

İnce Daneli Zeminlerin Sismik Koşullarda Yenilmesinin Adapazarı Kriterleri ile Tanısında Dinamik Deneylerin Etkisi

Proje No. 106M042

Prof.Dr. Akın ÖNALP
Yrd.Doç.Dr. Ersin AREL
Yrd.Doç.Dr. Ertan BOL
Yrd.Doç.Dr. Aşkın ÖZOCAK
Yrd.Doç.Dr. Sedat SERT
Yrd.Doç.Dr. Nazile URAL

HAZİRAN 2010

İSTANBUL - SAKARYA

ÖNSÖZ

İnce daneli zeminlerin sismik koşullarda davranışı yaklaşık 20 yıldır araştırılmaktadır. Bu zeminlerin kumlara özgü olduğu düşünülen "sıvılaşma" olayını gösterdiği gözlemi 1964 Alaska depremlerinde farkedilmiş ve bunları izleyen 1978 Çin depremlerini izleyerek bu olayı tetiklediği düşünülen özellikler teknik kamuoyuna duyurulmuştur. 1999 Marmara depremlerinde başta Adapazarı olmak üzere birçok yerde zemin yenilmeleri gözlemlendiğinden konu bu Gurup tarafından derinlemesine araştırılmış ve Adapazar Kriteri olarak adlandırılan tanı yöntemi geliştirilmiş idi.

Bu araştırma programı ise siltlerin deprem koşullarında yenilmesini sağlayan özelliklerin laboratuvarında dinamik üç eksenli hücre ve dinamik kesme kutusu deneylerinde değerlendirilmesini amaçlamıştır.

Bu amaca yönelik olarak siltlerin kesilmesi sırasında oluşan fazla boşluk suyu basınçları ve beliren şekil/boy değiştirmeler, davranışı etkilediği bilinen kıvam limitleri, kil içeriği, dane boyutu ve titreşimde çevrim sayısı gibi etkenlere bağlı olarak değerlendirilmektedir.

Proje sırasında edinilen izlenim, siltlerin deprem sırasında davranışlarının bundan sonraki depremlerde arazide stratejik olarak yerleştirilmiş ivme ve boşluk suyu ölçüm istasyonlarından gelecek veriler olmadan gerçekçi olarak tahmin edilemeyeceği yolunda olmuştur.

Proje çalışmalarında Guruba önemli katkı sağlayan İnş.Y.Müh.İ.Burak Duran'a teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
EK LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırma Programının Amacı	1
1.2. Strateji	2
2.1. Sıvılaşma Kavramı	7
2.1.1. Kumda sıvılaşma	7
2.1.2. Siltlerin Sismik Koşullarda Davranışı.....	8
2.1.2.1. Siltte Sıvılaşmanın Tanısı	9
3. DENEYLERE HAZIRLIK.....	13
3.1. Numuneler.....	13
3.2. Karışımli Numunelerin Hazırlanışı ve Özelliği.....	13
3.2.1. Katkı Killeri.....	15
3.2.2. Numunelerin Dinamik Deneylere Hazırlanışı.....	20
4. DENEY SİSTEMLERİ VE KALİBRASYON.....	23
4.1. Dinamik Üç Eksenli Hücre Kesme Deneyi (CTX)	24
4.1.1. Kullanılan CTX Sistemi	24
4.1.2. Dinamik Basit Kesme Sistemi	29
4.2. Deney Sistemlerinin Kalibrasyonu	31
4.2.1. DDSS Cihazının Başlangıç Durumu.....	32
4.2.2. Revizyon Sonrası DDSS Sonuçları	33
4.3. DDSS ve CTX'in Kalibrasyonu	34
4.3.1. Silikon ile Kalibrasyon	34
4.3.2. Monterey No.0 Kumu ile Kalibrasyon	36
5. YAPAY NUMUNELERDE DENEYLER	41
5.1. Birincil Sıvılaşma Değerlendirilmesi	41

5.2. Yenilmenin Şekil Değişirme Bazlı Değerlendirilmesi	50
6. DOĞAL NUMUNELERDE DENEYLER	52
6.1. Doğal Numunelerde CTX Değerlendirmesi (u_{N15}).....	53
6.2. Doğal Numunelerde CTX Değerlendirmesi ($N_{\epsilon}=\pm\%2.5$).....	63
6.3. Doğal Numunelerde DSS Değerlendirmesi (u_{N15})	67
6.4. Doğal Numunelerde DSS Değerlendirmesi ($N_{\square}=\pm\%5$).....	73
6.5. Doğal Numunelerde DSS Değerlendirmesi ($N_{\square}=\pm\%2.5$).....	78
6.6. Doğal Numunelerin Genel Değerlendirmesi.....	82
6.7. Adapazarı Kriterinin Geliştirilmesi.....	83
6.7.1. Etkin Parametre Seçimi	84
6.7.2. Sıvılaşma değerlendirilmesi.....	86
7. DİNAMİK ÖZELLİKLERİ BELİRLEYEN TEK VE ÇOKLU	91
7.1. Doğal Numunelerde Regresyon Analizleri	91
7.1.1. Tek Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizi.....	91
7.1.2. Tek Değişkenli Polinom Regresyon Analizi	93
7.2. Yapay Numunelerde Regresyon Analizleri	94
7.2.1. Tek Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizi.....	94
7.2.2. Tek Değişkenli İkinci Dereceden Polinom İlişkiler	97
7.3. Çoklu Regresyon Analizleri.....	99
7.3.1. Doğal Numuneler.....	99
7.3.2. Yapay Numuneler	100
7.3.2.1. Bentonit Karışımlar	100
7.3.2.2. Kaolinit Karışımlar	100
7.3.3. Plastisite İndisinin Dinamik Özelliklerle Çoklu Regresyonu	101
7.4. Dinamik Özellikler Arasında Çoklu Regresyonlar	104
8. SONUÇLAR.....	105
9. ÖNERİLER.....	106
KAYNAKÇA.....	107
TÜBİTAK PROJE ÖZET BİLGİ FORMU.....	110
EKLER.....	112

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Adapazarı Merkez Mahalleleri ve TÜBİTAK Sondaj/Sondalama Yerleri	4
Şekil 1.2 Adapazarı sondaj/sondalama veritabanı	6
Şekil 1.3 Siltlerde kum özelliğinden kil davranışına geçiş	9
Şekil 1.4 Sıvılaştırmanın plastisite kartında tanısı (Seed vd.,2003).....	10
1.5TS1500/2000 Plastisite Kartı	10
Şekil 1.6 Sıvılaştırma tanısının değişik kriterlerle değerlendirilmesi	11
Şekil 1.7 Sıvılaştırmada Plastisite İndisi- Su muhtevası ilişkisi (Bray ve Sancio, 2006).....	11
Şekil 1.8 Sıvılık İndisi-Plastisite İndisi bileşiminin sıvılaştırmaya etkisi (Bilge, 2010).....	12
Şekil 3.1 Adapazarı Siltinde Yapı (Bray vd.2005)	14
Şekil 3.2 Yıkılmış Adapazarı Silti Stoğu.....	15
Şekil 3.3 Adapazarı Siltinin bentonitle karışımlarından görüntüler	18
Şekil 3.4 Adapazarı Siltinin kaolinitle karışımından görüntüler (%K=18)	18
Şekil 3.5 Kil içeriğinin kıvama etkisi	19
Şekil 3.6 Kil yüzdesinin likit limite (koni düşürme) etkisi	19
Şekil 3.7 Likit limitin koni düşürme ve çarpmalı alette ölçüm sonuçları (80 numune, 16'sı NP)	20
Şekil 3.8 Bulamaçtan Numune Hazırlanması-Konsolidasyon silindirleri (a) 100mm çap (b) 50mm çap	21
Şekil 3.9 DSS ve CTX numunelerinde su muhtevası profilleri (a) %6 Bentonit içerikli (b) %15 Kaolinit içerikli	22
Şekil 3.10 Kaolin katkılı numunelerin su muhtevaları	22
Şekil 3.11 Kaolin ve Bentonit Karışımları: Kil İçerikleri.....	23
Şekil 4.1 Deneylerde Kullanılan Dinamik Üç Eksenli Sistem (CTX)	25
Şekil 4.2 Monterey 0/30 Kumunun Dinamik Deneyde Davranışı.....	26
Şekil 4.3 CTX numunesinde "boyun verme" ile yenilme.....	27
Şekil 4.4 CTX deneyde yükleme ve oluşan gerilmeler	28
Şekil 4.5 DSS Deney sisteminde gerilmeler.....	29
Şekil 4.6 Kumda yapılmış dinamik deneylerin karşılaştırması.....	30
Şekil 4.7 DSS numunesinin deney öncesi görünüşü.....	31
Şekil 4.8 Dinamik Basit Kesme deney aletinin (DSS) görünümü.....	31
Şekil 4.9 DDSS revizyon öncesi deney sonuçları	32
Şekil 4.10 Revizyon sonrası DDSS deney sonuçları.....	33
Şekil 4.11 Silikonun yatay ve düşey deformasyonlarının belirlenmesi.....	34
Şekil 4.12 Tek eksenli yüklemde silikon için σ - ϵ_z grafiği.....	35
Şekil 4.13 CTX sonuçlarına göre silikonun elastisite modülü hesabı.....	35
Şekil 4.14 DSS'te silikonun kayma modülünde değişimi.....	36
Şekil 4.15 CTX ve DSS için silikon deformasyon oranı grafikleri.....	37
Şekil 4.16 Monterey No.0 Kumunun CTX-DSS karşılaştırmaları.....	39
Şekil 4.17 CSR- $N_{ru=1}$ CTX ve DSS karşılaştırması (De Alba ve diğerleri, 1975)	39
Şekil 4.18 CTX ve DSS'in Monterey No.0 Kumunun karşılaştırmalı kalibrasyonu.....	40
Şekil 4.19 Kumda Deney Türünün Sıvılaştırmaya Etkisi	41
Şekil 5.1 Kil içeriğinin birincil sıvılaştırmaya etkisi	42
Şekil 5.2 Likit limitin fazla boşluk suyu basıncı ile ilişkisi	43
Şekil 5.3 Saf kaolin'in DSS'te davranışı	44
Şekil 5.4 Yıkılmış Adapazarı siltinin DSS'te davranışı	45

Şekil 5.5	Plastisite İndisinin fazla boşluk suyu basıncına etkisi	46
Şekil 5.6	Boşluk suyu basıncı artışının iki farklı deneyde maksimum düzeyleri.....	47
Şekil 5.7	CTX'te N=15 çevrimde ulaşılan boşluk suyu basıncının Likit Limit ve Plastisite İndisi ile değişimi	47
Şekil 5.8	CTX'te N=10 çevrimde ulaşılan boşluk suyu basıncının Likit Limit ve Plastisite İndisi ile değişimi	48
Şekil 5.9	Casagrande deney sonuçlarından bulunan sıvılık indisi w_r/w_L değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{15})	48
Şekil 5.10	Dane boyutunun sıvılaşmaya etkisi	49
Şekil 5.11	Bentonit yüzdesine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{15})	49
Şekil 5.12	Yenilmenin DSA %5'te olduğu kabulü ile plastisite indisinin etkisi (a) bentonit CTX (b) bentonit DSS (c) kaolinit CTX (d) kaolinit DSS	51
Şekil 5.13	Siltli kum numunelerde boşluk suyu basıncının numune özelliğine göre değişimi	52
Şekil 6.1	Deprem büyüklüğüne karşılık eşlenik gerilme çevrimi sayısı (Idriss&Boulanger, 2004' den)	53
Şekil 6.2	Likit limit (Casagrande) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-CTX)	54
Şekil 6.3	Likit limit (koni düşürme) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-CTX)	55
Şekil 6.4	Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (CTX).....	55
Şekil 6.5	Koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (CTX).....	56
Şekil 6.6	Kil yüzdesine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-CTX)	57
Şekil 6.7	Ortalama Dane boyutuna (D_{50}) karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-CTX).....	57
Şekil 6.8	Casagrande ve koni düşürme deney sonuçlarından sıvılık indisi (a-b) ve w_n/w_L (c-d) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15})	58
Şekil 6.9	Likit limit (Casagrande) değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-CTX).....	59
Şekil 6.10	Likit limit (koni düşürme) değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-CTX)	60
Şekil 6.11	Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-CTX)	60
Şekil 6.12	Koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-CTX)	61
Şekil 6.13	Kil yüzdesine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları	61
Şekil 6.14	Ortalama Dane boyutuna (D_{50}) karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (doğal numune-CTX)	62
Şekil 6.15	Casagrande deney sonuçlarından bulunan a-b) sıvılık indisi ve c-d) w_r/w_L değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N).....	63
Şekil 6.16	Likit limit (Casagrande) değerlerine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-CTX)	64

Şekil 6.17 Likit limit (koni düşürme) değerlerine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-CTX)	64
Şekil 6.18 Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (CTX)	65
Şekil 6.19 Koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (CTX)	65
Şekil 6.20 Kil yüzdesine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (doğal numune-CTX).....	66
Şekil 6.21 Ortalama Dane boyutuna (D_{50}) karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (CTX)	66
Şekil 6.22 Casagrande deney sonuçlarından bulunan a-b) sıvılık indisi ve c-d) w_r/w_L değerlerine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N).....	67
Şekil 6.23 Likit limit (Casagrande) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-DSS)	68
Şekil 6.24 Likit limit (koni düşürme) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-DSS)	69
Şekil 6.25 Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (DSS)	70
Şekil 6.26 Koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (DSS)	70
Şekil 6.27 Casagrande deney sonuçlarından bulunan sıvılık indisi değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}).....	71
Şekil 6.28 Casagrande deney sonuçlarından bulunan w_r/w_L değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15})	72
Şekil 6.29 Kil yüzdesine (%C) karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-DSS).....	72
Şekil 6.30 Ortalama Dane boyutuna (D_{50}) karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-DSS)	73
Şekil 6.31 Likit limit (Casagrande) değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)	74
Şekil 6.32 Likit limit (koni düşürme) değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)	75
Şekil 6.33 Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)	75
Şekil 6.34 Koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)	76
Şekil 6.35 Kil yüzdesine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları	76
Şekil 6.36 Ortalama dane boyutuna (D_{50}) karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (doğal numune-DSS)	77
Şekil 6.37 Casagrande deney sonuçlarından bulunan a) sıvılık indisi ve b) w_r/w_L değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)	78
Şekil 6.38 Likit limit (Casagrande) değerlerine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)	79
Şekil 6.39 Likit limit (koni düşürme) değerlerine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)	79

Şekil 6.40 Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (DSS).....	80
Şekil 6.41 Koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (DSS).....	80
Şekil 6.42 Kil yüzdesine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (doğal numune-DSS)	81
Şekil 6.43 Ortalama Dane boyutuna (D_{50}) karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (doğal numune-DSS)	81
Şekil 6.44 Casagrande deney sonuçlarından bulunan a) sıvılık indisi ve b) w_n/w_L değerlerine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (DSS).....	82
Şekil 6.45 Fiziksel özellikler korelasyon katsayıları histogramı	85
Şekil 6.46 Fiziksel özellikler karşılık gelen ortalama korelasyon katsayıları histogramı	85
Şekil 6.47 CTX deneyde E_{dcas} değerlerinin sıvılaşma açısından irdelenmesi	87
Şekil 6.48 DSS deneyinde E_{dcas} değerlerinin sıvılaşma açısından irdelenmesi	88
Şekil 6.49 CTX ve DSS deneyde E_{dcas} değerlerinin sıvılaşma açısından irdelenmesi.....	88
Şekil 6.50 CTX ve DSS deneyde E_{dcas} değerlerinin deformasyon açısından irdelenmesi.....	89
Şekil 6.51 CTX ve DSS deneyde E_{dkoni} değerlerinin deformasyon açısından irdelenmesi ...	90
Şekil 7.1 DSS'te (a) r_{umax} 'in (b) u_{N15} 'in $\%C$ ve w_L ile değişimi	93
Şekil 7.2 CTX'te (a) r_{umax} 'in (b) u_{N15} 'in $\%C$ ve w_L ile değişimi	93
Şekil 7.3 CTX'te (a) r_{umax} 'in I_L^* ve D_{50} ile (b) u_{N15} 'in $\%C$ ve D_{50} ile değişimi	95
Şekil 7.4 DSS'te (a) r_{umax} 'in (b) N_{rumax} 'in $\%C$ ve w_L ile değişimi.....	96
Şekil 7.5 CTX'te (a) r_{umax} 'in $\%C$ ve w_L ile (b) u_{N15} 'in I_L^* ve D_{50} ile değişimi.....	97
Şekil 7.6 Doğal Numunelerde u_{N15} 'in a) DSS'te b) CTX'te $\%C-I_p$ Değişimi.....	102
Şekil 7.7 Bentonit Karışımlarda a) DSS'te b) CTX'de u_{N15} 'in $\%C-I_p$ ile Değişimi.....	103
Şekil 7.8 Kaolinit Karışımlarda a) DSS'te b) CTX'de u_{N15} 'in $\%C-I_p$ ile Değişimi	103

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1	Adapazarı Kent Merkezinde Sondaj ve Sondalamalar için Kılavuz.....	3
Çizelge 1.2	106M042 Projesi kapsamında gerçekleştirilen sondajların koordinat ve yer altı suyu seviyesi ölçümleri.....	5
Çizelge 3.1	Adapazarı Doğal Siltinin Özellikleri	15
Çizelge 3.2	Karışımlarda kullanılan killerin özellikleri.....	15
Çizelge 4.1	Monterey No.0 kumunun temel özellikleri (Ural 2008).....	34
Çizelge 4.2	Karşılaştırmalı Monterey No.0 Kumu dinamik deney sonuçları	38
Çizelge 6.1	CTX deneylerinde fiziksel özelliklerin sınır değerleri	83
Çizelge 6.2	DSS deneylerinde fiziksel özelliklerin sınır değerleri	83
Çizelge 6.3	Fiziksel özellikler karşılık gelen korelasyon katsayıları	84
Çizelge 6.4	Casagrande ve koni düşürme deney sonuçlarına göre ağırlıklar	86
Çizelge 6.5	Casagrande ve koni düşürme deney sonuçlarına göre atanan değerler.....	86
Çizelge 7.1	Doğal Numunelere ait DSS Deneyi Doğrusal Determinasyon Katsayıları	92
Çizelge 7.2	Doğal Numunelere ait CTX Deneyi Doğrusal Determinasyon Katsayıları.....	92
Çizelge 7.3	Doğal Numunelere ait DSS Polinom Determinasyon Katsayıları	93
Çizelge 7.4	Doğal Numunelere ait CTX Polinom Determinasyon Katsayıları	94
Çizelge 7.5	Kaolinit Karışımlara ait DSS Doğrusal Determinasyon Katsayıları	95
Çizelge 7.6	Kaolinit Karışımlara ait CTX Doğrusal Determinasyon Katsayıları	95
Çizelge 7.7	Bentonit Karışımlara ait DSS Doğrusal Determinasyon Katsayıları	96
Çizelge 7.8	Bentonit Karışımlara ait CTX Doğrusal Determinasyon Katsayıları	97
Çizelge 7.9	Kaolinit Karışımlara ait DSS Polinom Determinasyon Katsayıları.....	98
Çizelge 7.10	Kaolinit Karışımlara ait CTX Polinom Determinasyon Katsayıları	98
Çizelge 7.11	Bentonit Karışımlara ait DSS Polinom Determinasyon Katsayıları	99
Çizelge 7.12	Bentonit Karışımlara ait CTX Polinom Determinasyon Katsayıları	99
Çizelge 7.13	Doğal Numunelerde DSS'te yapılan çoklu regresyonlar	99
Çizelge 7.14	Doğal Numunelerde CTX'te yapılan çoklu regresyonlar	100
Çizelge 7.15	Bentonit karışımlarda DSS'te yapılan çoklu regresyonlar	100
Çizelge 7.16	Bentonit karışımlarda CTX'te yapılan çoklu regresyonlar	100
Çizelge 7.17	Kaolinit karışımlarda DSS'te yapılan çoklu regresyonlar	101
Çizelge 7.18	Kaolinit karışımlarda CTX'te yapılan çoklu regresyonlar	101
Çizelge 7.19	Doğal Numunelerde I_p Kullanılarak DSS'te yapılan çoklu regresyonlar	101
Çizelge 7.20	Doğal Numunelerde I_p Kullanılarak CTX'te yapılan çoklu regresyonlar	102
Çizelge 7.21	Bentonit Karışımlarda I_p Kullanılarak DSS'te yapılan çoklu regresyonlar.....	102
Çizelge 7.22	Bentonit Karışımlarda I_p Kullanılarak CTX'te yapılan çoklu regresyonlar.....	103
Çizelge 7.23	Kaolinit Karışımlarda I_p Kullanılarak DSS'te yapılan çoklu regresyonlar	104
Çizelge 7.24	Kaolinit Karışımlarda I_p Kullanılarak CTX'te yapılan çoklu regresyonlar	104

EKLER LİSTESİ

EK-I SONDAJ YERLERİ

EK-II YAPAY NUMUNELER DENEY ÖZET TABLOSU

EK-III DOĞAL NUMUNELER DSS VE CTX DENEY SONUCU GRAFİKLERİ

ÖZET

Bu çalışma ince daneli zeminlerin depremde davranışı konusunda Sakarya ve İstanbul Kültür Üniversitelerinde 10 yılı aşkın sürdürülmekte olan araştırmaların yeni halkasını oluşturmaktadır.

Silt hatta killerin de depremden olumsuz etkilendikleri konusu 20 yıldan beri deprem geotekniği gündemindedir. 1999 depremlerinde Adapazarı kent merkezindeki siltlerde gözlemlenen zemin yenilmeleri birçoğunca kumlara özgü “sıvılaşma” olarak nitelendirildiğinde bu tür zeminlerde yenilmenin hangi koşullarda gerçekleştiği sorusu bu raporun konusunu oluşturmuştur.

Araziden gelen doğal siltli numuneler ve bunların farklı kil mineralleri karışımı ile oluşturulmuş yapay numuneler laboratuarda standart dinamik testler olan üç eksenli ve basit kesmeye tabi tutulmuştur. Bunların titreşimler sırasında gösterdiği deformasyon ve boşluk suyu basınçları fiziksel özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Bulgular, doymun zeminin zemin yenilmesinde kil içeriği, likit limit, plastisite indisi ve ortalama dane boyutu'nun olayı etkileyen parametreler olduğu yolundadır. Yapılan regresyon çalışması bu değişkenlerin göreceli ağırlıklarını tesbitte yararlı olmuştur. Sonuçta, dinamik deneylere oranla daha kolay gerçekleştirilebilen fiziksel özelliklere dayandırılmış yeni Adapazarı Kriteri ile yenilme teşhisinin daha gerçekçi hale getirileceği umulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: inşaat mühendisliği, geoteknik, deprem, Adapazarı kriteri, sıvılaşma, çevrimsel hareketlilik, dinamik üç eksenli kesme deneyi, dinamik basit kesme deneyi, fazla boşluk suyu basıncı, birim boy değiştirme, birim şekil değiştirme, likit limit, plastik limit, kil içeriği, ortalama dane boyutu, etkin değer

ABSTRACT

This research program is the latest attempt by this Group of workers aiming to understand the behaviour of fine grained soils in seismic conditions. The failure of the ground has been observed throughout the city of Adapazari during the 1999 earthquakes. Various investigators have labeled the phenomenon as “liquefaction” a word that had been specifically used for the failure of sands.

The aim of this study was therefore chosen to diagnose the conditions that lead to ground failure in predominantly silty profiles.

The samples obtained in situ and those reconstituted by addition of bentonite and kaolinite to the silt were subjected to dynamic direct simple shear and triaxial shear tests. The data on deformation and porewater pressures were compared to the physical properties of the soil or the mixture. The findings point out to the fact that behaviour in dynamic testing significantly depends on the clay content, liquid limit, plasticity index and the average grain size. The regression analyses have helped to estimate the relative influence of each and every property on the dynamic behaviour with the ultimate goal of refining the “Adapazari Criteria” developed to test the liquefaction potential.

Keywords: civil engineering, geotechnics, earthquake, Adapazari Criteria, liquefaction, cyclic mobility, dynamic triaxial test, dynamic simple shear test, excess porewater pressure, axial strain, shear strain, liquid limit, plastic limit, clay content, average grain size

1. GİRİŞ

“Sıvılaşma” terimi 1964’ten bu yana sıklıkla oluşan önemli depremlerle bağlantılı olarak temel zemininin yenilmesini ifade eden, ancak tam olarak tanımlanamamış, bir kavram olarak belirmiştir.

Gevşek kumlarda kolayca gelişebilen bu olay 1980’li yıllarda silt gibi ince daneli zeminler için de kullanılmaya başlanmış, siltlerin de kumlar gibi sıvılaşma süreci göstereceği varsayılır olmuştur.

Bu proje gurubunca gerçekleştirilmiş araştırmalar siltlerin sıvılaşma yeteneğinin zeminin fiziksel özellikleri ile kolayca saptanabileceği bulgularını getirmiş ve bu amaca yönelik olarak “Adapazarı Kriteri”nin revize edilmiş biçimi önerilmiş idi (Bol, Önalp, Arel, Özocak, Sert, 2010).

Bu araştırma programının öncülü olan 104M387 projesi de Adapazarı kenti ve çevresindeki siltli zeminlerin 1999 depreminde sıvılaştığı gözlemi esas alınarak sürdürülmüştü (Önalp, Arel, Bol, Özocak, Sert, 2007).

Bu projede siltlerin sıvılaşabilirliği savının geçerliliği fiziksel özellikler yanında laboratuvar deneyleri ile karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve Adapazarı Kriteri’nin geliştirilerek, özel durumlar dışında zahmetli deneylere girişmeden zeminin fiziksel özelliklerine bakılarak hızlı bir değerlendirmenin yapılabilirliği araştırılmıştır.

1.1. Araştırma Programının Amacı

Bu çalışmanın amacı siltlerde de gerçekleştiği öne sürülen (Wang,1979) sıvılaşma olayının bu olayın bağlı olduğu fiziksel özellikler, boşluk suyu basıncı artışı biçimleri, titreşim özellikleri ve benzeri etkenler gözönüne alınarak teşhisin en kolay ve hızlı biçimde nasıl yapılabileceğini incelemektir.

Birçok araştırmacı zeminin likit limiti, plastisite indisi, dane dağılımı, doğal su muhtevası gibi fiziksel özelliklerini kullanarak, diğerleri laboratuvarında öncelikle dinamik üç eksenli hücre kesme (CTX), bazen de dinamik basit kesme (DDSS) deneyleri ile değerlendirilebileceğini belirtmektedir. Göreceli az sayıda araştırmacı da sıvılaşabilirliği zeminin arazide deprem ivmelerine gösterdiği tepkilere bakarak değerlendirmeğe çalışmışlardır(Youd ve Holzer,1994; Hryciw vd.,1990)

Bu raporun konusu 106M042 projesinde yukarıda anılan ilk üç yaklaşım karşılıklı olarak değerlendirmeye alınmış ve her birinin etkinliği ve gerçekçiliği incelenmiştir. Uygulama ve araştırmada en fazla kullanılan deney dinamik üç eksenli deneydir. Bunun nedeni, üç eksenli burulma gibi gerçekçi ancak yapımı zor, deneylere göre hızlı biçimde gerçekleştirilebilmesi, özelden de boşluk suyu basınçlarının kolayca ölçülebilmesidir. Öte yandan, birçok araştırmacı deprem etkisini en iyi biçimde yansıtabilmesi ve yapılabilme kolaylığını öne sürerek dinamik basit kesme deneyinin yeğlenmesini önermektedirler(Jefferies ve Been,2006;Kramer,1996).

Bu çalışmada, önemli ölçüde 1999 depremini izleyerek yapılmış arazi gözlemlerine dayandırılarak geliştirilmiş Adapazarı Kriteri’nin CTX ve DSS sonuçlarıyla karşılaştırılması ve

siltlerde sıvılaştır/sıvılaştırmaz yargısına sağlıklı biçimde varılabilmesi için yeni bir yaklaşım geliştirilmesi amaçlanmıştır.

1.2. Strateji

Siltli zeminlerin profilde sıkça kesildiği Adapazarı kent merkezinde bu tür zeminlerin varlığının daha önce belirlenmiş olan yerlerinde(104M387) 2007-2010 yıllarında Çizelge 1-1 ve Şekil 1.1'de gösterilmiş noktalarda 25 yerde Adapazarı'nda sıvılaştırma derinliği olarak tesbit edilmiş 10m derinlikte dönel sondaj yapılarak örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmıştır. Bu sondaj yerlerinin 13'ünde, sondajın sağlığını denetleme amacıyla koni penetrasyon deneyi (CPTU) de icra edilmiştir (EK-1). Bu noktaların Sakarya Üniversitesi Geoteknik ABD veri tabanında bulunan 500 dolayında inceleme noktasına (Şekil 1.2) ek olarak seçildiği de belirtilmelidir.

Bu numuneler sınıflandırma ve konsolidasyon deneyine tabi tutularak ana özellikleri ölçülmüştür.

Daha sonra her sağlıklı siltli numune üzerinde CTX ve DSS deneyleri icra edilmiştir.

Doğal zeminlerde özellikler oluşum koşullarına bağlı olarak ani değişiklikler gösterdiği, hatta aynı örselenmemiş numune tüpünde birkaç farklı özellikte numuneye rastlanabildiğinden, araştırmanın ikinci evresinde Adapazarı silti kontrollu biçimde kaolin ve bentonit ile karıştırılarak 28 çift ek numune oluşturulmuştur.

Özellikleri yine ayrıntılı olarak ölçülen bu karışımlar da CTX ve DSS deneylerine tabi tutularak, böylece sıvılaştırmayı oluşturan koşullar yaşlanma/bayatlama, heterojenlikten arındırılmış olduğu varsayılarak irdelenmiş ve Adapazarı Kriteri'nin uygulanabilirliği denetlenmiştir.

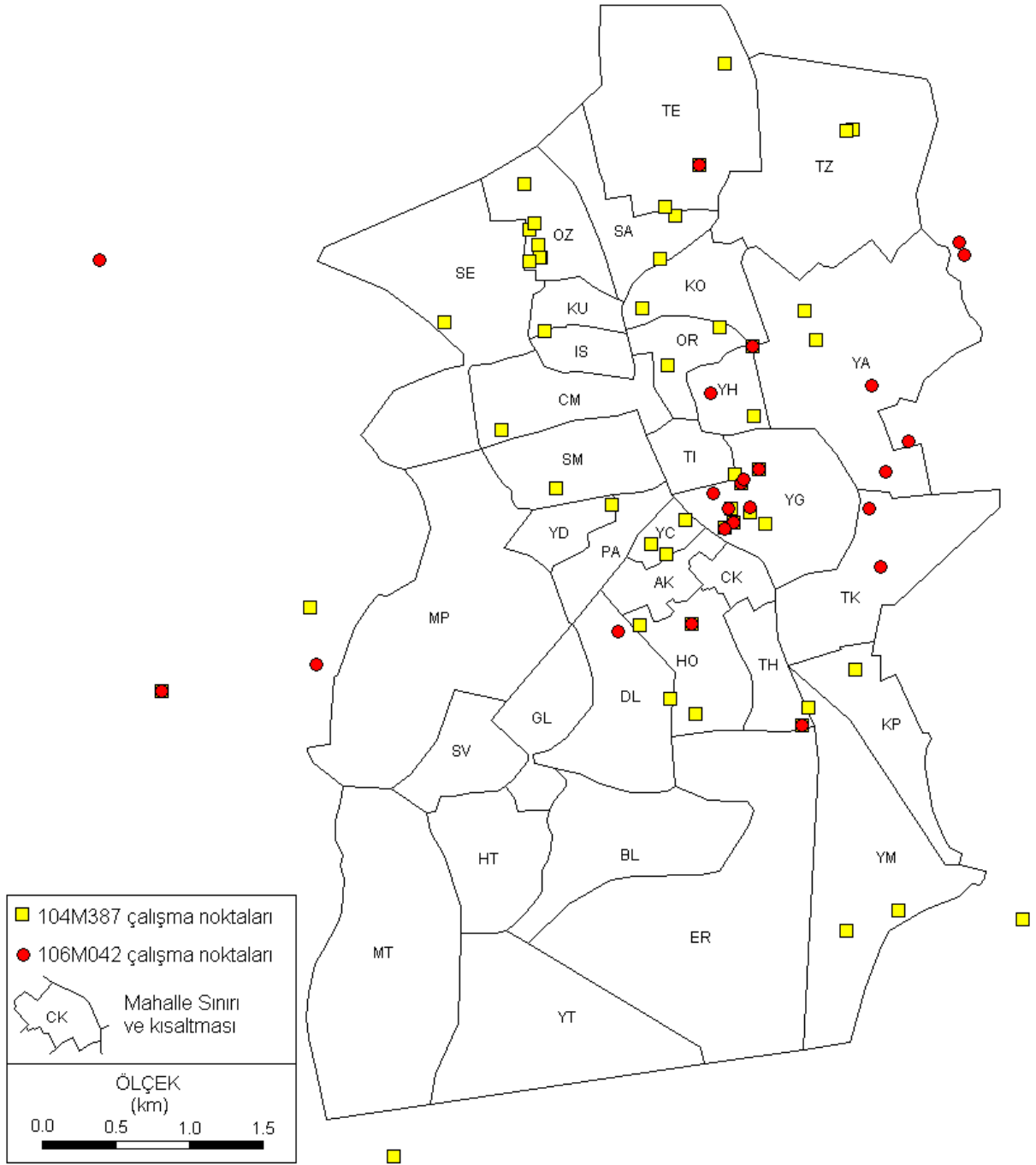
Çizelge 1.1 Adapazarı Kent Merkezinde Sondaj ve Sondalamalar için Kılavuz*

NO	KISALTMA	MAHALLE	BELEDİYE	NO	KISALTMA	MAHALLE	BELEDİYE
1	AK	AKINCILAR	ADAPAZARI	22	YA	YAĞCILAR	ADAPAZARI
2	CM	CUMHURİYET	ADAPAZARI	23	YH	YAHYALAR	ADAPAZARI
3	CK	ÇUKURAHMEDİYE	ADAPAZARI	24	YC	YENİCAMİ	ADAPAZARI
4	GL	GÜLLÜK	ADAPAZARI	25	YD	YENİDOĞAN	ADAPAZARI
5	HT	HIZIRTEPE	ADAPAZARI	26	YG	YENİGÜN	ADAPAZARI
6	IS	İSTİKLAL	ADAPAZARI	27	BL	BAĞLAR	ERENLER
7	KO	KARAOSMAN	ADAPAZARI	28	DL	DİLMEN	ERENLER
8	KU	KURTULUŞ	ADAPAZARI	29	ER	ERENLER MERKEZ	ERENLER
9	MT	MALTEPE	ADAPAZARI	30	HO	HACIOĞLU	ERENLER
10	MP	MİTHATPAŞA	ADAPAZARI	31	KP	KÜPÇÜLER	ERENLER
11	OR	ORTA	ADAPAZARI	32	TH	TABAKHANE	ERENLER
12	OZ	OZANLAR	ADAPAZARI	33	YM	YENİMAHALLE	ERENLER
13	PA	PAPUÇÇULAR	ADAPAZARI	34	YT	YEŞİLTEPE	ERENLER
14	SA	SAKARYA	ADAPAZARI	35	BK	BEKİRPAŞA	BEKİRPAŞA
15	SM	SEMERCİLER	ADAPAZARI	36	AO	ALTINOVA	SERDİVAN
16	SK	ŞEKER	ADAPAZARI	37	GN	GÜNEŞLER	GÜNEŞLER
17	SV	ŞİRİNEVLER	ADAPAZARI	38	SR	SERDİVAN	SERDİVAN
18	TE	TEKELER	ADAPAZARI	39	YZ	YAZLIK	SERDİVAN
19	TK	TEPEKUM	ADAPAZARI				
20	TI	TİĞCİLER	ADAPAZARI				
21	TZ	TUZLA	ADAPAZARI				

*Sondaj gösterim sistemi: **YG 01 S1 TX**

YG: mahalle kısaltması; 01= söz konusu mahallede site no; S1= Sondaj Kuyusu No1;

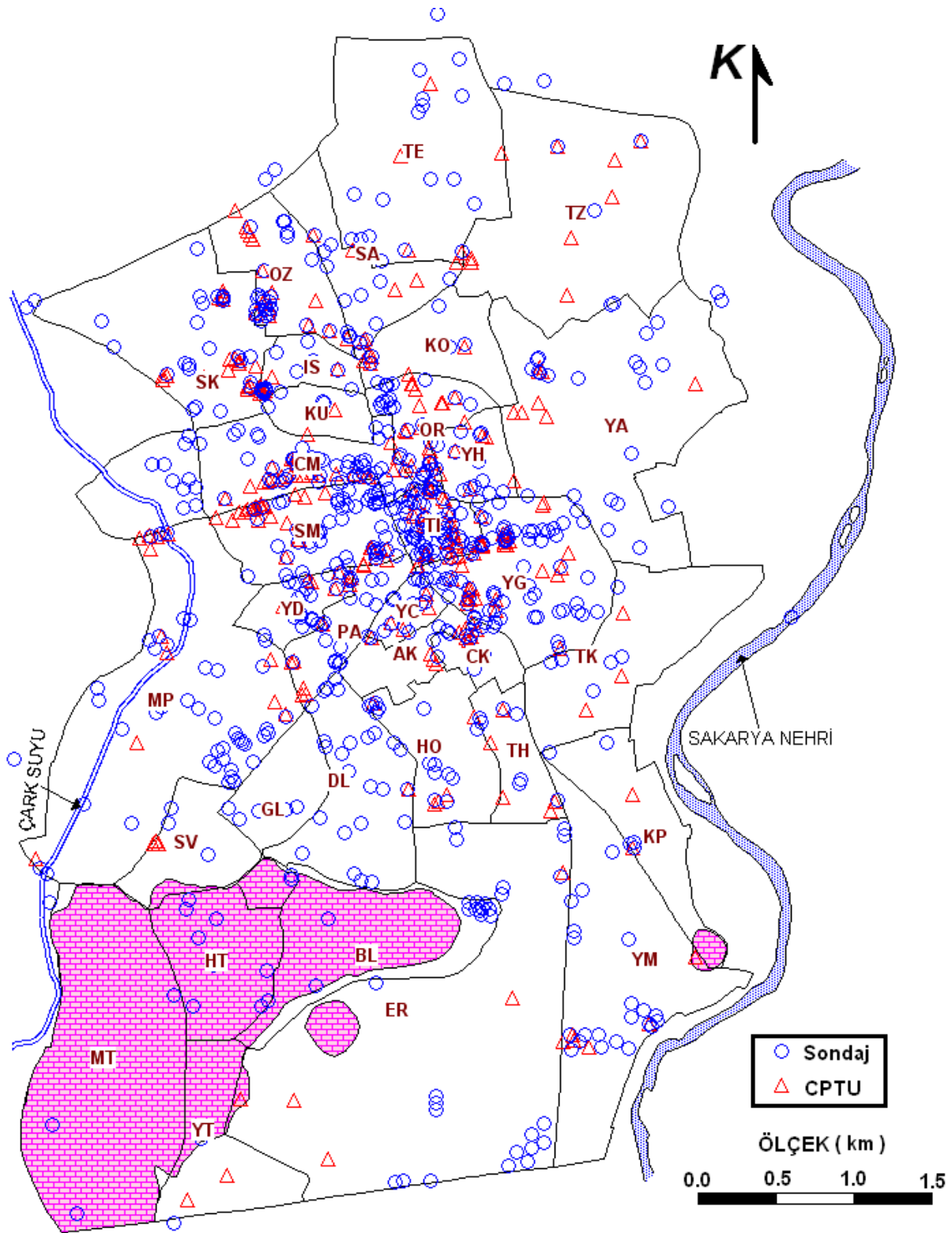
TX= CTX numunesi; DS= DSS numunesi



Şekil 1.1 Adapazarı Merkez Mahalleleri ve TÜBİTAK Sondaj/Sondalama Yerleri

Çizelge 1.2 106M042 Projesi kapsamında gerçekleştirilen sondajların koordinat ve yer altı suyu seviyesi ölçümleri

	SONDAJ_ID	BOYLAM	ENLEM	YASS(m)
1	YG01S1	30.40847	40.77145	1.10
2	YG02S1	30.40769	40.77103	2.00
3	YZ01S3	30.35664	40.78769	1.90
4	TH25S1	30.41405	40.75887	3.90
5	SR18S1	30.36171	40.76099	1.10
6	TE09S1	30.40571	40.79358	2.00
7	YG06S1	30.41051	40.77475	1.20
8	HO23S1	30.40500	40.76518	1.55
9	YG04S1	30.40909	40.77385	0.80
10	KO13S1	30.41003	40.78236	1.70
11	GN01S1	30.42727	40.78797	1.90
12	GN01S2	30.42693	40.78879	2.60
13	TK01S1	30.42045	40.76866	2.60
14	AO01S1	30.37433	40.76266	1.50
15	AO01S2	30.37433	40.76266	1.80
16	TK02S1	30.41976	40.77995	2.00
17	YH01S1	30.40655	40.77942	1.39
18	YA01S1	30.42087	40.77457	2.22
19	YA02S1	30.42277	40.77645	1.88
20	DL01S1	30.39908	40.76469	1.98
21	YG03S1	30.40924	40.77411	1.87
22	TI01S1	30.40677	40.77327	2.35
23	YG05S1	30.40800	40.7723	1.65
24	YG07S1	30.40984	40.77235	1.25
25	TK03S1	30.41956	40.77231	2.10



Şekil 1.2 Adapazarı sondaj/sondalama veritabanı

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Sıvılaştırma Kavramı

İlk olarak, William Hazen'in 1900'lü yıllarda California'da Calavera Barajının gövdesinde bulunan doygun kumda deprem sırasında yenilmelerin oluştuğunu bildirip, bunu "sıvılaştırma" kelimesini kullanarak tanımladığı öne sürülmektedir. Öte yandan, bugünkü adı ile anılmasa da batık zeminde sıvılaştırma olayının mekaniğine ilk kez 1930'lu yıllarda "kritik boşluk oran"ını tanımlayan Casagrande tarafından yaklaşıldığı, ancak sıvılaştırma teriminin Terzaghi ve Peck'ce (1948) kullanıldığı hakkında bilgiler vardır (Liu, 2009; Marcuson,1978).

Latince "*liquefacere*" dan türetilmiş yumuşamak, erimek veya zayıflamak anlamına gelen sıvılaştırma, kumlarda ani sismik yüklem sırasında oluşan direnç kaybı olarak tariflenen genel bir terimdir. Sözlük, olayı akıcı olma durumu, sıvı davranış sergilemek veya sıvı olma, sıvı veya erimiş olma, durumu olarak tanımlanmaktadır (Polito, 1999; The English-Language Institute of America, 1971).

Öncelikle bu sözcüğün deprem olayı ile özdeş olmadığını vurgulamak gerekmektedir. Sıvılaştırma, çevrimsel/sismik yüklem ile oluşabileceği gibi monoton, yani statik koşullarda da belirebilir.

Günümüzde "sıvılaştırma" olarak değinilen olaylar gerçekte birkaç farklı tür zemin yenilmesi'ni yansıtmaktadır(*ground failure*).

Tüm yenilme olayları aslında aynı biçimde başlar: plastik karakterli hacimsel birim azalması yeterince hızlı yükseldiğinde boşluk suyu basıncı bu yükselişe uyum sağlayamayarak artmakta, ortalama efektif gerilme düşmektedir. Bunu izleyerek yenilme çevrimsel hareketlenme, çevrimsel yumuşama ve de sıvılaştırma biçiminde ortaya çıkabilmektedir.

2.1.1. Kumda sıvılaştırma

İri daneli ve daneler arasında bağı olmayan gevşek ortamlarda zeminin aldığı kayma gerilmeleri boşluk suyu basıncının hızla yükselmesini sağlamakta, bu basınç toplam gerilmeye eşit olacak düzeye eriştiğinde efektif gerilme sıfır'a düştüğünden zeminin direnci kaybolması, yani daneler arasındaki dokunmanın yitilmesiyle başlangıç sıvılaştırması (*initial liquefaction*) oluşmaktadır.

Vaka kayıtları ve laboratuvar verileri kumlarda başlangıç ve akma sıvılaştırmasının kolayca oluştuğuna dair yeterli belge sağlamıştır. Bu olay gerçekleştiğinde suyun zemin yüzeyinde belirerek beraberinde bol miktarda inceleri (*ejecta*) taşıdığı gözlemlenmektedir.

Mekanik açıdan tanımlandığında, boşluk suyu basıncı yükselmesi sürecini kumun bağıl birim hacim ağırlığı D_r 'ye bağılı olarak boşluk suyu basıncı parametresi A_r , hidrolik iletkenlik k ve konsolidasyon katsayısının $c_v(c_h)$ fonksiyonu olarak açıklamak mümkündür.

Bu koşullarda kumun sıvılaştırması sismik etkilerle olduğu gibi statik koşullarda gelişebilir. Akma sıvılaştırması (*flow liquefaction*) statik dengeyi sağlamak için gerekli gerilmenin zeminin kalıntı direncinden yüksek olduğu durumu yansıtır. Bu nedenle teorik olarak sıvılaştırma, sadece düşük kalıntı dirençli gevşek kumlarda gerçekleşebilir.

Kramer (1996) ortamda etkiyen statik kayma gerilmesinin sıvılaşmış zeminin kayma direncinden, yani kalıntı dirençten, daha küçük olması durumunda sistemin çevrimsel hareketlenme (*cyclic mobility*) evresine geçeceğini belirtmiştir.

Jefferies ve Been (2006) olaya boşluk suyu basınçlarının efektif gerilmeyi sıfıra düşürmesi yanında şekil değiştirme açısından bakarak, gerilme artışı sürecinde plastik birim kayma şekil değiştirmesinin (γ) birikimi ile yükselen u_w 'nin zeminin rijitliğini düşürdüğünü, bir başka deyişle sıvılaşma için kumun yeterince gevşek olması gerektiğini bildirmişlerdir.

Castro (1975) kumlarda yaptığı çalışmada CTX sonuçları ile arazide ölçülen standart penetrasyon dirençlerini (SPT) karşılaştırmıştır. Bu deney sonuçlarından iki temel olay ayırtlanmıştır. Birincisi, gevşek kumlarda beliren klasik sıvılaşma, ikincisi ise dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deneyleri sırasında oluşan çevrimsel hareketlilik'tir. Bu araştırmacı sıvılaşmanın sadece gevşek kumlarda kritik boşluk oranından (e_{cr}) daha büyük boşluk oranlarında, çevrimsel hareketliliğin ise doğal boşluk oranı kritik boşluk oranı değerinin altında olan zeminlerde oluşabileceğini öne sürmüştür. Sıvılaşmada, dinamik yükleme sırasında, hacim azalması nedeniyle gevşek kumlarda boşluk suyu basıncının aniden arttığını ve boşluk suyu basıncının efektif gerilmeyi sıfıra düşürdüğünü söylemiştir. Çevrimsel hareketlilikte ise dinamik yükleme altındaki sıkı kumlarda kesme sırasında zeminin genleşme eğilimi olduğunu ve bu genleşme eğilimi yüzünden boşluk suyu basıncının düştüğünü, şekil değiştirmenin bu nedenle sınırlı kaldığını öne sürmüştür.

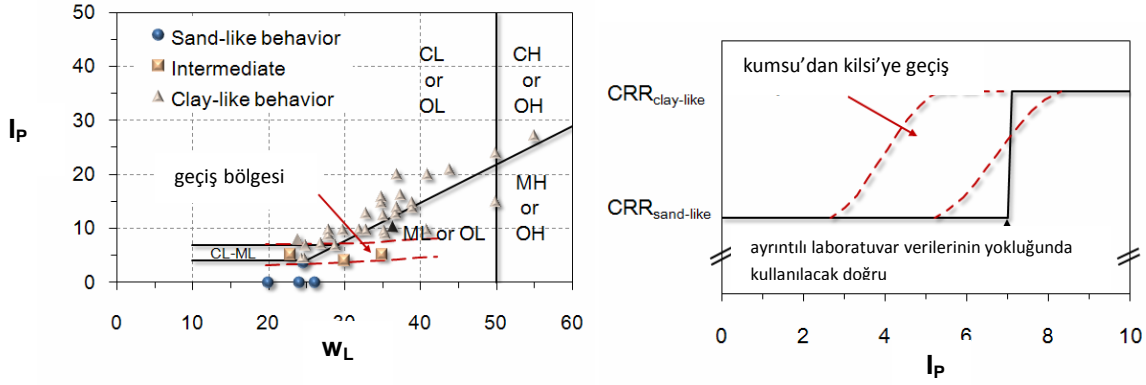
Siltlerin eğemen olduğu kum silt karışımlarının da, hidrolik iletkenlik katsayılarının yüksekliğine bağlı olarak sıvılaşma yeteneklerinin bulunduğu söylenebilmektedir.

2.1.2. Siltlerin Sismik Koşullarda Davranışı

Siltlerde sıvılaşmanın, en azından başlangıç sıvılaşmasının, aynı kolaylıkla oluşmadığı, hatta MI ve MH siltlerde olağan deprem koşullarında ($M_w < 7$, $t < 50s$) belki de hiç belirmediği yolunda kuşku vardır.

Buna bağlı olarak da siltlerin kumsu (*sand like*) ve kilisi (*clay like*) olarak ayırtlanması ve sıvılaşabilir gurubun yukarıdaki açıklamalara da bağlı olarak daha ziyade kumsu'lar olduğu öne sürülmüştür (Idriss ve Boulanger, 2006). Daha açık bir ifade ile, kilisi siltte ve killi zeminlerde sadece çevrimsel yumuşama (*cyclic softening*) olası iken kumsu karışımlarda tipik sıvılaşma (*liquefaction*) belirtileri ortaya çıkmaktadır. Kesin yargıya varılamayan birçok durumda da deney yapılması (*test*) hemen tüm araştırmacılarca önerilmiştir.

Şekil 2-1'de kilisi-kumsu tanımlaması yapılmaktadır. Plastisite kartına bakıldığında (b) geçiş bölgesinin, plastisite indisinin $I_p < 8$ olmasına karşın, likit limitin geniş bir aralıkta değiştii (20-40) görülmektedir. Şekil-2a'da ise siltin çevrimsel kayma direncinin (CRR) artan plastisite indisi ile yükseldii gösterilmektedir.



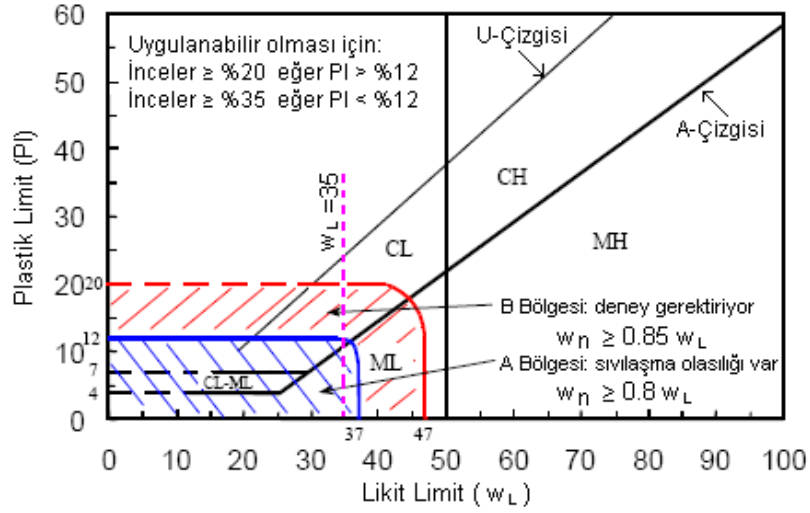
Şekil 1.3 Siltlerde kum özelliğinden kil davranışına geçiş

İnce daneli zeminlerde kumlarda olduğu gibi başlangıç sıvılaşmasına kolaylıkla erişilmemesi kum ve iri silt daneleri arasında oluşan “kil köprüleri”nin (Mitchell ve Soga, 2005) geçirimsizliği azaltıp boşluk suyu basıncı rejimini kısıtlaması yanında, karışımın kalıntı direncinin aşırı düşük kalmamasından kaynaklanmaktadır. Bu mantık tutarlı ise, ince daneli zeminin dinamik direncinin artan kil yüzdesi ile yükselmesi gerekecektir. I_p 'deki değişimler aşırı olmadığından kil yüzdesinin CRR üzerindeki etkisinin öncelikle değerlendirilmesi daha tutarlı bir yol gibi gösterilebilir.

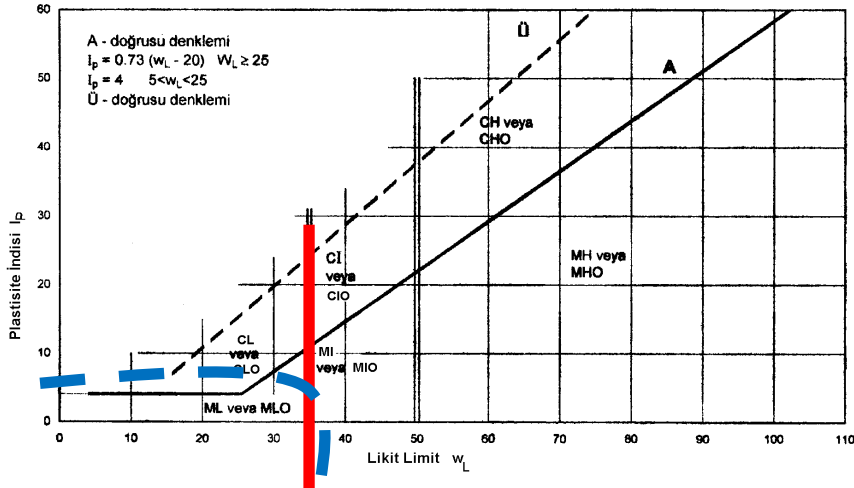
2.1.2.1. Silte Sıvılaşmanın Tanısı

Siltlerde sıvılaşma benzeri yenilmeler ilk kez 1964 Alaska ve Japonya depremleri sonrasında rapor edilmiş bunu izleyerek Çin depremlerinde edinilen deneyimler önce Çin Kriteri olarak tanımlanan özelliklerle literatüre yansımıştır (Wang, 1979). Çin kriteri siltin sıvılaşmasını doğal su muhtevası, likit limiti, kil yüzdesi ($< 5\mu m$) gibi fiziksel özelliklere bağlamaktadır.

Bunu izleyerek aynı yoldan birçok öneri getirilmiştir. Şekil 2-2' de sıvılaşan zeminler USCS plastisite kartında mavi bölge ile gösterilmiş ancak, likit limitin 37 ile 47 arasında olduğu geniş bir bölge gri bölge olarak yine “test” önerisi ile belirlenmiştir. Burada kesin sıvılaşma bölgesinin plastisite indisi 0-12 olarak ayrılmıştır. Bu, laboratuvar koşullarında kolayca ölçülemeyecek denli dar bir aralık olarak görünmektedir. Şöyle ki, likit limiti 25 olan bir NP silte plastik limitin standart deneylerle 13 ve daha küçük olarak ölçülmesi pek mümkün görünmemektedir. Daha basit bir deyişle, sıvılaşmanın tanımı için plastik limite başvurmak deneyin yapılaş ve değerlendirmesi gözönüne alındığında gerçekçi görünmemektedir.

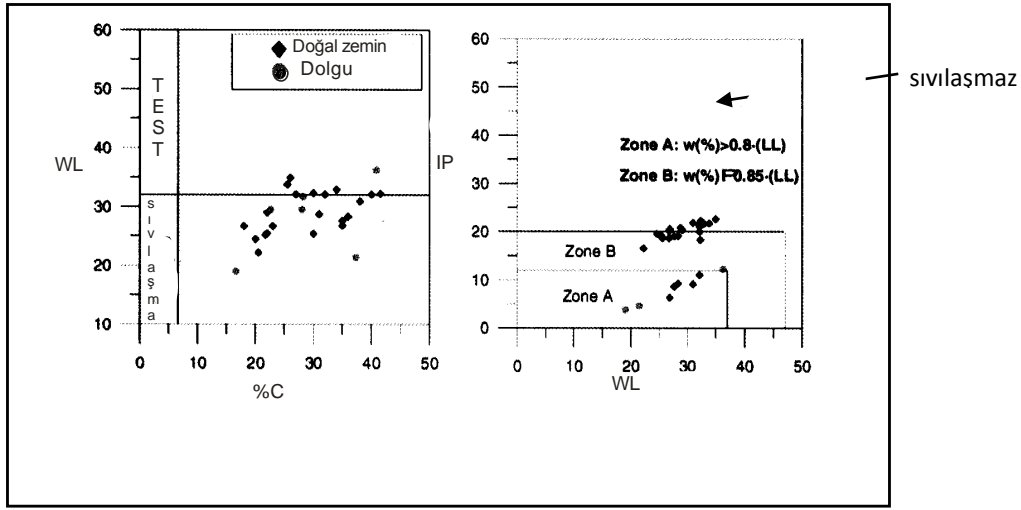


Şekil 1.4 Sıvılaşmanın plastisite kartında tanısı (Seed vd.,2003)



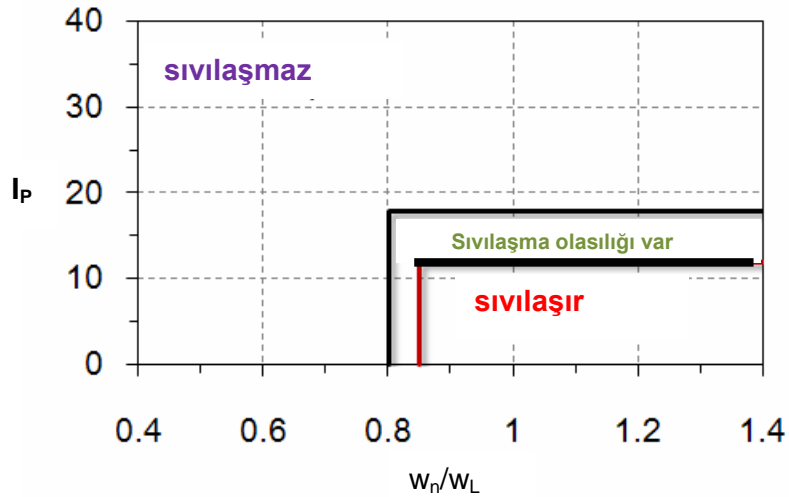
1.5TS1500/2000 Plastisite Kartı

Seed vd.'nin kesin sıvılaşma bölgesi olarak gösterdiği alanın sağ sınırı ($w_L=37$), TS1500/2000 plastisite kartında (Şekil 2.3) MI-orta plastisiteli silt'lerin başladığı ($w_L=35$) bölge ile adeta çakışması ilginç bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Literatürde dikkat çeken ve uygulama bulan çalışmalardan birinde (Şekil 2.4a) siltli doğal zeminler ve dolgularda sıvılaşmanın oluşabileceği ve siltin kil içeriği ($<2\mu m$) ile likit limitin sıvılaşma olayında "anahtar" parametreler olarak nitelendirilebileceği bildirilmiştir (Andrews ve Martin, 2000). Verilen limitler $w_L \leq 32$ ve $\%C < 10$ 'dur. 2007'de Barcelona Limanı'nda gerçekleşmiş olan sıvılaşma olayında sıvılaşan dolgular Andrews&Martin grafiğine işlendiğinde noktaların birçoğu sıvılaşma göstermediği halde (Şekil- 2.4a) bu yaklaşım Seed vd. önerisi ile karşılaştırıldığında bu ikincide (Şekil 2.4b) noktaların hemen tümünün sıvılaşma bölgesi kaldığı gibi ilginç bir sonuçla karşılaşmaktadır. Böyle bir sonucun sıvılaşma kriteri olarak plastisite indisi'nin kullanılmasından kaynaklanması olasılığı vardır. Ayrıca tüm yöntemlerde doğal su muhtevasının likit limitin $\%80-90$ 'ından yüksek olması (w_n/w_L) temel koşul olarak görünmektedir.



Şekil 1.6 Sıvılaşma tanısının değişik kriterlerle değerlendirilmesi
(a) Seed vd. 2003 (b) Andrews ve Martin, 2000

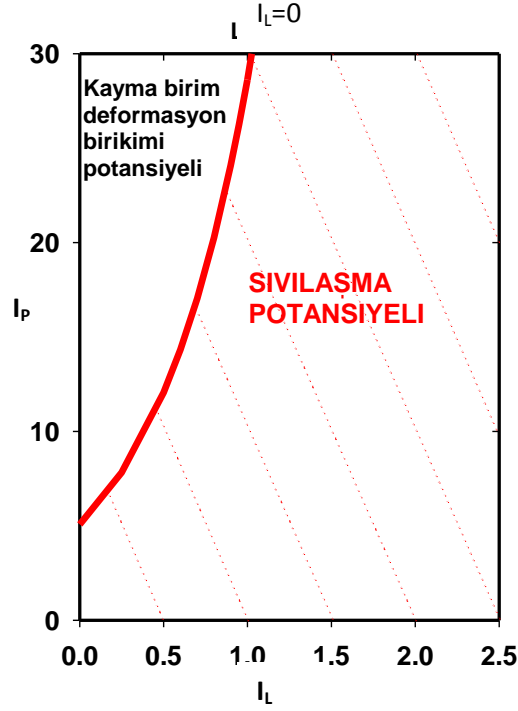
Bray ve Sancio (2006) Adapazarında kısıtlı sayıda siteden alınmış numuneler üzerinde yaptıkları değerlendirmede, ince daneli zeminlerde sıvılaşma olasılığının sadece doğal su muhtevası ve plastisite indisi ile değerlendirilebileceğini öne sürmüşlerdir (Şekil 2.5). Onlara göre, plastisite indisi < 18 ve su muhtevası likit limitin %85'i ve üstünde olan tüm zeminler sıvılaşma potansiyeline sahip olup, $I_p < 12$ zeminlerin sıvılaşması kaçınılmaz olmaktadır. Ancak, bu öneri "her $I_p < 12$ zeminin sıvılaşır olamayacağı" görüşü ile kendileri tarafından tartışmaya açılmaktadır.



Şekil 1.7 Sıvılaşmada Plastisite İndisi- Su muhtevası ilişkisi (Bray ve Sancio, 2006)

Su muhtevasının ve plastisite indisinin sıvılaşabilirliğe etkisinin Sıvılık İndisi ile ilişkisinin gözönüne alınması da önemli bir yaklaşım olabilir. Zira I_L 'nin tanımında doğal su muhtevası w_n , plastisite indisi ile birlikte gözönüne alınmaktadır:

$$I_L = \frac{w_n - w_p}{I_p} \quad (2.1)$$



Şekil 1.8 Sıvılık İndisi-Plastisite İndisi bileşiminin sıvılaşmaya etkisi (Bilge, 2010)

Şekil 2.6'da Sıvılaşma İndisi-Plastisite İndisi'nin sıvılaşma' yı nasıl etkilediği gösterilmektedir. Ayırım eğrisinin denklemi

$$I_L \geq 0.578 \ln(I_p) - 0.94 \quad (2.2)$$

ile verilmiştir. Burada plastisite indisinin 5 olduğu durumda sıvılaşmanın sıfır gibi çok düşük bir sıvılık indisi düzeyinde de gerçekleşebileceği gibi tartışılabilir bir sonuçla karşılaşılmakta ise de, bu doğrusal olmayan bağıntı incelemeye değer bulunmuştur.

Adapazarı Kriterleri olarak sunulan (Önalp ve Arel, 2001) ve siltli zeminlerin 1999 depreminde performansını yansıtan bilgiler literatürde Çin kriteri olarak anılan bilgilerin kritik değerlendirilmesi ile üretilmiş olup, sürekli güncellenmektedir.

Bu kriterler büyük arazide sıvılaşmış/sıvılaşmamış sitelerde yapılan gözlemler ve buralardan alınan numunelerin deneye tabi tutulması ile geliştirildiğinden, güvenilirliği makul derecede yüksek olarak nitelendirilebilir.

Son biçimi ile Adapazarı Kriteri'ne göre bir ince daneli zeminin sıvılaşabilmesi için

- $I_L \geq 0.9$ (w_p ölçülemiyor ise w_n/w_L oranı)
- $w_L \leq 33$
- $C \leq \%10$
- $D_{50} > 0.02\text{mm}$

koşullarının tümünün sağlanması gerekmektedir. Bu kriterde $25 < w_L < 33$ ve $10 < \%C < 15$ aralıklarında numunelerin dinamik deneylerle yargılanması önerilmiştir (Bol, Önalp, Arel,

Özocak, Sert, 2010): Adapazarı kriterlerinde plastisite indisinin yer almamasının nedeni olarak düşük plastisiteli ve sıvılaştırılabilir NP zeminlerde plastik limitin ölçümündeki tutarsızlıklar gösterilebilir.

Bölgenin üst sınırı ise $I_p=12$ ile gösterilmiş olup, Bray ve Sancio önerisi ile uyum içindedir. Ancak, bu plastisite indisi değerinin deneyle ölçülebilir en alt sınırı göstermesi nedeniyle, belki de sadece NP siltlerin sıvılaştırılabileceği gerçeği tartışılır olmaktadır. Öneriler genel olarak değerlendirildiğinde, sıvılaştırılabilir siltli zeminlerin “kumsu” karakterde olduğu hakkında görüş birliği olduğu, kumsu’dan kilsi’ye geçişte mekanik deneylerden de yararlanılarak yargıya varılmasının uygun olacağı ve sonuçta kilsi zeminlerin sıvılaştırılmayacağı gibi bir görüş belirmektedir.

3. DENEYLERE HAZIRLIK

Bu araştırma programı siltli zeminlerin sıvılaştırma yeteneğinin teşhisi için önerilmiş Adapazarı Kriteri’nin, yapay ve doğal örneklerde laboratuvarında gerçekleştirilmiş dinamik üç eksenli (CTX) ve basit kesme (DSS) deneyleriyle karşılaştırılması yoluyla yürütülmüştür. Deneylerin yapılması için Adapazarı’nın sıvılaştırmanın yaygın olduğu mahallelerinden Yenigün’den yeterli miktarda numune kazılıp alınarak laboratuvarında depolanmıştır.

3.1. Numuneler

Denenen tüm numunelerde öncelikle dane dağılımı, likit-plastik limit, kil içeriği, sıkışabilirlik ve aşırı konsolidasyon oranları ölçülmüş ve dinamik deney sonuçları ile fiziksel özellikler arasındaki bağlantıyı saptamaya yönelik olarak veriler sağlanmıştır.

Çalışma iki yoldan yürütülmüştür. Birinci aşamada kil ve kumundan arındırılmış Adapazarı siltinin bentonit ve kaolinit gibi iki çok farklı karakterde kil minerali ile değişen oranlarda karıştırılması ile yapay numunelerin hazırlanması ve bunların dinamik koşullarda denenmesi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde daha önceki çalışmalar ve 104M387 projesinde yapılmış 50 çift sondaj/sondajlamalara ek olarak 25 sondaj kuyusu açılmış ve buradan alınan örselenmemiş numuneler CTX ve DSS deneylerine tabi tutulmuştur.

Çalışmalara yapay numunelerle başlanmasının iki nedeni vardır:

- Adapazarı kriterinin dayandırıldığı ana öğelerden kil içeriğinin numunelerde homogen ve kontrollü ayarlanması ile, bu numunelerin dinamik davranışının kil içeriği ve mineralojisinden doğrudan etkilendiğinin incelenmesi;
- Sonuçları, doğal numunelerde dinamik davranışa doğrudan etki yapan “yaşlanma” ve laboratuvarında bekletilme sonucu oluşan “bayatlama” etkisinden arındırma

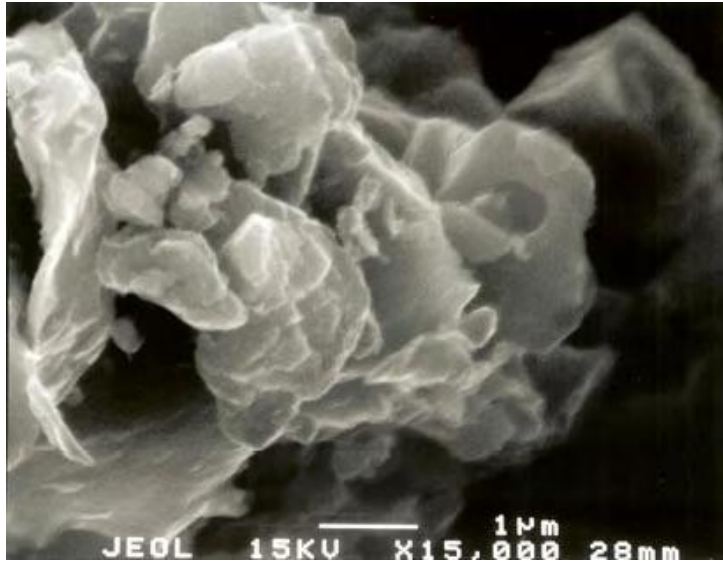
3.2. Karışım Numunelerin Hazırlanışı ve Özelliği

Araştırmanın başlığını oluşturan Adapazarı Silti daha önce özellikleri ayrıntılı olarak araştırılmış fluviyal, yani akarsu kökenli, bir malzemedir (Önalp, Arel, Bol, Özocak, Sert,

2007). Bu siltler Holosen ve son zamandan (1967'ye kadar) Sakarya Nehri tarafından Adapazarı Ovası'nın (Akova) değişik noktalarına sellenme ve menderes etkisi ile kısıtlı hacimlerde biriktirilmişlerdir. Bu araştırma programının yoğun biçimde yürütüldüğü ve yüzey alanı yaklaşık 27 km² olan Adapazarı kentinde zemin profili, Sakarya veya bir başka büyük akarsuyun geçmiş 7000 yılda yaklaşık 5 km boyunca batı'dan doğu'ya yatak değiştirmesinden etkilenmiştir. Bu görüş, günümüzde Çark Suyu gibi sadece Sapanca Gölü'nün fazla suyunu taşıyan önemsiz bir akarsu üzerinde mevcut Roma zamanında yapılmış 6 gözlü köprünün varlığından kaynaklanmaktadır.

Deneylerde kullanılan zemin karışımlarının kil içeriğinin tanınması için suda yüzdürülmüş numune üzerinde TÜBİTAK-MAM' da X-ışını kırınım analizi yaptırılmış ve bulunan mineraller kuvars, kalsit, feldispat, montmorillonit, illit ve kaolinit olarak verilmiştir.

Bray (2005) ise ABD Willamette Geological Service laboratuvarında yapılan analizde Adapazarı zeminlerinin kil içeriğinin smektit veya rastgele tabakalı illit/smektit, klorit, illit ve kaolinit olarak belirlendiğini bildirmiştir. Montmorillonitin kaynağı olan smektit ince kilin eğemen minerali olup, illit daha büyük kil boyutlarında boldur. <0.2 µm boyutların tüm durumlarda %85 smektit, %10 illit ve %5 klorit ve kaolinit içerdđi söylenebilmektedir. Şekil 3.1'de Adapazarı siltinin x15000 görünümü verilmektedir.



Şekil 3.1 Adapazarı Siltinde Yapı (Bray vd.2005)

Adapazarı siltinin (ML) tipik fiziksel özellikleri Çizelge-1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1 Adapazarı Doğal Siltinin Özellikleri

Likit Limit	w_L	34→NP	İnceler	FC	%80-90
Plastik limit	w_P	23→NP	% Kum	S	<30
Plastisite indisi	I_P	7→NP	%Silt	M	~60
	pH	7.98	%Kil	C	5-10
SINIFI	TS1500	ML			

Şehir içinde, yaklaşık 3m derinliklerde sıkça bulunan bu siltin birçok mahallede 1999 depreminde sıvılaştığı bilgisi vardır. Bu nedenle, silt doğal durumunda denenerek bir anlamda kalibrasyon gereci olarak kullanılmıştır.

Siltten yaklaşık 5 kN alınıp, oda sıcaklığında kurutulduktan sonra bu gereç No.200 elekten geçirilerek kumundan arındırılmıştır. Daha sonra bir havuzda büyük hacimde suyla karıştırılıp kilinin yıkanarak yüzdürme yoluyla alınması sağlanmıştır. İşlem sonunda siltin kil içeriğinin pipet analizi ile %4 dolayına düştüğü belirlenmiştir. Laboratuvar ortamında stoklanan silt Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Yıkanmış Adapazarı Silti Stoğu

3.2.1. Katkı Killeri

Silte katılan killer ticari kalitede olup, yerli üretilmiştir. Özellikleri Çizelge-II'de verilmiştir. Killerin üreticileri ile yapılan görüşmelerde bunlara herhangi bir kimyasal işlem uygulanmadığı bildirilmiştir.

Çizelge 3.2 Karışımlarda kullanılan killerin özellikleri

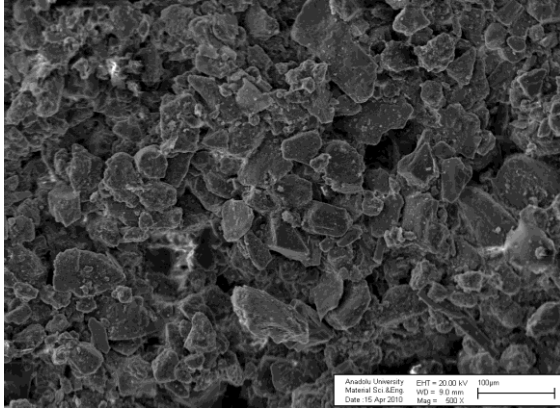
KİL	Üretici	FC(%)	C (%)	w_L	w_P	I_P	pH	Renk	Organik (%)	SINIF
Kaolin	Esan430	100	59	58	34	23	7.92	beyaz	0.02	MH
Bentonit	Kaytan	100	82	133	34	99	8.13	gri	1.79	CH

Killer yıkanmış Adapazarı siltine değişen oranlarda karıştırılarak alt stoklar hazırlanmış ve bunların öncelikle sınıflama deneyleri yapılmıştır. Bu işlem olağan bir çalışma olarak görüñse de, beklenmedik sonuçlarla karşılaşılmasıdır.

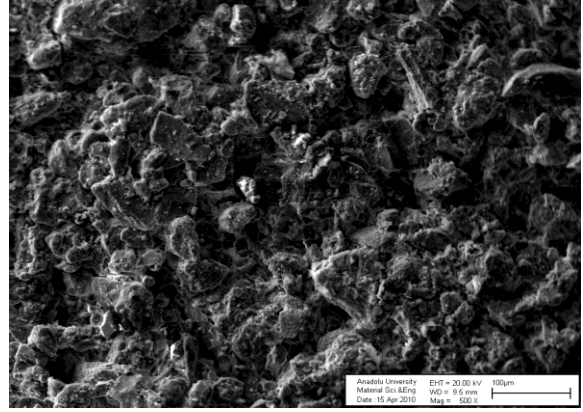
Öncelikle karışımların kil yüzdelerinin (C) ölçüldüğü hidrometre deneyinin çelişkili sonuçlar vermesi nedeniyle, ölçümler daha duyarlı olan pipet analizinde yapılmıştır. Ancak, önceden hesaplanarak ayarlanmış kil yüzdelerinin pipet analizinden gelen sonuçlarla da uyum içinde olmadığı,

$$C_{ölçülen}=0.82C_{beklenen}+1.2 \quad (2.3)$$

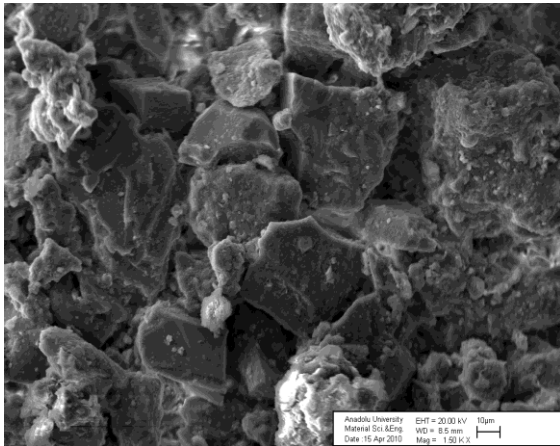
gibi bir doğrusal bağıntı belirdiği görülmüştür. Bir başka deyişle, bentonit ve kaolinitte ölçülen değerler beklenenlerin kararlı olarak altında kalmıştır. Bunun anlamı, killerin karışıma girdiklerinde silt daneleri ile yakın bir ilişkiye girdikleri biçiminde algılanmıştır. şekil 3.3'te gösterilen SEM görüntülerinden bu tür bir bilgi gelmektedir. Bentonit karışımları taze iken silt ve kil daneleri ayrı konumlarda görünmekte, yaşlanma sonucu kil danelerinin ortama yayılarak silt yüzeylerini kapladığı görülmektedir. Bunun sonucunda boşluklar tıkanmış görülmektedir.



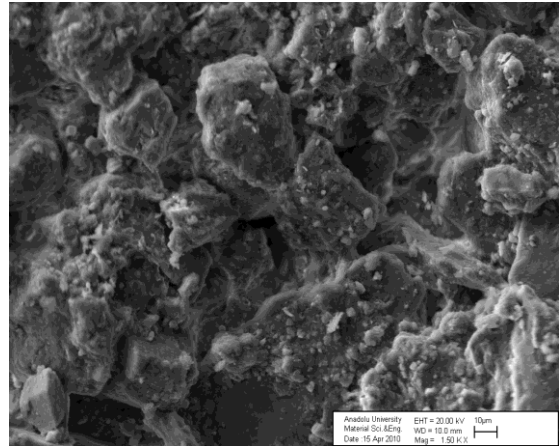
Genç %9 bentonit (500 X)



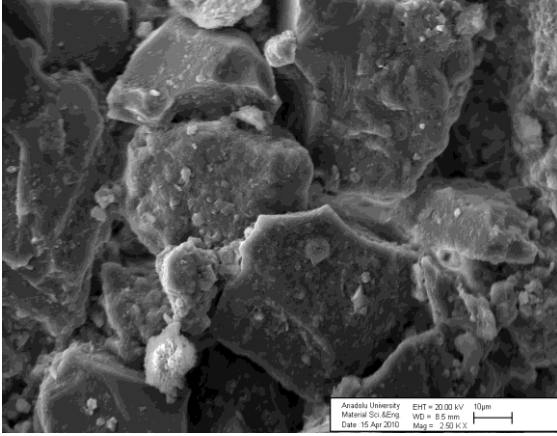
Yaşlı %9 Bentonit (500 X)



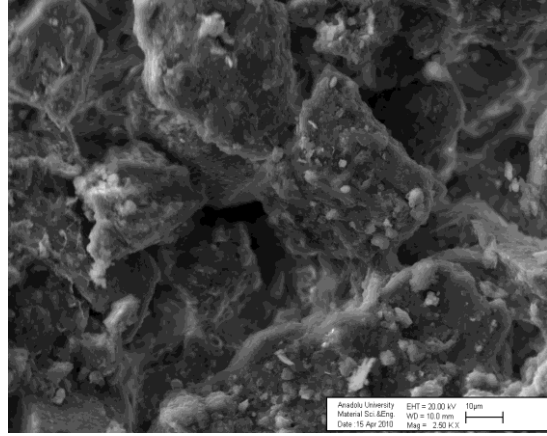
Gen %9 Bentonit (1500 X)



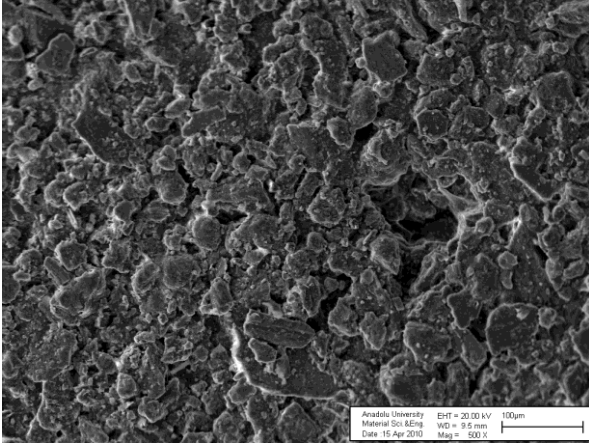
Yaşlı %9 Bentonit (1500 X)



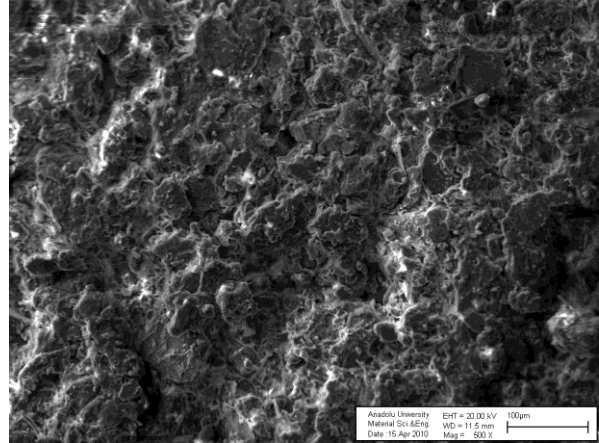
Genç %9 Bentonit (2500 X)



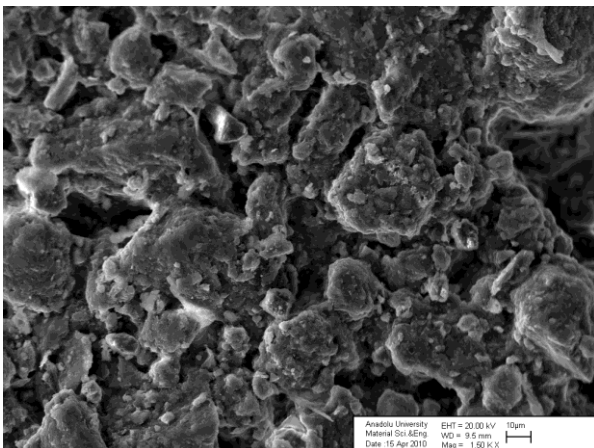
Yaşlı %9 Bentonit (2500 X)



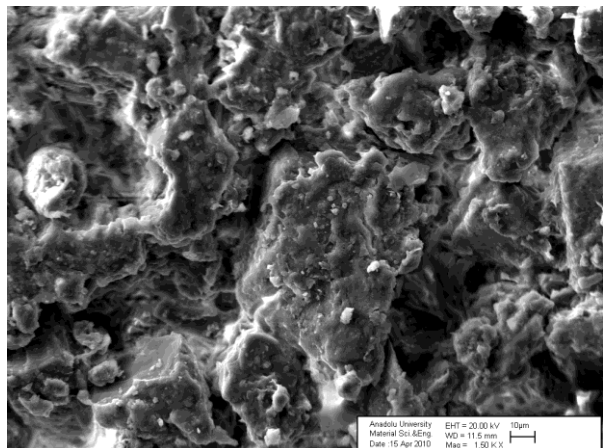
Genç %18 Bentonit (500 X)



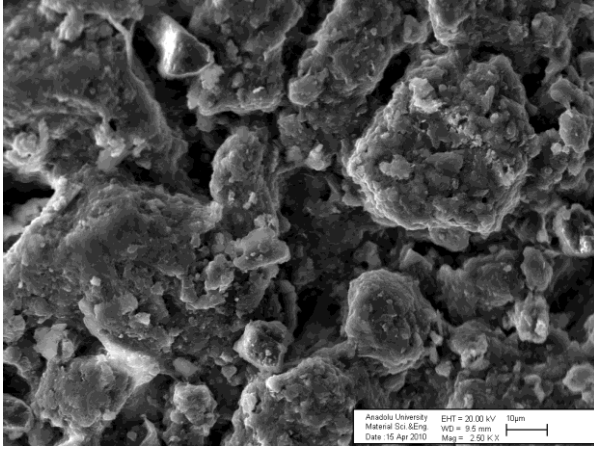
Yaşlı %18 Bentonit (500 X)



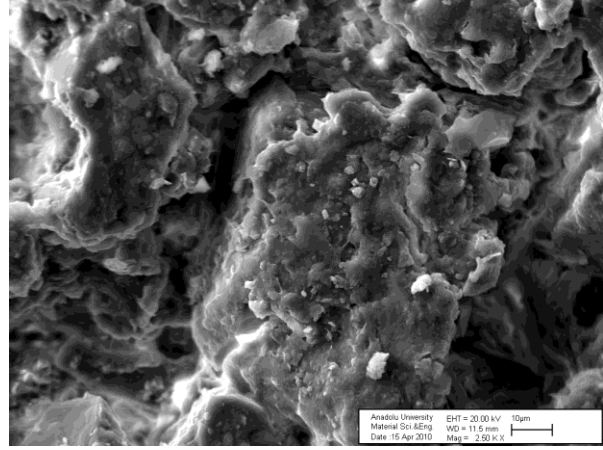
Genç %18 Bentonit (1500 X)



Yaşlı %18 Bentonit (1500 X)



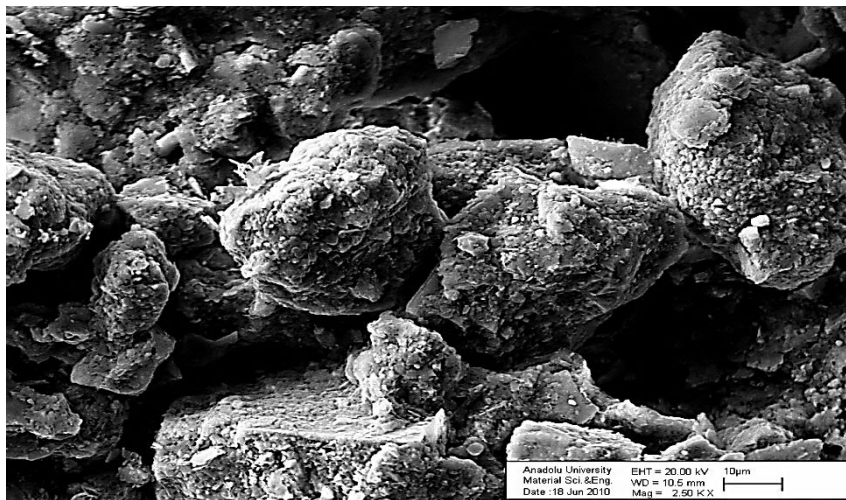
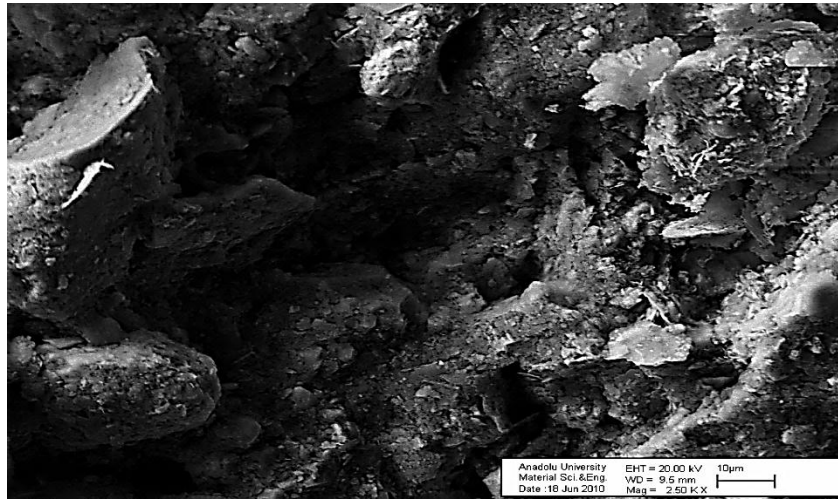
Genç %18 Bentonit (2500 X)



Yaşlı %18 Bentonit (2500 X)

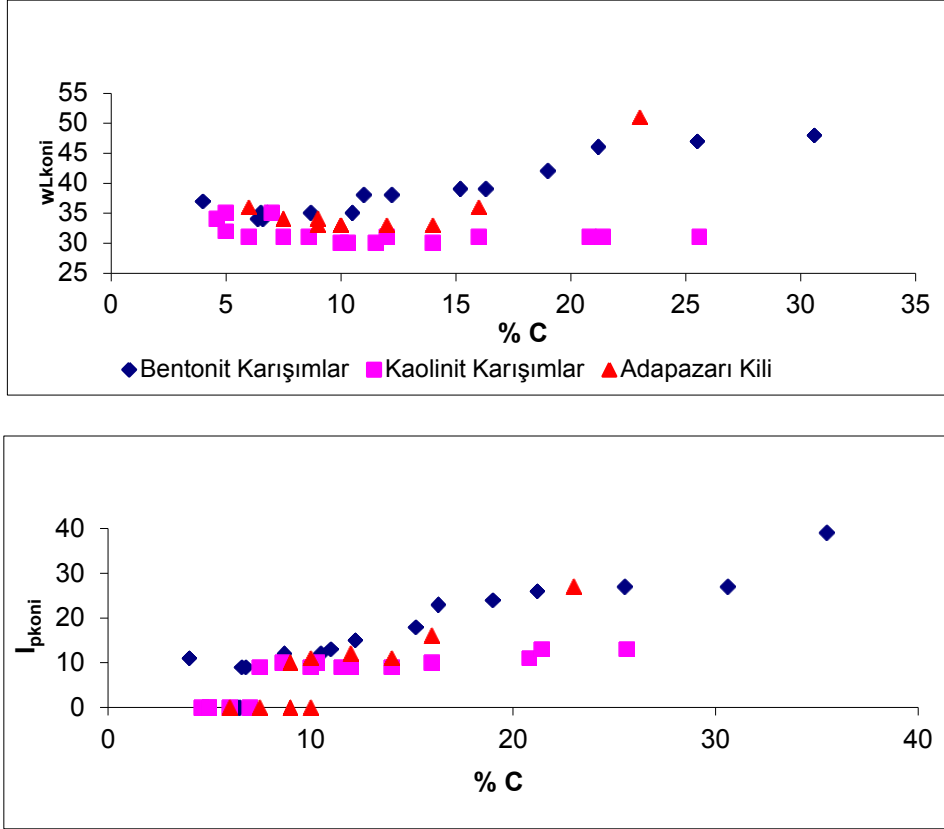
Şekil 3.3 Adapazarı Siltinin bentonitle karışımlarından görüntüler

Kaolinitte durum farklıdır. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi genç ve yaşlı kaolin-silt karışımında yapının bentonite oranla farklı olmasının yanısıra, yaşlanma sonucu yapıda büyük çaplı boşlukların oluşması dikkat çekmektedir.

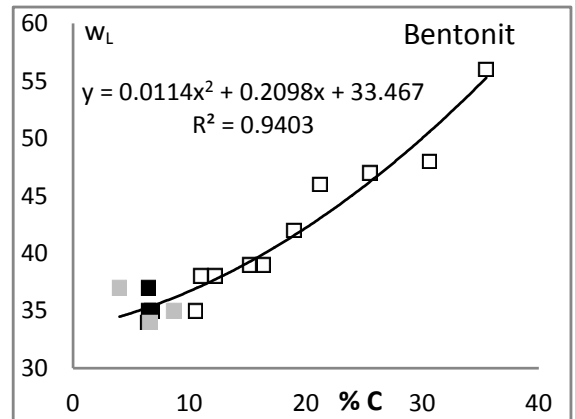
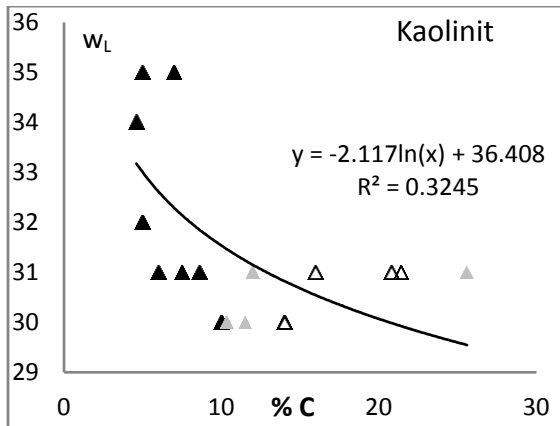


Şekil 3.4 Adapazarı Siltinin kaolinitle karışımından görüntüler (%K=18)

Bentonit ve kaolinit gibi iki farklı mineralin siltle karışımının fiziksel özellikleri nasıl etkileyeceği konusu ilerideki değerlendirmelere ışık tutması açısından bu aşamada incelenmiştir. Şekil 3.5'e bakıldığında silt-bentonit karışımında kil oranındaki artışla plastisitede yükselme belirgin ise de, doğal silt+kendi kilinin karışımında lineer olmayan bir bağıntı görülmektedir. Karışımda artan kaolinitin ise kıvamı hemen hiç etkilemediği, artan kil yüzdesinin likit limiti düşürdüğü ilginç bir sonuç olarak belirmiştir(Şekil 3.6). Bu bilgilerden kaolin-silt karışımının özel bir yapı kazandığı ve bu aşamada yapının özellikleri anlaşılmadan ayrıntılı analizlere girilmemesi kararına varılmıştır.

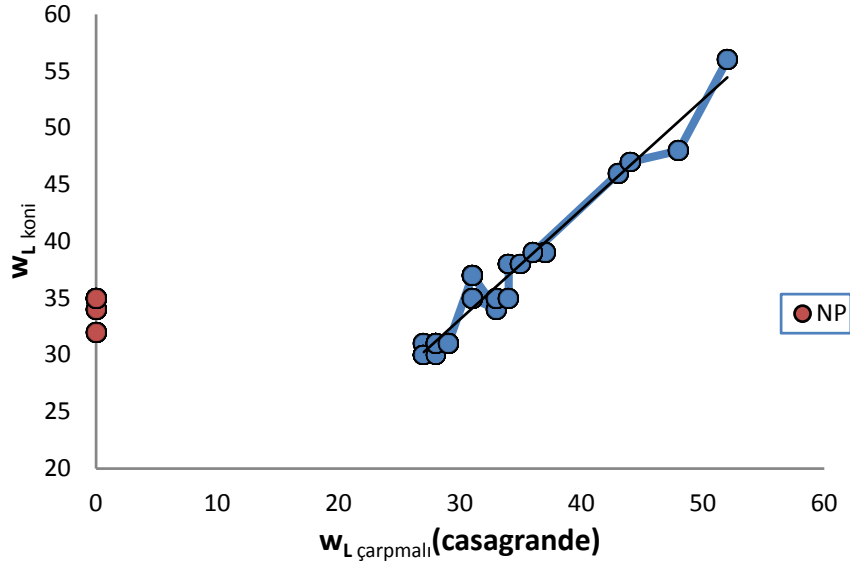


Şekil 3.5 Kil içeriğinin kıvama etkisi



Şekil 3.6 Kil yüzdesinin likit limite (koni düşürme) etkisi

Diğer bir sorun likit limitin ölçümünde belirlemiştir. Literatürde birçok araştırmacının da görüşlerine benzer olarak, 80 farklı karışımda ölçülen w_L değerleri Şekil 3.7'de



Şekil 3.7 Likit limitin koni düşürme ve çarpmalı alette ölçüm sonuçları (80 numune, 16'sı NP)

görüldüğü gibi önemli farklılıklar göstermektedir. Birinci fark, çarpmalı deneyde bulunan likit limitin koni düşürmeye oranla yaklaşık 3-4 puan düşük değerde olmasıdır.

$$w_{L\text{koni}}=0.9673w_{L\text{casag}}+4.14 \quad (r=0.98) \quad (2.4)$$

Ancak asıl önemli farklılık, 16 adet silt karışımının çarpmalı alette likit limit ölçümüne olanak bulunmadığı halde (NP/0) koni aletinde $w_L=35$ 'e kadar yükselebilen ölçümler alınabilmiş olmasıdır. Öte yandan, Sonuç Çizelge'sinden den görülebileceği gibi çarpmalı alette NP olan gerek bentonit gerekse kaolinit karışımlarda $w_{L\text{koni}}$ 31 ile 35 arasında ölçülmekte, ve de 30'un altına düşmemektedir.

Bu tür karışımlar plastik limit deneyinde de sorunlar çıkartmaktadır. TS ve ASTM tarafından önerilen, plastik limit deneylerinde numunenin 3mm kalınlıkta iplere yuvarlanması yolu, deneyi yapanın deneyim ve becerisine büyük ölçüde bağlıdır. Bir operatör numunenin yuvarlak hale getirilemeden ufalandığını beyan ederken (NP) bir diğeri gerekirse hafif basınç uygulayarak eliptik kesitli de olsa 3mm'lik ipi oluşturmayı başarmaktadır. Bunun sonucu, aynı numunenin ML(NP) veya CL(plastik limit ölçülebilir) olarak sınıflanması gibi çelişkili bir durumu ortaya getirmekte, bu da sıvılaştırma analizlerinde çelişkili yorumlara yol açmaktadır.

3.2.2. Numunelerin Dinamik Deneylere Hazırlanışı

Bu çalışmada ince daneli zeminde homogen numuneler sağladığı bilinen bulamaç konsolidasyonu yöntemi (*slurry consolidation*) uygulanmıştır.

Silt-kil karışımları oda sıcaklığında ağırlıkça ayarlanarak sınıflandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Bunu izleyerek, aynı numuneler likit limitin %150'si oranında bir su muhtevasında vakumlanarak içinde hava kalmayacak biçimde karıştırılmakta ve CTX için Şekil 3.8a (çap 100mm), DSS için de Şekil 3.8b'deki (çap 50mm) konsolidasyon silindirlerine

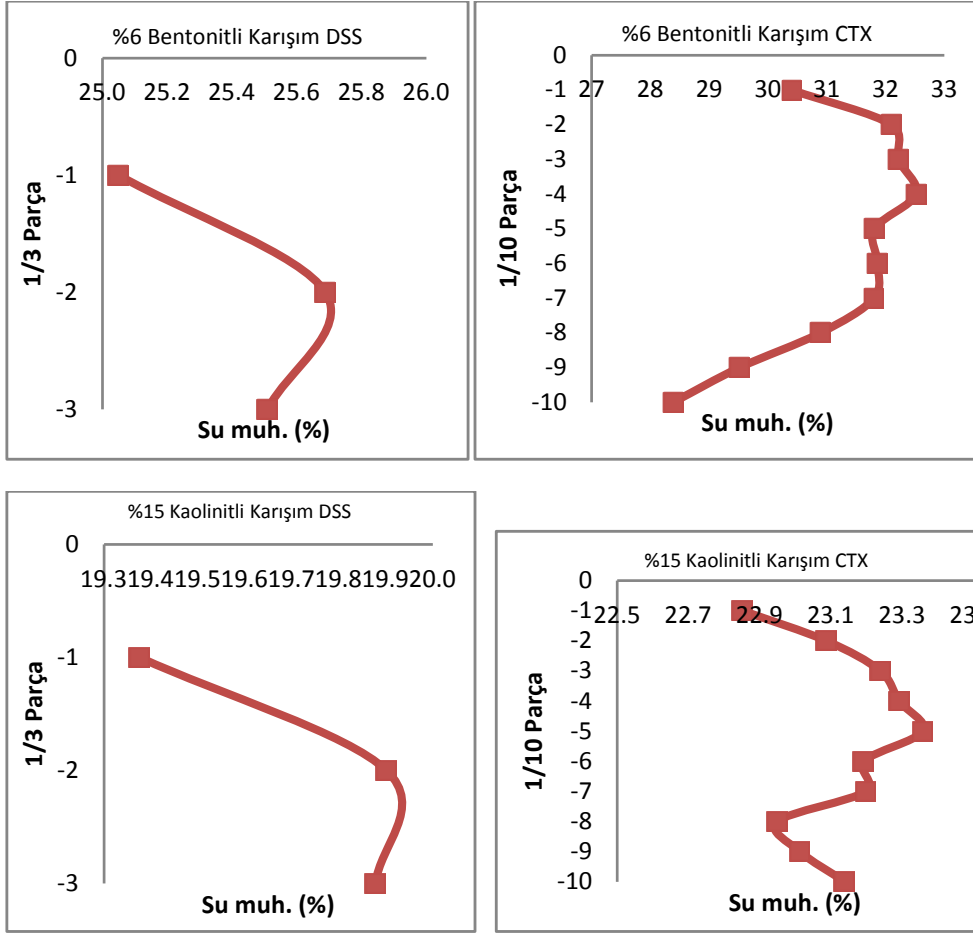
dökülerek kademeli olarak 100 kPa'a konsolide edilmektedir. Alt, üst ve yanlardan (*radyal*) drenajla konsolidasyon süreci 3-10 gün içinde tamamlanmaktadır. Bu evre, sistemden dışarıya su çıkmaması ve tepedeki mikrometrenin okumalarının ihmal edilecek düzeye düşmesinden anlaşılmaktadır. Konsolidasyonun tamamlanmasından sonra numuneler CTX hücresi ve DSS halkalarına aktarılmaktadır.

Burada dikkat çeken husus, numunelerin yukarıda anlatılan biçimde konsolide edilmesini izleyerek CTX ve DSS sistemlerine yerleştirilmesi sonrasında yeniden doyum ve yeniden aynı basınca (100 kPa) konsolide edilmelerine karşın numuneler boyunca su muhtevalarında farklılıklar göstermesidir. CTX numunesinin boyu uzun olduğundan (100mm) iki uç ile numune ortası arasındaki fark %4.5'a varırken, yüksekliği sadece 25.4mm olan DSS numunesinde %1'in altında kaldığı gibi, %6 bentonitli CTX numunesinin su muhtevası %32.5, DSS numunesinin ortalama su muhtevası ise %26 gibi çok farklı bir düzeyde ölçülmektedir(Şekil 3.9). Her iki deney için aynı numunenin kullanılmış olması ve bu numunenin deney aletine koyulup yeniden konsolide edilmeden hücrede en az 1 hafta 100 kPa basınç altında bekletildiği düşünüldüğünde, buna makul bir açıklama getirmek zor görünmektedir. Bu konuya ileride değinilecektir.

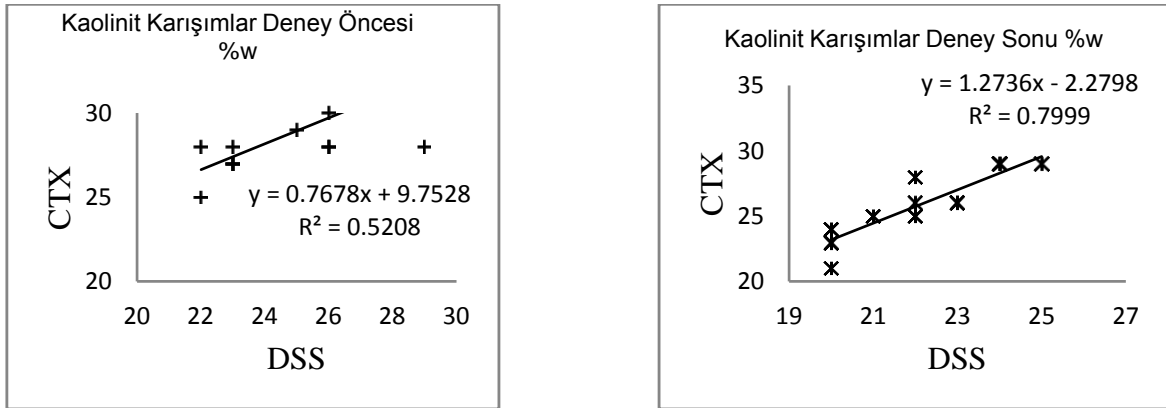
İlgi çeken bir diğer husus deney öncesi ve sonrası ölçülmüş su muhtevaları arasındaki farklılıktır. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi CTX ve DSS numunelerinde de önemsenecek farklılıklar bulunduğu görülmektedir. Kaolinde deney öncesi ve deney sonu korelasyonları uyum içinde değildir.



Şekil 3.8 Bulamaçtan Numune Hazırlanması-Konsolidasyon silindirleri (a) 100mm çap (b) 50mm çap

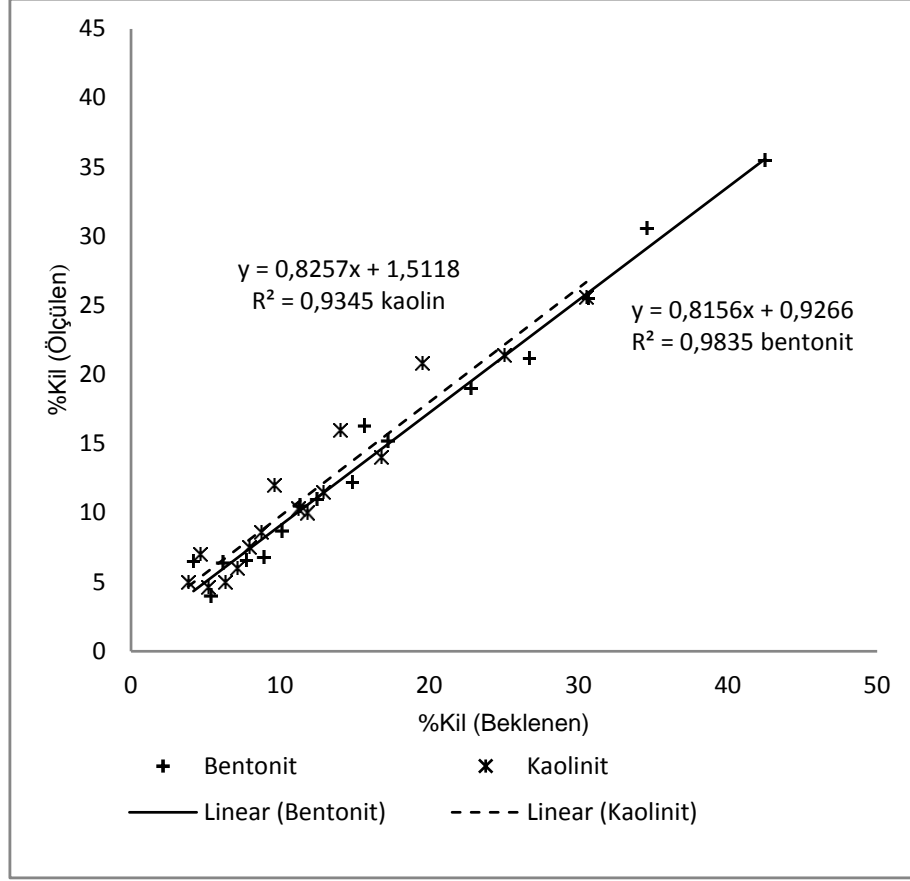


Şekil 3.9 DSS ve CTX numunelerinde su muhtevası profilleri (a) %6 Bentonit içerikli (b) %15 Kaolinit içerikli



Şekil 3.10 Kaolin katkılı numunelerin su muhtevaları

İncelenen diğer bir konu karışımların ortalama kil içeriğidir. Başlangıçta dikkatle ayarlanan karışım pipet analizine tabi tutulduğunda amaçlanan yüzdelere tutturulamadığı ve son kil içeriğinin amaçlanandan genelde daha düşük çıktığı görülmektedir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Kaolin ve Bentonit Karışımları: Kil İçerikleri

4. DENEY SİSTEMLERİ VE KALİBRASYON

Bu araştırma programının ana amacı fiziksel özellikleri kullanarak zeminleri sivilaşma/yenilme açısından değerlendiren Adapazarı Kriterleri'nin laboratuvarlarda sıkça kullanılan dinamik deneyler aracılığı ile irdelenmesidir.

Kullanılmakta olan dinamik zemin deneylerinin en ayrıntılı ele alındığı standart ASTM'dir. Bu standartlarda rezonant kolon, üç eksenli ve basit kesme

- D4015: Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Resonant Column;
- D5311: Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil;
- D3999: Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus;

deneyleri bulunmaktadır. Bu deney sistemleri günümüzde birçok firma tarafından imal edilmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır.

Birçok yayında, günümüze değin en çok kullanılan CTX'e oranla daha iyi sonuçlar verdiği gerçeğine değinilen dinamik basit kesme deneyi de halen birçok firma tarafından imal

edilmekte, ancak bununla ilgili bir ASTM standardı bulunmamaktadır. Yakın zamanda statik deney amaçlı D6528-07 Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils standardı çıkmış olup güncel eğilim, dinamik deneylerin de bu standartta istenen özellikleri kapsamaya yolundadır.

Gerilmelerin en gerçekçi şekilde uygulanabildiği içi boş silindir üç eksenli hücre burulma deneyi yapımındaki güçlükler ve yüksek maliyetler nedeni ile henüz yaygın uygulama bulamamıştır.

O halde, kalibrasyon aşamasında iki konu ele alınmalıdır. Birinci konu kullanılan CTX ve DDS deney sistemlerinin özellikleri, gereğince çalıştığı denetimi, ikincisi ise bu iki deneyin sonuçlarının örtüşüp örtüşmediğinin teyididir.

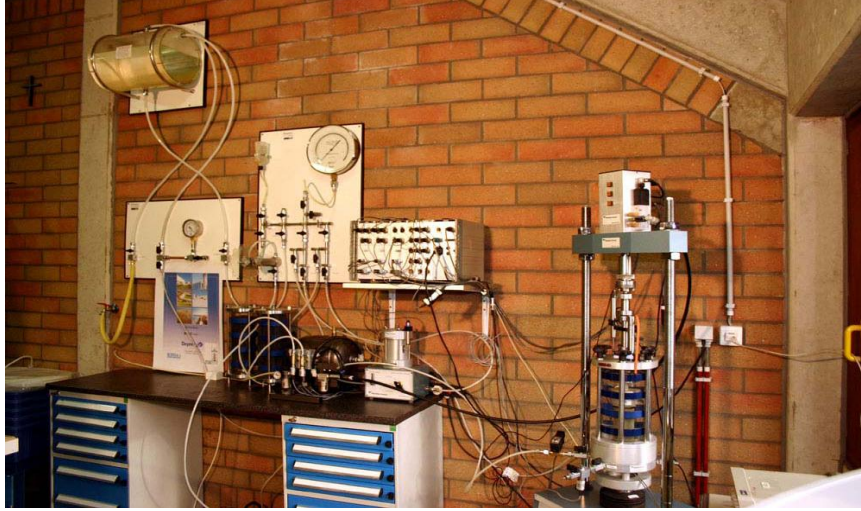
4.1. Dinamik Üç Eksenli Hücre Kesme Deneyi (CTX)

Üç eksenli deney ilk defa 1930'lu yıllarda Rendulic tarafından monoton yükleme yapmak üzere geliştirilmiştir. O tarihlerde numuneyi tek düzlemde kesen kesme kutusunun bu düzlemde dahi üniform olmayan gerilmeler oluşturduğu gerekçesi ile üç eksenli deney artan rağbet görmüştür. Kesme kutusundan farklı olarak kayma düzlemlerinde oluşan gerilmelerin bilinmesi yanında, drenajın çift taraflı kontrol edilebilmesi ve boşluk suyu basınçlarının sürekli izlenebilmesi deneyin ek olumlu yanları olarak gösterilmiştir. Ancak bu süreçte örneğin, çok geçirimsiz bir kilde numunenin tabanında ölçülen boşluk suyu basıncının kayma yüzeyinin belirlediği orta kesimdekinden ne denli farklı olabileceği literatürde sıkça irdelenmemiştir.

CTX, statik deney sisteminden esas itibarıyla yük uygulama biçimi ile farklıdır. Burada da numune önce doyurulmakta, sonra makul bir geri basınca (>200kPa) karşı konsolide edilmekte ve kesme aşaması drenajsız olarak deviatör gerilme uygulaması ile gerçekleştirilmektedir. Yükleme tekrarlı olduğundan veri kayıtlarının elektronik olarak izlenmesi zorunluluğu vardır.

4.1.1. Kullanılan CTX Sistemi

Bu projede, Wykeham Farrance (Controls) firması 1999 yılı imalatı CTX sistemi kullanılmıştır. Özel yazılımı olan sistem 50,100 mm çaplı numuneye ± 5 kN duyarlılıkla 50-60 Hz frekansta hidrolik sistemle yükleme yapabilmektedir(Şekil 4.1).

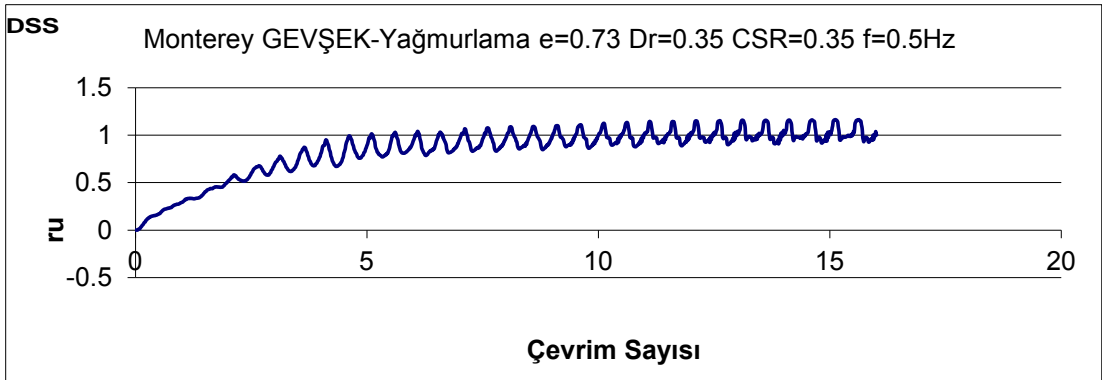
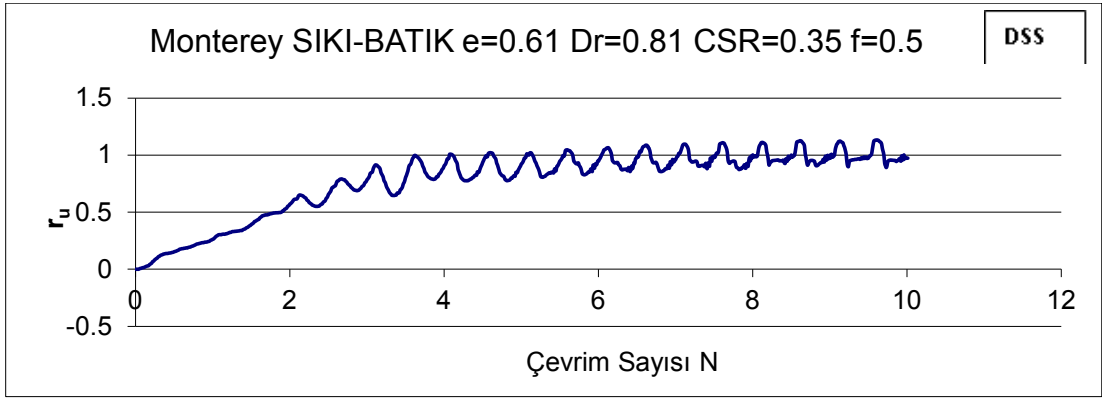
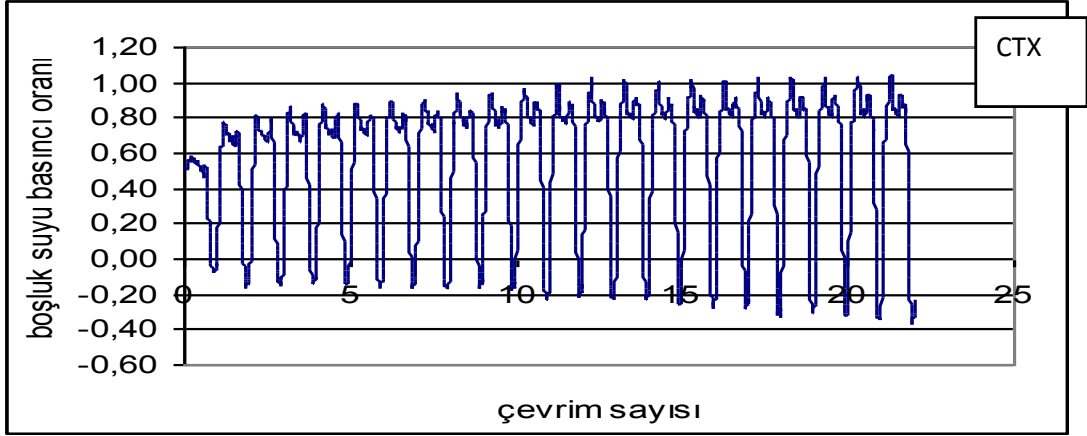


Şekil 4.1 Deneylerde Kullanılan Dinamik Üç Eksenli Sistem (CTX)

Seçilen hücre sıvısı basıncı σ_3 dinamik deneylerde etkili bir değişken olduğundan, Adapazarı deprem koşullarında sıvılaştığı belirlenmiş zeminlerin çoğunlukla üst 10m de bulunduğu göz önüne alınarak değişmez $\sigma_3=100$ kPa seçimi yapılmıştır.

Bu aşamada önemli bir konu gündeme girmiş bulunmaktadır. Deneyler ASTM'ye göre gerçekleştirildiğinden CTX: D3999, D5311 ve DSS: D6528 arasında sıvılaşma incelemesi açısından ciddi bir fark belirmiştir. Bu farkın nedeni CTX'te boşluk suyu basınçları u_w numunenin geri basınçla doyurulmasından sonra tam drenajsız koşulda ölçülürken, DSS'te kesmenin tam drenajlı gerçekleştirilmekte olması ve boşluk suyu basıncının numunede belirecek hacimsel artış veya azalmanın değişken düşey yükle önlenmesi ile (sabit hacim) dolaylı olarak, tahmin edilmesidir. D6528 her ne kadar statik kesme için öngörülmüş ise de günümüzde artık tüm dinamik deney aletlerinin de bu standarda göre imal edildiği görülmektedir. Böylece, bu iki deneyin kesme koşullarında önemli bir fark belirmiş olmaktadır.

Dinamik deneylere geçildiğinde sıvılaşma ve yenilme kavramlarını bir kez daha ince daneli zeminler açısından değerlendirmek gerekmiştir. Sıvılaşmanın kuşkusuz ve hızla gerçekleştiği gevşek üniform kumlarda mekanizma basitçe boşluk suyu basıncının yeterince yükselerek efektif gerilmeyi sıfıra düşürdüğü aşama olarak tanımlanmakta ve buna "başlangıç" sıvılaşması denmektedir. Bu noktadan çıkarak, öncelikle CTX ve DSS'te standart Monterey 0/30 kumunun $\sigma_3=\sigma_n=100$ kPa ile sıkı ve gevşek durumlarda kalibrasyonu yapılmıştır (Şekil-4.2).



Şekil 4.2 Monterey 0/30 Kumunun Dinamik Deneyde Davranışı

Buradan CTX ve DSS sonuçlarının en sonunda tutarlı hale geldiği görülebilmektedir. Gevşek kum CTX'te 2-3 çevrimde sıvılaşmaya ulaşırken DSS'in de bu aşamaya 5 çevrimde erişmiştir. Sıkı kumda yapılmış DSS daha anlamlıdır. Şöyle ki, kuru sıkı kumda DSS'te $N=35$ 'te sıvılaşma aşamasına gelinirken, bu sıkı kum batık/doğgun halde denendiğinde $N=4$ gibi beklenmedik bir sonuç belirlemektedir.

Bu aşamada bir diğer önemli konu gündeme girmiştir. Deneyler ASTM'ye göre gerçekleştirildiğinden CTX: D3999 ve DSS: D6528 arasında sıvılaşma incelemesi açısından ciddi bir fark belirlemiştir. Bu farkın nedeni CTX'te boşluk suyu basıncı u_w numunenin geri basınçla doyurulmasından sonra tam drenajsız koşulda ölçülürken, DSS'te tam drenajlı kesme gerçekleştirilmekte olması, boşluk suyu basıncı numunede belirecek hacimsel artış veya azalmanın değişken düşey yükle önlenmesi ile dolaylı yoldan, tahmin edilmektedir.

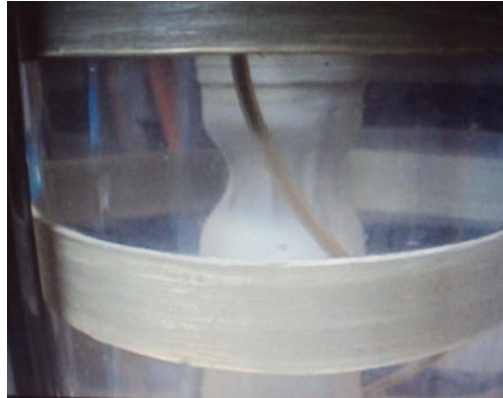
D6528 her ne kadar statik kesme için öngörölmüş ise de günümüzde artık tüm dinamik deney aletlerinin de bu standarda göre imal edildiği görölmektedir. Böylece, bu iki deneyin uyguladığı kesme koşullarında önemli bir fark belirmiş olmaktadır.

Şekil 4.4'de CTX deneyinde kesme sırasında uygulanan ve numunede oluşan gerilmeler gösterilmektedir. Buradan tekrarlı uygulanan deviatör gerilmenin yön değiştirdiği ve gerilme dairelerinin giderek büyüdüğü izlenebilmektedir.

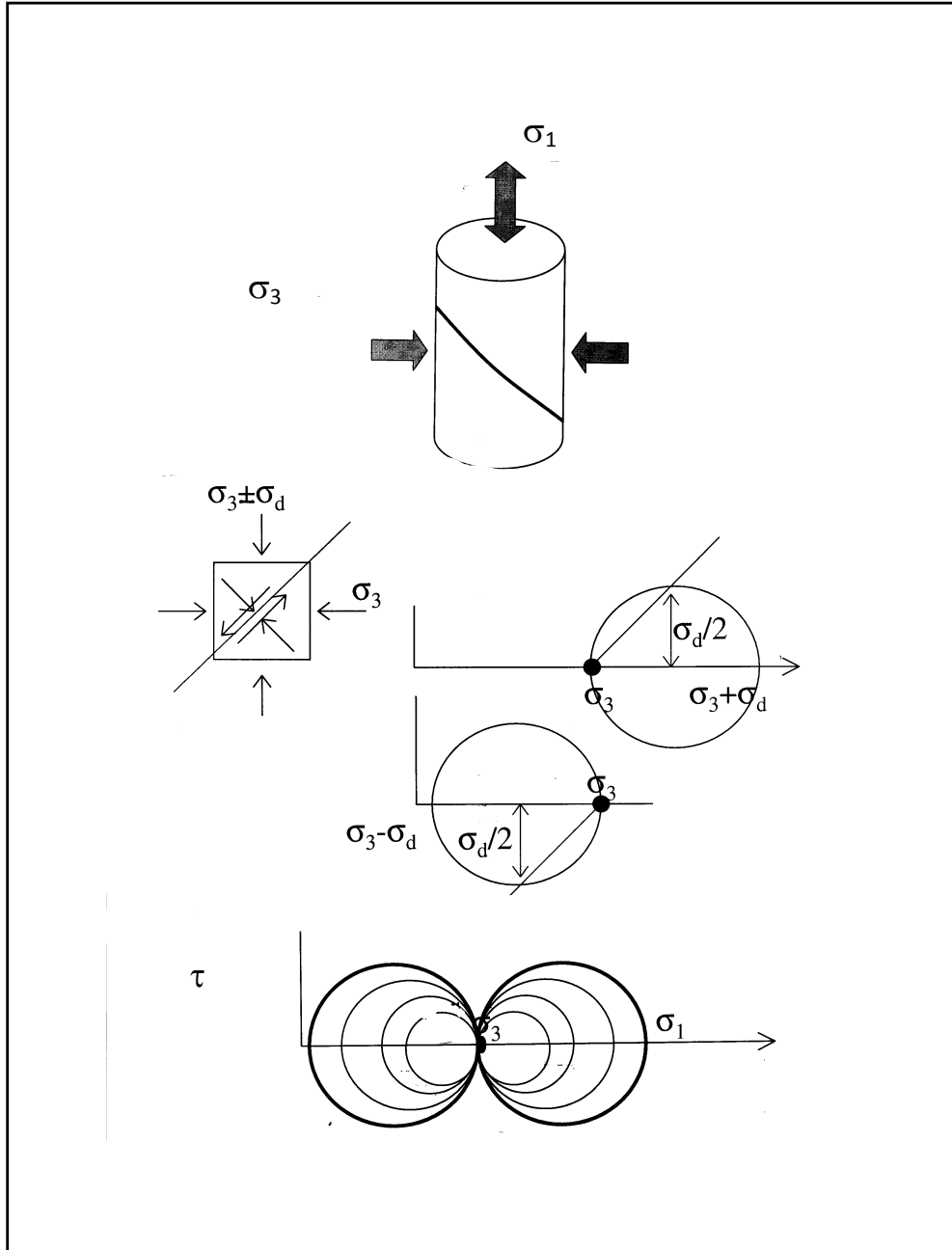
Deviatör gerilmenin uygulanması ile numune şekil değiştirmeye başlamakta, ancak drenaja izin verilmediğinden boşluk suyu basınçları ve eksenel birim boy kısaltmalar ε_z çevrim sayısı N arttıkça hızla yükselmektedir. Bu durumda olası kayma düzlemindeki çevrimsel gerilme

$$CSR = \frac{\sigma_{dev}}{2\sigma'_3} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2\sigma'_{3c}} \quad (4.1)$$

ile ifade edilmektedir. Deneyin sakıncalı yanlarından biri, numunedeki boy/çap oranının 2 gibi yüksekçe bir değer olması nedeniyle numunenin istenmeyen biçimlerde yenilmesi olasılığıdır. Şekil 4.3'te numunede çekme gerilmesi egemenliğinde oluşan boyun görölmektedir.



Şekil 4.3 CTX numunesinde "boyun verme" ile yenilme



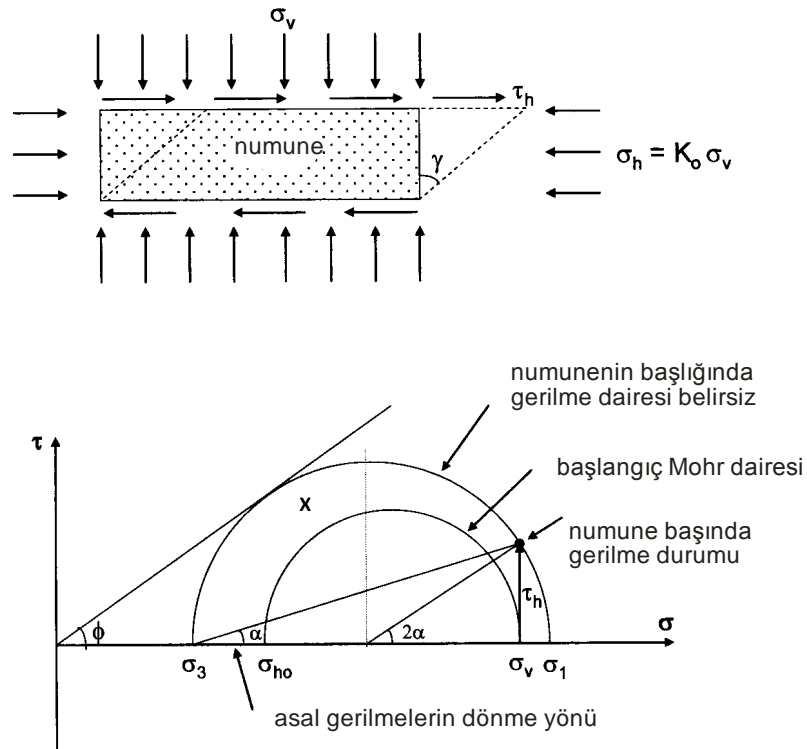
Şekil 4.4 CTX deneyde yükleme ve oluşan gerilmeler

CTX deneyi sırasında alınan okumalar numunede oluşan konsolidasyon (ΔV), boşluk suyu basınçları (u_w), deviatör gerilme (σ_d), eksenel birim boy değiştirme (ε_z) olarak özetlenebilir. Dinamik yükleme sırasında deney $\varepsilon_z=0.20$ ye kadar sürdürülebilmektedir.

4.1.2. Dinamik Basit Kesme Sistemi

Deprem sırasında yatay ivmelerin eğemen olduğu düşünöldüğünde, basit kesme deneyinin (DDSS=DSS) CTX'e göre daha gerçekçi olduğu düşünölebilir. Nitekim birçok kitapta laboratuvarın içi boş silindir burma gibi ayrıntılı ve pahalı bir sistemi kullanma olanağı yoksa, DSS'in daha gerçekçi bir seçenek olacağı belirtilmiştir (Kramer, 1996; Jefferies&Been, 2006).

CTX'e benzemez olarak, bu deneyde asal gerilmeler ölçölmemekte, numuneye bir düşey normal gerilme $\sigma_n=\sigma_v$ uygulanıp konsolidasyon sağlandıktan sonra yatay yönde uygulanan bir kuvvetle kesme gerilmesi τ oluşturulmaktadır. Bu τ değeri numunede γ kayma birim şekil değişimlerini zorlamaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 DSS Deney sisteminde gerilmeler

Numunenin üst ve alt yüzeylerine uygulanan gerilmelerle numune tümünde gerilme durumunu tariflemek mümkün olmaz. Zira gerilme dairesi üzerinde sadece bir nokta (X) bilinmektedir. Dairenin çizilebilmesi için ise yanıl gerilmelerin de bilinmesi gerekmektedir. Oysa, sadece kumların özel durumunda, ϕ 'nin bilinmesi şartıyla bu daire yenilme aşamasında tahminen çizilebilmektedir.

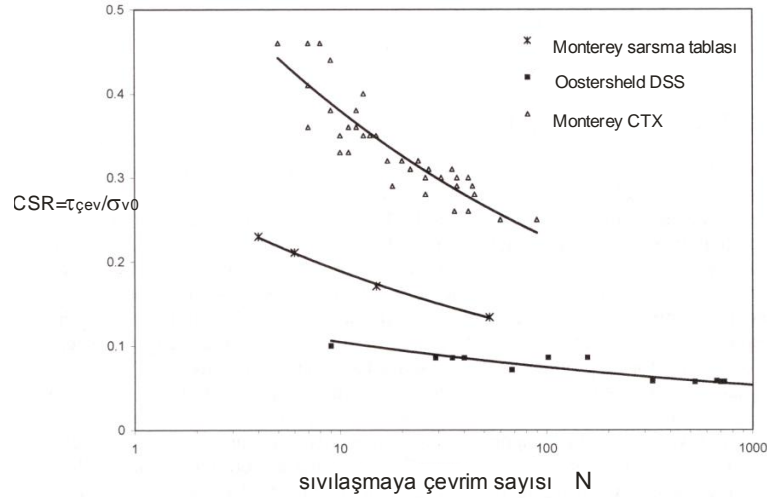
Öte yandan, gerilmeler bilinse dahi, halkalı basit kesme hücresinin yapısına bağlı olarak yanlardaki karşı τ değerleri bilinmediğinden numunenin sadece orta $\frac{1}{3}$ 'ünde üniform gerilmelerin uyandığı öne sürülmektedir (Wood-Drescher-Budhu, 1979).

Ancak, CTX numuneleri kumda zahmetli biçimde hazırlanabilmekte, silt dahi kesme aşamasına en az 3 günde gelmektedir. Oysa, DSS numuneleri yaklaşık 3-24 saatte konsolide olup, daha kısa bir sürede denenebildiğinden rutin deneyler için büyük hız ve kolaylık sağlanmaktadır.

Bu deneyde çevrimsel gerilme oranı, DSS'te yatay düzlemde etkiyen kesme gerilmesinin ilk normal gerilmeye oranı

$$CSR = \frac{\tau_h}{\sigma_{n0}} \quad (4.2)$$

olarak verildiğinden sonuçlarda farklılık belirmesi söz konusudur. Nitekim, kumda yapılmış bazı deneylerde (Şekil 4.6) CTX sonuçlarının en azından kumda DSS'inkilerden belirgin şekilde yüksek çıktığını göstermektedir. $K_0=0.4$ dolayında hazırlanmış laboratuvar numunelerinde ölçülmüş DSS direncinin CTX direncinin %60'ı dolayında olacağı öne sürülmüştür (Jefferies&Been, 2006).



Şekil 4.6 Kumda yapılmış dinamik deneylerin karşılaştırması

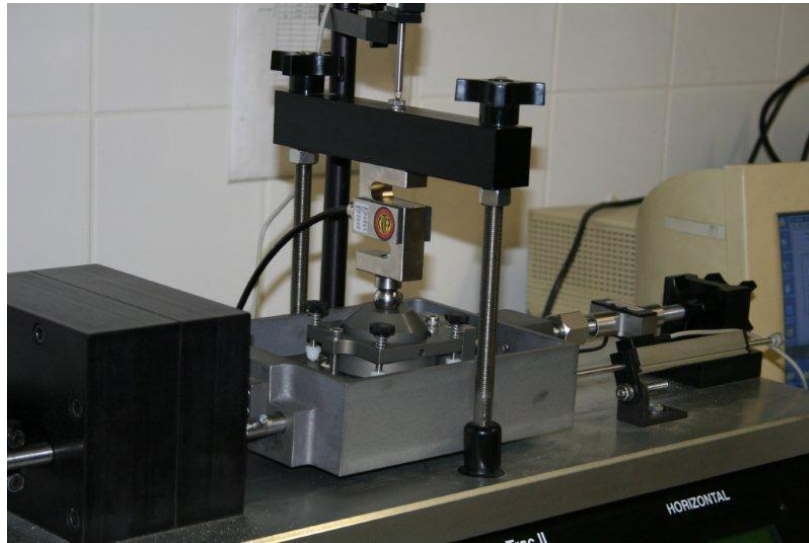
106M042 projesinde A.B.D. Geocomp firmasının geliştirilmiş olan ShearTrac II-DSS sistemi kullanılmıştır. Yeni imalat olan bu sistem numuneyi bir hücrede tutup çevre basıncı uygulayan önceki tiplerden farklı olarak 1940'larda İsveç Geoteknik Enstitüsü'nde Kjellman tarafından geliştirilmiş ve numuneyi çevresi teflon kaplı ince halkalarla tutan bir yan destek sistemi kullanmaktadır (Şekil 4.7). Statik biçimi ile ASTM 6528'de öngörölmüş bu alette öncekilere oranla en önemli fark, boşluk suyu basıncının CTX'teki gibi doğrudan ölçülmemesidir. Bunun yerine tam drenajlı olarak çalışan sistem, kesme sırasında numune

boyunu (hacmini) sabit tutarak drenajsız koşulu sağlamaktadır. Alet gelişen hacim artışı veya azalması eğilimini artan/azalan düşey yükü algılayarak bunu Δu_w biçiminde ölçümlere yansıtmaktadır. Düşey yükteki değişim efektif gerilme değişimine de eşit olacağından bu değişimin alette hiç drenaja izin verilmese idi oluşacak boşluk suyu basıncını yansıtacağı varsayılmaktadır. Böyle bir dolaylı ölçümün ne denli gerçekçi olacağı kuşkusuz karşılaştırmalarla saptanabilecektir.



Şekil 4.7 DSS numunesinin deney öncesi görünüşü

Şekil 4.8'de Geocomp DSS sisteminin genel görünümü verilmektedir. Bu alette konsolidasyon 32 adıma kadar aralıklarla gerçekleştirilebilmekte ve çevrimsel yükleme frekansı 1 Hz'e kadar ayarlanabilmektedir. Yatay ve düşey yükler 4.5 kN'a kadar yükseltilebilmektedir.



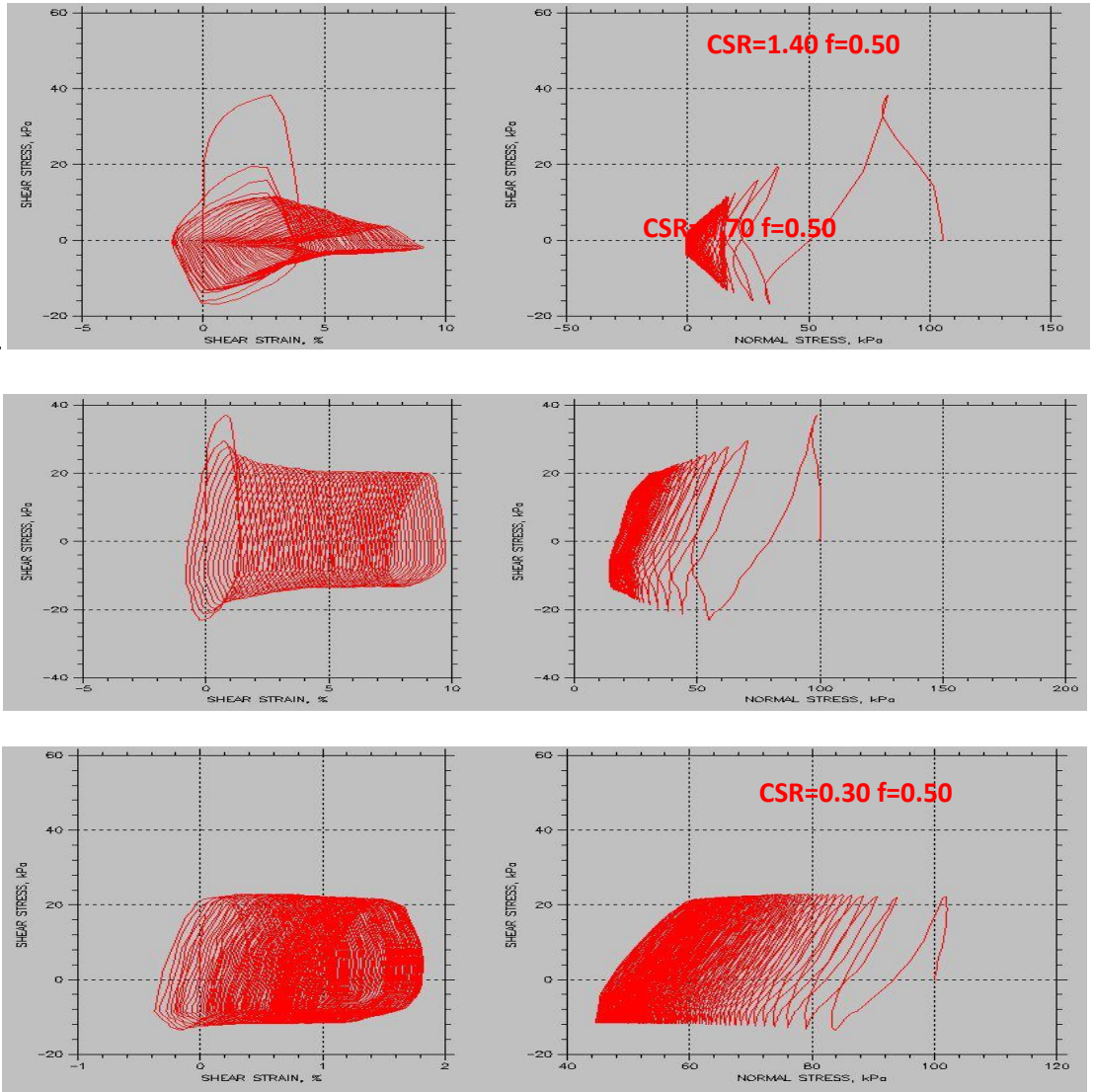
Şekil 4.8 Dinamik Basit Kesme deney aletinin (DSS) görünümü

4.2. Deney Sistemlerinin Kalibrasyonu

Deneyisel çalışmalarda araştırmacı satın aldığı ya da imal ettiği aygıt ve cihazın, beklenen işlevi kusursuz yerine getirdiği varsayımı ile yola çıkar. Bunun nedeni imalatçının sistemin belirli standartların koşulların sağladığı beyanıdır.

4.2.1. DDSS Cihazının Başlangıç Durumu

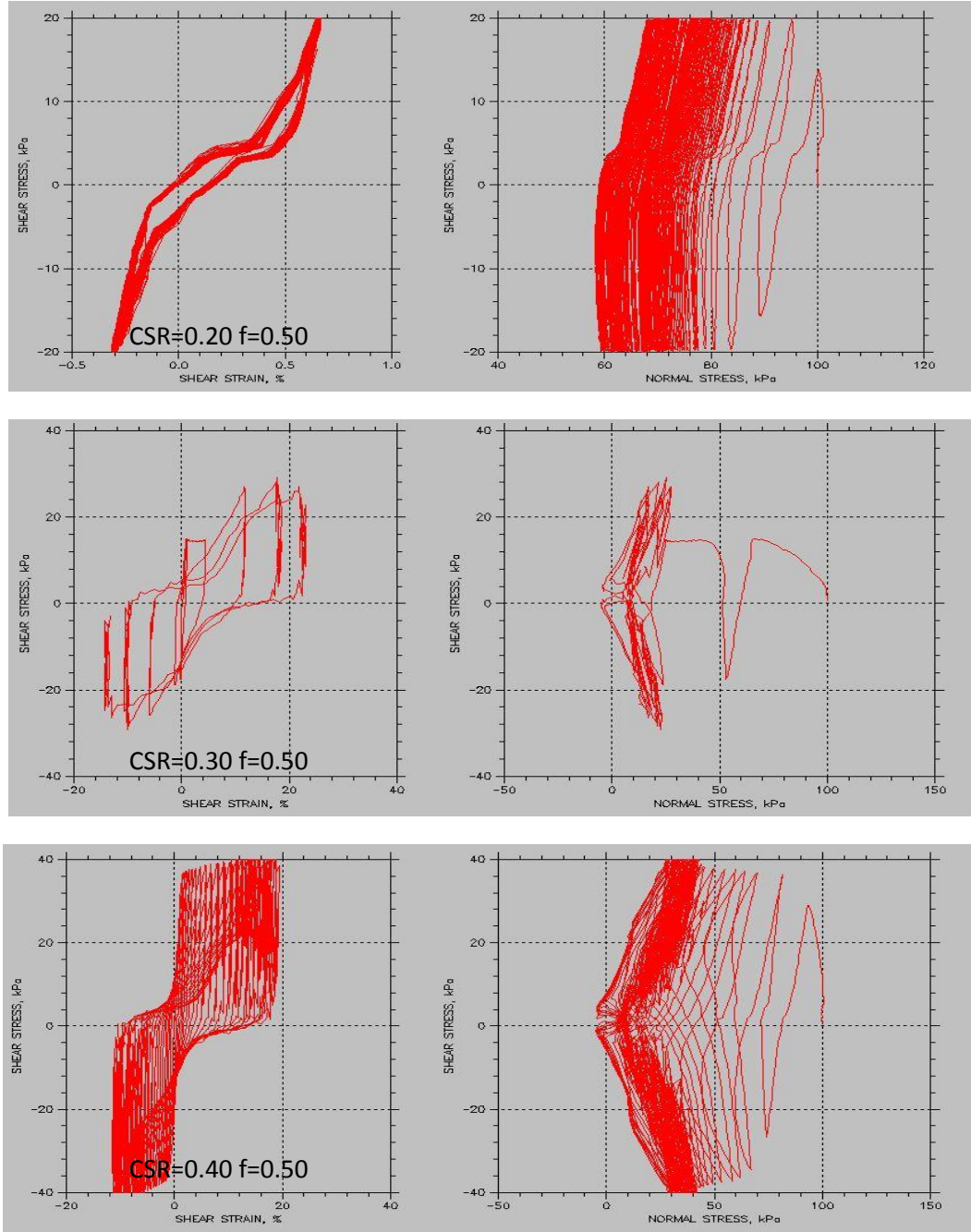
Proje kapsamında satın alınan ve projenin iki ana deney sisteminden biri olan DDSS cihazında, proje gelişme raporlarda da belirtildiği üzere fabrikasyon ve yazılım hatalarından kaynaklanan sorunlarla karşılaşmıştır. Projenin başlangıç tarihi 2007den Haziran 2009'a kadar alınan deney sonuçlarının tutarsız olduğu farkedilmiştir. Bu süreçte üretici firma (Geocomp) ile resmi yazışmalar yapılarak sorunların giderilmesi için sürekli olarak görüşülmüştür. Sonuçta ilgili firma hatanın kendilerinden kaynaklandığını kabullenmiş, yetkili bir mühendis göndererek sorunu çözmüşlerdir. Bu revizyondan önce standart Monterey No.0 Kumu ile DDSS'den alınmış olan sonuçlar Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Dikkat edilecek olursa, istenen CSR değeri için gerekli kayma gerilmesi sağlanamamaktadır. Ayrıca, elde edilen histerisis ilmeklerinin tamamen anlamsız olup literatürdeki benzer deney sonuçları ile uyumsuzluğu görülmektedir (Towhata, 2008)



Şekil 4.9 DDSS revizyon öncesi deney sonuçları

4.2.2. Revizyon Sonrası DDSS Sonuçları

Sorunun çözümü için gerekli mekanik ve yazılım düzeltmeleri yapıldıktan sonra DDSS'in çevrimsel gerilme oranına (CSR) karşı davranışı tekrar incelenmiştir. Şekil 4.10'da revizyon sonrası DDSS deney sonuçları gösterilmiştir. Cihazın gerekli düzeltmelerden sonra daha hassas ve beklenen biçimlerde sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu aşamadan sonra gerek DDSS'in gerekse DDSS ile CTX arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için kalibrasyon deneylerine başlanmıştır.



Şekil 4.10 Revizyon sonrası DDSS deney sonuçları

4.3. DDSS ve CTX'in Kalibrasyonu

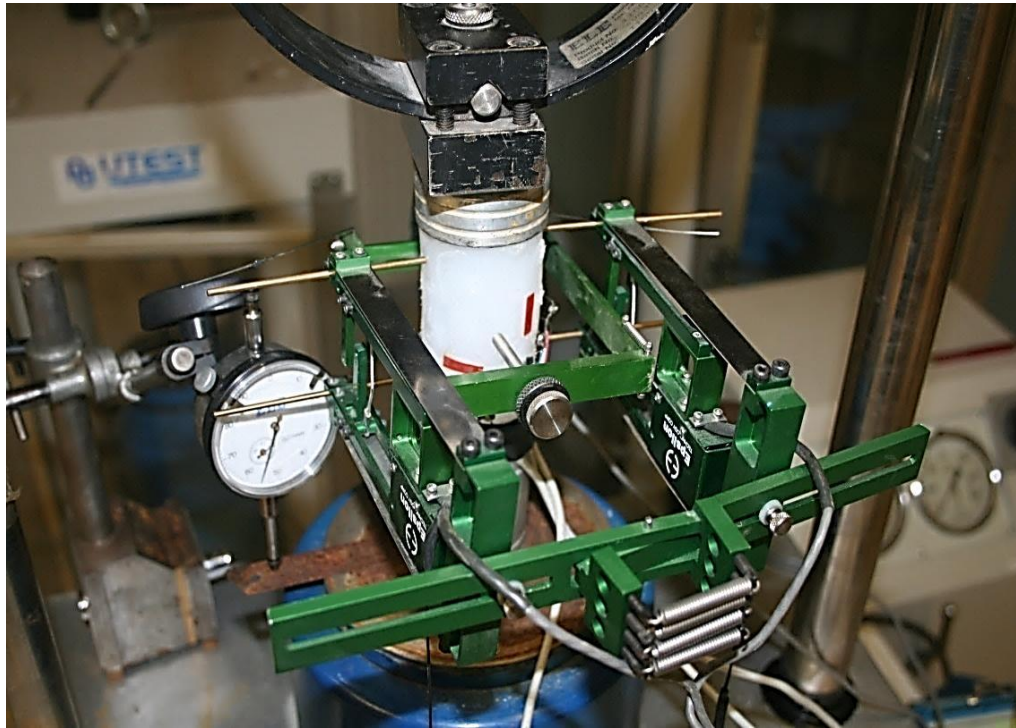
Öncelikle lineer elastik özelliğe sahip olan inşaat silikon macunundan (Henkel) her iki cihaz için numuneler hazırlanmıştır. Buna ek olarak dane dağılımı standart olan Monterey No.0 kumu üzerinde kalibrasyon deneyleri yapılmıştır. Kalibrasyon için kullanılan Monterey No.0 kumu Kaliforniya'dan temin edilmiştir. Monterey No.0 açık kahve rengi olup farklı araştırmacılar tarafından kullanılmıştır (Gallagher, 2000, Horita,1985, Silver,1976). Eldeki kum TS1900/2000 uyarınca sınıflandırılmış, hesaplanan D_{50} değeri ile ASTM'ye göre yapılan maksimum ve minimum boşluk oranı Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Monterey No.0 kumunun temel özellikleri (Ural 2008)

	Bu Projede	Polito No.0/30	Gallagher No.0/30	Horita No.0/30	William No.0	Silver No.0	Mulilis No.0	Chan No.0
SINIF	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_{max}	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

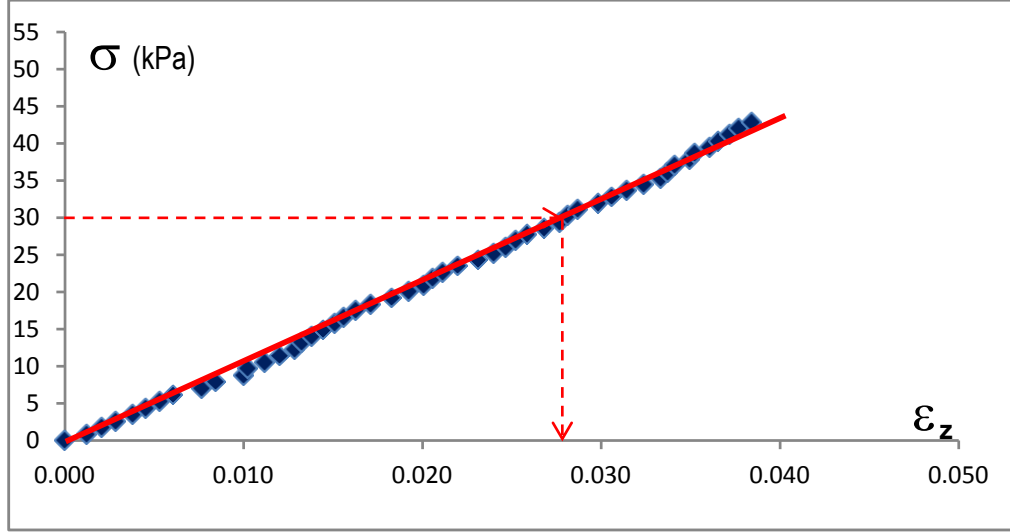
4.3.1. Silikon ile Kalibrasyon

Kumda kalibrasyon yapmadan önce lineer elastik özellikleri olan sertleştirilmiş silikon macunu ile ölçümler yapılmıştır.



Şekil 4.11 Silikonun yatay ve düşey deformasyonlarının belirlenmesi

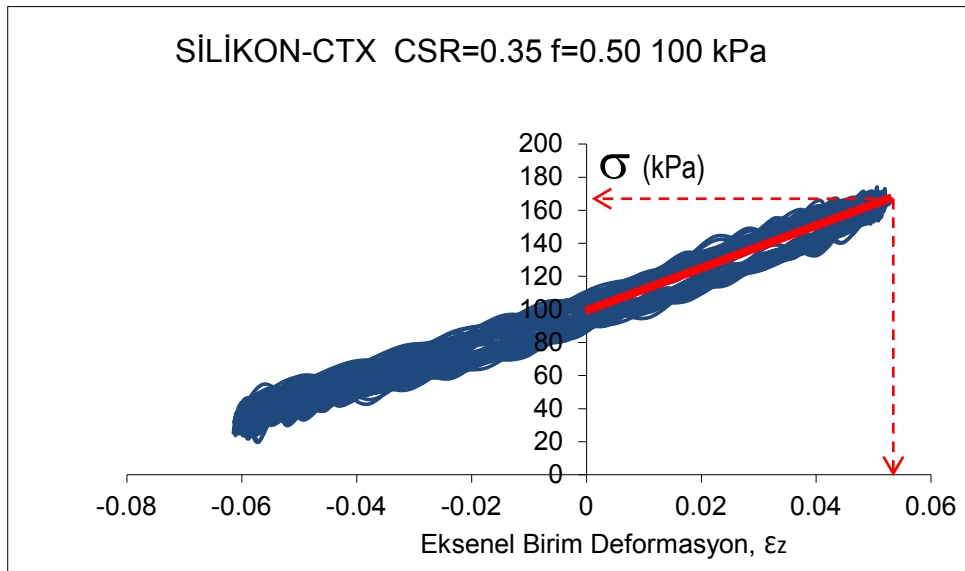
D=44.8 mm H=105.8 mm ölçülerde olan silikondan hazırlanmış silindir numunede yatay ve düşey deformasyonları belirlemek amacıyla hem gerilme pulu (*straingauge*) hem de ekstansometre yerleştirilmiştir (Şekil 4.11). Ayrıca boy kısalmasının doğrudan ölçümü için deformasyon saati yerleştirilmiştir (Duran, 2010). Buradan silikonun teğet elastisite modülü,



Şekil 4.12 Tek eksenli yüklemde silikon için σ - ϵ_z grafiği

$$E = \frac{14}{0.014} = 1071 \text{ kPa} \cong 1.1 \text{ MPa}$$

olarak ölçülmüştür. Daha sonra CTX de denenmiş olan aynı silikon numunesi sonucundan elastisite modülü hesaplanmıştır (Şekil 4.13). Bu da benzer biçimde,



Şekil 4.13 CTX sonuçlarına göre silikonun elastisite modülü hesabı

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

Gerilme pulu sonuçlarına göre Poisson oranı $\nu=0.5$ olarak bulunmuş, bu da kauçuğun literatürde verilen ν değeri ile örtüşmüştür.

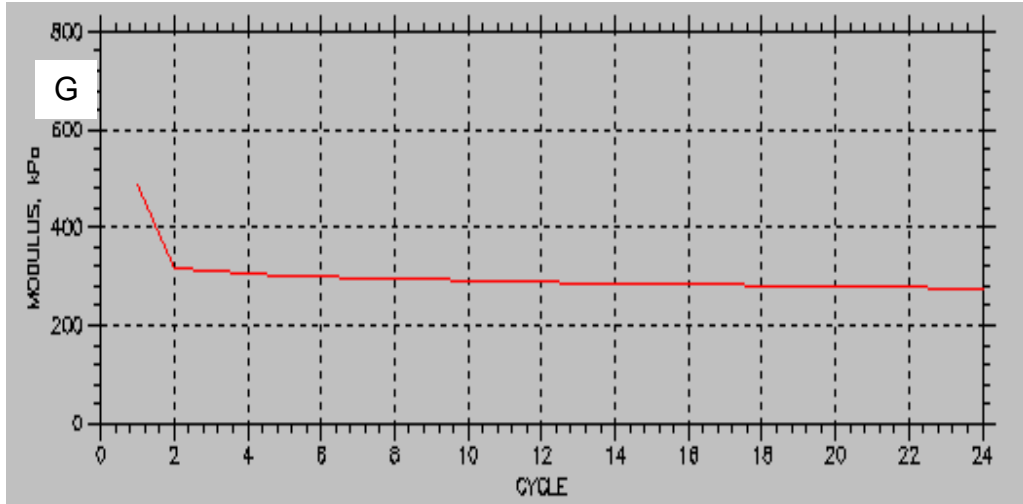
Bu sonuçlar doğrultusunda silikon için kayma modülü değerleri hesaplanmıştır.

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

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

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

Silikon için DSS' den doğrudan alınmış olan kayma modülü değişimi ise Şekil 4.14'teki gibi ölçülmüş olup diğer ölçümlerle uyum içindedir. Sonuçta, kayma deformasyonu ile aksenal birim deformasyon arasında lineer elastik bir malzeme için; $\nu/\varepsilon_z \approx 2$ gibi bir orandan bahsedilebileceği, CTX ve deformasyon sensörlerinden elde edilen bilgilere göre hesaplanmış olan kayma modülü değerleri ile DSS den elde edilmiş sonuçların birbirine yakın çıktığı görülmüştür.

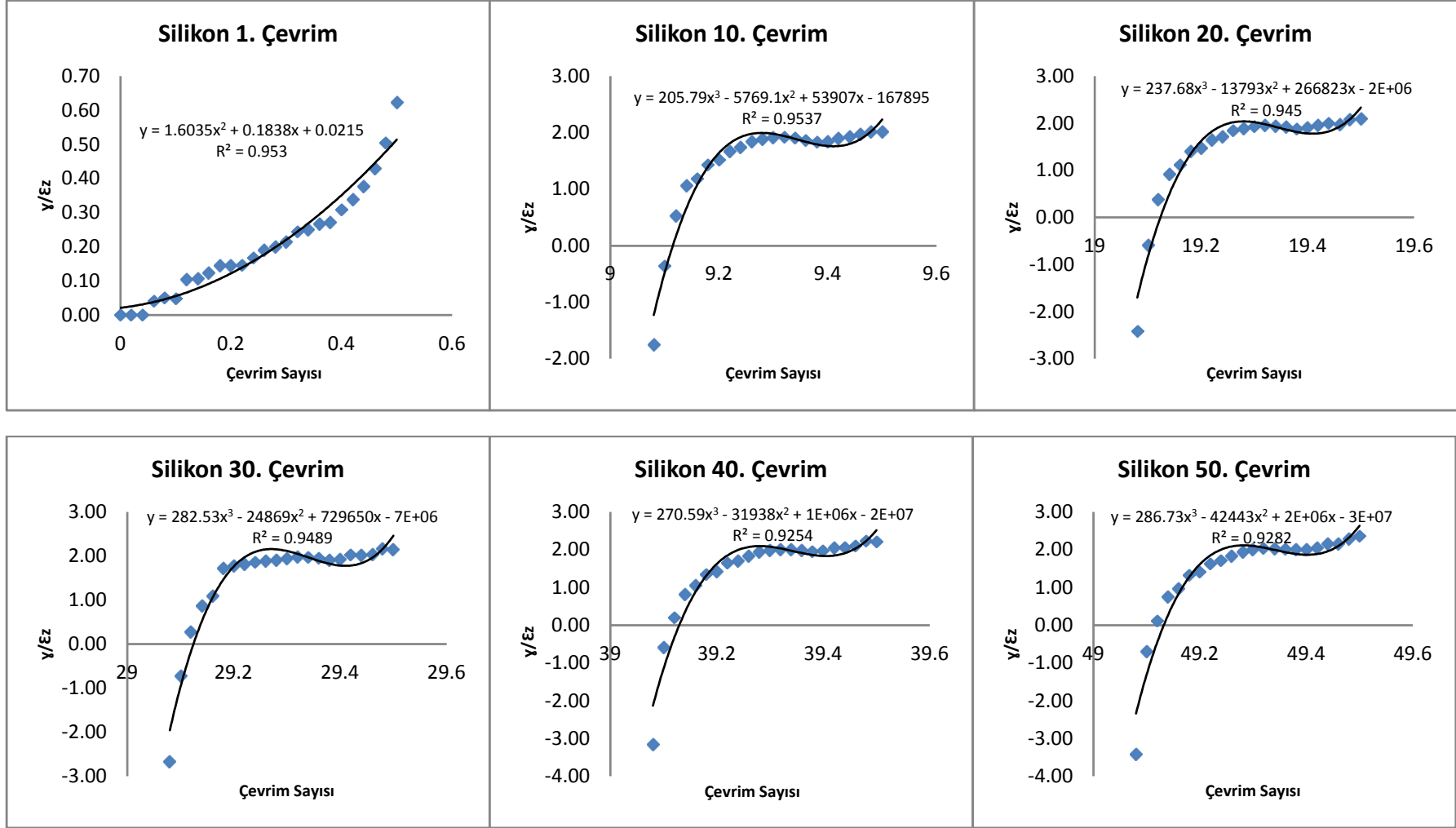


Şekil 4.14 DSS'te silikonun kayma modülünde değişimi

Şekil 4.15'de silikonun CTX ve DSS deneylerinde vermiş olduğu ε_z ve γ değerlerinin deneylerin farklı adımlarında karşılaştırmaları yapılmaktadır.

4.3.2. Monterey No.0 Kumu ile Kalibrasyon

DSS'in Monterey kumu ile kalibrasyonunda, literatürde daha önce birçok araştırmacının (Polito, 1999, Sancio, 2003, Silver ve diğ. 1976, Ural, 2005) Monterey No.0 kumu üzerinde CTX deneyinden elde ettiği $CSR-N_{ru=1}$ bulguları ile DSS sonuçlarının karşılaştırması yapılmıştır (Çizelge 4.2).



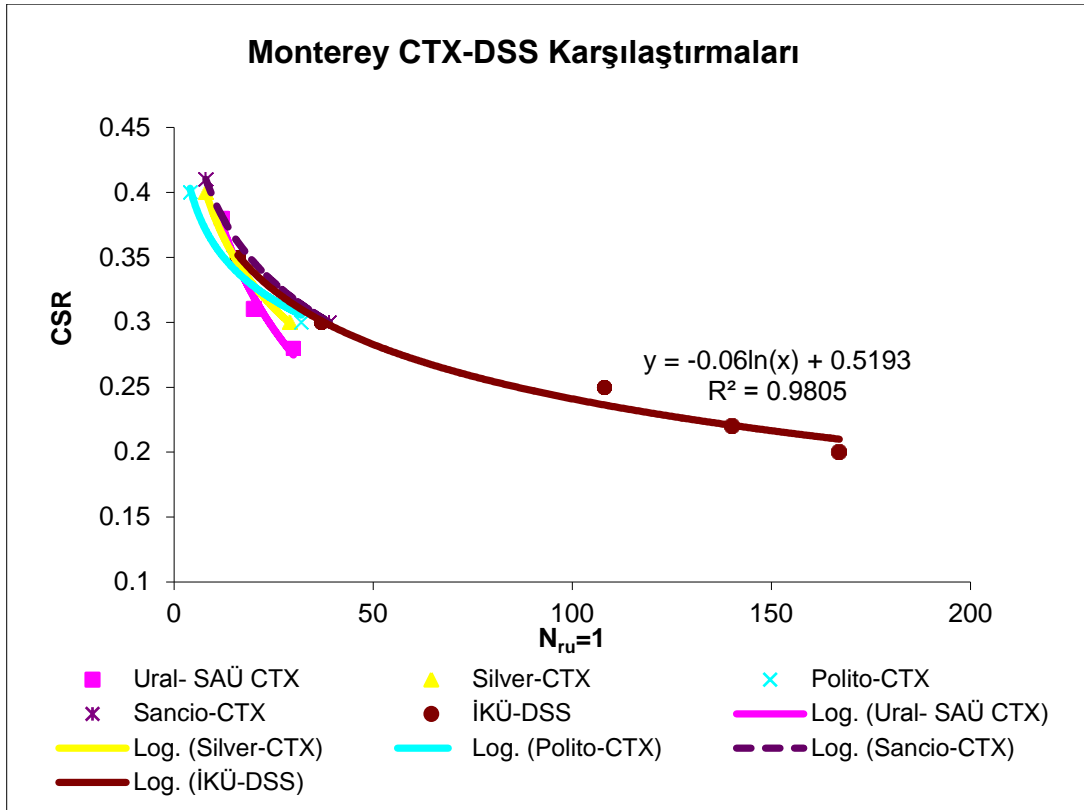
Şekil 4.15 CTX ve DSS için silikon deformasyon oranı grafikleri

Çizelge 4.2 Karşılaştırmalı Monterey No.0 Kumu dinamik deney sonuçları

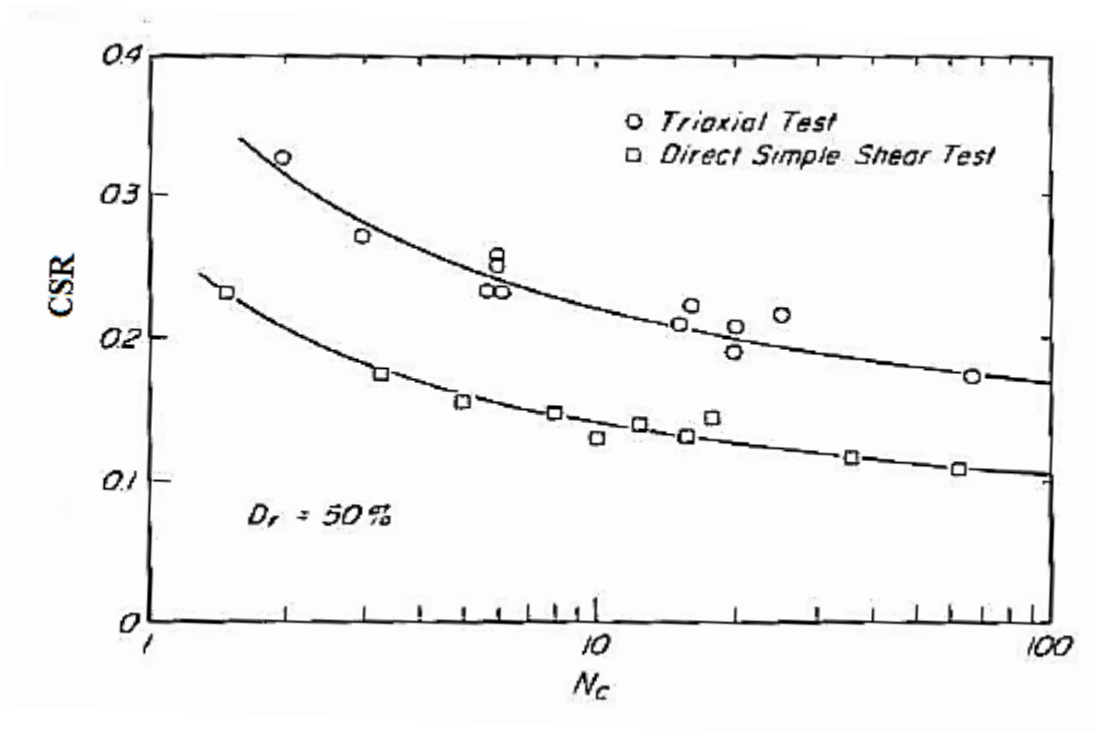
Dr=%60		
ARAŞTIRMACI	CSR (f=1 Hz)	N _{ru=1}
Silver (CTX)	0.30	29
	0.35	15
	0.40	8
Polito (CTX)	0.30	32
	0.35	15
	0.40	4
Sancio (CTX)	0.30	39
	0.41	8
Ural (SAÜ CTX)	0.28	30
	0.31	20
	0.38	12
DSS (İKÜ)	0.20	167
	0.22	140
	0.25	108
	0.30	37
	0.35	16

Elde edilen sonuçlar 4.16'da özetlenmiştir. Görüldüğü gibi, CTX sonuçları ile çizilen eğrilerle DSS eğrisi çakışmaktadır. Ancak bu durum literatürdeki benzer çalışmalarla çelişmektedir. Bu çelişkinin sebebinin önceki bölümlerde belirtildiği gibi, DSS'in boşluk suyu basıncını deformasyona bağlı olarak kabarma veya sıkışmaya göre dolaylı olarak ölçmesi olduğu düşünülmektedir. Her iki deney sonucu Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

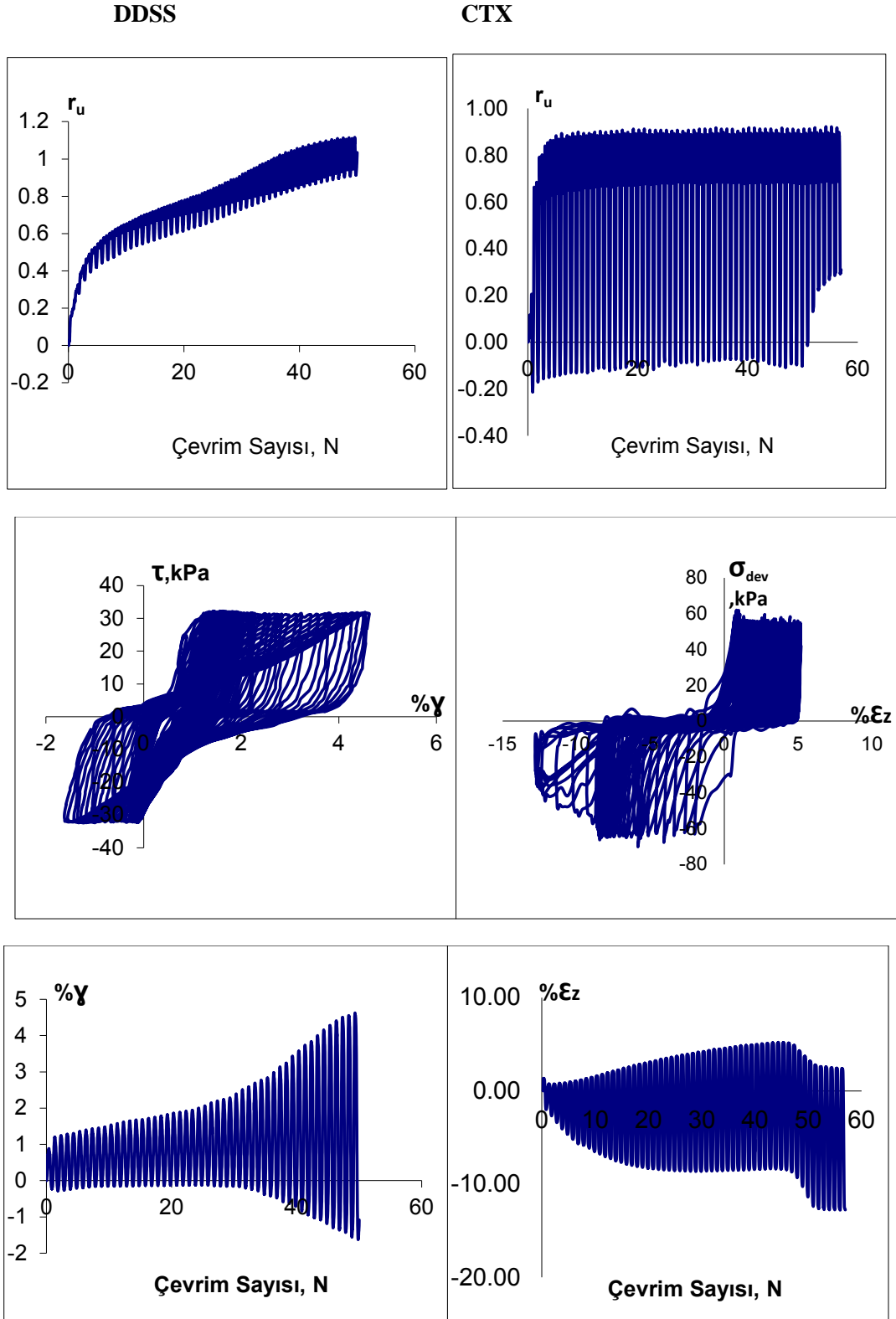
Nitekim, kumda yapılmış bazı deneylerde (Şekil 4.19) CTX sonuçlarının en azından kumda DSS'inkilerden belirgin şekilde yüksek çıktığını göstermektedir. $K_0=0.4$ dolayında hazırlanmış laboratuvar numunelerinde ölçülmüş DSS direncinin CTX direncinin %60'ı dolayında olacağını söylemek mümkündür (Jefferies&Been, 2006).



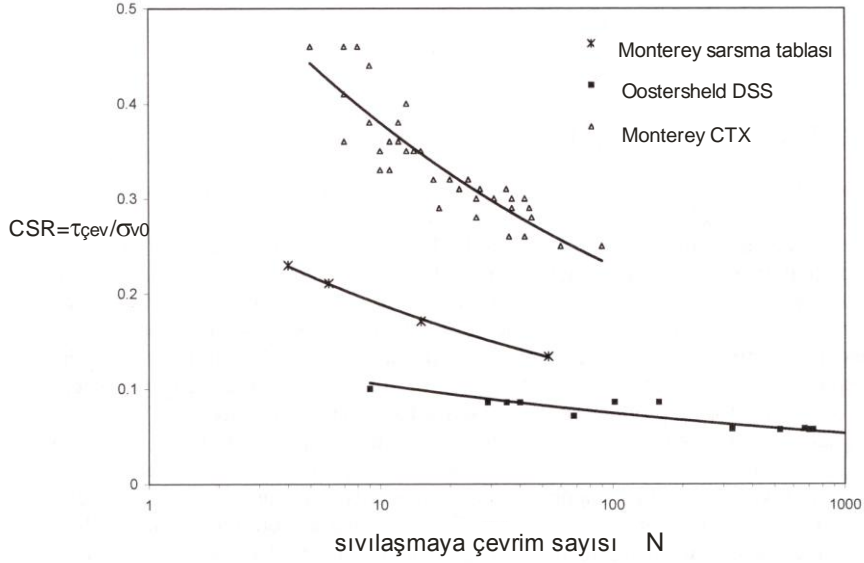
Şekil 4.16 Monterey No.0 Kumu CTX-DSS karşılaştırmaları



Şekil 4.17 CSR- $N_{ru=1}$ CTX ve DSS karşılaştırması (De Alba ve diğerleri, 1975)



Şekil 4.18 CTX ve DSS'in Monterey No.0 Kumu karşılaştırmalı kalibrasyonu



Şekil 4.19 Kumda Deney Türünün Sıvılaşmaya Etkisi

5. YAPAY NUMUNELERDE DENEYLER

5.1. Birincil Sıvılaşma Değerlendirilmesi

Yapay numunelerin öncelikle deneye alınmasının nedeni, yaşı sifıra yakın, dane dağılımı ve plastisitesi önceden ayarlanmış karışımların ikinci aşamada denenecek olan doğal numunelerin davranışını açıklama bakımından yararlı olabileceği görüşünün öne çıkmasıdır.

Bu amaca yönelik olarak, yıkanmış Adapazarı siltine değişen oranlarda bentonit ve kaolinit katılarak sistemlerin boşluk yapısı ve kıvamının NP'den yüksek plastisiteliye yönltilmesi öngörülmüştür.

Bu kapsamda gerçekleştirilmiş deneylerin tüm sonuçları verileri EK-2'de toplanmıştır.

Adapazarı Kriteri (Bol, Önalp, Arel, Sert, Özocak, 2010) ince daneli zeminin kil içeriği (C), likit limiti (w_L), doğal su muhtevası (w_r/w_L veya I_L) ve dane boyutunu (D_{50}) değerlendirerek sismik koşullarda yenilme değerlendirilmesi yaptığından, bu değişkenlerin öncelikle lineer regresyonları incelenmiştir.

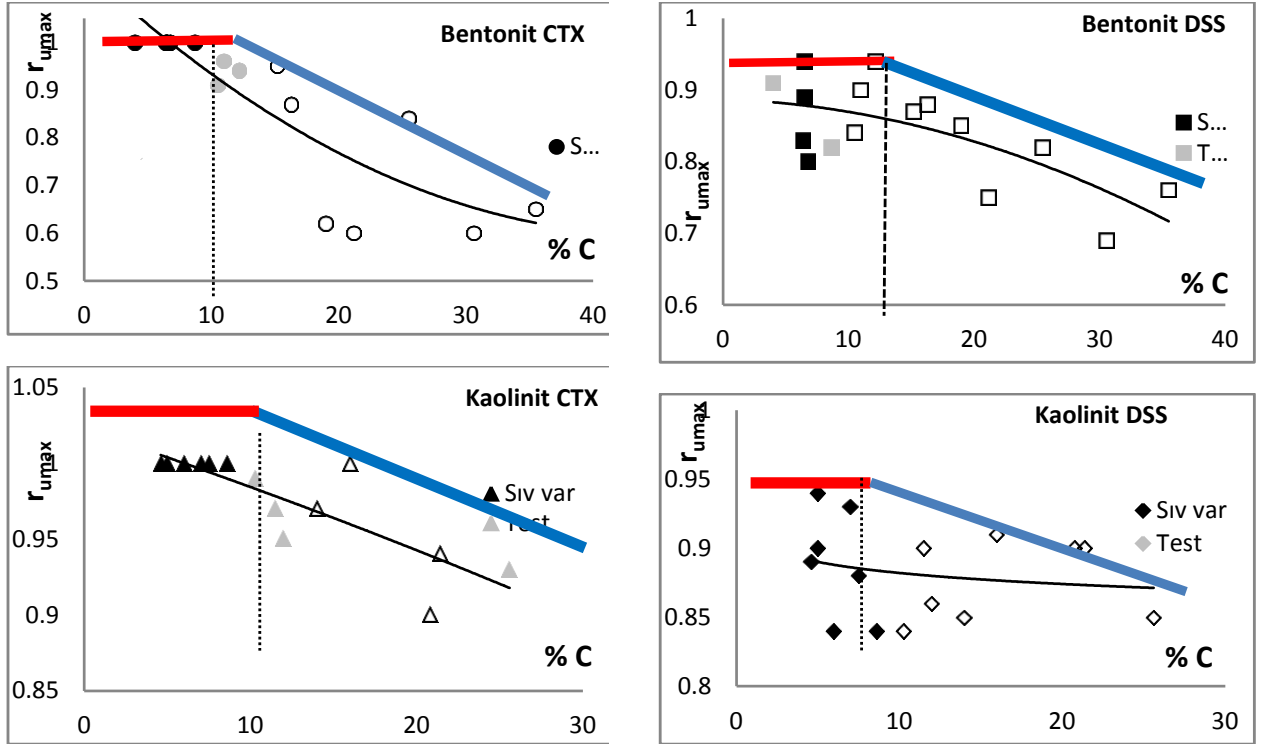
En basit yaklaşım boşluk suyu basıncının efektif gerilmeleri sifıra düşürdüğü tanımı ile "birincil sıvılaşma"dır. Birincil sıvılaşmayı boşluk suyu basıncının çevrim sayısı gözetmeksizin yükseldiği en yüksek düzey, ya da $N=15$ gibi daha gerçekçi görülebilecek bir evrede eriştiği değer olarak alarak irdelemek mümkündür.

Şekil 5.1'de kil içeriği deneyde kaydedilmiş en yüksek boşluk suyu basıncı ilişkileri ($\%C-r_{umax}$) noktalanmıştır. Numunelerin yenilmesi kil mineralinden bağımsız olarak, $\sim\%10$ kil içeriğinde belirlemektedir. Burada renkli doğrular bir zarf olarak çizilmiş ve sıvılaşmanın oluştuğu/oluşmadığı sınırlar tayin edilmeye çalışılmıştır. Siyah çizgiler ise regresyon sonucu beliren eğrilerdir. Bu eğri(ya da doğrular)ın mertebesi ve biçimleri çok anlamlı

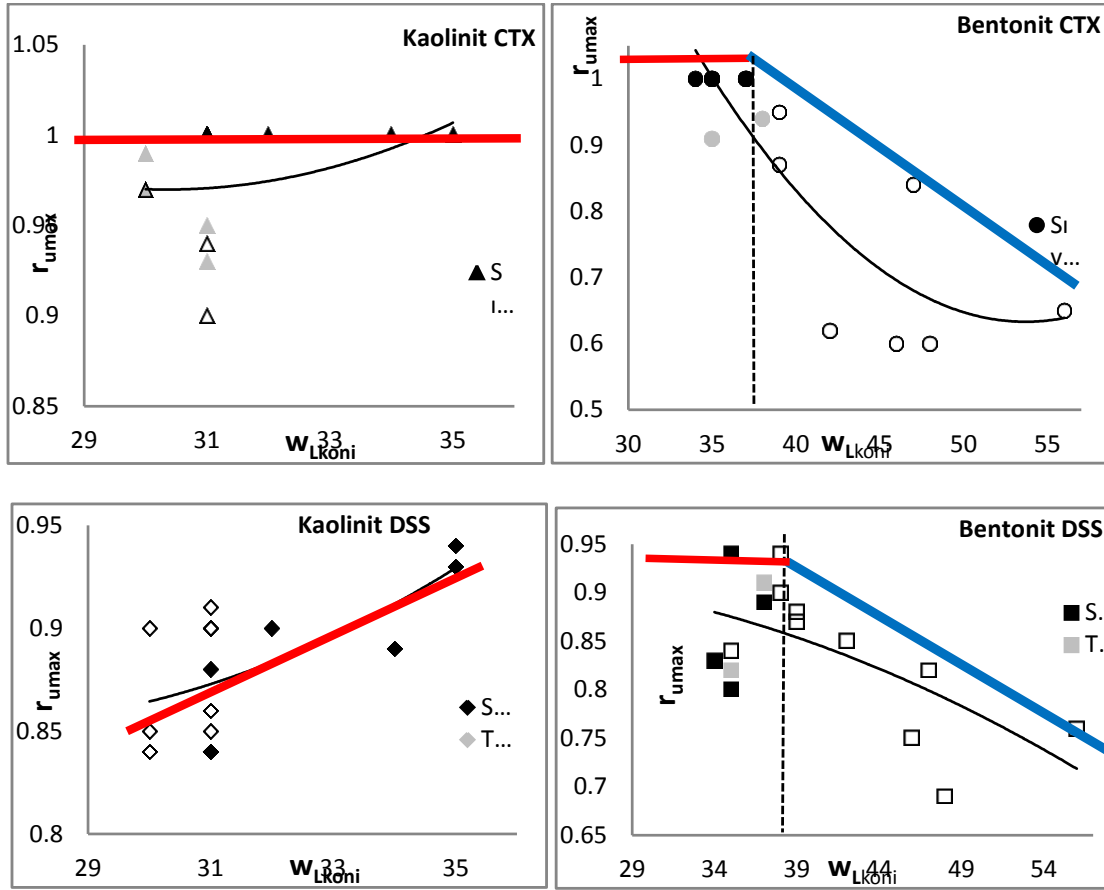
görünmemektedir. İçi dolu noktalar Adapazarı Kriterine göre sıvılaştan, içi boş olanlar ise sıvılaştıran karışımları göstermektedir.

Bu şekillerden çıkan belirgin sonuç karışımlarda birincil sıvılaştırmaya ulaşıldığı kabul edilse, CTX'te $r_u=1.0$ elde edilirken DSS'te bu aşamaya $r_u=0.95$ te ulaşılabileceği gerçeğidir. Diğer ilgi çeken sonuç ise $\%C-r_u$ doğrularının eğiminin yaklaşık olarak 0.005 dolayında çıkmasıdır. Bu doğrular her ne kadar göz kararı ile çizilmiş olsalar da mertebelerdeki benzerlik dikkat çekici bulunmuştur. Bir diğer bulgu, kaolinitte noktaların saçılımının bentonite oranla daha fazla olmasıdır.

Yine Adapazarı kriterlerinden biri olan, likit limitin birincil sıvılaştırmaya etkisi incelendiğinde (Şekil 5.2) daha ilginç bir durumla karşılaşılmaktadır. CTX'te sıvılaştırma ($r_u=1$) 37 gibi bir koni düşürme w_L değerinde belirirken ki bunun çarpmalı alette karşılığı $w_L=34$ tür, DSS'te aynı duruma $w_L=38$ 'de erişilmektedir. Diğer bulgu ise yine mavi sınırların eğimindeki benzerliktir.



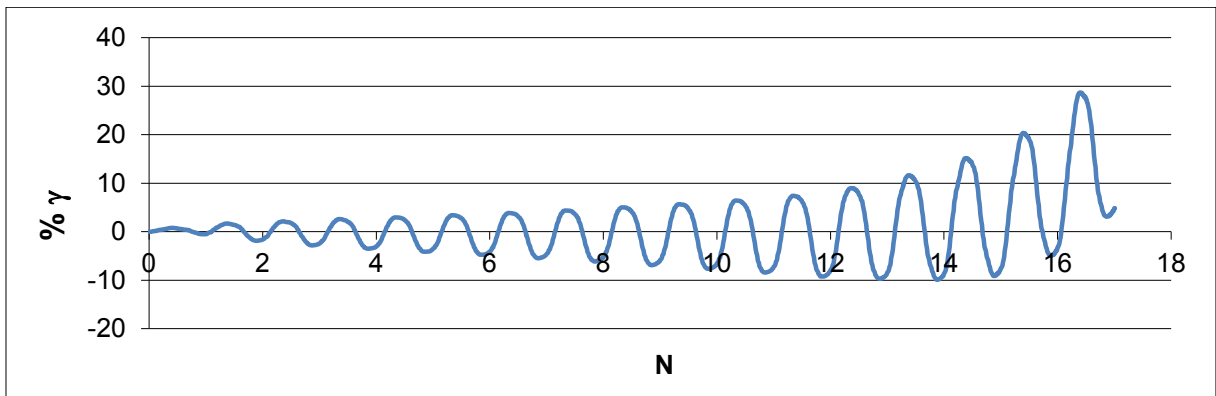
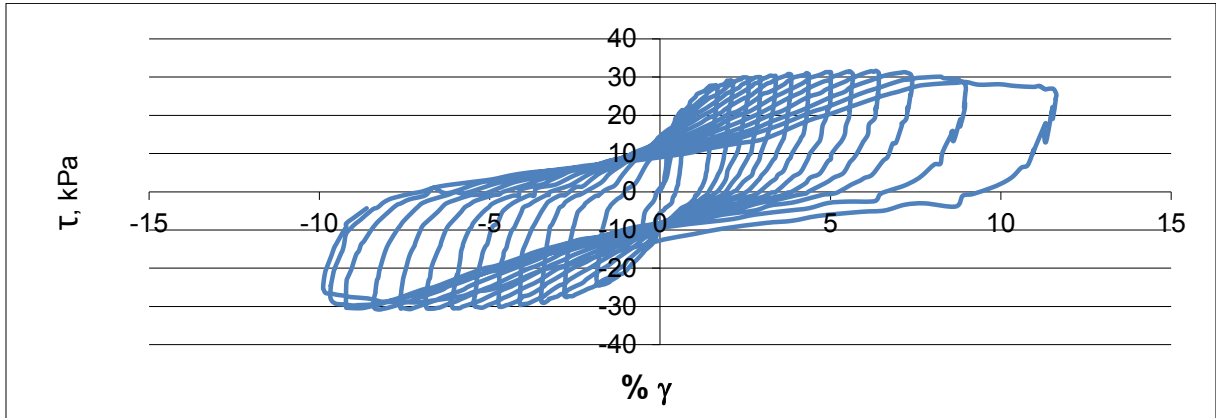
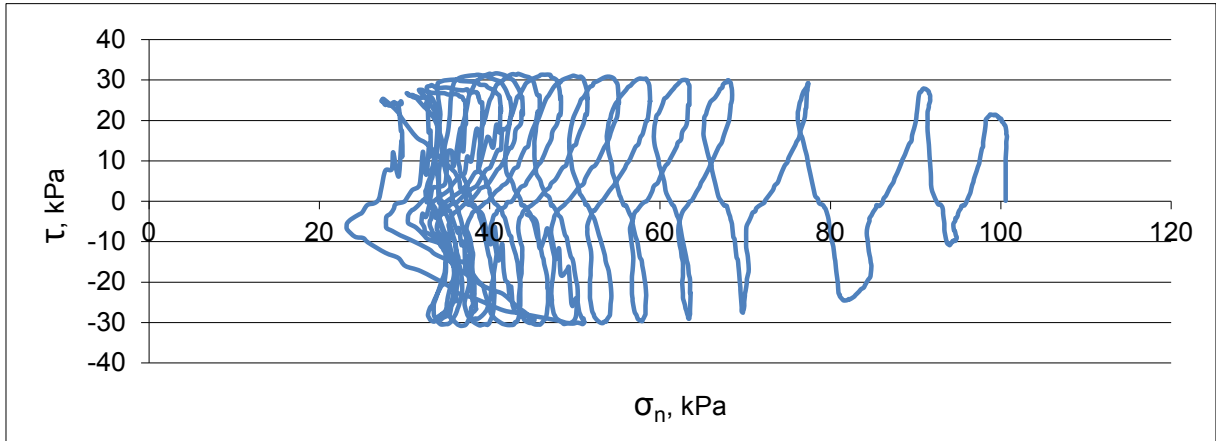
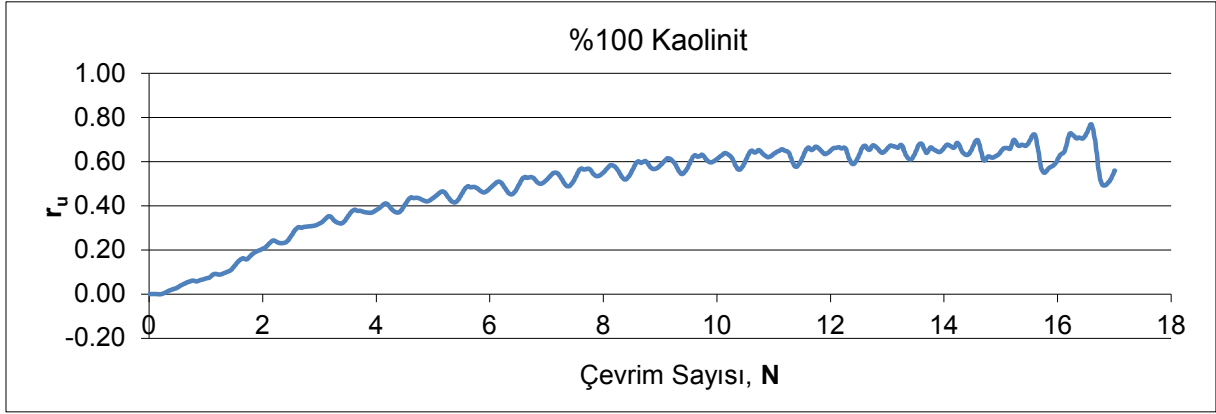
Şekil 5.1 Kil içeriğinin birincil sıvılaştırmaya etkisi



Şekil 5.2 Likit limitin fazla boşluk suyu basıncı ile ilişkisi

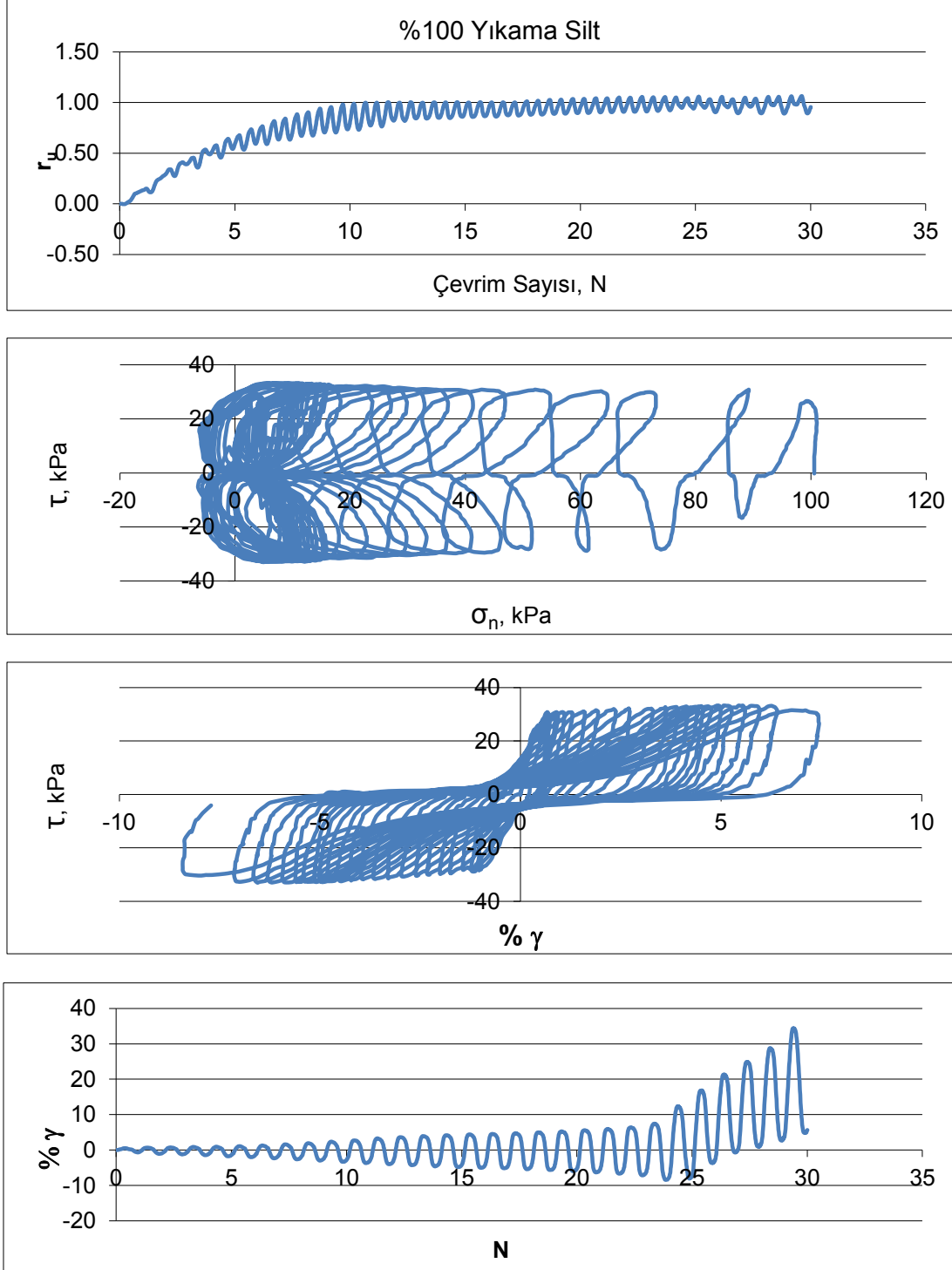
Aynı inceleme kaolin karışımlarında yapıldığında, karışımların likit limiti 35'i geçmediğinden yenilmeyi gösteren aşamaya (CTX'te $r_u=1.00$ ve DSS'te $r_u \approx 0.90-0.95$) kolayca gelinmekte ve tüm kaolin karışımlarının sıvılaştığı bulgusuna ulaşılmaktadır.

Bu durumu açıklığa kavuşturmak üzere $w_L=58$ olan saf kaolin numunesi(MH) DSS'te denendiğinde r_u 'nun 0.6'yı geçmediği görülmüştür(Şekil 5.3). Öte yandan, çift genlikli birim şekil değiştirme γ 'nın $N=10$ çevrimde yenilmeyi gösteren $\pm\%5$ 'e ulaştığı ilerideki paragraflarda ele alınmak üzere, dikkat çekmektedir.



Şekil 5.3 Saf kaolin'in DSS'te davranışı

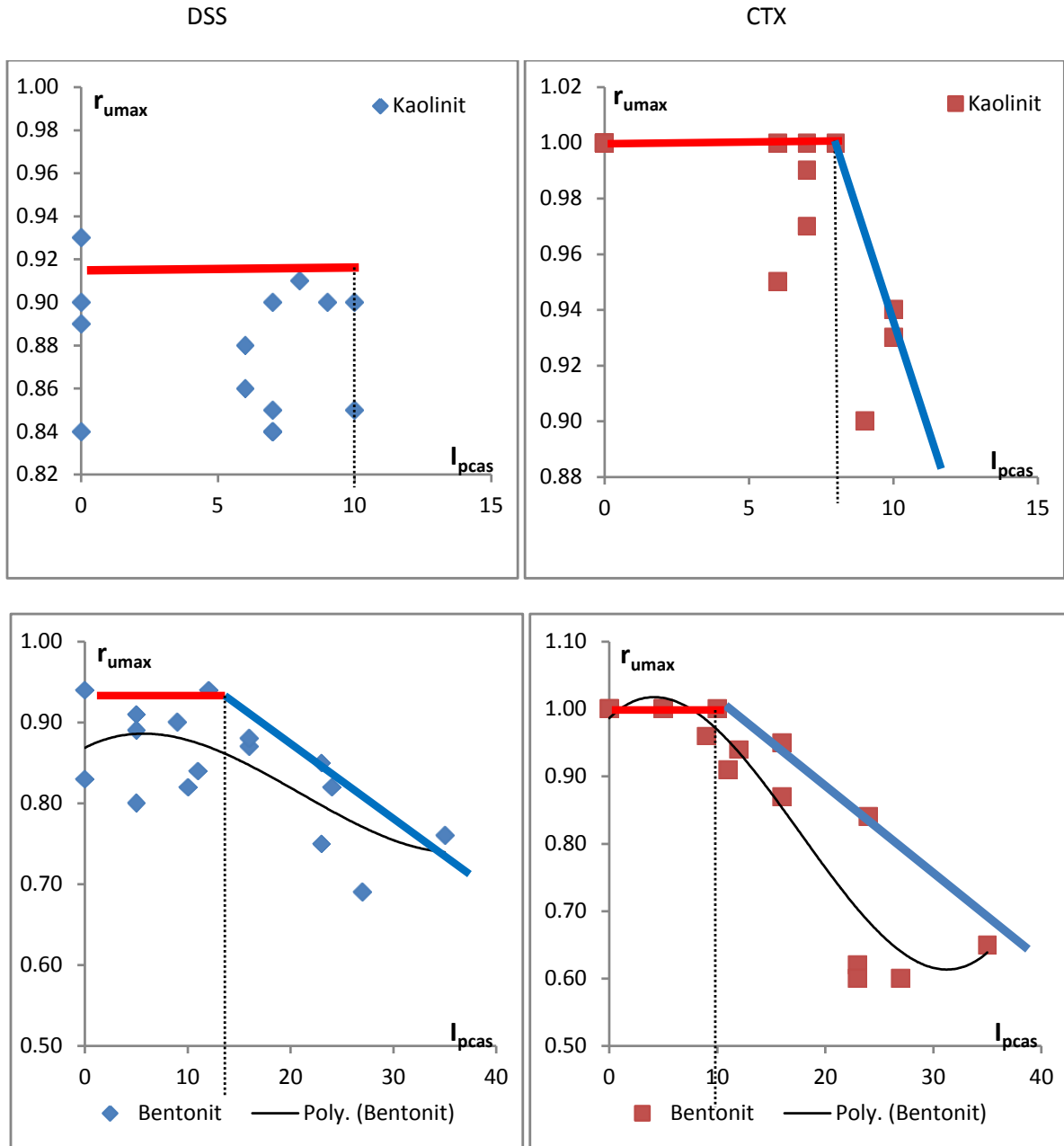
Benzer bir değerlendirme bu kez karışımlarda kullanılan yıkanmış silt için yapıldığında (Şekil 5.4) N=10 çevrimde $r_u=1.00$ 'e kolayca ulaşıldığı, yani birincil sıvılaşmanın gerçekleştiği, ancak bu aşamada da DSA'nın $\gamma=\pm\%4$ gibi kısıtlı bir düzeyde kaldığı yani %5'i aşmadığı, görülmektedir. Bu grafikler ve bulgular Şekil 5.3'ün bulguları ile karşılaştırıldığında, MH simgesi taşıyan saf kaolin'in birincil sıvılaşma belirtisi göstermediği, onunla karışıma giren siltin ise $r_u=1.0$ 'e kolayca ulaştığı, kaydedilmektedir.



Şekil 5.4 Yıkanmış Adapazarı siltinin DSS'te davranışı

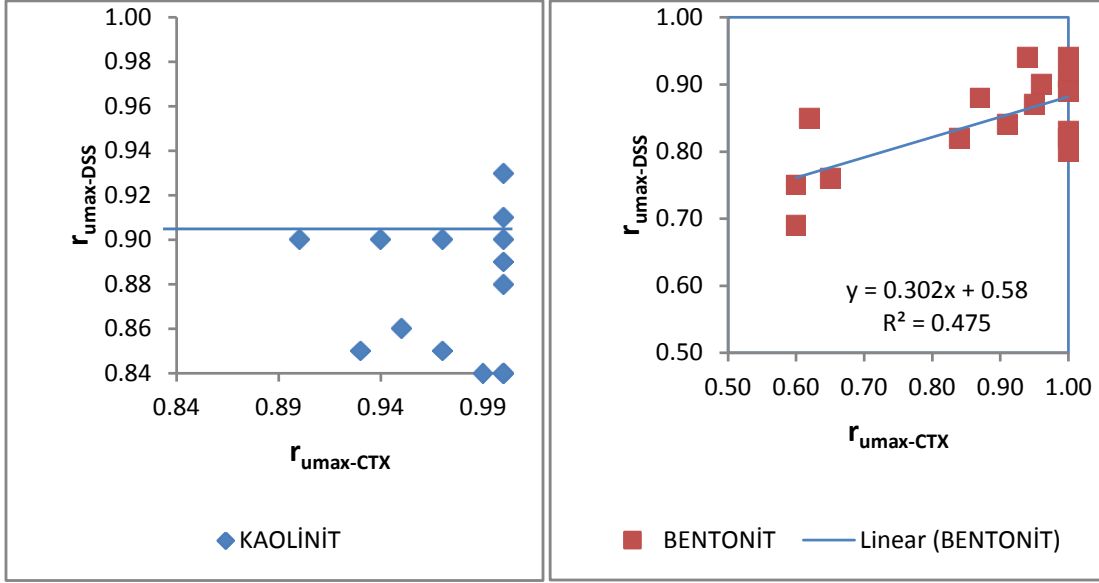
Benzer bir değerlendirme plastisite indisi için de yapılmıştır. Şekil 5.5'ten görüldüğü gibi, plastisite indisi 10-12'den küçük karışımlarda birincil sıvılaştırma söz konusudur. Bunu bir bağıntı ile temsil etmek çok düşük R^2 değerleri ile mümkün olduğundan, şekillerde kırmızı ve mavi ile gösterilmiş zarflarla ayırmanın daha gerçekçi olacağı görülmektedir.

Bir diğer deyişle, deneylerde ölçülen boşluk suyu basınçları karışımın özelliği kadar uygulanan deneyin kendine özgü koşullarına bağlı olduğundan, bunları bir denklemle bağıntılandırmak çok da anlamlı sonuçlara götürmemektedir. Daha da basitçe söylemek gerekirse, DSS'te ölçülen u_w değerleri dolaylı hesaplandığı, CTX'tekiler ise başlangıç su muhtevaları numune boyunca değişken olduğundan sonuçların duyarlılığı istenen düzeyde olmamaktadır. Ancak sıvılaştırmanın $I_p \leq 8-12$ aralığından düşük bölgede belireceği kesin gibi görünmektedir.



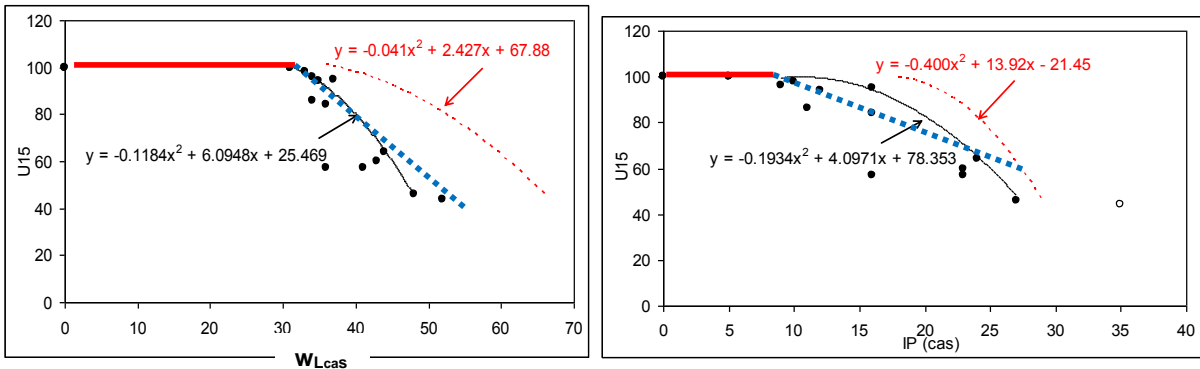
Şekil 5.5 Plastisite İndisinin fazla boşluk suyu basıncına etkisi

Varılan bir diğer görüş, yukarıda da saptandığı gibi ince daneli zeminde birincil sıvılaşmanın mümkün olduğu öne sürülürse, bunun CTX'te $r_u=1.00$, DSS'te ise $r_u=0.9-0.95$ 'te gerçekleşeceği yolunda olmuştur. Şekil 5.6 Bentonit ve kaolinit için karşılaştırma yapmaktadır. Bentonitte zayıf bir bağıntı görünse de kaolin karışımlarında ilginç bulgular vardır. Ancak ASTM D-6528 tipi deneyde DSS'de ölçülen r_{umax} değerlerinin CTX'te ölçülenlerden kararlı olarak düşük çıkacağı kesindir.



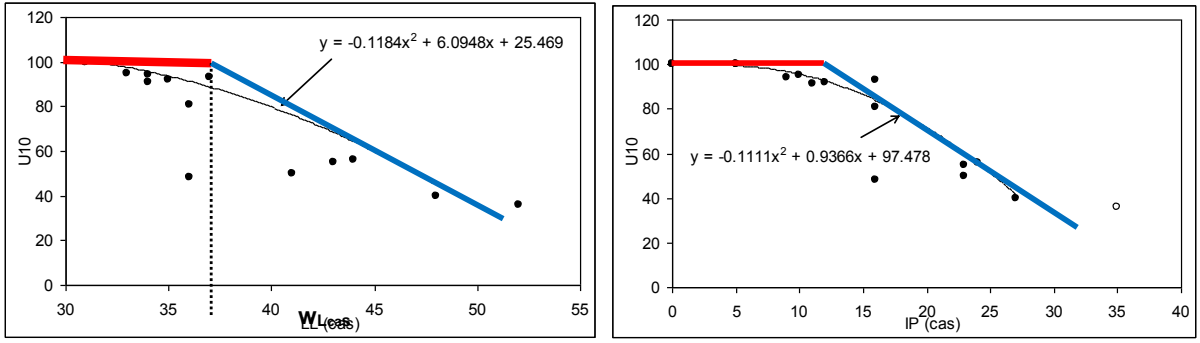
Şekil 5.6 Boşluk suyu basıncı artışının iki farklı deneyde maksimum düzeyleri

Birincil sıvılaşmaya diğer yaklaşım $N=15$ çevrim gibi makul bir düzeyde erişilen boşluk suyu basıncı oranıdır. Şekil 5.7'de bu ilişkiler bentonit karışımları için gösterilmektedir. Aradaki fark, sıvılaşmanın oluşmadığı mavi bölgenin bir doğru ile sınırlandırılmaması olduğu biçiminde belirmiştir. Sıvılaşmanın $w_L < 36$ veya $I_p < 18$ 'de belireceği gibi, yukarıdaki bulgudan ($w_L=33, I_p=8$) daha yüksek değerler bulunmaktadır.



Şekil 5.7 CTX'te $N=15$ çevrimde ulaşılan boşluk suyu basıncının Likit Limit ve Plastisite İndisi ile değişimi

Yenilme kriteri olarak $N=15$ yerine $N=10$ alındığında, durumda fazla değişiklik olmamakta (Şekil 5.8) sadece sınır eğrileri bir miktar ötelenmektedir.

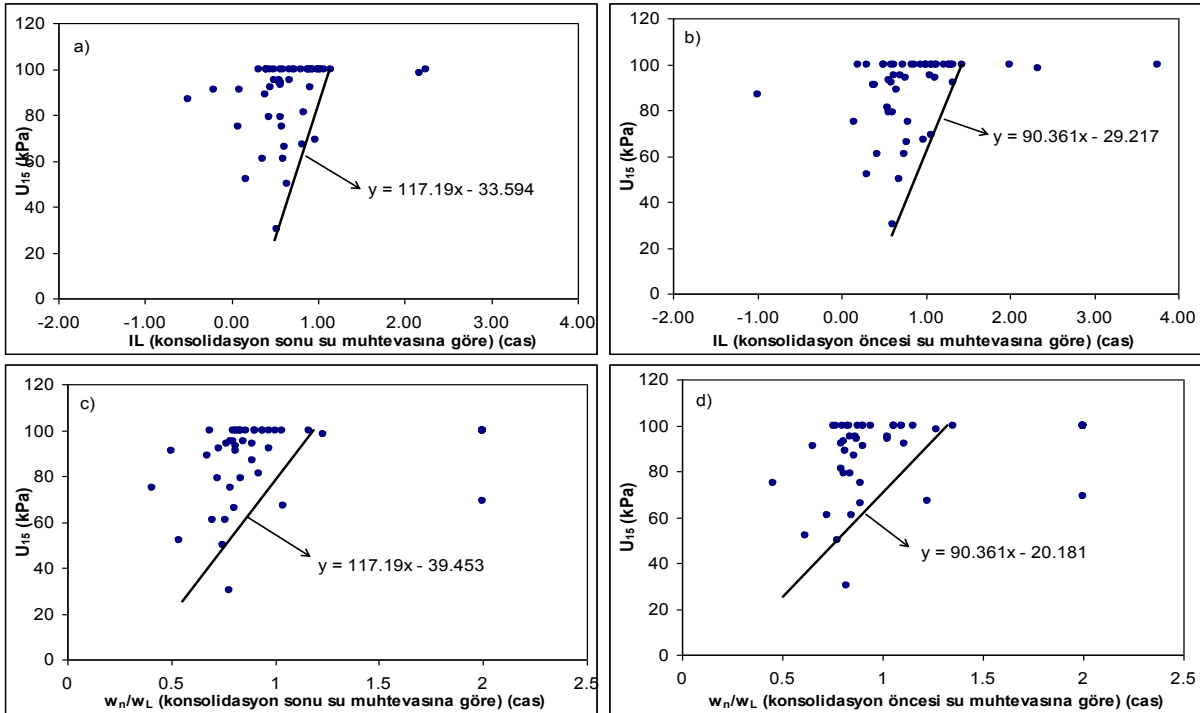


Şekil 5.8 CTX'te N=10 çevrimde ulaşılan boşluk suyu basıncının Likit Limit ve Plastisite İndisi ile değişimi

Zeminlerin arazideki statüsünü belirlemede en etkin araçlardan biri olduğuna inanılan ve,

$$I_L = \frac{w_n - w_L}{I_P} \quad (5.1)$$

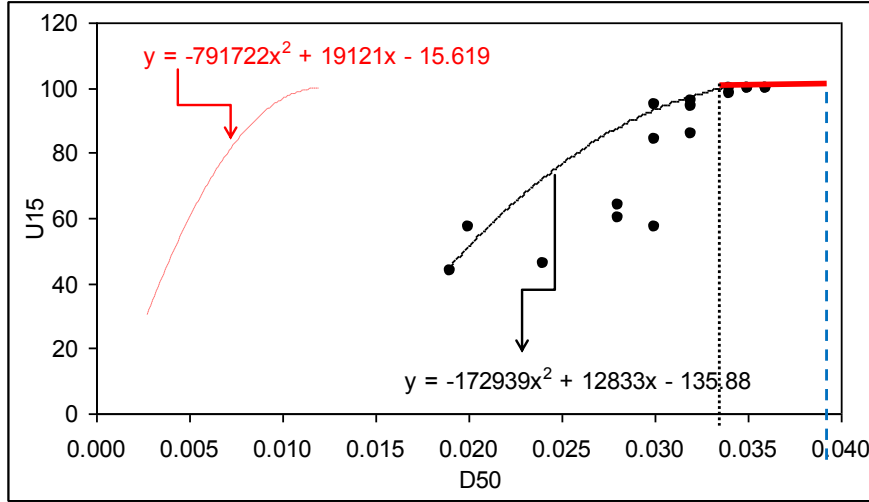
ifadesi ile tanımlanan sıvılık indisinin sıvılaşıma ile bir bağıntısının olması gerekir. Şöyle ki, likit ve/veya plastik limiti ölçülemeyen bir ince daneli zeminin sıvılaşıması kaçınılmaz olabilirken, I_L değerinin 1.0'den küçük olduğu, yani plastik limitin ölçülebildiği, durumlarda sıvılaşıma olasılığı önemli ölçüde düşüktür (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 Casagrande deney sonuçlarından bulunan sıvılık indisi w_n/w_L değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{15})

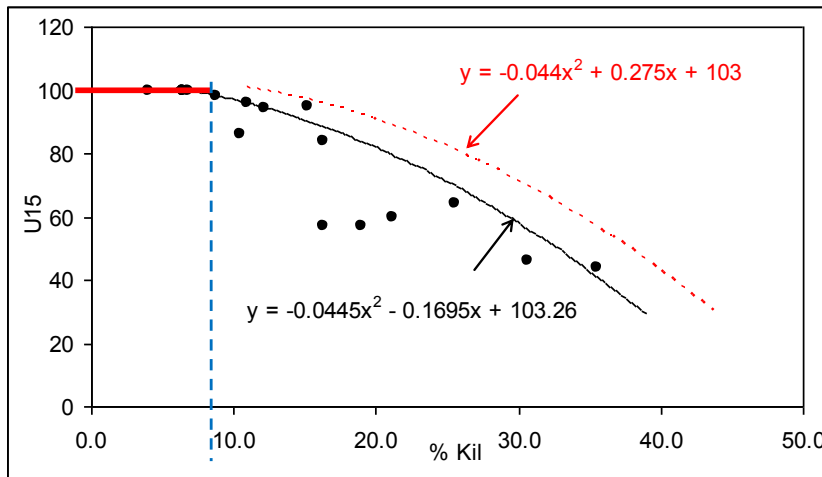
Burada dikkat edilmesi gereken, NP zeminler için I_L hesaplanmadığından literatürde I_L nin formül (5.1) yerine w_r/w_L tanımının kullanılmış olmasıdır.

Adapazarı Kriteri'nin öğelerinden biri de dane boyutudur. Ortalama dane boyutu D_{50} 'nin 0.06mm'den büyük olması zeminin sıvılaşabilirliğinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Şekil 5.10'a bakıldığında bu limitin 0.035mm'de olduğu, dahası doğal numunelerde 0.015mm ye kadar düştüğü (kırmızı eğri) görülmektedir.



Şekil 5.10 Dane boyutunun sıvılaşmaya etkisi

Kil içeriği gözönüne alındığında %C<9 limitinin sıvılaşmayı gösterdiği söylenebilmektedir (Şekil 5.11). Bu değer Adapazarı kriterinin C=%10 koşuluna çok yakın olduğu gibi, doğal numunelerde de benzer sonuca ulaşılmasıyla kil yüzdesinin sıvılaşmayı etkileyen önemli bir değişken olduğu teyid edilmiştir.



Şekil 5.11 Bentonit yüzdesine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{15})

5.2. Yenilmenin Şekil Değişirme Bazlı Değerlendirilmesi

Literatürde sıvılaşmanın kumlarda efektif gerilmenin sıfıra düştüğü aşamada gerçekleştiği genel kabul görürken, geçiş bölgesindekiler ve ince daneli zeminlerin sismik koşullarda yenilmesinin boşluk suyu basıncı artışına değil, birim boy/şekil değiştirme limitlerine ulaşılması ile belireceği kanısı yaygın olarak ele alınmıştır.

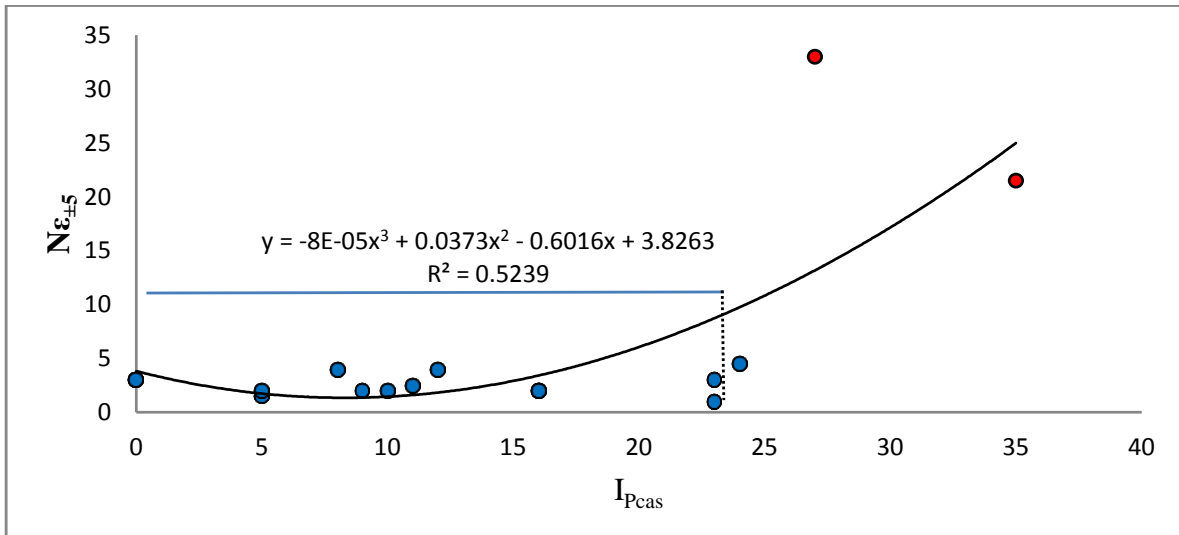
Nitekim, MH simgesi taşıyan saf kaolin $N \geq 15$ çevrimde $r_u = 0.7$ gösterip birincil sıvılaşma belirtisi göstermez iken, γ değerinin çift genlikli $\pm \%20$ 'ye yükseldiği, yani numunenin kesinlikle yenildiği görülmektedir (Şekil 5.3). Tersine, ML silt ise (Şekil 5.4) $N = 10$ çevrimde $r_u = 1.0$ ile birincil sıvılaşma gösterirken, kabarma özelliği (*dilatancy*) nedeniyle $N = 20$ çevrimde sadece $\gamma = \pm \%5$ limitinde kalmıştır.

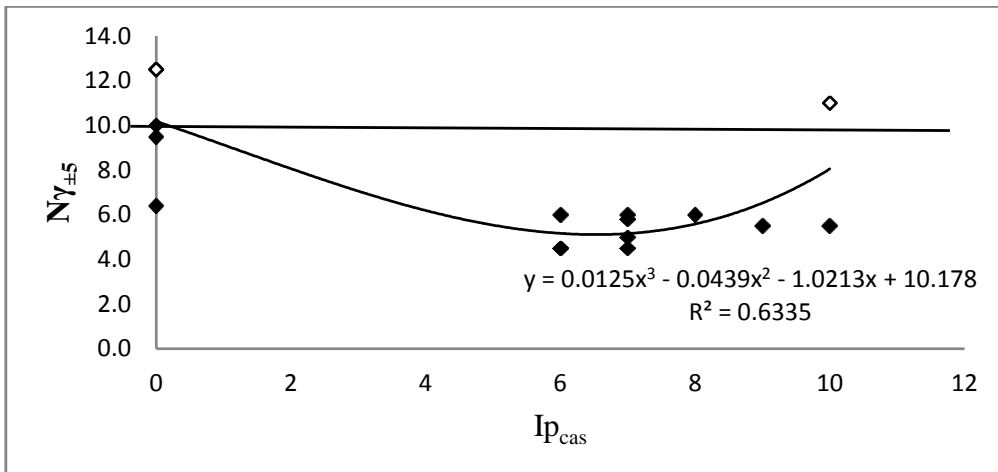
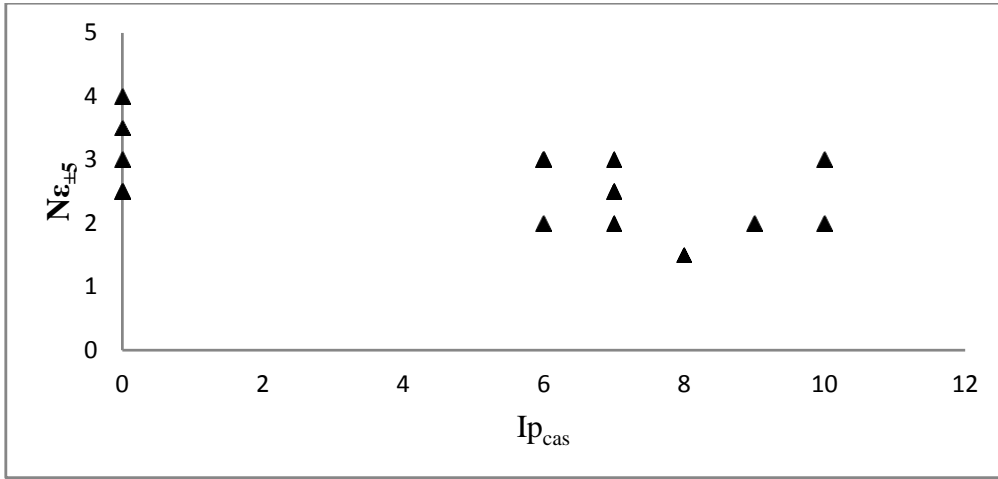
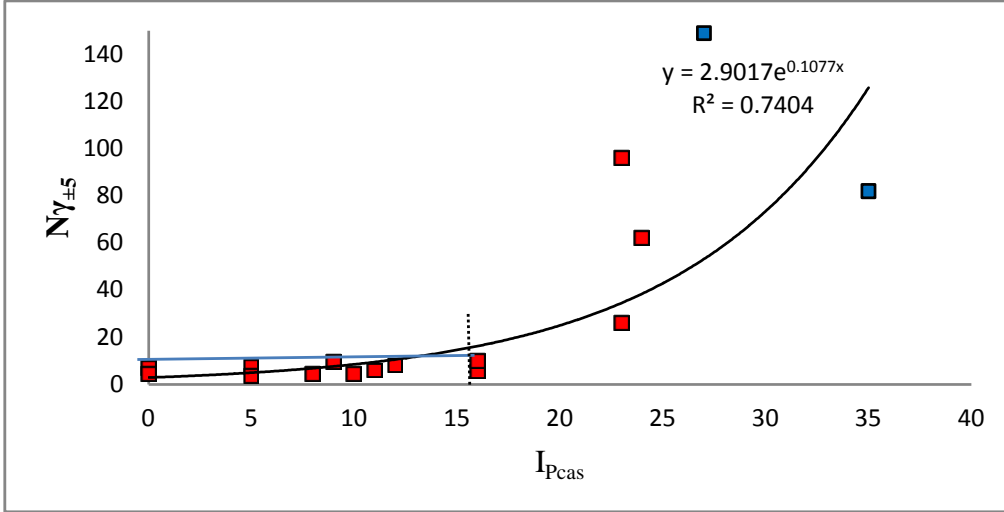
Bu evrede sismik koşullarda yenilmenin kumsu (*sand like*) numunelerde r_u , kilsi karışımlarda (*clay like*) ise γ/ε_z esaslı değerlendirilmesinin zorunluluğu gündeme gelmektedir.

Yenilme kriteri olarak $\%5$ çift genlikli şekil/boy değiştirme alınır buna $N \leq 10$ çevrimde erişilme koşulu aranır Şekil 5.12'den görülebileceği gibi bentonit karışımlarda CTX deneylerde $I_p \leq 23$, DSS'te $I_p \leq 17$ yenilmeyi göstermektedir. CTX-DSS farkının g-e bağıntısından kaynaklandığı açıktır.

Kaolinli karışımlar ise tümünde sıvılaşma oluştuğundan anlamlı sonuçlar elde edilememektedir. Öte yandan, kaolinli karışımların tümünün yenildiği gibi bir görünüm bulunmaktadır ki bu bulgu yukarıdaki saptamalarla örtüşür niteliktedir.

Burada yine laboratuvarında imal edilmiş numunelerin yaşlanmamış/bayatlamamış olmalarının (7 gün) sonuçları etkilediği kuşkusuz doğmaktadır. Zira araziden gelen numunelerin en az 100 yaşında olduğu önemli bir hata yapmadan söylenebilmektedir.

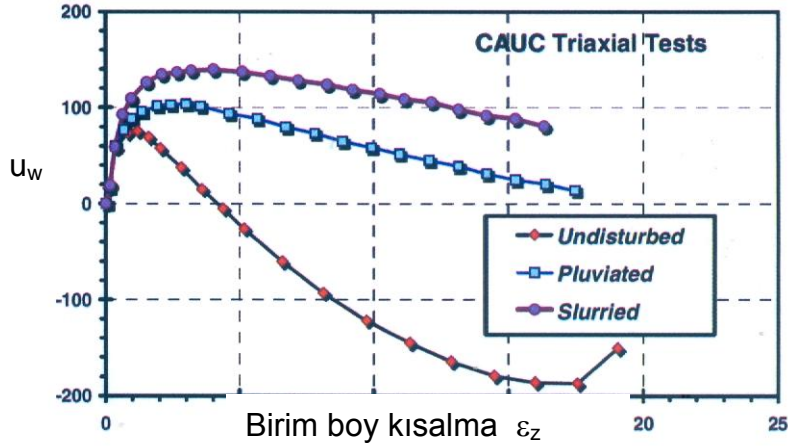




Şekil 5.12 Yenilmenin DSA %5'te olduğu kabulü ile plastisite indisinin etkisi (a) bentonit CTX (b) bentonit DSS (c) kaolinit CTX (d) kaolinit DSS

Bu noktalamalardan çıkartılan sonuç, ince dane içeren karışımlarda benzer sonuçlar edilmesine karşın, DSA%5 şekil değiştirmenin ε_z ve γ bağıntısının büyük olasılıkla bire bir olmaması nedeniyle DSS ve CTX sonuçlarının farklılık göstermesidir.

Bu Bölüm'e son vermeden genel değerlendirmeye olanak sağlama açısından literatür alıntısı yararlı olacaktır. Hoeg vd.200'in yapmış oldukları silt araştırmasında statik CAU üç eksenli kesme deneylerinde ölçülen boşluk suyu basınçları Şekil 5.13'te gösterilmektedir.



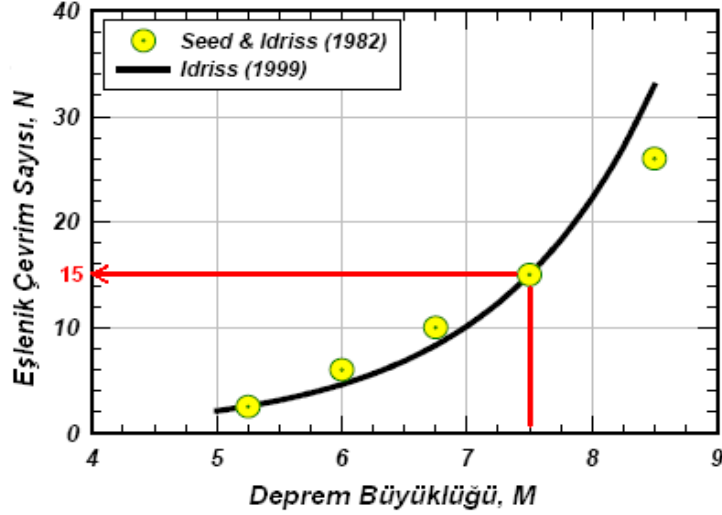
Şekil 5.13 Siltli kum numunelerde boşluk suyu basıncının numune özelliğine göre değişimi

Buradan, bulamaç konsolide etme yolu ile hazırlanmış numunelerde boşluk suyu basıncı rejimlerinin doğal ve yağmurlama yoluyla hazırlanmış numunelere oranla daha yüksek düzeyde olduğu görülmektedir.

Adapazarı siltlerinin çok genç yaşı gözönüne alındığında, bulamaç yönteminin siltin arazideki davranışını yansıttığı savunulabilir bir görüş olmaktadır.

6. DOĞAL NUMUNELERDE DENEYLER

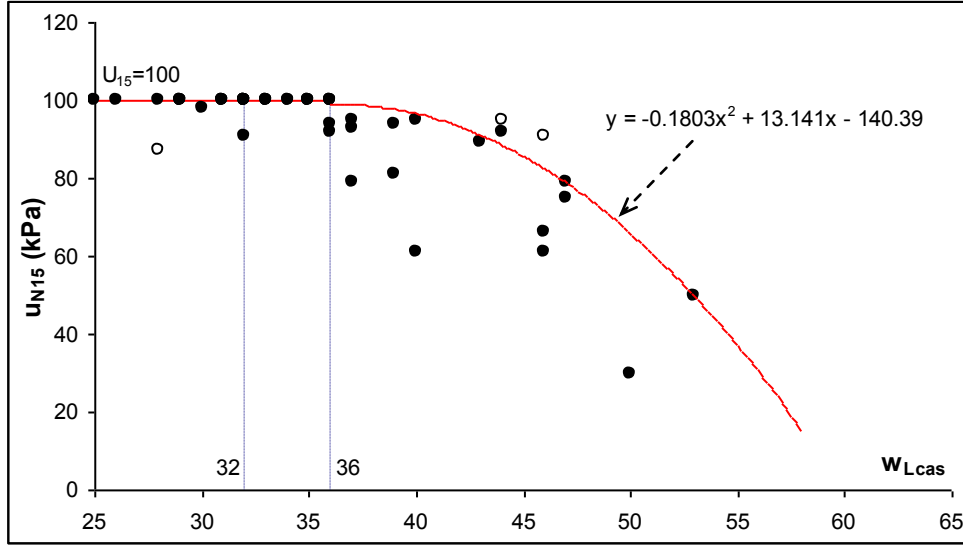
Bu Bölümde doğal numuneler üzerinde gerçekleştirilen CTX deney sonuçları irdelenmiştir. Bu proje kapsamındaki tüm deneylerde konsolidasyon sonu (çevrim başlangıcı) efektif çevre basıncı 100 kPa olduğundan, 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için boşluk suyu basıncının 15 çevrimden önce 100 kPa' a eşitlenmesi zeminin sıvılaştığının bir göstergesi olarak kabul edilebilir (Şekil 6.1). Bununla birlikte, doğal numuneler üzerinde gerçekleştirilen CTX deney sonuçlarından elde edilen $\pm 5\%$ ve $\pm 2.5\%$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları zeminlerin değişik fiziksel özelliklerine karşılık noktalanmışlardır.



Şekil 6.1 Deprem büyüklüğüne karşılık eşlenik gerilme çevrimi sayısı (Idriss&Boulanger, 2004' den)

6.1. Doğal Numunelerde CTX Değerlendirmesi (u_{N15})

Bu bölümdeki grafiklerde zeminlerin değişik fiziksel özelliklerine karşılık dinamik üç eksenli alette kesme sırasında uygulanan 15. çevrim sonucu numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) noktalanmıştır. Şekil 6.2' de Casagrande aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları noktalanmıştır. Burada değerlendirmelere geçmeden önce bazı hususları belirtmek gerekmektedir. Şekiller üzerine bazı sınır durum eğri veya doğruları çizilirken tüm dağılımın genel bir değerlendirilmesi yapılmış, göze çarpan eğilimler dışında kalan noktalar göz ardı edilmiştir. Şekil 6.2 üzerinden konuşacak olursak " $y = -0.1803x^2 + 13.141x - 140.39$ " denkleminin gösterdiği eğri tüm noktaların eğilimini yansıtmamakta, ancak artan likit limitlerine karşılık u_{N15} ' in alabileceği maksimum değerleri ifade etmektedir. Bu durumda likit limitin 36 dan küçük değerlerinde numunelerin büyük bir kısmında 15 çevrim sonunda (veya öncesinde) çevre basıncı boşluk suyu basıncına eşit olurken likit limit 36 dan büyük ise boşluk suyu basıncı çevre basıncına hiçbir zaman eşit olamamaktadır. Yine Şekil 6.2' de eğrinin sağında noktalanmış olan içi boş noktalar bulunmaktadır. Bunlar eğri çiziminde değerlendirmeye katılmayan, dinamik deney veya fiziksel deney hatası gibi bir sebeple genel eğilimi az da olsa bozan noktalar olarak değerlendirilmiştir. Bundan sonraki grafiklerde de karşımıza çıkacak olan içi boş daireler genel eğilimi bozan deney sonuçları olarak nitelendirilecek ve herhangi bir eğri uydurmada göz önüne alınmayacaklardır.



Şekil 6.2 Likit limit (Casagrande) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-CTX)

Şekil 6.2' de Casagrande aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit (w_{Lcas}) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları noktalanmıştır. Şekil 6.2' ye göre aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$w_{Lcas} < 36 \quad \rightarrow \quad u_{N15} = 100 \quad (6.1)$$

$$w_{Lcas} > 36 \quad \rightarrow \quad u_{N15} = -0.1803 w_{Lcas}^2 + 13.141 w_{Lcas} - 140.39$$

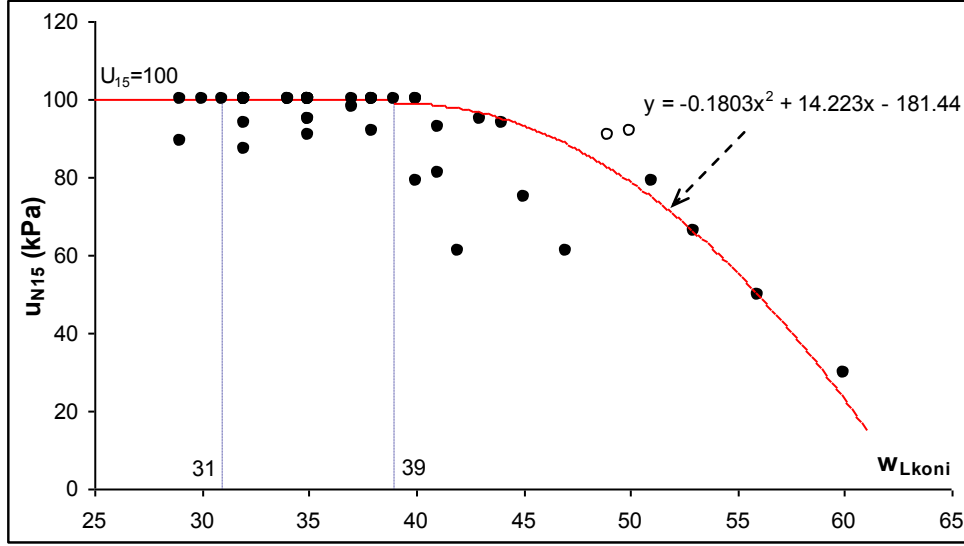
Bu denklemler Casagrande aletinde denenen numunenin alabileceği likit limit değerlerine karşılık dinamik üç eksenli alette (CTX) kesme sırasında onbeşinci çevrim ($N=15$) sonucunda gösterebilecekleri maksimum boşluk suyu basınçlarını ifade etmektedir. Şekil 6.2' ye göre Casagrande aleti ile ölçülen likit limit değerinin 36' dan büyük olduğu durumlarda $N=15$ çevrim sonunda hiçbir zaman boşluk suyu basıncı çevre basıncına eşit olmamakta, dolayısı ile efektif gerilme sıfıra yönelmediğinden sıvılaşmanın olası olmadığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, likit limitin 32'den küçük değerlerinde boşluk suyu basıncı 15. çevrime kadar çevre basıncına eşitlenmekte dolayısı ile numune sıvılaşmaktadır.

Şekil 6.3' de koni düşürme aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit değerlerine (w_{Lkoni}) karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları noktalanmıştır. Bu durumda koni düşürme ile yapılan deney sonuçlarına göre ölçülen likit limit değerinin 39' dan sonraki değerlerinde sıvılaşmanın görülmesi mümkün değildir denilebilir. Likit limitin 31' in altında olduğu durumlarda efektif gerilmenin sıfıra yönelmesi kuvvetle öne çıkmaktadır. Koni düşürme ile Casagrande aletlerinden elde edilen üst likit limit değerleri arasında 3 birimlik bir fark olduğu görülmektedir. Şekil 6.3' e göre aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$w_{Lkoni} < 39 \quad \rightarrow \quad u_{N15} = 100 \quad (6.2)$$

$$w_{Lkoni} > 39 \quad \rightarrow \quad u_{N15} = -0.1803 w_{Lkoni}^2 + 14.223 w_{Lkoni} - 181.44$$

Bu denklemler koni düşürme aletinde denenen numunenin alabileceği likit limit değerlerine karşılık dinamik üç eksenli alette (CTX) kesme sırasında 15. çevrim sonucunda gösterebilecekleri maksimum boşluk suyu basınçlarını ifade etmektedir.

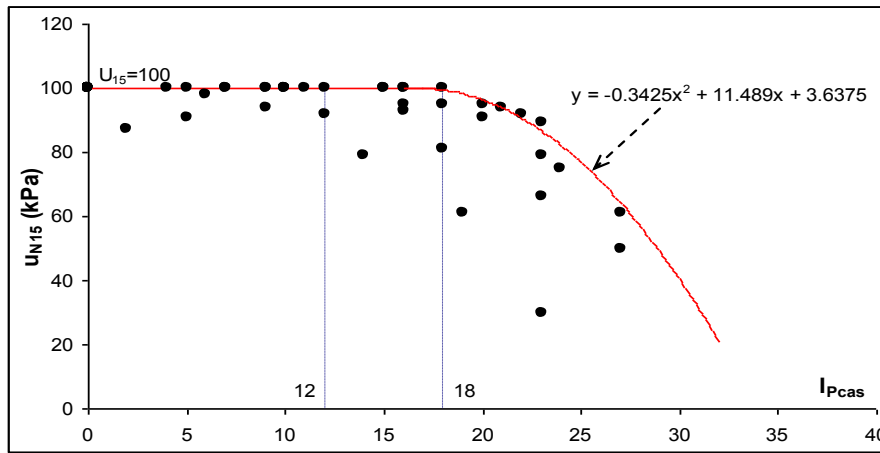


Şekil 6.3 Likit limit (koni düşürme) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-CTX)

Şekil 6.4' de Casagrande aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit sonuçlarından elde edilen plastisite indisi (I_{pcas}) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) noktalanmıştır. Bu durumda plastisite indisi değerinin 18' den sonraki değerlerinde sıvılaşmanın görülmesi mümkün değildir denilebilir. 12' nin altındaki plastisite indisi değerlerindeki çoğu numunede numune içindeki boşluk suyu basıncı hücre basıncına eşitlenmektedir. Şekil 6.4' e göre aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$I_{pcas} < 18 \quad \rightarrow \quad u_{N15} = 100 \quad (6.3)$$

$$I_{pcas} > 18 \quad \rightarrow \quad u_{N15} = -0.3425 I_{pcas}^2 + 11.489 I_{pcas} + 3.6375$$

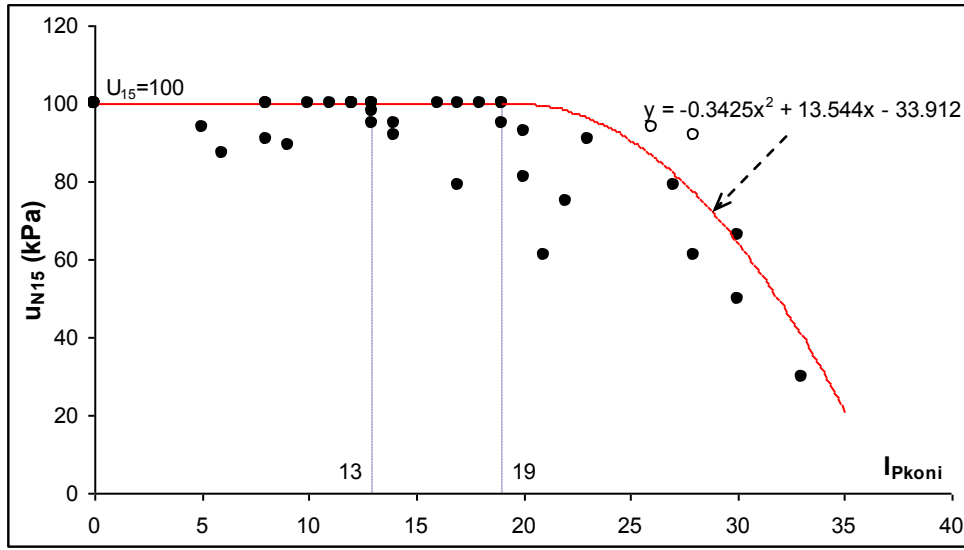


Şekil 6.4 Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (CTX)

Şekil 6.5' de koni düşürme aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit sonuçlarından elde edilen plastisite indisi (I_{pkoni}) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) noktalanmıştır. Bu durumda plastisite indisi değerinin 19' dan sonraki değerlerinde boşluk suyu basıncı hiçbir zaman sıvılaşmayı doğuracak olan hücre basıncına eşitlenmemektedir. Bununla birlikte 13' ün altındaki plastisite indisi değerlerinde çoğu numunede boşluk suyu basıncı hücre basıncına eşitlenmektedir. Şekil 6.5' e göre aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$I_{pkoni} < 19 \quad \rightarrow \quad u_{N15}=100 \quad (6.4)$$

$$I_{pkoni} > 19 \quad \rightarrow \quad u_{N15}= -0.3425 I_{pkoni}^2 + 13.544 I_{pkoni} - 33.912$$



Şekil 6.5 Koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (CTX)

Şekil 6.6' da denenen numuneler üzerinde ölçülen kil yüzdelere (%C) karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları noktalanmıştır. Grafikten görüleceği üzere $u_{N15}=100$ kPa değerini veren kil yüzdeleri 22' ye kadar ulaşmaktadır. Bununla birlikte $u_{N15}=100$ kPa değerini veren numuneler dikkatlice incelenirse bunların iki gruba ayrıldığı da görülmektedir. %10 kil içeriğine sahip numunelerin hemen hepsi sıvılaşırken, %10 ile %22 arasında kil oranlarına sahip numunelerin daha az bir kısmı sıvılaşmıştır. Bu durumda %10 kil sınırı sıvılaşma açısından belirleyici olmakla beraber %10-22 arasında kil içeriğine sahip numunenin ancak deneysel yöntemlerle sıvılaşma tayininin gerçekleştirilebileceği yani "tes" bölgesine girdiği düşünülebilir. Şekil 6.6' ya göre:

$$\%C < 10 \quad \rightarrow \quad u_{N15}=100 \quad \text{ve} \quad (6.5)$$

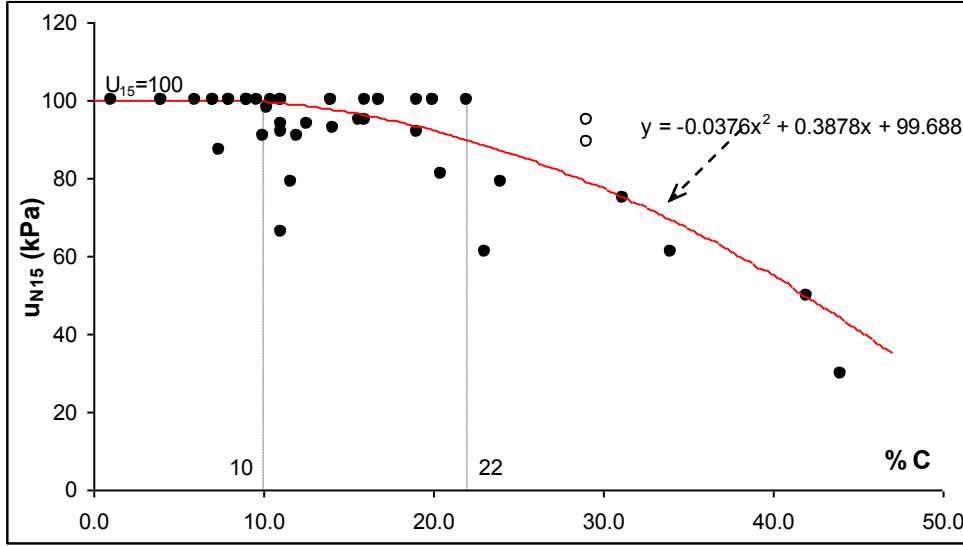
$$\%C > 10 \quad \rightarrow \quad u_{N15}= -0.0376 C^2 + 0.3878 C + 99.688 \quad \text{denklemleri yazılabilir.}$$

Şekil 6.7' de denenen numuneler üzerinde ölçülen ortalama dane boyutlarına (D_{50}) karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları noktalanmıştır. Şekil 6.7' den görüleceği üzere ortalama dane boyutunun (D_{50}) 0.012 mm den küçük olduğu durumlarda sıvılaşmanın oluşması mümkün görülmemektedir. Bu boyuttan daha büyük

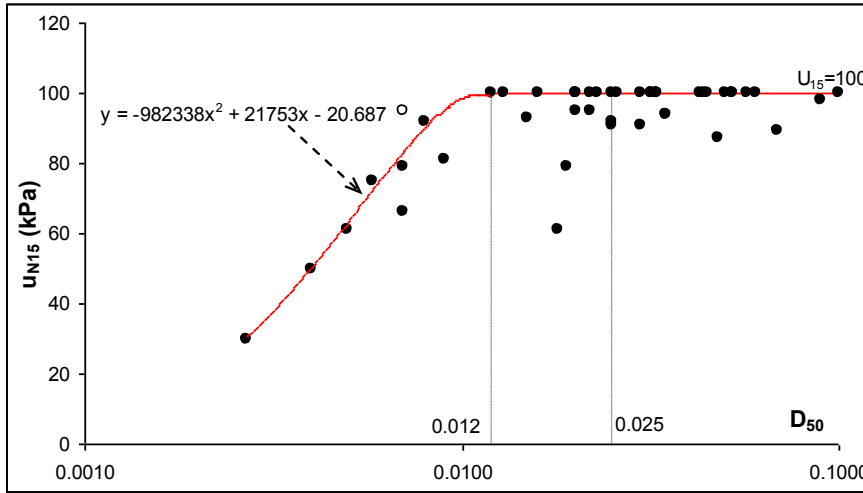
danelerin ise neredeyse yarısı sıvılaşmaya müsait iken diğer yarısında sıvılaşmanın başlangıcı için yeterli olan boşluk suyu basınçlarına (u_{N15}) ulaşılamadığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 6.7' ye göre aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$D_{50} > 0.012 \quad \rightarrow \quad u_{N15}=100 \quad (6.6)$$

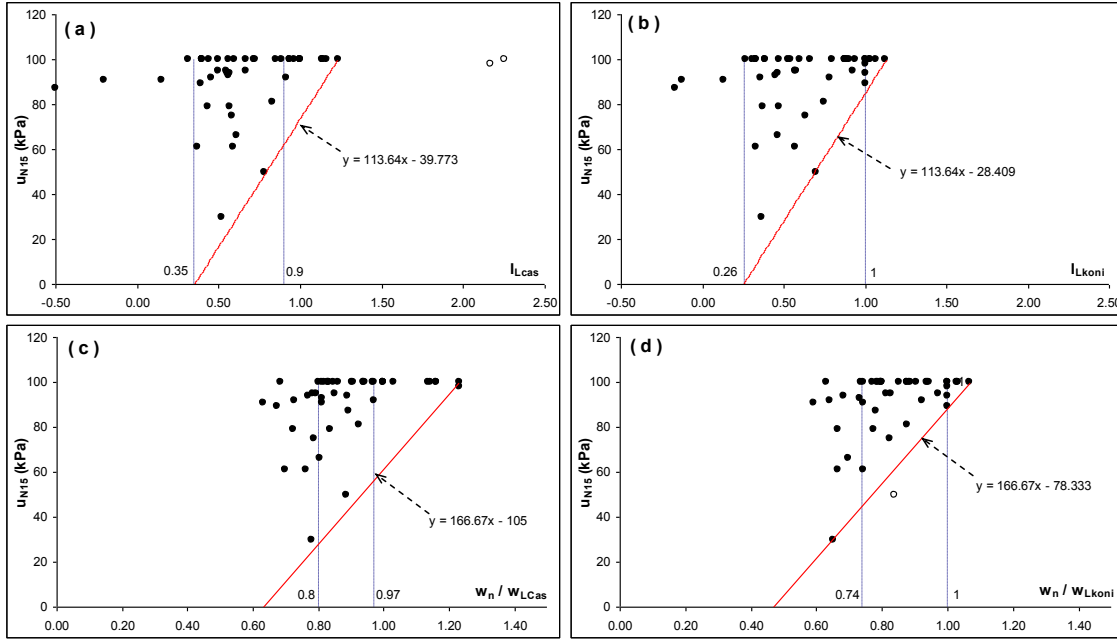
$$D_{50} < 0.012 \quad \rightarrow \quad u_{N15}= -982338 D_{50}^2 + 21753 D_{50} - 20.687$$



Şekil 6.6 Kil yüzdesine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-CTX)



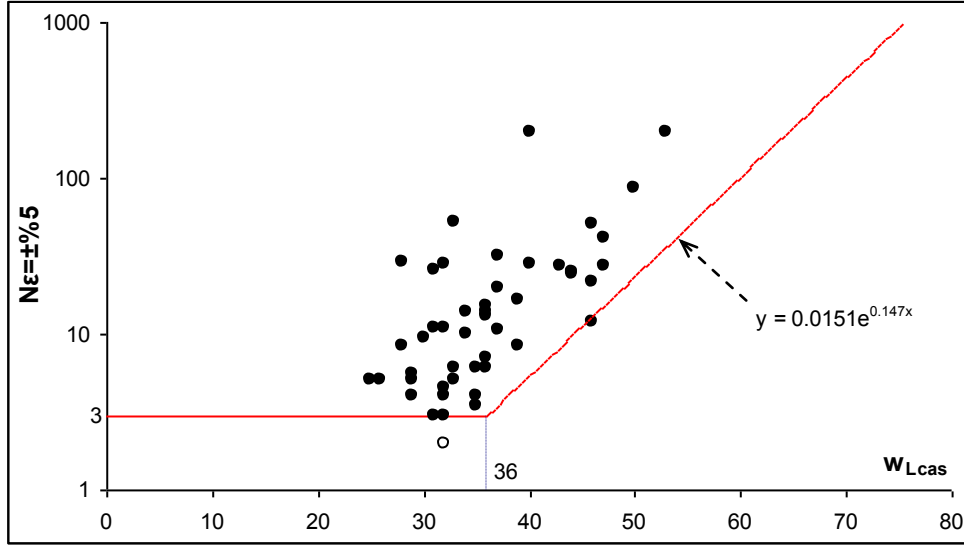
Şekil 6.7 Ortalama Dane boyutuna (D_{50}) karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-CTX)



Şekil 6.8 Casagrande ve koni düşürme deney sonuçlarından sıvılık indisi (a-b) ve w_n/w_L (c-d) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (U_{N15})

6.2. Doğal Numunelerde CTX Değerlendirmesi ($N\varepsilon = \pm 5\%$)

Şekil 6.8a ve b' de Casagrande ve koni düşürme deney sonuçlarından bulunan sıvılık indislerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (U_{N15}) gösterilmektedir. Şekil 6.8c ve d' de Casagrande ve koni düşürme deney sonuçlarından bulunan w_n/w_L oranlarına karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (U_{N15}) gösterilmektedir. Grafiklerde görülen eğriler verilen bir w_n/w_L değerine karşılık numunenin 15. çevrim sonunda göstereceği minimum boşluk suyu basıncını ifade etmektedir. Grafiklerde sıvılık indisi ve w_n/w_L oranlarındaki su muhtevası değişkenleri için konsolidasyon sonunda ölçülen değerler kullanılmıştır. Grafikler üzerindeki sınır değerler dikkatle incelenecek olunursa w_n/w_L oranının sıvılaştıran sıvılaşmayan ve "test" bölgelerini daha kesin ve makul sınırlarla ayırdığı görülebilir. En iyi sonucu w_n/w_{LCas} formülü ile çizilen Şekil 6.8c' grafiği vermiştir.



Şekil 6.9 Likit limit (Casagrande) değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-CTX)

Bu bölümde doğal numuneler üzerinde gerçekleştirilen CTX deney sonuçlarından elde edilen $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları zeminlerin değişik fiziksel özelliklerine karşılık noktalanmışlardır. Burada da değerlendirmelere geçmeden önce bazı hususları belirtmek gerekecektir. Şekil 6.9 üzerinden konuşacak olursak “ $y = 0.0151e^{0.147x}$ ” denklemleri ile gösterilen eğri tüm noktaların eğilimini yansıtmamakta, ancak artan likit limitlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayılarını ifade etmektedir. Böylece üzerinde denklemleri ile verilen eğrinin yapay olarak oluşturulduğu vurgulanmaktadır. Şekil 6.9 ve bundan sonraki çizilecek grafiklerde göze çarpan bir husus numuneler hangi fiziksel özelliğe sahip olursa olsun 3 çevrimden önce $\pm\%5$ deformasyona ulaşmamaktadır. Bu durumu grafiklerde sadece bir deney sonucu bozmuş o nokta da grafiklerde içi boş olarak gösterilmiştir. Böylece kırıklı çizginin altında kalan kısımlar noktaların düşemeyeceği bölgeler olarak ayırtlanmıştır.

Şekil 6.9’ a göre aşağıdaki denklemleri yazılabilir:

$$W_{Lcas} < 36 \quad \rightarrow \quad N_{\epsilon=\pm\%5} = 3 \quad (6.7)$$

$$W_{Lcas} > 36 \quad \rightarrow \quad N_{\epsilon=\pm\%5} = 0.0151 e^{0.147xW_{Lcas}}$$

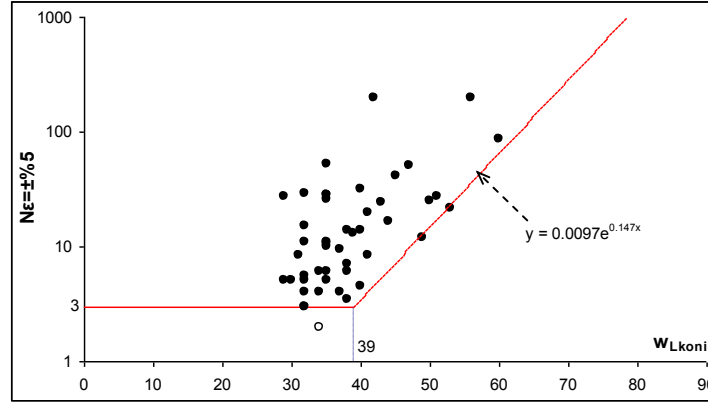
Bu denklemleri Casagrande aletinde denenen numunenin alabileceği likit limit değerlerine karşılık dinamik üç eksenli alette (CTX) $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayılarını gösteren limit durumları ifade etmektedir.

Şekil 6.10’ da koni düşürme aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayıları noktalanmıştır. Şekil 6.10’ a göre aşağıdaki denklemleri yazılabilir:

$$W_{Lkoni} < 39 \quad \rightarrow \quad N_{\epsilon=\pm\%5} = 3 \quad (6.8)$$

$$W_{Lkoni} > 39 \quad \rightarrow \quad N_{\epsilon=\pm\%5} = 0.0097 e^{0.147xW_{Lkoni}}$$

Bu denklemler koni düşürme aletinde denenen numunenin alabileceği likit limit değerlerine karşılık dinamik üç eksenli alette (CTX) $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayılarını gösteren limit durumu ifade etmektedir. Bu durumda koni düşürme bulunan sınır eğrisinin Casagrande' ye göre çizilen sınır eğrisine göre aynı eğimde olduğu ancak sağa doğru ötelendiği göze çarpmaktadır.

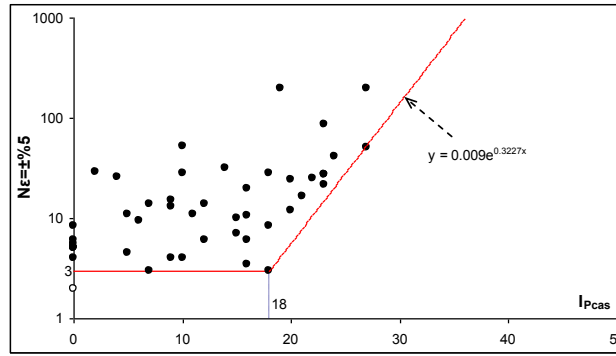


Şekil 6.10 Likit limit (koni düşürme) değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-CTX)

Şekil 6.11' de Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayıları noktalanmıştır. Şekil 6.11' e göre sınır durumu ifade eden aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$I_{pcas} < 18 \quad \rightarrow \quad N_{\epsilon=\pm\%5} = 3 \quad (6.9)$$

$$I_{pcas} > 18 \quad \rightarrow \quad N_{\epsilon=\pm\%5} = 0.009 e^{0.3227x I_{pcas}}$$



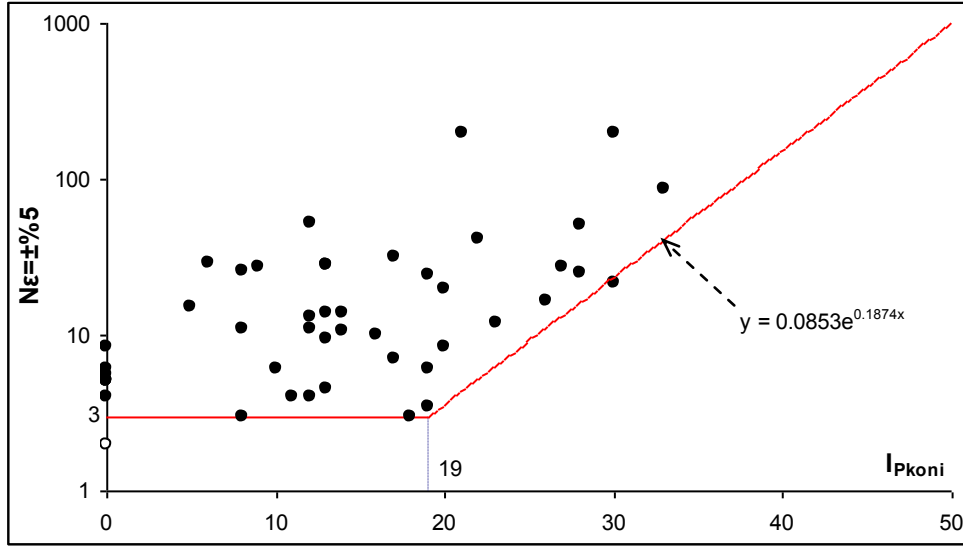
Şekil 6.11 Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-CTX)

Şekil 6.12' de koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayıları noktalanmıştır.

Şekil 6.12' ye göre sınır durumu ifade eden aşağıdaki denklem yazılabilir. Bu durumda koni düşürme ile bulunan I_p ' nin sınır eğrisinin Casagrande' ye göre bulunan I_p ' si ile çizilen sınır eğrisine göre farklı eğimde ve sağa doğru ötelendiği göze çarpmaktadır.

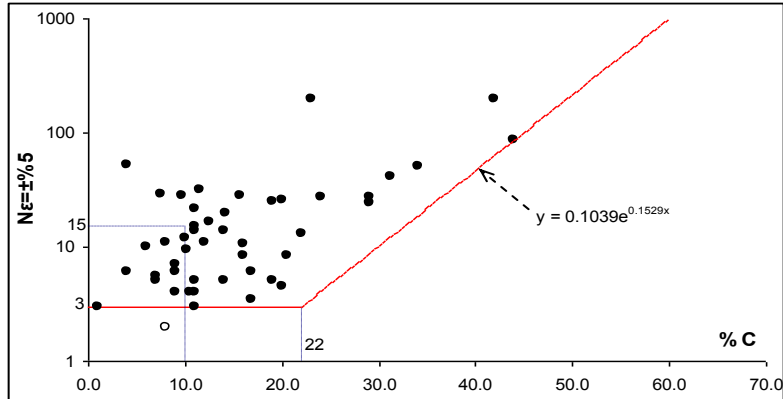
$$I_{pkoni} < 19 \quad \rightarrow \quad N_{\epsilon=\pm\%5} = 3 \quad (6.10)$$

$$I_{pkoni} > 19 \quad \rightarrow \quad N_{\epsilon=\pm\%5} = 0.0853 e^{0.147 \times I_{p(koni)}}$$



Şekil 6.12 Koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-CTX)

Şekil 6.13' de denenen numuneler üzerinde ölçülen kil yüzdelere karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) noktalanmıştır. Grafikten görüleceği üzere %10 dan daha az kil oranlarına sahip numunelerin büyük bir bölümü 15. çevrim öncesinde $\pm\%5$ deformasyona ulaşmışlardır.



Şekil 6.13 Kil yüzdesine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları

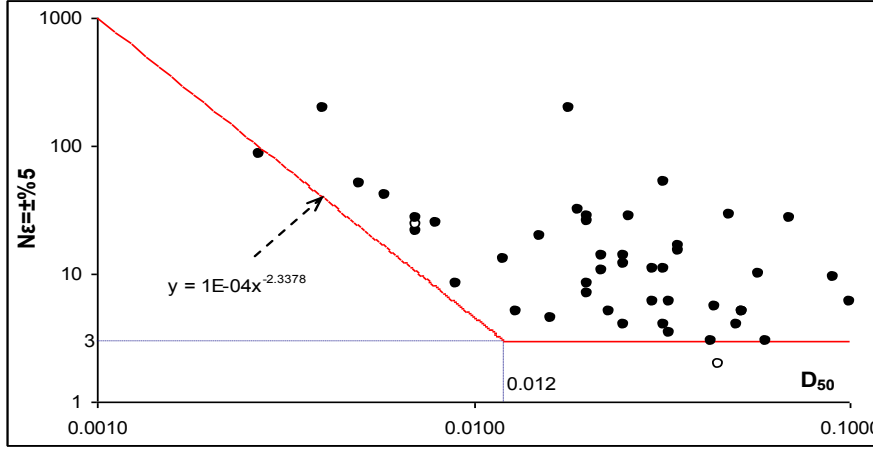
Şekil 6.13' e göre sınır durumu ifade eden aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$\%C < 22 \quad \rightarrow \quad N_{\epsilon=\pm\%5} = 3 \quad (6.11)$$

$$\%C > 22 \quad \rightarrow \quad N_{\epsilon=\pm\%5} = 0.1039 e^{0.1529 \times \%C}$$

Şekil 6.14' de denenen numuneler üzerinde ölçülen ortalama dane boyutlarına (D_{50}) karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) her iki eksen de logaritmik olacak şekilde noktalanmıştır. Şekil 6.14' den görüleceği üzere ortalama dane boyutunun

(D_{50}), $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) üzerinde bir ilişkisi vardır. Ortalama dane boyutu arttıkça $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayılarının (N) azaldığını söylemek yanlış olmayacaktır.



Şekil 6.14 Ortalama Dane boyutuna (D_{50}) karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (doğal numune-CTX)

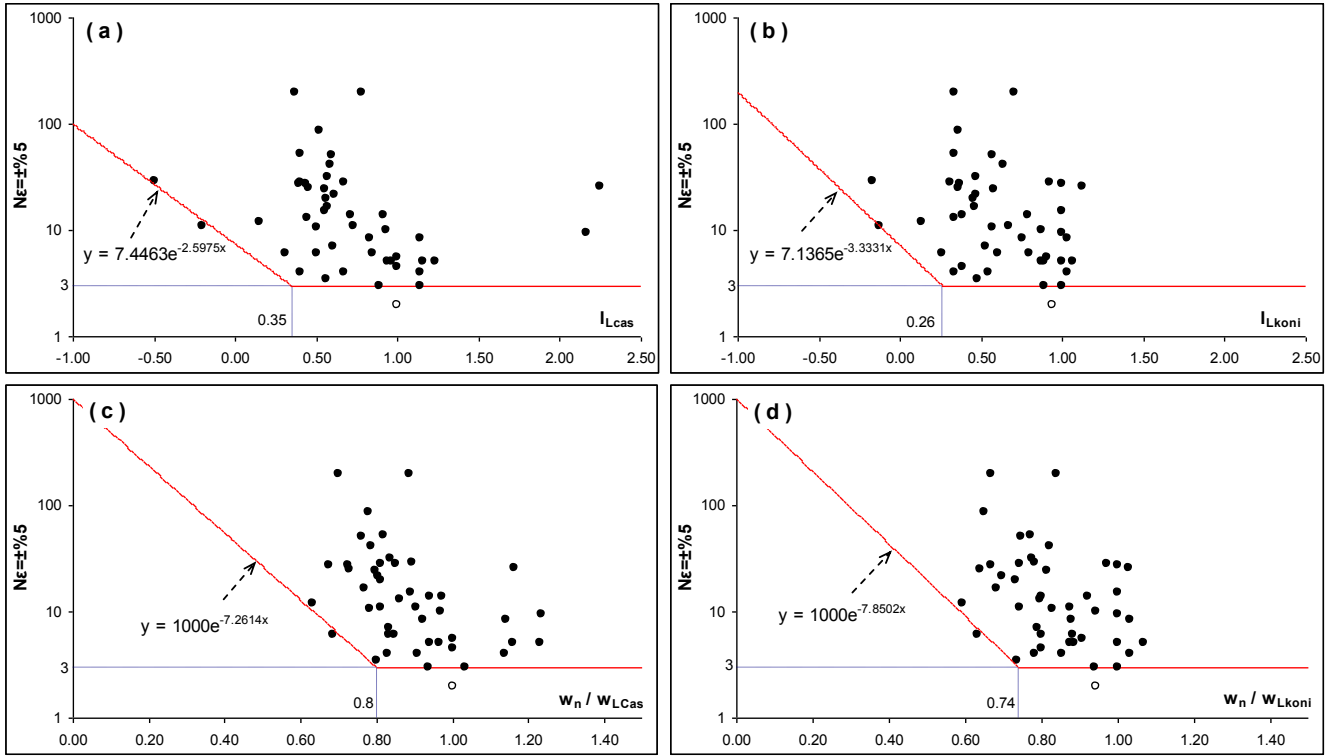
Şekil 6.14' e göre sınır durumu ifade eden aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$D_{50} > 0.012 \quad \rightarrow \quad N_{\epsilon=\pm\%5} = 3 \quad (6.12)$$

$$D_{50} < 0.012 \quad \rightarrow \quad N_{\epsilon=\pm\%5} = 1E-04 D_{50}^{-2.3378}$$

Şekil 6.15ab' de Casagrande ve koni düşürme deney sonuçlarından bulunan sıvılık indislerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) gösterilmektedir. Şekil 6.15cd' de Casagrande ve koni düşürme deney sonuçlarından bulunan w_n/w_L oranlarına karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) gösterilmektedir. Grafiklerde sıvılık indisi ve w_n/w_L oranlarındaki su muhtevası değişkenleri için konsolidasyon sonunda ölçülen değerler kullanılmıştır.

Bir önceki kısımda anlatılan u_{N15} grafiklerinde sıvılaşmanın gerçekleşmediği sınır durumu ifade eden, diğer bir deyişle eğrilerin kırılma noktası olan değerlerde yine bu kısımda Şekil 6.9-6.15 arasında gösterilen grafiklerde bir kırılma olmaktadır. Yani deformasyon ve boşluk suyu basıncı artışlarında bir paralellik bulunmaktadır. Bu da seçilen sınır değerlerinin doğruluğunu kuvvetlendirmiştir.



Şekil 6.15 Casagrande deney sonuçlarından bulunan a-b) sıvılık indisi ve c-d) w_n/w_L değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N)

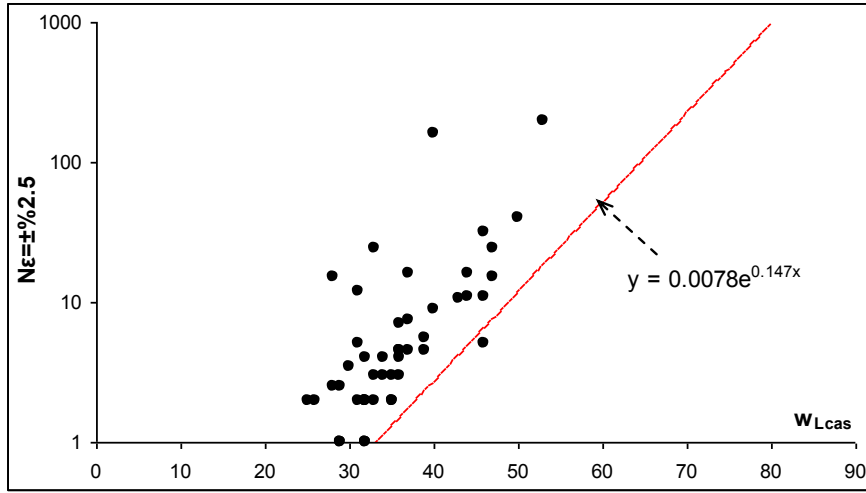
6.2. Doğal Numunelerde CTX Değerlendirmesi ($N_{\epsilon=\pm\%2.5}$)

Bu bölümde doğal numuneler üzerinde gerçekleştirilen CTX deney sonuçlarından elde edilen $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları zeminlerin değişik fiziksel özelliklerine karşılık noktalanmışlardır (Şekil 6.16-6.21). Grafiklerden görüleceği üzere sınır eğrilerinin konumu $\pm\%5$ deformasyondakilere nazaran bir miktar ötelenmiştir.

Şekil 6.16' da $\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli çevrim sayıları denenen numunenin Casagrande aleti ile ölçülmüş likit limit değerlerine (w_{Lcas}) karşı noktalanmıştır. Şekil 6.16' ya göre aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$N_{\epsilon=\pm\%2.5} = 0.0078 e^{0.147 W_{Lcas}} \quad (6.13)$$

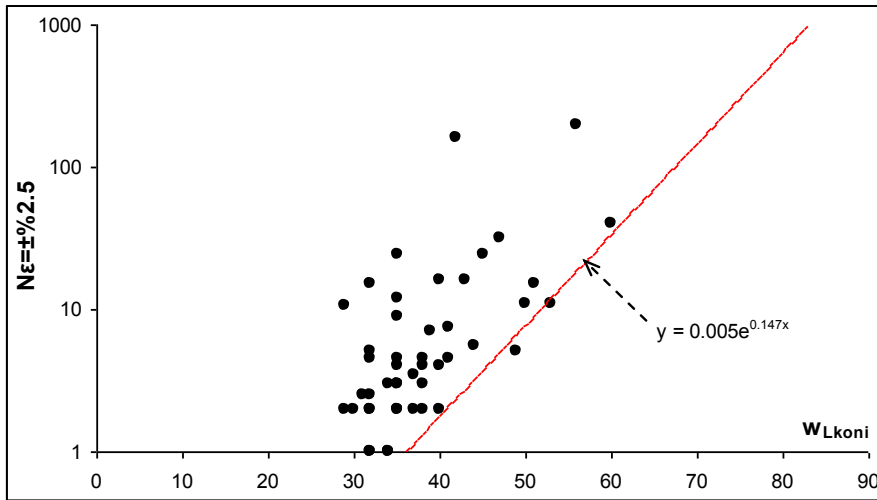
Bu denklem Casagrande aletinde denenen numunenin alabileceği likit limit değerlerine karşılık dinamik üç eksenli alette (CTX) $\pm\%2.5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayılarını gösteren limit durumu ifade etmektedir.



Şekil 6.16 Likit limit (Casagrande) değerlerine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-CTX)

Şekil 6.17' de koni düşürme aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit değerlerine (W_{Lkoni}) karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayıları noktalanmıştır. Şekil 6.17' ye göre aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$N_{\epsilon=\pm\%2.5} = 0.005 e^{0.147 W_{Lkoni}} \quad (6.14)$$

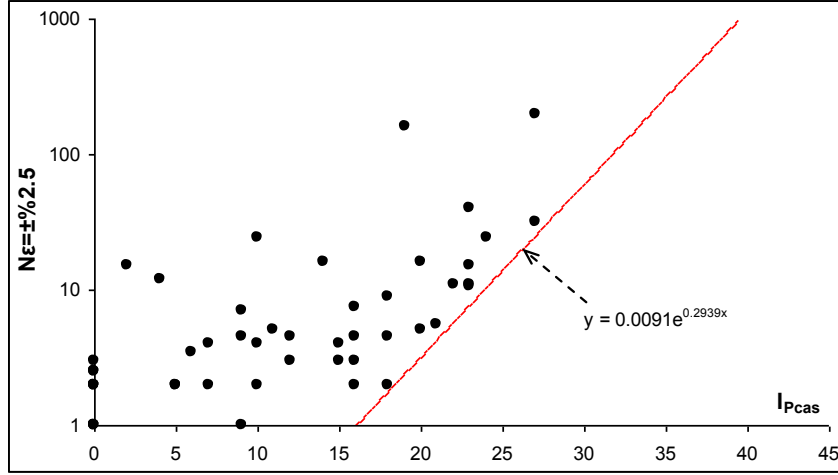


Şekil 6.17 Likit limit (koni düşürme) değerlerine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-CTX)

Bu denklem koni düşürme aletinde denenen numunenin alabileceği likit limit değerlerine karşılık dinamik üç eksenli alette (CTX) $\pm\%2.5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayılarını gösteren limit durumu ifade etmektedir. Bu durumda koni düşürme bulunan sınır eğrisinin Casagrande' ye göre çizilen sınır eğrisine göre aynı eğimde olduğu ancak sağa doğru ötelendiği göze çarpmaktadır.

Şekil 6.18' de Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayıları noktalanmıştır. Şekil 6.18' e göre sınır durumu ifade eden aşağıdaki denklem yazılabilir:

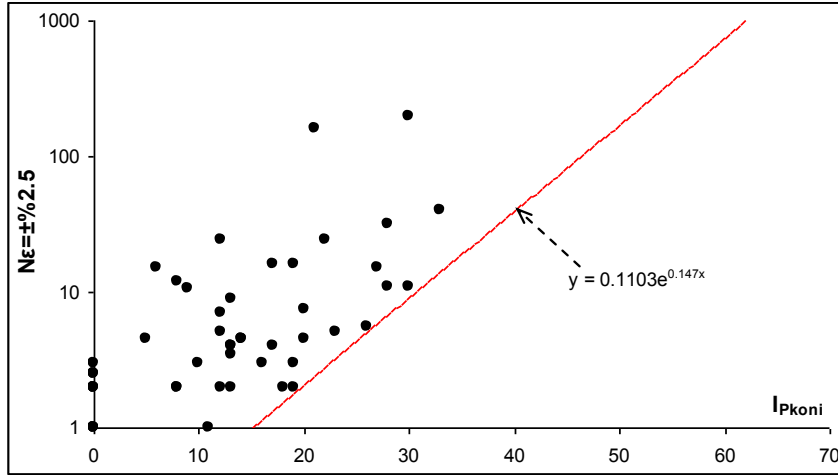
$$N_{\epsilon=\pm\%2.5} = 0.0091 e^{0.2939 I_p(\text{cas})} \quad (6.15)$$



Şekil 6.18 Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (CTX)

Şekil 6.19' da koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayıları noktalanmıştır. Şekil 6.19' a göre sınır durumu ifade eden aşağıdaki denklem yazılabilir:

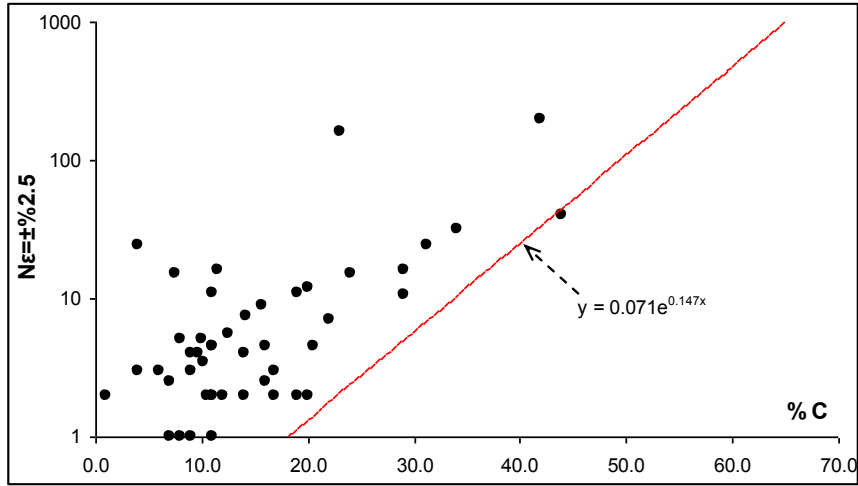
$$N_{\epsilon=\pm\%2.5} = 0.1103 e^{0.147 I_p(\text{koni})} \quad (6.16)$$



Şekil 6.19 Koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (CTX)

Şekil 6.20' de denenen numuneler üzerinde ölçülen kil yüzdelere karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) noktalanmıştır. Şekil 6.20' ye göre sınır durumu ifade eden aşağıdaki denklem yazılabilir:

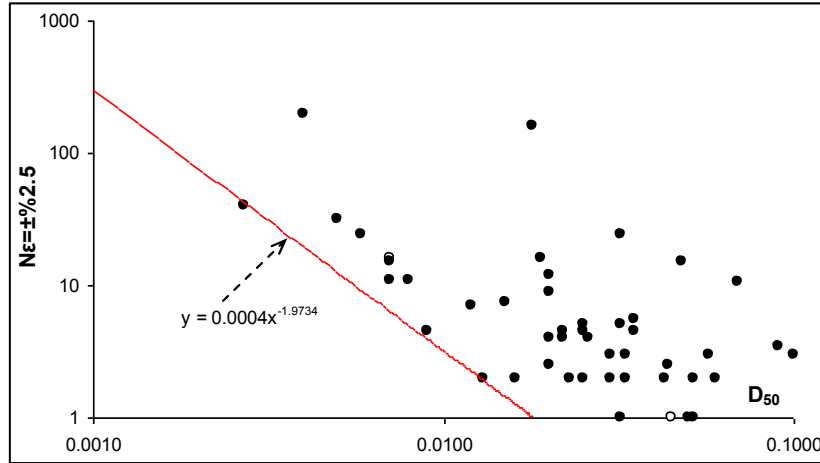
$$N_{\epsilon=\pm\%2.5} = 0.071 e^{0.147 C} \quad (6.17)$$



Şekil 6.20 Kil yüzdesine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (doğal numune-CTX)

Şekil 6.21' de denenen numuneler üzerinde ölçülen ortalama dane boyutlarına (D_{50}) karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) her iki eksen de logaritmik olacak şekilde noktalanmıştır. Şekil 6.21' den görüleceği üzere ortalama dane boyutunun (D_{50}), $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) üzerinde bir ilişkisi vardır.. Yine de ortalama dane boyutu arttıkça $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayılarının (N) azaldığını söylemek yanlış olmayacaktır. Şekil 6.21' e göre sınır durumu ifade eden aşağıdaki denklem yazılabilir:

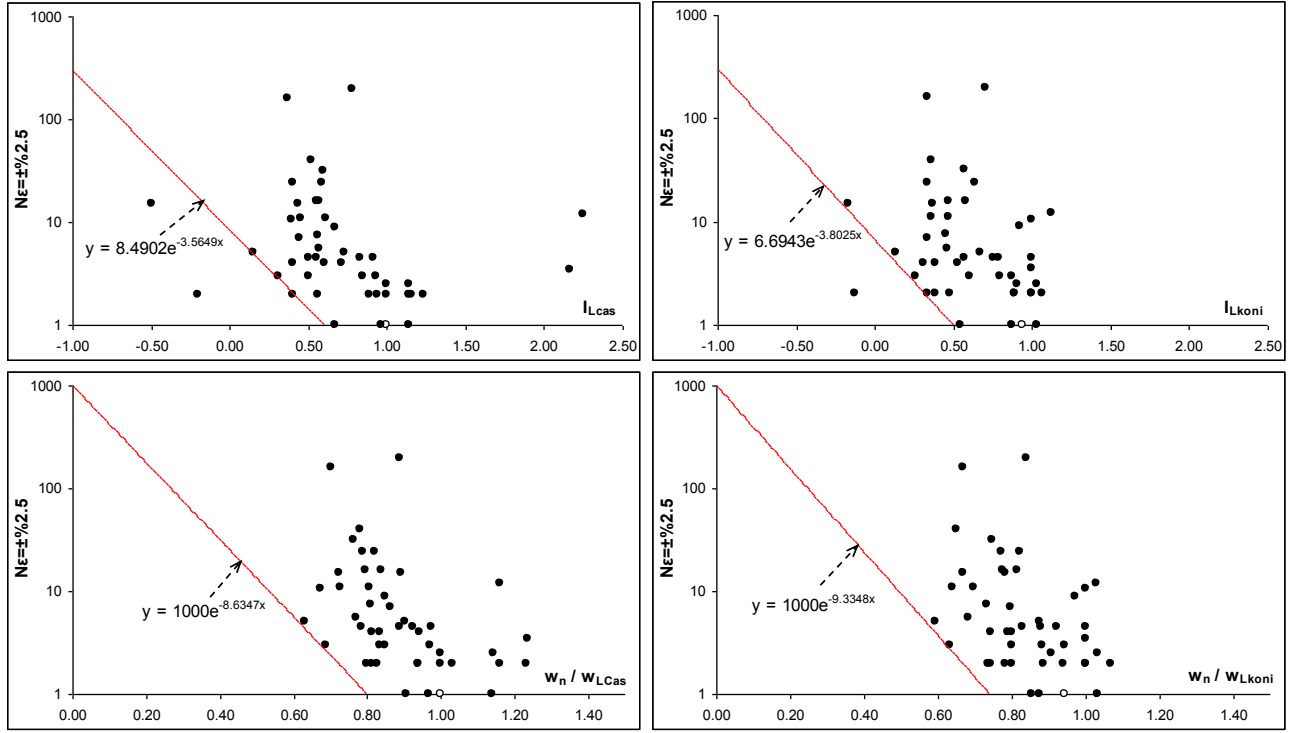
$$N_{\epsilon=\pm 2.5} = 0.0004 D_{50}^{-1.9734} \quad (6.18)$$



Şekil 6.21 Ortalama Dane boyutuna (D_{50}) karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (CTX)

Şekil 6.22ab' de Casagrande ve koni düşürme deney sonuçlarından bulunan sıvılık indislerine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) gösterilmektedir. Şekil 6.22cd' de Casagrande ve koni düşürme deney sonuçlarından bulunan w_r/w_L oranlarına karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim

sayıları (N) gösterilmektedir. Grafiklerde sıvılık indisi ve w_n/w_L oranlarındaki su muhtevası değişkenleri için konsolidasyon sonunda ölçülen değerler kullanılmıştır.



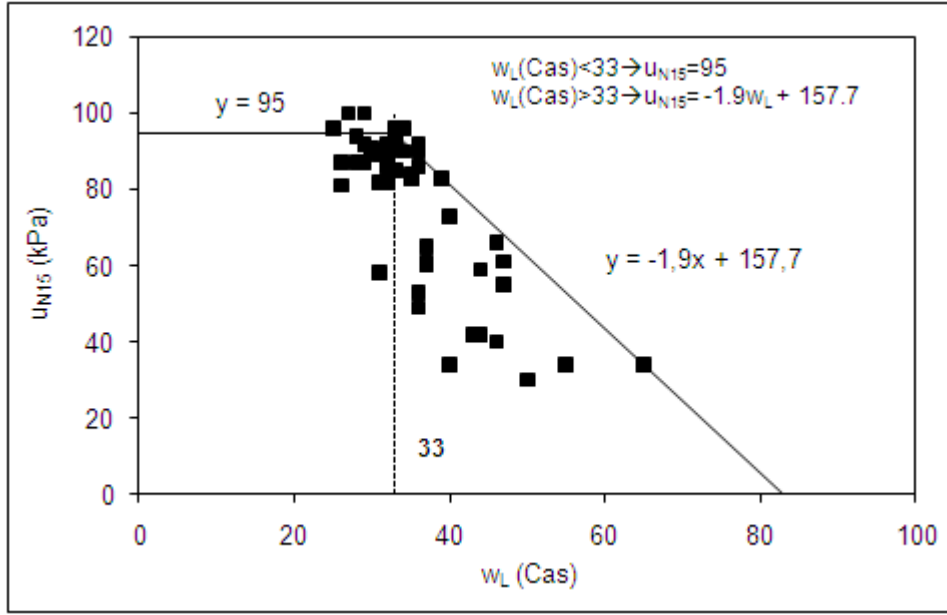
Şekil 6.22 Casagrande deney sonuçlarından bulunan a-b) sıvılık indisi ve c-d) w_n/w_L değerlerine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N)

6.3. Doğal Numunelerde DSS Değerlendirmesi (u_{N15})

Bu bölümde Adapazarı kent merkezinden sondajlar yardımıyla alınan doğal numuneler üzerinde yürütülen DSS deney sonuçları incelenmiştir. Sunulan eğrilerde zeminlerin fiziksel özelliklerine karşılık dinamik basit kesme deney sisteminde kesme aşamasında uygulanan 15. çevrim sonucu numune içinde ölçülen boşluk suyu basıncı değerleri (u_{N15}) noktalanmıştır. 15. çevrim sonundaki boşluk suyu basıncı değerinin göz önüne alınmasının nedeni Idriss&Boulanger (2004) 'e göre 7.5 büyüklüğündeki bir depremin etkisini yansıtmasıdır.

Şekil 6.23'de araziden alınan dinamik basit kesme deneyleri uygulanmış numunelerin Casagrande aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları noktalanmıştır. Noktalamaların sınır durum doğrularının da çizildiği şekile bakıldığında üzere likit limit değeri 33'den küçük olan numunelerde 15.çevrim sonunda 95-100 kPa yani çevre basıncına eş büyüklükteki boşluk suyu basıncı değerine ulaşıldığı görülmektedir. Dinamik deney sonuçları incelendiğinde CTX deneylerinde sıvılaştıran numunelerde 100 kPa boşluk suyu basıncı değerine ulaşılırken DSS deneylerinde bu değer 95 kPa civarında kalmaktadır. Bu nedenle DSS deney sonuçlarının irdelendiği aşağıdaki şekillerde üst sınır durum doğruları U_{15} için 95 kPa değerinden çizilmiştir. CTX deneylerde 36 olan bu eşik değeri ise DSS deneylerinde Adapazarı kriterini de teyit eder şekilde 33 değerinde kalmıştır. Bu eşik değerden daha büyük likit limit değerine sahip numunelerde ise ulaşılan boşluk suyu basıncı likit limit değeriyle doğru orantılı olarak azalmaktadır. Örneğin likit limit değerinin 50'nin üzerinde ölçüldüğü yani yüksek plastisiteli

numunelerde boşluk suyu basıncının 60 kPa'ı yani çevre basıncının % 65'ini geçemediği görülmektedir.



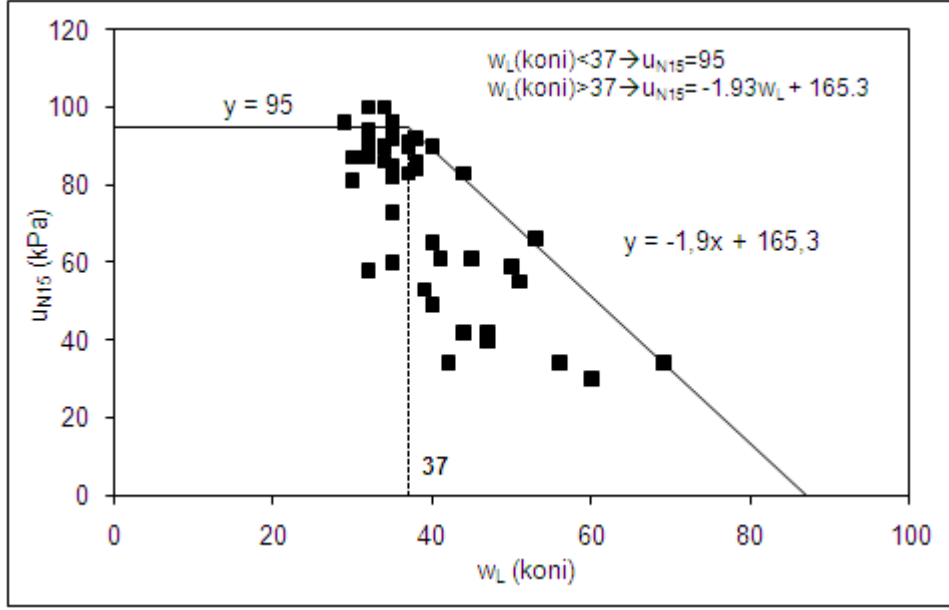
Şekil 6.23 Likit limit (Casagrande) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-DSS)

Şekil 6.23'e göre aşağıdaki denklemleri yazmak mümkündür:

$$\begin{aligned} w_{L(cas)} < 33 &\rightarrow u_{N15} = 95 & (6.19) \\ w_{L(cas)} > 33 &\rightarrow u_{N15} = -1.9 \cdot w_L + 157.7 \end{aligned}$$

Bu denklemler Casagrande aletinde denenen numunenin alabileceği likit limit değerlerine karşılık dinamik basit kesme deney sisteminde (DSS) kesme aşamasında 15. çevrim sonucunda beklenebilecek en büyük boşluk suyu basıncı değerlerini ifade etmektedir.

Şekil 6.24'de koni düşürme aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basıncı değerleri noktalanmıştır. Bu durumda koni düşürme ile yapılan deney sonuçlarına göre ölçülen likit limit değerinin 37'den daha büyük değerlerinde boşluk suyu basıncının 95 kPa'a ulaşmadığı diğer bir deyişle sıvılaşma olayının belirmesinin mümkün olmayacağı ifade edilebilir. Koni düşürme ile Casagrande aletlerinden elde edilen likit limit değerleri arasında ortalama 4 birimlik bir fark oluşması Şekil 6.23 ile Şekil 6.24 arasındaki bu farkın belirmesine neden olmaktadır.



Şekil 6.24 Likit limit (koni düşürme) değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-DSS)

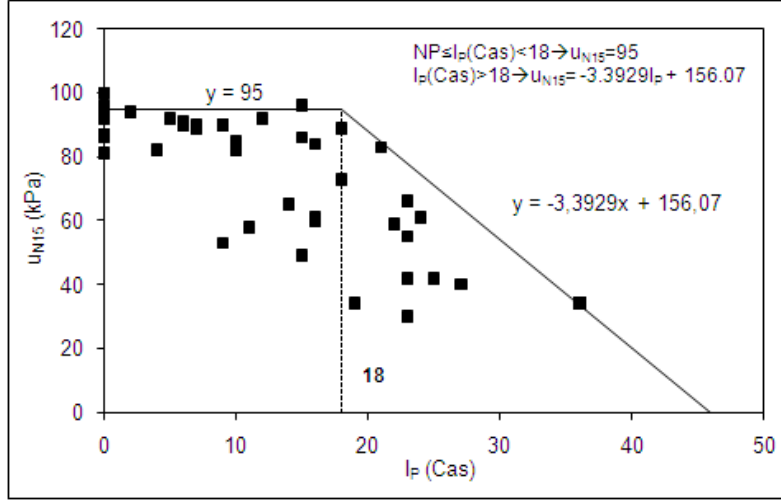
Şekil 6.24'e göre aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$w_{L(koni)} < 37 \rightarrow u_{N15} = 95 \quad (6.20)$$

$$w_{L(koni)} > 37 \rightarrow u_{N15} = -1.9 \cdot w_L + 165.3$$

Bu denklemler koni düşürme aletinde denenen numunenin alabileceği likit limit değerlerine karşılık dinamik basit kesme aletinde (DSS) kesme sırasında 15. çevrim sonucunda gösterebilecekleri en büyük boşluk suyu basıncı değerlerini ifade etmektedirler. Görüldüğü gibi sınır durum doğrularının ikincisinin eğimi Şekil 6.24'teki yani Casagrande deneyinde elde edilen likit limit değerine göre çizilen doğrunun eğimi ile aynı olup iki şekil arasındaki fark iki sınır durum doğrusu arasındaki eşik değerden kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.25'te Casagrande aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit sonuçlarından elde edilen plastisite indisi değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları noktalanmıştır. Bu durumda plastisite indisi değerinin 18'den büyük olan değerlerinde sıvılaşmanın görülmesi mümkün değildir denilebilir. Şekil 6.25, Şekil 6.4 (CTX $u_{N15} - I_{p(Cas)}$) ile karşılaştırıldığında DSS deneylerinde elde edilen sınır durum doğruları arasındaki eşik değerinin CTX deneylerinden elde edilen eşik değer ile aynı yani 18 olduğu görülmektedir. İki şekil arasındaki önemli fark, CTX grafiğindeki ikinci sınır durum eğrisinin 2.derece polinom, DSS grafiğinde ise doğru olması olarak dikkat çekmektedir.

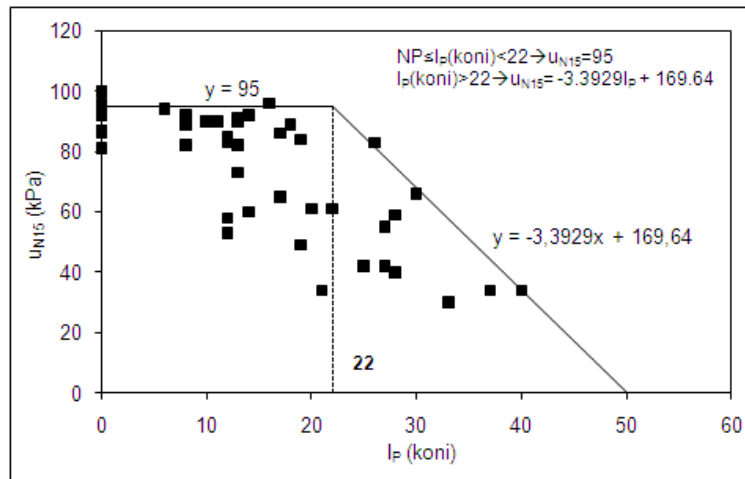


Şekil 6.25 Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (DSS)

Şekil 6.25'e göre aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$\begin{aligned} NP \leq I_p(\text{Cas}) < 18 &\rightarrow u_{N15} = 95 & (6.21) \\ I_p(\text{Cas}) > 18 &\rightarrow u_{N15} = -3.3929 I_p + 156.07 \end{aligned}$$

Şekil 6.26'da ise koni düşürme aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit sonuçlarından elde edilen plastisite indisi değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları noktalanmıştır. Şekle göre plastisite indisi değerinin 22'den büyük değerlerinde 15.çevrimde ulaşılan boşluk suyu basıncı değerinin çevre basıncı değerine ulaşması beklenmeyecektir sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.26 Koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (DSS)

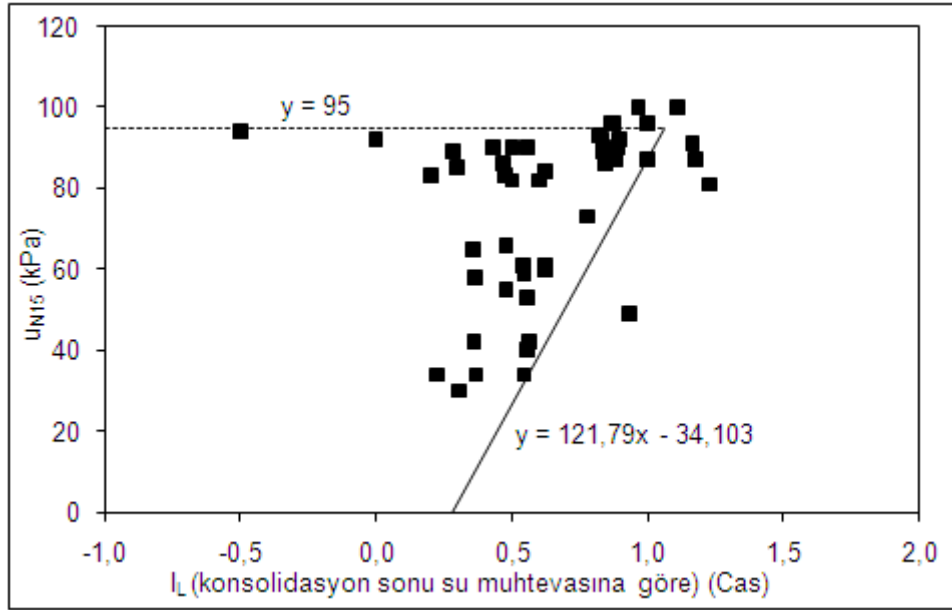
Likit limit ilişkisinde olduğu gibi plastisite indisine karşı çizilen grafiklerde de likit limit ölçüm sonuçları arasındaki ortalama 4 birimlik fark nedeniyle Casagrande ve koni düşürme sonuçlarına göre belirlenen plastisite indisi eşik değerlerinde 4 birimlik fark bulunmaktadır. Bunun yanında Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'daki ikinci sınır durum doğrularının eğimleri yine eşit

kalmaktadır. Şekil 6.26'ya göre sınır durum doğruları için aşağıdaki denklemleri yazmak mümkündür. Bu denklemler koni düşürme yöntemi ile elde edilen plastisite indisi değerine göre numunede 15 çevrimde ulaşılabilecek en büyük boşluk suyu basıncı değerini vermektedir.

$$NP \leq I_{p(koni)} < 22 \rightarrow u_{N15} = 95 \quad (6.22)$$

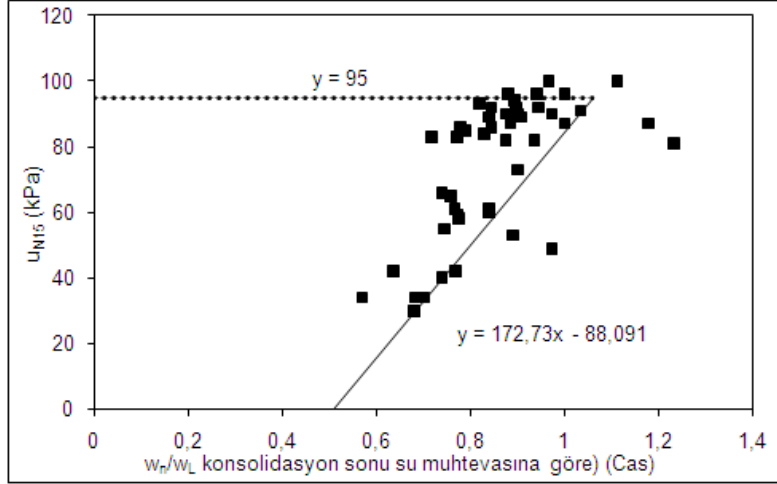
$$I_{p(koni)} > 22 \rightarrow u_{N15} = -3.3929 \cdot I_p + 169.64$$

Şekil 6.27'ye Casagrande deney sonuçlarından bulunan sıvılık indisi değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) gösterilmektedir. Zeminin katı halden sıvı hale geçişi ile gelişen boşluk suyu basınçları arasında grafikteki denklemlerle çizilebilecek bir sınır değeri söz konusu olabilir ancak, sıvılık indisinin katı hali ifade ettiği 0 değerinde bile çevre basıncının 95 kPa' a erişmesi şaşırtıcıdır. Şeklin oluşturulmasında konsolidasyon sonrası su muhtevalarının kullanılmıştır çünkü DSS deneyinin kesme aşamasında boşluk suyu basıncı artışının belirdiği numune konsolide olmuş ve başlangıçtaki halinden bir miktar su kaybetmiş haldedir. Buna göre sıvılık indisi değerinin 1 civarında olduğu durumlarda boşluk suyu basıncı değeri de 95 kPa'a yaklaşmaktadır. Grafiklerde çizilen sınır durum doğrularının denklemleri şekil üzerinde görülmektedir.



Şekil 6.27 Casagrande deney sonuçlarından bulunan sıvılık indisi değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15})

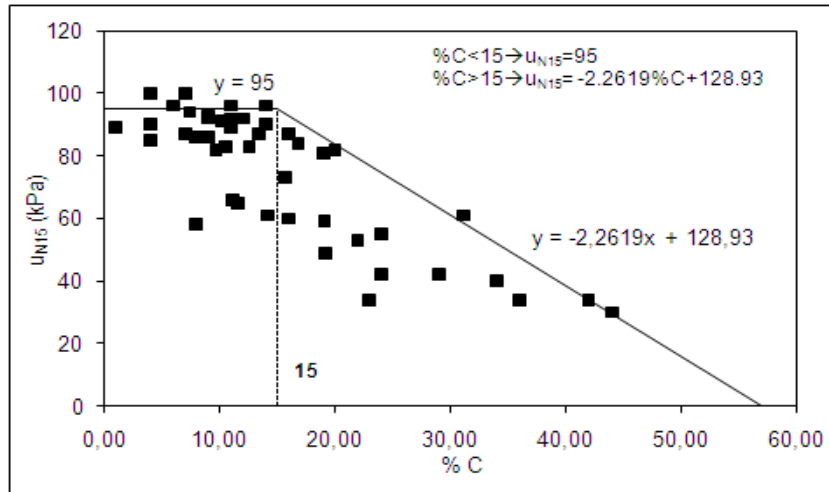
Şekil 6.28'de ise Casagrande deney sonuçlarından bulunan w_r/w_L değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) gösterilmektedir. Buradan da w_r/w_L göre sıvılık indisi değerinin 1 civarında olduğu durumlarda boşluk suyu basıncı değeri de 90 kPa'a yaklaşmaktadır. Grafiklerde çizilen sınır durum doğrularının denklemleri şekil üzerinde görülmektedir.



Şekil 6.28 Casagrande deney sonuçlarından bulunan w_r/w_L değerlerine karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15})

Şekil 6.29'da denenen numuneler üzerinde ölçülen kil yüzdelere karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları noktalanmıştır. Grafikten görüleceği üzere $u_{N15}=95$ kPa değerini veren kil yüzdeleri 15'e kadar ulaşmaktadır. Sıvılaştırmanın tayininde önemli bir ayıraç olan, çeşitli araştırmacılar tarafından %10 ila 20 arasında değerler önerilen kil yüzdesinin CTX deney verilerine göre %10 (%10-20 arası test bölgesi) iken DSS deney verilerine göre %15 olarak sunulması mümkün görülmektedir. Bu durumda Şekil 6.29'a göre aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$\begin{aligned}
 0 \leq \%C < 15 &\rightarrow u_{N15} = 95 \\
 \%C > 15 &\rightarrow u_{N15} = -2.2619 \cdot \%C + 128.93
 \end{aligned}
 \tag{6.23}$$



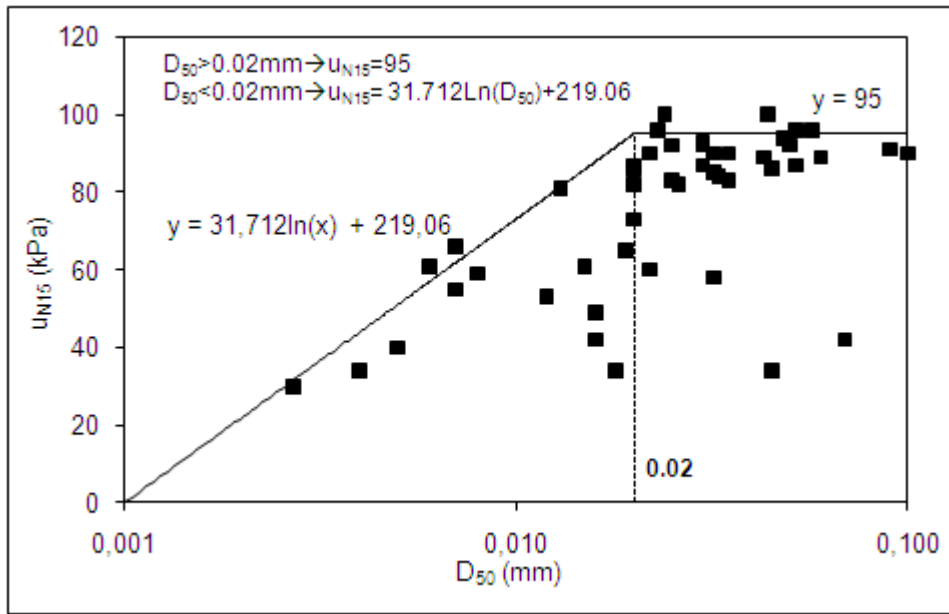
Şekil 6.29 Kil yüzdesine (%C) karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-DSS)

Şekil 6.30'da denenen numuneler üzerinde ölçülen ortalama dane boyutlarına (D_{50}) karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları noktalanmıştır. Şekil 6.30'dan görüleceği üzere ortalama dane boyutunun (D_{50}) 0.02 mm den küçük olduğu

durumlarda sivilaşmanın oluşması mümkün görülmemektedir. Bu boyuttan daha büyük ortalama dane boyutuna sahip numunelerin ise neredeyse yarısından fazlası sivilaşmaya müsait iken diğer numunelerde sivilaşmanın başlangıcı için yeterli olan boşluk suyu basınçlarına ulaşamadığı görülmektedir. Tabii bu sonucun irdelenmesinde sivilaşmayı yöneten fiziksel özelliğin sadece dane boyutu olmadığı gerçeği de unutulmamalıdır. Bunun yanında CTX verilerine göre 0.012 mm olarak belirlenen ortalama dane boyutunun DSS deney verilerine göre beliren değerinin (0.02 mm) Adapazarı kriterini tasvip eder büyüklükte olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca yarı logaritmik eksen takımında oluşturulan Şekil 6.30'a göre aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$D_{50} > 0.02 \rightarrow u_{N15} = 95 \quad (6.24)$$

$$D_{50} < 0.02 \rightarrow u_{N15} = 31.712 \ln(D_{50}) + 219.06$$



Şekil 6.30 Ortalama Dane boyutuna (D_{50}) karşılık 15 çevrim sonunda numune içinde gelişen boşluk suyu basınçları (u_{N15}) (doğal numune-DSS)

6.4. Doğal Numunelerde DSS Değerlendirmesi ($N_{\gamma=\pm\%5}$)

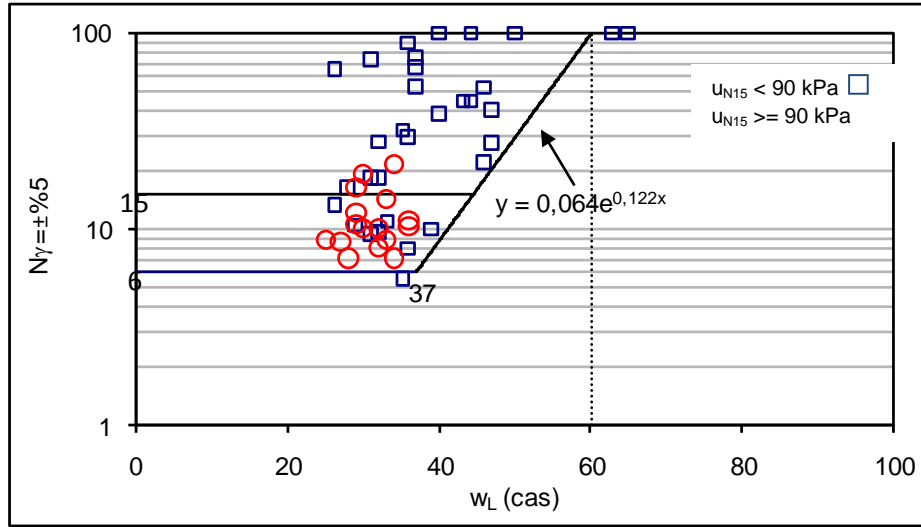
Bu bölümde doğal numuneler üzerinde gerçekleştirilen DSS deneylerinde $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli çevrim sayıları zeminlerin değişik fiziksel özelliklerine karşı noktalanmıştır.

Grafikler oluşturulurken 15 çevrim sırasında boşluk suyu basınçlarının aldığı değerler de temsil edilmeye çalışılmıştır. Boşluk suyu basıncının 15 çevrimde 90 kPa'dan küçük olduğu durumlar kutu (\square), 90 kPa'a eşit veya ondan büyük değer aldığı durumlar ise yuvarlak (\circ) simgelerle temsil edilmiştir. DSS deneyinde 15. çevrimde 90 kPa boşluk suyu basıncı oluşması sivilaşmaya karşılık kabul edilirse numunelerin büyük çoğunluğunda 15 çevrim deformasyon açısından da yenilmeye karşılık kabul edilecek $\%5$ değerine ulaşmaktadır. Aynı işlem deney sırasında elde edilen $r_{u(maks)}$ değerine göre yapıldığında gösterim aynı sonucu vermemiştir.

DSS deneyleri yapılırken 100 çevrim sayısı bir sınır değer olarak alınmıştır, bu nedenle şekillerde %5 deformasyona ulaşmak için gerekli çevrim sayısı maksimum 100 olarak gösterilmiştir.

Şekiller üzerine bazı sınır durum eğri veya doğruları çizilirken tüm dağılımın genel bir değerlendirilmesi yapılmış, göze çarpan eğilimler dışında kalan noktalar göz ardı edilmiştir.

Örneğin Şekil 31’de “ $y=0.064e^{0.122x}$ ” denklemi ile gösterilen eğri tüm noktaların eğilimini yansıtmamakta, ancak artan likit limitlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayılarını ifade etmektedir. Böylece üzerinde denklemi ile verilen eğrinin yapay olarak oluşturulduğu vurgulanmaktadır.



Şekil 6.31 Likit limit (Casagrande) değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)

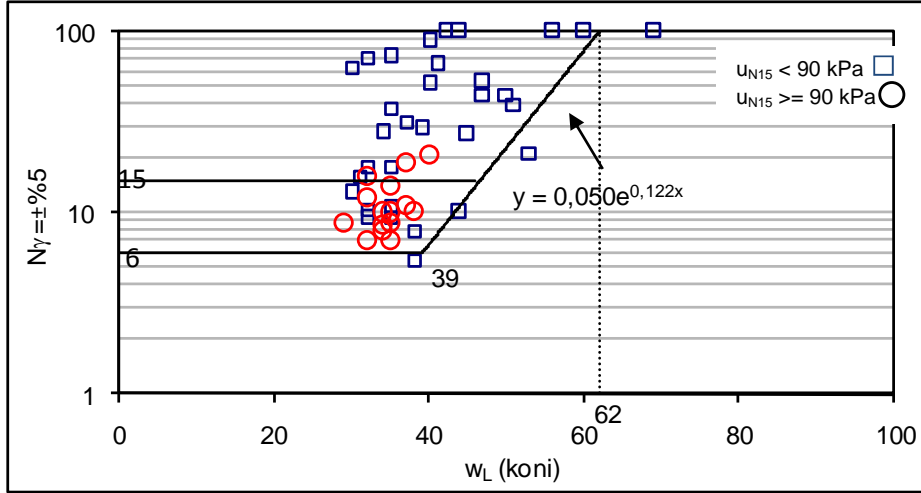
Şekil 6.31’ den likit limitin 60’i aştığı durumlarda %5 deformasyona 100 çevrimden sonra ulaşılabileceği anlaşılmaktadır. Şekil 31’e göre hiçbir numunede 6 çevrimden az çevrim sayısında %5 deformasyona ulaşılmamaktadır, $37 < w_L < 60$ olması halinde aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$N_{\gamma=\pm\%5} = 0.064 e^{0.122w_{Lcas}} \quad (6.25)$$

Bu denklem Casagrande aletinde denenen numunenin alabileceği likit limit değerlerine karşılık dinamik kesme kutusunda (DSS) $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayılarını gösteren limit durumu ifade etmektedir. 15 çevrime bakıldığında 90 kPa boşluk suyu basıncına ulaşılan numunelerin büyük çoğunluğunda %5 deformasyona da ulaşılmaktadır.

Şekil 6.32’de koni düşürme aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayıları noktalanmıştır. Şekil 32’ye göre $39 < w_L < 62$ olması durumunda aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$N_{\gamma=\pm\%5} = 0.050 e^{0.122w_{Lkoni}} \quad (6.26)$$



Şekil 6.32 Likit limit (koni düşürme) değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)

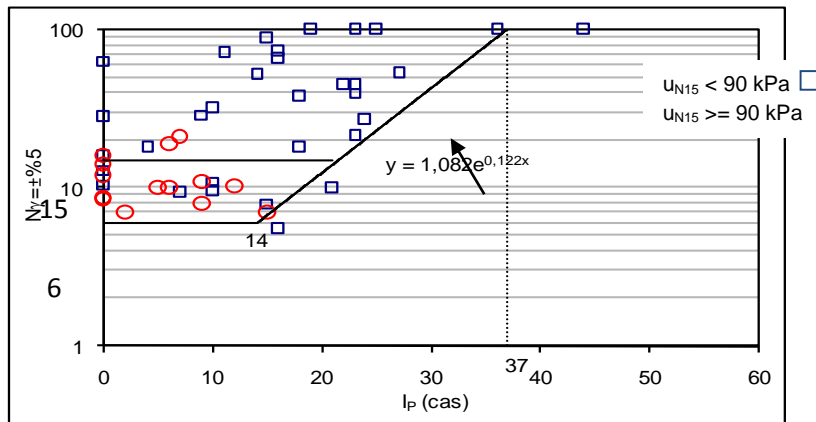
Bu denklem koni düşürme aletinde denenen numunenin alabileceği likit limit değerlerine karşılık dinamik kesme kutusunda (DSS) $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayılarını gösteren limit durumu ifade etmektedir. Şekil 6.32'den de 15 çevrimde 90 kPa boşluk suyu basıncı değerine ulaşılan numunelerin büyük çoğunluğunda % 5 deformasyona ulaşıldığı gözlemlenmektedir.

Şekil 6.33'te Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayıları noktalanmıştır. Şekil 6.33'e göre Plastisite İndisi ne olursa olsun %5 deformasyona ulaşmak için en az 6 çevrim yapılması gerekmektedir.

Şekil 6.33'e göre $14 < I_{p(cas)} < 37$ sınır durumu ifade eden aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$N_{\gamma=\pm\%5} = 1.082 e^{0.122I_{p(cas)}} \quad (6.27)$$

Şekil 33'e göre $I_{p(cas)} > 37$ ise %5 deformasyona ulaşmak için 100 çevrimin aşılması gerekmektedir.



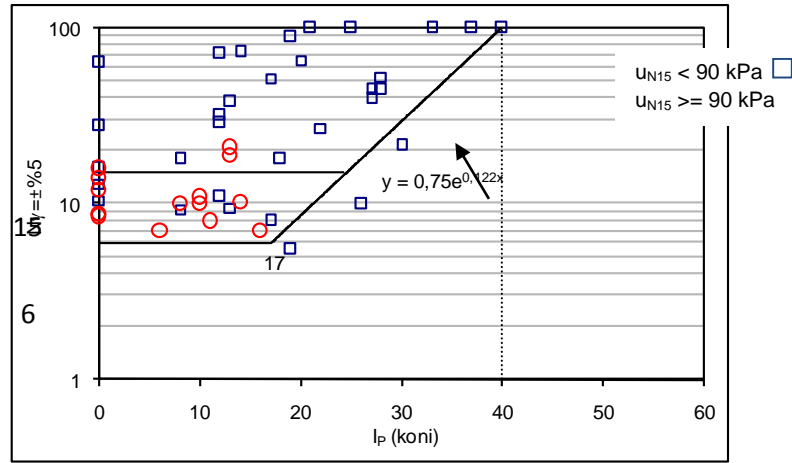
Şekil 6.33 Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)

Şekil 6.34'te koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayıları noktalanmıştır. Şekil 6.34'e göre $17 < I_{p(koni)} < 40$ sınır durumu ifade eden aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$N_{\gamma=\pm\%5} = 0.75 e^{0.122I_{p(koni)}} \quad (6.28)$$

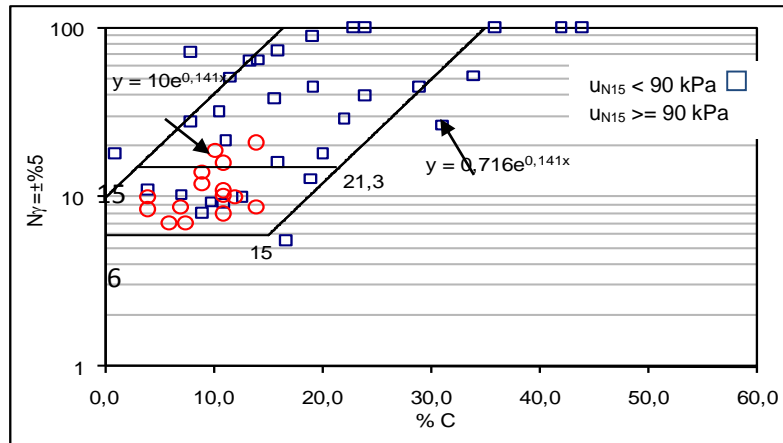
Bu durumda koni düşürme ile bulunan I_p ' nin sınır eğrisinin Casagrande' ye göre bulunan I_p ile çizilen sınır eğrisine göre aynı eğimde olduğu ancak sağa doğru ötelendiği göze çarpmaktadır. Buna göre $I_p > 40$ ise $\%5$ deformasyona ulaşmak için 100 çevrimin aşılması gerekmektedir. Şekil 6.34'e göre Plastisite İndisi ne olursa olsun $\%5$ deformasyona ulaşmak için en az 6 çevrim yapılması gerekmektedir.

Şekil 6.35'te denenen numuneler üzerinde ölçülen kil içeriğine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) noktalanmıştır. Grafikten görüleceği üzere $\%15$ ' den daha az kil içeriğine sahip numunelerin hemen tümü 15.



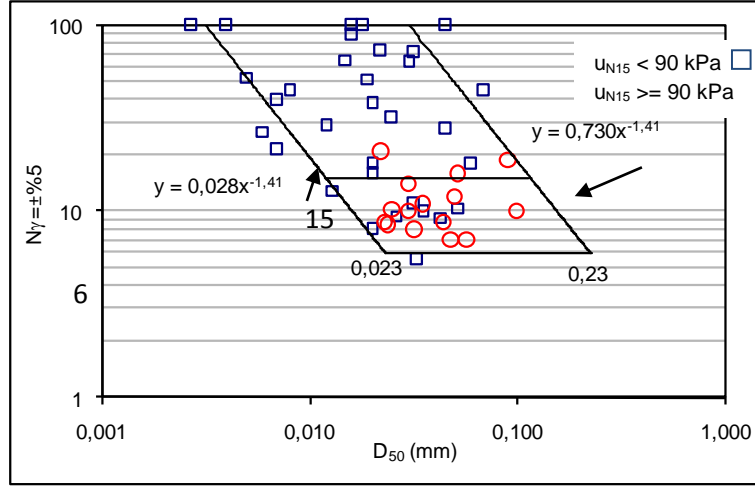
Şekil 6.34 Koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)

çevrim civarında 90 kPa boşluk suyu basıncı göstermişse $\pm\%5$ deformasyona da ulaşmıştır. Grafikten noktalamaların bir bant arasında yoğunlaştığı görülmekte ve bu bantın sınırlarını ifade eden denklemler şekil üzerinde verilmektedir.



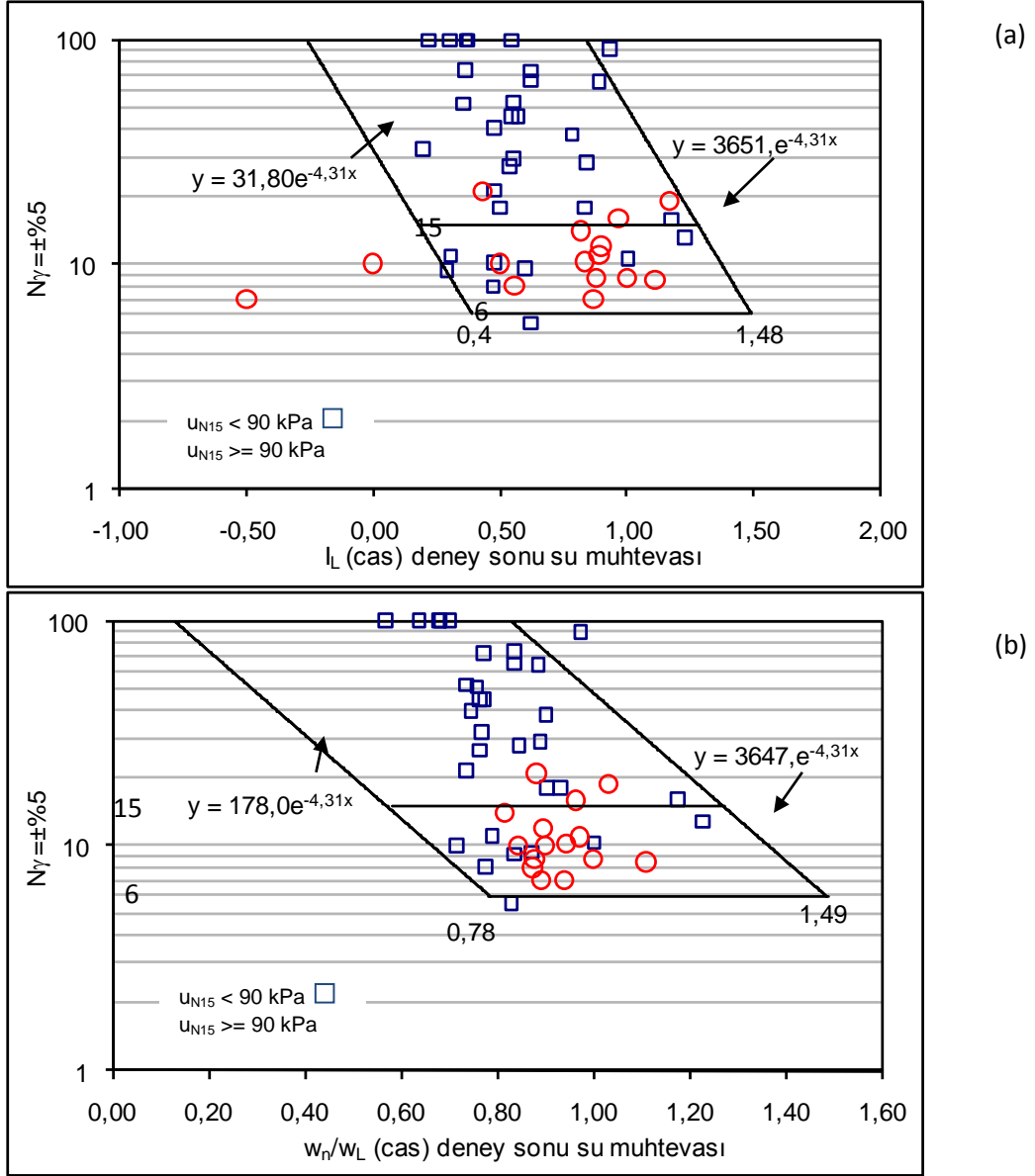
Şekil 6.35 Kil yüzdesine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları

Şekil 6.36'da denenen numuneler üzerinde ölçülen ortalama dane boyutlarına (D_{50}) karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) her iki eksen de logaritmik olacak şekilde noktalanmıştır. Şekil 6.36'dan görüleceği üzere ortalama dane boyutunun (D_{50}), $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) üzerinde bir ilişkisi vardır. D_{50} ne olursa olsun % 5 deformasyona ulaşmak için en az 6 çevrim yapılması gerekmektedir. Bu grafikten de 15 çevrimde 90 kPa'a ulaşıyorsa %5 deformasyona ulaşıyor gözükmektedir. Ayrıca ortalama dane boyutu arttıkça $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayılarının (N) azaldığını söylemek yanlış olmayacaktır.



Şekil 6.36 Ortalama dane boyutuna (D_{50}) karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (doğal numune-DSS)

Şekil 6.37'de Casagrande deney sonuçlarından bulunan sıvılık indisi (Şekil 6.37a) ve w_n/w_L oranlarına (Şekil 37b) karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) gösterilmektedir.



Şekil 6.37 Casagrande deney sonuçlarından bulunan a) sıvılık indisi ve b) w_n/w_L değerlerine karşılık $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)

6.5. Doğal Numunelerde DSS Değerlendirmesi ($N_{\gamma=\pm\%2.5}$)

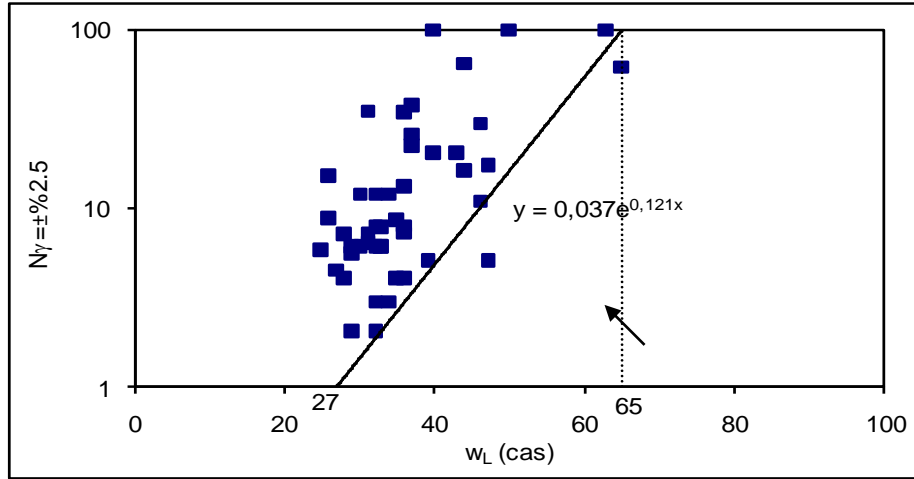
Bu bölümde doğal numuneler üzerinde gerçekleştirilen DSS deney sonuçlarından elde edilen $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları zeminlerin değişik fiziksel özelliklerine karşılık noktalanmışlardır (Şekil 6.38-6.43). Grafiklerden görüleceği üzere sınır eğrilerinin konumu $\pm\%5$ deformasyondakilere nazaran bir miktar ötelenmiştir. Yani belirtilen deformasyona daha az çevrim sayısında ulaşılmaktadır. Bunun yanında eğrilerin eğimleri değişmemiştir. Sadece denklemlerdeki katsayılar değişim olmuştur.

Şekil 38'te eğrinin sağında noktalanmış olan 2 adet nokta bulunmaktadır. Bunlar eğri çiziminde değerlendirmeye katılmayan, herhangi bir sebeple (deney hatası) genel eğilimi

bozan noktalar olarak değerlendirilmiştir. Şekil 6.38'e göre $w_L < 65$ olması halinde aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$N_{\gamma=\pm 2.5} = 0.037 e^{0.121w_{Lcas}} \quad (6.29)$$

Bu denklem Casagrande aletinde denenen numunenin alabileceği likit limit değerlerine karşılık dinamik kesme kutusunda (DSS) ± 2.5 deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayılarını gösteren limit durumu ifade etmektedir. Ayrıca Şekil 38'den likit limitin 65'i aştığı durumlarda %2.5 deformasyona 100 çevrimden sonra ulaşılabacağı anlaşılmaktadır

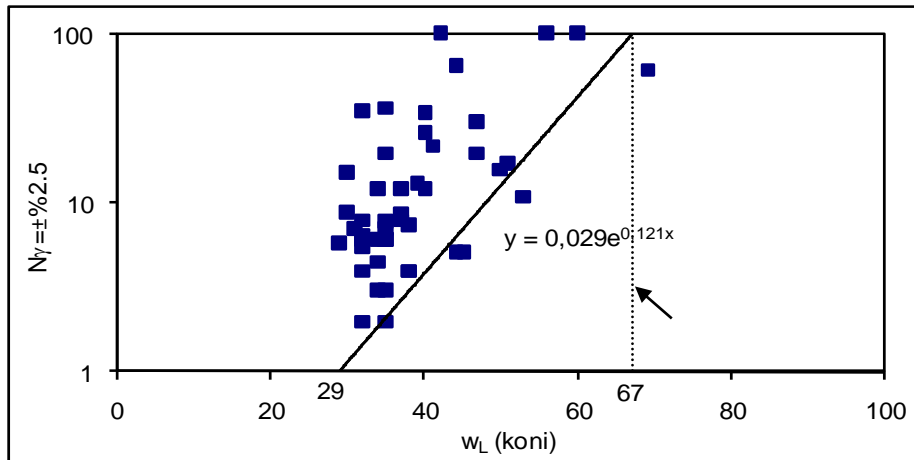


Şekil 6.38 Likit limit (Casagrande) değerlerine karşılık ± 2.5 deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)

Şekil 39'da koni düşürme aleti ile ölçümü gerçekleştirilen likit limit değerlerine karşılık ± 2.5 deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayıları noktalanmıştır.

Şekil 6.39'a göre aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$N_{\gamma=\pm 2.5} = 0.029 e^{0.121w_{Lkoni}} \quad (6.30)$$

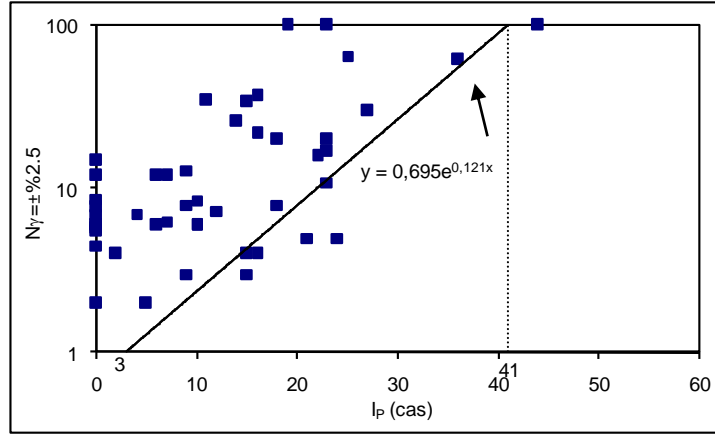


Şekil 6.39 Likit limit (koni düşürme) değerlerine karşılık ± 2.5 deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (doğal numune-DSS)

Bu denklem koni düşürme aletinde denenen numunenin alabileceği likit limit değerlerine karşılık dinamik kesme kutusunda (DSS) $\pm\%2.5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayılarını gösteren limit durumu ifade etmektedir.

Şekil 6.40'ta Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayıları noktalanmıştır. Şekil 40'a göre sınır durumu ifade eden aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$N_{\gamma=\pm\%2.5} = 0.695 e^{0.121I_p(\text{cas})} \quad (6.31)$$

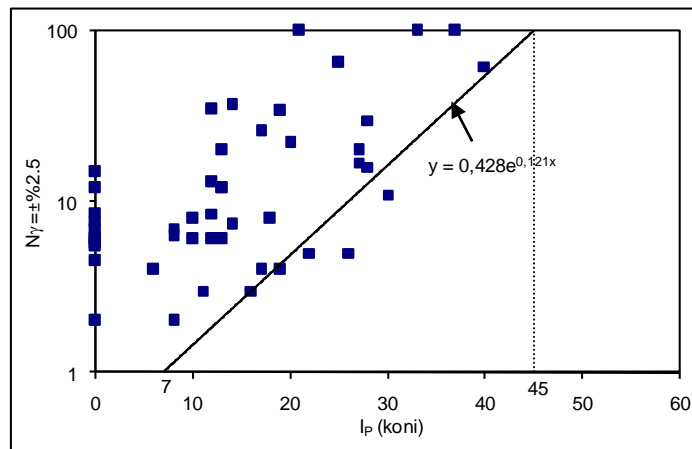


Şekil 6.40 Casagrande deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (DSS)

Şekil 6.41' de koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan minimum çevrim sayıları noktalanmıştır. Şekil 41' e göre sınır durumu ifade eden aşağıdaki denklem yazılabilir:

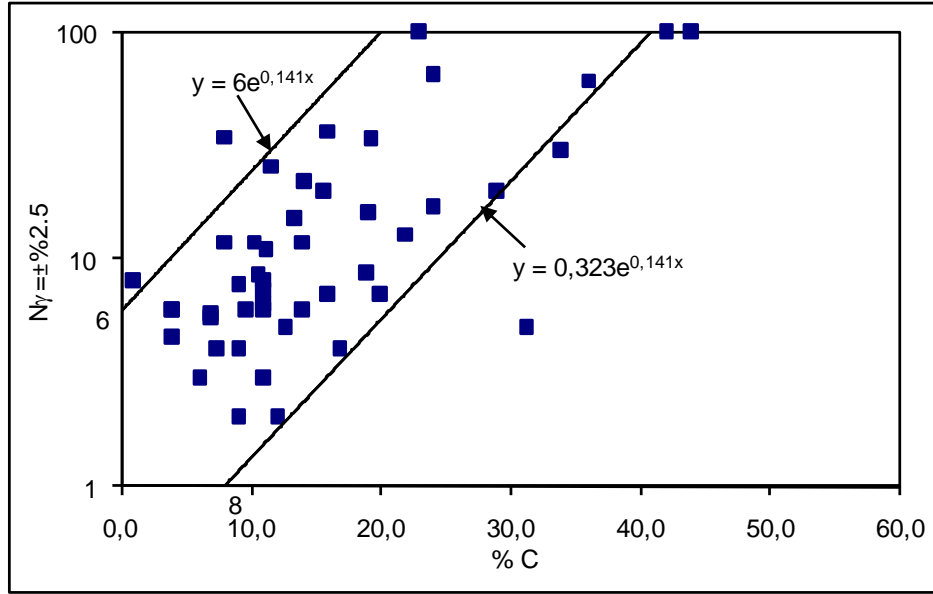
$$N_{\gamma=\pm\%2.5} = 0.428 e^{0.121I_p(\text{koni})} \quad (6.32)$$

$I_p > 45$ olması durumunda $\%2.5$ deformasyon oluşması için en az 100 çevrim yapılması gerekmektedir.



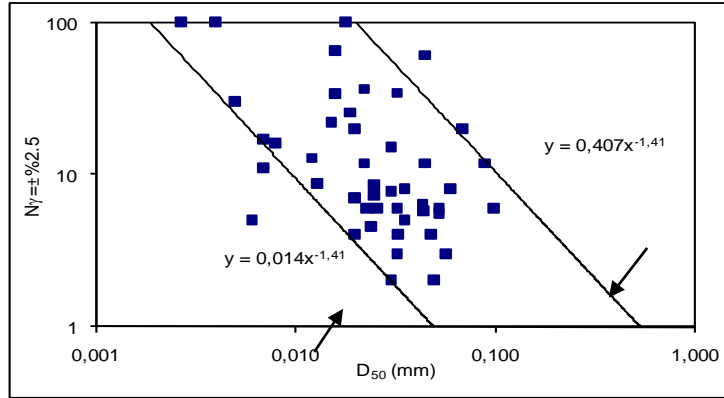
Şekil 6.41 Koni düşürme deney sonuçlarından bulunan plastisite indisine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (DSS)

Şekil 6.42’de denenen numuneler üzerinde ölçülen kil içeriğine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) noktalanmıştır.



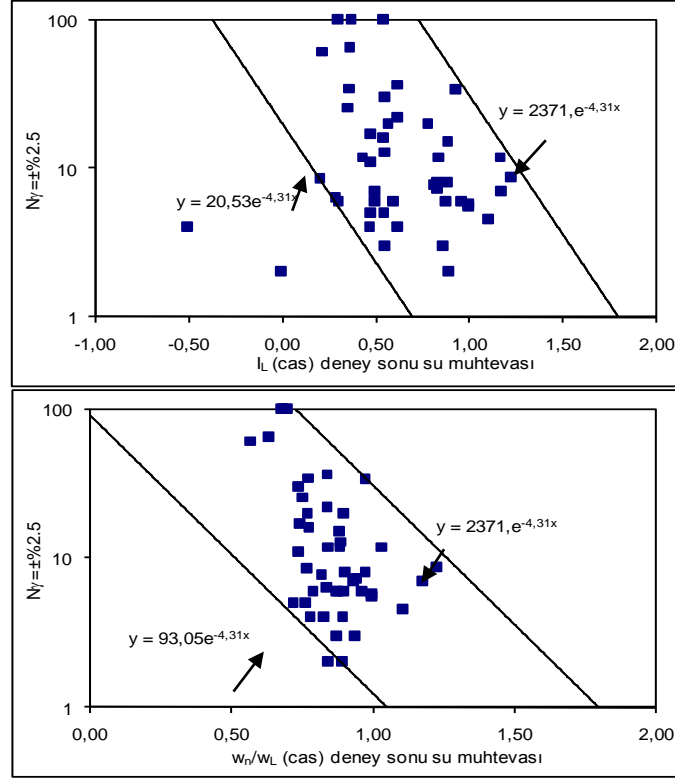
Şekil 6.42 Kil yüzdesine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (doğal numune-DSS)

Şekil 43’te denenen numuneler üzerinde ölçülen ortalama dane boyutlarına (D_{50}) karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) her iki eksen de logaritmik olacak şekilde noktalanmıştır. Çizilen sınır durumlar arasındaki bandın genişliği oldukça fazla olmakla birlikte ortalama dane boyutu arttıkça $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayılarının (N) azaldığını söylemek yanlış olmayacaktır.



Şekil 6.43 Ortalama Dane boyutuna (D_{50}) karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (doğal numune-DSS)

Şekil 6.44’te Casagrande deney sonuçlarından bulunan sıvılık indisi (Şekil 44a) ve w_n/w_L oranlarına (Şekil 6.44b) karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) gösterilmektedir.



(a)

(b)

Şekil 6.44 Casagrande deney sonuçlarından bulunan a) sıvılık indisi ve b) w_n/w_L değerlerine karşılık $\pm\%2.5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları (N) (DSS)

6.6. Doğal Numunelerin Genel Değerlendirmesi

7.5 büyüklüğündeki bir depremin yaklaşık olarak 15 çevrime karşılık geleceği birtakım araştırmacılar tarafından ileri sürülmüş ve genel kabul görmüştür. Dolayısı ile 15 çevrim sonunda boşluk suyu basınçlarının hücre basıncına eşit olması birincil sıvılaşmanın başlangıcını ve $\pm\%5$ deformasyona ulaşılması da yenilmenin tarifini karşıladığı kabul edilir. Bu sebeple doğal numunelerin CTX deney sonuçlarını konu alan bu bölümün önceki kısımlarında 15. çevrim sonucunda numune içinde gerçekleşen boşluk suyu basınçları (U_{N15}) ile $\pm\%2.5$ ve $\pm\%5$ deformasyonlara erişmek için gerekli olan çevrim sayıları ($N_{\epsilon=\pm\%2.5}$ - $N_{\epsilon=\pm\%5}$) irdelenmiştir.

Grafikler hem 15. çevrim sırasında gelişen boşluk suyu basınçlarına hem de $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli çevrim sayılarına karşılık likit limit, plastisite indisi, sıvılık indisi su muhtevası likit limit oranı, kil oranı ortalama dane boyutu gibi zeminin birtakım fiziksel özellikleri göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Grafiklerde sıvılaşmanın veya yenilmenin oluşması için gerekli sınır değerler gösterilmiştir. Aynı zamanda bunlar üzerinde sıvılaşmanın meydana gelemeyeceği fiziksel değerler de gösterilmiştir. Bununla birlikte her iki sınır değer arasında; boşluk suyu basınçlarının yaklaşık %85-100 arasında kaldığı ara bölgeler gösterilmiştir. Bu kısımlarda sıvılaşmanın sadece fiziksel büyüklüklerle tanımlanmasının yeterli olmayacağı kanısına varıldığından "test" alanı olarak sınırlandırılmıştır. Bu grafikler üzerinde elde olunan sonuçlar Çizelge 6.1' de özetlenmektedir.

Çizelge 6.1 CTX deneylerinde fiziksel özelliklerin sınır değerleri

	Birincil sınıflama için koşul	Test bölgesi koşulu	Sınıflamamaz koşulu
Likit Limit Casagrande (w_{Lcas})	$w_{Lcas} < 32$	$32 \leq w_{Lcas} \leq 36$	$w_{Lcas} > 36$
Likit Limit Koni Düşürme (w_{Lkoni})	$w_{Lkoni} < 31$	$31 \leq w_{Lkoni} \leq 39$	$w_{Lkoni} > 39$
Plastisite İndisi Casagrande (I_{Pcas})	$I_{Pcas} < 12$	$12 \leq I_{Pcas} \leq 18$	$I_{Pcas} > 18$
Plastisite İndisi Koni Düşürme (I_{Pkoni})	$I_{Pkoni} < 13$	$13 \leq I_{Pkoni} \leq 19$	$I_{Pkoni} > 19$
Kil İçeriği, % (C)	$C < 10$	$10 \leq C \leq 22$	$C > 22$
Ortalama Dane Boyutu, mm (D_{50})	$D_{50} > 0.025$	$0.012 \leq D_{50} \leq 0.012$	$D_{50} < 0.012$
Sıvılık İndisi Casagrande (I_{Lcas})	$I_{Lcas} > 0.90$	$0.35 \leq I_{Lcas} \leq 0.90$	$I_{Lcas} < 0.35$
Sıvılık İndisi Koni Düşürme (I_{Lkoni})	$I_{Lkoni} > 1.00$	$0.26 \leq I_{Lkoni} \leq 1.00$	$I_{Lkoni} < 0.26$
w_n/w_{Lcas}	$w_n/w_{Lcas} > 0.97$	$0.97 \leq w_n/w_{Lcas} \leq 0.80$	$w_n/w_{Lcas} < 0.80$
w_n/w_{Lkoni}	$w_n/w_{Lkoni} > 0.74$	$0.74 \leq w_n/w_{Lkoni} \leq 1.00$	$w_n/w_{Lkoni} < 1.00$

Çizelge 6.2’de ise DSS deneylerinde 15. çevrimde boşluk suyu basıncının 95 kPa’a ulaşması durumu için sınıflamaya yönelik fiziksel özelliklerin sınır değerleri verilmektedir. Çizelge incelendiğinde, DSS deney verilerinin sınıflama koşulunu sağlayan fiziksel parametrelerin Adapazarı kriterinin güncel koşullarını onaylar büyüklüklerde değerler aldığı görülmektedir.

Çizelge 6.2 DSS deneylerinde fiziksel özelliklerin sınır değerleri

	Sınıflama için koşul
Likit Limit Casagrande (w_{Lcas})	$w_{Lcas} \leq 33$
Likit Limit Koni Düşürme (w_{Lkoni})	$w_{Lkoni} \leq 37$
Plastisite İndisi Casagrande (I_{Pcas})	$I_{Pcas} \leq 18$
Plastisite İndisi Koni Düşürme (I_{Pkoni})	$I_{Pkoni} \leq 22$
Kil İçeriği, % (C)	$C \leq 15$
Ortalama Dane Boyutu, mm (D_{50})	$D_{50} > 0.02$
Sıvılık İndisi Casagrande (I_{Lcas})	$I_{Lcas} > 1.02$
w_n/w_{Lcas}	$w_n/w_{Lcas} > 1.06$

6.7. Adapazarı Kriterinin Geliştirilmesi

Bol ve diğ. (2010)’ nin sınıflanan ve sınıflamayan sitelerden elde etmiş oldukları siltli numuneler üzerinde yapmış oldukları detaylı arazi ve laboratuvar deney sonuçlarına göre $M_w \geq 7$ olan bir deprem sırasında siltin sınıflaması için aşağıda sıralanan tüm şartların karşılanması gerekmektedir:

- a) Likit limit (çarpmalı/Casagrande) 33 veya daha düşük olmalı,
- b) Sıvılık indisi 0.9' dan daha büyük olmalı (NP zeminlerde aynı sınır w_n/w_L oranı olarak kullanılabilir),
- c) Kil içeriği %10' dan az olmalı ($D < 0.002\text{mm}$),
- d) Ortalama dane boyutu 0.02 mm' den daha büyük olmalı.

Araştırmacılar; zeminlerin likit limitinin 25 - 33 aralığında, kil içeriğinin %10 – 15 oranında ve dane boyutunun 0.02 ile 0.06 mm arasında olduğu durumlarda “test” bölgesine girildiğini ve bu bölgeler giren numunelerin sıvılaşmış sıvılaşmayacağına karar vermek için ileri deneylerin yapılması gerektiğini söylemişlerdir.

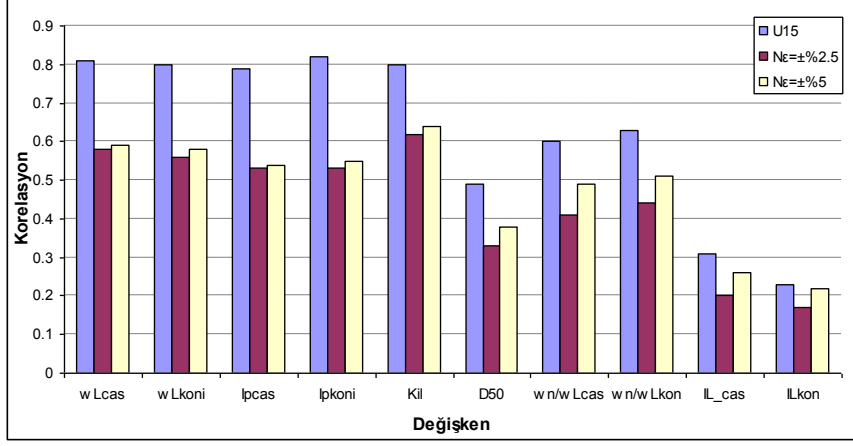
6.7.1. Etkin Parametre Seçimi

Zeminlerin çeşitli fiziksel özelliklerine karşı CTX deney sonuçlarının noktalandığı bu bölüm grafiklerinin tümünde ikili ilişkiler saptandığı söylenebilir. Ancak, bu fiziksel özelliklerden hangilerinin kullanılarak sağlam bir sıvılaşma kriteri ortaya atılacağı problemi hala karşımızda durmaktadır. Bunu çözmek için noktalamaların yelpazesinin daha geniş tutulması istenmiştir. Bunu sağlamak için bu bölümde anlatılan doğal numuneler CTX noktalamalarına ek olarak, doğal numuneler DSS sonuçları ile, karışım numuneleri CTX ve DSS sonuçları birlikte irdelenmiştir. Bu yoldan 120' ye yakın noktanın bir arada incelenme olanağı doğmuştur. Tüm fiziksel özellikler ile dinamik deney sonuçları bir çizelgede toplanmış ve aralarındaki korelasyonlar değerlendirilmiştir. Çizelge 6.3'te tüm fiziksel özellikler karşılık gelen korelasyon katsayıları görülmektedir. Çizelge 6.3'te negatif korelasyon katsayıları incelenen fiziksel özelliğe karşılık dinamik deney sonucunun azalan bir eğilimle ilişki kurduğunu, pozitif katsayılar ise artan bir eğilimi temsil etmektedir. Çizelgenin ikinci bölümünde korelasyon katsayılarının mutlak değerleri alınmıştır. Bunun sebebi u_{N15} , $N_{2.5}$ ve N_5 dinamik özelliklerine karşılık gelen korelasyon katsayılarının tüm fiziksel özellikler için ortalamasını bulmak içindir. Böylelikle hangi parametrelerin dinamik deney sonuçlarına daha etkin olarak karşılık geldiğini anlamının mümkün olacağı düşünülmüştür.

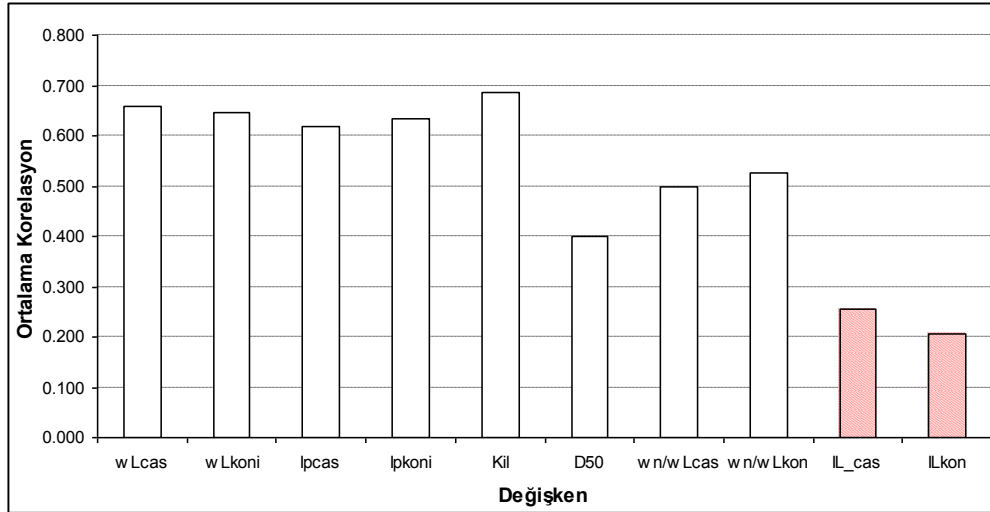
Çizelge 6.3 Fiziksel özellikler karşılık gelen korelasyon katsayıları

	w_{Lcas}	w_{Lkoni}	I_{pcas}	I_{pkoni}	% C	D_{50}	w_n/w_{Lcas}	w_n/w_{Lkon}	I_{Lcas}	I_{Lkoni}
u_{N15} (kPa)	-0.81	-0.80	-0.79	-0.82	-0.80	0.49	0.60	0.63	0.31	0.23
$N_{2.5}$	0.58	0.56	0.53	0.53	0.62	-0.33	-0.41	0.44	-0.20	-0.169
N_5	0.59	0.58	0.54	0.55	0.64	-0.38	-0.49	-0.51	-0.26	-0.22
↓↓↓ Korelasyon katsayılarının mutlak değerleri ↓↓↓										
u_{N15} (kPa)	0.81	0.80	0.79	0.82	0.80	0.49	0.60	0.63	0.31	0.23
$N_{2.5}$	0.58	0.56	0.53	0.53	0.62	0.33	0.41	0.44	0.20	0.169
N_5	0.59	0.58	0.54	0.55	0.64	0.38	0.49	0.51	0.26	0.22
Ort. korelasyon	0.660	0.647	0.620	0.633	0.687	0.400	0.500	0.527	0.257	0.206

Çizelge 6.3'e göre sıvılık indisinin (I_L) en düşük korelasyon katsayılarını verdiğini söylemek yanlış olmayacaktır. Fiziksel özelliklerle 15. çevrimde gelişen boşluk suyu basıncı değerleri arasında oldukça yüksek korelasyon katsayılarının çıkması dikkate değerdir. Bu durum ayrıca söz konusu katsayılara göre çizilen histogramlarda da görülmektedir (Şekil 6.45,6.46)



Şekil 6.45 Fiziksel özellikler korelasyon katsayıları histogramı



Şekil 6.46 Fiziksel özellikler karşılık gelen ortalama korelasyon katsayıları histogramı

Sıvılık indisini seçenekler arasından çıkartacak olursak arta kalan fiziksel özelliklerin de problemin çözülmesinde ağırlığının ne olacağı gibi bir soru da yanıtlanması gerekmektedir. Bugüne kadar geliştirilen kriterlerde ele alınan parametrelerin ağırlıklarının eşit olarak ele alındığı izlenmiştir. Oysa her bir parametrenin sıvılaşma üzerindeki etkisinin eşit olduğunu söylemek pek mantıklı görülmemektedir. Bu durum korelasyon katsayılarının birbirinden farklılaşmasıyla da görülebilir. Böylece, korelasyon katsayılarındaki büyüklüklere bakılarak hangi parametrenin ne kadar etkin olduğunu anlama yoluna gidilmiştir. Bu yapılırken likit limit, plastisite indisi ve w_n/w_L oranı Casagrande ve koni düşürme yöntemlerine göre farklı çıktığından kullanılan söz konusu deney aletlerine göre gruplandırma yapılmıştır. Çizelge 6.4'te Casagrande ve koni düşürme aletleri ile elde edilen fiziksel deney sonuçları ile ilgili

korelasyon katsayıları gurup halinde sunularak korelasyon katsayılarının her bir grup içindeki yüzdesi hesaplanmıştır. Diğer deyişle burada korelasyon katsayısının büyüklüğü problemi çözmeye ne kadar oranda katkı sağlayacağı ile ilişkilendirilerek pratik bir çözüm bulunmaya çalışılmıştır.

Çizelge 6.4 Casagrande ve koni düşürme deney sonuçlarına göre ağırlıklar

		w_L	I_P	% C	D_{50}	w_n/w_L
Casagrande	Korelasyon	0.660	0.620	0.687	0.400	0.500
	% Ağırlık	23	21	24	15	17
Koni Düşürme	Korelasyon	0.647	0.633	0.687	0.400	0.527
	% Ağırlık	22	22	24	14	18

6.7.2. Sıvılaşma değerlendirilmesi

Tüm bunlara göre sıvılaşma değerlendirilmesi için aşağıda anlatılan yöntem geliştirilmiştir:

- Çizelge 6.4'te görülen her bir fiziksel parametre için Çizelge 6.1'de görülen sınır değerlere göre numunenin hangi aralığa girdiği belirlenir (sıvılaşır, test veya sıvılaşmaz bölgesi),
- Numune hangi bölgeye giriyorsa Çizelge 6.5'e göre bir değer "(fiziksel özellik)_d" atanır. Buna göre tüm kriterler sıvılaşır bölgeye düşerse numunede değerler toplamı 5 olacaktır ki, bu da kesin sıvılaşma göstergesidir.

Çizelge 6.5 Casagrande ve koni düşürme deney sonuçlarına göre atanan değerler

		Sıvılaşır	Test	Sıvılaşmaz
Casagrande	$(w_{Lcas})_d$	1	0.5	0
	$(I_{Pcas})_d$	1	0.5	0
	% (C) _d	1	0.5	0
	$(w_n/w_{Lcas})_d$	1	0.5	0
Koni Düşürme	$(w_{Lkoni})_d$	1	0.5	0
	$(I_{Pkoni})_d$	1	0.5	0
	$(D_{50})_d$	1	0.5	0
	$(w_n/w_{Lkoni})_d$	1	0.5	0

- Elde edilen her bir değer Çizelge 6.4'teki ağırlıklarla çarpılarak "Etkin değer- E_d " likit limitin bulunmasında hangi yöntem uygulanmışsa ona göre bulunur. Böylece tüm atanmış değerlerin toplamı 5 ise $E_d=100$ üst değerini alacaktır. Casagrande ve koni düşürme yöntemi sonuçları için denklemler:

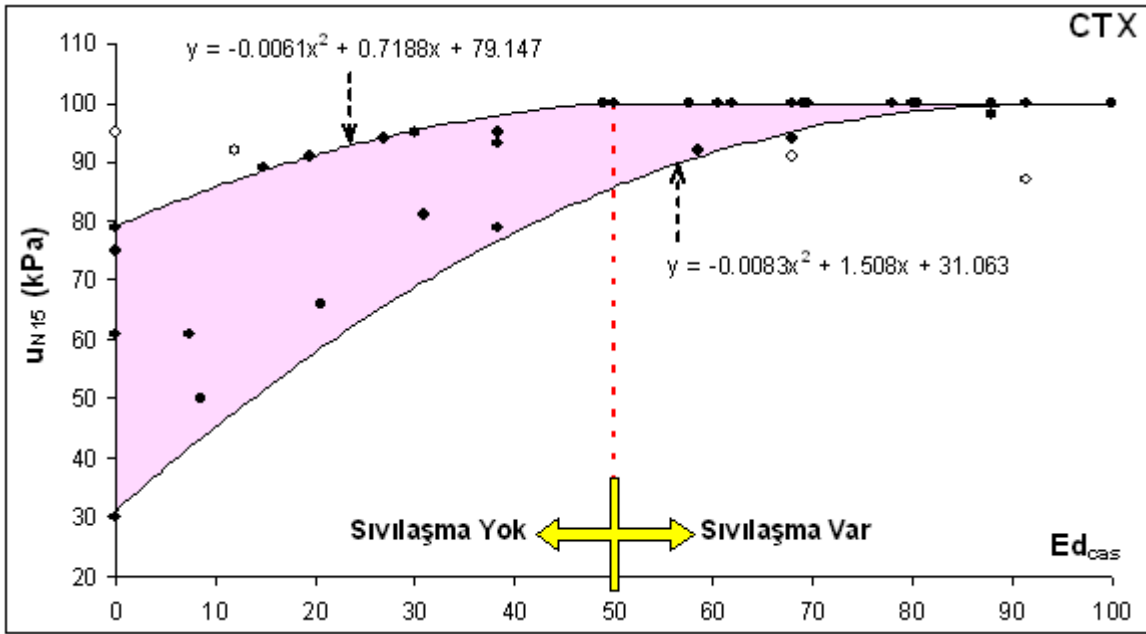
$$E_{dcas} = 23(w_{Lcas})_d + 21(I_{Pcas})_d + 24(\%C)_d + 15(D_{50})_d + 17(w_n/w_{Lcas})_d \quad (6.33a,b)$$

$$E_{dkoni} = 22(w_{Lkoni})_d + 22(I_{Pkoni})_d + 24(\%C)_d + 14(D_{50})_d + 18(w_n/w_{Lkoni})_d$$

biçiminde belirlemektedir

- d) Şekil 6.47' de 15. çevrim sonucunda CTX numunelerinin eriştikleri boşluk suyu basınçları E_{dcas} değerlerine karşı noktalanmıştır. Buna göre, E_{dcas} değerinin 50' den küçük olduğu numunelerin hiç birinde boşluk suyu basıncı çevre basıncına eşitlenmemiştir. E_{dcas} 'in 50' den büyük olması durumunda ise numunelerin çoğunluğunda efektif gerilme sıfıra düşmüş ve sıvılaşma oluşmuştur.

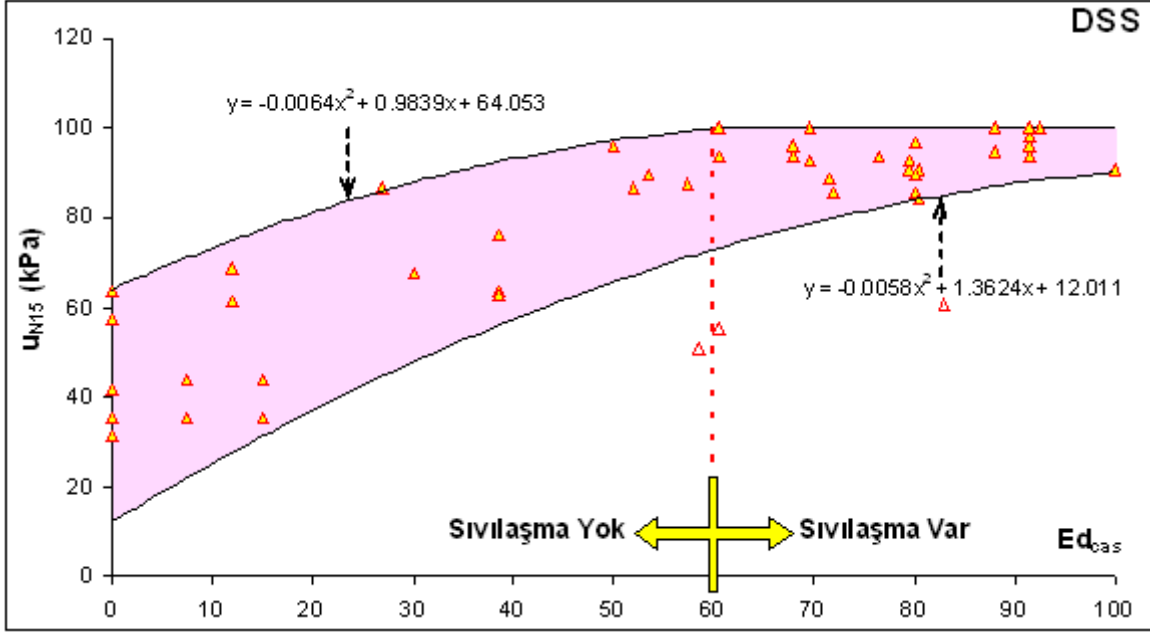
e)



Şekil 6.47 CTX deneyde E_{dcas} değerlerinin sıvılaşma açısından irdelenmesi

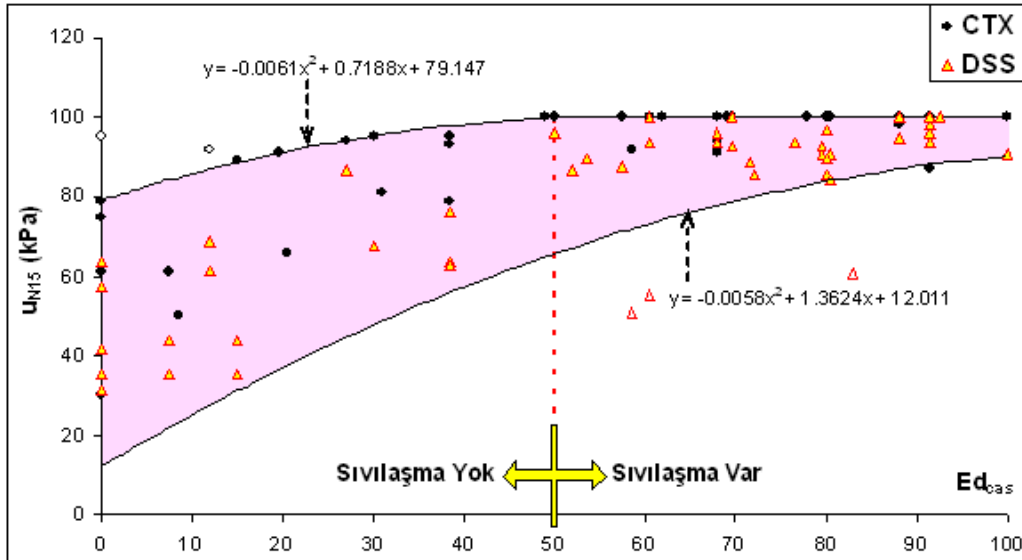
Yukarıda anlatılan yöntemle göre, hesaplanan E_{dcas} değerine 50' den büyük numuneler CTX aletinde denendiği zaman boşluk suyu basıncı oranlarının 0.9-1.0 gibi bir düzeyde olacağı anlaşılmaktadır.

Şekil 6.48' da DSS' te denenen numunelerin 15. çevrim sonucunda almış oldukları boşluk suyu basınçları E_{dcas} değerlerine karşılık noktalanmıştır. E_{dcas} değerinin 60' dan küçük değerlerine sahip numuneler sıvılaşmaz kabul edilebilirken, bu değer üzerinde numuneler ya sıvılaşacak ya da boşluk suyu basınçları 80 kPa gibi bir değeri verebileceğinden büyük deformasyonlara izin verecektir.



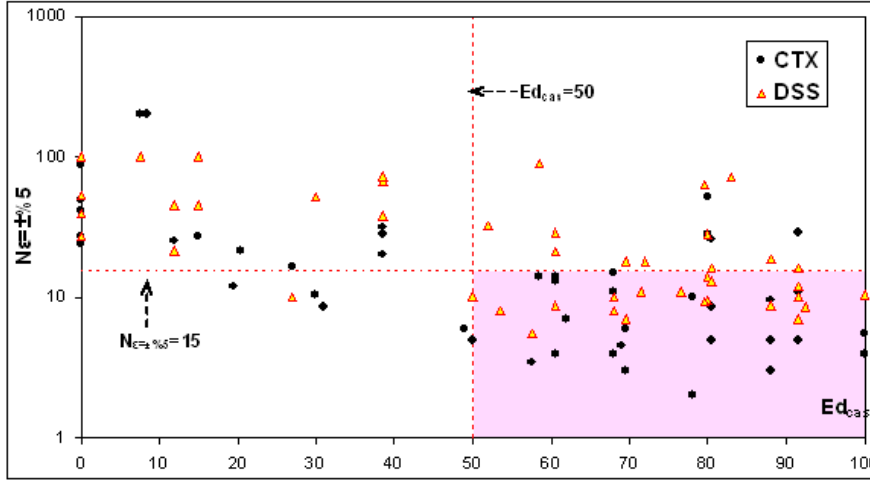
Şekil 6.48 DSS deneyinde E_{dcas} değerlerinin sıvılaşma açısından irdelenmesi

Şekil 6.49' da CTX ve DSS'te denenen numunelerin 15. çevrim sonucunda almış oldukları boşluk suyu basınçları E_{dcas} değerlerine karşılık noktalanmıştır. Şekilden E_{dcas} değeri arttıkça numune içinde 15. çevrim sonunda gelişen boşluk suyu basınçlarının da arttığı görülmektedir.



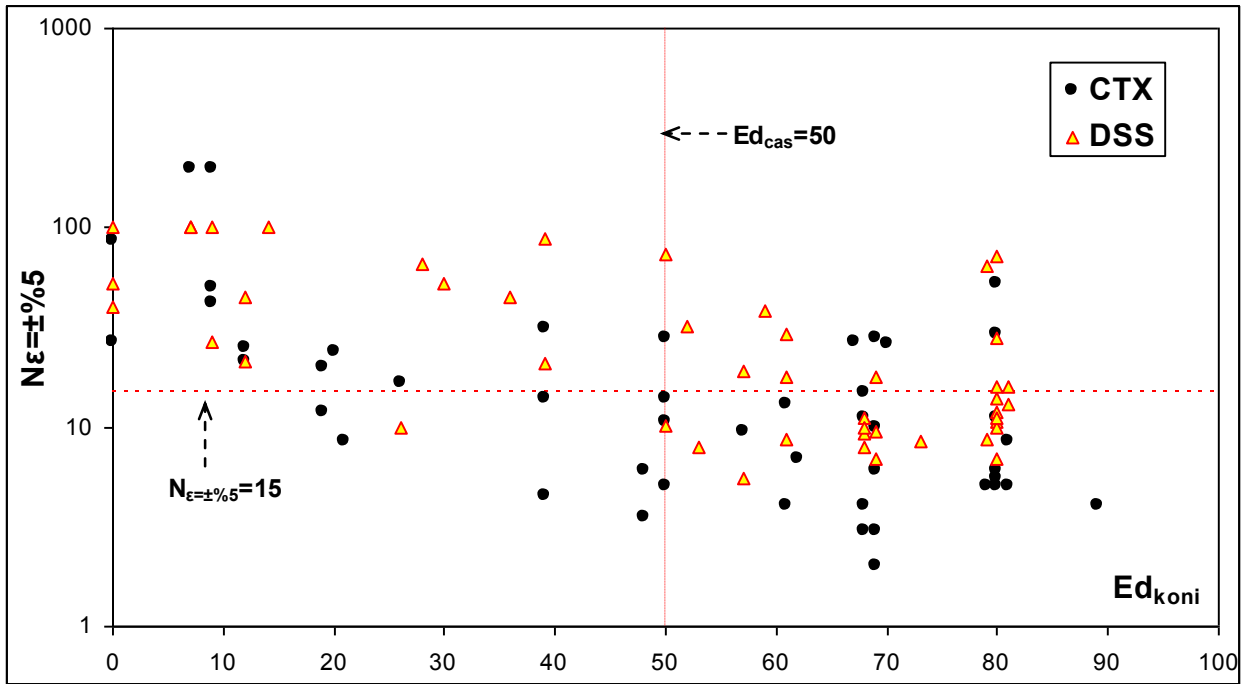
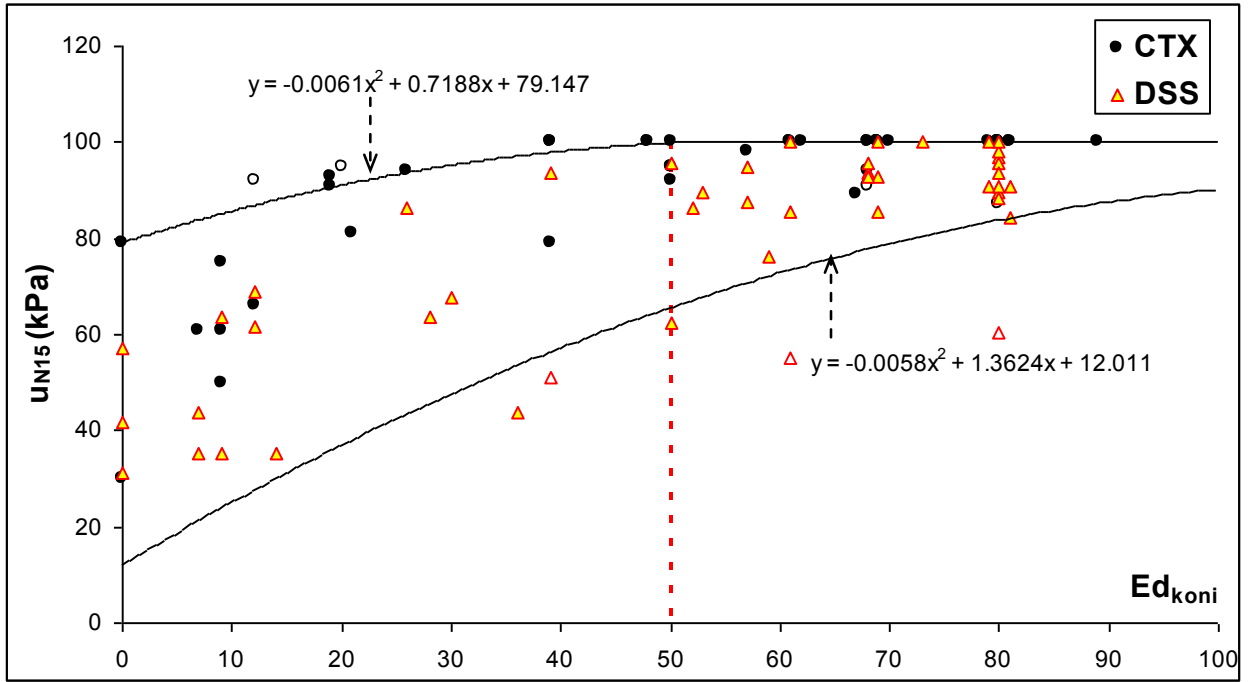
Şekil 6.49 CTX ve DSS deneyde E_{dcas} değerlerinin sıvılaşma açısından irdelenmesi

Şekil 6.50' de ise hem CTX hem de DSS deneylerde denenen numunelerin $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları E_{dcas} değerlerine karşı noktalanmıştır. Şekilden E_{dcas} değeri arttıkça $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan çevrim sayılarının azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, E_{dcas} ' in 50 den büyük olduğu numunelerin çoğunda $\pm\%5$ deformasyon, 7.5 büyüklüğündeki bir depremin yaklaşık oluşturacağı çevrim sayısı olan $N=15$ değerinin altında gelişmektedir. Bu kuralı bozan noktaların ağırlıklı çoğunluğunu DSS' te denenen numunelerin oluşturmuş olması olduğu dikkate çekmektedir.



Şekil 6.50 CTX ve DSS deneyde E_{dcas} değerlerinin deformasyon açısından irdelenmesi

Şekil 6.51'de ise hem CTX hem de DSS deneylerde denenen numunelerin $\pm\%5$ deformasyona erişmek için gerekli olan çevrim sayıları E_{dkoni} değerlerine karşı noktalanmıştır. Şekilden E_{dkoni} değeri arttıkça $\pm\%5$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan çevrim sayılarının azaldığı görülmektedir. Ancak sonuçların E_{dcas} ' takinden bir daha fazla saçılmış olduğu görülmektedir.



Şekil 6.51 CTX ve DSS deneyde Ed_{koni} değerlerinin deformasyon açısından irdelenmesi

7. DİNAMİK ÖZELLİKLERİ BELİRLEYEN TEK VE ÇOKLU

REGRESYON MODELLERİ

Proje kapsamında önce numuneler doğal ve yapay karışımlar olarak ikiye ayrılmıştır. Doğal numunelerden oluşan veri sayısı toplam 96 adet olup bunlardan 47 adedi DSS, 49 adedi ise CTX'ten elde edilmiştir. Yapay numuneler ise 60 veriden oluşmakta ve bu numuneler bentonit ve kaolinit karışımlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Toplam 14 adet olan kaolinit örneklerden elde edilen karışımlar hem DSS hem de CTX de denenerek 28 adet veri elde edilmiştir. Bentonit numunelerden ise toplam 16 adet karışım hazırlanarak DSS ve CTX'de denenmiş ve toplam 32 adet veri elde edilmiştir. Doğal ve karışım numunelerinin özelliklerine önceki bölümlerde değinilmiştir.

Dinamik deneylere (DSS, CTX) girecek her numunenin fiziksel özellikleri (boşluk oranı e_0 , %C, silt ve kum miktarları, likit limit w_L , plastik limit w_p , ortalama dane çapı D_{50} , sıvılık indisi I_L , sıkışma indisi C_c , doyumluk derecesi S_r , dane özgül ağırlığı G_s , yeniden yükleme indisi C_r , ön konsolidasyon basıncı σ_c) ölçülmüş ve buradan Adapazarı kriterinde kullanılan fiziksel özellikler (%C, w_L , D_{50} , I_L) seçilerek dinamik parametreler (en yüksek boşluk suyu basıncı oranı r_{umax} , en yüksek boşluk suyu basıncındaki çevrim sayısı N_{umax} , %2.5 deformasyondaki çevrim sayısı $N_{\pm 2.5}$, %5 deformasyondaki çevrim sayısı $N_{\pm 5}$, 10.çevrimdeki boşluk suyu basıncı u_{N10} , 15.çevrimdeki boşluk suyu basıncı u_{N15}) ile aralarında anlamlı korelasyonlar ve yüksek regresyon katsayılarının bulunması hedeflenmiştir. Bu amaçla ilk aşamada; tek değişkenli doğrusal regresyon (*linear regression*) denenmiş, ikinci aşamada; ikinci dereceden polinom (*polynomial regression*) ile daha sağlam ilişkiler aranmıştır. Üçüncü aşamada ise; değişken sayısının Adapazarı kriterindekinden artırılarak çoklu regresyon (*multiple regression*) modelleri oluşturulmuştur. Çalışma doğal ve yapay numunelere ayrı ayrı uygulanmıştır.

7.1. Doğal Numunelerde Regresyon Analizleri

Bu bölümün birinci aşamasında önce verilerin Adapazarı Kriterinde kullanılan fiziksel özellikleri ile dinamik parametreler arasında tek değişkenli doğrusal ilişkiler için regresyon analizleri yapılmış, ikinci aşamada, ilişkilerin daha yüksek determinasyon katsayıları vereceği tahmin edilerek 2.derece polinom regresyonlar yapılmış, üçüncü aşamada ise çoklu regresyon modelleri geliştirilmiştir.

7.1.1. Tek Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizi

Doğal numunelerde toplam 96 adet dinamik deney yapılmıştır. Bu deneylerden 47 adedi DSS'te 49 adedi ise CTX'de denenmiştir. Adapazarı Kriterinde kullanılan fiziksel özelliklerden (%C, likit limit w_L , orta dane çapı D_{50} , sıvılık indisi I_L) elde edilen bağımsız değişkenler ile dinamik deneylerden DSS ve CTX gelen parametreler (r_{umax} , N_{umax} , $N_{\pm 2.5}$, $N_{\pm 5}$, u_{N10} , u_{N15}) arasında tek değişkenli doğrusal regresyonlar yapılmıştır. Çizelge 7.1'de DSS'te Çizelge

7.2'de CTX'de denenen numunelerin dinamik özellikleri ile fiziksel özellikler arasında yapılan tek değişkenli doğrusal regresyonlardan bulunan determinasyon katsayıları (R^2) verilmektedir.

Çizelge 7.1 Doğal Numunelere ait DSS Deneyi Doğrusal Determinasyon Katsayıları

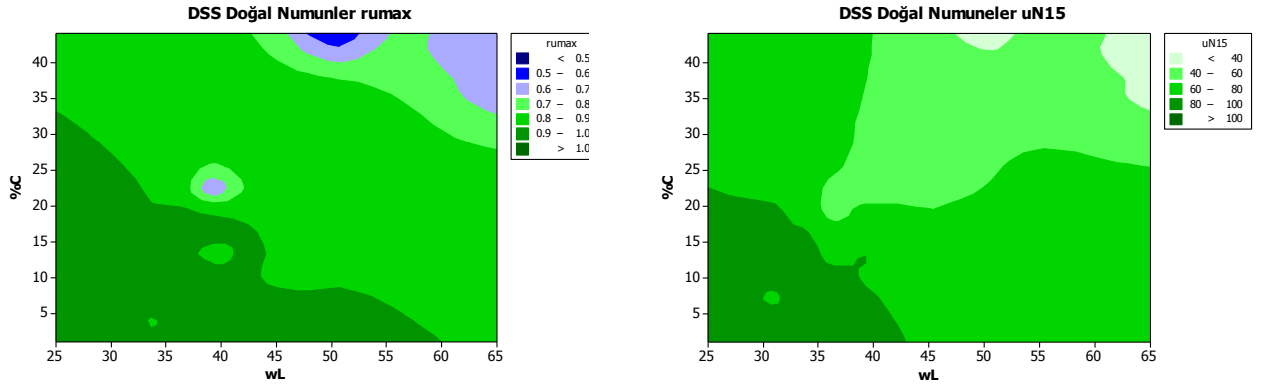
	%C	w_L cas	D_{50}	I_L^*
$N_{r_{umax}}$	0.481	0.480	0.130	0.210
$N_{\gamma \pm 2.5}$	0.510	0.440	0.110	0.210
$N_{\gamma \pm 5}$	0.460	0.410	0.140	0.220
$r_{u(max)}$	0.520	0.460	0.120	0.251
u_{N10}	0.670	0.590	0.220	0.270
u_{N15}	0.690	0.620	0.200	0.290

Çizelge 7.2 Doğal Numunelere ait CTX Deneyi Doğrusal Determinasyon Katsayıları

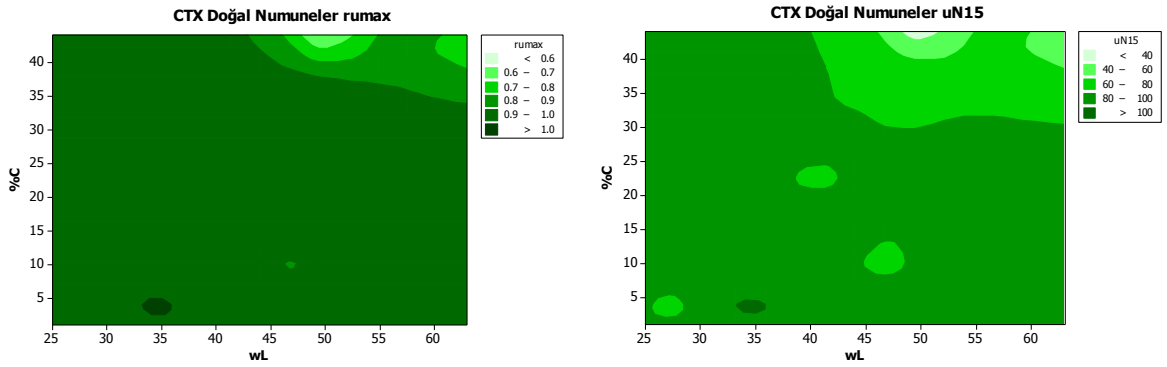
	%C	w_L cas	D_{50}	I_L^*
$N_{r_{umax}}$	0.460	0.270	0.190	0.060
$N_{\epsilon \pm 2.5}$	0.270	0.260	0.080	0.033
$N_{\epsilon \pm 5}$	0.260	0.230	0.103	0.050
$r_{u(max)}$	0.420	0.330	0.100	0.060
u_{N10}	0.410	0.343	0.220	0.160
u_{N15}	0.410	0.330	0.193	0.130

DSS'te 10. ve 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı ile %C arasında ($r=0.81$ ve 0.83) ve likit limit w_L ile ($r=0.77$ ve 0.79) yüksek korelasyon katsayıları görünmektedir. Ortalama dane çapı D_{50} ve sıvılık indisi I_L arasındaki korelasyonlar ise orta düzeyde ($r=0.47$) kalmaktadır (Çizelge 7.1, 7.2, Şekil 7.1).

CTX'de ise korelasyonlar DSS'e göre daha düşük (Çizelge 7.3, 7.4, Şekil 7.2) çıkmaktadır ($r=0.64$ ve 0.59). Buradan doğal numunelerde, dinamik özellikler ile %C ve w_L arasında yüksek, D_{50} ve I_L arasında düşük doğrusal bir ilişkinin olduğu söylenebilir.



Şekil 7.1 DSS'te (a) r_{umax} 'in (b) u_{N15} 'in %C ve w_L ile değişimi



Şekil 7.2 CTX'te (a) r_{umax} 'in (b) u_{N15} 'in %C ve w_L ile değişimi

7.1.2. Tek Değişkenli Polinom Regresyon Analizi

Doğrusal ilişkilerin verdiği katsayılardan daha yüksek ilişkilerin bulunması amaçlanarak 2.dereceden polinom regresyon analizleri yapılmıştır. Çizelge 7.3 ve 7.4'te polinom regresyonlara ait determinasyon katsayıları verilmiştir.

Çizelge 7.3 Doğal Numunelere ait DSS Polinom Determinasyon Katsayıları

	%C	w_L cas	D_{50}	I_L^*
N_{rumax}	0.510	0.490	0.130	0.210
$N_{\gamma \pm 2.5}$	0.570	0.460	0.120	0.210
$N_{\gamma \pm 5}$	0.460	0.420	0.150	0.220
$r_{u(max)}$	0.590	0.480	0.140	0.250
u_{N10}	0.680	0.650	0.230	0.290
u_{N15}	0.690	0.640	0.250	0.300

Çizelge 7.4 Doğal Numunelere ait CTX Polinom Determinasyon Katsayıları

	%C	w _{L cas}	D ₅₀	I _L
N _{r_umax}	0.460	0.270	0.230	0.100
N _{g±%2.5}	0.360	0.270	0.160	0.150
N _{g±%5}	0.380	0.240	0.170	0.120
r _{u(max)}	0.730	0.410	0.110	0.060
u _{N10}	0.500	0.340	0.230	0.170
u _{N15}	0.570	0.330	0.200	0.130

Polinom regresyonlarda korelasyon katsayıları beklendiği gibi belirgin bir artış göstermekle birlikte, CTX'de r_{u_{max}} ile %C arasında en yüksek korelasyon katsayısı (r=0.85) elde edilmiştir.

7.2. Yapay Numunelerde Regresyon Analizleri

Yapay numuneler için analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, kaolinit, ikinci aşamada bentonit karışımlardan elde edilmiş veriler üzerinde ve her iki veri grubu kendi içinde DSS ve CTX'den alınan veriler olarak tekrar ikiye ayrılmış ve bu veriler önce doğrusal daha sonra polinom ilişkiler için irdelenmiştir.

Yapay numuneler toplam 60 veriden oluşmakta ve bu numunelerin 28 adedi kaolinit örneklerden elde edilen karışımlardan DSS ve CTX'de denenerek elde edilmiştir. Bentonit numunelerden ise toplam 32 adet karışım hazırlanarak yine DSS ve CTX'de denenerek veri setleri oluşturulmuştur.

7.2.1. Tek Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizi

Adapazarı Kriteri'nde kullanılan fiziksel özelliklerden (%C, w_L, D₅₀, I_L) elde edilen bağımsız değişkenler ile dinamik deneylerden DSS ve CTX gelen parametreler (r_{u_{max}}, N_{u_{max}}, N_{g±%2.5}, N_{g±%5}, u_{N10}, u_{N15}) arasında tek değişkenli doğrusal regresyonlar yapılmıştır. Çizelge 7.5'te DSS'te, Çizelge 7.6'de CTX'de denenen numunelerin dinamik özellikleri ile fiziksel özellikler arasında yapılan tek değişkenli doğrusal regresyonlardan bulunan determinasyon katsayıları (R²) verilmektedir.

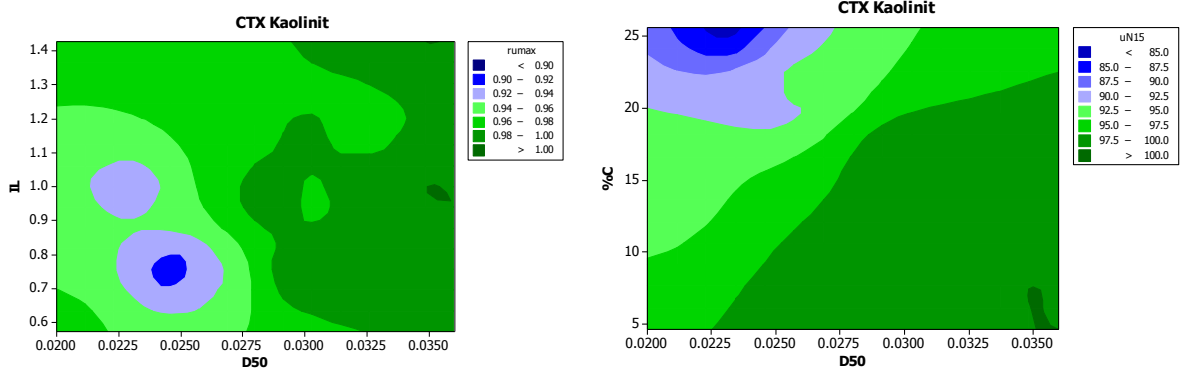
Kaolinit karışımların DSS'te denenerek numunelerin fiziksel özellikleri ile yapılmış doğrusal regresyon analizlerine ait korelasyon katsayıları incelendiğinde, dinamik özellikler ile %C arasında doğrusal ilişki zayıf çıkarken, CTX'ten alınan dinamik veriler r_{u_{max}}, N_{u_{max}}, u_{N10}, u_{N15} ile kil içeriği %C arasında yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir (u_{N10}-C için r= 0.86 gibi). Şekil 7.3'te en yüksek korelasyon katsayısı veren parametrelerin dağılımı gösterilmiştir.

Çizelge 7.5 Kaolinit Karışımlara ait DSS Doğrusal Determinasyon Katsayıları

	%C	w _{Lcas}	I _L [*]	D ₅₀
N _{r_{umax}}	0.000	0.078	0.076	0.010
N _{γ±2.5}	0.001	0.236	0.107	0.010
N _{γ±5}	0.044	0.582	0.053	0.008
r _{umax}	0.000	0.239	0.289	0.124
u _{N10}	0.171	0.277	0.048	0.006
u _{N15}	0.003	0.256	0.172	0.126

Çizelge 7.6 Kaolinit Karışımlara ait CTX Doğrusal Determinasyon Katsayıları

	%C	w _{Lcas}	I _L [*]	D ₅₀
N _{r_{umax}}	0.584	0.062	0.114	0.350
N _{ε±2.5}	0.272	0.102	0.048	0.156
N _{ε±5}	0.212	0.122	0.001	0.114
r _{umax}	0.607	0.189	0.456	0.451
u _{N10}	0.742	0.095	0.233	0.505
u _{N15}	0.732	0.114	0.260	0.640



Şekil 7.3 CTX'te (a) r_{umax} 'ın I_L^* ve D_{50} ile (b) u_{N15} 'in %C ve D_{50} ile değişimi

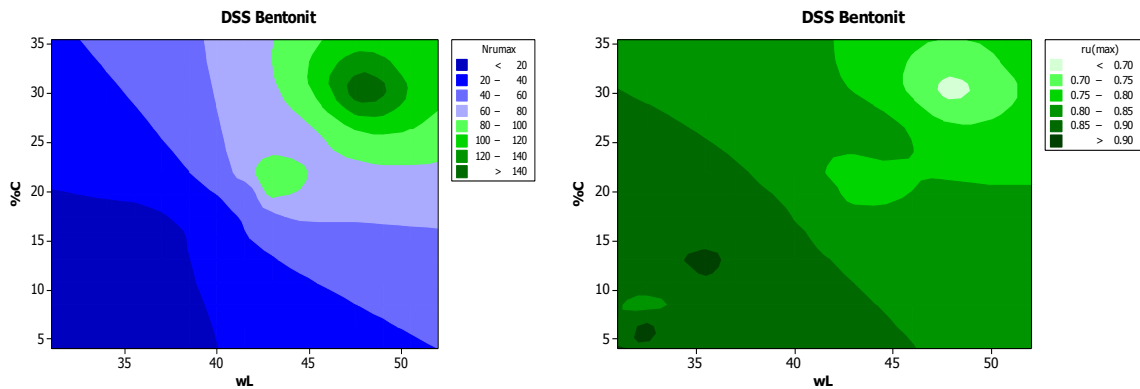
Çizelge 7.7 ve Çizelge 7.8'de aynı doğrusal ilişkiler Bentonit numuneler üzerinde irdelenmiş, buradan elde edilen determinasyon katsayıları gösterilmiştir. DSS ve CTX için ayrı ayrı gösterilmiş çizelgeler incelendiğinde determinasyon katsayılarının Kaolinit karışımlara göre çok daha yüksek bulunduğu görülmektedir. Şekil 7.4'te boşluk suyu basıncı oranı ve çevrim sayısının, %C ve w_L 'nin artışıyla benzer şekilde arttığını göstermektedir.

Çizelge 7.7 Bentonit Karışımlara ait DSS Doğrusal Determinasyon Katsayıları

	%C	w_{Lcas}	I_L^*	D_{50}
$N_{r_{umax}}$	0.792	0.369	0.028	0.108
$N_{\gamma \pm 2.5}$	0.639	0.293	0.019	0.072
$N_{\gamma \pm 5}$	0.699	0.315	0.025	0.089
r_{umax}	0.461	0.246	0.018	0.000
u_{N10}	0.850	0.453	0.019	0.113
u_{N15}	0.807	0.392	0.005	0.081

DSS deney kaolinit karışımlarda %C ile dinamik özellikler arasında korelasyon katsayısı en fazla $r=0.41$ iken bentonit karışımlarda $r=0.80-0.90$ mertebesine ulaşmaktadır. Likit limit ile yapılan regresyonlarda ise kaolinit karışımlarda en yüksek $N_{\gamma \pm 5}$ ile $r=0.76$, bentonit karışımlarda u_{N10} ile $r=0.67$ değerine ulaşılmaktadır.

Şekil 7.4 DSS'te (a) r_{umax} 'ın (b) $N_{r_{umax}}$ 'in %C ve w_L ile değişimi

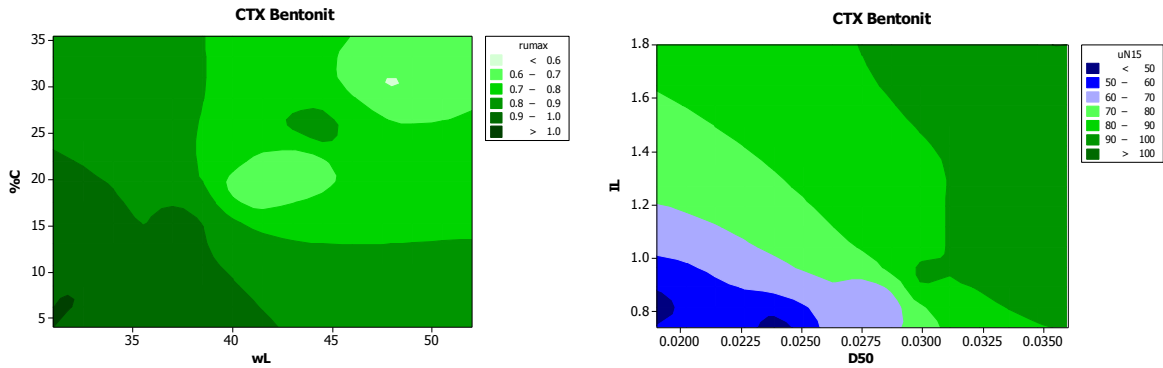


CTX deneylerden elde edilen veri setlerinden yapılan korelasyonlardan bulunan katsayılar daha yüksek çıkmaktadır. %C ile dinamik özellikler arasında kaolinitte en yüksek u_{N10} ile $r=0.86$ iken, bentonit karışımlarda u_{N10} ile $r=0.95$ gibi yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Kaolinitte %C ile $N_{\epsilon \pm 2.5}$ ve $N_{\epsilon \pm 5}$ arasında orta düzeyde ilişki bulunurken ($r=0.5$) bulunurken, bentonitte $r=0.72$ gibi iyi korelasyon katsayısı vermektedir. Sıvılık indisi ile dinamik özellikler arasındaki ilişkilere bakıldığında kaolinitte r_{umax} ile I_L arasında en yüksek değer olan $r=0.68$ bulunurken bentonitte; I_L-r_{umax} da $r=0.69$, I_L-u_{N10} arasında $r=0.73$, I_L-u_{N15}

arasında $r=0.71$ gibi yüksek değerler elde edilmiştir. I_L ile $N_{r_{umax}}$, $N_{\epsilon_{\pm 2.5}}$, $N_{\epsilon_{\pm 5}}$ arasındaki korelasyonlarda ise kaolinitte düşük değerler elde edilirken bentonitte $r=0.50$ düzeyinde çıkmaktadır. Buna göre bentonit karışımların kaolinit karışımlara göre dinamik özellikler arasında %C, w_L ve I_L olarak anlamlı ilişkiler olduğu söylenebilmektedir. D_{50} ile dinamik özellikler irdelendiğinde kaolinitte tüm ilişkiler zayıf bulunurken ($r \leq 0.3$), bentonitte DSS deneyde $N_{r_{umax}}$ $r=0.59$, r_{umax} $r=0.67$, u_{N10} $r=0.71$, u_{N15} $r=0.8$ değerlerini verirken, CTX deneylerde korelasyon katsayıları yükselmektedir. $N_{r_{umax}}$ $r=0.73$, r_{umax} $r=0.89$, u_{N10} $r=0.93$, u_{N15} $r=0.92$ değerleri ile yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir. En düşük değerler, $N_{\epsilon_{\pm 2.5}}$ ile $N_{\epsilon_{\pm 5}}$ parametrelerinde gözlenmiştir ($r=0.60$),

Çizelge 7.8 Bentonit Karışımlara ait CTX Doğrusal Determinasyon Katsayıları

	%C	w_{Lcas}	I_L^*	D_{50}
$N_{r_{umax}}$	0.772	0.389	0.292	0.527
$N_{\epsilon_{\pm 2.5}}$	0.516	0.195	0.235	0.352
$N_{\epsilon_{\pm 5}}$	0.530	0.198	0.242	0.362
r_{umax}	0.736	0.413	0.483	0.801
u_{N10}	0.901	0.474	0.533	0.864
u_{N15}	0.887	0.466	0.504	0.854



Şekil 7.5 CTX'te (a) r_{umax} 'in %C ve w_L ile (b) u_{N15} 'in I_L^* ve D_{50} ile değişimi

CTX bentonit deneylerde DSS'te gözlenmeyen sıvılık indisi ve ortalama dane çapı D_{50} 'nin artışı ile 15.çevrimdeki boşluk suyu basıncı artışı, bentonit gibi yapay bir numunede I_L ve D_{50} nin de etkin parametre olduğunu göstermektedir (Çizelge 7.8, şekil 7.5).

7.2.2. Tek Değişkenli İkinci Dereceden Polinom İlişkiler

DSS ve CTX deney aletlerinde yapılan kaolinit ve bentonit örneklere ait polinom regresyonlar ve bunlara ait determinasyon katsayıları çizelge 7.9 ve 7.10, 7.11 ve 7.12'de verilmiştir.

Kaolinit karışımlarda; DSS 'de en yüksek ilişkiler %C ile u_{N10} arasında $r=0.60$ iken w_L ile $r=0.82$ vermektedir. CTX'de %C ile $N_{r_{umax}}$, r_{umax} , u_{N10} ve u_{N15} yüksek korelasyon katsayıları göstermektedir ($r \approx 0.85$). w_L ile ilişkiler incelendiğinde DSS'te $N_{\gamma \pm 2.5}$ ile $r=0.82$ gibi yüksek bir değer elde edilmiştir. Aynı sonuca CTX'te ulaşılammıştır. I_L değerlerine bakıldığında, korelasyonların en fazla $r=0.5$ 'te kaldığı görülmektedir. D_{50} ilişkiler incelendiğinde DSS'te düşük korelasyonlar elde edilirken CTX'de r_{umax} , u_{N10} ve u_{N15} $r=0.71-0.81$ gibi yüksek vermesi dikkat çekicidir.

Çizelge 7.9 Kaolinit Karışımlara ait DSS Polinom Determinasyon Katsayıları

	%C	w_{Lcas}	I_L^*	D_{50}
$N_{r_{umax}}$	0.281	0.262	0.117	0.275
$N_{\gamma \pm 2.5}$	0.043	0.667	0.208	0.103
$N_{\gamma \pm 5}$	0.044	0.241	0.275	0.025
r_{umax}	0.033	0.277	0.291	0.180
u_{N10}	0.364	0.280	0.077	0.117
u_{N15}	0.003	0.789	0.172	0.018

Çizelge 7.10 Kaolinit Karışımlara ait CTX Polinom Determinasyon Katsayıları

	%C	w_{Lcas}	I_L^*	D_{50}
$N_{r_{umax}}$	0.720	0.063	0.145	0.351
$N_{\epsilon \pm 2.5}$	0.280	0.277	0.084	0.229
$N_{\epsilon \pm 5}$	0.230	0.361	0.188	0.130
r_{umax}	0.707	0.244	0.556	0.510
u_{N10}	0.797	0.147	0.273	0.505
u_{N15}	0.741	0.153	0.359	0.650

Bentonit karışımlarda polinom korelasyonların %C ile tüm dinamik parametrelerin hem DSS'te hem de CTX'de yüksek değerler verdiği görülmektedir. Burada %C ile dinamik özellikler arasında doğrusal ilişkinin değil, polinom bir ilişkinin varlığı kesinlikle söylenebilmektedir. Aynı şekilde, w_L ile polinom ilişkilerin iyi olduğu, D_{50} nin de dinamik özelliklerle ilişkisi irdelendiğinde polinom korelasyona uyduğu, ancak burada I_L 'nin sadece CTX'de u_{N10} ve u_{N15} ile iyi ilişkiler ($r=0.7$) verdiği söylenebilir.

Çizelge 7.11 Bentonit Karışımlara ait DSS Polinom Determinasyon Katsayıları

	%C	w _{Lcas}	I _L [*]	D ₅₀
N _{r_{umax}}	0.862	0.822	0.121	0.582
N _{γ±2.5}	0.768	0.664	0.094	0.449
N _{γ±5}	0.794	0.738	0.105	0.496
r _{umax}	0.494	0.246	0.103	0.154
u _{N10}	0.856	0.480	0.091	0.766
u _{N15}	0.826	0.394	0.043	0.653

Çizelge 7.12 Bentonit Karışımlara ait CTX Polinom Determinasyon Katsayıları

	%C	w _{Lcas}	I _L [*]	D ₅₀
N _{r_{umax}}	0.820	0.710	0.294	0.562
N _{ε±2.5}	0.580	0.580	0.252	0.353
N _{ε±5}	0.590	0.600	0.266	0.365
r _{umax}	0.809	0.937	0.081	0.490
u _{N10}	0.900	0.510	0.533	0.871
u _{N15}	0.890	0.490	0.507	0.862

7.3. Çoklu Regresyon Analizleri

Bu bölümde dinamik parametrelerin elde edilmesinde Adapazarı kriterinde kullanılan fiziksel özellikler ile çoklu regresyon modelleri geliştirilmiştir. Diğer bölümlerde olduğu gibi doğal ve yapay numunelerle burada da ayrı ayrı çalışılmıştır.

7.3.1. Doğal Numuneler

DSS'ten elde edilmiş doğal numunelerden oluşan veri seti ile yapılan çoklu regresyon analizlerinde korelasyon katsayılarının CTX'de yapılan analizlerden daha yüksek çıkması dikkat çekicidir.

Çizelge 7.13 Doğal Numunelerde DSS'te yapılan çoklu regresyonlar

$r_{umax} = 0.895 - 0.0060 \%C - 0.00189 w_L + 0.205 I_L^* + 0.019 D_{50}$	r=0.76
$N_{\epsilon=\pm\%5} = 35.7 + 1.45 \%C + 0.531 w_L - 51.6 I_L^* - 90 D_{50}$	r=0.72
$N_{umax} = 11.9 + 1.28 \%C + 1.15 w_L - 32.8 I_L^* - 59 D_{50}$	r=0.74
$u_{N15} = 87.0 - 1.15 \%C - 0.584 w_L + 30.8 I_L^* + 67.3 D_{50}$	r=0.87

Çizelge 7.14 Doğal Numunelerde CTX'te yapılan çoklu regresyonlar

$r_{umax} = 1.11 - 0.0041 \%C - 0.00220 w_{Lcas} + 0.0223 I_L^* - 0.345 D_{50}$	r=0.68
$N_{\epsilon=\pm\%5} = - 11.5 + 1.62 \%C + 1.02 w_{Lcas} - 28.9 I_L^* + 9.8 D_{50}$	r=0.55
$N_{umax} = 46.1 + 2.88 \%C + 0.065 w_{Lcas} - 61.8 I_L^* - 13 D_{50}$	r=0.70
$u_{N15} = 97.5 - 0.810 \%C - 0.323 w_{Lcas} + 19.0 I_L^* + 27 D_{50}$	r=0.69

7.3.2. Yapay Numuneler

Yapay numuneler üzerinde yapılan çoklu regresyon analizlerinde Bentonit numuneleri, Kaolinit numunelerine göre tek değişkenli analizlerde olduğu gibi daha yüksek korelasyon katsayıları vermektedir.

7.3.2.1. Bentonit Karışımlar

Bentonit karışımlarda yapılan deney verilerine göre DSS ve CTX den benzer sonuçlar elde edilerek her iki deney sistemi arasında uyum olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 7.15 Bentonit karışımlarda DSS'te yapılan çoklu regresyonlar

$r_{umax} = 1.41 + 0.0024 \% C - 0.0131 w_L - 0.0309 I_L - 3.36 D_{50}$	r=0.79
$N_{\epsilon=\pm\%5} = - 393 - 4.41 \%C + 12.4 w_L + 7.0 I_L + 802 D_{50}$	r=0.87
$N_{umax} = - 352 - 3.04 \%C + 11.0 w_L + 4.7 I_L + 797 D_{50}$	r=0.92
$u_{N15} = 343 + 2.59 \%C - 7.72 w_L - 11.2 I_L - 610 D_{50}$	r=0.95

Çizelge 7.16 Bentonit karışımlarda CTX'te yapılan çoklu regresyonlar

$r_{umax} = 1.52 + 0.019 \%C - 0.0372 w_L + 0.0252 I_L + 13.8 D_{50}$	r=0.92
$N_{\epsilon=\pm\%5} = - 49.5 + 0.31 \%C + 0.94 w_L + 3.96 I_L + 396 D_{50}$	r=0.75
$N_{umax} = 36.0 + 3.21 \%C - 2.18 w_L - 0.66 I_L + 532 D_{50}$	r=0.90
$u_{N15} = 167 + 0.91 \%C - 3.53 w_L - 1.50 I_L + 1155 D_{50}$	r=0.97

7.3.2.2. Kaolinit Karışımlar

Kaolinit karışımlarda CTX deneylerinden elde edilen katsayılar DSS verilerinden çok daha yüksek çıkmaktadır. En yüksek korelasyonu CTX'de u_{N15} ile w_L arasında gözlemlenmektedir.

Çizelge 7.17 Kaolinit karışımlarda DSS'te yapılan çoklu regresyonlar

$r_{umax} = 0.354 - 0.00054 \%C + 0.0192 w_L - 0.0196 I_L - 0.0842 D_{50}$	$r=0.77$
$N_{\epsilon=\pm\%5} = - 36.7 - 0.067 \%C + 1.55 w_L + 0.48 I_L - 1.80 D_{50}$	$r=0.68$
$N_{umax} = - 61.1 - 0.021 \%C + 2.63 w_L - 1.88 I_L - 0.9 D_{50}$	$r=0.48$
$u_{N15} = 50.9 + 0.014 \%C + 1.27 w_L + 0.27 I_L - 8.20 D_{50}$	$r=0.68$

Çizelge 7.18 Kaolinit karışımlarda CTX'te yapılan çoklu regresyonlar

$r_{umax} = 1.01 - 0.0038 \%C - 0.00014 w_L - 0.0122 I_L + 0.79 D_{50}$	$r=0.83$
$N_{umax} = - 47.2 + 0.941 \%C + 1.49 w_L + 16.6 I_L - 477 D_{50}$	$r=0.83$
$u_{N15} = 105 - 0.423 \%C - 0.445 w_L - 4.16 I_L + 474 D_{50}$	$r=0.89$
$N_{\epsilon=\pm\%5} = 2.25 - 0.0483 \%C + 0.040 w_L + 0.79 I_L - 35.3 D_{50}$	$r=0.52$

7.3.3. Plastisite İndisinin Dinamik Özelliklerle Çoklu Regresyonu

Adapazarı Kriterinde kullanılan fiziksel özellikler ile dinamik parametreler arasındaki ilişkilere önceki bölümlerde değinilmiştir. Ancak Adapazarı Kriterinde kullanılmayan proje kapsamında ölçülen diğer fiziksel özelliklerden boşluk oranı e_0 , plastisite indisi I_p , konsolidasyon özellikleri (sıkışma indisi C_c , yeniden yükleme indisi C_r , ön konsolidasyon basıncı σ_c) ile dinamik özellikler arasında iyi ilişkiler bulmak amacıyla da çoklu regresyon modelleri geliştirilmiştir. Bu bölümde dinamik özellikler ile geliştirilen en anlamlı fiziksel özellik olan I_p ile çok değişkenli regresyon modelleri sunulmaktadır. Diğer parametrelere gösterdikleri zayıf korelasyon katsayıları nedeniyle yer verilmemiştir.

Öncelikle ele alınan doğal numunelere ait I_p ve en yüksek katsayılara sahip olan $\%C$ ile DSS ve CTX'den ölçülen dinamik parametreler arasında iki değişkenli regresyon modelleri Çizelge 7.19 ve 7.20'de verilmektedir. Doğal numunelerde DSS'ten alınan parametreler ile $r=0.71-0.88$ arasında yüksek korelasyon katsayıları elde edilirken CTX'te daha düşük ($r=0.55-0.68$) ancak orta düzeyde korelasyon katsayıları bulunmuştur. Bu da yine önceki bölümlerde de bulunan doğal numunelerde DSS'in CTX'den daha yüksek değerler gösterdiğini kanıtlamaktadır.

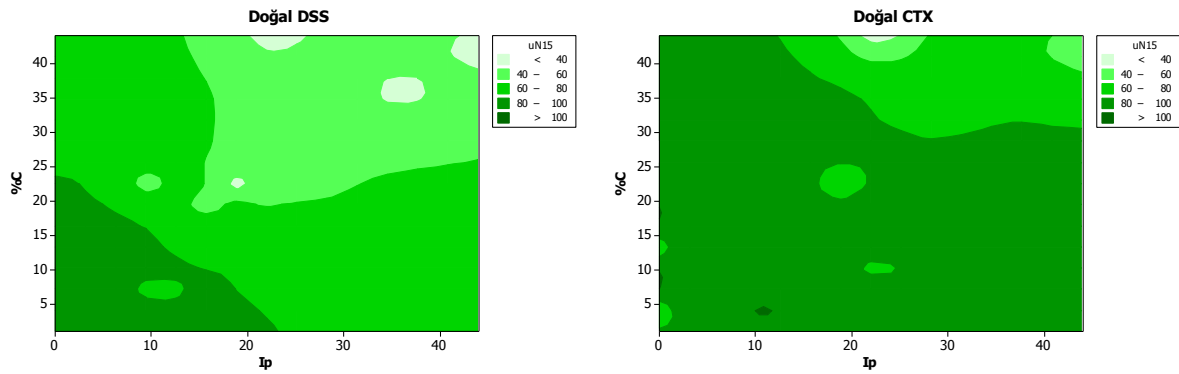
Çizelge 7.19 Doğal Numunelerde I_p Kullanılarak DSS'te yapılan çoklu regresyonlar

$r_{umax} = 1.03 - 0.0064 \%C - 0.00256 I_p$	$r= 0.74$
$N_{rumax} = 9.16 + 1.30 \%C + 1.34 I_p$	$r=0.76$
$u_{N10} = 97.5 - 1.32 \%C - 0.781 I_p$	$r=0.86$
$u_{N15} = 103 - 1.16 \%C - 0.829 I_p$	$r=0.88$
$N_{\epsilon=\pm\%5} = - 0.29 + 1.48 \%C + 0.912 I_p$	$r=0.71$
$N_{\epsilon=\pm\%2.5} = - 9.66 + 1.38 \%C + 0.633 I_p$	$r=0.74$

Çizelge 7.20 Doğal Numunelerde I_p Kullanılarak CTX'te yapılan çoklu regresyonlar

$r_{umax} = 1.05 - 0.0043 \%C - 0.00105 I_p$	$r=0.66$
$N_{rumax} = - 8.14 + 2.90 \%C + 0.341 I_p$	$r=0.68$
$u_{N10} = 107 - 0.960 \%C - 0.423 I_p$	$r=0.67$
$u_{N15} = 107 - 0.871 \%C - 0.334 I_p$	$r=0.67$
$N_{\epsilon=\pm\%5} = - 11.0 + 1.61 \%C + 1.05 I_p$	$r=0.55$
$N_{\epsilon=\pm\%2.5} = - 17.8 + 1.32 \%C + 1.08 I_p$	$r=0.57$

Dinamik parametrelerden en yüksek değerleri veren 15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı ile seçilen fiziksel özellikler arasındaki değişimler Şekil 7.6'da gösterilmektedir. DSS'te %C ve I_p değerleri arttıkça u_{N15} düşmekte, 20 değerinin üstünde u_{N15} %50'nin altına inmektedir. CTX'de ise u_{N15} nin %50'ye düşmesi için %C ve I_p 'nin iki katı yani 40 değerine ulaşması gerekmektedir.



Şekil 7.6 Doğal Numunelerde u_{N15} 'in a) DSS'te b) CTX'te %C- I_p Değişimi

Yapay numunelerde aynı ilişkiler irdelendiğinde, bentonit karışımlarda ölçülen dinamik parametreler diğer fiziksel özellikler de olduğu gibi I_p için de yüksek korelasyon katsayıları vermektedir (Çizelge 7.21 ve 7.22). DSS'te bu katsayılar 0.90 gibi güçlü bir ilişki gösterirken, CTX'de 0.95'e kadar yükselmektedir.

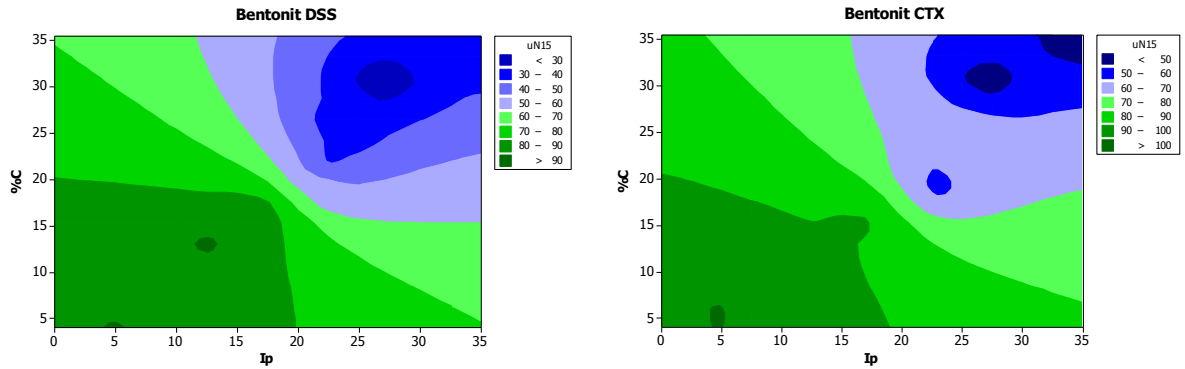
Her iki deney sistemi DSS ve CTX'de Bentonit örneklerinde yapılan deneylerde %C- I_p artarken u_{N15} aynı oranda azalmakta (Şekil 7.7) iken Kaolinit karışımlar için aynı benzerlikler (Şekil 7.8) saptanamamıştır.

Çizelge 7.21 Bentonit Karışımlarda I_p Kullanılarak DSS'te yapılan çoklu regresyonlar

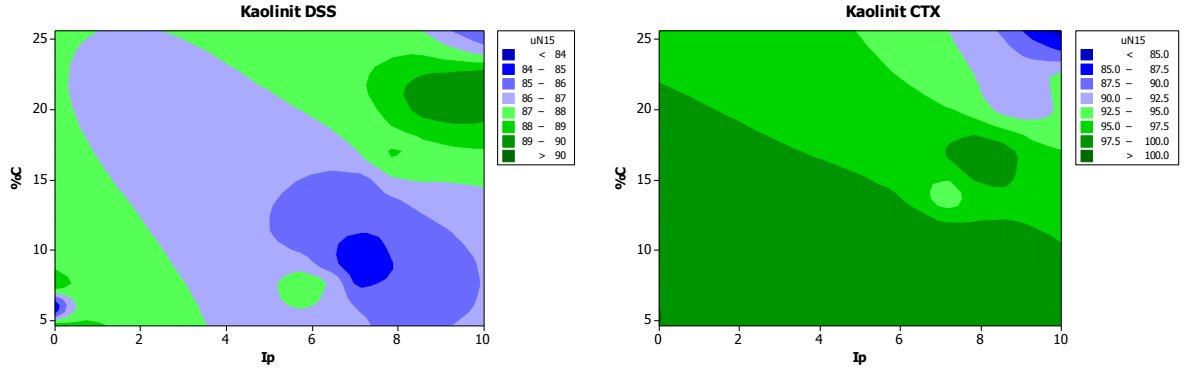
$r_{umax} = 0.920 - 0.0068 \%C + 0.00170 I_p$	$r=0.68$
$N_{rumax} = - 30.2 + 6.44 \%C - 2.08 I_p$	$r=0.90$
$u_{N10} = 104 - 2.06 \%C - 0.52 I_p$	$r=0.92$
$u_{N15} = 107 - 2.66 \%C + 0.19 I_p$	$r=0.90$
$N_{\epsilon=\pm\%5} = - 30.9 + 6.48 \%C - 2.48 I_p$	$r=0.85$
$N_{\epsilon=\pm\%2.5} = - 22.7 + 4.89 \%C - 2.04 I_p$	$r=0.82$

Çizelge 7.22 Bentonit Karışımlarda I_p Kullanılarak CTX'te yapılan çoklu regresyonlar

$r_{umax} = 1.07 - 0.0024 \%C - 0.0115 I_p$	$r=0.87$
$N_{rumax} = - 3.38 + 1.65 \%C - 0.202 I_p$	$r=0.88$
$u_{N10} = 114 - 1.48 \%C - 0.885 I_p$	$r=0.95$
$u_{N15} = 112 - 1.31 \%C - 0.753 I_p$	$r=0.95$
$N_{\epsilon=\pm\%5} = - 5.36 + 1.77 \%C - 1.05 I_p$	$r=0.80$
$N_{\epsilon=\pm\%2.5} = - 5.01 + 1.51 \%C - 0.907 I_p$	$r=0.79$



Şekil 7.7 Bentonit Karışımlarda a) DSS'te b) CTX'de u_{N15} 'in $\%C-I_p$ ile Değişimi



Şekil 7.8 Kaolinit Karışımlarda a) DSS'te b) CTX'de u_{N15} 'in $\%C-I_p$ ile Değişimi

Bentonite (Şekil 7.7) ait grafiklerden $\%C-I_p$ artışı ile u_{N15} 'in azaldığı rahatlıkla görülürken Kaolinitte DSS için tam sınır değerleri verilememekte, ancak sınır CTX'de (Şekil 7.8) kolaylıkla ayırt edilebilmektedir.

Kaolinit karışımlarda yapılan çoklu regresyonlarda DSS'ten elde edilen parametreler ile I_p arasında düşük korelasyon katsayıları ($r \approx 0.40$) bulunurken (Çizelge 7.23), CTX'de $r=0.90$ gibi yüksek değerlere (Çizelge 7.24), ulaşılmaktadır. Böylece I_p ' nin de diğer fiziksel özelliklerde

saptanan yargıyı güçlendirecek şekilde yapay karışımlarda CTX'in DSS'e göre daha yüksek korelasyon katsayıları verdiği görüşü ağırlık kazanmaktadır.

Çizelge 7.23 Kaolinit Karışımlarda I_p Kullanılarak DSS'te yapılan çoklu regresyonlar

$r_{umax} = 0.876 + 0.00236 \%C - 0.00485 I_p$	$r=0.33$
$N_{umax} = 11.9 + 0.495 \%C - 1.00 I_p$	$r=0.34$
$u_{N10} = 87.9 - 0.102 \%C - 0.251 I_p$	$r=0.43$
$u_{N15} = 86.6 + 0.225 \%C - 0.425 I_p$	$r=0.37$
$N_{\epsilon=\pm\%5} = 7.63 + 0.291 \%C - 0.776 I_p$	$r=0.64$

Çizelge 7.24 Kaolinit Karışımlarda I_p Kullanılarak CTX'te yapılan çoklu regresyonlar

$r_{umax} = 1.03 - 0.00474 \%C + 0.00132 I_p$	$r=0.83$
$N_{rumax} = - 4.16 + 1.55 \%C - 1.20 I_p$	$r=0.81$
$u_{N10} = 107 - 1.18 \%C + 0.741 I_p$	$r=0.89$
$u_{N15} = 105 - 0.883 \%C + 0.507 I_p$	$r=0.87$
$N_{\epsilon=\pm\%5} = 2.97 - 0.0250 \%C - 0.0293 I_p$	$r=0.48$

7.4. Dinamik Özellikler Arasında Çoklu Regresyonlar

Bu bölümde DSS ve CTX'ten elde edilen dinamik özellikler arasında ilişkiler araştırılmış ve bu amaçla çoklu regresyon modelleri oluşturulmuştur. Araştırma ve tartışmaya açık olan bu sonuçlar için çoklu regresyon modelleri geliştirilmesi önerilmektedir.

$$r_{umaxCTX} = 1.01 + 0.240 r_{umaxDSS} - 0.00470 u_{N15DSS} - 0.00161 N_{\epsilon=\pm\%2.5DSS} + 0.00105 N_{\epsilon=\pm\%5DSS} + 0.00229 u_{N10DSS} - 0.00127 N_{rumaxDSS} \quad r=0.52$$

$$r_{umaxDSS} = 0.678 - 0.00143 N_{umaxCTX} + 0.007 r_{umaxCTX} - 0.00840 u_{N10CTX} + 0.0108 u_{N15CTX} + 0.00095 N_{\epsilon=\pm\%2.5CTX} + 0.00065 N_{\epsilon=\pm\%5CTX} \quad r=0.50$$

8. SONUÇLAR

Adapazarı siltlerinin deprem koşullarında davranışı ile ilgili yapılmakta olan çalışmalar bazı önemli bulgular sağlamış ve ileri çalışmalara ışık tutacak ipuçları vermiştir.

1. Siltli zeminlerin sismik koşullarda davranışı kumlardan farklı olarak boşluk suyu basınçlarının yükselmesi ve şekil değiştirme'nin birlikte ve bağımsız etkileri ile gerçekleşmektedir
2. Siltin bentonit ve kaolin gibi iki farklı kökenden kille karışımı ile oluşturulan numunelerin dinamik deneylerde davranışı plastisite'nin yenilme/sıvılaşma mekanizmalarında önemini ön plana çıkartmıştır.
3. Dinamik deneylerde N=15. çevrimdeki boşluk suyu basıncı u_{wN15} yenilmenin tanısında önemli bir aşamadır.
4. CTX deneyinde ölçülen ε_z değeri ile DSS'teki γ değeri arasında değişken bir bağıntı vardır.
5. Başlangıç sıvılaşmasının kesinlikle olduğu numunelerde CTX'te $r_u=1$ 'e ulaşılmakta ancak DSS'te r_u değeri 0.9-0.95 düzeyinde gerçekleşmektedir.
6. Doğal numunelerde yapılan tüm laboratuvar deneyleri sonucunda(DSS,CTX) N=15 koşulunda sıvılaşması "olanaksız" zemin olarak $w_L=36$, $I_p>18$, $w_n/w_L<0.8$ özellikleri tanımlanmıştır.
7. Zeminin kil içeriği C, dinamik davranışını etkileyen en önemli öge olarak belirlemiştir. Mineralojik özelliğinden bağımsız olarak $C>22$ sıvılaşmanın üst sınırını gösterir.
8. Sıvılaşma analizine girecek parametrelerin likit limit, plastisite indisi, kil oranı, ortalama dane çapı ve w_n/w_L oranı olacağı görüşüne varılmıştır. Bu parametrelerin problemin çözümüne katkısı korelasyon katsayısı değerine göre geliştirilen bir "Etkin değer, E_d " ile değerlendirilmelidir.
9. E_d arttıkça N=15'te gelişen boşluk suyu basınçlarının da yükseldiği, buna karşın E_d değeri arttıkça $\pm 5\%$ deformasyona ulaşmak için gerekli olan çevrim sayılarının azaldığı sonucuna varılmıştır. $E_d=50$ sıvılaşma/yenilme için eşik değer olarak alınabilir. Bu sınırın altında CTX deneyde denenen numunelerin hiçbirinde çevrim esnasında boşluk suyu basıncı çevre basıncına eşitlenmemiştir.
10. CTX deneylerinde 15. çevrim için en büyük boşluk suyu basıncı için 36 olan likit limit (Casagrande) eşik değeri DSS deneylerinde Adapazarı kriterini de teyit eder şekilde 33 değerinde kalmıştır. Koni düşürme ile bulunan likit limit değeri Casagrande'deki değerinden ortalama 4 birim büyük bulunduğundan likit limit eşik değeri 37 olarak elde edilmiştir. Eşik değerlerden sonraki sınır doğru eğimleri ise iki durumda da eşit bulunmuştur. Yapay numunelerde yapılmış deney sonuçları bu bulgu ile örtüşmektedir.
11. CTX verilerine göre 0.012 mm olarak belirlenen ortalama dane boyutunun DSS deney verilerine göre beliren değerinin (0.02 mm) Adapazarı kriterini tasvip eder büyüklükle olduğu dikkat çekmektedir.
12. Konu şekil değiştirme bazlı değerlendirildiğinde $w_{L(cas)}>60$ durumunda ve $I_{p(cas)}>37$, $I_{p(koni)}>40$ olması durumunda 5% deformasyona ulaşmak için en az 100 çevrim gerekmektedir. Daha basit deyişle, bu değerler hiçbir koşulda yenilmeyecek sınırları göstermektedir.

13. DSS deneyinde %15' den daha az kil içeriğine sahip numunelerin hemen tümü 15. çevrim civarında $r_u=0.9$ eşdeğeri boşluk suyu basıncı göstermişse $\pm\%5$ deformasyona da ulaşmıştır.
14. Doğal numunelerde Adapazarı kriterinde kullanılan fiziksel özellikler ile dinamik parametreler arasında oluşturulan çoklu regresyon modellerinde fiziksel parametrelerden %C ve w_L ile en yüksek, I_L ve D_{50} ile ise orta düzeyde korelasyon katsayıları bulunmuştur. Doğal numunelerde DSS verileri ile yapılan çoklu regresyon modelleri iyi derece ilişkiler gösterirken CTX verileri ile orta düzeyde ilişkilerin varlığı saptanmıştır. Yapay numunelerde Kaolinit karışımlar benzer sonuçları verirken CTX'de Bentonit karışımlarla yapılan I_L ve D_{50} ile de yüksek korelasyon katsayıları bulunmuştur.
15. Bentonit karışımlar hem DSS hem de CTX deney sistemlerinden elde edilen verilerle fiziksel özellikler arasında güçlü çoklu korelasyonlar gösterirken Kaolinit karışımlarda CTX'de yüksek, DSS'de ise orta düzeyde korelasyonlar vermektedir.
16. Doğal numunelerde Adapazarı kriteri dışında denenen fiziksel parametrelerden I_p ile dinamik özellikler arasında DSS'te yüksek korelasyon katsayıları bulunurken Bentonit karışımlarda her iki deney sisteminde de iyi ilişkiler, kaolinitte ise DSS'te düşük CTX'de yüksek korelasyonlar saptanmıştır.
17. Yapılan analizlerden I_p nin Adapazarı kriterinde kullanılan diğer fiziksel özellikler gibi dinamik parametrelerle yüksek korelasyon katsayıları verdiği ve bu parametrenin Adapazarı kriteri için alternatif bir seçenek olduğu bulgusuna varılmıştır.

9. ÖNERİLER

106M042 Projesi kapsamında aşırı sayıda deney yapılarak geniş bir veri tabanı geliştirilmiştir. Burada yapılan analizler genel karakterli olup, korelasyonların geliştirilmesiyle Adapazarı Kriterinin revizyonu gündeme gelebilecektir.

Sıvılaşmanın laboratuvar deneyi sonuçlarına bakılarak değerlendirilmesi, bunların deney koşullarına aşırı duyarlı olması nedeniyle bu aşamada uygun görünmemektedir. Önerimiz Adapazarında mevcut sitelerden kesin sıvılaşan ve sıvılaşmayanların seçilerek bundan sonraki depremde oluşacak boşluk suyu basınçlarının doğrudan ölçülmesidir.

KAYNAKÇA

- Andrews, D.C.A. and Martin, G.R., Criteria for Liquefaction of Silty Soils, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand Paper 0312, (2000).
- Bilge, H. T. Cyclic volumetric and shear strain responses of fine-grained soils, Ph.D. Dissertation, Middle East Technical University, Ankara. (2010).
- Bol, E., Önalp, A., Arel, E., Sert, S., Özocak, A., Liquefaction of silts: the Adapazari criteria, Bulletin of Earthquake Engineering, 8:859–873. (2010).
- Boulanger, R. W., Clarence, K. C., Seed, H. B., Seed, R. B., and Sousa, J.B. "A low-compliance bi-directional cyclic simple shear apparatus." Geotech. Testing Journal, 16,1, 36–45 (1993).
- Bray, J.D. and Sancio, R.B. Assessment of liquefaction susceptibility of fine grained soils Journal Geotech. and Geoenvironmental Eng. ASCE 27, 2, 31-41 (2006).
- Casagrande, A. Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of earthfills Journal Boston Soc. Civil Eng. 23, 257-276 (1936).
- Castro, G., Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands, Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.101, No. GT6, 551-569, (1975).
- Das, B.M., Fundamentals of Soil Dynamics, Elsevier Science Publishing, New York, (1983).
- Donahue, J.L., J.D. Bray, M.F. Riemer The Liquefaction susceptibility, resistance and response of silty and clayey soils USGS Report 05HQGR0009, (2007).
- Duran, İ.B., Sismik Etkiler Alan İnce Daneli Zeminlerin Rijitlik Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İKÜ/FBE, (2010).
- Hazen, A. A study of the slip in the Calaveras Dam Eng. News Record 81, 26, 1158-1164 (1918).
- Hazirbaba, K. and Ellen M. Rathje Pore Pressure Generation of Silty Sands due to Induced Cyclic Shear Strains Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, No. 12, 1892-1905, (2009).
- Hoeg, K., Dyvik, R., Sandbakken, G. Strength of undisturbed versus reconstituted silt and silty sand specimens Journal Geotechnical and Geoenvironmental Eng. ASCE 126(7):606-617 (2000).
- Idriss, I.M., An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential, Proc., TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction, January, Publication No. FHWA-RD-99-165, Federal Highway Administration. (1999).

- Idriss, I.M., ve Boulanger, R.W., Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes, Proceedings of the 11th ICSDEE & 3rd ICEGE pp 32 – 56, Berkeley, California, USA, (2004).
- Ishihara, K., Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics, 1st Ed., Clarendon Press, Oxford, 350p. (1996).
- Jefferies, M. ve Been K., Soil Liquefaction: A Critical State Approach, Taylor&Francis, London, 479p. (2006).
- Kramer, S.L. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey (1996).
- Kramer, S.L. ve Elgamal, A.W., Modeling Soil Liquefaction Hazards For Performance-Based Earthquake Engineering, Peer Report 2001, Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley, (2001).
- Liu, G. Verification of shear wave velocity based liquefaction criteria using centrifuge model Ph.D.Thesis, Case Western University (2009)
- Marcuson, W.F.III Definition of terms related to liquefaction
Journal of Geotech.Eng.ASCE 104:9:1197 (1978).
- Mitchell, J.K. ve Soga Fundamentals of Soil Behaviour 3.Ed. 559s., J.Wiley, NewYork (2005).
- Önalp, A. ve Arel, E., Siltlerin sıvılaşma yeteneği: Adapazarı Kriteri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, (2002).
- Önalp, A., Arel, E., Bol, E., Özocak, A., Sert, S. Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesinde Koni Penetrasyon Deneyi Sönümlenme Yönteminin Uygulanması TÜBİTAK,Proje No.104M387, 350s., Adapazarı (2007)
- Polito, C.P., The Effects of Non-Plastic and Plastic Fines on the Liquefaction of Sandy Soils, Ph.D.Thesis, Virginia Polytechnic Institute (1999).
- Polito, C.P. ve Martin, J.P., 2001, Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127 No. 5, s. 408-414, (2001).
- Robertson, P.K. ve Wride, C.E., Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test, Canadian Geotechnical Journal, 35 (3), S. 442-459, (1998).
- Seed, H.B., and Idriss, I.M., Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA, 134 pp. (1982).
- Seed, H.B. ve Lee, K.L., Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, V.92, No.SM6, s.105-134, (1966).

Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., Riemer, M. F., Sancio, R. B., Bray, R. B., Kayen, R. E., Faris, A. "Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework", Report No. EERC 2003-06, University of California, Berkeley (2003).

The English Language Institute of America., The New Grolier Webster International Dictionary of the English Language, (1971).

Towhata, I, Geotechnical Earthquake Engineering, Springer-Verlag, Berlin, 684p. (2008).

Ural, N., İnce Daneli Zeminlerde Kil Oranının Sıvılaşmaya Etkisi, Doktora Tezi, SAÜ/FBE, (2008).

Wang, W.S., Some Findings in Soil Liquefaction, Research Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, (1979).

Youd, T.L. ve Holzer, T.L. Piezometer performance at Wildlife liquefaction site Journal Soil Mechanics and Foundations ASCE 120, GT6, 975-995 (1994).

EKLER:

EK-1 SONDAJ LOGLARI

EK-2 YAPAY NUMUNELER DENEY ÖZET TABLOSU

EK-3 DOĞAL NUMUNELER DSS VE CTX DENEY SONUCU EĞRİLERİ

**TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje No: 106M042
Proje Başlığı: İnce Daneli Zeminlerin Sismik Koşullarda Yenilmesinin Adapazarı Kriterleri ile Tanısında Dinamik Deneylerin Etkisi
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Prof.Dr. Akın ÖNALP; Yrd.Doç.Dr. Ersin AREL; Yrd.Doç.Dr. Ertan BOL; Yrd.Doç.Dr. Aşkın ÖZOCAK; Yrd.Doç.Dr. Sedat SERT; Yrd.Doç.Dr. Nazile URAL
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: İstanbul Kültür Üniversitesi, Ataköy; Sakarya Üniversitesi, Adapazarı
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: İstanbul Kültür Üniversitesi
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: Mart 2007-Mayıs 2010
Öz : Bu çalışmada ince daneli zeminlerin deprem koşullarında davranışının dinamik ve daha basit laboratuvar deneylerinden yararlanılarak kestirilmesi için değişkenler arasında olası ilişkiler araştırılmıştır. Bu amaçla Adapazarı kent merkezinde bulunan ve depreme duyarlı siltler farklı koşullarda denenmiş ve depremde oluşacak boşluk suyu basınçları ve zeminin şekil değiştirmelerinin basit deneylerle tahmin edilebileceği anlaşılmıştır.
Anahtar Kelimeler: inşaat mühendisliği, geoteknik, deprem, Adapazarı kriteri, sıvılaşma, çevrimsel hareketlilik, dinamik üç eksenli kesme deneyi, dinamik basit kesme deneyi, fazla boşluk suyu basıncı, birim boy değiştirme, birim şekil değiştirme, likit limit, plastik limit, kil içeriği, ortalama dane boyutu
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/>
Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
Projeden Yapılan Yayınlar: <ol style="list-style-type: none">1. Arel, E., Geotechnical properties of Adapazarı silt, Canadian Geotechnical Journal (in review), SCI. 2010.2. Arel, E., Önalp, A., Sert, S., Normal Yüklenmiş Zeminlerde Sıkışma İndisinin Yapay Sinir Ağları Kullanımıyla Fiziksel Özelliklerden Tahmini, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi, 30 Eylül - 1 Ekim 2010, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 2010.3. Bol, E., Önalp, A., Özocak, A., Zemin Sınıflandırılmasının CPTU İle Yapılmasında Etkin Parametre Seçimi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi, 30 Eylül - 1 Ekim 2010, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 2010.4. Bol, E., Önalp, A., Özocak, A., Yapay Sinir Ağlarıyla Zemin Özellikleri ve Deprem Hasarı İlişkisinin Belirlenmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü

Ulusal Kongresi, 30 Eylül - 1 Ekim 2010, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 2010.

5. Duran, İ.B., Sismik Etkiler Alan İnce Daneli Zeminlerin Rijitlik Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İKÜ/FBE, İstanbul, 2010.
6. Okur, M.E., Bol, E.,. Koni Penetrasyon Çalışmalarında Sönümlenme Deneyi İle Konsolidasyon Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi, 30 Eylül - 1 Ekim 2010, SAÜ/FBE, İstanbul, 2010.
7. Okur, M.E., Koni Penetrasyon Çalışmalarında Sönümlenme Deneyi ile Zemin Konsolidasyon Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ/FBE, Sakarya, 2010.
8. Önalp, A., Duran, İ.B., Arel, E., Dinamik Üç Eksenli ve Basit Kesme Yöntemlerinin Kayma Modülüne Göre Karşılaştırılması. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi, 30 Eylül - 1 Ekim 2010, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 2010.