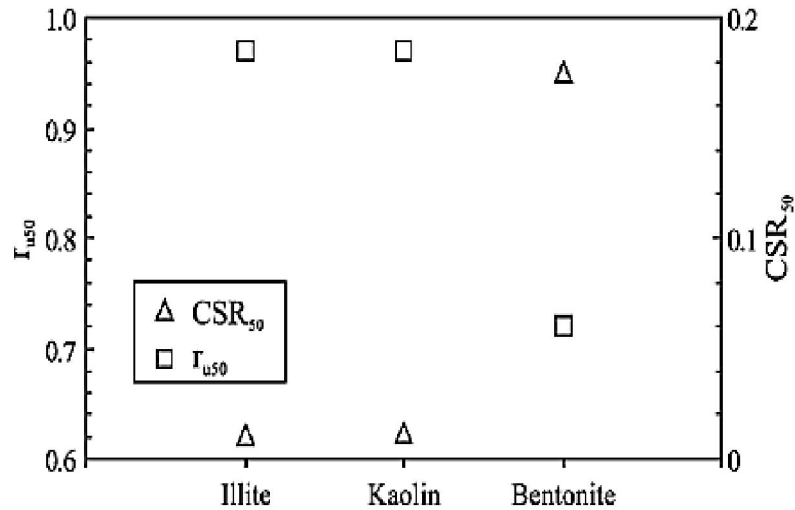


Şekil 3.9: Doku boşlukların şematik gösterimi: a) Kil-silt karışımı: daireler; silt kısmı, gri bölgeler kil matrisi. b) Kil matrisi: siyah kısımlar kil pulcuları, beyaz bölgeler pulcukların istiflenme biçiminden kaynaklanan boşluklar. c) Kil-silt-kum karışımı: daireler; kum daneleri, gri bölge; kil-silt dokusu. ZL, siltlerin dane boyutundan dolayı oluşan boşluklar; SL kumların dane boyutundan dolayı boşluklar, hL iskeletteki saklı boşluklar

Dayanımları düşük olan bu kil köprüleri dinamik yükleme sırasında kolayca parçalanmaktadır. Bunun sonucu olarak yüksek deformasyon genlikleri oluşmakta veya numunenin sıvılaşmaya karşı gösterdiği direnç düşmektedir.

Ortamdaki kil yüzdesinin artışı mikrofabrik yapının değişimine sebep olmaktadır. Bentonit yüzdesi 15 olan numunenin SEM fotoğrafları incelendiğinde, ortamdaki kil miktarının fazla olmasından dolayı dokudaki boşlukların azaldığı ve bu nedenle daha yoğun bir matrisin oluştuğu görülmüştür. Ayrıca bu yoğunluk farkından dolayı iskelet sisteminde gözlenmiş olan boşluk büyüklükleri %7 bentonit karışımıninkine oranla daha küçük ve sınırlı alanlar içerisinde kalmıştır. %15 kaolinit ve %15 illit karışımlarının da SEM fotoğrafları incelenmiştir. Yüzdeler aynı olmasına rağmen kaolinit ve illit karışımlarında oluşan matrislerin bentonit karışımlarında oluşan matristen daha az yoğun olup, kil pulcuklarının daha çok kum yüzeylerinde toplanma eğiliminde olduğu görülmüştür.

Bu nedenle aynı katkı yüzdelerinde bentonit, kaolinit ve illitin dinamik yüklemeler altındaki davranışları farklılık göstermiştir. Bu sonuçlara dayanarak zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışında kıvam yanında kilin mineralojik özelliğinin etkisinin olduğunu öne sürmüşlerdir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 :Kum ile %15 bentonit,%15 kaolinit ve %15 illitin dinamik yüklemedeki davranışı (Gratchev vd, 2006)

4. YÖNTEM

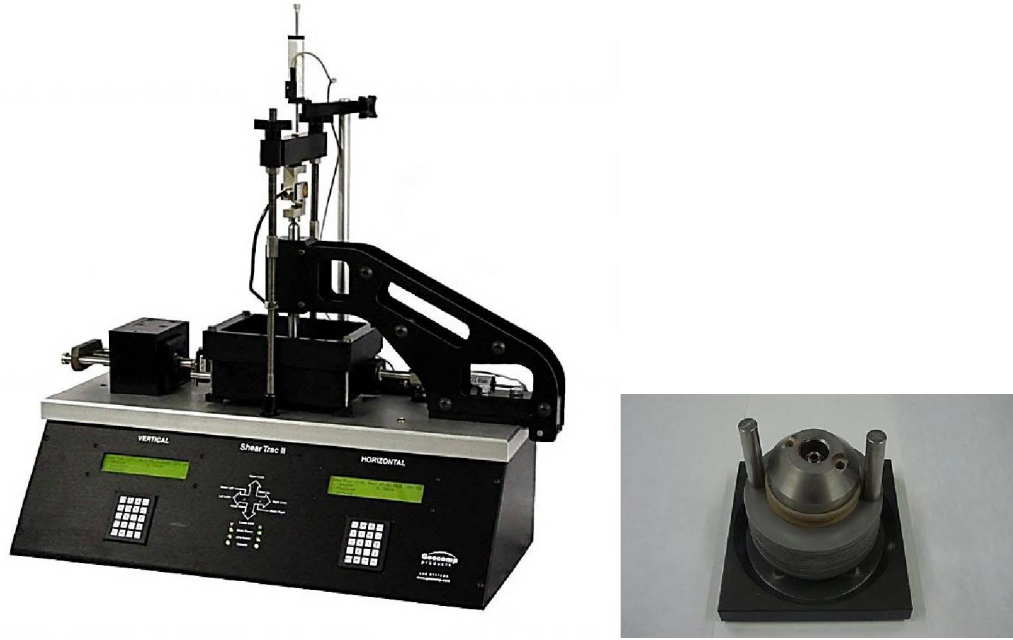
Bu çalışmada, dinamik rijitlik parametreleri olan kayma modülü ve sönüm oranlarının doğrudan hesaplanması için DDSS (*dynamic direct simple shear*) cihazı kullanılmıştır. Ayrıca, aynı numuneler için CTX (*cyclic triaxial test*) deneyi de yapılmış olup her iki deneyden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1’de ilgili problemin çözümü için kayma deformasyonu (γ) genliğine bağlı olarak kullanılması uygun olan dinamik testler gösterilmiştir.

%Kayma Deformasyonu Genliği, γ				
10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1
Resonant Kolonu (Rijit Katı Örnekler)			Dinamik Üç Eksenli ve Dinamik Basit Kesme	
	Resonant Kolonu İçi boş silindir numuneler		Çevrimsel kayma gerilmesi	
Doğal durum için Kayma dalgası hızı ölçümleri				
Özellikle makina temellerinin dizaynında	Gövde ağırlıklı kırılma yapıları		Güçlü yer sarsıntıları	
			Güçlü Patlamalar	

Şekil 4.1 : Kayma deformasyonuna dayalı problem çözümü için kullanılacak deney sistemi (http://www.ce.metu.edu.tr/~ce467/docs/test_comparison.pdf)

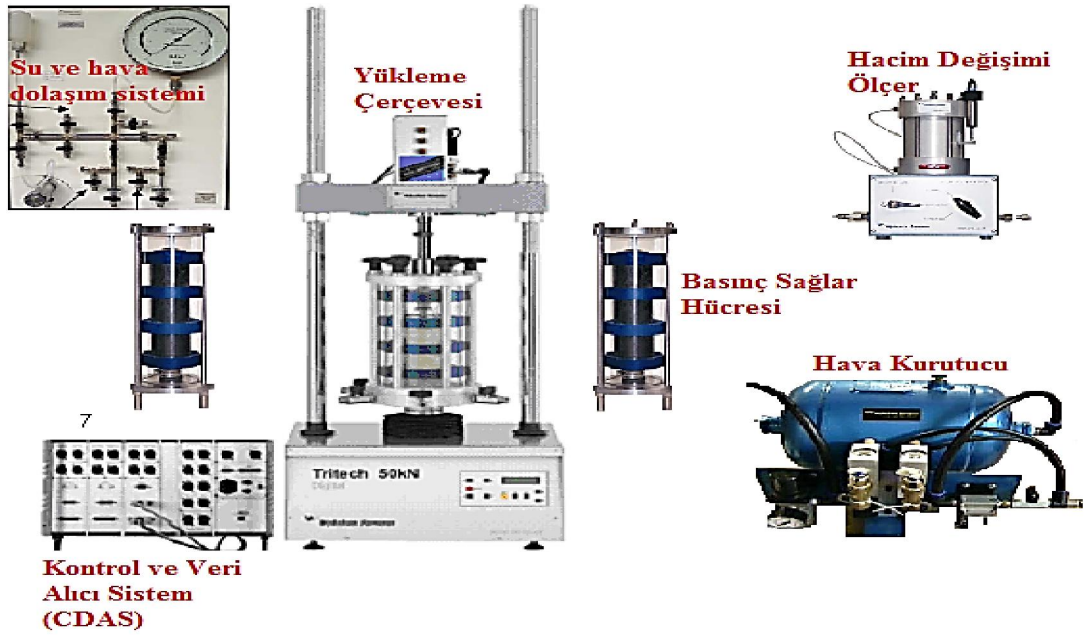
Geocomp firması tarafından üretilmiş olan DSS cihazı (Şekil 4.2) kesme sırasında sabit hacim prensibine dayalı çalışmaktadır. Boşluk suyu basıncını dolaylı olarak dinamik yükleme altında oluşan kabarma veya sıkışmaya bağlı belirlemektedir. Deney şartları değişken sayısını minimumda tutmak ve diğer araştırmacılara paralel

çalışma amacı ile $CSR=0.35$ $f=0.50$ Hz ve deney süresince uygulanan normal gerilme 100 kPa olarak seçilmiştir.



Şekil 4.2: DSS (*dynamic direct simple shear*) ve deney numunesi

Bu tez çalışmasında kullanılan CTX cihazı (Şekil 4.3) Wykeham Farrance firması tarafından üretilmiştir. Deneyler $\sigma_3=100$ kPa çevre basıncı altında yapılmıştır. CSR ve frekans parametreleri DSS’de uygulanan değerlerle aynıdır.



Şekil 4.3: CTX (*cyclic triaxial test*) ve sistem elemanları

Arazide sıvılaşması olası siltli kum veya alüviyal çökel zeminlerin laboratuvar ortamında dinamik yükleme altındaki davranışını incelemede suda yağmurlama veya bulamaç çamuru yöntemleri kullanılmaktadır. Bu tezde de numuneler bulamaç çamuru yöntemi ile hazırlanmıştır. Hazırlanan bulamaçlar 100 kPa ön konsolidasyon basıncı altında konsolide edilmiştir (Şekil 4.4). Bulamaç konsolidasyon hücrelerine alınmadan önce, %100 doygunluğun sağlanması için 2 gün oda şartlarında bekletilmiştir. Daha sonra desikatörde vakumlanarak doygunlukları sağlanmıştır.



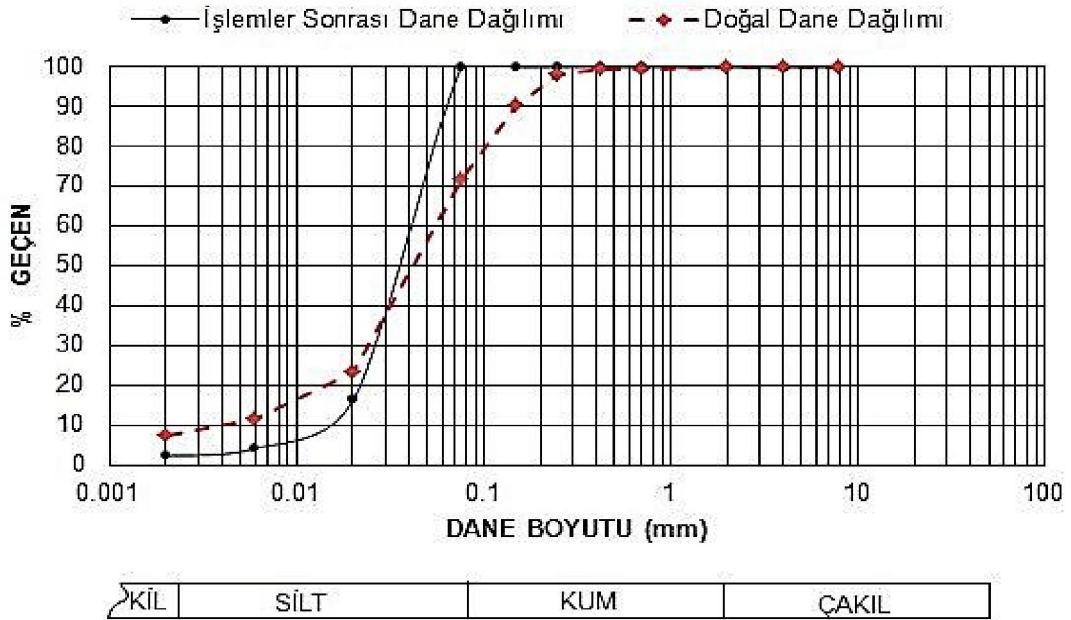
Şekil 4.4:Hazırlanmış bulamaca ön konsolidasyon basıncının uygulanması

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

5.1.1. Deney Numuneleri İçin Silt Temini

Karışımlarda kullanılan silt için, Adapazarı şehri Yenigün Mahallesinden alınmış olan doğal arazi numunesinin önce yıkamalı elek yöntemi ile kumu ayrıştırılmış ardından çöktürme yöntemiyle kil yüzdesinin mümkün olduğunca azaltılması hedeflenmiştir. Bu işlemler sonucunda dane dağılım eğrisi aşağıdaki gibi olan özel deney numunesi elde edilmiştir (Şekil 5.1). Likit limit ve plastik limit değerleri NP (non-plastik) olarak belirlenmiştir.



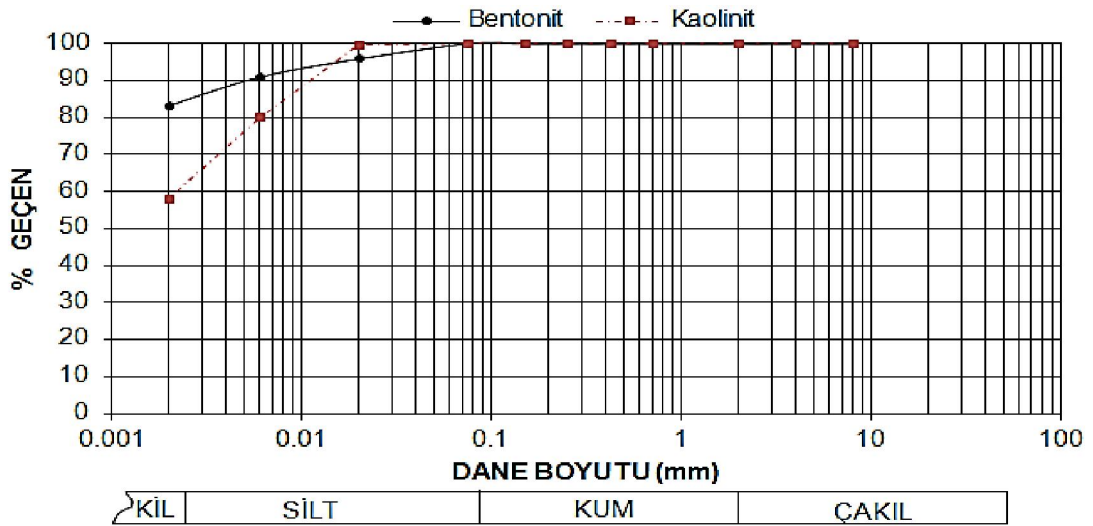
Şekil 5.1: Adapazarı Silti Doğal durumda ve işlem sonrası dane dağılım eğrileri

Elde edilen ince malzemeye ağırlıkça %1.5'den başlayarak %50'ye kadar artan oranlarda bentonit ve kaolinit karıştırılarak deney numuneleri hazırlanmıştır.

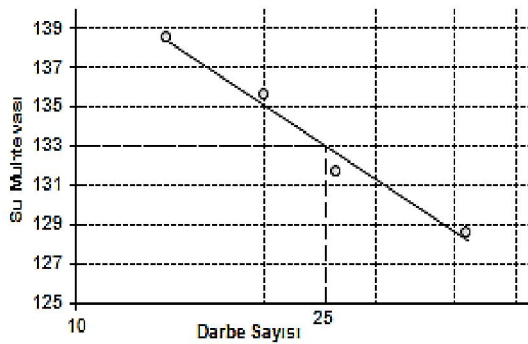
Kaolinit, birbirini tekrar eden elementel silika-gipsit plakalarından oluşur. Her tabaka yaklaşık olarak 7.2 Å kalınlığındadır. Bu tabakalar birbirlerine hidrojen bağları ile bağlıdır. Bu tabakaların oluşturduğu kaolinitin en küçük biriminin yüzey genişliği 1000 ile 20000 Å arasında değişirken kalınlığı ise 100 ile 1000 Å arasındadır. Kaolinit pulcuklarının her birim kütle için yüzey alanı yaklaşık olarak 15 m²/g dir.

Montmorillonit (bentonitin endüstriyel işlem görmemiş saf mineral hali), illitin tabaka yapısına benzer bir yapıya sahiptir. İki silika tabakası arasında bulunan gibsit tabakasından oluşur. Montmorillonit oktoedral sistemlerdeki alüminyum için magnezyum ve demir iyonları arasında izomorf yer değiştirme görülmektedir. İllite tabakalar arasında bulunan potasyum iyonları montmorillonitte bulunmazken bu boşlukları ortamdaki çekilen oldukça fazla miktarda su doldurmaktadır. Yüzey genişliği 1000 Å ile 5000 Å arasında olup tabakala kalınlığı 10 Å ile 50 Å arasındadır. Bu nedenle montmorillonitin özgül yüzey alanı 800 m²/g gibi yüksek değerler seviyesindedir.

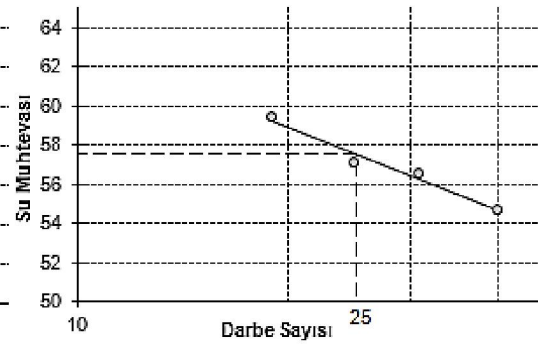
Deneyleerde kullanılan bentonitin ve kaolinitin ilgili deneyler sonrasında dane dağılım eğrisi (Şekil 5.2) ve likit limit değerleri Şekil 5.3a ve 5.3b’de verilmiştir. Bentonit için LL=%133, PL=%34, Ip=99 TS 1500/2000’e göre sınıfı CH, yağlı kil; kaolinit için LL=%58, PL=%34 ve Ip=24 ve sınıfı MH, elastik silt olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.2: Bentonit ve kaolinitin dane dağılım eğrisi



Şekil 5.3a: Bentonit LL grafiği



Şekil 5.3b: Kaolinit LL grafiği

Çalışma boyunca hazırlanmış olan tüm karışım numunelerinin de dane dağılımı için pipet analizi ve kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır.

5.2. DSS ve CTX'in Kalibrasyonu

Bu tezin ana konusu, DSS ve CTX'den alınan sonuçların karşılaştırılmasına dayalı olduğundan, deneysel çalışmalara başlamadan önce davranışı ve malzeme özellikleri bilinen numuneler üzerinde iki cihazı gerek kalibrasyonu gerekse aralarındaki uyumun belirlenmesi için bir dizi çalışma yapılmıştır.

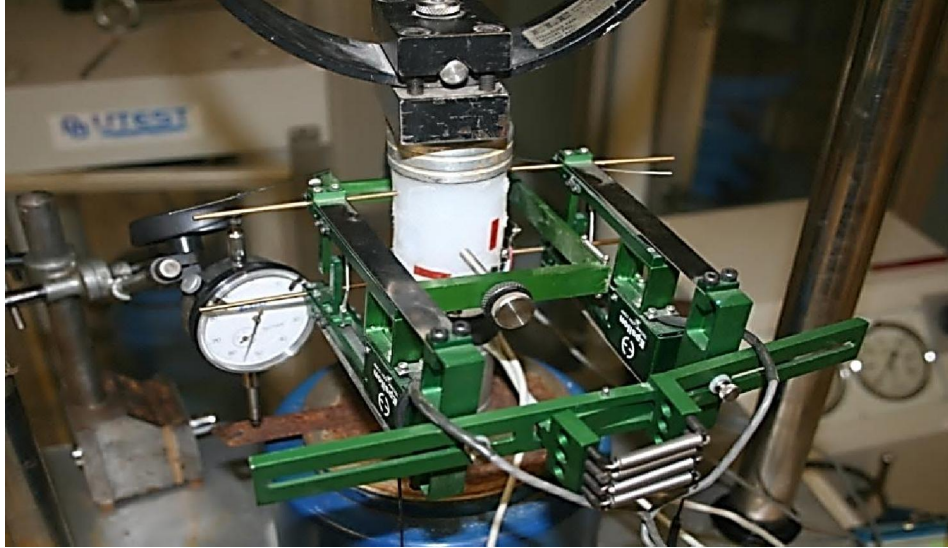
Öncelikle lineer elastik özelliğe sahip olan inşaat kalitesi silikon macunundan (Henkel) numuneler hazırlanmıştır. Bunun dışında dane dağılımı standart olan Monterey No.0 kumu üzerinde kalibrasyon deneyleri yapılmıştır. Kalibrasyon için kullanılan Monterey No.0 kumu ABD Kaliforniya'dan temin edilmiştir. Monterey No.0 açık kahverenginde olup farklı araştırmacılar tarafından kullanılmıştır (Gallagher, P. M., 2000, Horita, M.,1985, Silver, M.,1976). Eldeki kum TS 1900/1987 uyarınca sınıflandırılmış hesaplanan D_{50} değeri ile ASTM'ye göre yapılan maksimum ve minimum boşluk oranı Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1:Monterey No.0 kumunun temel özellikleri (Ural, N., Doktora Tezi 2008)

	Bu çalışma	Polito No.0/30	Gallagher No.0/30	Horita No.0/30	William No.0	Silver No.0	Mulilis No.0	Chan No.0
Simge	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP	SP
D_{50}	0.38	0.43	0.44	0.45	0.36	0.36	0.40	0.36
G_s	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
e_{maks}	0,82	0,82	0,821	0,80	0.88	0.85	0.851	0,86
e_{min}	0.56	0.63	0.464	0.56	0.67	0.56	0.573	0.57

5.2.1. Silikon ile Kalibrasyon

$D=44.8$ mm $H=105.8$ mm ölçülere sahip olan silikondan hazırlanmış silindirik numunede yatay ve düşey deformasyonları belirlemek amacıyla hem strain gauge hemde ekstansometre yerleştirilmiştir (Şekil 5.4). Ayrıca boy kışalmasının manuel ölçümü için deformasyon saati yerleştirilmiştir. Numunenin yatay ve düşey deformasyonları ölçülerek Poisson oranı (ν) 0.5 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.4:Silikonun yatay ve düşey deformasyonlarının belirlenmesi

Yapılan deneyler sonrasında silikon için elastisite ve kayma modülü değerleri hesaplanmıştır.

$$E_{manuel} = \frac{14}{0.014} = 1071kPa \cong 1.1MPa$$

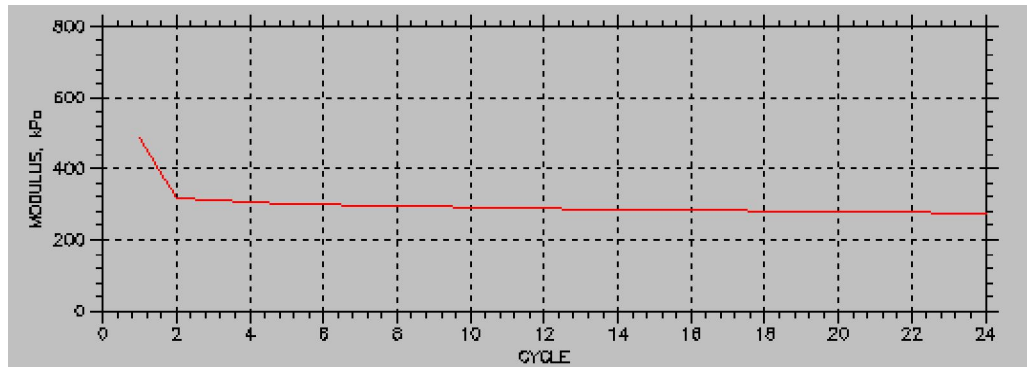
$$E_{ctx} = \frac{64}{0.052} = 1230.7kPa \cong 1.2MPa$$

$$G = \frac{E}{2*(1+\nu)} \text{ formülünden;}$$

$$\Rightarrow G_{manuel} = \frac{1.1}{2*(1+0.5)} = 0.37MPa \text{ (ekstansometre ölçümlerine göre)}$$

$$\Rightarrow G_{ctx} = \frac{1.2}{2*(1+0.5)} = 0.40MPa$$

Silikon için DSS den doğrudan alınmış olan kayma modülü değişimi ise aşağıdaki gibidir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5:DSS'den alınan silikonun kayma modülü

Sonuç olarak CTX'den ve manuel olarak deformasyon sensörlerinden elde edilen sonuçlara göre hesaplanmış olan kayma modülü değerleri ile DSS den elde edilmiş kayma modülü sonuçların birbirine yakın çıktığı görülmüştür.

Elastisite modülü ve kayma modülünün karşılaştırması dışında, silikonun lineer elastik davranışından dolayı çevrimsel yüklemeler sırasında kalıcı deformasyonlar oluşmayacaktır. Bu nedenle CTX'de oluşan aksel birim deformasyonlar (ϵ_z) ile DSS'in kayma deformasyonlarının (γ) karşılaştırılmasının net sonuçlar vereceği düşünülmüştür. Bu düşünce doğrultusunda elde edilen grafikler EK A'da gösterilmiştir.

Ölçümler sonrasında, kayma deformasyonu ile aksel birim deformasyon arasında lineer elastik bir malzeme için; $\gamma/\epsilon_z \approx 2$ gibi bir orandan bahsedilebileceği görülmüştür. Bu durumun normal zemin numuneleri içinde geçerli olup olmadığı kontrol edilecektir.

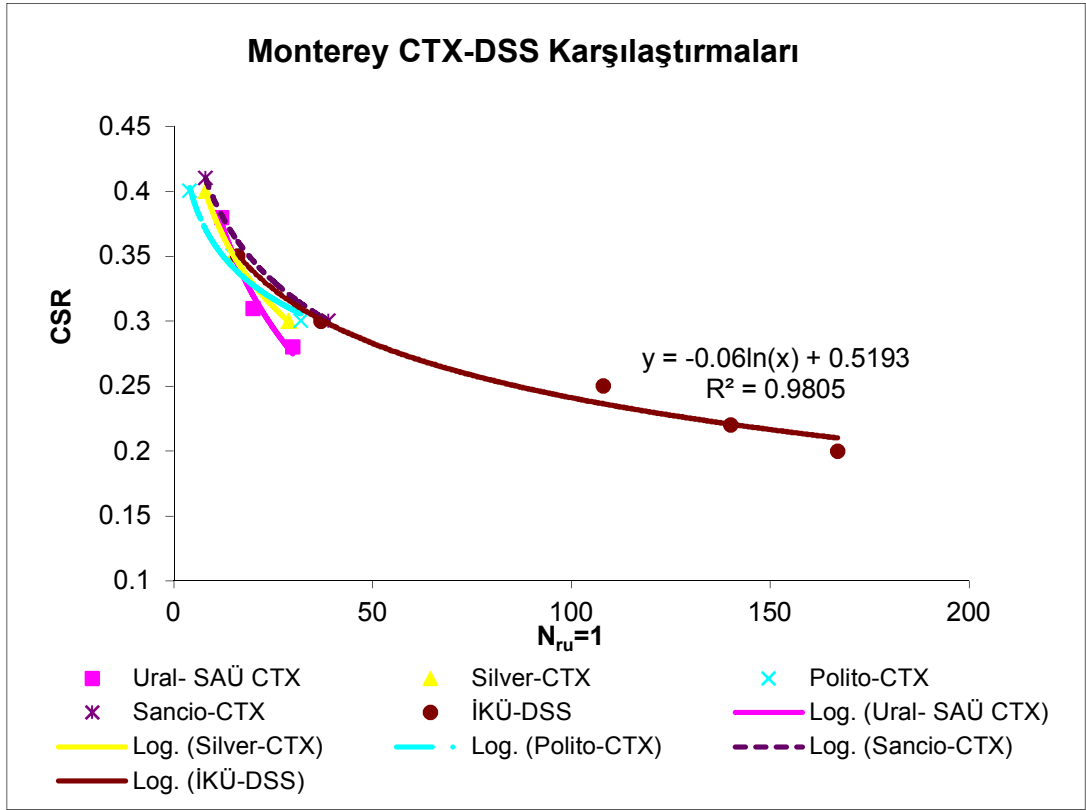
5.2.2. Monterey No.0 Kumu ile Kalibrasyon

Özellikle DSS'in Monterey kumu ile kalibrasyonunda, literatürde daha önce birçok araştırmacının (Polito, C.P.,1999, Sancio, B. R.,2003, Silver, M., ve diğ.1976, Ural, N.,2005) Monterey No.0 kumu üzerinde CTX deneyinden elde ettiği CSR- $N_{ru=1}$ bulguları ile DSS sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır (Tablo 5.3).

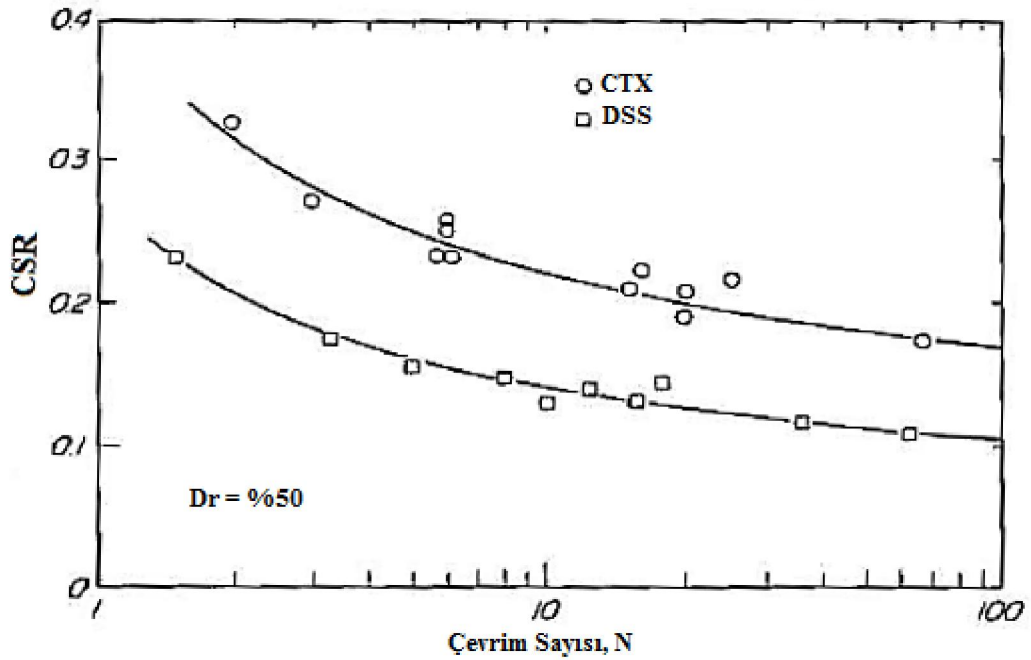
Tablo 5.2:Karşılaştırmalı Monterey No.0 Kumu dinamik deney sonuçları

MONTEREY No.0 Dr=%60		
ARAŞTIRMACI	CSR (f=1 Hz)	N_{ru=1}
Silver (CTX)	0.30	29
	0.35	15
	0.40	8
Polito (CTX)	0.30	32
	0.35	15
	0.40	4
Sancio (CTX)	0.30	39
	0.41	8
Ural (SAÜ CTX)	0.28	30
	0.31	20
	0.38	12
DSS (İKÜ)	0.20	167
	0.22	140
	0.25	108
	0.30	37
	0.35	16

Elde edilen tüm sonuçlar Şekil 5.6'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Görüldüğü üzere CTX sonuçları ile çizilen eğrilerle DSS eğrisi çakışmaktadır. Ancak bu durum literatürdeki benzer çalışmalarla çelişmektedir. Literatürdeki genel bulgu aynı özelliklere sahip numunelerin sıvılaşması için DSS de uygulanması gereken CSR (cyclic stress ratio) değerinin CTX de uygulanması gereken değerden daha düşük olduğudur (Şekil 5.7). Gerçekte de DSS deneyinde numuneye uygulanan gerilme saf kayma gerilmesidir ve uniform olmasa da numunenin yüksekliği boyunca tüm yatay düzlemlerde etki etmektedir. Bu nedenle DSS de numunelerin sıvılaşması için uygulanacak CSR değerinin CTX de uygulanandan daha düşük olması gerekmektedir.

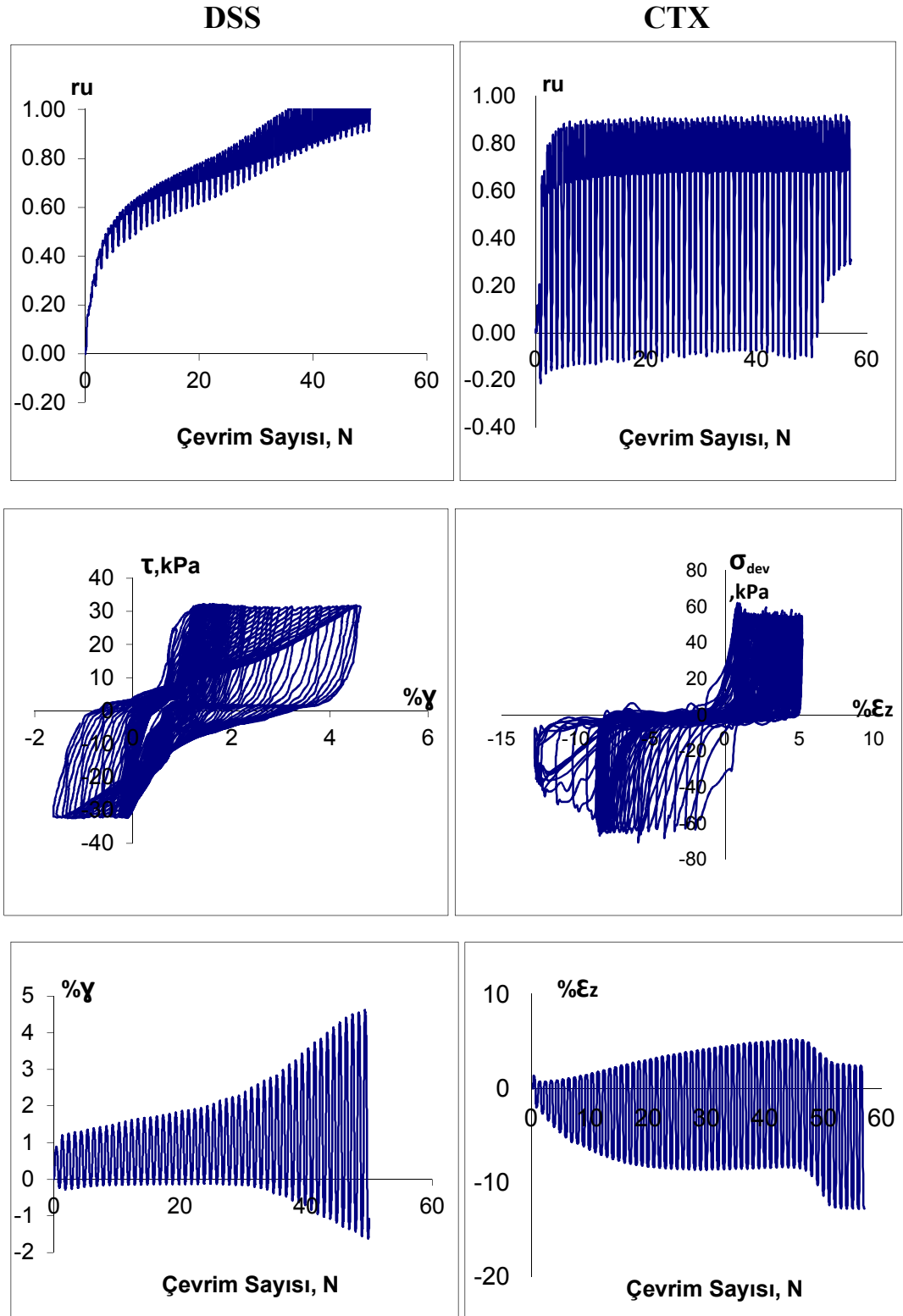


Şekil 5.6: Monterey No.0 Kumu CTX-DSS karşılaştırmaları



Şekil 5.7: CSR- $N_{ru=1}$ CTX ve DSS karşılaştırması (De Alba ve diğerleri, 1975)

Bu çelişkinin sebebinin Bölüm 4’de de belirtildiği gibi DSS’in boşluk suyu basıncını deformasyona bağlı olarak kabarma veya sıkışmaya göre dolaylı olarak ölçmesi olduğu düşünülmektedir. Her iki deney sonucu Şekil 5.8’de gösterilmiştir



Şekil 5.8:CTX ve DSS'in Monterey No.0 Kumu karşılaştırmalı kalibrasyonu

5.3. Karışım Numuneleri ve Fiziksel Özellikleri

Deneysel çalışma başlangıcında da hazırlanmış olan her bir karışımın kıvam limitleri, dane dağılımı ve diğer özelliklerinin belirlenmesi için ilgili deneyler yapılmıştır.

Bentonit ve kaolinitin karışımdaki yüzdeleri ile birlikte bulunan sonuçlar Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.3: Kaolinit ve bentonit karışımlarının fiziksel özellikleri

KAOLİNİT KARIŞIMLARI											
%Karışım	w_{Lcas}	w_{Lkoni}	w_p	w_n	I_{pcas}	Sınıf	G_s	%Kil	%Silt	%Kum	D₅₀
3.0	NP	35	NP	27	NP	ML	2.73	7.0	92.0	1.0	0.029
4.0	NP	34	NP	27	NP	ML	2.70	4.6	95.0	0.4	0.036
6.0	NP	32	NP	26	NP	ML	2.67	5.0	94.0	1.0	0.035
7.5	27	31	NP	26	NP	ML	2.70	6.0	93.0	1.0	0.035
9.0	28	31	22	28	6	ML	2.70	7.5	91.5	1.0	0.035
10.5	28	31	21	27	7	CL	2.65	8.6	91.0	0.4	0.333
12.0	28	31	22	26	6	CL	2.69	12.0	87.0	1.0	0.032
15.0	27	30	20	25	7	CL	2.70	10.3	89.0	0.7	0.031
18.0	28	30	21	22	7	CL	2.70	11.5	87.5	1.0	0.030
20.0	29	31	21	23	8	CL	2.70	16.5	82.5	1.0	0.030
25.0	28	30	21	20	7	CL	2.68	14.0	84.0	2.0	0.020
30.0	29	31	20	23	9	CL	2.69	20.8	77.2	2.0	0.025
40.0	28	31	18	22	10	CL	2.71	21.4	77.6	1.0	0.026
BENTONİT KARIŞIMLARI											
1.5	NP	35	NP	29	NP	ML	2.74	6.5	93.5	0.0	0.034
3.0	31	37	26	26	5	ML	2.70	4.0	94.0	2.0	0.035
4.0	NP	34	NP	30	NP	ML	2.70	6.4	92.6	1.0	0.036
7.5	31	35	26	31	5	ML	2.71	6.8	92.2	1.0	0.035
9.0	33	35	23	29	10	CL	2.65	8.7	89.0	1.3	0.034
10.5	34	35	23	27	11	CL	2.65	10.5	88.8	0.7	0.032
12.0	34	38	25	29	9	CL	2.73	11.0	87.0	2.0	0.032
15.0	35	38	23	30	12	CI	2.66	12.2	86.8	1.0	0.003
18.0	37	39	21	31	16	CI	2.65	15.2	84.2	0.6	0.030
16.0	36	39	20	29	16	CI	2.66	16.3	82.8	0.9	0.030
25.0	41	42	18	30	23	CI	2.65	19.0	79.0	2.0	0.020
30.0	43	46	20	33	23	CI	2.64	21.2	77.1	1.7	0.028
35.0	44	47	20	37	24	CI	2.73	25.5	73.0	1.5	0.028
40.0	48	48	21	34	27	CI	2.63	30.6	68.0	1.4	0.024
50.0	52	56	17	36	35	CH	2.66	35.5	62.7	1.8	0.019

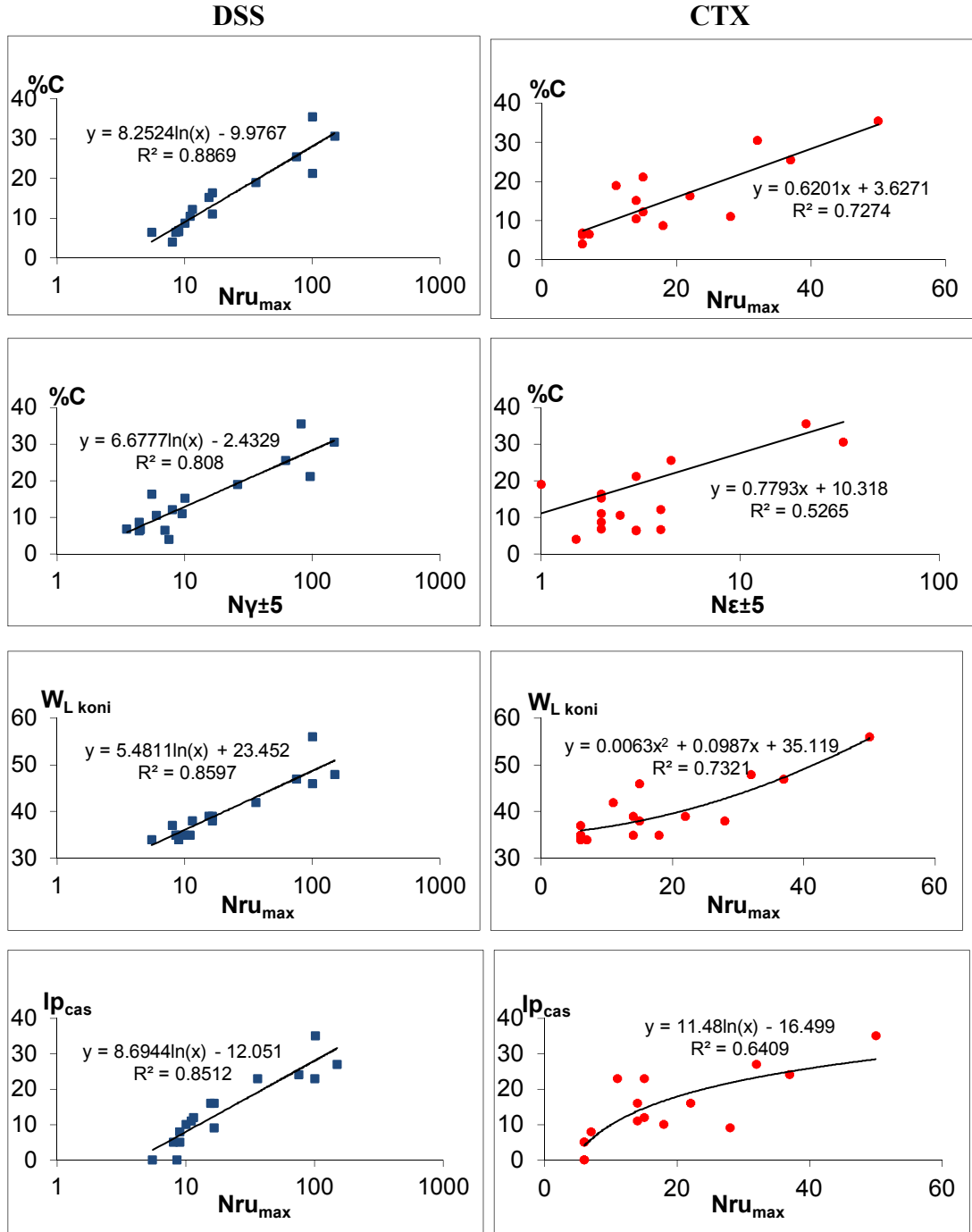
Deney sonuçlarından da görüldüğü üzere, karışımdaki bentonit yüzdesinin artmasıyla likit limit değerlerinde belirgin bir artış gözlenirken aynı durum kaolinit karışımları için geçerli olmamış, hatta kaolinit yüzdesinin artışına karşın likit limit değerleri düşmüştür. Bu beklenmedik sonucun dinamik davranışa olan etkisi de irdelenecektir.

5.3.1. Bentonit Karışımları Dinamik Deney Sonuçları

Aynı koşullarda DSS ve CTX deneylerine tabi tutulmuş olan bentonit karışımlarının deney sonuçları Tablo 5.5’de verilmiştir. Dinamik davranış açısından ± 2.5 ve ± 5 eksenel birim deformasyonu (ϵ_z) ile kayma deformasyonunu (γ) değerlerinin oluştuğu çevrim sayılarına ve boşluk suyu basıncı oranı değerinin maksimum olduğu çevrim sayısına (N_{rumaks}), likit limitin, plastisite indisinin ve karışımlardaki toplam kil yüzdesinin (%C) etkisi incelenmiştir. Sonuçlar grafik olarak Şekil 5.9’da gösterilmektedir.

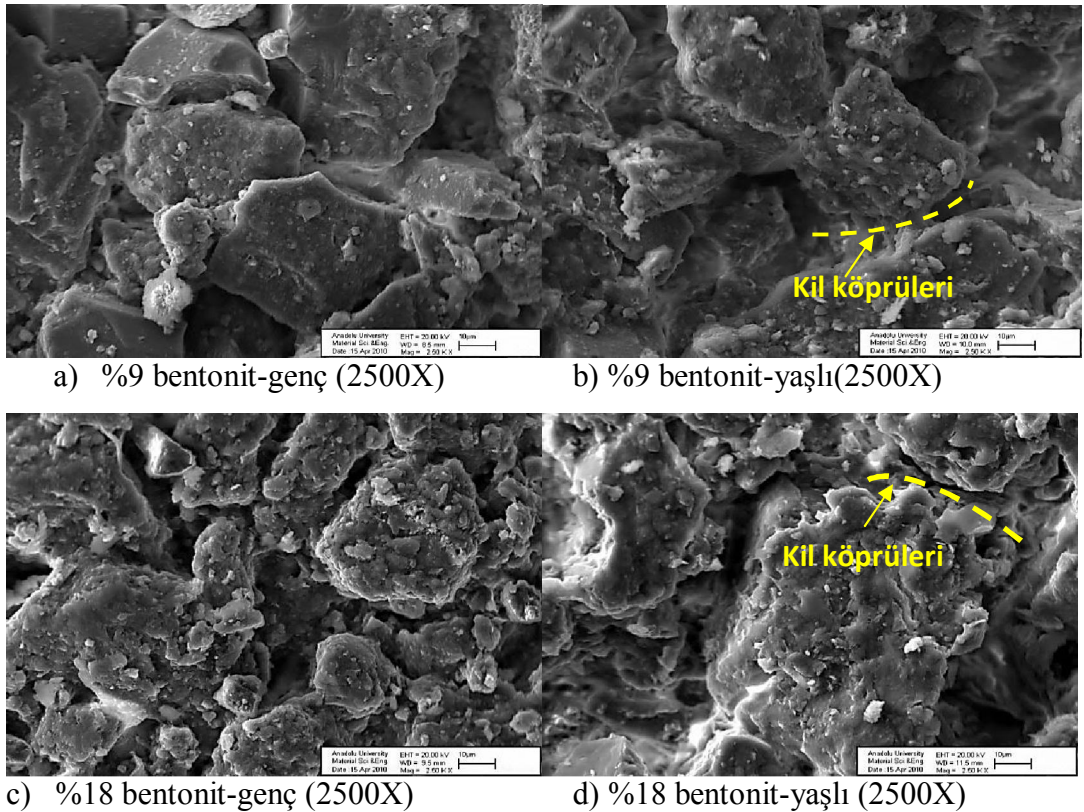
Tablo 5.4: Bentonit karışımları dinamik deney sonuçları

BENTONİT KARIŞIMLARI (CSR=0.35 f=0.50 100 kPa)						
DSS						
%C	$N_{\gamma;\epsilon \pm 5}$	$N_{\gamma;\epsilon \pm 2.5}$	Γ_{umaks} değeri	N_{rumaks}	WL koni	$I_{p_{cas}}$
4	7.5	4.5	0.91	8	37	5
6.4	4.4	2.8	0.83	5.5	34	0
6.5	7	3	0.94	8.5	35	0
6.6	4.5	3.5	0.91	9	34	8
6.8	3.5	2	0.80	9	35	5
8.7	4.4	3	0.84	10	35	10
10.5	6	3.6	0.84	11	35	11
11	9.5	7	0.90	16.5	38	9
12.2	8	4.8	0.94	11.5	38	12
15.2	10	6.4	0.87	15.5	39	16
16.3	5.5	4	0.88	16.5	39	16
19	26	15	0.85	36	42	23
21.2	96	70	0.75	100	46	23
25.5	62	45	0.82	75	47	24
30.6	149	114	0.69	150	48	27
35.5	82	50	0.76	101	56	35
CTX						
4	1.5	1	0.96	6	37	5
6.4	3	2	1.00	6	34	0
6.5	3	2	1.00	6	35	0
6.6	4	3	0.87	7	34	8
6.8	2	1	1.00	6	35	5
8.7	2	1	1.00	18	35	10
10.5	2.5	2	0.87	14	35	11
11	2	1	0.89	28	38	9
12.2	4	3	0.94	15	38	12
15.2	2	1	0.95	14	39	16
16.3	2	1	0.87	22	39	16
19	1	1	1.00	11	42	23
21.2	3	2	0.60	15	46	23
25.5	4.5	2.5	0.80	37	47	24
30.6	33	28	0.60	32	48	27
35.5	21.5	17	0.65	50	56	35



Şekil 5.9: Bentonit karışımlarının CTX ve DSS deneylerinde davranışının farklı değişkenlere göre incelenmesi

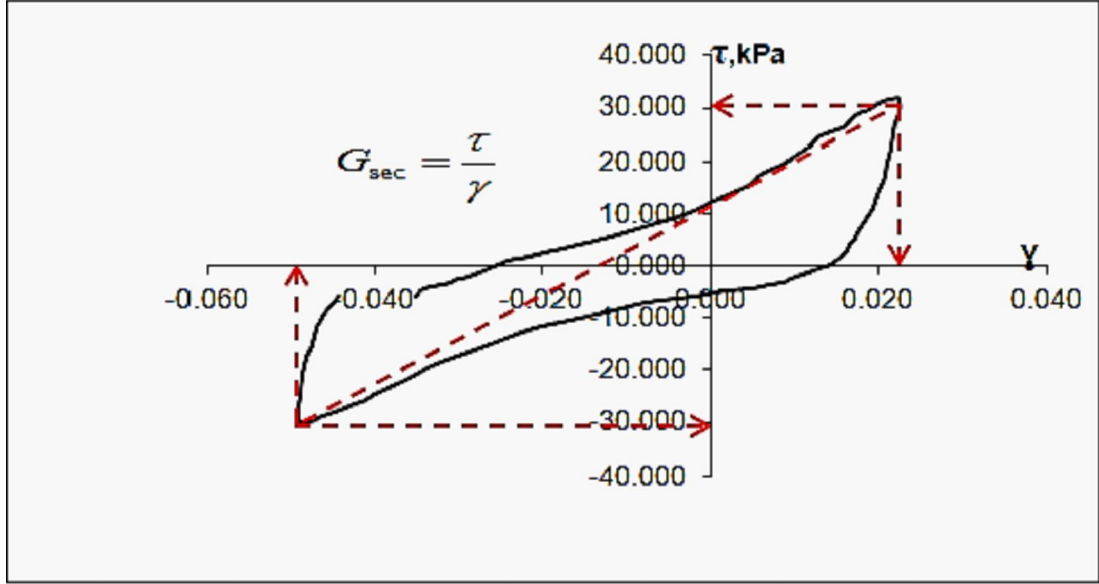
Şekil 5.9'a göre, karışımlardaki bentonit yüzdesinin yükselmesi hem DSS hem de CTX numunelerinin dinamik yüklemeye karşı direncini arttırıcı yönde etki yapmıştır. Sonuçta dinamik yükleme ile numunelerin sahip oldukları kayma direnci zorlanmaktadır. Ortamda bulunan kilin yüzdesi ile doğru orantılı olarak numunelerde görünür kohezyonun oluşmaktadır. Kayma direncini ifade eden $\tau = c + \sigma \tan \phi$ formülünde de görüldüğü üzere numunede oluşan görünür kohezyon kayma direncini arttırmaktadır. Dinamik yüklemeye karşı oluşan bu direnç artışının diğer sebeplerinden biri, karışımlarda kullanılan kil mineralinin özellikleri ve mikro boyutta silt ile bentonit arasında oluşan dokunun etkisidir. Bu bağlamda, incelenen karışım numunelerinden %9 ve %18 bentonitin genç ve yaşlı (yaklaşık 10 ay bekletilmiş) olmak üzere Eskişehir Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) çekilmiştir (Şekil 5.10). Genç numunelerin görüntülerinden(a ve c) kil yüzdesindeki yükselmeye bağlı olarak silt danelerinin tamamen kil pulcukları tarafından sarıldığı ve daha yoğun bir matrisin oluşarak daneler arasındaki boşlukların küçüldüğü görülmektedir. Bunun yanı sıra, numuneler yaşlandıkça (b ve d) kil-silt daneleri arasındaki etkileşimin güçlendiği ve silt daneleri arasında oluşan kil köprülerinin (*clay bridges*) daha belirgin hale geldiği görülmektedir.



Şekil 5.10: %9 ve %18 bentonit karışımlarının SEM görüntüleri

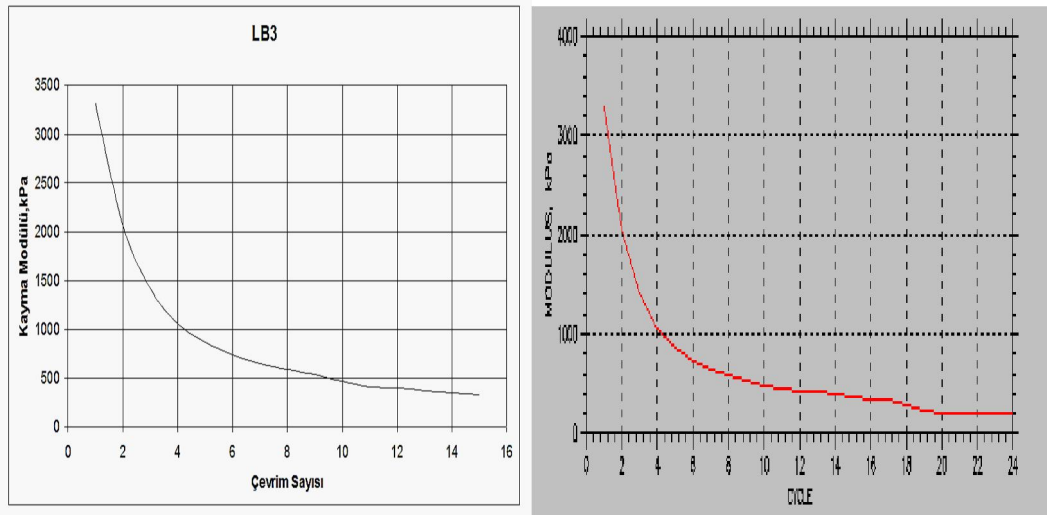
5.3.1.1. Bentonit Karışımlarının Kayma Modülü ve Sönüm Oranı

Kullanılan her iki deney sisteminin de yüksek deformasyon deney grubunda olmalarından dolayı kayma modülü incelemesi için G_{sec} değerleri kullanılmıştır. Gerçekçi bir yaklaşım olabilmesi için deneylerin ilk 15 çevrimdeki kayma modülü davranışları incelenmiştir. Bir diğer deyişle dinamik yüklemenin ilk 30 saniyesi gözönüne alınmıştır.



Şekil 5.11: Kayma modülü (G_{sec}) hesabı

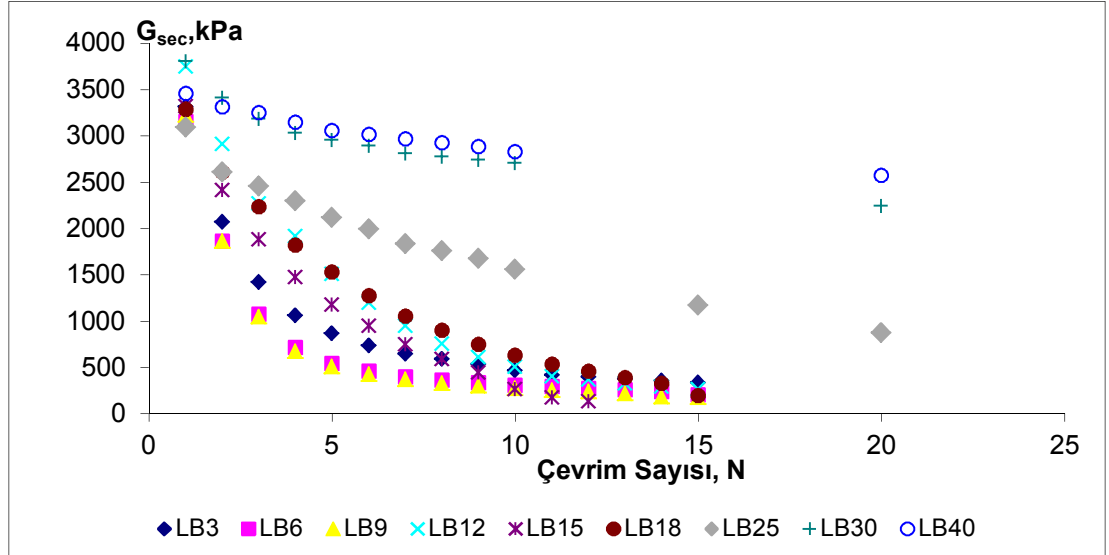
Şekil 5.11'de gösterildiği gibi, her bir çevrim için maksimum ve minimum kayma gerilmeleri ile kayma deformasyonlarını (*peak to peak*) birleştiren doğrunun eğimi alınarak kayma modülleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.12: Hesaplanan ve DSS den alınan çevrim sayısına göre kayma modülü değerleri karşılaştırması

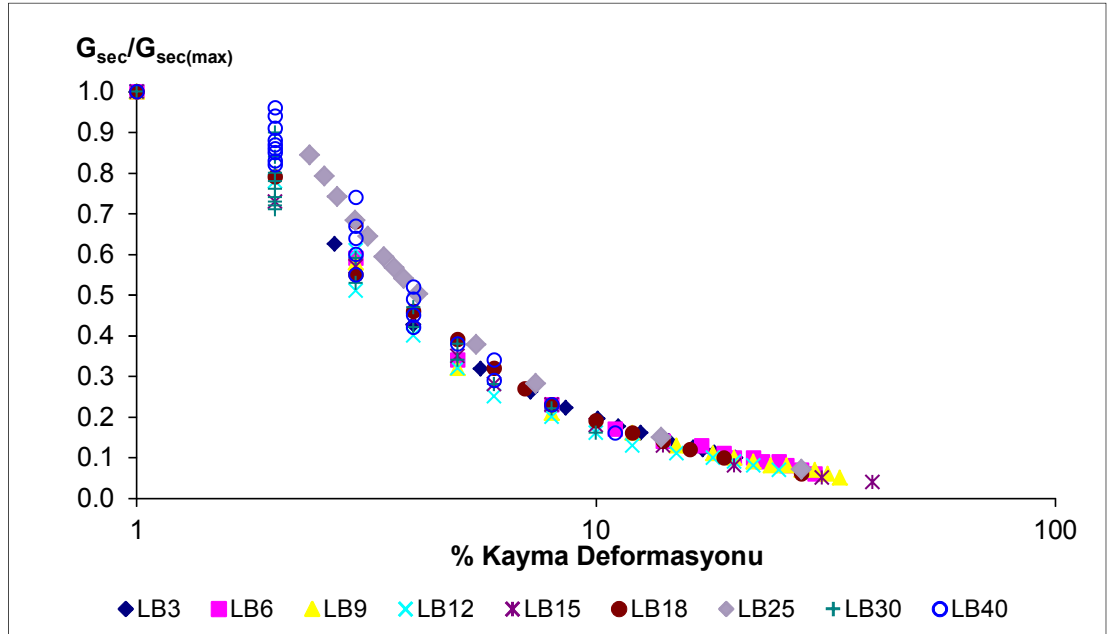
Şekil 5.12’de,yukarıda anlatılan hesaplama yöntemi ile elde edilmiş kayma modülü ve DSS’den alınmış olan sonuçların birebir uyumlu olduğu görülmektedir.

Her bir deney numunesinin, çevrim sayısına karşılık kayma modülü değişim değerleri Şekil 5.13’de gösterilmiştir. Bentonit yüzdesi arttıkça numunenin dinamik yüklemeye karşı gösterdiği direnç artmakta, buna bağlı olarak da kayma modülü değerindeki düşüşler daha az belirgin olmaktadır.

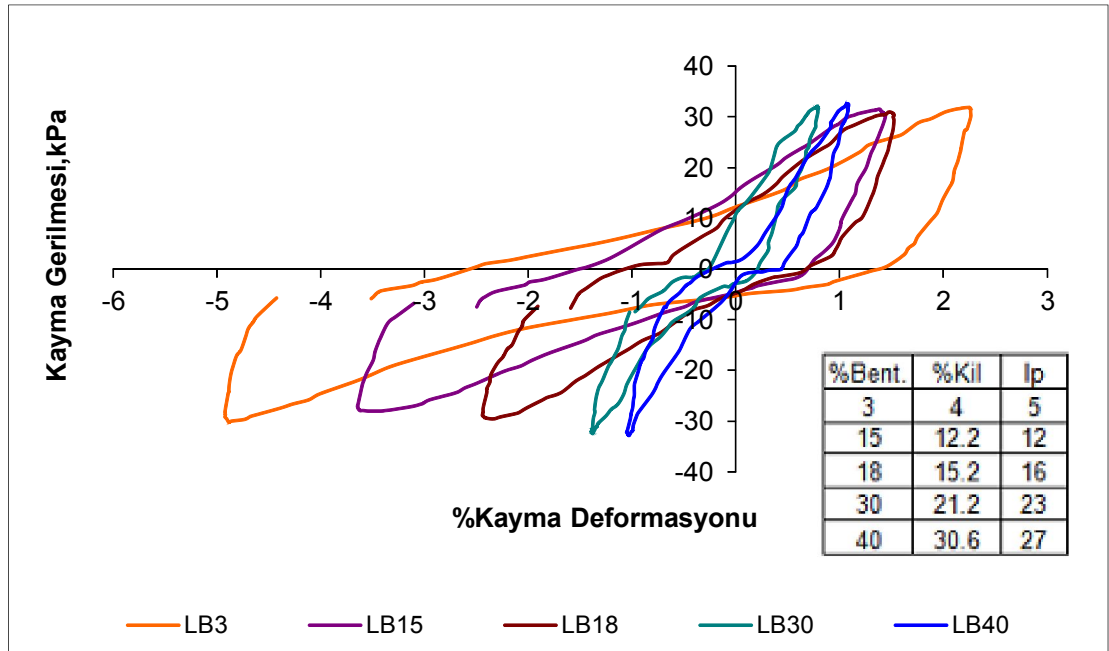


Şekil 5.13:Bentonit karışımları DSS kayma modüllerinin çevrim sayısına göre değişimi

İkinci aşamada her numunenin elde edilen kayma modülü değişim eğrisi kendi maksimum kayma modülüne göre normalize edilerek kayma deformasyonu ile ilişkisi Şekil 5.14’de gösterilmiştir. Özellikle %25 bentonit yüzdesinden sonra kayma deformasyonları daha düşük değerlerde kalarak belirli değerlerde yığılma göstermektedir.



Şekil 5.14: Normalized shear modulus reduction



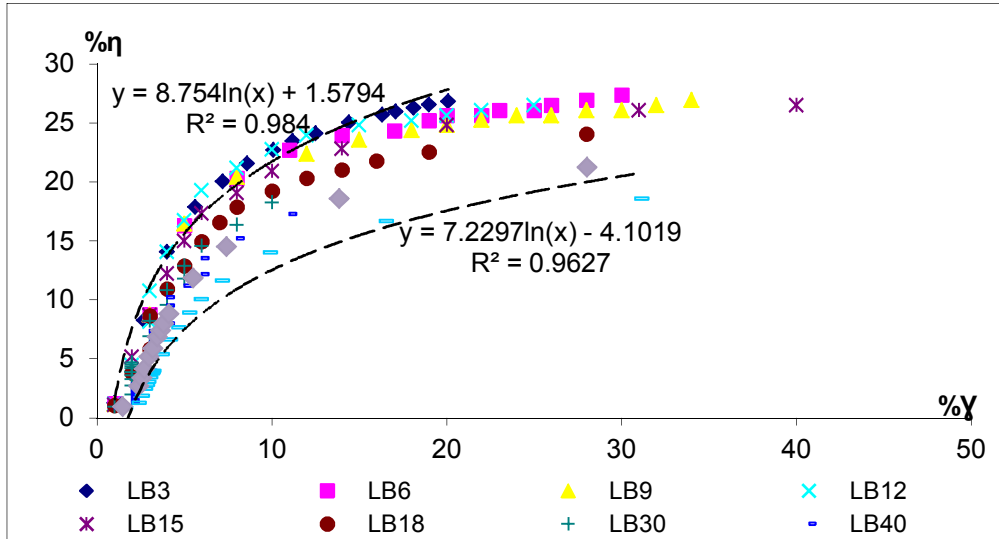
Şekil 5.15: 5. çevrim için histeresis ilmekleri

Şekil 5.15’de, farklı bentonit yüzdeleri sahip numunelerin 5. çevrimi için histeresis ilmekleri gösterilmiştir. Plastisite indisi kil yüzdesine bağlı olarak artmakta, plastisite indisinin numune rijitliği üzerindeki etkisiyle aynı çevrim için kayma deformasyonları da azalmaktadır. Bu nedenle Bölüm 2.4’de de açıklandığı üzere, eğriler altında kalan alanın (A_T) (Şekil 2.4) bir fonksiyonu olarak ifade edilen sönüm oranının (η) numunelerin plastisite indisi ile ters orantılı olduğu görülmektedir.

Sönüm oranı numunelerin fiziksel özelliklerinin ve rijitlik parametrelerinin bir fonksiyonu olan denklem 5.1'den de hesaplanabilmektedir.

$$\eta = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145I_p^{1.3})}{2} x \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{\max}} + 1 \right] \quad (5.1)$$

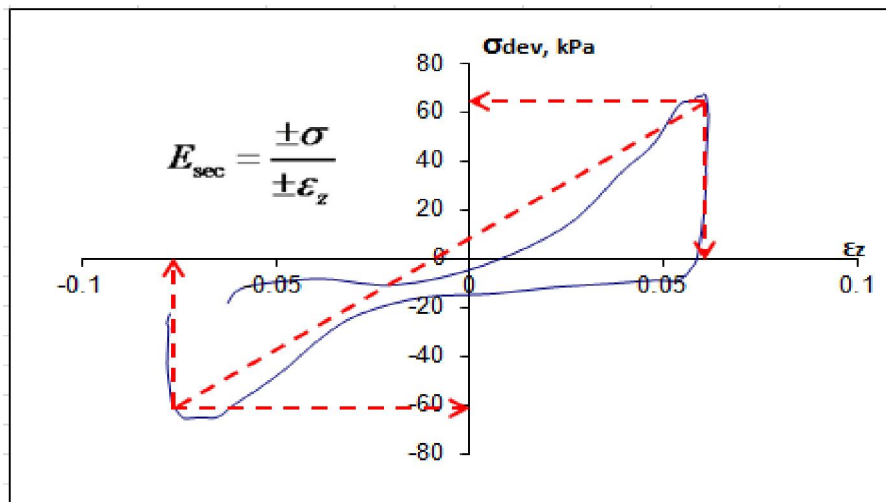
Denklem 5.1'e göre hesaplanmış sönüm oranları Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Yukarıdaki öngörüye göre plastisite indisi arttıkça numunelerin sönüm oranı azalmaktadır(Kramer,1996) .



Şekil 5.16: Bentonit karışımlarının sönüm oranları

5.3.1.2. CTX'ten Hesaplanan Kayma Modülü ve Deformasyon Karşılaştırması

DSS sonuçlarından yapılan kayma modülü hesabına benzer şekilde, CTX'den kiriş elastisite modülü (E_{sec}) hesaplanmıştır (Şekil 5.17).



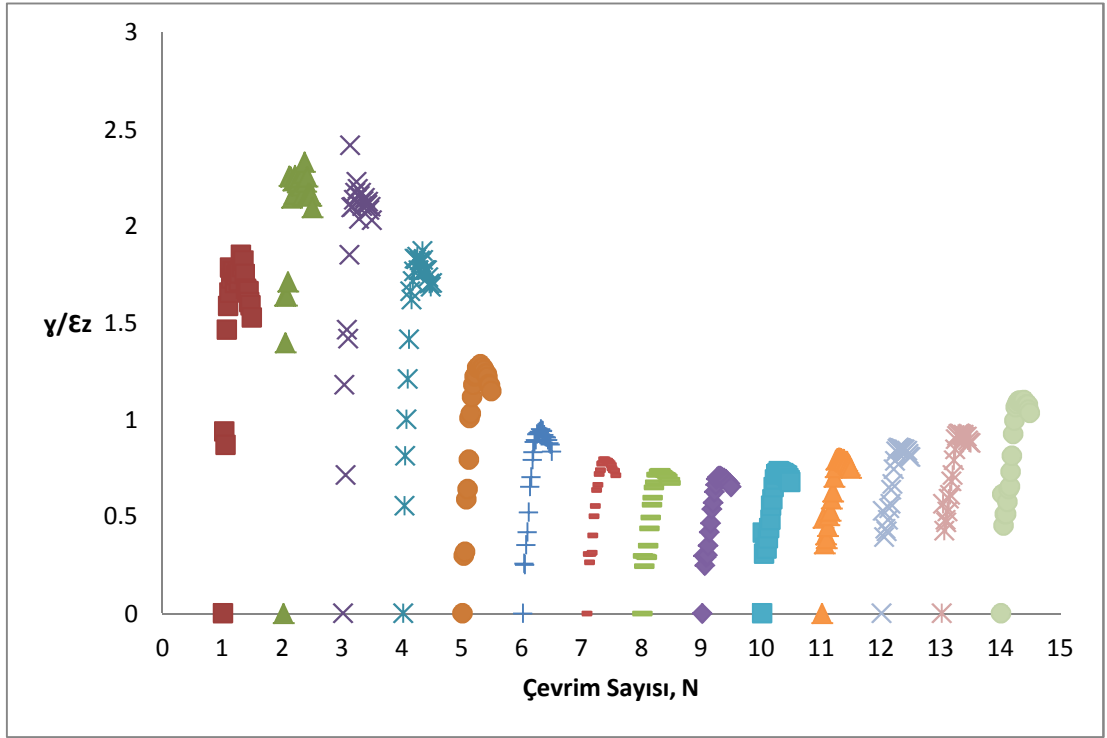
Şekil 5.17: CTX de kiriş elastisite modülü hesabı

Hesaplanan elastisite modüllerinden ASTM D3999-91'de verilen denklem 5.2'ye göre kayma modüllerine geçilmiştir. Burada yapay zemin numuneleri için Poisson oranı $\nu=0.3$ kabul edilmiştir.

$$G = \frac{E}{2*(1+\nu)} \quad (5.2)$$

CTX'den kayma modülü hesaplanırken CSR'ın deney başlangıç değerini (0.35) kaybetmediği, yani numunenin sıvılaşmadığı çevrim sayısına kadar olan değerleri alınmıştır. DSS için ise ilk 15 çevrimdeki kayma modülü azalımı hesaplanmıştır. Sonuçlar EK B.1'de verilmiştir. Sonuç olarak, DSS ve CTX'den hesaplanan kayma modülü azalım eğrilerinin uyumlu olduğu ve birbirlerini tamamladığı görülmüştür. Ancak bu yaklaşımda dikkat çeken bir diğer durum, G_{dss}/G_{ctx} grafiklerinden de (EK B.1) görüldüğü gibi aynı çevrim sayıları için her iki deneyden hesaplanan kayma modüllerinin birbirinden farklı olduğudur.

Ayrıca, deneylerde oluşan birim eksenel ve birim kayma şekil değiştirmeleri oranları da incelenmiştir. Silikon gibi lineer elastik bir malzemeden farklı olarak, numunelerde kalıcı deformasyonlar olduğundan karşılaştırmalarda, her zaman başlangıç durumundan ilgili çevrim sayısına kadar oluşan mutlak deformasyonlar değerlendirilmiştir. Silikonda olduğu gibi kayma deformasyonu ile eksenel deformasyon arasında tek bir orandan bahsetmenin mümkün olmadığı, γ/ϵ_z değerinin çevrim sayısı ile değişkenlik gösterdiği görülmüştür (Şekil 5.18).



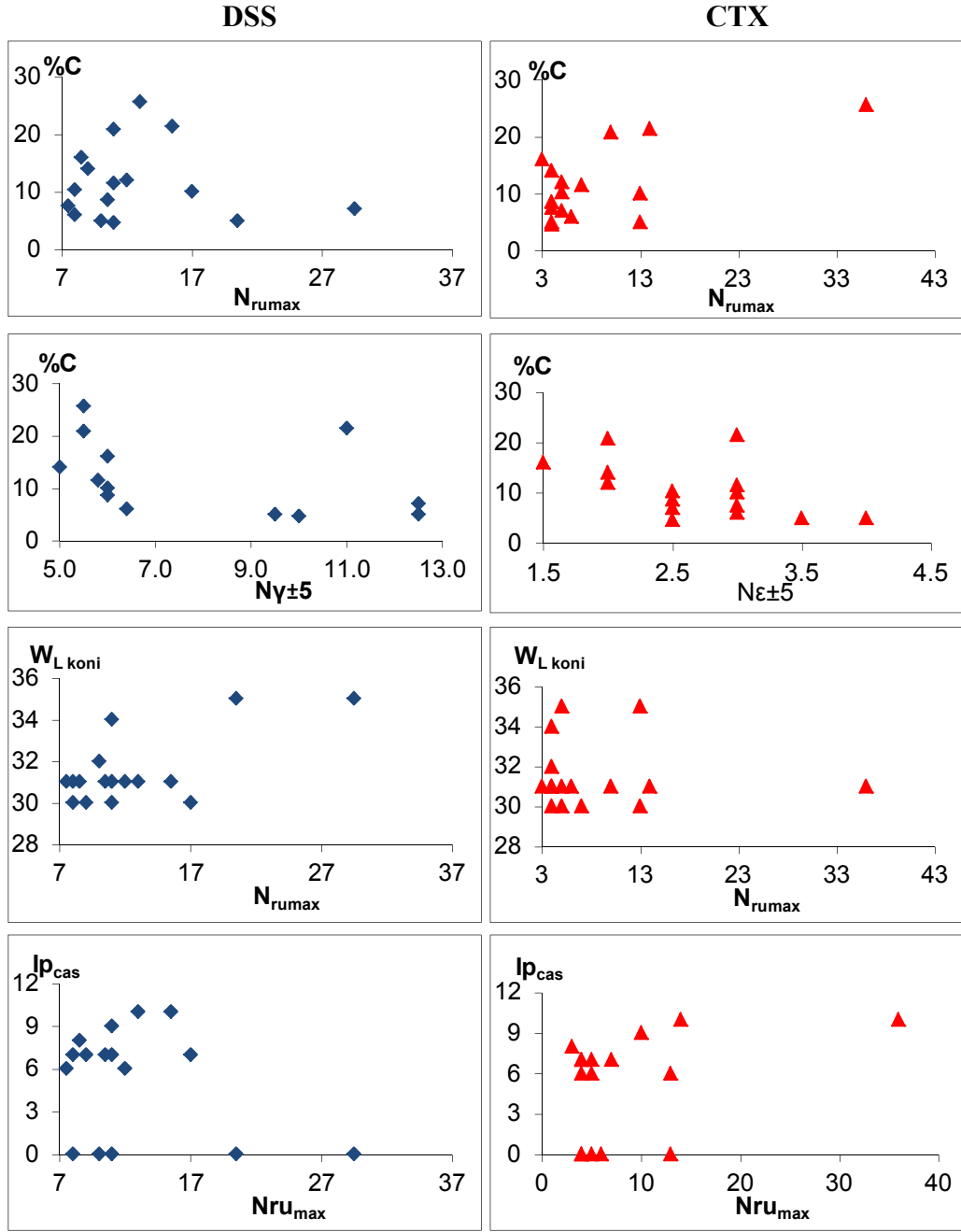
Şekil 5.18: %12 bentonitin çevrim sayısına göre γ/ϵ_z değişimi

5.3.2. Kaolinit Karışımları Dinamik Deney Sonuçları

Kaolinit karışımlarının CTX ve DSS’de elde edilen dinamik deney özet sonuçları Tablo 5.6’da verilmiştir. Ayrıca bentonit karışımlarında olduğu gibi kaolinit karışımlarının da aynı değişkenlere göre dinamik yükleme altındaki davranışı incelenmiş olup Şekil 5.19’da gösterilmiştir.

Tablo 5.5: Kaolinit karışımları dinamik deney sonuçları

KAOLİNİT (CSR=0.35 f=0.50 100 kPa)						
DSS						
%C	$N_{\gamma;\varepsilon\% \pm 5}$	$N_{\gamma;\varepsilon\% \pm 2.5}$	$r_{u\text{maks}}$	$N_{r\text{maks}}$	$W_{L\text{koni}}$	$I_{p\text{cas}}$
4.6	10.0	5	0.9	11	34	0
5	12.5	7	0.94	20.5	35	0
5	9.5	4	0.89	10	32	0
6	6.4	3.6	0.83	8	31	0
7	12.5	7.5	0.93	29.5	35	0
7.5	4.5	3	0.88	7.5	31	6
8.6	6.0	3.6	0.84	10.5	31	7
10	6.0	3.5	0.87	17	30	7
10.3	4.5	3	0.84	8	30	7
11.5	5.8	3.5	0.85	11	30	7
12	4.5	3	0.86	12	31	6
14	5.0	3	0.85	9	30	7
16	6.0	4	0.91	8.5	31	8
20.8	5.5	3.5	0.9	11	31	9
21.4	11.0	7.5	0.9	15.5	31	10
25.6	5.5	3.5	0.85	13	31	10
CTX						
4.6	2.5	1.5	1.00	4	34	0
5	4	2	0.96	13	35	0
5	3.5	2	1.00	4	32	0
6	3	2	1.00	6	31	0
7	2.5	1	1.00	5	35	0
7.5	3	2	1.00	4	31	6
8.6	2.5	1.5	1.00	4	31	7
10	3	2	0.88	13	30	6
10.3	2.5	2	0.99	5	30	7
11.5	3	2	0.97	7	30	7
12	2	1	0.95	5	31	6
14	2	1	1.00	4	30	7
16	1.5	1	1.00	3	31	8
20.8	2	1.5	0.9	10	31	9
21.4	3	1.5	0.94	14	31	10
25.6	2	1	0.93	36	31	10

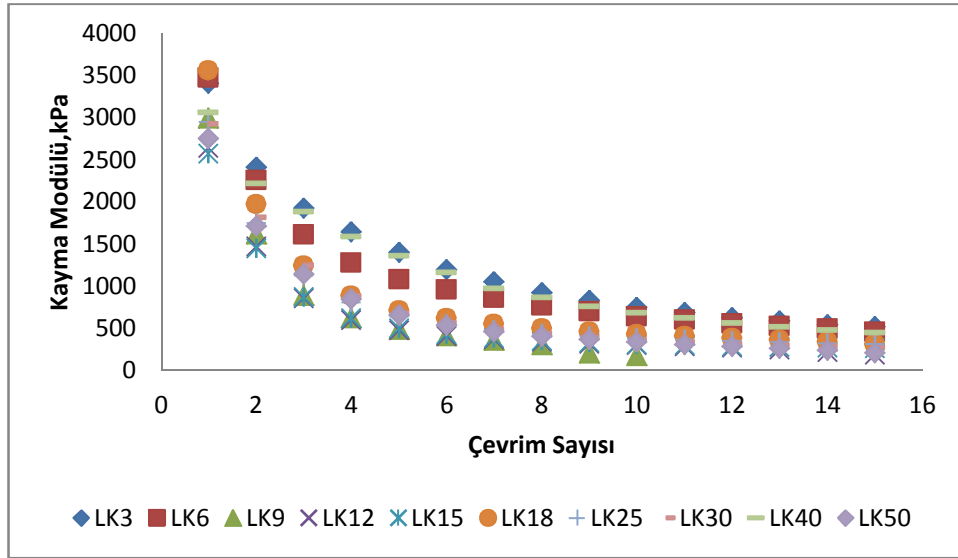


Şekil 5.19: Kaolinit karışımları CTX ve DSS deney sonuçlarının farklı değişkenlere göre incelenmesi

Bölüm 5.3’de belirtildiği üzere, bentonit karışımlarından farklı olarak kaolinitten dolayı karışım içerisindeki kil yüzdesi artmasına rağmen likit limit ve plastisite indisi değerlerinde belirgin bir değişim gözlenmemektedir. Bu durum sonucunda numunelerin dinamik yükleme altındaki davranışı da tutarsızdır. Hatta DSS sonuçları için kil yüzdesinin artışı dinamik yükleme direncini azaltmıştır. Bu davranışın sebebinin, karışımda kullanılan kilin kimyasal ve fiziksel özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

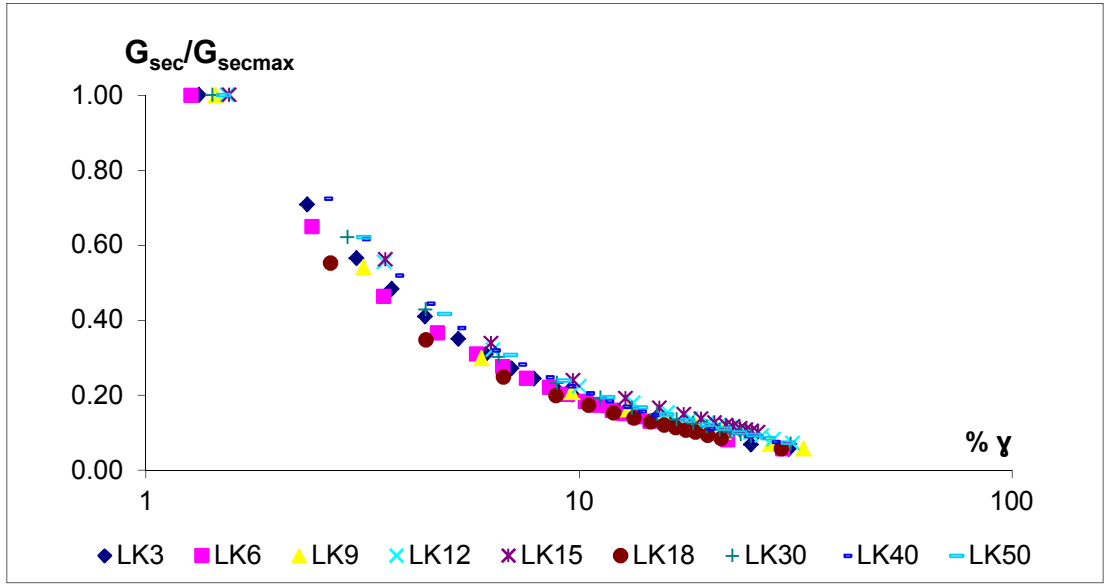
5.3.2.1. Kaolinit Karışımlarının Kayma Modülü ve Sönüm Oranı

Kaolinit karışımlarının kayma modülleri ve sönüm oranları da aynı yöntemle hesaplanmıştır. Kaolinit karışımlarındaki rijitlik değişim oranının bentonit karışımlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 5.20). Hatta düşük kaolinit yüzdesine sahip karışımların rijitliği daha yüksektir. Kayma modüllerindeki bu davranış, önceki bölümde öngörülen kaolinit miktarının artmasının rijitliği azaltıcı yönde etki ettiği yaklaşımını destekler yöndedir.

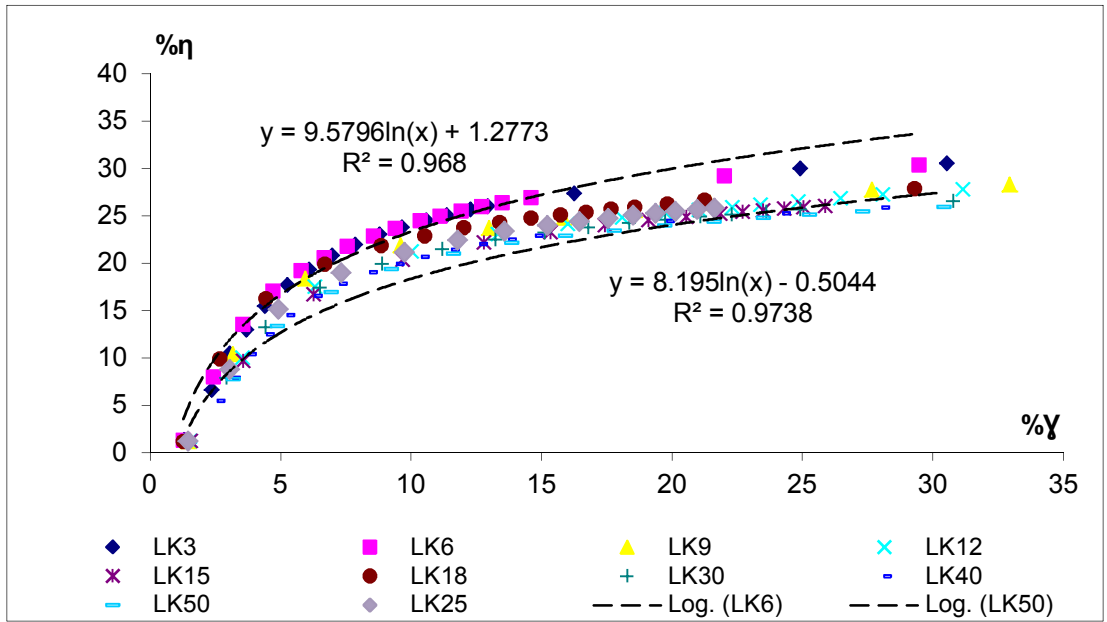


Şekil 5.20: Kaolinit karışımları DSS kayma modüllerinin çevrim sayısına göre değişimi

Normalize edilmiş kayma modülü azalım eğrilerinde de bentonit karışımlarından farklı olarak, kaolinit yüzdesinin artmasına rağmen oluşan kayma deformasyonlarının dağılımında herhangi bir farklılık görülmemiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21: Kaolinit karışımlarının normalize edilmiş kayma modülü azalımı

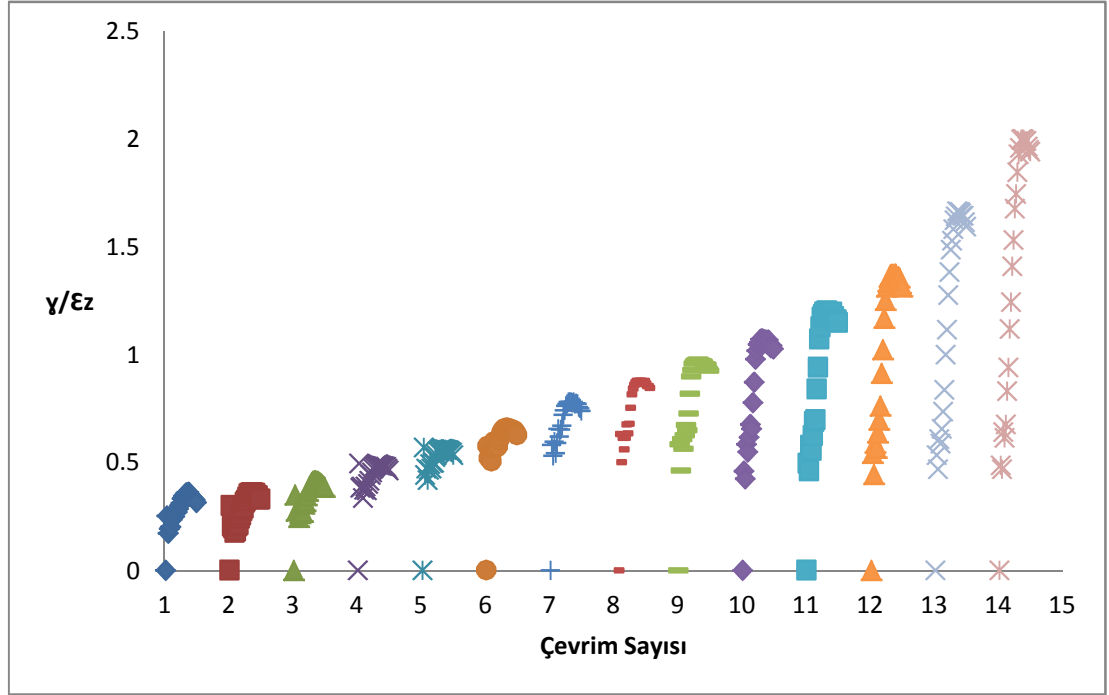


Şekil 5.22: Kaolinit karışımları sönüm oranları

Numunelerin sönüm oranları incelendiğinde, plastisite indisinde belirgin bir değişimin olmasından dolayı bentonit karışımlarına göre daha dar bir alanda kaldıkları görülmektedir. Ayrıca, daneler arası etkileşimin daha az olduğu kaolinit karışımlarının histeresis ilmekleri deformasyon eksenini boyunca daha geniş olup grafik altında kalan alan daha fazladır. Bu nedenle kaolinit karışımlarının sönüm oranları bentonit karışımlarına göre daha yüksektir.

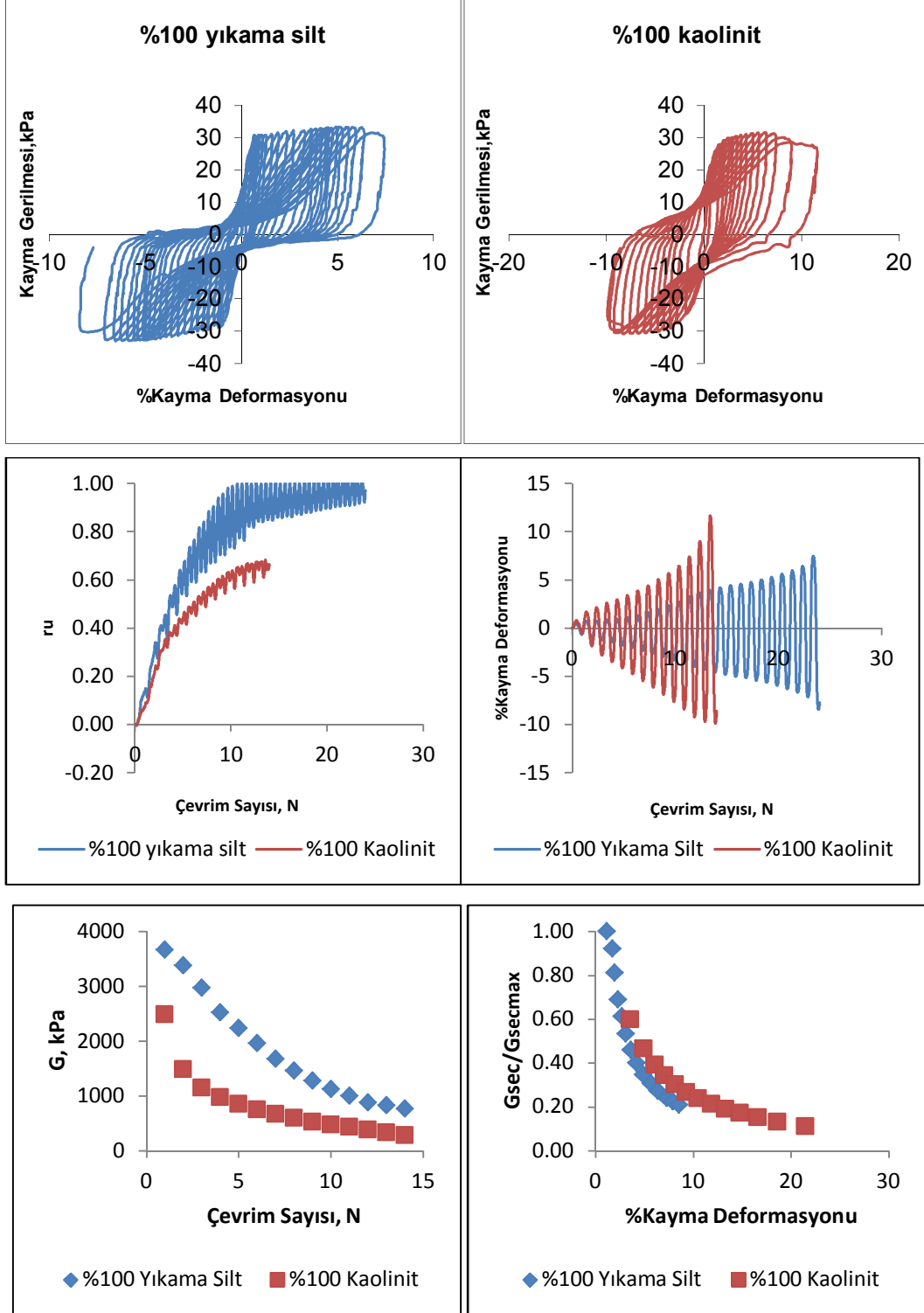
Kaolinit karışımlarının CTX'den hesaplanan kayma modülü karşılaştırması EK B.2'de verilmiştir. Kaolinit içinde bentonitte olduğu gibi her iki deneyden elde edilen kayma modülü azalım eğrileri birbiriyle uyumludur. Ayrıca G_{DSS}/G_{CTX} eğrilerinde

ise bentonit karışımlarında hep artan bir eğim görülürken, kaolinit karışımları için parabolik olup optimum bir değerden sonra azalım yönündedir. Bu durum kaolinit karışımlarının bentonit karışımlarına göre DSS’de uygulanan dinamik yüklemeye karşı rijitliğinin daha düşük olduğunun bir diğer göstergesidir.



Şekil 5.23: %12 Kaolinit karışımı γ/ϵ_z oranının çevrim sayısına göre değişimi

Kayma deformasyonu ile aksenal deformasyon arasında bentonit karışımları ile benzer olarak, sabit bir oran olmayıp çevrim sayısına göre değişkenlik göstermektedir (Şekil 5.23). Fakat kaolinit karışımları için γ/ϵ_z oranı çevrim sayısına göre artan bir eğilime sahipken, bentonit karışımları ise yine kaolinitin davranışının tersi olarak γ/ϵ_z oranı çevrim sayısına göre azalmaktadır.



Şekil 5.24: %100 yıkama silt ve %100 kaolinitin DSS deney sonuçları

Kaolinit karışımlarının dinamik yüklemeye karşı gözlemlenen davranışının açıklanabilmesi için %100 yıkama silti ve %100 kaolinit numunelerinin DSS deneylerinin yapılması öngörülmüştür. Şekil 5.24’de her iki numunenin deney sonuçları özetlenmiştir. Olması gerektiği gibi %100 yıkama silti numunesinde boşluk

suyu basıncı oranı (r_u) yaklaşık olarak 10. çevrimde 1.00 değerine ulaşırken kaolinitte oluşan maksimum r_u daha düşük değerlerde kalmıştır ($r_u=0.65$). Fakat kaolinitin deformasyon ve kayma modülü değişimi incelendiğinde ise silte göre tekrarlı yüklemeye karşı direncinin daha düşük olduğu görülmektedir. Kaolinit ± 10 çift yönlü deformasyon genliğine 14. çevrimde ulaşırken, yıkama silti numunesi ise aynı deformasyon genliğine 25. çevrimde ulaşmıştır. Ayrıca kaolinitin başlangıç kayma modülü değeri yıkama siltinin kayma modülünün %65'i kadardır ve aynı çevrim sayıları sonunda numunelerin kayma modülü azalım eğrilerinde de kaolinit silte göre daha düşük değerler almaktadır.

Belirlenen bu sonuçlar doğrultusunda, kaolinit karışımları için kaolinit yüzdesinin artmasına karşı numunelerin dinamik yüklemeye karşı direncinin düşmesi gerektiği söylenebilir. Her ne kadar dinamik deneylere başlamadan önce bu düşüncenin tersi bir sonuç beklenmiş olsada bu çalışmada kaolinit deneylerinde elde edilen sonuçlar kaolinit yüzdesindeki artışın dinamik direnci azalttığı bulgusunu desteklemektedir.

Sonuç olarak zeminlerin dinamik davranışında, numunelerde bulunan kil yüzdesinden çok kil mineralinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin daha etkili olduğu ön plana çıkmaktadır.

5.4. İnce Daneli Zeminlerin Sıvılaşma Tanısında Şekil Değiştirmeye Bağlı Değerlendirme

Siltlerin sıvılaşma tanımı, birçok araştırmacı tarafından eksenel deformasyon genliği ile yapılmıştır. Chang ve diğerleri (1982), düşük plastisiteli siltli zeminler üzerinde deneyler yapmışlardır. Bu araştırmacılar kil içerikli numunelerin sıvılaşma yenilme limitini %10 çift yönlü eksenel deformasyon genliği olarak tanımlamışlardır. Temiz kumlarda gelişen boşluk suyu basıncı artışı plastik özellikli numunelerle karşılaştırıldığında temiz kumlarda ilk çevrimsel hareketlilik olmaksızın %100 boşluk suyu basıncının geliştiği, plastik siltlerde ise %100 boşluk suyu basıncı kaydedilmeden önce çevrimsel hareketliliğin geliştiği gözlenmiştir. Law ve Ling (1992), plastisite gösteren killi kumlarda deneyler yapmışlar ve sıvılaşma yenilmesini az miktarda kil içeren numunelerde %100 boşluk suyu basıncının oluşması aşamasında tanımlamışlardır. Ancak, önemli kil içeriği olan numunelerde sıvılaşma yenilmesi %5 çift yönlü eksenel deformasyon genliğinde tanımlanmıştır.

Stewart ve Hussein (1993), NP siltin sıvılaşma eğilimini kil oranının artışına bağlı olarak incelemiştir. %0 ve %10 kil içerikli siltte fazla boşluk suyu basıncının gelişiminin aynı hız, %20 kil içerikli siltte ise farklı bir eğimde olduğu gözlemlenmiştir. Plastik siltlerde çevrimsel hareketlilik önemli boşluk suyu basıncı gelişimi kaydedilmeden önce gözlemlenirken, plastik olmayan siltlerin boşluk suyu basıncı gelişimi temiz kumda olduğu gibi önce $r_u = \%100$ değerine ulaşılması, bunu izleyerek önemli birim boy değiştirmelerin belirmesi biçiminde ortaya çıkmıştır. Koester (1994) farklı plastisitede siltlerde deney yapmıştır. Sıvılaşma yenilmesini boşluk suyu basıncı oranının %100'e yükselmesi veya %2.5 çift yönlü aksenal deformasyon genliği olarak tanımlamıştır. Olası %100 boşluk suyu basıncı oranının öncelikle düşük plastisiteli siltlerde belirdiği ve %2.5 çift yönlü aksenal deformasyon genliğinin de plastikliği yüksek siltlerde olduğu öne sürülmüştür. Singh (1994), Prakash ve Puri (1982) gibi siltli zeminlerin sıvılaşması üzerinde çalışmıştır. Bu gurubun görüşüne göre de plastik olmayan siltli zeminlerin boşluk suyu basıncının artması ve çevrimsel hareketliliğin oluşması genellikle temiz kumlarınkıyla aynıdır. Boşluk suyu basıncının artması ve çevrimsel hareketlilik özellikleri plastik silt ve plastik kumlarda benzerdir. Bu çalışmalarda örselenmemiş lölşlerde kil içeriğinin boşluk suyu basıncı artışını geciktirdiği belirlenmiştir. Niu (1996), plastik siltlerde deneyler yapmış ve sıvılaşma yenilmesini %5 çift yönlü aksenal deformasyon genliğinde tanımlamıştır. Denenen plastik siltlerde zeminin yüksek CSR değerlerinde sıvılaşabileceği gösterilmiştir. Prakash ve Puri (2003), siltler ve kil-silt karışımlarının sıvılaşma hassaslığını dinamik üç eksenli deneylerde incelemişlerdir. Yapılan CTX sonuçlarından sıvılaşmayı boşluk suyu basıncı oranının %100 olması veya dinamik deformasyonun %20 çift yönlü aksenal deformasyon genliğinde tanımlamışlardır (Ural, 2007).

Bu konuda yapılmış çalışmalar genelde CTX deneylerinden elde edilen sonuçlara dayanmaktadır. Bu tezde ise DSS deney sonuçlarına göre sıvılaşmanın birim şekil değiştirmeye dayalı tanımlaması yapılacaktır.

Tablo 5.4 ve 5.5'de görüldüğü üzere CTX de yapılan bentonit ve kaolinit deneyleri için $\% \pm 5$ çift yönlü deformasyon genliği (*double amplitude*, DA) değerine ulaşılan çevrim sayısı ($N_{E \pm 5}$), boşluk suyu basıncı oranının maksimum olduğu çevrim sayısı (N_{rumaks}) değerlerinden hep daha düşüktür. Bu nedenle numunelerin sıvılaşmasının

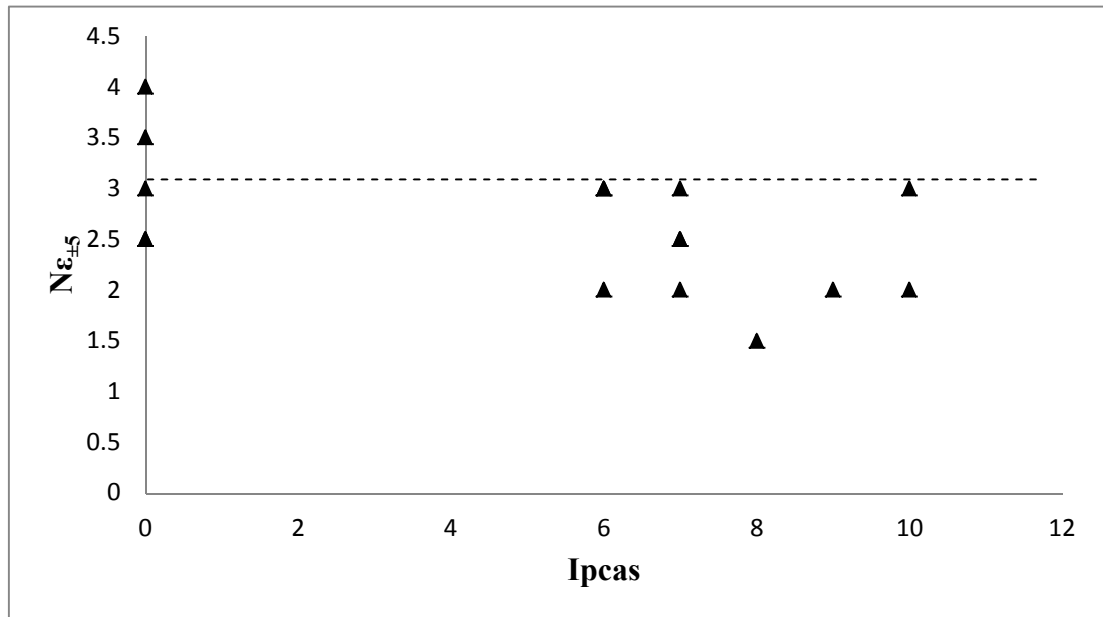
ru değerinden çok deformasyon değerine göre belirlenmesinin daha doğru olacağı düşünülmektedir.

Bu yaklaşımla, sıvılaşma ayrımı için $N_{\epsilon_{\pm 5}}$ değerinde bentonit ve kaolinit yüzdesine göre ani artış gözlemlendiği ilk sonuçlar eşik değeri olarak belirlenmiştir. Grafiklerde kullanılan simgelerin açıklaması Tablo 5.7'deki gibidir.

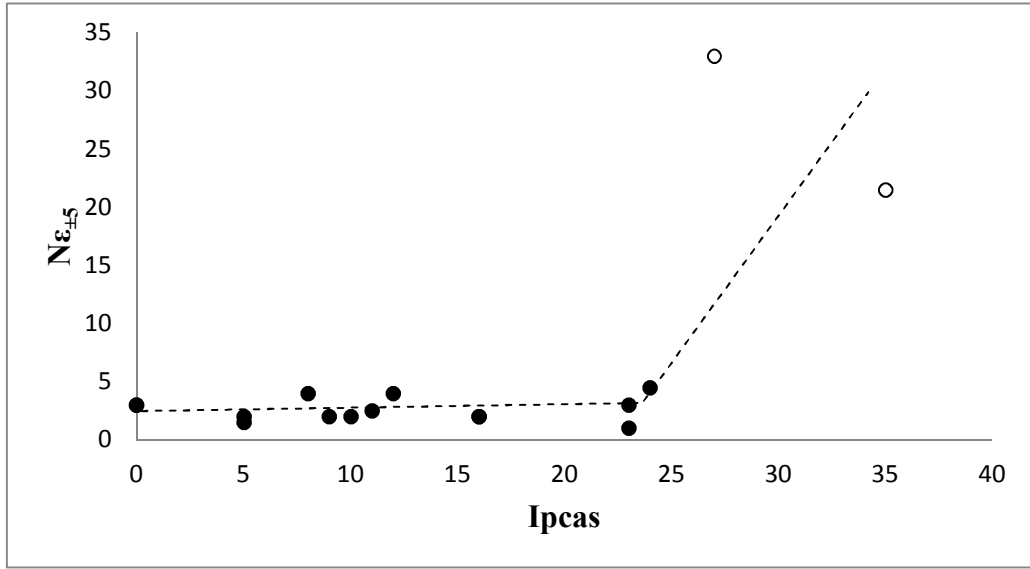
Tablo 5.6:Deformasyona bağlı sıvılaşmanın tanımlanmasında kullanılan grafikler için simgelerin açıklaması

	CTX	DSS
Bentonit (Sıvılaşan)	●	■
Bentonit (Sıvılaşmayan)	○	□
Kaolinit (sıvılaşan)	▲	◆
Kaolinit (sıvılaşmayan)	△	◇

CTX-Kaolinit tablosunda görüldüğü üzere $N_{\epsilon_{\pm 5}}$ değerleri çok düşük değerlerde kalmış olup tüm numunelerde sıvılaşma gözlemlendi olarak değerlendirilmiştir (Şekil 5.25).



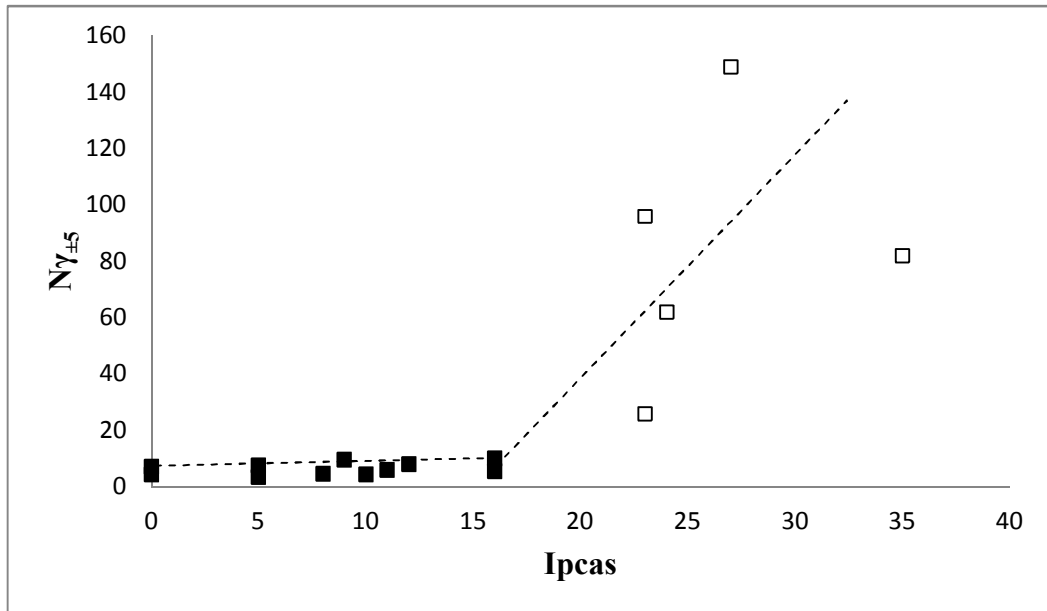
Şekil 5.25 :CTX-Kaolinit Karışımları



Şekil 5.26 :CTX-Bentonit Karışımları

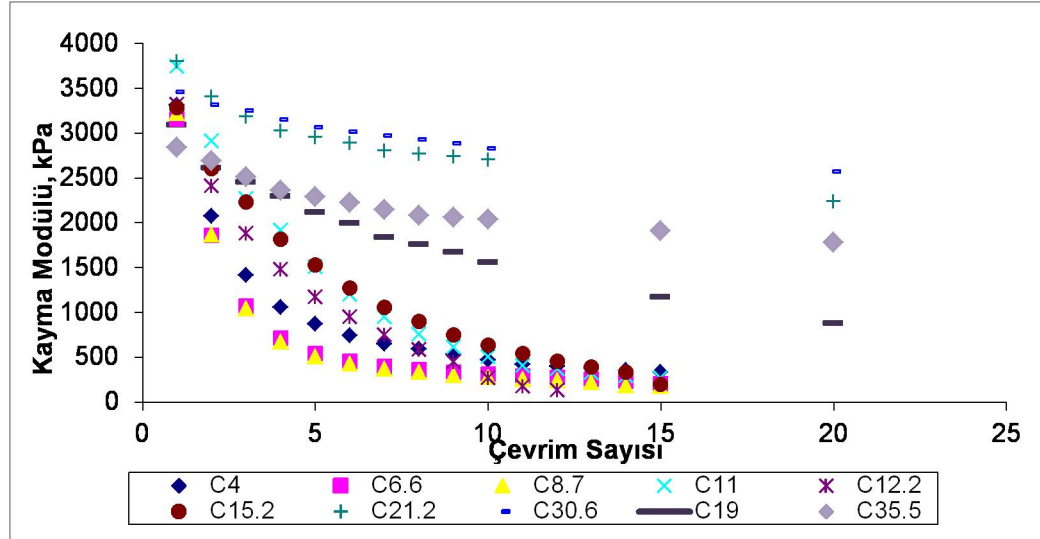
CTX-Bentonit sonuçlarında ise kaolinit numunelerine göre az da olsa bir değişimden bahsetmek mümkündür. %40 ve %50 bentonit numunelerinin diğer karışımlara oranla dinamik yüklemeye karşı direncinde kesin bir fark bulunmaktadır.

CTX'de incelenen aksenal deformasyon yaklaşımı, DSS'de ölçülen kayma deformasyonları içinde geçerli olup, $N_{\gamma_{\pm 5}}$ değerleri N_{rumaks} dan daha düşüktür. Hatta DSS de elde edilen sonuçlar CTX sonuçlarına göre çok daha tutarlıdır. Bunun sebebinin sıvılaşma kriteri olarak incelenen deformasyon yaklaşımının DSS'in çalışma mantığı olması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.27 :DSS-Bentonit Karışımları

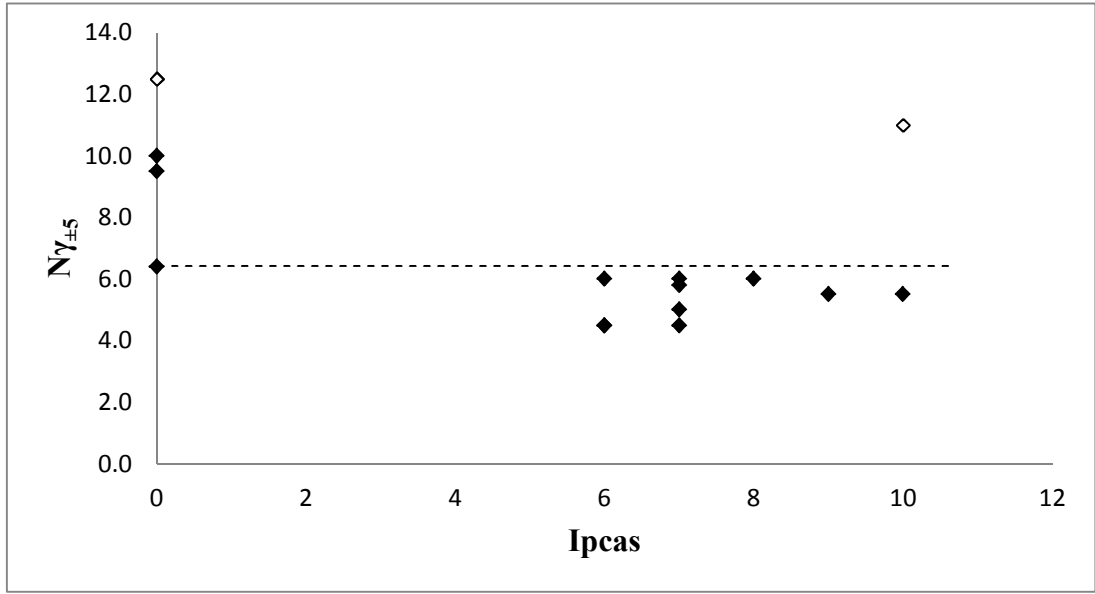
Şekil 5.27'e göre Ip'nin 16 olduğu değerden itibaren bentonit numunelerinin çevrimsel yüklemeye karşı gösterdiği davranış farklılaşmaya başlamıştır. Bu değere karşılık %C=15 dir. Bu durumun başka bir kanıtı olarak numunelerin ilk 15 çevrim için kil yüzdelere göre kayma modülü eğrileri Şekil 5.28'de gösterilmiştir. %C=15 değerinden sonra numunelerin çevrimsel yüklemeye direncinin arttığı burada da görülmüştür.



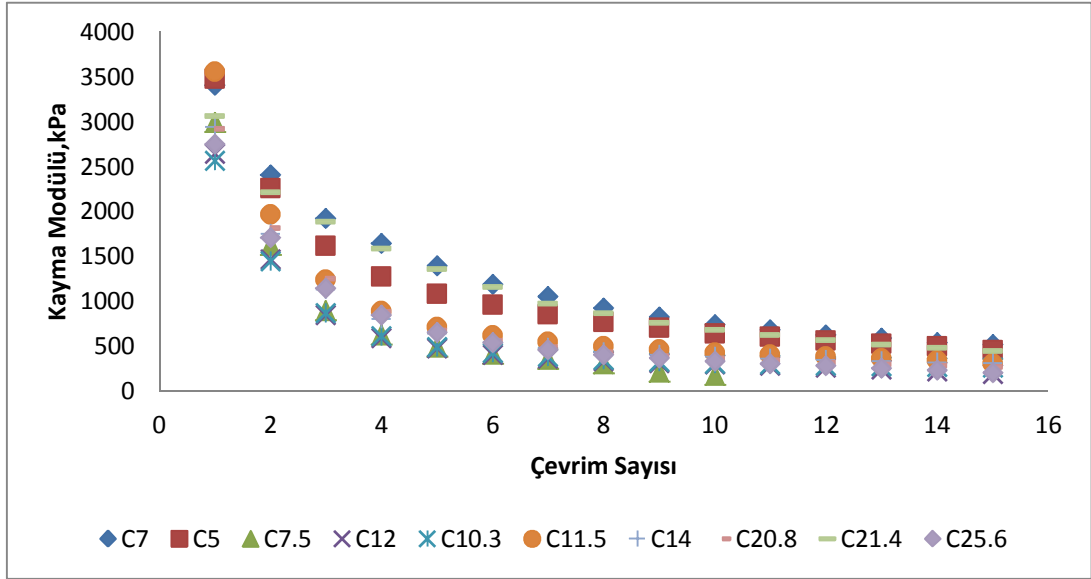
Şekil 5.28 :İlk 15 çevrim için DSS-Bentonit kayma modülü azalım eğrileri

Bu sonuçlar göz önüne alındığında, bentonit içerikli karışımlar için $N_{\gamma \pm 5}$ değeri referans olmak şartıyla, %C=15 değerinin hem sıvılaşma, hemde numunenin rijitliği açısından sınır değer kabul edilebileceği görülmektedir.

Tablo 5.6'da DSS-Kaolinit numune verileri gösterilmiştir. Deney sonuçlarında bentonit karışımlarının sonuçlarındaki kadar belirgin bir farklılık görünmese de $N_{\gamma \pm 5}$ değerleri yine N_{rumaks} çevrim sayısı değerinden hep daha düşüktür. Fakat bentonit numunelerinde olduğu gibi karışımdaki %C değeri artmasına rağmen kaolinit numunelerin çevrimsel yüklemeye karşı direncin düştüğü ve bu durumun sebebi bir önceki bölümde belirtilmiştir. DSS için de kaolinit karışımlarında sıvılaşmış olarak kabul edilen numunelerin sayısı bentonit karışımlarına göre daha fazladır.



Şekil 5.29 :DSS-Kaolinit Karışımları



Şekil 5.30 :İlk 15 çevrim için DSS-Kaolinit kayma modülü azalım eğrileri

Ayrıca Şekil 5.14 ve 5.21 incelendiğinde %10 çift yönlü deformasyon genliğinde numunelerin rijitliklerinde %85 civarında bir azalmanın olduğu ve G azalım eğrilerinin bu deformasyon değerinden itibaren yataylaşmaya başladığı görülmektedir. Bu nedenle %10 çift yönlü deformasyon genliğinin, yapay numuneler için sıvılaşma yenilmesinin başladığı ve plastik duruma geçtiği sınır değeri olduğundan bahsedilebilir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında laboratuvar ortamında hazırlanmış olan karışım numuneleri üzerinde yapılan DSS ve CTX deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi sonucu aşağıdaki görüşler oluşmuştur.

1. Lineer elastik malzemeler için DSS ve CTX'de oluşan deformasyonlar arasında $\gamma/\epsilon_z \approx 2$ gibi bir orandan bahsetmek mümkündür. Ancak, tez çalışmasında kullanılan yapay zemin numunelerinde bu oranın sabit olmayıp, kullanılan bentonit ve kaolinitin kimyasal veya fiziksel özellikleri ve çevrim sayısına bağlı olarak 0.4 ile 2 arasında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir.
2. Deneylede kullanılan cihazların çalışma prensiplerine bağlı olmak üzere, numunelerin sıvılaşması için her iki sistemde uygulanması gerekli çevrimsel gerilme oranı (CSR) değerlerinin aynı eğilim içerisinde olduğu görülmüştür.
3. Numunelerin rijitlik parametresi (kayma modülü) açısından yapılan değerlendirmede, DSS'de doğrudan hesaplanan sonuçlar ile CTX'den dolayı olarak elde edilen sonuçların birbirleriyle tam uyumlu olduğu saptanmıştır.
4. Plastisite indisi arttıkça, çevrim sayısına karşı $G_{sec}/G_{secmaks}$ değeri artmakta numunelerin sönüm oranı ise azalmaktadır.
5. Kil yüzdesindeki artışa bağlı olarak numunelerin dinamik yüklemeye karşı direncinin artması gerekmektedir. Ancak bunu karışımdaki kil yüzdesinden çok kil mineralinin fiziksel veya kimyasal özelliğinin belirlediği görülmüştür.
6. İnce daneli zeminlerde sıvılaşmanın deformasyona bağlı tanımlanmasında, $\pm 5\%$ çift yönlü deformasyon genliğinin ve bu deformasyonun ölçüldüğü çevrim sayısının, yapay numunelerde sıvılaşma yenilmesinin başladığı ve plastik duruma geçtiği sınır değeri olduğu görülmüştür.
7. Bundan sonraki aşamada, aynı değerlendirmelerin doğal numuneler için de geçerli olup olmadığının kontrol edilmesi ve laboratuvar ortamında hazırlanmış numunelerde zamanın rijitliğe etkisinin incelenmesi önerilmektedir.

7. SÖZLÜK

Advanced Constitutive Model	: İleri yapıcı model
Amplitude	: Genlik
Axial Strain (ϵ_z)	: Eksenel birim şekil değiştirme
Backbone Curve	: Omurga eğrisi
Cyclic Mobility	: Çevrimsel hareketlilik
Cyclic Resistance Ratio (CRR)	: Çevrimsel direnç oranı
Cyclic Stress Ratio (CSR)	: Çevrimsel gerilme oranı
Cyclic Triaxial Test (CTX)	: Dinamik üç eksenli testi
Damping Ratio (η)	: Sönüm oranı
Degraded Hysteresis Type	: Azalan histeresis türü
Double Amplitude Strain (DSA)	: Çift yönlü birim şekildeğiştirme genliği
Dynamic Simple Shear Test (DDSS)	: Dinamik basit kesme testi
Elastic Modulus (E)	: Elastisite modülü
Equivalent Linear Model	: Eş doğrusal model
Flow Liquefaction	: Akma sıvılaşması
Frequency	: Frekans
Hardening Rule	: Pekleşme kuralı
Hysteresis Loop	: Histeresis ilmeği
Intermediate-Strain Level	: Orta birim şekil değiştirme seviyesi
Limit State Curve	: Limit denge eğrisi
Liquefaction	: Sıvılaşma
Piezoelectric Bender Element	: Piezoelektrik bender elemanı
Pore Pressure Ratio (ru)	: Boşluk basıncı oranı
Reference Strain	: Referans birim şekil değiştirme
Relaxation Time	: Gevşeme zamanı
Resonant Column Test:	: Rezonant kolon testi
Retardation Time	: Gecikim zamanı
Secant Modulus	: Kiriş modülü
Shear Modulus (G)	: Kayma modülü

Shear Modulus Reduction (G/G_{maks})	: Kayma modülü azalımı
Shear Strain	: Kayma birim şekil değiştirmesi
Skeleton Curve	: Omurga eğrisi
Small-Strain Level	: Düşük birim şekil değiştirme seviyesi
Stiffness	: Rijitlik
Ultrasonic Pulse Test	: Ultrasonik sinyal deneyi
Undegraded Hysteresis Type	: Azalmayan histeresis türü

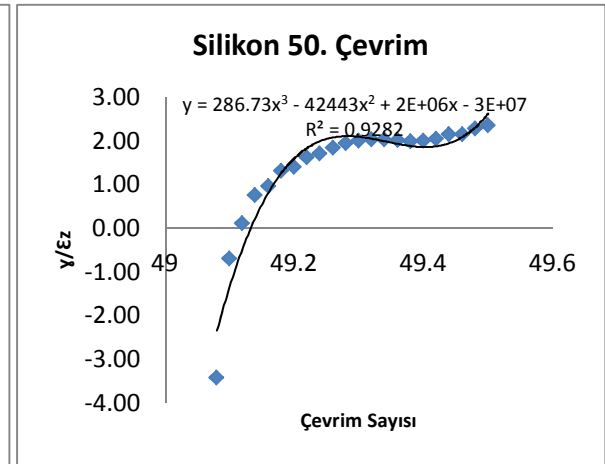
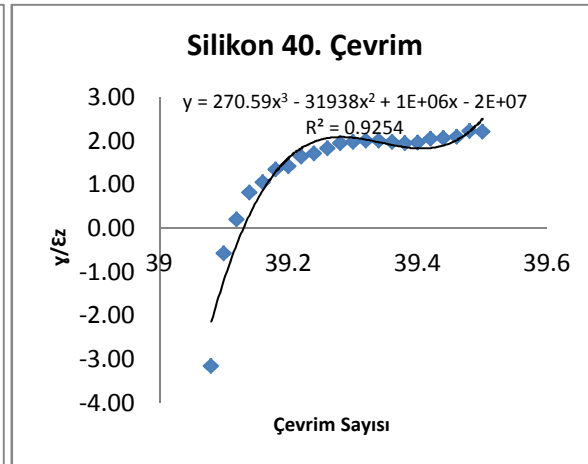
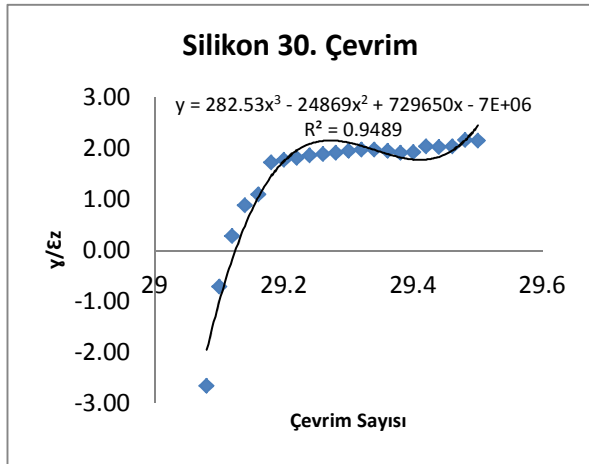
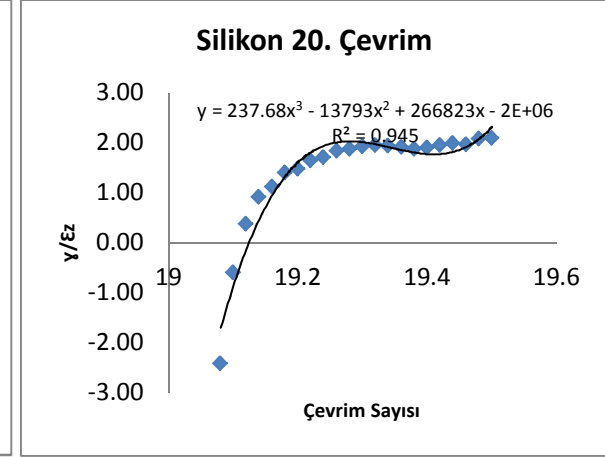
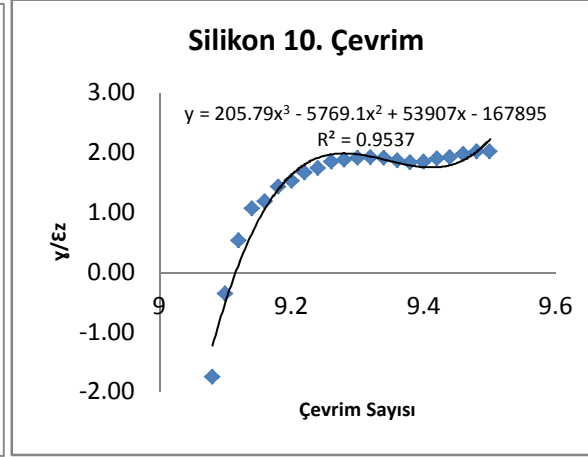
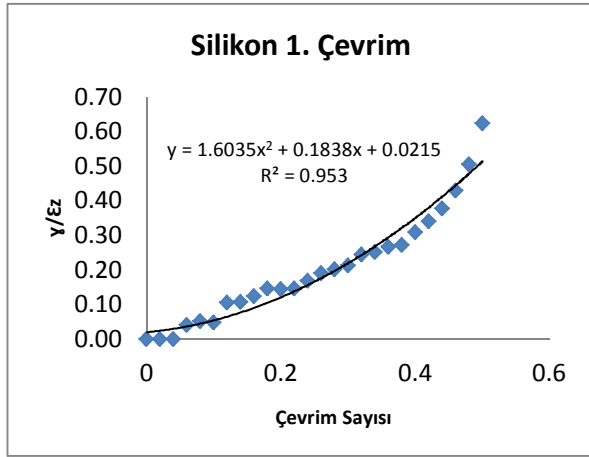
8. KAYNAKÇA

- ASTM D3999-91** (Reapproved 1996). “Standart Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus”
- ASTM D6528-00** “Standart Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils”
- De Alba, P.**, 1975. Determination of Soil Liquefaction Characteristics by Large-Scale Laboratory Test, Contract No. AT(04-3)-954, US Atomic Energy Commission Division of Reactor Safety Research, Washington DC
- Burland, J.**, 1989. “Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture: The stiffness of soils at small strains,” Canadian Geotechnical Journal 26, 499-516
- Jardine, R.**, 1992. “Some observation on the kinematic nature of soil stiffness,” Soil and Foundations 32 (2), 111-124
- Altun, S., Ansal, A.**, 2003. “Tekrarlı yükler altında kumların gerilme-şekil değiştirme özellikleri”, İtü Dergisi, Cilt 2, Sayı 4, 25-34
- Hight, D. ve Higgins, K.**, 1995. “An approach to the prediction of ground movements in engineering practice: background & applications”, Proc. of the 1st International Conference on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Sapporo-Japan, September 12-14
- Kallioglou, P., Tika, Th. Ve Pitilakis, K.**, 2008. “Shear Modulus and Damping Ratio of Cohesive Soils”, Journal of Earthquake Engineering, 12:6, 879-913
- Kramer, S. L.**, 1995. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall
- Hardin, B.O. ve Black, W.L.**, 1968. “Vibration modulus of normally consolidated clay, Proc. ASCE, Vol. 94, SM2, 353-369, 1968
- Afifi, S.S. ve Richart Jr., F.E.**, 1973. “Stress-history effects on shear modulus of soils, Soils Found., Vol. 13, No. 1, 77-95
- Hardin, B.O.**, 1978. “The nature of stress-strain behaviour for soils”, ASCE Geotech. Engg. Div. Specialty Conf. Earthq. Eng. Soil Dynam., Vol. I, 3-90
- Kokusho, T.**, 1982 “Dynamic soil properties and nonlinear seismic response of ground”, Doctoral Thesis, University of Tokyo (in Japanese), 1982
- Chung, R.M., Yokel, F.Y. ve Drnevich, V.P.**, 1984. “Evaluation of dynamic properties of sands by resonant column testing, Geotech. Test. J., Vol. 7, No. 2, 60-69
- Imazu, M. ve Fakutake, K.**, 1986 “Dynamic shear modulus and damping ratio of gravel materials”, Proc. 21st Annual Convention of JSSMFE, 509-512
- Kokusho, T.**, 1987. “In-situ dynamic soil properties and their evaluations, Proc. 8th Asian Regional Conf. Soil Mech. Engg., Vol. 2, 215-240
- Dobry, R. ve Vucetic, M.**, 1987. “Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits”, Proc. Intern. Symp. Geotech. Eng. Soft Soils, Vol. 2, 51-87
- Parakash, S., ve Puri, V.K.**, 2003. “Liquefaction of Silt and Silt-Clay Mixtures” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering
- Wang, W.**, 1979. “Some Findings in Soil Liquefaction” Report Water Conservancy and Hydro-electric Power Scientific Research Institute, Beijing, China, 1-17

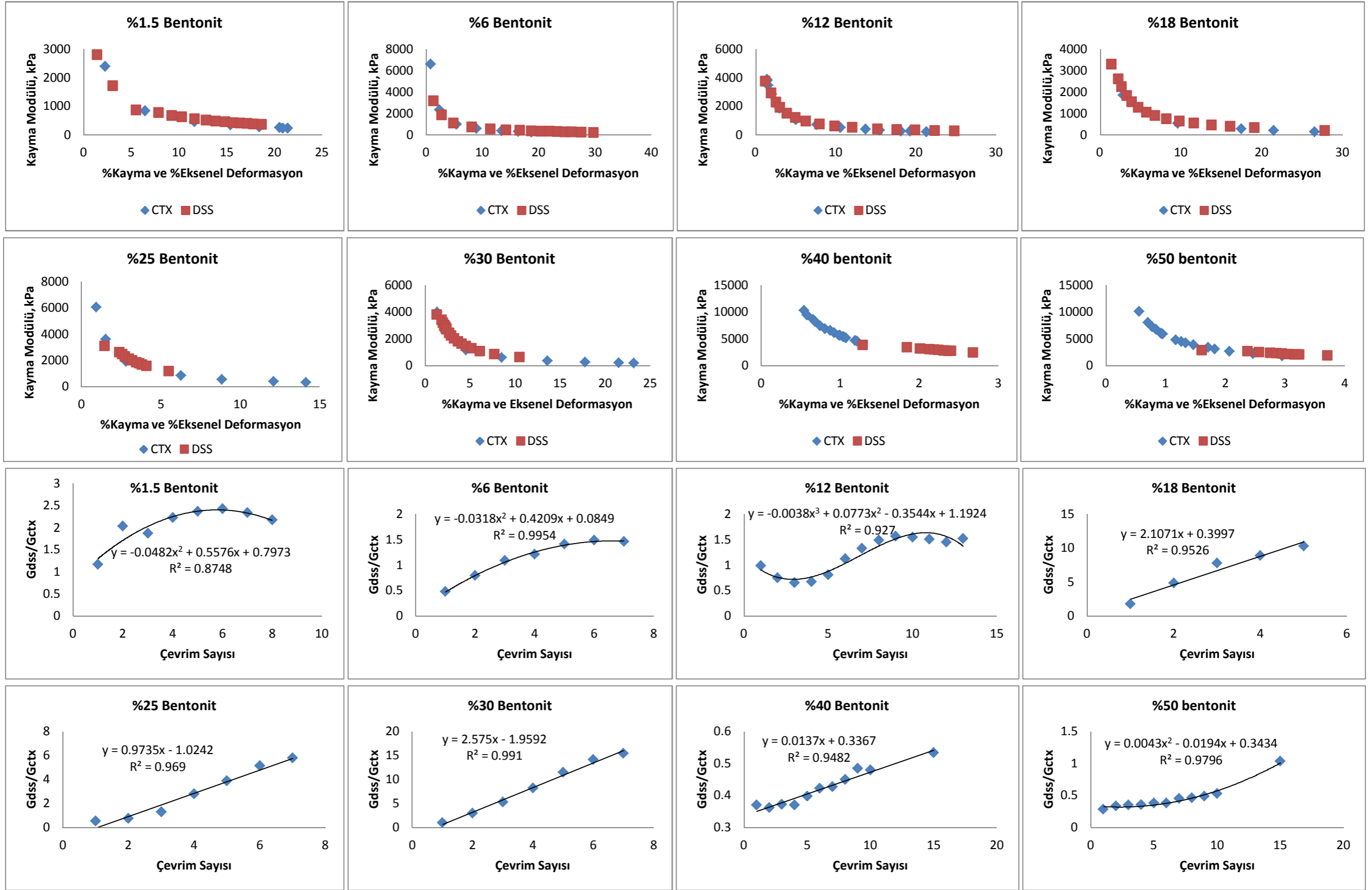
- Tohno, I. ve Yasuda, S.**, 1981. "Liquefaction of the Ground During the 1978 Miyagiken-Oki earthquake" *Soils and Foundations*, 21(3), 18-34
- Ishihara, K.**, 1984. "Post-Earthquake Failure of a Tailings Dam due to Liquefaction of the Pond Deposit". *Proc. Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engrg.* St. Louis, Missouri, Vol. 3, 1129-1143
- Miura S., Kawamura S., ve Yagi, K.**, 1995. "Liquefaction Damage of Sandy and Volcanic Grounds in the 1993 Hokkaido Nansel-Oki Earthquake." *Proc. 3rd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engg. An Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, Vol. 1, 193-196
- Sandoval, S.J.**, 1989. "Liquefaction and settlement characteristics of silts soils", Doktora Tezi, Missouri Üniversitesi
- Stewart, H.E. ve Hussein, A.K.**, 1993. "Undrained Cyclic Behavior of Silt", US-Japan Workshop, Napa, CA,
- Puri, V.K. Das, B.M., ve Prakash, S.**, 1999. "Liquefaction of silty soils", *Proc. Second Int Conf on Earthquake Geotechnical Engg.*, Lisbon, Portugal, Vol. 2, s.619-623
- Kaya, Z., Irisawa, T., Erken, A.**,2002. Adapazarı zeminlerinin dinamik davranışı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, s. 220-227
- Bouckovalas, G.D., Andrianopoulos K.I., Papadimitriou A.G.**, 2003. "A critical state interpretation for the cyclic liquefaction resistance of silty sands"
- Yunmin C., Han K., Ren-peng C.**, 2006. "Correlation of shear wave velocity with liquefaction resistance based on laboratory tests"
- Gratchev, I.B., Sassa, K., Osipov, V.I., Sokolov, V.N.**, 2006. "The liquefaction of clayey soils under cyclic loading," *Engineering Geology*, 86,70-79
- Ural, N., Önalp, A. ve Bol, E.**, 2007. Liquefaction Identification of Silts, 2. İMO Geoteknik Sempozyumu 22-23 Kasım 2007 Adana
- Ural, N., Doktora Tezi**, 2008. "İnce Daneli Zeminlerde Kil Oranının Sıvılaşmaya Etkisi", Sakarya Üniversitesi FBE, Mart 2008
- Ikuo, T.**, 2007. *Geotechnical Earthquake Engineering*, Springer-Verlag
- Ishihara, K.**, 1996. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Clarendon Press, Oxford
- Önalp, A.**, 2007. *Geoteknik Bilgisi 1, Çözümlü Örneklerle Zeminler ve Mekaniği*, Birsen Yayınevi
- Das, B. M.**, 1990. *Principles of Geotechnical Engineering 2nd. Edition*, McGraw-Hill
- Silver, M., Chan, C., Ladd, R., Lee, K., Tiedemann, D., Townsend, F., Valera, J., Wilson, J.**, 1976. Cyclic Strength of Standart Test Sand, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 102(5), 511-523
- Polito, C.P.**, 1999. *The Effects of Non-Plastic and Plastic Fines On The Liquefaction of Sandy Soils*, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University
- Sancio, B.R.**, 2003. *Ground failure and building performance Adapazarı, Turkey.* PhD Thesis, University of California, Berkeley
- Ural, N., Önalp, A.**, 2005. *Dinamik Üç Eksenli Kesme Deneyinin Monterey Kumu İle Kalibrasyonu, Deprem Sempozyumu, Kocaeli*

EKLER

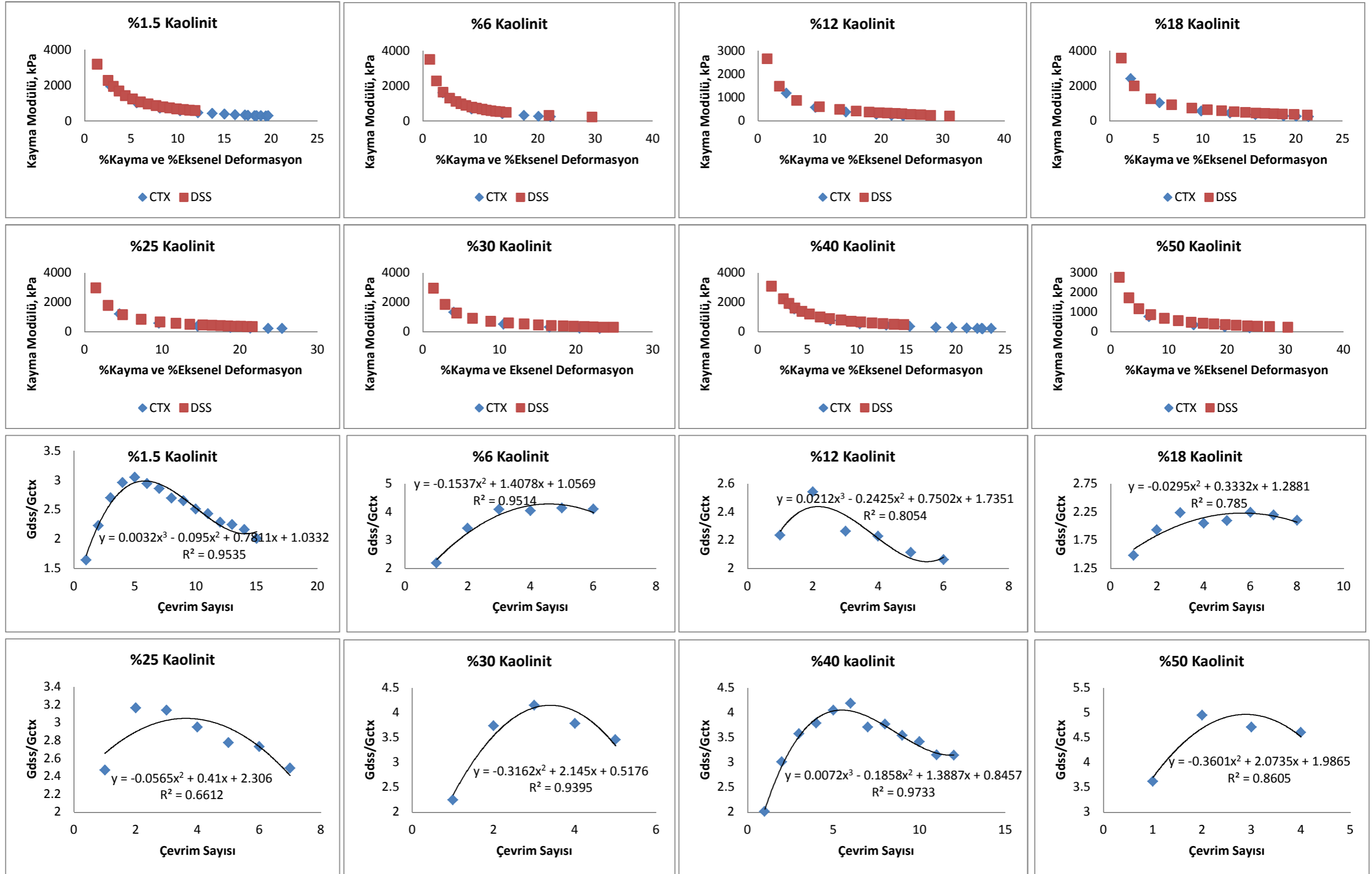
EK A



EK B.1



EK B.2



ÖZGEÇMİŞ



Adı ve Soyadı:

İlhan Burak DURAN

Doğum Tarihi ve Yeri:

01.01.1984 - Malatya

İletişim Adresi:

**Necip Fazıl Kısakürek Cad. Hacıyusuflar
Apt. No 21/18 44300 MALATYA**

Eğitim:

1. **İlkokul:**Kazım Karabekir İlköğretim Okulu;
(Malatya 1989–1994)
2. **Ortaokul:**Hacı Hüseyin Kölük Anadolu
Ticaret ve Meslek Lisesi;
(Malatya 1994–1998)
3. **Lise:** Sivas Fen Lisesi,
(Sivas 1998 – 2001)
4. **Lisans:** Anadolu Üniversitesi
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat
Mühendisliği Bölümü (2002 – 2007)

Alınan Ödüller:

1-) Mucitler ve Araştırmacılar Derneği'nin 2001 yılında düzenlemiş olduğu proje yarışmasında, “*Endüstriyel Atık Polimerlerin Yoğunluk Tayini Yöntemiyle Ayrıştırılması ve Tanımlanması*” adlı proje ile **Teşvik Ödülü ile Genç Mucit ve Bilim Adamı Ödülü**

2-) Mimar ve Mühendisler Grubu'nun 2006 yılında düzenlemiş olduğu YAP-PRO 2006 proje yarışmasında, “*Yeni Kimyasal Yöntemlerle Farklı Zemin Gruplarının İyileştirilmesi* ” adlı proje ile **Birincilik Ödülü**

Çalışılan Bilimsel Projeler:

1-) “Sepiolit ve Zeolitin Çöp Deponi Tabakası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, **Tübitak Projesi, MAG104I082**, (Anadolu Üniversitesi 2005-2007, **Araştırmacı Öğrenci**)

Proje Yürütücüsü: Doç. Dr. Yücel GÜNEY

2-) “İnce Daneli Zeminlerin Sismik Koşullarda Yenilmesinin Adapazarı Kriterleri ile Tanısında Dinamik Deneylerin Etkisi”, **Tübitak Projesi, 106M042**, (İstanbul Kültür Üniversitesi 2007-Devam Ediyor, **Araştırmacı Öğrenci**)

Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Akın ÖNALP