

127185

**ÖRSELENMEMİŞ KİLLİ ZEMİNLERİN STATİK
MUKAVEMETİNE DEPREM YÜKLERİNİN ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Recep ÖZAY
(501932007)

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Mart 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Ekim 2002

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Ayfer ERKEN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Atilla M. ANSAL (B.Ü.)
Prof.Dr. Kutay ÖZAYDIN (Y.T.Ü.)
Prof.Dr. Kemal ÖZÜDOĞRU (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Erol GÜLER (B.Ü.)

EKİM 2002

127185

ÖNSÖZ

Çalışmanın her aşamasında büyük bir sabırla ve titizlikle yönlendirmelerini esirgemeyen karşılaştığım problemlerin çözümünde yardımcı olan tez hocam Doç.Dr. Ayfer ERKEN'e, Deprem Geoteknik Mühendisliğini yurdumuza tanıtan ve getiren değerli bilim adamı Prof.Dr. A.M.Ansal'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Ayrıca Doç.Dr. Recep İYİSAN'a, Arş.Görevlileri Derviş Volkan OKUR'a, Süha AKSOY'a ve İnş.Yük.Müh. Recep OKAN'a, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Geoteknik Anabilim Dalı Zemin Mekaniği Laboratuvarı tüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Uzun süren bu çalışmam boyunca gerekli anlayışı gösteren İ.T.Ü. Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanına, çalışma arkadaşlarıma ve eşim A.Nur ÖZAY'a teşekkür ederim.

EKİM 2002

Recep ÖZAY

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xvii

1.GİRİŞ

2.İNCE DANELİ ZEMİNLERİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI	4
2.1 Giriş	4
2.2 Killerin Dinamik Yükler Altında Mukavemet Davranışı İle İlgili Çalışmalar	5
2.3 İnce Daneli Zeminlerin Gerilme-Şekil Değiştirme Özellikleri İle İlgili Çalışmalar	32
2.3 Sonuç	40

3.DENEY SİSTEMİ KULLANILAN MALZEME VE DENEYLER	42
3.1 Giriş	42
3.2 Kullanılan Deney Sistemi	43
3.2.1 Yükleme Birimi ve Üç Eksenli Hücre	43
3.2.2 Elektriksel Ölçüm Birimi	46
3.3 Numune Hazırlanması	48
3.4 Deneylerin Yapılışı	49
3.5 Verilerin Toplanması	56
3.6 Numunelerin Özellikleri	57
3.6.1 Numunelerin Fiziksel Özellikleri	57
3.6.2 SPT Deneyleri	63
3.6.3 Numunelerin Konsolidasyon Özellikleri	64
3.7 Deney Sonuçları	65
3.7.1 Dinamik Deneyler	66
3.7.2 N=20 Çevrim Dinamik Ve Sonra Statik Deneyler	70
3.7.3 Statik Deneyler	73
3.7.4 En Büyük Elastisite Modülü Ölçümü Yapılan Deneyler	74
3.8 Sonuç	77

4.SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	78
4.1 Giriş	78
4.2 Zemin Kıvamının Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi	78
4.3 Plastisitenin Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi	82
4.4 Frekansın Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi	85

4.5 Konsolidasyon Basıncının Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi	86
4.6 Kaba Dane Oranının Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi	87
4.7 Dinamik Kayma Gerilmesi Oranının Boşluk Suyu Basıncına Etkisi	89
4.8 Dinamik Kayma Gerilmesi Oranının Birim Boy Değişimine Etkisi	93
4.9 Dinamik Ön Yüklemenin Statik Mukavemet Üzerinde Etkisi	97
4.10 Çevrim Sayısının DKGO Üzerinde Etkisi	106
4.11 Hacim Değişimleri	111
4.11.1 Dinamik Yüklemeden Oluşan Hacim Değişimleri	111
4.11.2 Dinamik Yükleme Sonrası Statik Yükleme Hacim Değişimleri	115
4.12 Dinamik Yükleme Elastisite Modülü İlişkileri	118
4.12.1 Elastisite Modülü Birim Boy Değişimi İlişkileri	118
4.12.2 Elastisite Modülü Konsolidasyon Basıncı İlişkileri	120
4.12.3 Elastisite modülü DKGO İlişkileri	123
4.12.4 Başlangıç Elastisite Modülünün Mukavemete Etkisi	124
4.13 Sonuç	128
5.SONUÇLAR	129
KAYNAKLAR	133
EKLER	141
EK A Dinamik deney grafikleri	142
EK B N=20 Çevrim dinamik ardından statik deney grafikleri	153
ÖZGEÇMİŞ	166

KISALTMALAR

DGKO	: Dinamik kayma gerilmesi oranı
BSBO	: Boşluk suyu basıncı oranı
SPT	: Standart penetrasyon deneyi
CPT	: Konik penetrasyon deneyi
AKO	: Aşırı konsolidasyon oranı
KDO	: Kaba dane oranı
İDO	: İnce dane oranı



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : G_0 için önerilen ampirik bağıntılar.....	34
Tablo 3.1 : Dinamik deney yapılan numunelerin fiziksel özellikleri.....	58
Tablo 3.2 : N=20 çevrim dinamik ardından statik yükleme yapılan numunelerin fiziksel özellikleri.....	60
Tablo 3.3 : Dinamik elastisite modülü deneyi yapılan numunelerin fiziksel özellikleri.....	61
Tablo 3.4 : Statik deney yapılan numunelerin fiziksel özellikleri	62
Tablo 3.5 : SPT değerlerinin düzeltilmesi.....	64
Tablo 3.6 : Numunelerin konsolidasyon özellikleri.....	65
Tablo 3.7 : Dinamik deneylerde uygulanan gerilmeler ve sonuçlar.....	67
Tablo 3.8 : N=20 Çevrim dinamik ardından statik yüklemeli deney sonuçları.....	71
Tablo 3.9 : Statik deney sonuçları.....	74
Tablo 3.10 : Elastisite modülü ölçümü yapılan deney sonuçları.....	76
Tablo 4.1 : Dinamik ve statik gerilme değerleri.....	104

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Sıkıştırılmış killi zeminin tek yönlü puls tipi yükleme altında davranışı (Larew ve Leonards, 1962).....	6
Şekil 2.2 : Tek ve çift yönlü yükleme tiplerinin dinamik mukavemete etkisi (Seed ve Chan, 1966).....	7
Şekil 2.3 : Statik birim şekil değiştirme özelliğinin dinamik mukavete etkisi (Thiers ve Seed, 1969).....	8
Şekil 2.4 : Dinamik deney sonrası statik üç eksenli basınç deneyi (Lee ve Focht, 1975).....	9
Şekil 2.5 : Aşırı konsolidasyonun dinamik mukavemete etkisi (Lee ve Focht, 1975).....	9
Şekil 2.6 : Tekrarlı yük ile ϵ_d ilişkisi (Toğrol ve diğerleri, 1978).....	10
Şekil 2.7 : AKO nun tekrarlı yük altında BSBO artımına etkisi (Koutsoftas, 1978).....	11
Şekil 2.8 : τ/τ_f seviyesinin boşluk suyu basıncı üzerindeki etkisi (Erken, 1982).....	15
Şekil 2.9 : τ/τ_f seviyesinin birim kayma üzerindeki etkisi (Erken, 1982).....	15
Şekil 2.10 : Gerilme kontrollü deneylerde $\epsilon_{da} = \% 5$ için değişik frekanslarda gerilme oranı çevrim sayısı ilişkisi (Procter ve Khaffaf, 1985).....	16
Şekil 2.11 : Deformasyon kontrollü deneylerde $\epsilon_{da} = \% 5$ için değişik frekanslarda gerilme oranı çevrim sayısı ilişkisi (Procter ve Khaffaf, 1985).....	17
Şekil 2.12 : Oturma için eşik birim deformasyonuna konsolidasyon basıncının ve AKO nun etkisi (Matsuda, 1987).....	18
Şekil 2.13 : Normal konsolide killerde dinamik gerilmenin ve konsolidasyon basıncının efektif gerilme izlerinde gösterilişi (Matsui ve Bahr, 1992).....	22
Şekil 2.14 : $\epsilon_{da} = \% 10$ için tekrarlı deviator gerilme oranı çevrim sayısı ilişkisi (Hyodo ve diğerleri, 1994).....	23
Şekil 2.15 : Normalize edilmiş deprem sonrası mukavemetin plastisiteye göre değişimi (Govil ve Houston, 1995).....	25
Şekil 2.16 : Siltlerde $\epsilon_{da} = \% 5$ ve $\sigma_3 = 103.5$ kPa plastisite indisinin dinamik gerilme oranına etkisi (Das ve diğerleri, 1999).....	27
Şekil 2.17 : Normal konsolide killerde dinamik deviatorik gerilme oranı ($R_{1(N=20)}$) plastisite ilişkisi (Hyodo, 1997).....	28
Şekil 2.18 : Tekrarlı gerilme oranı çevrim sayısı değişimi (Pradan ve diğerleri, 1999).....	29
Şekil 2.19 : Silt-Kil karışımlarının dinamik gerilme oranı plastisite ilişkisi (Guo ve Prakash, 1999).....	30

Şekil 2.20 :	Dinamik gerilme plastisite indisi ilişkisi $N=20$ Normal konsolide killeri (Hyodo ve diğerleri, 1999).....	31
Şekil 2.21 :	$\sigma_{vy} > \sigma'_c > \sigma'_{vo}$ için $N=20$ çevrimdeki killerin tekrarlı gerilmesi (Hyodo ve diğerleri, 1999).....	31
Şekil 2.22 :	Dinamik kayma modülü-boşluk oranı ilişkisi (Hardin ve Black, 1968).....	32
Şekil 2.23 :	Plastik killeri için konsolidasyon basıncı ve gerilme tarihçesine bağlı olarak kayma modülünün değişimi (Koutsoftas ve diğerleri, 1980).....	35
Şekil 2.24 :	Birim kayma ve AKO değerlerine bağlı olarak normalize edilmiş kayma modülünün değişimi (Koutsoftas ve diğerleri, 1980).....	35
Şekil 2.25 :	$G_{maks.}-\sigma_c$ ilişkisi (Borden ve diğerleri, 1996).....	38
Şekil 3.1 :	Dinamik üç eksenli deney sisteminin yandan ve önden görünüşü..	44
Şekil 3.2 :	Dinamik üç eksenli deney sistemi hücresi.....	45
Şekil 3.3 :	Dinamik yükleme ölçüm ve kayıt birimleri.....	47
Şekil 3.4 :	Ölçüm ve kayıt birimi fotoğrafı.....	48
Şekil 3.5 :	Numune hazırlama aletleri fotoğrafı.....	50
Şekil 3.6 :	Deneylerde kullanılan numunelerin plastisite kartında görünüşü...	58
Şekil 3.7 :	DKGO=0.42 olan D08 deney sonuçları.....	69
Şekil 3.8 :	DKGO=0.42 olan D08 nolu deneyin gerilme birim boy değişimi. ve boşluk suyu basıncı oranı birim boy değişimi.....	70
Şekil 3.9 :	DKGO=0.40 olarak $N=20$ çevrim uygulanan ve ardından $\epsilon = \%20$ lik eksenel birim boy değişimi kadar statik yükleme yapılan DS56 nolu deney sonuçları.....	73
Şekil 3.10 :	S75 nolu statik deneyin gerilme birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı birim boy değişimi ilişkileri.....	74
Şekil 4.1 :	Birim boy değişimi $\epsilon_{da} = \%2$ için kıvrımın DKGO'na etkisi.....	79
Şekil 4.2 :	Birim boy değişimi $\epsilon_{da} = \%5$ için kıvrımın DKGO'na etkisi.....	80
Şekil 4.3 :	$I_p = 15-22$ etkisi aralığında olan killerin DKGO üzerinde kıvrımın etkisi ve diğer çalışmalarla karşılaştırılması.....	80
Şekil 4.4 :	$I_p = 27-30$ aralığında kıvrımın DKGO üzerinde etkisi.....	81
Şekil 4.5 :	$I_p = 15-24$ aralığında kıvrımın DKGO üzerinde etkisi ve diğer çalışmalarla karşılaştırma yapılması.....	82
Şekil 4.6 :	$I_p = 39-40$ aralığında zemin kıvrımının DKGO'na etkisi.....	83
Şekil 4.7 :	Konsolidasyon basıncı $\sigma_c = 100$ kPa olan numunelerde $\epsilon_{da} = \%5$ için plastisitenin DKGO üzerinde etkisi.....	84
Şekil 4.8 :	Konsolidasyon basıncı $\sigma_c = 150$ kPa olan numunelerde $\epsilon_{da} = \%2$ için plastisitenin ve kıvrımın DKGO'na etkisi.....	84
Şekil 4.9 :	Farklı çevrim sayılarında birim boy değişimi $\epsilon_{da} = \%5$ için plastisitenin DKGO na etkisi ve diğer araştırmacıların elde ettiği sonuçlarla karşılaştırma yapılması.....	85
Şekil 4.10 :	Frekansın DKGO'na etkisi ve Hyodo ve diğerlerinin (1999 deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	86
Şekil 4.11 :	Birim boy değişimi $\epsilon_{da} = \%2$ için konsolidasyon basıncının dinamik kayma gerilmesi oranı DKGO ya etkisi.....	87
Şekil 4.12 :	Birim boy değişimi $\epsilon_{da} = \%5$ için konsolidasyon basıncının dinamik kayma gerilmesi oranı DKGO 'na etkisi.....	88

Şekil 4.13 :	Birim şekil boy değişimi, $\epsilon_{da}=\%5$ için kaba dane oranının dinamik kayma gerilmesi oranına etkisi.....	88
Şekil 4.14 :	Yüksek plastisiteli ($I_p=28-40$) killerde $N=20$ için dinamik kayma gerilmesi oranı DKGO boşluk suyu basıncı oranı BSBO değişimi.....	90
Şekil 4.15 :	Düşük plastisiteli ($I_p=13-26$) killerde $N=20$ için dinamik kayma gerilmesi oranı DKGO boşluk suyu basıncı oranı BSBO değişimi.....	90
Şekil 4.16 :	Düşük plastisiteli ($I_p=21$) olan killerde dinamik kayma gerilmesi oranı DKGO'nın boşluk suyu basıncı.....	91
Şekil 4.17 :	Yüksek plastisiteli ($I_p=30$) olan killerde dinamik kayma gerilmesi oranı DKGO'nın boşluk suyu basıncı oranı BSBO üzerinde etkisi.....	92
Şekil 4.18 :	Yüksek plastisiteli ($I_p=34$) olan kumlu killerde dinamik kayma gerilmesi oranı DKGO'nın boşluk suyu basıncı oranı BSBO üzerinde etkisi.....	93
Şekil 4.19 :	$N=20$ çevrim için yüksek plastisiteli ($I_p=26-44$) killerde DKGO-birim boy değişimi (ϵ_{da}) ilişkisi.....	94
Şekil 4.20 :	$N=20$ çevrim için düşük plastisiteli ($I_p=15-22$) killerde DKGO-birim boy değişimi (ϵ_{da}) ilişkisi.....	94
Şekil 4.21 :	21 Düşük plastisiteli killerde DKGO-birim boy değişimi ilişkisi...	95
Şekil 4.22 :	Yüksek plastisiteli killerde DKGO-birim boy değişimi ilişkisi.....	96
Şekil 4.23 :	Kumlu killerde (DKGO) nın birim boy değişimine etkisi.....	97
Şekil 4.24 :	DS57 deneyin dinamik gerilme birim boy değişimi özellikleri.....	98
Şekil 4.25 :	DS55-DS56-DS57 nolu deneylerin dinamik yüklemen sonra gerilme birim boy değişimi davranışları.....	99
Şekil 4.26 :	$I_p=30$ olan ve 100 kPa basınç altında konsolide edilen numunelerde mukavemet kaybı.....	99
Şekil 4.27 :	Ön dinamik yüklemenin mukavemet azalmasına etkisinin değişik numunelerde gösterilmesi etkisi.....	100
Şekil 4.28 :	Plastisitesi $I_p=30-40$ aralığında olan $\sigma_c=100-150$ kPa aralığında konsolide edilmiş numunelerde mukavemet azalımı.....	101
Şekil 4.29 :	Plastisitesi $I_p=18-28$ aralığında olan $\sigma_c=150$ kPa altında konsolide edilmiş numunelerde mukavemet azalımı.....	102
Şekil 4.30 :	$N=20$ çevrimde oluşan birim boy değişiminin mukavemet kaybına etkisi.....	103
Şekil 4.31 :	Farklı numunelerde DKGO- σ_a değişimi.....	104
Şekil 4.32 :	Statik mukavemet azalımının σ_d/σ_a ya göre değişimi.....	105
Şekil 4.33 :	Statik mukavemet azalımının DKGO'na göre değişimi.....	106
Şekil 4.35 :	$N=20$ çevrim için kıvamın DKGO'na etkisi.....	107
Şekil 4.35 :	$N=20$ çevrim için kıvamın DKGO'na etkisi.....	108
Şekil 4.36 :	$I_p=29-30$ ve $I_c=0.23-0.47$ aralığında farklı çevrim sayılarına göre DKGO-birim boy değişimi ilişkisi.....	109
Şekil 4.37 :	$N=1$ için DKGO-birim boy değişimine plastisitenin etkisi.....	109
Şekil 4.38 :	$N=5$ için DKGO-birim boy değişimine plastisitenin etkisi.....	110
Şekil 4.39 :	$N=10$ için DKGO-birim boy değişimine plastisitenin etkisi.....	110
Şekil 4.40 :	$N=20$ için DKGO-birim boy değişimine plastisitenin etkisi.....	111
Şekil 4.41 :	$I_p=26-29$ ve $I_c=0.40-0.60$ olan killerde DKGO- ϵ_{vd} ilişkisi.....	112

Şekil 4.42 :	$I_p=26-40$ ve $I_c=0.68-0.98$ aralığında olan numunelerde dinamik kayma gerilmesi oranının hacimsel deformasyona etkisi..	112
Şekil 4.43 :	$I_p=15-21$ ve $I_c=0.65-0.93$ aralığında olan numunelerde dinamik kayma gerilmesi oranının hacimsel deformasyona etkisi..	113
Şekil 4.44 :	$I_p=18-40$ ve $I_c=0.30-0.90$ aralığında DKGO ϵ_{vd} ilişkisi.....	114
Şekil 4.45 :	Hacimsel deformasyon birim boy değişimi ilişkisi.....	114
Şekil 4.46 :	Plastisitesi 30-32 olan dinamik sonrası statik deneylerde hacimsel deformasyonun dinamik kayma gerilmesi oranına göre değişimi.....	115
Şekil 4.47 :	$I_p=36-44$ olan numunelerde dinamik sonrası statik deneylerde DKGO-hacimsel deformasyon ilişkisi.....	116
Şekil 4.48 :	$I_p=21-24$ olan numunelerde dinamik sonrası statik deneylerde DKGO-hacimsel deformasyon ilişkisi.....	116
Şekil 4.49 :	Dinamik sonrası statik deneylerde birim boy değişimi, ϵ_{sa} ün hacim değişimi, ϵ_{vd} ye göre değişimi.....	117
Şekil 4.50 :	Dinamik ve dinamik sonrası statik deneylerde DKGO- ϵ_{vd} değişimi.....	118
Şekil 4.51 :	DG58 nolu deney dinamik gerilme çevrim sayısı değişimi.....	119
Şekil 4.52 :	DG58 nolu deney elastisite modülü birim boy değişimi ilişkisi.....	119
Şekil 4.53 :	Konsolidasyon basıncı 120-250 kPa, $I_p=14-33$ ve $I_c=0.67-1.00$ arasındaki zeminlerde elastisite modülü oranı, (E/E_m) -birim boy değişimi, (ϵ) ilişkisi.....	121
Şekil 4.54 :	Yüksek plastisiteli numunelerde en büyük elastisite modülü üzerinde konsolidasyon basıncının etkisi ve E değerlerinin literatürle karşılaştırılması.....	121
Şekil 4.55 :	Dinamik kademeli yükleme deneyi yapılan $I_p=14-25$, $I_c=0.67-0.88$ aralığındaki katı numunelerde $E-\sigma_c$ ilişkisi.....	122
Şekil 4.56 :	Statik deney yapılan $I_p=19-25$ $I_c=0.65-1.04$ aralığındaki katı numunelerde $E-\sigma_c$ ilişkisi.....	122
Şekil 4.57 :	E modülüne DKGO'nın etkisi ($I_p=20-24$ $I_c=0.65-0.80$).....	123
Şekil 4.58 :	E modülüne DKGO'nın etkisi ($I_p=30$ $I_c=0.23-0.47$).....	124
Şekil 4.59 :	E modülüne DKGO'nın etkisi (kıvam ve plastisite farklı).....	124
Şekil 4.60 :	Başlangıç elastisite modülünün statik deviatorik gerilmeye etkisi..	125
Şekil 4.61 :	Boşluk oranı, (e) ve elastisite modülü, (E_m) değişimi ($I_p=33-40$)...	126
Şekil 4.62 :	Boşluk oranı E modülü değişimi ($I_p=14-30$).....	127
Şekil 4.63 :	Ölçülen G_0 değerleri ve hesaplanan G_0 değerleri dağılımı.....	127
Şekil A1 :	D04 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının, çevrim sayısı, (N) 'e göre değişimi.....	142
Şekil A2 :	D06 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının, çevrim sayısı, (N) 'e göre değişimi.....	143
Şekil A3 :	D08 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının, çevrim sayısı, (N) 'e göre değişimi.....	144
Şekil A4 :	D16 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının, çevrim sayısı, (N) 'e göre değişimi.....	145

Şekil A5 :	nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.....	146
Şekil A6 :	D26 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.....	147
Şekil A7 :	D30 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.....	148
Şekil A8 :	D31 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.....	149
Şekil A9 :	Dsil01 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.....	150
Şekil A10 :	Dsil03 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.....	151
Şekil A11 :	Dapz01 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.....	152
Şekil B1 :	DS37 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimi....	153
Şekil B2 :	DS38 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimi....	154
Şekil B3 :	DS41 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimi....	155
Şekil B4 :	DS44 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimi....	156
Şekil B5 :	DS45 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimi....	157
Şekil B6 :	DS41 nolu deneyin gerilme-birim boy değişimi ilişkileri.....	158
Şekil B7 :	DS44 nolu deneyin gerilme-birim boy değişimi ilişkileri.....	158
Şekil B8 :	DS45 nolu deneyin gerilme-birim boy değişimi ilişkileri.....	159
Şekil B9 :	DS47 nolu deneyin gerilme-birim boy değişimi ilişkileri.....	159
Şekil B10 :	DSY1 nolu deneyin gerilme-birim boy değişimi ilişkileri.....	160
Şekil B11 :	DSY1 nolu deneyin BSBO-birim boy değişimi ilişkileri.....	160
Şekil B12 :	DSY5 nolu deneyin gerilme-birim boy değişimi ilişkileri.....	161
Şekil B13 :	DSY5 nolu deneyin BSBO-birim boy değişimi ilişkileri.....	161
Şekil B14 :	DSY7 nolu deneyin gerilme-birim boy değişimi ilişkileri.....	162
Şekil B15 :	DSY7 nolu deneyin BSBO-birim boy değişimi ilişkileri.....	162
Şekil B16 :	DSY8 nolu deneyin gerilme-birim boy değişimi ilişkileri.....	163
Şekil B17 :	DSY8 nolu deneyin BSBO-birim boy değişimi ilişkileri.....	163
Şekil B18 :	DSY9 nolu deneyin gerilme-birim boy değişimi ilişkileri.....	164
Şekil B19 :	DSY9 nolu deneyin BSBO-birim boy değişimi ilişkileri.....	164
Şekil B20 :	DSadz2 nolu deneyin gerilme-birim boy değişimi ilişkileri.....	165
Şekil B21 :	DSapz2 nolu deneyin BSBO-birim boy değişimi ilişkileri.....	165

SEMBOL LİSTESİ

G_0, G_{maks}	: En büyük dinamik kayma modülü
$E_0, E_m,$	: En büyük elastisite modülü
E	: Elastisite modülü
e, e_0	: Boşluk oranı, başlangıç boşluk oranı
σ_d	: Dinamik düşey gerilme
σ_c	: Efektif çevre gerilmesi
σ_a	: Dinamik sonrası statik deviatorik gerilme
σ_s	: Statik deney deviatorik gerilme
ϵ_{fs}	: Statik deney göçme birim boy kısalması
ϵ_{da}	: Düşey çift yönlü birim boy değişimi
ϵ_{sa}	: Düşey tek yönlü birim boy değişimi
ϵ_{vd}	: Dinamik deney sonu hacimsel deformasyon
S_u	: Drenajsız mukavemet
ν	: Poisson oranı
γ	: Kayma gerilmesi genliği
S_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
τ	: Kayma gerilmesi
τ_f	: Nihai kayma gerilmesi
p_0	: Jeolojik yük
p_c	: Ön konsolidasyon basıncı
u	: Boşluk suyu basıncı
I_p	: Plastisite indisi
I_c	: Kıvam indisi
z	: Numunenin alındığı derinlik
ω_n, ω_0	: Doğal su muhtevası
ω_l	: Likit limit su muhtevası
ω_p	: Plastik limit su muhtevası
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlık
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
γ_s	: Dane birim hacim ağırlık
D	: Sönüm oranı
N_{60}	: Düzeltilmiş SPT değeri
N	: Çevrim sayısı
B	: Doygunluk derecesi
f	: Frekans
T	: Dinamik düşey yük
A_c	: Konsolidasyon sonu numune kesit alanı

ÖRSELENMEMİŞ KİLLİ ZEMİNLERİN STATİK MUKAVEMETİNE DEPREM YÜKLERİNİN ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmada örselenmemiş killi zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışını incelemek için 1995 yılında Dinar'da meydana gelen $M=5.9$ büyüklüğündeki depremden sonra bölgede yapılan geniş çaplı geoteknik araştırma sırasında piston numune alıcılarla sondaj kuyularından alınan killi zemin numuneleri üzerinde üç eksenli dinamik basınç deney aletinde deneyler yapılmıştır. Zeminlerin dinamik yükler etkisinde davranışının incelenmesine 1960'lı yıllarda başlanmış olup son yıllarda önem kazanarak devam etmektedir. Zeminlerin dinamik davranışlarının incelenmesi için arazi ve laboratuvar deneylerinden faydalanılır. Dinamik yükler etkisi altında zemin davranışı iki ana başlıkta incelenir. Bunlar, gerilme-birim şekil değiştirme özellikleri ve mukavemet özellikleridir.

Gerilme-birim şekil değiştirme özelliği olarak dinamik kayma modülü, birim kayma ve sönüm oranı incelenir. Mukavemet özelliği olarak ise kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayısı en önemli iki özelliktir. Bu çalışmada ağırlıklı olarak önce mukavemet özellikleri incelenmiş daha sonra gerilme şekil değiştirme özelliklerine değinilmiştir.

Çalışmanın giriş bölümünde zeminlerin dinamik davranışı ile ilgili genel bilgilerden bahsedilerek konu tanıtılmaya çalışılmıştır. Depremler sırasında suya doygun killi zeminlerde artan çevrim sayısına bağlı olarak boşluk suyu basıncında ve deformasyonlarda büyük artışlar meydana gelmektedir. Bunun sonucunda zeminde yumuşama oluşmakta iç yapı değişmekte ve deformasyonlar artmaktadır. Artan deformasyonlar sonucunda zemin üzerindeki yapılarda oturmalar ve dönmeler oluşmaktadır. Suya doygun killi zeminlerde tekrarlı yükler altında şevlerde kaymalar oluşmakta, ulaşım ve enerji hatlarında büyük hasarlar meydana gelmektedir.

Dinamik yükler altında zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet davranışları ile ilgili başka araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar tezin ikinci bölümünde verilmiştir. Killerin dinamik davranışı ile ilgili ilk deneysel çalışmalardan biri 1962 yılında Larew ve Leonards tarafından dinamik üç eksenli basınç deney aletinde laboratuvarda kompaksiyon yolu ile hazırlanmış numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmada dinamik mukavemetin statik mukavemetin % 77-84 olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmadan sonra günümüze kadar yapılan çalışmalarda killerin tekrarlı yükler etkisi altında davranışını etkileyen parametrelerin dinamik kayma gerilmesi oranı, gerilme geçmişi, plastisite indisi, aşırı konsolidasyon oranı (AKO), boşluk oranı, efektif çevre gerilmesi, yükleme hızı, yükleme şekli ve zemin yapısı olduğu belirtilmiştir. Laboratuvarda yapılan davranış incelemesinde deney sistemi ve tekniği de zeminlerin davranışını etkilemektedir. İnce daneli zeminlerde dinamik mukavemet plastisite, aşırı konsolidasyon oranı ve frekans arttıkça artmakta boşluk oranı azaldıkça yine dinamik mukavemet artmaktadır.

Bu bölümde ayrıca killi zeminlerin gerilme-birim şekil değiştirme davranışı ile ilgili literatür bilgileri de verilmiştir. Çok küçük birim boy değişimi seviyelerindeki Dinamik Kayma Modülünü etkileyen parametrelerin efektif çevre gerilmesi ve plastisite indisinin en önemli iki parametre olduğu gösterilmiştir. Zeminlerin sönüm oranının yumuşak zeminlerde daha çok olduğu da yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Dinamik kayma modülü ve sönüm oranının efektif çevre gerilmesine, gerilme geçmişine, boşluk oranına, doygunluğa, plastisiteye, aşırı konsolidasyon oranı AKO ya ve zemin yapısına bağlı olduğu gösterilmiştir. Tekrarlı yük etkisinde belirli bir çevrim sayısından sonra boşluk suyu basıncında ve birim boy değişimlerinde büyük artışlar oluşmaktadır. Birçok araştırmacı tarafından eşik birim boy değişimi seviyesi olarak bu nokta tanımlanmıştır. Eşik birim boy değişimi seviyesi aşıldıkça zeminde kalıcı şekil değiştirmeler oluşmakta ve mukavemet kaybı başlamaktadır.

Tezin üçüncü bölümünde bu çalışmada kullanılan deney sistemi detaylı olarak tanıtılmıştır. İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Geoteknik Anabilim Dalı Zemin Dinamiği Laboratuvarına JICA (Japonya Ululararası Yardım Ajansı) tarafından getirilen gelişmiş üç eksenli dinamik deney aletinde hem statik hem de dinamik deneyler yapılabilmektedir. Deney aletine bağlı elektrikli amplifikatörden düşey dinamik sinüzoidal yük, düşey boy değiştirme, boşluk suyu basıncı ve küçük boy değiştirmeler kaydedilmektedir. Bu değerler veri hatları vasıtası ile kişisel bilgisayara aktarılıp değerlendirilmektedir. Daha sonra kişisel bilgisayar ofis ortamında açılan bu verilerle deney sonuçları elde edilmiştir. Çok küçük birim boy değişimleri seviyesinde deneyler yapılarak en büyük elastisite modülü bu sisteme bağlı küçük yer değişimi ölçerler vasıtası ile hesap edilmiştir. Tezin bu bölümünde üç eksenli deney sisteminin nasıl kalibre edileceği ve deneyin yapılışı detaylı olarak anlatılmıştır.

Araziden piston numune alıcılarla mümkün olduğunca örselenmeden alınan numuneler yarılarak tüplerden çıkarılmış ve üç eksenli deney sisteminin hücrelerine yerleştirilmiştir. Dinamik deneyden önce konsolidasyon deneyleri yapılarak zeminin gerilme geçmişi hakkında bilgi edinilmiştir. Her dinamik deney sonunda fiziksel özellikleri belirlemek amacı ile numune 200 nolu elekten yıkanarak elenmiş ve kaba dane oranı bulunmuştur. Ayrıca her numunenin likit limiti ve plastik limiti de deneylerden sonra standart laboratuvar yöntemleri ile bulunmuştur. Dinamik deneylerin yapılışında ve numune hazırlanmasında JGS T 542-1995 ve JGS T 542-1995 nolu Japon Geoteknik Standartlarına uyulmuştur. Yapılan Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve laboratuvar indeks deney sonuçlarına göre numunelerin orta katı kil kıvamında olduğu, plastisitelerinin 15-44 arasında değiştiği ve CL ile CH sınıflarında olduğu bulunmuştur.

Dinamik üç eksenli deney aletinde dört değişik yükleme gurubu kullanılmıştır. Bunlardan ilk grup dinamik deneylerde seçilen dinamik kayma gerilmesi genliği altında numune göçünceye kadar deneye devam edilmiştir. Bazı numunelerde gerilme oranının düşük seçilmesinden ötürü yüklemeye çok uzun süre devam edildiği halde göçme meydana gelmemiş, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı artışları sınırlı seviyede kalmıştır. İkinci grup deneylerde numuneye önce $N=20$ çevrim tekrarlı gerilmeler uygulanmış sonra ara verilmeden drenajsız koşullarda deformasyon kontrollu statik deney yapılmıştır. Bu deneylerde numunede % 20 birim boy değişimi oluncaya kadar deneye devam edilmiştir. Tekrarlı gerilmenin düşük

olduğu numunelerde statik deviatorik gerilme daha yüksek meydana gelirken tekrarlı yükün şiddetinin artması ile statik deviatorik gerilmeye azalım meydana gelmiştir.

Üçüncü grup deneyler ise başlangıç elastisite modülünün ölçümü için yapılan deneylerdir. Bu deneylerde çok küçük değerlerden itibaren $N=5$ çevrim de bir artacak şekilde gerilme genlikleri uygulanarak küçük birim boy değişimleri ölçülmüştür. Uygulanan en küçük düşey tekrarlı gerilme etkisinde 10^{-5} mertebesindeki düşey birim boy değişimleri hesaplanarak elastisite modülü bulunmuş buradan poisson oranı $\nu=0.50$ alınarak en büyük Kayma Modülü $G_{maks.}$ elde edilmiştir. Son grup deneyler ise deformasyon kontrollü statik deneylerdir. Bu deneyler dinamik üç eksenli deney aletinde drenajsız koşullarda numunede %20 eksenel birim boy değişimi oluncaya kadar yapılmıştır.

Yukarıda anlatıldığı gibi yapılan bu deneyler sonucunda örselenmemiş killerin dinamik mukavemetini etkileyen parametreleri göstermek amacı ile dinamik kayma gerilmesi oranı, $DKGO=\sigma_a/2\sigma_c$ değerinin çevrim sayısı, (N) 'e göre değişimleri oluşturulmuştur. Örselenmemiş numunelerde plastisitenin ve zemin kıvamının dinamik davranışı etkilediği görülmüştür. Plastisite arttıkça belirli bir birim boy değişimi seviyesine ulaşmak için gereken çevrim sayısı (N) artmaktadır. Aynı plastisiteye ve aynı efektif çevre gerilmesine sahip numunelerde kıvam indisi, I_c arttıkça dinamik kayma gerilmesi oranı artmaktadır. Aynı kıvam ve çevre basıncına sahip numunelerde plastisite arttıkça dinamik kayma gerilmesi oranı artmaktadır. Plastisitenin $DKGO$ üzerinde etkisi $\epsilon=\pm 2.50$ düşey birim boy değişimi seviyesinde $N=20$ çevrim sayısında diğer araştırmacıların bulduğu değerlerle karşılaştırılmış olup plastisite arttıkça $DKGO$ 'nın arttığı gösterilmiştir. Dinamik kayma gerilmesi üzerinde frekansın ve konsolidasyon basıncının etkisi gösterilmiştir. Frekans arttıkça $DKGO$ artmakta konsolidasyon basıncı arttıkça ise $DKGO$ azalmaktadır. Killi zeminlerde bulunan kum oranının dinamik kayma gerilmesi oranını azaltıcı etki yaptığı gösterilmiştir. Dinamik gerilme oranı belirli bir değerin altında ise numunede büyük boşluk suyu basıncı artışı ve deformasyon artışı olmamaktadır. $DKGO$ ve boşluk suyu basıncı oranı $(BSBO)$ ilişkileri farklı kıvam ve plastisitedeki numuneler için gösterilmiştir. Boşluk suyu basıncı artışında $DKGO$ 'nın etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca $DKGO$ birim boy değişimi ilişkileri farklı çevrim sayılarında gösterilerek çevrim sayısı arttıkça $DKGO$ 'nın azaldığı görülmüştür.

$N=20$ çevrim dinamik ardından hiç ara vermeden yapılan statik deneylerden yararlanarak deviatorik gerilme oranı azalımı (σ_a/σ_s) nin $DKGO$ 'na göre değişimi incelenmiştir. Önce dinamik ve sonra statik deneyler sonucunda %20 birim boy değişimi seviyesinde oluşan deviatorik gerilmenin sismik geçmişi olmayan aynı gerilmeye oranı oluşturulmuştur. Plastisitesi $I_p=18-44$ aralığında olan orta katı killerde $DKGO-(\sigma_a/\sigma_s)$ ilişkisinden aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_s} = -0.6891 \ln(DKGO) + 0.0837 \quad (1)$$

Normal konsolide killi zeminler için önerilen bu bağıntı dinamik yüklemeden sonra yapılan statik deneyin eksenel birim boy değişiminin %10 veya %20 olması durumu için fazla fark etmemektedir.

Dinamik kayma gerilmesi oranının hacimsel deformasyona etkisi değişik numunelerde gösterilmiştir. Orta katı killerde plastisitenin $I_p=18-44$ olması durumuna göre dinamik yükten oluşacak hacim değişimi hesabı için aşağıdaki bağıntı önerilmiştir.

$$\varepsilon_{vd} = 7.5483 \frac{\sigma_d}{2\sigma_c} - 1.1404 \quad (\%) \quad (2)$$

Küçük birim boy değişimleri seviyelerinden itibaren elastisite modülleri küçük yer değişimi ölçerler yardımı ile hesaplanmıştır. Küçük birim boy değişimi seviyelerindeki elastisite modülleri plastisite indisi, kıvam, konsolidasyon basıncı, zemin yapısı, boşluk oranı ve kaba dane oranı farklarından dolayı numuneden numuneye farklılık göstermektedir. Birim boy değişimi seviyesinin %2.5 değerlerine ulaşması durumunda sismik geçmiş etkisinde kalmış olan veya hiç sismik geçmişi olmayan numunelerde modüller 20 MPa ın altına düşmektedir. DKGÖ arttıkça elastisite modülünün azaldığı gösterilmiştir. Konsolidasyon basıncı arttıkça elastisite modülünün arttığı görülmüştür.

Başlangıç elastisite modülü değerinin % 20 birim boy değişimi seviyesindeki statik deviatorik gerilmeye göre değişimi incelenmiştir. Başlangıç elastisite modülü arttıkça, statik deviatorik gerilmenin arttığı gösterilmiştir.

Başlangıç elastisite modülü bulunan suya doymuş numunelerin poisson oranı $\nu=0.50$ alınarak dinamik kayma modülleri bulunmuştur. Üç eksenli dinamik deney aletinde küçük yer değişimi ölçerler vasıtası ile yaklaşık 10^{-5} lik birim boy değişimi seviyesinde bulunan kayma modülünün literatürde aynı deney sisteminden elde edilen değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Plastisitesi $I_p=15-40$ aralığında olan orta katı normal konsolide killerde G_0 ın hesaplanması için aşağıdaki bağıntı önerilmiştir.

$$G_0 = 120 \frac{(8.50 - e)^2}{(1 + e)} \sigma_c^{0.50} \quad (\text{kPa}) \quad (3)$$

EFFECT OF EARTHQUAKE LOADING TO THE STATIC STRENGTH ON UNDISTURBED CLAYEY SOILS

SUMMARY

In this study dynamic triaxial tests were conducted on undisturbed clay specimens taken during a wide geotechnical research from Dinar region after the 1995 earthquake which had a magnitude of 5.9. Research on the behavior of soils under dynamic loads has began in 1960's and has increased in the recent years. Soil behavior under dynamic loads can be seperated into two parts, namely stress strain properties and strength properties.

Dynamic shear moduli and damping ratio are governing parameters in stress strain properties. Cyclic stress ratio and number of cycles are the important parameters for strength properties. First strength properties and then stress strain properties are considered in this study.

In the first chapter the subject of general dynamic behavior of soils are described. Depending on the number of cycles pore pressure and shear strain of saturated clay soils increase during the earthquakes. As a result, reduction in stiffness, a change in structure and an increase in deformation occur. Increase of deformations causes settlements and tilting of the structures above. When saturated clay soils are subjected to dynamic loads, failures on slopes, damages on transportation and energy lines may occur.

On the second chapter of the study a literature survey has been made on the subject of stress strain and strength properties by other researchers. First experimental study has been made by Larew and Leonards in 1962 on dynamic triaxial test apparatus on compacted specimens prepared in the laboratory. It is concluded that the dynamic strength is about 77-84 % of the static strength. After that attempt several researches has been made to the present date about effects of several parameters. Dynamic shear stress ratio, stress history, plasticity index, over consolidation ratio, void ratio, effective stress ratio, speed of loading, type of loading and soil structure have been found as the most effecting parameters on dynamic behavior of soils. Also testing devices and techniques are effecting parameters as well. It is found that cyclic strength increases as the plasticity, over consolidation ratio and frequency increases and void ratio decreases in fine grained soils.

Second chapter also covers a literature survey about stress strain behavior of clay soils. It is shown that effective consolidation pressure and plasticity index are the most effective parameters on the maximum dynamic shear moduli. It is also concluded that damping ratio has larger values in softer soils. Dynamic shear moduli and damping ratio are mostly affected from effective consolidation pressure, stress history, plasticity, over consolidation ratio and soil structure. During cyclic loading it

is seen that pore pressure and deformations begin to increase after some number of cycles. Some researchers define this point as a threshold deformation level. Beyond this threshold permanent deformations and the loss of strength begin.

On the third part of the study the test apparatus is described in details. Dynamic triaxial test apparatus which was donated to ITU Civil Engineering Faculty Geotechnical Department Soil Mechanics lab from JICA is capable of conducting both static and dynamic tests. By using amplifiers it is also possible to measure vertical dynamic sinus loading, vertical deformations and small deformations by a personal computer. The test data is analyzed by using statistical softwares. Calibration of the test apparatus and conducting of the tests are also included into the third chapter.

The specimens taken from the in situ by piston samplers were cut and placed in to the triaxial chamber. Consolidation tests were conducted in order to find about stress history of the specimens. After every test, specimens were sieved to find grain distribution and weight of the grains passing from no:200 sieve. Liquid and plastic limit tests were also conducted for each specimen. JGS T 542-1995 and JGS T 542-1995 Japanese Geotechnical Testing standards were used during specimen preparation and dynamic tests. From SPT results the specimens seems to be medium stiff plastic clay and the plasticity indices are between 15-44 %. The specimens are between high plasticity clay (CH) and low plasticity clay (CL).

Four different loading procedures were used during the dynamic tests. In the first group the tests were lasted until the failure under a pre chosen cyclic stress ratio. No failure occurred on some specimens because of the small cyclic stress ratio amplitudes. The deformations and pore pressure values remain limited. On the second group of tests specimens were cyclically loaded to 20 cycles and then subjected to static monotonic loading. The monotonic loading ended when the deformations reached to a value of %20. It's observed that static deviatoric stress ratio decreases as the cyclic stress ratios increases.

The third group of experiments were conducted to evaluate the initial Young's modulus. The cyclic stress ratios were increased for every five cycles beginning from very small values. By using the small amplitude values (on the order of 10^{-5}) and assuming Poisson's ratio $\nu=0.5$ maximum dynamic shear modulus was evaluated. Last set of experiments included strain controlled static tests. Undrained triaxial tests were conducted until an axial deformation level of %20 is reached.

From the test results the relationship between dynamic shear stress ratio, $DKGO=\sigma_d/2\sigma_c$ and number of cycles, N were obtained. It's observed that plasticity index and soil consistency are the important parameters affecting the dynamic behavior of soils. As the plasticity increases the number of cycles to reach the same strain amplitude increases. Also its observed that dynamic shear stress ratio increased as the consistency index increased for the same plasticity and consolidation pressure. Dynamic shear stress ratio is also compared with the results of other researchers. The effect of frequency and consolidation pressure is also shown. It is concluded that increase in frequency causes an increase in dynamic strength. Sand percentage is an effective parameter for the dynamic shear stress ratio. Increasing the sand ratio is cause for decreasing the dynamic shear stress ratio. As the percentage of sand in clay increases dynamic shear stress ratio decreases. If the dynamic shear stress ratio is

small the pore pressure generation and double amplitude axial strain are not so large. Relationship of dynamic shear stress ratio and pore water pressure ratio has been shown for different soil plasticity and different soil consistency. In the study it is observed that dynamic shear stress ratio is the main parameter on pore water generation. In addition to dynamic shear stress ratio and axial strain relationship were investigated to different value of number of cycles. Increasing of the number of cycles causes an increase the axial strain under high level the dynamic shear stress ratio.

Post cyclic behavior of clays was also investigated. Deformation controlled monotonic loading strain of 20% following dynamic load with number of cycles, N=20 was applied. The relationship between cyclic shear stress ratio and static deviatoric stress ratio, σ_a/σ_s for medium consistency of clay which has a soil plasticity between 18-44 is given below.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_s} = -0.6891 \ln(DKGO) + 0.0837 \quad (1)$$

This relationship can be used for monotonic axial strain of 10% or 20% for normally consolidated clays which have medium consistency and plasticity index $I_p=18-44$.

Dynamic shear stress ratio versus volumetric strain relationship was investigated for different soil plasticity and consistency. Using simple a correlation between dynamic shear stress ratio and volumetric strain for medium consistency clays which has plasticity index between $I_p=18-44$, the volumetric strain can calculated by the formula given below.

$$\varepsilon_{vd} = 7.5483 \frac{\sigma_d}{2\sigma_c} - 1.1404 \quad (\%) \quad (2)$$

The Young's modulus E were calculated for small strain using measurements with gap sensors. All samples have a different value of Young's modulus because of differences in soil consistency, plasticity, consolidation pressure, soil fabric, void ratio and sand ratio. If deformation level rise up 2.5% the modulus E decreases below of 20 MPa under dynamic and static loading. When the dynamic shear stress ratio increases modulus of Young's decreases and the consolidation pressure causes an increase in modulus of elasticity.

Young's modulus versus static deviatoric stress at 20% deformation level has been investigated. It has been illustrated as Young's modulus increases, static deviatoric stress increases.

Dynamic shear modulus of saturated specimens, G_0 were calculated by taking poisson ratio $\nu=0.50$ from Young's modulus E. It has been shown that measured G_0 values are consistent with formulas given in the literature. Very small strain levels down to $\varepsilon=10^{-5}$ was calculated by gap sensors. Maximum shear modulus for clays of

medium consistency with a plasticity index between 15-40 can be calculated by the given formula.

$$G_0 = 120 \frac{(8.50 - e)^2}{(1 + e)} \sigma_c^{0.50} \quad (\text{kPa}) \quad (3)$$



1. GİRİŞ

Yapının inşa edileceği temel zemininin statik yükler altında davranışının incelenmesine ilave olarak dinamik yükler altında da davranışının incelenmesi gerekmektedir. Yapı temeli zeminine etkiyen dinamik yüklerin başlıcaları, deprem yükleri, dalga yükleri, nükleer ve volkanik patlamalar ve makine titreşimlerinden oluşan yüklerdir. Yukarıda anlatılan yükler içerisinde deprem yükleri diğerlerinden daha farklı özellik gösterir. Deprem yükleri yapının yapılacağı bölgeye göre depremin oluş şekline ve özelliklerine, temel zemininin mikro bölgesel koşullarına göre yapılarda farklı etkiler yaparlar. Bilindiği gibi yurdumuzun % 98 i deprem kuvvetlerinin etkisinde kalabilir.

Geoteknik deprem mühendisliği 1960'lı yıllardan itibaren gelişmeye başlamıştır. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya'da artan enerji gereksinmesinin karşılanması için nükleer santraller gibi hiç göçme riski kabul etmeyen yapıların deprem bölgelerinde ve soğutma suyu temin kolaylığı nedeni ile nehir kenarlarındaki suya doymuş kumlu ve yumuşak killi zeminlerde yapılması zorunluluğu zemin dinamiğinin gelişmesine yol açmıştır. Ayrıca stratejik ve politik açıdan önemli binaların, büyük sanayi tesislerinin inşa edileceği bölgelerin de deprem kuşağı içinde kalması temel zemininin dinamik davranışının detaylı bir şekilde incelenmesini zorunlu hale getirmektedir.

Zeminlerin dinamik yükler altında davranışı incelenirken hem arazide hem de laboratuvarda yapılan deneylerden yararlanılır. Arazide veya laboratuvarda hangi tür deneysel yöntemin seçileceği zemin cinsine ve amaca göre değişebilir. Laboratuvar deneylerinde arazide zeminin etkisinde olduğu her türlü koşulun deney aletinde modellenmesine çalışılır. Araziden en gelişmiş bir yöntemle alınan zemin numunesinde numune alma, taşıma, numuneyi tüpten çıkarma, numuneyi deney hücresine hazırlayıp yerleştirme gibi sahalarda az da olsa örselenme meydana geleceği için zeminin davranışı bundan etkilenir. Buna karşın arazi deneylerinde zemin tabakalarının bazı malzeme ve dinamik özellikleri gerçeğe daha yakın

bulunabilmektedir. Fakat arazi deneylerinden bulunan özellikler de sınırlı olduğundan zemin tabakalarının davranışı incelenirken hem arazi hem de laboratuvar deneylerinden yararlanmak en çok seçilen yaklaşım biçimidir.

Depremler sırasında ince daneli zemin tabakalarında boşluk suyu basıncının artması sonucunda zeminde yumuşama meydana gelmekte ve bunun sonucunda aşırı deformasyonlar oluşmakta, dinamik kayma modülünde oluşan azalma sonucunda aşırı mukavemet kaybı meydana gelmektedir. İnce daneli zeminlerde de tekrarlı yükler altında oluşan yumuşama, aşırı deformasyon ve mukavemet kaybı sonucunda bu zeminlerin üzerindeki yapılarda oturmalar, şevlerde kaymalar meydana gelmekte zemin üst yüzeyinde deformasyonlar sonucu yollarda ve caddelerde bozulmalar oluşmaktadır. İnce daneli zeminlerin dinamik yükler altında davranışı incelenirken mukavemet özellikleri olarak kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayısı dikkate alınır. Gerilme-birim şekil değiştirme özellikleri olarak ise en büyük kayma modülü ve sönüm oranı dikkate alınır.

Bu çalışmada araziden piston numune alıcılarla alınmış örselenmemiş ince daneli zemin numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli basınç deney aletinde deneyler yapılarak bu zeminlerin davranışı incelenmiştir. Doğal zemin tabakalarının tekrarlı yükler altında davranışını etkileyen önemli parametrelerin laboratuvar deneyleri kullanılarak bulunması en çok kullanılan yöntem olmuştur. Bu çalışmada deneylerde laboratuvarda yoğrularak hazırlanmış numuneler kullanmak yerine araziden alınan örselenmemiş numuneler kullanılmasının nedeni zeminin arazideki oluşum şekline göre davranışını incelemek içindir.

Bu çalışmada önce zemin numuneleri üzerinde üç eksenli deney aletinde her numuneye farklı değerlerde sabit genlikli sinüzoidal gerilmeler uygulanmıştır. Bu gerilme genlikleri altında zemin kıvrımının, plastisitesinin, konsolidasyon basıncının, frekansın ve çevrim sayısının dinamik mukavemet oranı üzerindeki etkisi dördüncü bölümde incelenmiştir.

Büyük depremlerden sonra mühendislik yapılarının temellerinde kayma kamaları oluşması sonucu yapılarda oturmalar ve dönmeler oluşarak kullanılamaz duruma gelmektedirler. Arazide depremler sırasında oluşan bu durumu laboratuvarda dinamik üç eksenli basınç deney aletinde göstermek amacı ile önce 20 çevrimlik

dinamik deney ardından hemen sonra deformasyon kontrollu statik deneyler yapılmıştır. Frekans 0.5 Hz. alınarak yapılan bu deneyler $N=20$ çevrim sonucunda 40 saniye sürede tamamlanmıştır. $N=20$ çevrim sayısının alınmasının nedeni 40 saniyelik sürenin büyük bir depremi temsil ettiği düşünülmesindendir. Bu deney sonuçlarından zeminin statik mukavemetinde ne kadar bir azalma meydana geleceği konusu incelenmiştir.

Dinamik deneyler ile 20 çevrim dinamik ve ardından statik deneylerde deney bittikten sonra drenajlar açılarak 24 saat süre ile numuneler konsolidasyona bırakılmıştır. Bu konsolidasyon sonucunda oluşan hacim değişimleri hesaplanarak bu değerlerin uygulanan tekrarlı gerilme genliği veya Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına göre değişimi incelenmiştir. Böylece büyük depremlerden sonra plastisitesi $I_p=15-44$ ve kıvamı $I_c=0.23-1.00$ aralığında olan orta katı killerde ne kadar hacimsel deformasyon oluşacağı konusu incelenmiştir.

Deneylerde kullanılan numunelerin başlangıç dinamik kayma modülleri üç eksenli dinamik deney aletindeki küçük deformasyon ölçerler vasıtası ile ölçülmüştür. Bir grup numune üzerinde küçük gerilme genlikleri her 5 çevrimde bir artırılarak bu numunelerin gerilme şekil değiştirme davranışı incelenmiştir. Değişik deformasyon seviyelerindeki Elastisite modülleri hesaplanarak konsolidasyon basıncının etkisi incelenmiştir.

2. İNCE DANELİ ZEMİNLERİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI

2.1 Giriş

İnce daneli zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışı, gerilme-birim şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin laboratuvarında incelenmesi dinamik üç eksenli basınç deneyi, dinamik basit kesme deneyi, dinamik burulmalı kesme deneyi ve rezonans frekansı deneyi kullanılarak yapılmaktadır. Yukarıda adları bahsedilen laboratuvar deneyleri ile zeminlerin davranışının incelenmesi en çok kullanılan metodlar olmuştur. Arazi deneyleri olarak Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) ile mukavemet özellikleri bulunabilmektedir. Ayrıca arazide sondaj kuyuları içerisinde yapılan PS logging deneyleri ile zemin tabakalarından geçen kayma dalgası hızı bulunarak dinamik kayma modülü bulunmaktadır. Arazi deneyleri ile daha çok elastik bölgedeki zemin davranışı incelenirken laboratuvar deneyleri ile ise çok daha geniş bir aralıktaki zemin davranışı incelenebilmektedir. Bundan dolayı arazi deneyleri ile bulunan zemin özellikleri sınırlı olduğundan bir bölge için geoteknik inceleme yapılırken hem arazi hem de laboratuvar deneylerinden faydalanmak en çok tercih edilen yöntem olmuştur. Diğer taraftan seçilecek deneysel yöntem ise hem eldeki olanaklara hem de zeminin özelliklerine bağlıdır. Eğer zemin çok yumuşak ise böyle bir zemini örselemeden araziden alıp tüpten çıkarıp üç eksenli deney aletinin hücresine yerleştirmek oldukça zordur ve örselenmenin etkisi çok fazladır. İnce daneli zeminlerin tekrarlı yük altında davranışı, gerilme-birim şekil değiştirme özellikleri ve mukavemet özellikleri olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir. Bu çalışmada yapılan deneyler ağırlıklı olarak mukavemet özelliklerinin incelenmesi üzerinde olduğundan literatür taramasında da önce mukavemet ile ilgili çalışmalar daha sonra ise gerilme ve birim şekil değiştirme özellikleri incelenmiştir.

2.2 Killerin Dinamik Yükler Altında Mukavemet Davranış ı İle İlgili alışmalar

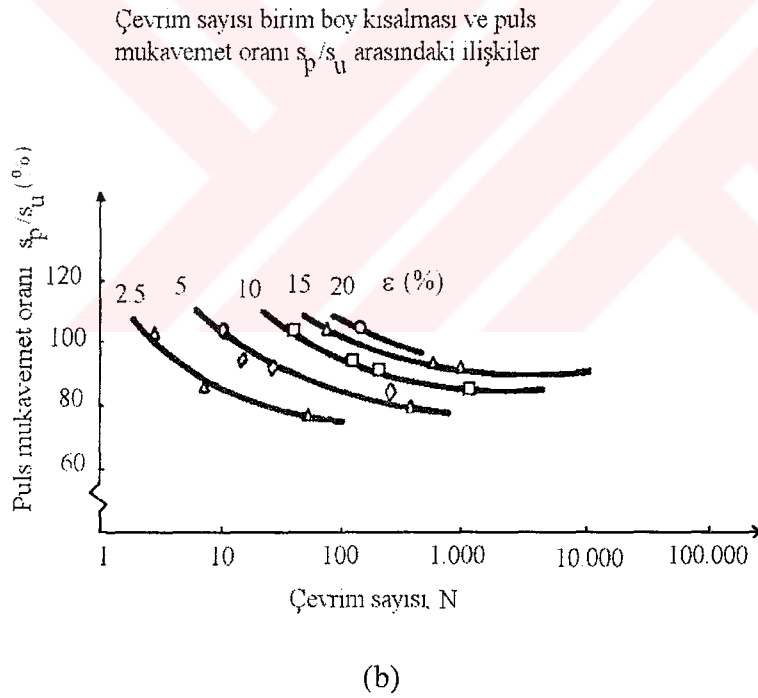
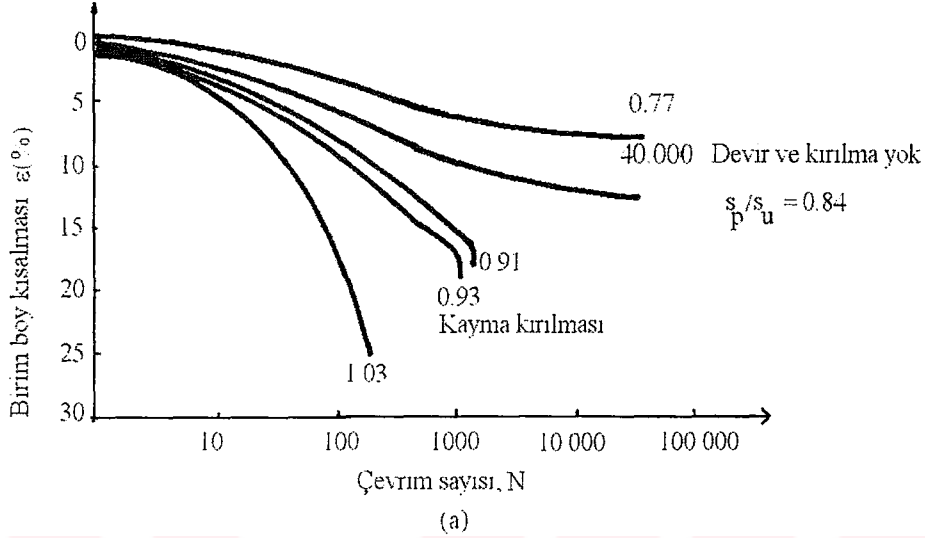
İnce daneli zeminlerin dinamik yükler olan depremler, dalga yükleri, makine temelleri, trafik yükleri gibi dış etkiler altında mukavemet davranışlarının incelenmesinde en önemli iki parametre kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayısıdır.

Larew ve Leonards (1962) tekrarlı gerilmelerin mukavemete etkisini araştırmak amacı ile laboratuvarda kompaksiyon yolu ile hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan dinamik üç eksenli basınç deneyleri sonuçlarına göre belirli bir birim boy değişimi değerine kadar her bir birim boy değişimi değeri için çizilen çevrim sayısı dinamik kayma gerilmesi oranı eğrilerinin birkaç çevrimden sonra sabitleştiği görülmüştür. Bu sabitleşen değere uygun düşen gerilme oranı kritik gerilme olarak tanımlanmıştır. Deviatorik gerilmenin bu kritik değerinin dinamik mukavemet olarak alınması önerilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şekil 2.1’de görülmektedir. şekilden de görüldüğü gibi dinamik gerilme oranı çevrim sayısı eğrilerinin sabitleştiği değer olan dinamik mukavemet statik mukavemetin %77-%84 civarında elde edilmiştir.

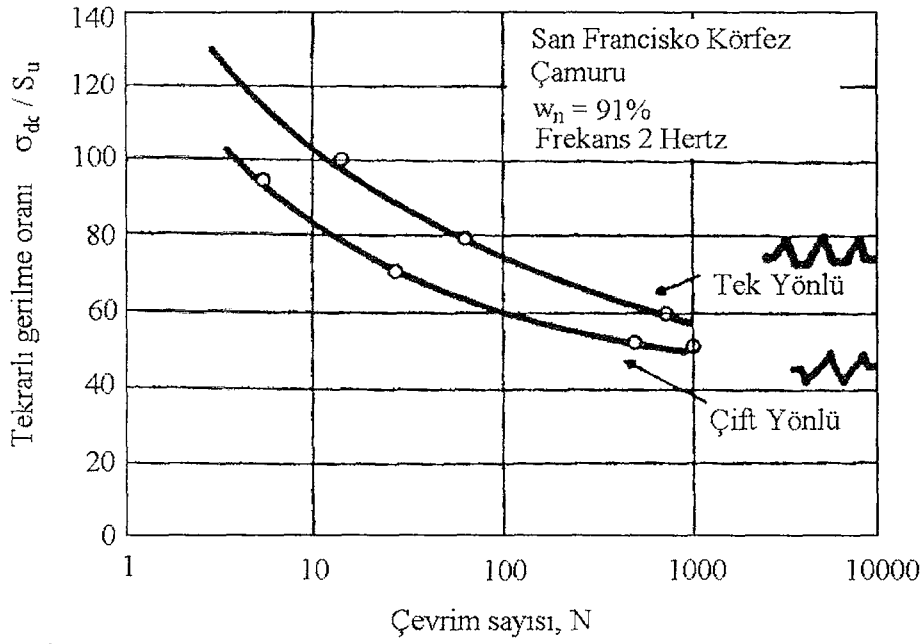
Knight ve Blight (1965) siltli kil numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre, çevrim sayısının artması ile kalıcı boşluk suyu basınçlarının azaldığı ve plastik deformasyonların sabit bir değere yaklaştığı belirtilmiştir. Bu deneylerde numunelerde her gerilme çevriminden sonra drenaja izin verilmiş ve yavaş yükleme-boşaltma uygulanmıştır.

Tek yönlü tekrarlı darbeleri gerilmeler sonucunda oluşan kayma mukavemetinin zeminlerin statik kayma mukavemetine oldukça yakın olması dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesini geciktirmiştir. Ancak gelişen teknoloji sonucunda önemli mühendislik yapılarının tasarımında yapının oturacağı temel zemininin ve civarının tekrarlı gerilmeler altında davranışının incelenmesini gerektirmiştir. Tekrarlı ift yönlü gerilmelere en çok deprem ve dalga yükleri neden olmaktadır. Depremler sonucunda oluşan dalgalar çok karmaşık ve gelişigüzel titreşimlere neden olurlar. Bu gelişigüzel titreşimlerin zeminlerin davranışını nasıl etkilediğinin araştırılması amacı ile laboratuvarda deneysel çalışmalara 1966 yılında Seed ve Chan, 1969 yılında ise Thiers ve Seed tarafından başlanmıştır. Seed ve Chan 1966’da San Francisco körfez çamurundan aldıkları numuneler üzerinde yaptıkları

üç eksenli dinamik basınç deney sonuçlarına göre tek yönlü gerilmelerle elde edilen dinamik mukavemetin çift yönlü gerilmelerle elde edilen mukavemetten daha yüksek çıktığı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



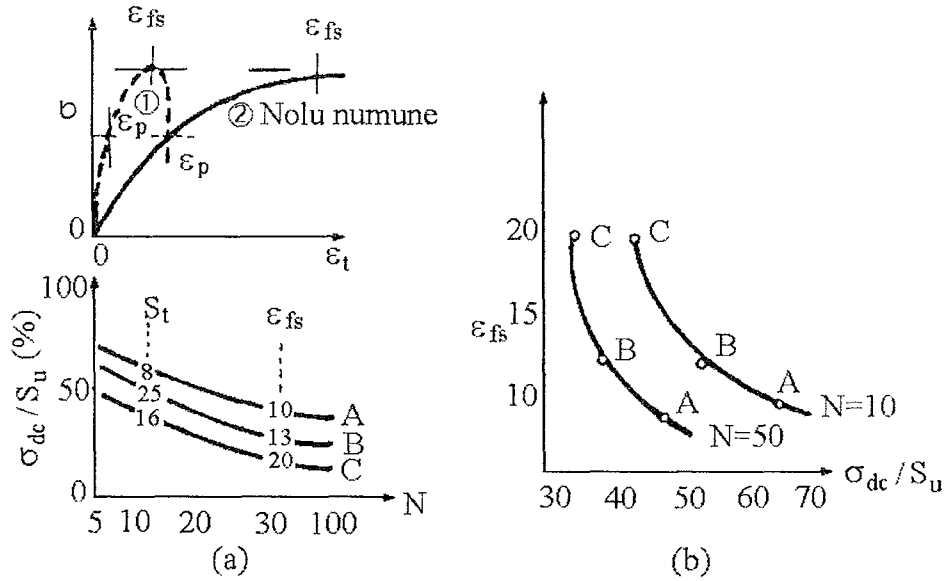
Şekil 2.1 Sıkıştırılmış killi zeminin tek yönlü tekrarlı puls tipi yükleme altında davranışı (Larew ve Leonards, 1962).



Şekil 2.2 Tek ve çift yönlü yükleme tiplerinin dinamik mukavemete etkisi (Seed ve Chan, 1966).

Thiers ve Seed (1969) suya doygun killi numuneler üzerinde yaptıkları dinamik üç eksenli basınç deneylerinde statik yükleme durumundaki gerilme-birim şekil değiştirme özelliklerinin ve statik yüklemede göçme kabul edilecek birim boy kısalması (ϵ_{fs}) değerinin zeminin dinamik mukavemetini etkilediğini göstermişlerdir. Yapılan çalışmadan elde edilen deney sonuçları Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Eşdeğer statik mukavemet değerine sahip fakat değişik birim boy değiştirme ve (ϵ_{fs}) özellikleri olan iki ayrı kil numunesi üzerinde yapılan üç eksenli dinamik basınç deney sonuçlarına göre daha büyük (ϵ_{fs}) değerine sahip numunede daha büyük şekil değiştirme olmaktadır.

Düşük genlikli tekrarlı gerilmeler altında göçmeye yol açmayacak şiddetteki tekrarlı gerilmelerin uygulanması halinde zemin elastik davranış göstermekte, oluşan en büyük boşluk suyu basınçları uygulanan gerilmenin şiddeti ile doğru orantılı olmaktadır (Sangrey, Henkel ve Esring, 1969). Killerin dinamik özellikleri iki ana başlıkta incelenmektedir. Bunlar, gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinden ibarettir. Gerilme-birim şekil değiştirme özellikleri olarak dinamik kayma modülü G_0 ve sönüm oranı D incelenmektedir. Mukavemet özellikleri olarak ise kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayısı N dikkate alınmaktadır.

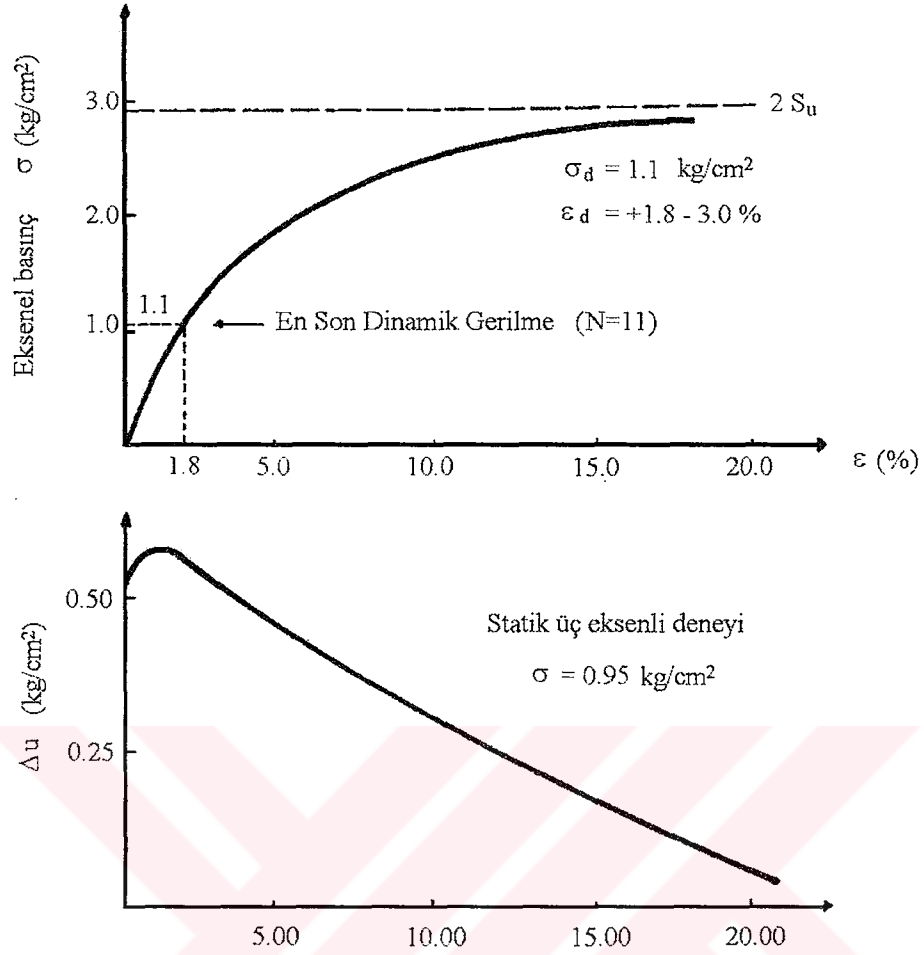


Şekil 2.3 Statik birim şekil değiştirme özelliğinin dinamik mukavete etkisi (Thiers ve Seed, 1969).

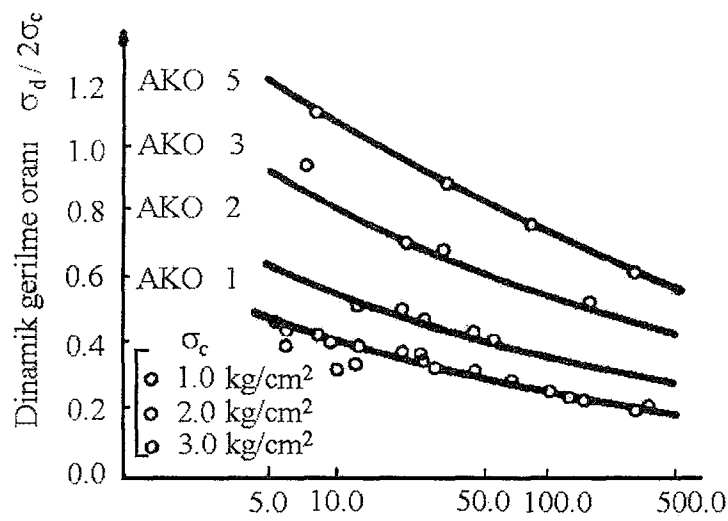
Yapının dinamik yüklemelerden sonra ne kadar mukavemet kaybettiğinin tespiti amacı ile önce tekrarlı yükleme ve daha sonra da statik yükleme deneyleri Lee ve Focht (1975) tarafından yapılmıştır. Temel zemininde ve zemin yapılarında depremin veya tekrarlı dalgaların bitiminden sonra oluşan yumuşama ve deformasyonların nihai göçmeye yol açabileceği dikkate alınmalıdır. Statik kırılma birim şekil değişimlerinin (ϵ_{fs}), % 70'i kadar dinamik birim şekil değiştirme yapmış numunelerin, statik mukavemetlerinde % 20 azalma olduğunu tespit etmişler, bu durumda dinamik yükleme sonrası mukavemet için

$$(S_u)_d = S_u \left[1 - 0.4 \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_{fs}} \right)^2 \right] \cdot \frac{\epsilon_d}{\epsilon_{fs}} < 1.0 \quad (2.1)$$

bağıntısını önermişlerdir. Dinamik yüklemelerden hemen sonra yapılan statik üç eksenli basınç deneylerinde, dinamik yüklemeler sırasında oluşmuş olan boşluk suyu basınçlarının Şekil 2.4'de görüldüğü gibi, birim şekil değiştirmeler arttıkça sabit bir değere kadar azalacağını belirtmişlerdir (Lee ve Focht, 1975). Aynı araştırmacılar aşırı konsolide killerin normal konsolide killere nazaran daha büyük bir mukavemet gösterdiklerini saptamışlardır. Şekil 2.5'de dinamik gerilme oranı çevrim sayısı arası ilişkisinde AK0 arttıkça dinamik mukavemetin arttığı görülmektedir.



Şekil 2.4 Dinamik deney sonrası statik üç eksenli basınç deneyi (Lee ve Focht, 1975).

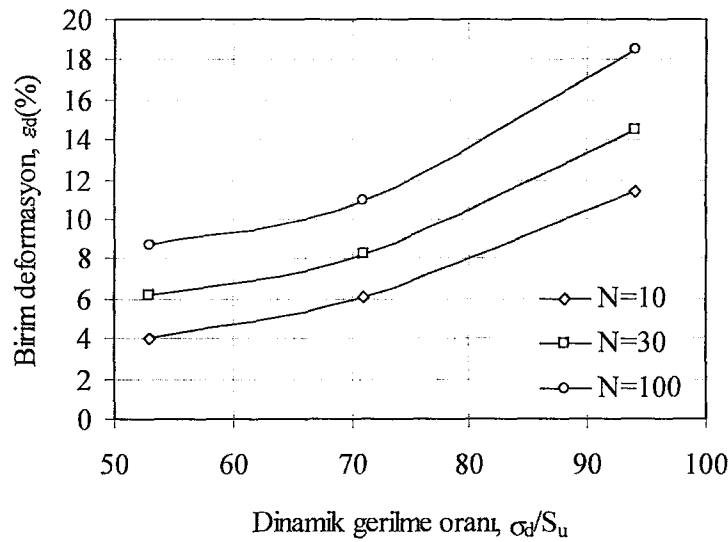


Şekil 2.5 Aşırı konsolidasyonun dinamik mukavemete etkisi (Lee ve Focht, 1975).

Anderson, Anderson ve Richart (1976) dinamik yüklemeler sonrasında statik mukavemette en fazla % 25 lik bir kayıp meydana geleceğini belirtmiştir.

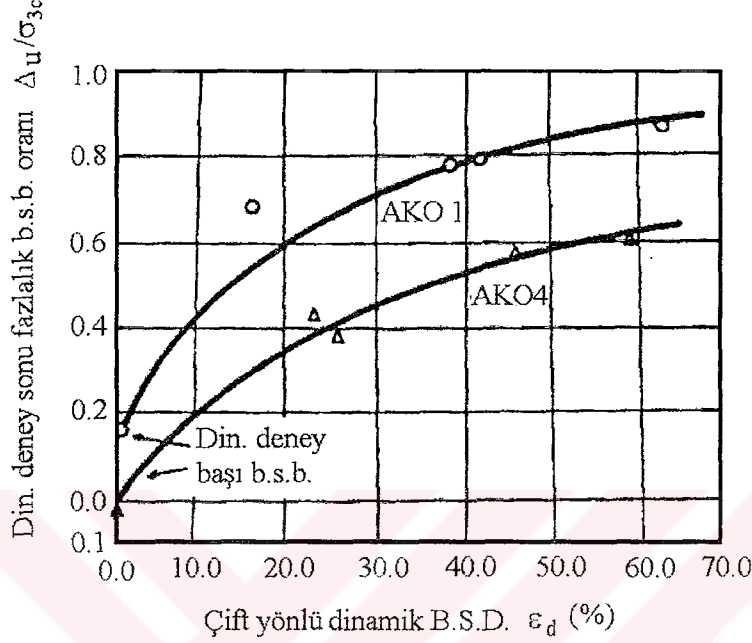
Castro ve Christian (1976) killeri üzerinde yapmış oldukları deneylerde tekrarlı yüklemeler sırasında boşluk suyu basınçlarının arttığını, dolayısı ile efektif gerilmelerin küçüleceğini ve kayma mukavemetinin azalıyor gibi gözükebileceğini ancak yüklemeyi takip eden statik kesme sırasında negatif boşluk suyu oluşma eğiliminin zeminin kayma mukavemetinin değişmesini önlediğini belirtmişlerdir. Buna ilave olarak ince daneli zeminlerin drenajsız kayma mukavemetine etkileyen esas parametrelerin boşluk oranı ve yapısal parametreler olduğunu ileri sürerek, killerin ve siltlerin içsel yapıları tekrarlı yüklemeler sırasında oluşan boşluk suyu basınçları ile değişmeyeceğinden ve oluşacak dinamik şekil değiştirmelerin yoğunlaşmaya yol açmaması halinde mukavemet kaybının fazla olmayacağını ifade etmişlerdir.

Toğrol ve diğerleri (1977) tekrarlı yüklemeler sırasında oluşan şekil değiştirmelerin incelenmesi konusunda yaptıkları deneysel çalışmalarda, tekrarlı gerilme genliğinin ve tekrar sayısının dinamik yükleme sırasında oluşan şekil değiştirmelere etkin olduğunu, tekrarlı yükleme sırasında oluşan plastik deformasyonların tekrarlı gerilme genliğinin şiddeti ve tekrar sayısı ile arttığını ifade etmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6 Tekrarlı yük ile ϵ_d ilişkisi (Toğrol ve diğerleri, 1978).

Koutsoftas (1978) tekrarlı yüklemeler sırasında normal konsolide killerin aşırı konsolide killere oranla daha fazla deformasyona uğradıklarını ve boşluk suyu basıncı artışlarının daha hızlı ve daha fazla olduğunu yaptığı deneysel çalışmalarla kanıtlamıştır. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7 AKO'nun tekrarlı yük altında BSBO artımına etkisi (Koutsoftas, 1978).

Özüdoğru (1979) araziden alınmış örselenmemiş aşırı konsolide plastik kil numuneler ile laboratuarda kompaksiyonla hazırlanmış suya doymun hale getirilmiş siltli kil numuneler üzerinde yaptığı bir ve iki yönlü dinamik üç eksenli basınç deneylerinde tekrarlı yüklemenin, önceden yüklenmiş killerin yüklemeden önceki statik mukavemetlerinde önemli bir değişiklik yapmadığı, tekrarlı yüklemeler sırasında oluşan plastik deformasyonların tekrarlı gerilmelerin genliği ve tekrar sayısı ile orantılı olarak arttığını, tekrarlı yükleme sonucunda aşırı konsolide killerde kırılmanın, zeminin belirli bir kesiminde negatif boşluk suyu basınçlarının ortaya çıkması sonucunda bu kesime su hücumu ile meydana geldiğini göstermiştir.

Houston ve Herrmann (1979) Atlantik ve Pasifik okyanuslarının altından ince tüp alıcılarla aldıkları 6 adet değişik tip zemin numunesi üzerinde yaptıkları gerilme kontrollü üç eksenli dinamik basınç deneyi sonuçlarına göre plastisitenin dinamik mukavemeti etkileyen en önemli parametre olduğunu tespit etmişlerdir. İndeks özellikleri yaklaşık aynı olan bu numunelerin yoğunlukları ve hassaslıkları farklıdır.

Arazi koşullarında kesin drenaj durumunun saptanması çok zor ve kompleks bir iştir. Eğer kısmi drenaj durumu göz önüne alınacaksa efektif gerilme durumu yaklaşımını kullanmak gerekir.

Matsui ve diğerleri (1980) yılında frekansın etkisini araştırmak amacı ile yaptıkları çalışmada frekans değerinin küçülmesinin, meydana gelen artık boşluk suyu basıncı ve birim şekil değiştirme genliklerinin büyümesine yol açtığını göstermişlerdir.

Andersen ve diğerleri (1980) örselenmemiş plastik Drammen kili üzerinde dört değişik laboratuvarında dinamik üç eksenli, dinamik basit kesme, statik üç eksenli ve statik basit kesme deneyleri yapmışlardır. Tekrarlı yük etkisindeki göçmenin birim kayma genliğinin $\gamma = \pm 0.3$ değerinde olduğunu ve bu değerinde aşırı konsolidasyon oranı ve kayma gerilmesi oranı τ/τ_f değerine bağlı olduğunu savunmuşlardır. Tekrarlı gerilmenin statik drenajsız mukavemeti azalttığını göstermişlerdir. Aşırı konsolide numunelerde efektif kayma mukavemeti parametreleri olan kohezyon c' ve kayma mukavemeti açısı ϕ' nin tekrarlı yükten etkilenmediğini göstermişlerdir.

Güler (1980) yılında yaptığı çalışmada statik yükleme sonucunda elde edilen gerilme birim şekil değiştirme eğrisi ile dinamik yüklemeyi takip eden statik yükleme sonrası elde edilen gerilme birim şekil değiştirme eğrisinin büyük benzerlik gösterdiğini, dinamik yüklemeler sırasında biriken boşluk suyu basıncının uygulanan sabit ve dinamik yükler cinsinden ifade edilebileceğini, dinamik yükleme sırasında biriken boşluk suyu basıncı değerinin artması ile numunenin dinamik yüklemeden sonraki statik kesmede kırıldığı deviatorik gerilmenin değerinin azalacağını, dinamik yüklemeden sonra statik olarak kesilen numunelerin aşırı konsolide killere benzer bir davranış göstereceğini, dinamik yüklemeler sırasında oluşan plastik deformasyonların aynı deney sırasında biriken boşluk suyu basıncı değerinden (2.2) bağıntısı yardımı ile hesaplanabileceğini belirtmiştir.

$$\Delta u_f = 0.34 p_c \log \varepsilon_f - 9.7 \quad (2.2)$$

Bu bağıntıda;

Δu_f : Kırılma sırasında oluşan boşluk suyu basıncı (kN/m^2),

p_c : Ön konsolidasyon basıncı (kN/m²),

ϵ_f : Kırılma anındaki eksenel birim deformasyondur.

Narayan, Varadhi ve Saxena (1981) tarafından normal konsolide ve aşırı konsolide yüksek plastisiteli killeri üzerinde dinamik üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde frekansın, boşluk suyu basıncının, çevrim sayısının ve deformasyonun tekrarlı kayma gerilmesine etkisi normal konsolidasyon durumuna göre ve aşırı konsolidasyon durumuna göre ayrı ayrı incelenmiştir. Dinamik yükleme sonrası oluşan kalıcı boşluk suyu basıncının en büyük kayma deformasyonu ile AKO nun bir fonksiyonu olarak gösterilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu bağıntı (2.3)'de gösterilmiştir.

$$\frac{u_r}{\sigma_c'} = \beta \left(\log \frac{\gamma_{d \max}}{(\gamma_{d \max})_0} \right) = \beta \left(\log \frac{\gamma_{d \max}}{A(AKO-1)+B} \right) \quad (2.3)$$

Burada;

β =Parametre (Boşluk suyu basıncı oranı ve maks. deformasyon ilişkisinden elde edilir),

A ve B =Plastisiteye bağlı katsayılar,

$\gamma_{d \max}$ =En büyük kayma deformasyonu,

u_r =Kalıcı boşluk suyu basıncı,

σ_c' =Efektif çevre gerilmesi,

Aşırı konsolide killerde dinamik yükleme sonucunda yumuşama ile birlikte şekil değiştirmeler artar ve kayma modülünde azalış oluşur, fakat yükleme bitince boşluk suyu basıncının drene olması sonucu zeminin başlangıç durumuna göre daha fazla mukavemet kazandığı görülür.

Ansal, (1981) Zeminlerin dinamik davranışının incelenmesi adı altında yaptığı İTÜ Doçentlik tezi çalışmasında killerin dinamik yükler altında davranışını iki ana başlık altında incelemiştir. Bunlardan ilki gerilme-şekil değiştirme özellikleri ikincisi ise

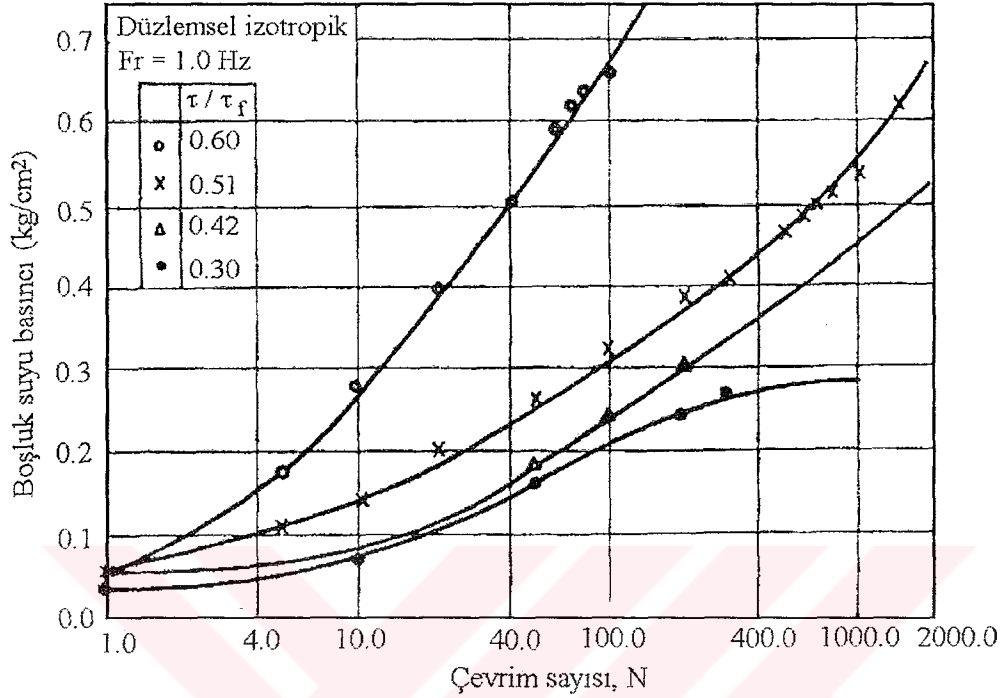
mukavemet özellikleridir. Gerilme-şekil değiştirme özelliği olarak en önemli iki parametre dinamik kayma modülü ve sönüm oranıdır. Mukavemet özelliği olarak ise kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayısı en önemli iki parametredir. Yapılan deneysel çalışma sonuçlarından yukarıda adı geçen parametreler üzerinde birim kayma genliğinin, ortalama efektif çevre gerilmesinin, boşluk oranının, çevrim sayısının, doygunluk derecesinin, aşırı konsolidasyon oranının ve frekansın etkisi gösterilmiştir. Ayrıca dinamik davranış üzerinde yükleme şekli ve yönü ile deney sistemlerinin de etkili olduğu gösterilmiştir.

Yasuhara ve diğerleri (1982) plastisitesi $I_p=58$ olan örselenmiş Ariake kili numuneleri üzerinde üç eksenli dinamik basınç deneyleri yapmışlardır. Efektif gerilmelere göre tanımlanan dinamik mukavemet frekanstan bağımsızdır. Suya doygun killerde dinamik gerilme etkisinde örselenmenin etkisi statik gerilme etkisinden daha azdır. Düşük frekanslarda daha büyük boşluk suyu basıncı elde edilir. Konsolidasyon basıncına göre normalize edilmiş boşluk suyu basıncı-birim şekil değiştirme ilişkisi yükleme metodundan bağımsızdır ve hiperbolik fonksiyon olarak model edilebilir. Hacimsel deformasyon efektif gerilme oranı ilişkisi doğrusaldır. Dinamik ve statik yüklemede oluşan efektif gerilme oranı deformasyon eğrileri yaklaşık olarak benzerdir. Toplam gerilme analizine göre ise dinamik deformasyon modülünün statik deformasyon modülünden biraz büyük olduğu, yükleme frekansından az etkilendiği gösterilmiştir.

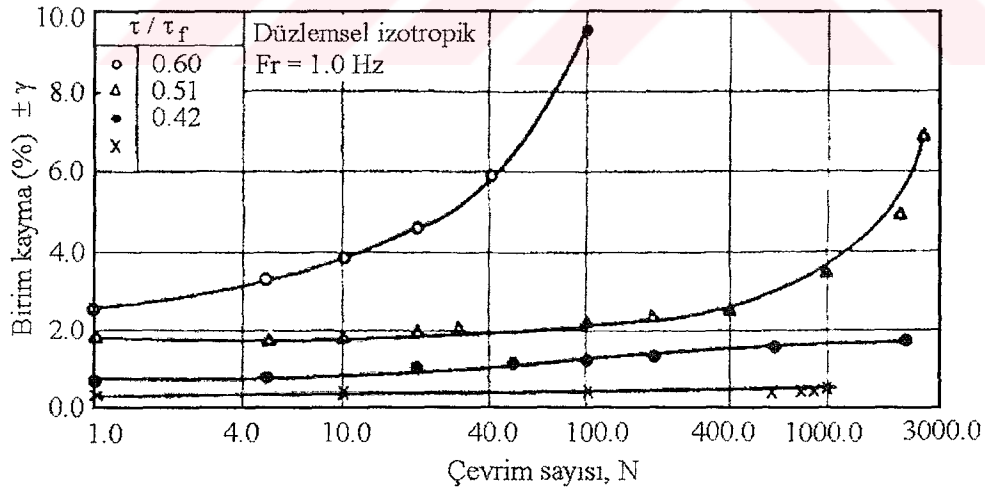
Erken (1982) dinamik basit kesme deney aletinde iki farklı şekilde hazırlanmış olan normal konsolide kaolin numuneler üzerinde tekrarlı gerilmenin ve frekansın boşluk suyu basıncı ve birim kayma üzerinde etkisini incelemek amacı ile dinamik deneyler yapmıştır. Şekil 2.8 ve 2.9'da görüldüğü gibi belirli bir frekansta kayma gerilmesi arttıkça boşluk suyu basıncı ve birim kayma değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Tekrarlı kayma gerilmesi sabit tutularak değişik frekanslarda yapılan deneylerde ise frekans arttıkça boşluk suyu basınçları ve birim kayma değerlerinin azaldığı gözlenmiştir.

Ansal ve Erken (1982) Çevrimsel yumuşamanın başlangıç eşik değerinin tanımlanması için yaptıkları deneysel çalışmadan aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir. Uygulanan gerilme genlikleri belirli bir değerden küçük ise zemin elastik bir davranış göstermektedir. Bu eşik değer aşıldığı zaman suya doygun zeminlerde

boşluk suyu basıncı ve deformasyonlar çevrim sayısına bağlı olarak artmakta ve zeminde yumuşama meydana gelmektedir. Oluşan bu yumuşama ile birlikte kayma modülü hızla azalmakta ve zemin iç yapısı da değişmektedir.



Şekil 2.8 τ/τ_f seviyesinin boşluk suyu basıncı üzerindeki etkisi (Erken, 1982)



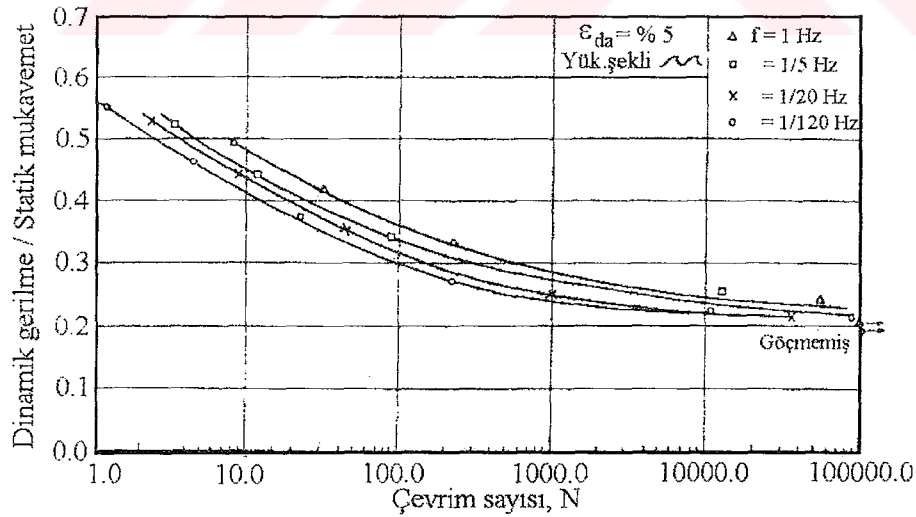
Şekil 2.9 τ/τ_f seviyesinin birim kayma üzerindeki etkisi (Erken, 1982).

Ansal ve Yıldırım (1985), Yıldırım (1987) dinamik basit kesme deney sisteminde anizotropik gerilmeler altında konsolide edilen, örselenmemiş doğal kil numunelerin mukavemet ve gerilme şekil değiştirme davranışları konusunda yaptıkları

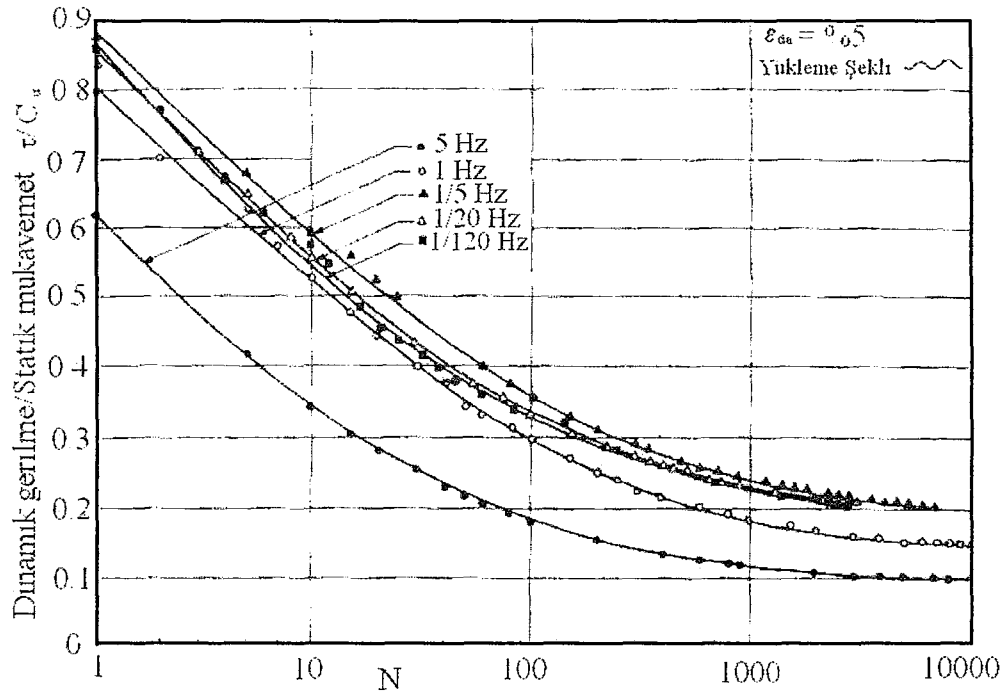
araştırmada, killerde dinamik kayma modülünün, birim kayma genliğine bağlı olarak doğrusal olmayan bir azalma gösterdiği, dinamik mukavemetin uygulanan tekrarlı gerilmenin genliğine bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Ansal ve Erken (1986) frekansın boşluk suyu basıncı üzerinde etkisini göstermek amacı ile dinamik basit kesme deney aletinde aynı gerilme genliğinde farklı frekanslarda yaptıkları deneylerde uygulanan frekans arttıkça boşluk suyu basıncı artışının azaldığını göstermişlerdir.

Procter ve Khaffaf (1985) örselenmiş killer üzerinde yaptıkları gerilme ve deformasyon kontrollü üç eksenli dinamik basınç deney sonuçlarından aşağıdaki bulguları elde etmişlerdir. Gerilme kontrollü deneylerde yüksek frekans uygulanan numunelerde mukavemet daha yüksek elde edilmektedir. Minimum gerilme oranı uygulanarak deformasyon kontrollü deney yapılması halinde $\epsilon_{da} \geq \% 5$ olması için 10.000 çevrime gereksinim duyulmaktadır. Frekansın $1/120 \text{ Hz} \leq f \leq 1/5 \text{ Hz}$ aralığında alınması halinde limit durumdaki gerilme oranı sabittir. Deformasyon kontrollü deneylerde frekansın 1 Hz veya 5 Hz alınması halinde mukavemet düşük çıkmaktadır. Gerilme kontrollü deneylerde ise frekans arttıkça mukavemet artmaktadır. Bu ilişkiler Şekil 2.10 ve 2.11’de görülmektedir.



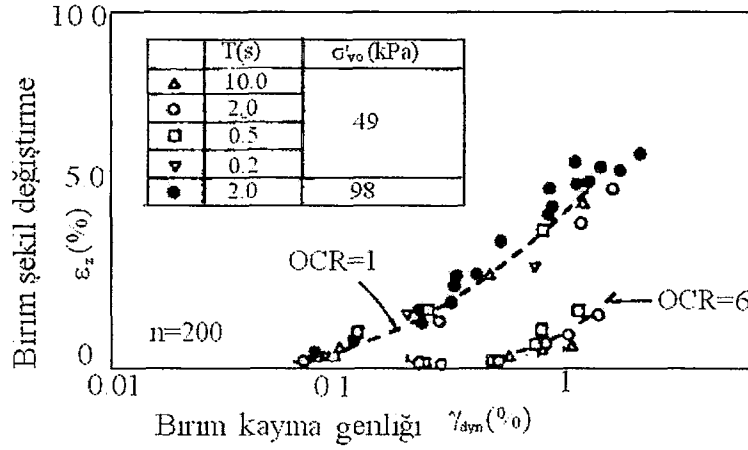
Şekil 2.10 Gerilme kontrollü deneylerde $\epsilon_{da} = \% 5$ için değişik frekanslarda gerilme oranı çevrim sayısı ilişkisi (Procter ve Khaffaf, 1985).



Şekil 2.11 Deformasyon kontrollü deneylerde $\epsilon_{da} = \% 5$ için değişik frekanslarda gerilme oranı çevrim sayısı ilişkisi (Procter ve Khaffaf, 1985).

Fujiwara ve diğerleri (1987) geniş çaplı üç eksenli hücrede $I_p=60-85$ arasında olan killeri üzerinde tekrarlı yük uygulayarak yaptıkları konsolidasyon deneylerinde tekrarlı yük etkisinde oluşan ikincil sıkışma katsayısının statik yük etkisinde oluşandan daha büyük olduğunu göstermişlerdir. Numune içerisinde organik madde olursa sıkışma daha fazla olmaktadır. Tekrarlı yükten oluşan oturmaya etki eden faktörler, toplam yük, yükleme periyodu, yükleme artım oranı ve yükleme şeklidir. Aşırı konsolide zeminlerdeki konsolidasyon katsayısı normal konsolide zeminlerden daha büyüktür.

Matsuda ve Ohara (1987) dinamik basit kesme deney aletinde kaolin kili üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir. Aşırı konsolidasyon oranı yüksek numunelerde eşik noktası daha yüksektir. Bu nokta aşıldıktan sonra boşluk suyu basıncı artarken birim deformasyon ve oturma da artar. Oturmalar AKO'nun artması ile artar. Tekrarlı kayma gerilmesi eşik kayma deformasyonundan çok etkilenir. Şekil 2.12'de oturma için eşik deformasyon seviyesine konsolidasyon basıncının etkisi görülmektedir.



Şekil 2.12 Oturma için eşik birim deformasyonuna konsolidasyon basıncının ve AKO nun etkisi (Matsuda, 1987).

Erken, Ansal ve Özarda (1987) normal konsolide killeri üzerinde gerilme ve deformasyon kontrollü üç eksenli deneyler yaparak gerilme şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı davranışlarını incelemişlerdir. Aynı frekansta ve farklı konsolidasyon basıncı ve birim boy değiştirme genliklerinde yapılan deneylerde numunelerin yaklaşık aynı çevrim sayısında kırıldığı gözlenmiştir. Kritik çevrim sayısına bağlı olarak elde edilen dinamik mukavemetin yaklaşık statik mukavemetin %50 si kadar olduğu gösterilmiştir. Belirli birim boy değişimi genliğinde ancak farklı konsolidasyon basınçlarında yapılan deneylerde meydana gelen gerilme ve boşluk suyu basınçları konsolidasyon basınçlarına göre normalize edildiklerinde gerilmelerin ve boşluk suyu basınçlarının tek bir eğri üzerinde düştüğü gösterilmiştir.

Diaz (1988) Meksiko kili üzerinde yaptıkları üç eksenli dinamik basınç deneylerinden dinamik gerilme oranının artması ile tekrarlı yüklemenin etkisinin arttığını, belirli bir dinamik gerilme oranı uygulanıp ondan sonra statik yükleme yapılırsa mukavemet kaybının dinamik gerilme oranının değerine oldukça bağlı olduğunu bulmuşlardır. Mukavemet kaybı R ile gösterilirse;

$$R = \frac{q_{cf}}{q_{sf}} \quad (2.4)$$

burada;

q_{cf} = Deviatorik dinamik gerilme,

q_{sf} = Statik gerilme dir.

$R < \% 83$ ise mukavemet kaybı yoktur. $R > \% 83$ ise boşluk suyu basıncı artışından dolayı belirgin bir mukavemet kaybı gözlenir.

Ohara ve Matsuda (1988) dinamik basit kesme aletinde Kaolin kilinden hazırlanan normal ve aşırı konsolide numuneler üzerinde dinamik yükten sonra oturmanın tespiti amacı ile deneyler yapmışlardır. Boşluk suyu basıncı sönümlendikten sonra oturmalar meydana gelir. Tekrarlı gerilme altındaki boşluk suyu basıncı artışı birim kayma genliğine çevrim sayısına ve aşırı konsolidasyon oranına bağlıdır. Zeminin deprem yükünden sonra oturması boşluk suyu basıncı artışı ve aşırı konsolidasyon oranına bağlıdır. Sismik oturma ikincil konsolidasyon oturmasından daha büyüktür.

Ansal ve Erken (1989) killi zeminlerin tekrarlı yükler altında drenajsız davranışı üzerinde dinamik basit kesme deney aletinde yaptıkları çalışmada boşluk suyu basıncının bir eşik değer altında oluşmadığı, bu değer aşılnca oluşmaya başladığını göstermişlerdir. Tekrarlı yükler altında göçme mukavemetini veren ampirik bir bağıntı önermişlerdir. Ayrıca frekansın etkisinin küçük çevrim sayılarında daha belirgin olduğunu göstermişlerdir.

Ansal ve Tuncan (1989) dinamik basit kesme deney aletinde yaptıkları çalışmada, belirli eksenel basınç altında konsolide edilen kil numunelere tekrarlı kayma gerilmesi uygulanmış ve bunun sonucunda oluşan boşluk suyu basıncının sönümlenmesi sonucu oluşan oturmalar hesap edilmiştir. Normal konsolide killerde oturmaların fazla olduğu aşırı konsolide killerde ise fazla boşluk suyu basıncı oluşmadığından oturmaların az olduğu gözlenmiştir.

Yasuhara ve Andersen (1991) normal konsolide Drammen kili üzerinde yapılan 18 adet dinamik basit kesme ve 6 adet konsolidasyon deneyi sonuçlarından dinamik yükten sonra oluşan tekrar sıkışma konusu araştırılmıştır. Drenajsız tekrarlı yükleme ve ardından oluşan drenaj normal konsolide killeri tekrar oluşacak bir dinamik yüke karşı daha dayanıklı yapar. Tekrarlı yükten dolayı oluşacak oturma hesabında kullanılan tekrar sıkışma indeksi odömetre deneyi tekrar sıkışma indeksinden 1.50

büyüktür. Tekrarlı yük etkisinde kalmış numunelerin sıkışma indeksi tekrarlı yük artarken azalmakta, boşluk suyu basıncı ve deformasyon artmaktadır.

Hirao ve Yasuhara (1991) laboratuvarında hazırladıkları konsolidasyonunu tamamlamamış Ariake kilinden elde ettikleri zemin numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli deney aletinde yaptıkları deneylerde aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir. Deneylerde plastisite indisi $I_p=72$, likit limit su muhtevası $w_l=115$ çapı 5 cm ve yüksekliği 10 cm olan numuneler kullanılmıştır. Konsolidasyonunu tamamlamamış killerin dinamik mukavemeti, konsolidasyon deformasyonundan ziyade efektif gerilme artışından etkilenir. Dinamik gerilme oranı hesaplanırken konsolidasyon basıncına göre yapılan normalizasyon yerine statik drenajsız mukavemete göre normalizasyon yapılmasının daha uygun olduğu belirtilmiştir. Drenajsız statik mukavemet S_u ile dinamik gerilme σ_r ile ve % 5 birim boy kısalması değerindeki çevrim sayısı N_f ile gösterilerek Ariake kili için (2.5) bağıntısı önerilmiştir. Bu kil için $a=0.85$ ve $b=-0.069$ olarak deneylerden bulunmuştur.

$$\frac{\sigma_r}{2.S_u} = a.N_f^b \quad (2.5)$$

O'Reilly ve diğerleri (1991) normal konsolide siltli killer üzerinde yaptıkları bir seri dinamik üç eksenli basınç deneylerinden aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir. Anizotropik normal konsolide siltli killerde drenajsız koşullarda tekrarlı yük etkisinde oluşan boşluk suyu basıncı, efektif gerilmeleri azaltarak göçme durumunu oluşturur. Artan tekrarlı deviatorik gerilme ve çevrim sayısı bu durumu pekiştirir. Drenaj peryotları mukavemeti artırıcı bir etki gösterir. Bir sonraki yüklemede aynı gerilme seviyesinde çevrim sayısının artması bir önceki ile eşit deformasyon ve boşluk suyu basıncı oluşmasına neden olur.

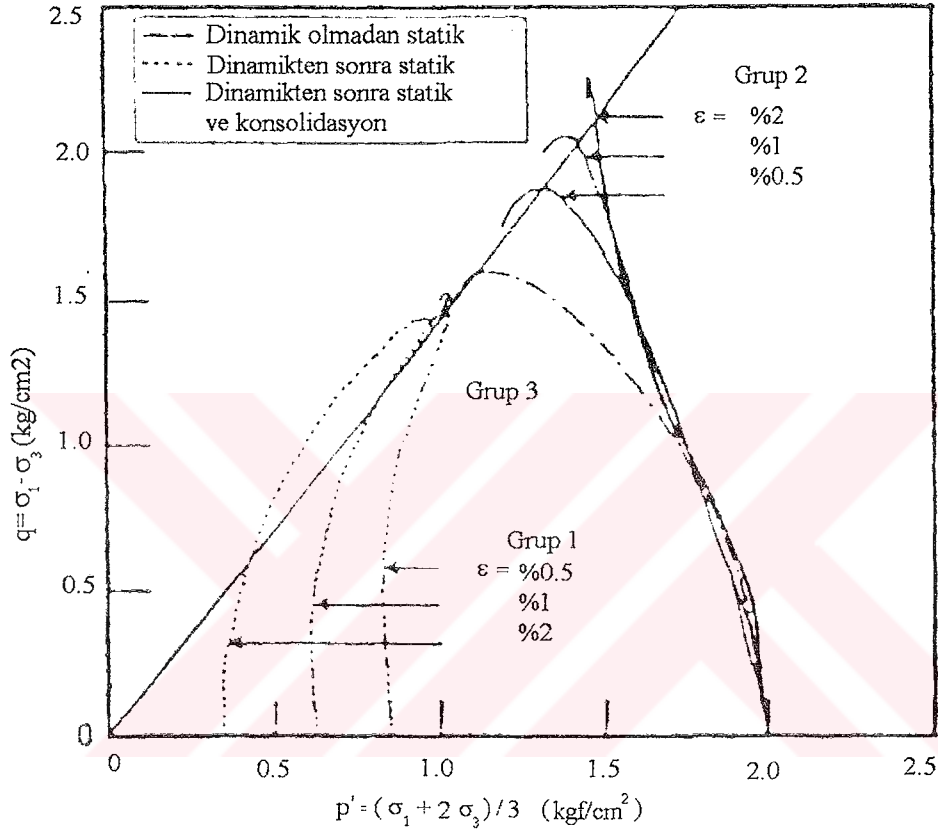
Georgiannou ve diğerleri (1991) killi kumlar üzerinde dinamik üç eksenli deney aletinde yaptıkları araştırmada statik ve dinamik gerilme izlerini oluşturmuşlar ve tekrarlı yükün statik gerilme izini etkilediğini göstermişlerdir. Deformasyonun küçük olduğu bir eşik değer altında boşluk suyu basıncında önemli artış olmadığı bu değer aşıldınca boşluk suyu basıncı ve deformasyonların artmaya başladığını göstermişlerdir. Üç eksenli basınçta deformasyon yumuşaması meydana gelirken, üç eksenli çekme deneyinde sıvılaşma meydana gelmiştir.

Matsui ve Bahr (1992) normal konsolide örselenmemiş killi zemin numuneleri üzerinde tekrarlı gerilmeden sonra zeminin nasıl bir kayma karakteristiği göstereceğini tahmin amacı ile üç eksenli dinamik ve statik deneyler yapmışlardır. Kullanılan numunelerin plastisitesi $I_p=22.5$ ve likit limitleri $\omega_l=\%67$ dir. Normal konsolide killerde uygulanan tekrarlı gerilme sonra oluşan statik kayma mukavemetini azaltır. Dinamik yüklemeden sonra numune konsolide edilirse daha yüksek drenajsız mukavemet elde edilir. Konsolidasyon sonucu kil daneleri yeniden bir iç yapı oluşturur ve  n dinamik gerilme sonraki statik göçme mekanizmasında önemli bir rol oynar. Boşluk suyu basıncı artışı dikkate alınarak sonraki statik deneydeki kayma gerilmesi özellikleri ve azalım değerleri tahmin edilebilir. Başlangıçta dinamik gerilmeye maruz kalan numunelerde sonradan konsolidasyon uygulanırsa drenajsız mukavemet artmaktadır. Bu numuneler şekil 2.13'de 2 nolu olarak gruplandırılmıştır. Başlangıç dinamik gerilmesinden sonra boşluk suyu basıncı dengeleninceye kadar 1 saat beklenip sonradan monotonik yüklenen numuneler 1 nolu grup olarak şekil 2.13'de gösterilmiştir. Aynı grafikte 3 nolu grup olarak adlandırılan numunelere tekrarlı gerilme uygulanmadan statik kayma deneyi yapılmıştır. Buradan uygulanan dinamik başlangıç gerilmesinin bütün numunelerin AKO davranış göstermesine neden olduğu görülmektedir. Konsolidasyona bırakılan numuneler ise pekleşen davranış göstermektedir.

Hyde, Yasuhara ve Hirao (1993) Ariake kilinden elde edilen numuneler üzerinde stabilite kriterlerini belirlemek amacı ile üç eksenli dinamik tek yönlü deneyler yaparak şu sonuçları elde etmişlerdir. Boşluk suyu basıncı frekanstan bağımsız olarak zamana bağlı artmaktadır. Deformasyon için de aynı şey geçerlidir. Boşluk suyu basıncı artışı hızı ve deformasyonlar geçen süreye bağlı olarak üstel bir azalış gösterir. Dinamik yükler altında göçmeye yol açan gerilme izleri dinamik normalize gerilme-efektif normal gerilme gösteriminde kritik durum eğrisi göçme kriteri olarak alınır.

Zergoun ve diğerleri (1994)    eksenli deney aletinde plastisite indisi 26 ve likit limit su muhtavasını $\%50$ olan deniz kili üzerinde dinamik deneyler yaparak sonuçları efektif gerilme analizi ile değerlendirmişlerdir. Hızlı dinamik deneylerde boşluk suyu basıncının anlamlı    lememesinden dolayı efektif gerilme analizi için yavaş yüklemeli deneyler yapılmıştır. Hızlı ve yavaş deneylerden farklı eşik değerlerinden sonra boşluk suyu basıncı ve deformasyon artışı oluşur. Tekrarlı yük etkisindeki

büyük birim boy değişimlerinde efektif gerilme göçme zarfı efektif stabilite kriteri olarak kullanılabilir. Sabit gerilme genlikleri uygulandığı zaman göçme olmayacağı durumda boşluk suyu basıncı değeri birkaç çevrimde pik değerine ulaşır. Adım adım dinamik yük artırılarak yapılan deneylerde birikimli oluşan en büyük veya kalıcı deformasyon bir önceki yüklemeye bağlı daha önceki yükleme ve çevrim sayısından bağımsızdır.



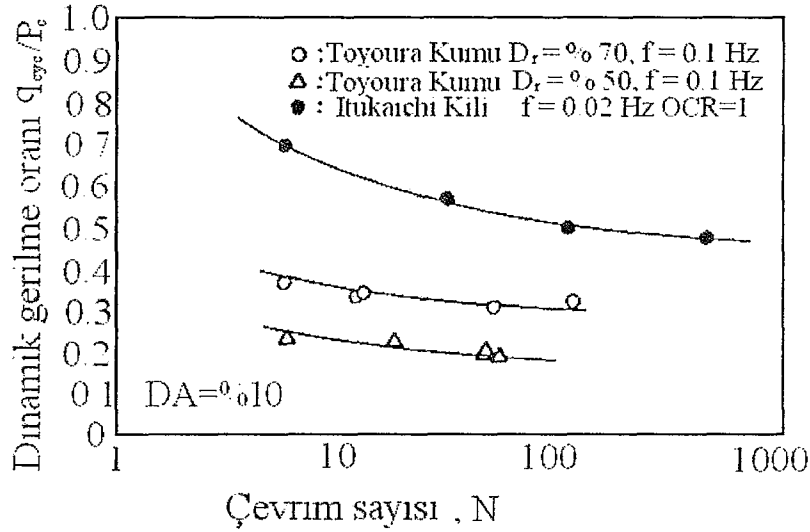
Şekil 2.13 Normal konsolide killerde dinamik gerilmenin ve konsolidasyon basıncının efektif gerilme izlerinde gösterilişi (Matsui ve Bahr, 1992).

Katagiri ve Imai (1994) kohezyonlu zeminlerin efektif gerilme azalması altındaki kayma davranışı adlı çalışmalarında üç eksenli deney sisteminde değişik oranlardaki aşırı konsolide numuneler üzerinde dinamik ve statik deneyler yapmışlardır. Değişik oranda aşırı konsolide numunelerde eğer başlangıç kayma gerilmesi uygulanmamışsa drenajsız mukavemet aynıdır. Bunun anlamı başlangıç kayma gerilmesinin drenajsız mukavemete etkisi olduğunu göstermektedir. Drenajsız başlangıç tekrarlı gerilmesi kohezyonlu zeminlerin aşırı konsolide davranış göstermesine ve efektif gerilmenin başlangıç statik deneydeki etkiden daha güçlü azalmasına neden olur. Aynı birim boy değişimi ve aynı aşırı konsolidasyon oranındaki killerin deformasyon modülü

başlangıç gerilmesi iki yönlü dinamik olanlarda statik başlangıç gerilmesi olanlardan daha küçüktür. Elastisite modülü E_{50} başlangıç deviatorik gerilmenin artması ile ve AKO nun azalması ile azalır.

Horii, Toyosawa ve Tamate (1994), yumuşak killerin tekrarlı yük etkisinden sonra kayma mukavemeti özellikleri incelemek amacı ile kaolin kilinden ($\omega_l = 87\%$ ve $I_p = 35\%$) hazırladıkları numuneler üzerinde 0.1 ve 10 Hz. aralığında değişen frekanslarda dinamik sinüzoidal yüklemeler ve ardından statik yüklemeler yapmışlardır. Ön tekrarlı yükleme zeminin kayma mukavemetinin ve büyük deformasyonlardaki rijitliğinin azalmasına neden olur.

Hyodo ve diğerleri (1994) yüksek plastisiteli deniz kili üzerinde değişik başlangıç statik koşullarında dinamik üç eksenli basınç ve çekme deneyleri yapmıştır. Deney sonuçlarına göre, killerde büyük şekil değiştirmeler sadece kalıcı olmayıp yükün en son uygulandığı aşamada daha büyük değere ulaşmıştır. Killerin dinamik mukavemeti Toyoura kumu ile karşılaştırılırsa, killerde başlangıç kayma gerilmesi yüksek olduğu zaman dinamik mukavemetin daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum Toyoura kumunda gözlenen davranış biçiminin tamamen tersidir. Başlangıç statik gerilmesi ve sonra gelen tekrarlı gerilme farklı olmasına rağmen hacımsal deformasyon ile boşluk suyu basıncı arasında lineer olmayan bir bağıntı elde edilmiştir. İzotropik olarak konsolide edilmiş Toyoura kumu ile Itukaichi kilinin dinamik gerilme oranı çevrim sayısı eğrileri Şekil 2.14'de görülmektedir.



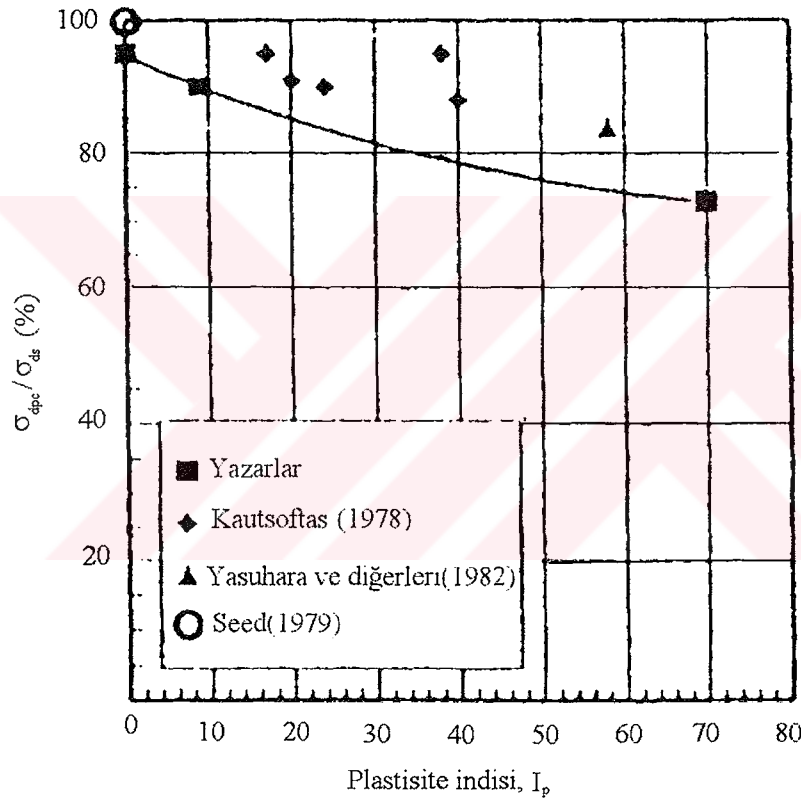
Şekil 2.14 $\epsilon_{da} = 10\%$ için tekrarlı deviator gerilme oranı çevrim sayısı ilişkisi (Hyodo ve diğerleri 1994).

Samang, Sakai ve Miura (1995) örselenmemiş Ariake siltli kili ($\omega_0=87.5$ ve $I_p=47.9$) üzerinde üç eksenli dinamik deney aletinde deprem sonrası oluşacak şekil değiştirmeleri tespit amacı ile statik ve dinamik deneyler yapmışlardır. Önce numune izotropik olarak konsolide edildikten sonra düşey basınç her saatte bir artırılarak istenilen K_0 değerine ulaşılmıştır. Sonra numuneler üzerinde 0.1 Hz. frekansında düşey çift yönlü birim boy değişimi $\epsilon_{da}=10$ oluncaya kadar dinamik deneye devam edilmiştir. Deney sonuçlarından boşluk suyu basıncı ve yükleme çevrimleri arasındaki doğrusal olmayan ilişki gösterilmiştir. Ariake kilinin deprem etkisi ve sonrası altındaki davranışını modellenmeye çalışmışlardır.

Adachi ve diğerleri (1995) tarafından Osaka kilinin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile arazi deneyleri, laboratuvar standart deneyleri ve dinamik üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Deneylerde numunelerin çökme koşullarına göre traşlama yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, Osaka kili arazide yumuşak ve hassas özelliklere sahiptir. Gerilme şekil değiştirme davranışının deformasyon oranına etkisi aşırı konsolide numunelerde daha az, normal konsolide olanlarda daha fazladır. Birim boy değişimi yumuşaması normal konsolide killerde daha çok görülmüştür. Üç eksenli basınç deney sonuçları ile burulmalı basınç deney sonuçları arasında karşılaştırma yapılırsa şekil değiştirme yumuşama etkisinin burulmalı deneylerde daha belirgin olduğu görülür. Nihai denge durumu diğer doğal killerle benzerdir. Sabit gerilme genliği altındaki büyük deviatorik gerilmelerde orta asal gerilme azaldığı zaman göçme oluşur. Küçük tekrarlı gerilmelerde orta asal gerilme azalırsa yarı denge durumuna gelinir. Hafif aşırı konsolide bölgedeki drenajsız kayma mukavemeti sistematik olarak eğilme düzlemi ile büyük asal gerilme düzlemi arasındaki açıya bağlıdır.

Govil ve Houston (1995) yaptıkları çalışmada, deprem sonrası zeminin statik kayma gerilmesi oranını tahmin etmek için literatürdeki ve laboratuvarında üç eksenli dinamik deney aletinde kum, silt ve killer üzerinde yaptıkları tekrarlı ve statik deneylerden yararlanmışlardır. Elde edilen deney sonuçlarına göre ve literatürdeki değerlere göre normalize edilmiş deprem sonrası statik mukavemet oranı plastisite ilişkisi Şekil 2.15’de gösterilmiştir. Şekil 2.18’den görüldüğü gibi plastisitenin artması ile gerilme kaybı artmaktadır. Bu sonuç, Koutsoftas (1978), Seed (1979) ve Yasuhara ve diğerlerinin (1982) sonuçları ile aynı eğilimi göstermektedir. Mukavemetteki bu kayıp zeminin plastisitesi ile ilgilidir.

Lefebvre ve Pfendler (1996) yumuşak killerin dinamik mukavemetlerine şekil değiştirme oranı ve başlangıç kayma gerilmesinin etkisini sabit hacimli dinamik basit kesme deneyi kullanarak incelemişlerdir. Numuneler arazideki konsolidasyon durumuna göre yeniden konsolide edilmişlerdir. Deneyler değişik değerlerdeki başlangıç kayma gerilmesine göre kurulmuştur. Yüksek şekil değiştirme oranına en büyük etki tekrarlı yüklemenin büyüklüğü ile ilgilidir. Bu nedenle yumuşak killerin davranışına en büyük etken gerilme oranı ve şekil değiştirme oranı ile ilgilidir. Buna ilave olarak diğer bir etki de süre yani çevrim sayısıdır. Çevrim sayısının artması dinamik mukavemeti belirgin bir şekilde azaltır.



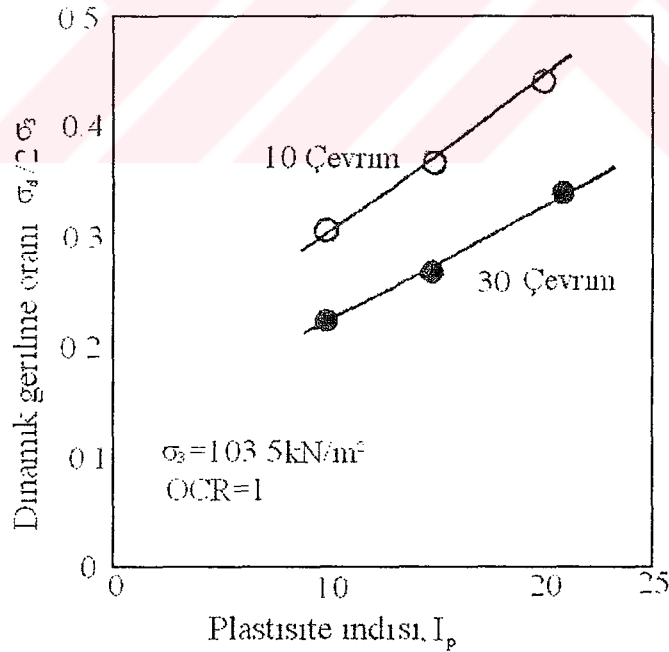
Şekil 2.15 Normalize edilmiş deprem sonrası mukavemetin plastisiteye göre değişimi (Govil ve Houston, 1995).

Boulanger ve diğerleri (1997) Loma Prieta depreminde büyük zarar gören Moss Landing Deniz Laboratuvar binasının bulunduğu bölgede kapsamlı bir zemin araştırması yapmışlardır. Bu bölgede deprem sırasında kaynama ve sıvılaşma olayları görülmüştür. Laboratuvar binası bu olaylar sırasında temel seviyesinden 1.30 m lik yatay ötelenmeye uğramıştır. Bu bölgede arazi deneyleri olarak konik penetrasyon

deneyi (CPT) ve standart penetrasyon deneyi (SPT) yapılarak sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Laboratuvar deneyleri olarak ise konsolidasyon deneyleri, dinamik üç eksenli basınç deneyleri, önce dinamik sonra statik yüklemeli deneyler ve indeks özellik deneyleri yapılmıştır. Zeminin yapılan indeks deneyleri sonucu plastisitesi % 17, likit limiti ise % 38 olarak bulunmuştur. Dinamik deneylerde örselenmenin etkisi göz önüne alınarak arazideki efektif gerilmenin iki misli efektif çevre gerilmesi olarak uygulanmıştır (Ladd ve Foott 1974). Yapılan deney sonuçlarına göre kalıcı boşluk suyu basıncı % 80-90 mertebelerine kadar ulaşmıştır. Bundan da düşük plastisiteli siltli killerin yüksek mertebede boşluk suyu basıncı oluşturmaya uygun oldukları anlaşılmıştır. Seed ve Idriss (1982) in verdiği sıvılaşma potansiyeli referans grafiğine göre sıvılaşmayacak gibi görünen temel altı zemini olan siltli kilin yapılan bu araştırmaya göre sıvılaştığı savunulmuştur. Siltli kilin altında 3.0 m kum tabakası ve çakıllı kum tabakası mevcuttur. Siltli ve killi zeminler deprem yükleri altında akma deformasyonuna uğramaya daha müsaittirler. Seed ve Idriss (1982) tarafından verilen bağıntı dikkatlice kullanılmalıdır. Bu dikkat özellikle çok değişiklik gösteren zemin tabakaları için daha büyük önem taşımaktadır. Özellikle büyük projelerde detaylı laboratuvar ve arazi incelemesi yapılmadan yukarıdaki kritere göre karar verilmesi uygun değildir.

Das, Puri ve Prakash, (1999), ince daneli zeminlerden siltlerin dinamik yükler altında davranışını incelemek amacı ile üç eksenli dinamik deney aletinde örselenmemiş ve laboratuvar da hazırlanmış numuneler üzerinde tekrarlı gerilmeler etkisinde deneyler yapmışlardır. Kullanılan numunelerin doğal su muhtevaları $\omega_0 = 18-26$ ve plastisite indisleri $I_p = 9-14$ arasındadır. Çalışmada çevrim sayısının AKO nun plastisitenin ve örselenmemiş numune ile hazırlanan numunenin dinamik davranışa etkisi ayrı ayrı gösterilmiştir. Plastisitesi $I_p = 15$ ve daha büyük olan numunelerde sıvılaşma olayı görülmemiştir. Şekil 2.16'da görüldüğü gibi plastisite indisi arttıkça tekrarlı gerilme etkisindeki mukavemet artmaktadır. Eksenel deformasyonun %5, %10 ve %20 mertebelerinde boşluk suyu basıncı efektif gerilmeye eşit olabilir. Göçme kriteri eksenel birim boy değişiminin %5 ve %10 olduğu boşluk suyu basıncının da efektif gerilmeye eşit olduğu değer olarak kabul edilir. Eksenel deformasyon % 20 değerine ancak boşluk suyu basıncı $u = \sigma_3$ gerilmesine ulaştıktan sonra oluşur. AKO nun artması siltlerin dinamik mukavemetlerinin de artmasına neden olur.

Hyodo (1997), Japonya'nın değişik yerlerinden alınmış örselenmemiş killi zemin numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak plastisitenin, AKO'nun, çevre basıncının ve örselenmenin tekrarlı mukavemet oranına etkisini incelemiştir. Tekrarlı mukavemet oranı hesaplanırken $\sigma_d/2\sigma_c$ yerine $R_t=q_{cyc}/p_c$ değeri $N=20$ çevrimden sonra %10 çift yönlü birim boy değişimi değerindeki gerilme olarak alınmıştır. Burada q_{cyc} ile tekrarlı deviatorik gerilme gösterilmiştir. Bu değer sıvılaşma analizlerinde kullanılan $\sigma_d/2\sigma_c$ değerinin iki katıdır. Dinamik deviatorik gerilme oranı ($R_{t(N=20)}$) değerinin normal konsolide killer için plastisiteye göre değişimi Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Benzer şekilde konsolidasyonunu tamamlamamış ve fiziksel olarak aşırı konsolidasyon oranı $AKO>1$ olan numuneler için de korelasyonlar oluşturularak dinamik mukavemet oranı plastisite indisi ve arazideki ön konsolidasyon basıncı ile jeolojik yüke bağlı ampirik bağıntıları çıkarılmıştır. Bu bağıntılar denklem (2.6), (2.7) ve (2.8) de sırası ile normal konsolide ve aşırı konsolide numuneler için ayrı ayrı gösterilmiştir. Bu bağıntılarda p_o ile arazideki efektif gerilme p_c ile ön konsolidasyon basıncı p_y ile ise konsolidasyon deneyi akma gerilmesi.

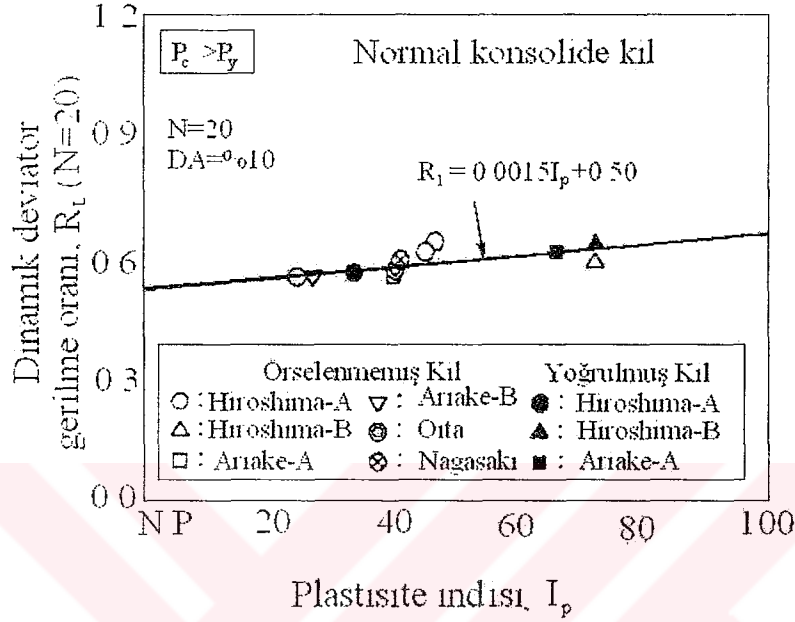


Şekil 2.16 Siltlerde $\varepsilon_{da}=\%5$ ve $\sigma_3=103.5$ kPa plastisite indisinin dinamik gerilme oranına etkisi (Das ve diğerleri,1999).

$$R_t = 0.0015I_p + 0.50 \quad (2.6)$$

$$R = 0.0015I_p + 0.50 + 0.097 \frac{p_y (p_y - p_c)}{p_0 (p_y - p_0)} \quad (2.7)$$

$$R = 0.0015I_p + 0.50 + 0.097 \frac{p_y}{p_0} + 0.64 \log_{10} \left(\frac{p_0}{p_c} \right) \quad (2.8)$$

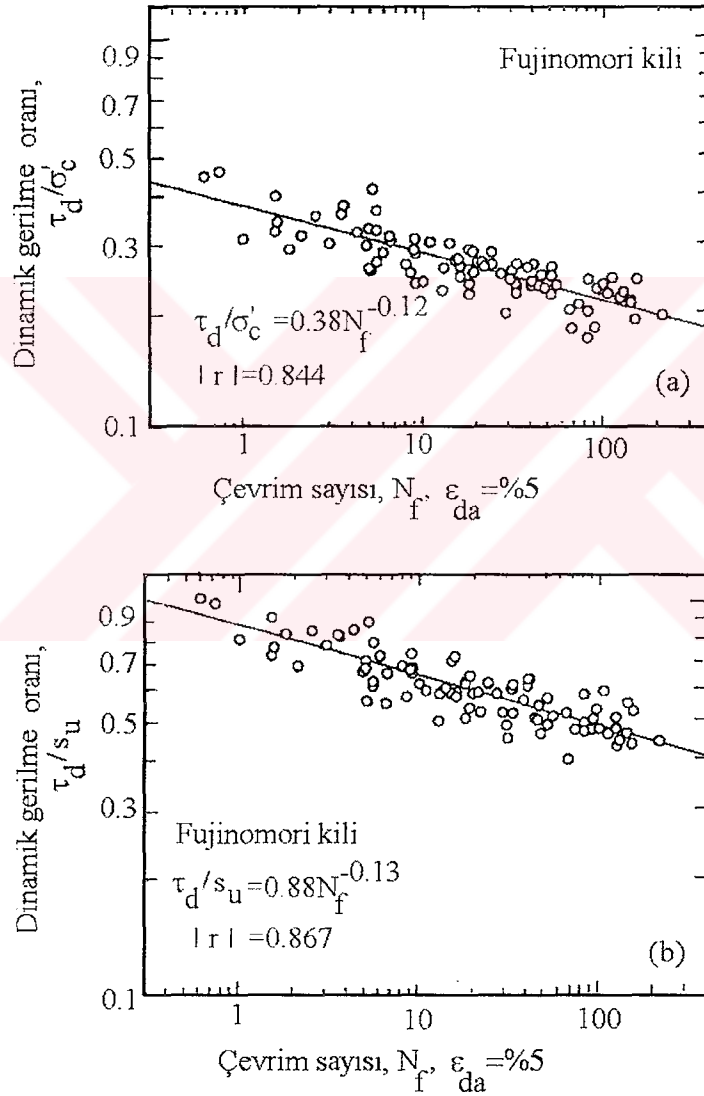


Şekil 2.17 Normal konsolide kilerde dinamik deviatorik gerilme oranı ($R_{(N=20)}$) plastisite indisi ilişkisi (Hyodo, 1997).

Pradhan ve diğerleri (1999) değişik 26 laboratuvarında plastisitesi $I_p=37$ ve likit limiti $\omega_l=\% 63$ olan Fujinomori kilinden elde ettikleri numuneler üzerinde üç eksenli dinamik deney aletinde ve dinamik basit kesme deney aletinde olmak üzere deneyler yapmışlardır. Değişik laboratuvarlarda aynı kilden farklı yerlerde deneyler yapılarak oluşan bu araştırmaya “round robin” test denilmektedir. Statik drenajsız mukavemet de her laboratuvarında bulunmuştur. Deney sonuçlarından deney koşulları ve tekniği kısıtlandığı zaman dinamik drenajsız mukavemet oranında oldukça küçük bir dağılım görülmektedir. Tekrarlı gerilme oranı normalize edilirken drenajsız mukavemet olan S_u nun kullanılmasının efektif konsolidasyon basıncı σ_c ye göre daha iyi dağılım verdiği Şekil 2.18’den görülmektedir. Bu çalışmada plastisite arttıkça dinamik mukavemet oranının arttığı da gösterilmiştir.

Harada ve diğerleri (1990) ile Ishihara ve diğerleri (1989) plastisite arttıkça dinamik mukavemet attığını göstermişlerdir.

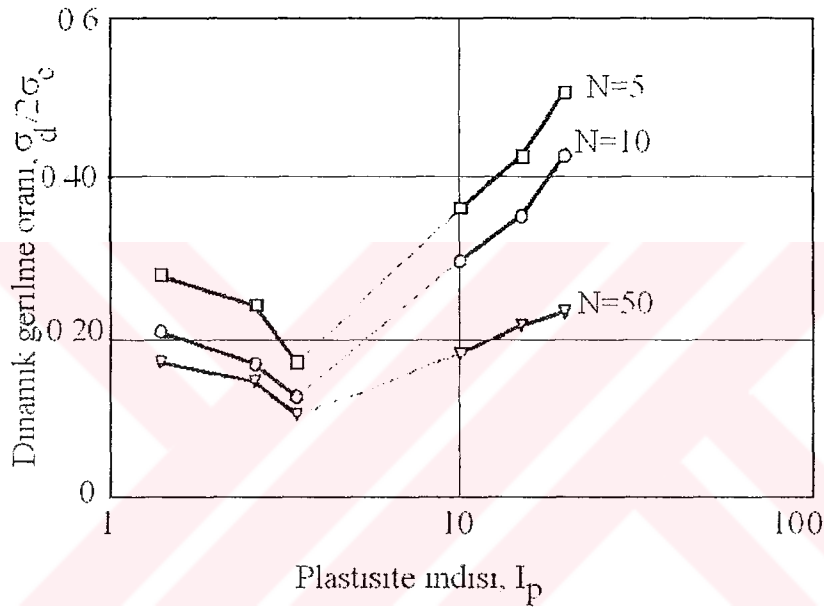
Guo ve Prakash (1999) örselenmemiş düşük plastisiteli siltler ile silt kil karışımlarının dinamik davranışının henüz tam açıklanmadığını belirtmişlerdir. Siltlerdeki kil oranının, plastisite indisinin ve boşluk oranının dinamik davranışı nasıl etkilediğini incelenmesini önermişlerdir. Ayrıca silt kil karışımlarının dinamik davranışına zemin yapısı ve gerilme geçmişi de incelenmesi gerekmektedir. Değişik çevrim sayılarına göre dinamik gerilme oranı plastisite ilişkisi Şekil 2.19'da verilmiştir. Şekilde dinamik gerilme oranı başlangıç boşluk oranına ($e_0=0.74$) göre normalize edilmiştir.



Şekil 2.18 Tekrarlı gerilme oranı çevrim sayısı değişimi (Pradan ve diğerleri 1999).

Hyodo ve diğerleri (1999) Japonya'nın yedi değişik bölgesinden alınmış örselenmemiş killer ile örselenmiş killer üzerinde dinamik üç eksenli basınç deney aletinde yaptıkları deneylerde gerilme geçmişi plastisite ve aşırı konsolidasyon

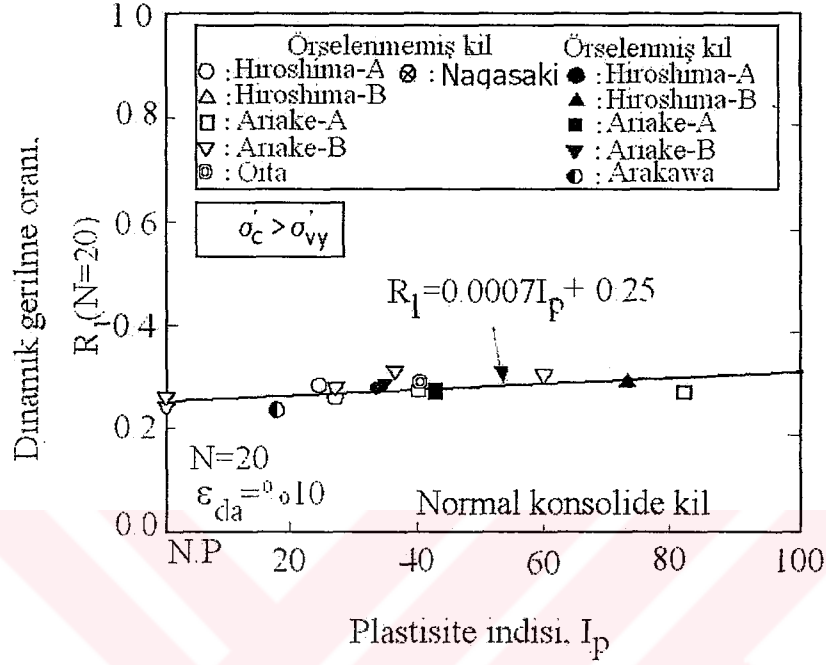
oranın etkisini izotropik ve anizotropik deneylerle incelemişlerdir. Anizotropik olarak konsolide edilmiş killerin başlangıç düşük drenajlı gerilmesi altında dinamik mukavemetleri plastisite arttıkça artmaktadır. Eğer başlangıç drenajlı gerilme artarsa dinamik mukavemet azalmaktadır. Bu ilişki plastisiteden bağımsız olarak düşünülemez. Çalışmada dinamik gerilme % 10 deformasyon için $N=20$ çevrime göre dinamik mukavemet plastisiteye bağlı olarak basitçe formüle edilmiştir. Çalışmadan elde edilen bağıntılar gerilme durumlarına göre Şekil 2.20 ve 2.21’de gösterilmiştir. Burada σ_{vo} ’ jeolojik yük, σ_c konsolidasyon basıncı, σ_v ’ odömetre deneyi düşey gerilmesi ve σ_{vy} düşey akma gerilmesi olarak gösterilmiştir.



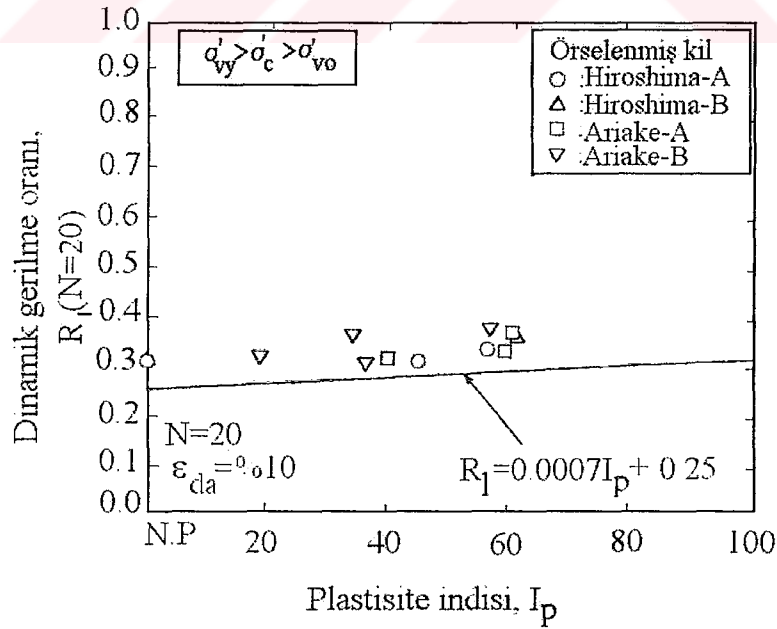
Şekil 2.19 Silt-Kil karışımlarının dinamik gerilme oranı plastisite ilişkisi (Guo ve Prakash, 1999).

Perlea ve diğerleri (1999) kohezyonlu zeminlerinde sıvılaşabileceğini savundukları çalışmalarında aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan yöntem Çinli bilim adamlarının kullandığı A kriteridir. Başlangıç sıvılaşma durumu kohezyonlu zeminlerde nadiren görülür. Buna rağmen büyük şekil değiştirme gösterirler. Tekrarlı gerilme altında şekil değiştirmeye göre göçme kriteri eksenel çift yönlü birim boy kısalması genliğinin $\epsilon_{da}=\%5$ veya $\%10$ seviyeleri için kabul edilir. İnce dane oranının $\%20$ seviyelerindeki değerlerine kadar sıvılaşmaya karşı mukavemet azalır, bu değerden sonra ince dane oranının artması ile mukavemette yavaş yavaş artmaya başlar. İnce dane oranının $\%15$ in altında olması kil oranının sıvılaşmaya karşı mukavemette bir etkisi yoktur. Eğer zemin $\%20$ veya daha fazla miktarda kil oranına sahip ise ve bu oran artarsa sıvılaşmaya karşı mukavemette

belirgin bir şekilde artar. Siltli kil veya killi siltlerin sıvılaşabilirliği ile en önemli parametre plastisite indisi. Sıvılaşmaya karşı en düşük direnç plastisite indisinin 4 ile 5 değerlerinde olması durumundadır. Zeminin plastisitesi $I_p=14$ ü geçerse sıvılaşamazdır denilebilir.



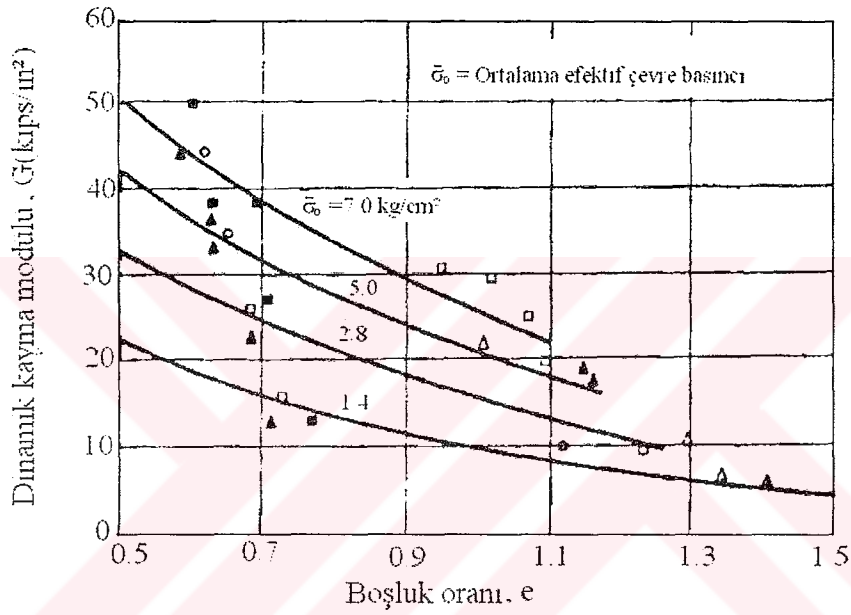
Şekil 2.20 Dinamik gerilme plastisite indisi ilişkisi $N=20$ Normal konsolide killeri (Hyodo ve diğerleri 1999).



Şekil 2.21 $\sigma_{vy} > \sigma'_c > \sigma'_{vo}$ için $N=20$ çevrimdeki killerin tekrarlı gerilmesi (Hyodo ve diğerleri 1999).

2.2 İnce Daneli Zeminlerin Gerilme-Şekil Değiştirme Özellikleri İle İlgili Çalışmalar.

Hardin ve Black (1968) Kaolin ve Boston mavi kili üzerinde yaptıkları dinamik deneylerde aynı boşluk oranında ortalama efektif çevre gerilmesi arttıkça dinamik kayma modülü değerinin arttığını göstermişlerdir. Dinamik kayma modülü ve boşluk oranı arasındaki ilişki değişik ortalama efektif çevre gerilmelerine göre Şekil 2.22’de görülmektedir.



Şekil 2.22 Dinamik kayma modülü-boşluk oranı ilişkisi (Hardin ve Black, 1968).

Hardin ve Drnevich (1972a,1972b) yaptıkları deneysel çalışmalarda dinamik kayma modülünün birim deformasyon genliğine, efektif ortalama asal gerilmeye, boşluk oranına, doygunluk derecesine ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı olduğu belirtilmiştir. Çok küçük birim deformasyon mertebelerindeki (10^{-6}) G_0 değerinin aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanabileceğini önermişlerdir.

$$G_0 = 320 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} (AKO)^a \sqrt{\sigma_m} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (2.9)$$

$$G = \frac{G_0}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (2.10)$$

Bu bağıntılarda;

G : Dinamik kayma modülü

e : Boşluk oranı

AKO : Aşırı konsolidasyon oranı

a : Zeminin plastisitesine bağlı bir katsayı

σ_m : Efektif orta asal gerilme

γ : Kayma birim deformasyonu

γ_r : Referans birim deformasyon

$$\gamma_r = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{G_0} \quad (2.11)$$

değerlerini göstermektedir.

Kokusho tarafından, (1987) yılında yapılan çalışmalarda G_0 için verilen bütün formüllerin aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebileceğini göstermiştir.

$$G_0 = A.F(e).(\sigma'_m)^n \quad (2.12)$$

Bu bağıntıda;

G_0 =Dinamik kayma modülü

A ve n =Aşağıdaki tabloda verilen sabitler

$F(e)$ =Boşluk oranının bir fonksiyonu, değeri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

σ'_m =Efektif orta asal gerilme

σ'_v =Efektif düşey gerilme

σ'_h =Efektif yatay gerilme

I_p =Plastisite indisi

γ =Birim kayma genliği

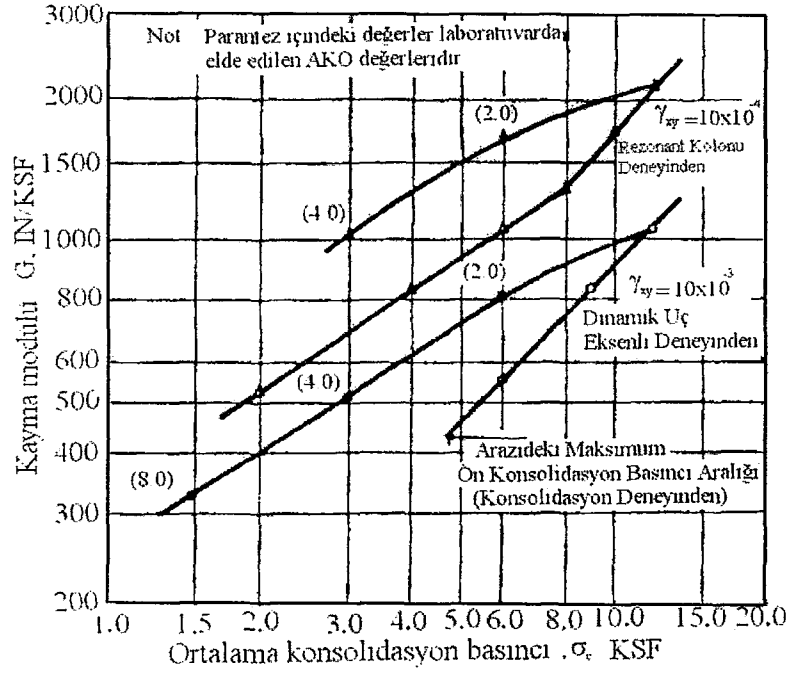
Erguvanlı (1975) tarafından yapılan çalışmada rezonans frekansı tekniği kullanılarak laboratuvarda yoğrularak hazırlanmış, sekiz farklı kil grubu üzerinde kohezyonlu zeminlerin dinamik yöntemle saptanan boyuna dalga yayılımı hızları, elastisite modülleri ve sönüm oranı değerlerine, su muhtevası, boşluk oranı, doygunluk derecesi, birim deformasyon mertebesi ve plastisitenin etkisini incelemiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre, zeminlerin dinamik özelliklerinin ve çeşitli

yöntemlerle saptanan elastisite modüllerinin tek bir değer olarak kabul edilemeyeceği, çeşitli parametrelerin ve koşulların etkisi altında beklenildiği gibi farklı değerlere yaklaşılabileceği, dolayısı ile projelendirme aşamasında kullanılacak değerlerin aynı koşulları yansıtan deneyler ve arazi-yapı-laboratuvar çalışmaları yaklaşımları sonucu saptanmasının gerekli olduğunu belirtmiştir.

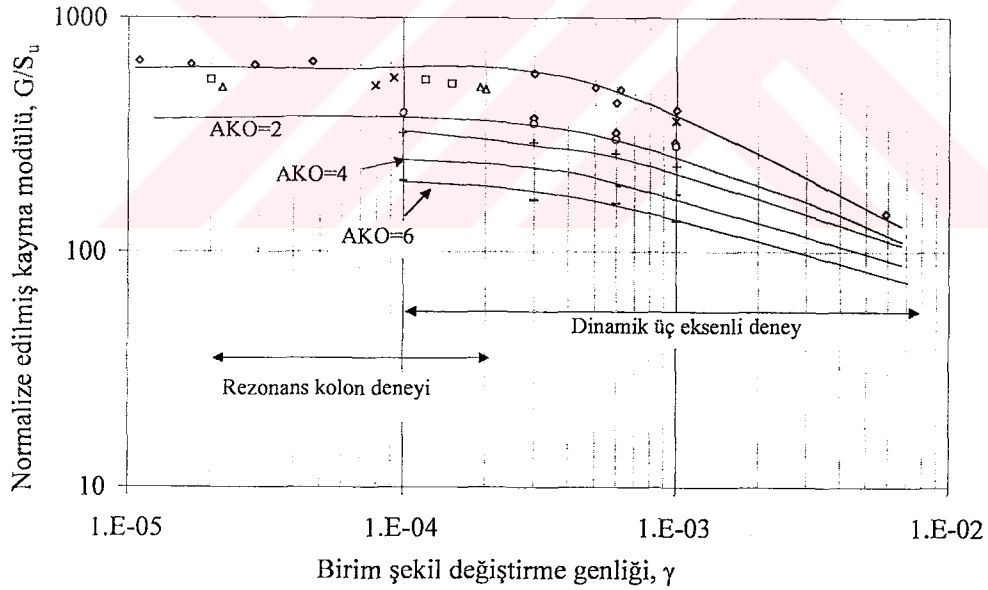
Tablo 2.1 G_0 için önerilen ampirik bağıntılar

Zemin Cinsi	Araştırmacı ve tarihi	A	$F(e)$	n	Zemin Özelliği	Test Metod	Çeşitli
Kum	Hardin-Richart(1963)	700	$(2.17-e)^2/1+e$	0.50	Ottava kumu Resonans kolon	Resonans kolon	$\gamma=10^{-4}$ $\sigma_m'=(\sigma_v'+2\sigma_h')/3$
		330	$(2.97-e)^2/1+e$	0.50	Köşeli derecenmiş Kuvars	Resonans kolon	-
	Shibata-Soelarno (1975)	4200	$0.67-(e/1+e)$	0.50	Üç çeşit temiz kum	Ultrasonik pulse	-
	Iwasaki-Tatsuoka Ve diğ. (1978)	900	$(2.17-e)^2/1+e$	0.38	Oniki çeşit temiz Kum	Resonans kolon	-
	Kokusho (1980)	840	$(2.17-e)^2/1+e$	0.50	Toyoura kumu	Tekrarlı üçeksenli	-
	Yu-Richart (1984)	700	$(2.17-e)^2/1+e$	0.50	Üç çeşit temiz kum	Resonans kolon	$\sigma_m'=\sigma_v'+\sigma_h'/2$
Kil	Hardin-Black (1968)	330	$(2.97-e)^2/1+e$	0.50	Kaolin ve diğ.	Resonans kolon	AKO dikkate alındı
	Marcuson-Wahls (1972)	450	$(2.97-e)^2/1+e$	0.50	Kaolin $I_p=35$	Resonans kolon	AKO dikkate alındı
		45	$(4.40-e)^2/1+e$	0.50	Bentonite $I_p=60$	Resonans kolon	AKO ve zaman etkisi dikkate al.
	Zen-Umerhara (1978)	200~400	$(2.97-e)^2/1+e$	0.50	Örselenmiş kil $I_p=0-50$	Resonans kolon	A I_p ye göre verilmiş
	Kokusho-Yoshida (1982)	14.1	$(7.32-e)^2/1+e$	0.60	Örselenmemiş kil $I_p=40-85$	Tekrarlı üç eksenli	AKO dikkate alındı

Koutsoftas ve diğerleri (1980) Dinamik üç eksenli ve Resonans frekansı deney aletlerinde plastik kıvamda olan örselenmemiş iki tür deniz kili üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalardan her iki tür kilde de kayma modüllerinin gerilme geçmişinden oldukça fazla etkilendiğini, aynı birim kayma, ve konsolidasyon basıncı altında aşırı konsolide numunelerin normal konsolide numunelere oranla daha yüksek kayma modülüne sahip olduklarını Şekil 2.23 ve 2.24'de göstermişlerdir.



Şekil 2.23 Plastik killer için konsolidasyon basıncı ve gerilme tarihçesine bağlı olarak kayma modülünün değişimi (Koutsoftas ve diğerleri, 1980).



Şekil 2.24 Birim kayma ve AKO değerlerine bağlı olarak normalize edilmiş kayma modülünün değişimi. (Koutsoftas ve diğerleri, 1980).

Ray ve Woods (1989) kumlu ve siltli zemin numuneleri üzerinde laboratuvarda yaptıkları Burulmalı basit kesme ve Rezonsant kolon deneylerinde aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir. Kumlardaki kayma modülü başlangıç değerinin %120 katına kadar çevrim sayısına bağlı olarak artabilir. Siltlerin kayma modülü ise çevrim

sayısına bağılı olarak azalış gösterir. Siltler ve kumlar çevrim sayısına bağılı olarak sönüm kapasitelerinde azalış gösterirler. Burulmalı basit kesme deney sonuçları ile rezonans kolonu deney sonuçları farklılık göstermektedir. Uniform dinamik yüklemeli deneylerden elde edilen veriler uniform olmayan sonuçlara uyarlanabilir.

Kagava (1990) tarafından yumuşak deniz killерinin modülü ve sönüm faktörlerinin tespiti amacı rezonans kolonu ve dinamik basit kesme deneyleri yapılmıştır. Birinci konsolidasyondan sonraki küçük birim şekil değıştirme modülü, konsolidasyon basıncına, plastisite indisine ve boşluk oranına bağılıdır. Modüler azalım eğrileri denizaltı ve karasal killер için birbirine oldukça benzerdir. Sönüm karakteristikleri de bu iki kil gurubu için birbirine benzerdir. Hiperbolik gerilme şekil değıştirme modelleri killерin sekant modülüne bağılı olarak deformasyonlar için uygundur. Ancak büyük şekil değıştirmelerdeki sönüm oranını bu modeller yanıtlayamaz. Bu çalışmada bulunan azalım ilişkisi parametreleri plastik deniz killeri için diğер araştırmacıların bulduğu parametreler ile aynıdır.

Vucetic ve Dobry (1991) plastisitenin tekrarlı yükler etkisindeki zemin davranışına etkisini göstermek amacı ile literatürdeki verileri kullanarak yaptıkları araştırmada aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir. Plastisitenin sönüm oranını kontrol eden en önemli parametre olduğu tespit edilmiştir. Plastisite indisi I_p büyüdükçe G/G_{maks} artar ve sönüm oranı λ azalır. Diğер bir söylevle yüksek plastisiteli zeminlerin daha doğrusal tekrarlı gerilme şekil değıştirme davranışı gösterdikleri söylenebilir. Bu durum normal konsolide ve aşırı konsolide zeminler için geçerlidir.

Normal konsolide killerde en büyük kayma gerilmesi modülünün derinlikle nasıl değıştiğinin tespiti amacı ile Shibuya ve Mitachi (1994) tarafından arazi deneyleri ve burulmalı üç eksenli dinamik deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada 10^{-3} seviyesinin altındaki şekil değıştirmeler küçük şekil değıştirme olarak kabul edilmiş ve bu değерlere karşılık gelen kayma modülü en büyük kayma modülü olarak dikkate alınmıştır. Laboratuvarıda örselenmemiş numune kullanılarak dinamik yükleme etkisinde bulunan 2×10^{-5} seviyesindeki şekil değıştirmeye karşılık gelen kayma modülü arazi şartlarına göre de pratik olarak anlamlıdır. Normal konsolide killерin kayma modülü hesabi için aşağıdaki bağıntılar verilmiştir.

$$\frac{G}{G_r} = \left(\frac{\sigma'_v}{(\sigma'_v)_r} \right)^{m(\gamma)} \quad \text{Arazideki sedimantasyon koşullarına göre} \quad (2.13)$$

$$\frac{G^*}{G_r^*} = \left(\frac{\sigma_r'}{(\sigma_v')_r} \right)^{m^*(\gamma)} \quad \text{Laboratuvar sıkıştırma koşullarına göre} \quad (2.14)$$

Burada;

G_r ve G_r^* $(\sigma_v')_r$ efektif gerilme seviyesindeki kayma modülünü,

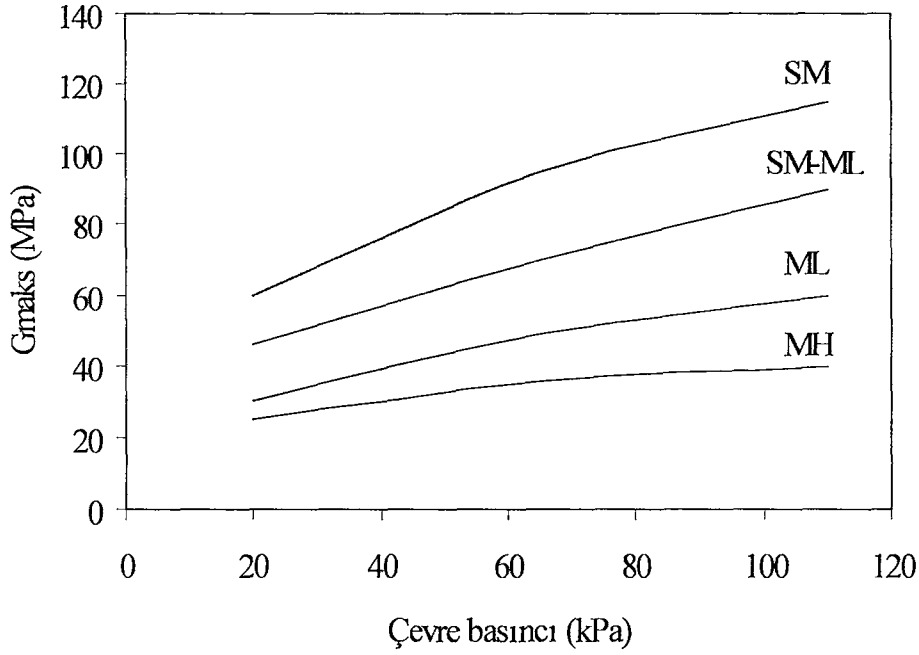
$m(\gamma)$ ve $m^*(\gamma)$ deformasyon seviyesine bağlı fonksiyonları göstermektedir.

Iwasaki ve diğerleri (1978) laboratuvar deneylerine göre kayma modülü hesaplanırken arazi şartlarındaki düşey gerilmenin üstünde bir çevre gerilmesinin numuneye uygulanması önerilmektedir. Bunun nedeni sıkışabilirlikteki farklılığın ve yaşlanma etkisinin arazi ve laboratuvar koşullarında değişmesidir.

Matasoviç ve Vucetic (1995) tarafından denizden alınan örselenmemiş killi numuneler üzerinde dinamik basit kesme deneyleri yapılmıştır. Kalıcı boşluk suyu basıncı artışı ve azalış parametreleri arasında modellemeye esas olacak bağıntı bulunmaya çalışılmıştır. Killerin mikro iç yapısının karmaşıklığı ve düzenli olmayan tekrarlı yük altında davranışlarının da karmaşık oluşu suya doymuş killerin tekrarlı yük altında davranışının modellenmesini karmaşık hale getirmiştir.

Viggiani ve Atkinson (1995) İnce daneli zemin numuneleri üzerinde üç eksenli deney aletinde küçük boy değişimleri seviyesinde ölçümler yaparak bunu etkileyen parametreleri incelemişlerdir. Deney sonuçlarından başlangıç kayma modülünü plastisitenin, AKO'nun ve gerilme tarihçesine bağlı değişik ampirik bağıntılarını elde etmişlerdir. Araziden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde ve laboratuvar da hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları ayrı ayrı gösterilmiştir.

Borden ve diğerleri (1996) rezonans kolon ve burulmalı kesme deney aletinde toplam 32 adet numune üzerinde değişik konsolidasyon basıncı ve değişik frekans etkisi altında dinamik özelliklerin tespiti amacı ile deneyler yapmışlardır. Deney sonuçlarından kayma gerilmesi genliğinin artırılması ile normalize edilmiş kayma modülünün azaldığı ve sönüm oranının arttığı tespit edilmiştir. Bu değişimin kumlarda daha yavaş killerde ise daha hızlı meydana gelmekte olduğu savunulmuştur. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre değişik konsolidasyon basıncına sahip değişik özellikteki siltli ve kumlu zeminlerin $G_{maks.}-\sigma_c$ ilişkisi aşağıdaki Şekil 2.25'de gösterilmiştir.



Şekil 2.25 G_{maks} .- σ_c ilişkisi (Borden ve diğerleri, 1996).

Fohoum ve diğerleri (1996) kompaksiyon yolu ile % 8 oranında kireç katılarak hazırlanmış kaolin sodyum montmorilonit ve kalsiyum montmorilonit killerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi için üç eksenli deney aletinde çeşitli tekrarlı yüklemeler yapmışlardır. Deneylerde kullanılan numunelerin plastisite indisleri $I_p=18$ ile 514 gibi çok geniş bir aralıkta değişmektedir. Kireç katılması ile dinamik özellikler etkilenmekte ve mukavemet değerleri değişmektedir. Her üç zemin numunesinde de dinamik yükler altında şekil değiştirmenin artırılması ile dinamik sekant kayma modülü azalmakta ve viskoz sönüm artmaktadır. Kireç katılması oranının artması ile sodyum montmorilonitin kayma modülü artmakta ve sönüm oranı azalmaktadır. Benzer davranış kalsiyum montmorilonit kili için de geçerlidir. Normalize edilmiş dinamik kayma modülünü en büyük yapan kireç miktarı olan optimum değer sodyum montmorilonit için %7-%8 civarındadır. Kalsiyum montmorilonitte bu oran %3-%4 civarındadır. Bu farklılık kalsiyum montmorilonitte kireç bulunmasından ileri gelmektedir. Modüler değerleri en büyük yapan kireç oranı %1-%2 arasındadır. Sonuç olarak killi zeminlere kireç katılarak dinamik özellikler değiştirilebilmekte ve pratik mühendislik hizmetlerinde kireç ile zemin stabilizasyonu yapılabilmektedir.

Yasuhara ve Hyde, (1997) suya doygun killi zeminlerin tekrarlı yükün etkisinden sonra veya oluşan boşluk suyu basıncı dengelendikten sonra Elastisite Modüllerinin hesaplanması için bir metod önermişlerdir. İlk aşamada tekrarlı yk sonrası drenajsız sekant modülleri hesap edilir. İkinci aşama olarak tekrarlı yükten dolayı modüllerdeki azalma üç eksenli deney sisteminde çeşitli örselenmemiş veya hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarından hesap edilir. Tekrarlı gerilme sonrası rijitlik tekrarlı gerilme sonrası drenajsız mukavemete göre açıklanabilir. Tekrarlı yükleme etkisinden sonra rijiklikteki azalım drenajsız mukavemetteki azalımdan daha büyüktür. Tüm deneysel parametreler plastisite indisinin fonksiyonu olarak hesaplanabilir.

Boulanger ve diğerkleri, (1998) Sherman adası çamurunun dinamik özelliklerinin tespiti amacı ile üç eksenli dinamik deney aletinde %0.0005 ve %10 birim şekil değıştirme oranlarında %35-%40 uçucu kül içeren numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Ayrıca üç eksenli drenajsız statik basınç ve çekme deneyleri de yapılmıştır. Yükleme frekansının, yumuşamanın, gerilme geçmişinin ve anizotropinin etkisi değıerlendirilmiştir. Sherman adası çamurunun modüler azalım ve sönüm zellikleri Vucetic ve Dobry (1991) in yüksek plastisiteli sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Stokoe ve diğerklerinin (1996) aynı konsolidasyon basıncı ve aynı uçucu kül oranlarındaki değıerleri Sherman adası çamurunun değıerleri ile lineer bölgede uyumlu davranış göstermektedir. Değışik kül oranı ve değışik yapıya sahip başka bölgedeki çamurların üzerinde benzer deneyler yaparak sonuçların genişletilmesi önerilmiştir.

Lanzo ve Vucetic (1999) küçük deformasyon seviyelerindeki sönüm oranına plastisitenin etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre % 0.001 in altında sönüm oranı killerde kumlardan daha büyüktür. Kumlar ve düşük plastisiteli killerin sönümü evre basıncı ve AKO'dan daha çok etkilendiğı halde yüksek plastisiteli killerde bu durum tersinedir. Değışik deney sistemleri aynı zemin için değışik sonuçlar vermektedir.

Kallioglu ve diğerkleri (1999) Yunanistan'ın değışik bölgelerinden alınan numuneler üzerinde rezonans kolon deneyi yapılarak, kayma rijitliğı ve sönüm oranı özellikleri üzerinde zemin parametreleri, konsolidasyon basıncı, plastisite indisi ve boşluk oranı etkisi literatürdeki verilerle birlikte gösterilmiştir. Kohezyonlu zeminlerin en büyük kayma modülü için basit korelasyon yapılarak aşağıdaki (2.15) bağıntısı önerilmiştir.

$$G_{maks.} = 1421e^{-1.504} \sigma^{0.623} \quad (2.15)$$

Kohezyonlu zeminlerin D_{min} değerinin %1.4 ile %4.80 arasında değiştiği savunulmuştur. Çakıl içeren kohezyonlu zeminlerin D_{min} değerinin %6 ile %7.4 arasında değiştiği belirtilmiştir. Laboratuvarda ölçülen dinamik değerler ile arazide ölçülen dinamik değerlerin arasındaki farkın %61-%107 arasında değiştiği savunulmuştur.

Değişik araştırmacılar tarafından örselenmenin en büyük dinamik kayma modülü üzerinde etkisi laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalarla incelenmiştir (Tatsuoka ve Shibuya, 1992, Jamiolkowski ve diğerleri, 1994, Hight ve Georgiannou, 1995, Guha ve diğerleri, 1997).

Shibuya ve diğerleri, (1997) üç eksenli dinamik deney aletinde laboratuvarda hazırlanan numuneler üzerinde statik ve dinamik deneyler yaparak Elastisite Modülünün deformasyona bağlı bağıntısını bulmaya çalışmışlardır. Önerdikleri model ile ölçülen ve tahmin edilen değerleri göstermişlerdir. Verilen tekrarlı birim boy değişimi genliğinde sönüm oranının artması eksenel birim boy değişiminin azalması gibi özellikleri sağlayan modeller önerilmişlerdir.

Bray ve diğerleri, (1999) araziden yüksek kalitede numuneler alınıp, bu numuneler en az arazide etkisinde kaldıkları jeolojik gerilmede veya daha büyük gerilmede konsolide edilirlse laboratuvar ortamında bulunan dinamik kayma modülleri arazideki değerlerine yaklaşabilmektedir.

Özay ve diğerleri, (2000) dinamik üç eksenli deney aletinde örselenmemiş değişik kıvramlardaki killi zemin numuneleri üzerinde çok küçük genlikli gerilmelerden başlayarak her beş çevrimde bir gerilme genliği artırılarak dinamik üç eksenli deneyler yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre plastisitesi ve konsolidasyon basınçları aynı olan numunelerde zemin kıvramı arttıkça dinamik kayma modülü değerinin arttığı ve sönüm oranının azaldığı görülmüştür.

2.3 Sonuç

Killi zeminlerin dinamik davranışının incelenmesinde 1960' lı yıllarda başlayan günümüze kadar devam eden laboratuvar deneysel çalışmalarında mukavemeti etkileyen parametreler ve gerilme-şekil değiştirme özellikleri incelenmiştir. Dinamik

mukavemeti etkileyen en önemli parametreler dinamik kayma gerilmesi oranı, $\sigma_d/2\sigma_c$ ve çevrim sayısı N dir. Gerilme-birim şekil değiştirme özelliği olarak başlangıç kayma modülü ve sönüm oranı en önemli iki parametre olmuştur. Bu parametreler üzerinde hangi zemin özelliklerinin etkili olduğu yukarıda incelenen literatür taramasında tarih ve araştırmacı sırasına göre ayrı ayrı incelenmiştir. Sonuç olarak dinamik davranışı etkileyen özellikler, dinamik gerilmenin büyüklüğü, süresi, yükleme şekli, zeminin plastisitesi, kıvamı, başlangıç boşluk oranı, doygunluk derecesi, sismik geçmişi, jeolojik yük, aşırı konsolidasyon oranı, kaba dane oranı, deney sistemi ve yükleme şeklidir.



3. DENEY SİSTEMİ KULLANILAN MALZEME VE DENEYLER

3.1 Giriş

Deprem bölgelerinde yapılacak önemli yapıların (Yüksek binalar, Barajlar, Nükleer santraller, Sanayi tesisleri, Köprüler, Tüneller, Limanlar, Enerji hatları) temel zeminin statik özelliklerinin yanında dinamik özelliklerinin de incelenmesi gerekir. Zeminlerin dinamik özelliklerinin bulunması için arazide yapılan ve laboratuvarda yapılan deneylerden faydalanılır. Arazide yapılan deneylerle bulunan parametreler tek başına yeterli olmadığından geoteknik mühendisliğinde laboratuvar deneyleri de büyük önem arz etmektedir. Her yapının yapılacağı yerdeki zeminin mekanik ve dinamik özellikleri daha önce yakın mahallerdeki diğer yapıların için yapılmış deneysel sonuçlardan veya jeofizik yöntemle elde edilmiş genel değerlerin kullanılması ile sağlıklı bir sonuca gidilemez. Bundan dolayı gerek proje gerekse araştırma aşamasında zeminlerin mühendislik özelliklerinin bulunması için geçmişten günümüze pek çok deneysel yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışmada JICA projesi kapsamında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Dinamiği laboratuvarına getirilen en gelişmiş dinamik üç eksenli basınç deney aletinde örselenmemiş ince daneli numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır.

Araştırmada kullanılan numuneler Dinar depreminden sonra bölgede yapılan sondajlar sırasında piston numune alıcılarla araziden alınmıştır (Erken ve diğerleri, 1998). Numunelerin alındığı sondaj kuyularında SPT deneyleri yapılmıştır. Ayrıca bazı sondaj kuyularının yanında CPT deneyleri de yapılmıştır. Her dinamik üç eksenli deneyde kullanılan numunelerin endeks özelliklerinin tespiti amacı ile standart laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde odömetre deneyi yapılarak elde edilen sonuçlar dikkate alınmıştır.

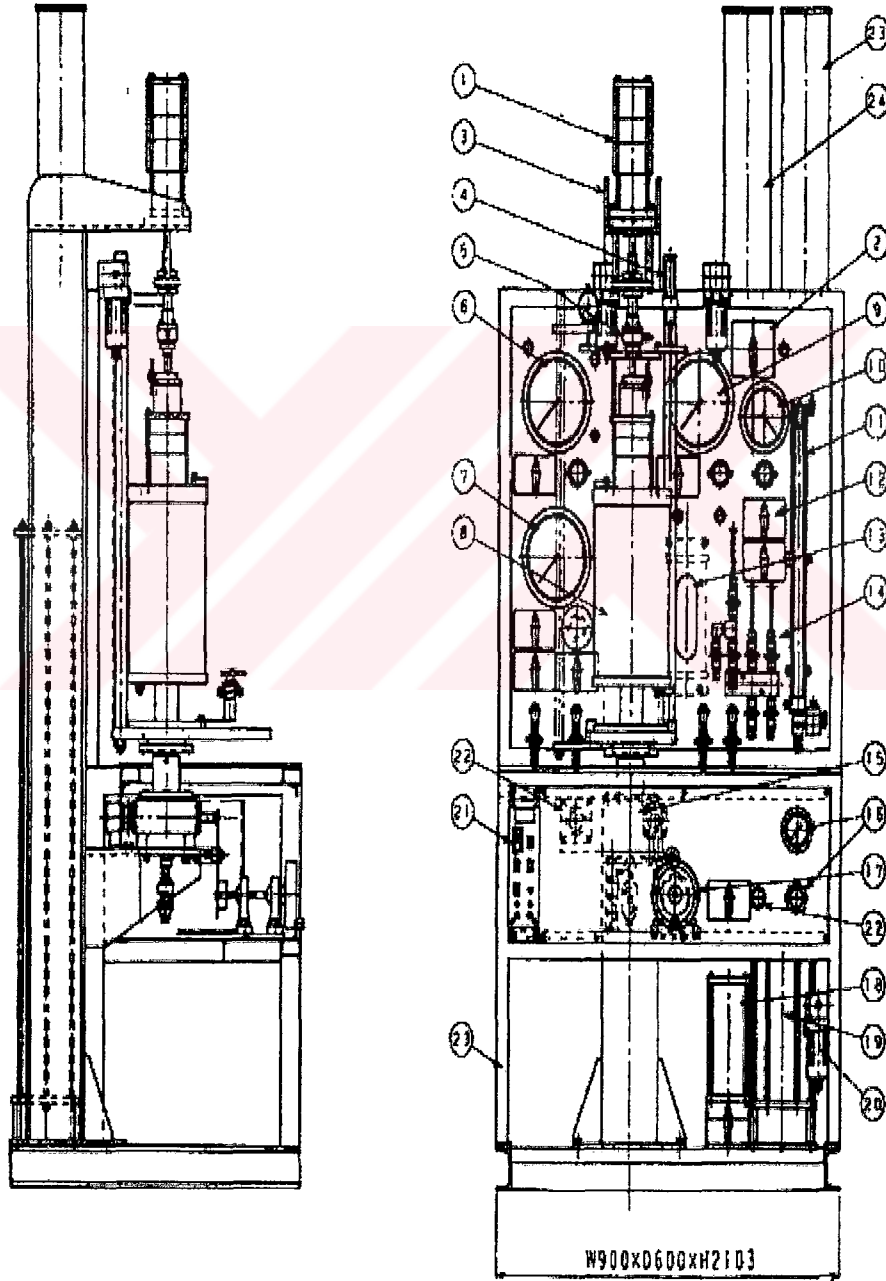
3.2 Kullanılan Deney Sistemi

Bu araştırmada dinamik deneylerin yapıldığı deney sistemi klasik üç eksenli dinamik basınç deney sisteminin Japon Seiken Inc. Firması tarafından gelişmiş bir modeli olup İ.T.Ü-JICA projesi (Japonya Uluslararası İşbirliği Kuruluşu) kapsamında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Dinamiği laboratuvarına getirilmiştir. Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de görüldüğü gibi deney sistemi iki ana üniteden oluşmaktadır bunlar ünite A ölçüm ve ünite B kayıt birimi olarak adlandırılmıştır.

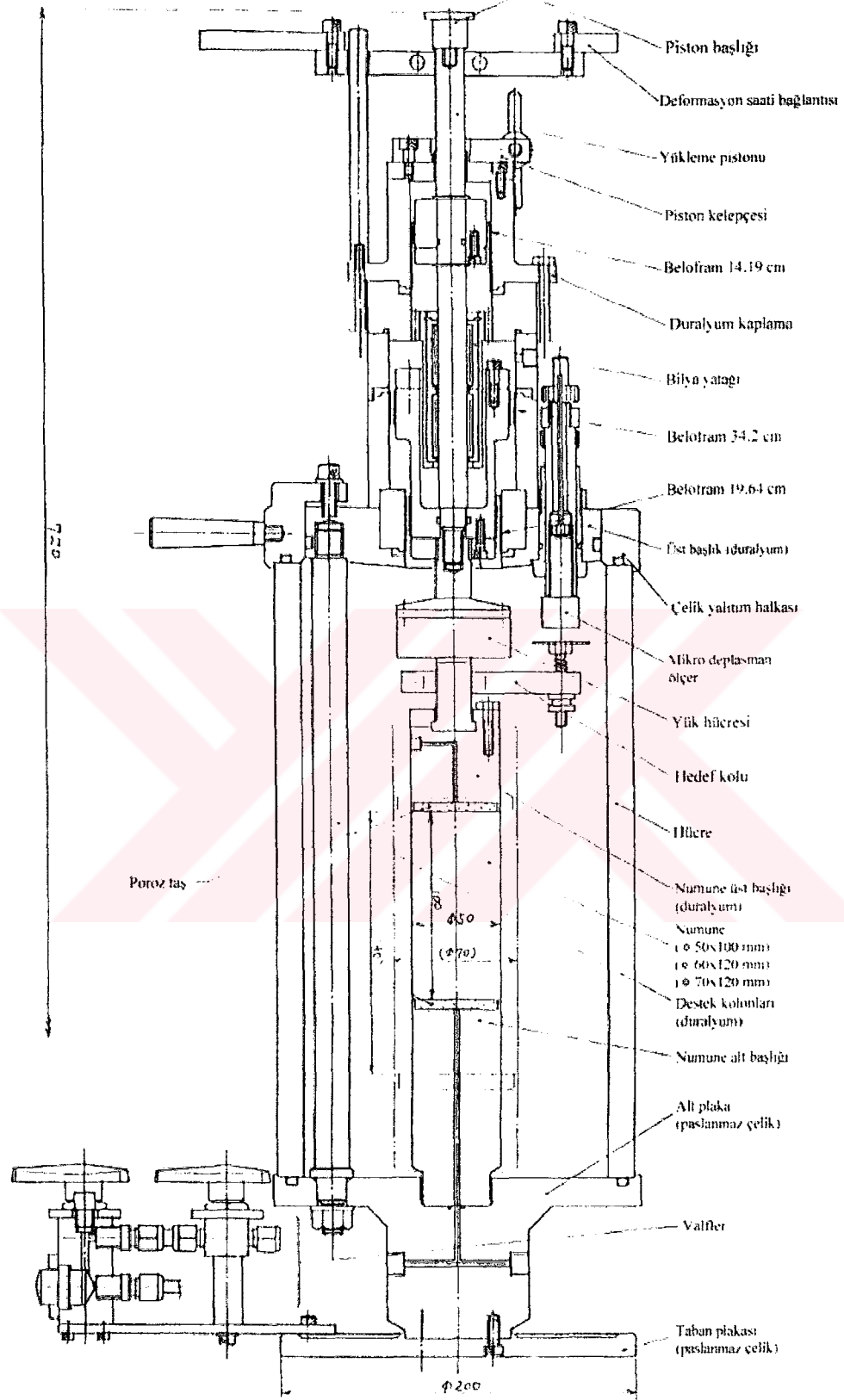
3.2.1 Yükleme Birimi Ve Üç Eksenli Hücre

Şekil 3.1’de dinamik üç eksenli deney sisteminin yandan ve önden görünüşü ile üniteleri görülmektedir. Dinamik üç eksenli hücre ve bölümleri ise Şekil 3.2’de detaylı olarak gösterilmiştir. Numunenin yerleştirildiği üç eksenli hücrenin 500 kgf düşey yük kapasitesi, 10 kg/cm² lik yatay yük kapasitesi veya hücre basıncı kapasitesi mevcuttur. Hücre içerisine üst ve alt başlık parçaları değiştirilerek üç değişik silindir ebatta numune yerleştirilmesi veya hazırlanması mümkündür. Bu ebatlar sırası ile $\phi=50 - 60 - 75$ mm çaplarında ve 100 – 120 – 150 mm yüksekliğinde olabilmektedir. Düşey yük yükleme aletinin 200 kgf dinamik yük kapasitesi mevcuttur. Yükleme çerçevesinin içerisinde düşey yönde hareket eden piston vasıtası ile düşey dinamik yük üst başlığa aktarılmaktadır. Statik üç eksenli basınç deneyi pistonun aşağıda belirtilen hızda hareket ettirilmesi ile yapılabilmektedir. Statik üç eksenli deneyde yükleme kapasitesi 500 kgf ve yükleme hızı 0.002 – 2 mm/dak dır. Bu sistemin güç kaynağı 100 V tur. Hava – Su ölçüm sistemi 0 ile 10 kg/cm² arasında basınç ayarlanmasına müsaittir. Çevre basıncı ile ters basınç 0 – 10 kg/cm² basınç verilmesine regültörler yardımı ile ayarlanabilmektedir. Ayrıca bias vana yardımı ile düşey basınç ters basınç ve çevre basıncı aynı anda artırılabilir. Alt ve üst başlıktan gelen drenaj kanallarına bağlı 25 ml lik buretten hacim değişimi ölçülmekte ve ters basınç uygulanmaktadır. Sistemde 5 litrelik damıtılmış su tankı ve 5 litrelik vakum tankı mevcuttur. Basınç ayarlamaları hem SI sistemine göre hem de metrik sisteme göre yapılabilmektedir.

- | | |
|---|--|
| 1 Pnömatik yükleme | 13 Üst ters basınç tankı: 1.5 Litre |
| 2 Ana vana valfi | 14 Numuneye su giriş sistemi |
| 3 Yükleme çerçevesi | 15 Mekanik kol: Kapasite:500 kgf |
| 4 Düşey deplasman ölçer : ± 20 mm | 16 Ana basınç saati ve basınç regülatörü |
| 5 Yük hücresi alt kısmı | 17 Manuel kol |
| 6 Düşey basınç saati: maks: 10 kgf/cm ² | 18 Alt ters basınç tankı: 1.5 Litre |
| 7 Çevre basıncı saati: maks: 10 kgf/cm ² | 19 Su tankı: 10 Litre |
| 8 Hücre | 20 Hava fitresi |
| 9 Ters basınç saati: maks: 10 kgf/cm ² | 21 Hız kontrol ünitesi |
| 10 Vakum saati: maks:-1 kgf/cm ² | 22 Hava kaydırma regülatörü |
| 11 Çift tüplü büret: 25 ml | 23 Vakum tankı: 5 Litre |
| 12 Açma kapama vanası | 24 Havası alınmış su tankı: 5 Litre |



Şekil 3.1 Dinamik üç eksenli deney sisteminin yandan ve önden görünüşü.



Şekil 3.2 Dinamik üç eksenli deney sistemi hücresi.

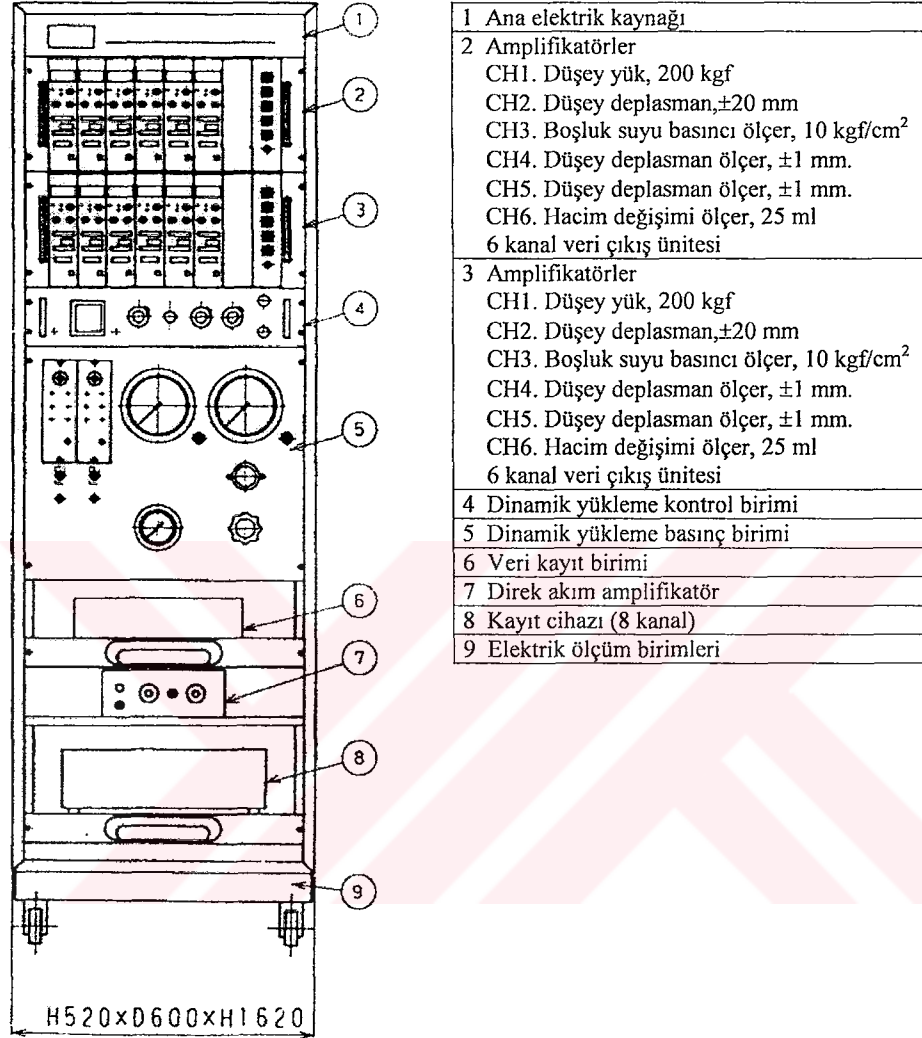
3.2.2 Elektiksel Ölçüm Birimi

Şekil 3.3’de Dinamik yükleme ölçüm ve kayıt ünitesi olarak adlandırılan elektiksel ölçüm ve kayıt birimi hem yüklemeyi kontrol etmekte hem de verilerin toplanıp aktarılmasında kullanılmaktadır. Şekil 3.3’de 9 bölümden oluşan sistemin fotoğrafı Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Pnömatik sinüzoidal yükleme birimi hem bir deprem kaydını yüklemeye hem de değişik frekanslarda sinüzoidal yük yüklemeye göre tasarlanmıştır. Sinüzoidal yüklerin frekansları 0.001 ile 2 Hz arasında değişebilecek şekilde ayarlanabilir. Elektiksel ölçüm ünitesi düşey yükleme transdüseri, düşey yer değiştirme transdüseri, boşluk suyu basıncı transdüseri, küçük yer değiştirme transdüserleri, hacim değiştirme transdüserleri olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır.

Elektiksel voltaj değişimine göre çalışan bu ünitelerde yük uygulandığı zaman sistemde voltlar değişir. Yük kaldırıldığı zaman sistem otomatik olarak ilk denge durumuna getirilir. Yukarıda 1 den 5’e kadar sıralanan büyüklüklerin ölçümü için değişik aralıklar mevcuttur. Bunlar sırası ile aşağıda açıklanmıştır.

Düşey dinamik yük üç değişik maksimum değerlerde uygulanmaktadır. Bu değerler 200 kgf, 100 kgf ve 40 kgf ten ibarettir. Kullanılan zeminin özelliğine göre uygulanacak düşey yük aralığı önceden seçilir. Aynı şekilde düşey yer değişimlerinin ölçümü için de üç seçenek bulunmaktadır. Bunlar 20 mm, 10 mm ve 4mm den oluşmaktadır. Boşluk suyu basıncı transdüserinden de üç değişik aralıkta ölçüm yapma olanağı mevcuttur. Bu aralıklar 10 kgf/cm^2 , 5 kgf/cm^2 ve 2 kgf/cm^2 dir. Küçük deplasmanlar ise hücre içerisinde üst başlığın bağlı olduğu düşey mile monte edilen biri sağda diğeri solda olmak üzere iki adet AEC – 55 PAN model Gap-Sensor vasıtası ile algılanmaktadır. Üst başlığın çok küçük düşey yer değiştirme yapması buradaki algılayıcıları etkilemekte ve bunun sonucunda Gap – Sensor un çıkış voltajında bir değişiklik meydana gelmektedir. Bu sistemin klasik üç eksenli sistemlerden bir farkı da budur. Maksimum çıkış voltajı 0.5 olan bu transdüserler de üç değişik aralıkta küçük deformasyon ölçümü yapmaya olanaklıdır. Bu aralıklar 1 mm 0.5 mm ve 0.2 mm den oluşmaktadır. Üst başlığın iki yanında bulunan dairesel metal parçaları çok küçük yer değiştirme meydana geldiği vakit bile sinyal almakta ve alınan sinyaller çıkış voltajını değiştirmektedir. Oluşan voltaj değişimi bir yer

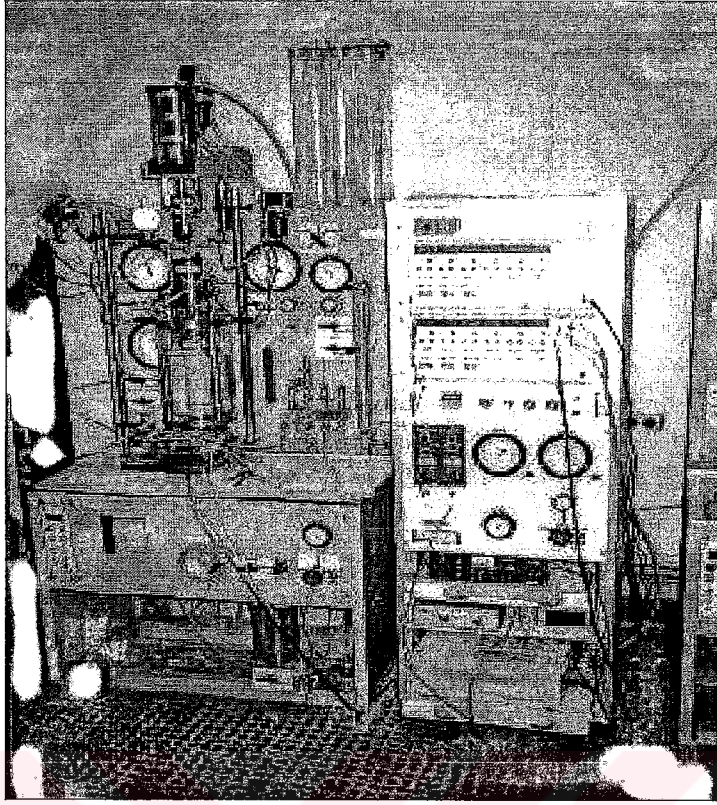
değiştirme sonucu olduğundan sisteminde yer değiştirmeden önceki denge durumu bilindiğinden ne kadar yer değiştirme olduğu iki pozisyon farkından hesaplanabilir.



Şekil 3.3 Dinamik yükleme ölçüm ve kayıt birimleri.

Ayrıca 25 ml lik burete bağlı bir transdüser yardımı ile hacim değişimlerinde elektiksel olarak ölçülmektedir. Deney sisteminde üst başlığa bağlı deformasyon mikrometresinden düşey yer değişimleri ve burette oluşan su seviyesi değişiminden de hacimsal değişimler elde edilmektedir.

Ölçülen bu değerler kişisel bilgisayara Virtuel Bench Logger programı vasıtası ile aktarılıp kaydedilmektedir. Aynı zamanda sisteme bağlı grafik çizici yardımı ile de değerler grafik olarak kaydedilebilir.



Şekil 3.4 Ölçüm ve kayıt birimi fotoğrafı.

3.3 Numune Hazırlanması

Yapılan çalışmada kullanılan numuneler 1995 yılı Dinar depreminden sonra bölgede yapılan kapsamlı geoteknik inceleme sırasında sondajlar vasıtası ile elde edilmiştir. Sondajlar sırasında 70 mm çapında ve 800 mm yüksekliğine sahip çelik tüplerle örselenmemiş numuneler alınmıştır. Örselenmemiş numune alınmasında TS 1901, UDK 622, 623, 624, 131 ve 136' da belirtilen "Önemli Zemin Etütleri İçin İnce Cidarlı Tüplerle Numune Alma Yöntemleri" uygulanmıştır. İnce cidarlı tüpler zemine tüp boyundan daha az olarak hidrolik baskı ile batırılmış numune alıcı sondaj kuyusundan çıkarılır çıkarılmaz yerinde özellikleri bozulmadan her iki ucu reçineli parafinle kapatılmıştır. Araziden bu şekilde alınan numuneler İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarı nem odasına saklanmışlardır.

Deney yapılacağı zaman nem odasından alınan ince cidarlı tüp, dinamik deneyde kullanılacak silindir numunenin boyundan 1 - 2 cm uzun olarak elektrikli spiral ile enine yönde kesilir. Örneğin dinamik deneyde 10 cm lik silindir numune kullanılacaksa tüp 11 cm uzunluğunda, eğer 12 cm lik silindir numune kullanılacaksa

tüp 13 cm uzunluğunda elektrikli spiral ile kesilerek bölünür. Elde edilen bu tüp parçalarının içerisinde zemin numunesinin örselenmeden çıkarılması için planya aletine yerleştirilen tüp her iki yönünden yarılr. Yarma sonucu yarı daire parçası haline gelen tüp kesitleri spatula yardımı ile dikkatlice zeminden ayrılır. Böylece silindirik zemin numunesi elde edilir. Bu numunenin çapı yaklaşık 7cm boyu ise 11 – 13cm civarındadır. Numunelerin tabii su içeriklerinin kaybetmemesi için üzerleri önce jelatin kağıdı ile sonra da streç naylonla kaplanıp bir naylon torbaya konup üzerine adı yazılır ve nem odasındaki desikatöre yerleştirilir. Bir tüpten yaklaşık 3 adet dinamik deney numunesi elde edilir. Kesilerek elde edilen zemin numunesi bittikten sonra diğer tüpe geçilir.

Numune hazırlanmasında Japon Geoteknik Komitesi JGS T 520-1990 standartlarına uyulmuştur. Dinamik deneylerde deney numuneleri (çap/boy) ya 50mm/100mm yada 60mm/120mm olarak kullanılmıştır. Deneyden önce desikatörden alınan numune fotoğrafı Şekil 3.5’de gösterilen traşlama aleti içerisine yerleştirilir. Traşlama aleti deneyde kullanılacak numune çapına göre ayarlanır. İstenilen çapa göre traşlanan numune yine aynı çapta boyu standart (10cm–12cm) metal kalıplar arasına yerleştirilerek standart boyu aşan kısımları ince çelik tel testere ile kesilir. Böylece çapı ve boyu mm hassasiyetinde silindirik numune kısa sürede hazırlanmış olur. Yukarıda yapılan işlemlerde son derece dikkatli davranılması ve numunenin örselenmemesi için gerekli önlemler alınmalıdır.

3.4 Deneylerin Yapılışı

Deney yapılışında Japon Geoteknik Standartı olan JGS T 542-1995 standardı uygulanmıştır. Yukarıda anlatıldığı şekilde hazırlanan numunenin çapı şerit mikrometre ile üstten ortadan ve alttan olmak üzere üç değişik yerden ölçülür ve deney föyüne kaydedilir. Daha sonra numunenin boyu boy kompası ile ölçülür. Numunenin tabii birim hacim ağırlığının bulunması için hassas terazide tartısı yapılır. Numune üzerine boyuna yönde filtre kağıtları ıslatılarak şerit şeklinde aralıklı olarak çepeçevre yerleştirilir. Böylece numune hücre içerisindeki alt başlığın üzerine yerleştirilmeye hazır hale gelmiş olur. Numuneyi alt başlığa yerleştirmeden önce burete su alınır, ters basınç uygulanarak drenaj kanalları alt ve üst başlığa bağlı poroz taşlar suya doygun hale getirilir. Buretteki su azalırsa damıtık su tankından yaklaşık

buretin yarsına kadar su doldurulur. Drenaj kanallarında hava kabarcığı olmamasına dikkat edilir. Alt başlık üzerine filtre kağıdı suya doymun hale getirilerek yerleştirilir. Başlık çapına eşit çapta olan numune getirilip alt başlığın üzerine dikkatlice yerleştirilir. Hangi çapta deney yapılacaksa alt ve üst başlıkların o çapa ait olanlarının önceden deney aletine yerleştirilmeleri gereklidir. Daha önce numune çapından 0.5 cm daha büyük iç çapa sahip içi boş silindirik ince cidarlı bir kalıbın içine vakumla yerleştirilmiş bulunan o numuneye ait membran (Çap 50 mm ise 50 lik membran çap 60 mm ise 60 lik membran kullanılır) dikkatlice üstten numuneye geçirilir.



Şekil 3.5 Numune hazırlama aletleri fotoğrafı.

İçi boş metal kalıp yardımı ile alt ve üst başlığa plastik O ringler geçirilir. Önce alt başlıktaki O ringler numuneden başlığa gelen membran üzerine getirilir. Sonra plastik şekilde kesilip hazırlanmış membran bantı ile başlık üzerindeki membran sıkıca çevrelenerek bağlanır. Bu işlem yapılırken arada boşluk kalmamasına, membranın düzgün ve gergin durmasına dikkat edilir. Membran alt başlığa bu şekilde tespit edildikten sonra üst başlığın bulunduğu üç düşey kolonlu parça alt düzlem üzerine getirilip üç kolon ayağı da ilgili yerlerinden vidalanarak alt düzleme bağlı hale getirilir. Piston vidası gevşetilerek üst başlığın numune üzerine değmesi sağlanır. Üst başlık ağırlığından ötürü numunenin şişmemesi için başlık numuneye

değer değmez daha önce gevşetilen başlığın düşey yönde hareket etmemesini sağlayan vida sıkılır. Üstteki kıvrılmış membran uçları üst başlığa geçirilir O ring de membran üzerine getirilir. Alt başlıkta yapıldığı gibi plastik membran şeridi ile üst başlık etrafına sarılarak membran içerisine hava ve hücreden su girmemesi sağlanır. Böylece numune üst ve alt başlık arasındaki hücredeki yerine yerleştirilmiş olur. Fleksiglas malzemeden yapılmış silindir kaldırılıp alt düzlem üzerindeki yerine oturtulur. Hücrenin altından su kaçmaması için silindirin O ring üzerine iyice oturması ve arada toz kum danesi kir vs olmamalıdır. Hücre üst kapağı alınıp yerine tespit edilir ve üç adet vida sıkılarak çevre silindirle montajı sağlanır. Hücre gurubu hava basıncı yardımı ile kaydırılarak yerine itilir, yükleme pistonu aksı ile düşey yükü pistonu aktaran elemanın aynı hizaya gelmesi sağlandıktan sonra iki yandaki kelepçeler sıkılarak sistemin stabil hale gelmesi sağlanır. Düşey deformasyonların ölçülebilmesi için yükleme pistonuna tespit edilmiş iki adet elemanın soldakine mikrometre bağlanır. Sağdaki elemana ise elektikli amplifikatörün 2 nolu kanalından gelen dial gage tespit edilir. Su tankına düşük basınç uygulanarak ve hücreye su temin eden musluk açılarak hücre damıtık su ile doldurulur. Hücre içerisindeki su seviyesi üst kotu üst başlık ortası civarındadır. Yukarıda yapılan işlemler sırasında tüm drenaj muslukları kapalı olmalıdır. Hücre su dolduktan sonra su tankındaki basınç sıfıra indirilir.

Elektikli amplifikatörden gelen 1, 2, 3, 4 nolu data hatları hücre üzerindeki ilgili soketlerine bağlanır. 1 nolu kanal düşey yükleme kanalıdır. Numunenin kıvamına göre uygulanacak yükleme aralığı seçilir (Ör. ATT 1 seçilirse 5 volt =200 kgf bağıntısı geçerlidir. Bu durumda numune orta katı veya katı kıvamda ise seçilen aralık uygundur). Bu aralık seçildikten sonra gain ve zero dengeleme tuşları ile kanalın kalibrasyonu yapılır ve otomatik dengeleme ile sıfırlanır. Sonra ikinci kanal olan düşey yer değiştirme kanalının çalışma aralığı seçilir ve benzer şekilde kalibrasyonu yapılır. Boşluk suyu basıncı ölçümleri için 3 nolu kanalın kalibrasyonu yapılır ve sıfırlanır. Küçük deformasyonların ölçüldüğü 4 ve 5 nolu kanalların kalibrasyonları yapılır ve sıfırlanırlar. Son kanal ise hacim değişimlerini ölçmektedir. Bu kanalın da benzer şekilde kalibrasyonları yapılır ve başlangıç olduğundan otomatik olarak gösterge değerleri sıfırlanır.

Çevre basıncı ve düşey basınç açılarak hücre içerisine 0.5 kg / cm^2 lik basınç uygulanır. Yükleme pistonunu tutan vida gevşetilerek numunenin düşey yönde hareket etmesi serbest bırakılır. Daha sonra drenajlar açılarak 3 kg/cm^2 lik ters basınç, burete yavaşça hava basıncı uygulanarak numuneye etkitilir. Bu durumda çevre basıncı ile ters basınç bias sistemi sayesinde aynı anda arttığından numune üzerinde 3.5 kg/cm^2 lik toplam basınç ve 0.5 kg/cm^2 lik de efektif basınç mevcuttur. Çevre basıncı vanası yardımı ile düşey basınç ve çevre basıncı yavaş yavaş artırılarak numuneye deneyde uygulanacak efektif gerilme değerine ulaşılır. Bu sistemde düşey basınç ile çevre basıncı da bias sistemi sayesinde aynı anda artırılabilir. Eğer numuneye 1 kg/cm^2 lik efektif gerilme uygulanacaksa daha önce 0.5 kg/cm^2 başlangıç gerilmesi 1 kg/cm^2 ye kadar artırılır. Böylece numune üzerinde 4 kg/cm^2 toplam basınç 3 kg/cm^2 de ters basınç mevcut olmuş olur. Numunelere uygulanacak efektif gerilmeler arazide etkisinde kaldığı efektif gerilmelerden büyük seçilir, bunun nedeni numune alınması sırasında gerilme boşalması nedeni ile oluşan örselenmenin etkisini gidermek içindir. Bu çalışmada da numunelere arazide etkisinde kaldığı jeolojik yük sondaj sonuçlarından ve konsolidasyon deneylerinden faydalanarak bulunmuştur. Efektif çevre gerilme değerine çıkıldıktan sonra buret su seviyesi kotu ve deformasyon saatleri değerleri deney föyüne kaydedilir. Numune bu koşullarda 1 gün süre ile konsolidasyona bırakılır. Bir günlük süre geçtikten sonra burette oluşan su seviyesi değişimi ve düşey deformasyon saatinde oluşan boy değişimi deney föyüne kaydedilir. Dinamik deney yapılacak numunelerde suya doygunluk çok önemli olduğundan numunenin doygunluğunun en az % 99 ve daha yukarı bir değerde olup olmadığı kontrol edilir. Skempton B kontrolü şu şekilde yapılır. Önce drenajlar kapatılır sonra çevre basıncı $\Delta\sigma$ kadar artırılır numune içerisinde oluşan boşluk suyu basıncı sabitleşinceye kadar beklenir. Artırılan efektif gerilme nedeni ile numune içerisinde oluşan boşluk suyu basıncı değeri Δu üçüncü kanaldan okunarak kaydedilir. $B = \Delta u / \Delta\sigma \geq 0.99$ ise numunenin doygun olduğu kabul edilir. Sistemdeki ters basınç vanası ile çevre basıncı ve düşey basınç bias olarak çalıştığından B kontrolü yapıldıktan sonra numune üzerindeki efektif gerilmenin değeri değişmez. Eğer numune doygun değilse doygunluğun sağlanması için konsolidasyon basıncı değiştirilmeden bir üst gerilme seviyesine çıkılır ve bir gün daha yeni gerilme seviyesinde beklenip tekrar B kontrolü yapılır. Bu kontrol sonunda numune doygun ise dinamik yükleme aşamasına geçilir.

Dinamik yüklemmeden önce amplifikatörün düşey dinamik yük düşey deformasyon boşluk suyu basıncı ve küçük deformasyon kanallarının kalibrasyonları yapılır. Burada sadece bir kanalın kalibrasyonunun nasıl yapıldığı kısaca anlatılacak, diğer kanallarda benzer şekilde yapılacaktır.

Amplifikatörün giriş enerjisi sağlanıp bütün kanallar üç eksenli alettaki ilgili soketlerine bağlandıktan sonra küçük tornavida ile Zero, C-Bal, Gain, Meas kontrol düğmeleri 5 defa döndürülerek orta pozisyonlarına (Optimal position) getirilir. ATT butonundan 5'e basılır, CAL. μ e butonuna basılır. CAL. ON butonu OFF durumuna getirilir, μ e($\times 10^{-6}$) sayısal panel düğmesi 400 rakamına ayarlanır. Böylece ilk hazırlık tamamlanmış olur ve ayarlara geçilir. Enerji düğmesine basılır ve yeşil lamba yanar. Gain ve ATT 5 düğmelerine basılır yeşil ışıklar yanarlar. CAL μ e düğmesine de basılır sarı lamba yanar. Bu durumda 15 dakika beklenir. Auto butonuna basılarak gösterge sıfırlanır. CAL. ON butonuna basılır kırmızı lamba yanar. Gain butonu tornavida yardımı ile döndürülerek dijital voltajın (DV) 5 olması sağlanır. (Eğer dijital voltaj tam 5 değilse 5 e yakın ise sorun önemli değildir).

ZERO-C-BAL. düğmesi ZERO pozisyonunda tutulu iken dijital gösterge + veya – bir değer gösterir, göstergenin sıfır olması için ZERO kontrol düğmesi sağa veya sola döndürülür. Bu döndürme işlemi yukarıdaki düğme basılı iken yapılır.

ZERO-C-BAL. Düğmesi C-BAL. pozisyonuna getirilir ve bu pozisyonda tutulur. Burada da dijital voltun sıfır olması C-BAL yardımı ile ayarlanır.

Yukarıda yapılan son iki paragraftaki işlemler 2-3 defa tekrarlanır. C-BAL. kontrolünün, hem C-BAL hem de ZERO pozisyonlarında dijital göstergenin sıfırı göstermesi sağlanır.

Hangi hassaslıkta çalışmak istenirse ATT butonunda ilgili değerlerden birine (1, 2, 5) basılır. İstenen hassaslıktaki kalibrasyonun yapılması için ATT değerini seçilen düğmenin tam altındaki CAL. ON μ e butonuna basılır.

Örneğin ATT olarak 1 seçilirse CAL. 10 butonuna basılır. Sonra auto butonuna basılarak DV göstergesinin sıfırlandığı görülür. CAL. ON basılır ve DV gain butonundan 5' e ayarlanır. Gain butonu sağa çevrilirse hassaslık artar sola çevrilirse

hassalık azalır. Yukarıdaki ayarlamalar bitince CAL. ON butonu "OFF" pozisyonuna getirilir ve kırmızı lamba yanar.

MEAS butonuna basılır yeşil lamba yanar. CAL. ON düğmesine basılarak MEAS butonu döndürülerek DV göstergesinin 10.00 olması sağlanır. İşlem sonunda CAL. ON butonu OFF pozisyonuna getirilir.

$\mu\epsilon$ kalibrasyonu için önce $\mu\epsilon$ butonuna basılır ve sarı lamba yanar. ATT 1 butonuna basılır ve yeşil lamba yanar. Dijital düğme çıkış değeri ($\times 10^{-6}$ strain) ile aynı değere getirilir. Auto tuşuna basılır ve DV göstergesi '0.00' ı gösterir. CAL ON butonuna basılır kırmızı lamba beyaza döner. DV işareti gain butonundan '5.00' volta ayarlanır. Tekrar CAL. ON butonuna basılarak OFF pozisyonuna getirilir ve kırmızı lamba söner.

MEAS butonuna basılır ve yeşil lamba yanar. ATT 1 e basılarak kırmızı lamba yanar ve CAL. $\mu\epsilon$ tuşuna basılarak sarı lamba yanar. CAL. ON tuşuna basılarak kırmızı lamba yanar. MEAS kontrol düğmesi döndürülerek DV göstergesi istenilen değerdeki hassaslığa ayarlanır. Tekrar CAL. ON butonuna basılarak OFF pozisyonuna getirilir ve kırmızı lamba söner. Eğer DV göstergesi '0,00' dan farklı bir değer gösterirse auto tuşuna basılarak sıfırlanır ve yukarıdaki işlem tekrarlanır.

Tüm kanalların kalibrasyonu bu şekilde yapılır. Yapılacak ölçüm koşullarına göre ATT butonu, MEAS butonu ve GAIN butonu CAL. $\mu\epsilon$ düğmesinden direk olarak istenilen ayara getirilir. Bütün kanalların auto tuşuna basarak DV gösterge değerlerinin '0,00' olması sağlanır. CAL. ON butonuna basılarak DV göstergesi GAIN den ayarlanır. CAL. ON butonu OFF durumuna getirilir. Böylece ölçüm yapmaya hazır hale gelinmiş olur. Her kanalda hangi yükleme, deformasyon ve gerilme aralıklarında çalışılacağına numune cinsine göre karar verilir. Örneğin düşey dinamik yükün seçileceği 1 nolu kanalda 40 kgf, 100 kgf ve 200 kgf olmak üzere üç aralık (range) mevcuttur. Eğer numune yumuşak kıvamda ise $5v = 40$ kgf olacak şekilde ATT 5 değerine basılır. Yüklemin frekansı değeri 0.001-2 Hz arasında değişen dijital düğmeden ayarlanır. Örneğin dijital düğme 100 e ayarlanıp range de 1 e ayarlanırsa uygulanacak frekans 1 Hz olarak seçilmiş olur. Deneyde uygulanacak genlik dynamic pressure gage düğmesinden ayarlanır. Yükleme yapmadan önce başlangıç hava basıncının bu ünitedeki değeri 5 kg/cm^2 ye ayarlanır. Eğer önceden

belirlenen bir çevrim sayısına kadar yükleme yapılacaksa bu sayı PRE-SET COUNTER düğmesinden ayarlanır. Deney sırasında seçilen çevrim sayısına ulaşıncaya otomatik olarak yükleme biter. Yukarıdaki hazırlıklar tamamlandıktan sonra STATİK Dial düğmesi saat ibresi yönünde yavaşça döndürülerek düşey yükleme pistonunun numunenin üzerine değmesi sağlanır. Sonra düşey basınç düğmesi yavaşça ekzos pozisyonuna getirilerek düşey yükün pistonu aktarımı sağlanır. Bu işlem çok dikkatlice yapılmalı ve numunede bu sırada herhangi bir boy değişimi meydana gelmemelidir. Yük aktarımından sonra birinci kanaldaki DV değeri “0.00”dan biraz değişmişse statik düğmenin çok az sağa veya sola döndürülmesi ile bu değer “0.00” a getirilir. Diğer kanallardaki DV gösterge değerleri de auto tuşlarından sıfırlanır. Dinamik gerilme genliği gage den seçilir ve drenajlar kapatılır. Dataların toplanacağı Virtuel bench LOGGER programının dosya açılarak kayıt almaya hazır hale gelmesi bu işlemlerden önce sağlanmalıdır. İstenirse datalar WR 7700 marka grafik yazıcıda da toplanabilir. Bunun için önce bu yazıcının kanallarının ayarları ve çalışma aralıkları seçilmelidir. Deney sisteminden gelen data kanalları hem bu yazıcıya hem de bilgisayara bağlıdır. Önce bilgisayardaki data dosyasının startına veya yazıcının startına basılır hemen sonra deney aletindeki starta basarak yükleme başlar. Yükleme bitince stop düğmesine basılır. Bilgisayar kaydı ve yazıcı kaydı da durdurulur. Sırası ile önce dinamik yük sıfırlanır. Sonra düşey çevre basıncı uygulanarak statik düşey yük de kaldırılır. Eğer numunede deneyden sonra başka bir deney veya dinamik deney sonrası hacim değişimi için 24 saat drenajlar açık beklenmeyecekse hücredeki su basınç yardımı ile boşaltıldıktan sonra tüm basınçlar sıfıra indirilerek numune hücreden alınır. Numunede hiç kayıp olmayacak şekilde membran numuneden alınır ve su muhtevası için hemen tartı yapılarak 24 saat süre ile 105 derecelik etüve konur. Daha sonra gerekli endeks özellik deneyleri yapılmak için saklanır. Bazı numunelerde dinamik deneyden sonra 24 saat drenajlar açık beklenerek buretten bu sırada oluşan hacim değişimi değerleri okunmuştur. Bir kısım numunede ise 20 çevrimlik dinamik deney uygulandıktan hemen sonra bu sistemin statik yükleme biriminden aşağıda anlatıldığı şekilde statik deney yapılmıştır. Numune yukarıda anlatıldığı şekilde hazırlanıp hücreye yerleştirilip konsolide edildikten sonra statik deformasyon kontrollu deney yapılacaksa aşağıdaki şekilde hareket edilir. Önce statik yükleme birimi açılır ve “loading” pozisyonuna getirilir. Deney sistemi önündeki statik yükleme manuel kolu elle çevrilerek istenilen aralığa gelinir. İstenilen aralık veya en çok data alınabilecek aralık statik yükleme

birimi yanındaki gösterge renkleri ile belirtilmiştir. Manuel kol çevrilerek yeşil ışık yanınca istenilen aralığa gelinmiş olur. Yükleme ünitesindeki dijital göstergeden yükleme hızı seçilir. Kayıt alınacak kanallar bağlanır ve yukarıdaki gibi kalibrasyonları yapılır. Dataların toplanacağı bilgisayar programı başlangıç durumuna ayarlanır. Drenajlar kapatılır ve amplifikatörün başlangıç değerleri auto tuşuna basarak sıfırlanır. Önce bilgisayarın start tuşuna basılır sonra statik yükleme ünitesinin start tuşuna basılır. Numune göçene kadar veya % 20 deformasyon olana dek data alınmasına devam edilir. Deney bitince stop tuşuna basılır ‘‘loading’’ pozisyonu ‘‘unloading’’ durumuna getirilir. Basınçlar düşürülerek hücreden su boşaltılır. Numune hücreden alınıp hiç kayıp olmayacak şekilde tartılır ve endeks özellik deneyleri yapılır.

3.5 Verilerin Toplanması

Dinamik üç eksenli deney sisteminden tekrarlı düşey sinüzoidal yük, düşey yer değiştirmeler, boşluk suyu basınçları ve küçük yer değiştirmeler sayısal volt olarak kişisel bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deneye başlamadan önce amplifikatörün data alınan kanallarının ATT butonları yardımı ile çalışma aralıkları seçilir. Örneğin 1. kanalda ATT 5’e 2.kanalda ATT 1’e 3. kanalda ATT 2 ye ve 4.kanalda ATT 5’ e basılırsa sırası ile 1. kanal değeri 5 volt = 40 kgf, 2. kanal değeri 5 volt =20 mm, 3.kanal değeri 5 volt = 5 kg/cm² ve 4. kanal değeri 0.5 volt = 0.2 mm olur. Bu kanallardaki değerler data hatları yardımı ile Virtuel Bench programına aktarılır. Hardware den gelen bu 4 kanal kişisel bilgisayarın software ine bağlanmıştır. Bu softwair 12 kanallıdır. Yukarıda adı anılan Virtuel Bench programının deneye başlamadan önce veri toplamaya hazır hale getirilmesi gerekir. Programın Loger dosyasına girilerek kanallar seçilir. Bu kanalların yukarıdaki örnekteki ölçeğe göre volt ayarları yapılır. Dosya bölümünden log uzantılı deney adını belirten dosya seçilir. Scan konfigürasyonu bölümünden saniyede kaç veri alınacağı seçilir. Eğer deneyin hızı küçükse saniyedeki veri alma aralığını büyük seçmek gerekir. Aksi takdirde hafıza çabuk dolar ve deney sırasında veri almaya devam edinebilmesi olanaksız olur. Filtre ayarı ve deneye başlayınca data almaya başlanacağı ayarı yapılır. Bu ayarlardan sonra ekranda grafik olarak veri alma şekli gelir. Deneyin startına basmadan önce logon’a basılır. Önce bilgisayarın start tuşuna sonra dinamik

deney aletinin start tuşuna basılarak deney başlatılır. Virtuel- Bench programında açtığımız dosyada kaydedilen bu datalar ofis ortamı excel programında açılarak log dosyası xls dosyası olarak kaydedilir. Burada dört kolon halindeki veriler seçtiğimiz ölçekteki katsayılarla çarpılarak fiziksel büyüklükler haline getirilir. Örneğin 2. kanalda 5 volt = 20 mm seçilmişti bu kanaldaki volt değerleri $20/5 = 4$ ile çarpılarak mm olarak düşey yer değiştirmeler elde edilir. Benzer şekilde hareket ederek bütün fiziksel büyüklükler ve birbirleri ile ilişkileri excel ortamında kolayca elde edilir ve grafikleri çizilir.

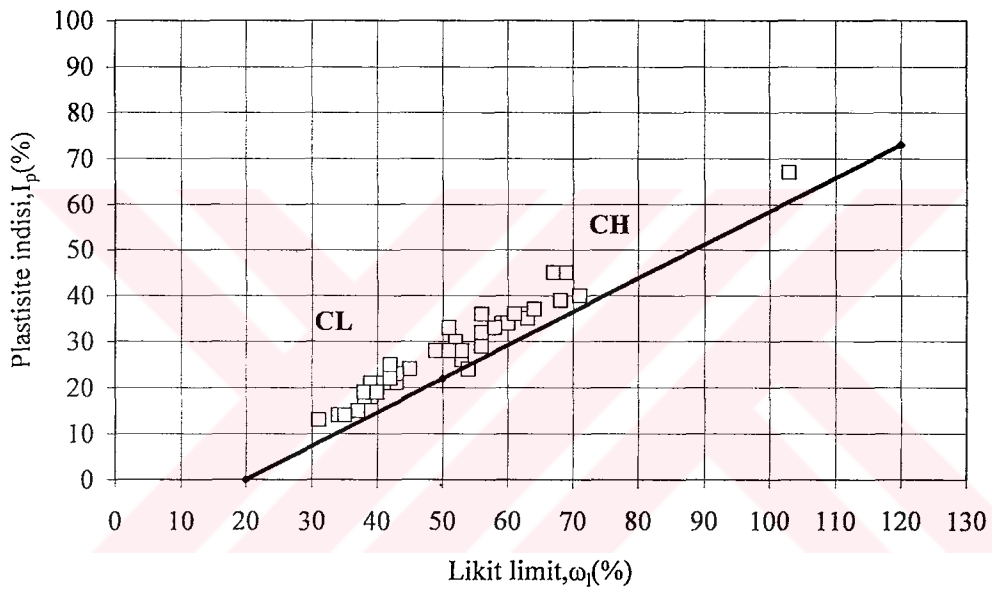
3.6 Numunelerin Özellikleri

Dinamik deney yapılacak numunelerin hem mühendislik özelliklerinin hem de indeks özelliklerinin belirlenmesi amacı ile öteden beri kullanılan yöntemler uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir. Önce fiziksel özellikler saptanmış daha sonra konsolidasyon özellikleri ve deney numunesi sondaj kuyularında yapılan Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) deneyi sonuçları aşağıda verilmiştir.

3.6.1 Numunelerin Fiziksel Özellikleri

Her dinamik deneyden sonra numuneler hemen tartılmış ve daha sonra 105 derecede etüvde 24 saat süre ile kurutularak su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları saptanmıştır. Deney numunesinin kaba dane oranını bulmak için 200 nolu elekten yıkılarak eleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra her tüp için likit limit ve plastik limit deneyleri yapılarak Atterberg kıvam indisleri bulunmuştur. Deneylerde kullanılan numuneler Birleştirilmiş zemin sınıflandırmasına göre kil sınıfına girmektedir. Tüm numuneleri gösteren plastisite kartı Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Yapılan dinamik deney numunelerinin fiziksel özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Tablolarda da görüldüğü gibi numunelerin araziden alındıkları derinlikler 2.50 m den başlayıp 18 m kadar değişmektedir. Doğal su muhtevaları $\omega_n = \%21 - \%61$ arasında likit limitleri $\omega_l = \%31 - \%71$ plastik limitleri $\omega_p = \%31 - \%18$, plastisite indisleri $I_p = 15 - 44$ arasında kıvam indisleri ise $I_c = 0.15 - 1.04$ arasında değişmektedir. Üç eksenli deneyde konsolidasyon sırasındaki doymuş birim hacim ağırlıkları $1.60 - 2.04 \text{ gr/cm}^3$ kuru birim hacim ağırlıklar ise $0.98 - 1.70 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişmektedir. Dinar'dan alınan numunelerde kaba dane oranı $\%0 - \%29$ arasında değişmektedir. Dinar numunelerinde

yapılan hidrometre deneylerinde kil oranının %16-%39 arasında silt oranının ise %38-%70 arasında bulunduğu tespit edilmiştir. Silivri’den alınan numunelerin kaba dane oranları %43-%47 arasındadır. Adapazarı’ndan alınan 6 numuneden iki tanesi silt, bir tanesi ise %103 likit limite sahip $I_p=67$ olan yüksek plastisiteli kildir. Silivri ve Adapazarı’ndan alınan numuneler üzerinde yapılan 12 deney Dinar numuneleri ile karşılaştırma amacı ile yapılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan 38 sabit genlikli dinamik, 37 adet $N=20$ çevrim dinamik ardından statik, 14 adet her 5 çevrimde bir yük artırımlı azalım ve 13 adet statik olmak üzere toplam 102 deney yapılmış 15 tanesi doygunluk ve örselenmeden dolayı tezde kullanılmamıştır.



Şekil 3.6 Deneylerde kullanılan numunelerin plastisite kartında görünüşü.

Tablo 3.1 Dinamik deney yapılan numunelerin fiziksel özellikleri

S.No	D.N	z (m)	γ_n (gr/cm ³)	γ_k (gr/cm ³)	ω_n (%)	ω_l (%)	ω_p (%)	I_p (%)	I_c (-)	İDO (%)
SK11-UD2	D01	5.50-6.00	1.99	1.52	32	54	30	24	0.92	35
SK11-UD2	D03	5.50-6.00	1.83	1.40	31	54	30	24	0.96	48
SK11-UD4	D04	8.50-9.00	2.00	1.67	20	43	20	23	1.00	46
SK11-UD4	D05	8.50-9.00	1.89	1.45	30	43	20	23	0.56	77

Tablo 3.1'in devamı: Dinamik deney yapılan numunelerin fiziksel özellikleri.

S.No	D.N	z (m)	γ_n (gr/cm ³)	γ_k (gr/cm ³)	ω_n (%)	ω_1 (%)	ω_p (%)	I_p (%)	I_c (-)	İDO (%)
SK11-UD4	D06	8.50-9.00	1.87	1.42	33	43	20	23	0.43	81
SK14-UD3	D07	5.50-6.00	1.60	0.98	61	56	27	29	0.30	93
SK14-UD3	D08	5.50-6.00	1.78	1.29	38	56	27	29	0.62	90
SK14-UD3	D09	5.50-6.00	1.67	1.13	48	56	27	29	0.28	90
SK14-UD5	D10	8.50-9.00	1.65	1.08	53	68	29	39	0.38	91
SK14-UD5	D11	8.50-9.00	1.70	1.18	43	68	29	39	0.64	90
SK8-UD1	D12	5.50-6.00	1.72	1.20	43	71	31	40	0.70	95
SK8-UD1	D13	5.50-6.00	1.82	1.35	35	71	31	40	0.90	97
SK9-UD2	D14	8.50-9.00	1.98	1.61	23	38	20	18	0.83	85
SK9-UD2	D15	8.50-9.00	2.04	1.70	23	37	22	15	0.93	81
SK8-UD1	D16	5.50-6.00	1.80	1.36	32	71	31	40	0.98	95
SK10-UD2	D24	11.50-12.50	1.98	1.62	22	49	21	28	0.96	71
SK10-UD2	D25	11.50-12.50	1.90	1.48	28	49	21	28	0.78	82
SK10-UD2	D26	11.50-12.50	1.91	1.48	29	49	21	28	0.75	70
SK14-UD6	D30	10.00-10.50	1.76	1.27	39	52	27	26	0.54	87
SK14-UD6	D31	10.00-10.50	1.81	1.31	38	53	27	26	0.58	86
SK14-UD6	D32	10.00-10.50	1.91	1.45	31	53	27	26	0.85	84
SK15-UD6	DSİL01	4.00-5.00	1.87	1.45	26	59	25	34	0.97	52
SK15-UD6	DSİL02	4.00-5.00	1.92	1.50	26	59	25	34	0.97	53
SK15-UD6	DSİL03	4.00-5.00	1.88	1.37	29	59	25	34	0.88	57
SK27-UD1	DSİL04	4.50-5.00	1.99	1.60	24	61	25	36	1.03	78
SK27-UD1	DSİL05	4.50-5.00	1.99	1.60	24	61	25	36	1.03	78
SK-04	DAP01	10.50-11.00	1.85	1.46	29			0		89

Yukarıdaki tabloda deney numarasının ilk harfi D ile gösterilen deneyler sadece dinamik yükleme yapılan numunelere aittir. Diğer bir numune gurubuna önce 20 çevrimlik dinamik deney uygulanmış ardından hemen sonra ise numune göçünceye kadar statik deformasyon kontrollü deney yapılmıştır. Bu numunelerin indeks

özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Bu deneylerin adlarının ilk iki harfi DS ile gösterilmiştir. D ile dinamik yükleme, S ile ise statik yükleme sembolize edilmektedir. Deney numunesinin ilk adı DG ile sembolize edilen numune fiziksel özellikleri Gerilme-Birim şekil değiştirme ve en büyük elastisite modülü deneyi yapılan numunelere aittir. S ile ilk adı başlayan deneyler ise sadece statik yükleme yapılan deneylere aittir. Bu deneylerin endeks özellikleri Tablo 3.3’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 N=20 çevrim dinamik ardından statik deney yapılan numunelerinin fiziksel özellikleri.

S.No	D.N	z(m)	γ_n (gr/cm ³)	γ_k (gr/cm ³)	ω_n (%)	ω_1 (%)	ω_p (%)	I_p (%)	I_c (-)	İDO (%)
SK14-UD7	DS37	11.50-12.00	1.94	1.58	22	67	23	44	1.01	90
SK14-UD7	DS38	11.50-12.00	1.85	1.41	31	67	23	44	0.80	90
SK14-UD7	DS39	11.50-12.00	1.90	1.49	27	67	23	44	0.89	90
SK6-UD2	DS40	11.50-12.00	2.00	1.62	24	43	21	22	0.84	81
SK6-UD2	DS41	11.50-12.00	2.02	1.63	24	43	21	22	0.84	72
SK6-UD2	DS42	11.50-12.00	2.01	1.66	21	43	21	22	0.97	79
SK3-UD2	DS43	11.50-12.00	1.99	1.63	23	45	22	24	0.92	76
SK3-UD2	DS44	11.50-12.00	1.94	1.56	25	45	21	24	0.83	79
SK3-UD2	DS45	11.50-12.00	1.98	1.62	22	45	21	24	0.96	79
SK2-UD2	DS46	8.50-9.00	1.82	1.34	35	56	24	32	0.65	91
SK2-UD2	DS47	8.50-9.00	2.00	1.63	22	39	18	21	0.80	86
SK2-UD2	DS48	8.50-9.00	1.98	1.62	22	39	18	21	0.8	87
SK5-UD2	DS49	8.50-9.00	1.79	1.33	35	61	25	36	0.72	89
SK5-UD2	DS51	8.50-9.00	1.87	1.41	33	61	25	36	0.78	87
SK4-UD1	DS52	7.00-7.50	1.91	1.48	29	31	18	13	0.53	74
SK4-UD1	DS53	7.00-7.50	1.78	1.34	33	31	18	13	0.15	90
SK4-UD1	DS54	7.00-7.50	1.80	1.32	35	31	18	13	0.25	87
SK3-UD1	DS55	5.50-6.00	1.81	1.20	38	52	22	30	0.47	94
SK3-UD1	DS56	5.50-6.00	1.73	1.31	45	52	22	30	0.23	97
SK3-UD1	DS57	5.50-6.00	1.72	1.18	45	52	22	30	0.23	94

Tablo 3.2'nin devamı: N=20 çevrim dinamik ardından statik deney yapılan numunelerinin fiziksel özellikleri.

S.No	D.N	z(m)	γ_n (gr/cm ³)	γ_k (gr/cm ³)	ω_n (%)	ω_l (%)	ω_p (%)	I_p (%)	I_c (-)	İDO (%)
SK12-UD7	DSY01	13.00-13.50	2.01	1.66	21	39	21	18	1.00	85
SK12-UD7	DSY02	13.00-13.50	2.00	1.63	23	39	21	18	0.89	83
SK5-UD1	DSY03	2.50-3.000	1.76	1.33	33	62	26	36	0.81	83
SK5-UD1	DSY04	2.50-3.000	1.78	1.31	36	62	26	36	0.72	90
SK5-UD1	DSY05	2.50-3.000	1.81	1.34	35	62	26	36	0.75	86
SK5-UD1	DSY06	2.50-3.000	1.91	1.48	29	63	28	35	0.89	100
SK10-UD1	DSY07	2.50-3.000	1.94	1.49	28	41	20	21	0.62	96
SK10-UD1	DSY08	2.50-3.000	1.91	1.48	27	41	20	21	0.67	97
SK10-UD1	DSY09	2.50-3.000	1.93	1.49	28	41	20	21	0.62	94
SK10-UD3	DSY10	17.50-18.00	1.88	1.51	27	53	25	28	0.93	77
SK10-UD3	DSY11	17.50-18.00	1.85	1.49	28	53	25	28	0.89	82
S3-U1	DSAD1	3.00-3.45	1.70	1.13	48	103	36	67	0.82	89
S2-U1	DSAD2	3.00-3.45	1.98	1.61	25	60	26	34	1.03	87

Tablo 3.3 Dinamik elastisite modülü deneyi yapılan numunelerin fiziksel özellikleri.

S.No	D.N	z (m)	γ_n (gr/cm ³)	γ_k (gr/cm ³)	ω_n (%)	ω_l (%)	ω_p (%)	I_p (%)	I_c (-)	İDO (%)
SK13-UD5	DG58	11.50-12.00	2.03	1.63	21	38	19	19	0.89	92
SK13-UD5	DG59	11.50-12.00	2.03	1.65	22	38	19	19	0.84	89
SK12-UD2	DG60	5.50-6.00	1.97	1.52	25	41	19	22	0.73	83
SK13-UD4	DG61	8.50-9.00	2.04	1.68	22	40	21	19	0.95	79
SK4-UD2	DG62	13.00-13.40	1.93	1.50	26	56	20	36	0.83	85
SK14-UD9	DG63	18.00-18.50	2.01	1.64	22	42	17	25	0.84	83
SK10-UD3	DG64	17.50-18.00	1.99	1.57	24	51	19	32	0.84	68
SK12-UD7	DG65	13.00-13.50	2.08	1.67	21	34	20	14	0.93	84
SK16-UD4	DG66	14.50-15.00	1.92	1.49	29	51	23	28	0.79	95
SK12-UD1	DG67	4.00-4.50	2.10	1.71	20	35	21	14	1.07	76

Tablo 3.3'ün devamı: Dinamik elastisite modülü deneyi yapılan numunelerin fiziksel özellikleri

S.No	D.N	z (m)	γ_n (gr/cm ³)	γ_k (gr/cm ³)	ω_n (%)	ω_l (%)	ω_p (%)	I_p (%)	I_c (-)	İDO (%)
SK13-UD6	DG68	14.50-15.00	1.80	1.25	36	58	25	33	0.67	88
SK13-UD6	DG69	14.50-15.00	1.90	1.42	29	58	25	33	0.88	96
SK5-UD2	DG50	8.50-9.00	1.84	1.36	35	61	25	36	0.72	93

Tablo 3.4 Statik deney yapılan numunelerin fiziksel özellikleri.

S.No	D.N	z (m)	γ_n (gr/cm ³)	γ_k (gr/cm ³)	ω_n (%)	ω_l (%)	ω_p (%)	I_p (%)	I_c (-)	İDO (%)
SK13-UD5	S70	11.50-12.00	1.97	1.59	24	38	19	19	0.74	90
SK14-UD9	S71	18.00-18.500	2.02	1.63	23	42	17	25	0.76	83
SK12-UD2	S72	5.50-6.00	2.02	1.67	21	41	19	22	0.91	59
SK16-UD4	S73	14.50-15.00	1.94	1.54	25	51	23	28	0.93	82
SK13-UD6	S74	14.50-15.00	1.83	1.29	35	58	25	33	0.70	99
SK14-UD2	S75	4.00-4.50	1.64	1.10	55	64	27	37	0.24	100
SK14-UD2	S76	4.00-4.50	1.67	1.18	40	64	27	37	0.65	96
SK5-UD1	S77	2.50-3.00	1.91	1.54	23	47	24	23	1.04	98
SK6-UD3	S78	14.50-15.00	1.87	1.51	27	42	20	22	0.68	89
SK16-UD3	S79	14.50-15.00	1.91	1.49	26	42	20	22	0.72	81
SK6-UD3	S80	14.50-15.00	1.85	1.41	28	42	20	22	0.64	89
S3-U1	SAD81	3.00-3.45	1.63	1.05	54	103	36	67	0.73	96
S3-U1	SAD82	3.00-3.45	1.92	1.56	25	60	26	34	1.03	87

Yukarıdaki tablolardan da görüldüğü gibi numunelerin kıvamları geniş bir aralıkta $I_c=0.15$ ile 1.04 arasında numunelerin plastisite indisleri $I_p=15-44$ arasında likit limitleri $\omega_l = \%31-\%71$ arasında değişmektedir. Numuneler suya doygun olup doygunluk değerleri 0.99-1.00 civarındadır. Numunelerin doğal birim hacim ağırlıkları $\gamma_n=1.60-2.05\text{g/cm}^3$ arasındadır. Birleştirilmiş zemin sınıflandırmasına göre numuneler CL veya CH sınıfına girmektedir. Numune alınan her derinlikte SPT deneyleri yapılmıştır.

3.6.2. SPT Deneyleri

Sondaj kuyularının açılması sırasında geçilen zemin tabakalarının fiziksel ve indeks özelliklerini belirlemek maksadı ile her 1.5 m derinlikte Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) yapılmıştır. Bilindiği gibi SPT deneylerinde dış çapı 5.08 cm(=2 inç). iç çapı 3.50 cm (=1 3/8 inç) olan standart tip boyuna yarık numune alıcının 63.5 kg (=140 lb) ağırlığındaki şahmerdanın 76 cm (=30 inç) yükseklikten serbest düşmesi ile zemine 15 cm lik kademeler halinde toplam 45 cm çakılması için gereken darbe adedi tespit edilir. İlk 15 cm lik çakılma için gereken darbe sayısı oturma kademesi olarak dikkate alınır. Son iki 15 cm lik çakılma için gereken darbe sayısı toplamı zeminin Standart Penetrasyon Direnci N olarak kaydedilir. Bu deney ASTM D 1586 standardı olarak adlandırılmış olup 1958 yılından beri kullanılmaktadır. Bu tarihten günümüze kadar bu deney ile elde edilen verilerin kullanımında pek çok revizyon yapılmıştır. SPT deneyinden elde edilen N sayıları ile kohezyonsuz zeminlerin göreceli sıklığı ve kohezyonlu zeminlerin kıvamı arasında korelasyon olduğu deneysel olarak belirlenmiştir. Bu N değerlerinin kullanılmadan önce düzeltilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada N değerlerinin düzeltilmesi aşağıdaki bağıntılara göre yapılmış ve dinamik deney yapılan örselenmemiş numune derinlikleri yanındaki değerler dikkate alınmıştır. Düzeltme katsayıları ve bağıntılar Foundation Analysis And Design (Bowles, 1988) baskılı eserden alınmıştır.

$$N'_{60} = C_N * \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4 \quad (3.1)$$

Burada;

N'_{60} = Düzeltilmiş SPT-N değeri,

C_N = Efektif jeolojik basınca göre düzeltme katsayısı,

$$C_N = \left(1 / p_o'\right)^{1/2} \quad (3.2)$$

p_o' = Efektif jeolojik basınç,

η_1 = Enerji düzeltilmesi (Kullanılan alete göre değeri tablodan alınır),

η_2 = Derinlik düzelmesi (Çubuk boyuna göre değeri tablodan alınır),

η_3 = Numune alıcı düzeltmesi (Zemin cinsine göre değeri tablodan alınır),

η_4 = Sondaj kuyusu çapı düzeltmesi (Delik çapına göre tablodan alınır), dir.

Bu bağıntılara göre yapılan düzeltmeler aşağıdaki Tablo 3.4 de gösterilmiştir.

Tablo 3.5 SPT değerlerinin düzeltilmesi.

D.NO	p_0 '(kg/cm ²)	η_1	η_2	η_3	η_4	N	$\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot N$	N ₆₀
D03	0.627	1	0.85	0.8	1	2	1.36	1.717533
D05	0.929	1	0.95	0.8	1	5	3.80	3.942537
D06	0.911	1	0.95	0.8	1	5	3.80	3.981295
D07	0.545	1	0.85	0.8	1	4	2.72	3.684433
D08	0.648	1	0.85	0.8	1	4	2.72	3.378947
D09	0.585	1	0.85	0.8	1	4	2.72	3.556239
D10	0.769	1	0.95	0.8	1	5	3.80	4.333317
D11	0.813	1	0.95	0.8	1	5	3.80	4.214425
D12	0.829	1	0.85	0.8	1	11	7.48	8.215317
D13	0.886	1	0.85	0.8	1	11	7.48	7.946662
D14	1.058	1	0.95	0.8	1	9	6.84	6.649872
D15	1.11	1	0.95	0.8	1	9	6.84	6.492241
D16	0.875	1	0.85	0.8	1	11	7.48	7.996456
D25	1.232	1	1	0.8	1	6	4.80	4.3245
D29	1.464	1	1	0.8	1	9	7.20	5.950616
DS41	1.14	1	1	0.8	1	9	7.20	6.743418
DS42	1.176	1	1	0.8	1	9	7.20	6.6394
DS48	0.643	1	0.95	0.8	1	11	8.36	10.42559
DS56	0.549	1	0.85	0.8	1	6	4.08	5.506479
DS57	0.548	1	0.85	0.8	1	6	4.08	5.511501

Yapılan SPT deney sonuçları da genelde kil zeminlerin (CH ve CL sınıfı) orta katı kıvamda bulunduklarını göstermiştir.

3.6.3 Numunelerin Konsolidasyon Özellikleri

Dinamik deney hücresinde numuneler önce arazide etkisi altında kaldıkları efektif gerilmeye göre konsolide edilirler. Bilindiği gibi killer. normal konsolide ve aşırı konsolide olmak üzere iki guruba ayrılırlar. Ödometre deneyleri ile killerin ön konsolidasyon basınçları, konsolidasyon katsayıları, sıkışma indisleri, hacimsel sıkışma katsayıları ve oturma zaman ilişkileri hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada

dinamik deney yapılan birçok kuyuda ödometre deneyi de yapılmış ve deney sonuçlarından Casagrande yöntemine göre bulunan ön konsolidasyon basınçları ile jeolojik yükler aşağıdaki Tablo.3.6’da verilmiştir. Dinar’ın jeolojik durumu ve deney sonuçları dikkate alındığında bütün numunelerin normal konsolide olduğu görülmektedir.

Tablo 3.6 Numunelerin konsolidasyon özellikleri

S.No	Derinlik	$\omega_0(\%)$	$\gamma_n(t/m^3)$	$p'_o(t/m^2)$	$p'_c(t/m^2)$
SK12-UD2	5.50-6.00	33	2.11	0.893	0.65
SK13-UD5	11.50-12.00	23	2.20	1.575	0.88
SK3-UD1	5.50-6.00	45	1.99	0.549	0.38
SK4-UD1	7.00-7.50	35	1.96	0.96	0.55
SK5-UD2	8.50-9.00	36	1.93	0.893	0.65
SK6-UD2	11.50-12.00	23	1.92	1.176	1.1
SK2-UD2	8.50-9.00	23	2.14	0.643	1.1
SK3-UD2	11.50-12.00	24	1.93	1.31	3.5
SK14-UD6	10.50-11.00	32	1.88	1.071	1.1
SK11-UD4	8.50-9.00	28	2.01	0.911	1.2
SK14-UD3	5.50-6.00	50	1.93	0.585	0.75

3.7 Deney Sonuçları

Bu çalışmada yukarıda ayrıntılı olarak anlatılan deney sisteminde dört değişik yükleme tipi uygulanarak 87 adet deney yapılmıştır. Birinci grup deneylerde numunelere deprem vb. gibi tekrarlı yük altındaki davranışını incelemek amacı ile düşey sinüzoidal yük yukarıda anlatıldığı şekilde uygulanmıştır. Bu çalışmada bu grup deneyler dinamik deneyler olarak adlandırılmıştır. İkinci grup deneyler ise önce numune üzerine $N=20$ çevrimlik düşey sinüzoidal yük uygulanmış hemen ardından ise deformasyon kontrollü statik gerilme numunede %20 birim boy değişimi oluncaya kadar uygulanmıştır. Bu deneyler ise dinamik sonrası statik yüklemeli deneyler olarak adlandırılmıştır. Üçüncü grup deneyler ise numunelerin $G_{maks.}$ ölçümü ve gerilme şekil değiştirme özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılan dinamik deneylerdir. Dördüncü grup deneyler ise statik deformasyon kontrollü

deneylerden oluşmaktadır. Deney sonuçlarının hesaplanması ile ilgili şekil ve tablolar aşağıdaki bölümlerde her deney grubu için ayrı ayrı anlatılmıştır.

3.7.1 Dinamik Deneyler

Dinamik mukavemet özelliklerinin tespit edilmesi amacı ile numunelere değişik gerilme oranlarında düşey sinüzoidal yükler uygulanmıştır. Yükün uygulanışı ve ölçülen büyüklükler yukarıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Deney sonucunda amplifikatörden kişisel bilgisayar ofis ortamına bir data programı ile aktarılan dijital değerler kalibrasyon katsayıları ile çarpılarak düşey tekrarlı gerilme, düşey yer değiştirme ve boşluk suyu basınçları elde edilmiştir. Deneylerde uygulanan düşey sinüzoidal yük (T) numune kesit alanının (A_0) a bölünerek düşey gerilme σ_d elde edilmiştir.

$$\sigma_d = \frac{T}{A_o} \quad (3.3)$$

Gerilme seviyesi veya Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı (DKGO) ise en büyük kayma gerilmesinin yani $\tau = \sigma_d/2$ nin çevre basıncı σ_c 'ye göre normalize edilmesi veya oranlanması ile elde edilir. Bu değer de aşağıdaki formülde gösterilmiştir.

$$DKGO = \frac{\sigma_d}{2\sigma_c} \quad (3.4)$$

Deneylerde ölçülen düşey boy değişimleri numunenin konsolidasyon sonrası boyuna bölünerek düşey birim boy değişimleri elde edilir. Dinamik deneylerde bir basınçta bir çekmede elde edildiğinden negatif ve pozitif değere sahiptir. Bu iki değer toplamından oluşan düşey birim boy değişimi çift yönlü düşey birim boy değişimi (ϵ_{da}) ile gösterilir. Bu değer hesabı (3.5) nolu bağıntı ile verilmiştir. Eğer sadece çekme veya sadece basınçtaki birim boy değişimi dikkate alınacaksa, (ϵ_{sa}) olarak formüldeki indis değişir ve tek yönlü birim boy değişimi dikkate alınır. Dinamik kayma gerilmesi oranı-Çevrim sayısı (DKGO-N) grafikleri belirli birim boy değişimi

seviyesine göre oluşturulmaktadır. Literatürde en çok $\varepsilon_{da} = \% 5.0 (\pm 2.50)$ ve $\varepsilon_{da} = \% 10 (\pm 5.0)$ değerleri için bu değişimler oluşturulmaktadır.

$$\varepsilon_{da} = \pm \frac{\Delta h}{h} \quad (3.5)$$

Çevrim sayısındaki N değeri ise sinüzoidal yükün bir basınç bir çekme olarak zemin numunesine uygulandığı bir çevrimdeki değer sayısıdır. Süre frekansa göre değişmektedir, örneğin bizim deneylerimizde $f=0.5$ Hz olduğundan 2 saniye süre bir çevrime karşılık gelmektedir.

Deneilerde ölçülen boşluk suyu basınçları efektif çevre gerilmesine göre normalize edilerek hesaplanır. Ölçülen boşluk suyu basıncı Δu ile efektif çevre basıncı da σ_c ile gösterilirse, boşluk suyu basıncı oranı (BSBO) ise (3.6) bağıntısı yardımı ile hesaplanır.

$$BSBO = \frac{\Delta u}{\sigma_c} \quad (3.6)$$

Yapılan dinamik üç eksenli basınç deneylerinde yukarıdaki bağıntılara göre deney sonuçlarından hesaplanan değerler Tablo 3.7’de gösterilmiştir. Deney grafiklerinin tümü burada verilmeyip farklı dinamik kayma gerilmesi oranı ve farklı çevrim sayısı uygulanan iki numunenin deney sonuçları Şekil, 3.7, 3.8 ve 3.9’da verilmiştir. Diğer tüm deneylerin grafikleri bu şekilde oluşturulup bu grafiklerden alınan değerler tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 3.7 Dinamik deneylerde uygulanan gerilmeler ve sonuçlar

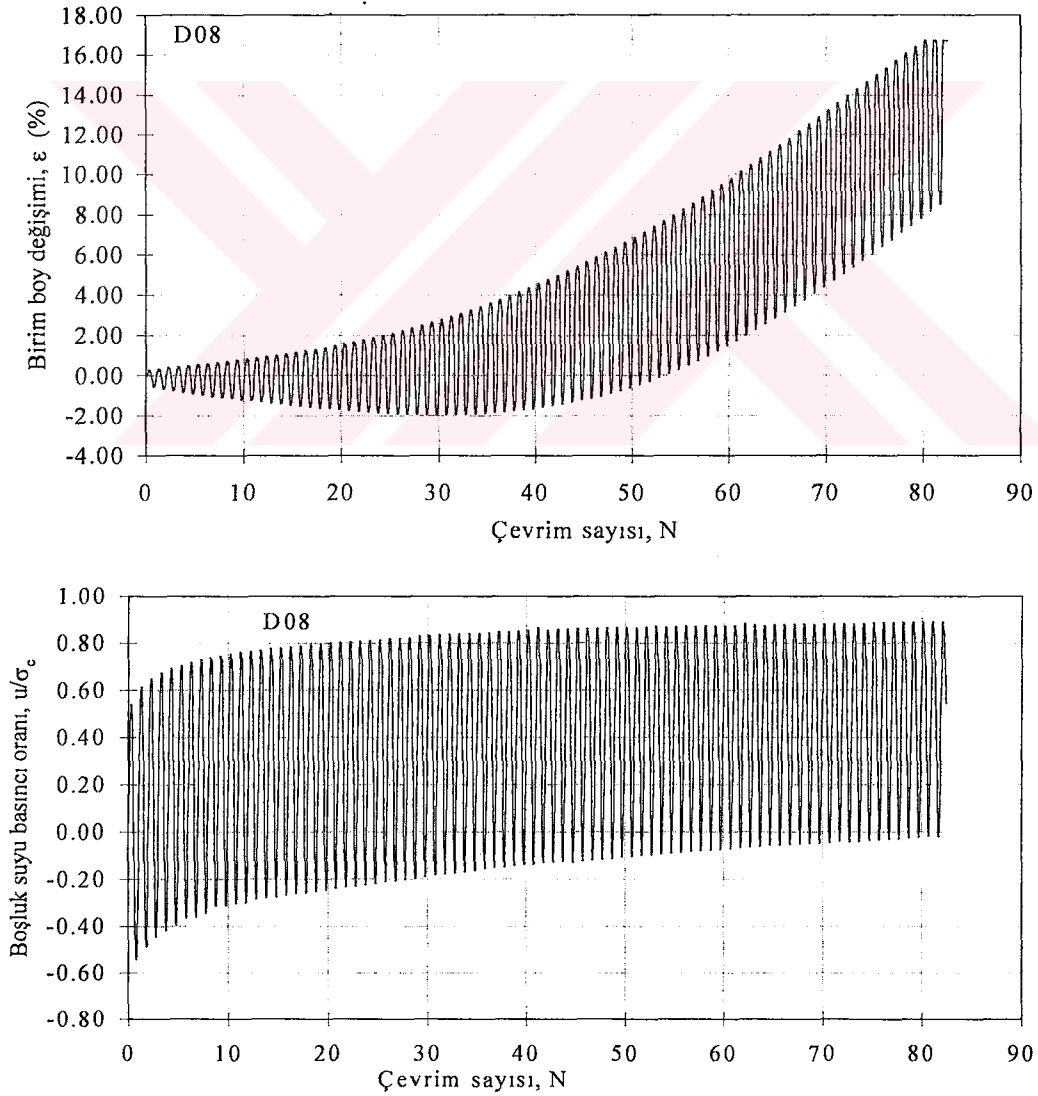
D.No	σ_c kPa	DKGO (-)	N	ε_{da} (%)	U/σ_c	N=20 $\pm \varepsilon(\%)$	$\varepsilon_{da} = \%5$ u/σ_c	$\varepsilon_{da} = \%5$ N
D01	70	0.532	108	1.0	1.0	0.9	0.75	-
D03	70	0.616	98	12	1.0	4.2	0.80	12
D04	70	0.255	73	0.5	0.71	0.15	-	-
D05	70	0.417	150	6.0	1.0	0.65	0.80	115

Tablo 3.7'nin devamı: Dinamik deneylerde uygulanan gerilmeler ve sonuçlar

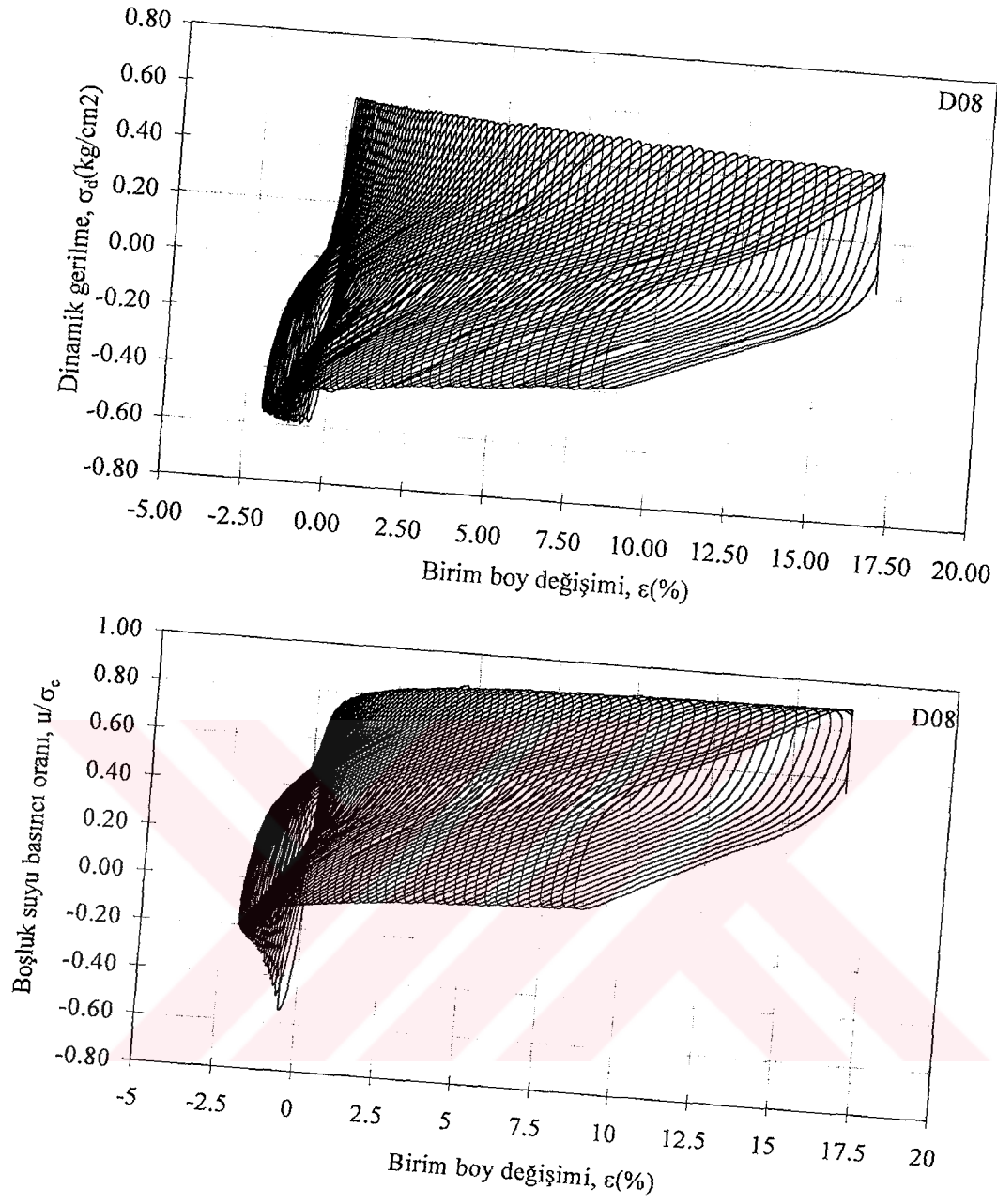
D.No	σ_c kPa	DKGO (-)	N	ϵ_{da} (%)	u/σ_c	N=20 $\pm\epsilon$ (%)	$\epsilon_{da}=\%5$ u/σ_c	$\epsilon_{da}=\%5$ N
D06	70	0.560	110	5.0	1.0	3.00	0.70	13
D07	70	0.521	75	15	0.46	3.75	0.46	14
D08	70	0.416	82	10	1.0	1.50	0.80	31
D09	70	0.659	15	10	1.0	-	0.80	3
D10	70	0.682	15	15	1.0	-	0.90	2
D11	70	0.680	12	18	1.0	-	0.80	1
D12	100	0.647	35	10	0.55	4.00	0.55	8
D13	100	0.752	58	8.0	1.0	2.50	0.85	20
D14	100	0.720	42	20	1.0	10.00	0.90	2
D15	100	0.734	25	20	1.0	8.00	0.90	3
D16	100	0.723	120	5.0	0.95	1.0	0.95	120
D24	100	0.196	200	0.3	0.15	0.15	-	-
D25	100	0.331	156	4.8	0.2	0.37	0.20	156
D26	100	0.521	27	12.5	1.0	5.0	0.90	7
D30	100	0.300	164	1.00	0.60	0.25	-	-
D31	100	0.360	186	1.0	0.48	0.36	-	-
D32	100	0.435	169	2.3	0.84	0.50	-	170-
DSİL01	100	0.400	33	26.3	1.05	2.60	0.92	19
DSİL02	100	0.345	144	13.8	1.18	0.50	0.95	114
DSİL03	100	0.435	17	21.00	1.00	9.00	0.75	7
DSİL04	150	0.39	172	1.2	0.42	0.45		
DSİL05	150	0.35	164	2.75	0.42	1.40		
DAPZ01	150	0.30	45	17.00	0.73	7.00	0.50	7

Şekil 3.7 ve 3.8'de DKGO=0.42 uygulanan $I_p=29$ ve $I_c=0.62$ olan yüksek plastisiteli kil bir numunenin deney sonuçları görülmektedir. Bu numunenin kaba dane oranı KDO=% 10 dur. Numunede ilk çevrimden itibaren boşluk suyu basıncında büyük artışlar oluşmuş ve N=31 çevrime gelindiğinde boşluk suyu basıncı efektif gerilme

seviyesine yaklaşmıştır. Bu durumda numunede birim boy değişimi $\varepsilon_{da} = \% 5$ civarında olup numune artık göçmüştür kabul edebiliriz. Bu çevrim sayısı değerinden büyük çevrim sayılarında boşluk suyu basıncında bir artış meydana gelmemiş fakat numune göçtüğü için deformasyonda pozitif tarafa doğru artma olmuştur. Şekil 3.8’de gerilme birim boy değişimi ilişkileri ve boşluk suyu basıncı birim boy değişimi ilişkileri incelendiği zaman, çevrim sayısı arttıkça artan boşluk suyu basıncı ve birim boy değişimine bağlı olarak yumuşama meydana gelmiş ve ilmikler yatıklaşmıştır. Başlangıçtaki elastisite modülü değerleri artan yumuşamaya paralel olarak hızla azalmış ve numune 31 çevrim civarında göçmüştür. Burada sadece seçilen bir deney için deformasyon ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısına göre değişimi verilmiş olup diğer deneylerin sonuçları eklerde gösterilmiştir.



Şekil 3.7 DKGO=0.42 olan D08 deney sonuçları.



Şekil 3.8 DKGO=0.42 olan D08 nolu deneyin gerilme birim boy değişimi. ve boşluk suyu basıncı oranı birim boy değişimi.

3.7.2 N=20 Çevrim Dinamik Ve Sonra Statik Deneyler

Tablo 3.2'de fiziksel özellikleri verilen numuneler üzerinde önce N=20 çevrimlik düşey sinüzoidal yük $f=0.50$ Hz. frekansında uygulanmıştır. 20. çevrim sonucunda düşey yük durdurularak drenajlar açılmadan hemen $v=0.50$ mm/dak deformasyon hızında statik yüklemeye geçilmiştir. Bu koşullarda numunede %20 birim boy değişimi oluncaya kadar deneye devam edilmiştir. Deney sonunda dinamik gerilme kaldırılıp drenajlar açılarak dinamik gerilme yüklenmeden önceki izotropik gerilme

koşullarında 24 saat beklenmiş ve bu süre zarfında numunede oluşan hacim değişikliği buretten okunarak elde edilmiştir. Daha sonra numunenin Tablo 3.2’de verilen fiziksel ve indeks özelliklerinin saptanması için standart deney yöntemleri kullanılmıştır. N=20 çevrimlik dinamik gerilme oranı numunelere farklı değerlerde uygulanmış ve diğer dinamik deneylerde olduğu gibi düşey birim boy değişimleri ile boşluk suyu basıncı değerleri elde edilmiştir. Dinamik deneylerde uygulanan gerilmeler sonucu elde edilen birim boy değişimi genliği (ϵ_{da}) ve boşluk suyu basınç oranları (u/σ_c) ile statik deney sonucu elde edilen deviatorik gerilme değerleri σ_a veya $\sigma_1-\sigma_3$ Tablo 3.8’de verilmiştir. Şekil 3.9’da DS56 nolu deneyin gerilme birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı birim boy değişimi ilişkisi gösterilmiştir.

Tablo 3.8 N=20 Çevrim dinamik ardından statik yüklemeli deney sonuçları.

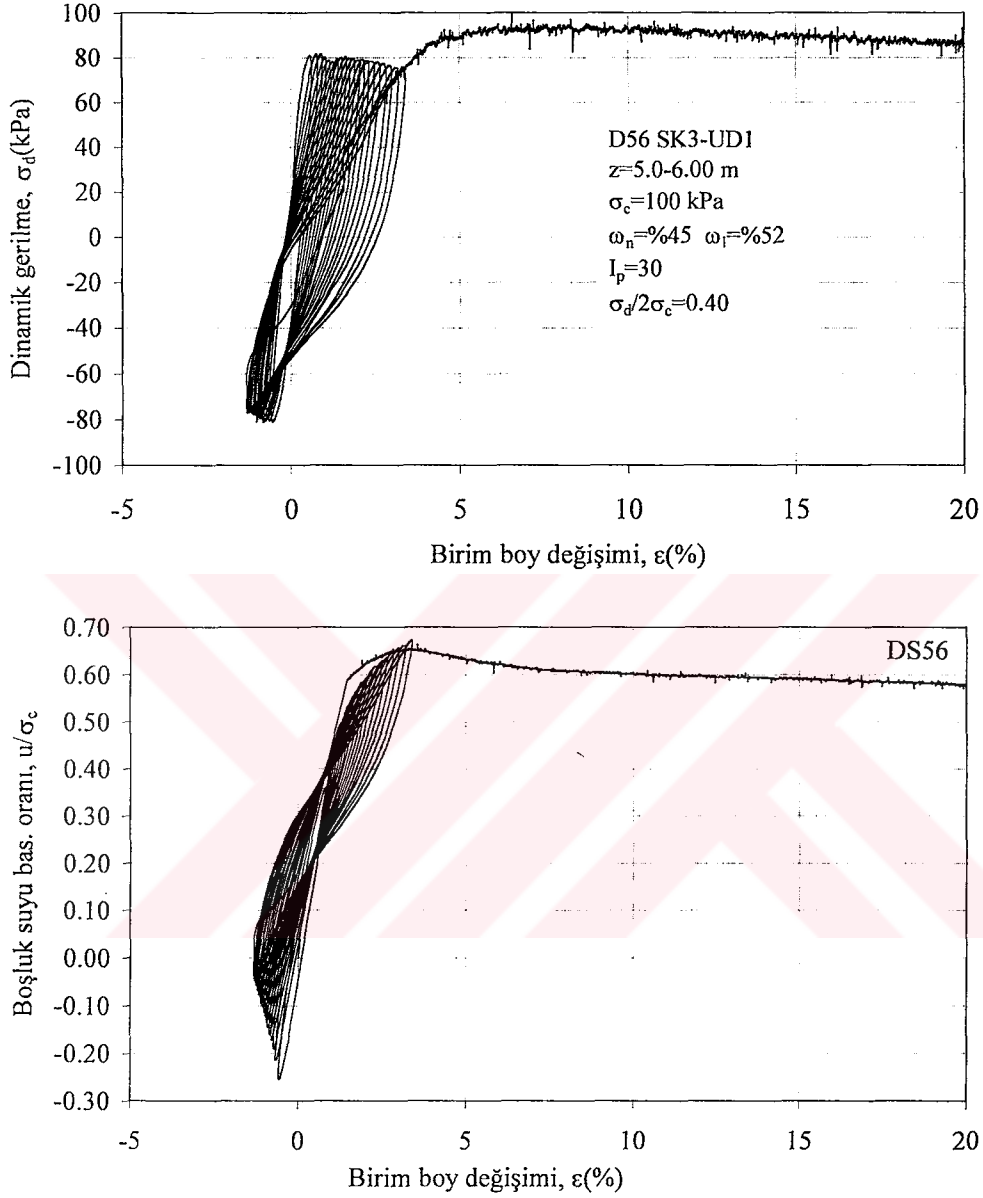
D No	σ_c (kPa)	$\sigma_c/2 \sigma_d$	N=20 için ϵ_{da}	$\epsilon_{da}=\%5$ N	N=20 için u/σ_c	$\epsilon=\%10$ de σ_a (kPa)	$\epsilon=\%20$ de σ_a (kPa)
DS37	150	0.30	1.00		0.43	240	237
DS38	100	0.43	1.96		0.87	125	130
DS39	100	0.43	0.40		0.18	189	184
DS40	125	0.38	1.43		0.80	167	164
DS41	125	0.39	6.79	18	0.55	138	140
DS42	125	0.40	7.14	15	0.60	106	133
DS43	150	0.36	1.00		0.30		
DS44	150	0.43	0.90		0.57	181	172
DS45	150	0.26	0.22		0.23	221	229
DS46	100	0.25	0.28		0.20	73	74
DS47	100	0.46	2.80		0.85	150	168
DS48	100	0.65	4.80	20	0.95	154	165
DS49	100	0.36	0.20		0.37	146	143
DS51	120	0.44	1.10		0.24	161	142
DS52	100	0.395	0.70		0.50	178	173
DS53	100	0.53	3.00		0.72	121	121
DS54	100	0.07	0.04		0.03	110	108

Tablo 3.8 in devamı: N=20 Çevrim dinamik ardından statik yüklemeli deney sonuçları.

D No	σ_c (kPa)	$\sigma_v/2 \sigma_d$	N=20 için ϵ_{da}	$\epsilon_{da}=\%5$ N	N=20 için u/σ_c	$\epsilon=\%10$ de σ_a (kPa)	$\epsilon=\%20$ de σ_a (kPa)
DS55	100	0.31	0.70		0.34	105	100
DS56	100	0.40	4.69	20	0.67	93	86
DS57	100	0.43	6.02	17	0.85	88	85
DSY01	200	0.55	22.00	0.75	0.50	121	46
DSY02	300	0.60	20.00	0.6	0.90	71	146
DSY03	200	0.48	22.00	8	0.88	36	65
DSY04	150	0.38	1.10		0.60	91	147
DSY05	150	0.44	1.73		0.70	200	219
DSY06	150	0.15	0.12		0.03	292	290
DSY07	150	0.42	7.00	15	0.93	194	224
DSY08	150	0.48	15.50	5	0.95	127	184
DSY09	150	0.33	0.84		0.40	262	296
DSY10	250	0.47	16.00	11	0.85	171	225
DSY11	250	0.36	1.50		0.80	187	208
DSAD1	100	0.41	1.00		0.25	140	127
DSAD2	200	0.49	0.70		0.73	490	450

Şekil 3.9'da plastisitesi $I_p=30$, kıvamı $I_c=0.23$ olan ve $\sigma_c=100$ kPa konsolidasyon basıncı altında konsolide edilmiş olan DS56 nolu deneyin N=20 çevrim dinamik ve daha sonra hemen ardından yapılan statik yükleme altında gerilme birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı birim boy değişimi ilişkisi görülmektedir. Numuneye önce DKGO=0.40 olan tekrarlı sinüzoidal gerilme oranı N=20 çevrim uygulanmıştır. Bu dinamik gerilme sonunda numunede $\pm \%2.35$ lik eksenel birim boy değişimi oluşmuş ve BSBO=% 67 oranında artmıştır. Hemen ardından yapılan statik deneyde numunede en büyük deviatorik gerilme 94 kPa olarak bulunmuştur.

Numuneye uygulanan tekrarlı gerilme genliği ise ± 80 kPa civarındadır. Benzer şekilde oluşturulan diğer deney sonuçları eklerde verilmiştir.



Şekil 3.9 DKGO=0.40 olarak $N=20$ çevrim uygulanan ve ardından $\epsilon=\%20$ lik eksenel birim boy değişimi kadar statik yükleme yapılan DS56 nolu deney sonuçları.

3.7.3 Statik Deneyler

Dinamik üç eksenli deney aletinde aynı zamanda statik deformasyon kontrollü deneyler yapılmıştır. Deformasyon hızı 0.50 mm/dak olarak seçilip % 20 lik eksenel birim boy değişimine ulaşıncaya kadar yapılan drenajsız üç eksenli deney sonuçları

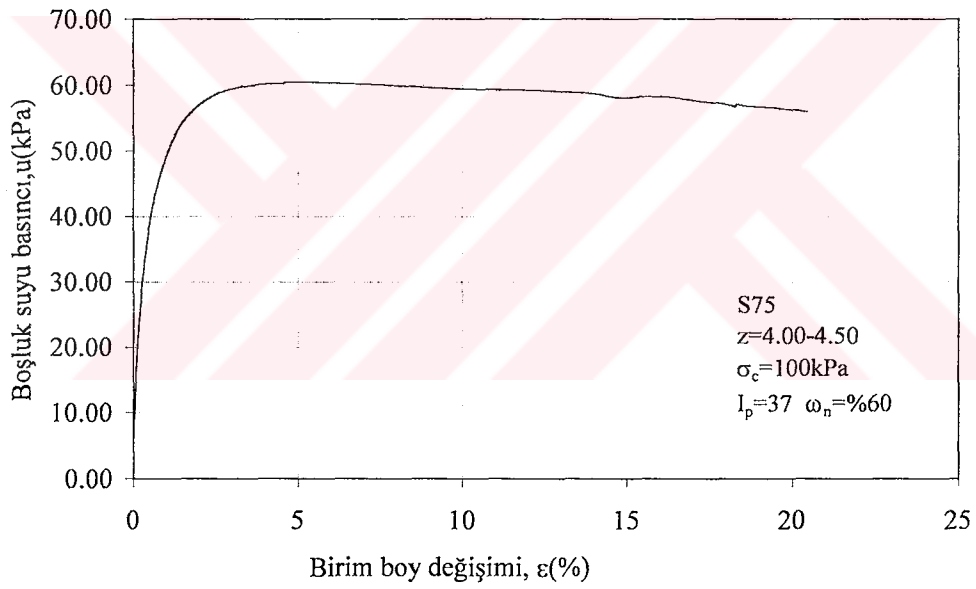
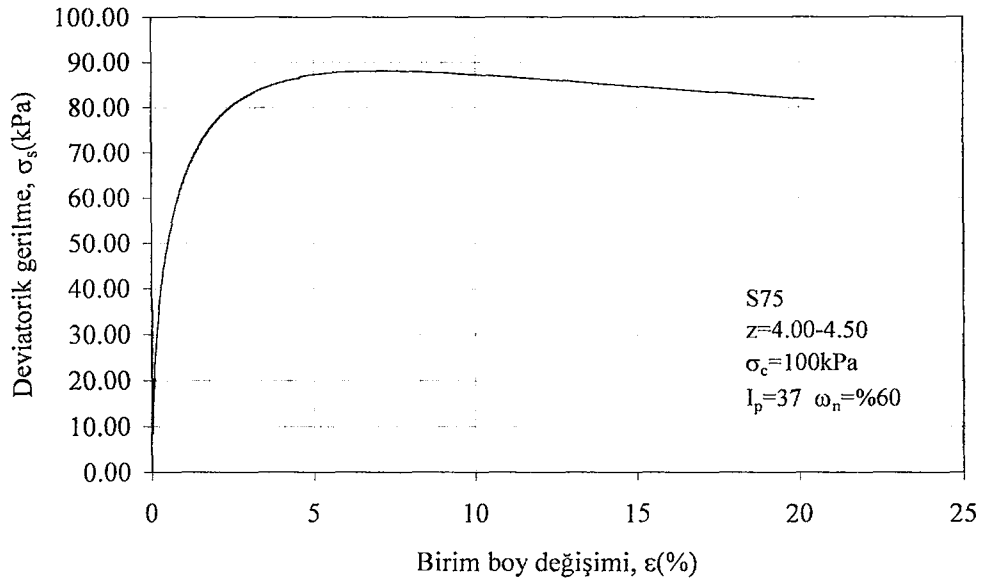
Tablo 3.9’da çıkarılmıştır. Burada birim boy değişimi hızının yüksek seçilmesinin nedeni dinamik yüklemeden sonra da yapılan statik deneylerde aynı hızın seçilmesinden dolayıdır. Burada Şekil 3.10’da S75 nolu deneyin gerilme birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı birim boy değişimi ilişkisi verilmiştir. Diğer statik deneylerin gerilme birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı birim boy değişimi ilişkilerinden elde edilen gerilme değerleri Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.9 :Statik deney sonuçları

Deney No	σ_c (kPa)	σ_s veya $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	u (kPa)	ϵ (%)	En büyük değerler		
					$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	u (kPa)	ϵ (%)
S70	200	217	104	15.00	215	108	6.00
S71	250	406	100	16.00	409	127	3.13
S72	100	189	50	16.00	190	52	14.00
S73	225	107	74	16.00	97	70	2.31
S74	250	148	107	20.00	222	116	6.10
S75	100	82	56	20.00	88	60	7.25
S76	150	123	107	20.00	145	86	1.87
S77	200	211	113	20.00	203	153	2.97
S78	250	208	163	20.00	252	117	1.74
S79	200	140	119	20.00	147	130	4.39
S80	300	160	112	20.00	160	116	3.80
SAD81	150	121	12	20.00	135	40	6.00
SAD82	200	362	-16	20.00	362	-16	20.00

3.7.4 En Büyük Elastisite Modülü Ölçümü Yapılan Deneyler.

Bazı numuneler üzerinde dinamik deneye başlamadan önce hiç boşluk suyu basıncı artışı oluşturmada, çok küçük gerilmeler uygulanarak 10^{-5} civarındaki deformasyonlar deney aletinin özelliklerinde anlatıldığı gibi küçük deformasyon algılayıcıları olan Gap-Sensor (Kokusho, 1982) vasıtası ile ölçülerek en büyük elastisite modülleri hesaplanmıştır.



şekil 3.10 S75 nolu statik deneyin gerilme birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı birim boy değişimi ilişkileri.

Diğer bir grup numune üzerinde ise gerilme birim şekil değişirme özelliklerinin tespiti için 0.10 Hz frekansında beşer çevrimde bir yük artırımlı deneyler yine çok küçük genliklerden itibaren yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda da elastisite modülleri ve poisson oranı $\nu=0.50$ alınarak (3.7) bağıntısı yardımı ile en büyük dinamik kayma modülü G_0 hesaplanmıştır.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.7)$$

Üç eksenli dinamik basınç deney aletinde izotropik gerilme koşullarında drenajsız durumda birim kayma $\gamma = 1.5 \varepsilon_a$ bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda ε_a ile silindirik numunenin düşey ekseninde oluşan birim boy değişimi gösterilmektedir. Elastisite modülü (Young Modülü) E ise düşey gerilmenin düşey boy değişimine ε_a ya bölünmesi ile elde edilmektedir. Bağıntısı (3.8)'de verilmiştir.

$$E = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_a} \quad (3.8)$$

Bu bağıntıda σ_d ile dinamik düşey gerilme genliği kastedilmektedir ve değeri aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_d = \frac{T}{A} \quad (3.9)$$

T ile dinamik deneyde uygulanan düşey sinüzoidal yük, A ile ise numune kesit alanı verilmektedir. Bu bağıntılar yardımı ile çok küçük gerilme genlikleri uygulanarak tekrarlı yükler altında numunede drenajsız koşullarda hiç boşluk suyu basıncı artımı oluşmadan dinamik kayma modülleri hesaplanmıştır Deney sonuçları Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10 :Elastisite modülü ölçümü yapılan deney sonuçları

Deney No	Frekans (Hz)	I_p (%)	I_c (%)	ω_n (%)	σ_c (kPa)	e (-)	σ_d (MPa)	ε (-)	$E_{maks.}$ (MPa)	$G_{maks.}$ (Mpa)
D06G	0.5	23	0.43	33	70	0.891	0.0024	2.20×10^{-5}	109	36.33
D09G	0.5	29	0.28	48	70	1.296	0.0021	3.10×10^{-5}	68	22.60
D13G	0.5	40	0.90	35	100	0.945	0.0037	3.08×10^{-5}	120	40
D16G	0.5	40	0.98	32	100	0.864	0.0022	1.61×10^{-5}	137	46.37
D43G	0.5	24	0.92	23	150	0.621	0.0022	2.20×10^{-5}	100	33.33
D46G	0.5	33	0.65	35	100	0.945	0.0043	4.78×10^{-5}	90	30
D50G	0.5	36	0.72	35	120	0.945	0.0032	3.33×10^{-5}	96	32

Tablo 3.10 un devamı:Elastisite Modülü ölçümü yapılan deney sonuçları

Deney No	Frekans (Hz)	I_p (%)	I_c (%)	ω_n (%)	σ_c (kPa)	e (-)	σ_d (MPa)	ε (-)	$E_{maks.}$ (MPa)	$G_{maks.}$ (Mpa)
D54G	0.5	13	0.30	35	100	0.945	0.0049	4.08×10^{-5}	120	40
D57G	0.5	30	0.30	45	100	1.215	0.0022	3.28×10^{-5}	67	22.33
DG58	0.1	19	0.89	21	200	0.567	0.0032	1.40×10^{-5}	229	76.33
DG59	0.1	19	0.84	22	200	0.594	0.0092	3.64×10^{-5}	253	84.33
DG60	0.1	22	0.72	25	120	0.675	0.0032	2.68×10^{-5}	119	39.66
DG61	0.1	19	1.0	22	150	0.594	0.0076	2.55×10^{-5}	298	99.33
DG62	0.1	36	0.83	26	220	0.702	0.0028	1.71×10^{-5}	164	54.66
DG63	0.1	25	0.8	22	250	0.594	0.0052	1.88×10^{-5}	277	92.33
DG64	0.1	33	0.82	24	250	0.648	0.0027	1.02×10^{-5}	263	87.67
DG65	0.1	14	0.93	22	200	0.594	0.0034	1.47×10^{-5}	229	76.33
DG66	0.1	28	0.79	29	225	0.783	0.0029	1.81×10^{-5}	159	53
DG67	0.1	14	1.07	20	150	0.540	0.0034	1.55×10^{-5}	217	72.33
DG68	0.1	33	0.67	36	250	0.972	0.0044	3.93×10^{-5}	112	37.33
DG69	0.1	33	0.88	36	250	0.972	0.0020	1.32×10^{-5}	153	51
DGST03	0.1	22	0.86	22	100	0.594	0.0011	6.32×10^{-6}	174	58
DGSAP1	0.1	0		46	160	1.242	0.0013	7.25×10^{-6}	186	62

3.8 Sonuç

Yapılan endeks özellik deneyleri sonucunda numunelerin plastisiteleri $I_p=15-44$ arasında, kıvamları ise $I_c=0.23-1.04$ arasında değişmektedir. Numunelerin likit limitleri $\omega_l=\%31-\%71$, doğal su muhtevaları $\omega_0=\%21-\%61$ arasında değişmektedir. Dinar'dan alınan numunelerin kaba dane oranları $\%0-\%29$ arasında değişmektedir. Yapılan hidrometre deneylerinden silt oranının $\%38-70$ arasında, kil oranının ise $\%16-\%39$ arasında değiştiği bulunmuştur. Tüm numuneler normal konsolide kil olup dinamik üç eksenli hücrede izotropik gerilme koşullarında konsolide edilmişlerdir. Dinamik üç eksenli deney sisteminde yapılan tüm deneylerin sonuçları yukarıdaki tablolarda verilmiştir. Örnek olarak seçilen iki adet deney sonucu grafikleri ve yorumları anlatılmış diğer tipik deney grafikleri eklerde verilmiştir. Küçük deformasyon ölçerler yardımı ile hesaplanan E ve G_0 modülü değerleri de yukarıdaki Tablo 3.10'da verilmiştir.

4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

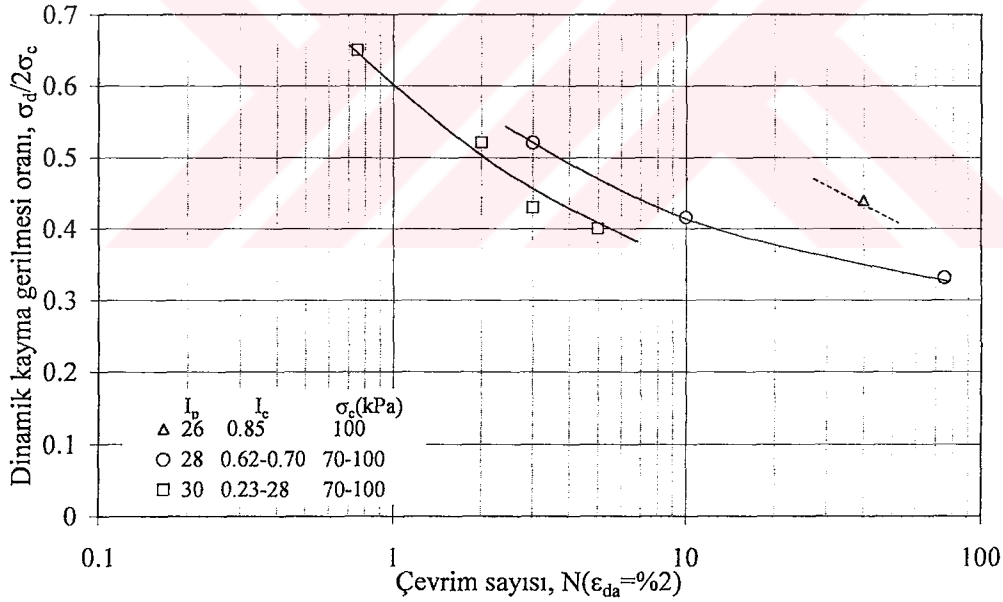
4.1 Giriş

Örselenmemiş değişik kıvam ve plastisiteye sahip killi zemin numuneleri üzerinde değişik dinamik ve statik deneylere ait sonuçlar bir önceki bölümde tablolarda verilmiştir. Bu bölümde deney sonuçlarından yararlanarak tekrarlı yükler etkisi altında zeminlerin davranışına etki eden faktörler irdelenmiştir. Bu araştırmanın ilk aşamasında dinamik kayma gerilmesi oranı (DKGO) üzerinde plastisite, kıvam, çevrim sayısı, kaba dane oranı, konsolidasyon basıncı, boşluk suyu basıncı, birim boy değişimi ve hacimsel deformasyonların etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada ise sismik geçmişin statik yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet azalımına etkisi incelenmiştir. Dinamik kayma gerilmesi oranı ($DGKO = \sigma_d / 2\sigma_c$) olarak deney sonuçlarından hesap edilmiş bu oranın $\epsilon_{da} = \%2 - \%5$ birim boy değişimi mertebeleri için çevrim sayısı (N)'e göre değişimleri oluşturulmuştur.

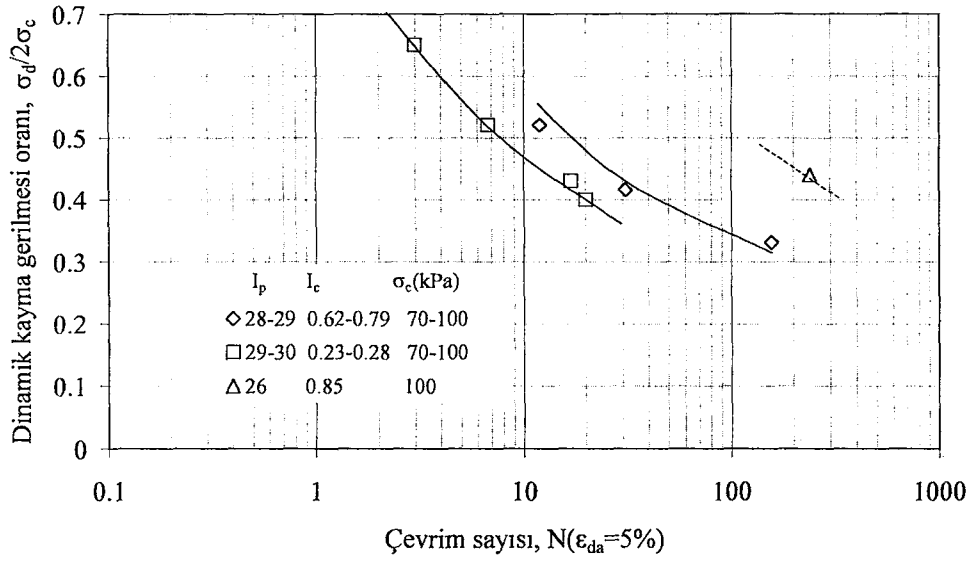
4.2. Zemin Kıvamının Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi

Aynı Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı (DKGO) altında plastisiteleri yaklaşık olarak aynı, değişik kıvamlardaki zemin numuneleri incelendiği zaman kıvam indisi (I_c) daha büyük olan numunelerin aynı birim boy değişimi seviyesine ulaşması için dinamik yükün daha çok uygulanması gerekmektedir. Kıvamın küçük birim boy değişimi seviyelerinde rijitliğe etkisi $\epsilon_{da} = \%2$ birim deformasyon için Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Burada amaç, küçük birim boy değişimi seviyelerinde zemin kıvamının tekrarlı yükler etkisi altındaki davranışı nasıl etkilediğini göstermektir. Grafikten de görüldüğü gibi plastisitesi $I_p = 26-30$ aralığında olan numunelerle kıvamı $I_c = 0.23-0.28$ olanların davranışı kıvamı $I_c = 0.70-0.85$ olanlardan çok daha farklı olmaktadır. Bunun nedeni katı numuneler yumuşak numunelerden daha rijit olduklarından aynı birim boy değişimi seviyesine ulaşmak için daha çok çevrim

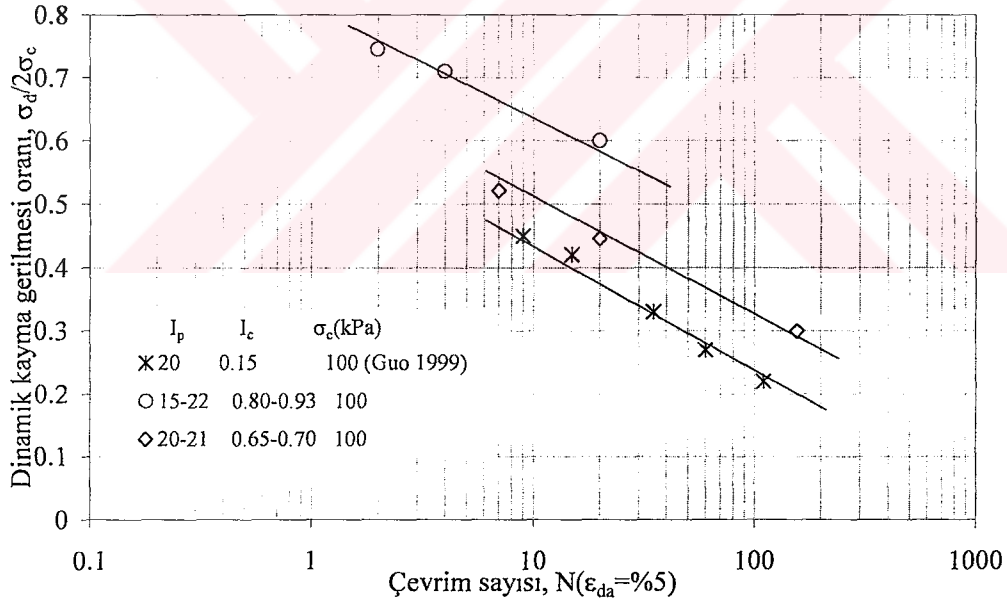
sayısına ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece $\epsilon_{da}=\%2$ birim boy değıştirme için kıvam artarken DKGO'nın arttığı gösterilmiştir. Kıvamın etkisi birim boy değışmi $\epsilon_{da}=\%5$ için Şekil 4.2'deki DKGO-N ilişkisinde gösterilmiştir. Plastisiteleri $I_p=26-30$ olan bu numunelerin kıvamları $I_c=0.23-0.85$ arasında değışmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kıvam arttıkça DKGO artmakta ve eğriler sağa doğru kaymaktadır. Plastisiteleri $I_p=15-22$ arasında değışen düşük plastisiteli siltli killere ait deney sonuçları ve (Guo, 1999) ile karşılaştırma ise Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Düşey birim boy değışimi $\epsilon_{da}=\%5$ olarak alınmıştır. Bu grafikte de kıvamın etkisi görülmektedir. Plastisiteleri yaklaşık aynı olduğu halde aynı DKGO uygulanması durumunda daha katı olan numuneler daha sağda kalmakta ve kıvam arttıkça DKGO artmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarla Guo ve Prakash (1999)'ın silt ve siltli kil karışımları üzerinde üç eksenli deney sisteminde elde ettiği sonuçlardan da kıvamın etkisi görülmektedir. Böylece bu çalışmada elde edilen sonuçların diğer araştırmacıların dinamik üç eksenli deney sisteminde elde ettiği sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1 Birim boy değışimi $\epsilon_{da}=\%2$ için kıvamın DKGO'na etkisi.



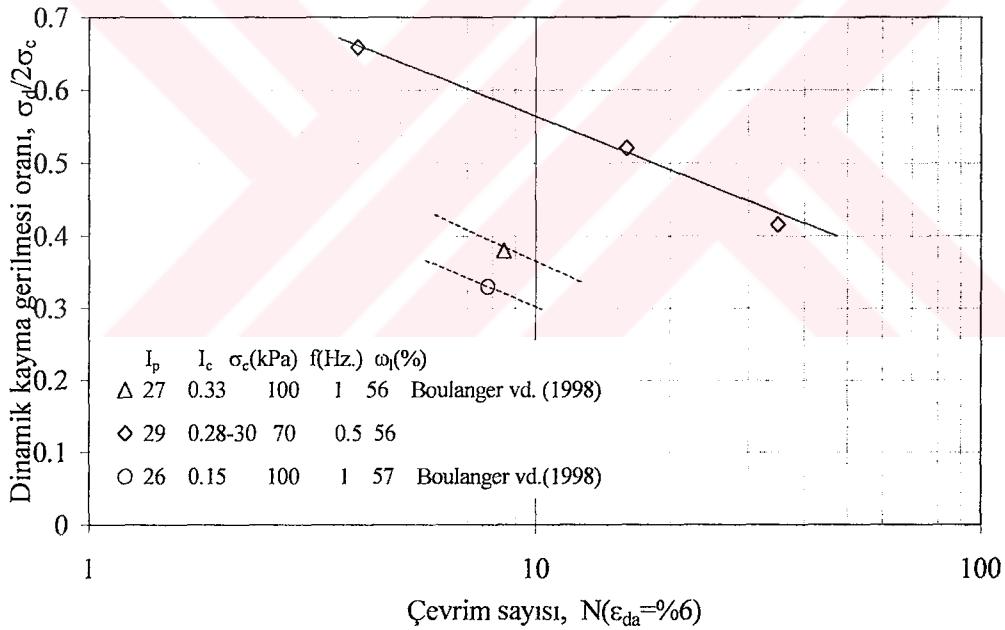
Şekil 4.2 Birim boy değişimi $\varepsilon_{da}=\%5$ için kıvamın DKGÖ'ne etkisi



Şekil 4.3 $I_p=15-22$ etkisi aralığında olan killerin DKGÖ üzerinde kıvamın etkisi ve diğer çalışmalarla karşılaştırılması.

Daha önceki çalışmalarla karşılaştırmak amacı ile birim boy değişimi $\varepsilon_{da}=\%6$ için yaklaşık aynı plastisiteye sahip ($I_p=26-29$) numunelerin likit limitleri $\omega_l=\%56-\%57$, konsolidasyon basınçları $\sigma_c=70-100$ kPa ve kıvamları $I_c=0.15-0.33$ arasındadır. Boulanger ve diğerleri (1998) nin $f=1$ Hz. frekansında yükleme yaparak üç eksenli deney aletinde elde ettiği sonuçlar Şekil 4.4'de karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada

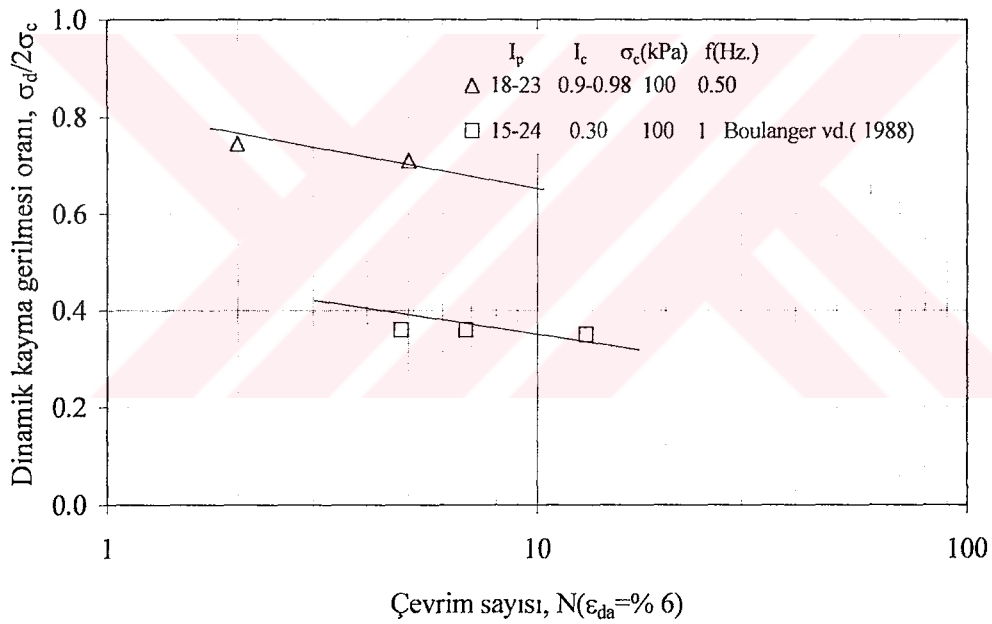
uygulanan frekans 0.5 Hz iken Boulanger ve diğerleri (1998) ise 1 Hz frekans uygulamışlardır. Frekans arttıkça mukavemetin artması gerekmektedir (Erken ve diğerleri (1981). Şekil 4.4’de ise daha yüksek frekanstaki Boulanger ve diğerleri (1998)’nin CH ve MH sınıfı numuneleri bu çalışmadaki CH sınıfı numunelerden daha az DKGÖ’na sahiptirler. Yüksek plastisiteli yumuşak silt olan $I_c=0.15$ kıvamındaki numune en az DKGÖ’na sahiptir. Burada zemin yapısı ve kıvamın etkisi vardır denilebilir. Bu sonuç zeminin silt olması nedeni ile frekansın etkisinin yerine zemin özelliğinin etkisini ön plana çıkarmaktadır. En sağda bu çalışmada elde edilen $I_p=29$ ve $I_c=0.28-0.30$ olan aynı özellikteki aynı derinlikten alınan üç deney sonucunda ise hem zemin özelliği farklılığı hem de uygulanan dinamik gerilme farklılığından dolayı numunelerin, siltli numunelerden daha yüksek DKGÖ’na sahip oldukları görülmektedirler.



Şekil 4.4 $I_p=27-30$ aralığında kıvamın DKGÖ üzerinde etkisi

Kıvamın etkisini düşük plastisiteli numunelerde göstermek amacı ile bu çalışmada kullanılan numuneler ile Boulanger ve diğerleri (1998) yılında elde ettiği sonuçlar Şekil 4.5’de karşılaştırılmıştır. Plastisiteler yaklaşık aynı olduğu halde ($I_p=18-24$) kıvamı daha yumuşak ($I_c=0.30$) olan Boulanger ve diğerleri nin aynı deney sisteminde yaptığı çalışmada elde ettiği sonuçlar, bu çalışmadaki ($I_c=0.62-0.90$) deney sonuçları ile karşılaştırıldığında zaman bu çalışmadaki numunelerin daha yüksek

DKGO gösterdikleri görülmektedir. Bu çalışmada frekans 0.50 Hz iken Boulanger ve diğerlerinin çalışmasında frekans 1 Hz. dir. Kıvam aynı olsa idi frekansı büyük olan numunelerin daha yüksek DKGO göstermesi gerekcekti. Burada plastisite ve konsolidasyon basıncı aynı olduğu halde kıvam etkisinden dolayı durum tersine olmuştur. Burada üçgen ile gösterilen numunelerin kıvamdan ve zemin yapısından dolayı Boulanger ve diğerlerinin (1998) 1 Hz. frekansındaki aynı plastisitedeki numunelerinden daha yüksek DKGO elde edilmiştir. Plastisiteleri $I_p=39-40$ ve kıvamları katı olanların $I_c=0.90-0.98$ ve yumuşak olanların $I_c=0.38-0.64$ olan numunelerin $\varepsilon_{da}=\%5$ çift yönlü aksenal birim boy değiştirme seviyesindeki DKGO-N değişimi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Burada da kıvamı yüksek numuneler daha yüksek DKGO göstermektedirler.

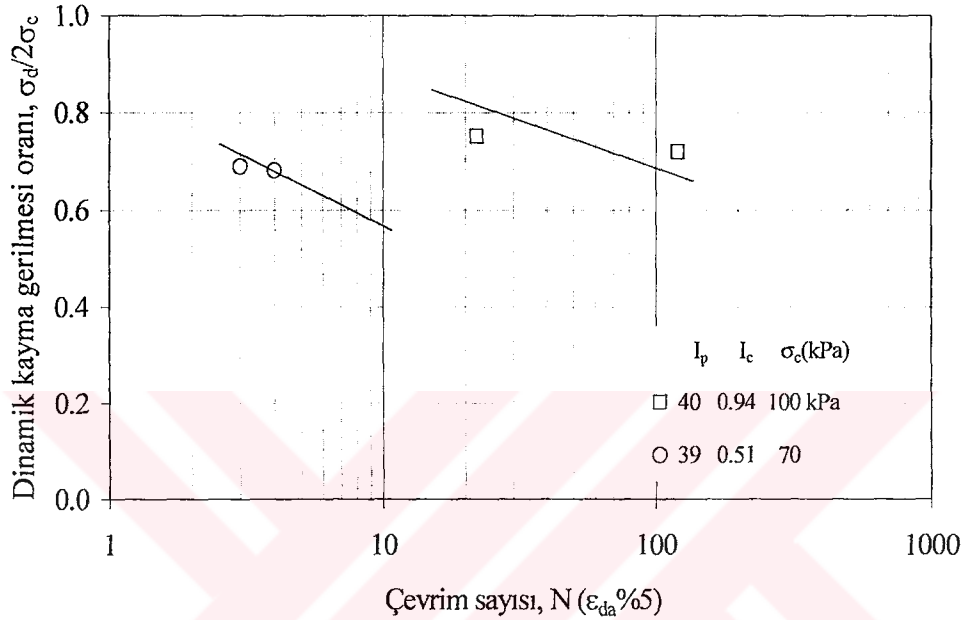


Şekil 4.5 $I_p=15-24$ aralığında kıvamın DKGO üzerinde etkisi ve diğer çalışmalarla karşılaştırma yapılması.

4.3. Plastisitenin Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi

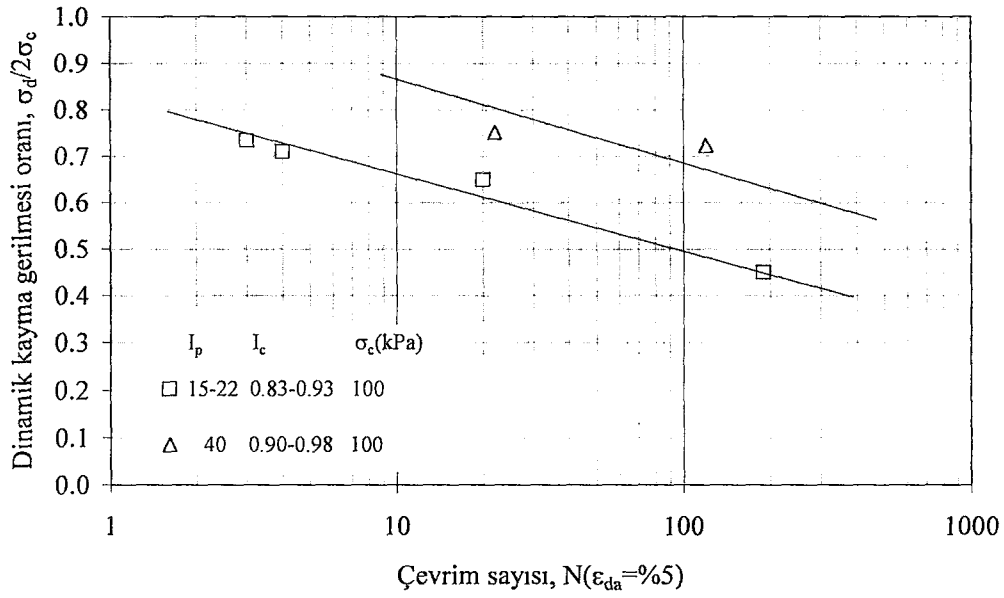
Zeminlerin tekrarlı gerilmeler altındaki davranışına etki eden parametrelerden bir tanesi de plastisite indisi I_p dir. Düşük plastisiteli killerde tekrarlı yükler etkisinde mukavemet azalırken plastisite arttıkça mukavemet artmakta veya bir başka deyişle belirli bir birim boy değişimi seviyesine ulaşmak için gereken süre yani Çevrim Sayısı (N) artmaktadır. Bu davranış biçimi aşağıda verilen DKGO-N deney sonuçları

ile doğrulanmaktadır. Şekil 4.7’de $\sigma_c=100$ kPa izotropik basınç altında konsolide edilmiş killi zemin numunelerine ait birim boy değıştirme $\epsilon_{da}=\%5$ alınarak oluşturulan DKGO-N diyagramında plastisitenin etkisi görölmektedir. Plastisitesi yüksek olan numuneler daha yüksek DKGO’na sahip olmakta ve çevrim sayıları da daha fazla olmaktadır.

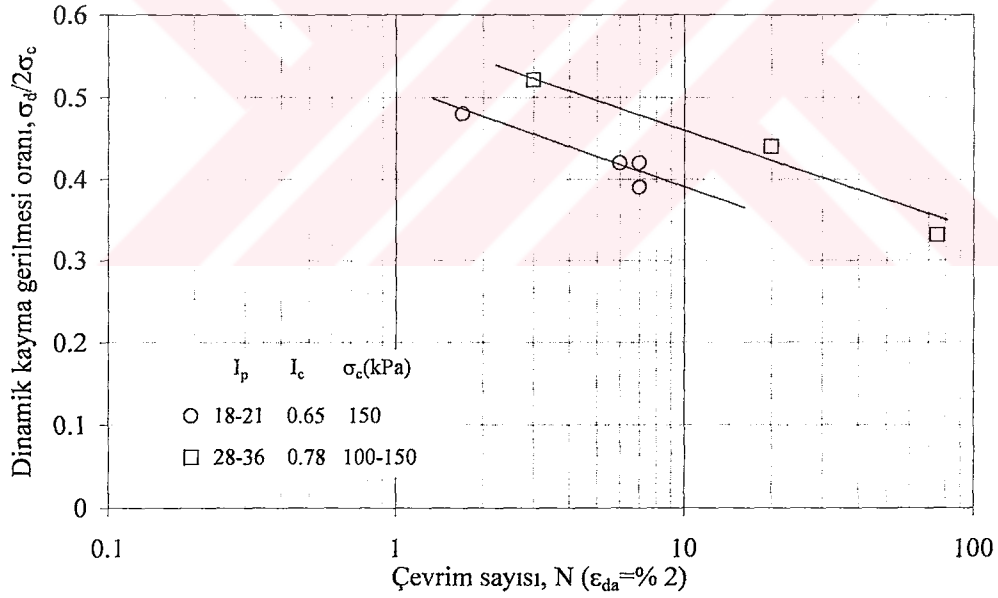


Şekil 4.6 $I_p=39-40$ aralığında zemin kıvamının DKGO’na etkisi.

Şekil 4.8’de $\sigma_c=150$ kPa izotropik basınç altında konsolide killi zemin numunelerinde plastisitenin ve kıvamın etkisi $\epsilon_{da}=\%2$ birim boy değışimi seviyesi için DKGO-N diyagramında görölmektedir. Burada aynı konsolidasyon basıncı uygulanan $I_c=0.65$ kıvamında ve plastisite indisleri $I_p=18-21$ olan numuneler ile kıvamı $I_c=0.78$ olan plastisite indisleri de $I_p=28-36$ olan numunelerin deney sonuçlarına bakıldığında plastisitenin ve kıvamın etkisi görölmektedir. Kıvam ve plastisite arttıkça DKGO-N eğrileri sağa doğru kaymaktadır. Plastisitenin artışının $N=10$ ve $N=30$ çevrim sayılarındaki DKGO’na göre değışimi Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Burada değışik dinamik kayma gerilme oranları (DKGO) altında kıvamları yaklaşık $I_c=0.70-0.90$ olan $\sigma_c=100$ kPa konsolidasyon basıncı altındaki katı numunelerin $N=10$ ve $N=30$ çevrim sayılarındaki değeri esas alındığında plastisite arttıkça DKGO’nın arttığı görölmüştür.



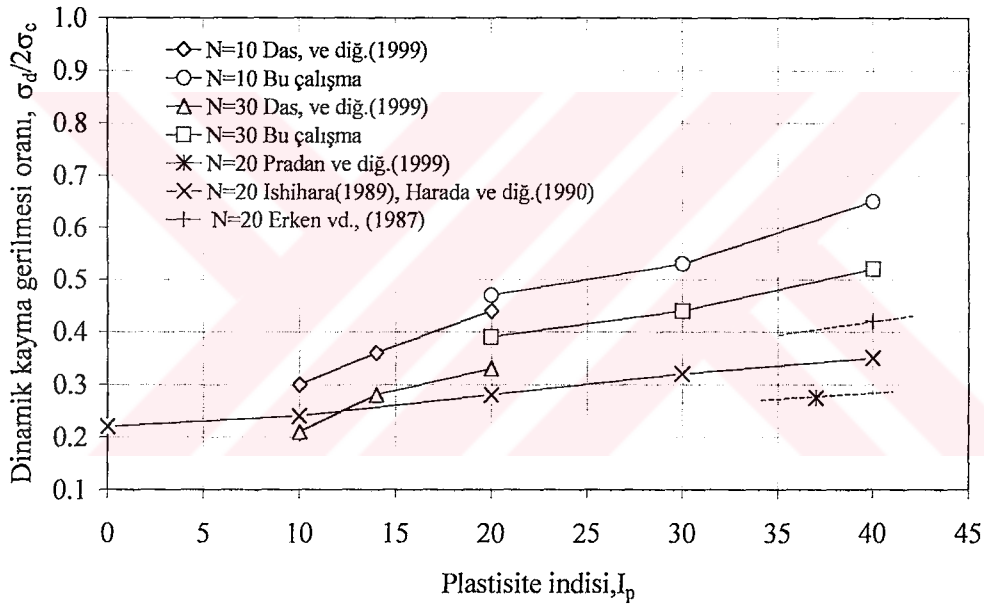
Şekil 4.7 Konsolidasyon basıncı $\sigma_c=100$ kPa olan numunelerde $\epsilon_{da}=\%5$ için plastisitenin DKGÖ üzerinde etkisi.



Şekil 4.8 Konsolidasyon basıncı $\sigma_c=150$ kPa olan numunelerde $\epsilon_{da}=\%2$ için plastisitenin ve kıvamın DKGÖ'ne etkisi.

Aynı Şekilde Das ve diğerleri (1999) tarafından aynı konsolidasyon basıncı ve aynı kıvamdaki hazırlanmış siltli numunelerin $\epsilon_{da}=\%5$ birim boy değişimi seviyesindeki davranışının benzer olduğu görülmektedir. Siltli zeminlerde plastisitenin artması ile sıvılaşmaya karşı direncin arttığı görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan

örselenmemiş suya doygun killi zeminlerin dinamik kayma gerilmesi oranı (DKGO)'nın plastisite ile artışı diğer araştırmacıların değişik plastisitede siltli numuneler üzerinde dinamik üç eksenli deney aletinde yaptığı çalışma ile aynı özellik görülmüştür. Pradan ve diğerleri (1999) Fujinomori kili için plastisitenin $I_p=37$ ve $I_c=0.55$ deki değerinin bu çalışmadaki numunelerden daha az DKGO göstermesi kıvamdan ve frekansın 0.1 Hz. olmasından kaynaklanmaktadır. Ishihara ve diğerleri (1989) ve Harada ve diğerleri (1990) Ariake kili için benzer sonuçları bulmuşlardır. Ariake kili daha yumuşak olduğundan DKGO daha azdır. Böylece farklı çevrim sayılarında plastisite artarken dinamik kayma gerilmesi oranının arttığı görülmektedir.

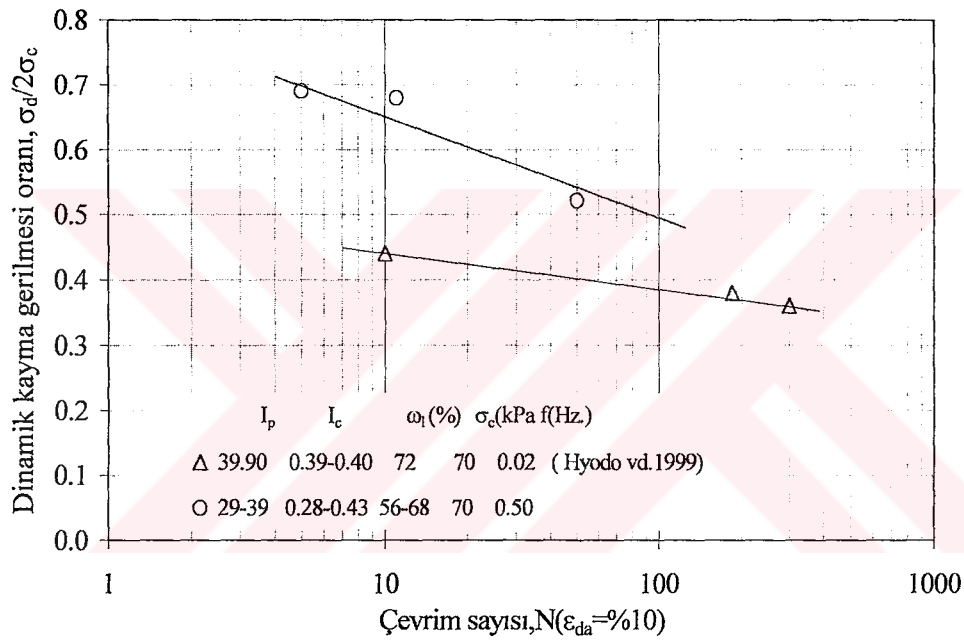


Şekil 4.9 Farklı çevrim sayılarında birim boy değişimi $\epsilon_{da}=\%5$ için plastisitenin DKGO'na etkisi ve diğer araştırmacıların elde ettiği sonuçlarla karşılaştırma yapılması.

4. 4 Frekansın Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi

Frekansın DKGO üzerinde etkisi Bölüm 2'de çeşitli araştırmacıların yaptığı çalışmalarda gösterilmiştir. Şekil 4.10'da bu çalışmada elde edilen veriler Hyodo ve diğerlerinin (1999) örselenmemiş yüksek plastisiteli killi zeminler $\omega_l=\%72$ ve $I_p=39.90$ üzerinde üç eksenli dinamik deney sisteminde yaptıkları deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Plastisite indisleri 40 olan bu numunelerin $\epsilon_{da}=\%10$ deformasyon

seviyelerinde olanları kullanılmıştır. Hyodo ve diğerlerinin (1999) deneyleri 0.02 Hz frekansında yapılmışken bu çalışmadaki deneyler ise 0.50 Hz frekansında yapılmıştır. Yüksek frekanstaki bu çalışmadaki numunelerin plastisitesi düşük olanlar dahi Hyodo ve diğerleri (1999) dan daha yüksek DKGÖ sahiptirler. Bu çalışmada % 10 çift yönlü birim boy değişimi seviyesindeki numunelerin plastisiteleri $I_p=29-39$ aralığındadır. Uygulanan konsolidasyon basınçları $\sigma_c=70$ kPa dır. Daire sembolü ile gösterilen bu çalışmadaki deney sonuçlarının hepsi Hyodo ve diğerlerinin (1999) çalışmasından dinamik mukavemet yönünden daha yüksek sonuç vermişlerdir. Bunun nedeni frekans ve yapısal farklılıktan ileri gelmektedir.

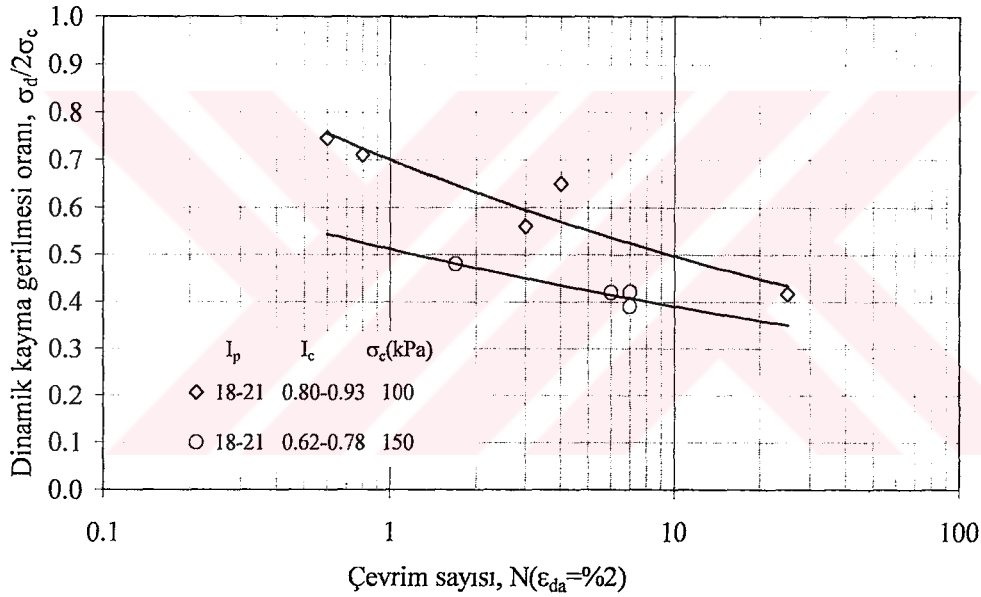


Şekil 4.10 Frekansın DKGÖ'ne etkisi ve Hyodo ve diğerlerinin (1999) deney sonuçları ile karşılaştırılması.

4.5. Konsolidasyon Basıncının Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi

DKGÖ-N ilişkilerinde bilindiği gibi konsolidasyon basıncı arttıkça dinamik kayma gerilmesi oranı azalmaktadır. Bu ilişki Hyodo ve diğerlerinin (1999) yaptığı çalışmada Bölüm 2'de verilmiştir. Konunun pekiştirilmesi amacı ile bu çalışmada kullanılan yaklaşık aynı plastisite aralığı ve kıvama sahip değişik efektif basınçlarda konsolide edilmiş numunelerin davranışı Şekil 4.11 ve 4.12'de gösterilmiştir. Bu grafiklerde de konsolidasyon basıncı arttıkça dinamik kayma gerilmesi oranı (DKGÖ)'nın azaldığı görülmektedir. Şekil 4.11'de iki numune grubundan daha

küçük konsolidasyon basıncına sahip numuneler daha yüksek DKGO vermektedir. Şekil 4.12’de birim boy değiştirme $\epsilon_{da}=\% 5$ seviyelerinde konsolidasyon basıncının etkisi görülmektedir. Konsolidasyon basıncı yüksek numunelerde aynı birim boy değişimi seviyesine ulaşmak için daha az çevrim sayısına gereksinme duyulmakta ve bu deney sonuçları DGKO-N eksen takımında daha solda kalmaktadır. Bunun nedeni konsolidasyon basıncı yüksek olan numunelere aynı $DKGO=\sigma_d/2\sigma_c$ için daha fazla dinamik gerilme uygulandığından daha az çevrim sayısında aynı birim boy değişimine ulaşmaktadırlar. Şekil 4.11 ve 4.12’de kıvamı $I_c=0.62-0.78$ olan numuneler kıvamı 0.80-0.93 olan numunelerden daha yumuşak olduklarından DKGO ları da daha az olmaktadır.

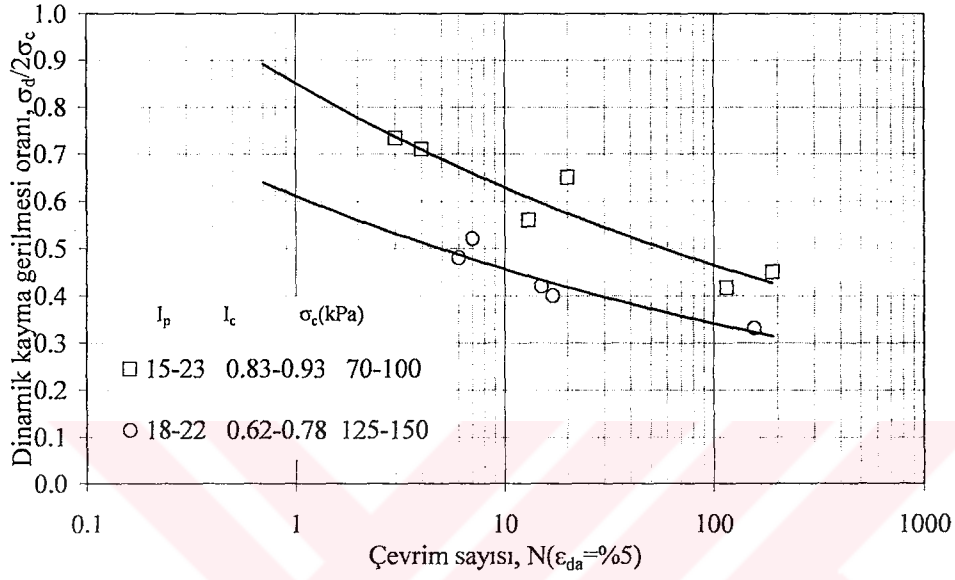


Şekil 4.11 Birim boy değişimi $\epsilon_{da}=\%2$ için konsolidasyon basıncının dinamik kayma gerilmesi oranı DKGO’na etkisi.

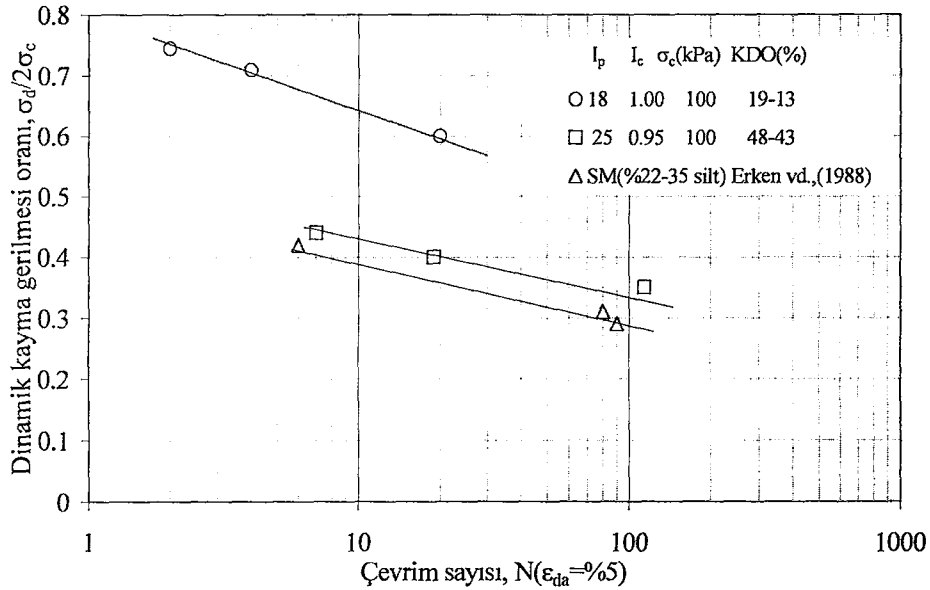
4.6 Kaba Dane Oranının Dinamik Kayma Gerilmesi Oranına Etkisi

Kaba dane oranının DKGO üzerinde etkisini göstermek amacı ile plastisiteleri $I_p=18-25$ aralığında değişen, kıvamı $I_c=0.95-1.00$ arasında değişen, 100 kPa konsolidasyon basıncı altındaki numunelerin değişik kaba dane oranlarına göre DKGO-N değişimi Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Plastisitesi biraz düşük olmasına rağmen %19-13 kaba dane içeren numunelerin, %48-43 kaba dane içeren numunelerden daha yüksek dinamik kayma gerilmesi oranı gösterdikleri görülmektedir. Aynı grafikte Erken ve

diğerleri (1988) tarafından yapılan üç eksenli dinamik deneysel çalışmada silt içeren kumlu numunelerin benzer ilişkisi görülmektedir. Suyu doymun ince daneli zeminlerde kum oranının artması boşluk suyu basıncının daha hızlı artmasına neden olmakta ve bundan dolayı oluşan yumuşama sonucu deformasyonlar artmaktadır.



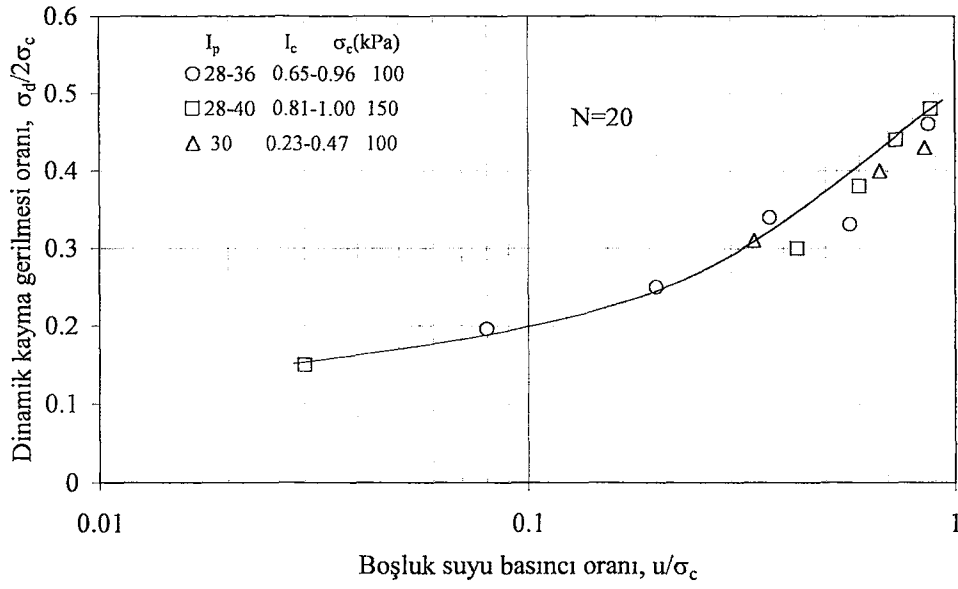
Şekil 4.12 Birim boy değişimi $\epsilon_{da}=\%5$ için konsolidasyon basıncının dinamik kayma gerilmesi oranı (DKGO)'ya etkisi.



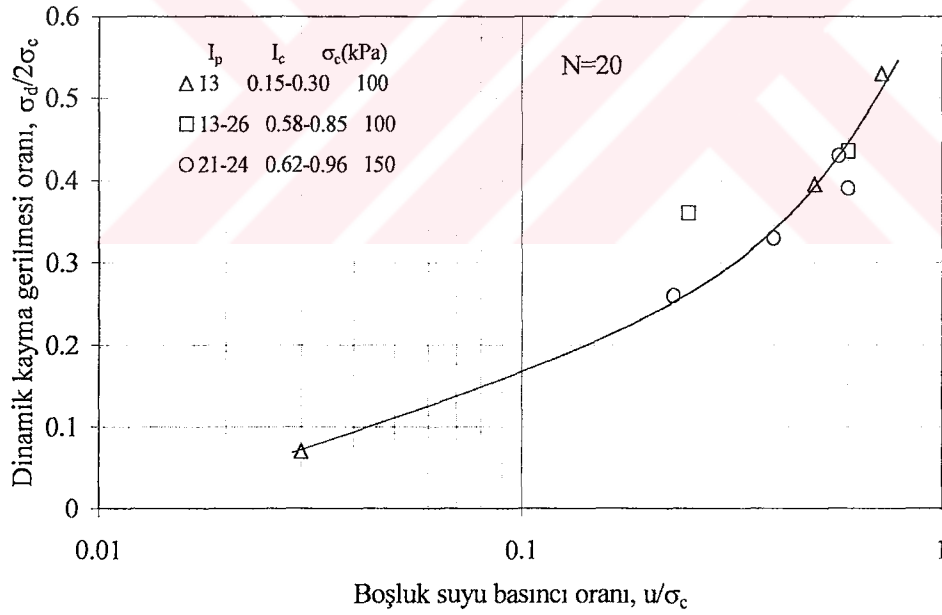
Şekil 4.13 Birim şekil boy değişimi, $\epsilon_{da}=\%5$ için kaba dane oranının dinamik kayma gerilmesi oranına etkisi.

4.7 Dinamik Kayma Gerilmesi Oranının Boşluk Suyu Basıncına Etkisi

İnce daneli zeminlerin tekrarlı yükler altında mukavemetini etkileyen en önemli parametrelerden birisi de boşluk suyu basıncı artışıdır. Tekrarlı gerilmeler etkisi altında suya doymun killi zemin numuneleri üzerinde yapılan deneylerde çevrim sayısı arttıkça boşluk suyu basıncı da artmaya devam eder. Bilindiği gibi birim boy değişimlerinin artması ile numunede bir yumuşama meydana gelir ve bunun sonucunda boşluk suyu basıncı da artarak efektif gerilmeler azalır. Artan boşluk suyu basıncının etkisi ile efektif gerilmeler azalmaya başlar ve zeminde mukavemet kaybı meydana gelir (Harden ve Back 1968, Harden ve Drnevich 1972, Castro ve Chistian 1976, Kautsoftas 1978, Güler 1980, Ansal ve Erken 1981 ve O'Reilly ve diğerleri 1991). Bu çalışmada ise boşluk suyu basıncı oranı ($BSBO=u/\sigma_c$) ile dinamik kayma gerilmesi oranı ($DKGO=\sigma_d/2\sigma_c$) arasında değişik deney numunelerine göre nasıl bir ilişki vardır sorusu yanıtlanmaya çalışılmıştır. Şekil 4.14'de plastisite $I_p=28-40$ aralığında, kıvamları ise $I_c=0.23-1.00$ aralığında değişen $\sigma_c=100$ ve 150 kPa basınç altında konsolide edilmiş CH numunelerin $N=20$ çevrim sonundaki BSBO-DKGO davranışı görülmektedir. Şekil 4.15'de ise plastisite $I_p=13-24$ aralığında, kıvam $I_c=0.15-0.96$ aralığında değişen $\sigma_c=100$ ve 150 kPa basınç altında konsolide edilmiş numunelerin aynı koşullardaki davranışı görülmektedir. Boşluk suyu basıncının artması DKGO na bağlı olarak artmaktadır. Kıvam ve konsolidasyon basıncındaki farklılıklar $N=20$ çevrim sonucundaki boşluk suyu basıncı artışını az da olsa etkilemektedir. Bu durum Şekil 4.14'den görülmektedir. Aynı ilişki Şekil 4.15'de $I_p=13-25$ ve $I_c=0.15-0.96$ gibi çok farklı kıvamlardaki CL numunelerde de görülmektedir. Bilindiği gibi dinamik gerilmeler altında yapılan üç eksenli basınç deneylerinde boşluk suyu basıncı artışında frekansın önemli ölçüde etkisi vardır. Yüksek frekanslı deneylerde boşluk suyu basıncı daha düşük ölçülmektedir. Eğer deney biter bitmez drenajlar açılmadan bir süre beklenirse boşluk suyu basıncının dengeli değerine ulaştığı görülebilir. Şekil 4.14 ve 4.15'den görüldüğü gibi 20 çevrimlik süre sonunda boşluk suyu basıncı artışı değerleri plastisitenin $I_p=13-40$ aralığı ve kıvamın $I_c=0.23-1.00$ aralığında olması halinde birbirlerine yakın olmaktadır. Uygulanan dinamik gerilme frekansının $f=0.50$ Hz. alınması $N=20$ çevrim sonunda 40 saniyelik süreye karşılık gelmektedir. Yukarıdaki sonuçlara göre $N=20$ çevrimlik süre sonunda boşluk suyu basıncı artışı davranışında uygulanan gerilmenin zemin özelliklerinden daha etkili olduğu denilebilir.



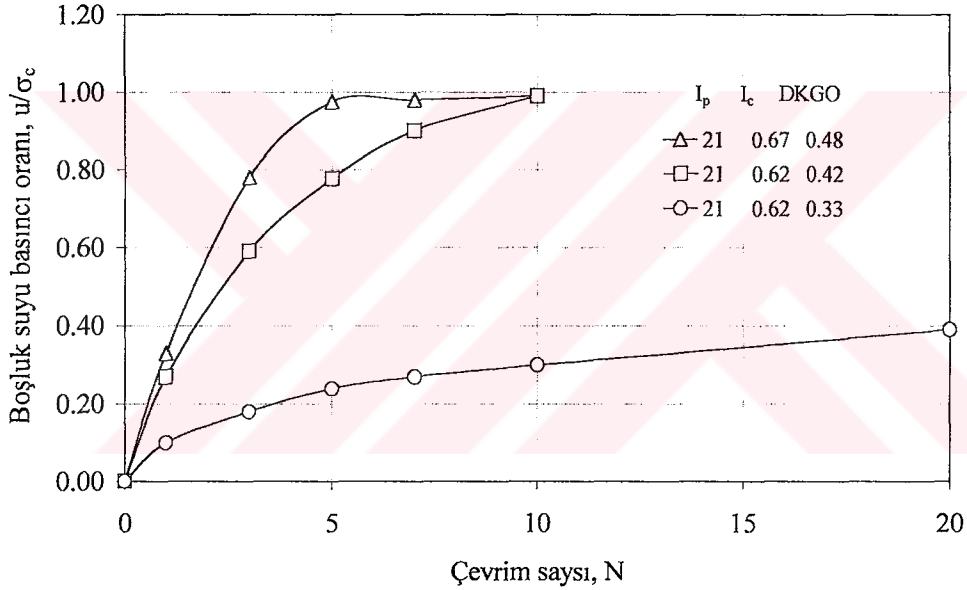
Şekil 4.14 Yüksek plastisiteli ($I_p=28-40$) killerde $N=20$ için dinamik kayma gerilmesi oranı (DKGO), boşluk suyu basıncı oranı (BSBO) değişimi.



Şekil 4.15 Düşük plastisiteli ($I_p=13-26$) killerde $N=20$ için dinamik kayma gerilmesi oranı (DKGO), boşluk suyu basıncı oranı (BSBO) değişimi.

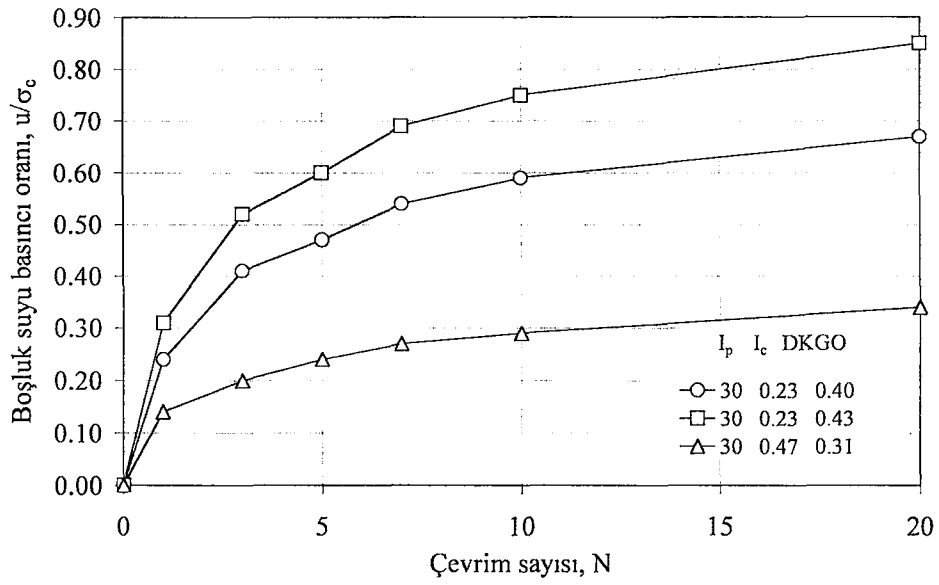
Dinamik kayma gerilmesi oranının boşluk suyu basıncı üzerindeki etkisini göstermek amacı ile aynı özelliklere sahip farklı DKGO etkisinde $\sigma_c=150$ kPa basınç altında konsolide edilmiş düşük plastisiteli numunelerin BSBO çevrim sayısı ilişkileri Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi $DKGO=0.33$ uygulanan

numunede boşluk suyu basıncı sınırlı kalırken diğer iki numunede uygulanan DKGO yüksek olması nedeni ile $DKGO=0.48$ olan numunede $N=5$ çevrimden sonra efektif gerilmeye yakın bir değere ulaşmış olup numunenin büyük mukavemet kaybetmesine neden olmuştur. Bu numunelerin düşük plastisiteli siltli kil olmaları ise boşluk suyu basıncının daha yüksek değerlere çıkmasına neden olmuştur. Şekil 4.16’da dikkat edilmesi gereken bir diğer özellik de uygulanan DKGO’ları 0.33, 0.42 ve 0.48 olarak seçilmiştir. Bu oranlardan 0.42 ve 0.48 değerler 0.33 dan %27 ve %45 büyüktür. Aynı şekilde $N=5$ çevrim sonundaki BSBO değerleri ise sırası ile 0.37 den 0.74 ve 0.98’e çıkarak %100 ve % 162 oranında artmıştır. Bu ise boşluk suyu basıncı artışının gerilme artışına bağlı olarak daha hızlı arttığını göstermektedir.



Şekil 4.16 Düşük plastisiteli ($I_p=21$) olan killerde dinamik kayma gerilmesi oranı (DKGO)'nın boşluk suyu basıncı oranı (BSBO) üzerinde etkisi.

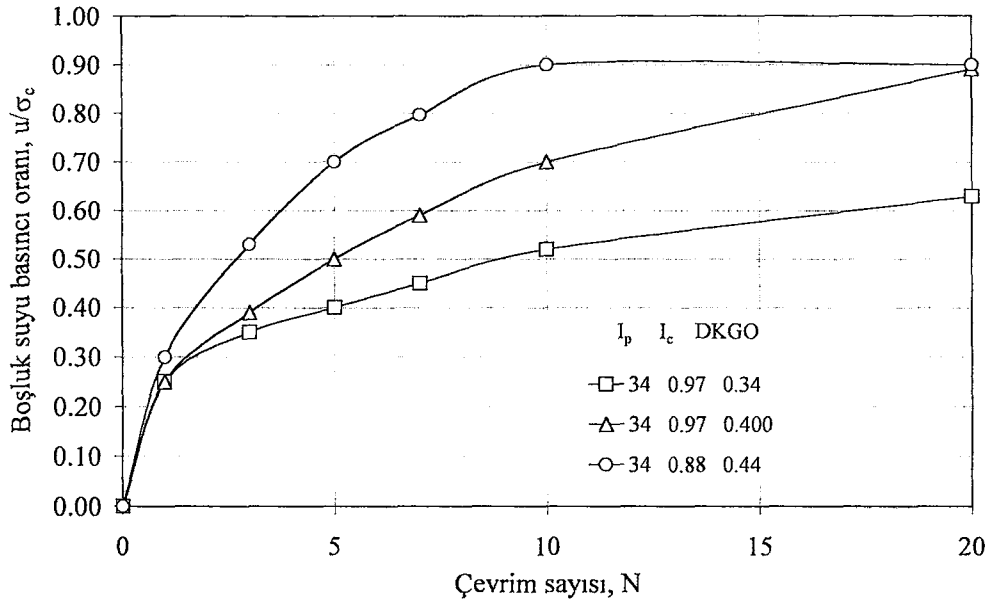
Şekil 4.17’de ise 100 kPa basınç altında konsolide edilmiş yüksek plastisiteli killerin değişik gerilme seviyeleri altındaki boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkileri görülmektedir. Burada ise uygulanan DKGO’ları 0.31, 0.40 ve 0.43 dür. Uygulanan bu 0.40 ve 0.43 değerleri 0.31 değerinden %29 ve %39 fazladır. Yine yukarıdaki gibi BSBO değerleri ise 0.24 den 0.47 ve 0.60 değerlerine çıkarak %96 ve %150 oranında artmıştır. Artış hızı bakımından $N=5$. çevrim sonundaki değerler birbirine yakın görülmektedir.



Şekil 4.17 Yüksek plastisiteli ($I_p=30$) olan killerde dinamik kayma gerilmesi oranı (DKGO)'nın boşluk suyu basıncı oranı (BSBO) üzerinde etkisi.

Dinamik kayma gerilmesi oranı artışının kumlu yüksek plastisiteli killerde boşluk suyu basıncını ne şekilde etkilediğini göstermek amacı ile yaklaşık %48-%49 kum oranına sahip yüksek plastisiteli killerin yaklaşık yukarıdaki gerilme oranı etkisindeki (DKGO=0.34-0.40-0.44) boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı ilişkileri ise Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Şekil 4.18'de görüldüğü gibi DKGO=0.40 ve 0.44 oranları 0.34 değerinden %18 ve %29 daha büyüktür. Bu esnadaki boşluk suyu basıncı $N=5$ çevrim için ise 0.40 dan 0.50 ve 0.70 e çıkarak %25 ve %75 artmıştır.

Bu sonuçlardan boşluk suyu basıncı artışının gerilme seviyesi artışına bağlı olarak üstel arttığı söylenebilir. Düşük çevrim sayılarında boşluk suyu basıncı artış hızları birbirine yakın görülmektedir. Aynı gerilme oranlarında yüksek çevrim sayılarına çıkıldığında gerilme oranı ve zemin özelliklerine bağlı olarak büyük boşluk suyu basıncı artışları meydana gelmektedir. Örneğin Şekil 4.16'da DKGO=0.42 uygulanan numunede 10. çevrimde boşluk suyu basıncı artışı oranı 1'e yaklaşarak efektif gerilmenin sıfıra ulaşmasına neden olurken, Şekil 4.17'de yaklaşık aynı gerilme seviyesi DKGO=0.43 olan numunede 20. çevrimde boşluk suyu basıncı artış oranı 0.85 olmakta ve efektif gerilme sıfıra ulaşmamaktadır.

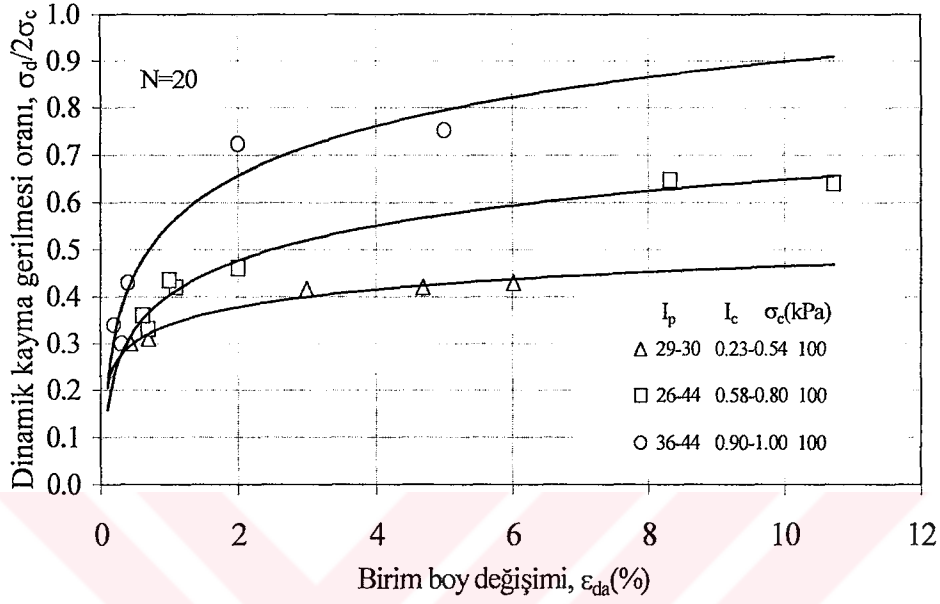


Şekil 4.18 Yüksek plastisiteli ($I_p=34$) olan kumlu killerde dinamik kayma gerilmesi oranı (DKGO)'nın boşluk suyu basıncı oranı (BSBO) üzerinde etkisi.

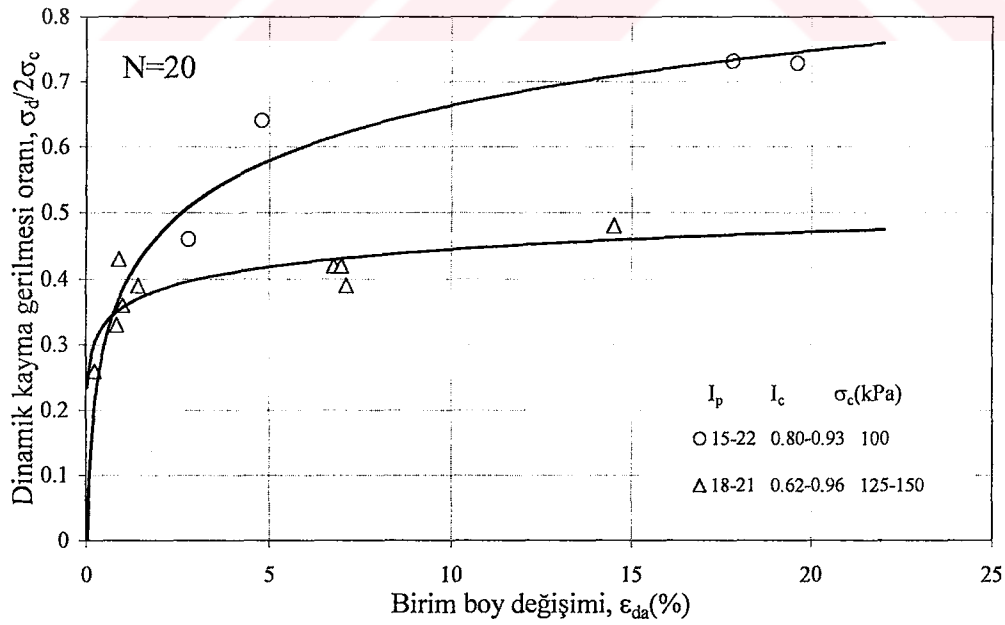
4.8 Dinamik Kayma Gerilmesi Oranının Birim Boy Değişimine Etkisi

$N=20$ çevrime karşılık gelen farklı DKGO etkisindeki farklı plastisite ve kıvamda sahip numunelerin $DKGO-\epsilon_{da}$ değişimleri Şekil 4.19 ve 4.20'de oluşturulmuştur. Burada $N=20$ çevrim sonunda oluşan değerlerin alınmasının nedeni büyük depremlerde $M=7.5$ büyüklüğündeki değerlerin $N=20$ çevrime karşılık gelmesindendir (Seed ve diğerleri, 1976). Şekil 4.19'da $\sigma_c = 100$ kPa basınç altında konsolide edilmiş $I_p=26-44$ değişik kıvamdaki numunelerin DKGO birim boy değişimi ilişkisi görülmektedir. Küçük genliklerde DKGO değerlerinin numuneden numuneye çok fazla farklılık göstermediği görülmektedir. Genlikler arttıkça zemin kıvamının etkisi görülmektedir. Zemin kıvamı arttıkça DKGO değerleri artmaktadır. Şekil 4.20'de ise $\sigma_c=100$ kPa ve 150 kPa lık basınçlar altında konsolide edilmiş, $I_p=15-22$ plastisite aralığında $I_c=0.62-0.93$ kıvamlardaki zemin numunelerinin DKGO birim boy değişimi ilişkisi görülmektedir. Burada farklı kıvamda ve konsolidasyon basıncına sahip numunelerden daire ile sembolize edilenler daha yüksek DKGO'na sahiptirler. Bunun nedeni bu numunelerin diğerlerinden biraz daha katı olmalarından ve konsolidasyon basıncı farklarından ileri gelmektedir. Sonuç olarak $N=20$ çevrimde

farklı kıvam plastisite ve konsolidasyon basıncına sahip numunelerin DKGÖ birim boy değişimi ilişkilerinden DKGÖ arttıkça birim boy değişiminin numune özelliklerine bağlı olarak değişik oranlarda arttığı görülmektedir



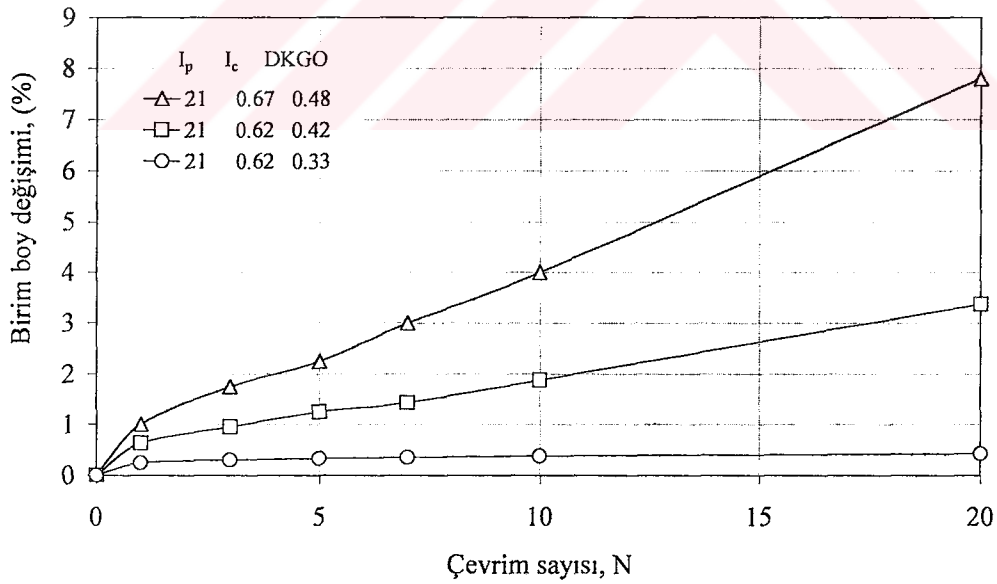
Şekil 4.19 N=20 çevrim için yüksek plastisiteli ($I_p=26-44$) killerde DKGÖ-birim boy değişimi (ϵ_{da}) ilişkisi.



Şekil 4.20 N=20 çevrim için düşük plastisiteli ($I_p=15-22$) killerde DKGÖ-birim boy değişimi (ϵ_{da}) ilişkisi.

Uygulanan farklı dinamik gerilme genlikleri ile birim boy değişimi-çevrim sayısı ilişkileri Şekil 4.21-4.22 ve 4.23’de gösterilmiştir. Burada daha yukarıda anlatılan boşluk suyu basıncı oranı çevrim sayısı (BSBO-N) etkisini göstermek için kullanılan numuneler seçilmiştir.

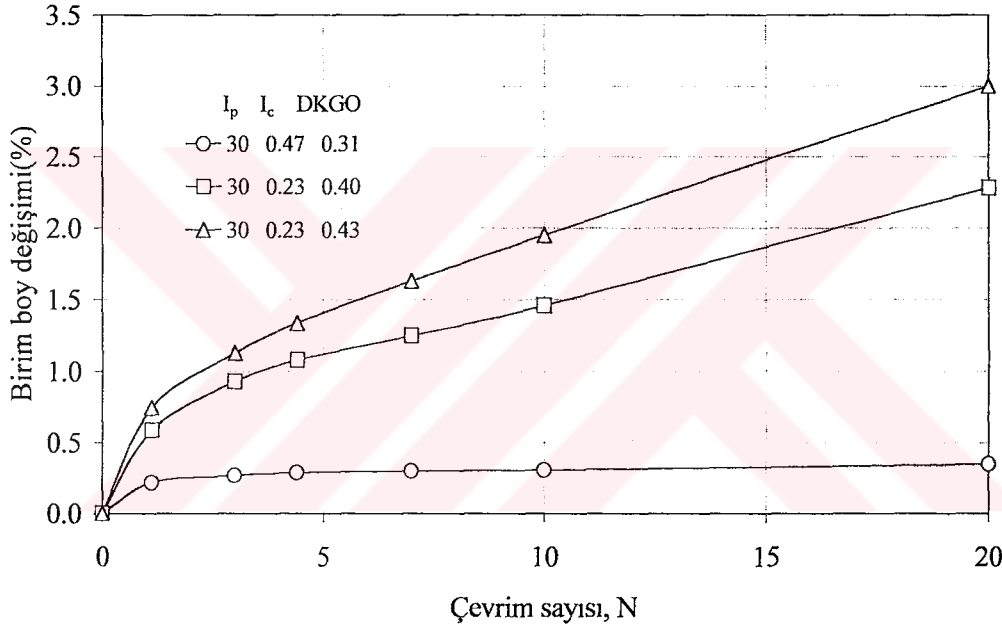
Şekil 4.21 de aynı sondaj kuyusundan alınmış aynı plastisite kıvam ve konsolidasyon basıncına sahip DY07-DY08-DY09 nolu numunelerin birim boy değişimi çevrim sayısı ilişkisi üzerinde DKGO’nun etkisi görülmektedir. DKGO’nun 0.33 den 0.42 ve 0.48 artırılması %27 ve %45 lik bir artışa neden olurken bu sırada N=20 çevrim için düşey pozitif en büyük birim boy değişimleri %0.23 den %2.7 ve %8’e çıkarak 10 kat ve 34 kat artmaktadır. Bu ise DKGO artışı karşısında birim boy değişimi artışının üstel olarak çok büyük değerlere ulaştığını göstermektedir. Aynı değerlere N=10. çevrim için bakarsak DKGO 0.33 dan 0.42 ye çıkarken deformasyon 4 kat, gerilme seviyesi 0.48 olurken ise 16 kat artmaktadır. Bu olay depremin büyüklüğünün biraz artması sonucu oluşan deformasyonların çok miktarda artacağını ve büyük hasar oluşacağını göstermektedir.



Şekil 4.21 Düşük plastisiteli killerde DKGO-birim boy değişimi ilişkisi.

DKGO’nun etkisini yüksek plastisiteli yumuşak numunelerde göstermek amacı ile DS55-DS56-DS57 nolu aynı sondaj kuyusundan aynı derinlikten alınmış fiziksel ve indeks özellikleri aynı deney numunelerinin birim boy değişimi çevrim sayısı

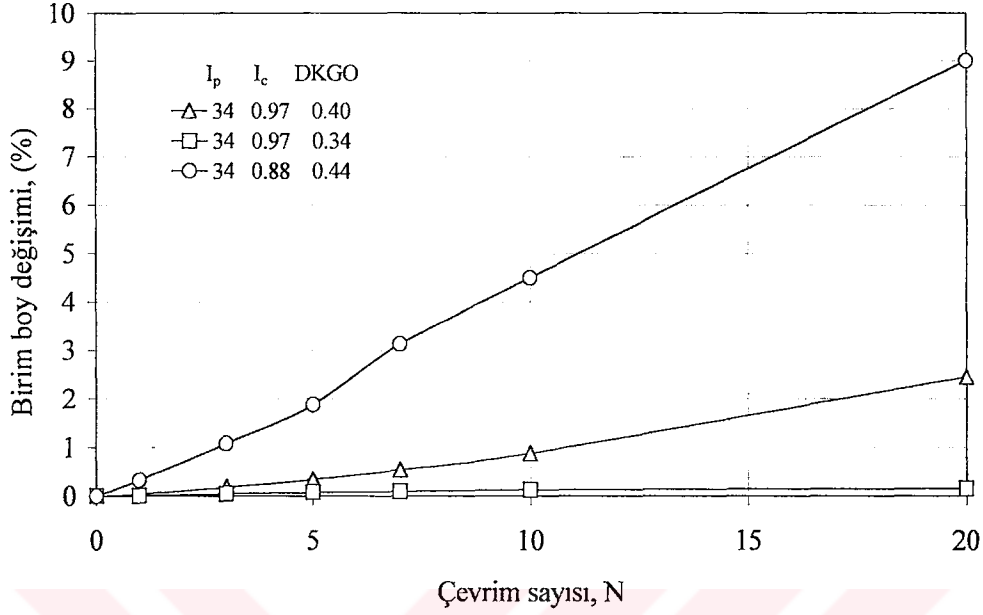
ilişkileri Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi $N=20$ için DKGO 0.31 den 0.40 ve 0.43 e çıkarılması %29 ve %39 oranında bir artış iken birim boy değişimlerinde sırası ile %0.63 den %3.37 ve %4.32 değerlerine ulaşmaktadır. Bu %0.63 den %3.37 ye çıkarken 4 kat, %4.32 ye çıkarken ise 6 kat bir artışa tekabül etmektedir. Aynı durum Şekil 4.21’de yaklaşık aynı DKGO düşük plastisiteli killerde 10 misli ve 34 misli artmıştı. $N=10$. çevrimde aynı değerlendirme yapılırsa düşey deformasyon 0.50 den 1.85 ve 2.36 değerlerine ulaşarak 3 kat ve 4 kat artmaktadır. Düşük plastisiteli killerde bu oran 4 kat ve 16 kat civarındadır. Burada düşük plastisiteli killerin daha katı olsalar dahi daha yüksek deformasyon gösterdikleri görülmektedir.



Şekil 4.22 Yüksek plastisiteli killerde DKGO-birim boy değişimi ilişkisi.

DKGO’nun yüksek plastisiteli kumlu numunelerde nasıl bir etki yaptığını göstermek için Şekil 4.23 oluşturulmuştur. Şekil 4.23’de 0.34, 0.40 ve 0.44 DKGO %43-47 oranında kum içeren numunelere uygulanmıştır. Bu numunelerin ince daneli kısımlarının plastisiteleri $I_p=34$ olarak bulunmuştur. DKGO 0.34 den 0.40 ve 0.44 e çıkarılırken %17 ve %29 artırıldığı zaman $N=20$ çevrimdeki deformasyonlar ise DKGO=0.34 olan numunede %0.16 iken 0.40 uygulanan numunede %6 ve 0.44 uygulanan numunede %9 civarındadır. Birim boy değişimi $N=20$ çevrim için DKGO=0.34 uygulanan numune esas alındığında DKGO=0.40 uygulanan numunede 37 kat fazla iken DKGO=0.44 uygulanan numunede 56 kat daha büyüktür. DKGO

birim boy değişimi etkisi incelendiğinde en büyük deformasyon artışının kumlu olan numunelerde meydana geldiği görülmektedir.

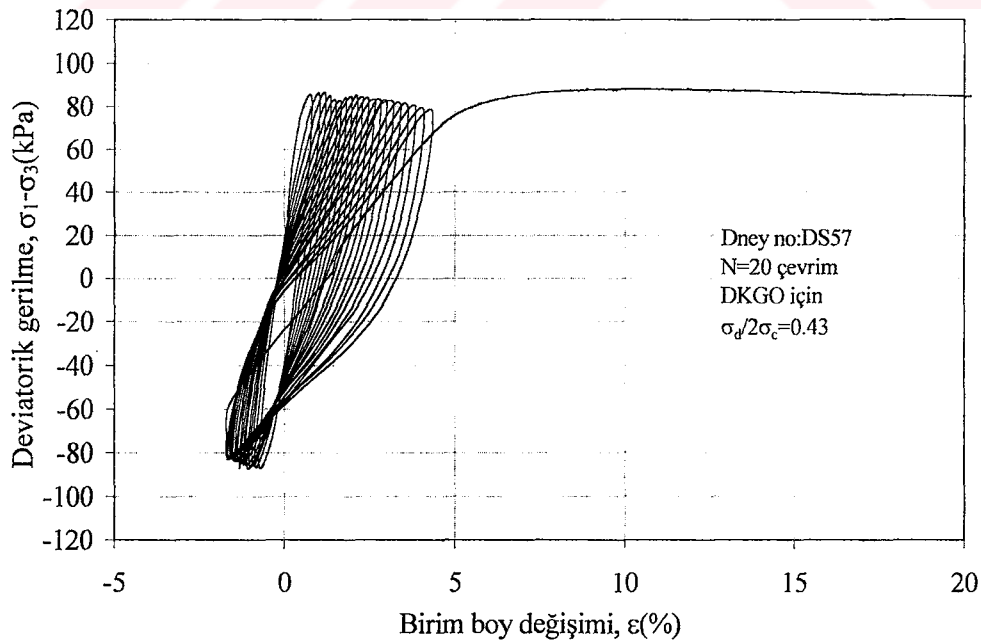


Şekil 4.23 Kumlu killerde DKG0'nın birim boy değişimine etkisi.

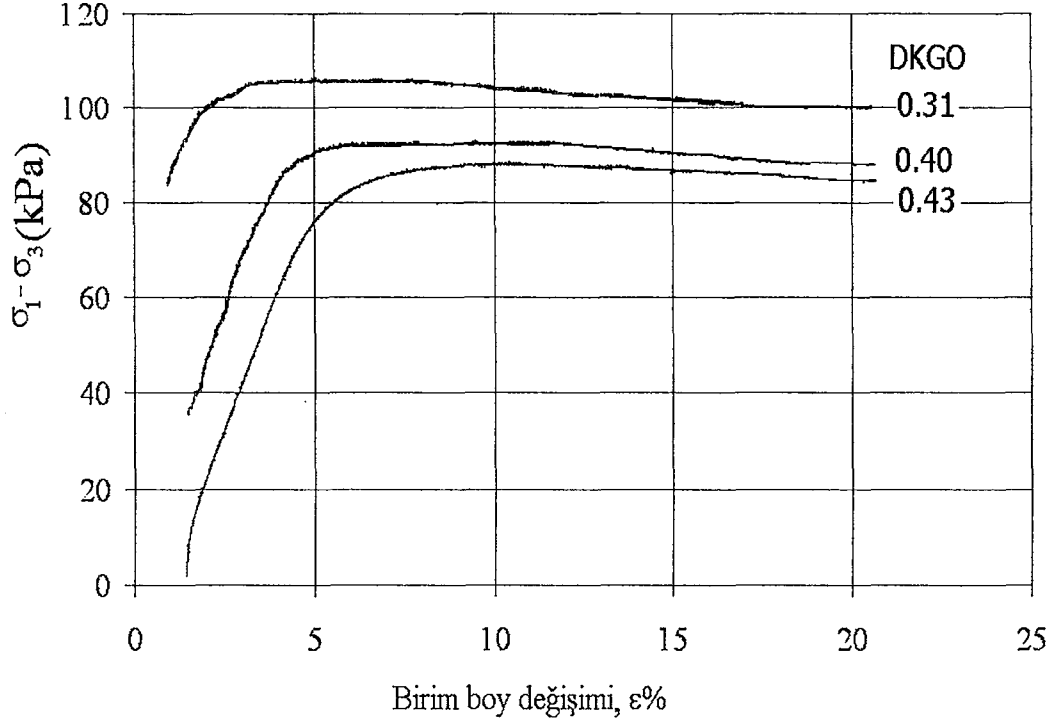
4.9 Dinamik Ön Yüklemenin Statik Mukavemet Azalım Oranı Üzerinde Etkisi

Deneyler bölümünde sonuçları verilmiş olan bir grup numune üzerinde üç eksenli basınç deney sisteminde deformasyon kontrollu statik yükleme yapılmış ve kullanılan numunelerin deney sonuçları Tablo 3.8'de verilmiştir. Diğer grupta önce N=20 çevrimlik bir dinamik yükleme yapılmış ve hemen ardından hiç ara vermeden statik yüklemeye geçilmiştir. Bu şekilde yapılan 33 adet deney sonuçları Bölüm 3'de detaylı olarak Tablo 3.8'de verilmiştir. Burada Şekil 4.24'de $I_p=30$ $I_c=0.23$ ve $\sigma_c=100$ kPa uygulanan DS57 nolu numunenin N=20 çevrim dinamik ve ardından hiç ara vermeden yapılan deformasyon kontrollu statik yüklemeli drenajsız deney sonuçları gösterilmiştir. Bu deneyde önce N=20 çevrim $f=0.50$ Hz. frekansında $\sigma_d/2\sigma_c(\text{DKGO})=0.43$ olarak seçilen yük uygulanmıştır. Bu gerilme altında numune ilk çevrimden itibaren boşluk suyu basıncı ve deformasyonlar artmaya başlamış bunun sonucunda oluşan yumuşama ile gerilme deformasyon eğrisinde görülen ilmikler yatıklaşmıştır. N=17 çevrime gelindiğinde düşey çift yönlü birim şekil değiştirme genliği $\epsilon_{da}=\%5$ değerine ulaşmış ve bu sırada boşluk suyu basıncı oranı ise u/σ_c (BSBO)=%83 değerine kadar çıkmıştır. N=20 inci çevrimde dinamik

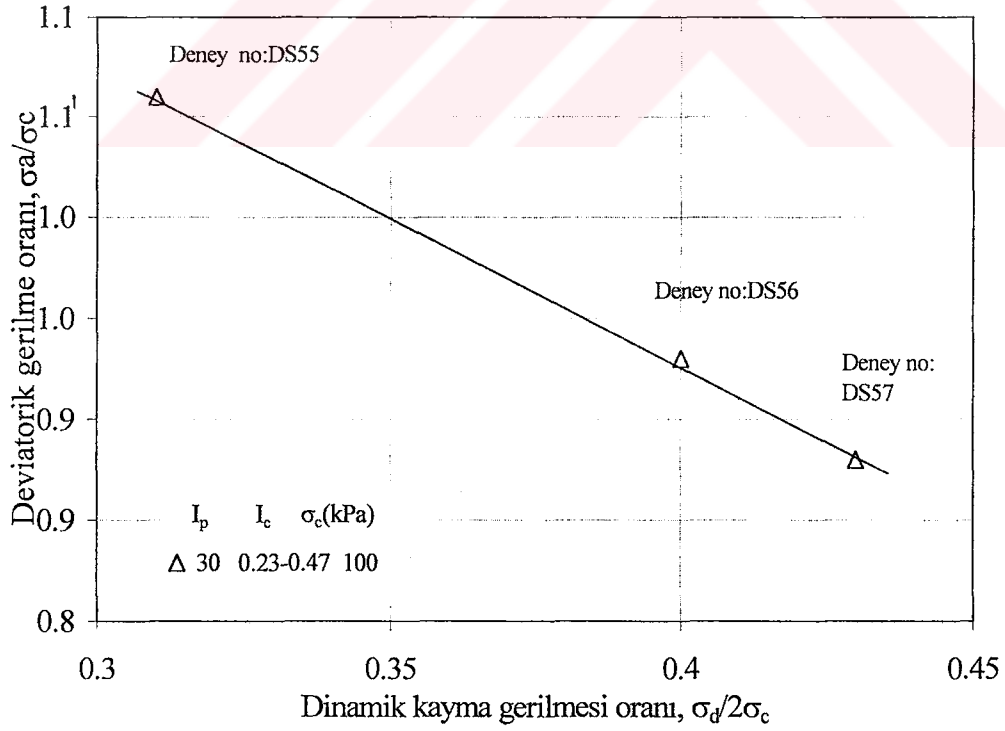
yüklemeye son verilip drenajlar açılmadan ve boşluk suyu basıncı sönümlenmeden statik deformasyon kontrollü deney 0.5 mm/dak.(%0.5/dak.) hızında yapılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi oldukça yumuşayan numunede %20 lik deformasyona uğrayıncaya kadar yapılan statik yükleme deneyinde deviatorik gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$)=88 kPa olarak elde edilmiştir. Şekil 4.25’de ise $I_p=30$, $I_c=0.23-0.47$ ve $\sigma_c=100$ kPa olan DS55-DS56-DS57 nolu numuneler üzerinde N=20 çevrimlik DKGO ları sırası ile 0.31-0.40 ve 0.43 uygulandıktan sonra yapılan statik deneyde elde edilen gerilme deformasyon ilişkileri görülmektedir. DKGO=0.31 uygulanan numunenin en büyük deviatorik gerilmesi ($\sigma_1 - \sigma_3$)=105 kPa, DKGO=0.40 olarak uygulanan DS56 nolu numunenin ise ($\sigma_1 - \sigma_3$)=93 kPa dır. Deviatorik gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$)= σ_a ile gösterilmiş ve konsolidasyon basıncı σ_c ye göre normalize edilmiştir. Bu sonuçlardan faydalanarak N=20 çevrim uygulanan DKGO’nın daha sonra yapılan statik deneyde nasıl bir etki yaptığının gösterilmesi amacı ile statik deney sonu konsolidasyon basıncına göre normalize edilmiş kayma mukavemeti oranı (σ_a / σ_c)’ye göre değişimi incelenmiştir. Şekil 4.26’da aynı sondaj kuyusundan alınmış yukarıda açıklanan dinamik yüklemeler etkisinde kalmış DS55-DS56-DS57 nolu numunelerin deney sonuçlarına dayanılarak DKGO’nın dinamik sonrası normalize kayma mukavemeti oranı (σ_a / σ_c) nasıl etkilendiği gösterilmiştir.



Şekil 4.24 DS57 deneyin dinamik gerilme birim boy değişimi özellikleri.

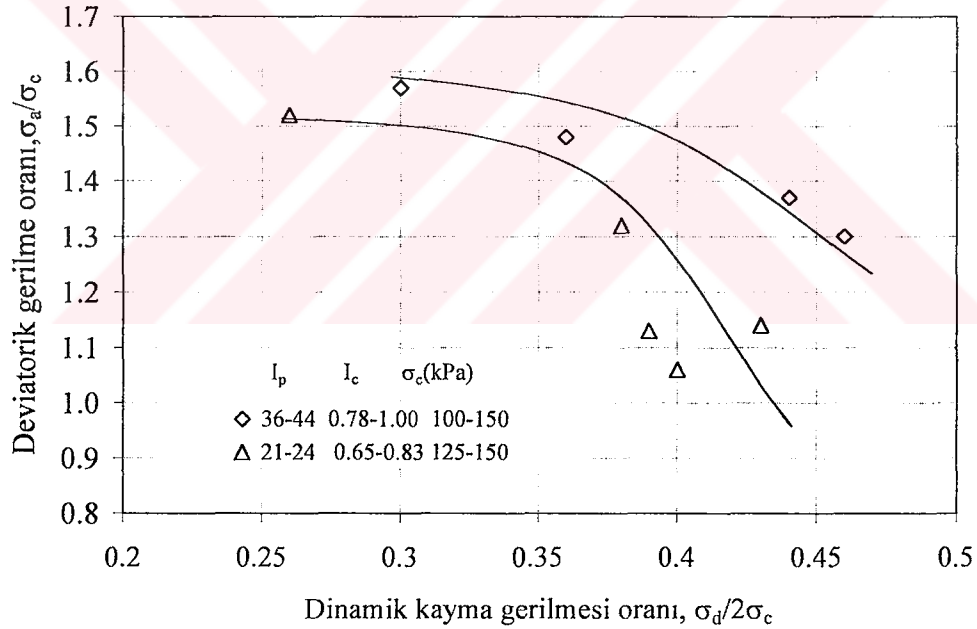


Şekil 4.25 DS55-DS56-DS57 nolu deneylerin dinamik yükleme sonra gerilme birim boy değışimi davranışları.



Şekil 4.26 $I_p=30$ olan ve 100 kPa basınç altında konsolide edilen numunelerde mukavemet kaybı.

Şekil 4.26'dan da görüldüğü gibi $N=20$ çevrimlik süre ile uygulanan DKGO değeri arttıkça dinamik sonrası statik deneyde elde edilen kayma mukavemeti oranı olan σ_a/σ_c azalmaktadır. Değişik plastisite kıvam ve konsolidasyon basınçlarına sahip numunelerin ön dinamik yüklemelerine ve daha sonra statik deformasyon kontrollü deney sonuçlarına göre oluşan mukavemet kayıpları Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Bu sonuçlardan mukavemet kaybını zemin indeks özellikleri ve uygulanan dinamik yükten nasıl etkilendiği gösterilmeye çalışılmıştır. Bütün grafiklerde kullanılan ön dinamik yükleme DKGO ları ve daha sonra yapılan statik yükleme deneyi mukavemet değerleri Bölüm 3 deki Tablo 3.8'den alınmıştır. Şekil 4.27'de DKGO arttıkça dinamik yükleme sonrası mukavemet oranının azaldığı görülmektedir. Yaklaşık aynı kıvam ve aynı konsolidasyon basıncına sahip numunelerden plastisitesi yüksek olanlarda mukavemet kaybı daha geç meydana gelirken düşük plastisiteli numunelerde mukavemet kaybı daha önce meydana gelmektedir.

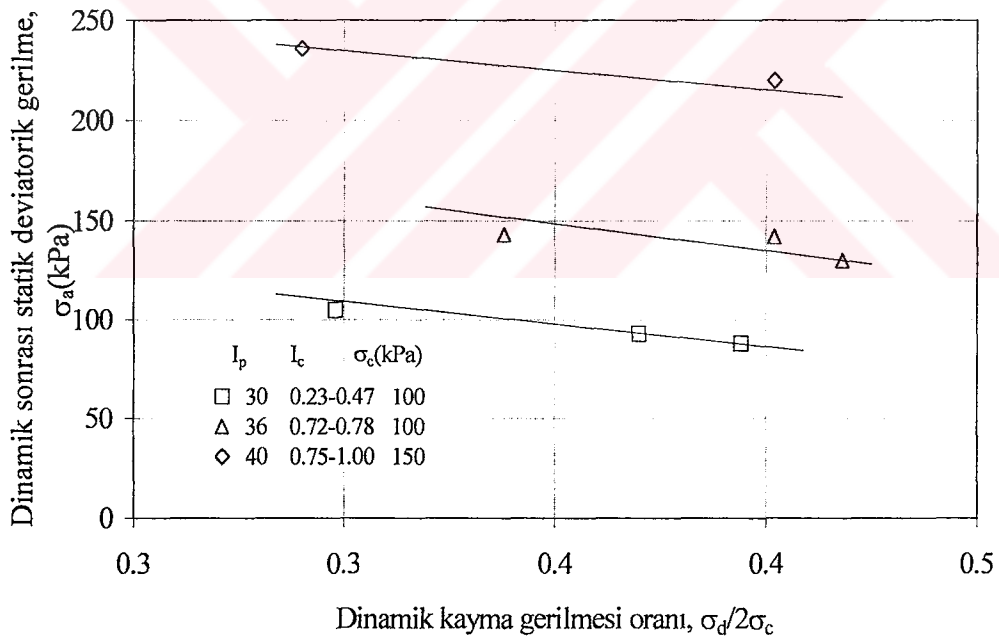


Şekil 4.27 Ön dinamik yüklemenin mukavemet azalmasına etkisinin değişik numunelerde gösterilmesi etkisi.

Şekil 4.28'de $I_p=30-40$ arasında olan killere ait dinamik deney sonrası statik deneyde elde edilen %20 lik birim boy değişimi değerindeki deviatorik gerilme ile (DKGO) arasındaki ilişki gösterilmektedir. Burada da hem kıvamın hemde konsolidasyon basıncının etkisi görülmektedir. Kıvamı yüksek olan numuneler en yüksek mukavemeti göstermektedirler. Plastisitesi $I_p=40$, $I_c=0.75-1.00$ ve konsolidasyon

basıncı $\sigma_c=150$ kPa olan numuneler en yüksek mukavemeti göstermektedir. Konsolidasyon basıncı $\sigma_c=100$ kPa olan numunelerden plastisitesi $I_p=30$, $I_c=0.23-0.47$ olanlar ise en düşük mukavemeti göstermektedir.

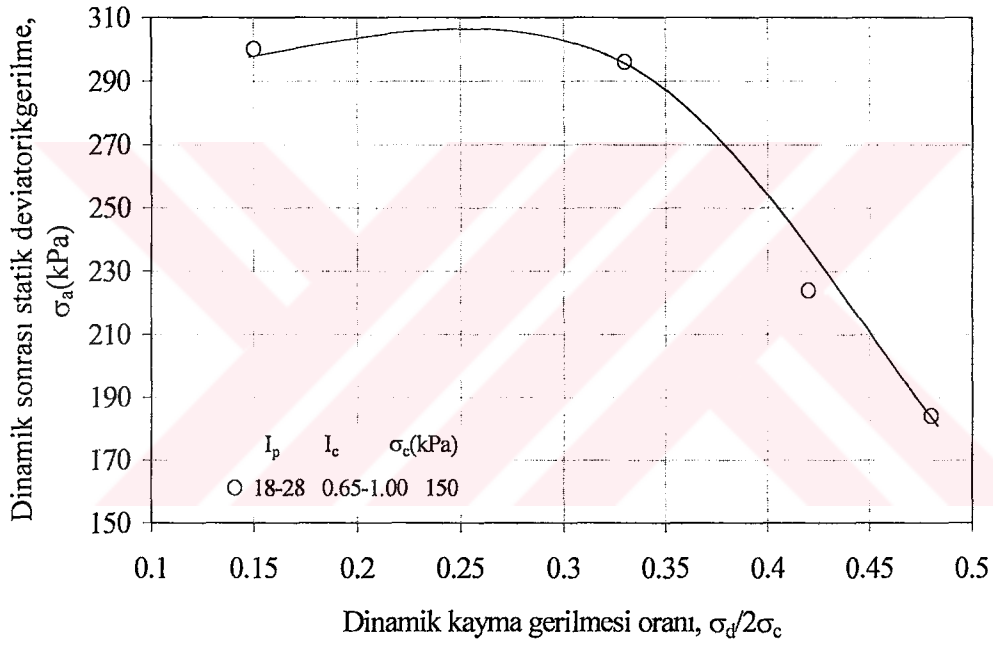
Mukavemet kaybını daha belirgin bir şekilde göstermek amacı Şekil 4.29 düzenlenmiştir. Şekil 4.29'da numuneler üzerinde çok geniş bir aralıkta $N=20$ çevrimlik ön DKGO uygulanmış ardından yukarıdaki gibi statik deney yapılarak %20 birim boy değişimi civarındaki deviatorik gerilme hesap edilmiştir. Gerilme oranı 0.15-0.30 civarında iken mukavemette bir azalış görülmezken 0.30-0.40 aralığından sonra mukavemet hızla azalmaktadır. $I_p=21-24$ kıvam ise $I_c=0.65-0.67$ arasındadır. Bundan dolayı grafikten de görüldüğü gibi taşıma gücü yitirilinceye kadar aynı eğilimi sürdürerek mukavemetleri azalmaktadır. Bu özellikteki numunelerde mukavemet kaybı yaklaşık olarak DKGO=0.35 seviyesinden itibaren başlamaktadır denilebilir.



Şekil 4.28 Plastisitesi $I_p=30-40$ aralığında olan $\sigma_c=100-150$ kPa aralığında konsolide edilmiş numunelerde mukavemet azalımı.

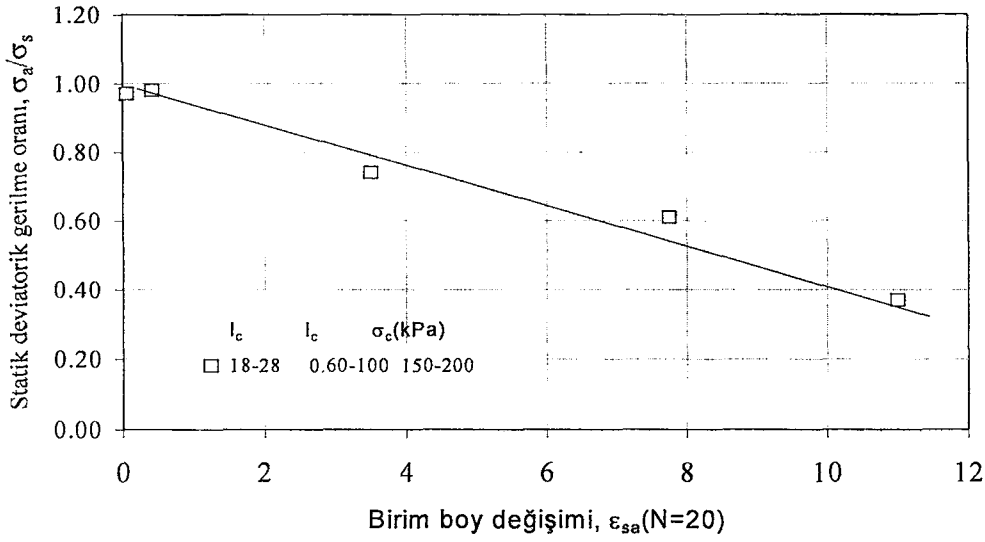
Şekil 4.29'da kullanılan numunelerin $N=20$ çevrim sonunda oluşan deformasyonlarının dinamik deney sonrası statik mukavemet oranına göre değişimleri ise Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Burada düşey ekseninde σ_a/σ_s ile gösterilen mukavemet azalış oranı hesaplanırken %20 birim boy değişimi seviyesindeki

değerler esas alınmıştır. σ_a ile dinamik ve sonradan statik yüklemeli %20 deformasyon seviyesindeki deviatorik gerilme, σ_s ile ise aynı kıvam plastisite ve konsolidasyona sahip özellikleri olan sismik geçmişi olmayan gerilme gösterilmiştir. Şekil 4.30'da görüldüğü gibi $N=20$ çevrim sonunda oluşan birim boy değişimi arttıkça statik mukavemet oranı azalmaktadır. Bu ise deprem yükleri etkisinde $N=20$ çevrimde oluşan birim boy değişiminin mukavemet azalım oranını nasıl etkilediğini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi düşük birim boy değişimi seviyelerinde mukavemette kayıp çok az iken yüksek birim boy değişimi seviyelerinde kayıp daha fazladır. Büyük birim boy değişimi oluşmasına ise $N=20$ çevrim uygulanan DKGÖ oranı etkili olmaktadır.



Şekil 4.29 Plastisitesi $I_p=18-28$ aralığında olan $\sigma_c=150$ kPa altında konsolide edilmiş numunelerde mukavemet azalımı.

Farklı DKGÖ etkisinde $N=20$ çevrim süreyle maruz kalmış değişik plastisite kıvam ve konsolidasyon basıncı etkisindeki numunelerin DKGÖ- σ_a değişimi Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Bu grafikte ortak indeks özellikler bir grupta toplanarak uygulanan dinamik kayma gerilmesi oranının dinamik sonrası mukavemet olan σ_a ya göre değişimi gösterilmiştir. Tüm deneylerde dinamik yükün artması ile statik %20 seviyesindeki statik gerilme σ_a nin azaldığı görülmektedir. Konsolidasyon basıncı indeks özellikler ve zemin yapısındaki farklılıklardan dolayı artan gerilme oranına bağlı olarak aynı yönde azalım görülmektedir.

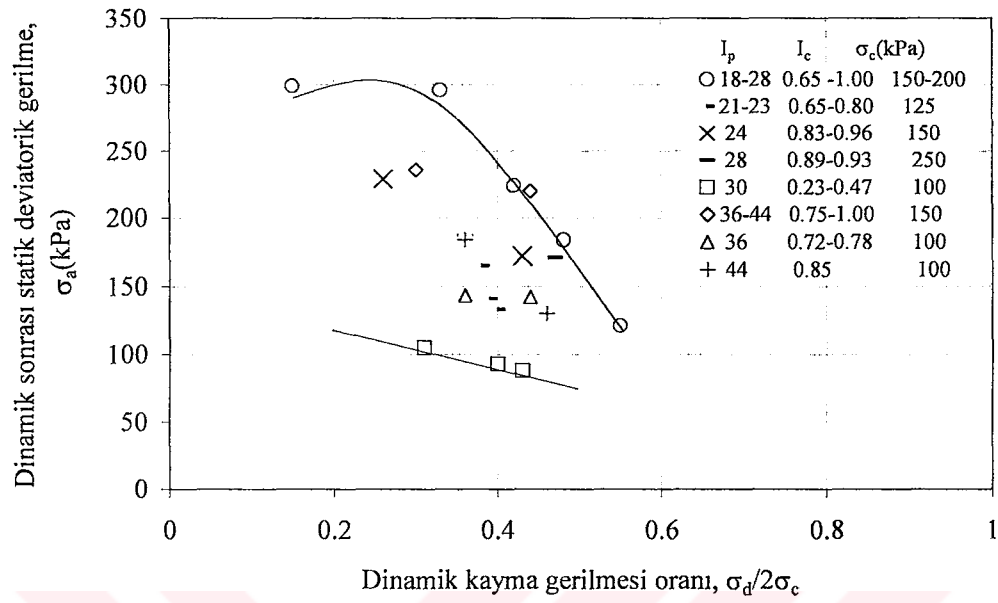


Şekil 4.30 N=20 çevrimde oluşan birim boy değişiminin mukavemet kaybına etkisi.

Dinamik deney sonrası %20 birim boy değişimi seviyesindeki mukavemet aynı birim boy değişimi seviyesindeki sismik geçmişi olmayan mukavemete göre normalize edilmiştir. Normalizasyonda kullanılan mukavemet değerleri Bölüm 3'deki Tablo 3.9'dan alınarak aşağıdaki Tablo 4.1 düzenlenmiştir. Tablo 4.1'den yararlanarak σ_d/σ_s 'nin σ_a/σ_s ye göre değişimi Şekil 4.32'de verilmiştir. Burada düşey dinamik gerilme σ_d statik gerilme σ_s 'ye göre normalize edilmiş, dinamik sonrası düşey gerilme σ_a ise yine σ_s 'ye göre normalize edilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi farklı plastisiteli numunelerde dinamik yük arttıkça statik mukavemet oranı σ_a/σ_s nin <1 olduğu görülmektedir. Burada kullanılan numune gruplarının kıvamları ve plastisiteleri farklı olmalarına rağmen aynı eğri üzerinde bulunmaları dikkat çekicidir. Meksiko kili üzerinde Diaz (1988) yaptığı üç eksenli deneylerden benzer sonuçları bulmuştur.

Tablo 4.1 deki değerlerin hesaplanışına benzer olarak diğer N=20 çevrim yükleme yapılan deney sonuçları da hesaplanarak $I_p=20-45$ ve kıvamın 0.23-1.00 aralığında olması durumuna göre oluşan DKGO- σ_a/σ_s değişimi Şekil 4.33'de gösterilmiştir. Burada düşey eksen statik deviatorik gerilme σ_s ' ye göre normalize edilmiş yatay eksen ise dinamik kayma gerilmesi oranı (DKGO) olarak alınmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi dinamik kayma gerilmesi oranının artışına bağlı olarak yukarıda belirtilen özelliklere sahip killi zeminler aynı eğilimi koruyarak mukavemetleri azaltmaktadır. Buradan killer için plastisitenin 18-45 olması durumunda uygulanan

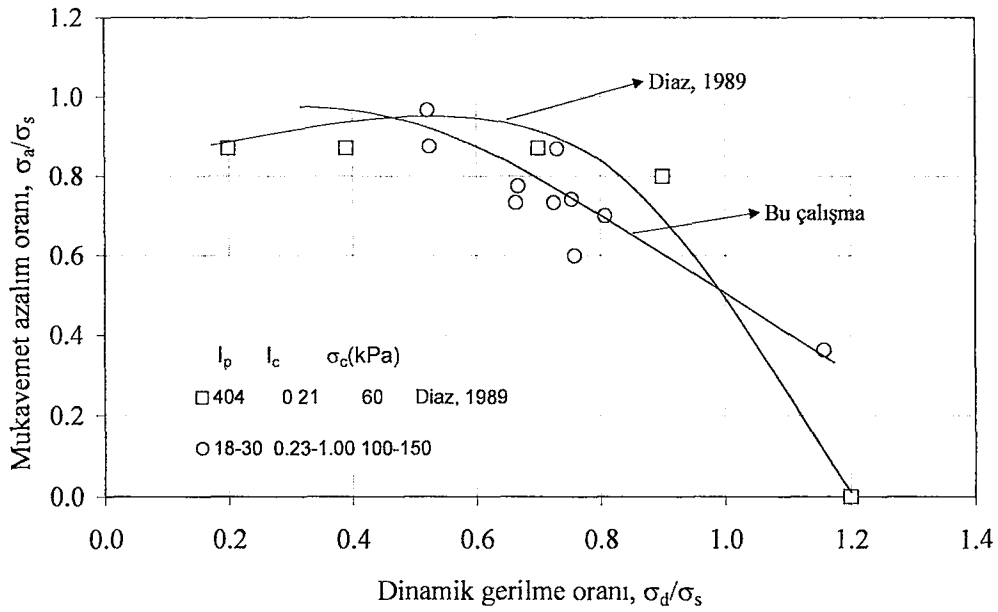
gerilme oranına bağılı olarak ne kadar statik mukavemet azalacağı yaklaşık olarak bulunabilir.



Şekil 4.31 Farklı numunelerde DKGO- σ_a değişimi.

Tablo 4.1 Dinamik ve statik gerilme değerleri

D.no	σ_c (kPa)	σ_s (kPa)	σ_a (kPa)	σ_d/σ_s	σ_d (kPa)	DKGO
DS40	125	190	165	0.87	95	0.38
DS41	125	190	141	0.74	98	0.39
DS42	125	190	133	0.70	105	0.42
DS55	100	120	105	0.88	63	0.31
DS56	100	120	93	0.77	80	0.40
DS57	100	120	88	0.73	87	0.43
DSY01	200	330	120	0.36	220	0.55
DSY02	300	400	30	0.08	360	0.60
DSY07	150	300	220	0.74	126	0.42
DSY08	150	300	180	0.60	144	0.48
DSY09	150	300	290	0.96	99	0.33



Şekil 4.32 Statik mukavemet azalımının σ_d/σ_s 'ya göre değişimi.

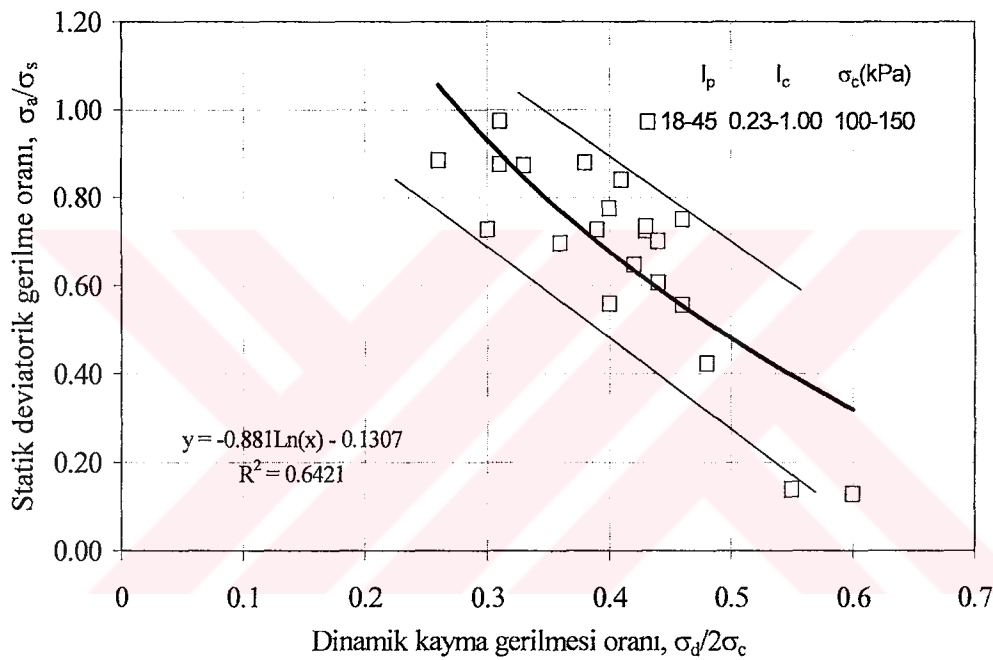
Şekil 4.33'deki deney sonuçları arasından basit bir korelasyon yapılırsa gerilme azalımının uygulanan dinamik kayma gerilmesi oranına bağlı ifadesi %64 oranında korelasyon katsayısı ile elde edilir. Elde edilen bu bağıntı 4.1'de gösterilmiştir. Burada bütün numuneler normal konsolide kil olup statik deneydeki birim boy değişimi değeri, $\varepsilon=\%10$ değerine karşılık σ_a/σ_s değerleri alınmıştır. Statik deformasyon kontrollü deneyler birim boy değişiminin $\varepsilon=\%20$ değerine ulaşıncaya kadar yapılmıştır. Burada hem $\varepsilon=\%10$ ve hem de $\varepsilon=\%20$ değerlerindeki gerilmelere göre iki ayrı bağıntı verilmesinin nedeni %10 luk boy değişimi değerinden sonra gerilme azalımında %20 değerine göre bir fark olup olmadığını göstermek içindir.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_s} = -0.881 \ln(\text{DKGO}) - 0.1307 \quad (4.1)$$

Eğer $\varepsilon=\%20$ lik birim boy değişimi seviyesindeki gerilme değerleri dikkate alınsa 4.2 nolu bağıntı elde edilmiş olur. Bu durumdaki korelasyon katsayısı % 63.98 olarak yukarıdaki değere yakındır.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_s} = -0.6891 \ln \text{DKGO} + 0.0837 \quad (4.2)$$

Buradan da görüldüğü gibi normal konsolide killerde %10 ve %20 seviyesindeki birim boy değişimleri çok farketmediğinden mukavemet azalımında da aynı eğilim görülmektedir. Yukarıdaki grafikte çok yumuşak olan DS53-DS54-DS55 nolu numuneler farklı davranış gösterdiklerinden yer almamışlardır. Ayrıca plastisitesi yüksek olan DSAP02 nolu deney numunesi de çok yüksek mukavemet gösterdiğinden yer almamıştır. Geoteknik mühendisliğinde zeminin çok karmaşık yapı göstermesinden dolayı yukarıda gösterilen bağıntıların güvenliği pratik amaçlar için yeterli olmaktadır.

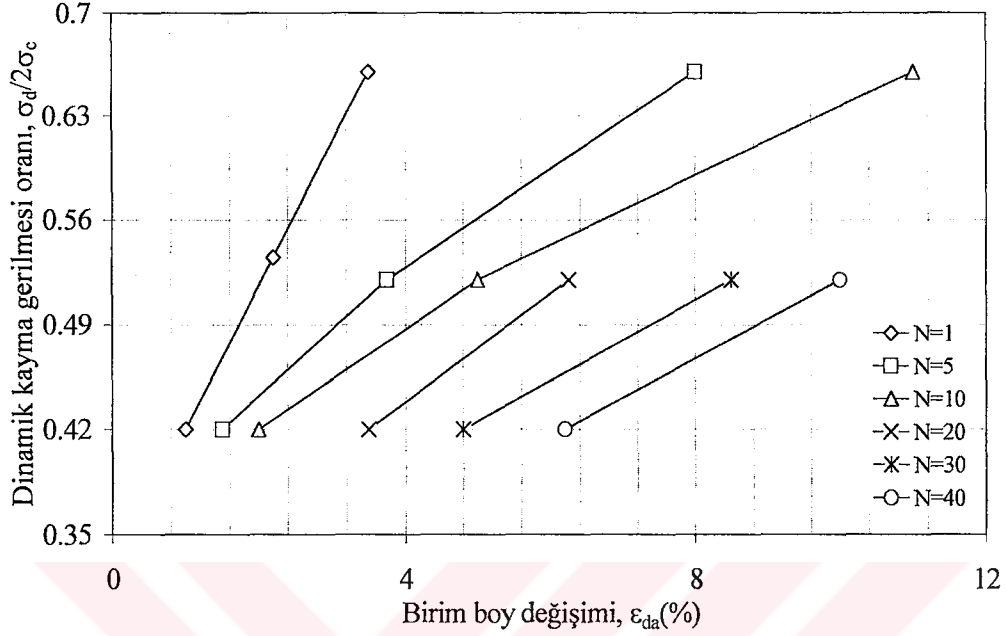


Şekil 4.33 Statik mukavemet azalımının DKGO'na göre değişimi.

4.10 Çevrim Sayısının DKGO Üzerinde Etkisi

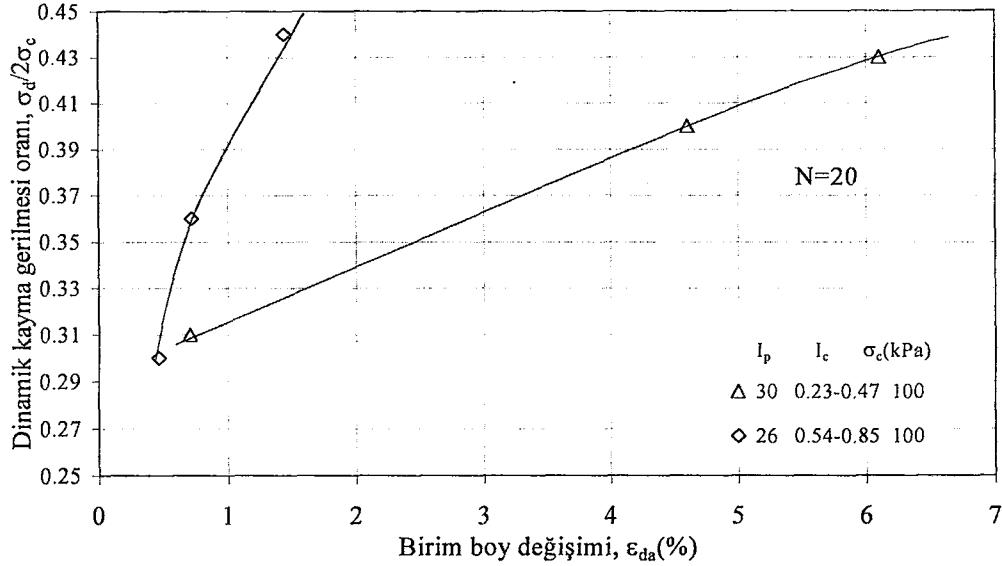
Tekrarlı yüklerin uygulama süresi yani çevrim sayısı N 'in DKGO, Boşluk Suyu Basıncı Oranı (BSBO) ve birim boy değişimi üzerindeki etkisi pek çok araştırmacı tarafından gösterilmiştir. Bu çalışmada deneylerde kullanılan farklı plastisite ve kıvamdaki örselenmemiş numunelerin dinamik yükler altında davranışında çevrim sayısının etkisini göstermek amacı ile $N=1, 5, 10, 20, 30, 40$ çevrim sayılarındaki DKDO- ϵ_{da} değişimleri oluşturulmuştur. Aynı DKGO uygulandığında çevrim sayısı arttıkça birim boy değişimlerinin arttığı görülmüştür. Örneğin plastisite indisleri $I_p=29$ olan D07-D08-D09 nolu numunelerin DKGO- ϵ_{da} farklı çevrim sayıları için

Şekil 4.34’de oluşturulmuştur. Çevrim sayısı arttıkça birim boy değişimleri artmaktadır.



Şekil 4.34 Çevrim sayısının DKGO’na etkisi ($I_p=29$ $I_c=0.28-0.62$ $\sigma_c=70$ kPa).

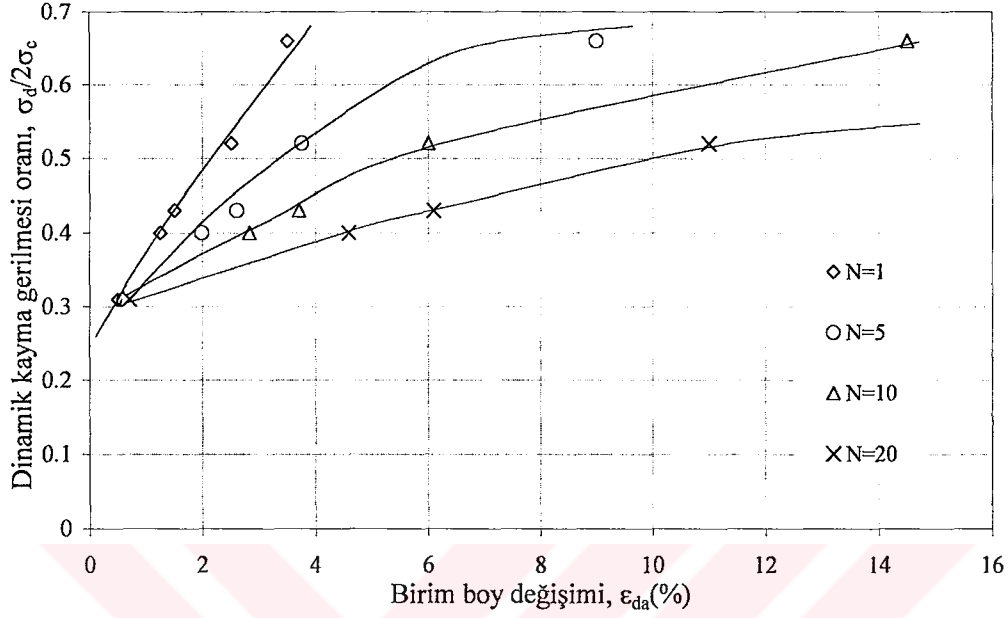
Şekil 4.34 oluşturulurken D07-D08-D09 nolu üç dinamik deneyin $N=1, 5, 10, 20, 30, 40$ sayılarındaki DKGO birim boy değişimi değerleri dikkate alınmıştır. Bunun nedeni diğer etkilerin ortak olup sadece çevrim sayısının etkisini aynı özellikteki farklı numuneler üzerinde görmek içindir. $N=20$ çevrimdeki DKGO ve birim boy değişimi değerleri dikkate alınarak yaklaşık aynı plastisitedeki numunelerin kıvrımlarının davranışa etkisi ise Şekil 4.35’de gösterilmiştir. Bu grafikte çevrim sayısı aynı numunelerde kıvrım arttıkça birim boy değişimi azalmakta dolayısı ile DKGO artmaktadır. Çevrim sayısının etkisini göstermek amacı ile 29-30 plastisite aralığındaki numunelerin değişik çevrim sayılarındaki DKGO birim boy değişimi eğrileri Şekil 4.36’da gösterilmiştir. Bu şekilden de çevrim sayıları arttıkça eğriler yatıklaşmakta ve $N=20$ çevrimde en düşük DKGO’na en yüksek birim boy değişimine ulaşılmaktadır. Burada numuneler iki farklı sondaj kuyusundan alınmış olup plastisiteler yaklaşık aynı kıvrım 0.23-0.47 aralığında konsolidasyon basınçları ise 70-100 kPa arasındadır. Burada da yukarıda anlatıldığı gibi çevrim sayısı arttıkça birim boy değişimleri artmakta ve DKGO değerleri azalmaktadır.



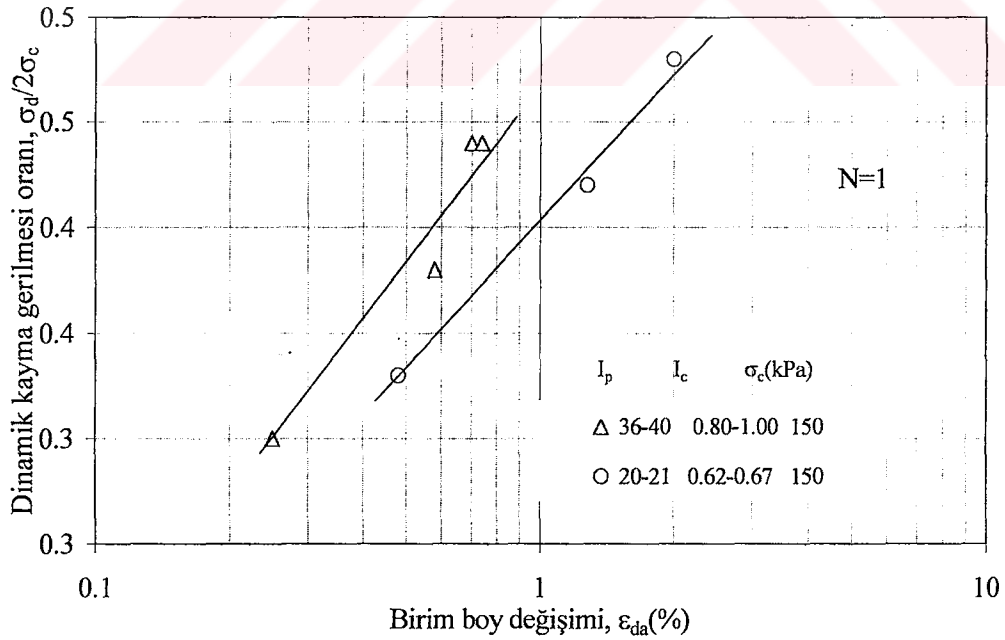
Şekil 4.35 N=20 çevrim için kıvamın DKGO'na etkisi.

Şekil 4.37 da N=1 için değişik kıvam ve plastisitedeki numunelerin DKGO birim boy değişimi ilişkisi incelendiğinde yüksek plastisitedeki numunelerin dinamik gerilme yüksek dahi olsa ilk çevrimde düşük plastisitedeki numunelerden daha az birim boy değişimine uğradıkları görülmektedir. Buradan kıvamın yanında davranışa plastisitenin daha büyük etkisinin olduğu anlaşılmaktadır. Aynı numune grubunun N=5 çevrim sonucunda oluşan DKGO-birim boy değişimi ilişkisi ise Şekil 4.38'de gösterilmiştir. Şekil incelendiği zaman düşük gerilme oranlarında birim boy değişimleri iki değişik numune grubu için birbirine yakın iken yüksek DKGO'na çıkıldığında farklılık görülmektedir. N=10 ve N=20 çevrim sonucunda oluşan DKGO birim boy değişimi değerleri ise Şekil 4.39 ve 4.40'da ayrı ayrı gösterilmiştir. Bu şekillerde de plastisitenin etkisi daha belirgin olarak görülmektedir. Aynı plastisiteye sahip numunelerin DKGO-birim boy değişimi değerleri arasındaki farklılık ise konsolidasyon basınçları arasındaki küçük farklardan ve kıvamdaki küçük farklardan ileri gelmektedir. Çevrim sayısının artması ile eğriler daha yatıklaşmakta ve düşük plastisiteli numunelerde çok büyük birim boy değişimleri meydana gelmektedir. Buradan ince daneli zeminlerden silt oranı yüksek olan düşük plastisiteli killerin tekrarlı gerilmelere karşı zayıf dayanım gösterdikleri ortaya çıkmaktadır. Deprem yükleri etkisinde ince daneli zeminleri tek grupta değerlendirmek hatalı sonuçlara gidilmesine neden olur. Killerin içerisindeki silt oranları ve bu oranın plastik veya nonplastik olup olmaması davranışı büyük ölçüde etkilemektedir. Bu zeminler çok

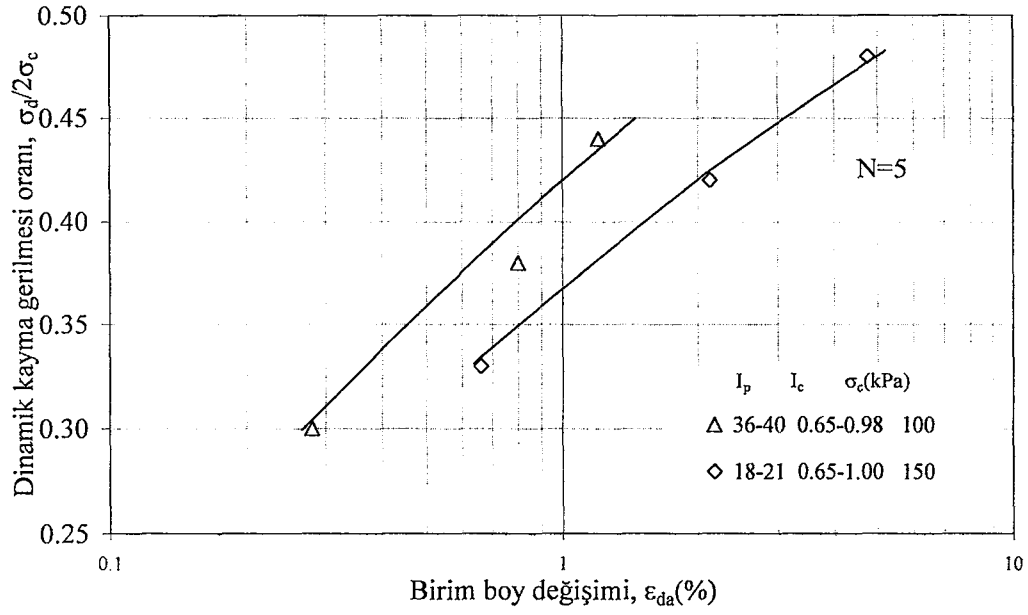
katı olsalar dahi yüksek DKGÖ'larına çıkıldığında zaman ve uzun süre tekrarlı gerilme genlikleri altında kaldıklarında büyük şekil değişimlerine uğramaktadırlar.



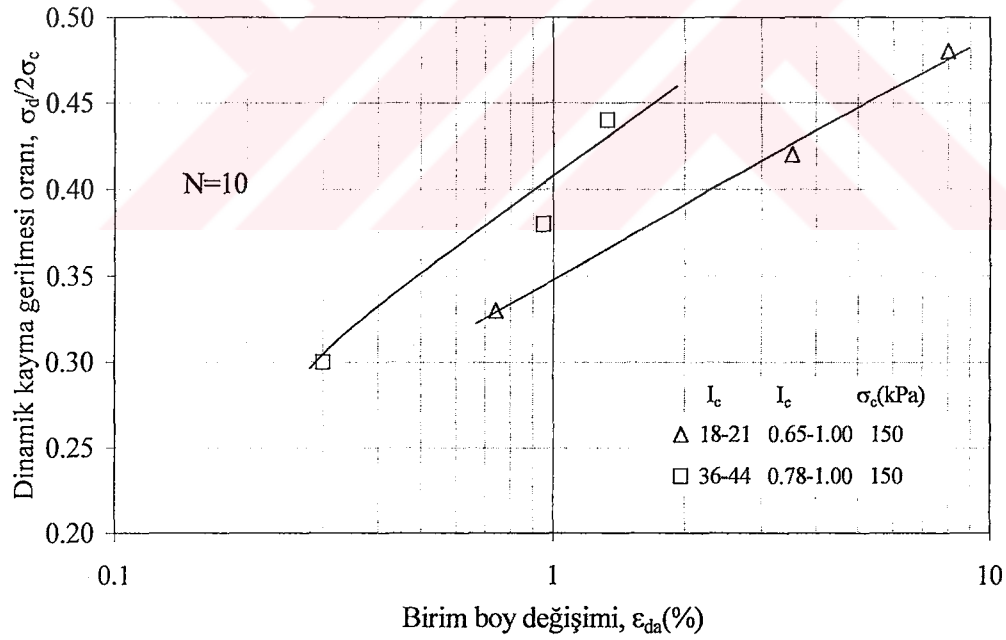
Şekil 4.36 $I_p=29-30$ ve $I_c=0.23-0.47$ aralığında farklı çevrim sayılarına göre DKGÖ-birim boy değişimi ilişkisi.



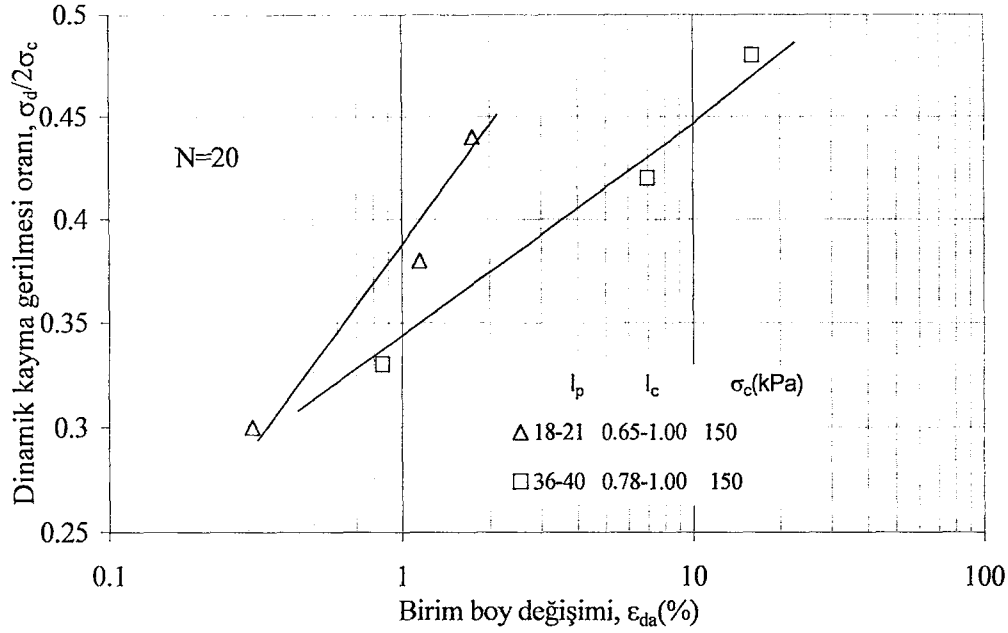
Şekil 4.37 $N=1$ için DKGÖ-birim boy değişimine plastisitenin etkisi.



Şekil 4.38 N=5 için DKGO-birim boy değişimine plastisitenin etkisi.



Şekil 4.39 N=10 için (DKGO)-birim boy değişimine plastisitenin etkisi.

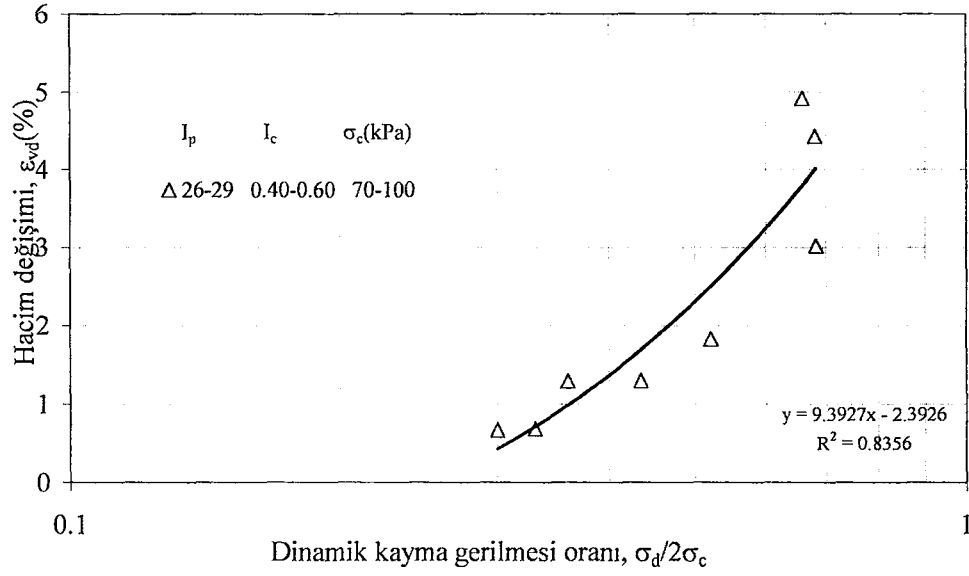


Şekil 4.40 N=20 için DKGO-birim boy değişimine plastisitenin etkisi.

4.11 Hacim Değişimleri

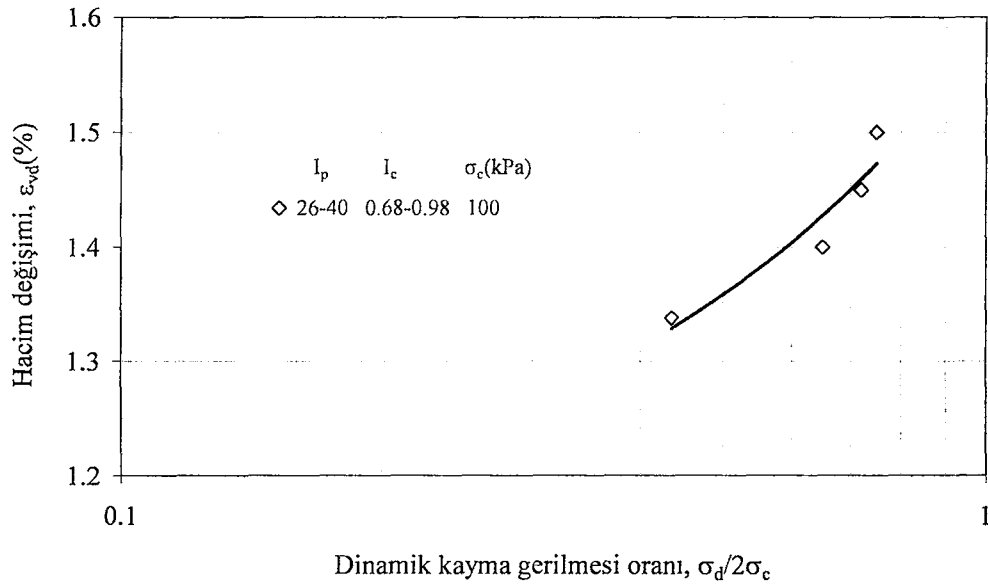
4.11.1 Dinamik Yüklemeden Oluşan Hacim Değişimleri.

Büyük depremlerde suya doygun killerde oluşan boşluk suyu basınçları nedeni ile artan şekil değiştirmeler sonucunda yumuşama olur. Depremin hemen ardından oluşan artık boşluk suyu basıncının drene olması sonucu bu tür zeminlerde oturmalar meydana gelir. Bu çalışma kapsamında deprem sonrası, killerde ne kadar hacim değişimi oluşabileceği belirlenmeye çalışılmıştır. Dinamik yükleme yapılan deney bittikten sonra dinamik düşey gerilme kaldırılıp drenajlar açılarak numune, 24 saat süre ile dinamik gerilme uygulanmadan önceki izotropik basınç (σ_c) etkisinde konsolidasyona bırakılmış ve bu sırada oluşan hacim değişimleri ölçülmüştür. Uygulanan farklı büyüklüklerdeki gerilme oranlarının 70 ile 100 kPa basınç altında konsolide edilmiş plastisite indisi $I_p=26-29$ ve $I_c=0.30-0.60$ kıvam aralığındaki killi zeminleri nasıl etkiledikleri Şekil 4.41’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi DKGO’nın artması sonucu hacimsel deformasyonlar da artmaktadır. Dinamik deney sonucunda oluşan hacimsel deformasyonlar $\epsilon_{vd}(\%)$ ile gösterilmiştir. Bu değer deney sonu elde edilen hacim değişiminin numunenin konsolidasyonu sonundaki hacmine oranlanması ile elde edilmiştir.



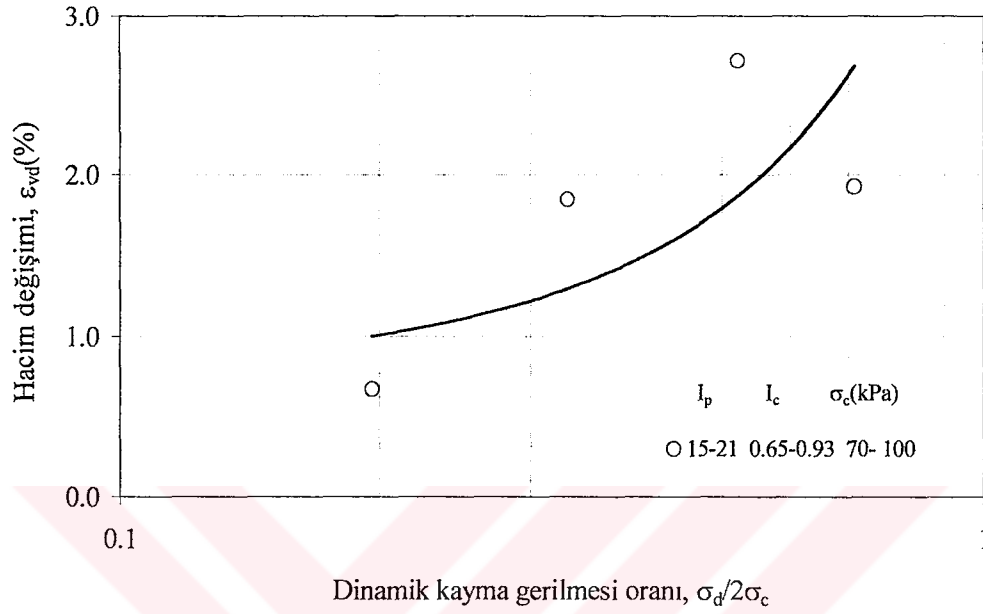
Şekil 4.41 $I_p=26-29$ ve $I_c=0.40-0.60$ olan killerde DKGO- ε_{vd} ilişkisi.

Şekil 4.42’de ise plastisite aralığı $I_p=26-40$ ve daha katı kıvamda $I_c=0.68-0.98$ olan numunelerin dinamik yüklemeden sonra oluşan hacim değişimi dinamik kayma gerilme oranı ilişkisi görülmektedir. Bu grafikten de DKGO arttıkça hacim değişiminin arttığı görülmektedir



Şekil 4.42 $I_p=26-40$ ve $I_c=0.68-0.98$ aralığında olan numunelerde dinamik kayma gerilmesi oranının hacimsel deformasyona etkisi.

Şekil 4.43'de ise plastisitesi daha düşük $I_p=15-21$ aralığında yine kıvamı yaklaşık $I_c=0.65-0.93$ arasında değişen numunelerin dinamik kayma gerilmesi oranı hacim değişimi incelendiğinde benzer davranış biçimi gözlenmektedir.



Şekil 4.43 $I_p=15-21$ ve $I_c=0.65-0.93$ aralığında olan numunelerde dinamik kayma gerilmesi oranının hacimsel deformasyona etkisi.

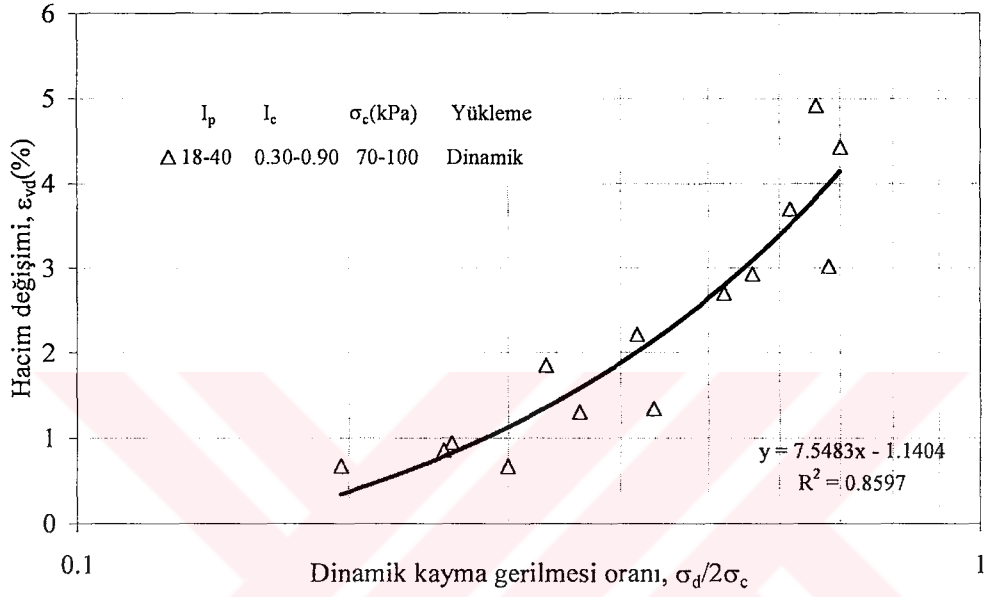
Şekil 4.44'de ise bütün numunelerden elde edilen hacimsel değişimler karşılaştırılmıştır. Bu şekilden de görüldüğü gibi plastisite indisi $I_p=18-40$ aralığında ve $I_c=0.30-0.98$ arasındaki killerin dinamik deney sonucunda 70-100 kPa arasında tekrar konsolide edildiklerinde benzer davranış biçimi elde edilmektedir. Davranış biçimi üzerinde bu plastisite indisi ve kıvam aralığının etkisi ihmal edilebilir. Bu killeri için konsolidasyon basıncının 70-100 kPa olması durumunda DKGÖ'ne bağlı olarak ne kadar hacim değişimi oluşacağı basit doğrusal korelasyon yapılarak aşağıda verilen (4.3) nolu bağıntı ile hesap edilebilir. Bu bağıntının korelasyon katsayısı %86 dır.

$$\varepsilon_{vd} = 7.5483 \frac{\sigma_d}{2\sigma_c} - 1.1404 \quad (\%) \quad (4.3)$$

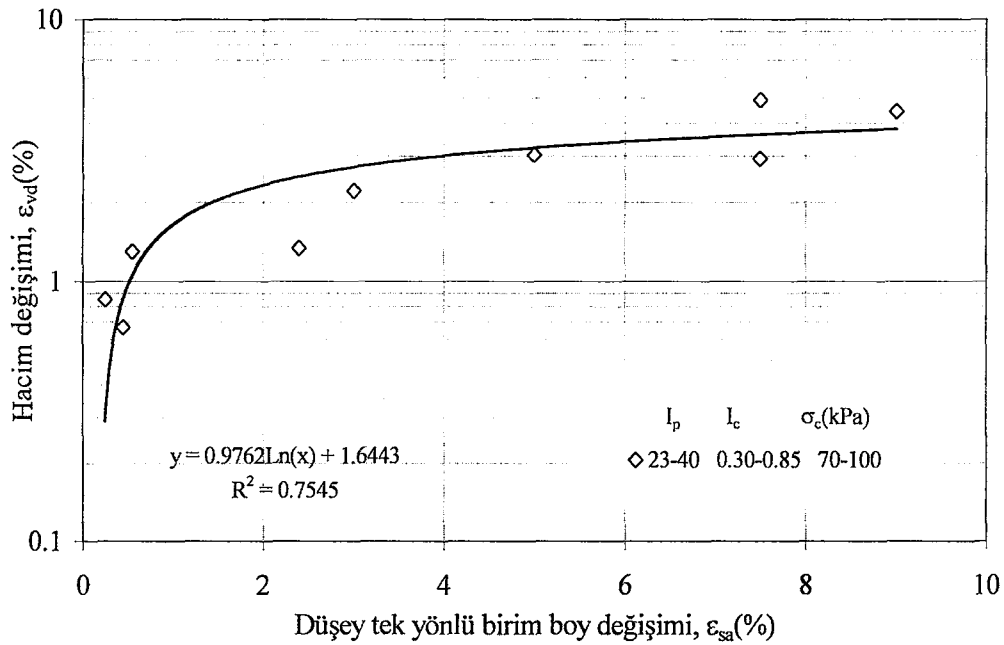
Şekil 4.44'deki numunelerin dinamik deney sonrası hacim değişimlerinin deney sonu düşey tek yönlü deformasyonlara göre değişimi ise şekil 4.45'de verilmiştir. Burada

da plastisitenin 18-40 aralığında olması ve kıvamın da 0.30-0.85 aralığında olması durumuna göre belirli bir birim boy değişimi değerindeki hacimsel deformasyon (4.4) yardımı ile hesaplanabilir. Basit logaritmik korelasyon yapılarak bulunan bu bağıntının korelasyon katsayısı %75 dir.

$$\varepsilon_{vd} = 0.9762 \ln \varepsilon_{sa} + 1.664434 \quad (\%) \quad (4.4)$$



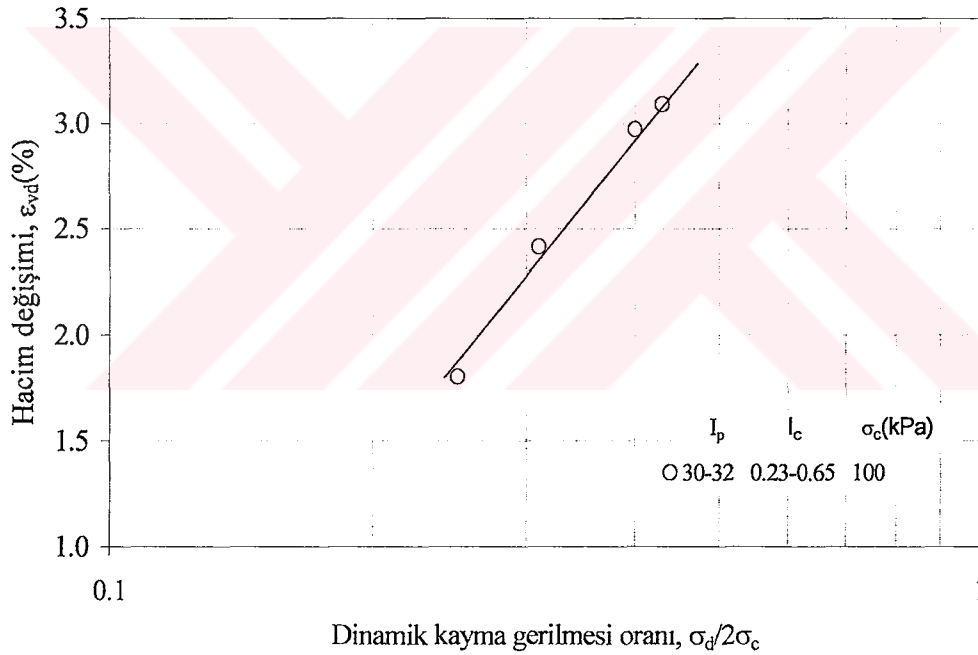
Şekil 4.44 $I_p=18-40$ ve $I_c=0.30-0.90$ aralığında DKGÖ- ε_{vd} ilişkisi.



Şekil 4.45 Hacimsel deformasyon-birim boy değişimi ilişkisi.

4.11.2 Dinamik Yükleme Sonrası Statik Yükleme Hacim Değişimleri.

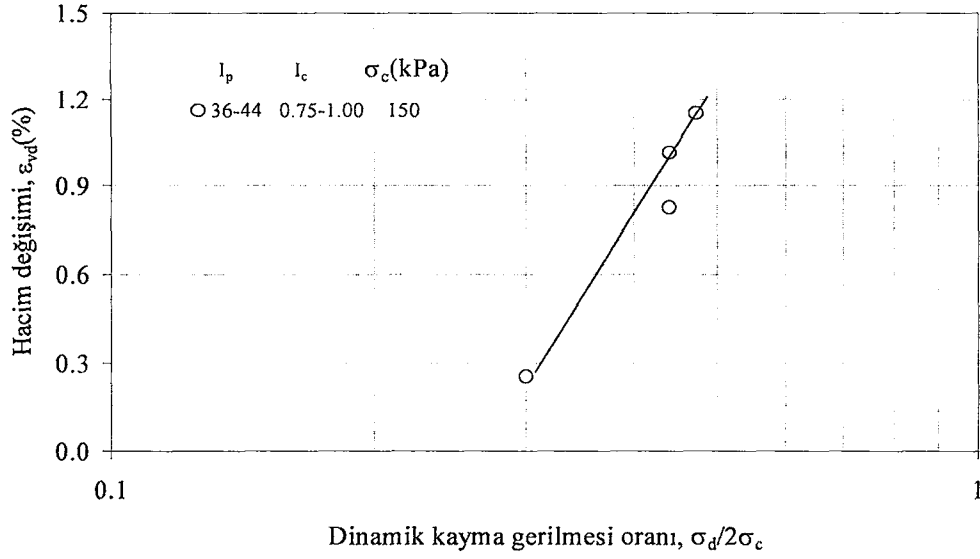
Dinamik deneylerden hemen sonra numune %20 lik düşey eksenel deformasyon seviyesine ulaşınca kadar statik deney yapılmış ve deney sonunda drenajlar açılarak 24 saat süre ile konsolidasyon oluşturulmuştur. Bu sırada oluşan hacim değişimleri ölçülmüştür. Numunelerin hacim değişimlerinin numuneye önceden uygulanan $N=20$ çevrimlik dinamik gerilme oranına göre değişimleri Şekil 4.46, 4.47 ve 4.48’de değişik plastisite, kıvam ve gerilme oranları için ayrı ayrı gösterilmiştir. Plastisitesi $I_p=29-30$ ve kıvamı $I_c=0.23-0.65$ aralığındaki numunelerin 0.30-0.43 DKGO aralığındaki hacimsel deformasyonları Şekil 4.46’da gösterilmiştir. Dinamik kayma gerilmesi oranı arttıkça hacimsel deformasyonlarda uygun bir dağılımda artmaktadır.



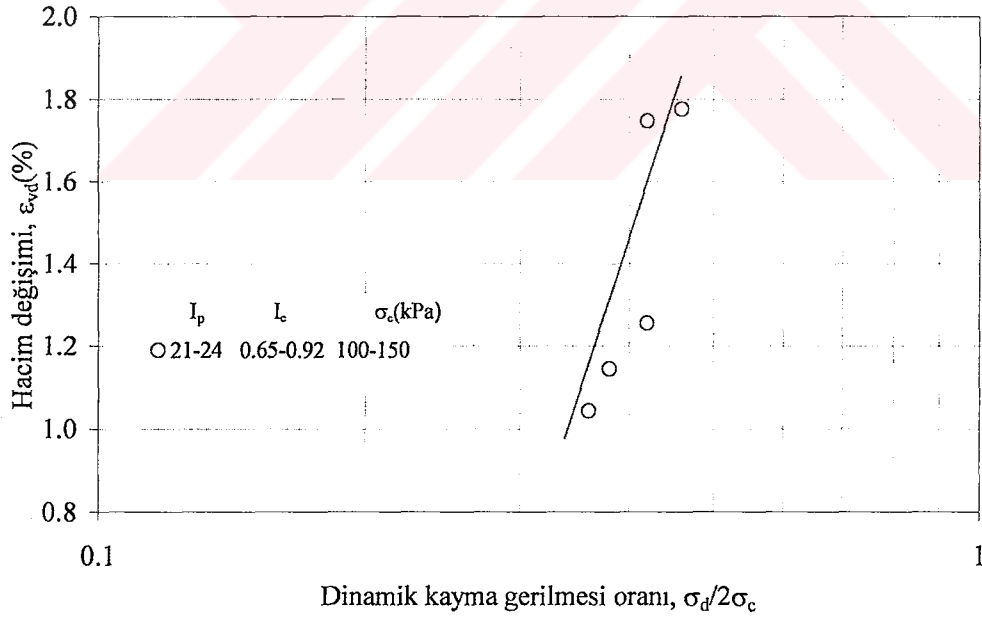
Şekil 4.46 Plastisitesi 30-32 olan dinamik sonrası statik deneylerde hacimsel deformasyonun dinamik kayma gerilmesi oranına göre değişimi.

Plastisitesi $I_p=36-44$ ve kıvamı $I_c= 0.75-1.00$ aralığındaki daha katı numunelerin dinamik gerilme kayma oranı hacimsel deformasyon ilişkisi ise Şekil 4.47’de gösterilmiştir. Şekil 4.48’de ise daha düşük plastisiteye sahip $I_p=21-24$ ve kıvamı $I_c=0.65-1.00$ aralığındaki numunelerin DKGO’nun hacimsel deformasyona göre değişimi gösterilmiştir. Böylece değişik plastisite kıvam ve konsolidasyon basıncındaki numunelerin ön dinamik gerilme ve ardından yapılan statik deney

sonucunda oluşan hacim değişimlerinin değişik plastisite ve kıvam aralıklarına göre değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.47 $I_p=36-44$ olan numunelerde dinamik sonrası statik deneylerde DKGO-hacimsel deformasyon ilişkisi.



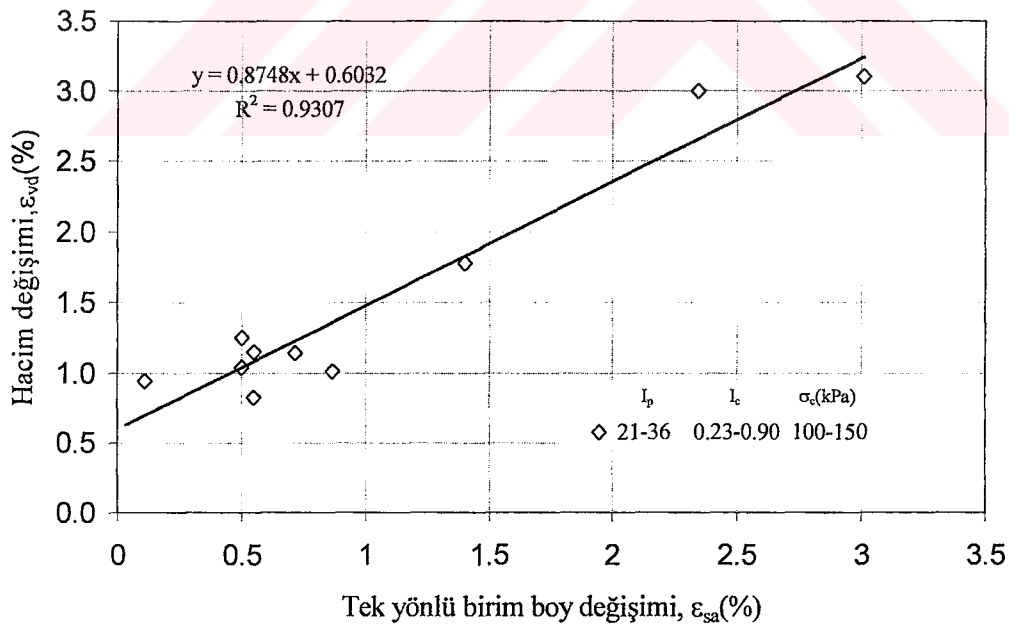
Şekil 4.48 $I_p=21-24$ olan numunelerde dinamik sonrası statik deneylerde DKGO-hacimsel deformasyon ilişkisi.

Dinamik sonrası statik deneylerde $N=20$ çevrimlik dinamik yük nedeni ile oluşan tek yönlü birim boy değişimini, ϵ_{sa} ile deney sonu hacim değişimi, ϵ_{vd} ilişkisi Şekil 4.49'da gösterilmiştir. Şekilde gösterilen numunelerin plastisite aralığı $I_p=21-36$ ve

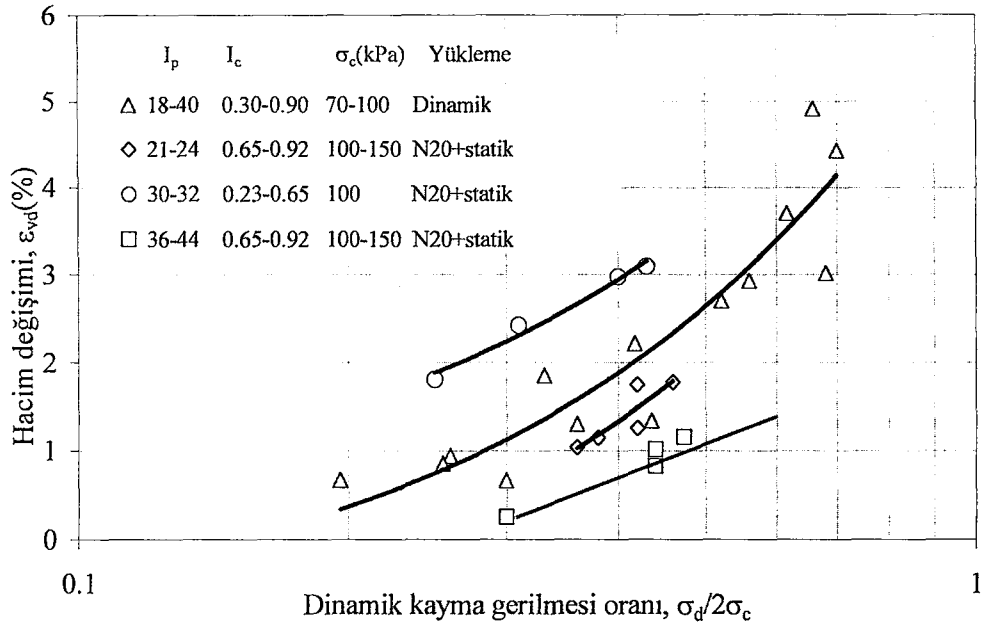
kıvam aralığı ise $I_c=0.23-0.90$ arasındadır. Numunelerin konsolidasyon basınçları 100-150 kPa değerleri arasındadır. Burada kıvamı 0.23 olan iki numune daha fazla deformasyon ve hacim değişimine uğramıştır. Diğer numunelerle bu numunelerin deformasyon ve hacim değişimleri arasında basit doğrusal dağılım yapılırsa (4.5) nolu bağıntı elde edilmiş olur. Bu bağıntının korelasyon katsayısı %93 dür.

$$\varepsilon_{vd} = 0.8748\varepsilon_{sa} + 0.6032 \quad (\%) \quad (4.5)$$

Sabit genlikli gerilme uygulanarak ardından konsolidasyona bırakılan numuneler ile $N=20$ çevrim gerilme genliği uygulanıp hemen ardından statik drenajsız deney yapıp bulunan numunelerin hacim değişimi DKGO değişimleri Şekil 4.50’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi daire ile sembolize edilen yumuşak numuneler hariç diğer numunelerin davranışı benzer özellik göstermektedir. Bundan dolayı plastisitenin $I_p=18-44$ ve kıvamın da $I_c=0.30-0.90$ arasında olması durumunda dinamik yükten dolayı oluşan hacim değişimi ile $N=20$ çevrim dinamik ardından %20 deformasyon seviyesine ulaşıncaya kadar yapılan statik yükten oluşan hacim değişimleri için yukarıdaki (4.3) nolu bağıntının kullanılabilir.



Şekil 4.49 Dinamik sonrası statik deneylerde birim boy değişimi, ε_{sa} ’ün hacim değişimi, ε_{vd} ’ye göre değişimi.



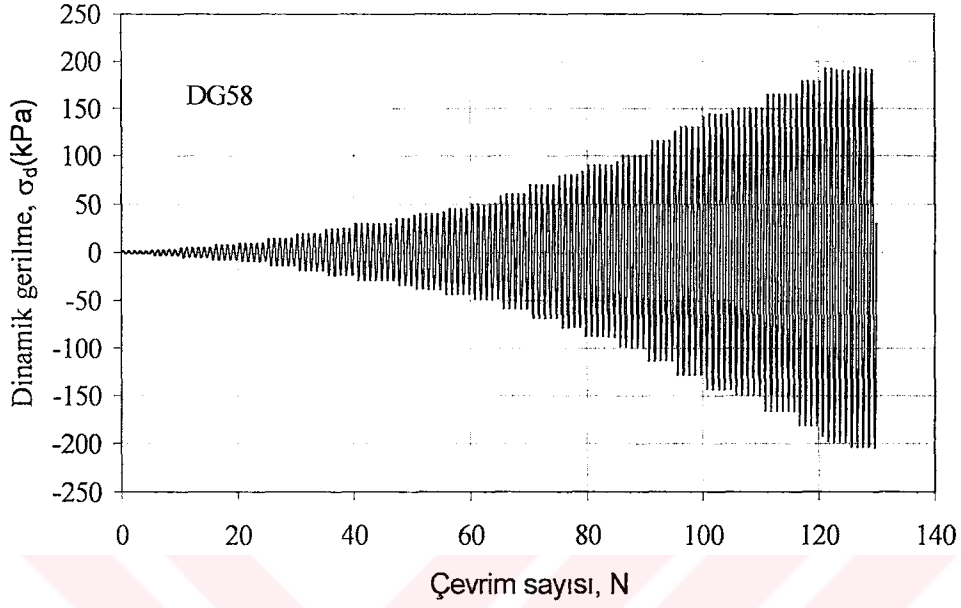
Şekil 4.50 Dinamik ve dinamik sonrası statik deneylerde DKGO- ϵ_{vd} değişimi.

4.12 Dinamik Yükleme Elastisite Modülü İlişkileri

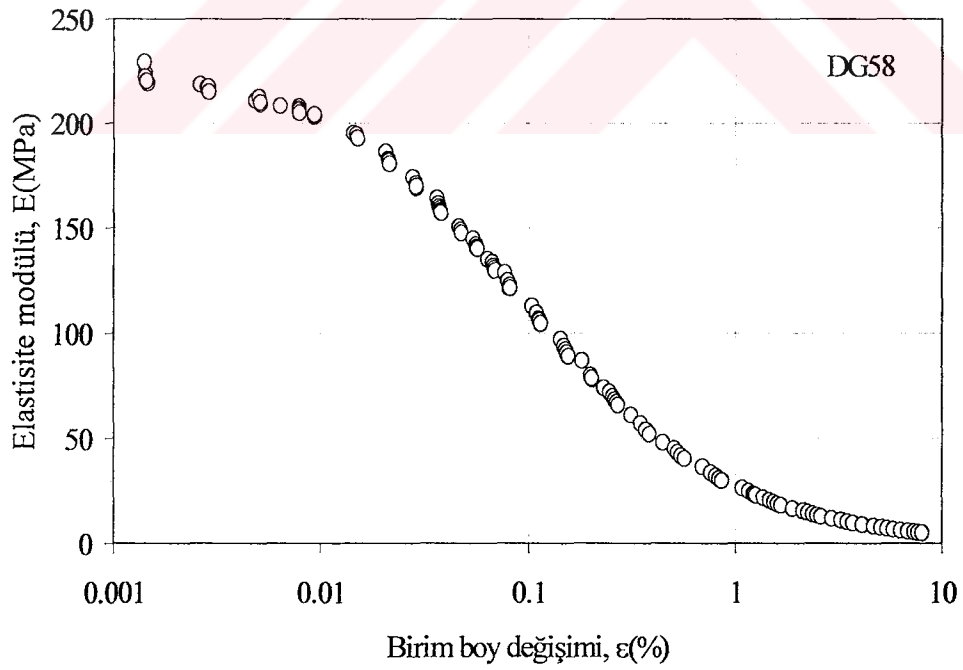
4.12.1 Elastisite Modülü Birim Boy Değişimi İlişkileri

Daha önce 3. bölümde indeks özellikleri verilen bir grup numune üzerinde her 5 çevrimde bir çok küçük gerilme genlikleri artırılarak uygulanmıştır. Başlangıçta küçük deformasyon algılayıcılardan alınan kayıtlar yardımı ile hiç boşluk suyu basıncı artımı oluşmadan elastik bölgedeki E değerleri elastisite teorisine göre hesaplanmıştır. Artan çevrim sayılarına paralel olarak boşluk suyu basıncında da artışlar meydana gelmiş ve zeminde oluşan yumuşamanın etkisi ile E modülleri azalmaya başlamıştır. Bu deneylerde numunede birim boy değişimi $\epsilon = \pm 2.5-3.00$ oluncaya kadar yüklemeye devam edilmiştir. Tipik bir yükleme kaydı Şekil 4.51’de gösterilmiştir. Bu yükleme etkisi ile oluşan Elastisite Modülü düşey eksenel birim boy değişimi ilişkisi ise Şekil 4.52’de gösterilmiştir. Plastisite indisi $I_p=18$ ve kıvamı $I_c=0.83$ olan bu numunenin rijitliği %0.01 birim boy değişimi seviyesinden sonra yumuşamadan dolayı azalmaya başlar ve %2 lik birim boy değişimi seviyesinde numunenin elastisite modülü 15 MPa civarında olup başlangıç modülü olan 229 MPa’a göre 15 kez küçülmüş olur. Bu küçülmenin nedeni çevrim sayısının ve gerilme genliklerinin artması ile oluşan birim boy değişimlerinin artması ve

yumuşama meydana gelmesi sonucunda rijitliğin azalmasıdır. Ayrıca bu yükleme sonucunda killi zeminin iç yapısı da bozulur ve mukavemet kaybı oluşur.



Şekil 4.51 DG58 nolu deney dinamik gerilme çevrim sayısı değişimi.

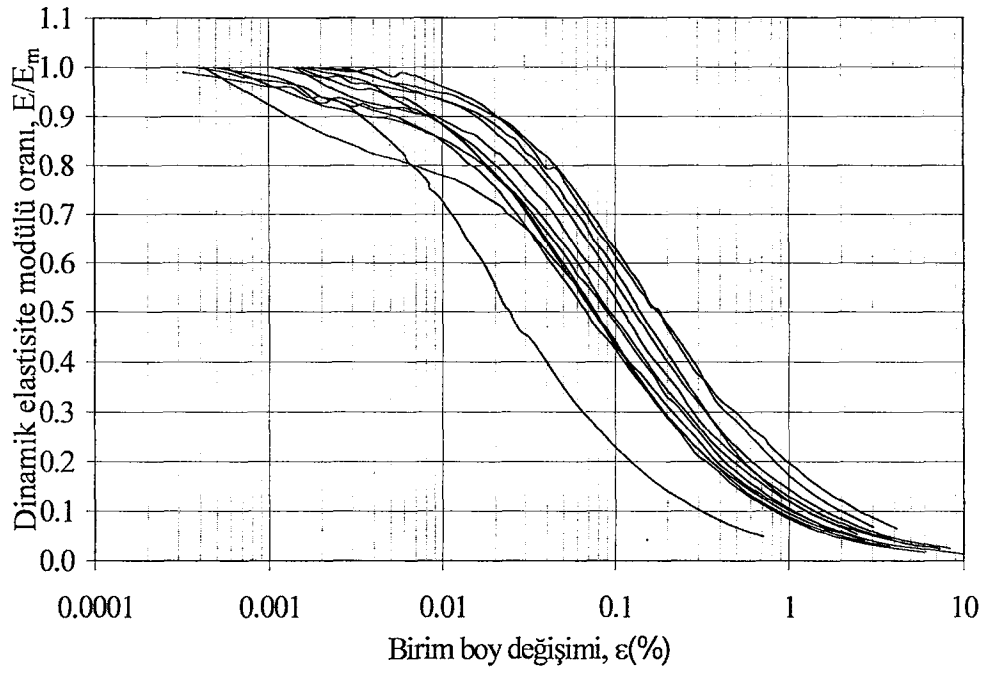


Şekil 4.52 DG58 nolu deneyin elastisite modülü birim boy değişimi değişimi ilişkisi.

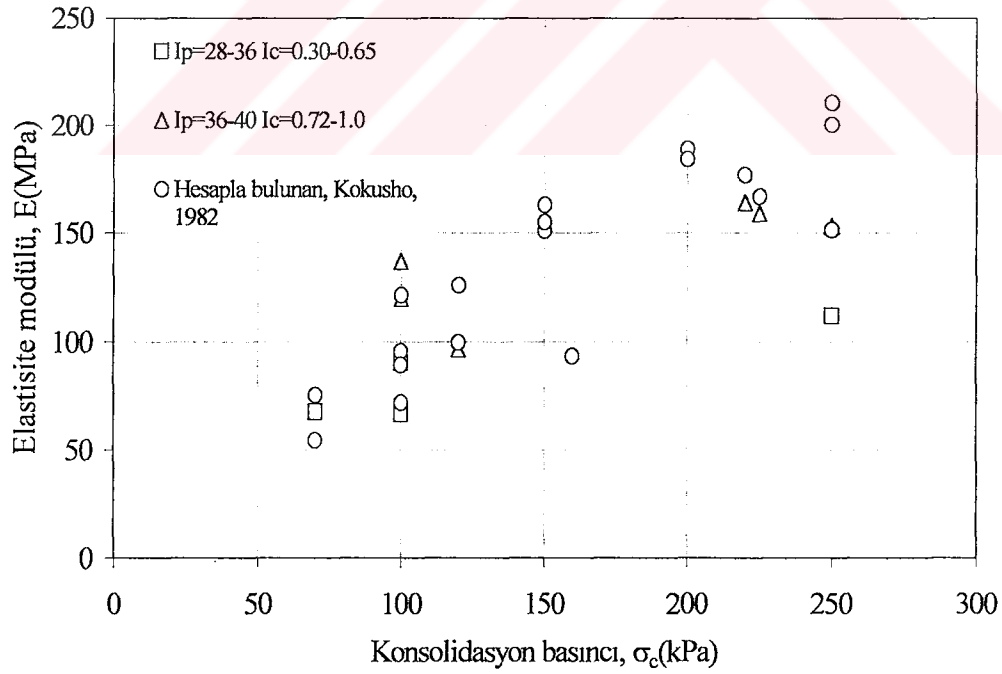
4.12.2 Elastisite Modülü Konsolidasyon Basıncı İlişkileri

Başlangıç elastisite modülü tespiti amacı ile bazı numuneler üzerinde konsolidasyon ve doyumluk sağlandıktan sonra dinamik deneye geçmeden çok küçük tekrarlı yükler uygulanarak oluşan deformasyonlar yardımı ile başlangıçtaki elastisite modülleri bulunmuştur. Bu numunelerin özellikleri ve hesaplanan E modülleri ve poisson oranı 0.50 alınarak bulunan en büyük dinamik kayma modülleri $G_{maks.}$ lar Bölüm 3’de Tablo 3.10’da verilmiştir. Başlangıç elastisite modülüne göre normalize edilen 120-250 kPa arası konsolidasyon basıncına sahip numunelerin düşey deformasyon- E/E_m ilişkisi Şekil 4.53’de gösterilmiştir. Burada kullanılan numunelerin plastisitesi $I_p=14-33$ aralığında ve kıvamları ise $I_c=0.67-1.00$ arasındadır. En solda kalan numunenin plastisitesi 33 ve kıvamı 0.67 dir. Kıvamı yüksek olan numunelerin daha sağda kaldığı görülmüştür. Aynı kıvamdaki numuneler incelendiğinde plastisitesi yüksek olanların daha yüksek modüle sahip oldukları görülmüştür (Özay ve diğerleri, 2000, Okur ve Ansal, 2000). Şekil 4.54’de Kokusho (1982) tarafından önerilen bağıntı kullanılarak elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Burada da konsolidasyon basıncı arttıkça elastisite modülü değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu çalışmada ölçülerek elde edilen küçük deformasyon elastisite modülü değerlerinin Kokusho (1982) bağıntısı ile hesaplanarak elde edilen değerlerle yakın olduğu görülmektedir.

Zeminlere deprem gibi tekrarlı yüklerin etkimesi ile elastisite modülü E nin elastik bölgenin aşılmasından sonra plastik deformasyonlar oluşmaya başlaması ile birlikte artan çevrim sayısına bağlı olarak azaldığı bilinmektedir. Bu değişimi göstermek amacı ile bu çalışma kapsamında statik deformasyon kontrollu drenajsız deneyler, $N=20$ çevrimlik dinamik yüklemenin hemen ardından yapılan statik deformasyon kontrollu deneyler ve çok küçük artan yükler uygulanarak küçük deformasyonlar ölçülmesi sureti ile yapılan dinamik gerilme kontrollu deneyler yapılmıştır. Yapılan bu deneylerde elastisite teorisine göre E modülleri hesap edilmiştir. Şekil 4.55’de küçük gerilme genliklerinin her beş çevrimde bir artırılması ile yapılan deney sonuçlarından küçük birim boy değişimi seviyeleri %0.1 ile %1 ve %2 birim boy değişimleri arasında büyük fark görülmektedir. Bunun nedeni elastik bölgenin aşılmasından sonra artan birim boy değişimlerine paralel olarak yumuşama meydana gelmesi ve elastisite modülü değerlerinin azalmasıdır.

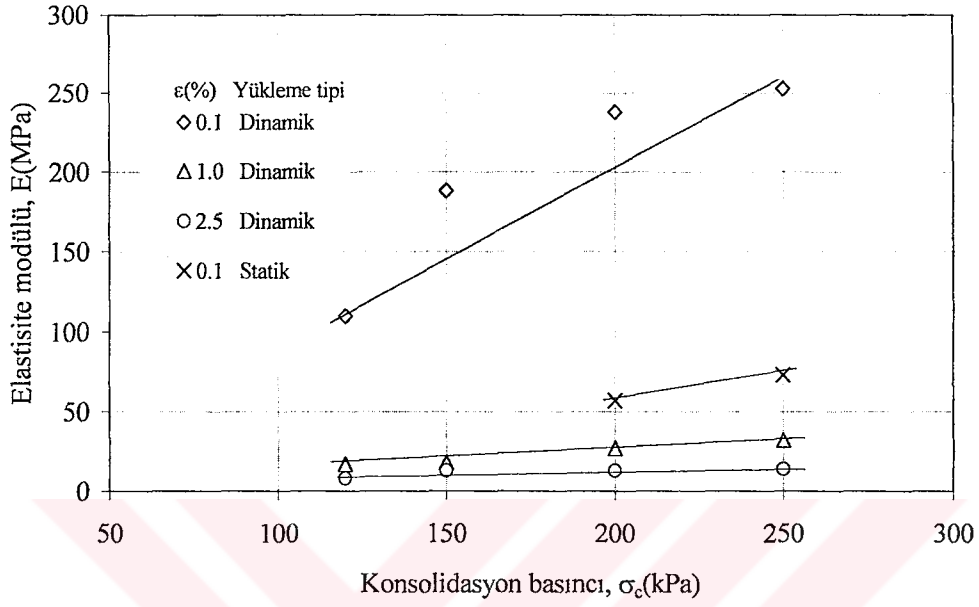


Şekil 4.53 Konsolidasyon basıncı 120-250 kPa, $I_p=14-33$ ve $I_c=0.67-1.00$ arasındaki zeminlerde elastisite modülü oranı, (E/E_m) -birim boy değişimi, (ϵ) ilişkisi.

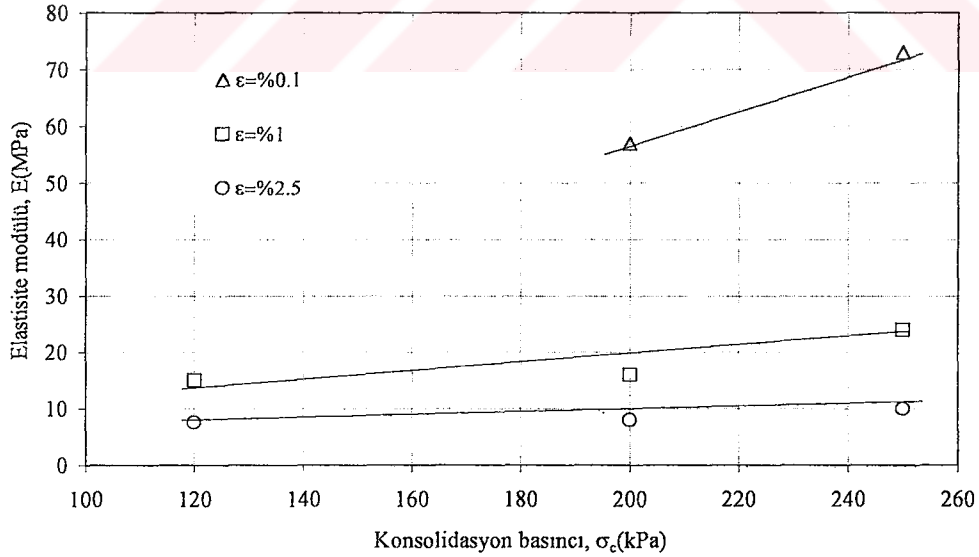


Şekil 4.54 Yüksek plastisiteli numunelerde en büyük elastisite modülü üzerinde konsolidasyon basıncının etkisi ve E değerlerinin literatürle karşılaştırılması

Statik deformasyon kontrollü deneylerde % 0.1, %1 ve %2 deformasyon seviyesinde ölçülen sekant elastisite modülü değerleri Şekil 4.56'da gösterilmiştir. Tüm birim boy değişimi seviyelerinde uygulanan konsolidasyon basıncı arttıkça elastisite modülü değerinin arttığı görülmektedir.



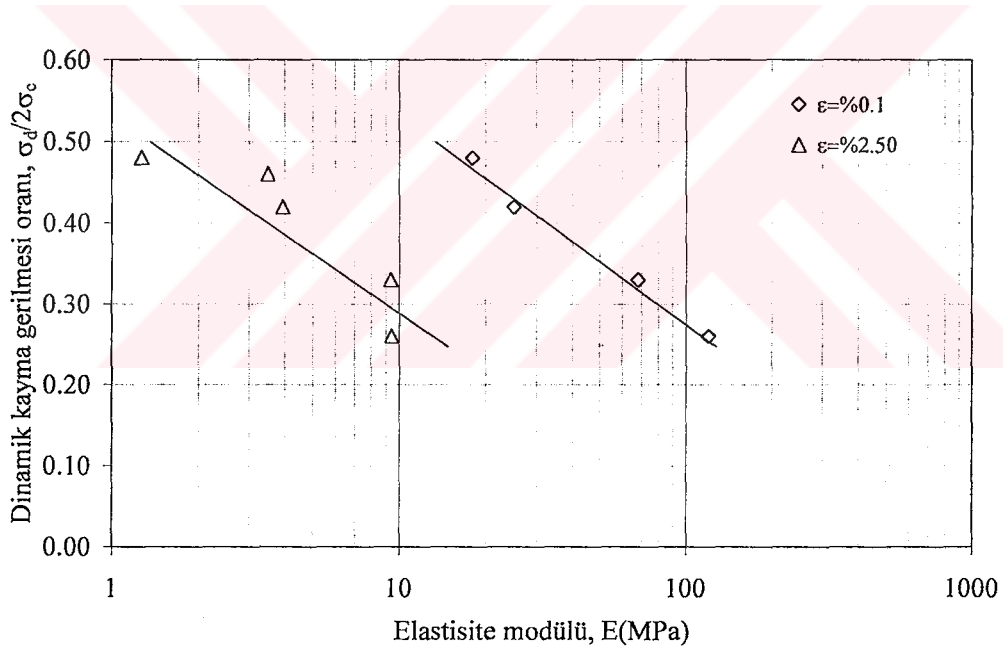
Şekil 4.55 Dinamik kademeli yükleme deneyi yapılan $I_p=14-25$ $I_c=0.67-0.88$ aralığındaki katı numunelerde $E-\sigma_c$ ilişkisi.



Şekil 4.56 Statik deney yapılan $I_p=19-25$ $I_c=0.65-1.04$ aralığındaki katı numunelerde $E-\sigma_c$ ilişkisi.

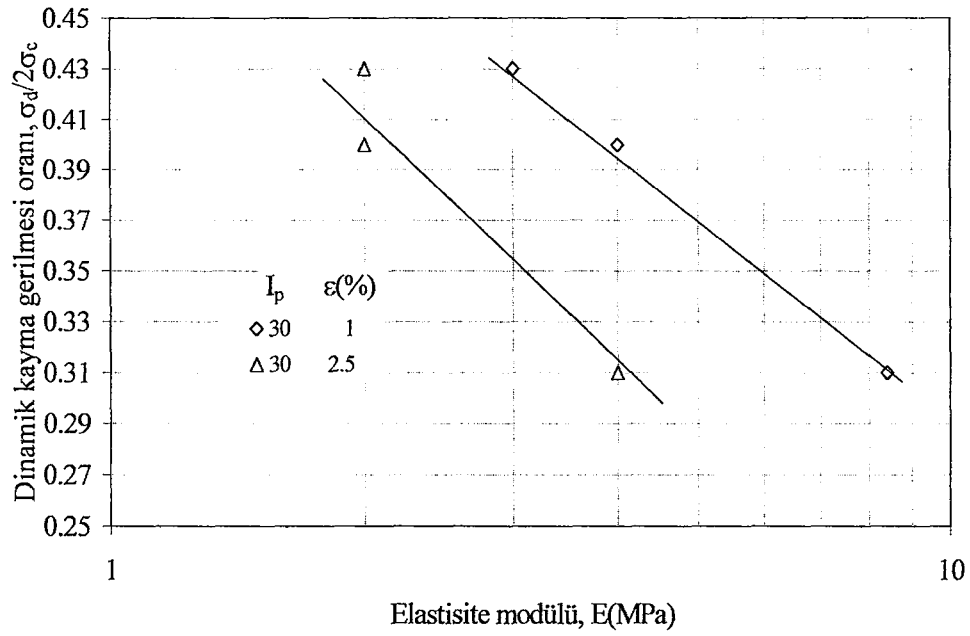
4.12.3 Elastisite modülü DKGO İlişkileri

Önceden dinamik gerilme uygulanıp sonradan statik deney yapılan numunelerde statik deneyde belirli deformasyon seviyesindeki elastisite modüllerinin DKGO larına göre değişimleri Şekil 4.57 ve 4.58’de farklı plastisitelere ve farklı kıvramlara göre gösterilmiştir. Şekil 4.57’de plastisitesi $I_p=20-24$ ve kıvramı $I_c=0.65-0.80$ olan numunelerin dinamik kayma gerilmesi oranı elastisite modülü (DKGO-E) değişimi incelendiğinde uygulanan ön dinamik gerilme arttıkça E modülü değerinin veya rijitliğin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.58’de ise aynı ilişki plastisitesi $I_p=30$ ve kıvramı $I_c=0.23-0.47$ olan daha yumuşak numune grubu için gösterilmiştir. Burada da uygulanan ön dinamik kayma gerilmesi oranı arttıkça rijitlik azalmaktadır. Birim boy değişiminin %1 ve %2.50 olması durumunda azalım eğrileri birbirine paralel olduğundan rijitlik kaybı aynı orandadır denilebilir.

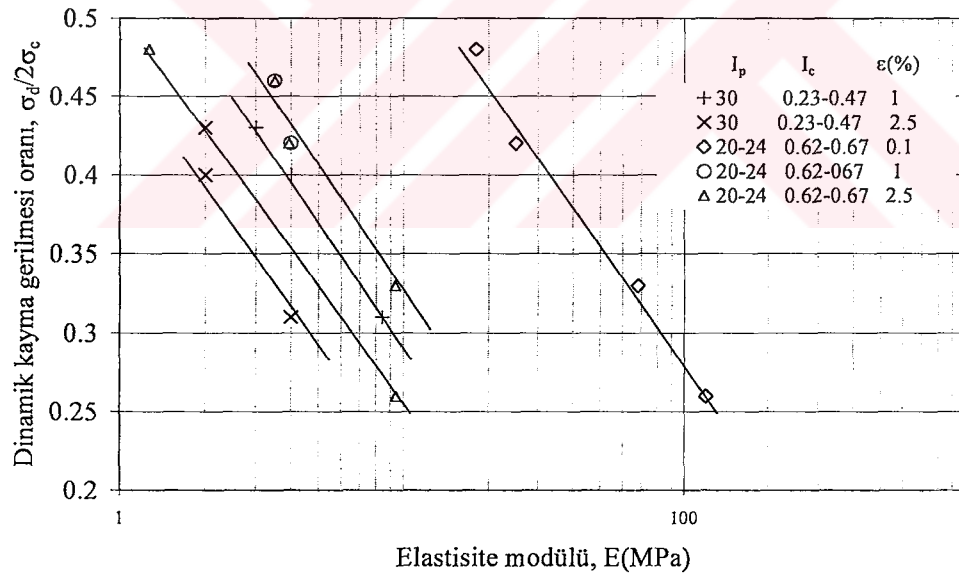


Şekil 4.57 E modülüne DKGO'nun etkisi ($I_p=20-24$ $I_c=0.65-0.80$).

Yukarıda bahsedilen plastisiteleri $I_p=30$ ve $I_p=20-24$ olan iki numune grubunun değişik birim boy değişimi değerlerindeki E modüllerinin uygulanan ön (DKGO) na göre değişimi Şekil 4.59’da gösterilmiştir. Aynı şekilde %0.1, %1 ve % 2.50 birim boy değişimi değerlerinde düşük plastisiteli katı numuneler ile daha yüksek plastisitedeki yumuşak numunelerin eğrileri birbirine paralel olduğundan aynı oranda rijitlik kaybı gösterdikleri söylenebilir.



Şekil 4.58 E modülüne DKGO'nun etkisi ($I_p=30$ $I_c=0.23-0.47$)



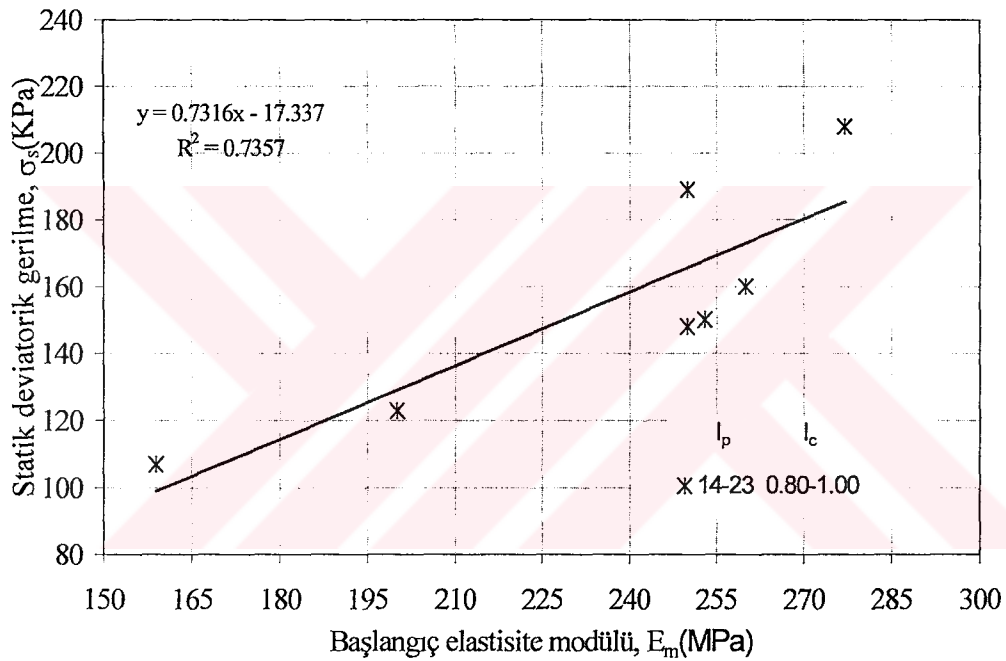
Şekil 4.59 E modülüne DKGO'nun etkisi (kıvam ve plastisite farklı).

4.12.4 Başlangıç Elastisite Modülünün Mukavemete Etkisi

Başlangıç küçük birim boy değişimi elastisite modülü ile mukavemet arasındaki bağıntının tespit edilmesi amacı ile E_m - σ_s değişimi oluşturulmuştur. Burada en büyük elastisite modülü E_m değerleri Bölüm 3 Tablo 3.10'da verilmiştir. Bu numuneler ile

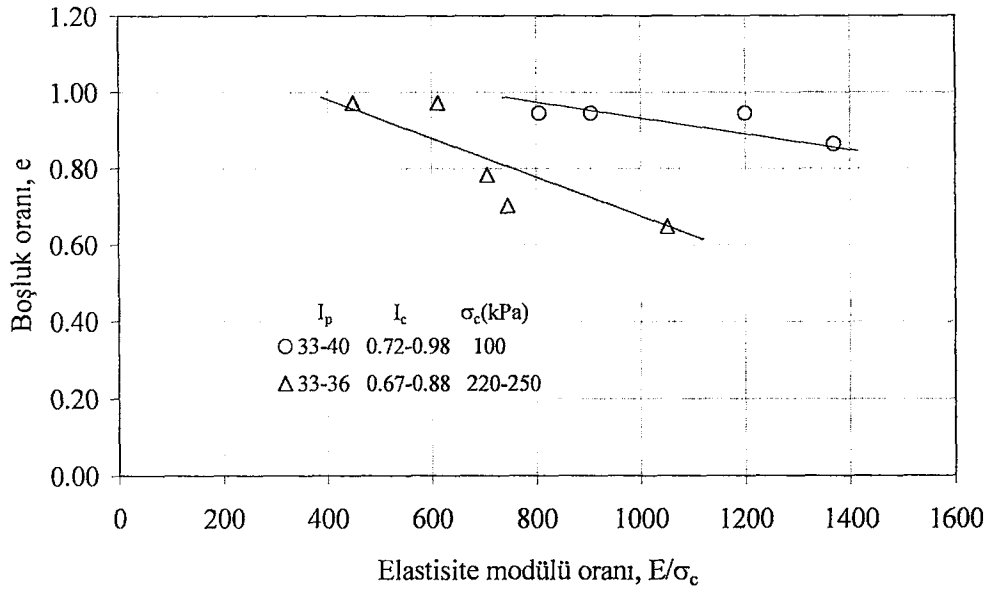
aynı kıvam plastisite ve konsolidasyon basıncındaki statik deney yapılan numunelerin $\varepsilon=20$ birim boy değişimi değerindeki deviatorik gerilmeleri σ_s ise Tablo 3.9’da verilmiştir. Şekil 4.60’da başlangıç en büyük elastisite modülünün deviatorik gerilme σ_s ’ye göre değişimi gösterilmiştir. Plastisitenin $I_p=14-23$ ve kıvamın $I_c=0.80-1.00$ aralığında olan bu numunelerde basit doğrusal korelasyon yapıldığı zaman bulunan σ_s - E_m ilişkisi (4.6) nolu bağıntı ile aşağıda gösterilmiştir. Bu bağıntının korelasyon katsayısı %74 dur.

$$\sigma_s = 0.7316E_m - 17.337 \quad (\text{kPa}) \quad (4.6)$$



Şekil 4.60 Başlangıç elastisite modülünün statik deviatorik gerilmeye etkisi.

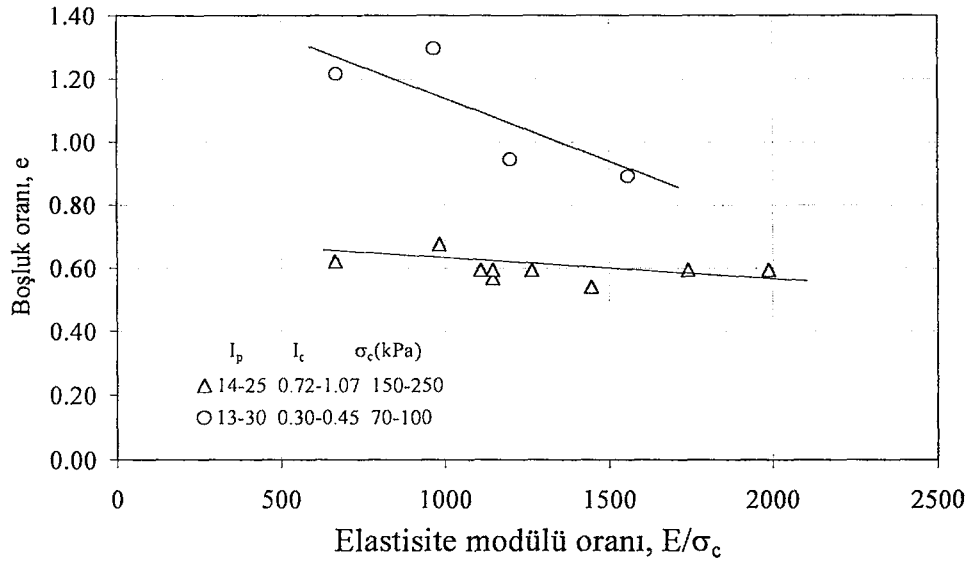
Başlangıç elastisite modülünün plastisite ve kıvama etkisini göstermek amacı ile deney başında dinamik küçük deformasyon modülü değerleri ölçülen numunelerin boşluk oranları da hesaplanmıştır. Bu değerler Bölüm 3 de Tablo 3.10’da verilmiştir. Şekil 4.61’de plastisiteleri $I_p=33-40$ arasında değişen numunelerin boşluk oranı-normalize elastisite modülü ilişkisi görülmektedir. Şekil incelendiği zaman daha katı kıvamdaki en sağdaki numunelerin daha yüksek rijitliğe sahip oldukları söylenebilir.



Şekil 4.61 Boşluk oranı, e elastisite modülü, E_m değişimi ($I_p=33-40$).

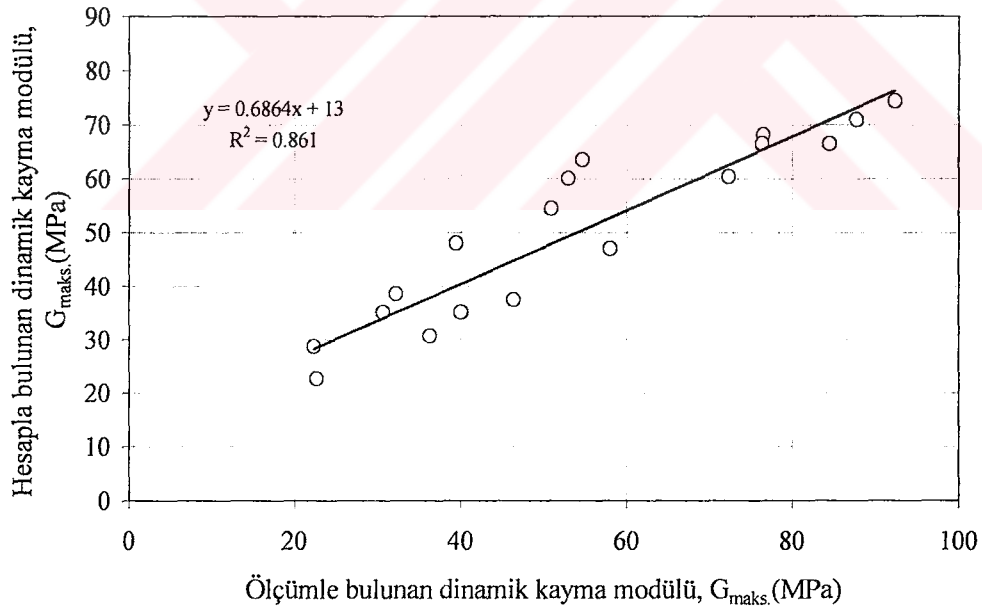
Plastisitesi daha düşük olan diğer bir grup deney sonucuna göre oluşturulan boşluk oranı elastisite modülü ilişkisi ise Şekil 4.62’de gösterilmiştir. Burada plastisitenin yanında kıvamın etkisi daha belirgin görülmektedir. Kıvamı yumuşak olan numunelerin elastisite modüllerinin daha küçük olduğu görülmektedir. Yumuşak numunelerin boşluk oranları da büyük olduğundan E modüllerinin küçük olması normaldir. Dinamik kayma modülü ve sönüm oranı üzerinde yapılan çalışmada zemin kıvamı arttıkça modül artarken sönüm oranı azalır (Özay ve diğerleri 2000).

Bölüm 3 Tablo 3.10’da verilen E değerleri (3.7) nolu denklemde yerine konarak başlangıç kayma modülü G_0 değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Kokusho (1987) tarafından verilen bağıntı ile hesaplanan değerlere yakın olmakla beraber kıvam-plastisite farkından dolayı biraz uzak kalmaktadır. Kokusho (1982) bağıntısının daha yumuşak ve $I_p > 40$ olan zeminlerde kullanım daha uygundur. Bundan dolayı plastisitesi 15-40 aralığında değişen orta katı killer için aşağıdaki aşağıda (4.7) deki bağıntı önerilmiştir. Bu bağıntı yardımı ile ölçülen ve hesaplanan değerler Şekil 4.63’de görüldüğü gibi 0.86 lık bir korelasyon katsayısı ile birbirlerine yakın olmaktadır.



Şekil 4.62 Boşluk oranı E modülü değişimi ($I_p=14-30$).

$$G_0 = 120 \frac{(8.50 - e)^2}{(1 + e)} \sigma_c^{0.50} \quad (\text{kPa}) \quad (4.7)$$



Şekil 4.63 Ölçülen G_0 değerleri ve hesaplanan G_0 değerleri dağılımı

4.13 Sonuç

Yapılan sabit genlikli dinamik, $N=20$ çevrim ardından statik, her 5 çevrimde bir küçük genliklerden itibaren yük artırımlı dinamik ve deformasyon kontrollü statik deneyler sonucunda dinamik kayma gerilmesi oranı (DKGO) kıvam ve plastisitenin artması ile artmakta, kaba dane oranının artması ile ise azalmaktadır. Dinamik yüklemeler sonucunda oluşan hacimsel deformasyonların dinamik yükün büyüklüğüne bağlı olarak arttığı gösterilmiştir. $N=20$ çevrim uygulanan DKGO hemen ardından yapılan statik deneyde elde edilen deviatorik gerilmenin azalmasına neden olmaktadır. Artan gerilme genliklerinde çevrim sayısına bağlı olarak birim boy değişiminin artması sonucu oluşan yumuşama ile rijitliğin azaldığı gösterilmiştir. En büyük kayma modülünün hesabı için deney sonuçlarından yararlanarak basit korelasyon yolu ile ampirik bir bağıntı önerilmiştir.



5. SONUÇLAR

Bu çalışmada örselenmemiş killi zemin numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli basınç deney aletinde deneyler yapılarak dinamik mukavemet özellikleri, mukavemet kaybı, dinamik yükleme sonrası hacim değişimleri ve başlangıç elastisite modülü özellikleri incelenmiştir. Deney sistemi klasik dinamik üç eksenli deney aletinin Kokusho (1980) tarafından geliştirilmiş bir modelidir. Hassas deformasyon ölçerler vasıtası ile 10^{-5} - 10^{-6} seviyesindeki yer değiştirmeler ölçülebilmektedir. Deneylerde kullanılan numunelerin büyük çoğunluğu Dinar bölgesinden araziden piston numune alıcılarla alınmıştır. Dinar bölgesi dışında 5 adet Adapazarı ve 5 adet Silivri olmak üzere 10 adet aynı yöntemle alınmış numunelerde kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelerin plastisite indisleri $I_p=15-44$, kıvamları $I_c=0.15-1.03$ doğal su muhtevaları $\omega_n=\%21-\%61$, likit limitleri, $\omega_l=\%31-\%71$ doğal birim hacim ağırlıkları $\gamma_n=1.90-2.05\text{g/cm}^3$ ve doygunluk parametresi $B=0.98-1.00$ arasında değişmektedir.

Örselenmemiş killi zemin numuneleri üzerinde yapılan sabit genlikli dinamik deneylerden mukavemet davranışını etkileyen zemin indeks özelliklerinden kıvam ve plastisitenin etkisi incelenmiştir. Aynı plastisite ve aynı konsolidasyon basıncı altındaki zemin numunelerinde kıvam arttıkça dinamik kayma gerilmesi oranı (DKGO)'nın arttığı gösterilmiştir. Aynı kıvam ve aynı konsolidasyona sahip zemin numunelerinde ise plastisite arttıkça DKGO'nun arttığı görülmüştür. Diğer araştırmacıların daha değişik kıvam ve konsolidasyon basınçlarında plastisitenin dinamik kayma gerilmesi oranının üzerinde etkisini göstermek için yaptıkları çalışmalar ile bu çalışmadaki sonuçların uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Frekansın etkisini göstermek için daha önce yapılan farklı frekanstaki çalışmalarla bu çalışmadaki elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada frekans dinamik deneylerde 0.50 Hz. olarak seçilmiştir.

Kaba dane oranının DKGO üzerinde etkisi diğer çalışmalarla karşılaştırılarak gösterilmiştir. Yaklaşık aynı kıvam ve plastisitedeki zeminlerde kum oranı arttıkça

DKGO'nın azaldığı gösterilmiştir. Bunun nedeni suya doymun zeminlerde kum oranı arttıkça tekrarlı yük etkisinde boşluk suyu basıncının daha hızlı bir şekilde artması ve büyük şekil değıştirmeler oluşması olarak açıklanabilir.

Birim boy değışimi ve boşluk suyu basıncının farklı çevrim sayılarındaki değeri dikkate alınarak dinamik kayma gerilmesi oranına göre değışimleri gösterilmiştir. Artan çevrim sayılarına bağı olarak boşluk suyu basıncı ve birim boy değışiminde artışlar meydana gelerek zeminin yumuşaması sonucu DKGO'nın azaldığı gösterilmiştir.

Sismik geçmişin etkisini göstermek amacı ile numunelere önce N=20 çevrim tekrarlı gerilme genlikleri veya dinamik kayma gerilmesi oranları uygulanmış ardından hiç ara vermeden drenajlar açılmadan 0.5 mm/dakika hızında statik deney yapılmıştır. Numune $\epsilon=20\%$ düşey birim boy değışimine uğrayınca deneye son verilmiştir. Bu deneylerden uygulanan N=20 çevrimlik tekrarlı gerilmelerden dolayı zeminde ne kadar bir deviatorik gerilme azalımı oluştuğı basit korelasyon yapılarak aşağıdaki bağıntıda verilmiştir. Burada zemin drenajsız dinamik sonrası statik deneyde 20% birim boy değışimine uğramıştır. Plastisitenin $I_p=19-44$ aralığı ve kıvamın $I_c=0.30$ ile 1.00 aralığında olması durumunda bu bağıntının geçerliliğı 64% lük korelasyon katsayısı ile gösterilmiştir.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_s} = -0.6891 \ln DKGO + 0.0837 \quad (4.2)$$

Bu bağıntıda dinamik deneyden sonraki statik deneyde elde edilen düşey deformasyonun 10% ve 20% olması durumunda fazla farklılık görülmemektedir. Bunun nedeni numuneler normal konsolide ve izotropik gerilme koşullarında efektif çevre gerilmesi uygulanmıştır.

Dinamik deneyler ve N=20 çevrim dinamik ardından 20% deformasyona kadar yapılan statik deneylerden sonra drenajlar açılarak numuneler 24 saat konsolidasyona bırakılmış ve bu sırada oluşan hacim değışimleri hesap edilmiştir. Değişik plastisite ve kıvamdaki, DKGO-hacimsel deformasyon (ϵ_{vd}) değışimleri incelenmiş olup kıvamın $I_c=0.30-1.00$ aralığında ve plastisite indisinin $I_p=18-44$ aralığında olması

durumu için aşağıdaki ampirik bağıntı basit korelasyon yapılarak bulunmuştur. Bu bağıntının numunelerin dinamik yükleme ile veya N=20 çevrim dinamik ardından statik yükleme hallerinde geçerliliği gösterilmiştir.

$$\varepsilon_{vd} = 7.5483 \frac{\sigma_d}{2\sigma_c} - 1.1404 \quad (\%) \quad (4.3)$$

Bu bağıntı yardımı ile belirli bir dinamik kayma gerilmesi oranında ne kadar hacimsel deformasyon oluşabileceği hesaplanabilir.

Başlangıç elastisite modülü küçük deformasyon ölçerler vasıtası ile hesap edilerek bu değer konsolidasyon basıncı ile arttığı gösterilmiştir. Değişik birim boy değişimi değerlerindeki elastisite modülü değerleri hesap edilmiştir. Dinamik yükün etkisi ile boşluk suyu basıncında artış oluşmakta ve birim boy değişimleri artarken elastisite modülü veya rijitlik azalmaktadır. Elastik bölgede deformasyon seviyesi 10^{-4} veya 10^{-5} değerinde iken başlangıç elastisite modülü değerleri zemin plastisite ve kıvamına göre farklılık gösterirken deformasyon seviyesi %1-%2.50 değerlerine ulaştığı zaman bütün numunelerde birbirlerine daha yakın olmakta ve 20 MPa'nın altına düşmektedir.

Konsolidasyon basıncının artması ile elastisite modülünün arttığı farklı plastisite ve kıvamdaki zeminlerde gösterilmiştir. Üç eksenli dinamik deney sisteminde ölçülen başlangıç elastisite modülü değerlerinin diğer araştırmacıların aynı deney sistemini kullanarak elde ettiği bağıntılar ile hesaplanan değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Boşluk oranı arttıkça başlangıç elastisite modülü veya rijitlik azalmaktadır.

Dinamik kayma gerilmesi uygulanan numunelerin belirli birim boy değişimi seviyelerindeki elastisite modülü değerleri incelendiği zaman uygulanan dinamik kayma gerilmesi oranına bağlı olarak sekant E modüllerinin azaldığı gösterilmiştir.

Başlangıç elastisite modülü ölçülen deneyler ile yaklaşık aynı plastisite ve kıvamdaki statik deneylerin %20 birim boy değişimi seviyesindeki statik deviatorik gerilme ilişkileri oluşturulmuştur. Başlangıç dinamik elastisite modülü arttıkça statik deviatorik gerilme σ_s 'nin arttığı gösterilmiştir. Basit korelasyon yapılsa statik

deviatorik gerilme σ_s ile başlangıç dinamik elastite modülü $E_{maks.}$ arasında $I_p=14-23$ arası ve $I_c=0.60-1.00$ kıvamındaki normal konsolide killerde aşağıdaki bağıntı elde edilir. Korelasyon katsayısı %74 olan bu bağıntı daha çok deneyle desteklenerek pratik amaçlar için kullanılabilir.

$$\sigma_s = 0.7316E_m - 17.337 \quad (\text{kPa}) \quad (4.6)$$

Başlangıç kayma modülü değeri için plastisite aralığı $I_p=15-40$ ve orta katı kıvamdaki killi zeminlerde (4.7) nolu bağıntı önerilmiştir. Üç eksenli deney sisteminde ölçülen küçük birim boy değişimleri sonucu bulunan elastik bölgedeki G_0 değerleri bu formülle bulunan değerlerle örtüşmektedir.

$$G_0 = 120 \frac{(8.50 - e)^2}{(1 + e)} \sigma_c^{0.50} \quad (\text{kPa}) \quad (4.7)$$

KAYNAKLAR

- Ansal, A.M.**, 1981. Zeminlerin dinamik kayma gerilmeleri altında davranışları, *Doçentlik Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Ansal, A.M., Yıldırım H.**, 1985. Killerin tekrarlı yükler altında kayma mukavemeti, *II.Ulusal Kil Sempozyumu*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 24-27 Eylül, s. 329-341.
- Ansal, A.M., ve Erken A.**, 1982. Rate dependent dynamic behavior of normally consolidated clay, *7th European Conference On Earthquake Engineering*, Athens, 20-25 September, Greece, p. 329-336.
- Ansal, A.M., ve Erken A.**, 1986. Kohezyonlu zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışı, *Deprem Araştırma Bülteni*, **50**, 10-53.
- Ansal, A.M., ve Erken A.**, 1989. Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, **115**, 968-983.
- Ansal, A.M., ve Tuncan M.**, 1989. Consolidation in clays due to cyclic stresses, *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 13-18 August, Brasil, p. 3-6.
- Anderson, K.H.**, 1976. Behavior of clay subjected to undrained cyclic loading, *Norwegian Geotechnical Institute*, **114**, 33-44.
- Anderson, D.G. and Richart, F.E.**, 1976. Effects of straining in shear modulus of clay, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **102**, 975-987.
- Andersen K.H., Pool, J.H., Brown, S.F. and Rosenbrand, W.F.**, 1980. Cyclic and static laboratory tests on Drammen clay, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **106**, 499-529.
- Adachi, T., Oka, F., Hirata, T., Hasmimoto, T., Nagaya, J., Mimura, M., and Pradhan, B.S.** 1995. Stress-strain behavior and yielding characteristics of Eastern Osaka Clay, *Soils and Foundations*, **3**, 1-13.
- Boulanger, R.W., Meyers, M.W., Mejia, L.H. and Idris, I.M.**, 1997. Behavior of a fine-grained soil during the Loma Prieta earthquake, *Canadian Geotechnique*, **35** 146-158

- Boulanger, R.W., Mejia, L.H. and Idris, I.M., 1997.** Liquefaction at Moss Landing during the Loma Prieta earthquake., *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, ASCE*, **123(5)**, 453-467
- Bowles, J.E., 1988.** Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill Book Co.,Singapore.
- Borden, R.H. Shao, L. and Gupta, A. 1996.** Dynamic properties of piedmont residual soils *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **122**, 813-821
- Bray, J.D., Riemer, M.E., Gookin, W.B., 1999.** On the dynamic characterization of soils, *Proceedings of 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisbon, 21-25 June, Portugal, p. 847-856.
- Castro, G. and Chistian, J.T., 1976.** Shear strength of soils and cyclic loading, *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE*, **102**, 887-894.
- Das, M.B., Puri, K.V. and Prakash, S. 1999.** Liquefaction of silty soils, *Proceedings of Second Earthquake Geotechnical Engineering International Conference*, Lisbon, June 21-25, Portugal, p. 619-623.
- Diaz, J.A., 1988.** Behavior of Mexico City clay subjected to undrained repeated loading, *Canadian Geotechnique*, **26**, 159-162
- Erken, A., 1982.** Killerin dinamik özellikleri üzerinde frekansın etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Erken, A., Ansal, A.M. ve Özarda, H., 1987.** Killerde deformasyon kontrollü dinamik deneyler, *III. Ulusal Kil Sempozyumu*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 21-27 Eylül, s. 343-355.
- Erken, A. Özay, R. İyisan, R. ve Güllü, H. 1998.** 1995 Dinar depreminde yerel zemin koşullarının etkisi, *İTU İnşaat Fakültesi ARGE Raporu*, **305**, İstanbul.
- Erguvanli, M.A.,1975.** Kohezyonlu zeminlerin dinamik özelliklerinin deneysel yöntemle saptanması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- Fujiwara , H., Yamanouchi, T., Yasuhara, K. and Ue, S., 1985.** Consolidation of alluvial clay under repeated loading, *Soils and Foundations*, **27**, 19-30.
- Fohoum, K., Fellow, A., and Amini, F., 1996.** Dynamic properties of cohesive soils treated with lime, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, ASCE*, **122**, 382-389
- Güler, F.E., 1980.** Kohezyonlu zeminlerin dinamik davranışına boşluk Suyu basıncının etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.

- Guha, S., Drenevich, V.P. and Bray, J.D.,** (1997). Dynamic characteristics of Old Bay clay, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, **20**, 383-393.
- Guo, T. and Prakash, S.,** 1999. Liquefaction of silts and silt-sand mixtures, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division*, ASCE, **125**, 706-710.
- Georgiannou, V.N., Hight, D.W. and Burland, J.B.,** 1991a. Behavior of clayey sands under undrained cyclic triaxial loading, *Geotechnique*, **41**, 383-393.
- Govil, S. and Houston, W.N.,** 1995. Post-earthquake shear strength of soils, *Proceedings of first Earthquake Geotechnical Engineering Conference*, Tokyo, 14-16 November, Japan, p. 197-201.
- Hardin, B.O. and Black, W.L.,** 1968. Vibration modulus of normally consolidated clay, , *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, **94**, 353-369.
- Harden, B.O. and Richart, F.E.,** 1963. Elastic wave velocities in granular soils, *Journal of Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, **89**, 33-65.
- Hardin, B.O. and Drnevich, V.P.,** 1972a. Shear modulus and damping in soils measurement and parameter effects, *Journal of Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, **98**, 603-624
- Hardin, B.O., Drnevich, V.P.,** 1972b. Shear modulus and damping in soils: design equation and curves, *Journal of Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, **98**, 667-692.
- Hirao, K. and Yasuhara,** 1991. Cyclic strength of underconsolidated clay, *Soils and Foundations*, **31**, 180-186
- Horii, N., Toyosawa, Y. and Tamate, T.** 1994. Undrain shear characteristics of a soft clay after cyclic loading, *Proceedings of International Symposium on Pre-Failure Deformation Characteristic of Geomaterials*, Sapparo, 12-14 September, Japan, p. 113-118.
- Hight, D.W. and Georgiannou, V.N.,** 1995. Effects of sampling on the undrained behavior of clayey sands, *Geotechnique*, **45**, 237-247.
- Houston, N. W. and Herrmann, H. G.,** 1979. Undrained cyclic strength of marine soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **106**, 691-711.
- Hyodo, M., Yamamoto, Y. and Sugiyama, M.,** 1994. Undrain cyclic behavior of normally consolidated clay subjected to initial static shear stress, *Soils and Foundations*, **34**, 1-11

- Hyodo, M.**, 1997. Evaluation of in-situ cyclic shear strength of clay, *Proceedings of The Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Hamburg, 6-12 September, Germany, p.123-126.
- Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Yamamoto, Y. and Fujii, T.**, 1999. Cyclic shear strength of undisturbed and remoulded marine clays, *Soils and Foundations*, **39**, 45-58.
- Harada, M., Urasawa, Y. and Sirai, S.** 1990. Liquefaction strength characteristics of reclaimed coastal area by sands containing fines, *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundations Engineering*, JSSMFE, **38-6**, 21-26.
- Hyde, Adrian F.L., Yasuhara, K. and Hirao, K.**, 1993. Stability criteria for marine clay under one-way cyclic loading, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **119**, 1771-1789.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y.**, 1978. Shear moduli of sands under torsional shear loading, *Soils and Foundations*, **18**, 39-56.
- Ishihara, K. and Koseki, J.** 1989 Cyclic shear strength of fine containing sands, *Proceeding of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 13-18 August, Mexico, p. 101-106
- Ishihara, K.**, 1996. Soil Behavior in Earthquake Geotechnics, Clarendon Press, Oxford.
- Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., Presti, D.C.F.**, 1994. Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays, *Proceedings of International Symposium on Pre-Failure Deformation Characteristic of Geomaterials*, Sapparo, 12-14 September, Japan, p. 135-144.
- JGS T 542-1995**, 1995. Method for cyclic triaxial test to determine deformation properties of geomaterials, *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*.
- JGS T 542-1995**, 1990. Practice for preparing triaxial test specimens, *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*.
- Kagawa, T.**, 1990. Moduli and damping factor of soft marine clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **118**, 1360-1375
- Knight, K. and Blight, G.E.** 1965. Studies of some effects resulting from unloading of soils, *Proceedings of 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, 20-22 December, Canada, p. 103-107
- Koutsoftas, C.D.**, 1978. Effects of cyclic loads on undrained strength of two marine clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **104** 609-619

- Koutsoftas, C.D. and Fischer, J.A.**,1980. Dynamic properties of two marine clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE **106** 645-657
- Katagiri, M. and Imai, G.** 1994. Shearing behaviour of cohesive soil subjected to decrease in mean effective stress, *Proceedings of International Symposium on Pre-Failure Deformations Characteristics of Geomaterials*, Sapparo, 12-14 september, Japan, p. 131-136.
- Kokusho, T.**,1980. Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range, *Soils and Foundations*, **20**, 45-60.
- Kokusho, T., Yoshida, Y. and Esashi, Y.**, 1982. Dynamic properties of soft clays for wide strains range, *Soils and Foundations*, **22**, 1-18.
- Kokusho, T.**, 1987. In-situ dynamic soil properties and their Evaluations, *Proceedings of The 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Kyoto, 22-23 September, Japan p. 215-240.
- Kallioglou, P., Tika, Th. and Pitilakis, K.**, 1999. Dynamic characteristics of natural cohesive soils, *Earthquake Geotechnical Engineering*, **17**, 113-117.
- Kramer, S.L.**, 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall Press, New Jersey.
- Kumbasar, V. ve Kip, F.** 1992. Zemin Mekaniği Problemleri, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- Larew, H.G. and Leonards, G.A.**, 1962. A strength criterion for repeated loads, *Highway Research Board*, **41**, 529-566.
- Ladd, C. and Foott, R.** 1974. New design procedure for stability of soft clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **100**, 763-786
- Lee, K.L. and Focht, J.A.**, 1975. Strength of clay subjected to cyclic loading, *Marine Geotechnology*, **1**, 165-185.
- Lefebvre, G. and Pfendler, P.**, 1996. Strain rate and preshear effects in cyclic resistance of soft clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE **122**, 19-26.
- Lanzo, G. and Vucetic, M.**, 1999. Effects of soil plasticity on damping ratio at small strains, *Soils and Foundations*, **39**, 131-141.
- Matsuda, H. and Ohara, S.**, 1987. Treshold strain of clay for pore pressure buildup, *Soils and Foundations*, **3**, 127-130.

- Matsui, T. and Bahr, M. A.**, 1992 Prediction of shear characteristics of undistributed clays after cyclic loading, *Proceedings of the 10th World Conference Earthquake Engineering*, Madrid, 19-24 July, Spain, p. 1239-1242
- Matsui, T., Ohara, H. and Ito, T.**, 1980. Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **106**, 1101-1120.
- Matasoviç, N. and Vucetic, M.**, 1995. Generalized cyclic degradation pore pressure generation model for clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **121**, 33-41.
- Marcuson, W.F., Wahls, H.E.**, 1972. Time effects on dynamic shear modulus of clays, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, **98**, 1359-1379.
- Ohara, S. and Matsuda, H.**, 1988. Study on settlement of saturated clay layer induced by cyclic shear, *Soils and Foundations*, **28**, 103-113.
- O'Reilly, M., Borvn, F.S. and Overy, R.F.**, 1991. Cyclic loading of silty clay with drainage periods, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **117**, 354-362.
- Okur, V., Ansal, A.M.**, 2000. Dynamic characteristics of clays, *Proceedings of the 3rd Japan-Turkey Workshop on Earthquake Engineering*, Istanbul, 21-25 February, Turkey, p. 45-52.
- Özüdogru, K.G.**, 1979. Önceden yüklenmiş killerin dinamik davranışı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Özaydın, K.**, 1982. Zemin Dinamiği, Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Özaydın, K.**, 1989. Zemin Mekaniği, Maya Matbaacılık ve Yayıncılık Ltd.Şti. İstanbul.
- Özay, R., Okur, V. ve Erken, A.**, 2000. Örselenmemiş killi zeminlerde kıvamın dinamik kayma modülü ve sönüme etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi*, İ.T.Ü. İstanbul, 26-27 Ekim, Türkiye, s. 437-444.
- Procter, D.C. and Khaffaf, J.H.**, 1984. Cyclic triaxial tests on remoulded clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE **110**, 1431-1445.
- Pradhan, B.S. Matsui, T. and Yasuhara, K.** 1999. Cyclic undrained triaxial strength of clay by a Round Robin Test, *Soils and Foundations*, **4**, 121-129

- Ray, R.P and Woods, R.D.** 1988. Modulus and damping due to uniform and variable cyclic loading, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **114**, 861-875
- Seed, H.B. and Chan, C.K.,** 1966. Clay strength under earthquake loading condition, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering Division ASCE*, **92**, 53-78.
- Sangrey, B.O., Henkel, J.D. and Esring, M.I.,** 1969. The effective stress response of a saturated clay soil to repeated cyclic Loading, *Canadian Geotechnical Journal*, **6**, 241-452.
- Samang, L., Sakai, A. and Miura, N.,** 1995. Post earthquake deformation of soft clay deposits, *Proceedings of the first Earthquake Geotechnical Engineering Conference*, Tokyo, 14-16 November, Japan, p. 183-187.
- Seed, H.B., Martin, P.P. and Lysmer, J.** 1976. Pore-water pressure changes during liquefaction, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering Division, ASCE*, **102**, 323-347.
- Seed, H.B.,** 1979. Considerations in earthquake-resistant design of earth and rockfill dams, *Geotechnique*, **29**, 215-263
- Seed, H.B. and Idriss, I.M.** 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquake, *Monograph Series*, Earthquake Engineering Research Institute, Palo Alto, California.
- Shibuya, S.** 1997 Modeling of strain-rate depending deformation of clay at small strains, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, 6-12 September, Germany, p. 409-412
- Shibuya, S. and Mitachi, T.,** 1994. Small strain shear modulus of clay sedimentation in a state of normal consolidation, *Soils and Foundations*, **4**, 67-77
- Shibata, T and Soelarno, D.S.,** 1975. Stress-strain characteristic of sands under cyclic loading, *Japan Society of Civil Engineering*, **239**, 57-65.
- Stokoe, K.H., Bay, J.A., Rosenblad, B.L. , Hwang, S.K. and Twede, M.R.,** 1996. In situ seismic and dynamic laboratory measurements of geotechnical materials at Queensboro Bridge and Roosevelt Island, *University of Texas, Geotechnical Engineering Report, GR-94-5*, Austin, Texas, USA.
- Thiers, G.R. and Seed, H.B.,** 1969. Strength and stress-strain characteristics of clays subjected to seismic loading conditions, *American Society of Testing and Materials, ASTM*, **450** 3-56.
- Toğrol, E., Özüdoğru, K.G. ve Güler, E.,** 1977. Tekrarlı yüklerin zemin mukavemetine etkisi, *İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Teknik Rapor*, **29** İstanbul.

- Tatsuoka, F. and Shibuya, S.,** 1992. Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests, *Proceedings of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics*, Bangkok, 9-13 December, Thailand, p. 101-170.
- TS-1901,** 1987. İnşaat Mühendisliğinde sondaj yolları ile örselenmiş ve örselenmemiş numune alma yöntemleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Varadhi, S.N. and Saxsena, S.K.,** 1981. Foundation response to soil trasmitted loads, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **106**, 1101-1109.
- Vucetic, M. and Dobry, R.,** 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **117**, 89-107.
- Viggiani, G. and Atkinson, J.H.,** 1995. Stiffness of fine-grained soil at very small strains, *Geotechnique*, **45**, 249-265.
- Yasuhara, K., Yamanouchi, T., Hirao, K.,** 1982. Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay, *Soils and Foundations*, **22**, 77-91.
- Yu, P. and Richart, F.E** 1984. Stress ratio effects on shear modulus of dry sands, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **110**, 331-345
- Yasuhara, K. and Hyde, F.L.,** 1997. Method for estimating postcyclic undrained secant modulus of clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **123**, 204-212
- Yasuhara, K. and Andersen, K.H.,** 1991. Recompression of normally consolidated clay after cyclic loading, *Soils and Foundations*, **31**, 83-94.
- Yıldırım, H.,** 1987. Farklı tekrarlı yükleme biçimleri altında killerin dinamik davranışı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Zergoun, M. and Vaid, Y.P.,** 1994. Effective stress response of clay to undrained cyclic loading, *Canadian Geotechnical Journal*, **31**, 714-727.
- Zen, K., Umehara, Y.P., and Hamada, K.,** 1978. Laboratory tests and in-situ seismic survey on vibration shear modulus of clayey soils with various plasticities, *Proceedings of the 5th Japanase Earthquake Engineering Symposium*, 14-18 June, Japan, p. 721-728.

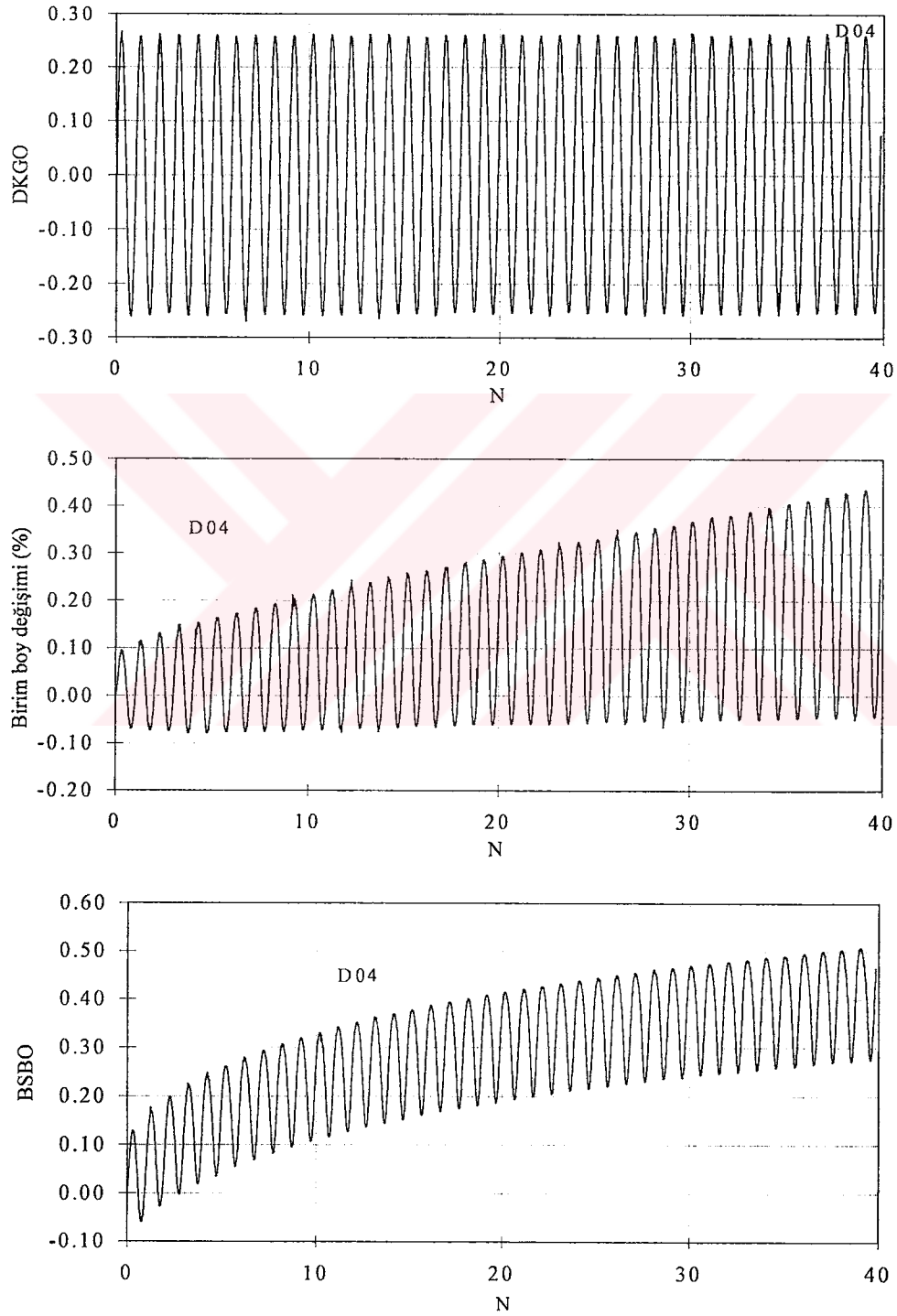
EKLER

EK A. DİNAMİK DENEY GRAFİKLERİ

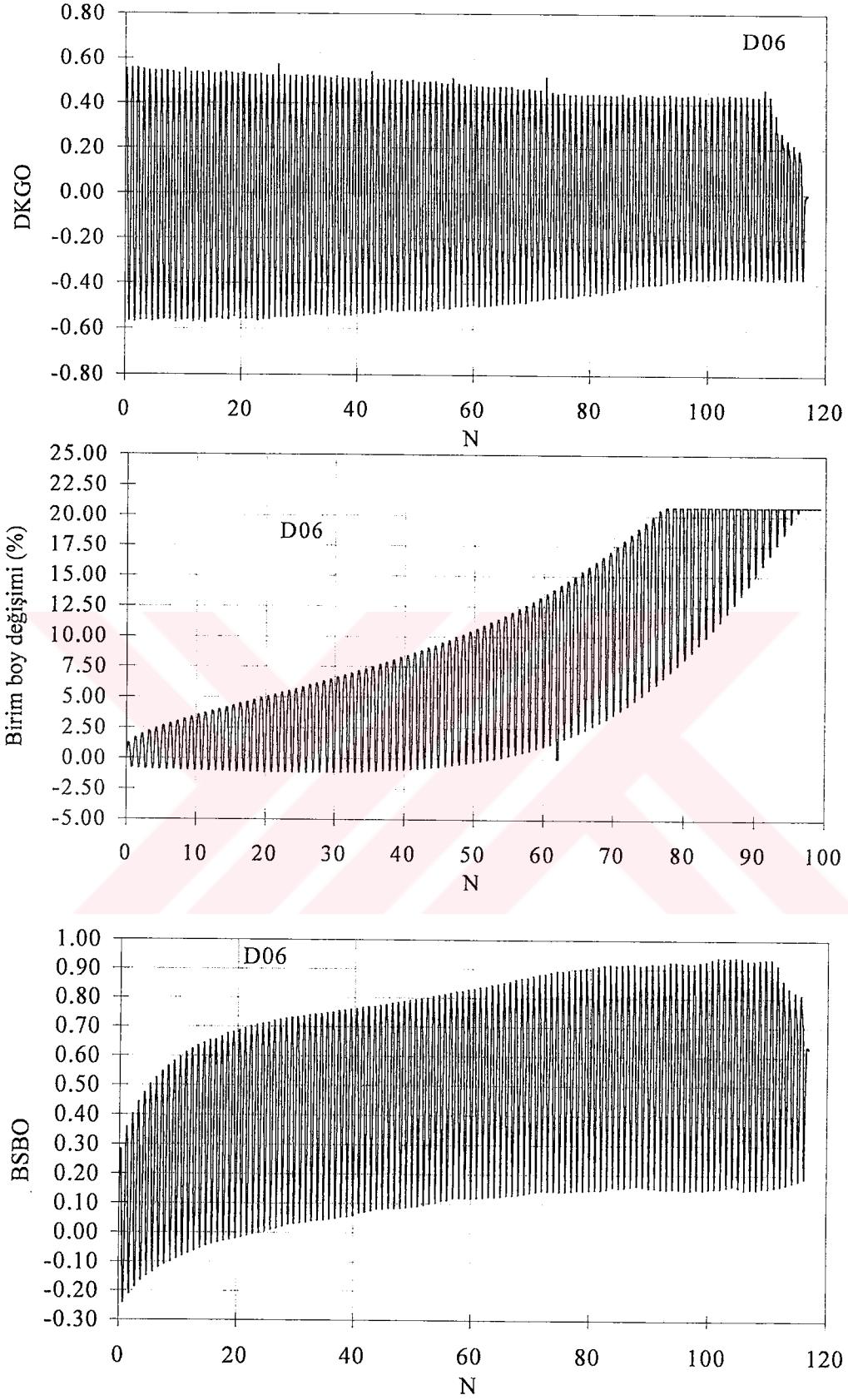
EK B. N=20 ÇEVİRİM DİNAMİK ARDINDAN STATİK DENEYLER GRAFİKLERİ



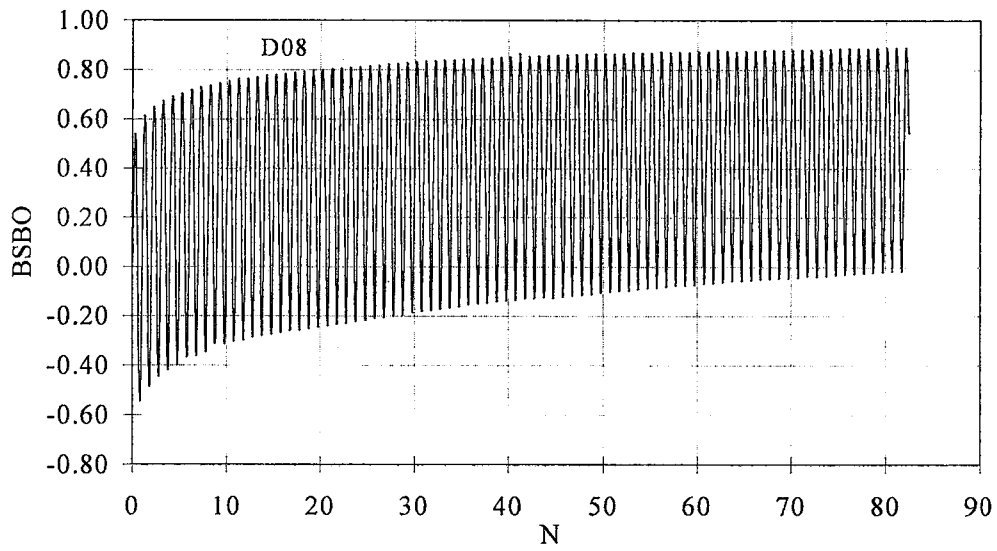
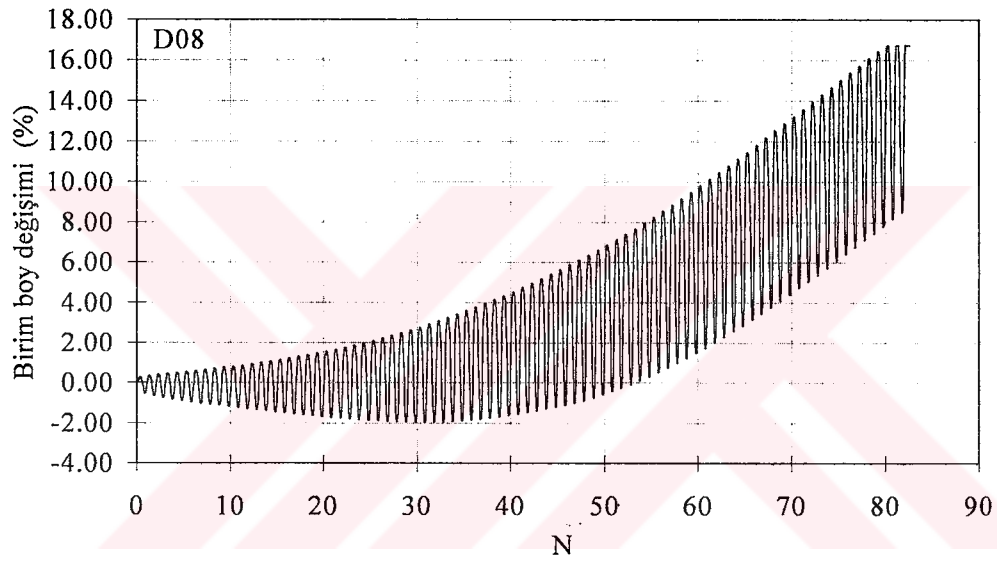
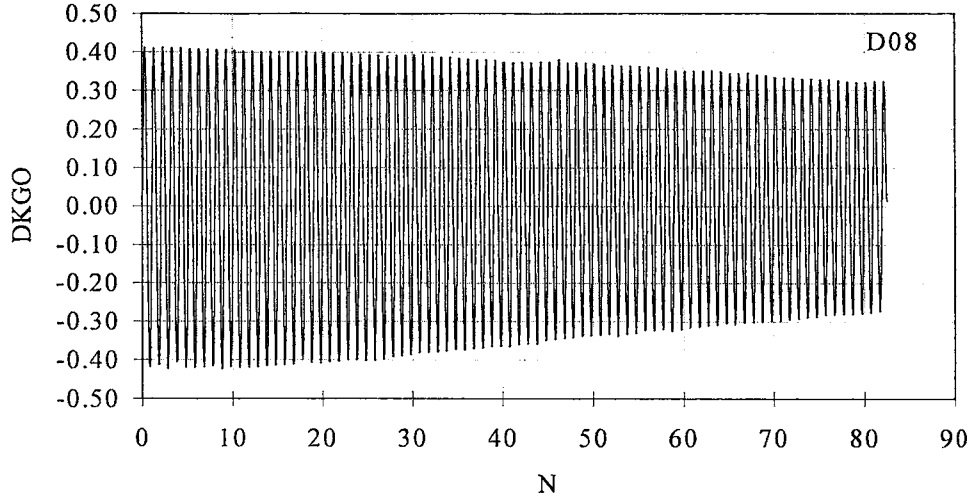
EK A. DİNAMİK DENEY GRAFİKLERİ



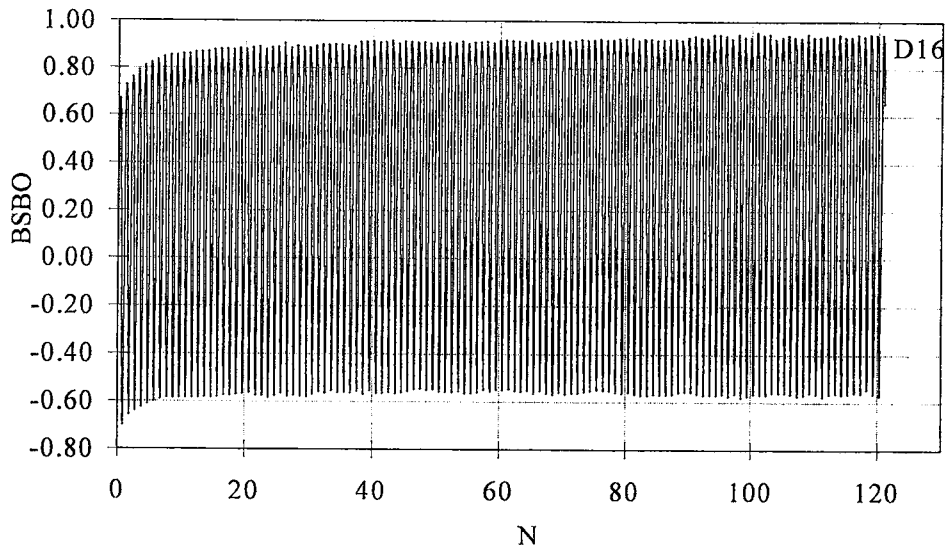
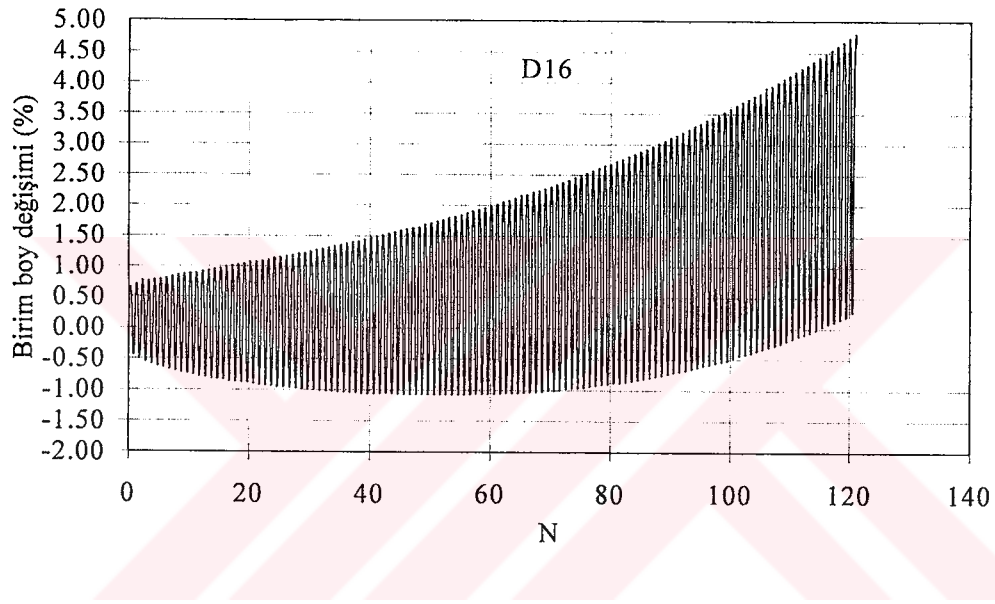
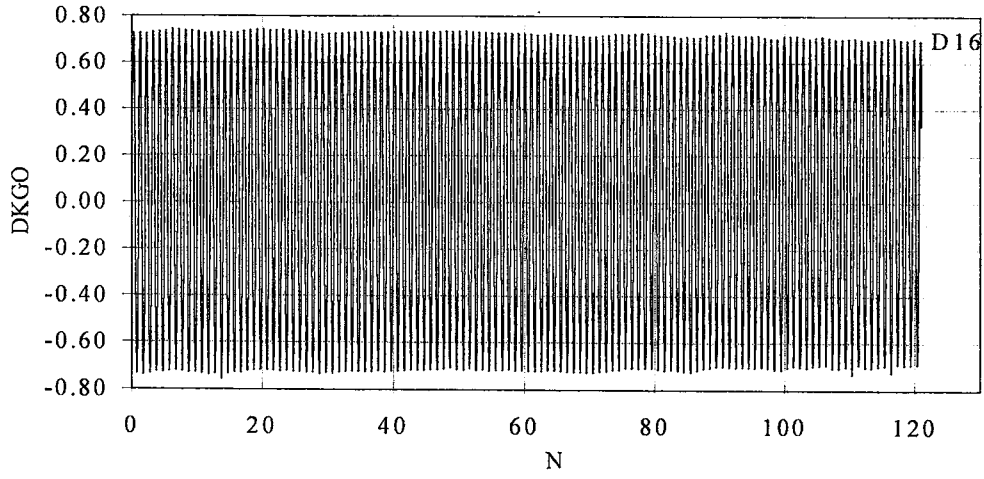
Şekil A1 D04 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.



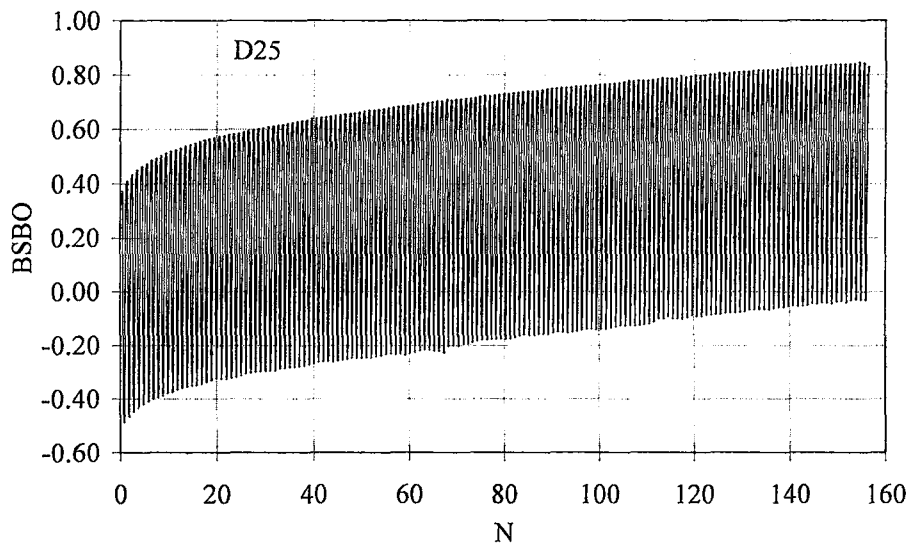
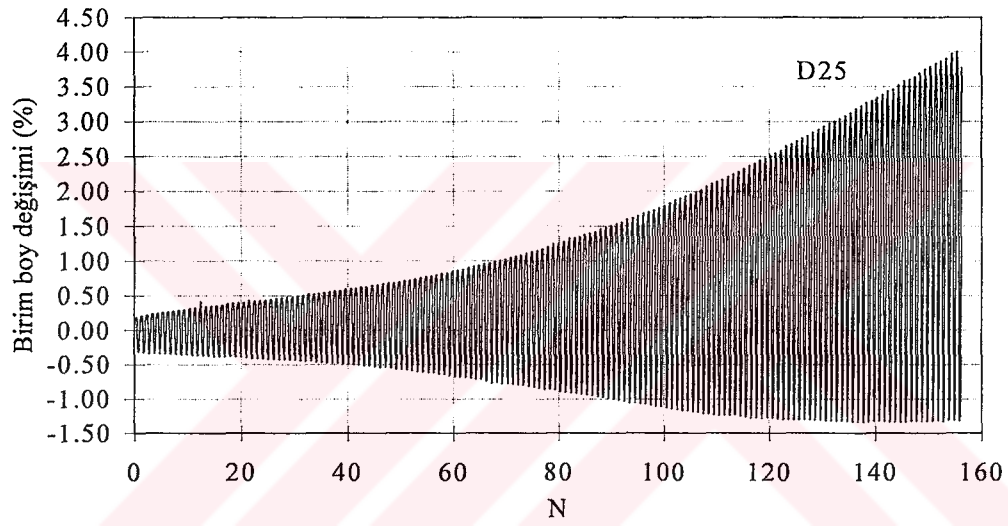
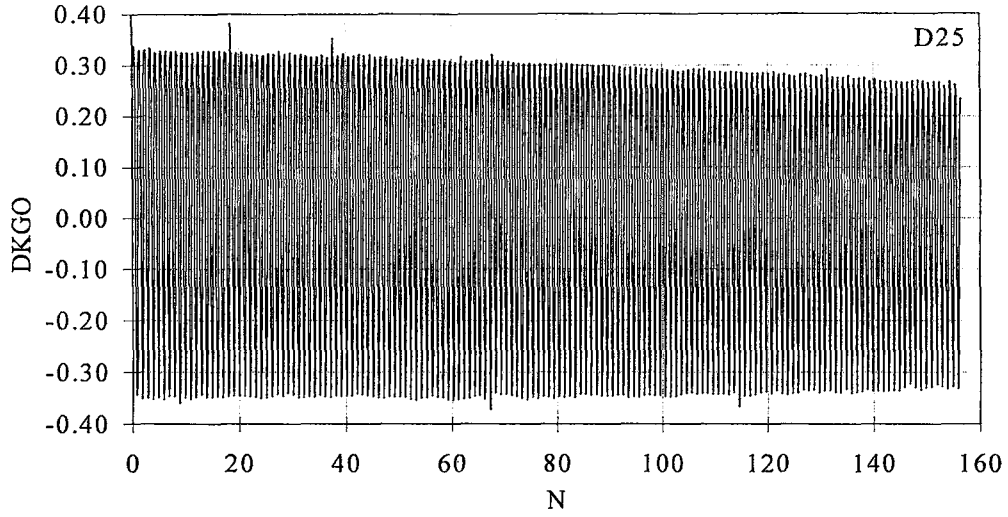
şekil A2 D06 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.



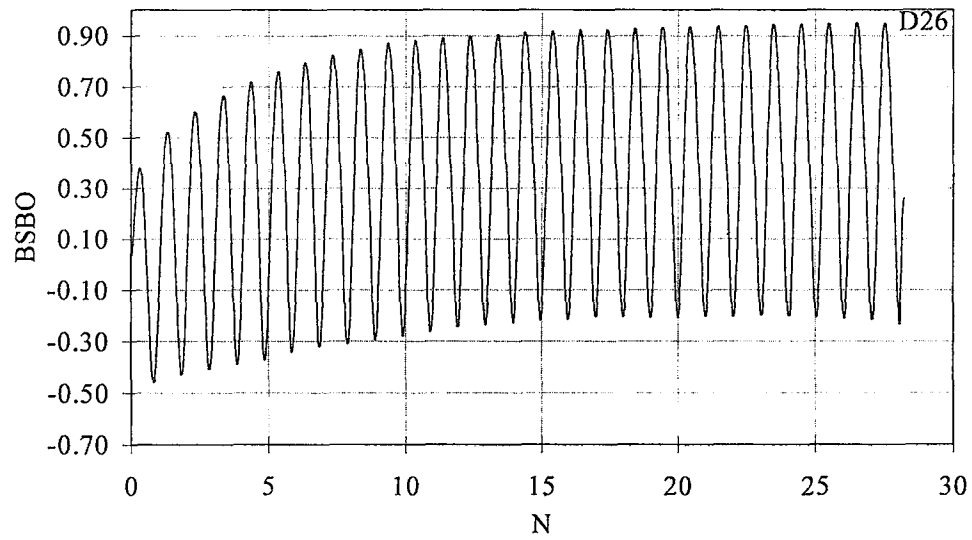
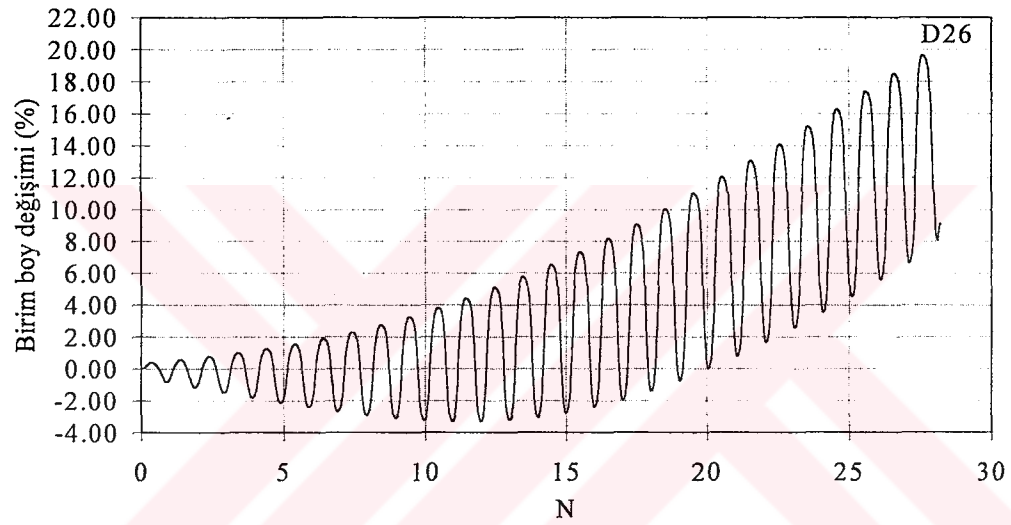
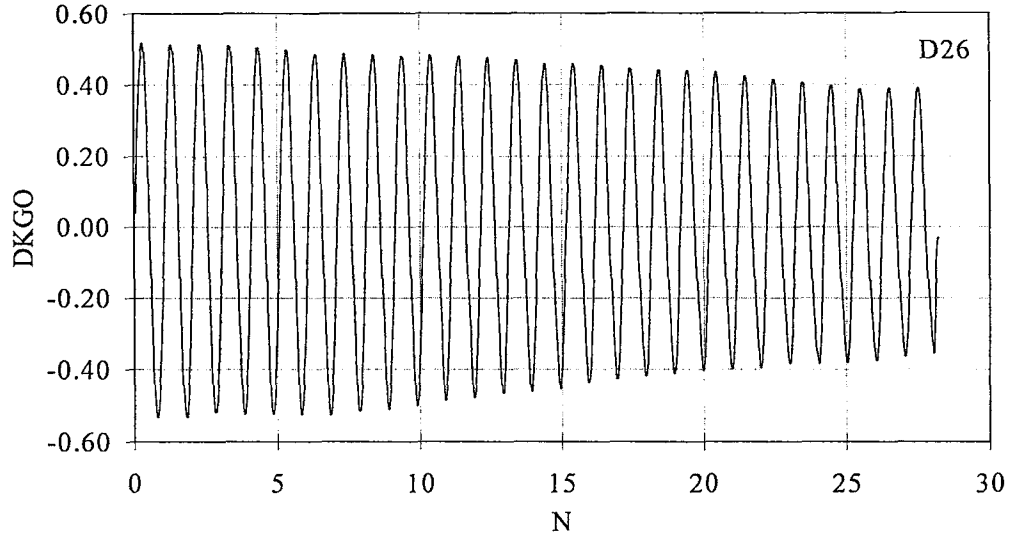
Şekil A3 D08 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.



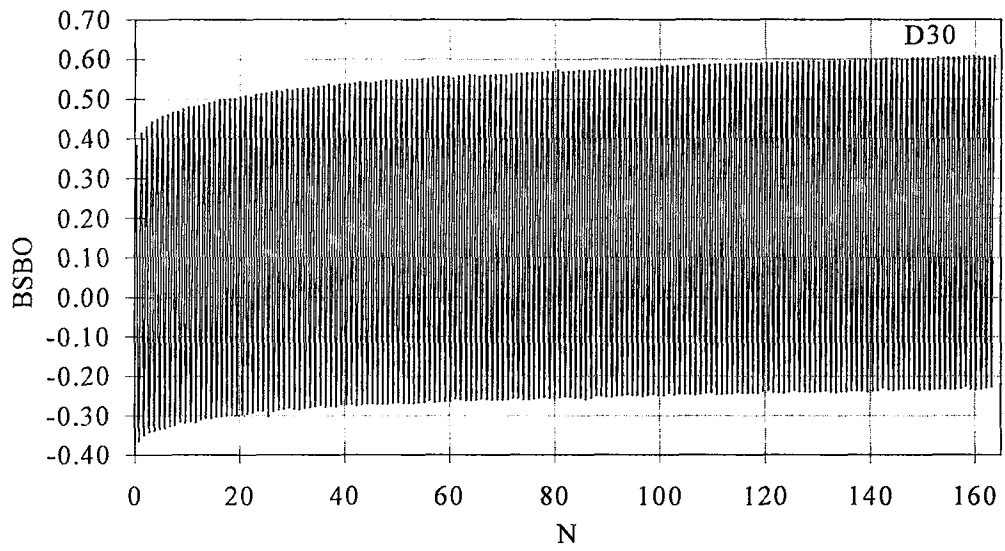
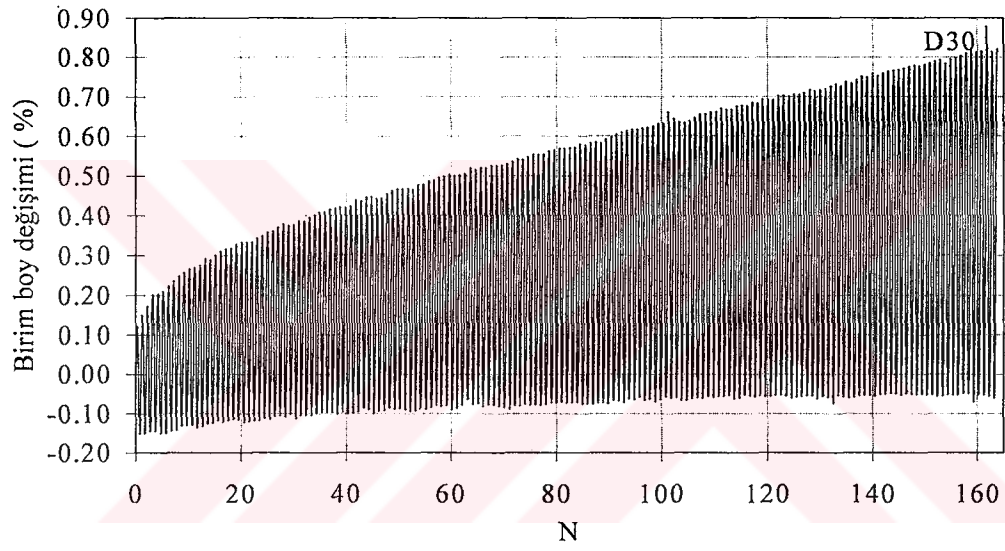
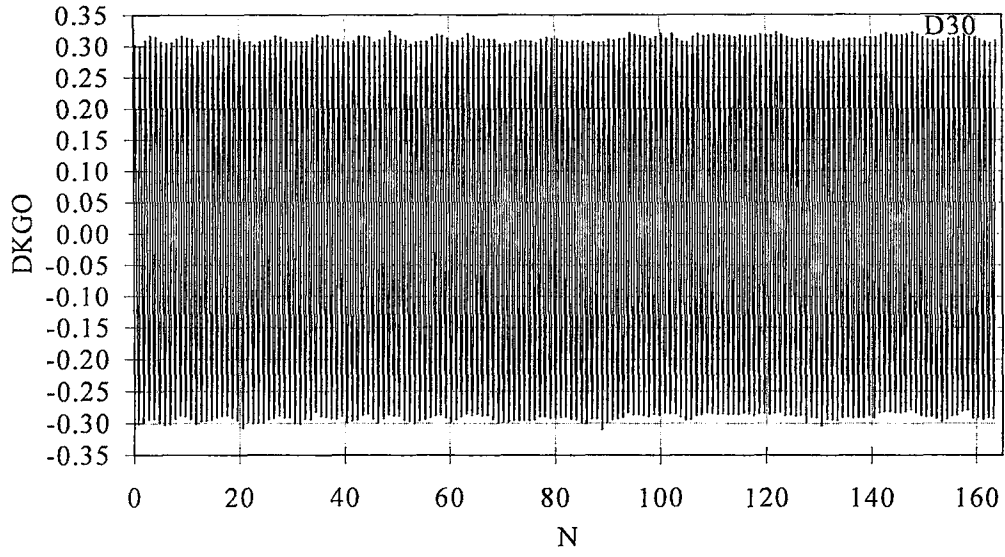
Şekil A4 D16 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.



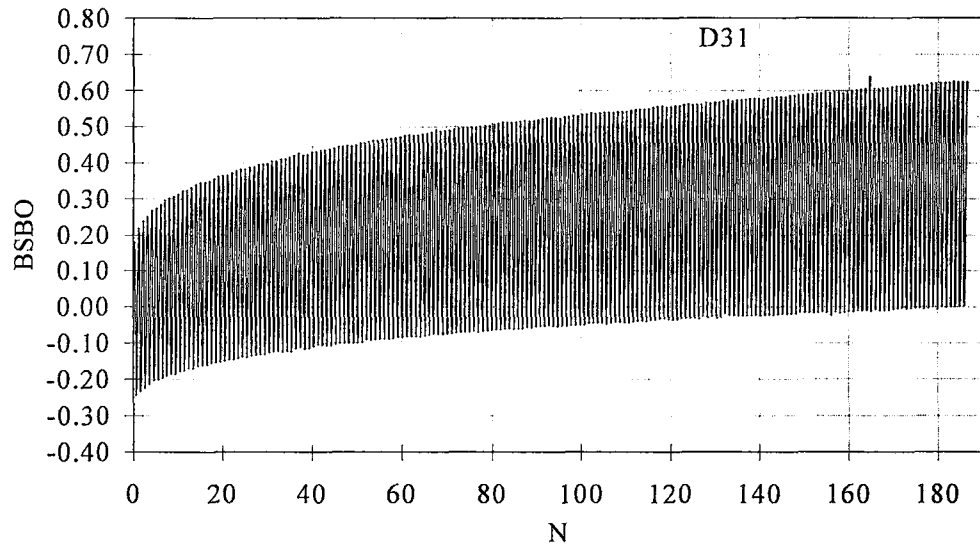
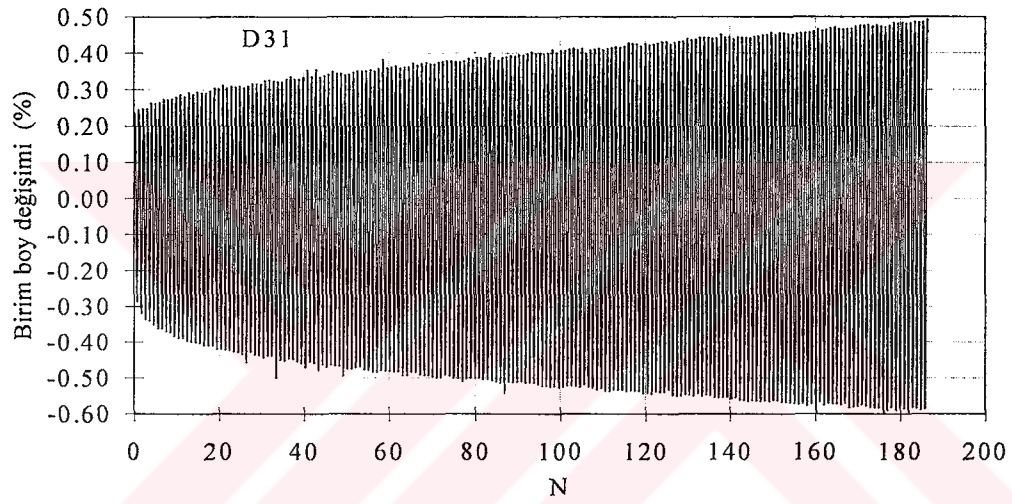
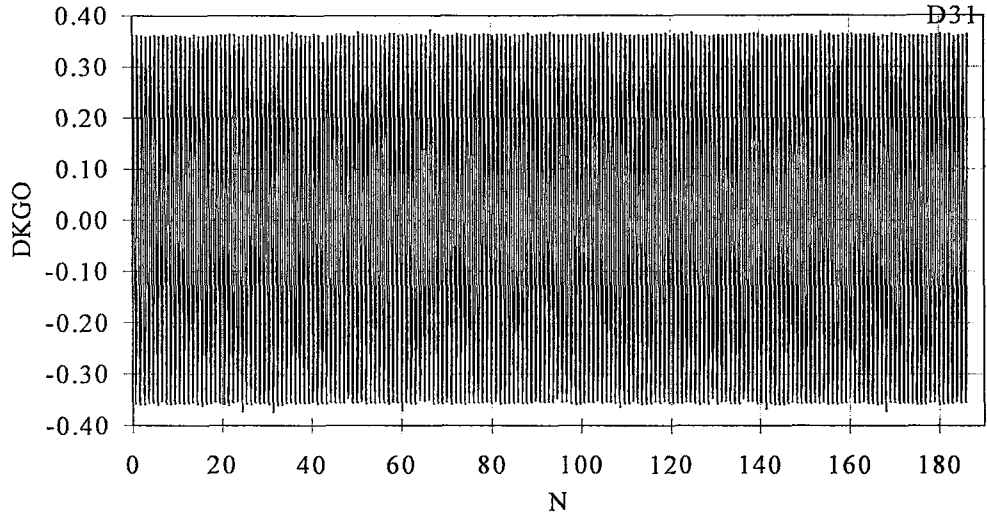
Şekil A5 D25 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.



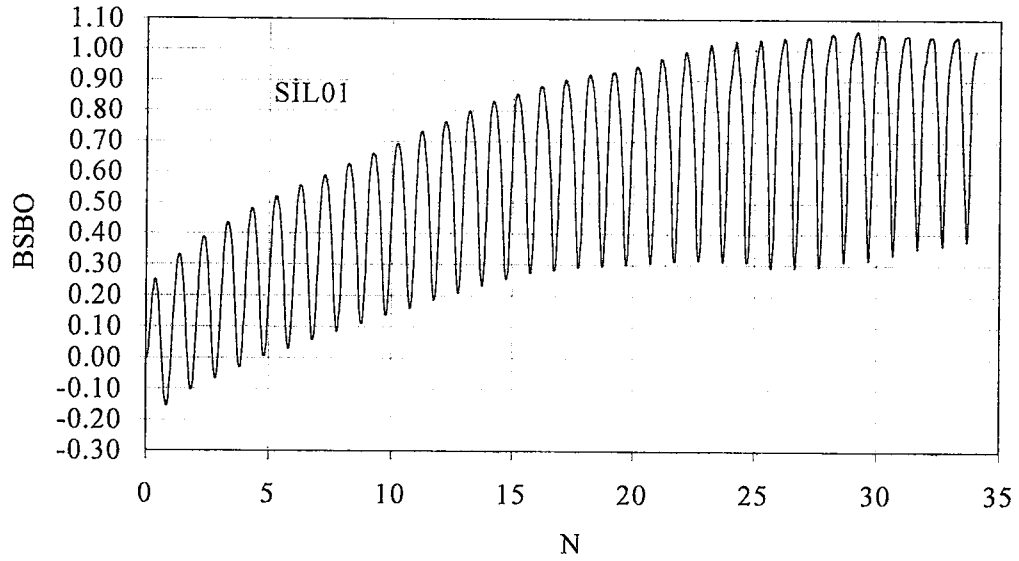
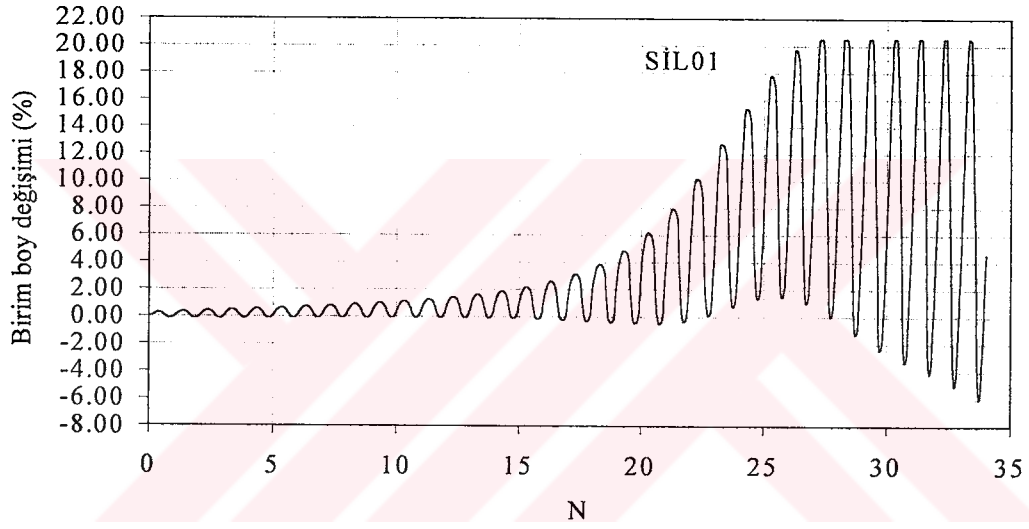
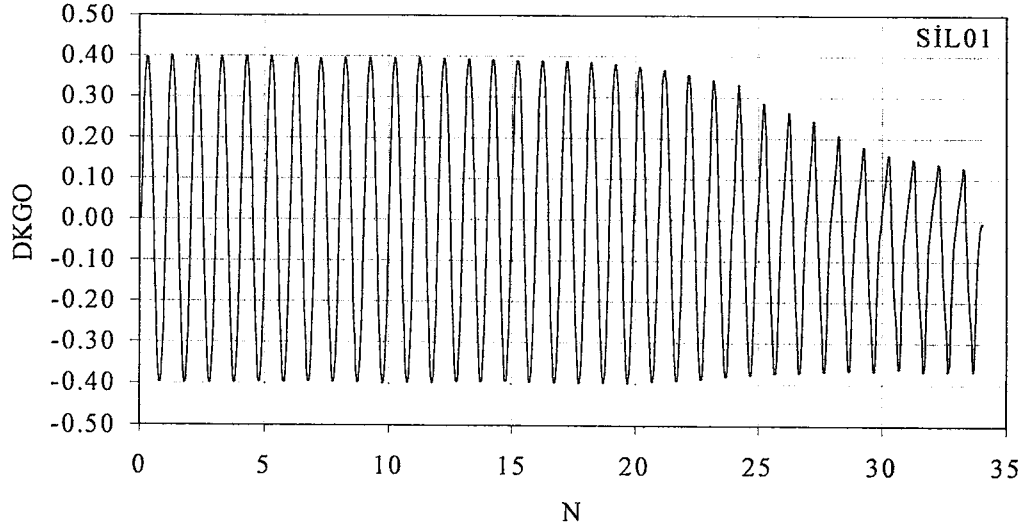
Şekil A6 D26 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.



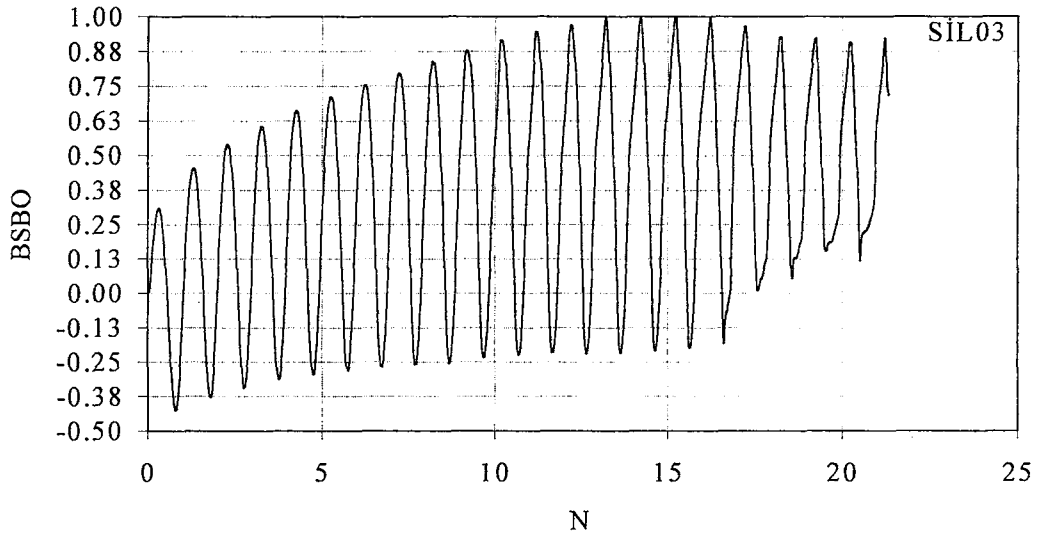
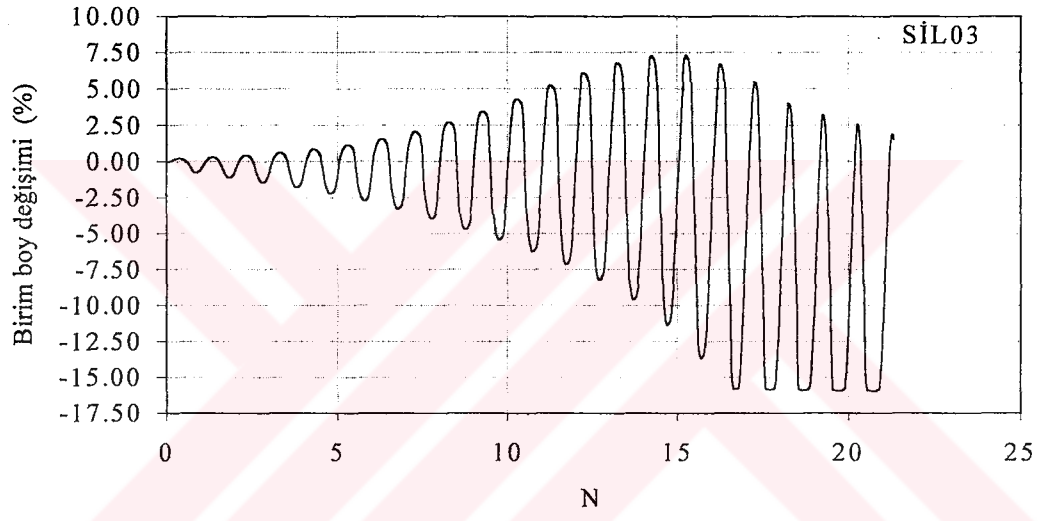
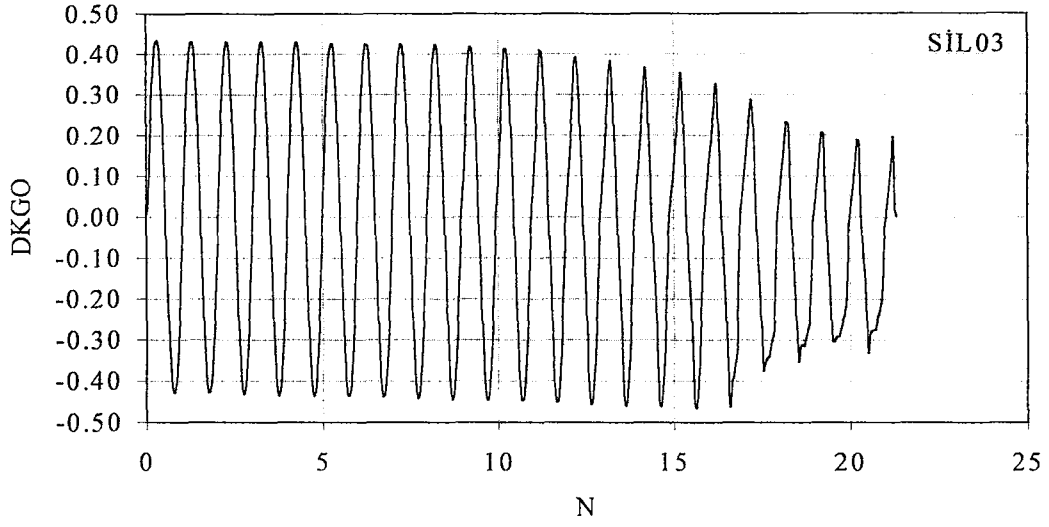
Şekil A7 D30 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.



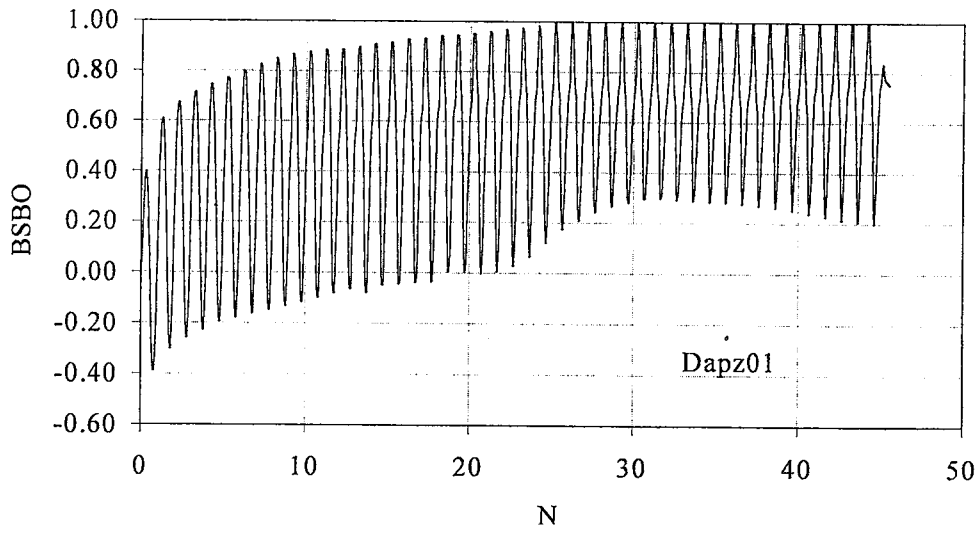
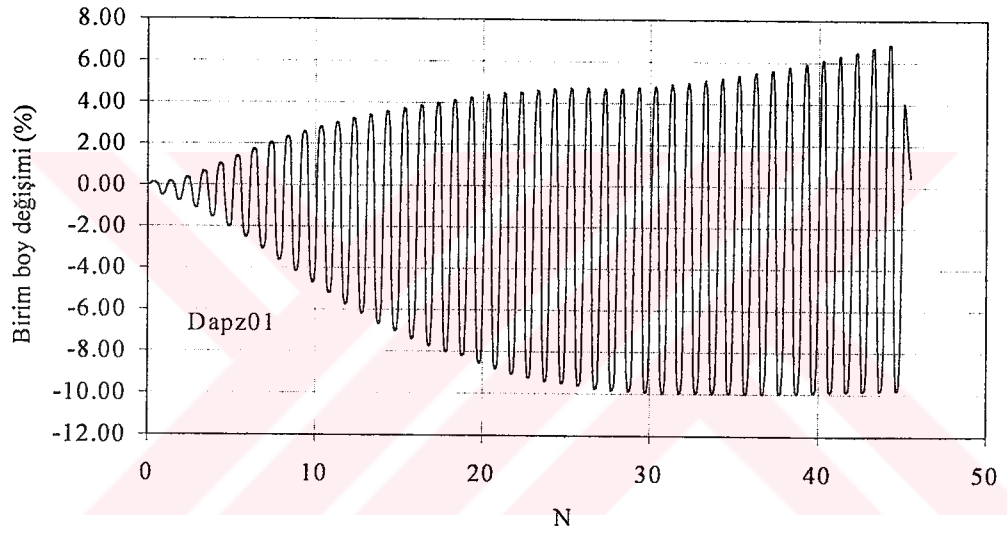
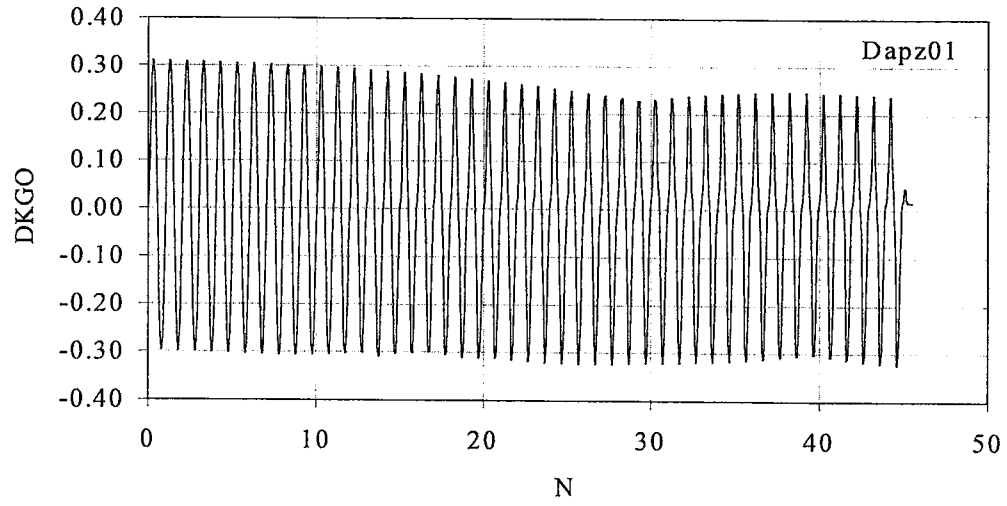
Şekil A8 D31 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.



Şekil A9 Dsil01 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.

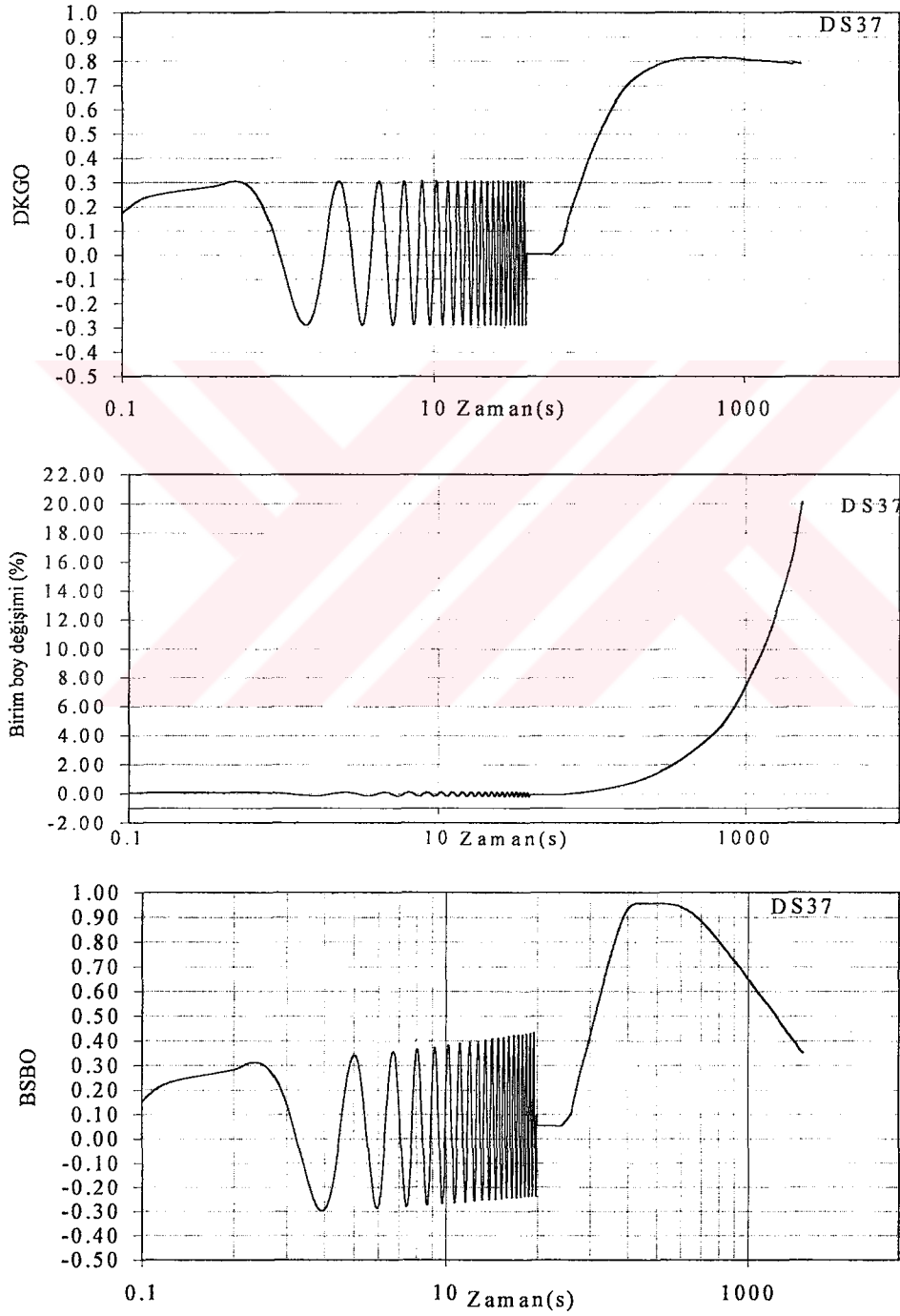


Şekil A10 Dsil03 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.

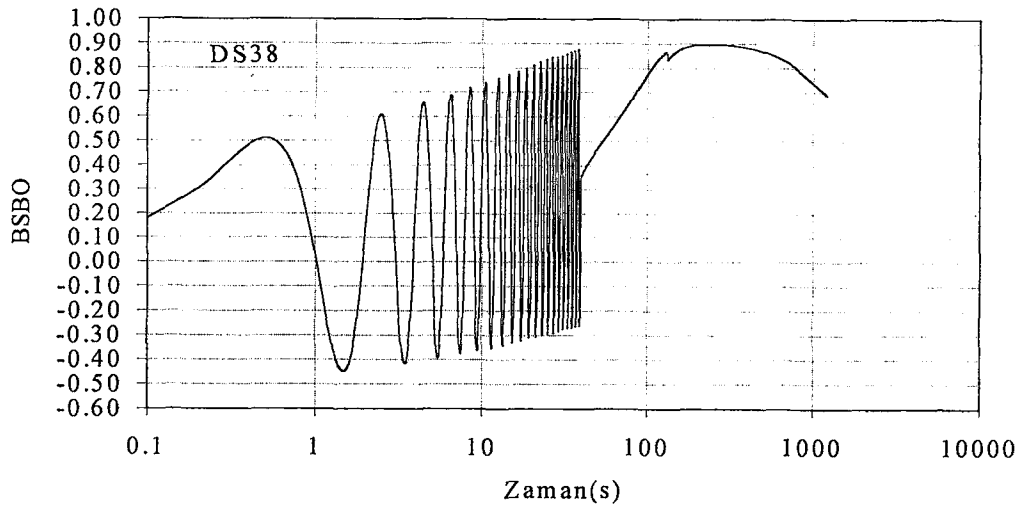
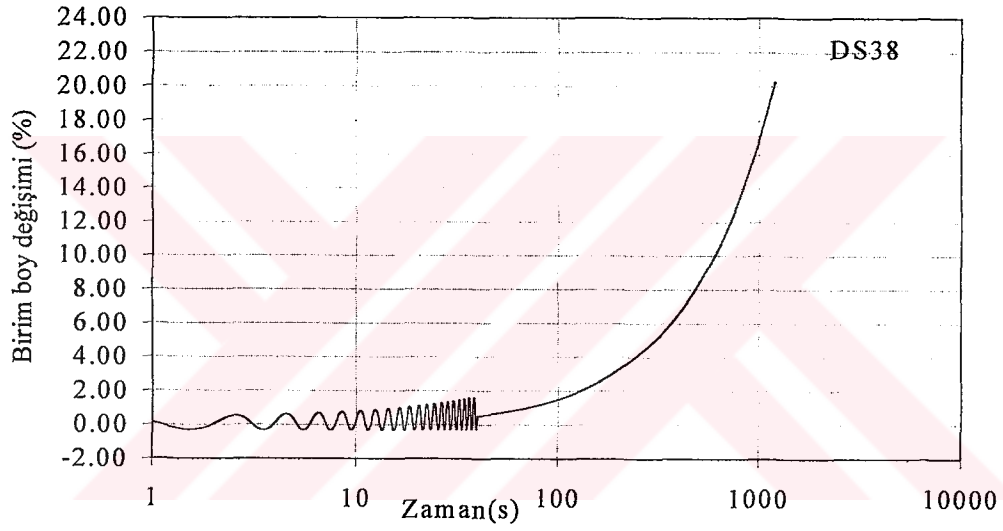
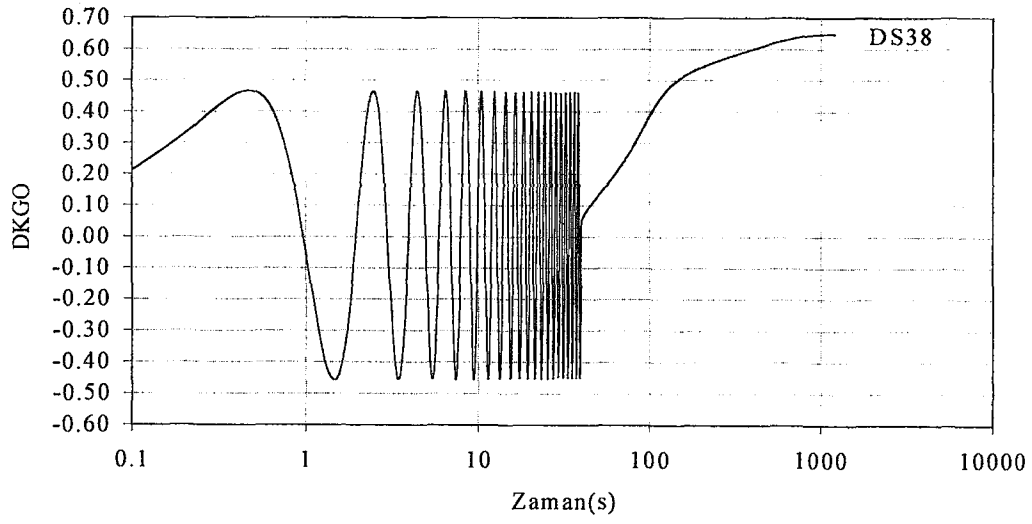


şekil A11 Dapz01 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısı, (N)'e göre değişimi.

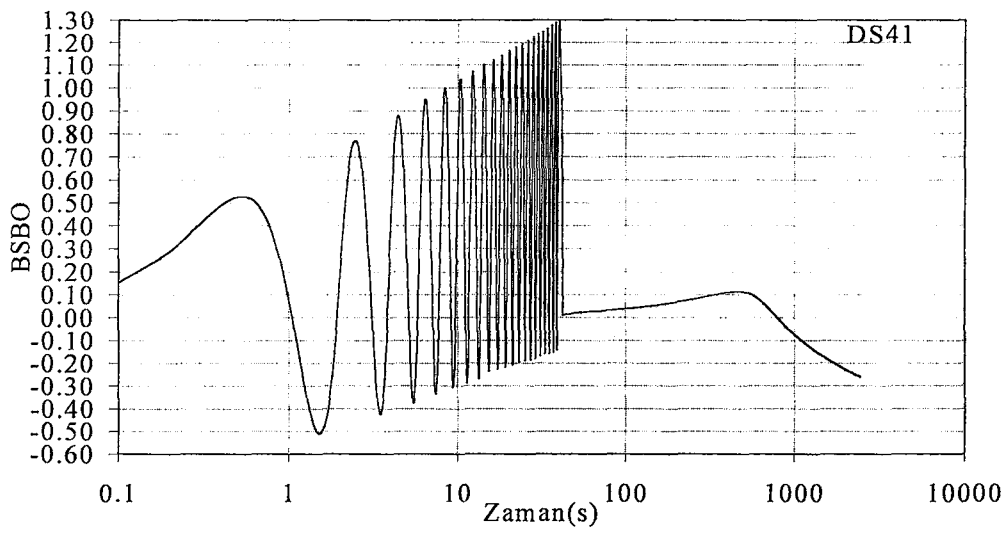
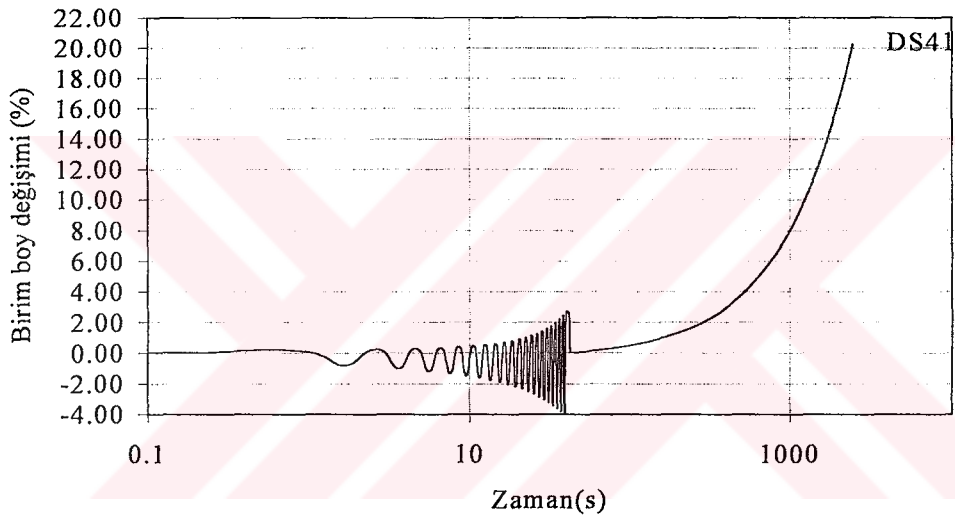
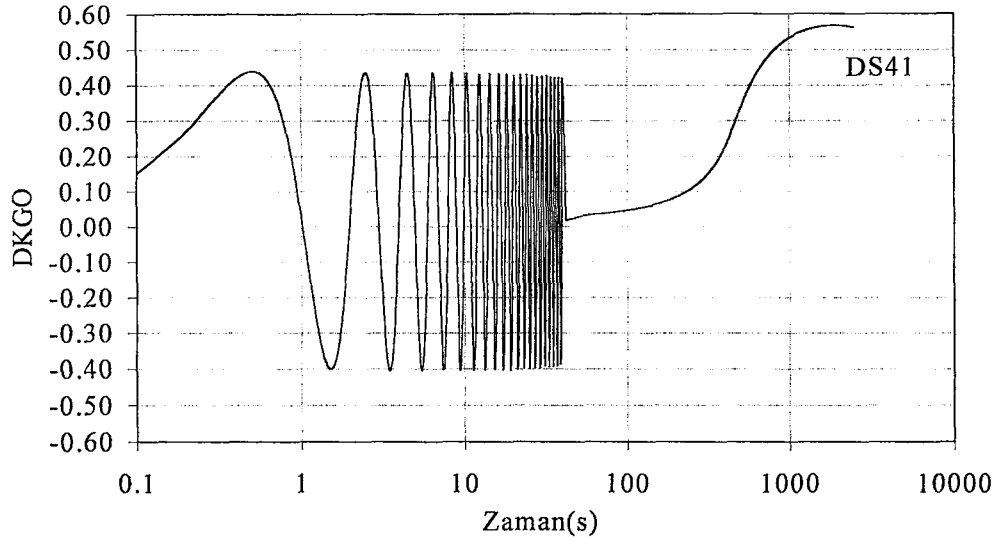
**EK B. N=20 ÇEVİRİM DİNAMİK ARDINDAN STATİK DENEYLER
GRAFİKLERİ**



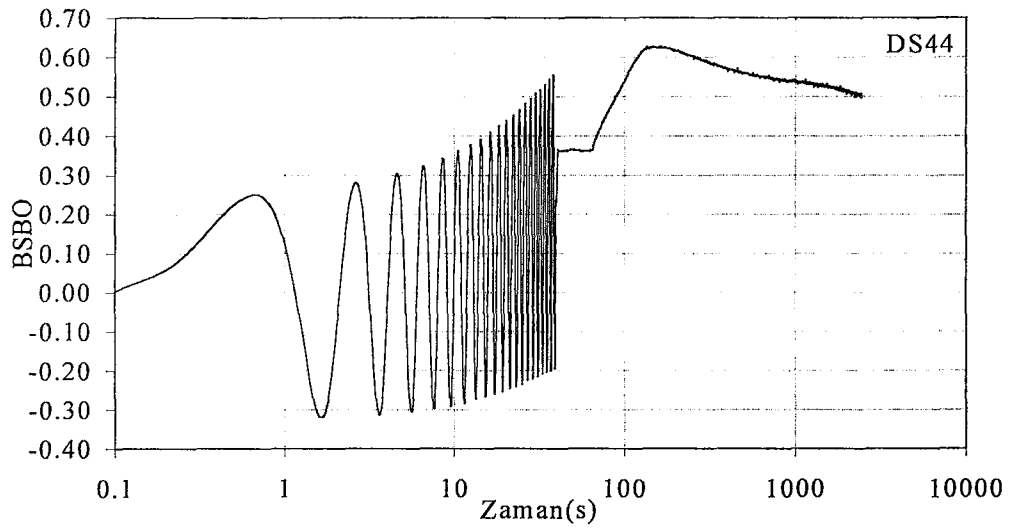
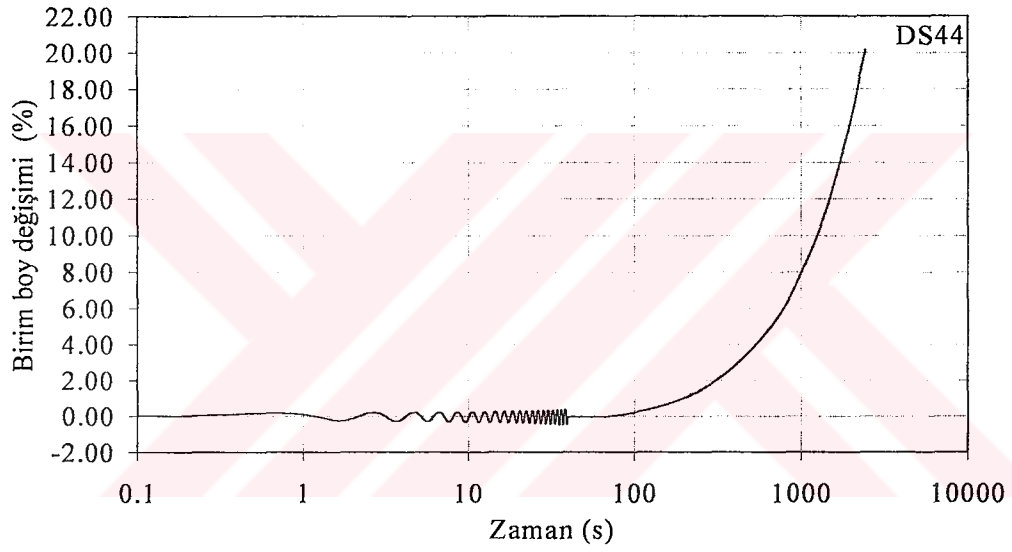
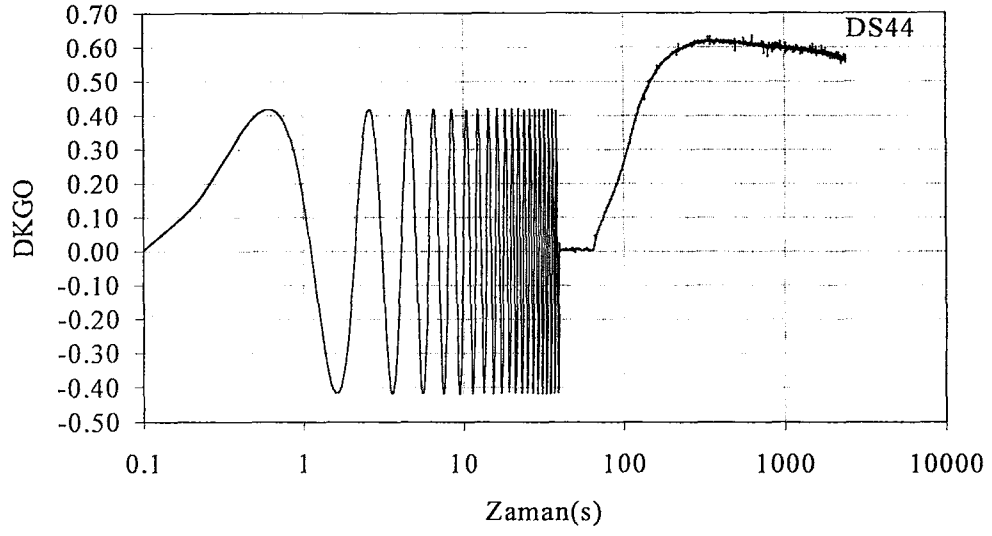
Şekil B1 DS37 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimi.



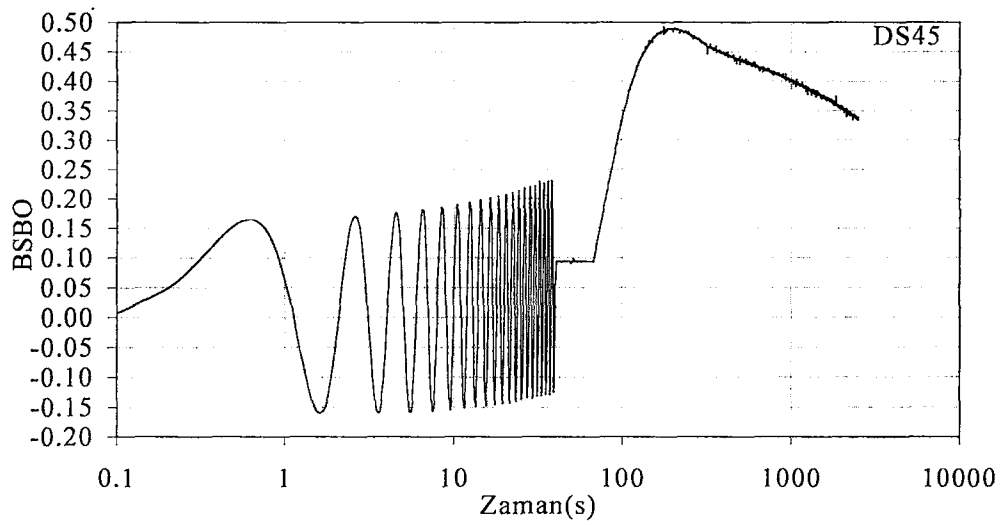
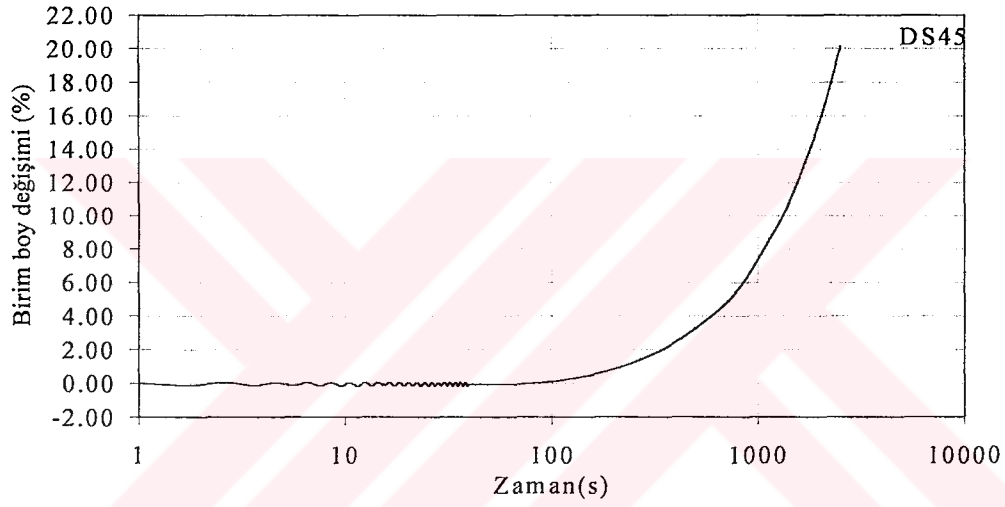
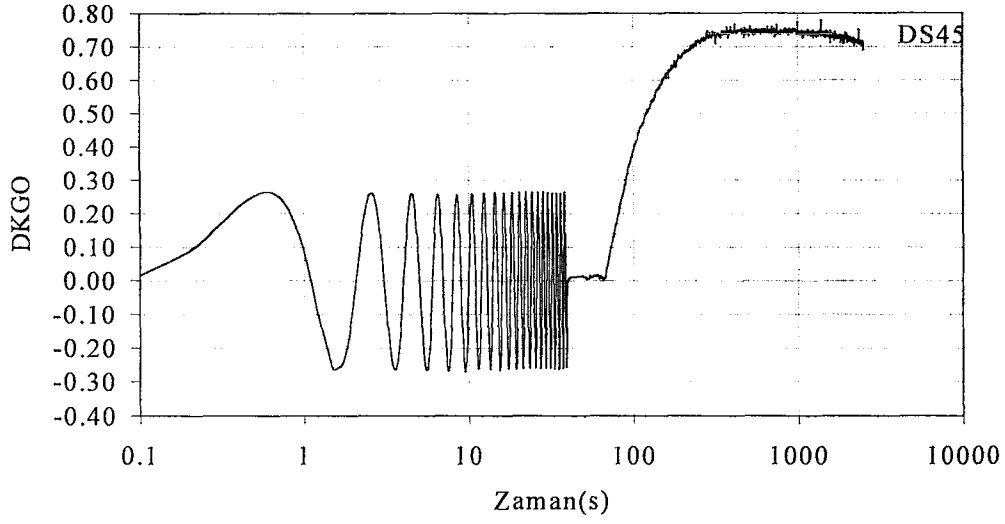
Şekil B2 DS38 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimi.



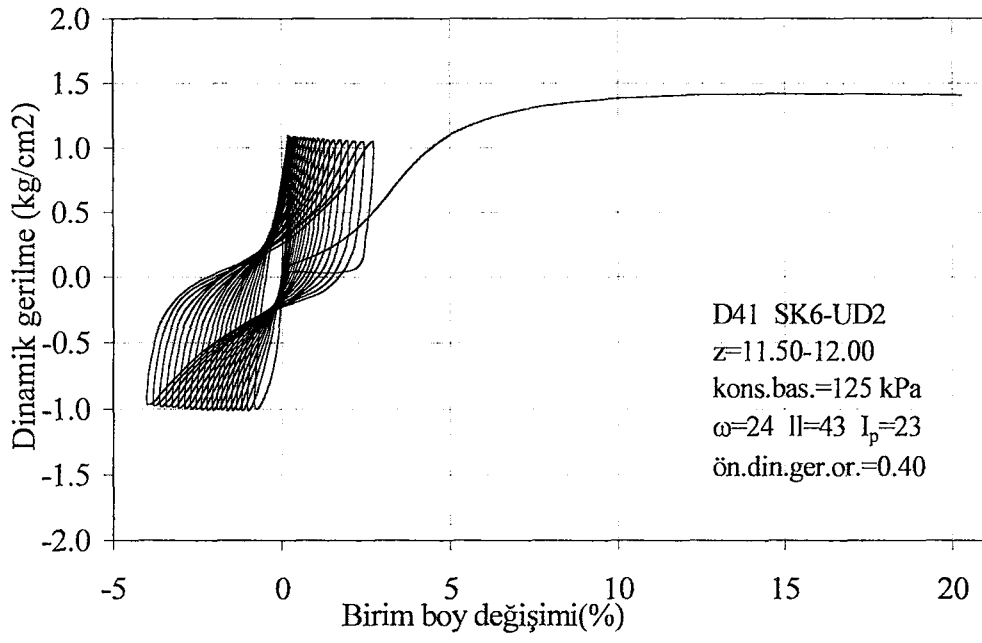
Şekil B3 DS41 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimi.



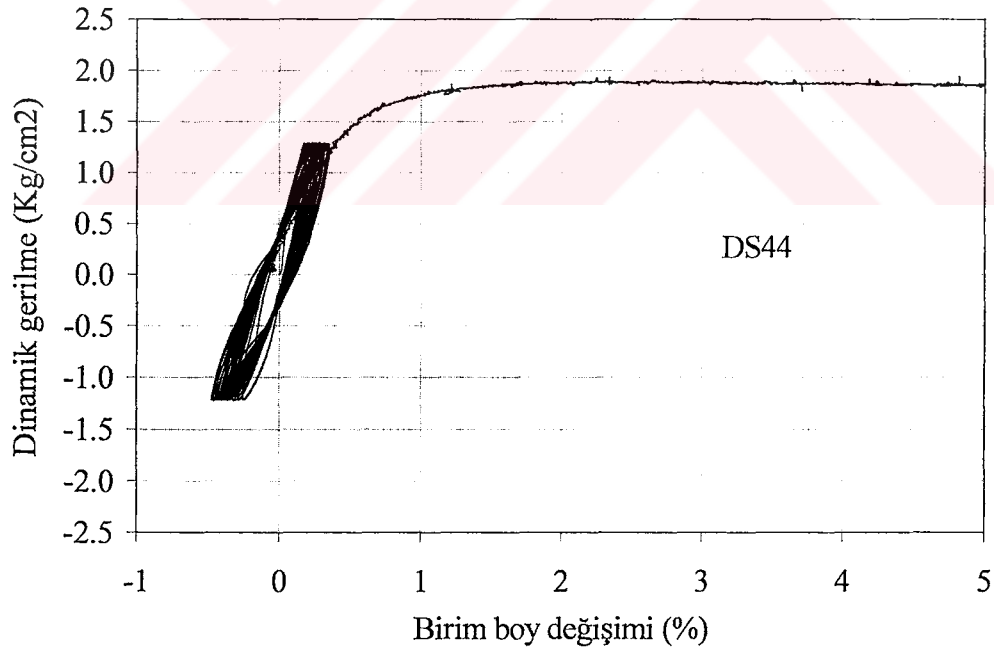
şekil B4 DS44 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimi.



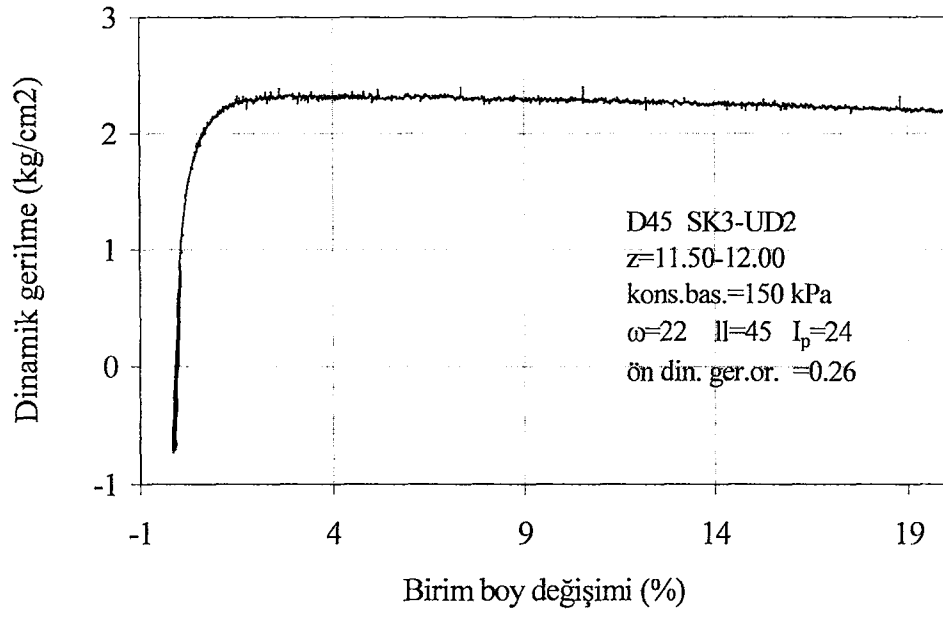
Şekil B5 DS45 nolu deneyin dinamik kayma gerilmesi oranı, birim boy değişimi ve boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimi.



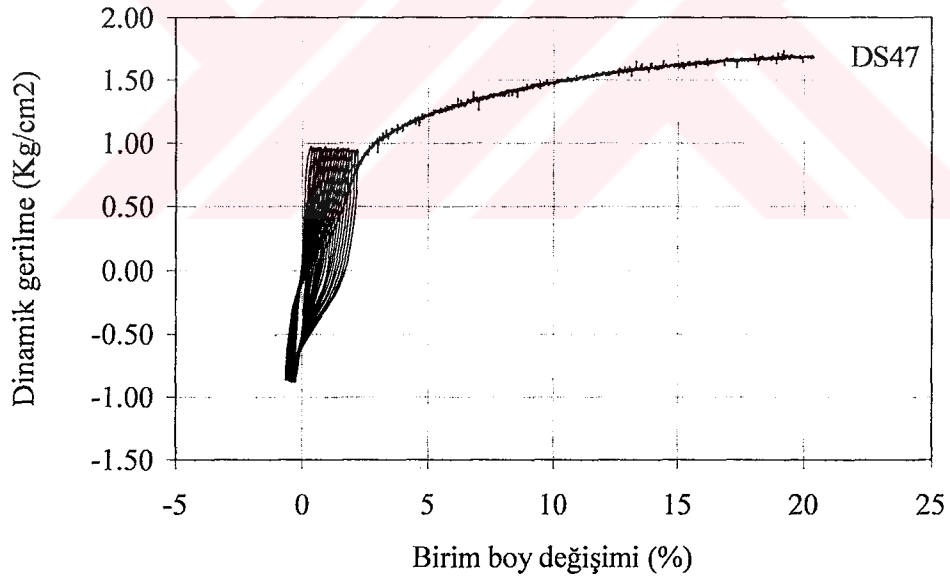
Şekil B6 DS41 nolu deneyin gerilme–birim boy değişimi ilişkileri



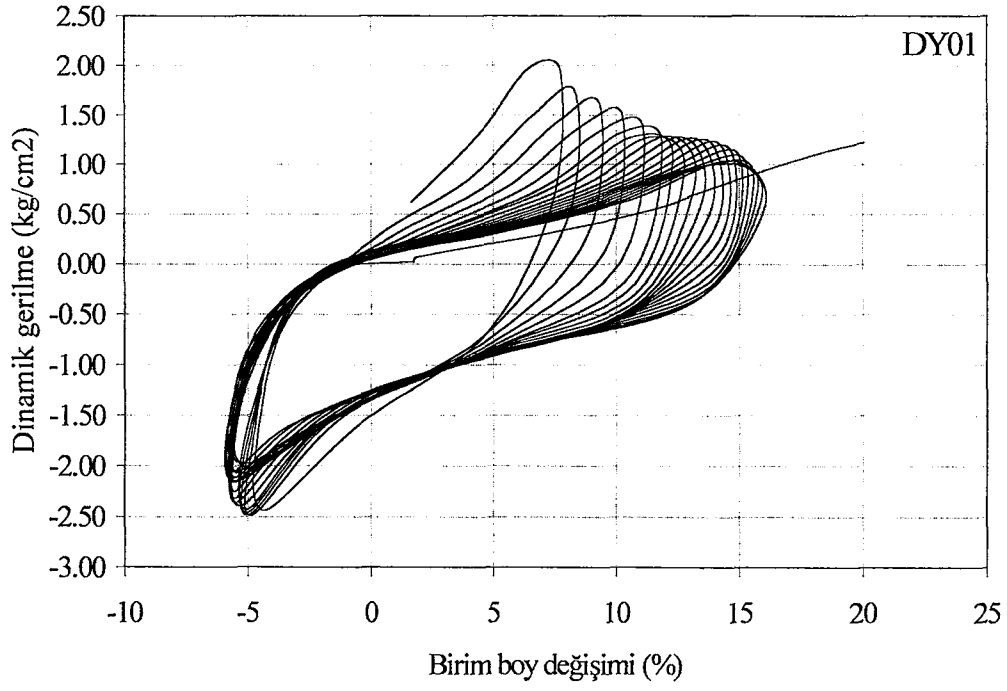
Şekil B7 DS44 nolu deneyin gerilme–birim boy değişimi ilişkileri



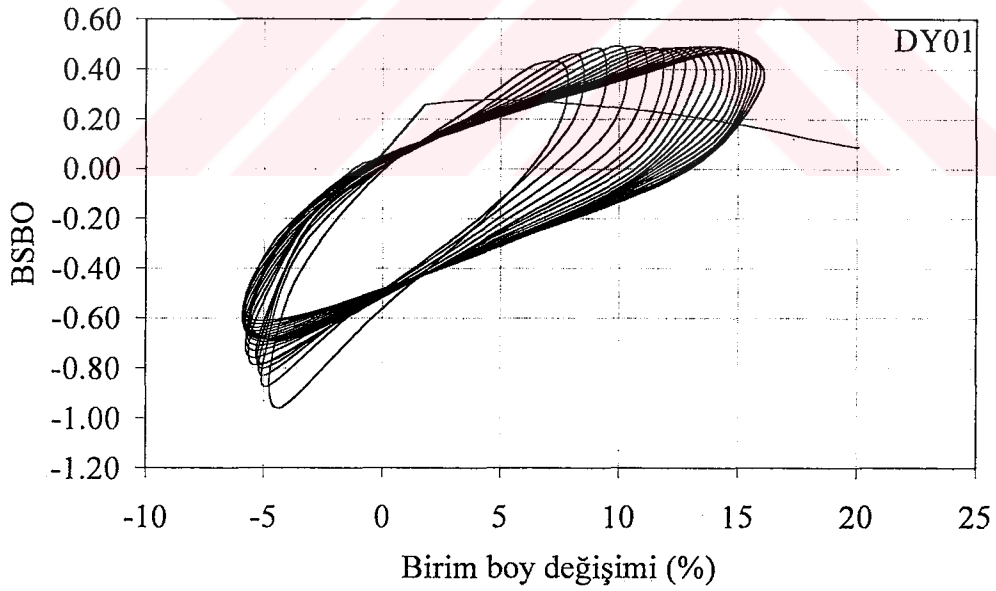
şekil B8 DS45 nolu deneyin gerilme–birim boy değişimi ilişkileri



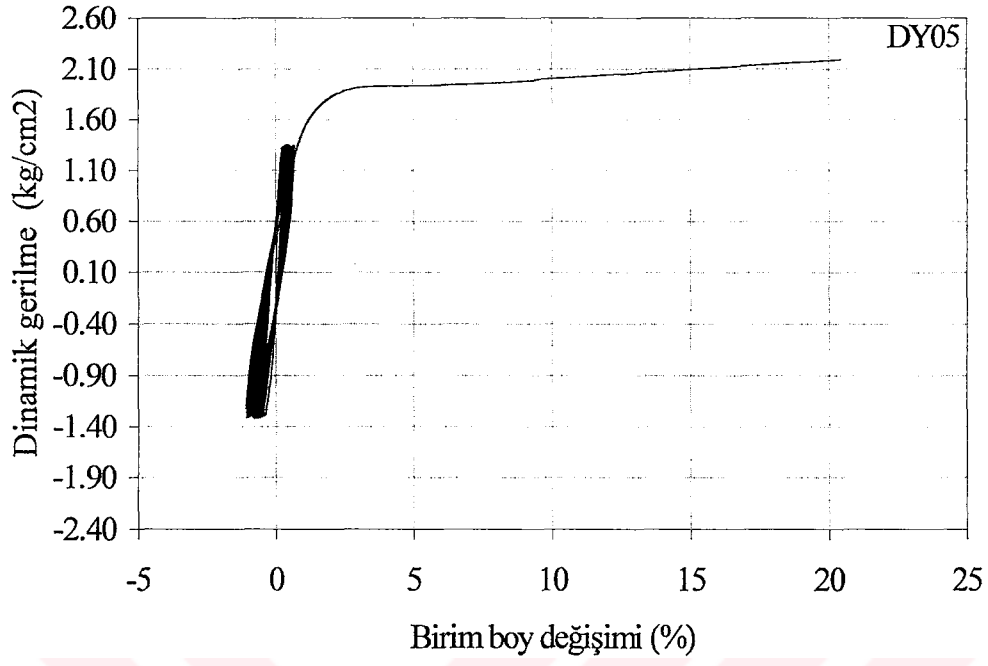
şekil B9 DS47 nolu deneyin gerilme–birim boy değişimi ilişkileri



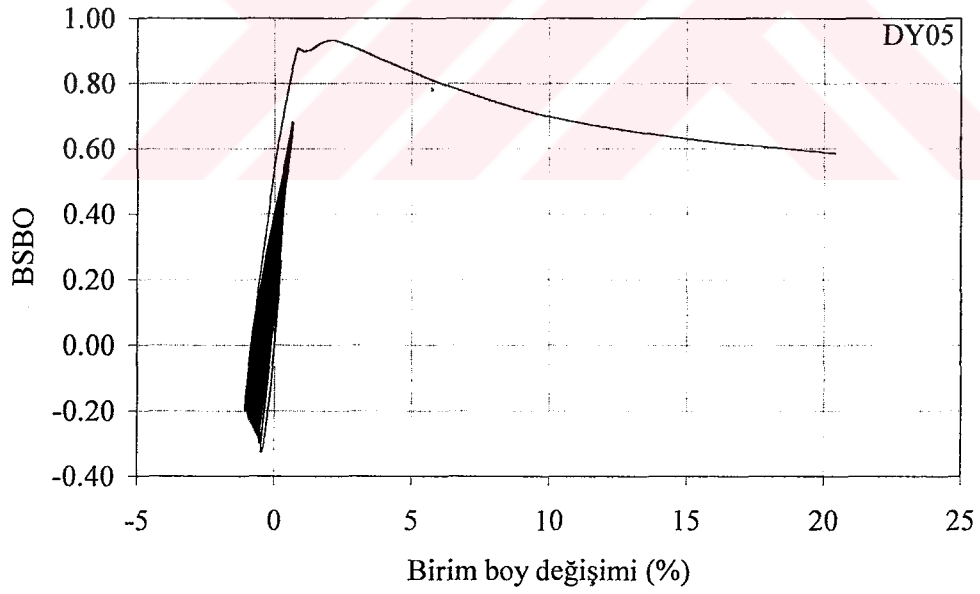
Şekil B10 DSY1 nolu deneyin gerilme–birim boy değişimi ilişkileri



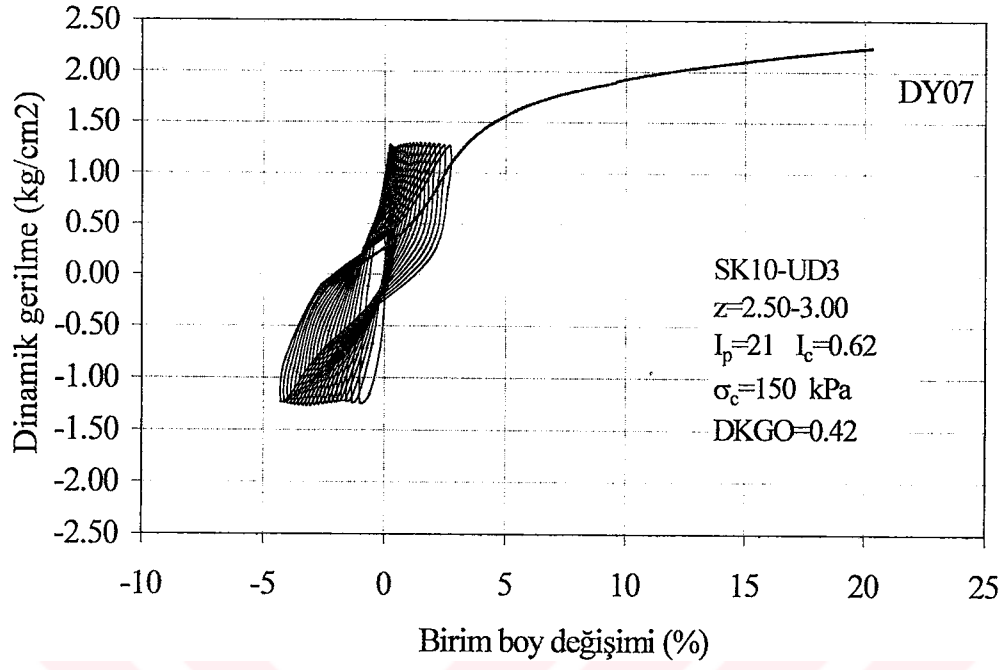
Şekil B11 DSY1 nolu deneyin BSBO–birim boy değişimi ilişkileri



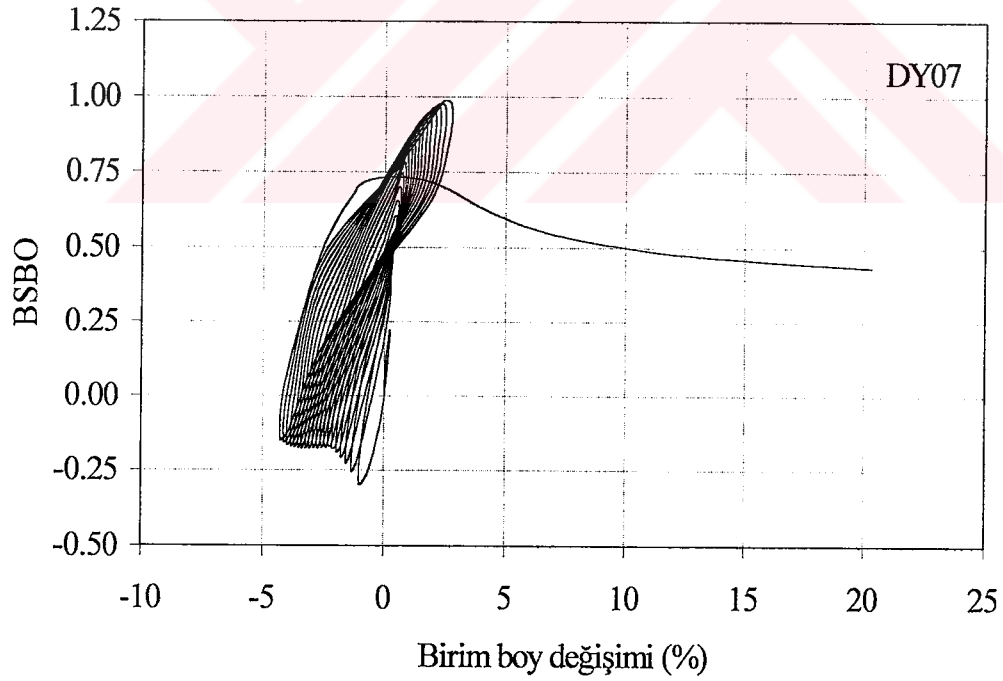
Şekil B12 DSY5 nolu deneyin gerilme–birim boy değişimi ilişkileri



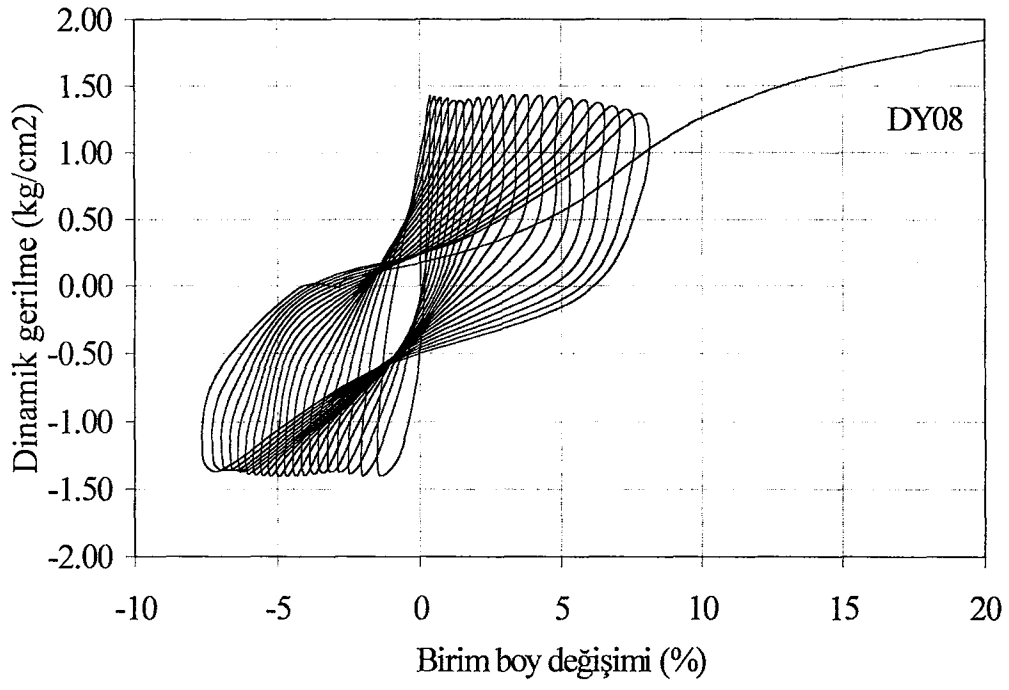
Şekil B13 DSY5 nolu deneyin BSBO–birim boy değişimi ilişkileri



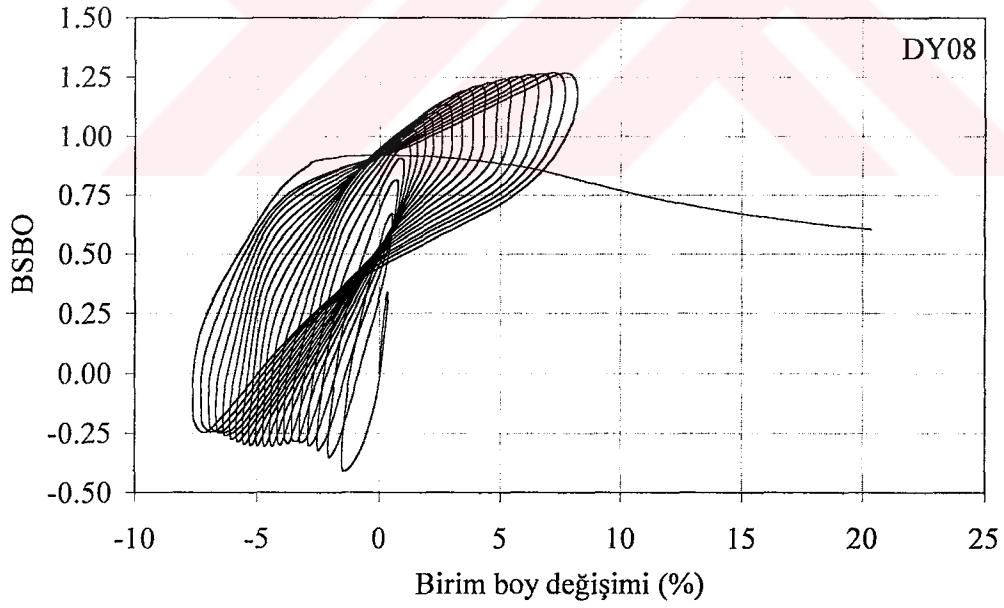
şekil B14 DSY7 nolu deneyin gerilme–birim boy değişimi ilişkileri



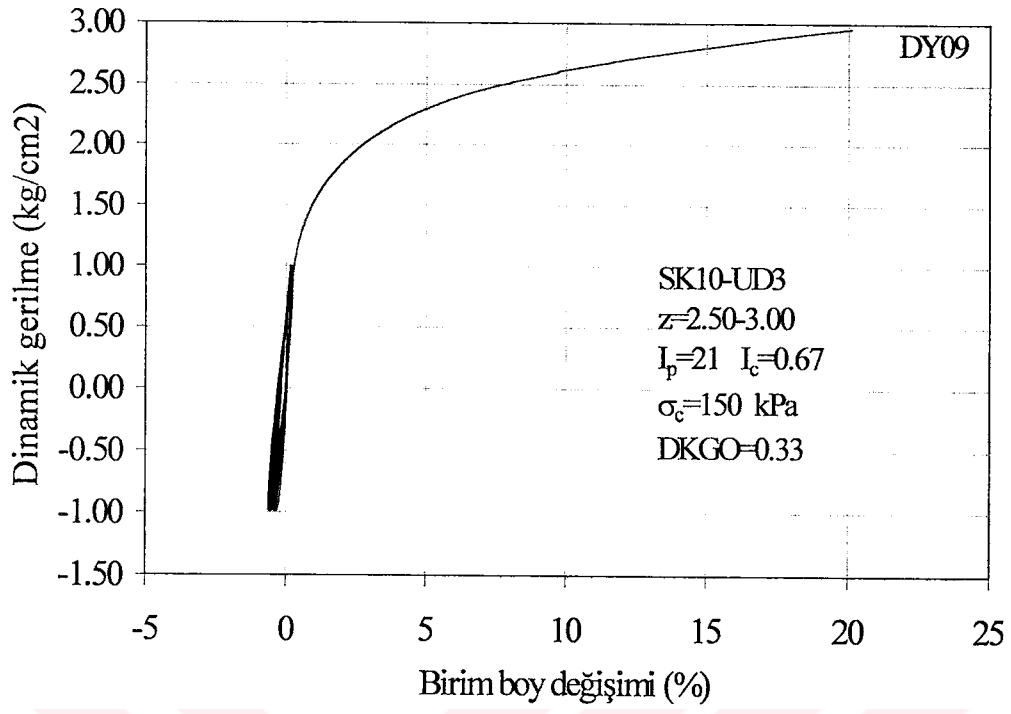
şekil B15 DSY7 nolu deneyin BSBO–birim boy değişimi ilişkileri



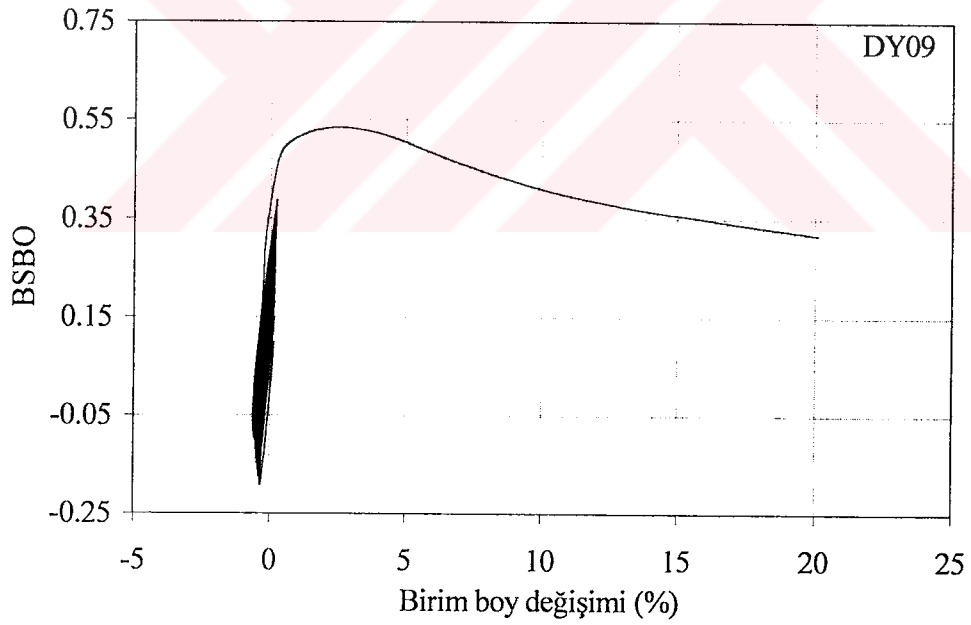
Şekil B16 DSY8 nolu deneyin gerilme–birim boy değişimi ilişkileri



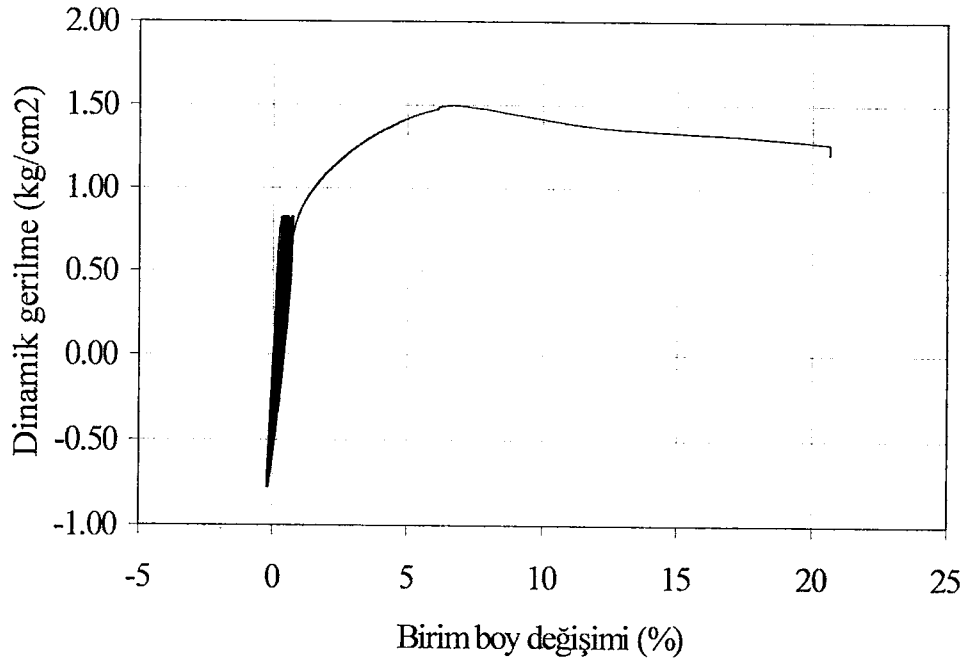
Şekil B17 DSY8 nolu deneyin BSBO–birim boy değişimi ilişkileri



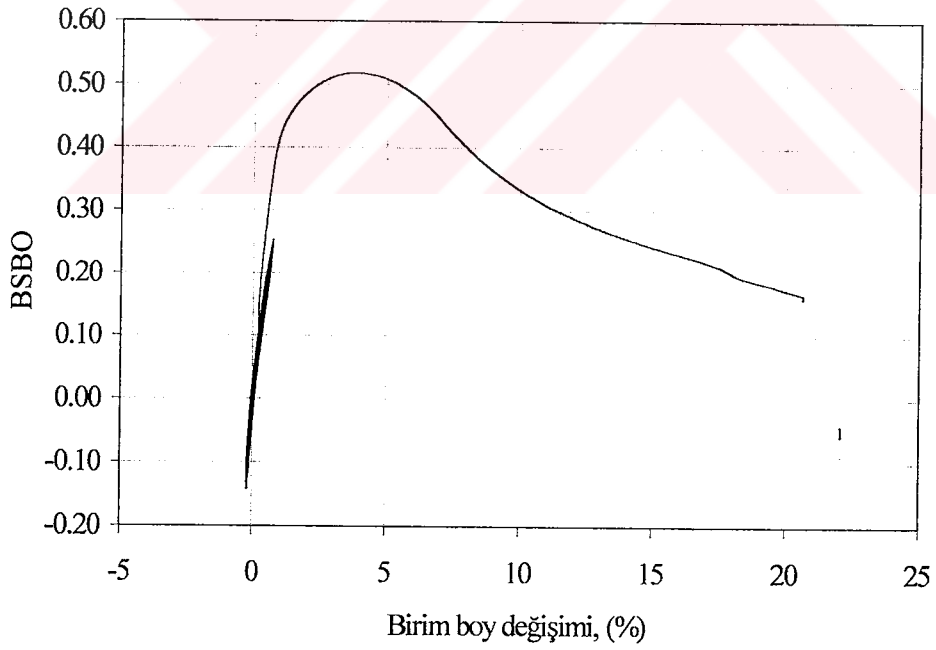
Şekil B18 DSY9 nolu deneyin gerilme–birim boy değişimi ilişkileri



Şekil B19 DSY9 nolu deneyin BSBO–birim boy değişimi ilişkileri



şekil B20 DSadz2 nolu deneyin gerilme–birim boy değişimi ilişkileri



şekil B21 DSapz2 nolu deneyin BSBO–birim boy değişimi ilişkileri

ÖZGEÇMİŞ

1962 yılında Artvin ili Borçka ilçesinde doğdu. İlk öğrenimini orada tamamladı. Orta ve lise öğrenimini İstanbul Bahçelievler lisesinde 1977 yılında tamamladı. 1978 yılında Yıldız Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne kaydolarak yüksek öğrenimine başladı. 1982 yılında iyi derece ile mezun olarak inşaat mühendisi olmaya hak kazandı. 1983-1984 yıllarında vatani görevini askeri inşaatlarda Yedek Subay olarak yaptı. 1984 yılında İTÜ Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığında Kontrol Mühendisi olarak göreve başladı ve halen bu görevi sürdürmektedir. 1985-1988 yılları arasında Deprem Mühendisliği programında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans Eğitimi alarak Yüksek Mühendis oldu. 1992 yılında evlendi. 1993 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde doktora çalışmalarına başladı. İngilizce ve az Fransızca bilen yazar evli ve iki çocuk babasıdır.

