

152360

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZEMİNLERİN SIVILAŞABİLİRLİĞİNE İNCE DANE
ORANI VE PLASTİSİTENİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Müh. Cemal Alper ÖZMEN
(501011559)

152360

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Kasım 2004

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Kasım 2004

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Ayfer ERKEN (İ.T.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Kemal ÖZÜDOĞRU (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Erol Güler (B.Ü.)

KASIM 2004

ÖNSÖZ

Geoteknik mühendisliği uğraştığı malzemenin yani zeminin gösterdiği çok farklı davranışlar nedeniyle inşaat mühendisliğinin diğer dallarından oldukça farklı ve belki de araştırılmaya en açık bölümüdür. Bu sebeple bu dal bana sonsuz bir araştırma alanı gibi görünmektedir. Zeminlerin aynı bölge içinde bile farklı mühendislik özelliklerine sahip olmasından dolayı bir bölge için uygun olan yaklaşım başka bir bölge için gerçeğe uzak sonuçlar çıkarabilmekte bu durumda her zemin tabakasının kendi içinde değerlendirme gereğini ortaya çıkarmaktadır. Sıvılaşma konusu da geoteknik mühendisliğinin en karmaşık mekanizmalarından birine sahip olduğu için teknolojinin tüm imkanlarını kullanarak dikkatle ve tüm parametreleri göz önünde bulundurularak incelenmeli ve bir bölge için makro ve mikro sıvılaşma analizleri yapılmalıdır.

Yüksek lisans tezi çalışmalarım kapsamında konu seçiminde, tezin yürütülmesinde ve bana bu konuda beni çalışmaya sürekli teşvik eden danışmanın Sayın Doç. Dr. Ayfer Erken'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışma hayatımda bana yardımcı olan Mim. Adil Baştanoğlu'na, arkadaşlarım Onur Şenocak ve sevgili Nurşen Demiröz'e teşekkür ederim. Hayatım boyunca bana destek olan sevgili aileme de sonsuz teşekkür ederim.

Kasım 2004

Cemal Alper ÖZMEN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
2. ZEMİN SIVILAŞMASI	4
2.1. Sıvılaşma ve İlgili Kavramların Tanımları	4
2.2. Boşluk Suyu Artış Mekanizması	5
2.3. Sıvılaşmanın Mekanizması	7
2.4. Sıvılaşmanın Meydana Getirdiği Hasarlar	9
2.5. Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler	12
2.5.1.Zemin Özellikleri ve Tabakalaşma Etkileri	12
2.5.1.1. Rölatif Sıkılık	12
2.5.1.2. İnce Dane Oranı ve Plastisite	14
2.5.1.3. Yatay Toprak Basıncı ve Aşırı Konsolidasyon Oranı	22
2.5.1.4. Sıvılaşabilir Zeminin Derinliği	24
2.5.1.5. Yeraltı Su Seviyesinin Derinliği	24
2.5.2. Deprem Hareketleri ve Etkileri	24
2.5.2.1. Sismik Geçmişin Etkisi	24
2.5.2.2. Kumların Fiziksel Özelliklerinin Etkisi	25
2.5.2.3.Sıvılaşma Yaratıcı Kritik Deprem Şiddeti	26
2.5.2.4.Odak Uzaklığı	26
2.6. Sıvılaşma Potansiyeli Değerlendirmeleri	25
2.6.1. Laboratuvar Deneyleri	26
2.6.1.1. Dinamik Üç Eksenli Deney	26
2.6.1.2. Dinamik Basit Kesme Deneyi	27
2.6.1.3. Burulmalı Dinamik Deney Sistemi	27
2.6.2. Arazi Deneyleri	28
2.6.2.1. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)	29
2.6.2.2. Koni Penetrasyon Deneyi (CPT)	32
2.6.2.3. Sismik Koni Penetrasyon Deneyi (SCPT)	33
2.7 Sıvılaşma Analizinde Kullanılan Yöntemler	34
2.7.1 Seed ve Idriss, 1971 Yöntemi	35
2.7.2 Seed ve diğ., 2001 Yöntemi	35
2.7.3 Japon Yol Kurumu Yöntemi (1996)	41
2.7.4. Çin Milli Kodu	44
2.8.4. Enerji Metodu (Wang ve Law, 1994)	45
2.8 Sıvılaşma Şiddetinin Tahmini	46

3. 17 AĞUSTOS 1999 KOCAELİ DEPREMİ VERİLERİ VE ADAPAZARI BÖLGESİ YEREL ZEMİN KOŞULLARI	47
3.1. Giriş	47
3.2 17 Ağustos 1999 İzmit Depremi ve Depremsel Veriler	47
3.3 Körfez ve Adapazarı Bölgesi Zemin Durumu	51
3.3.1 Körfez Bölgesi	51
3.3.2 Adapazarı Bölgesi	53
3.4 Adapazarı'nda Sıvılaşmanın Sıklıkla Gözleendiği Mahallerin Yerel Zemin Koşulları	56
3.4.1 Cumhuriyet Mahallesi	57
3.4.2 İstiklal Mahallesi	60
3.4.3 Tıgıcılar Mahallesi	63
4. ZEMİNLERİN SIVILAŞABİLİRLİĞİNE İNCE DANE ORANI VE PLASTİSİTENİN ETKİSİ	67
4.1. Giriş	67
4.2. Adapazarı Bölgesi İçin Maksimum Yer İvmesi Seçilmesi	67
4.3. Adapazarı'nda Arazideki Zeminlerin Sıvılaşmaya Karşı Davranışları	70
4.3.1 İstiklal Mahallesi için Sıvılaşma İncelemesi	71
4.3.1.1. İstiklal Mahallesindeki Zeminlerin Endeks Özellikleri	71
4.3.1.2. İstiklal Mahallesindeki Zeminlerin Deprem Sırasındaki Davranışları	79
4.3.2 Cumhuriyet Mahallesi için Sıvılaşma İncelemesi	81
4.3.2.1. Cumhuriyet Mahallesindeki Zeminlerin Endeks Özellikleri	81
4.3.2.2. Cumhuriyet Mahallesindeki Zeminlerin Deprem Sırasındaki Davranışları	89
4.3.3 Tıgıcılar Mahallesi için Sıvılaşma İncelemesi	91
4.3.3.1. Tıgıcılar Mahallesindeki Zeminlerin Endeks Özellikleri	91
4.3.3.2. Tıgıcılar Mahallesindeki Zeminlerin Deprem Sırasındaki Davranışları	99
4.4. Arazi verilerinin ortak değerlendirilmesi	101
4.5. Örselenmemiş Numunelerin Dinamik Direnci	107
4.6. Sonuç	117
KAYNAKLAR	119
ÖZGEÇMİŞ	125

KISALTMALAR

AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı
B	: Batı
CPT	: Koni Penetrasyon Deneyi
D	: Doğu
DAD	: Deprem Araştırma Dairesi
DKGO	: Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı
ER	: Enerji Oranı
G	: Güney
GB	: Güney-Batı
GD	: Güney-Doğu
İDO	: İnce Dane Oranı
JRA	: Japan Road Association
JSCE	: Japanese Society of Civil Engineers
K	: Kuzey
KB	: Kuzey-Batı
KD	: Kuzey-Doğu
KGO	: Kayma Gerilmesi Oranı
MDF	: Magnitüd Düzeltme Faktörü
NP	: Non Plastic
SCPT	: Sismik Koni Penetrasyon Deneyi
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
UU	: Undrained Unconsolidated
YASS	: Yer Altı Su Seviyesi

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Relatif Sıklığa (Dr) Bağlı Olarak Sıvılaşma Potansiyeli.....	12
Tablo 2.2 : SPT- N değerleri ile relatif sıklık ve nispi yoğunluk sınıflaması.....	31
Tablo 2.3 : SPT - N değerleri ile kıvam ve serbest basınç dayanımları sınıflaması.....	32
Tablo 2.4 : Tasarım deprem şiddetine göre verilen Pso	33
Tablo 2.5 : Derinliğe göre C _R değerleri.....	39
Tablo 2.6 : Numune türüne göre C _B değerleri	39
Tablo 2.7 : Deprem tipine göre C _w değerleri	42
Tablo 2.8 : Japon Yol Kurumu'nun zemin sınıfları özellikleri.....	44
Tablo 2.9 : N ₀ Değerinin Belirlenmesi.....	45
Tablo 2.10 : Sıvılaşma Şiddeti.....	46
Tablo 3.1 : Adapazarı'nda deprem kaydının alındığı istasyonun zemin kesiti.....	48
Tablo 3.2 : Cumhuriyet mahallesi sokak isimleri.....	58
Tablo 3.3 : İstiklal mahallesi sokak isimleri	60
Tablo 3.4 : Tığcılar mahallesi sokak isimleri.....	63
Tablo 4.1 : Çeşitli ivme azalım bağıntılarıyla Adapazarı için bulunan maksimum yatay yer ivmesi değerleri	70
Tablo 4.2 : İstiklal Mahallesinde Sıvılaşma Gözlenen Noktalardaki Sondajlar	71
Tablo 4.3 : İstiklal Mahallesine ait zemin değerleri ve DKGO	71
Tablo 4.4 : Cumhuriyet Mahallesinde Sıvılaşma Gözlenen Noktalardaki Sondajlar	81
Tablo 4.5 : Cumhuriyet Mahallesine ait zemin değerleri ve DKGO	81
Tablo 4.6 : Tığcılar Mahallesinde Sıvılaşma Gözlenen Noktalardaki Sondajlar	91
Tablo 4.7 : Tığcılar Mahallesine ait zemin değerleri ve DKGO	91
Tablo 4.8 : Erzurum Ekşisu Dinamik Basit Kesme Deneyi (Erken ve Ülker.,1994)	107
Tablo 4.9 : Adapazarı Bölgesi Dinamik Üç Eksenli Basınç Deneyi (Kaya ve diğ.,2002)	108
Tablo4.10 : İzmir Bölgesi Dinamik Burulmalı Basınç Deneyi (Ülker.,2004)	108

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Ön sıvılaşmayı oluşturan tekrarlı yük grafiği (Das1993).....	4
Şekil 2.2 : Sıvılaşma Sonucu oluşmuş Bir Kum Konisi.....	5
Şekil 2.3 : Tekrarlı Üç Eksenli Yükleme Kademeleri İçin Gerilme Durumları (Ishihara, 1996).....	8
Şekil 2.4 : Tekrarlı Üç Eksenli Deneyde Eksenel Uzama ve Boşluk Suyu Basıncı Artışı (Ishihara, 1996).....	9
Şekil 2.5 : Niigata Depreminde Sıvılaşma Sonucu Yatmış Apartmanlar.....	10
Şekil 2.6 : Alaska (1964) Sıvılaşma sonucu deforme olmuş binalar.....	11
Şekil 2.7 : Adapazarı'nda (1999) temelden devrilmiş bir bina.....	11
Şekil 2.8 : Başlangıç Relatif Sıkılığın Sıvılaşmaya Etkisi (Seed, 1978).....	13
Şekil 2.9 : Relatif Sıkılığın Oluşacak Boşluk Suyu Basınçlarına Etkisi (Ladd,1989).....	13
Şekil 2.10 : Relatif Sıkılığın Sıvılaşmaya ve Birim Kaymalara Etkisi (Seed, 1978).....	14
Şekil 2.11 : Dane boyutu dağılımına göre sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi (Japon Liman ve Barınak Birliği, 1989).....	15
Şekil 2.12 : Sıvılaşma gözlenmiş zeminlerin dane çapı dağılım eğrileri (Ishihara, 1985).....	16
Şekil 2.13 : Plastik ince danelerin sıvılaşmaya etkisi (Erken ve Ansal, 1994)	17
Şekil 2.14 : Düşük plastisiteli siltli kumlarda a)N=10 ve b)N=30 çevrimlerinde boşluk suyu basıncı oranı ile eksenel deformasyonların değişimi (Erten ve Moher, 1995).....	18
Şekil 2.15 : Örselenmemiş kumlu zeminlerde ince dane oranının sıvılaşmaya etkisi (Ansal ve diğ., 1994).....	19
Şekil 2.16 : Plastisitenin sıvılaşmaya etkisi (Ansal ve diğ., 1994).....	19
Şekil 2.17 : Plastisitenin sıvılaşmaya etkisi.....	20
Şekil 2.18 : Tekrarlı Gerilme Oranı Çevrim Sayısı İlişkisi (Ansal ve diğ.,1998).....	21
Şekil 2.19 : Yatay toprak basıncı katsayısının sıvılaşmaya etkisi (Seed, 1978)	22
Şekil 2.20 : Aşırı konsolidasyon oranının sıvılaşmaya etkisi.....	22
Şekil 2.21 : Sismik geçmişin sıvılaşmaya etkisi {Seed, 1978).....	24
Şekil 2.22 : Düzeltilmiş SPT (N60) değerlerinden yararlanılarak DKGO değerlerinin 7,5 büyüklüğündeki bir deprem için, deneysel sıvılaşma verileri yardımıyla bulunması (NCEER,1997'den sonra	36
Şekil 2.23 : Çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilen MDF değerleri (NCEER, 1997'den sonra).....	37
Şekil 2.24 : Seed ve De Alba (1986)'ya göre DKGO ile N60 ilişkisi, sıvılaşma ve de sıvılaşmama sınır çizgileriyle beraber gösterim (JSCE, 2001).....	38

Şekil 3.1	: Adapazarı'nda Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü'nde bulunan sismograftan elde edilen 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi ana şok kaydı(DAD,1999).....	49
Şekil 3.2a	: 13 Eylül 1999 tarihinde meydana gelmiş olan artçı depremde Adapazarı'nda alüvyon zemin üzerinde inşaa edilmiş olan A. Babalıoğlu konutunda (40,7863 K ve 30,3907 B, dış merkeze uzaklık 24,5 km) ölçülen depremin D-B bileşeni (Kandilli Rasathanesi, 1999).....	50
Şekil 3.2b	: 13 Eylül 1999 tarihinde meydana gelmiş olan artçı depremde Adapazarı'nda kaya üzerinde inşa edilmiş olan Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü binasında (40,7369 K ve 30,3787 B, dış merkeze uzaklık 23,7 km) ölçülen depremin D-B bileşeni (Kandilli Rasathanesi, 1999).....	50
Şekil 3.3a-b	: İnceleme alanına ait uydu görüntüleri (İzmit Körfezi'nin batıdan doğuya doğru 3 boyutlu uydu görüntüsü, ölçeksiz) (Nurlu ve diğ. 2000).....	52
Şekil 3.3c-d	: Akyazı'dan İzmit Körfezi arasının 3 boyutlu uydu görüntüsü, bakış doğudan batıya (Nurlu ve diğ., 2000).....	53
Şekil 3.3e-f	: Gölyaka-Mudurnu Vadisi civarının 3 boyutlu uydu görüntüsü, bakış doğudan batıya doğru, ölçeksiz) (Nurlu ve diğ., 2000).....	53
Şekil 3.4	: Adapazarı'nın KD' dan GB' ya doğru morfolojik görünümü.....	54
Şekil 3.5	: Adapazarı şehrinin ilk 15 m derinlikteki yüzey tabakaları (Erken, 2001b).....	56
Şekil 3.6	: Adapazarı'nda en çok hasara uğrayan mahalleler.....	57
Şekil 3.7	: Cumhuriyet Mahallesi.....	57
Şekil 3.8	: Cumhuriyet mahallesinde açılan sondajlardan silt-kum zeminlerde yapılan elek analizlerinden elde edilen dane çapı dağılımı (Okan R., 2001).....	59
Şekil 3.9	: İstiklal Mahallesi.....	60
Şekil 3.10	: İstiklal mahallesinde açılan sondajlardan silt-kum zeminlerde yapılan elek analizlerinden elde edilen dane çapı dağılımı (Okan R., 2001).....	62
Şekil 3.11	: Tıgıcılar Mahallesi.....	63
Şekil 3.12	: Tıgıcılar mahallesinde açılan sondajlardan silt-kum zeminlerde yapılan elek analizlerinden elde edilen dane çapı dağılımı (Okan R., 2001).....	65
Şekil 4.1	: İstiklal Mahallesi için Plastiklik Kartı.....	73
Şekil 4.2	: İstiklal Mahallesi için w_L – İDO Grafiği.....	74
Şekil 4.3	: İstiklal Mahallesi için w_p – İDO Grafiği.....	75
Şekil 4.4	: İstiklal Mahallesi için w_n –İDO Grafiği	76
Şekil 4.5	: İstiklal Mahallesi için I_p – İDO Grafiği	77
Şekil 4.6	: İstiklal Mahallesi için D_{50} – İDO Grafiği	78
Şekil 4.7	: İstiklal Mahallesi için $w_n / w_L - (N_1)_{60}$ Grafiği.....	79
Şekil 4.8	: İstiklal Mahallesinin Deprem Sırasındaki DKG0-(N_1) ₆₀ Grafiği	80
Şekil 4.9	: Cumhuriyet Mahallesi için Plastiklik Kartı.....	83
Şekil 4.10	: Cumhuriyet Mahallesi için w_L – İDO Grafiği.....	84
Şekil 4.11	: Cumhuriyet Mahallesi için w_p – İDO Grafiği.....	85
Şekil 4.12	: Cumhuriyet Mahallesi için w_n – İDO Grafiği.....	86
Şekil 4.13	: Cumhuriyet Mahallesi için I_p – İDO Grafiği	87
Şekil 4.14	: Cumhuriyet Mahallesi için D_{50} – İDO Grafiği	88

Şekil 4.15	: Cumhuriyet Mahallesi için $w_n / w_L - (N_1)_{60}$ Grafiği.....	89
Şekil 4.16	: Cumhuriyet Mahallesinin Deprem Sırasındaki DKGO- $(N_1)_{60}$ Grafiği.....	90
Şekil 4.17	: Tığcılar Mahallesi için Plastiklik Kartı.....	93
Şekil 4.18	: Tığcılar Mahallesi için $w_L - \dot{I}DO$ Grafiği.....	94
Şekil 4.19	: Tığcılar Mahallesi için $w_p - \dot{I}DO$ Grafiği.....	95
Şekil 4.20	: Tığcılar Mahallesi için $w_n - \dot{I}DO$ Grafiği	96
Şekil 4.21	: Tığcılar Mahallesi için $I_p - \dot{I}DO$ Grafiği	97
Şekil 4.22	: Tığcılar Mahallesi için $D_{50} - \dot{I}DO$ Grafiği	98
Şekil 4.23	: Tığcılar Mahallesi için $w_n / w_L - (N_1)_{60}$ Grafiği.....	99
Şekil 4.24	: Tığcılar Mahallesinin Deprem Sırasındaki DKGO- $(N_1)_{60}$ Grafiği	100
Şekil 4.25	: Arazi Verileri İçin Ortak Plastiklik Kartı.....	101
Şekil 4.26	: Ortak Arazi verileri için $w_n - \dot{I}DO$ Grafiği.....	102
Şekil 4.27	: Ortak Arazi verileri için $\log D_{50} - \dot{I}DO$ Grafiği.....	103
Şekil 4.28	: Ortak Arazi verileri için $w_n/w_L - (N_1)_{60}$ Grafiği.....	104
Şekil 4.29	: Ortak Arazi verileri için $w_n/w_L - \dot{I}DO$ Grafiği.....	105
Şekil 4.30	: Ortak Arazi Verilerinin Deprem Sırasındaki DKGO - $(N_1)_{60}$ Grafiği.....	
Şekil 4.31	: Örselenmemiş numuneler için oluşturulan plastisite kartı.....	109
Şekil 4.32	: Örselenmemiş numuneler için $\dot{I}DO$ ve DKGO değişimi.....	110
Şekil 4.33	: Örselenmemiş numuneler için I_p ve DKGO eğrileri.....	111
Şekil 4.34	: Örselenmemiş numuneler için N_c ve DKGO eğrileri.....	112
Şekil 4.35	: Örselenmemiş numuneler için sıvılaşma analizi ve DKGO eğrileri.....	113
Şekil 4.36	: Örselenmemiş numuneler için oluşturulmuş DKGO eğrileri.....	114
Şekil 4.37	: Örselenmemiş numuneler için oluşturulmuş DKGO eğrilerinin Adapazarı'ndan elde edilen ortak arazi verileri ile birlikte değerlendirilmesi.....	115

SEMBOL LİSTESİ

a_{maks}	: Maksimum yatay yer ivmesi
c	: Kohezyon
C_B	: Sondaj borusu çapını düzeltme katsayısı
C_E	: SPT tokmağı enerji verimlilik düzeltme katsayısı
C_N	: Düşey efektif gerilmeye göre SPT düzeltme katsayısı
C_R	: Kısa sondaj borusu uzunluk düzeltme katsayısı
C_S	: Standartlara uymayan numune alıcılarının düzeltme katsayısı
d	: Derinlik
D	: Deprem kaynağına olan uzaklık
D_{10}	: Efektif dane çapı
D_{50}	: Ortalama dane çapı
D_f	: Temel derinliği
D_r	: Relatif sıkılık
E_r	: SPT deneyi tokmağında Türkiye’de kullanılan enerji verimliliği
ER	: SPT deneyi tokmağında Türkiye’de kullanılan enerji verimliliği
E_{rb}	: SPT deneyi tokmağında kullanılan standart enerji verimliliği
ϕ	: Kayma mukavemeti açısı
F_L	: Sıvılaşma güvenlik sayısı (JRA, 1996)
F_s	: Sıvılaşma güvenlik sayısı (Seed ve diğ., 2001)
g	: Yerçekimi ivmesi
γ_1	: Temel tabanı üzerindeki zeminin birim hacim ağırlığı
γ_2	: Temel tabanı altındaki zeminin birim hacim ağırlığı
γ_d	: Suyu doymuş birim hacim ağırlığı
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlığı
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlığı
G_s	: Güvenlik sayısı
h	: Odak derinliği
I_0	: Deprem şiddeti
I_c	: Kıvam indisi
I_p	: İnce dane oranı
IDO	: Plastisite indisi
K_0	: Yatay toprak basıncı katsayısı
K_1 ve K_2	: Temel tabanı şekline bağlı katsayılar
L	: JRA (1996) yönteminde deprem durumu için hesaplanan DKGO
M_d	: Süre magnitüdü
M_s	: Yüzey dalgası magnitüdü
M_w	: Moment magnitüdü
N	: Düzeltilmemiş SPT değeri
N_1	: 1 kg/cm ² atmosfer basıncına göre düzeltilmiş SPT değeri
N_{30}	: Düzeltilmemiş SPT değeri
$(N_1)_{60}$	: Düzeltilmiş SPT değeri
R	: JRA (1996) yönteminde sıvılaşmanın olduğu durumlar için DKGO

r_d	: Zemin kolonu için gerilme azaltma faktörü
r_{MDF}	: Magnitüd düzeltme faktörü
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	: Asal gerilmeler
σ'	: Efektif gerilme
σ_v	: Düşey toplam gerilme
σ_v'	: Düşey efektif gerilme
τ_{av}	: Ortalama kayma gerilmesi oranı
u	: Boşluk suyu basıncı
U	: Üniformluk katsayısı
V_s	: Kayma dalgası hızı
w_L	: Likit limit
w_n	: Su muhtevası
w_p	: Plastik limit
# +4	: ASTM'nin 4 nolu eleği (4,76 mm) üzerinde kalan miktar
# -200	: ASTM'nin 200 nolu eleği (0,074 mm) altına geçen miktar
z	: Zemin yüzeyinden itibaren ölçülen derinlik



ZEMİNLERİN SIVILAŞABİLİRLİĞİ ÜZERİNE İNCE DANE ORANI VE PLASTİSİTENİN ETKİSİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, depremlerde ortaya çıkarak özellikle kumlu ve siltli zeminlerde zemin mukavemetini tamamen ortadan kaldıran ve bunun sonucunda yapıların dönmesine, oturmasına,şev kaymalarına sebep olan zemin sıvılaşması vakası ve zeminlerin sıvılaşma potansiyelini hesaplama yöntemleri ve zemin sıvılaşmasına ince dane oranı ve plastisite parametrelerinin etkisi incelenmiş, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin ardından Adapazarı ilinde oluşturduğu sonuçlar irdelenmiştir.

Araştırma kapsamında zemin sıvılaşmasının mekanizmasını açıklayan, sıvılaşmanın yapılar üzerindeki etkilerini gösteren yayınlar incelenmiş ve sıvılaşma araştırmaları tarihi içerisinde bu konu üzerine yapılan diğer araştırmacıların çalışmalarından yararlanılarak literatür çalışması oluşturulmuştur. Ülkemizde ve dünyada yaygınlıkla kullanılan sıvılaşmayı etkileyen, tetikleyen, faktörler, sıvılaşma potansiyeli analizi kriterleri, ve parametreleri incelenmiştir. Sıvılaşma potansiyelini ortaya çıkarmak için yapılan arazi deneyleri ve laboratuvar deneyleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Araştırma içinde kullanılacak olan standart penetrasyon deneyi ile ilgili düzeltmelere yer verilmiştir. Körfez ve Adapazarı bölgesinin jeolojik yapısına ana hatlarıyla değinilmiş ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin parametreleri hakkında ayrıntılı veriler sunulmuştur. Deprem sırasında oluşan en büyük yer ivmesi değeri çeşitli yöntemlerle hesaplanıp 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi için ortalama bir değer seçilmiştir.

17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrasında Adapazarı bölgesinde sıvılaşmanın yoğun olarak görüldüğü İstiklal, Cumhuriyet ve Tıgıcılar Mahallelerinde yapılan sondajlardan elde edilen zemin verileri derlenmiştir. Bu verilerin ince dane oranı ve plastisiteyle olan ilişkileri gösterilmiştir. SPT'ye bağlı sıvılaşma potansiyeli hesaplama yöntemlerine değinilmiş, Seed ve diğ.,2001 yöntemi kullanılarak arazi verileri için $(N_1)_{60}$ ve dinamik kayma gerilme oranı değişimini içeren detaylı grafikler oluşturulmuştur.

Diğer taraftan Adapazarı, İzmir, Erzincan bölgelerinden alınan örselenmemiş numunelerle yapılmış çeşitli laboratuvar deneyi çalışmaları derlenerek, bu numunelerde sıvılaşmayı etkileyen parametrelerin birbirleriyle değişimleri ayrıntılı olarak gözlemlenmiştir. Örselenmiş numune verilerini zenginleştirmek için literatürde yer alan Ishihara, 1979, Ishihara'dan sonra, 1993, Seed ve diğ.,1985, Yoshimi ve diğ.,1989 çalışmalarından da veriler derlenmiştir. Tüm örselenmemiş numune deney verileri Seed ve Peacock,1971 bağıntısına göre arazi şartlarına uyarlanmıştır ve arazi için oluşturulmuş dinamik kayma gerilme oranı ve düzeltilmiş SPT değerlerinin değişimini gösteren grafikler oluşturulmuştur.

Bu bağlamda NCEER, 1997'den sonra çalışmasından farklı %100, %90, %80 ve %55 ince dane oranları için sıvılaşma sınır eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen sıvılaşma sınır eğrileri Adapazarı arazi verilerine adapte edildiğinde eğrilerin ve verilerin birbirleriyle uyumlu olduğu gözlenmektedir.

17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sıvılaşmanın ülkemiz için ne kadar büyük problemler ortaya çıkarabileceğini göstermiştir. Bir çok parametrenin etkilediği sıvılaşma karışık bir mekanizmaya sahip olsa da matematiksel açıdan modellenemez değildir. Özellikle Adapazarı bölgesinde sıvılaşma potansiyeli görülen yerlerde düzgün arazi deneyleri yapıp, bu deney verileri laboratuvar verileriyle desteklenirse bölgenin bütünündeki sıvılaşma durumu için bir kaynak oluşturulup, bir sıvılaşma güvenliği haritası oluşturulabilir. Tabi ki tüm bunları yapabilmek için sıvılaşmayı iyi anlamak ve sıvılaşmayı etkileyen faktörlerin birbirleriyle olan etkileşimini iyi bilmek varılmak istenen noktaya büyük ışık tutacaktır.



EFFECTS OF FINES CONTENT AND PLASTICITY ON SOIL LIQUEFACTION

SUMMARY

Soil liquefaction occurs during earthquakes and decreases the soil strength to zero value. As a result of this the buildings can settle, tilt and fell down. This situation causes lots of damages both building and human life. In this study, methods on evaluation of liquefaction potential were investigated and a case study from Adapazarı was conducted to understand the effects of fines content and plasticity over liquefaction after the 17 August 1999 Kocaeli Earthquake.

In this study first researches on liquefaction have been focused to understand the liquefaction mechanism, visualize the effects of liquefaction over the constructions and also the development and improvement of evaluation of soil liquefaction potential in research history. The parameters those affect and trigger the soil liquefaction and the relations between these parameters were also investigated. In-situ and laboratory soil testing and sampling methods and their procedures was explained specifically. Standard penetration test and the corrections of SPT blow count was given in the frame of research. Adapazarı and İzmit Bay region's geological and geotechnical structure were presented generally and the 17 August 1999 Kocaeli Earthquake data was obtained from boreholes drilled in situ and some borehole data was provided from local authorities. The peak ground acceleration value in the earthquake was evaluated in several methods and a mean value was chosen for 17 August 1999 Kocaeli Earthquake.

Soil data that was obtained from the soil borings conducted on the most liquefied zone in Adapazarı namely İstiklal, Cumhuriyet and Tığcılar region after the 17 August 1999 Kocaeli earthquake. The relations between of the soil parameters and fines content and plasticity were also presented. The SPT based soil liquefaction evaluation methods were explained and by using Seed et.al.,2001 method the $(N_1)_{60}$ and cyclic stress ratio charts were produced for in-situ soil samples obtained from Adapazarı. On the other hand data obtained from the undisturbed soil samples drilled in Adapazarı, İzmir and Erzincan and tested in laboratory conditions by using dynamic triaxial pressure, dynamic simple shear and dynamic torsional tests. Erken ve diğ.,(1994), Kaya ve diğ., (2002), Ülker, (2004), Ishihara et al., (1979), Ishihara (after 1993), Seed et.al (1985) and Yoshimi et.al. (1989) research data were also used in the study. These data were re-evaluated for providing the harmony with in-situ parameters by using Seed and Peacock, (1971) study. After that by using Seed et.al.,2001 method the $(N_1)_{60}$ and cyclic stress ratio charts were produced again for the undisturbed samples.

At this point the soil liquefaction limit curves (cyclic stress ratio curves) depend on the fines content %100, %90, %80, %55 were produced in the charts. These curves were also adopted to in-situ data in Adapazarı region. It was observed that the cyclic stress ratio curves for different fines content ,represents the in-situ values as well in a harmony.

17 August 1999 Kocaeli Earthquake had showed the soil liquefaction is a huge problem and may cause serious damages in our country. The soil liquefaction has many variants that affect to structure and it can be modeled mathematically. If the proper and numerous in-situ tests can be conducted in the Adapazarı region for the places have a liquefaction potential, the liquefaction map can be produced. But first of all the liquefaction phenomena and the relationships between the soil and earthquake parameters must be understand properly. This will illuminate the destination on liquefaction.



1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Zemin sıvılaşması geride bıraktığımız yüzyılın ikinci yarısından beri araştırmacıların, geoteknik mühendislerinin ilgi alanı olmuş sofistike bir kavramdır. Özellikle 1964 Alaska ve Niigata depremleri sonrası ortaya çıkan tabloda oluşan hasarların önemli bir bölümünün zemin sıvılaşması sonucu ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bunun sonucu olarak bir çok bilim adamı bu konu üzerinde çalışmaya başlamıştır. Bu bilim adamlarından başlıcaları Bolton H. Seed, I. M. Idriss ve K. Ishihara'dır. 1964'deki Niigata ve Alaska'daki deprem felaketinden sonra burada ortaya çıkan sıvılaşma vakası ile ilgili ortak bir çalışma yapmışlar ve geliştirdikleri sistemi "Zeminlerin Sıvılaşma Direçlerinin Hesaplanması için Basitleştirilmiş Yöntem" (Simplified Procedure For Evaluating Liquefaction Resistance of Soils) adıyla 1971 yılında yayınlayıp geoteknik literatürüne sokmuşlardır.

Bu tarihten sonra sıvılaşma kavramı ve zemin sıvılaşmasını etkileyen parametreler araştırmacılar için önemli bir konu olma özelliğini azalmadan sürdürmüştür. 1979 yılında Seed ve Idriss basitleştirilmiş yöntemi yeni bulgular doğrultusunda geliştirmişlerdir. Yöntem zaman içerisinde bir çok değişikliğe uğramış ve yöntemle bir çok ekleme yapılmıştır. 1985 yılında Seed ve çalışma ekibi ince dane oranlarını içeren eğrileri bu yöntemle uyarlamışlardır. Yöntem esas olarak dinamik kayma gerilmesi oranından yola çıkarak zeminin düzeltilmiş SPT değerlerini kullanarak sıvılaşmaya karşı olan direncini hesaplama ilkesiyle çalışır.

Zeminin sıvılaşmaya karşı direncini hesaplama çalışmaları sadece Seed ve Idriss'in çalışmalarıyla sınırlı değildir özellikle Japonya ve A.B.D'de bir çok farklı yöntem geliştirilmiştir Bu yöntemler arasında; Japon Yol Kurumunun 1996'da sunduğu yöntem, Eşik İvme Kriteri Yöntemi (Dorby ve diğ) ve Çin Milli Kodu en çok kullanılanlarıdır. Zemin sıvılaşması oldukça karışık ve bir çok parametreden oluşan bir kavram olduğundan her bir yöntem belli bölgeler ve belli şartlar altında en güvenilir sonuçları vereceği açıktır. Her bir yöntemde değişen zemin koşullarına göre değişim gösterebilir.

Bu araştırmanın da çıkış noktası zemin sıvılaşması potansiyelinin hesaplama yöntemlerindeki bu geliştirilebilme özelliğidir. Araştırma kapsamında kullanılan örnek uzay Adapazarı bölgesi ve burada sıvılaşmanın yoğun olarak görüldüğü İstiklal, Cumhuriyet ve Tığcılar mahallelerinden elde edilen zemin verileridir. Ayrıca çalışma içerisinde örselenmemiş numuneler ile yapılmış sıvılaşma direnci analizlerinde Yoshimi ve diğ.,1989, Seed ve diğ.,1985, Ishihara, 1979, Ishihara'dan sonra, 1993, çalışmalarındaki doneler de kullanılmıştır

Tez çalışmasının 2. bölümünde zemin sıvılaşması kavramı ve bu kavramı bütünleyen diğer kavramlar hakkında literatür taraması yapıldı. Sıvılaşmanın oluşumu ve meydana getirdiği hasarlar hakkında görsel veriler sunuldu. Sıvılaşma potansiyelini etkileyen deprem hareketleri, zemin özellikleri ve çevresel koşulların etkileri irdelendi. Bu bağlamda sıvılaşmayı etkileyen zemin parametrelerinden olan ince dane oranı, plastisite, rölatif sıkılık kavramları incelenmiştir. Sıvılaşma potansiyeli hesabında gerek duyulan laboratuvar deneyleri ve arazi deneyleri açıklandı. SPT düzeltmeleri hakkında bilgiler verildi. Bu bölümde son olarak sıvılaşma analizinde kullanılan yöntemlere değinilip bu yöntemlerin mekanizması açıklanmaya çalışıldı.

Çalışmanın 3. bölümünde 17 Ağustos 1999 İzmit depremi hakkında sıvılaşma analizinde kullanılacak verilerine değinildi. Körfez ve Adapazarı bölgesi yerel zemin koşulları açıklandı. Tez kapsamında Adapazarı'nda bulunan mahallerin yerel zemin durumlarına yer verildi. Adapazarı bölgesinde sıvılaşmanın yoğun olarak görüldüğü İstiklal, Cumhuriyet ve Tığcılar mahallerinin bölgesel durumu ve zemin yapısı hakkında bilgiler sunuldu.

Tez çalışmasının araştırma bölümü olan 4. Bölümde önceki bölümlerde anlatılan İstiklal, Cumhuriyet ve Tığcılar mahallerinden alınan sondaj verileri önce ayrı ayrı ele alınarak değerlendirildi. Sıvılaşma görülen bölgelerin endeks özellikleri incelenerek bu endeks özelliklerinin ince dane oranı ve plastisite ile olan değişimleri incelendi. 17 Ağustos 1999 İzmit depremi için seçilen maksimum yer ivmesi kullanılarak bu mahalleler için dinamik kayma gerilme oranı ile düzeltilmiş SPT değerleri arasındaki korelasyonlar ortaya kondu. Ardından bu üç mahalleye ait veriler ortak olarak değerlendirilerek ortak sonuç grafikleri elde edildi. Sonrasında Adapazarı, (Kaya ve diğ.,2002), İzmir, (Ülker, 2004), Erzurum,(Erken ve diğ.,1994) bölgelerinden elde edilen örselenmemiş zemin numuneleriyle yapılmış laboratuvar çalışmaları değerlendirildi, ayrıca literatürde yer alan Ishihara, 1979, Ishihara'dan sonra, 1993, Seed ve diğ.,1985, Yoshimi ve diğ.,1989 çalışmalarından da veriler derlenip örselenmemiş numune verileri zenginleştirilmiş ve Seed ve Peacock,1971 bağıntısına göre arazi değerlerine uyarlanmıştır. Bu analiz sonucunda NCEER,

1997'den sonra çalışmasından farklı ince dane oranları için sıvılaşma sınır eğrileri elde edilip bu eğriler arazi sondaj verileri ile mukayese edilmiştir.

Çalışmanın 5. bölümünde genel sonuçlara yer verilmiştir.

Gerek dünyada gerekse ülkemizde insan yaşamına ve ekonomiye büyük yaralar açan zemin sıvılaşması kavramı gün geçtikçe önemini arttırmakta ve üzerinde yapılan çalışma sayısı artmaktadır. Ülkemizin de bu gün karşı karşıya kaldığı bir sorun olan sıvılaşma ülkemizde de yeteri kadar tanınmamaktadır ve konudaki çalışmalar fazla değildir. Araştırılmaya ve geliştirilmeye çok açık bir vaka olan zemin sıvılaşması geoteknik mühendisliğinin önemli bir konusu olmaya devam edecektir.



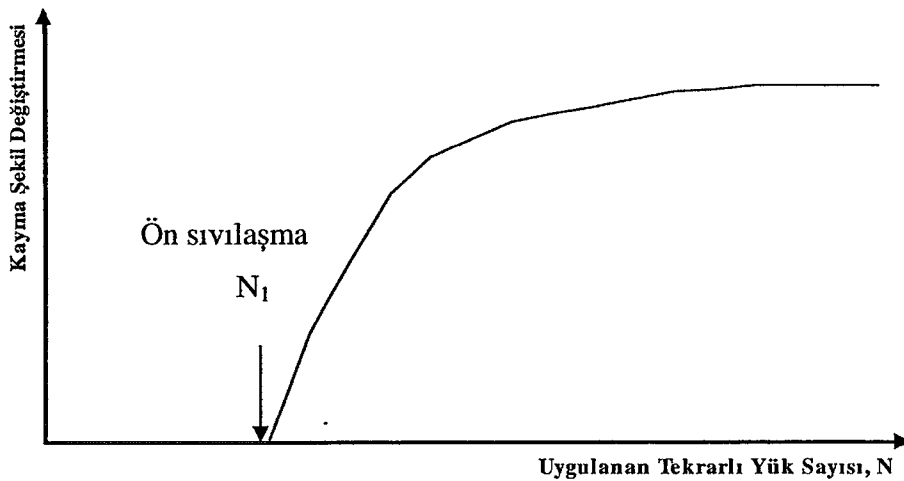
2. ZEMİN SIVILAŞMASI

2.1 Sıvılaşma ve İlgili Kavramların Tanımları

Zemin sıvılaşması tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının artarak zemin efektif gerilmesine eşit olup zemindeki granüler malzemenin taşıma gücünü kaybedip viskoz bir sıvı gibi davranması olarak tanımlanabilir. Bu olay sonucunda zemin, kayma mukavemetini kaybeder ve büyük şekil değiştirmelerine maruz kalır.

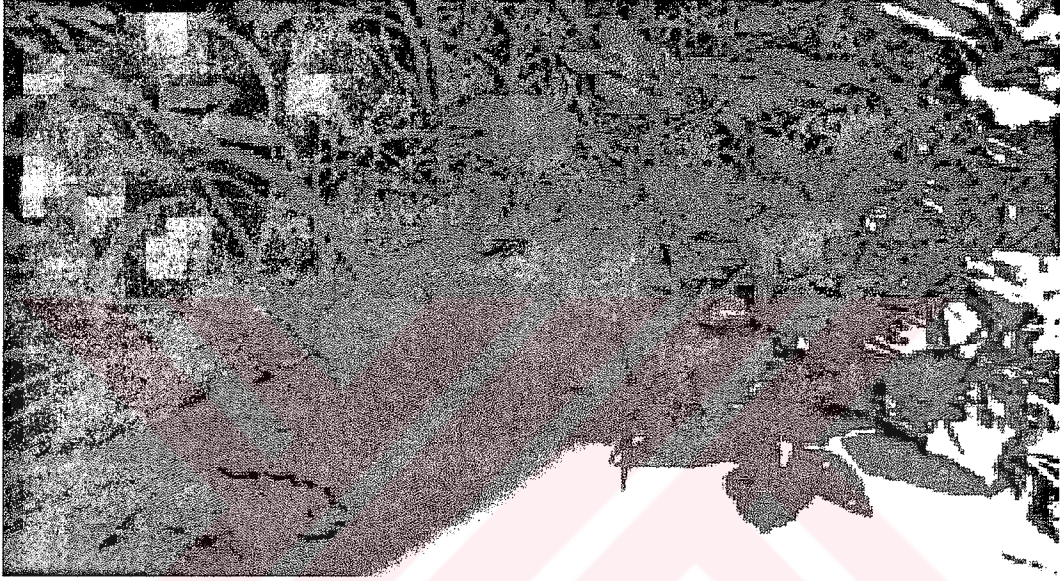
Sıvılaşmayı daha detaylı anlayabilmek için sıvılaşma ile ilgili kavramları şu şekilde yapılabilir:

a) Ön Sıvılaşma : Tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının, bir yükleme çevrimi sonunda efektif çevre gerilmesine eşit olmasına ön sıvılaşma denir. Ön sıvılaşmanın meydana gelmesi, zemin elemanında oluşabilecek şekil değiştirmelerin boyutları ile ilgili bir bilgi vermez. Böyle bir tanım yapmaktaki amaç zemin elemanının tekrarlı yükler altında davranışlarının adlandırılması ve ön sıvılaşmadan sonraki davranışının değerlendirilmesine açıklık getirilmesidir (Seed ve diğ., 1976). Tekrarlı yükler altında sıkı kumların yapacağı kayma şekil değiştirmesi ve uygulanan tekrarlı yükün döngü sayısı Şekil2.1'de görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta ön sıvılaşmanın bir eşik değeri olduğu ve şekil değiştirmenin belli bir noktadan sonra sabit kaldığıdır.(Das,1993)



Şekil 2.1. Ön sıvılaşmayı oluşturan tekrarlı yük grafiği (Das1993)

b) Sıvılaşma : Boşluk suyu basıncının tekrarlı veya statik yükler altında sürekli olarak artması ve bir noktadan sonra sabitleşmesi, efektif gerilmenin sıfır veya çok küçük bir değere düşmesine neden olur. Bunun sonucunda zemin elemanında sürekli olarak artan şekil değiştirmeler oluşur ve zemin bir sıvı gibi davranır. Bu olaya gerçek sıvılaşma denir. Tekrarlı yükler altında kalan zemin elemanı boşluk suyu basıncındaki artış dolayısıyla borulanarak dışarı çıkar. Bu esnada kum tanecikleri de dışarı taşınır ve zemin yüzeyinde kum konileri veya diğer adıyla kum volkanları oluşur. Şekil 2.2' de 1999 Kocaeli Depreminde oluşmuş kum kaynaması sonucu oluşmuş bir kum konisi görülmektedir



Şekil2.2. Sıvılaşma Sonucu oluşmuş Bir Kum Konisi

c) Sınırlı Ön Sıvılaşma-Çevrimsel Hareketlilik: Tekrarlı yükler altında bir yükleme çevrimi sonunda bir ön sıvılaşmanın oluşması ve bunu izleyen yükleme çevrimlerinde zemin elemanında bir artık dayanım bulunmasından veya hacim genişlemesi nedeni ile tekrar bir kayma direnci oluşur. Bunun sonucunda şekil değiştirmeler sınırlı kalır ve zemin elemanı tekrarlı yükler altında duraylı bir konuma gelir. Bu olaya sınırlı ön sıvılaşma denir.

2.2. Boşluk Suyu Basıncı Artış Mekanizması

Kohezyonsuz zeminler, özellikle gevşek kumlar, tekrarlı yükler altında, bulunduklarından daha sıkı bir konuma geçmek isterler. Kuru kumlar üzerinde yapılan değişik dinamik deneylerde bu hacim azalması ve sıkılığın artması gözlenmiştir. Suyu doymun zeminlerde ise, drenajsız halde tekrarlı yükler altında gevşek kuru kumlarda gözlenen hacimsel sıkışmaya daneler arasını dolduran boşluk suyu engel olmaktadır. Suyun sıkışabilirliğinin zemin yapısına oranla çok daha az

olması boşluk suyu basıncının artmasına yol açmaktadır. İnce-orta kumlarda hidrolik iletkenlik nispeten yüksek olmasına karşın, süre açısından bir deprem sırasında boşluk suyu basıncında olabilecek sönüm miktarının ihmal edilebilir olacağı ve drenajsız yükleme koşullarının geçerli olduğu varsayılmaktadır (Özaydın K.,1996).

Tek boyutlu yüklemelerde oluşan boşluk suyu basıncı uygulanan düşey gerilmenin büyüklüğüne eşit olur. Üç boyutlu veya üç eksenli yüklemelerde boşluk suyu basıncı büyüklüğü zemin tipine ve gerilme tarihçesine bağlıdır. Mühendislik uygulamasında, çeşitli gerilmelerde drenajsız yükleme yapılması; durumunda ne kadar fazla boşluk suyu basıncı oluşacağını tahmin etmek genellikle gereklidir. Bu gerilme değişiklikleri toplam gerilmeler cinsinden olup, hidrostatik veya kayma şeklinde de olabilir. Toplam gerilmelerdeki bu değişikliklere ($\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_3$) boşluk suyu basıncının tepkisi araştırıldığı için bu değişiklikleri boşluk suyu basıncı katsayıları veya parametreleri şeklinde ifade etmek uygun olur. Bu parametreleri ilk defa 1954 yılında İngiltere Imperial College'de Prof. Dr. A.W. Skempton tanıtmıştır.

Zemin elemanı, yapısında bulunan boşluklarında su ve hava bulunan sıkışabilir zemin bloğu şeklinde düşünülebilir. Bu zemin elemanına etkiyen gerilmeler arttırılırsa, zemin elemanın hacminde bir azalma ve boşluk suyu basıncında artış gözlenir. Drenajsız (UU) üç eksenli deneyde hidrostatik hücre basıncı σ_c uygulanması durumunda eğer zemin %100 suya doygun ise uygulanan hücre basıncı değişikliği $\Delta\sigma_c$ değerine eşit bir boşluk suyu basıncı değişikliği (Δu) elde edilir. Bir başka deyişle $\Delta u / \Delta\sigma_c$ oranı 1'e eşit olur. Eğer zemin %100'den daha az doygunsa, meydana gelen ilave boşluk suyu basıncı Δu 'nun artan hücre basıncı $\Delta\sigma_c$ 'ye oranı 1'den az olur. Üç eksenli deneyde bu oran şöyle ifade edilebilir:

$$\frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} = \frac{1}{1 + \frac{nC_v}{C_{sk}}} = B \quad (2.1)$$

Burada, n : Porozite

C_v : Boşlukların sıkışması

C_{sk} : Zemin iskeletin sıkışmasıdır.

Prof. Skempton rahatlık açısından bu oranı B şeklinde isimlendirmiştir. B parametresi, drenajsız yükleme koşullarında hidrostatik veya hücre basıncı artışının boşluk suyu basıncında meydana getirdiği artışı ifade eder.

Zemin tamamen doygunsa $C_v = C_w$ olur ve suyun sıkışabilirliği zemininkine çok küçük olduğu için $C_w/C_{sk} \rightarrow 0$ kabul edilebilir. Dolayısıyla doygun zeminlerde $B=1$ ' dir. Eğer zemin kuruyorsa C_v/C_{sk} sonsuza yaklaşır çünkü havanın sıkışabilirliği zemine göre çok fazladır. Dolayısıyla kuru zeminlerde $B=0$ olur. Kısmen doygun zeminlerde B parametresi 0 ile 1 aralığında değişir. B ve doygunluk derecesi arasındaki ilişki zemin tipine ve gerilme seviyesine bağlıdır (Holtz ve Kovacs, 1981).

2.3. Sıvılaşmanın Mekanizması

Yatay zeminlerde gözlenen zemin sıvılaşmasının esas nedenleri uzun zamandan beri bilinmektedir. Kayma gerilmesine maruz bırakılan sıkı kumlar genişlemeye yani hacminde bir artış meydana gelmeye, gevşek kumlar ise aynı gerilme koşulları altında hacminde azalmaya eğilim gösterir. Kayma gerilmesi uygulanan kumun hacminde bir değişimin meydana gelmediği boşluk oranına kritik boşluk oranı denir.

Dinamik bir etkiyle titreşim uygulanan ve kritik boşluk oranından daha büyük boşluk oranına sahip olan kum tabakalarının hacminde azalma meydana gelir. Drenaj mümkün değilse hacim azalması eğilimi boşluk suyu basıncının artması sonucunu doğurmaktadır. Boşluk suyu basıncındaki bu artış ortalama çevre basıncına eşit olacak mertebeye ulaştığı zaman efektif gerilmeler sıfır olmakta, kum tabakası mukavemetini tamamen kaybetmekte ve sıvılaşmış bir duruma gelmektedir.

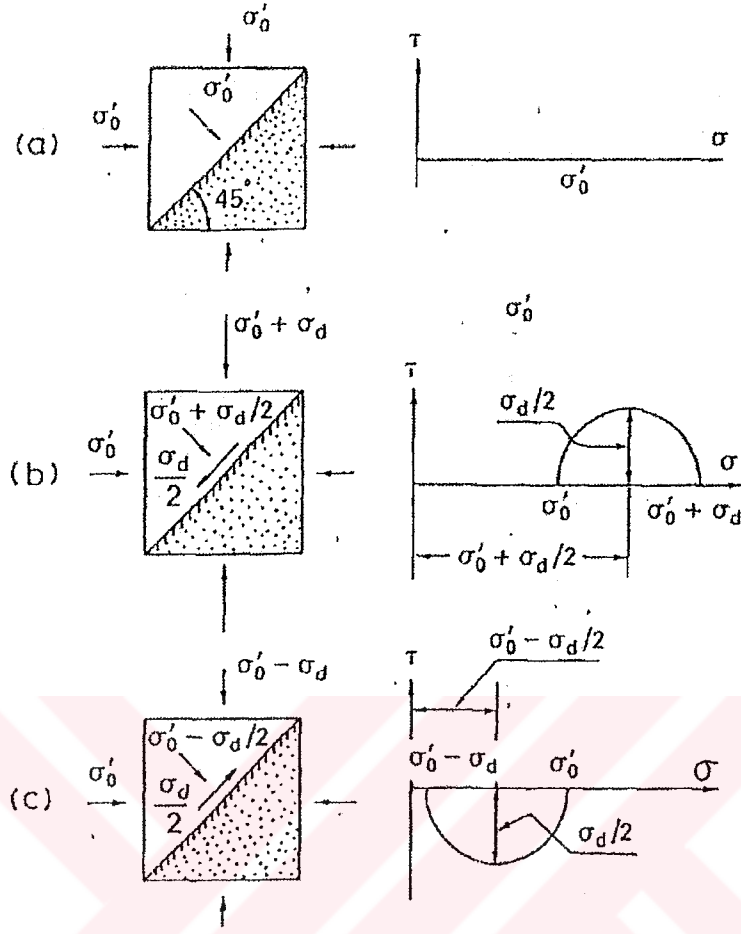
Ancak aşağıdaki sebeplerden dolayı kritik boşluk oranı kavramı tek başına kumların sıvılaşma potansiyellerini değerlendirmek için yeterli değildir.

i) Kritik boşluk oranı sabit bir değer değildir, çevre basıncıyla değişir.

ii) Dinamik yükleme koşullarındaki hacim değişiklikleri laboratuvarında tek yönlü basit kesme ve üç eksenli kesme deneylerinde elde edilenlerden farklıdır.

Bu nedenle 1960'lardan beri sıvılaşmayı kontrol eden zemin parametrelerinin belirlenmesi için özenli çalışmalar yapılmaktadır (Das, 1993).

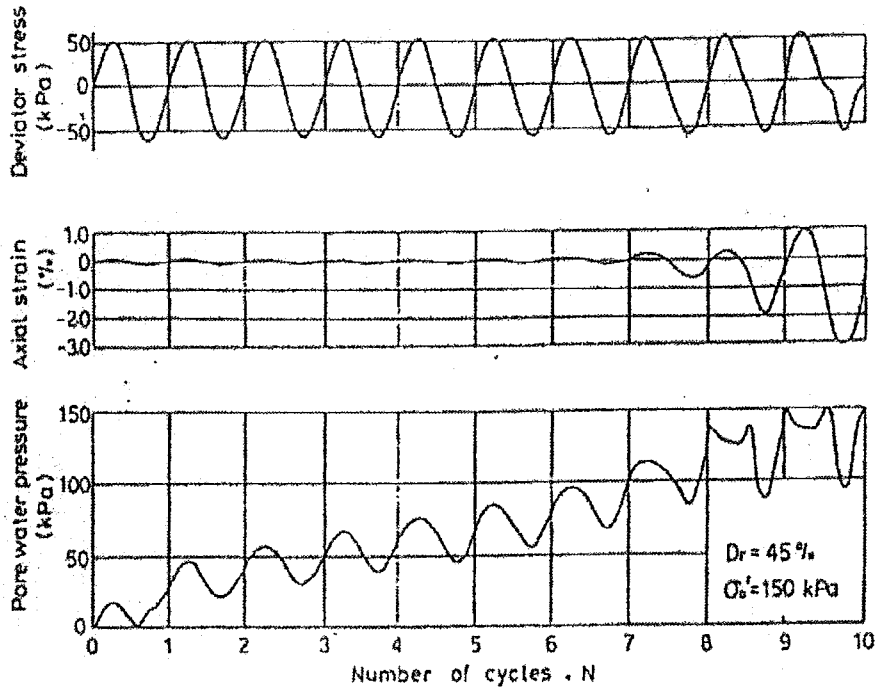
Laboratuvarında üç eksenli basınç deney aletiyle tekrarlı gerilme uygulanan kum numunelerin davranışı incelenerek sıvılaşma kavramının temeli oluşturulmuştur. İlk olarak Seed ve Lee (1966) tarafından suya doygun kum numuneler hücre basıncıyla konsolide edilmiş ve drenajsız koşullarda belirli bir eksenel uzamaya kadar tekrarlı eksenel gerilmelere maruz bırakılmıştır. Bu yükleme yöntemi numuneye yatayla 45°'lik açı yapan kayma yüzeyi ve düzlemi boyunca gerilme durumları oluşturur. Bu durum deprem sırasında yerde yatay bir düzlemde oluşan durumun aynısıdır, Tekrarlı üç eksenli deneydeki her yükleme kademesi için gerilme durumları Şekil 2.3 'de gösterilmiştir (Ishihara, 1996).



Şekil 2.3. Tekrarlı Üç Eksenli Yükleme Kademeleri İçin Gerilme Durumları (Ishihara, 1996)

Drenajsız koşullar altında eksenel gerilme σ_d uygulanırsa, 45° 'lik düzlemde oluşan kayma gerilmesi $\sigma_d/2$ olur. Ayrıca bu düzlemde $\sigma_d/2$ normal gerilme de oluşur fakat bu gerilme mevcut efektif çevre gerilmesini (σ'_0) değiştirmeden boşluk suyuna aktarılır. Dolayısıyla bu normal gerilme dikkate alınmaz.

Tekrarlı üç eksenli basınç deneyi için tipik bir sonuç Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



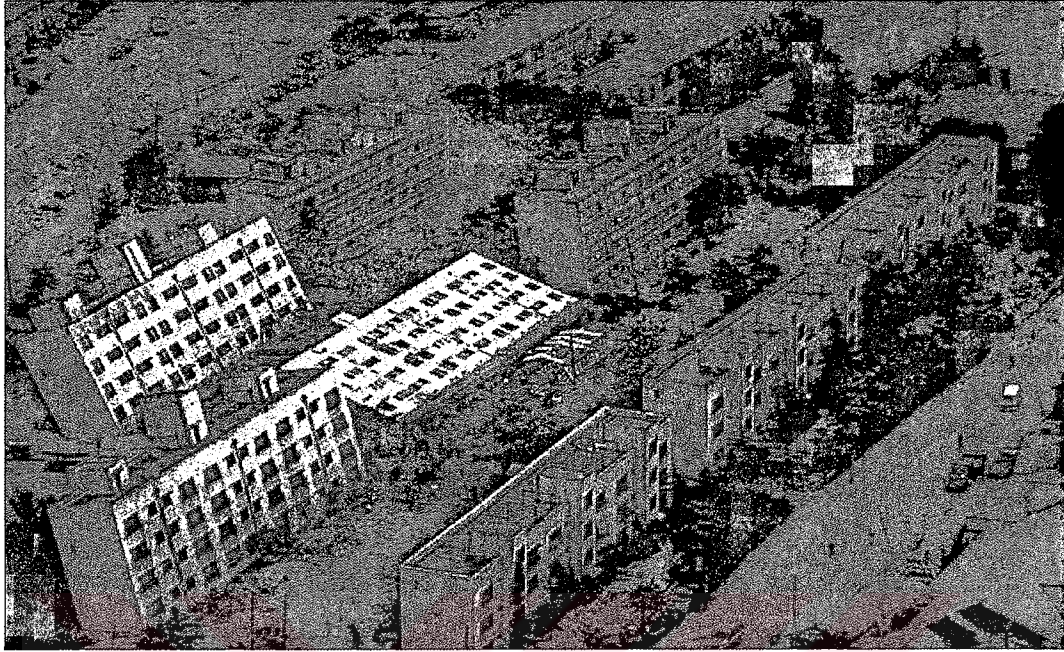
Şekil 2.4. Tekrarlı Üç Eksenli Deneyde Eksenel Uzama ve Boşluk Suyu Basıncı Artışı (Ishihara, 1996)

Burada tekrarlı eksenel gerilme uygulandıkça boşluk suyu basıncı giderek artmaktadır. Bu durum ön sıvılaşma veya kısaca sıvılaşma olarak isimlendirilir. Gevşek kum için ön sıvılaşma bir yumuşama durumu olarak isimlendirilir. Çünkü %100 boşluk suyu basıncı oluşumuyla mukavemet tamamen kaybolur ve aniden çok büyük deformasyon meydana gelir. Orta sıkı ve sıkı kumlarda yine %100 boşluk suyu basıncı oluşumuyla bir yumuşama durumu meydana gelir. Orta sıkı ve sıkı kumlarda tekrarlı yükler altında boşluk suyu basınçlarındaki artışların daha yavaş ve düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Bu tip kumlarda artırı boşluk suyu basınçları kısa süreli olarak efektif çevre gerilmesine eşit olur. Zemin numunesinin genişlemeye başlaması ile boşluk suyu basınçlarının değeri azalır ve zemin tekrar mukavemet kazanır. Bu zeminlerde oluşan sıvılaşma gevşek kumlarda gözlenen sıvılaşmadan farklı olup şekil değiştirmeler kumun sıkılığına bağlı olarak sınırlı kalır. Bu olaya sınırlı sıvılaşma veya çevrimsel hareketlilik oluşması denilmektedir (Ishihara, 1996).

2.4. Sıvılaşmanın Meydana Getirdiği Hasarlar

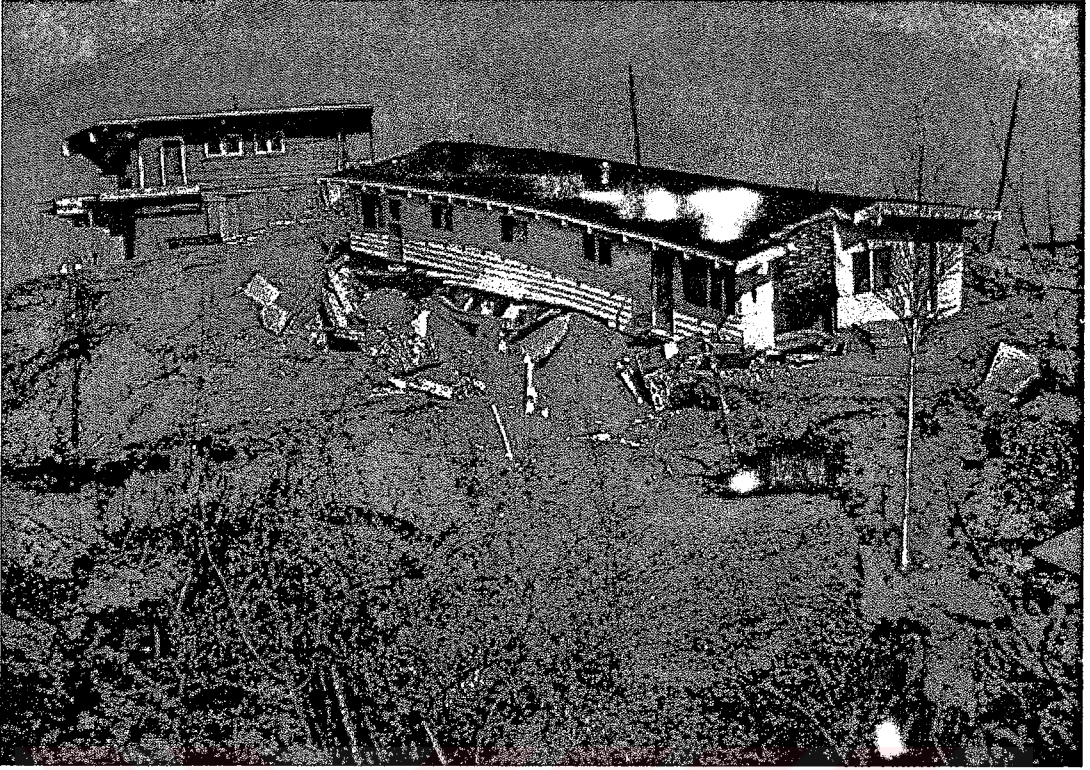
Sıvılaşma kavramını daha somut kavrayabilmek için, sıvılaşmanın meydana getirdiği hasarları gözlemleyip, bunlara karşı önlemler alınması gereklidir. Özel bir durum olarak, önemli depremlerde sıvılaşma yapılar da dönmelere, oturmalara ve yatmalara

sebepler olsa da yaşamsal hasarları oldukça minimize etmektedir. Sıvılaşmanın yarattığı hasarları anlatan en çarpıcı ve en ünlü görüntü Şekil 2.5. de görülen 1964 Niigata depremine ait yatmış apartmanlardır.



Şekil 2.5. Niigata Depreminde Sıvılaşma Sonucu Yatmış Apartmanlar

Aynı yıl Alaska’da meydana gelen 8.5 büyüklüğündeki depremde yine sıvılaşmaya bağlı oldukça önemli hasarlar meydana geldi. Şekil 2.6.’de de görüldüğü gibi sıvılaşmanın meydana getirdiği hasar yapılar için oldukça büyük ve geri dönülemez olsa da insan yaşamına çok da büyük etkileri yoktur. 1999 Kocaeli depreminden de tamamen devrilmiş bir bina Şekil 2.7’ de görülmektedir.



Şekil 2.6. Alaska (1964) Sıvılaşma sonucu deforme olmuş binalar.



Şekil 2.7. Adapazarı'nda (1999) temelden devrilmiş bir bina.

Sonuç olarak sıvılaşmanın yapıların temeline yönelik oldukça ciddi hasarları olduğunu ve bu hasarları binalarda ciddi dönme ve oturmalara sebep olması nedeni ile binaların kullanılamadığı ama yatmış binalarda çökme ve göçme şeklinde bir hasar olmadığı için can kayıplarının az olduğunu söyleyebiliriz.

2.5. Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler

Sıvılaşma vakası bir çok parametreye bağlı olarak değişen oldukça karışık bir mekanizması olan karışık bir kavramdır. Bunun sonucu olarak sadece birkaç parametreye bakarak kesin yargılara varılamaz. Değişik depremlerde meydana gelen sıvılaşmalar incelendiğinde her birinin yeni olgular doğurabildiği rahatlıkla söylenebilir. Sıvılaşmaya etki eden faktörler başlıca iki ana grupta incelenebilir, zemin özellikleri ve tabakalaşma (yerel topografya, yeraltı suyu rejimi vb.) ve deprem hareketi özellikleri. Bu iki an bölümle ilgili tarihsel verilere dayalı çalışmayı aşağıda bulabilirsiniz.

2.5.1. Zemin Özellikleri ve Tabakalaşma Etkileri

Sıvılaşmama potansiyelini etkileyen zemin özelliklerinden en önemlisi rölatif sıkılıktır. İnce dane oranı plastisite, yatay toprak basıncı ve aşırı konsolidasyon oranı tabakalaşma etkileri olarak bu bölümde incelenecektir.

2.5.1.1. Relatif Sıklık

Relatif Sıklık, D_r , daneli zeminlerdeki oturma ve sıvılaşma riskinin belirlenmesindeki temel parametrelerden biridir. Başlangıç relatif sıklık değeri arttıkça titreşim sırasında oturma ve boşluk suyu basıncının azaldığı bilinmektedir.

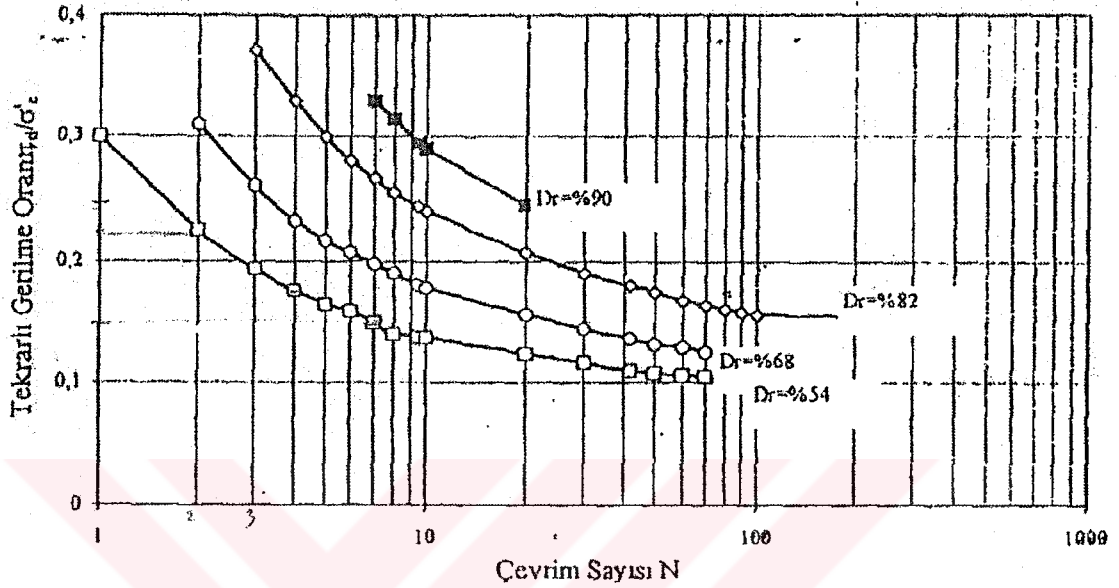
Yer ivmesi ve relatif sıklığa bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli durumu Tablo 2.1'de verilmiştir (Dowrick, 1975).

Tablo 2.1. Relatif Sıklığa (D_r) Bağlı Olarak Sıvılaşma Potansiyeli

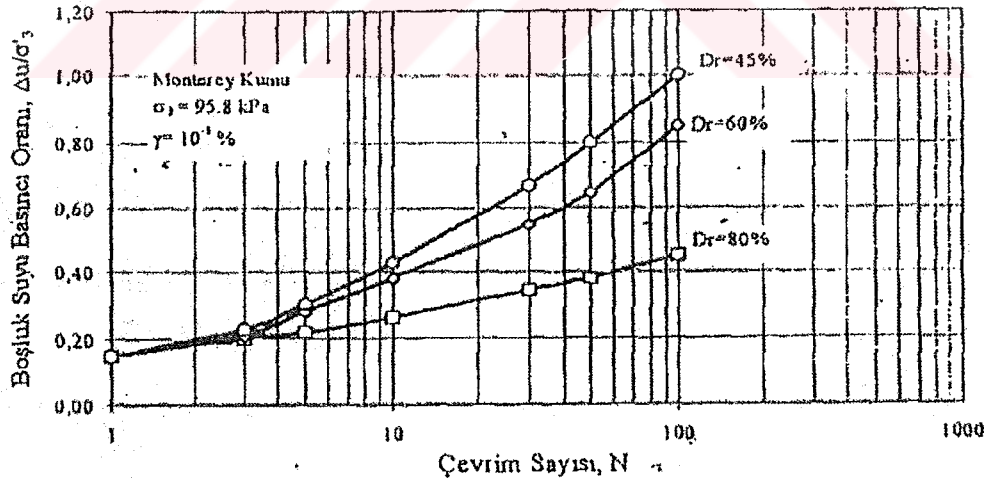
Maksimum Yer İvmesi	Sıvılaşma Potansiyeli	Sıvılaşma zemin tipine ve deprem büyüklüğüne	Sıvılaşma Potansiyeli
0-10 g	$D_r < \%33$	$\%33 < D_r < \%54$	$D_r > \%54$
0.15 g	$D_r < \%48$	$\%48 < D_r < \%73$	$D_r > \%73$
0.20 g	$D_r < \%60$	$\%60 < D_r < \%85$	$D_r > \%85$
0.25 g	$D_r < \%70$	$\%70 < D_r < \%92$	$D_r > \%92$

Gevşek kumlar titreşimle sıkışır. Depremler sırasında bu sıkışma yapıları zarar veren oturmalara yol açar. Dolayısıyla kumlu bir zeminde sıkılaşmaya karşı hassaslığın derecesi değerlendirilmelidir. Bu değerlendirmeyi tam bir doğrulukla yapmak mümkün olmasa da relatif sıklığı $\%60$ 'ın altında olan veya SPT değeri 15'den küçük olan kumlarda oturma riski yüksektir. (Köleoğlu, 2002)

Relatif sıkılığın etkisini incelemek için Seed ve arkadaşları tarafından basit kesme deney sisteminde aynı konsolidasyon basıncında farklı relatif sıkılıklarda hazırlanmış deneysel numuneler kullanılmıştır. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi sıkılık değerinin artmasıyla ön sıvılaşmaya ulaşmak için gereken tekrar sayısı ve uygulanan kayma gerilmesinin artırılması gerekmektedir.



Şekil 2.8. Başlangıç Relatif Sıkılığın Sıvılaşmaya Etkisi (Seed, 1978)

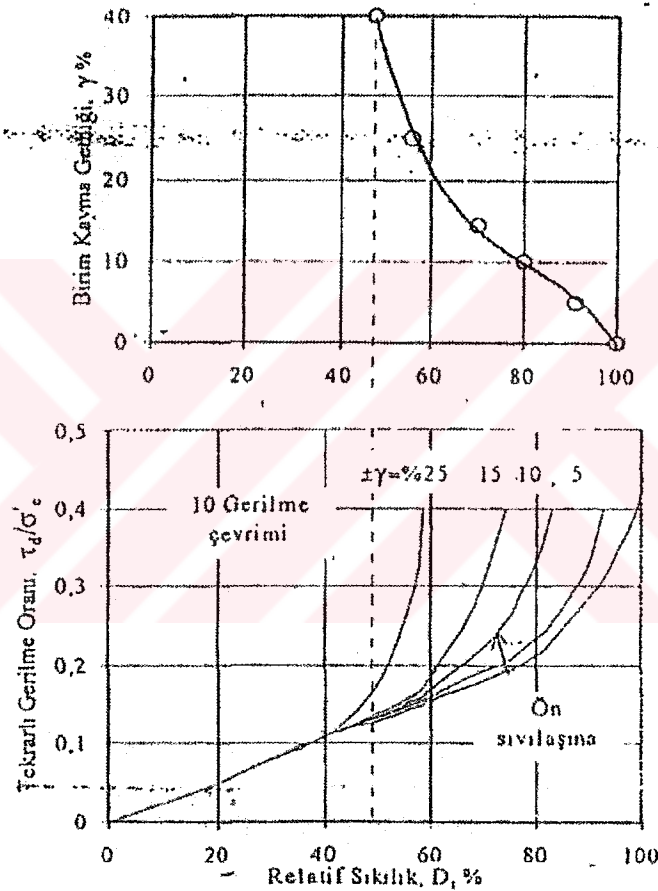


Şekil 2.9. Relatif Sıkılığın Oluşacak Boşluk Suyu Basınçlarına Etkisi (Ladd, 1989)

K.Ishihara, sıvılaşma olasılığının relatif sıkılıkla birlikte o kumun maksimum hacim değiştirme potansiyeli (V_d) ile de ifade olunması gerektiğini, V_d değeri büyük olan kumlarda sıvılaşmanın daha olası olduğunu belirtmiştir.

Ladd ve diğ. (1989), relatif sıklığın boşluk suyu basıncı üzerindeki etkilerini incelemiş ve Şekil 2.9'de araştırmanın sonuçları gösterilmiştir.

Ön sıvılaşmadan sonra meydana gelebilecek şekil değiştirmelerin Şekil 2.10'da gösterildiği gibi sıklığa bağlı olduğu gözlenmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi relatif sıklığın %47'den küçük olması durumunda sıvılaşmanın olduğu, şekil değiştirme oranının çok büyük değere ulaştığı, buna karşılık sıklığın %47'den büyük olması durumunda uygulanacak kayma gerilmesinden elde edilebilecek şekil değiştirme oranlarının sınırlı kaldığı, relatif sıklığa bağlı olduğu görülmektedir.



Şekil 2.10. Relatif Sıklığın Sıvılaşmaya ve Birim Kaymalara Etkisi (Seed, 1978)

Wang ve Law (1994), sıvılaşma oluşabilecek zeminin relatif sıklığının %75'ten küçük olması gerektiğini belirtmişlerdir.

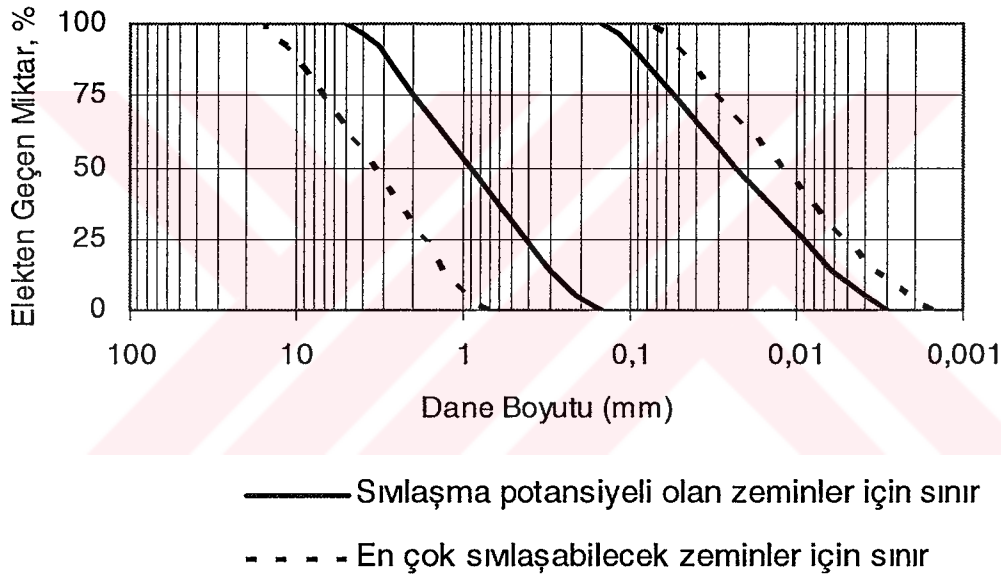
2.5.1.2. İnce Dane Oranı ve Plastisite

Sıvılaşma ve sıvılaşmaya etki eden faktörlerin araştırılmasında genel yaklaşım laboratuvarında değişik yöntemlerle hazırlanan üniform temiz kum numunelerin

davranış biçimlerini incelemek ve doğal zemin tabakalarının sıvılaşabilirliklerini bu çalışmalara dayanarak belirlemektir. Fakat geçmişteki birçok depremde suya doygun ince dane içeren kumlu zemin tabakalarında sıvılaşma olaylarının gözlenmesi üzerine, arazideki davranış biçimini belirleyebilmek için, doğal zemin tabakaları üzerinde gerek laboratuvar gerek arazi deneyleri ile yapılan araştırmalar büyük bir ağırlık kazanmaya başlamıştır. Yoğunlaşma ise ince dane boyutları ve ince danelerin endeks özellikleri üzerinde olmuştur.

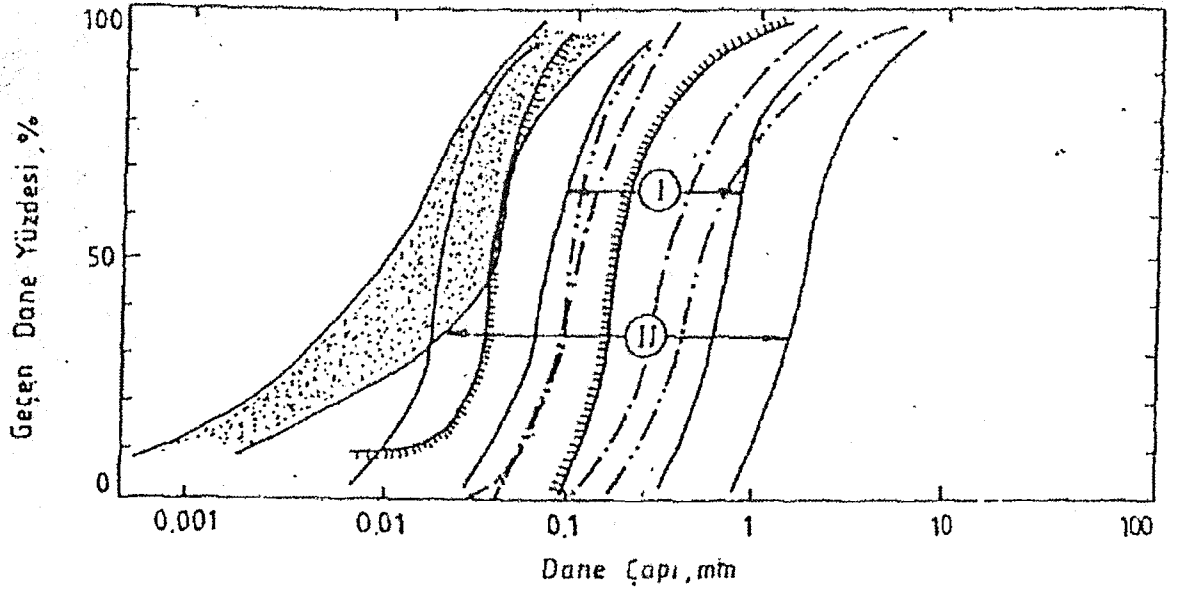
Sıvılaşan ve sıvılaşma olasılığı olan zeminler için sınır eğrileri Japon Liman ve Barınak Birliği (1989)'e göre üniformalık katsayısı 3,5 ve daha büyük olan zeminler için Şekil 2.11'de verilmiştir. Adapazarı'nda incelenen hemen hemen bütün deney sonuçlarında bu katsayıya uyum sağlandığından bu sınırlar sıkça kullanılmıştır.

Dane Boyutu Dağılımına Göre Sıvılaşma Potansiyeli



Şekil 2.11 Dane boyutu dağılımına göre sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi (Japon Liman ve Barınak Birliği, 1989).

Sıvılaşma üzerinde dane çapı dağılımının etkisini incelemek amacıyla geçmişte oluşan depremlerde gözlenen, sıvılaşan zeminlerin dane çapı eğrileri Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi ince dane içeren kumların sıvılaşma olasılıkları ince dane içermeyen kumlara oranla daha fazladır.



{(I)}

En çok sıvılaşabilecek zeminler için sınır (Tsuchida, 1970)

{(II)}

Sıvılaşma potansiyeli olan zeminler için sınır (Tsuchida, 1970)

{(III)}

İnce boyutlu madensel atıklar (Ishihara, 1985)

{(IV)}

Sıvılaşmış kum (Gifu - Toho - Oki Depremi 1987)

{(V)}

Sıvılaşmış kum (Niigata Depremi 1964)

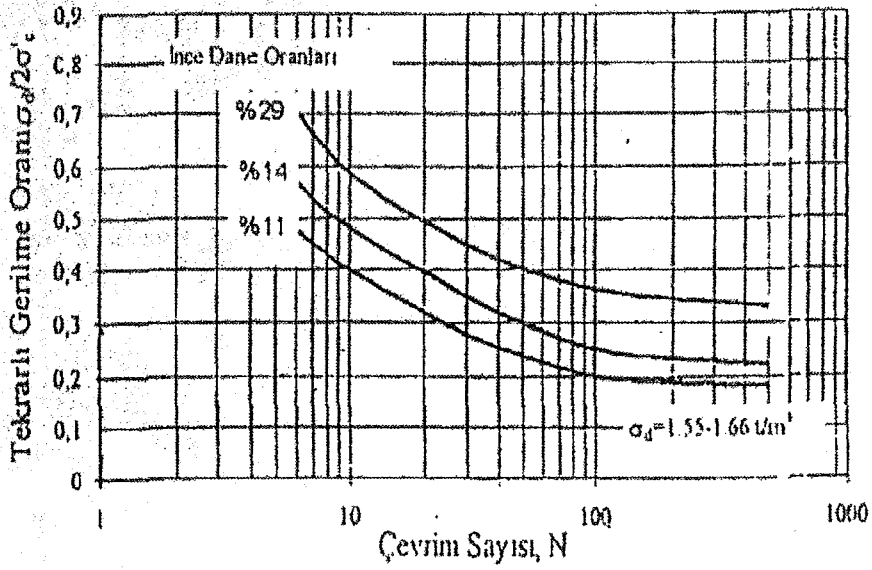
{(VI)}

Sıvılaşmış kum (Nihonkai - Chubu Depremi, 1983)

Şekil 2.12 Sıvılaşma gözlenmiş zeminlerin dane çapı dağılım eğrileri (Ishihara, 1985)

Sıvılaşma üzerinde ince dane oranının etkisinin belirlenmesi amacıyla birçok araştırmacı tarafından kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Shen ve arkadaşları 1981 'de üç eksenli basınç deney aletinde Ottawa kumu üzerinde düşük plastisiteli danelerin etkisini incelemişler, plastik olmayan ince dane oranı arttıkça sıvılaşma mukavemetinde azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir

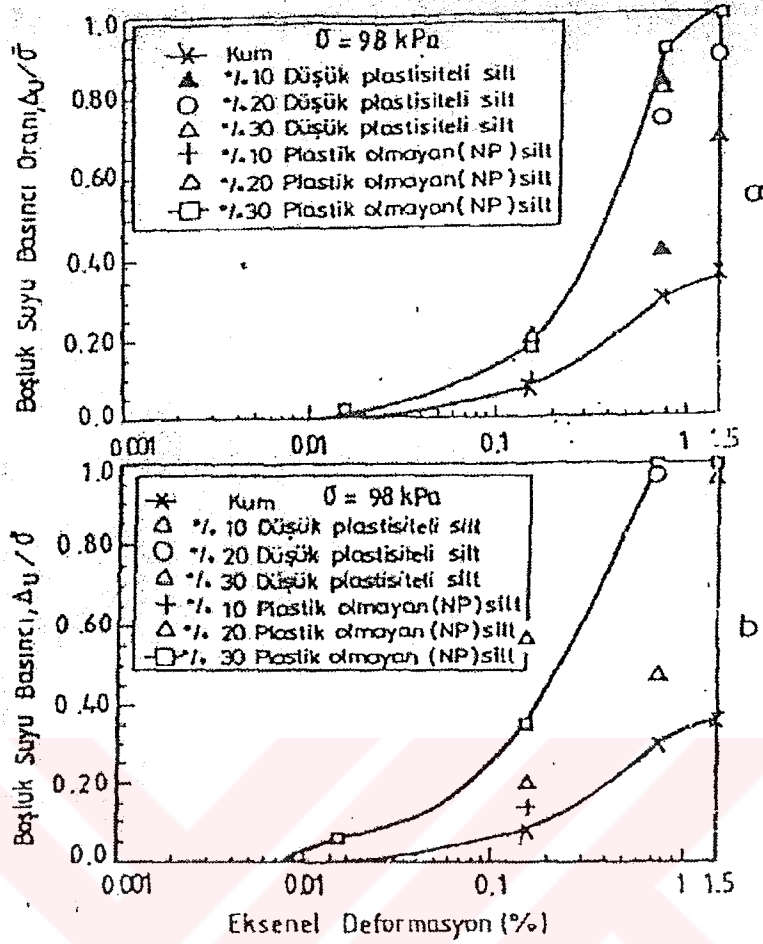
Aynı amaçla Erken ve Ansal (1994) tarafından dinamik üç eksenli basınç deney sisteminde örselenmemiş düşük plastisiteli siltli kum numunelerin davranış biçimleri incelenmiştir, Kumlu zeminin içerdiği silt oranının dinamik mukavemeti olumsuz olarak etkilediği, sili oranı arttıkça mukavemette azalmanın olduğu görülmüştür.



Şekil 2.13 Plastik ince danelerin sıvılaşmaya etkisi (Erken ve Ansal, 1994)

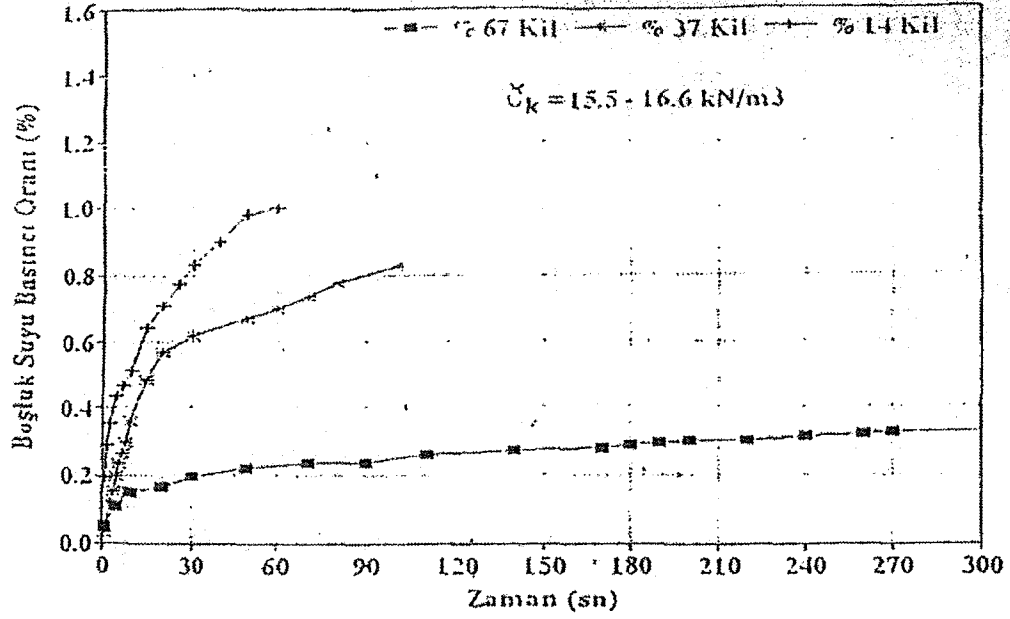
Şekil 2.13'de yine Erken ve Ansal (1994) tarafından dinamik basit kesme deney sisteminde değişik oranlarda plastik ince dane içeren zeminlerin sıvılaşma deney sonuçları verilmektedir. Plastik ince dane oranının artmasıyla sıvılaşmaya karşı direncin arttığı şekilden anlaşılmaktadır.

Erten ve Moher (1995) tarafından tekrarlı üç eksenli deney sisteminde plastik olmayan ve düşük plastisiteli silt içeren sıkı şartlar altındaki kumların dinamik davranışları incelenmiş ve sonuçlar Şekil 2.14'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi aynı gerilme seviyelerinde ve aynı çevrimi sayılarında hem plastik olmayan hem de düşük plastisiteli silt oranlarının artmasıyla, boşluk suyu basınçlarında ve birim şekil değiştirmelerde büyük artışlar meydana gelmektedir. Büyük şekil değiştirmeler de zeminin dinamik mukavemetinin kaybolarak sıvılaşma olasılığının artmasına yol açar.



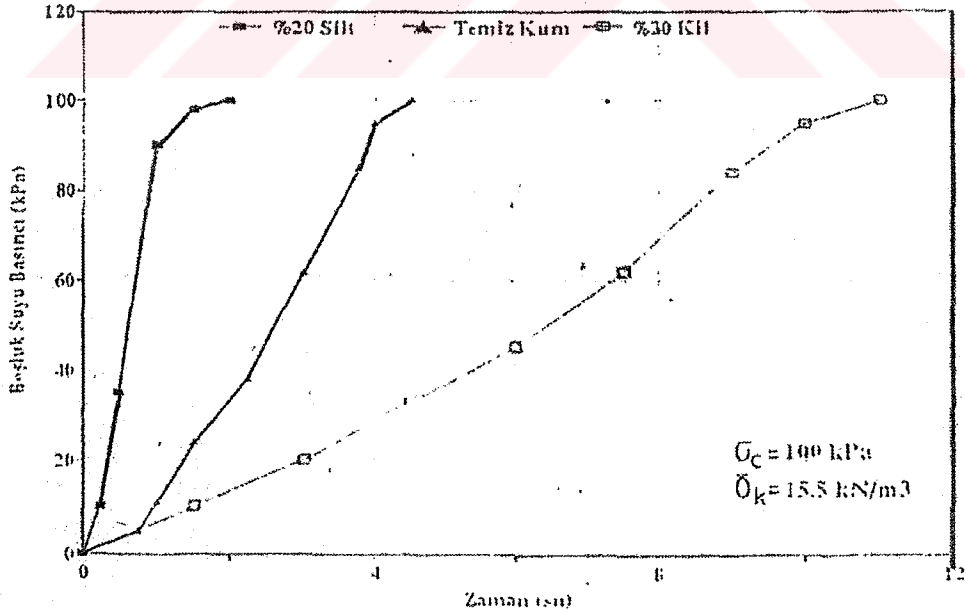
Şekil 2.14 Düşük plastisiteli siltli kumlarda a)N=10 ve b)N=30 çevrimlerinde boşluk suyu basıncı oranı ile eksenel deformasyonların değişimi (Erten ve Moher, 1995)

Şekil 2.15'de örselenmemiş, değişik oranlarda düşük plastisiteli kil içeren kumlu zeminlerin $\tau_d / \sigma_c = \pm 0.311 - 0.292$ gerilme seviyesi altındaki davranış biçimlen görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi plastik ince dane oranı arttıkça sıvılaşılabirlik azalmaktadır. % 14 kil içeren kumlu zemin numunesi, boşluk suyu basıncının başlangıç efektif gerilmesine (konsolidasyon basıncına) $N_c=60$ çevrimde eşit olması sonucu sıvılaşmıştır. Burada N_c , "Ön Sıvılaşma Çevrim Sayısı" olarak tanımlanmaktadır. % 37 ince dane içeren numunede, boşluk suyu basıncı, yükün 100. tekrarında konsolidasyon basıncının ancak % 80' ine ulaşmaktadır. Killi (% 67) olan numunede ise ilk 10 çevrimde boşluk suyu basınçları hızlı artmakta, bu çevrimden sonra artış bizi azalarak sabitleşmeye başlamaktadır. Boşluk suyu basınçlarının 270. çevrimde konsolidasyon basıncının ancak % 30' una gelerek sabitleşmesi sonucu bu numune sıvılaşmamıştır.



Şekil 2.15. Örselememiş kumlu zeminlerde ince dane oranının sıvılaşmaya etkisi (Ansal ve diğ., 1994).

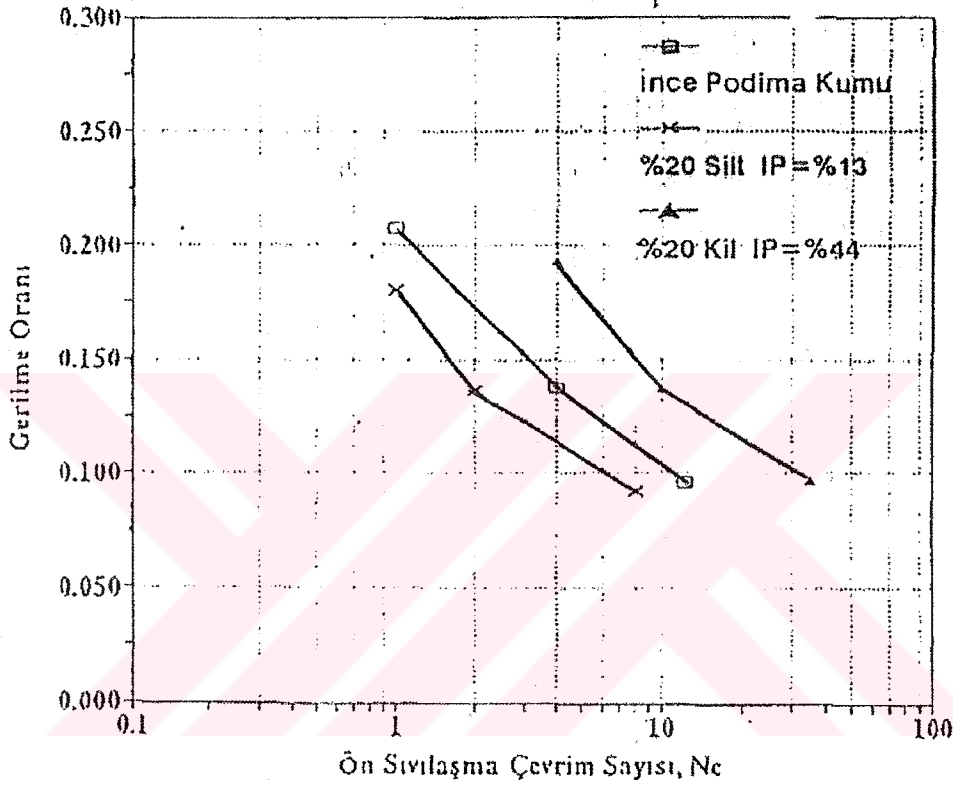
Şekil 2.16'da plastisitenin etkisini incelemek için suda yağmurlama yöntemi ile hazırlanmış yaklaşık % 20 yüksek plastisiteli kil, düşük plastisiteli silt içeren kum zemin numunelerinin, $\tau_d/\sigma_c = \pm 0.137$ gerilme seviyesindeki dinamik davranış biçimleri temiz kumun davranış biçimi ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.16 Plastisitenin sıvılaşmaya etkisi (Ansal ve diğ., 1994).

Şekilde görüldüğü gibi siltli kumda yükün 2. tekrarında boşluk suyu basıncındaki artış başlangıç efektif çevre gerilmesine eşit olmuş ve kum zemin numunesi

sıvılaştırmıştır. Bu numune için sıvılaştırmanın başladığı çevrim sayısı $N_e = 2$ dir. Şekilden de görüldüğü gibi siltli kum (SM) numune $N_c = 2$ de sıvılaştırırken temiz kum (SP) $N_c=5$, yüksek plastisiteli killi kum (SC) ise $N_c=11$ de sıvı l aşmaktadır. Siltli kumun sıvılaştırılabilirliği temiz kuma göre daha yüksek olurken, killi kumun sıvılaştırılabilirliği daha düşük olmaktadır (Erken ve diğ., 1994). Bu, Şekil 2.17'de daha açık olarak görülmektedir. Hangi gerilme seviyesi uygulanırsa uygulansın killi kumların dinamik mukavemeti siltli ve temiz kumlara göre daha yüksektir.

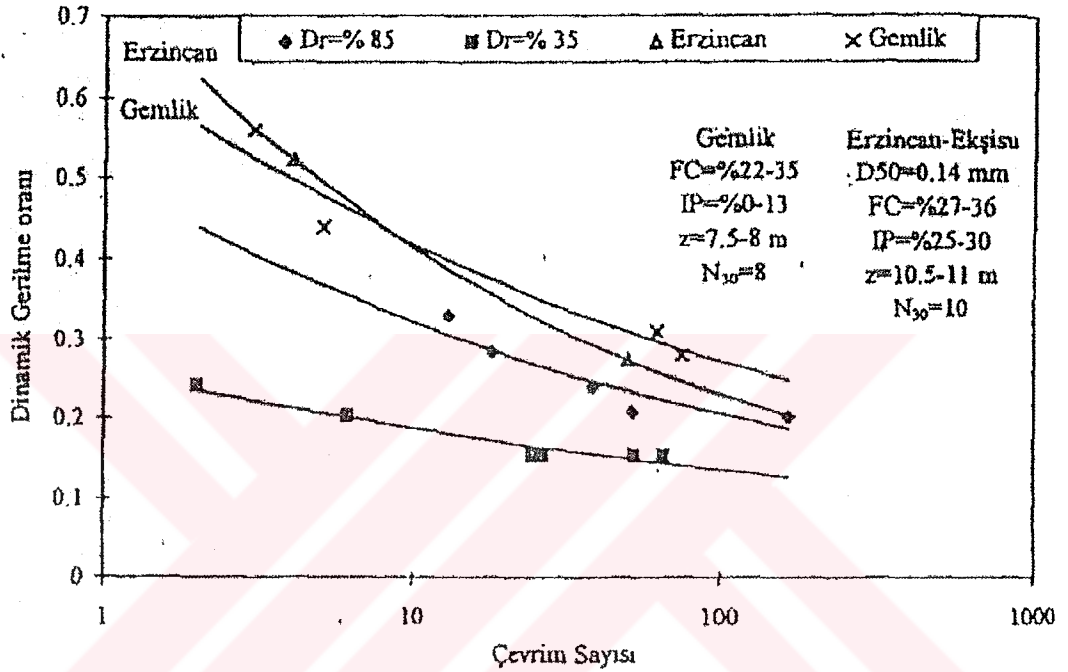


Şekil 2.17 Plastisitenin sıvılaştırmaya etkisi

Laboratuarda yapılan üç eksenli dinamik deneylerde ince dane oranının etkisi Ishihara ve Koscki (1989) tarafından incelenmiştir. Dinamik mukavemet üzerinde plastisitenin etkisi Erken ve diğ. (1994), Kuerbis ve diğerleri (1989) tarafından incelenmiştir. Plastik ince danelerin dinamik mukavemeti arttırdığı plastik olmayan ince danelerin ise dinamik mukavemeti azalttığı belirtilmiştir.

Erzincan- Ekşisu bölgesinden alınan ince dane içeren örselenmemiş kumlu zemin numunelerinin dinamik mukavemeti laboratuarda hazırlanan sıkı kum zemin numunelerinin dinamik mukavemetinden daha büyüktür. Bu sonuç zemin yapısı ve plastik ince danenin dinamik mukavemet üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermektedir. Şekil 2.18'de Gemlik bölgesinden alınan ve % 22-35 ince dane içeren örselenmemiş zemin numunelerinin dinamik davranışı gösterilmiştir. Elde

edilen sonuçlara göre Erzincan-Ekşisu bölgesinden alınan ince dane oranı % 27-36 arasında değişen plastisite indeksi $I_p = \% 25-30$ arasında olan zeminlerin dinamik mukavemetinin de Gemlik bölgesinden elde edilen mukavemete yakın olduğu Şekil 2.16'den görülmektedir. Kumlu zeminlerin dinamik mukavemetini etkileyen en önemli parametrelerden birinde ince dane oranı olduğu bu sonuçlardan anlaşılmaktadır. Plastisite indeksi daha yüksek olan zeminlerde daha yüksek dinamik mukavemet görülmektedir.

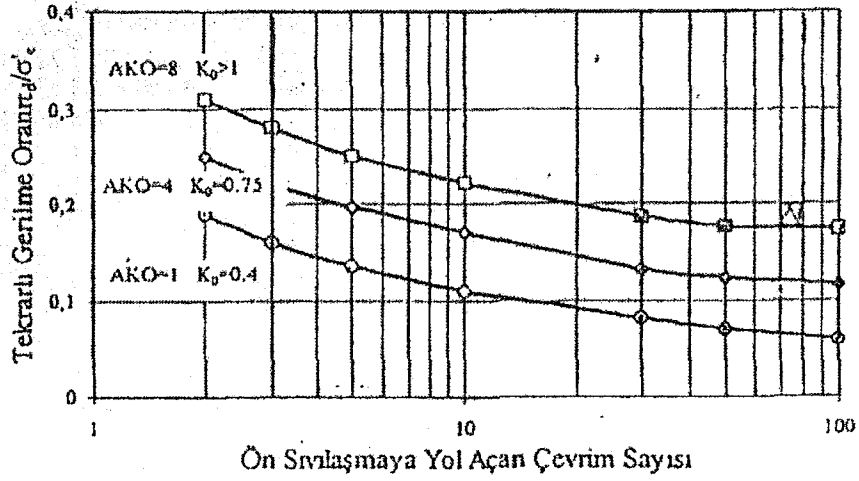


Şekil 2.18 Tekrarlı Gerilme Oranı Çevrim Sayısı İlişkisi (Ansal ve diğ., 1998)

Plastik ince dane oranının artması ile dinamik mukavemet artmaktadır. Plastisitesi geniş bir aralıkta değişen numunelerin dinamik mukavemeti sıkı kumlarda elde edilen dinamik mukavemetten daha büyük elde edilmiştir.

2.5.1.3. Yatay Toprak Basıncı ve Aşın Konsolidasyon Oranı

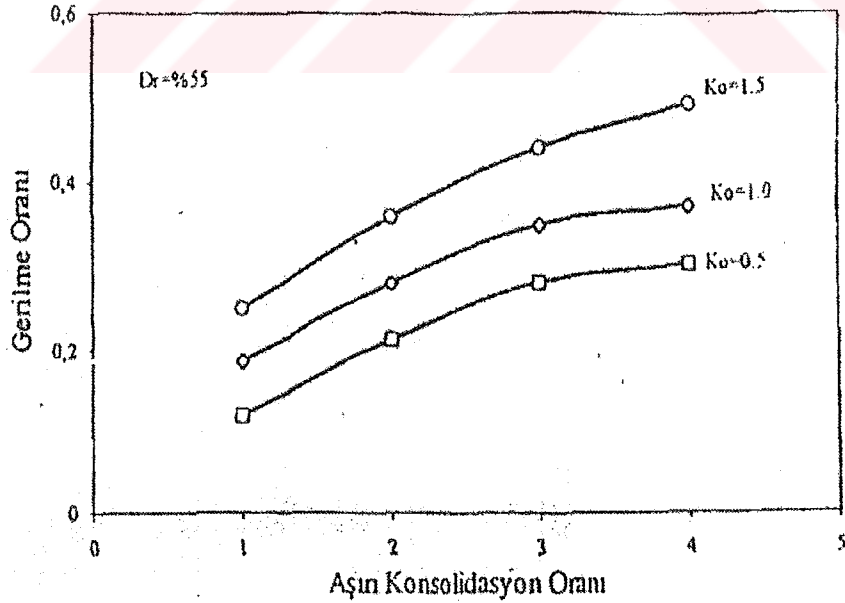
Sıvılaşmaya etki eden faktörlerden bir diğeri yatay toprak basıncıdır. Şekil 2.19'da görüldüğü gibi yatay toprak basıncı katsayısı K_0 'ın artmasıyla ön sıvılaşmaya yol açacak gerilme oranlarında büyük artışların olacağı bulunmuştur.



Şekil 2.19 Yatay toprak basıncı katsayısının sıvılaşmaya etkisi (Seed, 1978)

Ishihara ve Takatsu (1979) tarafından aynı tip kum numunelerini kullanarak burulmalı kesme deneylerinde aşın yüklenmişliğin etkisi incelenmiş ve deney sonuçları Şekil 2.20'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi aşın konsolidasyon oranı (A.K.O.)'nın artmasıyla sıvılaşmaya karşı direnç artmaktadır.

Suya doymun kohezyonsuz zeminlerde yapılan araştırmalarda, uygulanan konsolidasyon basınçları arttıkça, numunelerin dinamik mukavemetleri azalarak sıvılaşabilirliğin artmakta olduğu gözlenmiştir (Castro ve Paulos, 1976).



Şekil 2.20 Aşırı konsolidasyon oranının sıvılaşmaya etkisi.

2.5.1.4. Sıvılaştırılabilir Zeminin Derinliği

Efektif dūşey gerilme sıvılaştırma oluşumunu kontrol ettiği için yüksek basınç altında veya küçük kayma gerilmesi dūşey efektif gerilme oram dolayısıyla sıvılaştırma olmayacak bir maksimum derinlik vardır, Sıvılaştırma olayının gözlemlendiği birçok bölgede yerin 20 m altından daha derinde sıvılaştırma olmadığı anlaşılmıştır

2.5.1.5. Yeraltı Su Seviyesinin Derinliği

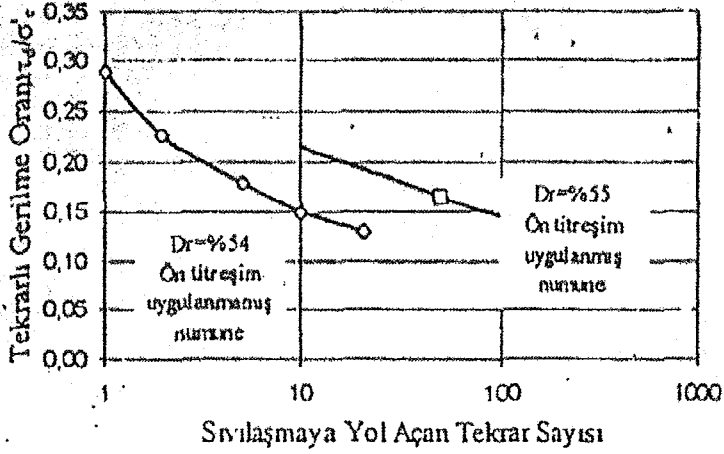
Sıvılaştırma vakasının gözlemlendiği bölgelerin çoğunda yeraltı suyu seviyesi 3m'den daha derin değildir. Sadece birkaç tekil olayda yeraltı suyu seviyesi 3-4 m arasındadır. Yeraltı suyu 5m'nin altında olduğu kesimlerde sıvılaştırma olayı gözlemlenmemiştir (Wang ve Law,1994).

2.5.2. Deprem Hareketleri ve Etkileri

2.5.2.1. Sismik Geçmişin Etkisi

Bir kum elemanın sıvılaştırılabilirliğinin, o kum elemanın daha önce tekrarlı yükler etkisi altında kalmış olmasından etkilendiği birçok araştırmacı tarafından gözlemlenmiştir (Finn, Bransby ve Pickering, 1970; Bjerrum, 1973; Lee ve Focht, 1975). Bu etkinin ne yönde olacağını ve önemini daha iyi kavramak için, aynı şekilde ve aynı sıklıkta hazırlanmış numunelerden bir kısmı çok ufak titreşimlere. tabi tutulmuştur.

Şekil 2.21'de görüldüğu gibi geçmişte deprem etkisi altında kalmış kum tabakalarının, yukarıda sözü edilen deneylerde numunelere uygulanmış olan titreşimlerden çok daha kuvvetli titreşimlerin etkisi altında kaldıkları düşünülürse, bu tabakaların sıvılaştırmaya karşı dirençlerinin artmış olacağı düşünülebilir. Yalnız burada numuneye uygulanan titreşimlerin mertebesi de önemli olmaktadır. Eğer bu titreşimler küçük kalmış ve sıvılaştırmaya yol açmamış ise genel olarak mukavemette bir artış olurken, sıvılaştırma olması halinde mukavemette bir azalmaya yol açmaktadırlar. Bu tip davranışa neden olarak ise uygulanan titreşimler sonucu meydana gelen değişiklikler gösterilebilir.



Şekil 2.21 Sismik geçmişin sıvılaşmaya etkisi {Seed, 1978}

Daneli bir yapıya sahip olan kumlarda, küçük titreşimler danelerin ve dane yüzeylerindeki pürüzlülüklerin birbirine göre daha iyi yerleşmesine ve bundan dolayı kayma mukavemetini belirleyen iki bileşenden biri olan danelerin kilitlenmesinin artmasına neden olduğundan sıvılaşmaya karşı dirençte bir artış görülür. Buna karşılık büyük genlikli titreşimlerin etkisi altında kalmış zeminlerin davranış biçimi farklı olur. Önceden sıvılaşmış numunelerde ilk duruma göre oluşmuş dane kilitlenmeleri, oluşan çevre basıncına eşit boşluk suyu basıncının daneleri kısa bir süre için de olsa birbirlerinden ayırması sonucunda yok olur ve yeniden sıvılaşmaya karşı direnci azalır.

Sıvılaşmaya karşı en büyük direnci gösteren numuneler, yüksek frekanslı titreşim uygulanmış numunelerdir. En zayıf numunelerse havada ve suda yağmurlama ile hazırlanmış olanlardır. Burada sıvılaşmadan sonra numunenin suda yağmurlama yolu ile hazırlanmış numunelere benzer bir yol izlediği düşünülebilir. Benzer şekilde uzun süre jeolojik yük altında zemin tabakalarında, daneler arasında meydana gelen kaynama ve çimentolaşma sıvılaşma potansiyelini düşürebilir. Seed, 1978 yılında yapmış olduğu deneylerde böyle bir durumda sıvılaşmaya karşı dayanımın %75 oranında arttığını göstermiştir.

2.5.2.2. Kumların Fiziksel Özelliklerinin Etkisi

Kumların en önemli fiziksel özellikleri dane boyutu, dane şekli ve derecelenme olarak düşünülebilir. Bütün araştırmalar ve geçmişteki tüm depremler, sıvılaşan zeminlerin dane boyutlarının belirli sınırlar içinde kalmayıp geniş bir aralıkta değişebileceğini göstermektedir. Buna göre düşük relatif sıkılıklarda, kötü derecelenmiş kumlar iyi derecelenmiş kumlara göre daha düşük dinamik

mukavemete sahiptir. Yüksek relatif sıklıklarda ise tanı tersi bir davranış görülmüştür.

Kumların dane şekilleri de sıvılaşma özelliklerini etkilemektedir. Yuvarlak şekilli daneler, köşeli danelere göre daha çabuk bir araya gelme eğilimi gösterdikleri için sıvılaşmaya daha yatkındır. Daneleri köşeli olan zeminlerin belirli bir konsolidasyon basıncına kadar sıvılaşmaya karşı daha dirençli olduğu fakat büyük basınçlarda köşelerin kırılıp ince dane oluşturmaları nedeniyle sıvılaşmayı kolaylaştırıcı yönde etki yaptıkları gözlenmiştir.

Wang ve Law (1994), sıvılaşabilir zeminlerin karakteristiklerini şu şekilde özetlemiştir;

Ortalama dane boyutu $d_{50} = 0.02-1.00$ mm.

İnce dane ($d < 0.005$ mm) içeriği %10'dan az.

Üniformluk katsayısı (d_{60}/d_{10}) < 10

Plastisite indisi $I_p < 10$

2.5.2.3.Sıvılaşma Yaratan Kritik Deprem Şiddeti

Eldeki kayıtlara göre büyüklüğü 5'in altında şiddeti VT'nın altında, orta ve sığ derinlikteki bir deprem sonucu sıvılaşma olayı gözlenmemiştir (Wang ve Law,1994).

2.5.2.4.Odak Uzaklığı

Bu sismik olayda, sıvılaşmayı tetikleyen deprem etkilerinin hissedilmediği maksimum odak uzaklığı (Δ_{max}) vardır. Araştırmalar sonucu bu Δ_{max} değeri km olarak aşağıdaki bağıntıyla elde edilebilir (Wang ve Law,1994):

$$\Delta_{max} = 0.82 * 10^{0.862(M-5)} \quad (2.2)$$

Kuribayashi ve Tatsusuoka (1991) ile Erken ve diğ. (1993) göre deprem büyüklüğüne bağlı olarak sıvılaşmanın olabileceği uzaklık D km olmak üzere,

$$\log D = 0.77 * M - 3.6 \quad (2.3)$$

ifadesinden hesaplanabilir.

2.6. Sıvılaşma Potansiyeli Değerlendirmeleri

Önceki bölümde verilen ölçütlerden sadece sıvılaşmaya karşı duyarlı olabilecek ortamların ve zeminlerin ayırtlanması için ön değerlendirme amacıyla yararlanılır. Dolayısıyla, bu ölçütler esas alınarak yapılacak ön değerlendirmelerin sonuçlarına göre, zeminlerin sıvılaşp sıvılaşmayacağına kesin olarak karar verilmesi doğru bir

yaklaşım değildir. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi, çok sayıda zemin ve deprem parametresinin dikkate alındığı ayrıntılı analiz yöntemleriyle yapılmaktadır.

2.6.1. Laboratuvar Deneyleri

Depremeler sırasında meydana gelebilecek yapısal hasar üzerinde yerel zemin koşullarının önemli etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışları ile deprem sonrası statik mukavemetlerinin belirlenmesi önem kazanmaktadır. Zeminlerin deprem sırasında ve deprem sonrasındaki gerilme - şekil değiştirme davranışlarını laboratuvarında çeşitli deney sistemleriyle belirlemek mümkün olmaktadır. Özellikle suya doygun kumlu zeminlerin tekrarlı yükler altındaki sıvılaşma potansiyelleri ve sıvılaşma sonrası davranışları laboratuvarında dinamik basit kesme (Peacock ve Seed, 1968; Finn ve diğ.,1970; Seed ve Peacock, 1971), dinamik üç eksenli (Seed ve Lee, 1966; Lee ve Seed, 1967), dinamik burulmalı deney (Yoshimi ve Ohoka,1973; Ishibashi ve Sherif, 1974), sarsma tablası (Prakash ve Mathur, 1965) gibi dinamik deney sistemleriyle incelenebilmektedir (Das, 1993).

2.6.1.1. Dinamik Üç Eksenli Basınç Deneyi

Sıvılaşma kavramını çalışmak için Seed, 1966 yılında dinamik üç eksenli basınç deneylerinin yapılmasını önermiştir. Üç eksenli deney hücresi, bir zemin numunesinde deprem öncesi arazi şartlarında meydana gelen konsolidasyona izin verir. Dinamik kaymayı oluşturmak için tekrarlı deviatorik gerilme uygulanır. Çalışmalar sonucu düşeyle 45°lik açı yapan bir düzlem boyunca gerilme durumunun gerçeğe yakın olduğu görülmüştür (Seed ve diğ., 1966).

Sıvılaşma, boşluk suyu basıncının konsolidasyon basıncına eşit olduğu veya dinamik eksenel boy değiştirmenin %15 değerini aştığında oluşur. Uygulanan tekrarlı kayma gerilmeleri sıvılaşma dayanımı τ_1 olarak alınır ve sıvılaşmaya yol açan tekrarlı kayma sayısına (N_{eq}) karşılık gelir (Wang and Law,1994).

2.6.1.2. Dinamik Basit Kesme Deneyi

Bu deneyle beş parametre elde edilebilir: Bunlar dinamik kayma gerilmesi, toplam düşey gerilme, dinamik birim kayma boşluk suyu basıncı ve karşılık gelen tekrar sayısıdır.

Kıyaslama yapmak gerekirse dinamik basit kayma deneyi, dinamik üç eksenli deneye göre tabii haldeki sıvılaşma olayını daha gerçekçi olarak açıklar. Fakat bu deneyde zemin numunesine uygulanan kayma gerilmesi üniform olarak dağılmamaktadır.

Daneli zeminlerdeki sıvılaşma olayı incelemelerinde kullanılan deney sistemlerinde bazı olumsuz noktalar bulunmaktadır:

i- Küçük ölçekli basit kesme deneyindeki gerilme yığılması sonuçlarda bazı hatalara yol açmaktadır (Castro, 1969).

ii- Üç eksenli deney numunelerinin taban ve başlıklarındaki gerilme yığılması ve boyun oluşması olasılığı uzama ve su muhtevası dağılımında düzensizliğe yol açmaktadır (Castro, 1975).

iii- Sarsma tablası deneyleri ile yapılan sıvılaşma çalışmalarında ise sonuçlar, kutunun kenarlarının sınırlayıcı etkisiyle kesin olmamaktadır.

Bu nedenlerden dolayı DeAlba, Seed ve Chan (1976), tek yönlü tekrarlı gerilme uygulanan geniş ölçekli basit kesme deneyini kullanmışlardır. Deneylerde kullanılan kum numuneler 2300 mm * 1100 mm * 100 mm boyutlarında olup, bir sarsma tablasının üzerine yerleştirilmektedir. Drenajı önlemek için kumun üzerine kauçuk bir membran ve eylemsizlik için bir kütle konulmaktadır. Sarsma tablasının hareketiyle kumda tekrarlı gerilme durumu oluşmaktadır. Tekrarlı kayma gerilmesi aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\tau_h = W/g \cdot a_m \quad (2.4)$$

Burada,

W : Numuneden ve eylemsizlik kütesinden dolayı tabana etkiyen toplam basınç

a_m : Üiform tekrarlı hareket için pik ivme

g : Yerçekimi ivmesidir.

Yapılan bu deney sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır (Das, 1993):

i) Başlangıç relatif sıkılık < %45 için ön sıvılaşma oluşturacak yükseklikteki tekrarlı gerilme oranı aşırı birim kaymalara yol açar. Bu durum sıvılaşmaya karşılık gelir.

ii) Başlangıç relatif sıkılık > %45 için ön sıvılaşma oluşturacak yükseldikteki tekrarlı gerilme oranı sınırlı birim kayma uzamasına yol açar. Buna zeminin sınırlı uzama potansiyeli veya çevrimsel hareketlilik durumu denir.

iii) Zeminin başlangıç relatif sıkılığının artması ile birim kaymalar azalır.

2.6.1.3. Burulmalı Dinamik Deney Sistemi

Dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deney sistemlerindeki birçok zorluk burulmalı dinamik deney sistemiyle ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Bu deney sistemiyle numuneye ilave yanal gerilme yükleri uygulanabilmekte, izotropik veya anizotropik şartlarda yükleme yapılabilmekte ve yine numuneye yatay düzlemde

burulmalı bir şekilde tekrarlı kayma gerilmeleri uygulanabilmektedir, Büyük ölçekli deformasyon şartlarında zemin özelliklerini incelerken bu deney sistemi kullanılabilir.

Ishihara ve Li tarafından 1972'de geliştirilen deney sisteminde içi dolu zemin numuneleri kullanılmaktaydı, Fakat bu sistemlerde kullanılan içi dolu zemin numunelerinde açısal üniformluk sağlanamadığından, bu etkiyi azaltmak maksadıyla araştırmacılar deneylerde içi boş silindirik numuneler kullanmayı tercih etmişlerdir (Yasuda, 1998).

Zeminlerin sıvılaşmaya veya tekrarlı yumuşamaya karşı direnci bazı ampirik formüller kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Zeminlerin sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı F_1 ; Yasuda (1998) tarafından aşağıda verilen ifade ile bulunabilmektedir.

$$F_1 = \tau_1 / \tau_p \quad (2.5)$$

Burada τ_1 , 20 tekrarda kumun sıvılaşmasına neden olan gerilme seviyesidir. τ_p ise uygulanan gerilme seviyesidir. F_1 değerinin 1 den küçük olması durumunda sıvılaşma ihtimalinden söz etmek mümkündür.

Burulmalı dinamik deney sistemiyle zeminlerin deformasyon özelliklerinin temel kavramları araştırılırken drenaj ve gerilmelerin kontrolü ve üniformluğu üst düzeyde olmasına karşın numune hazırlama güçlüğü gibi sebeplerden dolayı bu sistem pratik amaçlar için çok uygun olmamaktadır (Yasuda, 1998).

2.6.2. Arazi Deneyleri

Arazi deneylerinin avantajı zemini tabii durumda test etmemizi sağlamasıdır. Daha büyük bir hacimde deney yapılarak ölçek etkisi dikkate alınabilmektedir. Yüzeyden itibaren istenilen derinliğe ulaşılabilir ve sürekli tanımlama yapılabilir.

Fakat arazide sismik aktivite'yi göstermek zor olduğu için sıvılaşma potansiyelini ölçmek için yapılan deneylerde, sıvılaşma dayanımıyla doğrudan ilgili zemin parametrelerine ulaşılamaz. Değerlendirme kriterlerine ulaşmak için sıvılaşma meydana gelmiş geçmiş depremler incelenerek ampirik bağıntılar geliştirilmiştir (Wang ve Law, 1994).

Yüzeysel jeoloji ile yerel zemin koşulları arasında tekil bir ilişki olmamasından dolayı, inceleme konusu olan alanlarda beklenebilecek sismik davranışın gerçeğe daha yakın olarak analiz edilebilmesi için. geoteknik araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Arazi zemin koşulları hakkında ayrıntılı bilgiler elde etmek amacıyla yapılacak geoteknik araştırmalar, taban kayası derinliğine kadar gerçekleştirilmelidir.

Genellikle kayma dalgası hızı 700 m/s'den büyük olan formasyonlar "taban kayası" olarak kabul edilebilmektedir. Zemin profilinin sismik davranış açısından tanımlanabilmesi için kohezyonsuz zeminlerde ve katı zeminlerde Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), yumuşak zeminlerde ise Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) gibi arazi deneylen çok yararlı bilgiler vermektedir. SPT deneyi, sınıflandırma için numune alınması ve zeminin sıkılık derecesinin belirlenmesi için bilgiler vermesi yanında, darbe sayısı (N) ile kayma dalgası hızı (Vs) arasında kurulan korelasyonlar açısından da yararlı olmaktadır. CPT deneyinde de zeminin cinsi ve sıkılık derecesi zemin profili derinliği boyunca sürekli olarak belirlenebilmekte, CPT koni direnci ile SPT darbe sayısı arasındaki korelasyonlardan, kayma dalgası hızına geçilebilmektedir (Özaydın, 1996).

2.6.2.1. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)

Standart penetrasyon deneyi verileri deprem sonucu oluşan sıvılaşma direncinin ve potansiyelinin ölçülmesinde önemli bir role sahiptir (Seed H.B.,1985). Bu deney, sondaj tijlerine takılmış, ortasından ikiye ayrılabilen ve içinde pirinçten yapılmış bir iç tüpün bulunduğu örnekleyicinin, 63.5 kg ağırlığında bir şahmerdanın 760 mm yükseklikten tijlerin üzerine düşürülerek zemine sokulması ilkesine dayanır. Ortadan ayrılabilen tübün dış çapı 50 mm, iç çapı 35 mm ve uzunluğu 650 mm olup, tijlere monte edilir.

Kuyu, deneyin yapılacağı seviyeye kadar temizlenir ve deney seviyesinde örselenmiş bir kısmın kalmamasına özen gösterilir. Tüp, kuyu tabanına kadar indirilip zemine 45 cm çakılır. İlk 15 cm'lik darbe sayısı zeminin örselenmiş olması sebebiyle dikkate alınmaz, daha sonraki 30 cm çakma için toplam darbe sayısı (N) deney sonucu olarak kaydedilir. Eğer tüp, 30 cm'lik bir penetrasyona ulaşmadan Önce elde edilen darbe sayısı 50 ise daha fazla darbe uygulanmaz. Genel olarak deney her 1.5 m'de bir yapılır.

Deney Sonuçlarına İlişkin Düzeltmeler:

a) Yeraltısuyu düzeltmesi:

Deney, yeraltısuyu seviyesinin altında yapıldığında, suyun tübe girerek kumlu zemini gevşetmemesi için dikkatli olunmalıdır. Buna engel olunması amacıyla sondaj kuyusuna su ilave edilerek su seviyesi dengelenir. Yeraltısuyu tablası altında yer alan ince kum veya siltli kumlarda, eğer $N > 15$ ise N değerleri için aşağıdaki eşitlik kullanılarak su düzeltmesi yapılır.

$$N = 15 + 0.5(N - 15) \quad (2.6)$$

Bu düzeltmenin amacı, çakma işlemi sırasında kısa sürede uzaklaşması mümkün olmayan suyun, negatif bir boşluk suyu basıncı yaratmasından dolayı zeminin direncinde, yerindeki normal penetrasyon direncine oranla meydana gelen artışın giderilmesidir (Ulusay, 2001).

b) Tij enerji oram, ER:

Şahmerdanın tipi ve serbest bırakılış yöntemi, en üstteki tijin üzerinde yer alan ve darbenin uygulandığı metal bloğun tipi ve sondaj tijlerinin uzunluğu elde edilen N darbe sayısı değerlerinde farklılıklara neden olur. Bunun standart hale getirilebilmesi amacıyla enerji oranı (ER) kavramı geliştirilmiştir. Enerji oranı dikkate alınarak, N değerleri aşağıdaki ifade kullanılıp normalize edilir ve normalize edilmiş darbe sayıları (N₆₀) hesaplanır.

$$N_{60} = N * (ER/60) \quad (2.7)$$

Türkiye'de kullanılan Donut tipi şahmerdan için enerji oranı (ER) 45'dir (Ulusay, 2001).

c) Jeolojik gerilme düzeltmesi, C_N:

N darbe sayıları, zeminin rölatif yoğunluğunun yanı sıra, deney derinliğindeki efektif gerilime de bağlıdır. Efektif gerilim, efektif jeolojik gerilme ile temsil edilir. Aynı göreceli yoğunluğa sahip bir kum, farklı derinliklerde farklı N değerleri verir. Bu nedenle bir düzeltme yapılır. Düzeltme katsayısı C_N aşağıdaki ifadede yerine konularak düzeltilmiş darbe sayısı N₁ elde edilir.

$$N_1 = C_N * N \quad (2.8)$$

Diğer düzeltmelerle birlikte,

$$(N_1)_{60} = C_N * N_{60} \quad (2.9)$$

ifadesi kullanılır. Örtü gerilimi düzeltmesi, C_N, için çok sayıda eşitlik önerilmiş olmakla birlikte, en çok kullanılanlar aşağıda verilmiştir.

-Liao ve Whitman (1986) :

$$C_N = \sqrt{\frac{1}{\sigma'_v}} \quad (\sigma'_v : \text{kgf/cm}^2) \quad (2.10)$$

-Tokimatsu ve Yoshimi (1983) :

$$C_N = \frac{1.7}{0.7 + \sigma'_v} \quad (\sigma'_v : \text{kgf/cm}^2) \quad (2.11)$$

-Peck v.d. (1974):

$$C_N = 0.77 * \log(20 / \sigma_v') \quad (\sigma_v' : \text{ton/ft}^2) \quad (2.12)$$

-Seed ve diğ.(1971):

$$C_N = 0.85 * \log(145 / \sigma_v') \quad (\sigma_v' : \text{ton/m}^2) \quad (2.13)$$

SPT'nin kullanım alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Yapı temellerinin taşıma gücü (zemin emniyet gerilmesi) hesaplarında,
2. Kumlu zeminlerde inşa edilen temellerin oturma miktarlarının belirlenmesinde,
3. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesine yönelik analizlerde,
4. Zeminin relatif sıkılığının belirlenmesinde,
5. Zeminin içsel sürtünme açısının tahmininde,

Tablo 2.2. SPT- N değerleri ile relatif sıkılık ve nispi yoğunluk sınıflaması

N	Relatif Sıkılık	Yerleşim Sıklığı
<4	<0.15	Çok gevşek
5-10	0.15-0.30	Gevşek
11-30	0.35-0.65	Orta
31-50	0.65-0.85	Sıkı
>50	>0.85	Çok sıkı

Özellikle kohezyonsuz zeminler için darbe sayıları ile relatif sıkılık arasında değişik korelasyonlar verilmektedir. SPT deneyi ancak kohezyonsuz zeminlerde sıkılığı güvenli şekilde verebilir. Kohezyonsuz. zeminlerde darbe sayısı ile relatif sıkılık arasında Tablo 2.2 de gösterilen bağıntı vardır. Kohezyonlu zeminlerde ise darbe sayısı ile zeminlerin kıvamları ve serbest basınç dayanımları arasında Tablo 2.3 deki bağıntıdan yararlanılabilir.

Tablo 2.3 SPT - N değerleri ile kıvam ve serbest basınç dayanımları sınıflaması

N	Kıvam	Serbest Basınç Dayanımı (kg/cm ²)
0-2	Çok Yumuşak	0-0.25
3-4	Yumuşak	0.25-0.50
5-8	Orta	0.50-1.00
9-13	Katı	1.00-2.00
14-30	Çok katı	2.00-4.00

2.6.2.2. Koni Penetrasyon Deneyi (CPT)

Bu yöntemde sondalama 10 cm kesitli 60° açılı bir konik ucun, 2 cm/sn sabit hızla zemine penetre edilmesi ile yapılmaktadır. Bu deney kum ve sililerde en iyi sonucu verir. Ancak günümüzde çakıllar ve bloklı zeminler dışında her tür zeminde uygulanmaktadır. Konik sonda hidrolik olarak sürekli itilirken dışarıdan okunan uç direnci qc ile kumun taşıma gücünü ölçmektedir.

Penetrometre ölçümlerinde çok önemli bir gelişme 1980'lerde konik ucun hemen arkasına bir piyezometrenin yerleştirilmesiyle olmuştur. Piyezokoni aletinde (CPTU) zeminin kayma direnci yanında aşırı konsolidasyon oranı ve sıvılaşma potansiyeli ölçülebilmektedir (Önalp, 1997).

Sıvılaşma potansiyelini ölçmek için Çin'de bir koni penetrometre geliştirilmiştir (Wang, 1978,1983). Ölçülen penetrasyon dayanımı ps, aşağıda verilen eşitlikteki kritik değer p/ ile karşılaştırılır,

$$p_s' = p_{so} [1 - 0,065(d_w - 2)] \times [1 - 0,05(d_y - 3)] \quad (2.14)$$

Burada,

dw ; Yeraltı su seviyesinin derinliği (m)

dy : Üstteki sıvılaşmayacak tabakanın kalınlığı (m)

Pso:Tablo 2.4 de dw = 2m ve dy =3m için verilen kritik penetrasyon dayanımı (Mpa)

Tablo 2.4 - Tasarım deprem şiddetine göre verilen Pso

I	VII	VIII	IX
Pso (Mpa)	5-6	11.5-13	18-20

Eğer ölçülen koni penetrasyon dayanımı p_s , kritik değer p_s' den daha düşükse, sıvılaşma potansiyeli yüksektir denir. Aksi halde sıvılaşma potansiyeli düşüktür (Wang ve Law, 1994).

2.6.2.3. Sismik Koni Penetrasyon Deneyi (SCPT)

Temel zeminlerinin yerinde kayma dalgası hızlarının belirlenmesine yönelik olarak kuyu içi ve cross-hole teknikleri yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır. Kuyu içi tekniklerinde yapay olarak oluşturulan bir kayma dalgasının bilinen mesafeler içinde yol almasının ve bu dalganın kaynak ile bilinen bir noktada yerleştirilen jeofonlar aracılığı ile yol alma süresinin belirlenmesi esas alınmaktadır. Elastik teori kayma dalgası hızı, V_s , zemin yoğunluğu, ρ ve kayma modülünün, G , aşağıdaki bağıntı ile ilişkilendirilmesini sağlamaktadır.

$$G = \rho \times V_s^2 \quad (2.15)$$

Böylelikle, kayma modülü yerinde kayma dalgası hızlarının ölçülmesi aracılığı ile ölçülebilmektedir. Yerinde sismik deneylerde elde edilen kayma birim deformasyonunun genelde %10 mertebesinde küçük genliklere sahip olması nedeniyle, düşük deformasyon seviyelerinde .dinamik kayma modülü, G_{max} 'ın bulunmasına olanak tanımaktadır. Bu tür bir deneyin alışlagelmiş sondaj teknikleri ve kuyu içi yöntemleri ile gerçekleştirilmesi birden fazla sondaj kuyusu gerektirmesi nedeniyle oldukça yüksek maliyetli ve uzun süre gerektirmektedir.

Yerinde kayma dalgası hızlarının ölçülmesine olanak tanıyan yeni bir deney yöntemi olarak sismik statik penetrasyon deneyi (SCPT) maliyetleri önemli oranda düşürdüğü gibi zemin profilinin geoteknik ve geodinamik parametrelerinin aynı zamanda ve süratli bir şekilde ölçülmesine olanak tanımaktadır.

Bu yöntemde sondalama 10 cm konik uç ve 150 cm çevre alanına sahip 60° açılı elektronik bir konik ucun, 10 ton kapasiteli bir hidrolik baskı yoluyla, 2 cm/sn sabit hızla zemine penetre edilmesi ile yapılmaktadır. Bu penetrasyon sırasında 2 cm ara ile Ölçülen uç ve çevre mukavemeti verileri bilgisayarda kaydedilmektedir. Boşluk suyu basınçlarının ölçümünde kullanılan "piezocone" elemanı, uç mukavemetinin kaydedildiği konik ucun hemen arkasında, 7.5 cm² kesit elemanlı poroz bir elemana sahiptir. Buna ilaveten, penetrometre konik ucunun hemen arkasında birbirine 1.0 m

ara mesafe ile yerleştirilmiş olan, yatayda iki yönde (x,y) ve düşeyde bir yönde (z) üçlü bir jeofon sistemine sahip İki sismometre aracılığı ile kayma dalgası hızı, Vs ve basınç dalgası hızı, Vp arzu edilen derinlikte ölçülebilmektedir.

Statik penetrasyon deneyinde (CPT) uç mukavemeti ve çeper sürtünmesi zemin profilinin zemin tipleri ve kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesinde hızlı ve güvenilir bir yöntemdir. Kuyu içi sismik deneyleri SCPT deneyinde arzu edilen derinlikte kısa süreli aralar verilerek yapılabilir. SCPT deneyinden elde edilen kayma dalgası hızı verileri maksimum dinamik kayma modülünün hesaplanmasında kullanılmaktadır. CPT deneyinde derinlik ve sismometrelerin konumu hassas olarak kontrol edilebilmektedir. Statik penetrasyon deneyi (CPT) ile sismik Ölçümlerin birleştirilmesi ve tek bir deneyde gerçekleştirilebilmesi, temel zeminlerinin Stratigrafik, mukavemet ve dinamik özelliklerinin belirlenmesinde çok hızlı, güvenilir ve ekonomik bir araç teşkil etmiştir, SCPT deneylerinde elde edilen değerler diğer kuyu içi yöntemlerle elde edilen dinamik zemin parametreleri ile büyük uyum içerisinde. Buna karşın SCPT, cross-hole gibi diğer tekniklerle karşılaştırıldığında çok hızlı ve ekonomik bir yöntemdir (Durgunoğlu ve diğ., 2000).

2.7 Sıvılaşma Analizinde Kullanılan Yöntemler

Sıvılaşma potansiyelinin hesaplanmasında çok sayıda yöntem ve yaklaşım vardır. Bu yöntemler farklı zemin yapıları için oluşturulmuştur, ve tarih içerisinde çeşitli düzeltmeler ve eklemelerle daha spesifik bir hal almışlardır. Bu tez kapsamında farklı yöntemler hakkında bilgiler verilip araştırma bölümü olan son bölümde sıvılaşma analizleri Seed ve diğ.,2001 yöntemiyle yapılacaktır.

2.7.1 Seed ve Idriss., 1971 Yöntemi

Depremi neden olduğu eş tekrarlı kayma gerilmesinin (τ_{eq}), sıvılaşma dayanımını (τ_1) aşması durumu sıvılaşma olarak ifade edilir. Çalışmalar sonucu τ_{eq} aşağıdaki şekilde elde edilmiştir (Seed ve Idriss, 1971).

$$\tau_{eq} = 0.65 * \frac{a_{max}}{g} * \sigma_0 * r_d \quad (2.16)$$

Bu denklem, zemin yapısında düşünülen belirli derinlik için hesaplanacak efektif düşey basınca (σ_0') göre normalize edildiğinde, ortalama tekrarlı kayma gerilmesi ile efektif düşey gerilmenin oranı olarak değerlendirilmiş olacaktır.

$$\frac{\tau_{eq}}{\sigma_0'} = 0.65 * \frac{a_{max}}{g} * \frac{\sigma_0}{\sigma_0'} * r_d \quad (2.17)$$

Burada,

$a_{\max}$: Maksimum ivme

g : Yerçekimi ivmesi

r_d : Zemin tabakası derinliği için azaltma faktörüdür.

Shibata ve Teperaksa (1988) r_d düzeltme faktörünü,

$$r_d = 1 - 0,0015 * z \quad (2.18)$$

olarak ifade etmişlerdir.

Dinamik üç eksenli deney genellikle nitrojenle dondurularak alınmış örselenmemiş örneklerle gereksinim duyulması ve uzun zaman alan pahalı bir deney olması nedeniyle, daha çok araştırma amaçlı kullanılmaktadır

2.7.2 Seed ve diğ., 2001 Yöntemi

Bu yöntemde, zeminde yatay düzlem içerisinde bulunan ve üzerine ön düşey efektif gerilme etkileyen elemanın ortalama “Dinamik Kayma Gerilmesi Oranı (DKGO)” tespit edilmeye çalışılır.

Zeminin penetrasyon direnci ve arazideki DKGO’su arasındaki korelasyonla belli yerel koşullarda bulunan zeminlerin son depremlerde sıvılaşmaya uğrayıp uğramadığının kararına varılır.

Pratikte DKGO, sıvılaşmanın “tetikleme” olayının gerçekleşmesinin tespiti için gerekli olduğundan, sıvılaşma sınır eğrileri yardımıyla bu değer tespit edilebilir. Şekil 2.22’de Seed ve diğ. (1984, 1985) tarafından öne sürülen SPT değerleri yardımıyla sıvılaşma potansiyellerinin değerlendirilmesi yöntemi olan, oldukça kabul gören ve geniş bir kullanım alanı bulan ve de NCEER (1997)’de bazı eklemeler yapılan DKGO ve $(N_1)_{60}$ arasındaki ilişkiyi gösteren grafik görülmektedir.

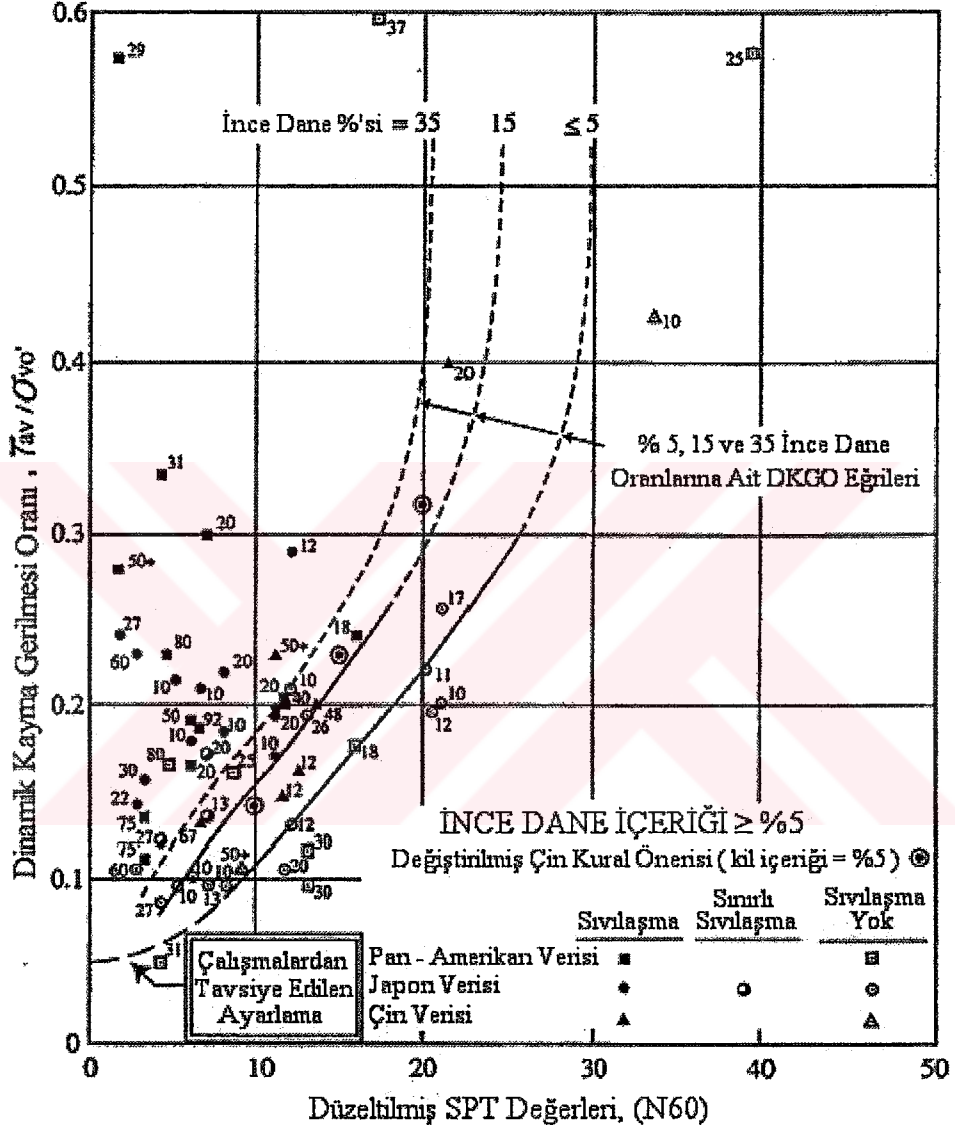
Ancak burada unutulmaması gereken bir nokta, bu şeklin 7,5 büyüklüğündeki bir deprem için hazırlandığıdır.

Ancak diğer magnitüdlerdeki depremler için ise belli bir magnitüd düzeltmesinden sonra Şekil 2.22’deki şekilden yararlanılabilmektedir. Bu düzeltme için ise “Magnitüd Düzeltme Faktörü (MDF)” olarak adlandırılan bir katsayı kullanılmaktadır.

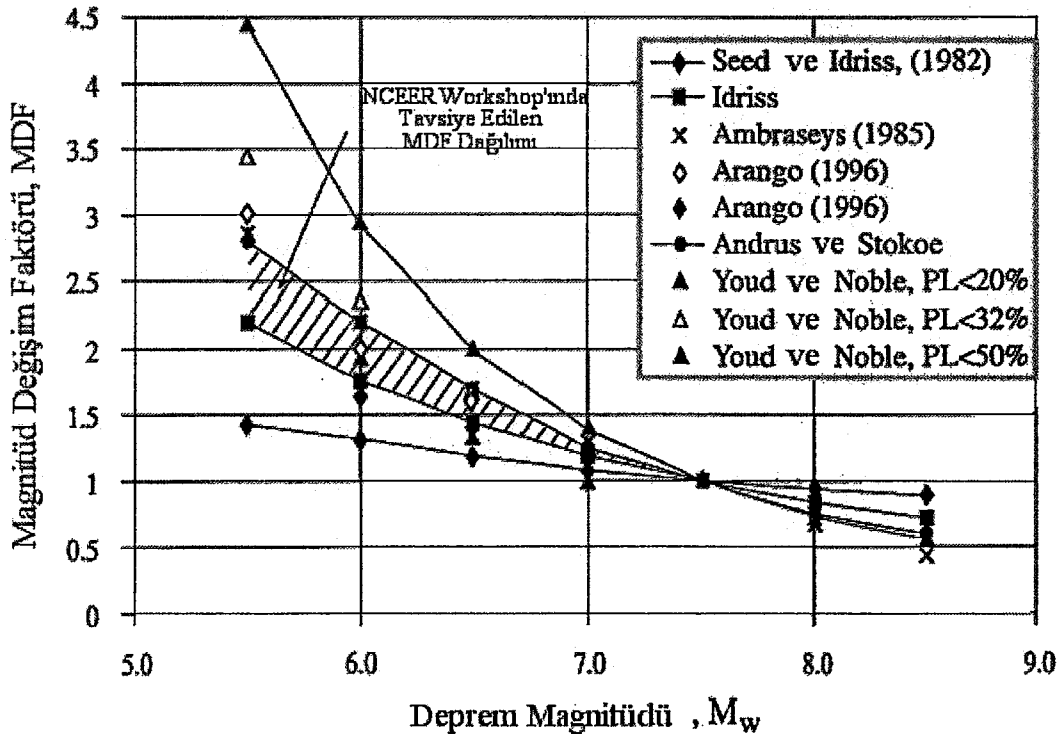
Şekil 2.23’de MDF’nin bulunmasına yönelik olarak deprem magnitüdüne göre oluşturulan şekil görülmektedir.

Grafikten okunan DKGO'nun (2.19) denklemiyle bulunan DKGO'ya oranı şeklinde bir "Sıvılaşma Güvenlik Sayısı (Fs)" bu yöntemde sıvılaşma potansiyelinin tespitinde kullanılmaktadır.

Eğer $F_s \geq 1$ ise sıvılaşma potansiyeli yok, $F_s < 1$ ise de sıvılaşma potansiyeli var şeklinde yorumlanmaktadır.



Şekil 2.22 Düzeltilmiş SPT (N_{60}) değerlerinden yararlanılarak DKGO değerlerinin 7,5 büyüklüğündeki bir deprem için, deneysel sıvılaşma verileri yardımıyla bulunması (NCEER, 1997'den sonra).



Şekil 2.23 Çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilen MDF değerleri (NCEER, 1997'den sonra).

Şekil 2.24'de Ansal ve diğ. (1994), Erken ve diğ. (1998), Ülker ve diğ. (1998), Aydan ve Kumsar (1997), Aydan ve diğ. (1998) ve de Aydan ve diğ. (2000)'e göre JSCE (2001)'de Erzincan, Adana-Ceyhan, Dinar ve Adapazarı için oluşturulan DKGO ve N_{60} ilişkisi verilmiştir. Sıvılaştıran zeminlere ait veriler genellikle, sıvılaşabilir zemin sınırları içine düşmektedir.

DKGO'nun bir deprem esnasındaki değeri aşağıdaki bağıntıyla verilmektedir:

$$DKGO = \left(\frac{\tau_{av}}{\sigma_v} \right) = 0,65 * \frac{a_{maks}}{g} * \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} * r_d * r_{MDF} \quad (2.19)$$

Bu formülasyonda,

τ_{av} : Ortalama kayma gerilmesi oranı

σ_v : Toplam düşey gerilme

σ_v' : Düşey efektif gerilme

a_{maks} : Maksimum yatay yer ivmesi

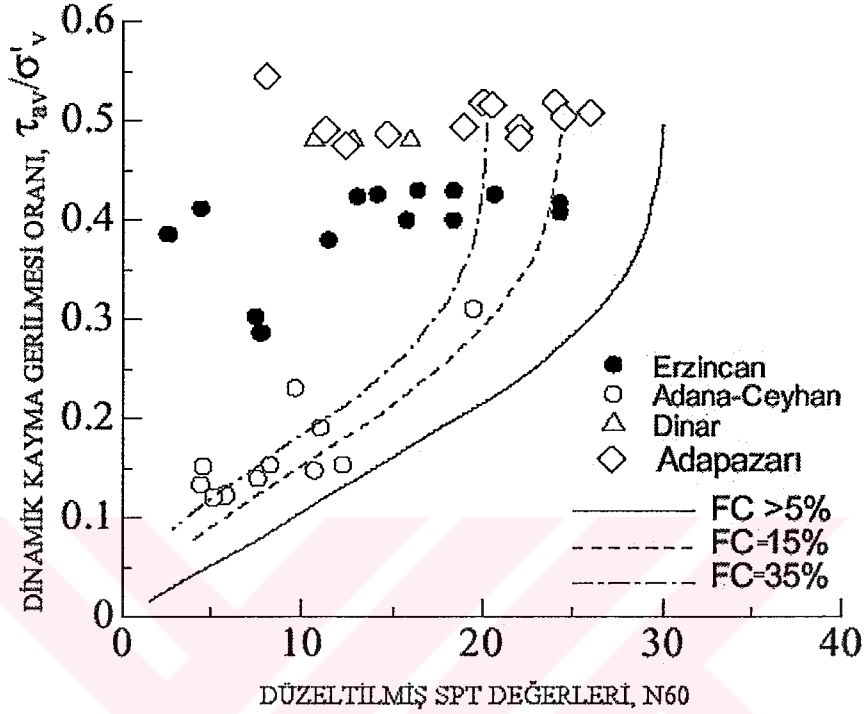
g : Yerçekimi ivmesi ($= 981 \text{ cm/sn}^2$)

r_d : Zemin kolonu için gerilme azaltma faktörü

$$r_d = (1 - 0,00765 * d) \quad (2.20)$$

d : Derinlik (m)

r_{MDF} : Magnitüd düzeltme faktörü



Şekil 2.24 Seed ve De Alba (1986)'ya göre DKGÖ ile N_{60} ilişkisi, sıvılaşma ve de sıvılaşmama sınır çizgileriyle beraber gösterim (JSCE, 2001).

Düzeltilmiş SPT değeri de, SPT deneyi sonucunda elde edilen düzeltilmemiş SPT (N_{30}) değerinin aşağıda verilen bağıntılardan bulunan düzeltme katsayıları ile çarpımı sonucunda elde edilir.

Bütün SPT değerleri örtü etkisi nedeniyle $1 \text{ atm.} = 1 \text{ kg/cm}^2$ atmosfer basıncına göre düzeltilir ve bu düzeltilmiş değer N_1 olarak adlandırılır.

$$N_1 = N * C_N \quad (2.21)$$

Burada C_N (Liao ve Whitman, 1986'dan sonra)

$$C_N = \sqrt{\frac{1}{\sigma'_v}} \quad (2.22)$$

olarak tanımlanmıştır.

Bulunan bu N_1 değeri ayrıca uygulanan enerji, kullanılan teçhizat ve SPT değerlerinin bulunmasında uygulanan aşamaların etkileri de göz önüne alınıp tam olarak standart hale getirilir ve bu düzeltilmiş değer de $(N_1)_{60}$ olarak tanımlanır.

$$(N_1)_{60} = N_1 * C_R * C_S * C_B * C_E \quad (2.23)$$

Burada;

C_R = “Kısa” sondaj borusu uzunluk düzeltme katsayısı

Tablo 2.5 Derinliğe göre C_R değerleri.

Derinlik (m)	C_R
0 – 4	0,75
4 – 6	0,85
6 – 10	0,95
> 10	1,00

C_S = Standartlara uymayan numune alıcılarının düzeltme katsayısı

$$C_S = 1 + \frac{(N_1)_{60}}{100} \quad (2.24)$$

Bu düzeltmenin özellikle numune alıcılarının içerisinde yer alan kelepçelerin takılmadığı durumlarda numuneyle SPT aletinin arasında yaratılan alan sayesinde kaybedilen sürtünme etkisinin düzeltilmesi amacıyla kullanıldığı belirtilmektedir.

C_B = Sondaj borusu çapını düzeltme katsayısı

Tablo 2.6 Numune türüne göre C_B değerleri.

Sondaj Borusu Çapı (mm)	C_B
65 - 115	1,00
150	1,05
200	1,15

Kullanılmış olan boru çaplarının 120 mm olması nedeniyle bu katsayı hesaplarda 1,00 olarak alınmıştır.

C_E = SPT tokmağı enerji verimlilik düzeltme katsayısı

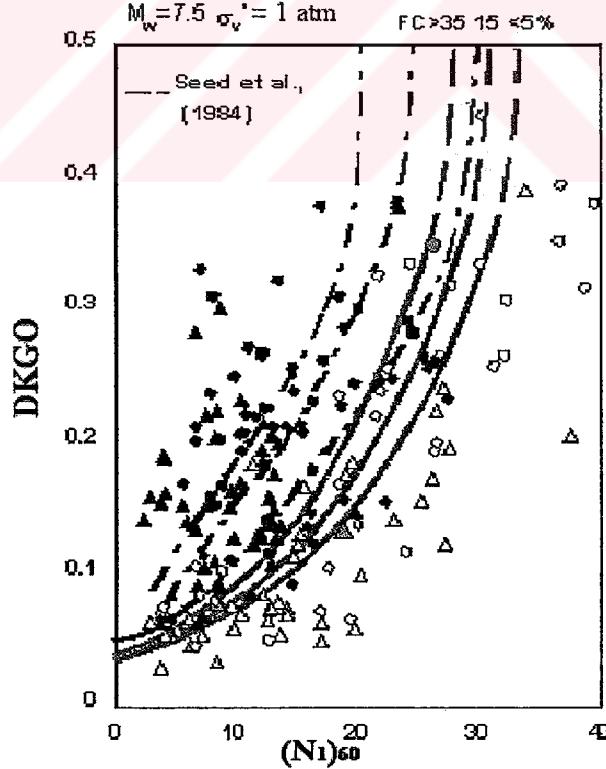
$$C_E = \frac{ER}{\%60} \quad (2.25)$$

Burada ER (Verimlilik oranı) teorik olarak uygulanan SPT tokmağı enerjisinin gerçekte ne kadarlık bir kısmının numune alıcıya iletildiğini ifade etmektedir.

Bu ifadeden anlaşılacağı üzere kullanılan deney yöntemi ve ekipmanların standartlara uygunluğu ve de tipi C_E 'nin belirlenmesinde rol oynayacaktır.

Erken (2001a)'ya göre yaklaşık olarak $C_E = 1$ olarak hesaplarda kabul edilmiştir.

Bütün bu düzeltmelerden sonra bulunan $(N_1)_{60}$ değerine karşılık gelen DKGO değeri önceki çalışmalardan yararlanılarak oluşturulmuş sınılaşma olayının olduğu $(N_1)_{60}$ ile DKGO ilişkisi grafiğinden yararlanılarak bulunur. Bu grafik daha önceki sayfalarda verilmiş olan Şekil 2.22'deki grafiğin elde edilen yeni veriler ve yürütülen yeni araştırmalar sayesinde Seed ve diğ. (2001) ve Çetin ve diğ. (2000) tarafından revize edilmiş şekliyle Şekil 2.25'de verilmiştir.



Şekil 2.25 Düzeltilmiş SPT değerlerine göre $M_w = 7,5$ ve $\sigma_v' = 1,0$ atm (kg/cm^2) durumu için sınılaşma tetikleme DKGO değerleri (Seed ve diğ., 2001, Çetin ve diğ., 2000).

$$F_s = \frac{DKGO_{siv}}{DKGO_{dep}} \quad (2.26)$$

F_s = Sıvılaşma güvenlik sayısı

$DKGO_{siv}$: Şekil 4.9’da verilen, daha önce oluşan depremlerde meydana gelen sıvılaşma olaylarından yararlanılarak oluşturulan grafikten $(N_1)_{60}$ değerine karşılık olarak ince dane miktarı da göz önünde bulundurularak okunan sıvılaşma tetikleme $DKGO$ ’su.

$DKGO_{dep}$: Meydana gelen deprem sonucunda belli bir zemin numunesi için bulunan $DKGO$.

2.7.3 Japon Yol Kurumu Yöntemi (1996)

Bu yöntemde SPT deneyi sonucunda elde edilen düzeltilmemiş SPT değerleri (N_{30}), YASS, en büyük yatay ivme (a_{maks}), deprem tipi ($a_{maks} < 600$ gal ise tip 1, $a_{maks} \geq 600$ gal ise tip 2), zemin kesitinin olduğu zemin tabakalarının sayısı, bunların derinlikleri ve suya doymun birim hacim ağırlıkları (γ_d), N_{30} değerlerinin elde edildiği numunelerin deney sonuçları ayrıntılı olarak (numunelerin alındıkları derinlikler, ince dane oranları, ortalama dane çapları (D_{50} (mm)), efektif dane çapları (D_{10} (mm)), plastisite indisleri) ve zemin tipi (kum özellikli zemin ise tip 1, çakıl özellikli zemin ise 2 şeklinde) göz önüne alınarak sıvılaşma potansiyeli belirlenmektedir.

Analiz sonucunda “Sıvılaşma Güvenlik Sayısı (F_L)” elde edilerek sıvılaşma potansiyelinin olup olmadığı, sıvılaşma potansiyeli var ise bunun hangi derinlikler arasında olduğu ifade edilmektedir. Eğer $F_L \geq 1$ ise sıvılaşma yok, $F_L < 1$ şeklinde ise sıvılaşma var şeklinde sonuçlar yorumlanmaktadır. (Okan R.,1991)

Bu yöntemde aşağıda belirtilen koşulların sağlanmaması durumunda o zemin için sıvılaşma potansiyeli hesabı yapılamamaktadır. Bu koşullar:

- i) YASS yüzeyden 10 m derinliğe kadar bir derinlikte olmalıdır.
- ii) İ.D. içeriği % 35 den küçük olmalı veya İ.D. miktarının % 35’den büyük olması durumunda $I_p < 15$ olmalıdır.
- iii) $D_{50} < 10$ mm ve $D_{10} < 1$ mm olmalıdır.

Bu yöntemde sıvılaşma güvenlik sayısı,

$$F_L = \frac{R}{L} \quad (2.27)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Burada;

F_L : Sıvılaşma güvenlik sayısı

R : Önceden tespit edilen sıvılaşmanın olduğu durumlar göz önünde bulundurularak hesaplanan DKGO

L : Deprem esnasında oluşan DKGO

$$R = C_w * R_L \quad (2.28)$$

C_w depremin oluşturduğu en büyük yatay yer ivmesine göre bulunan deprem tipi katsayısıdır. Tablo 2.7'de C_w 'nin aldığı değerler görülmektedir.

Tablo 2.7 Deprem tipine göre C_w değerleri.

Tip 1 ($a_{maks} < 600 \text{ gal}$)	Tip 2 ($a_{maks} \geq 600 \text{ gal}$)
1	1,0 ($R_L \leq 0,1$)
	$3,3 * R_L + 0,67$ ($0,1 < R_L \leq 0,4$)
	2,0 ($0,4 < R_L$)

R_L ise SPT değerinin düşey efektif gerilmeye göre düzeltilmiş değeri ile İ.D. miktarına göre bulunan DKGO' dur.

$$R_L = \begin{cases} 0,0882 \sqrt{\frac{N_a}{1,7}} & (N_a < 14) \\ 0,0882 \sqrt{\frac{N_a}{1,7}} + 1,6 * 10^{-6} * (N_a - 14)^{4,5} & (N_a \geq 14) \end{cases} \quad (2.29)$$

Kum zemin durumunda,

$$N_a = C_1 * N_1 + C_2 \quad (2.30)$$

$$N_1 = \frac{1,7 * N}{\sigma'_v + 0,7} \quad (2.31)$$

$$C_1 = \begin{cases} 1 & (\%0 \leq \dot{I}.D.O. < \%10) \\ (\dot{I}.D.O. + 40) / 50 & (\%10 \leq \dot{I}.D.O. < \%60) \\ (\dot{I}.D.O. / 20) - 1 & (\%60 \leq \dot{I}.D.O.) \end{cases} \quad (2.32)$$

$$C_2 = \begin{cases} 0 & (\%0 \leq \dot{I}.D.O. < \%10) \\ (\dot{I}.D.O. - 10) / 18 & (\%10 \leq \dot{I}.D.O.) \end{cases} \quad (2.33)$$

Çakıl zemin durumunda,

$$N_a = \{1 - 0,36 * \log_{10} (D_{50} / 2)\} * N_1 \quad (2.34)$$

Verilen bu bağıntılarda,

N : Düzeltilmemiş SPT değeri

N_1 : Örtü etkisi nedeniyle yapılan düzeltme sonucunda bulunan SPT değeri (örtü etkisi nedeniyle 1 atm. = 1 kg/cm² atmosfer basıncına göre SPT değerleri düzeltilir).

C_1, C_2 : İ.D.O.'ya göre bulunan katsayılar

N_a : Örtülü zemin nedeniyle ve zemindeki İ.D. miktarına göre bulunan düzeltilmiş SPT değeri

Oluşan veya oluşması tahmin edilen deprem etkisi durumunda DKGÖ ise,

$$L = r_d * K_{hc} * \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad (2.35)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmaktadır.

Bu bağıntıda,

r_d : Sondaj derinlik düzeltmesi ($r_d = 1 - 0,015z$)

z : Zemin yüzeyinden itibaren ölçülen derinlik

$K_{hc} = a_{maks} / g$

σ_v : Toplam düşey gerilme

σ'_v : Düşey efektif gerilme

Ancak yukarıda belirtilen ve bu yöntemin uygulanması için gerekli olan bazı veriler bütün numuneler için laboratuvar deneylerinin yapılmadığı durumlarda veya başka bir ifadeyle bilinmediği durumlarda JRA'nın çeşitli zemin sınıfları için oluşturduğu zemin özellikleri tablosundan yararlanılmıştır.

Ayrıca bu yöntemin uygulanması esnasında dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri de Türkiye'de yapılan SPT'ler sonucunda bulunan düzeltilmemiş SPT değerlerinin doğrudan bu Japon yönteminde kullanılamayacağıdır. Kiku ve diğ. (2001)'e göre Türkiye'de yapılmış olan SPT'lerdeki deney tokmağının enerji absorbesi ile Japonya'da yapılmış olanların absorbesinin farklı olduğu ve de bu oranın yaklaşık olarak % 58 mertebesinde olduğu belirtilmektedir. Bu ilişki (2.36) bağıntısında verilmektedir.

$$\frac{N_{JP}}{N_{TR}} = \frac{\left(\frac{V_s}{80,0}\right)^{1/0,292}}{\left(\frac{V_s}{68,3}\right)^{1/0,292}} = \left(\frac{68,3}{80,0}\right)^{1/0,292} \approx 0,58 \quad (2.36)$$

(2.36) bağıntısına göre Japonya’da uygulanan SPT yöntemine göre ölçülen SPT değerlerinin Türkiye’de ölçülmüş olanların %58’i büyüklüğünde olduğu anlaşılmaktadır.

Yani bu Japon yönteminin kullanılabilmesi için SPT değerlerinin Japonya ölçüm metodundaki enerji absorbesi miktarlarına göre düzeltilmesi gerekmektedir. Aksi halde büyük SPT değerleri sıvılaşma potansiyelinin tespitinde doğru olmayan sonuçlar verecektir.

Bu nedenle SPT ham değerleri 0,58 katsayısıyla çarpılarak ham SPT değerleri (N) olarak JRA yönteminde kullanılmıştır (Okan R.,2001)

Tablo 2.8 Japon Yol Kurumu’nun zemin sınıfları özellikleri.

	YASS Altındaki Birim Hacim Ağırlığı (γ_d , t/m ³)	YASS Üstündeki Birim Hacim Ağırlığı (γ_k , t/m ³)	D ₅₀ (mm)	İ.D.O. (%)
Kil	1,50		0,005	100
Yüzey Tabakası	1,70	1,50	0,020	80
Silt	1,75	1,55	0,025	75
Siltli Kum	1,80	1,60	0,040	65
Kumlu Silt	1,80	1,60	0,070	50
Çok İnce Kum	1,85	1,65	0,100	40
İnce Kum	1,95	1,75	0,150	30
Kum	2,00	1,80	0,350	10
Kaba Kum	2,00	1,80	0,600	0
Çakıllı Kum	2,10	1,90	2,000	0

Ayrıca bu yöntemde, D₁₀ değerlerinin tespit edilmediği durumlarda bu bilinmeyen D₁₀ değerleri için 0 alınması istenmektedir.

2.7.4. Çin Milli Kodu Yöntemi

“The Chinese National Code of Aseismic Design for Buildings” aşağıdaki denklemi önermiştir (Wang ve Law, 1994):

$$N_{cr} = N_0 * [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] * \sqrt{(3/p_c)} \quad (2.37)$$

Burada, d_w : Yer altı su seviyesi derinliği (m)

d_s : Deney yapılan zemin derinliği (m)

p_c : Yüzde olarak ince dane ($D < 0.005$ mm) miktarı, eğer $p_c < 3$ ise $p_c = 3$ alınır.

N_0 : Tablo 2.9'da gösterildiği şekilde tasanın deprem şiddetine bağlı ampirik N değeri.

Tablo 2.9. N_0 Değerinin Belirlenmesi

Deprem alanına yakınlık/uzaklık	Tasarım Deprem Şiddeti (I)		
	VII	VIII	IX
Yakın Alan	6	10	16
Uzak Alan	8	12	-

Zeminde 15 m içinde ölçülen N değeri yukarıdaki denklemden bulunan N_{cr} değeri ile karşılaştırılır. Eğer $N < N_{cr}$ ise "zeminin sıvılaşma riski" vardır.

2.7.5. Enerji Metodu Yöntemi (Wang ve Law, 1994)

Bu metot, titreşim sırasındaki enerji kaybının, zeminin sismik harekete karşı tepkisini gösterir bir parametre olarak kullanılması prensibine dayanır. Laboratuvar da dinamik yüklemeyle elde edilen enerji kaybı ile boşluk suyu basıncı arasındaki ilişki ve arazi verileri regrasyon analizleriyle korelasyonu yardımıyla sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmektedir. Buna göre suya doymuş kum zeminlerde sıvılaşmayı tanımlamak için aşağıdaki ifade verilmiştir.

$$\frac{10^{1.5M}}{2.28 * 10^{-10} * N_1^{11.5} * R^{4.3}} \geq 1 \quad (2.38)$$

Burada, M : depremin büyüklüğü,

R : Depremin odak uzaklığı (km)

N_1 : 100 kPa efektif basınç ve %60 enerji oranına göre düzeltilmiş standart penetrasyon dayanımıdır.

2.8 Sıvılaşma Şiddetinin Tahmini

Bir bölgede meydana gelebilecek sıvılaşma tehlikesinin yanında bu sıvılaşma şiddetinin tahmini de önemlidir. Iwasaki, 1986 yılında sıvılaşma derecesini (D_L) şu şekilde ifade etmiştir.

$$D_L = \sum (1 - F_{LR}) * W(Z) * Z \quad (2.39)$$

Burada, sıvılaşma dayanımı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$F_{LR} = \tau_R / S_r \quad (2.40)$$

$$\tau_R = 0.109 * \sigma_v'^{-0.207} * N^{-0.367} * d_{50}^{-0.318} \quad (2.41)$$

$$S_r = (a_{maks} / g) * (\sigma_v / \sigma_v') * r_d \quad (2.42)$$

$W(Z)$, zemin tabakasının ağılık fonksiyonudur. Z , m cinsinden derinlik olmak üzere,

$$W(Z) = 10 - 2/3 * Z \quad (2.43)$$

Tablo 2.10 sıvılaşma derecesi D_L ile sıvılaşma şiddeti arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Wang ve Law, 1994).

Tablo 2.10. Sıvılaşma Şiddeti

Sıvılaşma Derecesi (D_L)	<4	4-10	>10
Sıvılaşma Şiddeti	Zayıf Seyrek kum kaynamaları, ve önemsiz oturmalar	Çok sayıda kum kaynaması, görünür zemin oturmaları, hasarlar	Tehlikeli, geniş alanda kum kaynamaları, ciddi yapısal hasarlar

2.9 Sonuçlar

Bu bölümde sıvılaşmayı, sıvılaşma mekanizmasını, etkin parametreleri, sıvılaşma hesaplama yöntemlerini ve tarihsel gelişimini ve farklılıklarını inceledik. Sıvılaşmaya etki eden parametreler açıklandı. Bu parametrelerden ince dane oranı ve plastisitenin etkisi 4. bölümde derince açıklanacaktır.

3. 17 AĞUSTOS 1999 KOCAELİ DEPREMİ VERİLERİ VE ADAPAZARI BÖLGESİ YEREL ZEMİN KOŞULLARI

3.1 Giriş

Bu çalışmada kullanılan arazi verilerinin tümü 17 Ağustos İzmit Depremi sonrasında oluşan koşulların deneysel metotlarla derlenmesinden oluştuğu için bu depremi ve depremde sivilaşma bakımından en ciddi hasarların gözlemlendiği Adapazarı'nın yerel zemin koşulları bu bölümde anlatılacaktır. Çalışma kapsamında Adapazarı'nda bulunan Cumhuriyet, İstiklal ve Tıgçılar mahallerinde yapılan 150'nin üzerindeki zemin etütlerindeki veriler derlenip çalışma için uygun olanları seçilmiştir.

3.2 17 Ağustos 1999 İzmit Depremi ve Depremsel Veriler

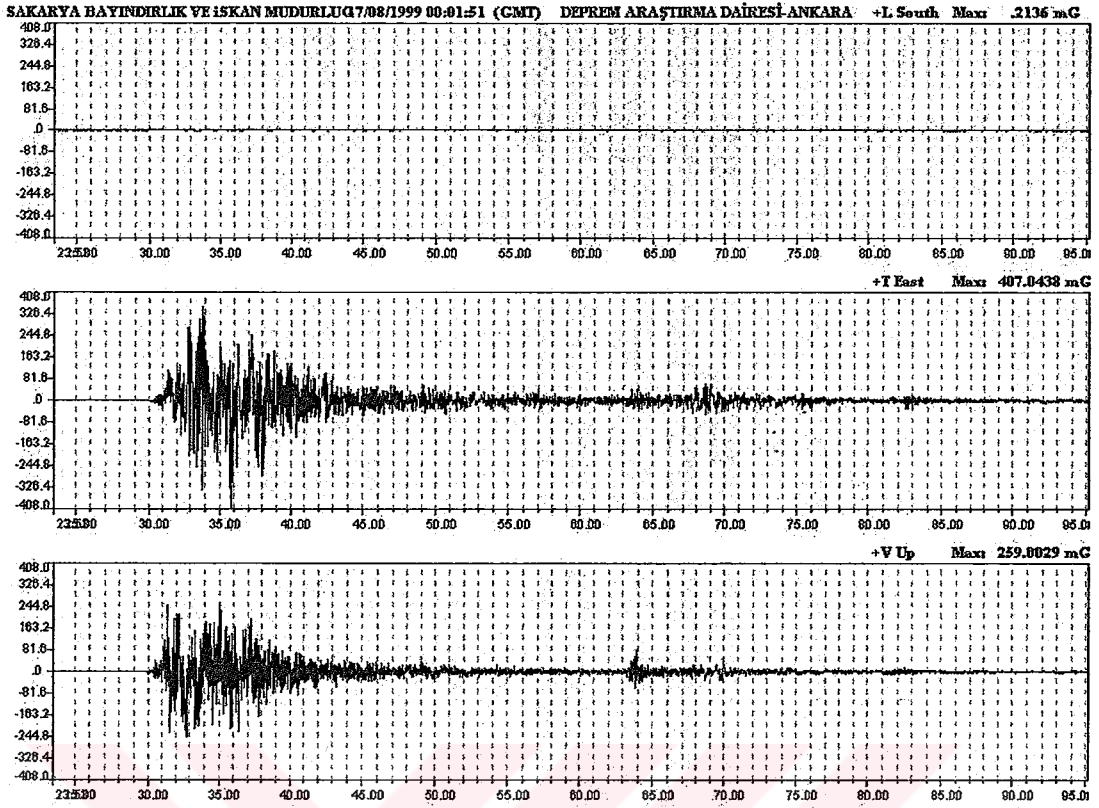
Sivilaşma potansiyeli analizlerinde en büyük yer ivmesi etkin bir parametredir. Bu veriye ulaşmak için deprem kayıt istasyonlarından alınacak doğru bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

17 Ağustos depreminde deprem bölgesindeki diğer istasyonların aksine Adapazarı'ndaki istasyondan yalnızca doğu batı yönünde ve düşey yönde kayıt alınabilmiştir. Bu sismograf istasyonu Adapazarı'nda, Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü (40,7369 K ve 30,3787 B) binasında bulunmaktadır. İstasyon kayalık bir bölge üzerinde yer almaktadır. Tablo 3.1'de İ.T.Ü. tarafından yürütülen araştırma kapsamında açılan sondajdan elde edilen, bu kayıt istasyonunun üzerinde bulunduğu zemin kesiti görülmektedir.

Tablo 3.1 Adapazarı'nda deprem kaydının alındığı istasyonun zemin kesiti.

Sondaj No	YASS (m)	Zemin Durumu	Derinlik (m)	SPT Değeri (N ₃₀)
S-10	0,00	Dolgu	1,00	14
		Kil – Silt – Çakıl	1,50	>50
		Kumtaşı	12,50	>50
		Kiltaşı	14,00	>50
		Kil	16,00	>50
		Kiltaşı	20,00	>50

Böyle bir zemin kesiti üzerinde yer alan, kuvvetli yer hareketi ölçüm istasyonunda kayıt edilmiş olan deprem kaydı da Şekil 3.1'de verilmektedir. Bu deprem kaydına göre en büyük yatay ivme Doğu-Batı doğrultusunda 407 gal olarak ve en büyük düşey ivme ise 260 gal olarak gerçekleşmiştir. Yatay eksenin diğer kısmına ait Kuzey-Güney bileşeni ise deprem esnasında kayıt edilememiştir. Ana şok esnasında Adapazarı'nda havza üzerinde kayıt almış olan başka bir istasyon bulunmamaktadır.(Okan R., 2001)



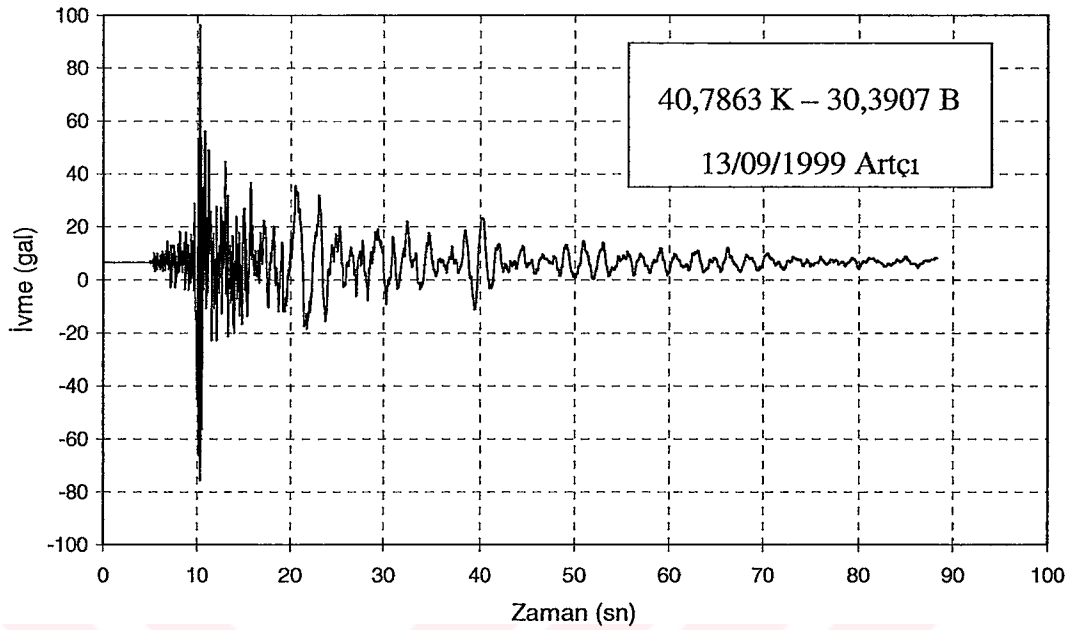
Şekil 3.1 Adapazarı'nda Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü'nde bulunan sismograftan elde edilen 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi ana şok kaydı (DAD, 1999).

Sadece kayada ölçülmüş olan bu deprem kaydından yararlanılarak diğer zemin kesitleri için de bazı araştırmacılar tarafından deprem kayıtları türetilmiştir. Bu türetme, belli bir zemin kesitinde de depremin etkilerini tam olarak anlayabilmek için çok gereklidir. Çünkü farklı türdeki zemin tabakalarının deprem dalgalarına karşı gösterdiği direnç de yine farklıdır.

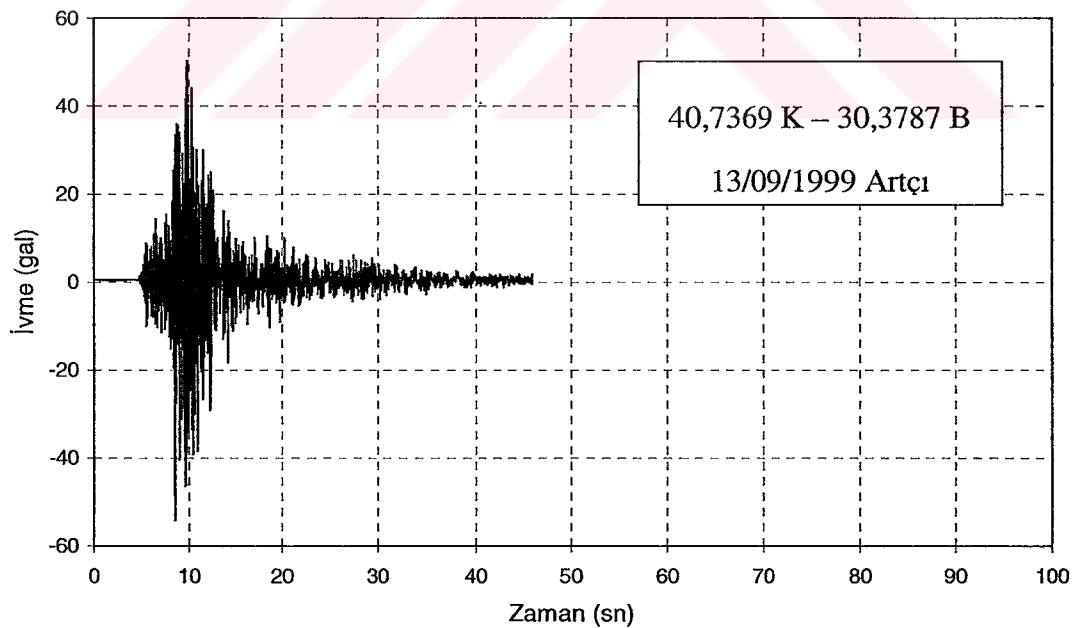
Bu duruma en iyi örnek olarak 13 Eylül 1999 tarihinde 40,77 K ve 30,10 B dış merkezinde, odak derinliği 19,6 km olan 5,8 büyüklüğünde meydana gelen artçı depremde hem kayada hem de alüvyon bir zemin üzerinde alınan deprem kayıtları gösterilebilir. Bu artçı şoka ait D-B bileşen kayıtları Şekil 3.2'de görülmektedir. Bu iki kayıtdan hareketin süresi, havza üzerinde alınan kayıtda kaya üzerinde alınmış olan kayıtdan daha uzundur.

Bu farklılık nedeniyle deprem esnasında, yapım kaliteleri benzer olan binaların neden farklı deprem etkilerine maruz kaldığı görülmektedir. Adapazarı'nda deprem kaydının kaya üzerinde ölçülmüş olması, sonraki bölümde ayrıntılı olarak verilmiş olan şehrin yerel zemin koşulları için belli düzeltmeler yapılmadan kullanılamayacağını da ifade etmektedir. Ayrıca Şekil 3.1'de verilen, kaya üzerinde ölçülmüş olan deprem kaydından depremin yaklaşık olarak 45-50 sn sürdüğü anlaşılmaktadır. Ama Şekil 3.2'de de görüldüğü üzere alüvyon zeminlerde bu süre

oldukça uzamaktadır. Bu nedenle değişik türde tabakalara sahip zeminlerde inşaa edilmiş yapılar değişik deprem etkilerine maruz kalmışlardır.



Şekil 3.2a 13 Eylül 1999 tarihinde meydana gelmiş olan artçı depremde Adapazarı'nda alüvyon zemin üzerinde inşaa edilmiş olan A. Babaloğlu konutunda (40,7863 K ve 30,3907 B, dış merkeze uzaklık 24,5 km) ölçülen depremin D-B bileşeni (Kandilli Rasathanesi, 1999).



Şekil 3.2b 13 Eylül 1999 tarihinde meydana gelmiş olan artçı depremde Adapazarı'nda kaya üzerinde inşaa edilmiş olan Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü binasında (40,7369 K ve 30,3787 B, dış merkeze uzaklık 23,7 km) ölçülen depremin D-B bileşeni (Kandilli Rasathanesi, 1999).

3.3 Körfez ve Adapazarı Bölgesi Zemin Durumu

3.3.1 Körfez Bölgesi

17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi kırığının geliştiği bölge, doğrultu atım ve çekme tektoniğinin egemen olduğu aktif bir çöküntü içerisinde yer almaktadır. Bölgenin jeolojisi ve paleotektonik ve neotektonik gelişimi ile depremselliği hakkında çeşitli araştırmalar gerçekleştirilmiştir (Ketin, 1966; Şengör, 1979; Toksöz ve diğ., 1979; Şengör ve Yılmaz, 1981; Kato, 1988; Barka ve Cadinsky-Cade, 1988; Koçyiğit, 1993; Demirtaş, 1994, 1995, 1996; Bargu, 1993,1997; Hoşgören, 1995; Demirtaş ve Yılmaz, 1996; Seymen, 1995; Üçer ve diğ., 1997; Stein ve diğ., 1997; Barka, 1997; Okay, 1999).

Kocaeli Depremi kırığının uzandığı bölge Armutlu ve Almacık bloklarının kuzey kesimlerini oluşturmaktadır. Armutlu Yarımadası K – G ve KD – GB eksenli büyük bir antiklinoryum tarafından denetlenmektedir (Kato, 1988). Bölgenin taban kayacını prekambriyen-alt paleozoik yaşlı Pamukova metamorfikleri ile karbonifer-permiyen yaşlı serpantin, şist, gnays ve granitik kayalardan ibaret olistolitler ile türbiditik ve volkanoklastik kayalar oluşturmaktadır.

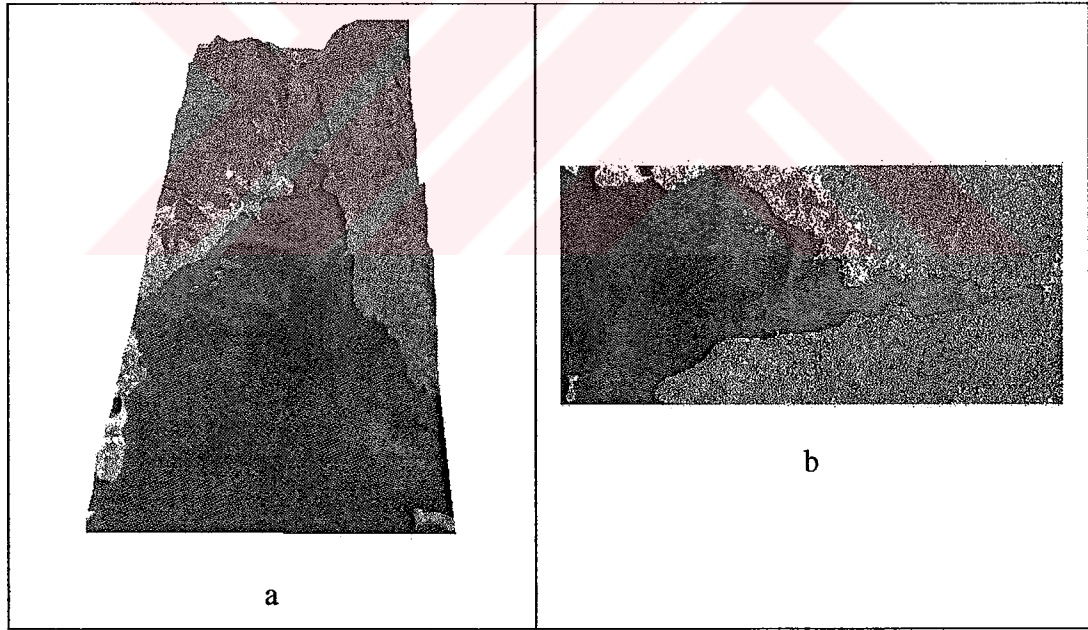
Eosen yaşlı magmatik ve volkanik kayalar bölgede geniş bir alanda yayılım göstermektedir. Miyosen yaşlı sedimanter kayalar, eosen yaşlı birimleri açılı uyumsuz örterken, pliyosen yaşlı birimler tarafından açılı uyumsuz örtülürler. Pliyosen ve kuvaterner yaşlı birimler karasal ortamda depolanmış çökellerden oluşmaktadır.

Pliyosen yaşlı akarsu-gölsel istif, KAF boyunca, Sapanca Gölü güneybatısında, Feyziye, Yuvacık, Gölcük güneyi, Bahçecik kuzeyini kapsayan Sapanca Gölü – İzmit Körfezi arasında dağ eteklerinde yüzeylenmektedir. Bu birimler, kumtaşı, silttaşı ve çakıltası ardası halinde akarsu çökelleri ile temsil edilmektedir. Feyziye’de pliyosen birimlerin kalınlığı, 50 – 75 metreye kadar ulaşmaktadır. Çakıllar, genellikle eosen yaşlı andezit ve neojen yaşlı tüflerden oluşmaktadır. Kullar beldesi, Rahmiye Köyü civarında açılmış araştırma hendeğinde, yüzeyin 5 m altında körfez çamurları ve akarsu çökelleri gözlenmiştir.

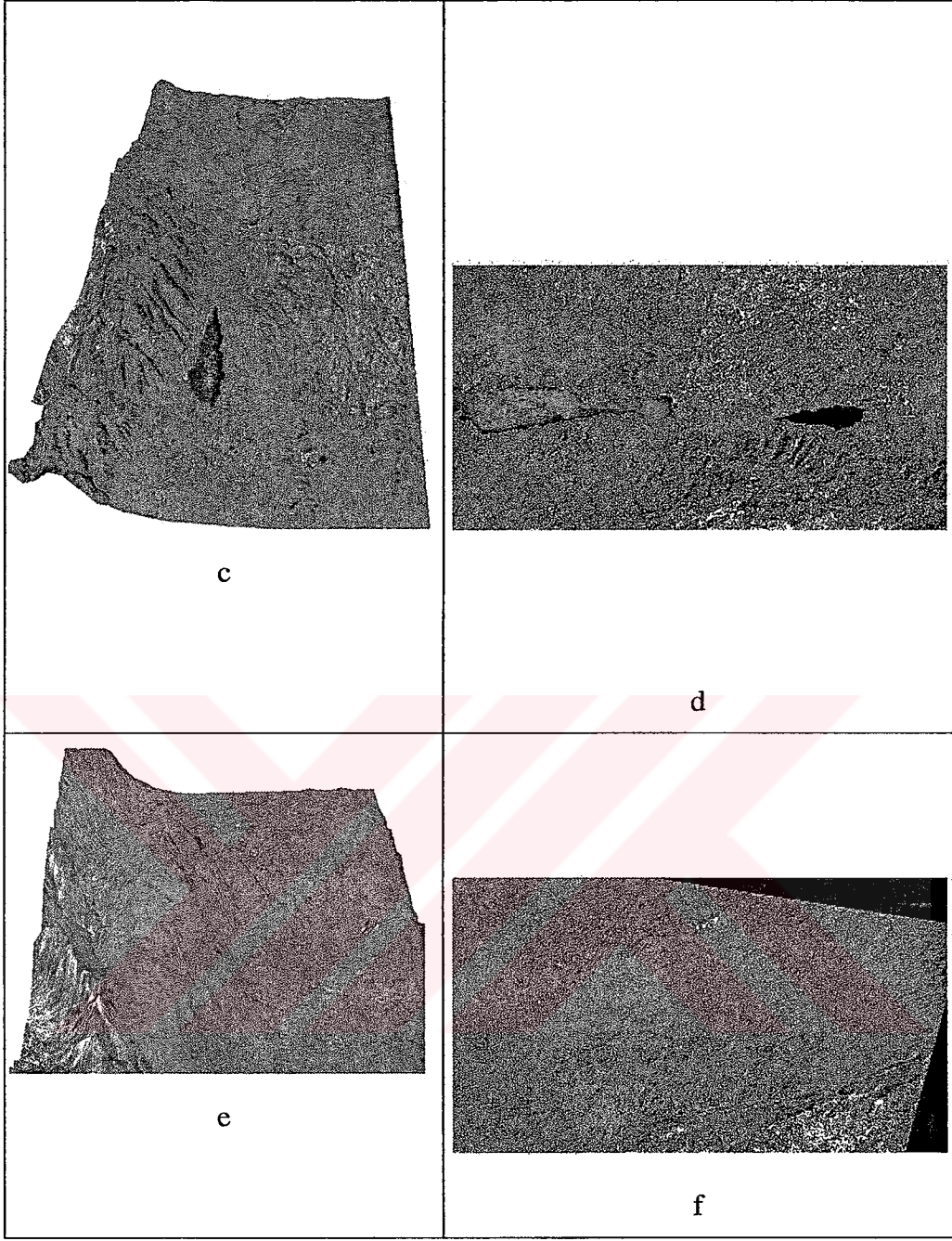
İzmit körfezi güneyi boyunca, pliyosen yaşlı birimler, silt, tuf ve kum aralanmasıyla temsil edilmektedir. Çınarcık – Karamürsel arasında, bu birimler kıyı boyunca yer almaktadır. Yalova güneyi ve Karamürsel güneybatısında pliyosen birimleri silttaşı ve kumtaşlarından oluşmaktadır. Yalova yakınlarında Hersek deltası ve Altınova’da çakıl, kum, silt ve kil tabakalarından ibaret gevşek ve suya doymun alüvyonlar yer almaktadır.

Sapanca Gölü–Akyazı arasında alt ordovisiyen yaşlı kumtaşı ve şeyl ardalanmasından ibaret filiş birimleri yer alır. Sakarya kuzeyinde orta devoniyen – alt karbonifer yaşlı sığ denizel rekristalize ve dolomitik kireçtaşları bulunur. Sapanca Gölü – Akyazı arasında permien-triyas yaşlı çakıltası, kumtaşı ve çamurtaşı ardalanmasından oluşan çökeller gözlenmektedir. Akyazı güneyinde ve güneydoğusunda alt-orta eosen yaşlı andezit ve bazaltlardan ibaret volkanik bir istif yer alır. Bu bölümde, pliyosen yaşlı çakıltası-kumtaşı ve kilaşlarından ibaret akarsu-gölsel çökeller, genellikle KAF boyunca gözlenir. Akyazı, Adapazarı ve Hendek ovalarında 300 metre kalınlığa erişen kalın, gevşek ve suya doymun alüvyonlar dağılım gösterir. Düzce Ovası’nın temelini ise paleozoyik yaşlı kumtaşı, silttaşı ve şeyllerden oluşan bir istif oluşturmaktadır. Bu birimlerin üzerine kretase yaşlı kayalar uyumsuz gelmektedir. Kretase yaşlı kayaların üzerine tersiyer yaşlı pekişmemiş çökeller yer almaktadır. Düzce Ovası’nın en üst seviyesinde genç gölsel-akarsu çökelleri dağılım göstermektedir (Demirtaş, 2000).

Şekil 3.3’de uydu görüntüleri üzerinde bu basenlerin dağılımı net olarak görülmektedir (Nurlu ve diğ., 2000).



Şekil 3.3 İnceleme alanına ait uydu görüntüleri (a-b: İzmit Körfezi’nin batıdan doğuya doğru 3 boyutlu uydu görüntüsü, ölçeksiz) (Nurlu ve diğ., 2000).

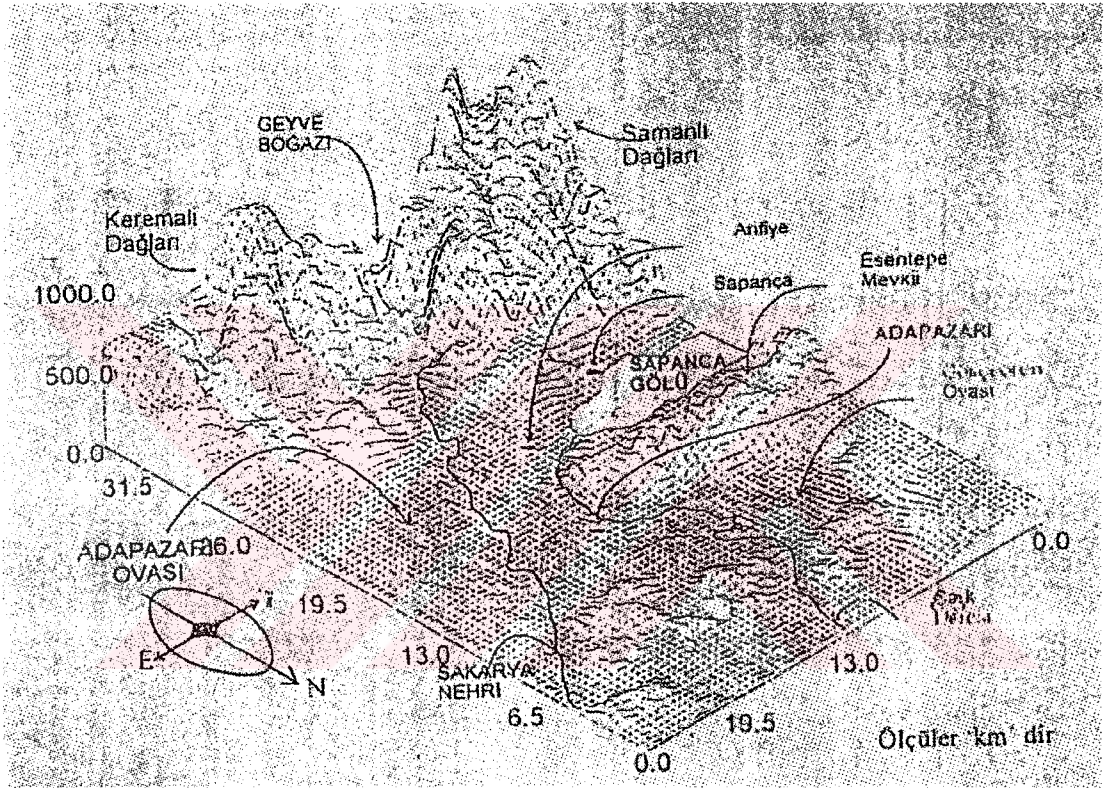


Şekil 3.3 İnceleme alanına ait uydu görüntüleri (c-d: Akyazı'dan İzmit Körfezi arasının 3 boyutlu uydu görüntüsü, bakış doğudan batıya; e-f: Gölyaka-Mudurnu Vadisi civarının 3 boyutlu uydu görüntüsü, bakış doğudan batıya doğru, ölçeksiz) (Nurlu ve diğ., 2000).

3.3.2 Adapazarı Bölgesi

Adapazarı şehri, uzun doğrultuda Sapanca Gölü - Hendek güneybatısı arasında 32 km, kısa doğrultuda Kuzeyde Mağara Boğazı -Güneyde Akyazı batısı arasında 27

km kadar uzanan yaklaşık bir paralelkenar biçimindeki Adapazarı Ovası'nın batı kısmında kurulmuştur. Şehir alüviyal dolgu üzerinde ve yayılmanın daha ziyade kuzey - güney doğrultusunda olduğu tipik bir ova kentidir. Adapazarı şehrinin kurulmuş okluğu saha genelde düz bir görünüm ihtiva etmekte olup şehir merkezinin deniz seviyesine göre yüksekliği genelde 30m civarındadır. Bu yükseklik kuzeydoğu (NE) istikametinde ‰0 0.5, kuzeybatı (NW) istikametinde ‰02'lik bir eğimle azalma gösterir. Kentleşme sınırlarındaki bu düzlüğü batıda Serdivan ve güneybatıda Erenler mevkiileri kısmen bozmaktadırlar. Şekil 3.4'de Adapazarı'nın morfolojik bir krokisi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Adapazarı'nın KD' dan GB' ya doğru morfolojik görünümü

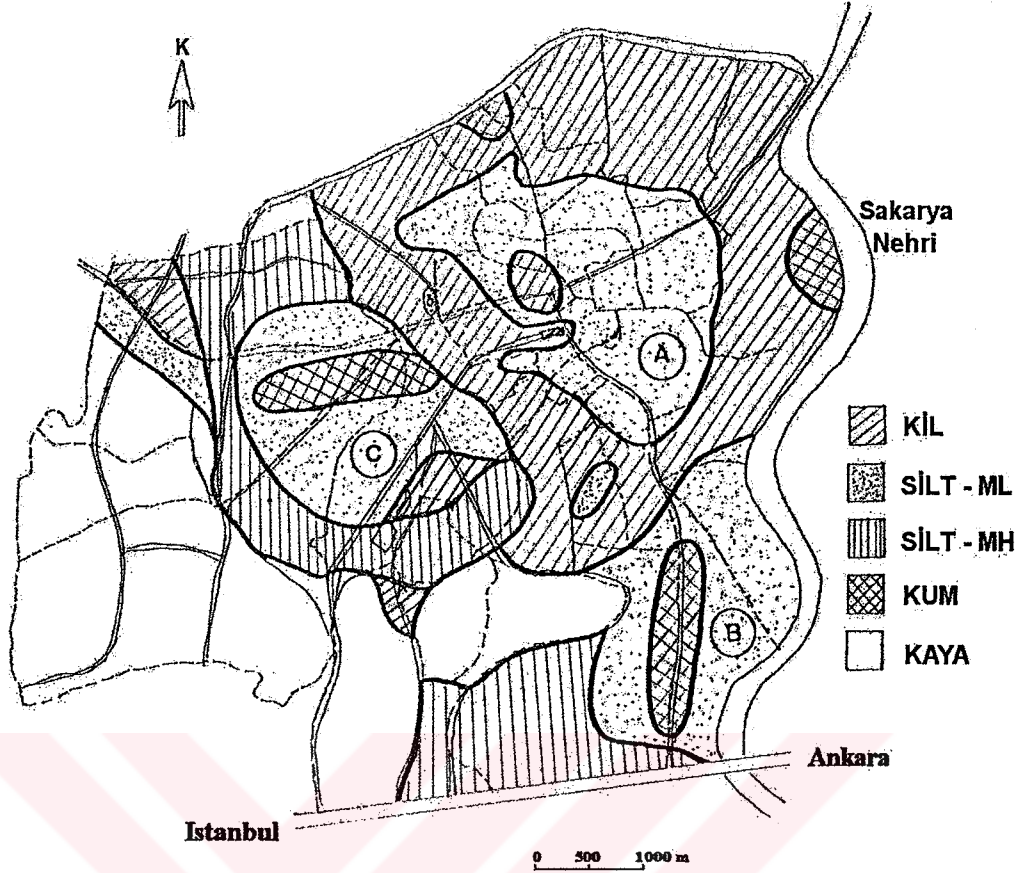
Adapazarı ve çevresinde görülen başlıca litolojik birimler şöyle özetlenebilir: Adapazarı'nın kuzeyindeki Armutluk Tepe (180 m) ve Sivri Tepe (236 m) gibi yüksek kısımlarda Devoniyen'e ait kırmızımsı mor kumlası ve kuvarsitler bulunmaktadır. Adapazarı kentinin güneybatısında Kuzeyde Gökçeören Ovası ve Güneyde Sapanca Çukuru ile sınırlı tepelik bir saha bulunmaktadır. Adapazarı Ovasına doğru bir burun gibi sokulan bu bölge Üst Kretase'ye ait marnlı ve kumtaşlı kalkerlerden ibarettir. Batıda Serdivan'dan itibaren başlayan Eosen flişi bu Üst Kretase oluşukları ile uyumsuz olarak bulunur. Serdivan kuzeyinde ise Üst Kretase oluşukları üzerinde bazalt, aglomera ve tüflerden ibaret bir volkanik birlik bulunur. Adapazarı ve çevresinin büyük bir kısmını Sakarya ve Mudurnu nehirlerinin getirdiği çakıllı ve siltli kumlar içeren Kuvaterner alüvyon birikintileri oluşturur. Ova

kenarlarında düşük olan alüvyon kalınlığı, ova ortalarına doğru 1100 m kalınlığa ulaşmaktadır. Genellikle çakıl-kum-silt serileri devamlı bir şekilde görülür. Bu birikintiler mercekli veya bant şeklinde düşük plastisiteli kil ve silt serileri içerirler. Kil, kum, çakıl ve silt bazen tek başlarına belli seviyelerde bazen de bunların değişik kombinasyonları şeklinde aralanmalı olarak görülmektedir. Türkiye kuzeyinde doğudan-batıya uzanan Kuzey Anadolu Fayı'ndan dolayı tektonik açıdan aktif bir konumdadır. Adapazarı kenti aynı zamanda kalınca bir alüviyal dolgu zeminde yer alması sebebiyle meydana gelmiş olan şiddetli depremlerden büyük hasar görmüştür. Jeoloji ve yerel zemin şartlarından dolayı, deprem esnasında sıvılaşma potansiyeli açısından da büyük kaygı uyandırmaktadır (Önalp ve Bol, 1998).

Şekil 3.5'de Adapazarı şehir planı verilmiştir. Adapazarı şehri Sakarya havzası içerisinde bulunmaktadır. Şehrin bazı kısımları tepelik şeklinde olsa da genelini Sakarya havzası oluşturmaktadır. Havzadaki alüvyon zeminler Sakarya nehri ve Çark deresi tarafından taşınmıştır. Siltli veya killi yüzey tabakalarının kalınlığı yaklaşık olarak 3 m'den başlayıp şehrin kimi yerlerinde 15 m'ye kadar ulaşmaktadır (Erken, 2001b).

Adapazarı şehrinde meydana gelen zemin etkilerini ve sıvılaşma olayını yakından anlamak için, depremden sonra bina bazında zorunlu hale getirilen, çeşitli kişi ve kurumlar tarafından yaptırılan 1000'ün üzerinde zemin sondajından ve bunların deney sonuçlarından faydalanılmıştır.

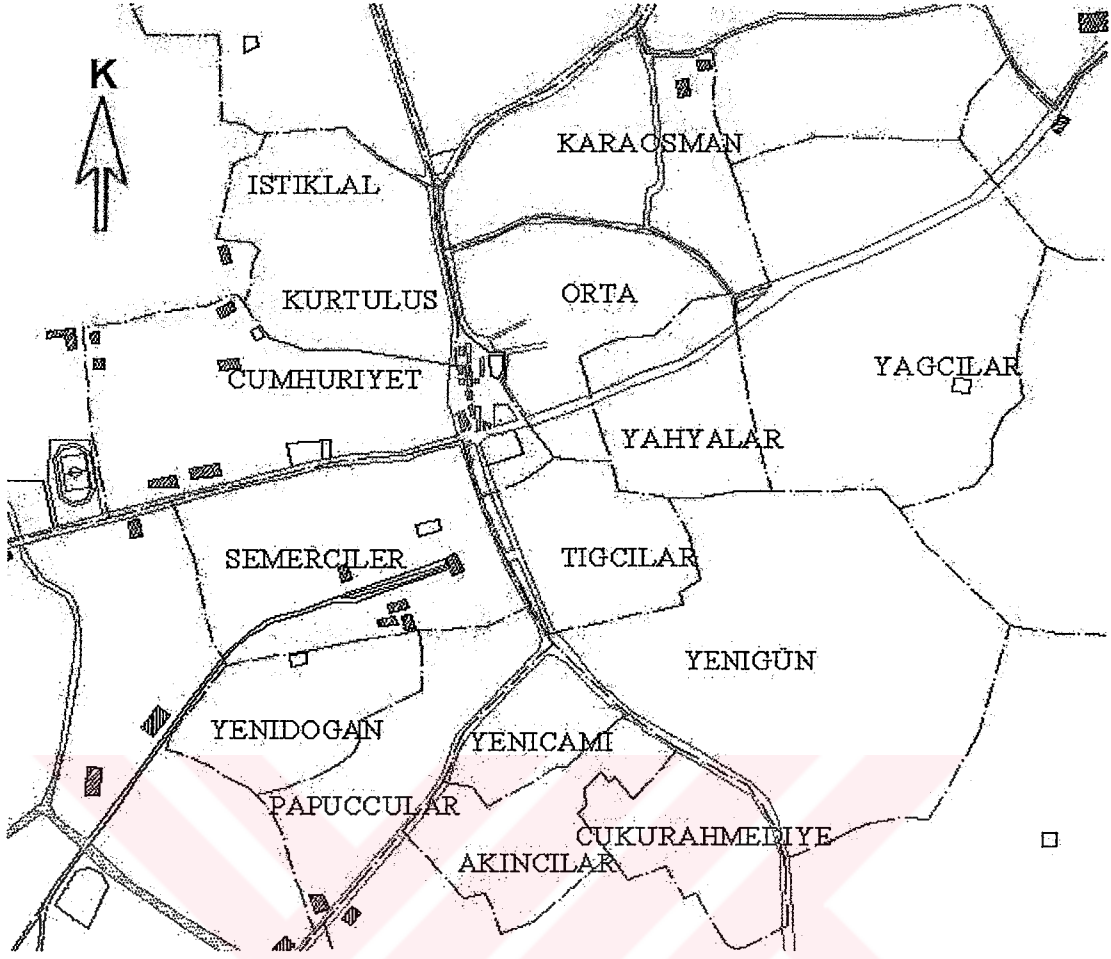
Şekil 3.5'de Erken (2001b)'ye göre zemin verilerine dayanılarak oluşturulan Adapazarı şehrinin yüzeyden yaklaşık 15 m derinliğe kadar olan yüzey tabakalarının ayrımı görülmektedir. Plastik olmayan veya düşük plastik özelliği olan silt tabakaları şehrin merkezinde yer almaktadır. Bu tabakalaşma A bölgesi olarak şekil üzerinde belirtilmiştir. Bu bölge içerisinde silt içerisinde kum yoğunluğu bazı yerlerde % 50 mertebesine kadar çıkmaktadır. Hasarın yoğun olarak gözlemlendiği bu bölgenin yerel zemin koşulları bu tez konusu kapsamında yer almaktadır.



Şekil 3.5 Adapazarı şehrinin ilk 15 m derinlikteki yüzey tabakaları (Erken, 2001b).

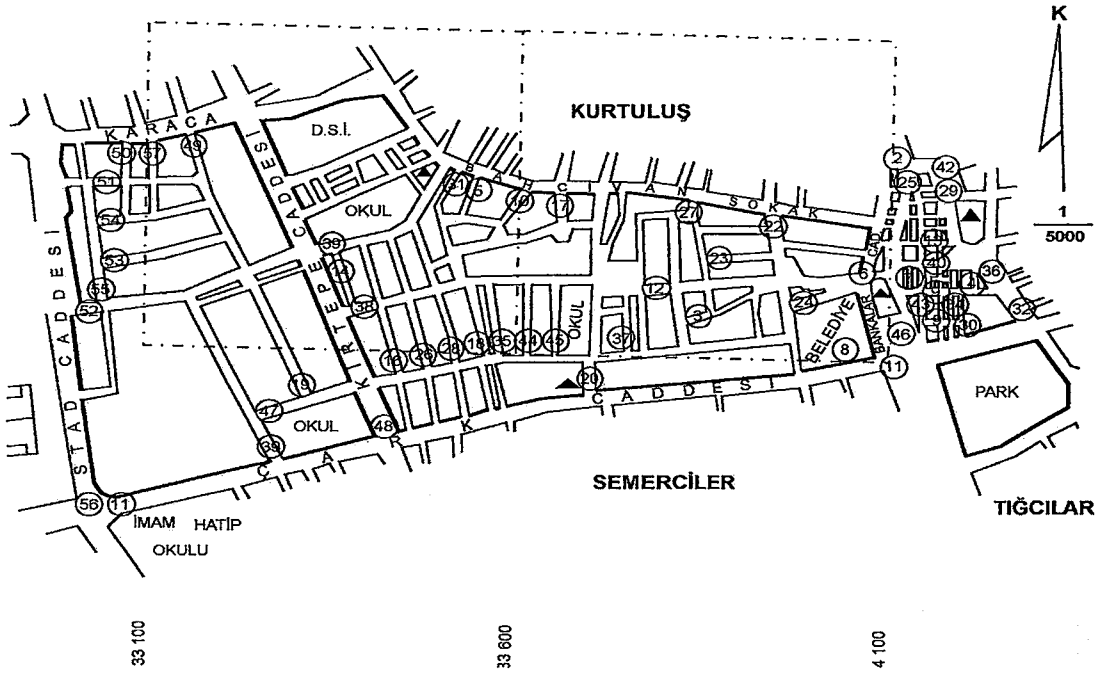
3.4 Adapazarı'nda Sıvılaşmanın Sıklıkla Gözlendiği Mahallerin Yerel Zemin Koşulları

Bu tez kapsamında Adapazarı'nda zemin sıvılaşmasının en çok görüldüğü, Şekil 3.3'de verilen A bölgesindeki mahallelerin yerel zemin koşulları üzerinde durulacaktır. A bölgesi olarak belirtilmiş olan kısımda 15 mahalle yer almaktadır. Bunların yerleşimi Şekil 3.7'de verilmiştir. Bu bölgedeki 3 mahalle İstiklal, Cumhuriyet ve Tığcılar bu tezin araştırma alanı olarak seçilmiştir.



Şekil 3.6 Adapazarı'nda en çok hasara uğrayan mahalleler.

3.4.1 Cumhuriyet Mahallesi



Şekil 3.7 Cumhuriyet mahallesi.

Tablo 3.2 Cumhuriyet mahallesi sokak isimleri.

No	Sokak İsmi	No	Sokak İsmi	No	Sokak İsmi
1	Arabacılar Çarş.	20	Kanarya Sokak	39	Tümen
2	Ağa Cami	21	Kasaplar Çarş.	40	3. Geçit
3	Annem Sokak	22	Kayı	41	Usta
4	Aynalı Kavak	23	Kiraz	42	Unkapanı Çarş.
5	Basık Sokak	24	Kolağası	43	Uzun Çarş.
6	Bankalar Cad.	25	Kuyumcular Çarş.	44	Yakın Sokak
7	Bakırcılar Çarş.	26	Menekşe Sokak	45	Yalı
8	Belediye Meydanı	27	Onat	46	Yazan Çarş.
9	1. Geçit	28	Papatya	47	Yasemin Sokak
10	Çalım Sokak	29	Pirinç Pazarı	48	Sedat Kirtetepe
11	Çark Cad.	30	Sebzeciler Çarş.	49	Bal Sokak
12	Dr. Kamil Sokak	31	Serpil Sokak	50	Bilen
13	4. Geçit	32	Soğan Pazarı	51	Birlik Sokak
14	Fikret Sokak	33	Şal Sokak	52	Değerli
15	Fulya	34	Tenekeçiler Çarş.	53	Nadir
16	Gökalp	35	Telli Sokak	54	Pancar
17	Hatip	36	Ticaret Sarayı	55	Sefa
18	Hüseyin Rahmi	37	Toplu Sokak	56	Stad
19	2. Geçit	38	Tül	57	Yel Sokak

Bu mahallede yerel zemin durumu ekseriyetle, üst kısımlarda düşük plastisiteli silt ve/veya plastik olmayan siltten ve bu tabakanın altında da siltli kumdan oluşmaktadır. Ancak bazı kesimlerde üstte yaklaşık 3-3,5 m'ye kadar kil, bunun altında silt veya kum yer almakta olup kil, silt ve kumun ardalı olarak tabakalar halinde bulunduğu birçok kesit söz konusudur. Bu mahallede yapılan sondajlarla ilgili ayrıntılı çalışma bir sonraki bölümde verilecektir.

Cumhuriyet Mahallesinin numunelerinden zeminin γ_n 'inin 1,79 gr/cm³ olduğu anlaşılmaktadır.

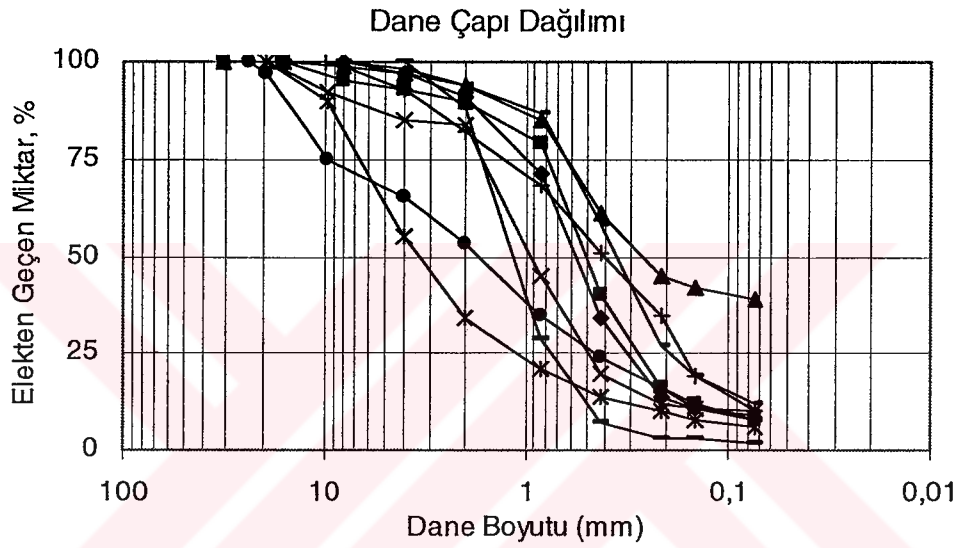
Cumhuriyet Mahallesi'nde genellikle üstte yer alan silt tabakalarının ya plastik değil yada I_p 'sinin %3-8 aralığında değişik değerler aldığı görülmektedir. Kimi yerde zemin kesitini, üstte yaklaşık 3,5 m'ye kadar kil (I_p = %8-28), bunun altında silt (I_p = %0-8) ve/veya kum, en alt kısımda da ekseriyetle ince dane miktarı (İ.D.O.) %7-39 olan kum oluşturmaktadır.

YASS mevsimsel olarak yağış miktarına göre değişim göstermekte olup yaklaşık olarak 1,0 m dolayındadır. Likit limit değerleri ekseriyetle su muhtevalarına ya çok yakın ya da kimi kısımlarda az miktarlarda da olsa onlardan büyük veya küçüktür.

Zeminin γ_n 'i 1,75-1,98 gr/cm³ aralığında değişmektedir.

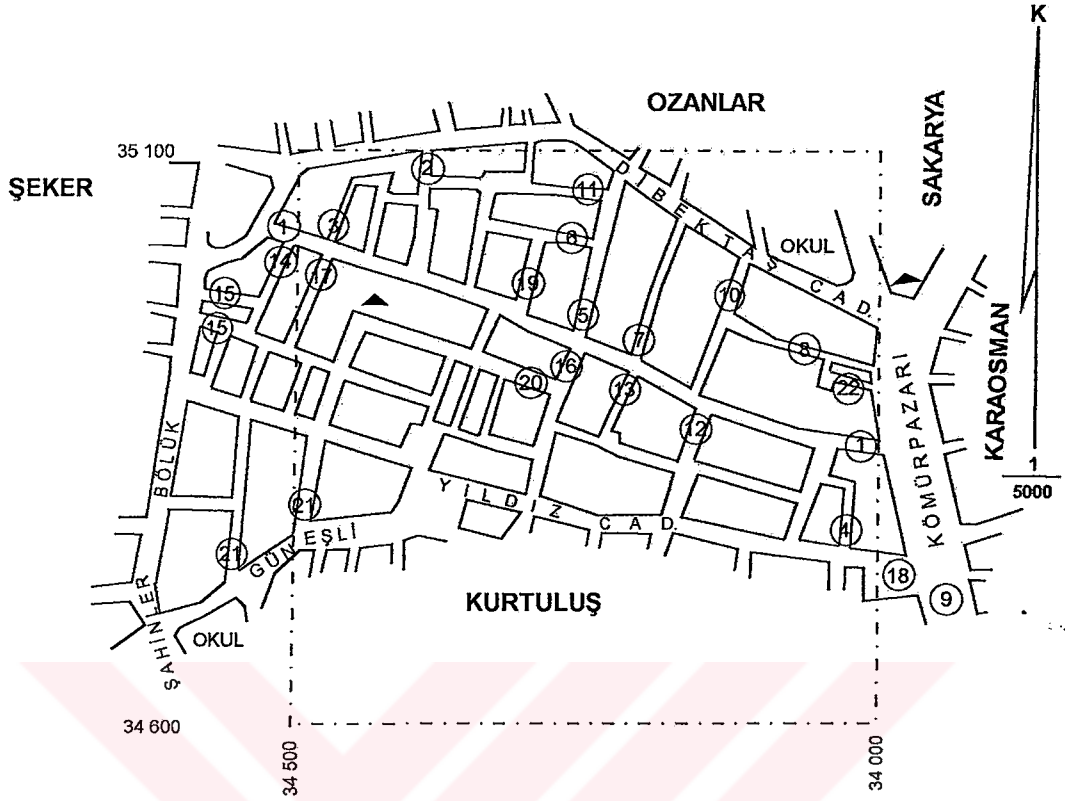
Suya doymun kumlar için kayma mukavemeti açısı (ϕ) 22° olarak, suya doymun killer için ise kohezyon değeri (c) 47-66 kN/m² aralığında bulunmuştur.

Cumhuriyet mahallesinde yapılan sondajlardan elde edilen numunelerden siltli ve/veya kumlu zeminler üzerinde yapılan elek analizinden elde edilen dane çapı dağılımı aşağıda Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 Cumhuriyet mahallesinde açılan sondajlardan silt-kum zeminlerde yapılan elek analizlerinden elde edilen dane çapı dağılımı (Okan R., 2001).

3.4.2 İstiklal Mahallesi



Şekil 3.9 İstiklal mahallesi.

Tablo 3.3 İstiklal mahallesi sokak isimleri.

No	Sokak İsmi	No	Sokak İsmi	No	Sokak İsmi
1	Aydın Sokak	9	Kömürpazarı Cad.	17	Yay
2	Bağ	10	Melik Sokak	18	Yıldız Cad.
3	Çerez	11	Melal	19	Yonca Sokak
4	Çeşme	12	Pilavcı	20	Zembil
5	Çimen	13	Sağlam	21	Kartal
6	Biçer	14	Sırım	22	Bayram
7	Derin	15	Şeref		
8	Karanfil	16	Tüten		

Bu mahallede yerel zemin durumu ekseriyetle, üst kısımlarda düşük plastisiteli silt ve/veya plastik olmayan siltten ve bu tabakanın altında da siltli kumdan oluşmaktadır. Ancak bazı kesimlerde üstte yaklaşık 4 m'ye kadar kil, bunun altında silt veya kum yer almakta olup silt ve kumun ardalı olarak tabakalar halinde bulunduğu birçok profil söz konusudur. Bu mahallede yapılan sondajlarla ilgili ayrıntılı çalışma bir sonraki bölümde verilecektir (Okan R., 2001).

İstiklal Mahallesiinde genellikle üstte yer alan silt tabakalarının I_p 'sinin %0-14 aralığında değişik değerler aldığı görülmektedir. Kimi yerlerde zemin kesitinin üstte yaklaşık 4,0 m'ye kadar kil (I_p = %12-20) bulunmaktadır. Zemin kesitlerinde silt (I_p = %0-14) ve kum (İ.D.O. = %5-46) ardalı olarak bulunduğu gibi silt tabakası üstünde kum tabakası şeklinde, sadece silt tabakası şeklinde veya sadece kil tabakası şeklinde de bulunabilmektedir.

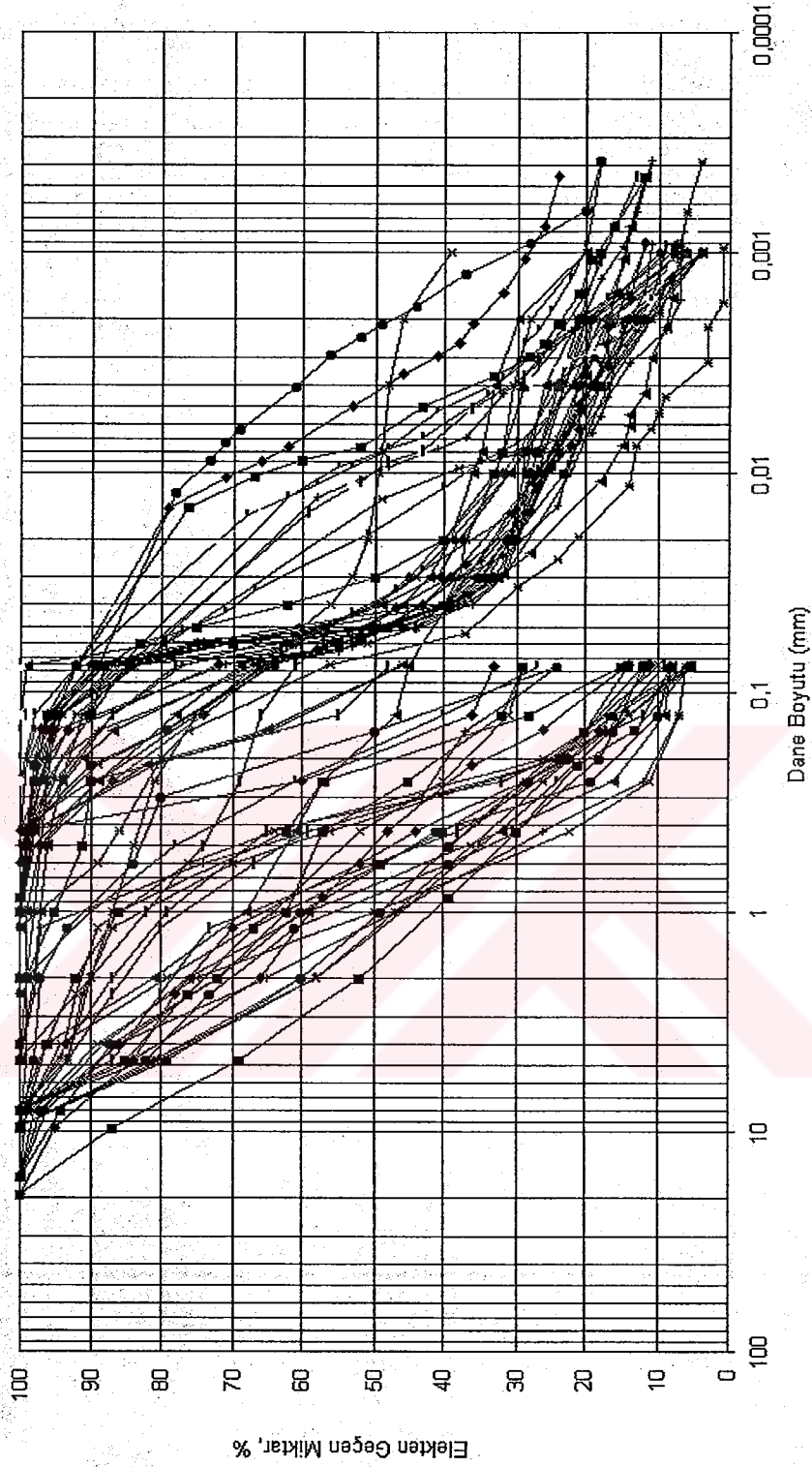
YASS mevsimsel olarak yağış miktarına göre değişim göstermekte olup yaklaşık olarak 0,70-2,92 m dolayındadır. Likit limit değerleri ekseriyetle su muhtevalarından büyüktür.

Zeminin genel olarak γ_n 'i 1,74-2,10 gr/cm³ aralığı dolayındadır.

Suya doymun siltler için kayma mukavemeti değerleri (ϕ) 4-15° şeklinde bulunmuştur.

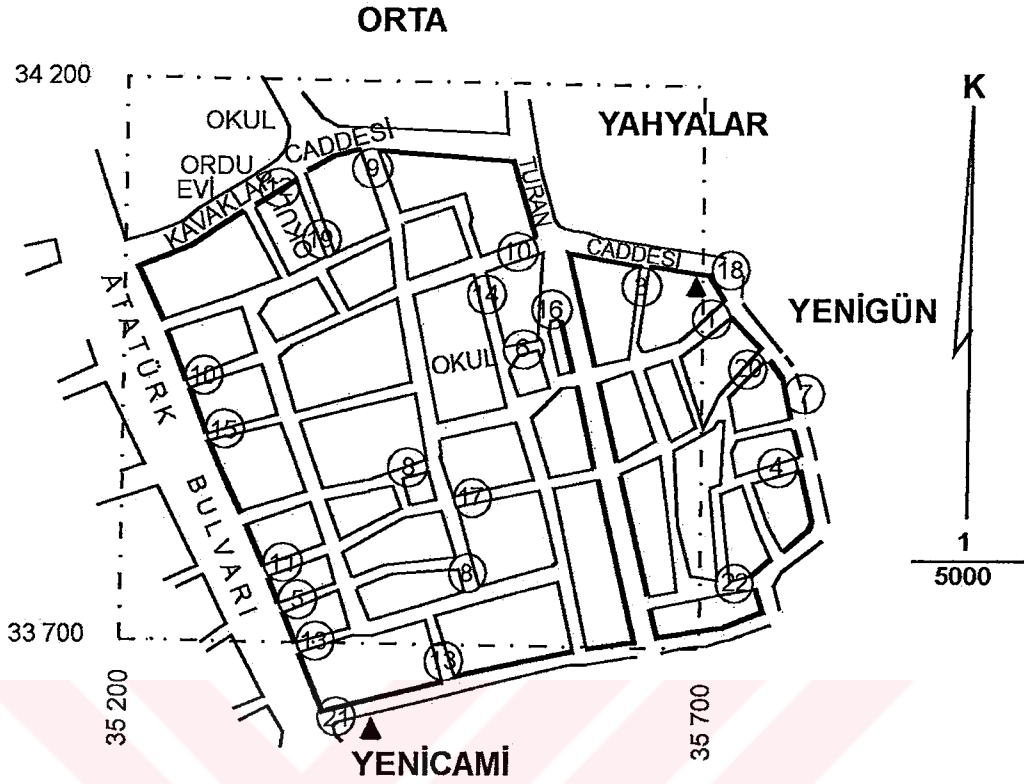
İstiklal mahallesinde yapılan sondajlardan elde edilen numunelerden siltli ve/veya kumlu zeminler üzerinde yapılan elek analizinden elde edilen dane çapı dağılımı aşağıda Şekil 3.10'da verilmiştir. (Okan R., 2001).

Dane apı Dağılımı



Şekil 3.10 İstiklal mahallesinde açılan sondajlardan silt-kum zeminlerde yapılan elek analizlerinden elde edilen dane çapı dağılımı.

3.4.3 Tıǒcılar Mahallesi



Şekil 3.11 Tıǒcılar mahallesi.

Tablo 3.4 Tıǒcılar mahallesi sokak isimleri.

No	Sokak İsmi	No	Sokak İsmi	No	Sokak İsmi
1	Akça Sokak	9	İpek	17	Pamuklar
2	Atatürk Bulvarı	10	Karaosman	18	Turan Caddesi
3	Çetin Sokak	11	Kadir Hoca	19	Tekin Sokak
4	Diken	12	Kavaklar Caddesi	20	Yağcıoğlu
5	Döner Geçit	13	Keşçi Sokak	21	Yenicami
6	Duyar	14	Kol	22	Yunusağa
7	Hasırcılar	15	Küçükosman		
8	İnce	16	Müftü		

Bu mahallede yerel zemin durumu ekseriyetle, üst kısımlarda düşük plastisiteli silt ve/veya plastik olmayan siltten ve/veya siltli kumdan, bu tabakanın altında da siltli kumdan veya düşük plastisiteli kilden (CL) oluşmaktadır. Ancak bazı kesimlerde üstte kil, bunun altında silt veya kum yer almakta olup silt ve kum ardalı olarak tabakalar halinde bulunmaktadır. Bu mahallede yapılan sondajlarla ilgili ayrıntılı çalışma bir sonraki bölümde verilecektir

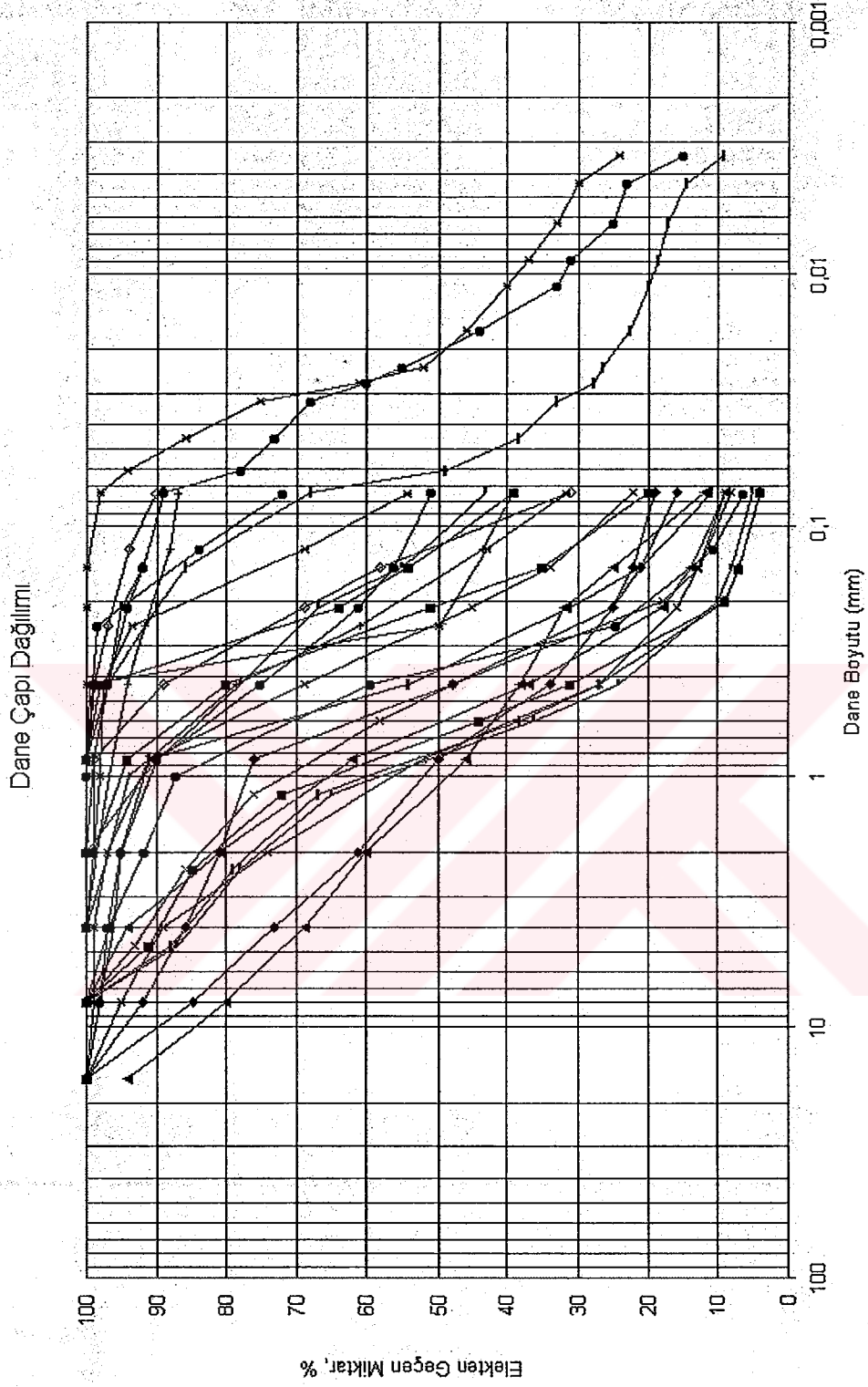
Tığcılar Mahallesiinde genellikle üstte yer alan silt tabakalarının I_p 'sinin %0-12 aralığında değişik değerler aldığı görülmektedir. Plastik olmayan ML en çok görülen üst tabakalardandır. Kimi yerde zemin kesitinde üstte yaklaşık 5,0 m - 6,0 m'ye kadar kil (CL) (I_p = %9-26) bulunmaktadır. Zemin kesitlerinde silt (I_p = %0-15) ve kum (İ.D.O. = %4-44) ardalı olarak bulunduğu gibi kum tabakası üstünde silt tabakası şeklinde de bulunabilmektedir.

YASS mevsimsel olarak yağış miktarına göre değişim göstermekte olup yaklaşık olarak 0,70-2,70 m aralığı dolayındadır. Likit limit değerleri su muhtevalarından büyük olabildiği gibi yüzey tabakalarında likit limitten küçük olduğu da yaygın olarak görülen bir durumdur.

Zeminin genel olarak γ_n 'i 1,70-2,00 gr/cm³ aralığı dolayındadır.

Suya doymun kil (CL) için kohezyon değeri 19 - 47 kg/cm² aralığında, suya doymun silt (ML) için kayma mukavemeti değeri 11° ve kohezyon değeri de 3 kg/cm² olarak bulunmuştur. (Okan R., 2001).

Tığcılar mahallesinde yapılan sondajlardan elde edilen numunelerden siltli ve/veya kumlu zeminler üzerinde yapılan elek analizinden elde edilen dane çapı dağılımı aşağıda Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12 Tığcılar mahallesinde açılan sondajlardan silt-kum zeminlerde yapılan elek analizlerinden elde edilen dane çapı dağılımı.

İlerleyen bölümlerde bu 3 mahallede yapılan sondajların sonuçlarını ve bu sonuçlar ışığında sıvılaşma analizinde kullanılan parametreleri ve bunların sıvılaşma potansiyeline olan etkileri anlatılacaktır. Ekler bölümünde çalışma bünyesinde oluşturulmuş sıvılaşma parametrelerinin derinliğe, ince dane oranına, SPT değerlerine göre sınıflamış halini bulabilirsiniz.



4. ZEMİNLERİN SIVILAŞABİLİRLİĞİNE İNCE DANE ORANI VE PLASTİSİTENİN ETKİSİ

4.1 Giriş

Bu bölümde, önceki bölümlerde jeolojik, coğrafi ve fiziksel özellikleri anlatılan Adapazarı bölgesindeki İstiklal, Tığcılar ve Cumhuriyet mahallelerinin de yapılmış sondajlardan elde edilen örselenmiş zemin numunelerinden derlenen zemin verileri değerlendirilmiştir. Bu verilerin ışığında mahallelere ait sıvılaşma analizleri Seed ve diğ.,2001 yöntemiyle yapılmıştır. Ayrıca Adapazarı bölgesi, Kaya ve diğ.,(2002), İzmir-Çiğli bölgesi Ülker.,(2004) ve Erken ve Ülker.,(1994, 2004) Seed ve diğ.,(1985), Yoshimi ve diğ.,(1989) çalışmalarından derlenen örselenmemiş numunelerin dinamik dirençleri çalışmaya eklenmiş ve arazide gözlenen sıvılaşma davranışı ile karşılaştırılmıştır. Örselenmiş ve örselenmemiş numunelerle yapılan analizler sonucu ortaya çıkan DKGÖ ve $(N_1)_{60}$ grafiklerine, ince dane oranı ve plastisitenin etkisi benzer SPT aralıkları, derinlik, kıvam gibi farklı parametreleri sırasıyla sabit tutulup araştırmaya katılmıştır.

4.2 Adapazarı Bölgesi İçin Maksimum Yer İvmesi Seçilmesi

Adapazarı'nda ağır hasara uğrayan bölge için yapılacak sıvılaşma analizlerinde kullanılacak maksimum yatay yer ivmesi değeri çeşitli ivme azalım bağıntıları kullanılarak elde edilen sonuçların değerlendirilmesi sonucunda bulunacaktır.

a) Joyner ve Boore (1981),

$$\log A = 0,249 * M_w - \log r - 0,00255 * r - 1,02 \mp 0,26 \quad (4.1)$$

$$r = \sqrt{D^2 + 7,3^2} \quad (4.2)$$

$5,0 \leq M_w \leq 7,7$ olmalıdır.

D : Fay kırığına en yakın mesafe (km)

A : Maksimum yatay yer ivmesi

M_w : Moment magnitüdü

$D \cong 5$ km

$$r = \sqrt{5^2 + 7,3^2} = 8,85 \text{ km}$$

$$M_w = 7,4 \text{ (USGS, DAD)}$$

$$\log A = 0,249 * 7,4 - \log 8,85 - 0,00255 * 8,85 - 1,02 \mp 0,26$$

$$\log A = -0,15 - 0,26 = -0,41 \quad A = 0,39 \text{ g}$$

b) Fukushima ve Tanaka (1990),

$$\log A = 0,41 * M_s - \log(R + c(M_s)) - 0,0034 * R - 1,69 \mp 0,21 \quad (4.3)$$

$$c(M_s) = 0,032 * 10^{0,41 * M_s} \quad (4.4)$$

R : Fay kırığına en yakın mesafe (km)

A : Maksimum yatay yer ivmesi

M_s : Yüzey dalgası magnitüdü

$6,0 \leq M_s \leq 7,9$ olmalıdır.

$M_s = 7,8$ (USGS'den)

$R \cong 5 \text{ km}$

$$c(7,8) = 0,032 * 10^{0,41 * 7,8} = 50,48$$

$$\log A = 0,41 * 7,8 - \log(5 + 50,48) - 0,0034 * 5 - 1,69 \mp 0,21$$

$$\log A = -0,25 - 0,21 = -0,46$$

$$A = 0,35 \text{ g}$$

c) Ambraseys (1995),

$$\log(a_h) = -0,87 + 0,217 * M_s - 0,00117 * r - \log r \quad (4.5)$$

$$r = \sqrt{D^2 + h^2} \quad (4.6)$$

D : Deprem kaynağına olan uzaklık (km)

h : Odak derinliği (km)

a_h : Maksimum yatay yer ivmesi

$D \cong 5 \text{ km}$

$h \cong 17 \text{ km}$ (USGS'den)

$$r = \sqrt{5^2 + 17^2} = 17,72 \text{ km}$$

$$\log(a_h) = -0,87 + 0,217 * 7,8 - 0,00117 * 17,72 - \log 17,72$$

$$\log(a_h) = -0,45$$

$$a_h = 0,36 \text{ g}$$

d) Hu, Liu ve Dang (1996),

$$\ln(a_y / g) = 3,363 + 0,530 * M_w - 2,216 * \ln(R + 25) \quad (4.7)$$

R : Odak uzaklığı

a_y : Maksimum yatay yer ivmesi

$$R = \sqrt{D^2 + h^2} \quad (4.8)$$

D : Deprem kaynağına olan uzaklık (km)

h : Odak derinliği (km)

a_h : Maksimum yatay yer ivmesi

$$D \cong 5 \text{ km}$$

$$h \cong 17 \text{ km (USGS' den)}$$

$$R = \sqrt{5^2 + 17^2} = 17,72 \text{ km}$$

$$\ln(a_y / g) = 3,363 + 0,530 * 7,4 - 2,216 * \ln(17,72 + 25)$$

$$\ln(a_y / g) = -1,035$$

$$a_y / g = 0,36$$

$$a_y = 0,36 \text{ g}$$

e) Ansal (1999),

$$\log(a_y) = 0,33 * M_w - 0,00327 * R - 0,79 * \log R + 1,177 \quad (4.9)$$

R : Odak uzaklığı

a_y : Maksimum yatay yer ivmesi

$$R = \sqrt{D^2 + h^2}$$

$$R = \sqrt{5^2 + 17^2} = 17,72 \text{ km}$$

$$\log(a_y) = 0,33 * 7,4 - 0,00327 * 17,72 - 0,79 * \log 17,72 + 1,177$$

$$\log(a_y) = 2,575$$

$$a_y = 376 \text{ cm/sn}^2 = 0,38 \text{ g}$$

Tablo 4.1 Çeşitli ivme azalım bağıntılarıyla Adapazarı için bulunan maksimum yatay yer ivmesi değerleri.

İvme Azalım Hesap Yöntemi	Maksimum Yatay Yer İvmesi
Joyner ve Boore (1981)	0,39 g
Fukushima ve Tanaka (1990)	0,35 g
Ambraseys, N.N. (1995)	0,36 g
Hu, Liu ve Dang (1996)	0,36 g
Ansal (1999)	0,38 g

17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nde Adapazarı'nda Bayındırlık ve İskân Müdürlüğü'nde kaya üzerinde bulunan sismograftan Doğu-Batı doğrultusu için bulunan maksimum yatay yer ivmesinin 0,41 g olduğu ve de çeşitli ivme azalım bağıntıları kullanılarak bulunan maksimum yatay yer ivmeleri göz önüne alındığında sivilaşma analizleri için maksimum yatay yer ivmesi değeri yaklaşık olmak üzere 0,40 g olarak kabul edilmiştir. (Okan R.,2001)

4.3 Adapazarı'nda Arazideki Zeminlerin Sivilaşmaya Karşı Davranışları

Bu bölümde 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrası Adapazarı'nda sivilaşmanın yoğun görüldüğü, coğrafi özellikleri ve yerel zemin koşulları bölüm 3.4'de anlatılan İstiklal, Cumhuriyet ve Tıgıcılar mahallelerinin Seed ve diğ 2001 çalışmasına göre sivilaşma analizi yapılacaktır. Öncelikle deprem sonrası üç mahallede yapılan sondajlar derlenip, analizler yapılacak, zeminlerin endeks özellikleri ve bunların birbirleriyle olan ilişkileri grafikler ile açıklanacaktır. Sonrasında mahallelerin tüm verileri ortak bir tabloda toplanıp her üç mahalle için analiz tekrar yapılacak ve ortak sonuçlar gösterilecektir.

4.3.1 İstiklal Mahallesi için Sıvılaşma İncelemesi

4.3.1.1. İstiklal Mahallesindeki Zeminlerin Endeks Özellikleri

17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde sıvılaşmanın yoğun görüldüğü mahallelerden biri olan İstiklal Mahallesi ile ilgili derlenen arazi verileri ve deprem sonrası bu mahalledeki zemin incelemeleri sırasında yapılan sondajların özellikleri ve sondaj yapılan bölgelerin numaraları Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 İstiklal Mahallesinde Sıvılaşma Gözlenen Noktalardaki Sondajlar

Yer No	Sondaj No	Sondaj Derinliği (m)	Sıvılaşma Durumu
1	TAE-18	15	VAR
2	TAE-19	15	VAR
3	TAE-8	12	VAR
4	TAE-21	10	VAR
5	TAE-22	15	VAR
6	TAE-6	15	VAR
7	TAE-24	15	VAR
8	TAE-14	15	VAR
9	TAE-26	15	VAR
10	TAE-17	15	VAR
11	TAE-2	15	VAR
12	TAE-1	15	VAR
13	TAE-5	15	VAR
14	TAE-12	15	VAR
15	TAE1	15	VAR

İstiklal Mahallesinde sıvılaşma görülen bölgelerde yapılan sıvılaşma analizi Tablo 4.3’de gösterilmiştir. Bu tabloda gösterilen sıvılaşma analizinde bölüm 2.7.2’de açıklanan Seed ve diğ., 2001 yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 4.3 İstiklal Mahallesine ait zemin değerleri ve DKGO

Yer No	h(m)	D ₅₀	w _L	I _p	w _n	w _n /w _L	(N ₁) ₆₀	İDO	DKGO
1	1.75	0.0065	20	3	25	1.25	10.33	72	0.337
2	1.75	0.0290	0	0	22	—	10.33	75	0.337
3	1.75	0.5000	0	0	25	—	10.33	9	0.337
4	1.75	0.0420	27	5	28	1.04	7.23	69	0.337
5	1.75	0.0055	39	10	39	1.00	5.17	70	0.337
6	1.75	YOK	34	9	26	0.76	7.23	85	0.337
9	1.75	0.0370	0	0	30	—	8.27	79	0.337
10	1.75	0.0620	0	0	25	—	10.33	61	0.337
12	1.75	0.0170	30	7	30	1.00	11.37	89	0.337
13	1.75	0.0380	40	14	31	0.78	8.27	85	0.337
14	1.75	0.0550	0	0	23	—	7.23	56	0.337

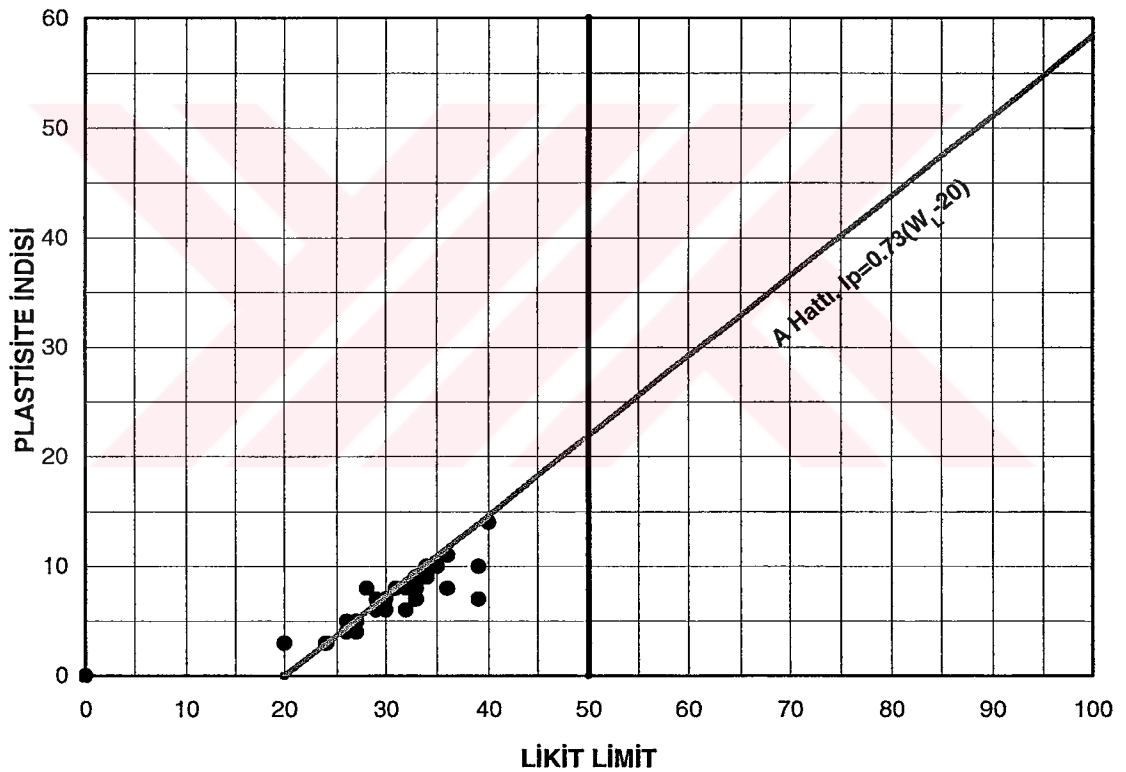
Tablo 4.3 İstiklal Mahallesine ait zemin değerleri ve DKGO(devam)

Yer No	h(m)	D ₅₀	w _L	I _p	w _n	w _n /w _L	(N ₁) ₆₀	İDO	DKGO
15	1.75	0.1500	0	0	24	—	6.20	27	0.337
8	2.75	0.0850	0	0	31	—	6.26	82	0.394
1	3.75	YOK	34	10	35	1.03	10.41	91	0.426
7	3.75	0.1800	0	0	34	—	16.01	33	0.426
3	3.75	0.0025	33	9	32	0.97	8.00	85	0.426
9	3.75	0.0130	29	7	24	0.83	4.80	89	0.426
10	3.75	0.0160	28	8	26	0.93	9.61	94	0.426
15	3.75	0.0400	33	7	37	1.12	6.40	65	0.426
2	4.25	0.0850	0	0	22	—	22.49	44	0.437
14	4.25	0.0550	0	0	28	—	11.24	71	0.437
3	5.25	0.0024	36	8	36	1.00	8.75	96	0.454
6	5.25	0.0510	33	8	27	0.82	13.53	83	0.454
12	5.25	0.0400	0	0	33	—	12.73	93	0.454
9	5.75	0.0120	26	5	24	0.92	7.67	90	0.459
1	6.25	YOK	33	9	31	0.94	14.07	100	0.464
10	6.25	0.0230	24	3	31	1.29	14.90	78	0.464
11	6.25	0.0046	0	0	28	—	21.52	95	0.464
7	6.25	0.2100	0	0	17	—	39.09	15	0.464
14	6.25	0.0200	27	4	28	1.04	14.86	100	0.464
3	6.75	0.0600	0	0	36	—	34.07	51	0.468
2	6.75	0.0400	0	0	24	—	22.71	73	0.468
6	6.75	0.0520	35	10	42	1.20	19.24	84	0.468
12	6.75	0.0400	29	6	32	1.10	14.43	97	0.468
12	7.75	0.0400	31	8	32	1.03	14.27	97	0.474
3	8.25	0.0450	0	0	29	—	23.62	74	0.476
1	8.75	YOK	33	9	47	1.42	11.47	63	0.478
2	8.75	0.0750	0	0	20	—	28.44	51	0.478
10	8.75	0.7500	0	0	10	—	31.15	17	0.478
7	8.75	0.7500	0	0	19	—	31.15	8	0.478
14	8.75	YOK	26	4	27	1.04	16.25	98	0.478
15	8.75	0.0400	32	6	28	0.88	7.45	69	0.478
6	9.25	0.0520	36	11	47	1.31	23.13	84	0.479
12	9.25	YOK	30	6	31	1.03	15.20	97	0.479
5	9.75	0.0540	39	7	28	0.72	17.77	78	0.480
6	10.75	0.0510	34	10	36	1.06	26.03	84	0.481
12	10.75	YOK	32	8	32	1.00	16.92	97	0.481
2	11.75	0.3000	0	0	20	—	19.19	14	0.481
7	11.75	1.0000	0	0	18	—	31.26	6	0.481
1	12.25	YOK	33	8	38	1.15	11.04	100	0.481
10	12.25	0.9000	0	0	10	—	30.67	11	0.481
14	12.25	YOK	0	0	15	—	33.74	9	0.481
15	12.25	0.0400	37	5	22	0.59	20.86	67	0.481
1	14.75	YOK	32	8	30	0.94	11.93	93	0.478
4	14.75	YOK	28	3	20	0.71	23.10	61	0.478
5	14.75	4.1000	23	5	30	1.30	10.74	26	0.478
6	14.75	0.0500	35	9	41	1.17	27.61	85	0.478
12	14.75	YOK	30	7	31	1.03	25.36	97	0.478

Elde edilen zemin verileri derinlik parametresine göre sıralanmıştır. Sıvılaşma analizi yapılırken yer ivmesi olarak 0.40g esas alınmıştır. Sondajlardan elde edilen SPT değerleri (N_{30}) bölüm 2.6.2.1 de anlatılan şekilde düzeltilmiş ve (N_1)₆₀ değerleri oluşturulmuştur.

Çalışmaya başlarken İstiklal Mahallesi'ne ait çok sayıdaki sondaj logunda ve zemin analiz verilerinden bir çoğunda eksik veya hatalı veriler olması sonucunda sondaj sayısı 15 ile sınırlı tutulmuştur.

Bu 15 sondajdan elde edilen veriler incelenmiş, içlerinden kil olanlar ayıklanmış ve genelinde silt ve kum numunelere ait veriler kullanılmıştır. Bunun için öncelikle plastiklik kartı oluşturulmuştur. Bu karta göre likit limiti 50'den düşük ve A hattının ($I_p = 0.73 (w_L - 20)$ doğrusunun) altında kalan numuneler araştırma kapsamına alınmıştır. Bu şartlar altında ortaya çıkan plastiklik kartı Şekil 4.1 de gösterilmiştir.



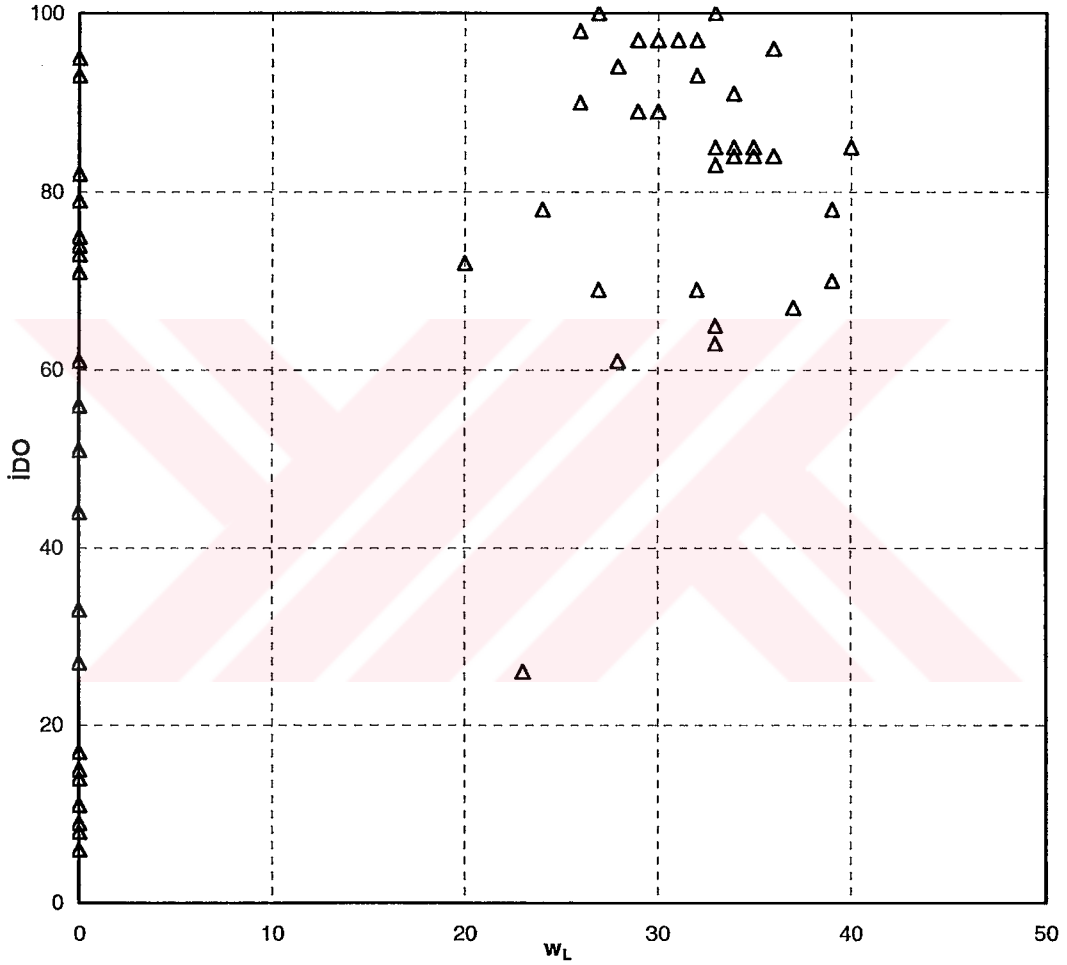
Şekil 4.1 İstiklal Mahallesi için Plastiklik Kartı

Bu mahalledeki seçilen sondajlardaki numuneler için plastik olmayan numuneler dışındaki numuneler için plastisite indisi 5 ile 20 arasında yer almaktadır, likit limitler ise 20 ile 40 arasında yer almaktadır. Bu eleme sonunda çalışmada kullanılan numune cinsleri birleştirilmiş zemin sınıflarına göre ML, OL, CL olduğu gözlenmektedir.

Araştırma kapsamında ince dane oranının sıvılaşmaya olan etkisini gözlemleyebilmek için ince dane oranının diğer zemin parametreleriyle olan

ilişkilerini incelemekte fayda vardır. Bu bağlamda ince dane oranının ($\dot{I}DO$), sırasıyla likit limit (w_L), plastik limit (w_p), tabii su muhtevası (w_n), plastisite indisi (I_p), ortalama dane çapı (D_{50}) ile olan ilişkileri incelenecek, ayrıca kıvamlar oranı (w_n/w_L) ile $(N_1)_{60}$ arasındaki ilişki gözlenecektir.

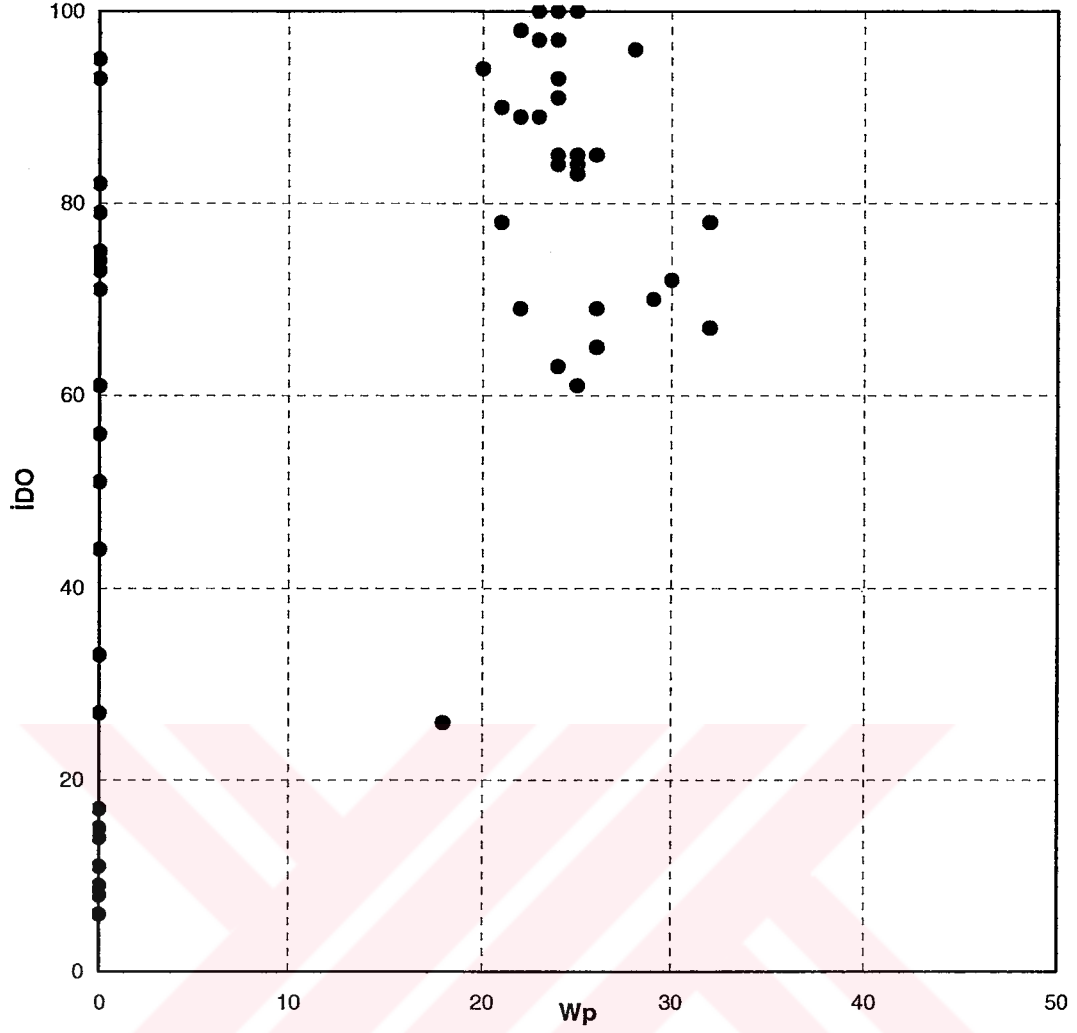
İnce dane oranının likit limitle olan değişimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. İnce dane oranının %5-%95 arasında değişen plastik olmayan siltlerde likit limit 0 olmakta, ince dane oranı 60’dan yüksek olan bir kısım zeminlerde ise likit limit 20 ile 40 arasında çıkmaktadır.



Şekil 4.2 İstiklal Mahallesi için w_L – $\dot{I}DO$ Grafiği

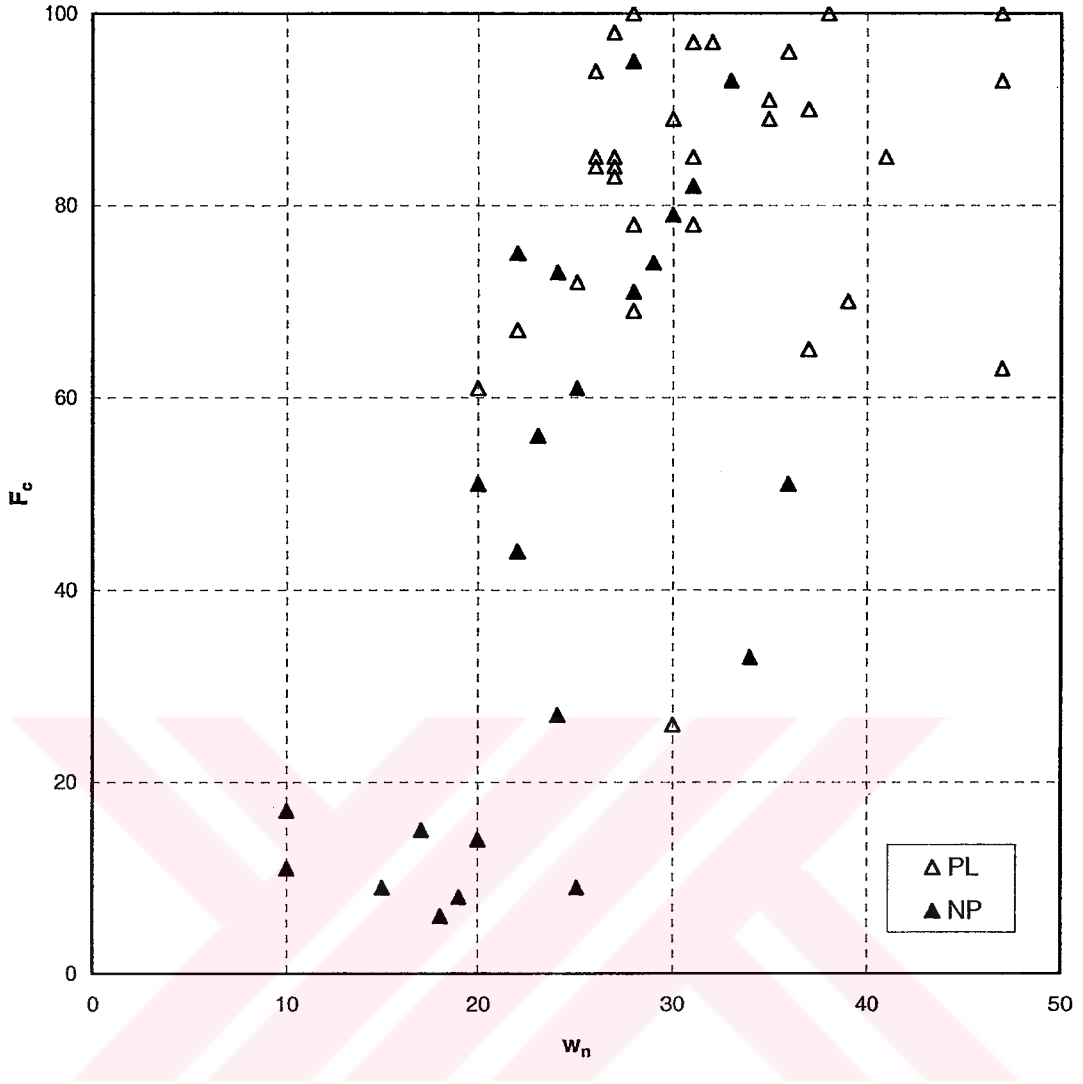
İnce dane oranı likit limit ilişkisinden net ve anlamlı bir korelasyon elde edilememektedir.

Benzer şekilde Şekil 4.3’de gösterilen ince dane oranı ile plastik limit arasında da bir net bir ilişki elde edilememekte olup sıvılaştıran zeminlerin bir kısmının plastik limitlerinin 20 ile 30 arasında değişim gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.3 İstiklal Mahallesi için w_p – İDO Grafiği

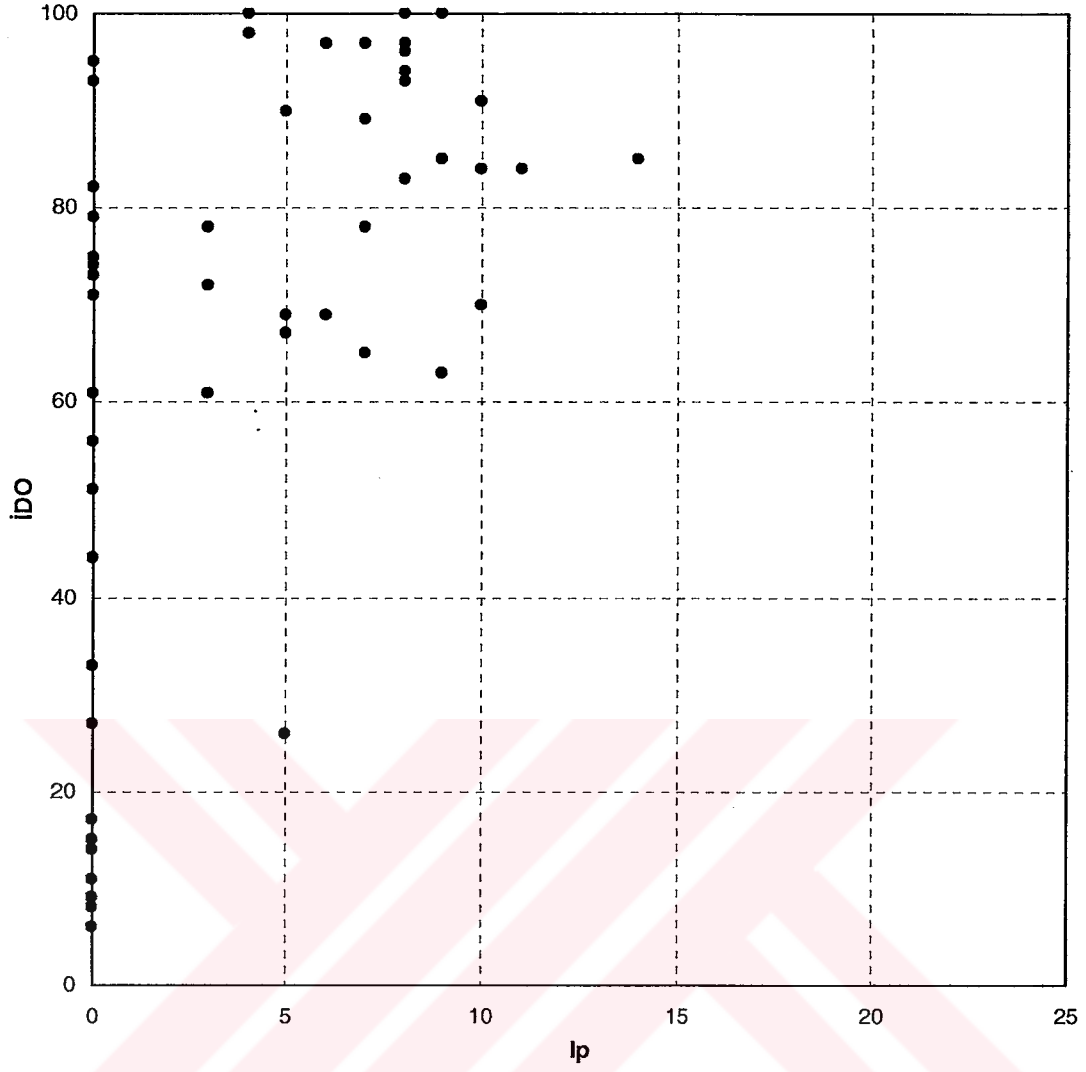
İnce dane oranının tabii su muhtevasıyla olan değişimini incelemek için Şekil 4.4 oluşturulmuştur. Plastik olmayan numunelerin davranışını ayrı olarak izlenmiş ve plastik numuneler ile farkı sunulmuştur. Bu grafikte de su muhtevasının artımına karşı ince dane oranlarının plastik ve plastik olmayan numuneler için de azalan eğimle arttığı gözlenmiştir. Numunelerin tabii su muhtevaları 10 ile 47 arasında, ince dane oranları 5 ile 100 arasında değişmektedir.



Şekil 4.4 İstiklal Mahallesi için w_n –İDO Grafiği

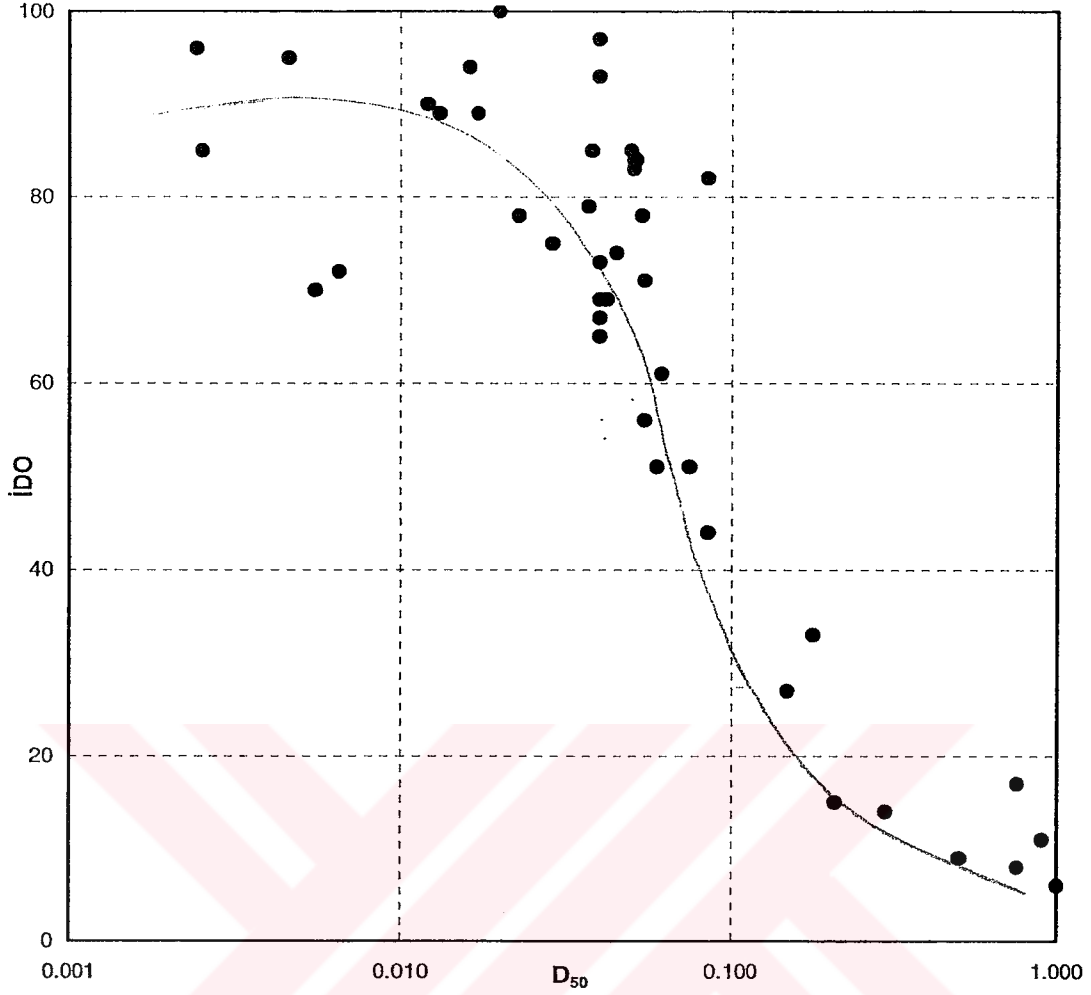
Plastik numunelerin, aynı tabii su muhtevalı plastik olmayan numunelere göre daha yüksek ince dane oranına sahip olduğu gözlenmektedir.

İnce dane oranının plastisite indisiiyle olan değişimi Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Bu grafik sıvılaşmaya etkileri araştırılan iki parametrenin birbirleriyle olan ilişkilerini sunmaktadır. Plastisite indisinin 15’den düşük numunelerle çalışılmış olup bu numunelerin belli bir plastisite indisine sahip kısmı ile ince dane oranı ilişkisinde net bir bağıntı ortaya koymak zordur.



Şekil 4.5 İstiklal Mahallesi için $I_p - \dot{I}DO$ Grafiği

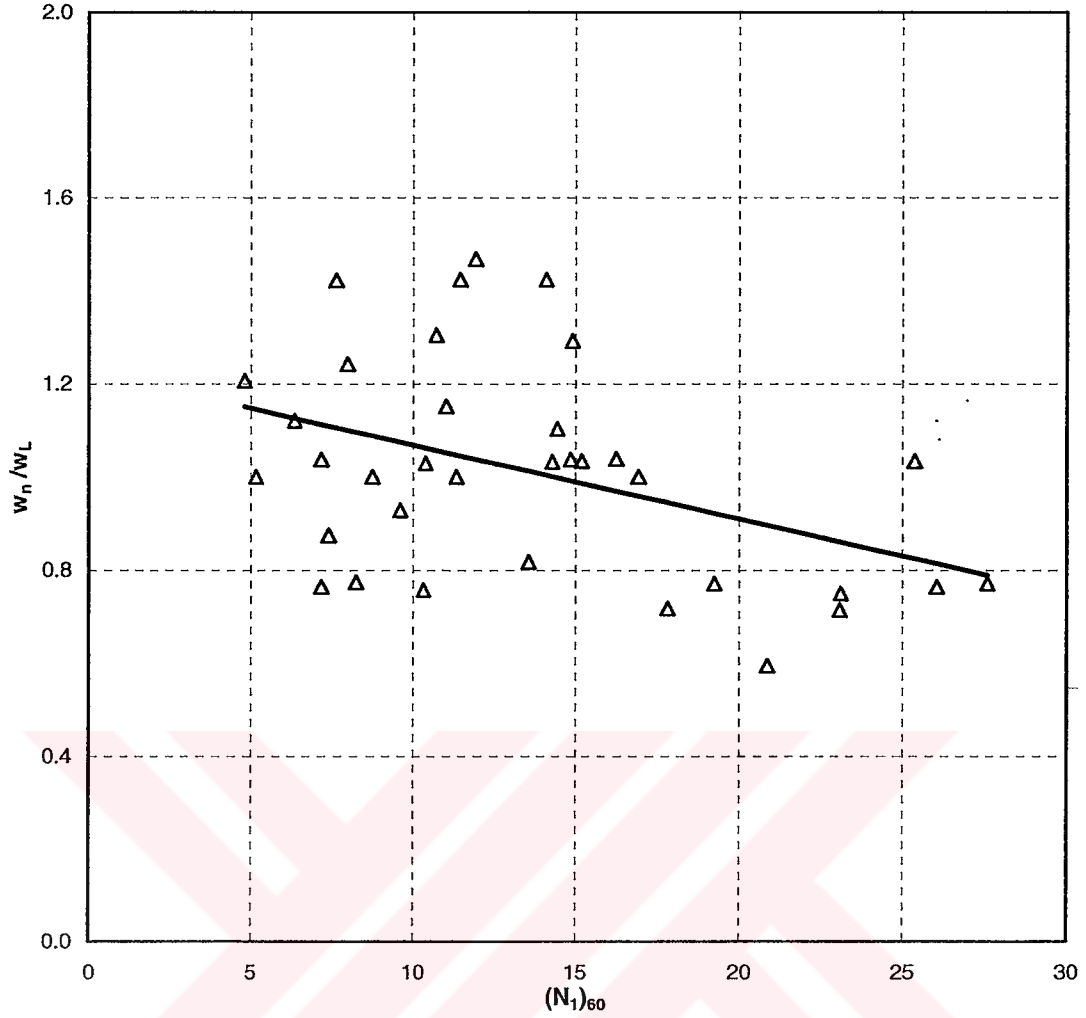
İnce dane oranının ortalama dane çapıyla olan değişimini gözleyebilmek için Şekil 4.6 oluşturulmuştur. Ortalama dane çapı genelde küçük değerler aldığı için değişimi net izleyebilmek için D_{50} değerleri için logaritmik eksen takımı seçilmiştir. Ortalama dane çapı elde edilemeyen numuneler grafikte gösterilmemiştir.



Şekil 4.6 İstiklal Mahallesi için D_{50} – İDO Grafiği

Bu grafikten ortalama dane çapları küçüldükçe ince dane oranlarının arttığını söyleyebiliriz. Grafikten çizilen 2.dereceden polinom eğrisi bu değişimi göstermektedir. Bu sonuç da zemin için beklenen bir durumdur. İnceleme yapılan zemin numunesi için ortalama dane çapları genel olarak 0.0025 ile 1.0cm arasında yer almaktadır.

İstiklal mahallesinde gözlenmesi gereken bir diğer olgu da zeminin kıvam oranının $(N_1)_{60}$ ile olan korelasyonudur. Bu korelasyon bize bölgede yapılmış olan zemin deneylerinin doğruluğu hakkında bilgi verir. Zemin kıvam oranının w_n/w_L 'nin 1 den büyük olduğu durumlarda zeminler çok yumuşak olup SPT değerlerinin çok düşük çıkması beklenir. Bu halde, $(N_1)_{60}$ değerlerinin w_n/w_L ile belli bir ters orantı içinde değişmesi gerekir. Şekil 4.7 de İstiklal Mahallesinden plastik olan numuneler derlenmiş ve grafik oluşturulmuştur.

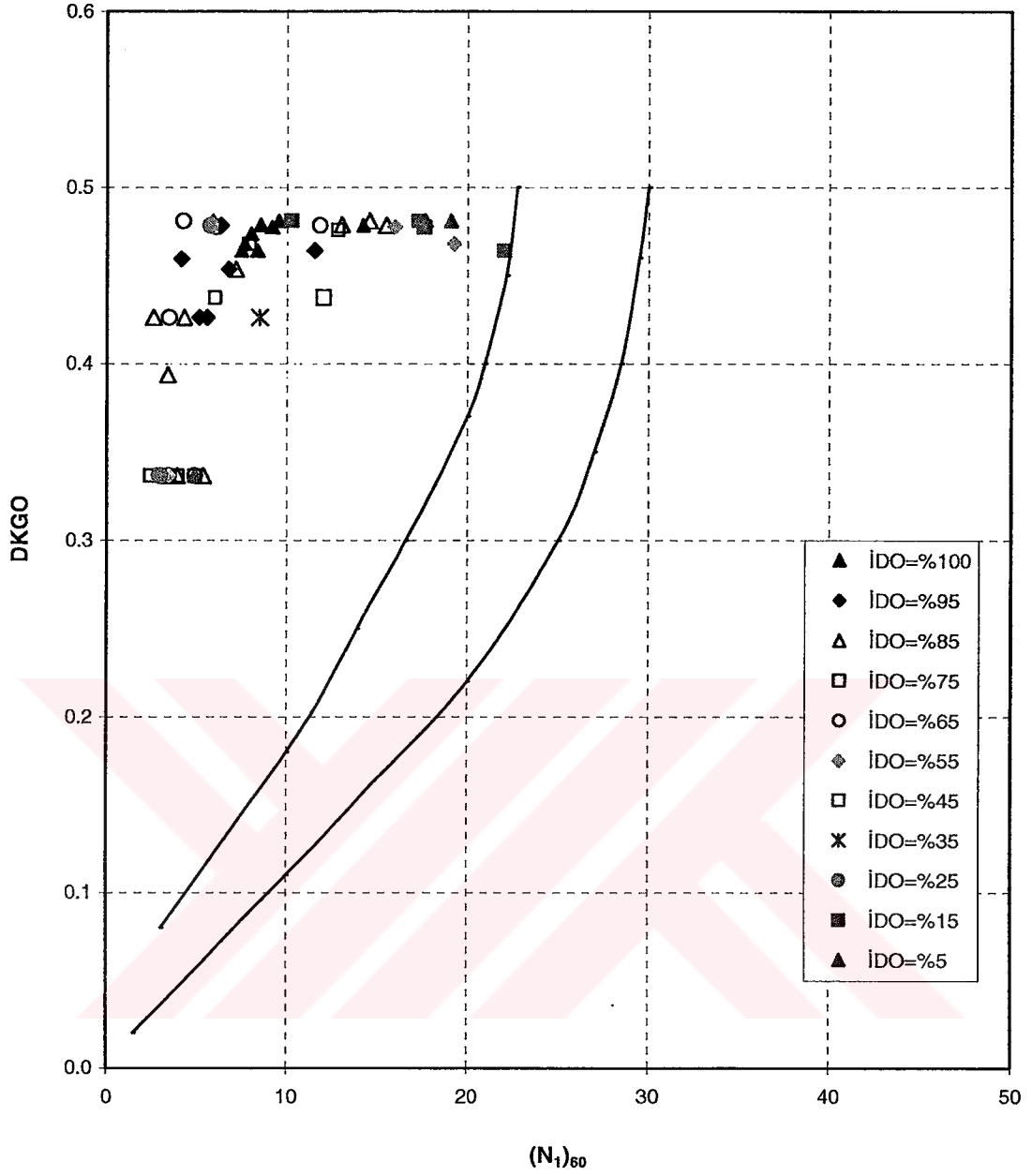


Şekil 4.7 İstiklal Mahallesi için $w_n / w_L - (N_1)_{60}$ Grafiği

Zemin numunelerinin w_n / w_L değerleri azaldıkça numunelerin $(N_1)_{60}$ değerlerinde beklenen bir artış gözlenmektedir. Bu durum yapılan zemin deneylerinin kalitesi hakkında bize fikir vermektedir. Bu grafiğin doğrusal olarak azalış göstermesi beklenirken bazı sapmaların olmasının ana sebeplerinden biri de numunelerin belli oranda silt ve kumlu numune içermesidir.

4.3.1.2 İstiklal Mahallesindeki Zeminlerin Deprem Sırasındaki Davranışları

İstiklal Mahallesinde 17 Ağustos 1999 İzmit depremi sırasında büyük sıvılaşma problemleri görülmüştür. İstiklal mahallesinden elde edilen veriler Tablo 4.3’de sunulmuştur. Bu tabloda dinamik kayma gerilme oranı tespitinde bölüm 2.7.2’de anlatılan deprem magnitudü 7.5 olan bir deprem için Seed ve diğ., 2001 yöntemi kullanılmıştır. Bu veriler ışığında İstiklal mahallesinin deprem sırasındaki davranışını ortaya koyan Dinamik Kayma Gerilme Oranı(DKGO) ve $(N_1)_{60}$ değerlerinin değişimi ince dane oranlarına göre sınıflandırılıp Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 İstiklal Mahallesi'nin Deprem Sırasında DKGO - $(N_1)_{60}$ Grafiği

İstiklal Mahallesi'nde seçilen sondaj noktalarının tümünde deprem sırasında sıvılaşma gözlenmiştir. Şekil 4.8'de gösterilen ince dane oranlarına göre sınıflanan grafikte ince dane oranları arttıkça sıvılaşmanın arttığı gözlenmektedir. Ayrıca NCEER 1997'den sonra çalışmada gösterilen %5, %15, %35 ince dane oranlarına ait DKGO eğrileri gösterilmiştir. Bu DKGO eğrilerine ilave eğriler çalışmanın son bölümünde gösterilecektir.

4.3.2. Cumhuriyet Mahallesi için Sıvılaşma İncelemesi

4.3.2.1. Cumhuriyet Mahallesindeki Zeminlerin Endeks Özellikleri

17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde sıvılaşmanın yoğun görüldüğü mahallelerden bir diğeri olan Cumhuriyet Mahallesi ile ilgili derlenen arazi verileri ve deprem sonrası bu mahalledeki zemin incelemeleri sırasında yapılan sondajların özellikleri ve sondaj yapılan bölgelerin numaraları Tablo 4.4’de gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Cumhuriyet Mahallesinde Sıvılaşma Gözlenen Noktalardaki Sondajlar

Yer No	Sondaj No	Sondaj Derinliği (m)	Sıvılaşma Durumu
1	TAE-11	15	VAR
2	TAE-10	15	VAR
3	TAE-2	12	VAR
4	TAE-21	10	VAR
5	TAE-1	15	VAR
6	TAE-23	15	VAR
7	TAE-24	15	VAR
8	TAE-5	15	VAR
9	TAE-6	15	VAR
10	TAE-9	15	VAR
11	TAE-8	15	VAR

Cumhuriyet Mahallesinde sıvılaşma görülen bölgelerde yapılan sıvılaşma analizi Tablo 4.5’de gösterilmiştir. Bu tabloda gösterilen sıvılaşma analizinde bölüm 2.7.2’de açıklanan Seed ve diğ., 2001 yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen zemin verileri derinlik parametresine göre sıralanmıştır.

Tablo 4.5 Cumhuriyet Mahallesine ait zemin değerleri ve DKGO

Yer No	h(m)	D ₅₀	w _L	I _p	w _n	w _n /w _L	(N ₁) ₆₀	İDO	DKGO
1	1.75	0.006	33	6	40	1.21	8.94	92	0.337
2	1.75	0.001	45	18	42	0.93	8.94	100	0.337
2	1.75	0.018	38	12	27	0.71	8.13	92	0.337
3	1.75	0.040	38	10	35	0.92	5.69	98	0.337
4	1.75	0.037	29	7	35	1.21	6.50	93	0.337
5	1.75	0.054	29	6	29	1.00	4.88	90	0.337
9	1.75	0.007	25	5	32	1.28	7.32	77	0.337
4	3.25	0.900	—	—	11	—	12.75	11	0.412
1	3.75	0.015	0	0	40	—	10.58	88	0.426
2	3.75	—	45	17	41	0.91	14.36	100	0.426
2	3.75	0.011	38	4	31	0.82	13.61	94	0.426
5	3.75	0.060	26	4	30	1.15	10.58	89	0.426

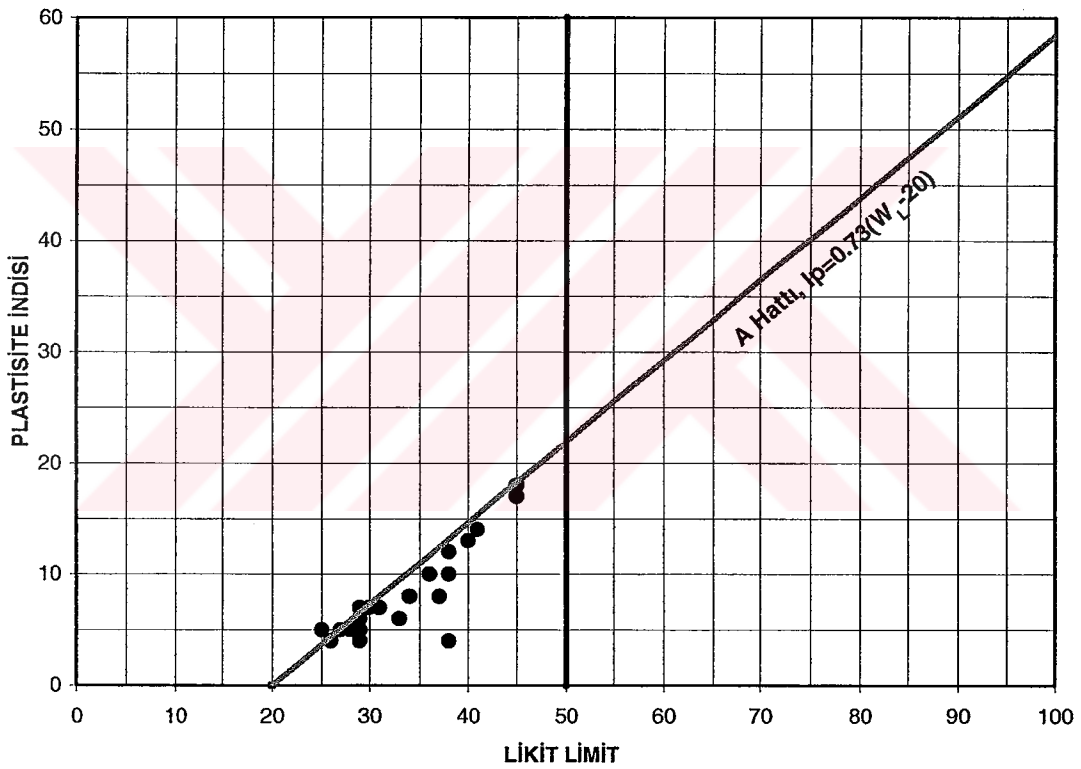
Tablo 4.5 Cumhuriyet Mahallesi'ne ait zemin değerleri ve DKGO (devam)

Yer No	h(m)	D ₅₀	w _L	I _p	w _n	w _n /w _L	(N ₁) ₆₀	İDO	DKGO
6	3.75	0.050	34	8	35	1.03	8.32	87	0.426
8	3.75	0.040	37	8	34	0.92	6.05	87	0.426
9	3.75	—	—	—	30	—	12.85	84	0.426
2	4.75	0.160	0	NP	21	—	21.12	2	0.446
4	4.75	2.400	—	—	7	—	39.11	6	0.446
7	4.75	—	41	14	32	0.78	7.04	65	0.446
11	4.75	0.050	0	NP	26	—	3.13	61	0.446
1	5.25	0.009	29	5	36	1.24	14.28	86	0.454
5	5.25	0.050	27	5	30	1.11	15.91	95	0.454
6	5.25	0.050	31	7	34	1.10	6.01	87	0.454
2	5.75	0.350	—	—	19	—	30.41	11	0.459
2	6.25	0.300	0	NP	19	—	41.39	2	0.464
8	6.25	0.045	29	4	26	0.90	30.63	70	0.464
11	6.25	—	0	NP	39	—	4.14	94	0.464
10	6.25	0.160	0	NP	22	—	41.39	32	0.464
9	6.25	0.007	31	7	36	1.16	12.42	83	0.464
1	6.75	0.012	0	NP	28	—	16.65	78	0.468
3	6.75	—	—	—	24	—	40.08	17	0.468
5	6.75	0.420	—	—	17	—	17.63	12	0.468
6	6.75	0.160	—	—	23	—	21.64	19	0.468
2	7.75	0.450	—	—	13	—	37.79	10	0.474
7	7.75	—	40	13	29	0.73	7.56	62	0.474
11	7.75	0.150	0	NP	23	—	25.69	28	0.474
10	7.75	0.230	0	NP	21	—	23.43	20	0.474
3	8.75	0.150	—	—	24	—	35.85	20	0.478
8	8.75	0.045	28	5	27	0.96	35.85	68	0.478
9	8.75	—	30	7	36	1.20	16.49	100	0.478
1	9.25	—	—	—	27	—	25.19	57	0.479
4	9.25	—	—	—	26	—	34.98	85	0.479
5	9.25	0.370	—	—	17	—	18.19	13	0.479
6	9.25	0.160	—	—	23	—	11.19	20	0.479
10	9.25	0.240	0	NP	20	—	24.45	16	0.479
2	9.75	—	36	10	35	0.97	14.20	94	0.480
1	10.75	0.200	—	—	22	—	31.00	30	0.481
5	10.75	0.500	—	—	16	—	17.22	13	0.481
6	10.75	0.160	—	—	24	—	12.36	19	0.481
7	10.75	0.130	—	—	19	—	9.64	11	0.481
11	10.75	0.170	0	NP	23	—	19.29	28	0.481
3	12.25	—	—	—	23	—	30.67	18	0.481
2	12.25	0.720	—	—	12	—	30.67	9	0.481
4	12.25	1.800	—	—	12	—	31.89	12	0.464
1	14.75	0.300	—	—	16	—	30.43	18	0.478
5	14.75	0.400	—	—	17	—	20.29	10	0.478
6	14.75	0.160	—	—	24	—	13.13	19	0.478
7	15.25	0.095	—	—	13	—	8.23	36	0.478

Sıvılaşıma analizi yapılırken yer ivmesi olarak 0.40g esas alınmıştır. Sondajlardan elde edilen SPT değerleri (N_{30}) bölüm 2.6.2.1 de anlatılan şekilde düzeltilmiş ve (N_1)₆₀ değerleri oluşturulmuştur.

Çalışmaya başlarken Cumhuriyet Mahallesi ait çok sayıdaki sondaj logunda ve zemin analiz verilerinden bir çoğunda eksik veya hatalı veriler olması sonucunda sondaj sayısı 11 ile sınırlı tutulmuştur.

Bu 11 sondajdan elde edilen veriler incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Bunun için öncelikle plastiklik kartı oluşturulmuştur. Bu karta göre likit limiti 50'den düşük ve A hattının ($I_p = 0.73 (w_L - 20)$ doğrusunun) altında kalan numuneler araştırma kapsamına alınmıştır. Bu şartlar altında ortaya çıkan plastiklik kartı Şekil 4.9'da gösterilmiştir



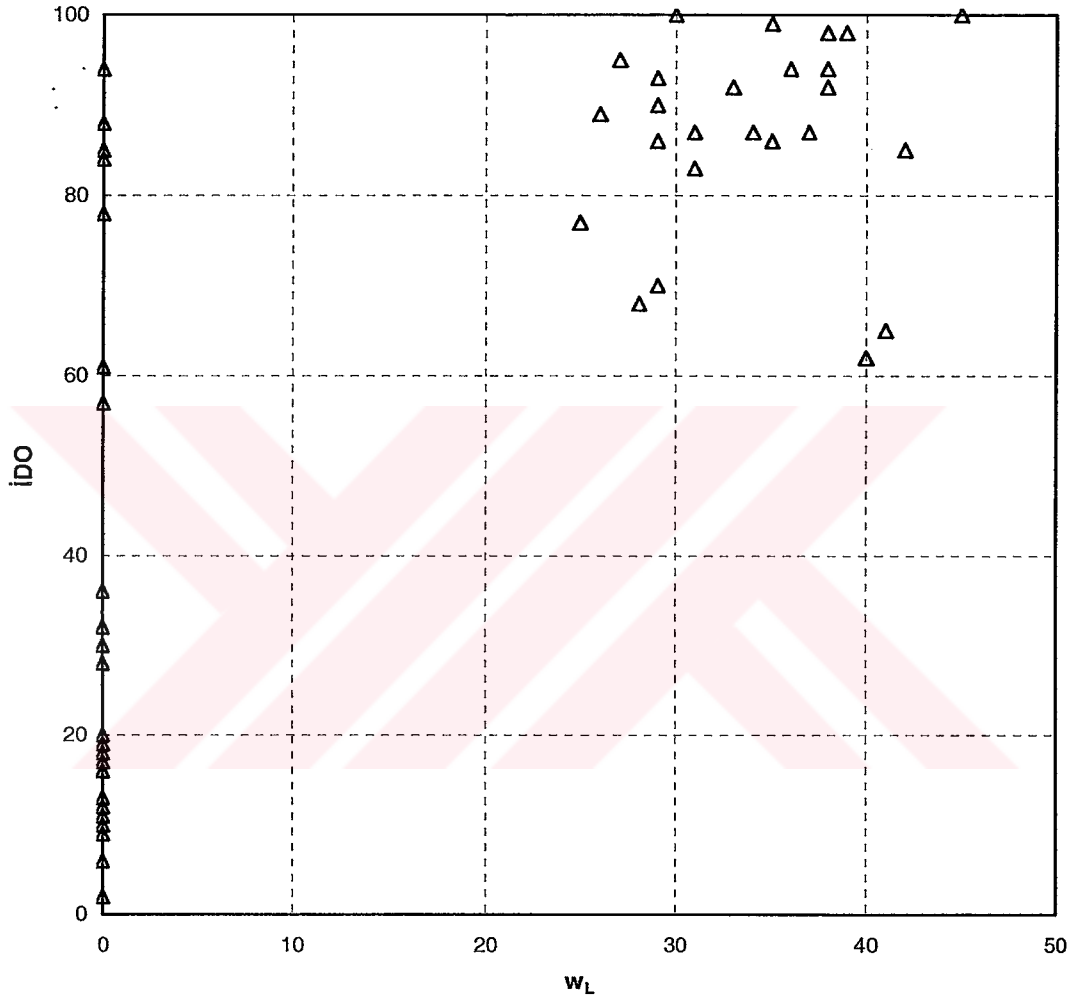
Şekil 4.9 Cumhuriyet Mahallesi için Plastiklik Kartı

Bu mahalledeki seçilen sondajlardaki numuneler için plastik olmayan numuneler dışındaki numuneler için plastisite indisi 5 ile 20 arasında yer almaktadır, likit limitler ise 20 ile 40 arasında yer almaktadır. Bu eleme sonunda çalışmada kullanılan numune cinleri birleştirilmiş zemin sınıflarına göre ML, OL, CL ve ayrıca olduğu gözlenmektedir.

Araştırma kapsamında ince dane oranının sıvılaşımaya olan etkisini gözlemleyebilmek için ince dane oranının diğer zemin parametreleriyle olan ilişkilerini incelemekte fayda vardır. Bu bağlamda ince dane oranının (İDO),

sırasıyla likit limit (w_L), plastik limit (w_p), tabi su muhtevası (w_n), plastisite indisi (I_p), ortalama dane çapı (D_{50}) ile olan ilişkileri incelenecek, ayrıca kıvamlar oranı (w_n/w_L) ile $(N_1)_{60}$ arasındaki ilişki gözlenecektir.

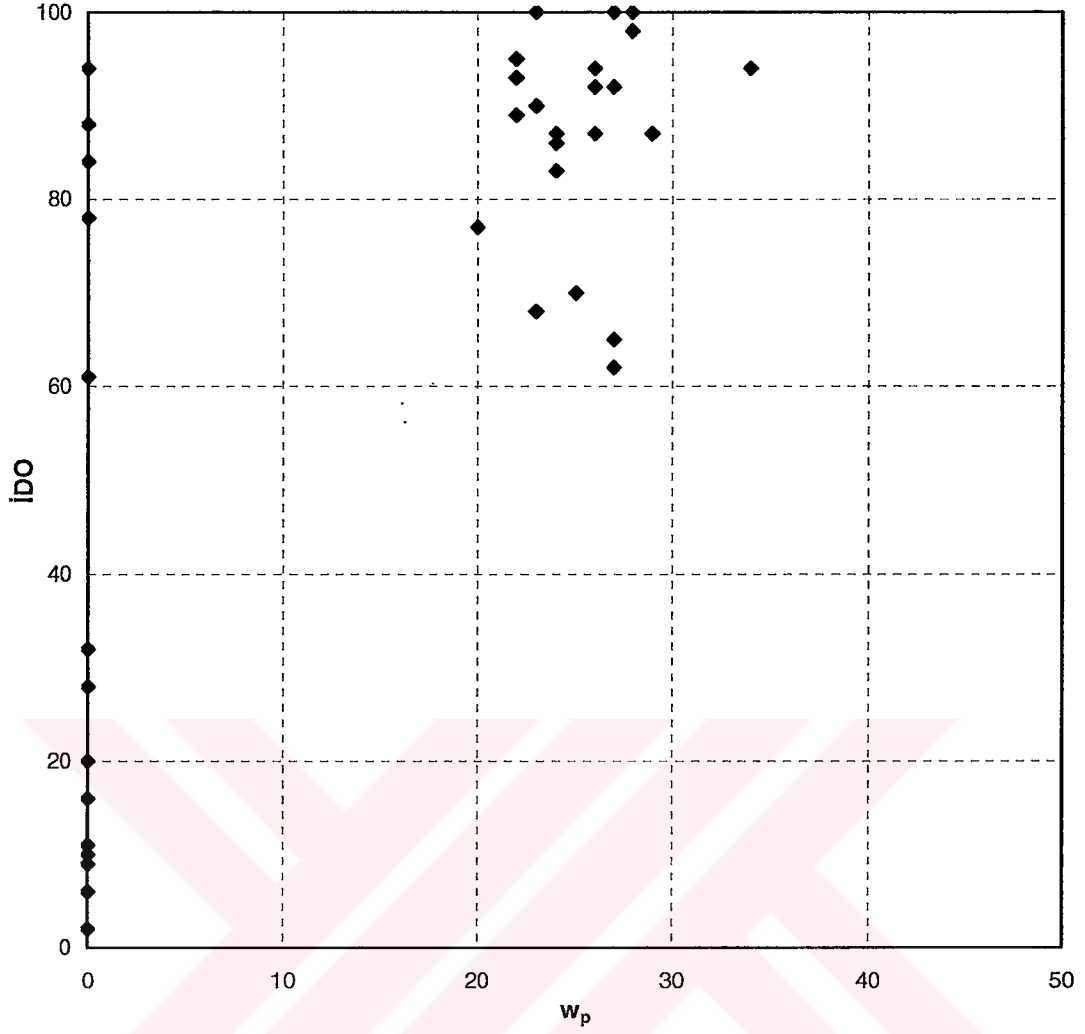
İnce dane oranının likit limitle olan değişimi Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Likit limitin 0 dan farklı olduğu 20 ile 45 arasında ince dane oranının 60 dan yüksek olduğu gözleniyor.



Şekil 4.10 Cumhuriyet Mahallesi için w_L – İDO Grafiği

Likit limitin 0 olduğu bölgede ise plastik olmayan zeminlere rastlanmaktadır. İnce dane oranlarının likit limitle değişimini gösterebilmek için oluşturulan eğriden likit limitlerin artımına karşılık ince dane oranının azalan bir eğimle artacağı bir sonuca varılmaktadır.

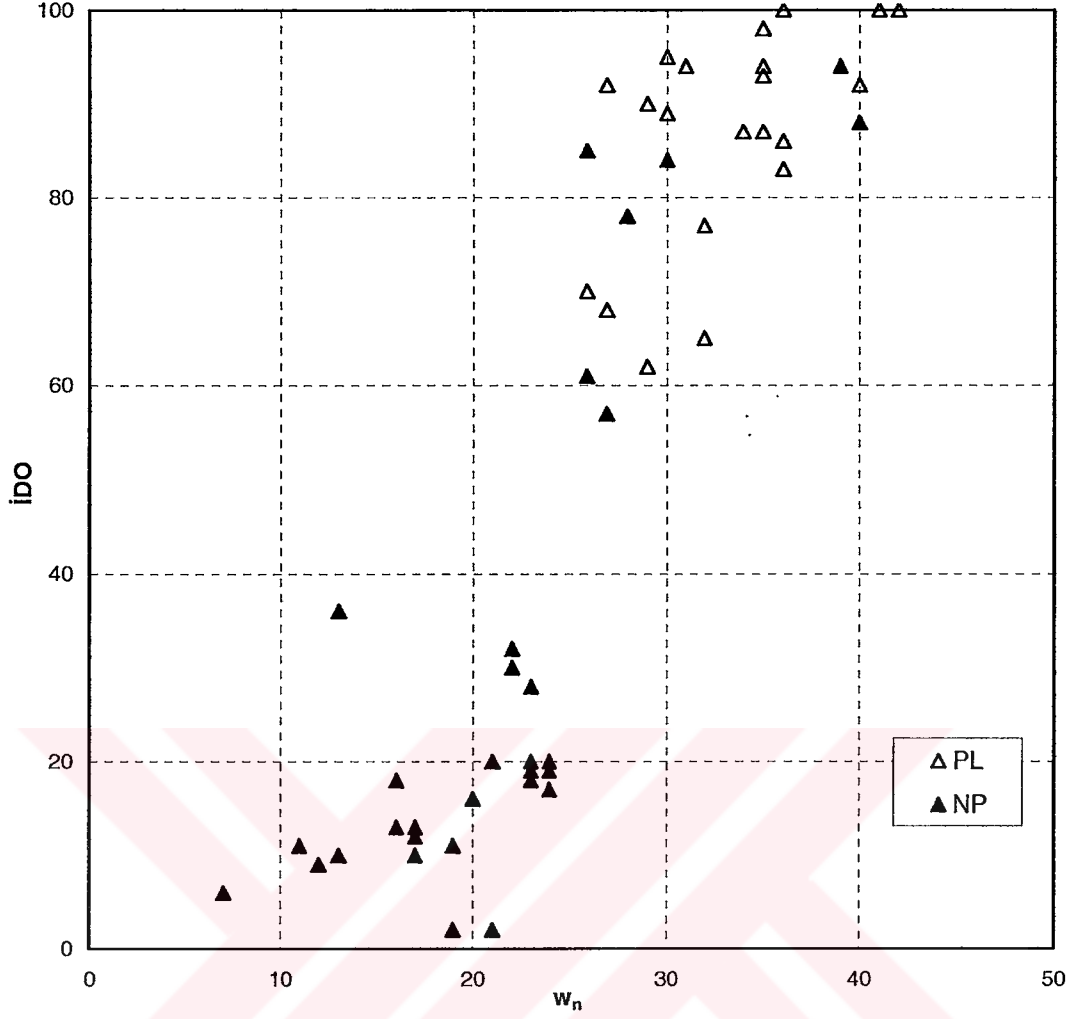
İnce dane oranı ile plastik limit arasındaki ilişki Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Bu şekle göre sıvılaşılan zeminlerin bir kısmının plastik limitlerinin 20-30 arasında değişim gösterdiği ve bu numunelerin ince dane oranlarının %60 ile %100 arasında değiştiği gözlenmiştir.



Şekil 4.11 Cumhuriyet Mahallesi için w_p – İDO Grafiği

Plastik olmayan silt numuneler için ince dane oranı 2 ile 95 arasında değişim göstermektedir.

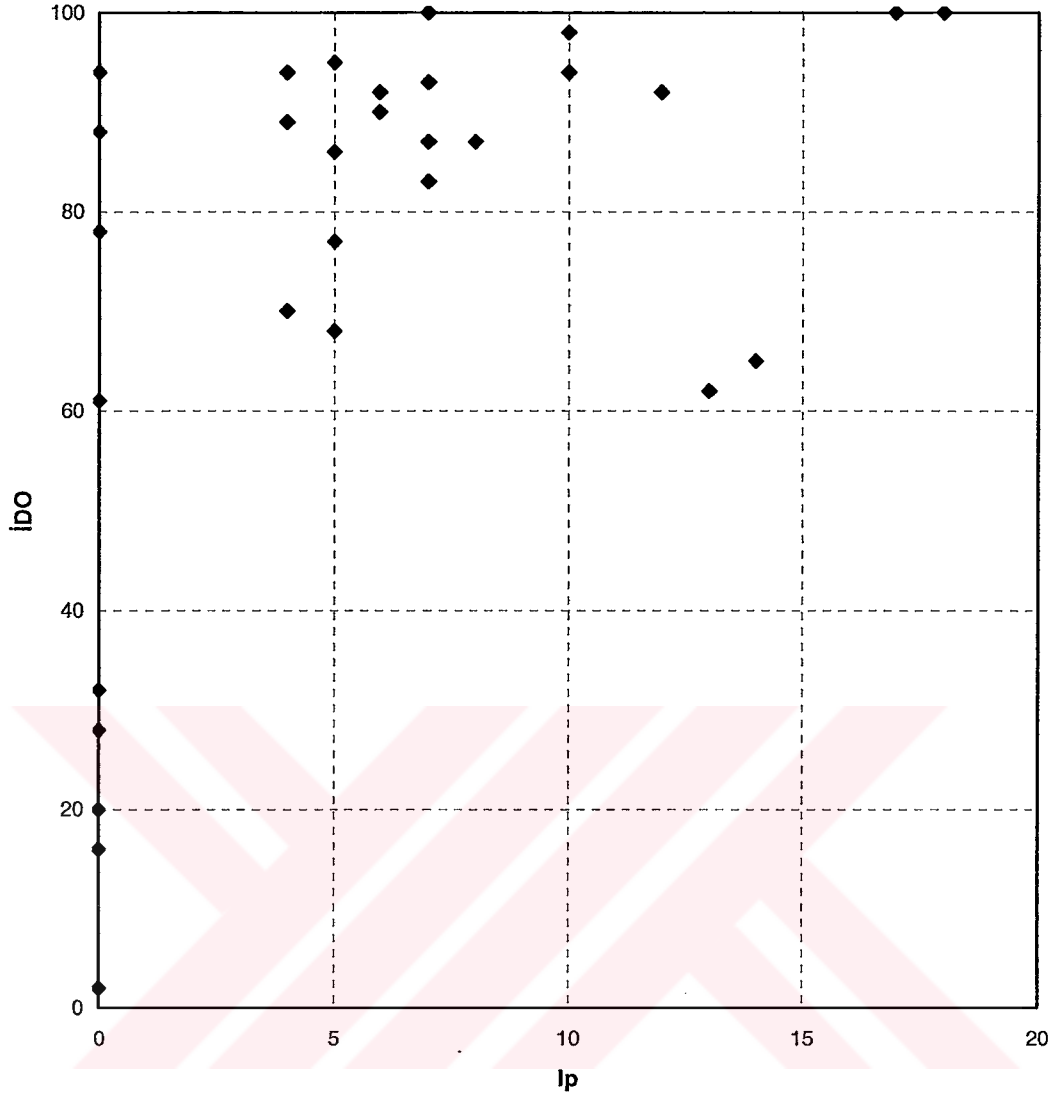
İnce dane oranının tabii su muhtevasıyla olan değişimini incelemek için Şekil 4.12 oluşturulmuştur. Plastik olmayan numunelerin davranışını ayrı olarak izlenmiş ve plastik numuneler ile farkı sunulmuştur. Bu grafikte de su muhtevasının artımına karşı ince dane oranlarının plastik ve plastik olmayan numuneler için de azalan eğimle arttığı gözlenmiştir. Numunelerin tabii su muhtevaları 10 ile 47 arasında, ince dane oranları 5 ile 100 arasında değişmektedir.



Şekil 4.12. Cumhuriyet Mahallesi için w_n – İDO Grafiği

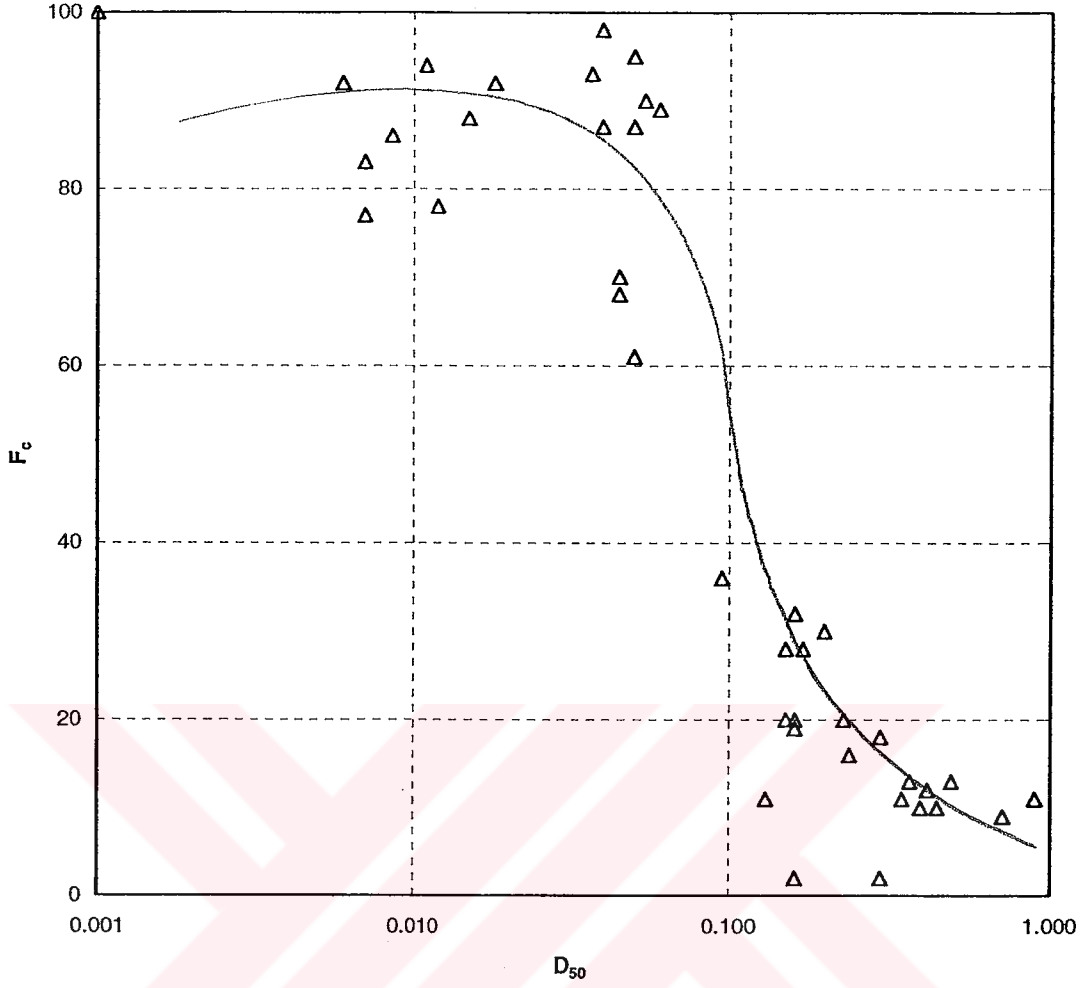
Plastik numunelerin, aynı tabii su muhtevalı plastik olmayan numunelere göre daha yüksek ince dane oranına sahip olduğu gözlenmektedir.

İnce dane oranının plastisite indisiyle olan değişimi Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Bu grafik sıvılaşmaya etkileri araştırılan iki parametrenin birbirleriyle olan ilişkilerini sunmaktadır. Plastisite indisinin 15’den düşük numunelerle çalışılmış olup bu numunelerin İDO ile olan ilişkisinde net bir bağıntı ortaya koymak zordur.



Şekil 4.13 Cumhuriyet Mahallesi için $I_p - \dot{I}pO$ Grafiği

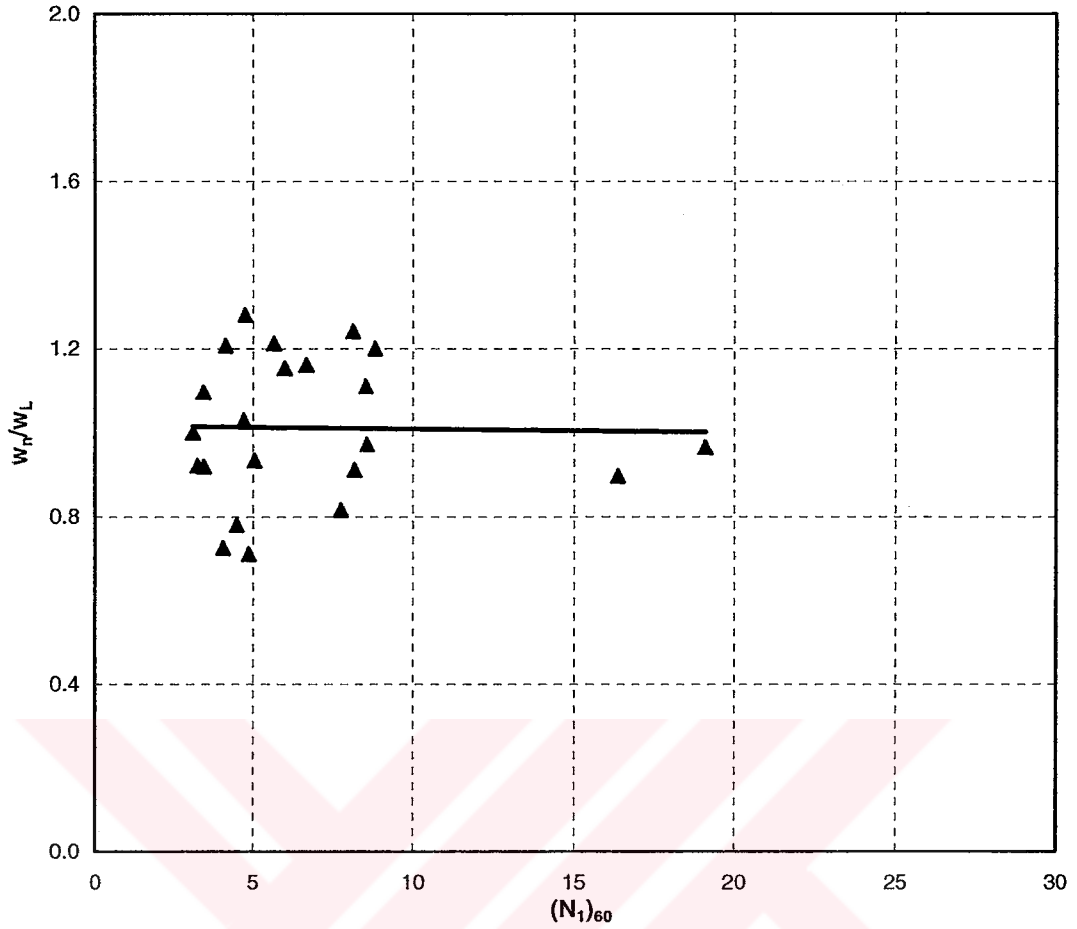
İnce dane oranının ortalama dane çapıyla olan değişimini gözleyebilmek için Şekil 4.14 oluşturulmuştur. Ortalama dane çapı genelde küçük değerler aldığı için değişimi net izleyebilmek için D_{50} değerleri için logaritmik eksen takımı seçilmiştir. Ortalama dane çapı elde edilemeyen numuneler grafikte gösterilmemiştir.



Şekil 4.14 Cumhuriyet Mahallesi için D_{50} – İDO Grafiği

Bu grafikten ortalama dane çapları küçüldükçe ince dane oranlarının arttığını söyleyebiliriz. Grafikten çizilen 2.dereceden polinom eğrisi bu değişimi göstermektedir. Bu sonuç da zemin için beklenen bir durumdur. İnceleme yapılan zemin numunesi için ortalama dane çapları genel olarak 0.0025 ile 1.0cm arasında yer almaktadır.

Cumhuriyet mahallesinde gözlenmesi gereken bir diğer olgu da zeminin kıvam oranının $(N_1)_{60}$ ile olan korelasyonudur. Bu korelasyon bize bölgede yapılmış olan zemin deneylerinin doğruluğu hakkında bilgi verir. Zemin kıvam oranının w_n/w_L 'nin 1 den büyük olduğu durumlarda zeminler daha kıvamsız halde, sıvıya yakın bir formda bulunur ve haliyle SPT değerleri bu tip numuneler için düşük çıkması beklenir. Bu halde, $(N_1)_{60}$ değerlerinin w_n/w_L ile belli bir ters orantı içinde değişmesi gerekir. Şekil 4.15'de Cumhuriyet Mahallesinden plastik olan numuneler derlenmiş ve grafik oluşturulmuştur.



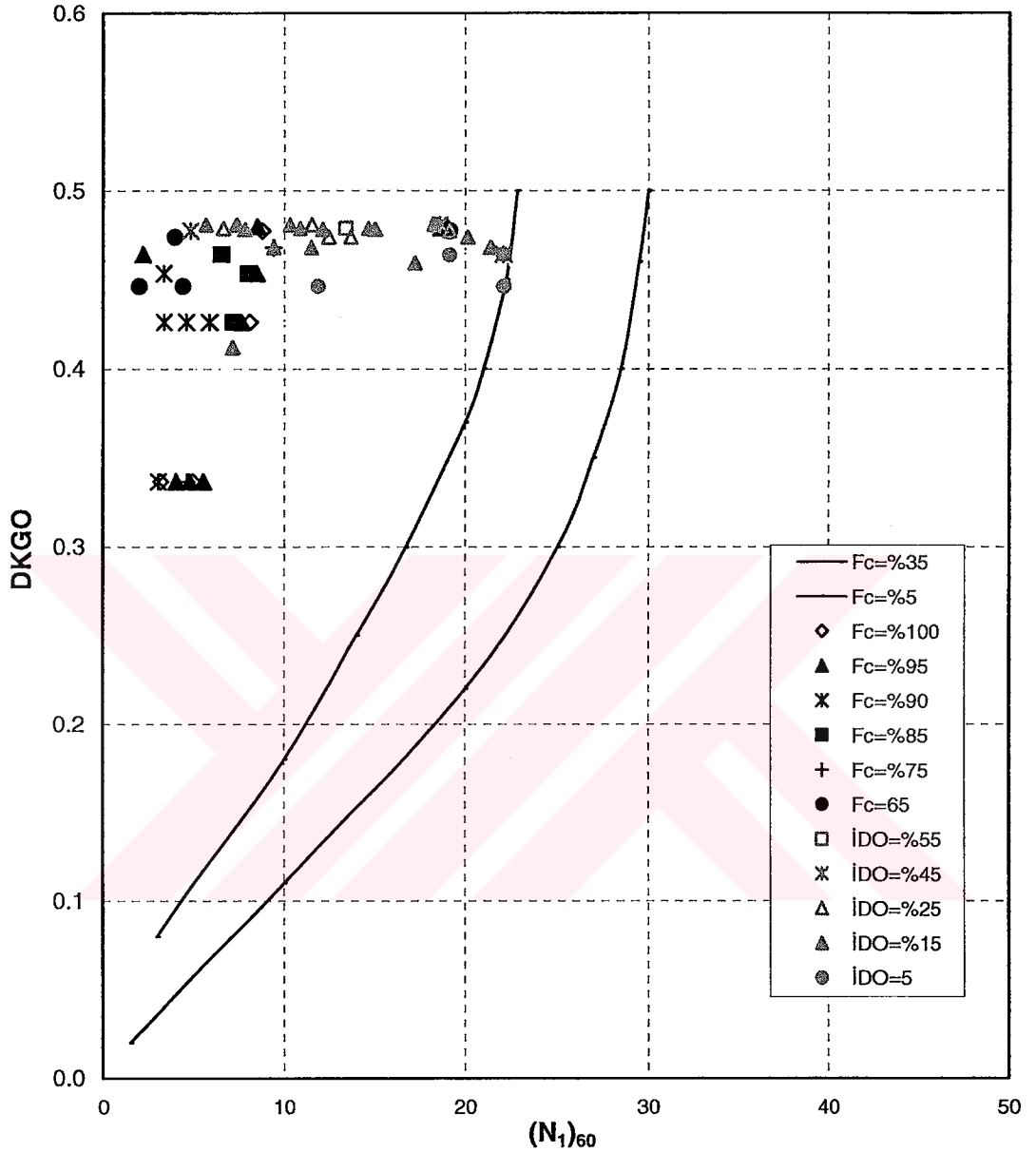
Şekil 4.15 Cumhuriyet Mahallesi için $w_n / w_L - (N_1)_{60}$ Grafiği

Zemin numunelerinin w_n/w_L değerleri azaldıkça numunelerin $(N_1)_{60}$ değerlerinde beklenen bir artış gözlenmektedir. Bu grafiğin doğrusal olarak azalış göstermesi beklenirken bazı sapmaların olmasının ana sebeplerinden biri de numunelerin belli oranda silt içermesidir. Cumhuriyet mahallesindeki bu örnekte zeminin yumuşak olması beklenen yerlerde bazı farklı sonuçlara rastlanmıştır. Bu durumun sebebi olarak belli derinliklerdeki sondajlarda ince dane oranı düşük kum numunelere rastlanmış olmasıdır.

4.3.2.2 Cumhuriyet Mahallesi Zeminlerinin Deprem Sırasındaki Davranışları

Cumhuriyet Mahallesinde 17 Ağustos 1999 İzmit depremi sırasında büyük sıvılaşma problemleri görülmüştür. Cumhuriyet mahallesinden elde edilen veriler Tablo 4.3'de sunulmuştur. Bu tabloda dinamik kayma gerilme oranı tespitinde bölüm 2.7.2'de anlatılan deprem magnitudü 7.5 olan bir deprem için Seed ve diğ., 2001 yöntemi kullanılmıştır. Bu veriler ışığında Cumhuriyet mahallesinin deprem sırasındaki davranışını ortaya koyan Dinamik Kayma Gerilme Oranı(DKGO) ve $(N_1)_{60}$

değerlerinin değişimi ince dane oranlarına göre sınıflandırılıp Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Cumhuriyet Mahallesi'nin Deprem Sırasında DKGO - $(N_1)_{60}$ Grafiği

Cumhuriyet Mahallesi'nde seçilen sondajların tümünde ve tüm derinliklerde sıvılaşma gözlenmiştir Şekil 4.16'da gösterilen ince dane oranlarına göre sınıflanan grafikte ince dane oranları arttıkça sıvılaşabilen numune miktarının arttığı söylenebilir. Ayrıca NCEER 1997'den sonra çalışmasında gösterilen %5, %15, %35 ince dane oranlarına ait DKGO eğrileri gösterilmiştir. Bu DKGO eğrilerine ilave eğriler çalışmanın son bölümünde gösterilecektir.

4.3.3. Tıgçılar Mahallesi için Sıvılaşma İncelemesi

4.3.3.1. Tıgçılar Mahallesindeki Zeminlerin Endeks  zellikleri

17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde sıvılaşmanın yoğun görüldüğü mahallelerden bir diğeri olan Tıgçılar Mahallesi ile ilgili derlenen arazi verileri ve deprem sonrası bu mahalledeki zemin incelemeleri sırasında yapılan sondajların özellikleri ve sondaj yapılan bölgelerin numaraları Tablo 4.4’de gösterilmiştir.

Tablo 4.6 Tıgçılar Mahallesinde Sıvılaşma Gözlenen Noktalardaki Sondajlar

Yer No	Sondaj No	Sondaj Derinliği (m)	Sıvılaşma Durumu
1	TAE-13	15	VAR
2	TAE-1	15	VAR
3	TAE-20	12	VAR
4	TAE-21	10	VAR
5	TAE-22	15	VAR
6	TAE-3	15	VAR
7	TAE-2	15	VAR
8	TAE-25	15	VAR
9	TAE-7	15	VAR
10	TAE-27	15	VAR
11	TAE-8	15	VAR
12	TAE-12	15	VAR
13	TAE-4	15	VAR
14	TAE-15	15	VAR

Tıgçılar Mahallesinde sıvılaşma görülen bölgelerde yapılan sıvılaşma analizi Tablo 4.7’de gösterilmiştir. Bu tabloda gösterilen sıvılaşma analizinde bölüm 2.7.2’de açıklanan Seed ve diğ., 2001 yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen zemin verileri derinlik parametresine göre sıralanmıştır. Sıvılaşma analizi yapılırken yer ivmesi olarak 0.40g esas alınmıştır. Sondajlardan elde edilen SPT değerleri (N_{30}) bölüm 2.6.2.1 de anlatılan şekilde düzeltilmiş ve (N_1)₆₀ değerleri oluşturulmuştur.

Tablo 4.7 Tıgçılar Mahallesine ait zemin değerleri ve DKGO

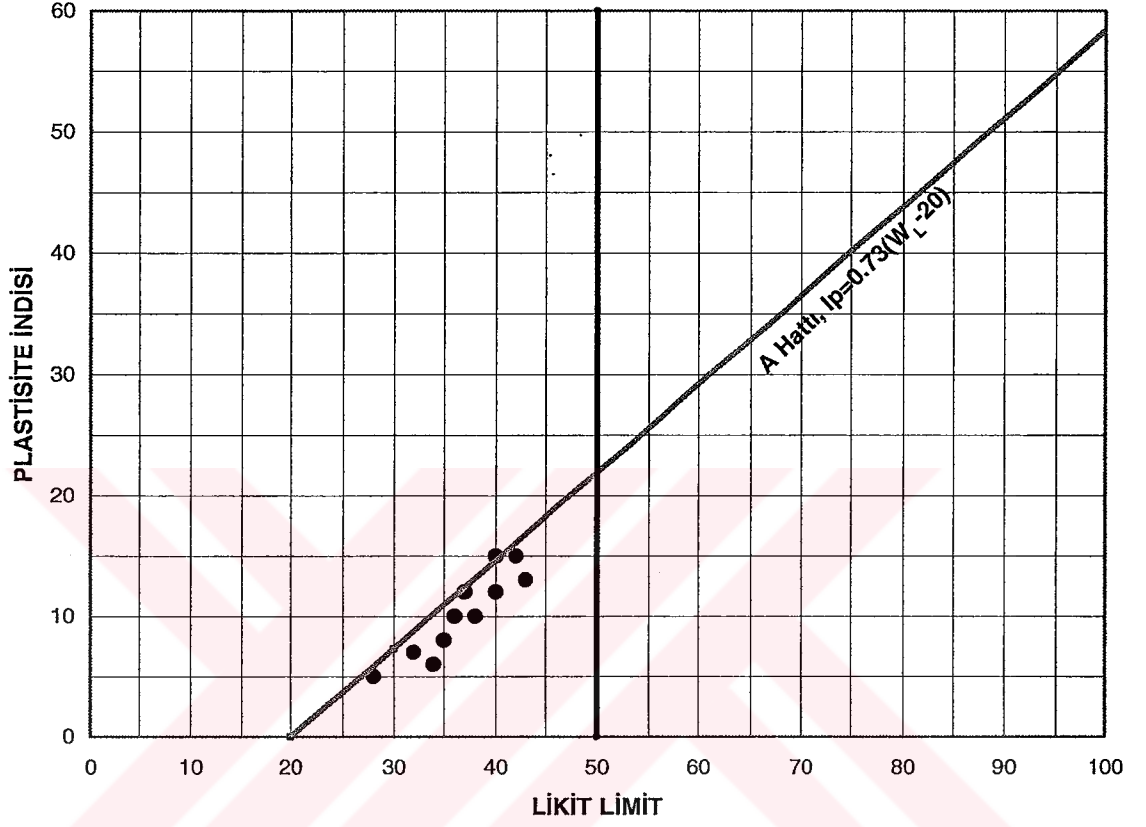
Yer No	h(m)	D ₅₀	w _L	w _n	w _p	I _p	(N ₁) ₆₀	w _r /w _L	İDO	DKGO
1	1.75	0.12	40	26	25	15	4.41	0.65	44	0.337
2	1.75	0.45	0	10	NP	0	13.78	—	8	0.337
3	1.75	0.00	40	29	28	12	3.10	0.73	60	0.337
4	1.75	0.01	36	32	26	10	6.20	0.89	73	0.337
5	1.75	3.50	0	15	NP	0	11.16	—	15	0.337
5	1.75	—	37	48	25	12	3.72	1.30	90	0.337

Tablo 4.7 Tıǒcılar Mahallesiine ait zemin değerleri ve DKGO (devam)

Yer No	h(m)	D ₅₀	w _L	w _n	w _p	I _p	(N ₁) ₆₀	w _r /w _L	İDO	DKGO
6	3.25	0.38	0	10	NP	0	11.14	—	11	0.412
4	3.75	0.02	34	30	28	6	2.88	0.88	70	0.426
2	3.75	0.70	0	14	0	0	14.51	—	4	0.426
3	4.25	0.05	42	30	27	15	3.11	0.71	79	0.437
7	4.75	0.90	0	19	0	0	13.91	—	5	0.446
9	4.75	—	31	37	0	0	7.95	1.19	93	0.446
10	5.25	—	30	32	0	0	10.98	1.07	83	0.454
5	5.75	0.26	0	25	0	0	15.95	—	8	0.459
11	6.25	0.01	21	29	0	0	15.89	1.38	89	0.464
2	6.25	0.82	0	12	0	0	22.08	—	5	0.464
3	6.25	0.13	0	22	0	0	4.97	—	16	0.464
4	6.25	0.28	0	17	0	0	24.73	—	17	0.464
12	6.25	—	31	33	0	0	8.44	1.06	93	0.464
13	6.25	—	0		0	0	21.63	—	11	0.464
13	6.75	0.37	0	20	0	0	9.14	—	6	0.468
3	7.75	0.13	0	23	0	0	5.89	—	19	0.474
5	7.75	0.70	0	14	0	0	23.78	—	10	0.474
9	7.75	—	35	38	27	8	6.35	1.09	93	0.474
14	8.25	—	43	35	30	13	9.81	0.81	94	0.476
2	8.75	0.80	0	13	0	0	19.12	—	4	0.478
4	8.75	0.30	0	16	0	0	21.41	—	16	0.478
13	9.75	—	0	36	0	0	6.97	—	87	0.474
3	9.75	0.13	0	24	0	0	7.38	—	19	0.474
1	10.75	0.48	0	22	0	0	6.20	—	12	0.465
7	10.75	0.30	0	24	0	0	14.33	—	6	0.465
13	12.25	—	28	32	23	5	8.66	1.14	90	0.450
3	12.25	0.12	0	23	0	0	6.63	—	18	0.450
9	12.25	—	17	35	0	0	10.39	2.06	77	0.450
4	12.25	—	0	16	16	0	20.09	—	11	0.450
5	13.25	—	26	28	0	0	9.02	1.08	60	0.438
8	13.75	—	32	32	25	7	13.80	1.00	97	0.433
15	14.25	—	38	35	38	10	9.38	0.92	98	0.427
3	14.75	0.12	0	22	0	0	5.73	—	18	0.421
13	15.25	0.17	0	24	0	0	9.71	—	39	0.415

Çalışmaya başlarken Tıǒcılar Mahallesiine ait çok sayıdaki sondaj logunda ve zemin analiz verilerinden bir çoğunda eksik veya hatalı veriler olması sonucunda nokta sayısı 14 ile sınırlı tutulmuştur.

Bu 14 sondajdan elde edilen veriler incelenmiş, sıvılaştan zemin tabakalarına ait veriler kullanılmıştır. Bunun için öncelikle plastiklik kartı oluşturulmuştur. Bu karta göre likit limiti 50'den düşük ve A hattının ($I_p = 0.73 (w_L - 20)$ doğrusunun) altında kalan numuneler araştırma kapsamına alınmıştır. Bu şartlar altında ortaya çıkan plastiklik kartı Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

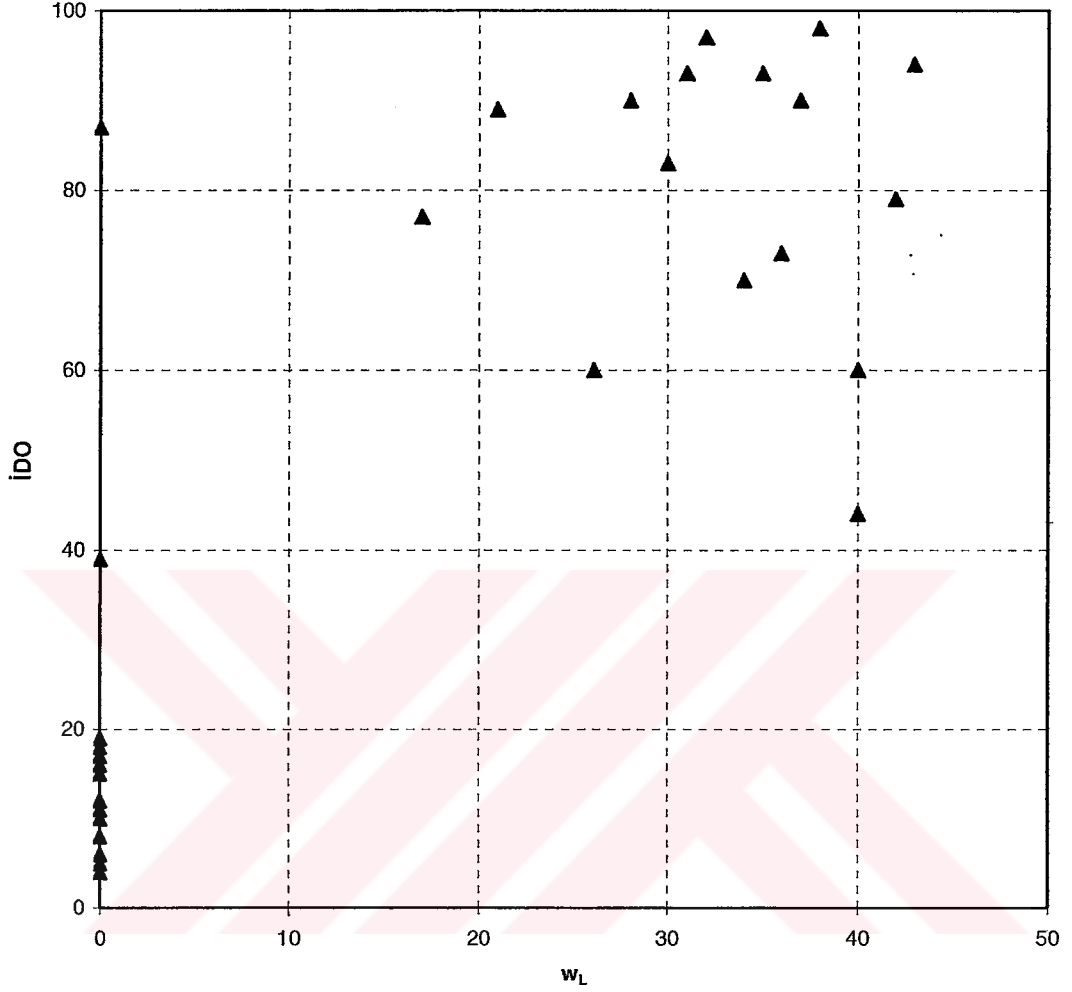


Şekil 4.17 Tıgıcılar Mahallesi için Plastiklik Kartı

Bu mahalledeki seçilen sondajlardaki numuneler için plastik olmayan numuneler dışındaki numuneler için plastisite indisi 5 ile 15 arasında yer almaktadır, likit limitler ise 20 ile 40 arasında yer almaktadır. Bu eleme sonunda çalışmada kullanılan numune cinleri birleştirilmiş zemin sınıflarına göre ML, OL, CL olduğu gözlenmektedir.

Araştırma kapsamında ince dane oranının sıvılaşmaya olan etkisini gözlemleyebilmek için ince dane oranının diğer zemin parametreleriyle olan ilişkilerini incelemekte fayda vardır. Bu bağlamda ince dane oranının (I_{DO}), sırasıyla likit limit (w_L), plastik limit (w_p), tabi su muhtevası (w_n), plastisite indisi (I_p), ortalama dane çapı (D_{50}) ile olan ilişkileri incelenecek, ayrıca kıvamlar oranı (w_n / w_L) ile $(N_1)_{60}$ arasındaki ilişki gözlenecektir.

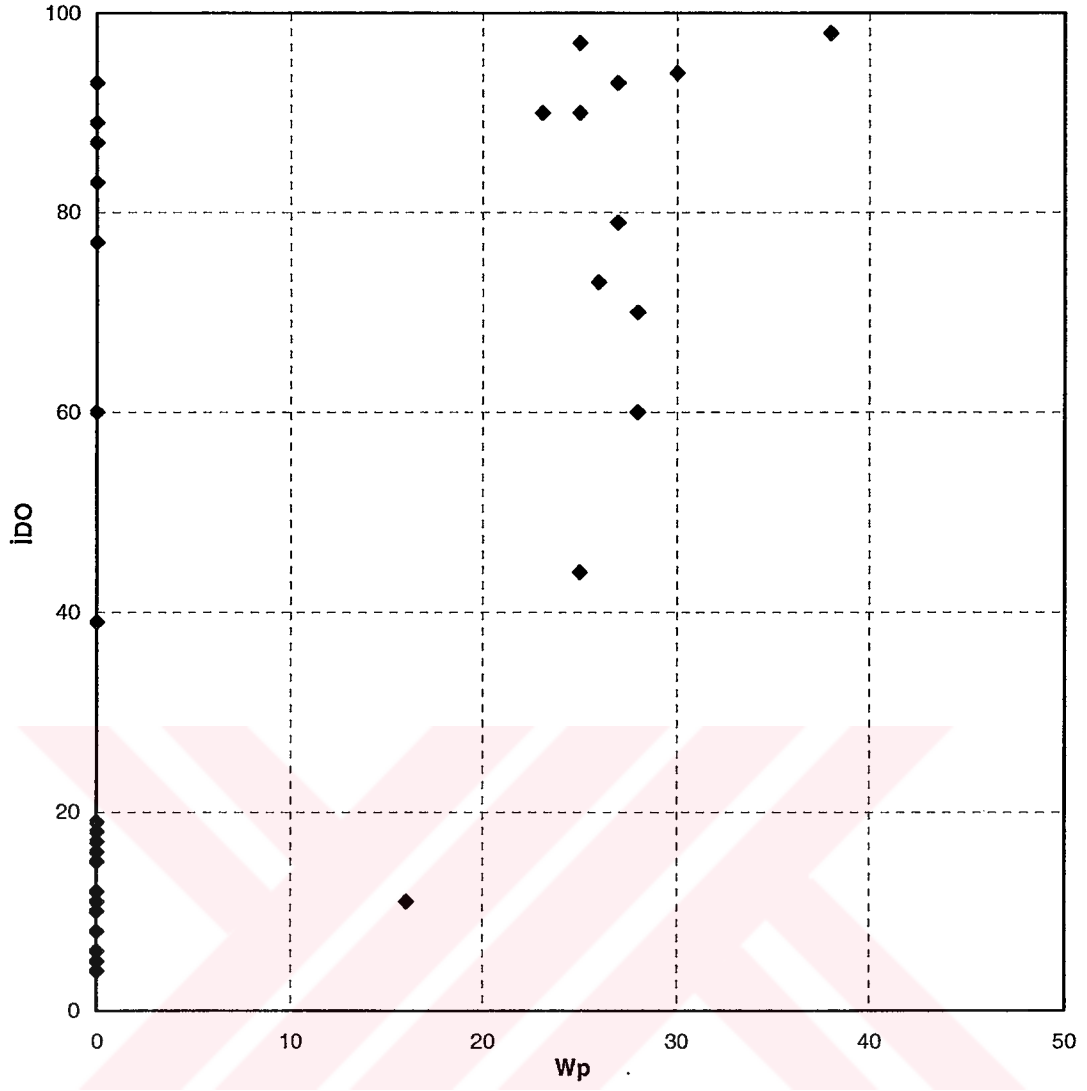
İnce dane oranının likit limitle olan değişimi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Likit limitin 17 ile 43 arasında değişen zeminlerde ince dane oranının 45’den yüksek olduğu gözleniyor.



Şekil 4.18 Tıg cılar Mahallesi için w_L – İDO Grafiği

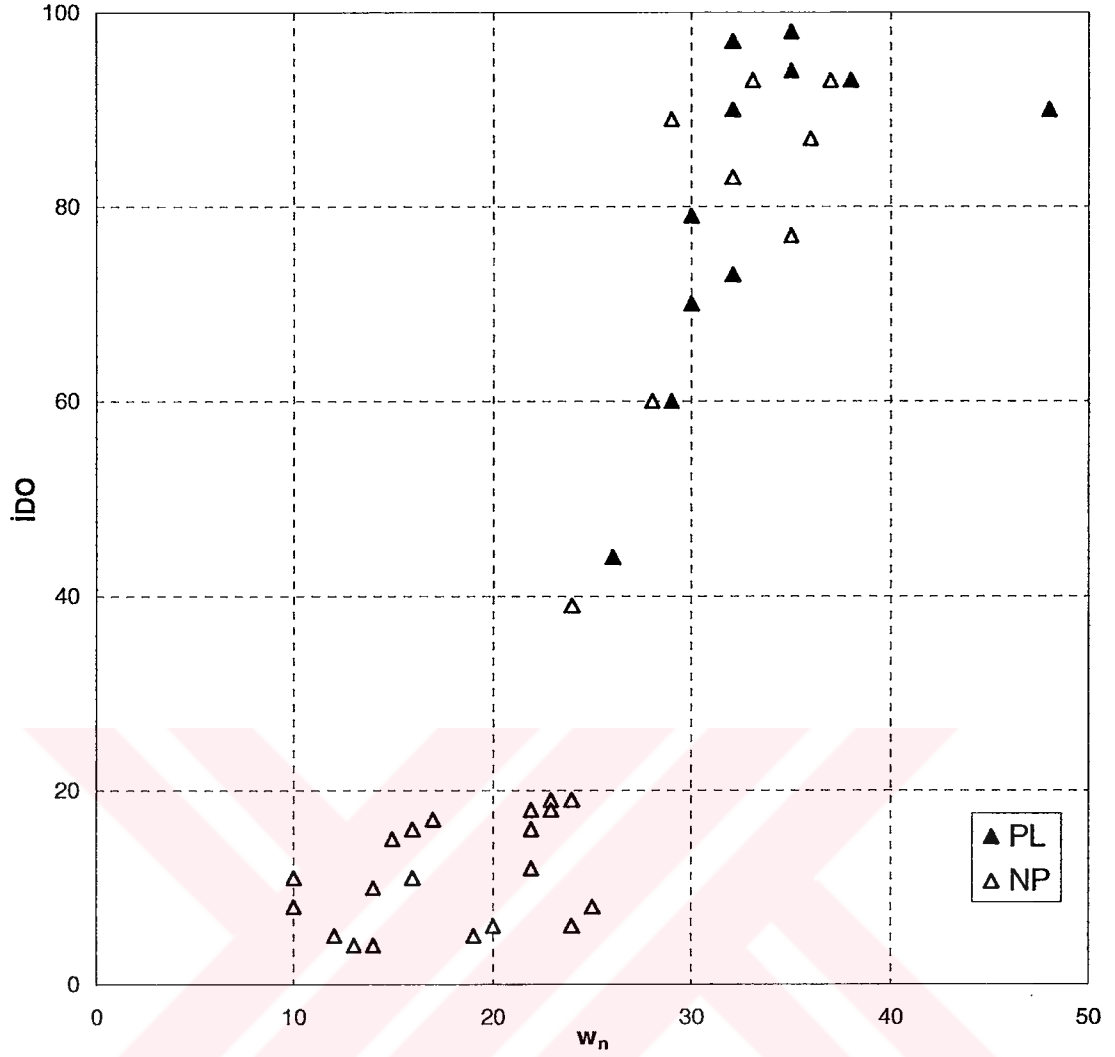
Likit limitin 0 olduğu bölgede ise plastik olmayan zeminlere rastlanmaktadır.

Tıg cılar mahallesindeki sondaj verilerinden ince dane oranı ile plastik limit arasındaki ilişki şekil 4.19’da verilmektedir. Plastik limit 16 ile 38 arasında değişim göstermektedir.



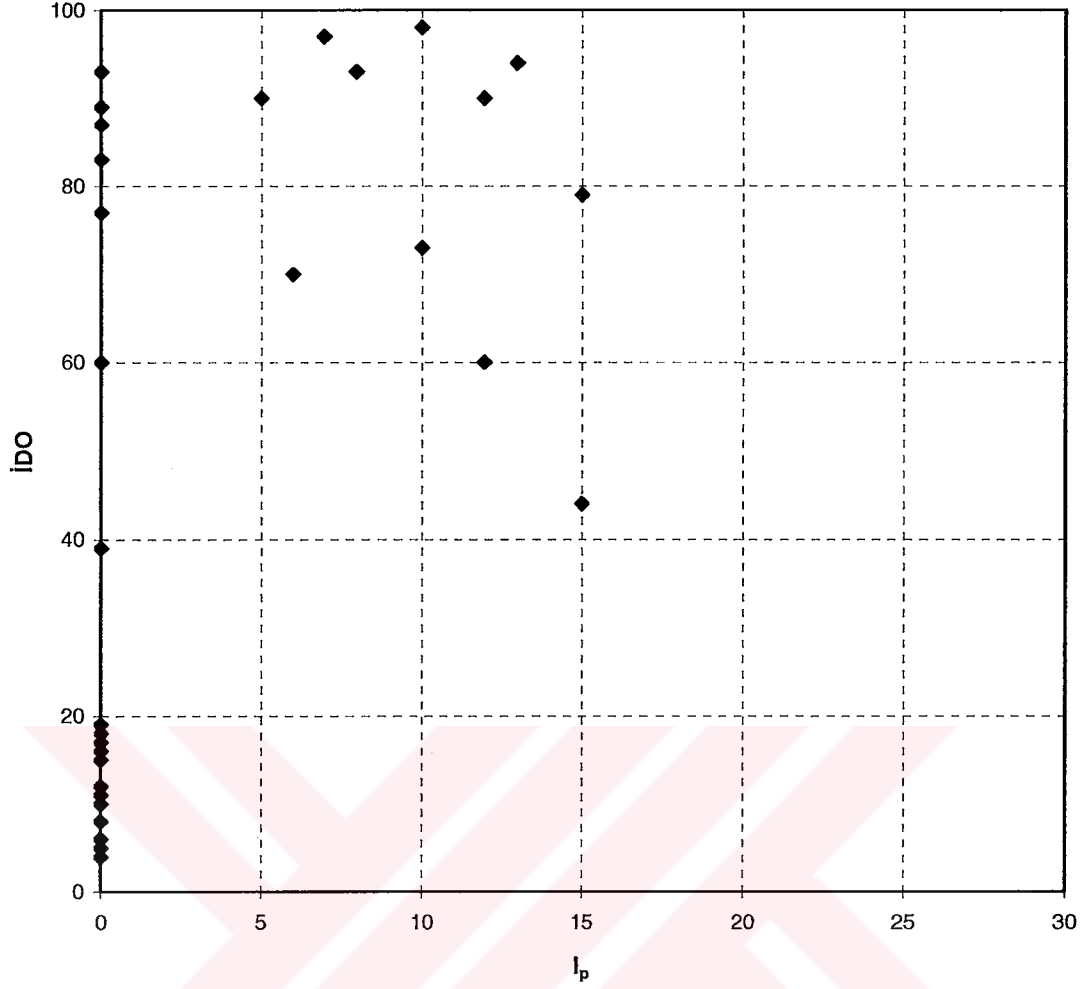
Şekil 4.19 Tıgçılar Mahallesi için w_p – İDO Grafiği

İnce dane oranının tabii su muhtevasıyla olan değişimini incelemek için Şekil 4.20 oluşturulmuştur. Plastik olmayan numunelerin davranışını ayrı olarak izlenmiş ve plastik numuneler ile farkı sunulmuştur. Bu grafikte de su muhtevasının artımına karşı ince dane oranlarının plastik ve plastik olmayan numuneler için de azalan eğimle arttığı gözlenmiştir. Numunelerin tabii su muhtevaları 10 ile 47 arasında, ince dane oranları 5 ile 100 arasında değişmektedir.



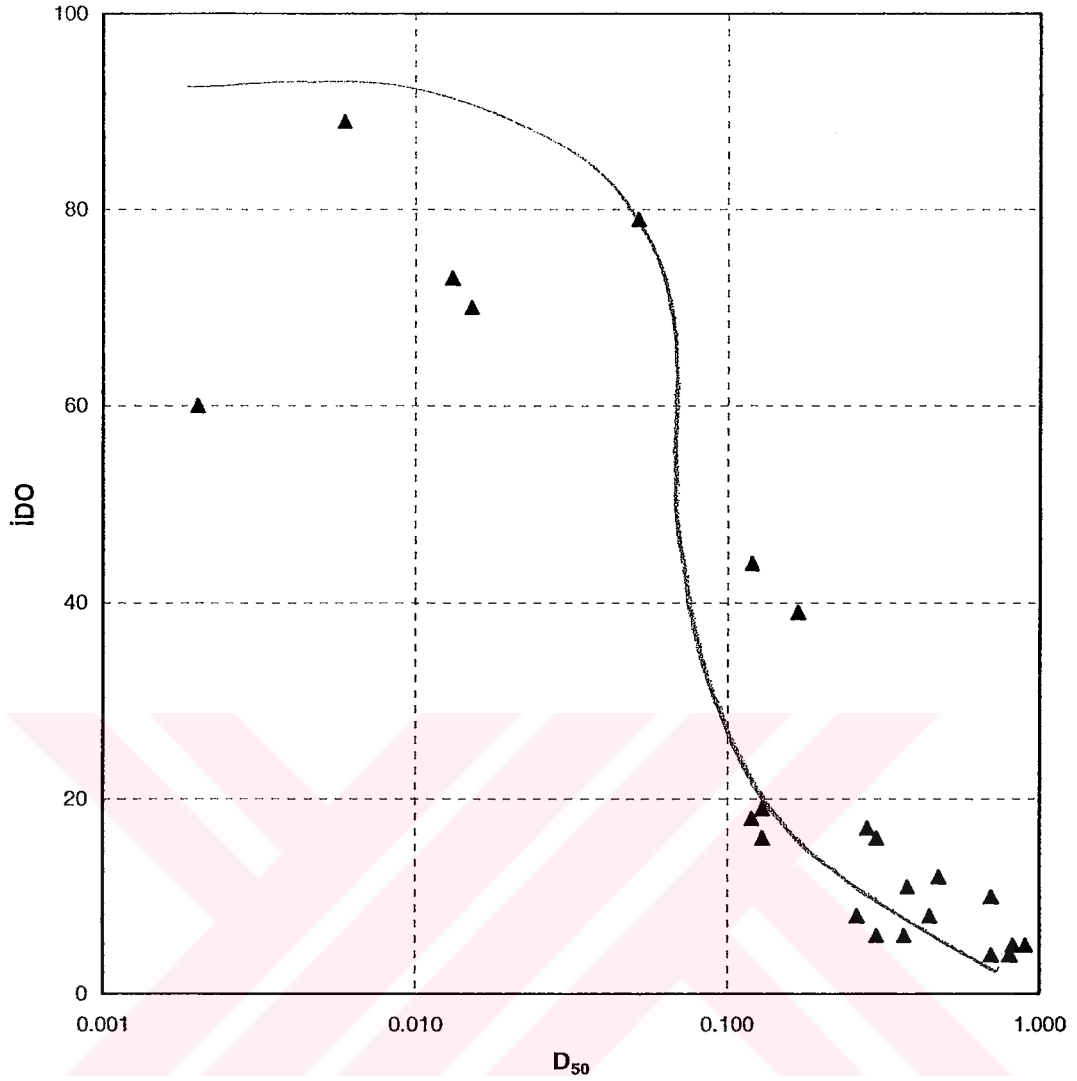
Şekil 4.20 Tığcılar Mahallesi için w_n –İDO Grafiği

İnce dane oranının plastisite indisiyle olan değişimi Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Bu grafik sıvılaşmaya etkileri araştırılan iki parametrenin birbirleriyle olan ilişkilerini sunmaktadır. Plastisite indisinin 15’den düşük numunelerle çalışılmış olup bu numunelerin İDO ile olan ilişkisinde net bir bağıntı ortaya koymak zordur.



Şekil 4.21 Tıgçılar Mahallesi için $I_p - \dot{I}DO$ Grafiği

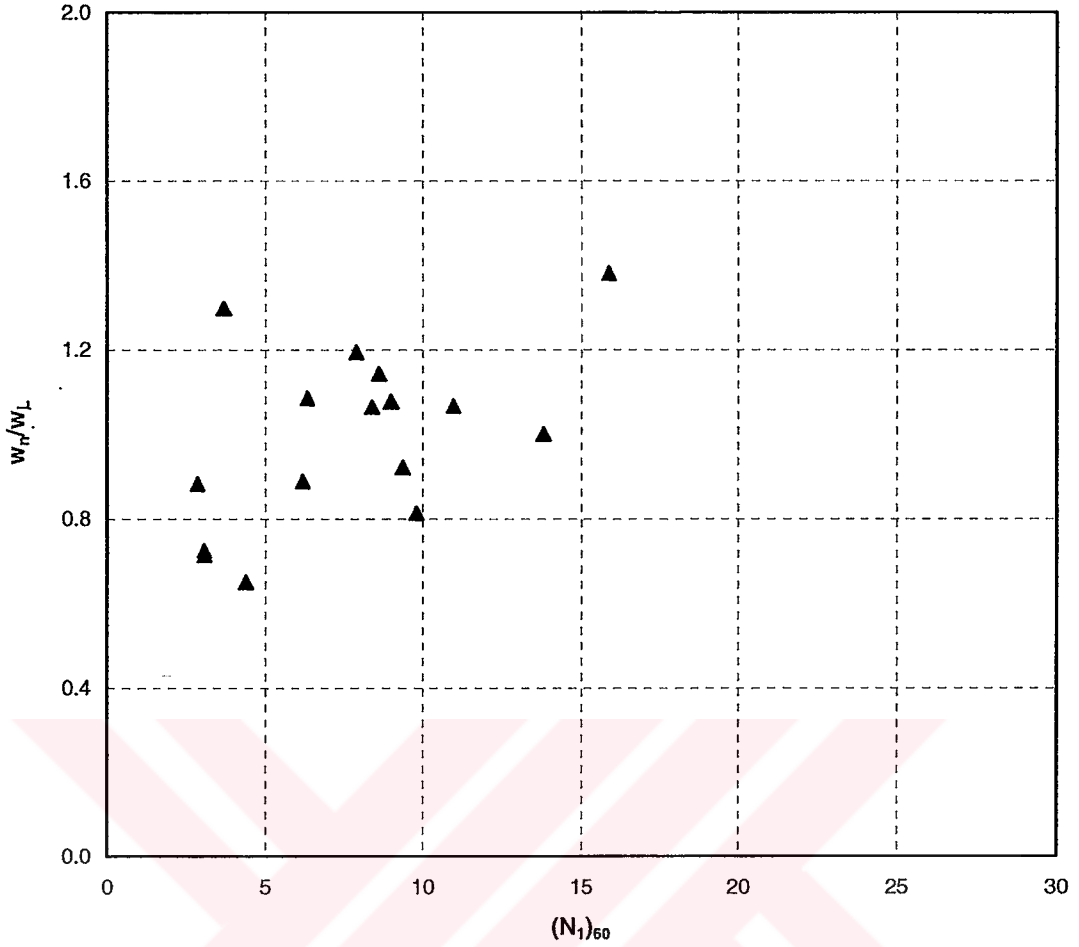
İnce dane oranının ortalama dane çapıyla olan değişimini gözleyebilmek için Şekil 4.22 oluşturulmuştur. Ortalama dane çapı genelde küçük değerler aldığı için değişimi net izleyebilmek için D_{50} değerleri için logaritmik eksen takımı seçilmiştir.



Şekil 4.22 Tığcılar Mahallesi için D_{50} – İDO Grafiği

Bu grafikten ortalama dane çapları küçüldükçe ince dane oranlarının arttığını söyleyebiliriz. Grafikten çizilen 2.dereceden polinom eğrisi bu değişimi göstermektedir. Bu sonuç da zemin için beklenen bir durumdur. İnceleme yapılan zemin numunesi için ortalama dane çapları genel olarak 0.0025 ile 1.0cm arasında yer almaktadır.

Tığcılar mahallesinde gözlenmesi gereken bir diğer olgu da zeminin kıvam oranının $(N_1)_{60}$ ile olan korelasyonudur. Zemin kıvam oranının w_r/w_L 'nin 1 den büyük olduğu durumlarda zeminler sıvıya yakın bir formda bulunur ve haliyle SPT değerleri bu tip numuneler için düşük çıkması beklenir. Bu halde, $(N_1)_{60}$ değerlerinin w_r/w_L ile belli bir ters orantı içinde değişmesi gerekir. Şekil 4.23'de Tığcılar Mahallesinden plastik olan numuneler derlenmiş ve grafik oluşturulmuştur.

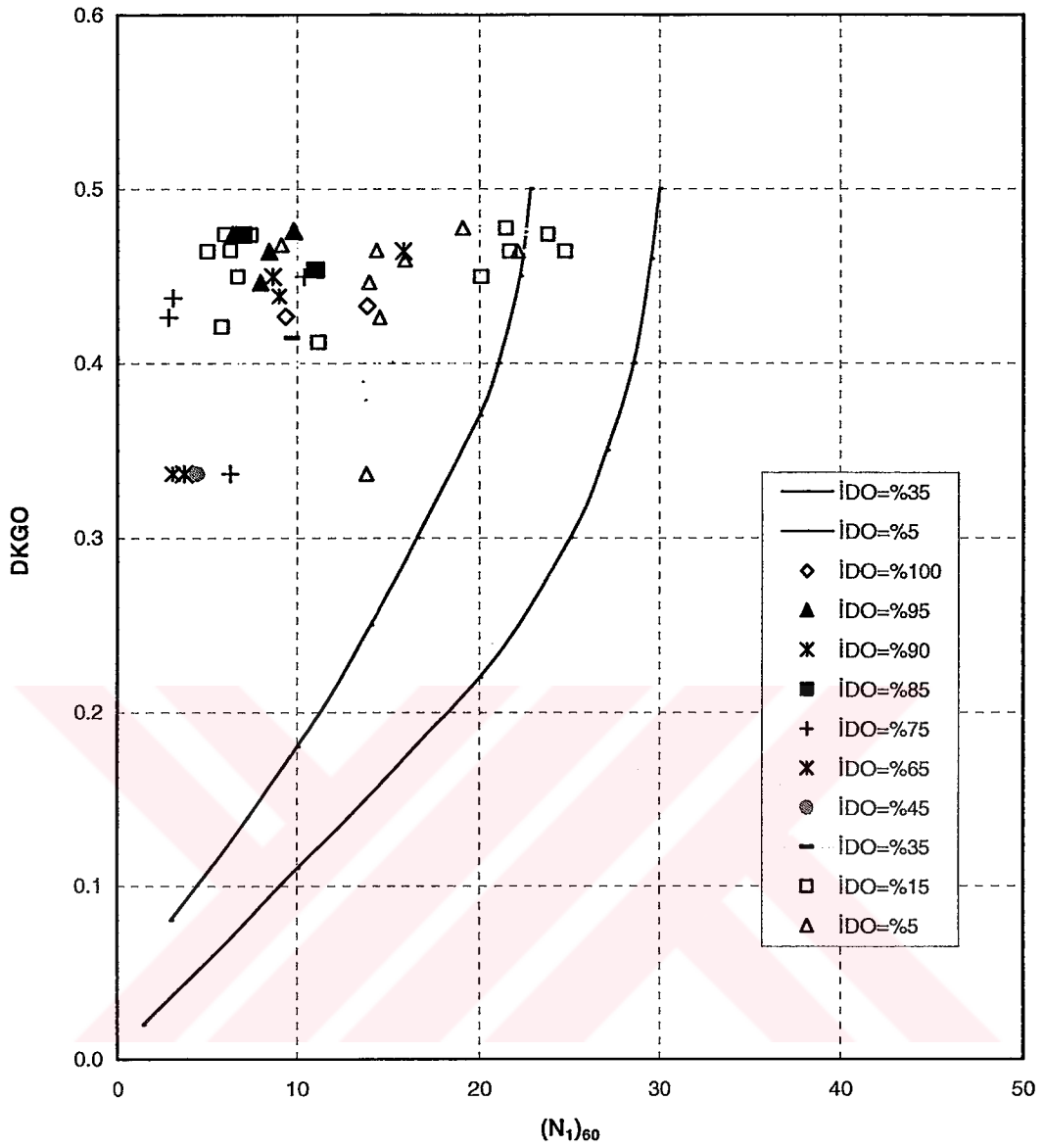


Şekil 4.23 Tıgçılar Mahallesi için $w_n/w_L - (N_1)_{60}$ Grafiği

Zemin numunelerinin w_n/w_L değerleri azaldıkça numunelerin $(N_1)_{60}$ değerlerinde beklenen bir artış gözlenmektedir. Bu durum yapılan zemin deneylerinin kalitesi hakkında bize fikir vermektedir. Bu grafiğin doğrusal olarak azalım göstermesi beklenirken bazı sapmaların olmasının ana sebeplerinden biri de numunelerin belli oranda silt içermesidir.

4.3.3.2 Tıgçılar Mahallesindeki Zeminlerin Deprem Sırasındaki Davranışları

Tıgçılar Mahallesinde 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sırasında büyük sıvılaşma problemleri görülmüştür. Tıgçılar mahallesinden elde edilen veriler Tablo 4.7’de sunulmuştur. Bu tabloda dinamik kayma gerilme oranı tespitinde bölüm 2.7.2’de anlatılan deprem magnitüdü 7.5 olan bir deprem için Seed ve diğ., 2001 yöntemi kullanılmıştır. Bu veriler ışığında Tıgçılar mahallesinin deprem sırasındaki davranışını ortaya koyan Dinamik Kayma Gerilme Oranı(DKGO) ve $(N_1)_{60}$ değerlerinin değişimi ince dane oranlarına göre sınıflandırılıp Şekil 4.24’de gösterilmiştir.



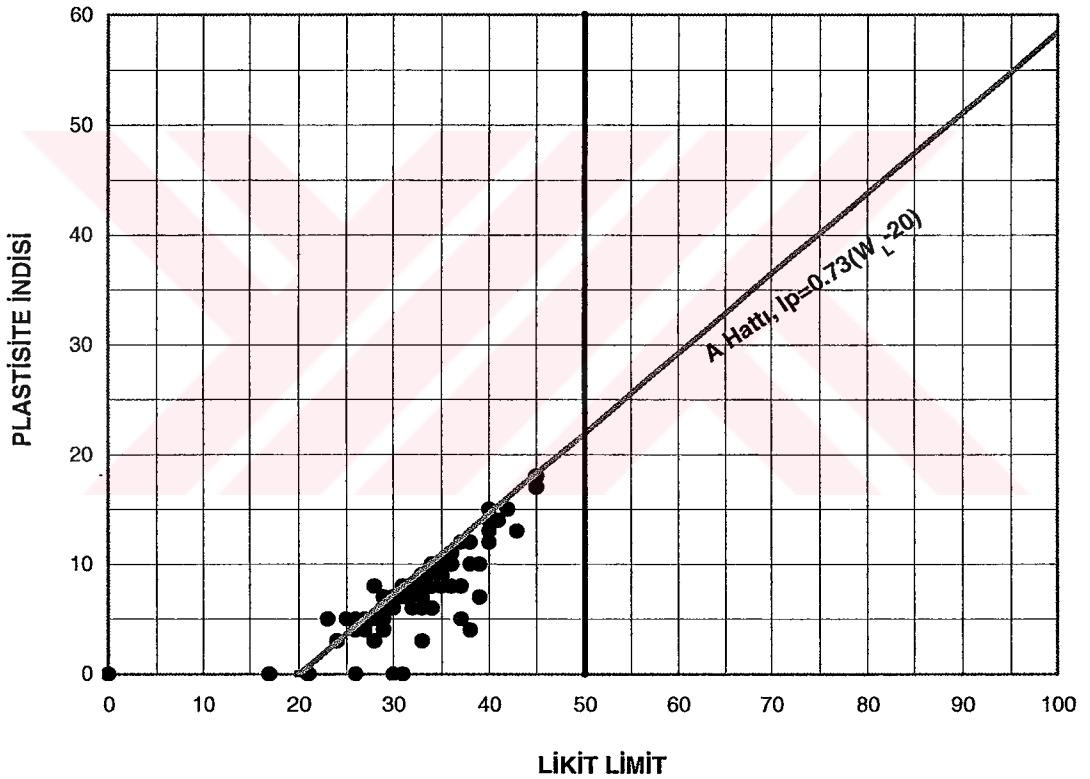
Şekil 4.24 Tığcılar Mahallesi'nin Deprem Sırasındaki DKG0 - (N₁)₆₀ Grafiği

Tığcılar Mahallesi'nde seçilen sondajların tümünde ve tüm derinliklerde sıvılaşma gözlenmiştir Şekil 4.24'de gösterilen ince dane oranlarına göre sınıflanan grafikte ince dane oranları arttıkça sıvılaşabilen numune miktarının arttığı söylenebilir. Ayrıca NCEER 1997'den sonra çalışmasında gösterilen %5, %15, %35 ince dane oranlarına ait DKG0 eğrileri gösterilmiştir. Bu DKG0 eğrilerine ilave eğriler çalışmanın son bölümünde örselenmiş numuneler ile yapılan çalışmalarla birlikte sunulacaktır.

4.4 Arazi Verilerinin Ortak Değerlendirilmesi

Bölüm 4.3’de 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrası sivilaşmanın yoğun görüldüğü üç mahallede yapılan sondajlar sonrası elde edilen veriler mahalle bazında değerlendirilip sivilaşmayı etkileyen zemin parametreleri arasında korelasyonlar oluşturulmaya çalışılmıştı. Bu bölümde bu üç mahallenin verileri kullanılarak ortak bir değerlendirilme yapılmış olacaktır.

Mahalle sondajlarının tümünden elde edilen veriler incelenmiş, sivilaşan zemin tabakalarına ait veriler kullanılmıştır. Bunun için öncelikle plastiklik kartı oluşturulmuştur. Bu karta göre likit limiti 50’den düşük ve A hattının ($I_p = 0.73 (w_L - 20)$ doğrusunun) altında kalan numuneler araştırma kapsamına alınmıştır. Bu şartlar altında ortaya çıkan plastisite kartı Şekil 4.25’de gösterilmiştir.

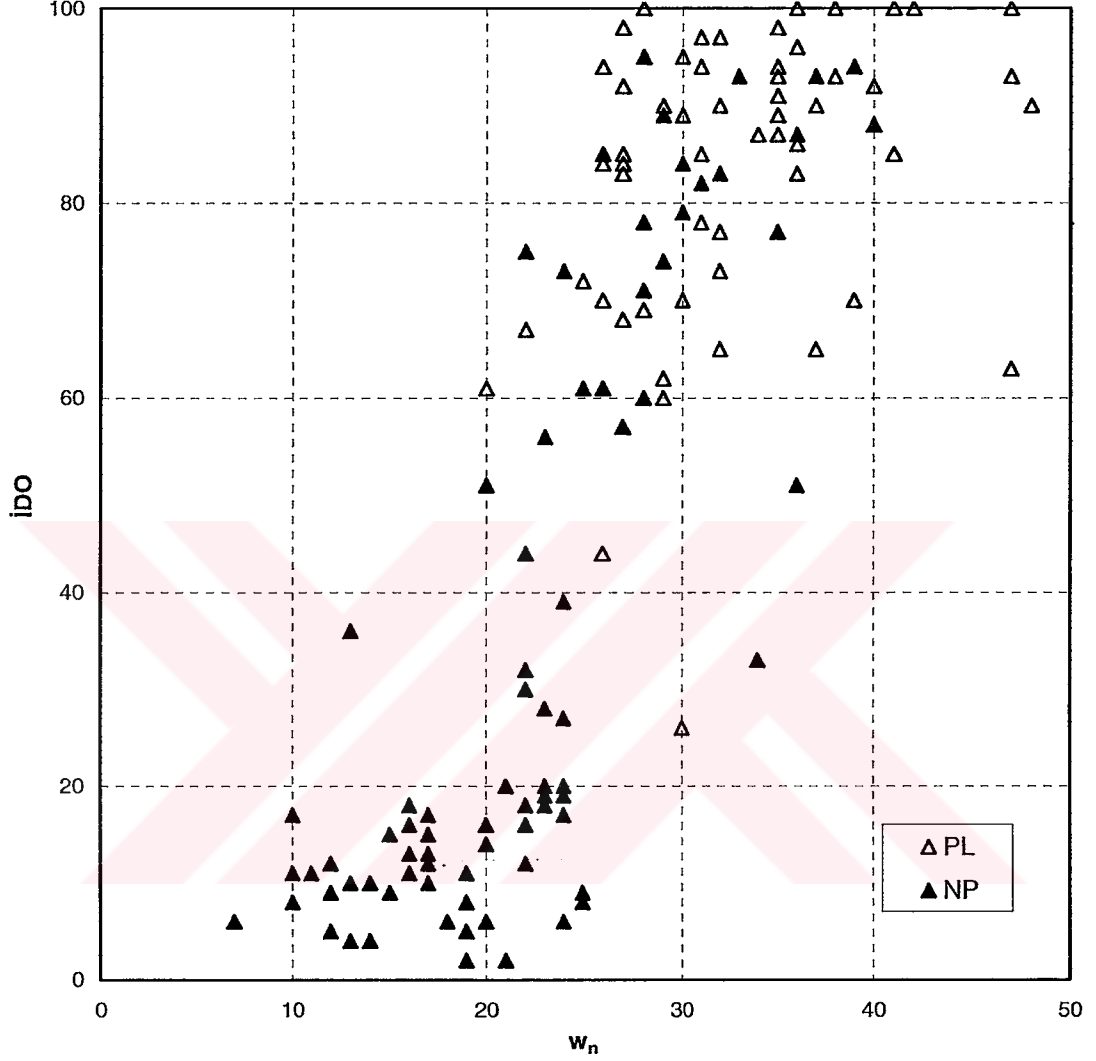


Şekil 4.25 Arazi Verileri İçin Ortak Plastiklik Kartı

Ortak değerlendirme kapsamında seçilen sondajlardaki numuneler için plastik olmayan numuneler dışındaki numuneler için plastisite indisi 5 ile 15 arasında yer almaktadır, likit limitler ise 20 ile 40 arasında yer almaktadır. Bu eleme sonunda çalışmada kullanılan numune cinleri birleştirilmiş zemin sınıflarına göre ML, ML-CL olduğu gözlenmektedir.

İnce dane oranının tabii su muhtevasıyla olan değişimini incelemek için Şekil 4.26 oluşturulmuştur. Plastik olmayan numunelerin davranışını ayrı olarak izlenmiş ve

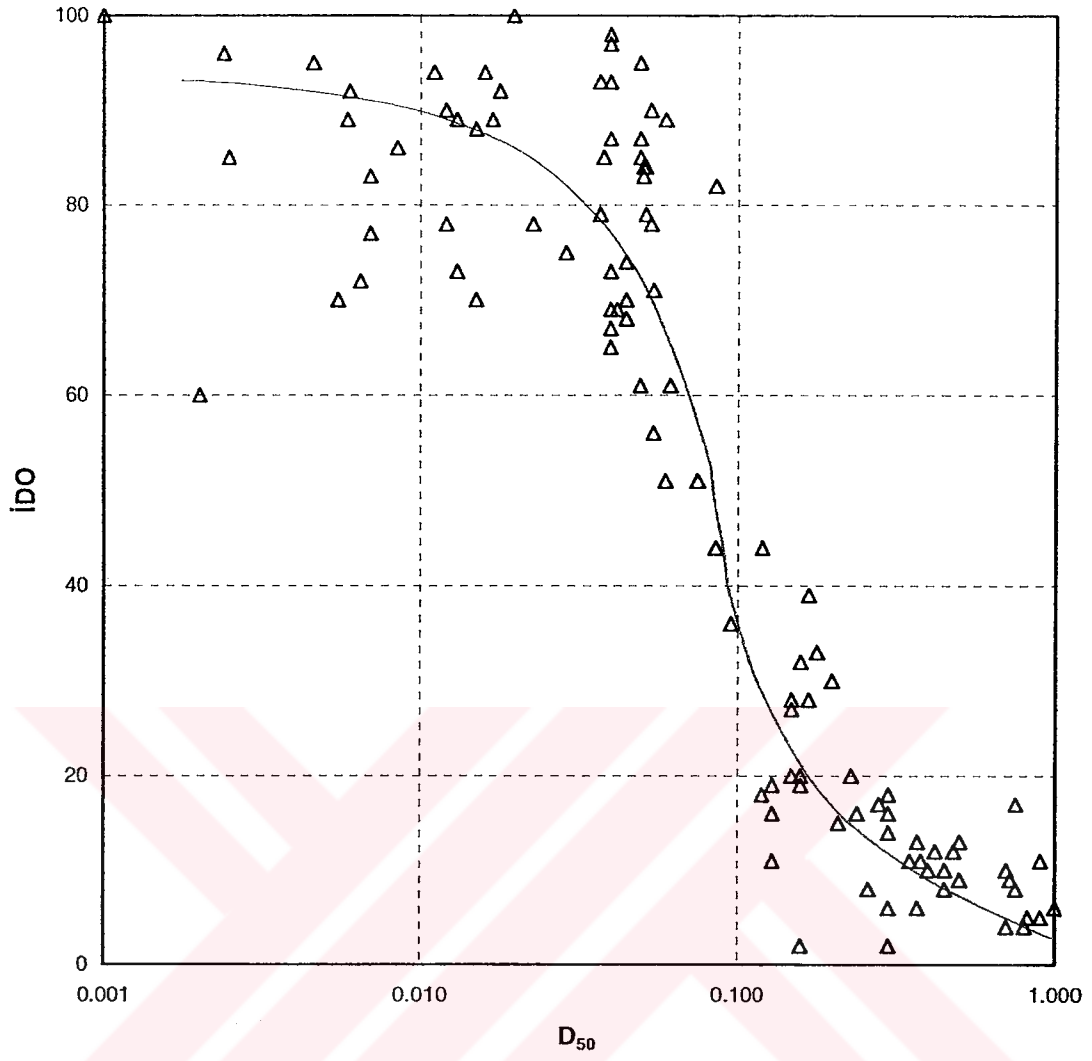
plastik numuneler ile farkı sunulmuştur. Bu grafikte de su muhtevasının artımına karşı ince dane oranlarının plastik ve plastik olmayan numuneler için de azalan eğimle arttığı gözlenmiştir. Plastik numunelerin tabii su muhtevaları 20 ile 47 arasında, ince dane oranları 5 ile 100 arasında değişmektedir



Şekil 4.26 Ortak Arazi verileri için w_n -İDO Grafiği

Plastik olmayan numunelerin tabii su muhtevaları 7 ile 40 değer aralığında ince dane oranları 2 ile 95 değer aralığında değişim göstermektedir. Plastik olmayan ve düşük plastisiteli numuneler benzer bir davranış göstermektedir.

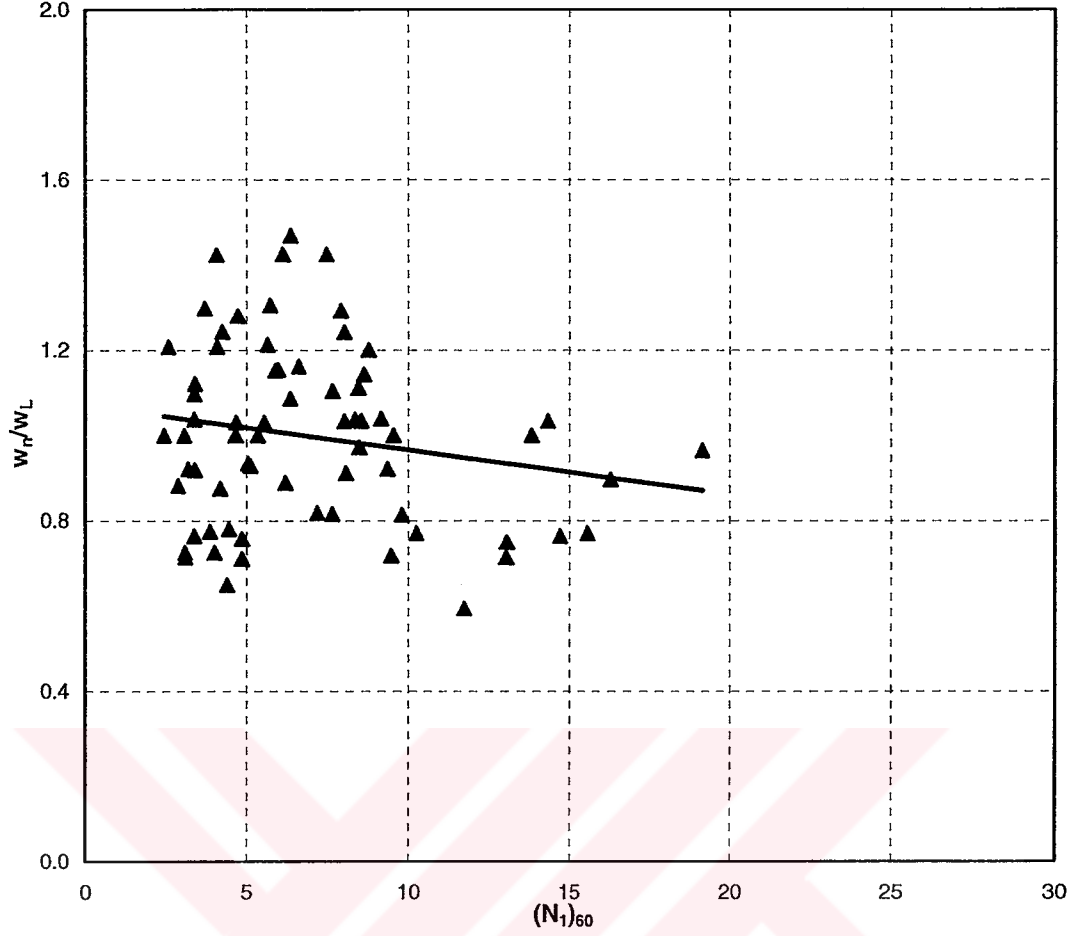
İnce dane oranının ortalama dane çapıyla olan değişimini gözleyebilmek için Şekil 4.27 oluşturulmuştur. Ortalama dane çapı genelde küçük değerler aldığı için değişimi net izleyebilmek için D_{50} değerleri için logaritmik eksen takımı seçilmiştir.



Şekil 4.27 Ortak Arazi verileri için log D_{50} – İDO Grafiği

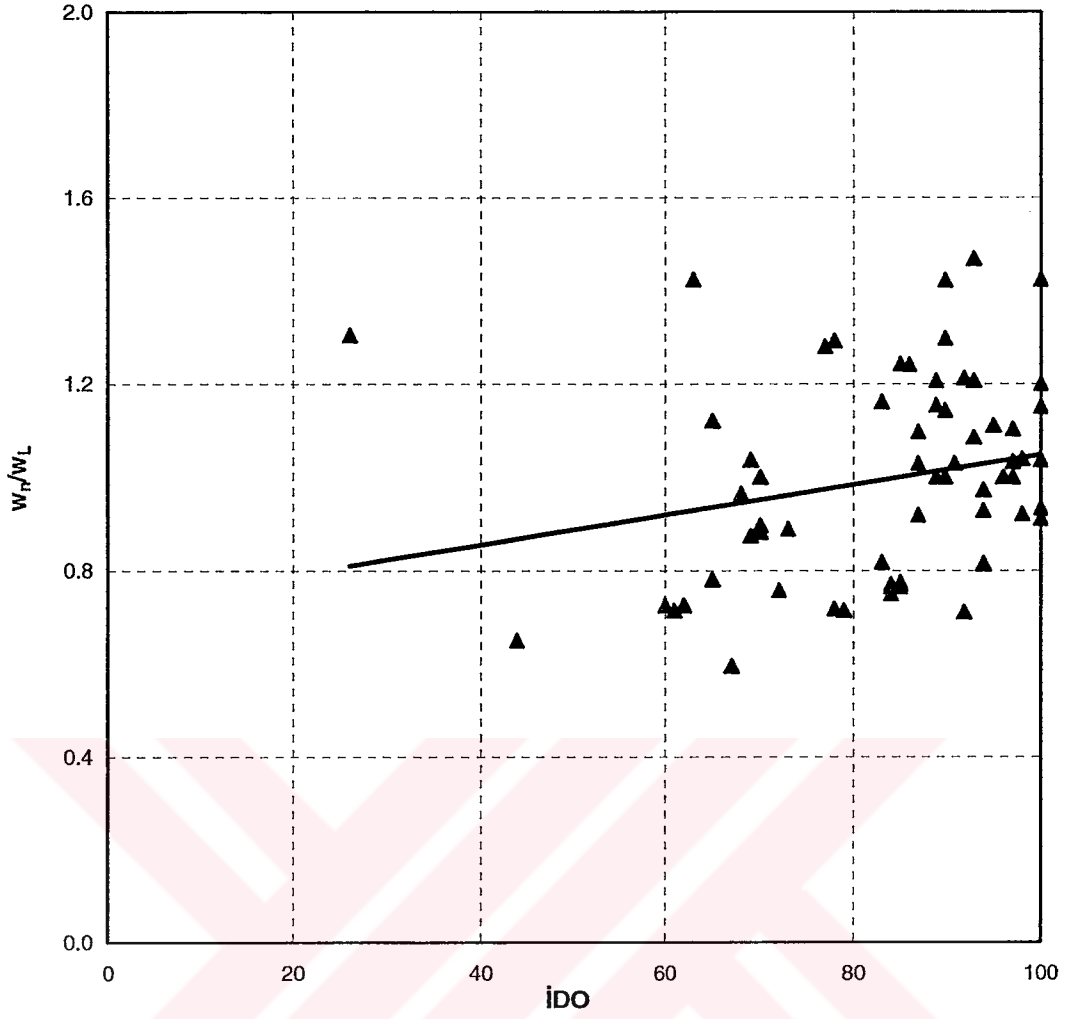
Bu grafikten ortalama dane çapları küçüldükçe ince dane oranlarının arttığını söyleyebiliriz. Grafikten çizilen 2.dereceden polinom eğrisi bu değişimi göstermektedir. Bu sonuç da zemin için beklenen bir durumdur. İnceleme yapılan zemin numunesi için ortalama dane çapları genel olarak 0.0025 ile 1.0cm arasında yer almaktadır. Adapazarı'nda $D_{50} = \%0.001 - 1$ aralığında olan zeminlerde sıvılaşma gözlenmiştir.

Ortak arazi verileri için gözlenmesi gereken bir diğer olgu da zeminin kıvam oranının $(N_1)_{60}$ ile olan korelasyonudur. Zemin kıvam oranının w_n/w_L 'nin 1 den büyük olduğu durumlarda zeminler sıvıya yakın bir formda bulunur ve haliyle SPT değerleri bu tip numuneler için düşük çıkması beklenir. Bu halde, $(N_1)_{60}$ değerlerinin w_n/w_L ile belli bir ters orantı içinde değişmesi gerekir. Şekil 4.28'de ortak arazi verilerinin w_n/w_L ile $(N_1)_{60}$ değişimi gösterilmektedir.



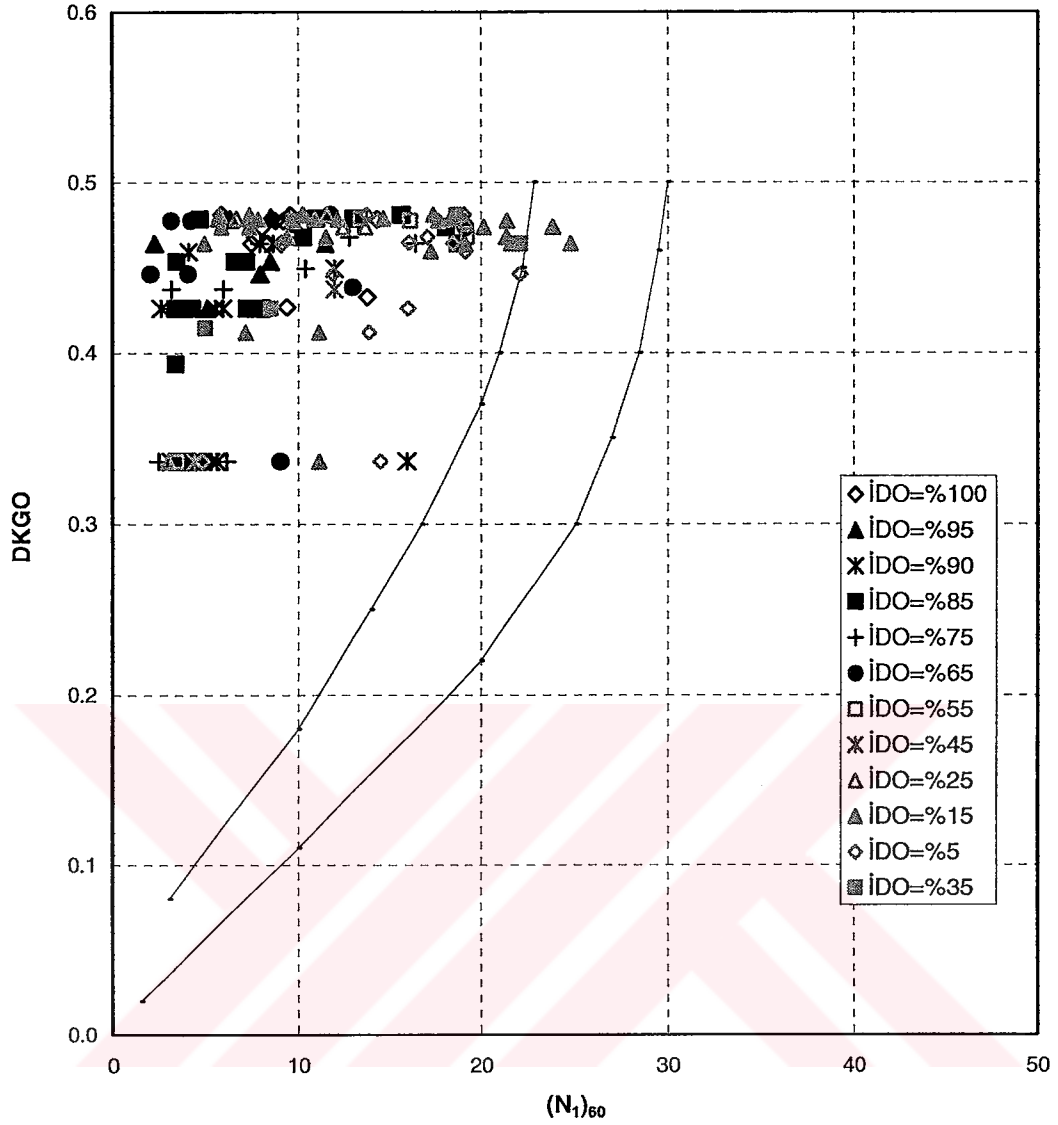
Şekil 4.28 Ortak Arazi verileri için $w_n/w_L - (N_1)_{60}$ Grafiği

Zemin numunelerinin w_n/w_L değerleri azaldıkça numunelerin $(N_1)_{60}$ değerlerinde beklenen bir artış gözlenmektedir. Bu grafiğin doğrusal olarak azalım göstermesi beklenirken bazı sapmaların olmasının ana sebeplerinden biri de numunelerin belli oranda kumlu numune içermesidir. Şekil 4.28’de zeminin yumuşak olması beklenirken yüksek $(N_1)_{60}$ değerlerinin çıkmasını incelemek için w_n/w_L ile ince dane oranı arasındaki ilişkiyi gözlemlemek gerekir, bu ilişki Şekil 4.29’da gösterilmektedir. Bu grafiğe göre ince dane oranı azaldıkça w_n/w_L değerlerinde de azalma görülmüştür, bu durum da zeminler için beklenen bir durumdur.



Şekil 4.29 Ortak Arazi verileri için w_r/w_L - İDO Grafiği

17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sırasında Adapazarı'nda önceki bölümde anlatılan üç mahallede büyük sıvılaşma problemleri görülmüştür. Bu üç mahalleden elde edilen veriler Tablo 4.3, Tablo 4.5, Tablo 4.7'de sunulmuştur. Bu tablolarda dinamik kayma gerilme oranı tespitinde bölüm 2.7.2'de anlatılan deprem magnitüdü 7.5 olan bir deprem için Seed ve diğ., 2001 yöntemi kullanılmıştır. Bu veriler ışığında bu üç mahallenin deprem sırasındaki davranışını ortaya koyan Dinamik Kayma Gerilme Oranı(DKGO) ve $(N_1)_{60}$ değerlerinin değişimi ince dane oranlarına göre sınıflandırılıp Şekil 4.30'da gösterilmiştir



4.5 Örselenmemiş Numunelerin Dinamik Direnci

Çalışmanın bu bölümünde Adapazarı bölgesi, (Kaya ve diğ.,2002), İzmir bölgesi (Ülker., 2004) ve Erken ve Ülker.,1994., Seed ve diğ.,1985, Yoshimi.,1989 çalışmalarından bölgelerinden alınan örselenmemiş zemin numunelerinin dinamik basit, dinamik burulmalı basınç ve dinamik üç eksenli basınç deneylerinin verileri ve bu verilerle yapılmış sıvılaşma direnci analizleri incelenecektir. İnce dane oranına göre Dinamik Kayma Gerilme Oranı eğrileri elde edilecektir. Eldeki numunelerin sondaj loglarından elde edilen N_{30} değerleri bölüm 2.6.2.1 de anlatılan SPT düzenlemesiyle $(N_1)_{60}$ değerlerine getirilmiştir. Örselenmemiş numuneler ile yapılan deneyler ayrı ayrı tablolarda gösterilmiştir. Bu veriler ışığında oluşturulan grafiklerde tablolardaki tüm değerler ortak veri havuzundan oluşmaktadır. Erzurum bölgesine ait örselenmemiş numunelerle yapılan dinamik basit kesme deneyine ait veriler (Erken ve Ülker.,1994) Tablo 4.8’de gösterilmiştir. Bu tabloda gösterilen N_c değeri deneyde kullanılan örselenmemiş zemin numunesinin %2.5 deplasman seviyesine ulaştığı andaki devir sayısına karşı gelmektedir. Bu araştırmada genel olarak 20 çevrimde sıvılaşan deney sonuçları değerlendirilmiştir.

Tablo 4.8 Erzurum Ekşisi Dinamik Basit Kesme Deneyi (Erken ve Ülker.,1994)

Deney No	Sondaj No	Derin. (m)	IDO (%)	$(N_1)_{60}$	w_n (%)	w_L (%)	I_p (%)	Zemin Cinsi	DKGO deney	DKGO arazi	N_c ($\gamma=\pm\%2,5$)
E02	SK3-UD4	7.25	100	2.85	41	44	6	OL	0.246	0.221	5
E05	SK3-UD4	7.25	100	3.02	44	44	6	OL	0.321	0.289	2.5
E06	SK3A-UD2	7.25	98	2.86	36	49	—	ML	0.183	0.165	4.5
E10	SK3A-UD1	4.25	98	2.06	38	49	—	ML	0.153	0.138	35
E18	SK3A-UD1	4.25	62	1.90	36	36	10	ML	0.353	0.318	5
E19	SK3A-UD1	4.25	62	1.89	36	36	10	ML	0.310	0.279	25
E37	SK3-UD3	5.75	83	5.20	33	31	—	OL	0.200	0.180	22
E38	SK3-UD3	5.75	83	5.23	30	31	—	OL	0.234	0.210	8
E45	SK4-UD4	6.25	70	5.26	41	—	—	ML	0.501	0.451	7
E47	SK4-UD4	6.25	80	4.86	41	—	—	ML	0.588	0.529	1.5
E39	SK3-UD3	5.75	49	4.78	38	31	NP	SM	0.295	0.265	35
E40	SK3-UD2	4.25	28	1.77	18	25	NP	SM	0.400	0.360	1
E41	SK3-UD2	4.25	25	1.69	18	25	NP	SM	0.345	0.310	8
E42	SK3-UD2	4.25	35	1.66	18	25	NP	SM	0.285	0.256	20
E43	SK3-UD2	4.25	11	1.69	18	25	NP	SM	0.420	0.378	30
E44	SK4-UD4	6.75	48	5.13	41	—	NP	SM	0.421	0.379	1.5
E49	SK3A-UD3	8.75	30	2.14	18	—	NP	SM	0.350	0.315	1

Adapazarı bölgesine ait örselenmemiş numunelerle yapılan dinamik 3 eksenli basınç deneyine ait veriler (Kaya ve diğ.,2002) Tablo 4.9’da gösterilmiştir. Bu tabloda sunulan verilerden N_c değeri dinamik üç eksenli deneyde numunenin % ± 2.5 deformasyona uğradığı değere karşı gelmektedir.

Tablo 4.9 Adapazarı Bölgesi Dinamik Üç Eksenli Basınç Deneyi (Kaya ve diğ.,2002)

Deney No	Sondaj No	Derin. (m)	İDO (%)	$(N_1)_{60}$	w_n (%)	w_l (%)	I_p (%)	Zemin Cinsi	DKGO deney	DKGO arazi	N_c % ± 2.5
S4-1	S4	3.25	55	5.66	22.37	—	NP	ML	0.320	0.158	19.3
S8-3	S8	3.25	97	2.16	44.40	—	NP	ML	0.400	0.198	19.2
T6-1	S2	7.50	89	5.84	24.55	31	NP	ML	0.410	0.203	20
T7-2	S6	7.75	86	3.81	27.23	26	NP	ML	0.360	0.178	2.5
S3-1	S3	10.75	53	7.78	37.18	—	NP	ML	0.280	0.139	7.3
S3-3	S4	10.75	39	7.78	32.40	—	NP	SM	0.210	0.104	23.3

İzmir bölgesine ait örselenmemiş numunelerle yapılan dinamik 3 eksenli basınç deneyine ait veriler (Ülker.,2004) Tablo 4.10’da gösterilmiştir.

Tablo 4.10 İzmir Bölgesi Dinamik Burulmalı Basınç Deneyi (Ülker.,2004)

Deney No	Sondaj No	Derinlik (m)	İDO (%)	$(N_1)_{60}$	w_n (%)	w_L (%)	I_p (%)	Zemin Cinsi	DKGO deney	DKGO arazi	N_c % ± 2.5
DÖ1	A5	7.75	98	2	43	55	18	MH	0.327	0.294	2
DSÖ2	A5	9.25	63	2	32	34	8	ML	0.227	0.204	3
DSÖ1	A3	5.25	55	3	35	31	9	CL	0.240	0.216	10
DSÖ3	A3	5.25	52	3	35	31	6	ML	0.170	0.153	20
DÖ2	1	2.75	95	5	40	37	13	ML	0.333	0.299	1

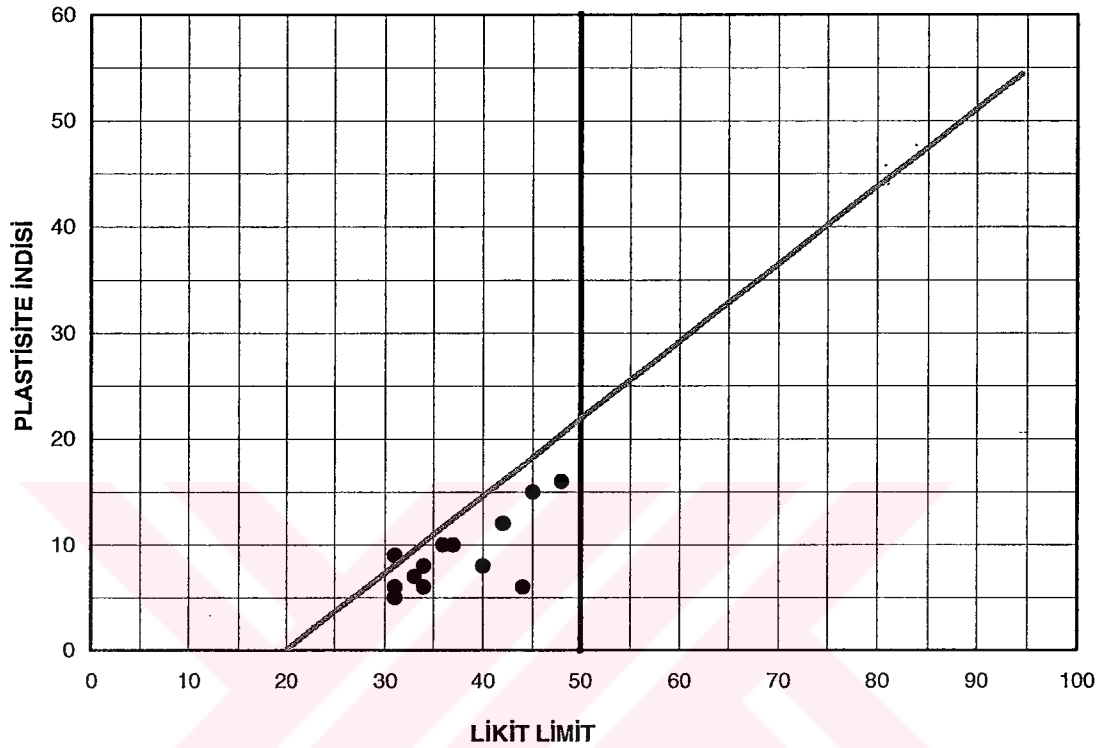
Yukarıdaki tablolarda verilen dinamik kayma gerilme oranı değerleri deney ve arazi değerleri olarak ayrı ayrı gösterilmiştir. Deneyden elde edilen dinamik kayma gerilme oranı değerleri arazi değerlerine dönüştürmek için Seed ve Peacock,1971 bağıntısına göre düzenlenmiştir. Bu bağıntı şu şekilde gösterilmiştir:

$$DKGO_{arazi} = 0.9 * DKGO_{bk} \quad (4.10)$$

$$DKGO_{arazi} = 0.9 * 0.55 * DKGO_{üe} \quad (4.11)$$

Burada $DKGO_{arazi}$, araziye uyarlanmış dinamik kayma gerilme oranını, $DKGO_{bk}$ dinamik basit kesme deneyinden elde edilen dinamik kayma gerilme oranını, $DKGO_{üe}$ dinamik üç eksenli basınç deneyinden elde edilen dinamik kayma gerilme oranını göstermektedir.

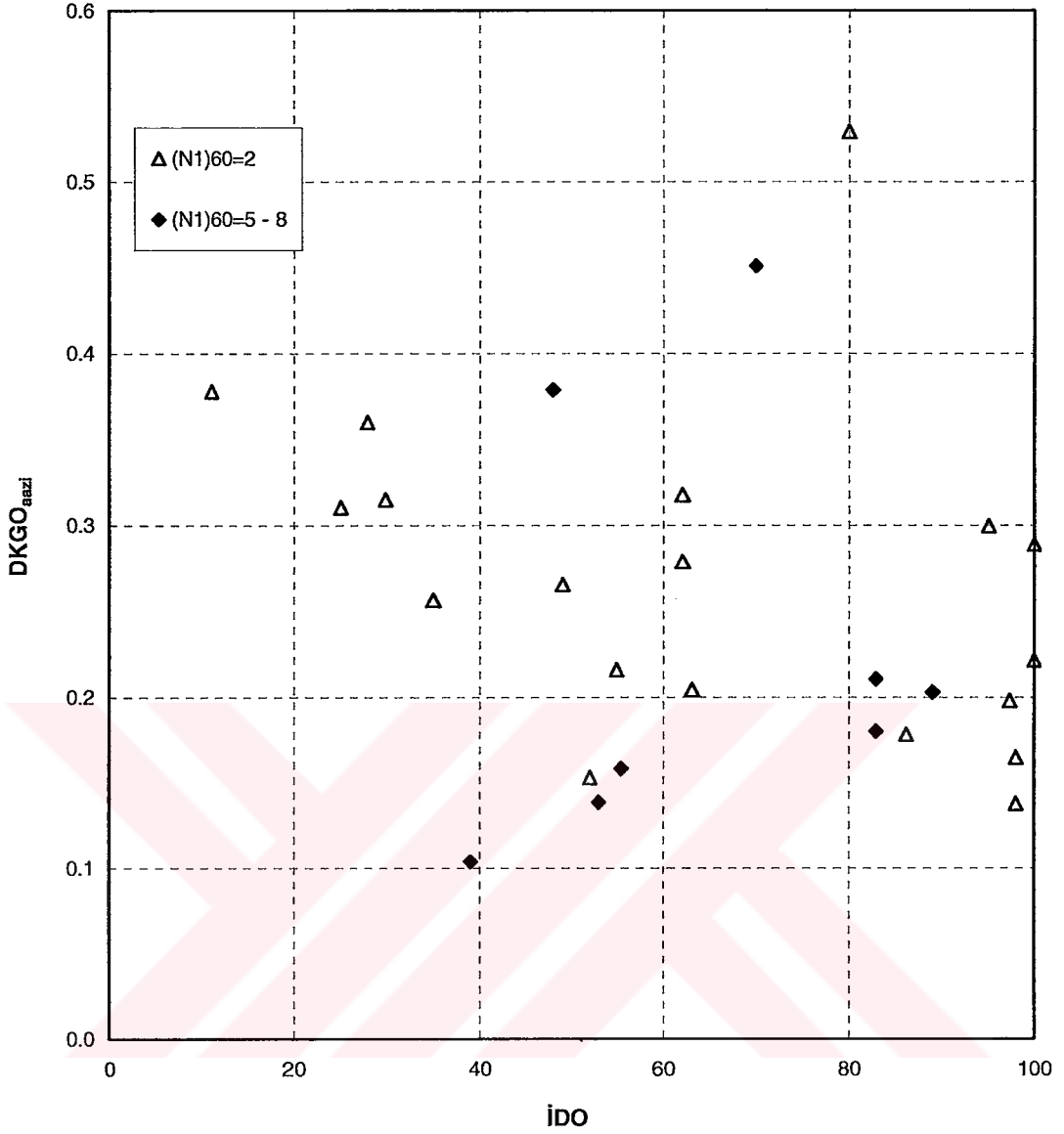
Tüm deneylerden elde edilen veriler incelenmiş, içlerinden yüksek plastisiteli killler, inorganik siltler ve organik killler ayıklanmıştır. Bunun için öncelikle plastiklik kartı oluşturulmuştur. Bu karta göre likit limiti 50'den düşük ve A hattının ($I_p = 0.73 (w_L - 20)$ doğrusunun) altında kalan numuneler araştırma kapsamına alınmıştır. Bu şartlar altında ortaya çıkan plastiklik kartı Şekil 4.31'de gösterilmiştir.



Şekil 4.31 Örstenmemiş numuneler için oluşturulan plastisite kartı

Plastisite indisi $I_p = 0.73(w_L - 20)$ bağıntısıyla verilen doğrunun altında kalan ve likit limiti 50 den küçük olan bu numunelerin zemin özellikleri genelde inorganik siltler, çok ince kumlar (ML), ve düşük plastisiteli siltler (CL), fena derecelenmiş kum silt karışımları (SM), organik siltler (OL) kullanılmıştır.

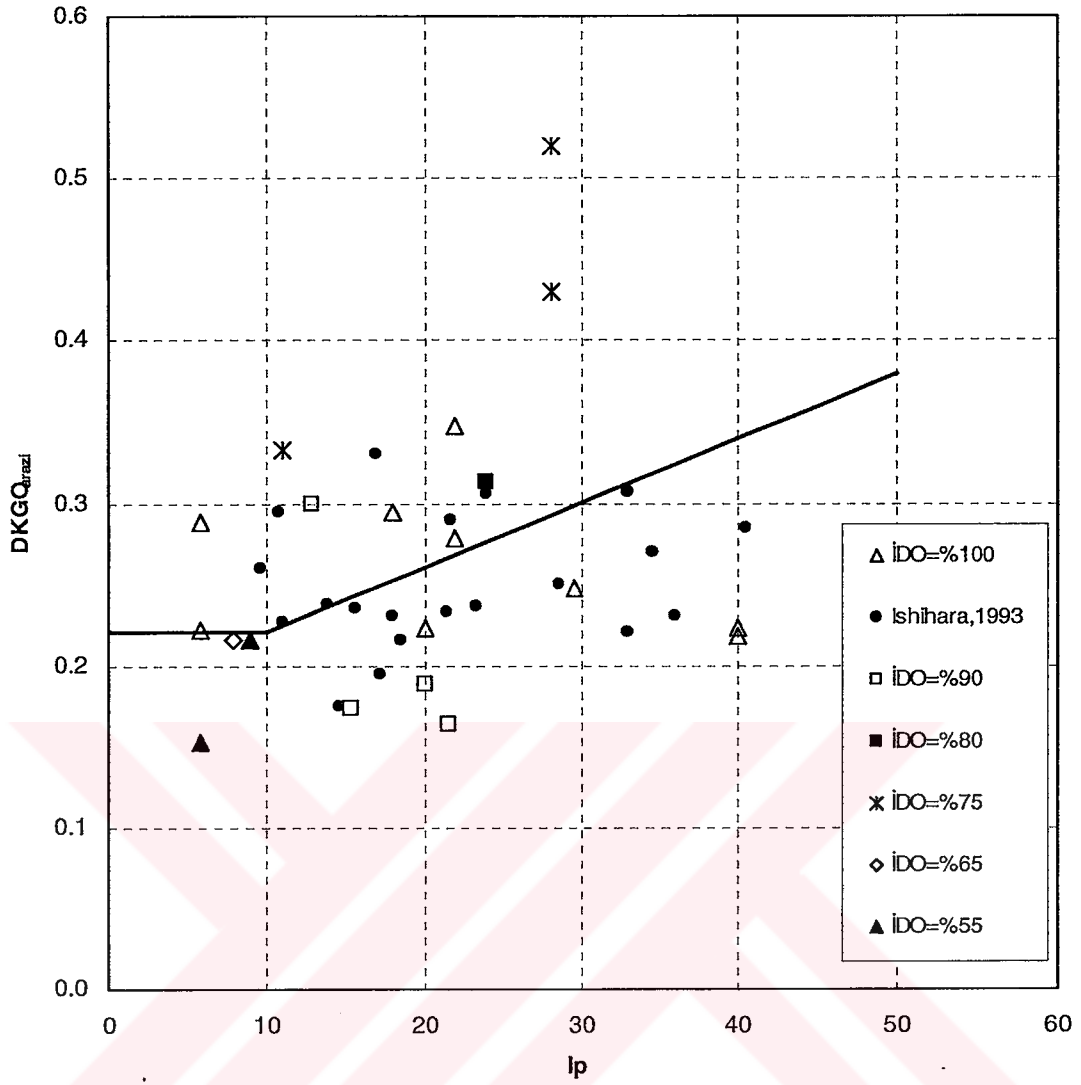
Dinamik kayma gerilme oranı ile ince dane oranları arasındaki değişimi Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Bu grafikte $(N_1)_{60}$ değerlerinin 2 olduğu ve 5-8 aralığında olduğu durumlara göre ince dane oranları sınıflandırılmıştır.



Şekil 4.32 Örselenmemiş numuneler için İDO ve DKG0 değışimi

Bu şekle göre zemin numuneleri gevşek ve yumuşak olduğu için $(N_1)_{60}$ 'ın davranışını üzerinde bir etkisi görülmemektedir. Fakat genel olarak ince dane oranı arttıkça dinamik kayma gerilme oranı azalmaktadır. Noktaların dağılım göstermesinin ana nedeni zeminin plastisitesinden kaynaklanmaktadır.

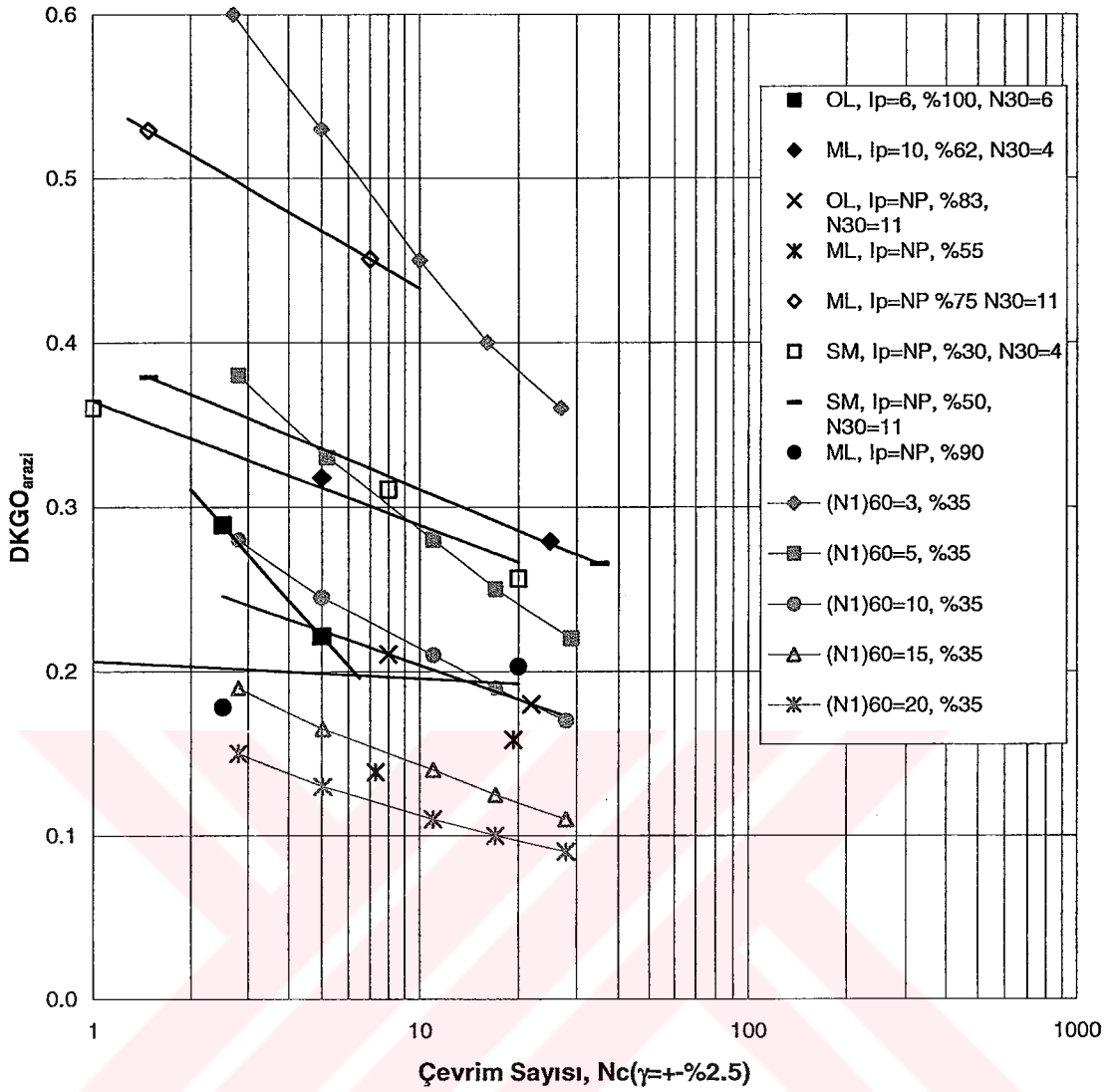
Dinamik kayma gerilme oranı ile plastisite indisi arasındaki değışimi Şekil 4.33'de gösterilmiştir. Bu grafikte İshihara ,1993'den sonra çalışmasından elde edilen örselenmemiş deney verileri ve Tablo 4.8, Tablo 4.9, Tablo 4.10'daki tüm deneylere ait örselenmemiş veriler birlikte kullanılmıştır. Grafik oluşturulurken plastisitesi 0'dan farklı numunelerle çalışılmıştır.



Şekil 4.33 Örselenmemiş numuneler için I_p ve DKGO eğrileri

Bu şekle göre ince dane oranı %100, %90, %80, %65 ve %55 olan numunelerinin dinamik kayma gerilme oranı ve plastisite indisi değişimi Ishihara,(1993) tarafından verilen veriler ile büyük bir uyum göstermektedir.

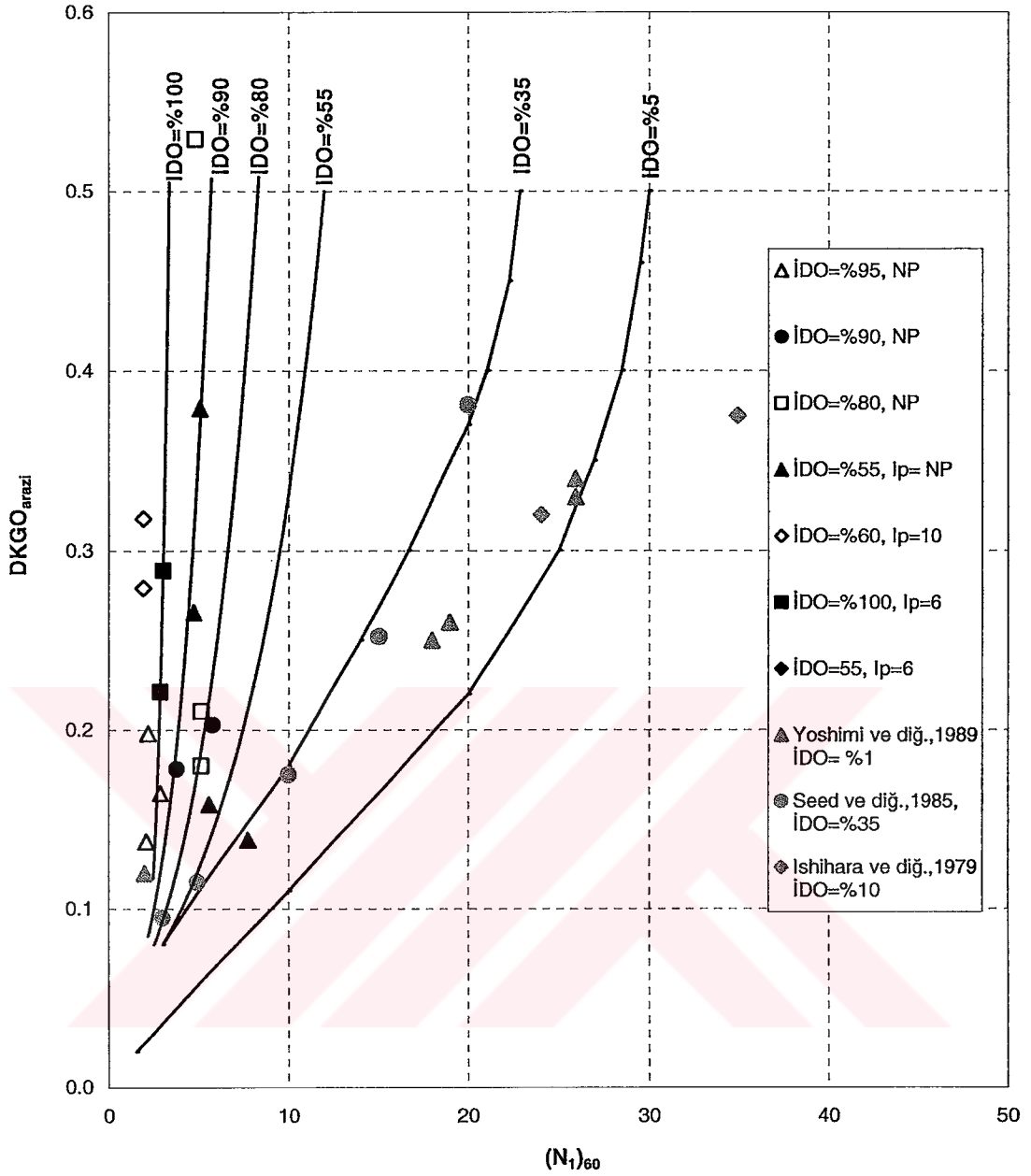
Dinamik kayma gerilme oranı ve ± 2.5 deformasyon oluşturup sıvılaşmaya bağlı göçmeye yol açan çevrim sayıları arasındaki değişim Şekil 4.34'de gösterilmiştir. Bu grafik oluşturulurken Tablo 4.8, Tablo 4.9, Tablo 4.10'daki örselenmemiş zemin numunelerine ait veriler ile birlikte Seed ve diğ., 1985 çalışmasına ait veriler kullanılmıştır. Burada kullanılan örselenmemiş deney verileri Seed ve Peacock,1971 bağıntısına göre arazi şartlarına uyarlanmıştır.



Şekil 4.34 Örstenmemiş numuneler için N_c ve DKGO eğrileri

Şekil 4.34’de kullanılan numunelerde sıvılaşmaya bağlı göçme 20 çevrim civarında gerçekleşmekte, göçmenin olduğu seviye ise ± 2.5 deformasyon seviyesidir. Numunelerde 20 çevrim civarına karşı gelen dinamik kayma gerilmesi oranı okunduğunda ince dane oranı ve $(N_1)_{60}$ değeri bilinen numuneler elde edilmiş olur.

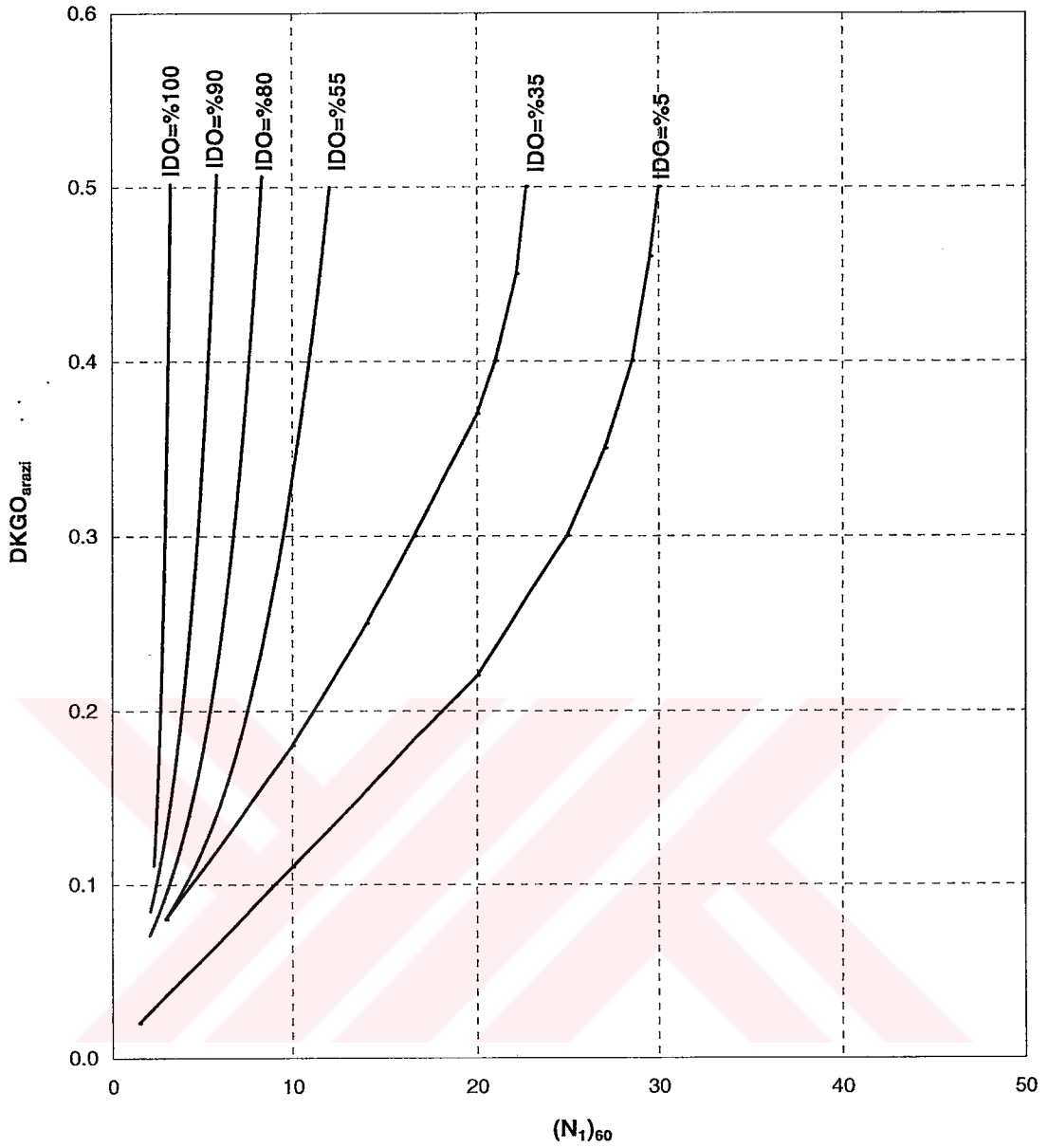
Bu yöntemle Seed ve diğ., 1985 çalışmasına ait veriler için ince dane oranı %35 için sıvılaşma sınır eğrileri oluşturulabilir. Benzer şekilde Tablo 4.8, Tablo 4.9, Tablo 4.10’daki örstenmemiş veriler ve Yoshimi ve diğ., (1989), Ishihara ve diğ., (1979) çalışmalarından da derlenen numuneler ile Şekil 4.35’de gösterilen $(N_1)_{60}$ ve dinamik kayma gerilmesi oranı değişimini ve bu değişime bağlı elde edilmiş farklı ince dane oranları için oluşturulmuş sıvılaşma sınır eğrileri oluşturulmuştur.



Şekil 4.35 Örselenmemiş numuneler için sıvılaşma analizi ve DKGO eğrileri

İnce dane oranı %5 ve %35'e ait olan dinamik DKGO eğrileri NCEER, 1997'den sonra çalışmasında kullanılan eğrilerdir. Ancak burada unutulmaması gereken bir nokta, bu şeklin 7,5 büyüklüğündeki bir deprem için hazırlandığıdır. Şekil 4.34'den elde edilen Seed ve diğ., 1985'e ait veriler de bu grafikte %35 ince dane oranı için oluşturulmuş DKGO eğrisini desteklemektedir. Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan İDO=%55, %80, %90 ve %100 için oluşturulmuş DKGO eğrileri Şekil 4.35'de gösterilmiştir. Bu eğriler üzerinde belirtilen ince dane oranları için sıvılaşma sınırlarını belirtmektedir.

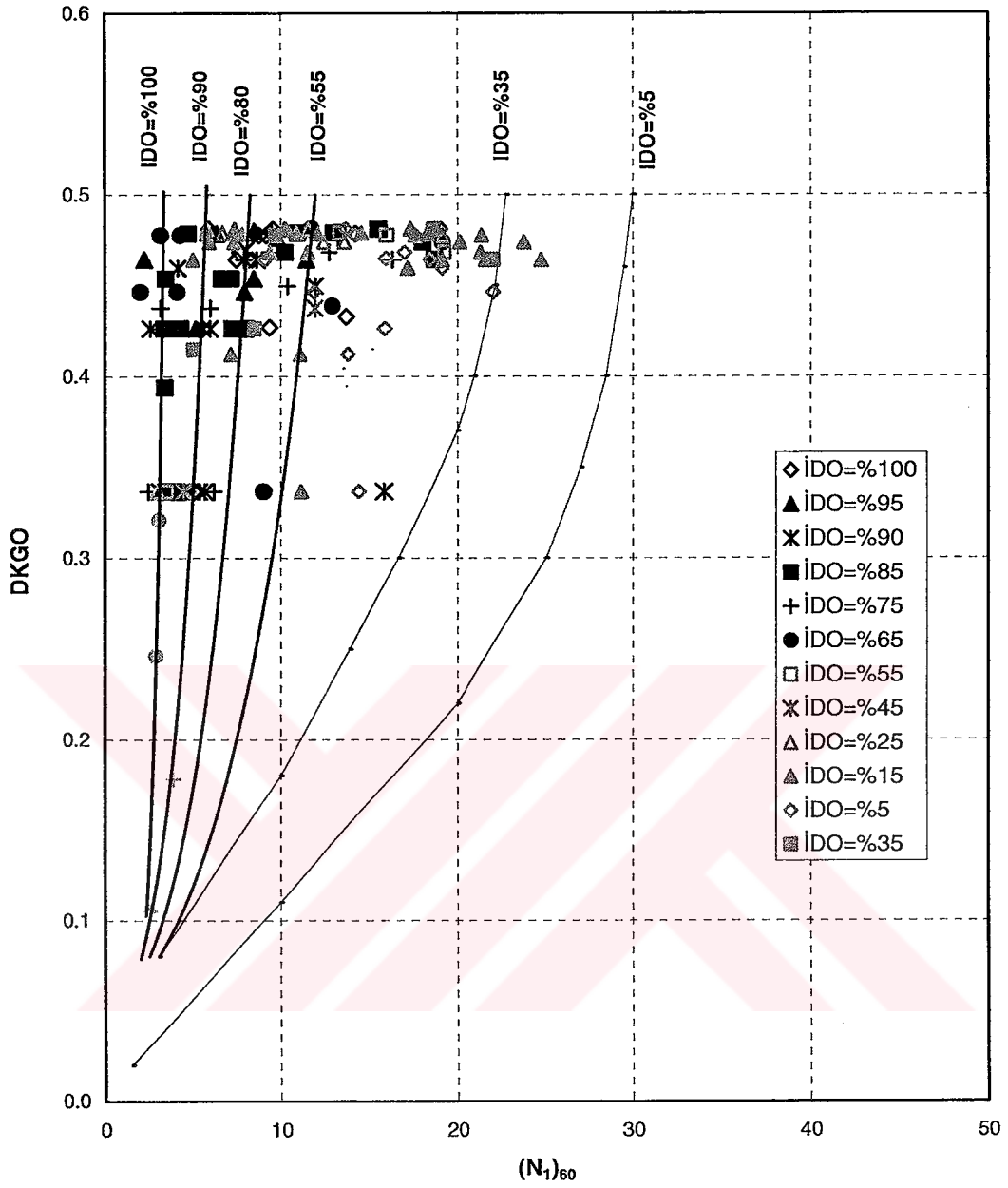
Örselenmemiş numunelerde bağımsız olarak sadece dinamik kayma gerilme oranı eğrileri Şekil 4.36'da gösterilmiştir.



Şekil 4.36 Örselenmemiş numuneler için oluşturulmuş DKGO eğrileri

Şekil 4.36'da gösterilen dinamik kayma gerilme oranı eğrileri araziye göre uyarlanmış şekilde bulunmaktadır.

Adapazarı arazi sondajlarından elde edilen İstiklal, Cumhuriyet ve Tıgçılar mahalleleri verileri Şekil 4.35'de elde edilen farklı ince dane oranları için oluşturulmuş DKGO eğrileri ile kıyaslanmaları, örselenmemiş numunelerden elde edilen laboratuvar deneysel verilerinin arazi verileriyle uyumu hakkında fikir verecektir. Bu amaçla ortak arazi verileri için oluşturulmuş Şekil 4.30 bu verilerin ışığında 7.5 şiddetindeki deprem için yeniden oluşturulmuş dinamik kayma gerilme oranı eğrileri Şekil 4.37'de gösterilmiştir.



Şekil 4.37 Örselenmemiş numuneler için oluşturulmuş DKGO eğrilerinin Adapazarı'ndan elde edilen ortak arazi verileri ile birlikte değerlendirilmesi

17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrasında bölgede sıvılaşmanın yoğun olarak gözlemlendiği İstiklal, Cumhuriyet ve Tıgıcılar mahallelerinde yapılan sondaj verileri ile örselenmemiş numune verileri birlikte değerlendirildiğinde birbirlerine yakın sonuçlar ve dinamik kayma gerilmesi oranı eğrileri oluşmaktadır.

4.6 Sonuçlar

Bu araştırma kapsamında öncelikle 17 Ağustos 1999 Kocaeli deprem verileri derlenip bu deprem için maksimum yer ivmesi tespiti yapılmıştır. Adapazarı'nın sıvılaşma görülen bölgelerinde deprem sonrasında yapılan sondaj çalışmalarından elde edilen veriler derlenip değerlendirilmiş, sıvılaşmayı etkileyen parametrelerden olan ince dane oranı ve plastisitenin zeminlerin endeks özellikleriyle olan değişimi incelenmiş ve Seed ve diğ.,2001 yöntemi kullanılarak sıvılaşma direnci verileri elde edilmiştir. Sonrasında Adapazarı, İzmir bölgelerinden elde edilen örselenmemiş zemin numuneleriyle yapılmış laboratuvar çalışmaları değerlendirilmiş, ayrıca literatürde yer alan bazı çalışmalardan örselenmemiş numune verileri alınarak örnekler zenginleştirilmiş ve arazi değerlerine uyarlanmıştır. Bu bağlamda örselenmemiş numuneler için sıvılaşma direnci grafikleri oluşturulmuş ve NCEER, 1997'den sonra çalışmasından farklı ince dane oranları için sıvılaşma sınır eğrileri elde edilmiştir. Son olarak arazilerden elde edilen veriler ile sıvılaşma sınır eğrileri mukayese edilmiştir ve arazi sonuçları ile deneysel verilerle elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Sıvılaşma son yıllarda üzerinde en çok araştırma yapılan zemin dinamiği konularından biridir. Bir çok zemin parametresi sıvılaşmayı etkilemekte ve bu etkilerde zeminin farklı durumlarına farklı sonuçlar gösterebilmektedir. Bu haliyle sıvılaşma başlı başına zemin mühendisliğin temel problemlerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıvılaşmaya etkileyen parametrelerin çokluğu ve bu parametrelerin birbirleriyle olan ilişkileri sıvılaşma üzerine daha çok araştırma yapılması gerekliliğini doğurmaktadır.

Bu yüksek lisans çalışması kapsamında depremlerde ortaya çıkarak yapılarda büyük hasarlar yaratan sıvılaşma problemi tüm yönleriyle tanıtılıp, sıvılaşan zeminler ve sıvılaşmayı belirleyen yöntemler üzerinde ince dane oranın ve plastisitenin etkileri araştırılmıştır. Ülkemizde sıvılaşmanın yaşandığı ve büyük hasarların görüldüğü 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ve bu deprem sonrasında Adapazarı bölgesinde yapılmış olan zemin incelemeleri ve sondaj verileri çalışmanın örselenmiş numune bazında veri tabanını oluşturmaktadır. Örselenmemiş numuneler için de Adapazarı bölgesi,(Kaya ve diğ.,2002), İzmir-Çiğli bölgesi (Ülker., 2004) ve Erken ve Ülker.,1994., Seed ve diğ.,1985, Yoshimi.,1989 çalışmalarından elde edilen veriler kullanılmıştır.

Öncelikle sıvılaşma, ön sıvılaşma, çevrimsel hareketlilik kavramları açıklanmış, sıvılaşma konusu ile ilgili kavramlar aydınlatılmıştır. Sıvılaşmanın mekanizması, boşluk suyu basıncının artış mekanizması açıklanmış sıvılaşmanın meydana getirdiği hasarlar görsel deprem örnekleriyle sunulmuştur. Bu bağlamda sıvılaşmaya etki eden tüm faktörler anlatılmıştır. Bu faktörlerden başlıcaları olan ince oranı ve plastisitenin etkisi deneysel verilerin ışığında araştırılmıştır. Sıvılaşmaya etki eden faktörler arasında numune üzerindeki sismik geçmişin etkisi son derece önemli ve araştırmaya açık bir konudur. Kum zeminler için relatif sıkılığın etkisi, ayrıca aşırı konsolidasyon oranı sıvılaşma üzerinde ciddi etkilere sahiptir. Sıvılaşmayı tetikleyen ana unsur deprem olduğu için zeminin depremin merkezine olan uzaklığı ve depremin şiddetinin az olması sıvılaşma hasarlarını azaltan yöndedir. Sıvılaşmanın etkilerini ve mekanizmasını araştırmak için yapılan laboratuvar ve arazi deneyleri büyük önem taşımaktadır. Arazi deneylerinden biri olan standart penetrasyon deneyi sonuçlarına bağlı olarak yapılan sıvılaşma analizleri çalışmanın merkezini oluşturmaktadır.

Araziden SPT değerlerini elde etmek oldukça pratik için bir yoldur ve SPT değerleri zeminin bir çok parametresi için –sıkılık gibi- fikir vermektedir. Araziden elde edilen SPT değerleri (N_{30}) yapılan enerji, boru çapı, zemin düzeltmeleriyle Seed ve diğ.,2001 çalışmasında bahsedilen (N_1)₆₀ düzeltilmiş değerine gelir.

Çalışma kapsamında Adapazarı'nda sıvılaşmanın yoğun görüldüğü İstiklal, Cumhuriyet ve Tığcılar mahallelerinde yapılan zemin sondajları bu mahallelerin coğrafi ve zeminlerinin geoteknik özellikleri açıklanmıştır. Bu analiz kapsamında 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin ivmesel büyüklükleri ve bu depremin özellikleri hakkında bir çalışma yapılmıştır. Bu üç mahallede 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrası yapılan zemin sondaj verileri değerlendirilip sıvılaşmaya yol açan zemin parametrelerinin özellikleri birbirleriyle ve bu numunelerin endeks özellikleriyle kıyaslanmıştır. Sonrasında bu üç mahalleye ait sıvılaşma direnci ve düzeltilmiş (N_1)₆₀ değerleri her bir mahalle için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

Çalışmanın son bölümünde Adapazarı ve İzmir bölgelerinden elde edilen örselenmemiş zemin numuneleriyle yapılmış dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli basınç ve dinamik burulmalı deney sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca rselenmemiş numuneleri zenginleştirmek için Ishihara, (1979, 1993), Seed ve diğ.,1985, Yoshimi ve diğ.,1989 çalışmalarından da veriler derlenmiştir. Toplanan tüm bu örselenmemiş deney verileri Seed ve Peacock,(1971) bağıntısına göre arazi şartlarına uyarlanmıştır ve arazi için oluşturulmuş dinamik kayma gerilme oranı grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafik ve verilerin ışığında ince dane oranı belirli numunelerden bir korelasyon oluşturup NCEER, 1997'den sonra çalışmasından farklı %100, %90, %80 ve %55 ince dane oranları için sıvılaşma sınır eğrileri elde edilmiştir. Bölümün başında Adapazarı'ndaki sondajlardan elde edilen düzeltilmiş SPT değerlerine bağlı depremde oluşan dinamik kayma gerilme oranı değişimi grafiğine örselenmemiş numunelerden elde edilen sıvılaşma sınır eğrileri adapte edilip ortak bir mukayese yapılmıştır. Sonuçta arazi sonuçları ile deneysel verilerle elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Bu alışma veri sayısı, bölge sayısı ve sondaj yapılan bölge sayısı arttırılarak daha da zenginleştirilerek devam ettirilebilir ve böylelikle daha farklı ince dane oranları için sıvılaşma sınır eğrileri elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Arioğlu, E., ve Yılmaz, A.O., 2000. Çözümlü Problemlerle Yeraltı Mühendislik Yapılarına Deprem Etkileri, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, İstanbul.
- Aydan, Ö., 1999. A Preliminary Investigation of Kocaeli Earthquake of August 17, 1999, Türkiye Deprem Vakfı, İstanbul.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H. and Tuncay, E., 2000. Site Investigation and Engineering Evaluation of The Düzce-Bolu Earthquake of November 12, 1999, Türkiye Deprem Vakfı, İstanbul.
- Barka, A., Akyüz, S., Altunel, E., Sunal, G., Çakır, Z., Dikbaş, A., Yerli, B., Rockwell, T., Dolan, J., Hartleb, R., Dawson, T., Fumal, T., Langridge, R., Stenner, H., Christofferson, S., Tucker, A., Armijo, R., Meyer, B., Chabalier, J.B., Lettis, W., Page, W. and Bachhuber, J., 2000. The August 17, 1999 İzmit Earthquake, $M = 7.4$, Eastern Marmara Region, Turkey: Study of Surface Rupture and Slip Distribution, *The 1999 İzmit and Düzce Earthquakes: Preliminary Results*, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 15-30.
- Castro, G. and Poulos, S. J., 1977. Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103.
- Çetin, K.O., Seed, R.B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L.F. and Kayen R.E., 2000. SPT-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Initiation Hazard, *Research Report, No: 2000/5*, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Das, B., M., 1993. Principles of Soil Dynamics, pp 397-453, PVVS-KENT Publishing Company, Boston, USA.

- Demirtaş, R.,** 2000. Bölgenin Genel Jeolojik Konumu, *17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depremi Raporu*, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı Yayınları, Ankara.
- Demirtaş, R.,** 2000. Deprem Öncesi Sismisite-Tarihsel Dönem (1509, 1719, 1754, 1766 ve 1894 Depremleri), *17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depremi Raporu*, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı Yayınları, Ankara.
- Demirtaş, R., Erkmen, C. ve Yılmaz R.,** 2000. Yüzey Faylanması, *17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depremi Raporu*, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı Yayınları, Ankara.
- Durgunoğlu, H. T., Karadayılar, T., Bray, J. D., Sancio, R. B. ve Hacıaloğlu E.,** 2000. Sismik Statik Penetrasyon Deneyi (SCPT) ile Geoteknik-Geodinamik Zemin Profili, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, 26-27 Ekim, İstanbul, s. 383-389
- Erken, A. ve Ansal, A.M.,** 1994. Liquefaction Characteristics of Undisturbed Sands Performance of Ground and Soil Structure During Earthquakes, *Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering*, Napoli, Italy, December 1994, 165-170.
- Erken, A. ve Ülker, R.,** 1994. Erzincan-Ekşisu'da Sıvılaşma Potansiyeli ve Yerel Zemin Koşulları Araştırma Projesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Araştırma Fonu İstanbul.
- Erken, A.,** 1999. The Effect of Soil Condition During Kocaeli Earthquake. <http://geophysics.gg.utk.edu/izmit/liq.htm>
- Holtz, R. D. and Kovacs, W. D.,** 1981. An Introduction To Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- İshihara, K.,** 1985. Stability of Natural Deposits During Earthquakes, *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, 1, 321-376.
- İshihara, K.,** 1996. Soil Behavior in Earthquake Geotechnics, Clarendon Press, Oxford.

İshihara, K., 1993. Liquefaction and Flow Failure During Earthquakes: Thirty-Third Rankine Lecture, *Geotechnique*, London, **43-3**, 351-415.

İstanbul Teknik Üniversitesi, Kocaeli Depremi İnternet Sayfaları, 1999.
<http://ciragan.cc.itu.edu.tr/deprem/ana.html>

Kaya, Z., Irisawa. T., Erken. A., 2002. Adapazarı Zeminlerinin Dinamik Davranışı. 9.Zemin Mekaniği 9.Ulusal Kongresi, Eskişehir.

Kiku, H., Yoshida, N., Yasuda, S., Irisawa, T., Nakazawa, H., Shimizu, Y., Ansal, A. and Erken, E., 2001. In-situ Penetration Tests and Soil Profiling in Adapazari, Turkey, *Proceedings of the XVth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes*, İstanbul, Turkey, August 2001, 259-265.

Köleoğlu, E., 2002. Sıvılaşma Potansiyeli Değerlendirmeleri ve Sıvılaşma Analizi Kriterlerinin Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul.

Kumbasar, V., ve Kip, F., 1992. Zemin Mekaniği Problemleri, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

Liao, S.S.C. and Whitman, R.V., 1986. Overburden Correction Factor for SPT in Sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **112-3**, 373-377.

MCEER (Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research), İzmit Depremi İnternet Sayfaları, 2001.
<http://mceer.buffalo.edu/research/turkeyeq/default.asp>

Mori, K., and Ishihara M., 1979. Undisturbed Block Samplcity of Niigata Sand, 6th Asian Region Conference , Vol#1 24th – 27th July 1979., Singapore.

NCEER, 1997. Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Edited by Youd, T.L., Idriss, I.M., *Technical Report, No: NCEER-97-0022*, December.

Nurlu, M., 2000. 17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depreminin Tektonik Özellikleri, *17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depremi Raporu*, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı Yayınları, Ankara.

- Nurlu, M., Cerit, O. ve Sezen, F., 1999. 17 Ağustos 1999 Gölcük ve 12 Kasım 1999 Düzce Depremleri Tektonik İncelemesi, Deprem Araştırma Dairesi, <http://www.deprem.gov.tr/rapor/DEPREM-web.htm>
- Nurlu, M., Batman, B., Chorowicz, J. and Genç, M.A., 1995. A geometrical approach relating to the movement mechanism of North Anatolian Fault Zone, *International Symposium on the Geology of the Black Sea region*, Erler, A., Ercan, T., Ergüzer, B. and Örcen, S. (ed), Ankara, 283-291.
- Okan, R., 2002. 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nde Adapazarı'nda Gözlenen Yapısal Hasar Üzerinde Zemin Koşullarının Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul.
- Önalp, A., Bol, E., 1998. Adapazarı Kent Merkezi Jeolojisi ve Jeomorfolojisi, SAÜ, Adapazarı.
- Özaydın, K., 1996. Yer Hareketleri Üzerine Zemin Koşullarının Etkisi ve Zemin Büyütmesi, Türkiye Deprem Vakfı Yayınları., İstanbul.
- Özaydın, K., 1982. Zemin Dinamiği, Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları No: 1, İstanbul.
- Özsaraç, V., 1997. Sapanca Gölü Kuzeyinin (Adapazarı-W) Tektonik İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M., 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Div.*, ASCE, **97-SM9**, 1249-1273.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M., 1982. Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes, EERI Monograph, Berkeley, California.
- Seed, H.B. and Peacock, W.H., 1971. Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristics, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Div.*, ASCE, **97-8**, 1099-1199.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F. and Chung, R.M., 1985. Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **111-12**, 1425-1445.

- Seed, R.B., Chang, S.W., Dickenson, S.E. and Bray, J.D., 1997.** Site-Dependent Seismic Response Including Recent Strong Motion Data, *XIV International Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Germany, A. A. Balkema Publ., Sept. 6-12, 125-134.
- Seed, R.B., Çetin, K.O., Moss, R.E.S, Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M. and Reimer, M.F., 2001.** Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering and Seismic Site Response Evaluation, National Information Service for Earthquake Engineering University of California, Berkeley Web Site. <http://nisee.berkeley.edu/library/seed/>
- Sipahioğlu, S., 1984.** Kuzey Anadolu Fay Zonu ve Çevresinin Deprem Etkinliğinin İncelenmesi, *Deprem Araştırma Bülteni*, Ankara, **45**, 5-138.
- Şengör, A.M.C., Görür, N. and Şaroğlu, F., 1985.** Strike-Slip Faulting and Related Basin Formation in Zones of Tectonic Escape: Turkey as a Case Study, Strike-Slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation, *Biddle, T.R. and Christie-Blick, N. (ed.), Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Special publication*, **37**, 227-264.
- Tatar, Y., 1975.** Tectonic Structures Along North Anatolian Fault Zone, Northeast of Refahiye (Erzincan), *Tectonophysics*, **29**, 401-409.
- Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1999.** Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (Revised Version), ISSMGE, TC4.
- Tezcan, S. and Leri, L., 2001.** Shear Wave Propagation and Liquefaction in Layered Soils, Türkiye Deprem Vakfı, İstanbul.
- Tezcan, S. and Özgirgin, F., 2001.** Soil Amplification and Case Studies, Türkiye Deprem Vakfı, İstanbul.
- Tokay, M., 1973.** Kuzey Anadolu Fay Zonunun Gerede ile Ilgaz Arasındaki Kısımında Jeolojik Gözlemler, *Kuzey Anadolu Fayı ve Deprem Kuşağı Sempozyumu*, Ankara, s. 12-29.
- Ulusay, R., 1994.** Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.
- USGS (U.S. Geological Survey), Kocaeli Depremi İnternet Sayfaları, 2001.**
<http://quake.wr.usgs.gov/research/geology/turkey/index.html>

- Ülker, C. B.M., 2004. Siltli ve Killi Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışı. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul.
- Wang, J.G.Z.Q. and Law, K. T., 1994. Sitting in Earthquake Zones, pp. 70-89, A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- Yasuda, S., Yoshida, N. and Irisawa, T., 2001. Settlement of Buildings due to Liquefaction during the 1999 Kocaeli Earthquake, *Proceedings of the XVth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes*, İstanbul, Turkey, August 2001, 77-82.
- Youd, T.L. and Noble, S.K., 1997. Liquefaction Criteria Based on Statistical and Probabilistic Analyses, *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, December 1997, 201-205.
- Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Hosaka, Y., 1989. Evaluation of Liquefaction Resistance of Clean Sands Based on High-Quality Undisturbed Samples. *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 1, 93-104 March, 1989, Japan, 93-104
- Youd, T.L. and Noble, S.K., 1997. Liquefaction Criteria Based on Statistical and Probabilistic Analyses, *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, December 1997, 201-205.

ÖZGEÇMİŞ

Cemal Alper Özmen 1979 yılında İzmir’de doğdu. İlk öğrenimini Denizli Hürriyet İlkokulu’nda, orta öğrenimini Denizli Anadolu Lisesi’nde 1997 yılında tamamladı. Aynı yıl üniversite sınavında başarılı olarak İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne girmeye hak kazandı. İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2001 yılında mezun oldu. Mezuniyet sonrasında öğrenimine ara vermeden İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Geoteknik Mühendisliği (Deprem) Programı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2004 yılı Nisan ayında yüksek lisans tezini enstitüye teslim etti. Cemal Alper Özmen halen özel bir şirkette çelik yapılar üzerine çalışmaktadır.

