

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

85092

**ŞİŞEN KİLLERLE İNŞA EDİLEN
DOLGU DAVRANIŞININ NUMERİK ANALİZİ**

İnş.Yük. Müh. Ahmet ŞAHİN

**F.B.E. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

85092

Tez Savunma Tarihi : 22 Ekim 1999
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Remzi ÜLKER (İTÜ)
: Prof. Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU (İÜ)

[Handwritten signature]
[Handwritten signature]
[Handwritten signature]

**TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

İSTANBUL, 1999

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖNSÖZ.....	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. GENEL GİRİŞ	1
1.1 Şişme Potansiyeli	2
1.2 Şişme Basıncı	3
1.3 Şişen Kil Zeminlerin Kaynağı	3
1.4 Şişen Kil Zeminlerin Genel Yapısı	4
1.5 Şişen Kil Zeminlerin Fiziksel Özellikleri	4
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	7
2.1 Giriş	7
2.2 Şişme Potansiyelinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar	7
2.2.1 Şişme potansiyeline sahip zeminlerin görsel olarak belirlenmesi	7
2.2.2 Şişme potansiyelinin kil yapısına ve kristal özelliğine göre belirlenmesi	8
2.2.3 Şişme potansiyelinin zemin özelliğine ve toplam gerilme durumuna bağlı olarak belirlenmesi	11
2.3 Şişme Basıncının Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar.....	32
2.4 Şişme Yüzdesinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar.....	40
2.5 Boşluk Suyu-Emme Oranı ve Şişme Özelliği Arasındaki İlişki.....	42
2.5.1 Şişmenin tahmini için geliştirilen diğer ampirik metotlar.....	47
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	49
3.1 Giriş.....	49
3.2 Seçilen Örneğin Özellikleri	49
3.3 Deneysel Çalışmalar	50
3.4 Ödometre Deneyleri.....	51
3.5 Örneklerin Hazırlanması.....	52
3.6 Ödometre Yöntemi ile Belirli Düşey Basıncı Altında İslatma Deneyleri	54
3.7 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	57
4. NUMERİK MODELLEME.....	60
4.1 Giriş.....	60
4.2 Gerilme – Şekil Değiştirme İlişkisi	61
4.3 Şişen Zemin Modeli ve Analogisi	67

4.4	Yükleme ve Mesnet Koşulları	71
4.5	Nümerik Modelleme Çalışması Sonuçları ve Değerlendirmesi	72
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR.....		86
EKLER.....		94
EK 1. MODİFİYE PROKTOR ÖRNEKLERİNİN ÖDOMETRE DENEY FÖYLERİ VE HESAPLARI İLE BUNLARA AİT GRAFİKLER		95
EK 2. STANDART PROKTOR ÖRNEKLERİNİN ÖDOMETRE DENEY FÖYLERİ VE HESAPLARI İLE BUNLARA AİT GRAFİKLER		103
EK 3. NÜMERİK ANALİZ SONUÇLARI		111
ÖZGEÇMİŞ		129



SİMGE LİSTESİ

e	Boşluk oranı
e_o	Başlangıçtaki boşluk oranı
e_f	Nihai boşluk oranı
H_o	Deney başlangıcındaki örnek yüksekliği (cm)
H_d	Deney sonundaki örnek yüksekliği (cm)
K_o	Durgun toprak basıncı katsayısı
M_c	Hacimsel sıkışma modülü (kPA)
PI	Plastisite indisi
$P_{\bar{s}}$	Eksenel şişme basıncı (kPA)
$P_{\bar{s}_y}$	Yanal şişme basıncı (kPA)
P_o	Ön konsolidasyon basıncı (kPA)
R_n	Deney sonundaki örnek çapı (cm)
S	Şişme potansiyeli
S_p	Şişme yüzdesi (%)
t	Zaman
U_w	Boşluk suyu basıncı (kN/m ²)
ω	Tabii su içeriği
ω_L	Likit limit
ω_n	Nihai su içeriği
ω_p	Plastik limit
σ_o	Efektif gerilme (kPA)
γ_o	Başlangıçtaki kuru birim hacim ağırlığı
γ_n	Nihai kuru birim hacim ağırlığı

KISALTMA LİSTESİ

ModPro + %5	Modifiye Proctor Optimumunun % 5 ıslak tarafında sıkıştırılmış örnek veya dolgu
ModPro	Modifiye Proctor Optimumunda sıkıştırılmış örnek veya dolgu
ModPro + %5	Modifiye Proctor Optimumunun % 5 kuru tarafında sıkıştırılmış örnek veya dolgu
StaPro + %5	Standart Proctor Optimumunun % 5 ıslak tarafında sıkıştırılmış örnek veya dolgu
StaPro	Standart Proctor Optimumunda sıkıştırılmış örnek veya dolgu
StaPro - %5	Standart Proctor Optimumunun % 5 kuru tarafında sıkıştırılmış örnek veya dolgu
OSİ	Optimum su içeriği



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Sıkıştırılmış El Arahal numuneleri üzerinde ıslatma deneyi (Justo vd., 1980).	11
Şekil 2.2	Zeminlerin şişme potansiyelinin belirlenmesi (Williams, 1958)...	12
Şekil 2.3	Zemindeki su içeriğinin derinlikle değişimi (Kraynski, 1973).....	15
Şekil 2.4	Su içeriğinin derinlikle değişimi (Chen, 1983).....	15
Şekil 2.5	Farklı yerleşim şartlarında hazırlanmış aynı kil numunesinin 7 kPa sürşarj yükünde ıslatılmasıyla oluşan şişme yüzdeleri (Seed vd., 1962).....	16
Şekil 2.6	Zeminlerin şişme potansiyeline göre sınıflandırılması (Seed vd., 1962).....	17
Şekil 2.7	Hacim değişikliği ve plastisite indisi ilişkisi hakkında yapılan bazı çalışmaların kıyaslanması (Chen, 1975).....	18
Şekil 2.8	Başlangıçtaki su içeriği değişimlerinin, kuru birim hacim ağırlığı sabit numunelerin toplam şişmesine etkisi (Holtz ve Gibbs, 1956).	19
Şekil 2.9	Başlangıçtaki kuru birim hacim ağırlığı değişiminin, numunelerin toplam şişmesine etkisi (Holtz ve Gibbs, 1956).....	20
Şekil 2.10	Basınç değişiminin, su içeriği ve kuru birim hacim ağırlığı sabit numunelerin toplam şişmesine etkisi (Holtz ve Gibbs, 1956).....	20
Şekil 2.11	TSL modeli için rötre eğrisinin başlıca özelliği (Reeve ve Hall, 1978).....	22
Şekil 2.12	Ön konsolidasyon basıncına göre düzeltilmiş şişme basıncının durumu (Fredlund ve Rahardjo, 1991).....	24
Şekil 2.13	Bir boyutlu ödometre test sonuçları ve numunenin örselenmesinin etkisi (Fredlund ve Rahardjo, 1987).....	25
Şekil 2.14	Arazide ölçülen ve ödometre deneylerinden hesaplanan şişmeler (Erol, 1990).....	29
Şekil 2.15	Arazide ölçülen şişme değerleriyle ödometre deneylerinden bulunan şişme değerlerinin karşılaştırılması (Erol, 1990).....	31
Şekil 2.16	Kil fazında denge sağlamak amacıyla bir P basıncının uygulanmasını gerektiren iki fazlı (kil ve su) sistem (Low, 1987)	33
Şekil 2.17	Na-smektitleri için λ ve II arasındaki ilişkiyi gösteren teorik ve gözlemsel olarak elde edilmiş eğriler (Low, 1987).....	34
Şekil 2.18	Düzeltilmiş şişme basıncının belirlenmesi (Fredlund vd., 1980)....	35
Şekil 2.19	Yanal deformasyon ölçüm elemanları ve üç eksenli hücre detayı (Dif, 1990).....	37
Şekil 2.20	Düşey ve yanal şişme basınçlarının zamanla değişimi (Chen, 1988).....	39
Şekil 2.21	Şişme indisinin önceden belirlenebilmesini sağlayan kart (Dhowian vd., 1990).....	44
Şekil 2.22	Zemin emmesi metotlarına dayanarak önceden belirlenen değerler ve ölçülen şişme değerleri arasında karşılaştırma (Dhowian vd., 1990).....	45

Şekil 3.1	Casagrande kartında, bilinen kil minerallerinin yerleşimi (Casagrande tarafından geliştirildi, 1948; içindeki bilgiler Mitchell, 1976).	50
Şekil 3.2	Kompaksiyon kalıbından örselenmeyi en aza indirecek biçimde halkaya zemin örneği alınması.	52
Şekil 3.4	Standart Proctor Deney Sonuçları.....	55
Şekil 3.5	Modifiye Proctor Deney Sonuçları.....	55
Şekil 3.6	Modifiye ve Standart Proctor Deney Sonuçları Düşey Basınç – Şişme İlişkileri.....	56
Şekil 4.1	Modellemesi yapılan kil zemin dolgusunun geometrisi ve özellikleri.	59
Şekil 4.2	Üstyapı ve Dolgu Tabakaları.....	60
Şekil 4.3	Üstyapı Tabakaları.....	60
Şekil 4.4	Gerilme vektörü.....	61
Şekil 4.5	Sonlu eleman geometri, düğüm sayısı ve koordinat sistemi.....	66
Şekil 4. 6	Gibson'un Derinlikle Değişen Elastisite Modeli (Gibson, 1967)...	67
Şekil 4.7	Sonlu elemanlar modelinde eleman ve mesnet şartları.....	68
Şekil 4.8.a	Dolgu ve üstyapı da kendi ağırlıkları sonucu oluşan SX yatay gerilme izobarları.....	69
Şekil 4.8.b	Dolgu ve üstyapıda kendi ağırlıkları sonucu oluşan düşey gerilme SY izobarları.....	69
Şekil 4.9.a	Yükleme 1 (az ıslanma)	70
Şekil 4.9.b	Yükleme 2 (çok ıslanma)	71
Şekil 4.9.c	Yükleme 3 (tüm ıslanma)	71
Şekil 4.9.d	Yükleme 4 (az kuruma)	71
Şekil 4.9.e	Yükleme 5 (çok kuruma)	71
Şekil 4.11.a.	Analiz sonucu beklenen çatlak gelişim sırası.....	74
Şekil 4.11.b.	Otoyolda gözlenen çatlak gelişim sırası (TRL, 1995).....	74
Şekil 4.12.a	Düğüm 37'de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi.....	75
Şekil 4.12.b	Düğüm 47'de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi.....	75
Şekil 4.12.c	Düğüm 45'de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi.....	76
Şekil 4.12.d	Düğüm 1344'de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi.....	76
Şekil 4.12.e	Düğüm 2406'de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi.....	77
Şekil 4.12.f	Düğüm 316'de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi.....	77
Şekil 4.12.g	Düğüm 43'de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi.....	78
Şekil 4.12.h	Düğüm 46'de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi.....	78
Şekil 4.12.i	Düğüm 44'de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi.....	79

Şekil 4.13.a	Modifiye Proctor ıslağında sıkıştırılan dolgunun farklı düğüm noktalarında çekme gerilmesi-yüklemeye koşulları ilişkisi.....	79
Şekil 4.13.b	Modifiye Proctor optimumunda sıkıştırılan dolgunun farklı düğüm noktalarında çekme gerilmesi-yüklemeye koşulları ilişkisi.....	80
Şekil 4.13.c	Modifiye Proctor kurusunda sıkıştırılan dolgunun farklı düğüm noktalarında çekme gerilmesi-yüklemeye koşulları ilişkisi.....	80
Şekil 4.13.e	Standart Proctor optimumunda sıkıştırılan dolgunun farklı düğüm noktalarında çekme gerilmesi-yüklemeye koşulları ilişkisi.....	81
Şekil 4.13.f	Standart Proctor ıslağında sıkıştırılan dolgunun farklı düğüm noktalarında çekme gerilmesi-yüklemeye koşulları ilişkisi.....	81
Şekil Ek1.1	Tablo Ek1.1'e ait grafikler. (a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.	95
Şekil Ek1.2	Tablo Ek 1.2'ye ait grafikler. (a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.	97
Şekil Ek1.3	Tablo Ek 1.3'e ait grafikler. (a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.	99
Şekil Ek1.4	Tablo Ek 1.4'e ait grafikler. (a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.	101
Şekil Ek2.1	Tablo Ek 2.1'e ait grafikler. (a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.	103
Şekil Ek2.2	Tablo Ek 2.2'ye ait grafikler. (a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.	105
Şekil Ek2.3	Tablo Ek 2.3'e ait grafikler. (a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.	107
Şekil Ek2.4	Tablo Ek 2.4'e ait grafikler. (a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.....	109
Şekil Ek3.1	Modifiye Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 1 (az ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	110
Şekil Ek3.2	Modifiye Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 2 (çok ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	110
Şekil Ek3.3	Modifiye Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 3 (tüm ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	111
Şekil Ek3.4	Modifiye Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 4 (az kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	111
Şekil Ek3.5	Modifiye Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 5 (çok kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	112
Şekil Ek3.6	Modifiye Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 1 (az ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	113
Şekil Ek3.7	Modifiye Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 2 (çok ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	113

Şekil Ek3.8	Modifiye Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 3 (tüm ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	114
Şekil Ek3.9	Modifiye Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 4 (az kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	114
Şekil Ek3.10	Modifiye Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 5 (çok kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	115
Şekil Ek3.11	Modifiye Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 1 (az ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	116
Şekil Ek3.12	Modifiye Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 2 (çok ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	116
Şekil Ek3.13	Modifiye Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 3 (tüm ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	117
Şekil Ek3.14	Modifiye Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 4 (az kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	117
Şekil Ek3.15	Modifiye Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 5 (çok kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	118
Şekil Ek3.16	Standart Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 1 (az ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	119
Şekil Ek3.17	Standart Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 2 (çok ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	119
Şekil Ek3.18	Standart Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 3 (tüm ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	120
Şekil Ek3.19	Standart Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 4 (az kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	120
Şekil Ek3.20	Standart Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 5 (çok kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	121
Şekil Ek3.21	Standart Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 1 (az ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	122
Şekil Ek3.22	Standart Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 2 (çok ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	122

Şekil Ek3.23	Standart Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 3 (tüm ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	123
Şekil Ek3.24	Standart Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 4 (az kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	123
Şekil Ek3.25	Standart Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 5 (çok kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	124
Şekil Ek3.26	Standart Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 1 (az ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	125
Şekil Ek3.27	Standart Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 2 (çok ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	125
Şekil Ek3.28	Standart Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 3 (tüm ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	126
Şekil Ek3.29	Standart Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 4 (az kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	126
Şekil Ek3.30	Standart Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 5 (çok kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri.....	127

ÇİZELGE LİSTESİ

Tablo 2.1	Hacim değişikliği, şişme basıncı ve muhtemel hasar ilişkisi (Wayne vd., 1984).....	39
Tablo 2.2	Şişmenin önceden belirlenmesi için gerekli ampirik metotlar (Dhowian vd., 1990).	47
Tablo 3.1	Babaeski kilinin fiziksel ve endeks özellikleri.....	49
Tablo 3.2	Standart Proctor Deney Sonuçları.....	54
Tablo 3.3	Modifiye Proctor Deney Sonuçları.....	55
Tablo 3.4	Standart Proctor Deneylerinde Sıkıştırma Su İçeriğinin Şişme Özelliklerine Etkisi.....	57
Tablo 3.5	Modifiye Proctor Deneylerinde Sıkıştırma Su İçeriğinin Şişme Özelliklerine Etkisi.....	57
Tablo 4.1	Dolgu ve üstyapı tabakaları malzeme özellikleri.....	68
Tablo 4.2	Analizde ve malzeme parametrelerinde kullanılan analogi.....	70
Tablo Ek1.1	Ödometre deney föyleri ve hesapları (ω =%24.00 Modifiye Proktor)....	94
Tablo Ek 1.2	Ödometre deney föyleri ve hesapları (ω =%24.85 Modifiye Proktor)....	96
Tablo Ek 1.3	Ödometre deney föyleri ve hesapları (ω =%25.60 Modifiye Proktor)....	98
Tablo Ek 1.4	Ödometre deney föyleri ve hesapları (ω =%31.00 Modifiye Proktor)....	100
Tablo Ek 2.1	Ödometre deney föyleri ve hesapları (ω =%27.60 Standart Proktor).....	102
Tablo Ek 2.2	Ödometre deney föyleri ve hesapları (ω =%28.00 Standart Proktor).....	104
Tablo Ek 2.3	Ödometre deney föyleri ve hesapları (ω =%29.00 Standart Proktor).....	106
Tablo Ek 2.4	Ödometre deney föyleri ve hesapları (ω =%33.60 Standart Proktor).....	108

ÖNSÖZ

Türkiye’de ve dünyada, aşırı konsolide olmuş ve şişme özelliğine sahip killi zeminlere sıkça rastlanmaktadır. Şişme olayı özellikle aktif kil minerali içeren killi zeminlerde önemli bir problemidir. Bu tür zeminlerin şişme davranışlarının ve bunlara etki eden faktörlerin daha önceden belirlenmesi ile meydana gelebilecek zararlar önlenabilir. Bu konuyla ilgili araştırmalar halen devam etmektedir. Doğal zeminler yanında şişme özelliği gösteren dolgu zeminlerde de suyla ilk tanışma sonucu pratikte önemli yapısal bozukluklar gözlemlenebilmektedir.

Bu çalışmada, Lüleburgaz-Babaeski kilinin şişme davranışları ve özellikleri araştırılmış ve şişme özelliğine sahip yüksek plastisiteli bu kil ile inşa edilen yol dolgusunun ıslanma sonucu kabarma ve göçme hareketleri sonlu elemanlar metodu ile modellenmeye çalışılmıştır. Ayrıca Bölüm 2’ de de şişme konusunda günümüze kadar yapılan çalışmalar hakkında genel bilgi verilmiştir. Bölüm 3; bu çalışmanın deneysel kısmını anlatmakta ve değerlendirmektedir. Bilgisayar model programında ANSYS Sonlu Elemanlar Programı kullanılmıştır. Bu çalışmanın içeriği ve sonuçları Bölüm 4’ de anlatılmış ve değerlendirilmiştir. Bölüm 5 ise sonuç ve öneriler kısmına ayrılmıştır.

Doktora tez çalışmam sırasında değerli bilgi ve yardımları ile yol göstererek destekleyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM’a sonsuz teşekkürler ederim. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında yardımcı olan Mehmet ÇETİNER’e ve tez yazımında ve şekil çizimlerinde emeği geçen Serdar KALAYCI ve Ahmet KALAYCI’ ya teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim...

ÖZET

Özellikle kurak iklimli bölgelerdeki suya doymun olmayan killi zeminlerde su içeriğindeki artış sonucunda, şişme olarak adlandırılan önemli hacim değışiklikleri oluşmaktadır. Bu tür zeminlerle ilgili mühendislik çalışmalarında şişme potansiyelinin ve şişme basıncının önceden belirlenmesi ve bunlara etki eden mineralojik ve çevresel faktörlerin bir arada incelenmesi gerekir. Bu sayede gerekli önlemler daha önceden alınarak uygun temel sistemleri seçilebilir veya projelendirme yapılabilir, meydana gelebilecek hasarlar da en aza indirilebilir. Bu konuda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada eksenel şişme davranışları, düşey basınç ve ıslanma faktörleri ele alınmıştır.

Bu çalışmada, Lüleburgaz-Babaeski kilinin şişme davranışları ve özellikleri araştırılmış ve şişme özelliğine sahip yüksek plastisiteli bu kil ile inşa edilen yol dolgusunun ıslanma sonucu kabarma ve göçme hareketleri Sonlu Elemanlar Metodu ile modellenmeye çalışılmıştır.

Ödometre deneylerinde değışik su içeriklerinde sıkıştırılmış numunelerin sabit hacim ve serbest şişme şartlarında şişme basınçları ve miktarları belirlenmiştir. Aynı deneyler, optimum su içeriğinde (Standart ve Modifiye Proktor olarak) sıkıştırılarak hazırlanan ve başlangıç su içeriği düşürülmüş ve artırılmış numuneler üzerinde tekrarlanarak, başlangıç su içeriğinin ve kuru birim hacim ağırlığının şişme davranışına olan etkileri gözlenmiştir. Ayrıca bu deneylerden elde edilen sonuçlar, aynı zeminle inşa edilmiş yol dolgusunun ıslanma durumunda gerilme ve şekil değıştirme davranışının sonlu elemanlar programında modellenmesi için veri olarak kullanılmıştır.

Sonuçla; özellikle kuru tarafta sıkıştırılmış zeminlerin su ile tanışmaları halinde dolgu içerisinde önemli gerilmeler doğuracağını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler : Dolgu, doymun olmayan zeminler, ıslanma, numerik analiz, sonlu elemanlar metodu, şişen killer.

ABSTRACT

Water-content increase of unsaturated clays especially in arid regions; causes important volumetric changes which is called “swell”. In order to determine the swell potential and swelling pressure correctly in engineering studies of these soils; the mineorologic and environmental factor should be considered together. Therefore; by taking necessary precautions earlier; foundation system can be selected and projected properly. A lot of studies have been conducted concerning this topic. In this study; the axial swelling behaviour, vertical pressure and wetting factors are taken into consideration.

In this study, the swelling properties and swelling behaviour of Lüleburgaz-Babaeski clay have been investigated. Heave and settlement of an embankment constructed with expansive and highly plastic clay has been modelled by using Finite Element Method technique.

Swelling pressures and swell percentages of the samples compacted with different water contents have been determined by means of oedometer tests. Similiar tests are conducted with different samples compacted with different initial water contents in Standard and Modified Proctor tests. Therefore; effects of the initial water content and dry density on swelling behaviour of samples are observed. The results obtained from these tests are used as data in Finite Element Modelling of embankment that undergoes inundation.

The results show that large tension stresses can be developped depending on the compaction effort and initial water content of the swelling clays and these might endanger the behaviour of embankments.

Key Words : Embankment, unsaturated soils, wetting, numerical analysis, finite element method, swelling clays.

1. GENEL GİRİŞ

Düşük su içeriğine sahip ve aşırı konsolide olmuş killi zeminlerin su emerek hacimlerinin artması olayına *şişme* denilmektedir. Bu tür killi zeminlerin su ile temas etmeleri sonucunda meydana gelen hacim değişikliklerinin oldukça büyük olması ve bu hacim artışının engellenmesi durumunda aşırı basınç tatbik etmeleri, şişme davranışlarının incelenmesinin en önemli nedenleridir. Söz konusu zeminler üzerine inşa edilen az katlı yapılarda, sulama kanallarında, karayolu ve havaalanı kaplamalarında veya arkasında bu tür zeminleri tutan istinat yapılarında zemindeki hacim değişimi nedeniyle önemli boyutlarda hasarlar meydana gelebilmektedir.

Bir zeminin arazide şişme yapıp yapmayacağı birçok etkene (kilin kaynağına, yapısına, kil plakalarının yerleşimine, zeminin başlangıçtaki fiziksel durumuna, su içeriğine, birim hacim ağırlığına, şişmeye izin verilen süreye v.b.) bağlıdır (Chen, 1988). Zeminler bu etkenlere bağlı olarak az veya çok şişebilir ve bazı durumlarda hatta çökebilir.

Karayolu ve havaalanı kaplamaları altında genelde doğal zemin yerine sıkıştırılmış zeminler bulunmaktadır. Örselenmiş olan bu tür zeminlerin şişme davranışları ise başlangıç su içeriğine, kuru birim hacim ağırlığına, sıkıştırma yöntemine, tabaka kalınlığına ve zamana bağlı olarak değişmektedir.

Zeminlerin şişme özellikleri, şişme yüzdesi ve şişme basıncı ile ifade edilmektedir. Bu özelliklerin zamanında belirlenmesi ile, gerekli mühendislik önlemleri daha önceden alınabilmektedir. Bu sayede şişme nedeniyle oluşan hacim değişiklikleri sonucunda üst yapıda oluşabilecek hasarlar en aza indirilebilmektedir.

Bu çalışmada, Lüleburgaz-Babaeski kili zemin numunelerinin şişme davranışlarına etki eden etkenlerin hepsi birden dikkate alınarak incelenmiştir. Ayrıca zemin numunelerinin düşey şişme basınçları zamana bağlı olarak belirlenmiştir.

1.1 Şişme Potansiyeli

Doğal haldeki veya laboratuvarında belirli koşullarda sıkıştırılarak hazırlanan bir zemin örneğinde, belirli bir yük altında suya doymun hale gelinceye kadar oluşan şişme miktarının, numunenin başlangıçtaki hacmine oranına *şişme potansiyeli* denilir. Kısaca bu şartlar altında zemin numunesinde meydana gelen hacimsel artış yüzdesidir. Hacimsel artış yüzdesi; (a) sabit ve küçük bir yük altında örnek doymun hale gelirken yanal deformasyonun sıfır olması durumunda oluşan düşey boy değişimi ve (b) eksenel deformasyonların engellenmesi halinde zeminin yanal şişme yüzdesinin çap değişimi olmak üzere iki şekilde ifade edilebilir (Keskin vd., 1992).

Şişme potansiyeline etki eden faktörler aşağıda sıralanmıştır.

- Arazideki gerilme şartları,
- Zeminin ihtiva ettiği kil yüzdesi ve mineralojik yapısı,
- Kuru birim hacim ağırlık ve danelerin yerleşimi,
- Başlangıçtaki su içeriği ve doymunluk derecesi,
- Emme basıncı,
- Permeabilite,
- Şişen kil tabakasının kalınlığı ve derinliği,
- Dış yükler,
- İklim şartları,
- Sıkıştırılmış zeminler için kompaksiyon metodu ve
- Kür ve zaman.

Bu faktörler, bir zemin tabakasında su içeriğinin artması sonucunda ortaya çıkacak kabarmalara önemli/önemsiz etki edebilir. Zeminlerin şişme potansiyelini belirleyen bu faktörler, (a) kilin özgül şişme kapasitesini belirleyen mineralojik yapısı ve (b) arazideki gerilme ve sınır şartları altındaki su emme kapasitesi olmak üzere başlıca iki grup altında ele alınabilir. Böylece doğadaki zemin tabakalarının şişme potansiyellerini incelemek için bu iki grup etken dikkate alınarak korelasyonlar bulunmalıdır (Keskin vd., 1992).

1.2 Şişme Basıncı

Şişme basıncı, şişme potansiyeline sahip killi bir zeminin su içeriğinin artması ile meydana gelecek hacim değişikliğine engel olabilecek basınç olarak tanımlanabilir. Şişme basıncı, zeminin başlangıçtaki kuru birim hacim ağırlığına bağlı olup belirli bir zemin için sabittir. Dolgu zeminlerde şişme basıncı, kompaksiyon derecesi ile değişir.

Şişme basıncı önceden belirlenerek zeminlerin şişme karakteristiklerinin tanımlanmasında doğrudan kullanılabilir. Şişme potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan aletler, şişme basıncı deneylerinde de kullanılabilir. Söz konusu aletler ve bazı araştırmacıların yaptıkları çalışmalar ile beklenen kabarmaya karşı alınacak hasar önlemleri ve temel tipi seçimi için yapılmış olan bazı öneriler, bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

1.3 Şişen Kil Zeminlerin Kaynağı

Şişmeye neden olan kil minerallerinin esas kaynağı magmatik kayalar ve özellikle de bazalttır. İçinde feldispat bulunan metamorfik ve püskürük kayaların kimyasal ayrışması sonucu ortaya çıkan montmorillonit, şişmeye yol açan en önemli kil mineralidir (Gillot, 1963; Kellar, 1964; Lambe ve Whitman, 1969; Millot, 1970; Donaldson, 1971; Chen, 1975; Schreiner, 1987a). Bu araştırmacılar, ayrışma şartları ile şişmenin doğrudan ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Örneğin montmorillonit ve kaolen, magmatik kayalardan ayrılmış kil mineralleri oldukları halde, ayrışma şartlarındaki farklılıklar sebebiyle montmorillonit yüksek, kaolen ise düşük şişme potansiyeline sahiptir.

Neojen devrine ait killi, paleozoik ve daha yaşlı kayalardan ayrılan killerden daha fazla montmorillonit ihtiva etmektedirler (Snethen, 1984). Deniz çevresindeki kayalardan ayrılarak şekillenmiş olan killi genellikle değişen bir katyon olan sodyuma sahip olma eğilimindedirler. Ayrılmamış kayalardaki esas kil minerali ise klorittir. Kayaların permeabilitesinin çok düşük olması sebebiyle ayrışma sırasında yıkama oluşur ve klorit, smektite dönüşür. Bazalt, ayrışma esnasında katyon teminine çalışır ve bu da Ca ve Mg alarak montmorillonitin oluşumuna katkıda bulunur (Paige-Green, 1980; Olliver, 1984).

1.4 Şişen Kil Zeminlerin Genel Yapısı

Şişme potansiyeli üzerinde, şişen kil zeminlerin mineralojik yapısı önemli bir etkiye sahiptir. Kristal yapıdaki kil minerallerinin özgül spesifik yüzeyleri büyük olduğundan su tutma kapasiteleri de fazladır. Örneğin montmorillonitin özgül spesifik yüzeyi illitten sekiz kat ve kaolenden kırk kat daha büyük olduğundan, su tutma kapasitesi ve dolayısıyla şişme kapasitesi diğer kil minerallerine oranla daha fazladır. Değişebilir katyon cinsi ve miktarı da, kil minerallerinin şişme potansiyelini etkileyen bir başka faktördür. Katyonlar, katı danelerden ayrılıp uzaklaşma serbestliğine sahip değildirler. Buna elektrostatik kuvvetlerin etkisi neden olur. Bu sayede serbest boşluk akışkanı tabakalar arasına girer. Kısaca, kil minerallerinin yüzeyleri üzerindeki negatif elektrik yükleri, tabakalar arasındaki bağ kuvvetini ve katyon değiştirme kapasitesini, dolayısıyla kilin şişme potansiyelini tümüyle arttırmaktadır (Schreiner, 1987a). Böylece bazı araştırmacılar, herhangi bir kilin esas mineral öğelerinin belirlenmesi ile bu kilin şişme potansiyelinin değerlendirilebileceğini iddia etmektedirler. Bunun belirlenmesi için geliştirilen metotlardan en yaygın olanları aşağıda verilmiştir. Bu metotlar tek başlarına kullanılabildikleri gibi birlikte de kullanılabilirler.

- X-Ray difraksiyonu,
- Diferansiyel Termal Analizleri (DTA),
- Boya adsorbsiyonu,
- Kimyasal analizler ve
- Scanning Elektron Mikroskop (SEM) fotoğrafları.

1.5 Şişen Kil Zeminlerin Fiziksel Özellikleri

Killi zeminlerde şişmeye yol açan önemli bir faktör de, zeminin su içeriği değişikliğinden etkilenen emme kapasitesidir. Su içeriğinin arttırılması sonucunda şişmenin kaolen ve illitte sınırlı, montmorillonit killlerinde ise oldukça fazla olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte kilin şişme potansiyeli yüksek de olsa, zeminin su içeriği sabit kaldığı süreçte hacminde herhangi bir değişiklik olmayacaktır. Örneğin oldukça büyük bir özgül şişme miktarına sahip montmorillonit kilinin su içeriğinde herhangi bir artış olmaz ise şişme

potansiyeli çok farklı olabilir ve hatta hiç şişme göstermeyebilir. Dolayısıyla su içeriği sabit olan killler üzerinde inşa edilen yapılar, kabarma etkisi ile oluşabilecek tesirlerin etkisinde kalmazlar.

Doygun bir kil zemin kütleğinde yapılacak kazı sırasında, zeminde önceden mevcut olan büyük negatif boşluk suyu basıncının etkisiyle gerilme boşalması oluşabilir. Böylece su, kazı çukuruna akacak ve sonuçta kabarma oluşacaktır (Obermeier, 1973). Zemin-su sistemindeki negatif basınçların değerlendirilmesi sonucunda zemin emmesi ölçülebilir, ayrıca şişme ve rötre olayları belirlenebilir. Suyun “cm” cinsinden kapiler yükselmesinin logaritması olarak ifade edilen zemin emmesini ölçerek şişme potansiyelini doğrudan belirlemek yerine, su hareketi ve nemlilik derecesini önceden tahmin etmek daha doğru olacaktır (Olliver, 1984). Buna göre şişme potansiyeline sahip bir kilin su içeriğinin değişmesi sonucunda düşey ve yatay yönde şişmelerin oluşacağı ortaya çıkmaktadır.

Su içeriğinde meydana gelebilecek çok küçük oranlardaki (%1~2) değişiklikler bile zararlı şişmelere neden olabilmektedir. Şişme miktarı, şişen zeminlerin başlangıçtaki su içeriği tarafından kontrol edilmektedir. Bu durum, örselenmiş ve yoğrularak hazırlanan zeminler için geçerlidir. Yüksek şişme potansiyeline sahip çok kuru killerin tabii su içeriği genellikle %15’den küçüktür (Holtz, 1959; Seed vd., 1962). Bu tür killer %35 su içeriğine ulaşıncaya kadar su absorbe edip kabarak şişme sonucunda üst yapıda önemli hasarlar meydana getirirken, su içeriği %30’un üzerinde olan killer ise kabarmasının büyük bir kısmını tamamlamış olduklarından önemli miktarda ilave bir genişleme yapmazlar.

Su tabakasındaki alçalma veya fiziksel şartlardaki değişikliklerin etkisiyle nemlilik derecesi azalan killi zeminler tekrar kapiler su emerlerse, önceden sahip oldukları şişme potansiyeline yeniden kavuşurlar. Fakat kuruma ve ıslanmanın her bir devresinde, zeminin şişme davranışında yorulma gözlenir. Chu ve Mou (1973) tarafından yapılan araştırmalarda, kurutma ve ıslatma işlemlerinin tekrarlanması halinde ilk dönüşümde oluşan şişmenin sonrakilerden önemli derecede daha büyük olduğu görülmüştür. Bu hal, şişmenin yorulması olarak açıklanabilir.

Kil zeminin birim hacim ağırlığı, başlangıçtaki su içeriği ile doğrudan ilişkili olup kabarmayı etkileyen diğer bir faktördür. Kuruduklarında bir kaya kadar sert, ıslatıldıklarında ise çamur gibi davranan ve 17.6 kN/m^3 'den fazla kuru birim hacim ağırlığa sahip zeminler genellikle yüksek şişme potansiyeli gösterirler (Schreiner, 1987a). Arazideki SPT deneyi ile killerin kuru birim hacim ağırlıkları tahmin edilebilir. Yüksek şişme potansiyeline sahip zeminler, genellikle darbe sayısı 15'in üzerinde olan killi zeminlerdir. Şişen zeminlerin mekanik özellikleri bir sonraki bölümde anlatılmıştır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 GİRİŞ

Dünyanın birçok bölgesinde ve özellikle de kurak bölgelerde şişen zeminlerle çok sık olarak karşılaşilmektedir. Bu tür zeminler genellikle kil ihtiva ederler ve ıslatıldıklarında büyük hacim değişikliklerine uğrayarak üst yapıda hasarlara neden olurlar. Amerika Birleşik Devletleri'nde yüksek rötire ve şişme potansiyeline sahip zeminlerin sebep olduğu maddi hasar; erozyon, kuraklık, kasırga, deprem ve sel felaketlerinin verdiği zararların toplamından daha büyüktür ve yaklaşık olarak 9 milyar dolar civarındadır (Jones ve Jones, 1987). Fourie (1989) tarafından yapılan araştırmada, şişmenin sadece düşey yönde gerçekleşmediği, yanal yöndeki şişme davranışının da önemli problemlere neden olabileceği, yanal ve düşey yöndeki şişmenin birlikte düşünülmesi gerektiği belirtilmiştir.

Dünyanın birçok bölgesinde görülen zeminlerdeki bu şişme problemini önleyebilmek için şişme potansiyeli ve şişme basıncı daha önceden belirlenmelidir. Bu amaçla arazi şartlarına uygun laboratuvar deneyleri geliştirilmiştir.

Bu bölümde, şişen zeminlerin tanımlanması, mekanik özelliklerinin belirlenmesi, şişme potansiyeli ve şişme basıncının önceden tahmin edilmesi ile bunlara etkiyen faktörlerin belirlenmesi için çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar ve geliştirdikleri deney sistemleri açıklanmış, elde ettikleri deney sonuçlarına göre ortaya koydukları regresyon analizleri ve amprik bağıntılar hakkında bilgi verilmiştir.

2.2 Şişme Potansiyelinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar

2.2.1 Şişme potansiyeline sahip zeminlerin görsel olarak belirlenmesi

Gromko (1974), arazide potansiyel olarak kaba bir kilin varlığının genellikle fisürlü ve parçalı yapısından, parçaların parlak yüzeylerinden ve o çevrede mevcut şişen zeminlerin neden olduğu yapısal hasarlardan anlaşılabilirliğini belirtmiştir.

Şişme eğilimli zeminler kuru mevsimlerde geniş ve derin büzülme çatlaklarına sahip olup kuru iken kaya gibi sert, ıslanınca yumuşak ve yapışkan bir görünümde dirler (Wayne vd., 1984). Wayne vd. (1984) şişen bir zeminin görsel olarak tanımlanmasında bu hususlara dikkat edilmesini önermişlerdir.

Şişen zeminlerin laboratuvar da tanımlanması konuları aşağıdaki başlıklarda açıklanmıştır.

2.2.2 Şişme potansiyelinin kil yapısına ve kristal özelliğine göre belirlenmesi

Şişme potansiyeline etki eden önemli faktörler ve en çok şişen kil mineralinin ise montmorillonit olduğu daha önceki bölümde açıklanmıştı. Bu bölümde ise söz konusu faktörlerin ve şişme potansiyeline olan etkilerinin belirlenmesi ile ilgili olarak daha önceden yapılmış olan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Schreiner (1987b), uygulanan farklı dış gerilmelerin ve emmenin etkisiyle ve zemin danelerinin etrafını kuşatan su tabakasının varlığı ile killerde hacim değişikliğinin meydana geldiğini ifade etmiştir. Kil daneleri etrafında, *adsorbe su tabakası* denilen, bitişik dört su tabakasının var olduğu ve bunların katı danelere güçlü bir şekilde bağlandıkları ifade edilmiştir. Bu suyun dışında *çift tabaka* olarak ifade edilen, daha zayıf bir bağla bağlanan bir su tabakasının daha mevcut olduğu da belirtilmektedir. Adsorbe su tabakasının ve çift tabakanın kalınlıklarındaki değişikliklerin ise zeminlerin rötresine ve şişmesine neden olduğu ileri sürülmektedir.

Farklı minerallerin kristal yapıları Lambe ve Whitman (1969) ile Taylor ve Cripps (1984) tarafından geniş bir şekilde araştırılmasına rağmen Moore (1970) ile Brindley ve Brown (1980), kristal yapıların detayları konusunda halen bazı belirsizliklerin olduğunu belirtmişlerdir.

Ülker (1971), özellikle oluşum dönemlerinden sonra killi zeminlerin fiziksel, kimyasal ve jeolojik etkilere maruz kaldıklarını ve zemin yapısının bu ön etkenler sebebiyle karmaşık bir iç kuvvet dağılımıyla farklı deformasyon ve arızalara sahip olduğunu belirtmiştir.

Önceden yüklenmiş zeminlerin, yeryüzünde geniş alan kaplamaları ve farklı yapı yükleri altındaki davranışlarının bilinmesi için zemin yapısının incelenmesinin gerekliliği belirtilmiştir. Bu amaçla Kuzey Avrupa’da geniş bir alandaki buzul killeri üzerinde X-Ray, DTA ve SEM analizleri ile ince kesit çalışmaları ve geoteknik araştırmalar yapılmış, numunelerin kayma mukavemetleri belirlenmiştir.

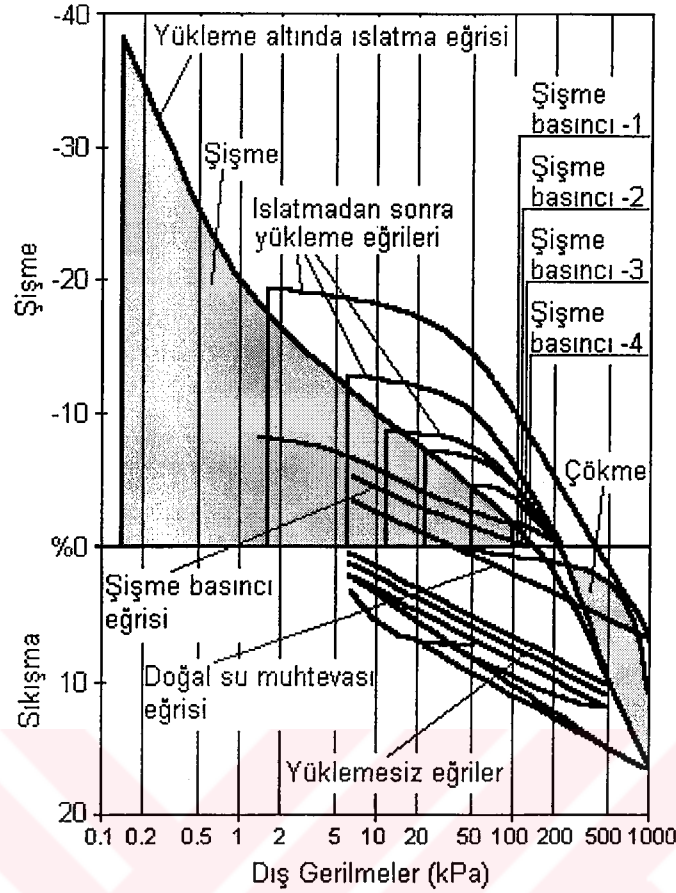
İncelemeler sonunda, ön konsolidasyonun yapı üzerinde önemli hasarlara sebep olduğu bulunmuştur. Yapısal hasarların yoğun olduğu bölgelerde ön konsolidasyon etkisinin de arttığı ve ön konsolidasyonun maksimuma ulaştığı bölgenin, eksenel kırılma şeklindeki yapısal hasarların da başladığı yerler olduğuna dikkat çekilmiştir. Bu çalışmada aynı zamanda ince dane, kireç, su ve sıcaklık gibi faktörlerin yapı üzerine olan etkileri de araştırılmıştır. Montmorillonit ve illit-kaolen minerallerine sahip buzul killerinin yatay ve düşey yönde farklı yapıda oldukları, yapı üzerinde kirecin önemli etkisinin bulunduğu ve yapı hasarlarının genellikle düşeye yakın kuvvet yönünde gerçekleştiği belirlenmiştir.

Schreiner (1987b), en çok şişme yapan mineral cinsi montmorillonitin iki silikat birimi arasındaki bir gipsit birimi şeklinde üç birimden oluştuğunu ve diğer kil minerallerinin çoğunun iki ya da üç yapısal birimin ardışık dizilişlerinden ibaret olduklarını, bir montmorillonit partikülünün ise çok küçük kalınlıkta ($10 \text{ Å} = 10 \times 10^{-10} \text{ m}$) olabileceğini belirtmiştir. Araştırmacı tarafından kil mineral yüzeyi üzerinde genellikle adsorbe edilmiş su olduğu ve artan basınç neticesinde kil minerallerinin nitrojen adsorbe edebileceklerine de dikkat çekilmiştir.

Grim (1962) ile Sridharan ve Jayadeva (1982), kil minerallerinin çoğunun diğer bir kristal çatı içerisinde bir metal iyonunun yerine geçebilme yetenekleri üzerinde çalışmışlardır. Çatı içine yeniden yerleşen iyonun daha düşük bir değerlikte olduğu, bu sebeple kimyasal yapının tamamlanabilmesi için yeni bir iyon ihtiyacı duyulduğu ve normal şartlarda bu katyonların/ yığınların sulu solüsyon içerisindeki katı danelerin her biriyle birleşip çift tabakanın şekillenmesini sağladıkları ifade edilmiştir. Talibudeen (1981), iç tabakalar arasındaki boşluk genişlemesinin nedeninin, dengeleme katyonları arasındaki elektrostatik çekimden ve bitişik yüklenmiş tabakalar arasındaki dengeden kaynaklandığını belirtmiştir.

Çift tabakanın oluşumunu etkileyen en önemli faktörün değişebilir katyon cinsi, diğer bir faktörün ise boşluk suyu kompozisyonu olduğu Grim (1962) tarafından belirtilmiştir. Bolt (1956), doyurulmuş bir sodyum montmorilloniti kullanarak, bunun sıkıştırılması sırasında boşluk akışkanındaki sodyum kloritinin farklı konsantrasyonlarında, daha düşük konsantrasyonların daha büyük boşluk oranıyla birleştiğini göstermiştir. Sridharan ve Jayadeva (1982) bu araştırmalara devam etmişler, Yong vd. (1984) ise yaptıkları çalışmalarda tabii zeminler için benzer sonuçları bulmuşlardır. Morgenstern ve Balasubramonian (1980) ile Richards (1980), benzer şartlar söz konusu değilken yüksek tuz muhtevalı zeminin düşük tuz muhtevalı zeminden daha düşük boşluk oranına sahip olacağını, yağmur suyu gibi tuzsuz bir suyla ıslatılan zeminde su içeriğinin artışıyla tuzluluk oranının azalacağını ve zeminin daha fazla şişeceğini belirtmişlerdir.

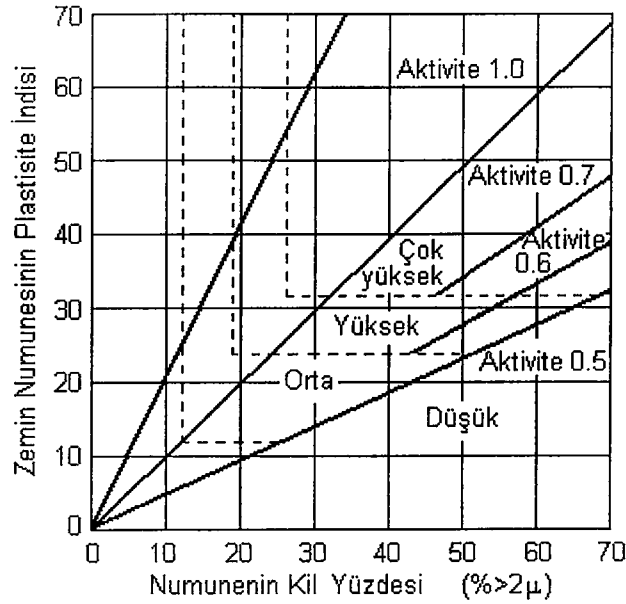
Justo vd. (1980), yukarıda açıklanan durumun laboratuvar deneylerinde önemli boyutlarda olabileceğini belirtmişler, El Arahal'dan aldıkları numuneleri sıkıştırıp bir sürsaj yükünde ıslatmışlar ve bir de numunelerin hiç gerilme uygulamaksızın serbest olarak şişmelerini sağlamışlardır. Şişen numuneleri her iki yöntemde de daha sonra yükleyerek, elde ettikleri boşluk oranı-logaritmik efektif gerilme ilişkisini gösteren eğrileri Şekil 2.1'de vermişlerdir. Şekilde görülen her iki deney tipine ait yatay-düşey gerilme oranlarındaki farklılıklar, Morgenstern ve Balasubramonian (1980) tarafından yapılan gözlemlerle uyum içindedir. Zeminde yüksek orandaki buharlaşma sonucunda boşluk suyundaki tuz konsantrasyonunun arttığını ve tuzun çökelp katılaşacağını, dolayısıyla kil partikülleri arasında çimentolaşma olacağını ve dönüşü olmayan değişikliklerin meydana geleceğini belirtmişlerdir. Laboratuvar da ozmotik teknikle kurutulan likit fazdaki numunelerde bu durumların söz konusu olmayacağına dikkat çekmişlerdir.



Şekil 2.1 Sıkıştırılmış El Arah al numuneleri üzerinde ıslatma deneyi (Justo vd., 1980).

2.2.3 Şişme potansiyelinin zemin özelliğine ve toplam gerilme durumuna bağlı olarak belirlenmesi

Gromko (1974), laboratuvar sınıflandırma deneyleriyle bir zeminin kabarma potansiyelinin belirlenebileceğini ve Güney Afrika'da yaptığı bu çalışmada Williams (1958) tarafından geliştirilen Şekil 2.2'deki kartın yaygın olarak kullanıldığını belirtmiştir. Bu kart kullanılarak, kil yüzdesi ve plastisite indeksi belirlenen numunenin şişmesi düşük, orta, yüksek veya çok yüksek olarak tahmin edilebilmiştir.



Şekil 2.2 Zeminlerin şişme potansiyelinin belirlenmesi (Williams, 1958).

Holtz ve Gibbs (1956), zeminin kil tipi ve yüzdesini yansıtan endeks özelliklerinin şişme potansiyeline olan etkisini araştırmışlar, bu amaçla kolloid içeriğini ve endeks özelliklerini belirledikleri zemin numunelerini 7 kPa'lık sürşarj yükünde doygun hale getirmişler ve zemin numunelerinin şişme potansiyellerini, toplam hacmin yüzdesi cinsinden belirlemişlerdir.

Dakshanamurthy ve Raman (1973) ile Snethen (1984), zeminlerin şişme potansiyeli ile likit limit arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Dakshanamurthy ve Raman (1973), tabii şişme potansiyelini belirlerken başka bir data kullanmazken Snethen (1984), potansiyel şişme miktarına plastisite indeksi ve emme oranının etkisini araştırmak için örselenmemiş numuneler kullanarak, numuneleri arazideki jeolojik yük altındaki doğal su içeriğinden daha doygun hale getirmiştir. Elde edilen bağıntı, jeolojik yükü içermemesine rağmen her plastisite aralığı için emme oranını dikkate almaktadır.

Komornik ve David (1969), killi zeminlerin serbest şişme değerleriyle plastisite indeksleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Bunun için zeminleri serbest şişme deneyine tabi tutmuşlar ve deney sırasında numuneleri su içeriğini kuru halden doygun hale kadar

getirmişlerdir. Deneyler sonucunda, serbest şişme değerinin plastisite indeksiyle doğru orantılı olarak arttığını ve aralarında lineer bir ilişkinin mevcut olduğunu belirtmişlerdir. Mitchell ve Avalle (1985) tarafından kompleks bir zemin profilinde yapılmış olan çalışmalarda, plastisite indeksi (PI) ile kararsızlık indeksi (I) arasındaki ilişki araştırılmış ve kararsızlık indeksi, emme ile değişen düşey gerilmenin bir oranı şeklinde tanımlanmıştır. Araştırmacılar, kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiş olan örselenmemiş zemin numuneleri kullanarak emmedeki değişiklikleri ölçmüşler ve örselenmemiş numunelerin rötire değerlerini belirlemişlerdir. Bu araştırmacıların üzerinde çalıştıkları zeminlerde ve hatta özel bir zemin tipinde plastisite indeksi ile kararsızlık indeksi arasındaki ilişki büyük bir dağılım göstermiştir. Örneğin plastisite indeksi 40 olarak ölçülen bir zeminde kararsızlık indeksi değerleri %1~3 arasında çıkmıştır. I-PI korelasyonunda, numunenin başlangıçtaki kuru birim hacim ağırlığı veya boşluk oranı dikkate alınmamış, her zemin tipinde dağılım derecesinin değişebileceği ifade edilmiştir.

Zeminin şişmiş haldeki boşluk oranının arazideki boşluk oranıyla ve jeolojik yük basıncıyla olan ilişkisi, %96 doyumlukta ve laboratuvarında sıkıştırılarak hazırlanan numuneler üzerinde Nagaraj ve Srinivasamurthy (1983) tarafından araştırılmıştır. Araştırmacılar, şişen zeminler üzerinde çalışmış olan önceki araştırmacıların elde ettikleri verilerden yararlanarak, şişmiş haldeki boşluk oranını belirlemek için bazı bağıntılar vermişlerdir.

Tadanier ve Nguyen (1984), Sullivan ve Mc Cleland (1969) tarafından verilen metodu geliştirmişler, örselenmemiş ve laboratuvarında sıkıştırılarak hazırlanan iki tip zemin numunesi kullanarak benzer bir çalışma yapmışlardır. Tadanier ve Nguyen (1984), rötire limiti, lineer rötire, plastisite indeksi, rötire indeksi ve likit limit değerleri ile şişme oranları arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Deney sırasında zemin numunelerinin optimum su içeriğinden tam doyumluğa erişmeleri sağlanarak, sabit hacimli şişme basıncı deneyleri yapılmıştır.

Van der Merwe (1964), arazideki şişme değerleriyle plastisite indeksi ve kil fraksiyonu ilişkisini araştırmışlar ve derinlik etkisini dikkate alarak zeminlerin potansiyel şişme ve

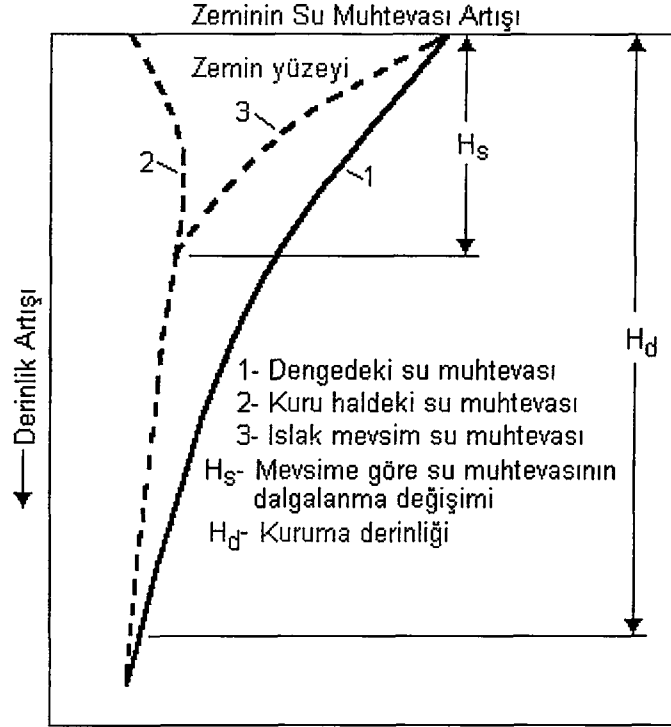
toplam kabarma değerlerini belirlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmada zemin numuneleri, dört farklı potansiyel şişme kategorisinde sınıflandırılarak her kategoride, bir metrede 8.3×10^{-2} m'lik şişmeden başlayarak kabarmanın sıfıra doğru düşmesiyle belirlenen numerik bir değer tanımlanmıştır. Dolayısıyla gözlenen kabarma değerleri, yüksek potansiyel şişmelerde 8.3×10^{-2} m, düşük potansiyel şişmelerde ise ± 0.0 m'dir.

şişmenin gözlendiği 6 m'den büyük derinliklerde potansiyel kabarma ile doğal kabarmanın karşılaştırılmasıyla derinlik faktörü elde edilmiştir. Potansiyel kabarmanın bulunması için ise potansiyel şişme, derinlik faktörü ve tabaka kalınlıklarından yararlanılmıştır. Bu metod, çok kuru şartlarda ve yerinde oluşmuş zeminler için güvenilir değildir (Williams ve Donaldson, 1980).

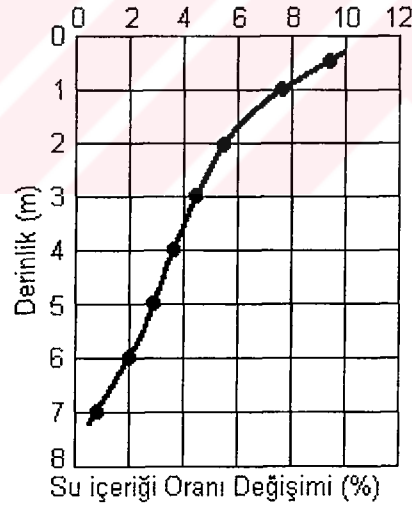
Zeminlerdeki şişme miktarını doğrudan etkileyen su içeriğinin derinlikle değişimi, Kraynski (1973) tarafından incelenmiş ve arazide yaptığı çalışmalar neticesinde homojen bir zeminin su içeriğinin derinlikle değişimini vermiştir (şekil 2.3).

Bu şekil üzerinde, *1 eğrisi* ile kaplamalı alanlardaki su içeriği profili, *2 eğrisi* ile de kaplanmamış alanlardaki su içeriği profili gösterilmiş ve yüzeye yakın bölgelerde buharlaşmanın su içeriği kaybına neden olduğu, derinlikle etkisinin azaldığı belirtilmiştir. İklim şartlarına, zemin tipine ve su içeriğine bağlı olan H_d gibi bir derinlikte su içeriği, örtülmüş alandakine benzer şekilde dengede olup H_d değeri, *kuruma derinliği* olarak dikkate alınmıştır. Yağışlı mevsimlerde yüzeye yakın bölgelerdeki zeminlerin su muhtevalarının arttığı, nemlilik eğrisi olan *2 eğrisinin 3 eğrisine dönüştüğü* gözlenmiştir. Yüzeydeki su içeriği değişiminin, zeminlerin permeabilitesinin ve iklim şartlarının, *su içeriği dalgalanması derinliği* olarak ifade edilen H_s derinliğini etkilediği de belirtilmiştir.

Buna benzer bir alışma Chen (1983) tarafından yapılmış ve su içeriğinin derinlikle azaldığı ifade edilerek, şişme-derinlik ilişkisi grafik olarak verilmiştir (şekil 2.4).



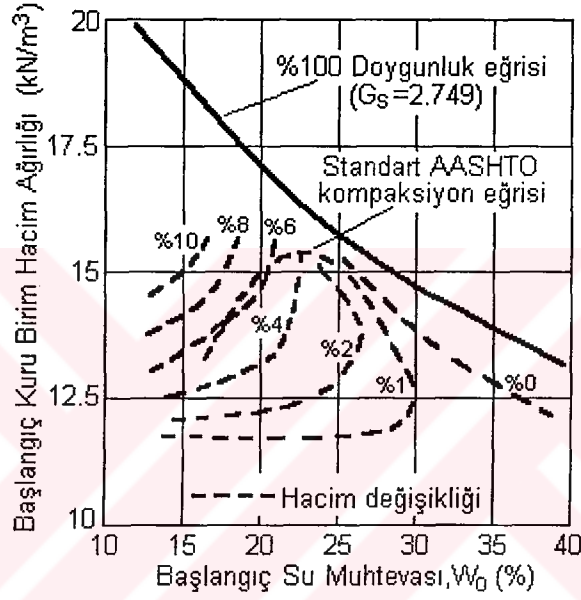
Şekil 2.3 Zemindeki su içeriğinin derinlikle değişimi (Kraynski, 1973).



Şekil 2.4 Su içeriğinin derinlikle değişimi (Chen, 1983).

Seed vd. (1962), karayolu ve havaalanı gibi kaplama yapılarının altında kullanılan sıkıştırılmış zeminlerin şişme potansiyellerini daha önceden belirleyebilmek için 28 ayrı kil numunesi alarak laboratuvarında standart kompaksiyon metoduyla optimum su içeriğinde ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırmışlardır. Araştırmacılar, bu zemin

numunelerini 7 kPa sürşarj basıncında doygun hale getirmişler ve şişme miktarlarını belirleyerek, başlangıç su içeriğinin ve kuru birim hacim ağırlığının zeminlerin şişme potansiyeli üzerindeki etkisini araştırmışlardır (Şekil 2.5). Şekilden, %20 su içeriğinde ve 15 kg/m^3 birim hacim ağırlığında sıkıştırılan zemin numunesinin 7 kPa sürşarj yükünde ıslatılmasıyla %6'lık bir şişme gözlenirken, aynı zemin %27 su içeriğinde ve aynı birim hacim ağırlıkta sıkıştırıldığında şişme göstermemiştir. Buradan, incelenen zemin numunesinin şişme potansiyeline sahip olmasına rağmen farklı yerleşim şartlarında bu potansiyelin anlaşılamayacağı sonucu çıkarılabilir.

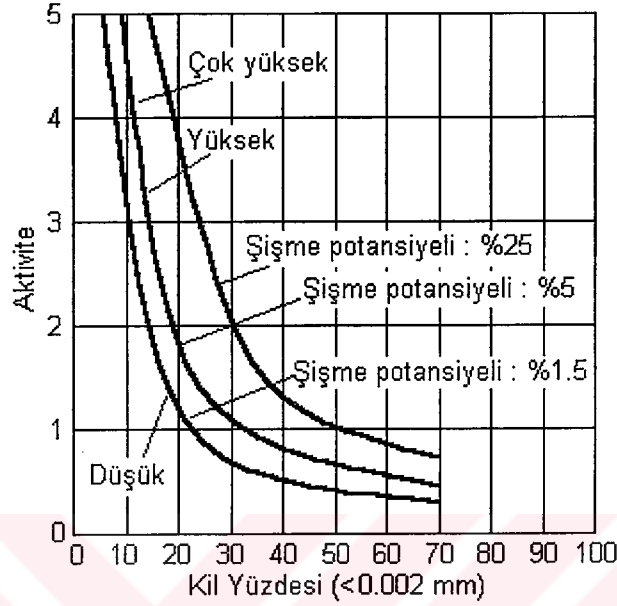


Şekil 2.5 Farklı yerleşim şartlarında hazırlanmış aynı kil numunesinin 7 kPa sürşarj yükünde ıslatılmasıyla oluşan şişme yüzdeleri (Seed vd., 1962).

Bu çalışmada şişme miktarına kil oranının etkisi de araştırılmış ve deney sonuçlarına göre şişme potansiyelinin, kil boyutu yüzdesinin bir fonksiyonu olduğu belirlenmiştir. Şişme potansiyeli (S), aktivite (A) ve kil boyutu yüzdesi (C) ($<0.002 \text{ mm}$) arasında aşağıdaki bağıntı yazılmıştır.

$$S = 3.6 \times 10^{-5} \times A^{2.44} \times C^{3.44} \quad (2.1)$$

Burada aktivite için $A=PI/(C-n)$ eşitliği verilmiş ve n değeri doğal zeminde 5, yoğrulmuş zeminde ise 10 olarak alınmıştır. Bu çalışmada, zeminleri şişme potansiyeline göre sınıflandırabilmek için bir de abak verilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Zeminlerin şişme potansiyeline göre sınıflandırılması (Seed vd., 1962).

Seed vd. (1962) aynı zamanda, şişme potansiyeli ve toplam şişmeyle plastisite indeksi arasındaki ilişkiyi ortaya koymuşlar ve toplam şişmeyi belirlemek amacıyla, havada kurutulmuş zemin numunelerine 7 kPa sürşarj yükünde doygunluk kazandırmışlardır. Araştırmacılar, %8~65 kil ihtiva eden tabii zeminlerin şişme potansiyelinin ± 0.33 hata ile hesaplanabilmesi için aşağıdaki eşitliği vermişler ve bu eşitliğin, gerçek şişme miktarını tam olarak yansıtmayacağını, fakat zeminin şişme özelliğini göstereceğini belirtmişlerdir.

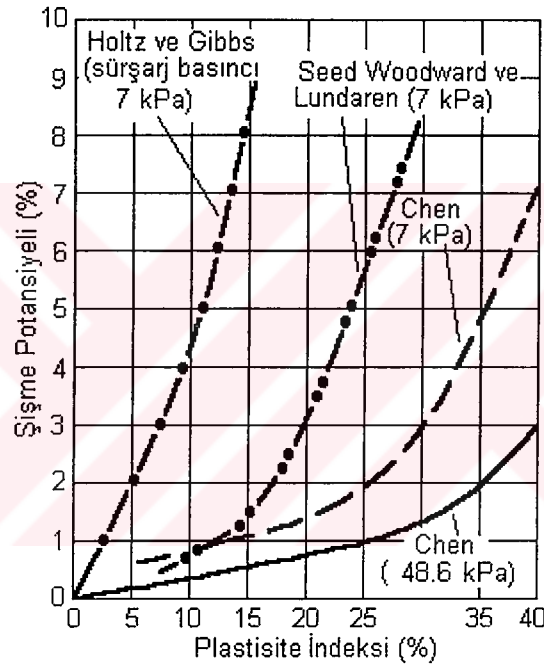
$$S = 2.16 \times 10^{-3} \times PI^2 \quad (2.2)$$

Plastisite indeksinin şişme potansiyeline olan etkisi, Holtz ve Gibbs (1956), Peck vd. (1974), Chen (1975) ile Wayne vd. (1984) tarafından da araştırılmıştır. Chen (1975), $15.7 \sim 17.3 \text{ kN/m}^3$ kuru birim hacim ağırlığında ve %15~20 arasında değişen tabii su içeriğindeki örselenmemiş zemin numunelerini 7 kPa sürşarj yükünde ıslatarak şişme

deneyleri yapmıştır. Bu konuyla ilgili olarak son yıllarda yapılan diğer çalışmalar ve deney sonuçları hakkında bilgi vermiş ve aşağıdaki bağıntıyı elde etmiştir.

$$S = B \times e^{A(PI)} \quad (2.3)$$

Bu bağıntıda $A=0.0838$, $B=0.2558$ ve $e=2.718$ (tabii logaritma tabanı) olarak verilmiştir. Bu numuneler aynı zamanda 49 kPa sürşarj yükünde de ıslatılmış ve şişme değerleri bulunmuştur. Chen (1975), deneyden elde ettiği sonuçlarla şişme potansiyeli ve PI arasında, diğer araştırmacılar tarafından yapılan önerileri karşılaştırmıştır (Şekil 2.7).



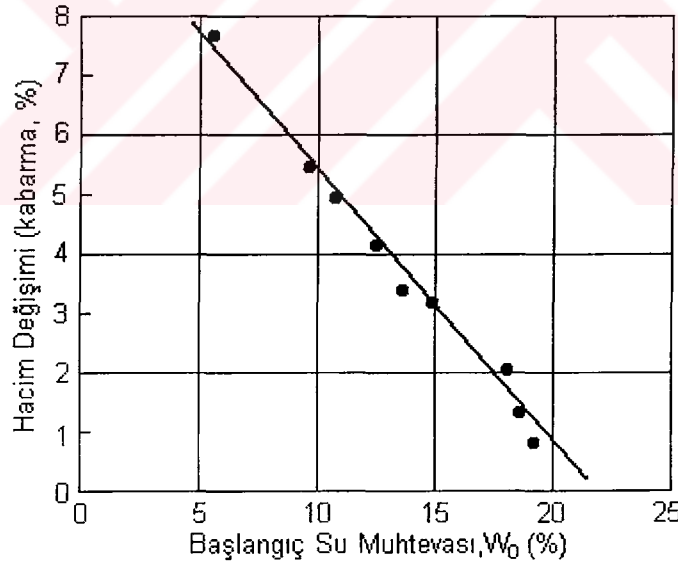
Şekil 2.7 Hacim değişikliği ve plastisite indeksi ilişkisi hakkında yapılan bazı çalışmaların kıyaslanması (Chen, 1975).

Peck vd. (1974), Chen (1975) ile Wayne vd. (1984), yaptıkları çalışmalarda plastisite indeksi ve şişme potansiyeli ilişkisi hakkında bilgi vermişlerdir.

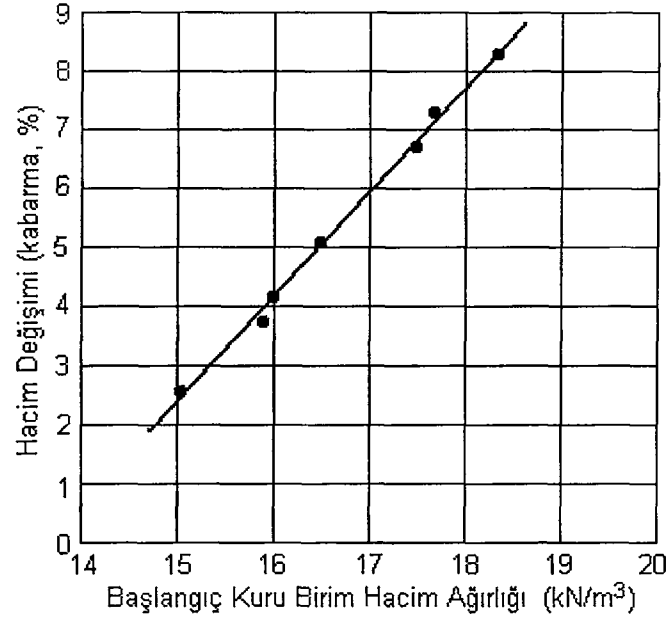
Zemin kabarma potansiyeli ve kil içeriği ile plastisite indeksi ve rötre limiti ilişkisi hakkında araştırma yapan Fredlund ve Rahardjo (1991), konuyla ilgili olarak daha önce yapılmış çalışmaları incelemişler ve elde ettikleri sonuçların Şekil 2.2 ile uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Holtz ve Gibbs (1956) ile Chen (1988), zemin numunesinin başlangıçtaki su içeriğinin, kuru birim hacim ağırlığının ve sürşarj basıncının, toplam şişme miktarına olan etkileri üzerinde çalışmışlardır. Bu amaçla numuneleri sabit bir kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırmışlar ve farklı başlangıç su muhtevalarında ödometre deneyine tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar, başlangıçtaki su içeriğinde meydana gelen azalma ile toplam şişme miktarındaki artış gözlemişlerdir. Diğer deneylerde ise başlangıçtaki su muhtevaları sabit olan zemin numunelerinin toplam şişme miktarının, başlangıçtaki kuru birim hacim ağırlığındaki artışla doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir.

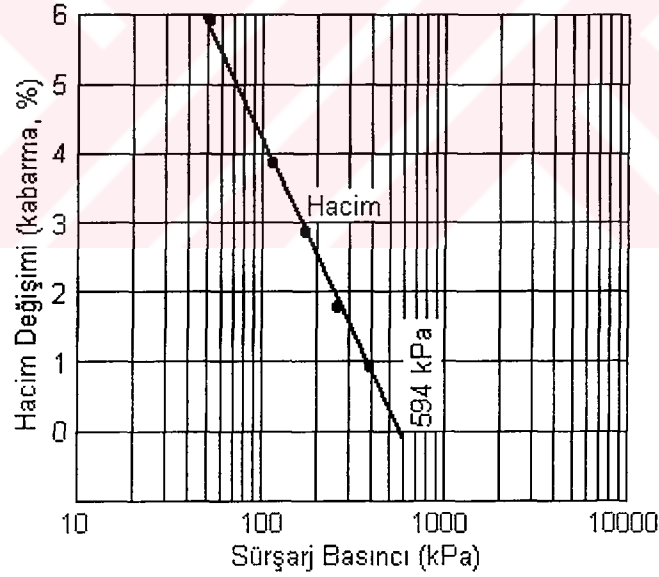
Toplam şişme miktarı, zemin özelliklerinin (kuru birim hacim ağırlık, su içeriği) yanında toplam gerilmenin de bir fonksiyonudur (Holtz ve Gibbs, 1956). Şişme miktarına sürşarj basıncının önemli bir etkisinin olduğu ve uygulanan sürşarj basıncının azalmasıyla şişme miktarının artacağı sonucuna ödometre deneylerinden varılmış ve bu değerler Şekil 2.8, 2.9 ve 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.8 Başlangıçtaki su içeriği değişimlerinin, kuru birim hacim ağırlığı sabit numunelerin toplam şişmesine etkisi (Holtz ve Gibbs, 1956).



Şekil 2.9 Başlangıçtaki kuru birim hacim ağırlığı değişiminin, numunelerin toplam şişmesine etkisi (Holtz ve Gibbs, 1956).



Şekil 2.10 Basınç değişiminin, su içeriği ve kuru birim hacim ağırlığı sabit numunelerin toplam şişmesine etkisi (Holtz ve Gibbs, 1956).

Sposito ve Giraldez (1976), Chan (1982), Giraldez vd. (1983), Daniells (1989) ile Keskin ve Şenol (1992), zeminde su içeriği değişikliğiyle meydana gelen şişmenin rötre durumunu, rötre eğrisini inceleyip karakterize etmişlerdir. Ayrıca zemindeki su içeriğinin azalmasıyla

oluşan rötreyi *normal rötreye*, zemin boşluklarında hava varken oluşan rötreyi ise *kalıcı/yapısal rötreye* olarak isimlendirmişler ve bunun zeminden su akışıyla oluşan normal rötreden daha küçük olduğunu belirtmişlerdir. Reeve ve Hall (1978), organik karbon içeriği ve zeminin makro yapısının rötreye olan etkileri üzerinde çalışmışlardır.

Sposito ve Giraldez (1976), termodinamik çalışmalar sonucunda su içeriği ile hacim arasındaki ilişkiyi aşağıdaki şekilde ifade etmişlerdir.

$$V(\theta) = V_s + V_w\theta + V_{po} \times [1 - f(\theta / \theta_{ae})] \quad (2.4)$$

Burada spesifik zemin hacmi V , katı kütledeki katı hacmi V_{po} , su hacmi $V_w\theta$, katı kütlenin birim hacmindeki hava $V_{po} \times [1 - f(\theta / \theta_{ae})]$ ve başlangıçtaki spesifik boşluk suyu ise V_{po} ile gösterilmiştir. Rijit ortamda f fonksiyonu $1-\theta/\theta_{ae}$ olarak ifade edilebilir. Bu konuda araştırmacıların yaptığı deneyler sonucunda bulunan veriler, Giraldez vd. (1983) tarafından değerlendirilerek 3. dereceden bir polinom bulunmuş ve bu *genel zemin hacim değişikliği (G SVC) eşitliği* olarak isimlendirilmiştir.

$$V(\theta) = V_s + V_w\theta + V_{po} \times [1 - 1.346 \times (\theta / \theta_{ae}) + 0.310 \times (\theta / \theta_{ae})^2 + 0.036 \times (\theta / \theta_{ae})^3] \quad (2.5)$$

Mc Garry ve Malafant (1987), bu polinomu kullanarak rötreye eğrisi eşitliğini üç doğrusal çizgi seti olarak ifade etmiş ve bunu da *TSL modeli* olarak isimlendirmişlerdir. Bu yaklaşımın başlıca özelliği Şekil 2.11’de gösterilmiştir.

Bu modeldeki rötreye eğrisi eşitliği aşağıdaki sınır şartlarında ayrı ayrı verilmiştir.

$$V(\theta) = V_o + (V_{ae} - V_o) \times (\theta / \theta_{ae}) \quad 0 \leq \theta \leq \theta_{ae} \quad (2.6a)$$

$$V(\theta) = V_{ae} + (V_{sl} - V_{ae}) \times (\theta - \theta_{ae}) / (\theta_{sl} - \theta_{ae}) \quad \theta_{ae} \leq \theta \leq \theta_{sl} \quad (2.6b)$$

$$V(\theta) = V_{sl} + (V_{mx} - V_{sl}) \times (\theta - \theta_{sl}) / (\theta_{mx} - \theta_{sl}) \quad \theta_{sl} \leq \theta \leq \theta_{mx} \quad (2.6c)$$

olmayan fakat buradaki deney şartlarında hazırlanmış numunelerde uygun sonuçlar veren bir bağıntı bulunmuştur.

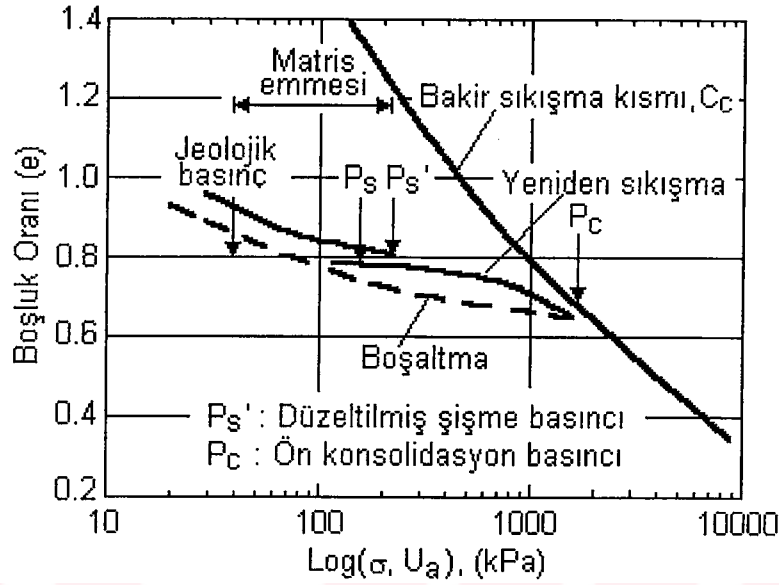
Smith (1973), şişen zemin üzerinde yapılan hafif bir yapı altında oluşabilecek şişmeyi belirlemek amacıyla örselenmemiş zemin numunelerinde “*serbest şişen*” ödometre deneyleri yapmıştır. Araştırmacı, konsolidasyon aletine yerleştirdiği numuneler üzerlerine jeolojik yük basıncına eşit bir basınç uygulayarak suyun bu basınç altında numuneye serbest girmesini sağlamış ve zemin numunelerindeki şişme miktarlarını kaydetmiştir.

Darkshanamurthy (1979), Fredlund ve Rahardjo (1987) ile Hettiaratchi (1990), zeminlerde oluşabilecek kabarma miktarı ve gerilme şartları arasındaki ilişkiyi belirlemeye çalışmışlardır. Darkshanamurthy (1979) bu amaçla bir sodyum montmorillonitini laboratuvar şartlarında sıkıştırmış ve üç eksenli basınç aleti kullanmıştır. Deneylerde, büyük ve küçük asal gerilme arasındaki oranın farklı olduğu numunelerin su emmesi ve şişmesi sağlanmış, toplam şişme miktarının normal gerilmedeki artışla hızla azaldığı, fakat asal gerilmeler arasındaki orandan etkilenmediği sonucuna varılmıştır.

Fredlund ve Rahardjo (1991), zemindeki gerilme durumu değişkenlerinden faydalanarak şişmeyi daha önceden tahmin etmeyi amaçlamışlar ve bu konuda birkaç örnek çözmüşlerdir. Ayrıca zemin profilinin değiştirilmesinin, toplam şişme miktarını ne kadar azaltılabileceği üzerinde çalışmışlardır.

Yapılan bu çalışmada doygun olmayan zeminlerin davranışları, (a) net toplam gerilme ($\sigma - U_a$) ve (b) matris (zemin iskeleti) emmesi ($U_a - U_w$) olmak üzere birbirinden bağımsız iki gerilme durumu değişkeni ile tanımlanmıştır (U_a : boşluk havası basıncı, U_w : boşluk suyu basıncı, σ : toplam gerilme). Toplam şişme büyüklüğünün, arazideki mevcut gerilme ve bir süre sonraki gerilme farkının bir fonksiyonu olarak yazılabileceği ve ödometre deneyi ile arazideki gerilme durumunun net normal gerilme düzlemi üzerine dönüştürüldüğü ifade edilmiştir. Arazideki gerilme durumu düzeltilmiş şişme basıncı P_s' olarak verilmiş ve bunun toplam jeolojik yük basıncına eşit ve matris emmesine eşdeğer olduğu belirtilmiştir.

Bir zeminin gerilme tarihçesinin zeminin şişme davranışında önemli bir etken olduğu belirtilerek, bu konuda yapılan ödometre deney sonuçları Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12 Ön konsolidasyon basıncına göre düzeltilmiş şişme basıncının durumu (Fredlund ve Rahardjo, 1991).

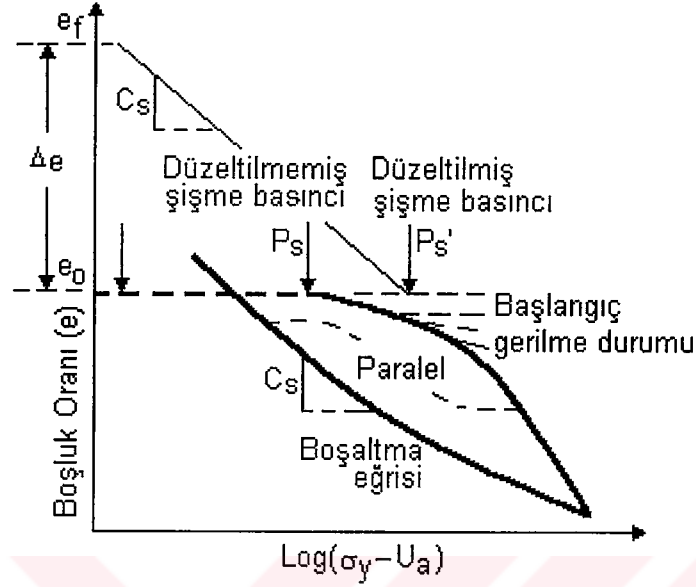
Şekildeki aşırı konsolidasyon oranı (OCR), ön konsolidasyon basıncı (p_c) ve düzeltilmiş şişme basıncı (p_s') arasındaki orandır (2.7).

$$OCR = \frac{p_c}{p_s'} \quad (2.7)$$

Fredlund ve Rahardjo (1991), zemindeki toplam şişme miktarını normal gerilme düzleminde tasarlanan başlangıç ve nihai gerilmeleri dikkate alarak daha önceden tahmin etmiş ve kullandıkları bir boyutlu ödometre deneylerinde, K_o yükleme şartlarında düşey şişme basıncını ölçerek düşey kabarmayı önceden belirlemişlerdir. K_o şartlarında farklı yükleme durumları için toplam şişmenin yanal doğrultuda oluşabileceğini de not etmişlerdir.

Fredlund ve Rahardjo (1987), doymun olmayan bir zeminde yanal şişmeyi daha önceden tahmin etmek için hacim değişikliği teorisini, toplam kabarma miktarını hesaplamak için

de Şekil 2.13'de verilen ödometre deneyi sonucundaki başlangıç ve nihai gerilme durumlarına karşılık gelen boşluk oranlarındaki değişiklikleri ve şişme indeksini kullanmışlardır.



Şekil 2.13 Bir boyutlu ödometre test sonuçları ve numunenin örselenmesinin etkisi (Fredlund ve Rahardjo, 1987).

Şekildeki deney verilerinin boşaltma kısmı için aşağıdaki ifade verilmiştir.

$$\Delta e = C_s \times \log\left(\frac{p_f}{p_o}\right) \quad (2.8)$$

Burada başlangıçtaki ve nihai gerilme şartlarında boşluk oranlarındaki değişiklik ($e_f - e_o$) Δe , başlangıçtaki boşluk oranı e_o , nihai boşluk oranı e_f , şişme indeksi C_s ve düzeltilmiş şişme basıncına eşit başlangıçtaki gerilme durumu da p_o ile gösterilmiştir. p_o ve p_f değerleri ise aşağıdaki bağıntılar yardımıyla bulunabilir.

$$p_o = (\sigma - U_a) + (U_a - U_w)e \quad (2.9)$$

$$p_f = \sigma_y + \Delta\sigma_y - U_{wf} \quad (2.10)$$

Bu eşitliklerde;

σ_y : toplam jeolojik basınç,

U_a : boşluk havası basıncı,

U_w : boşluk suyu basıncı,

$\sigma - U_a$: net jeolojik basınç,

$(U_a - U_w)_e$: matris emmesi eşdeğeri,

U_{wf} : önceden tahmin edilen nihai boşluk suyu basıncı ve

$\Delta\sigma_y$: kazı veya dolgunun yeniden yerleştirilmesiyle oluşan toplam gerilmedeki değişiktir (toplam gerilmedeki artış için pozitif, azalma için negatif işaret alınır).

Fredlund ve Rahardjo (1987), verilen bu eşitliklere dayanarak herhangi bir zeminin kabarma miktarının aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabileceğini ve bağıntıdaki Δe_i yerine (2.8) eşitliğinin yazılması ile (2.12) eşitliğinin elde edilebileceğini ifade etmişlerdir.

$$\Delta h_i = \frac{\Delta e_i}{1 + e_{oi}} \times h_i \quad (2.11)$$

$$\Delta h_i = \frac{C_s}{1 + e_{oi}} \times h_i \times \log\left(\frac{P_{fi}}{P_{oi}}\right) \quad (2.12)$$

Burada incelenen zemin tabakasının kabarması Δh_i , boşluk oranı Δe_i ve kalınlığı h_i ile, zemin tabakasının başlangıçtaki boşluk oranı e_{oi} , nihai gerilme durumu ($P_{fi} < P_{oi}$) olmak üzere P_{fi} ve başlangıçtaki gerilme durumu ise P_{oi} ile gösterilmiştir. Birden fazla tabakanın toplam kabarma miktarı H ise, aşağıdaki ifade ile tanımlanmıştır.

$$H = \sum \Delta h_i \quad (2.13)$$

Bu bağıntılardan faydalanarak, kabarma hesabıyla ilgili örnekler çözülmüş ve örnek alma esnasındaki örselenme için şişme basıncının etkisiyle toplam kabarmanın arttığı sonucuna varılmıştır. Bunun yanında, kazılan bölgeye kabarmayan malzeme doldurulmadıkça toplam kabarmanın yeterince azalmayacağı ifade edilmiştir.

Baveye vd. (1990), killerin şişmesiyle ilgili olarak mevcut teorilerin kil numunelerine veya arazideki zeminlere uygulanması durumunda hacim değişikliğine neden olan moleküler mekanizmaların, laboratuvar şartlarında hazırlanan kil süspansiyonlarındaki şişmeye olan etkilerini araştırmışlar, zemin şişmesi-kapilarite ilişkisini incelemişlerdir. Parker (1986), zeminlerdeki kapilarite olayını açıklamak için her iki ucundan birlikte ıslatılan ve bir ucu kapalı diğer ucundan ıslatılan R iç yarıçaplı iki farklı silindirik kılcal tüp kullanmıştır. Araştırmacı, ikinci tipteki kılcal tüpte buhar-sıvı arasındaki ara yüzeyde yüzey gerilmesinden kaynaklanan bir kuvvetin varlığından bahsetmiştir. Kılcal tüp aksı boyunca bu kuvvetin F_γ bileşeni aşağıda verilmiştir.

$$F_\gamma = 2 \times \pi \times R \times \gamma_{lv} \times \cos\alpha \quad (2.14)$$

Burada γ_{lv} suyun yüzey gerilmesi ve α ise kılcal tüp kenarıyla su yüzeyi arasındaki değme açısıdır. F_γ kuvveti tarafından suyun kapiler olarak emilmesiyle, atmosferik basınçtan daha fazla olan P_{ta} değerinde artan hava basıncının, F_p kuvvetinin değerini vereceği belirtilmiştir.

$$F_p = P_{ta} \times \pi \times R^2 \quad (2.15)$$

Kapiler tüpteki yükselmede menisküs tamamlandığında F_γ ve F_p kuvvetlerinin eşitlendiği gözlenmiş ve hava basıncı (2.16) eşitliği ile verilmiştir. Bu eşitlikte P_{ta} basıncının bazen iri daneli zeminlerin parçalanıp dağılmasına sebep olabileceği ve P_{ta} basıncı ile tüp yarıçapı R arasında ters bir ilişkinin varlığı not edilmiştir. Hunter (1989) ile Grant ve Dexter (1990) tarafından yapılan çalışmalarda da aynı sonuçlar bulunmuştur.

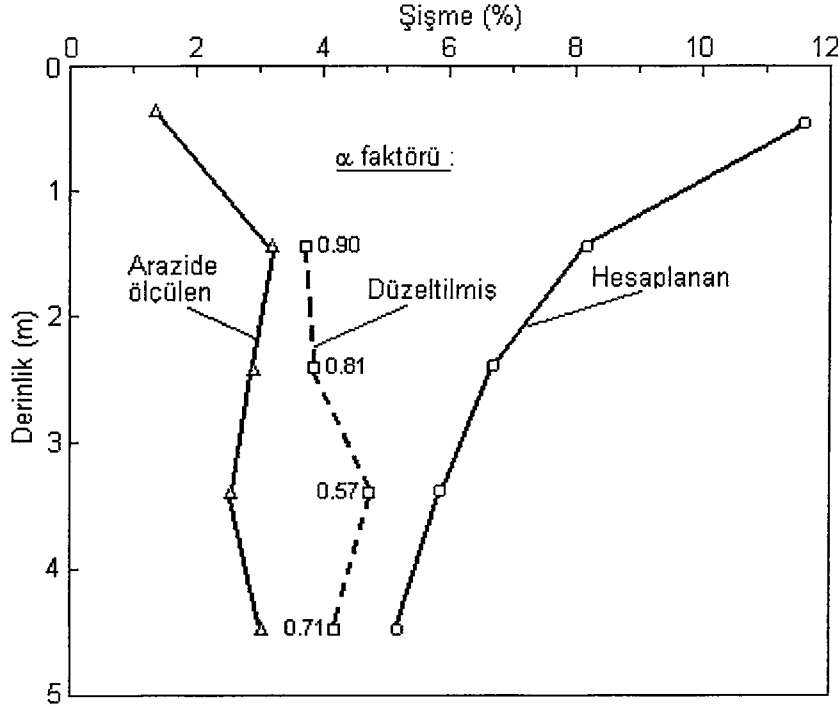
$$P_{ta} = \frac{2}{R} \times \gamma_{lv} \times \cos\alpha \quad (2.16)$$

Parker vd. (1980), zemin boşluklarındaki gaz fazının hareketiyle killerin şişmesi arasındaki ilişkinin varlığını araştırmak amacıyla ağırlıkça %9~48 oranlarında montmorillonit ve %11~15 oranlarında vermikülüt ihtiva eden zemin numuneleri kullanmışlardır. Bütün durumlarda atmosferik basınç altında suya daldırılan zeminlerdeki şişmenin, suyu tahliye

edilmiş zeminlerin suya daldırılmasıyla elde edilen şişmeden daha büyük olduğu ve boşluklardaki gaz fazının da şişme mekanizmasını etkileyebileceği kaydedilmiştir.

Erol (1990), arazideki gerçek kabarma değerleri ve laboratuvarında ölçülen parametrelerle hesaplanan kabarma değerlerini kıyaslamak için %72 oranında kil içeren kaolen ve illit minerallerinden oluşmuş killi-şeylli 10x20 m²'lik bir arazide çalışmış ve hesaplamalarda dikkat edilmesi gereken etkenler üzerinde durmuştur. Burada bir tank yardımıyla sürekli ıslatılan ve bir hat üzerinde bulunan 4 m derinliğinde 19 adet kum dren teşkil edilmiştir. Kabarmalar her birim metre derinliğe yerleştirilen oturma plakaları yardımıyla, hacim değişimleri ise nükleer bir hücreden faydalanarak ölçülmüştür. Çalışmada, çift tüplü karotiyer ve hava sirkülasyonu yöntemiyle örnek alındıktan sonra incelenen alana su verilmiştir. Alınan karot numuneler ödometre yöntemiyle serbest şişme, şişme basıncı ve farklı sürşarj yüklerinde şişme deneylerine tabi tutulmuştur. Ödometre deneylerine göre sürşarj yükleriyle şişme miktarları arasında, basınç artışıyla birlikte şişmenin lineer olarak azaldığı sonucu elde edilmiştir. Bu ilişki, Brackley (1975) tarafından yapılan çalışmaların sonuçlarıyla uyum içindedir.

Arazideki gerçek kabarma değerleri ve laboratuvarında yapılan ödometre deneylerinden bulunan kabarma değerlerinin derinliğe bağlı olarak değişimleri, Şekil 2.14'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.14 Arazide ölçülen ve ödometre deneylerinden hesaplanan şişmeler (Erol, 1990).

Laboratuvardaki deneylerden bulunan şişme miktarları arazideki şişmelerden büyük çıkmış ve bu fark, Birand (1977) tarafından önerilen bir yöntem yardımıyla düzeltilmiştir. Araştırmacı, kabarma etkisiyle oluşan boşluk oranındaki artış (e) ile emilen su miktarı (w) arasındaki bağıntının doğrusallığını göstermiş ve doğrunun eğimini de su alma temayülü endeksi (P_w) olarak tanımlamıştır.

$$P_w = \frac{\Delta e}{\Delta w} \quad (2.17)$$

Laboratuvardaki denge su içeriği ile arazideki nihai su içeriği arasındaki farka karşı gelen düzeltilmiş şişme değerleri P_w yardımıyla bulunmuştur. Fakat arazideki zeminin ödometre deney koşulları kadar uygun bir ıslanma ortamına sahip olmaması ve dolayısıyla farklı şekilde su emmesi sebebiyle, bu değerler de reel kabarmadan büyük çıkmıştır. Bu farkın diğer bir nedeni de şişen zeminlerdeki çatlak ve fisür gibi yapısal süreksizliklerdir (Mc Keen, 1981). Arazideki bu süreksizlikler, yanal hacim değişimlerine de neden olmakta ve düşey şişmeleri azaltmaktadır. Yanal deformasyonların etkisini yansıtmak amacıyla,

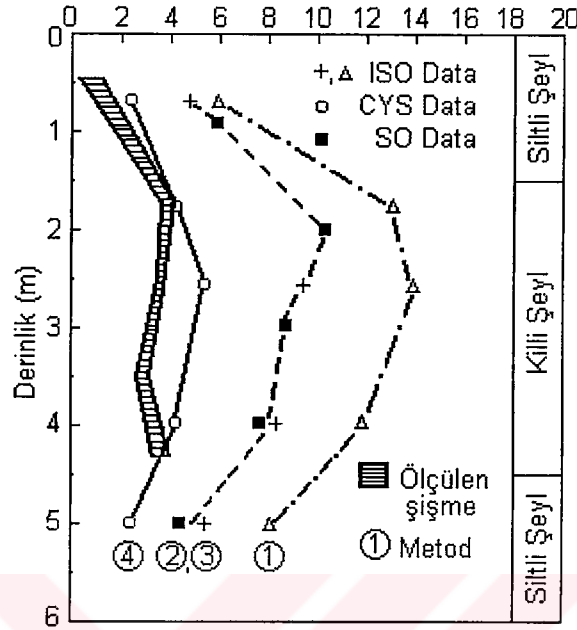
gerçekleşmesi beklenen reel şişme ile ödometre deneyinden bulunan şişme değerleri arasındaki oran olarak ifade edilen α sınır faktörü tanımlanmıştır. Alınan zemin numunesinde bu değer 0.57~0.90 arasındadır.

Erol ve Dhowian (1990), şişmenin nicel analizinde kullanılan şişme parametrelerinin belirlmesi amacıyla ASTM (1986) standartlarına da bağlı kalarak dört alternatif ödometre tekniği tanımlamışlar ve bunların arazideki gerçek şişme miktarlarına yakınlıklarını araştırmışlardır. Bütün deney metotlarında serbest su girişi bulunan konsolidasyon aletinde, yanlardan sınırlandırılmış ve eksenel yüklenmiş zemin numunelerine ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir.

Birinci ödometre tekniğinde, örselenmemiş şişen zemin numunesinin sadece üst başlık yükü altında serbest olarak kabarmasına izin verilmiş ve daha sonra arazideki gerilmeye (P_o) uygun jeolojik yük uygulanarak, meydana gelen gerilme izi ve değişiklik kaydedilmiştir. İkinci yöntemde zemin numunesi, 7 kPa'lık düşük basınçta konsolidasyon aletinde ıslatılmış ve daha sonra orijinal boşluk oranının ve şişme basıncının elde edildiği gerilme değerine kadar yüklenmiştir. Zemin numunesinin p_0 gerilmesiyle düşey olarak yüklendiği üçüncü metotta, artan p_0 gerilmesinde örnek doyumluğa ulaşıncaya kadar su eklenerek, basınç seviyelerine göre belirlenen hacim değişimleri kaydedilmiştir. Dördüncü ve son metotta ise örnek, p_0 düşey gerilme yükünün azaltılmasından sonra ödometre aletindeki sabit bir hacimde doymun hale getirilmiştir. Hacim değişikliği ve gerilme izi durumu da belirtilmiştir.

Bu metotlarda şişme parametreleri olarak serbest şişme, şişme basıncı ve şişme indeksleri bulunmuştur. Şişme değeri, (2.12) eşitliği yardımıyla analitik olarak da hesaplanmıştır. Ödometre deneyleri sonucunda hacim değişiminin ve şişme parametrelerinin, gerilme izi ve ıslatma şartlarına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Bu dört ödometre deneyi yardımıyla şişme değerleri tahmin edilen A_1 -Ghatt şeyllerinin arazideki şişme miktarları da ölçülmüştür. Arazi çalışmasında Erol (1990)'daki teknik kullanılmış, arazideki şişme değerleri ile ödometre deneylerinden bulunan şişme değerlerinin derinliğe bağlı değişimleri

verilmiş ve dördüncü metodun sonuçlarının arazide ölçülen değerlere yakın olduğu görülmüştür (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 Arazide ölçülen şişme değerleriyle ödometre deneylerinden bulunan şişme değerlerinin karşılaştırılması (Erol, 1990).

Kil yüzey alanının, dolayısıyla şişme potansiyelinin belirlenmesi için Birand ve Çokça (1991) tarafından *metilen mavisi deneyi* kullanılmıştır. 40 No'lu elekte elenen 30 gr zemin numunesi üzerine 200 cc saf su eklenerek 700 devir/dakika hızla karıştırılmıştır. 10 gr metilen mavisi maddesine ise 1L saf su ilave edilmiştir. Daha sonra, artan dozadaki metilen mavisi solüsyonu zemin solüsyonu içine enjekte edilerek deney süresince zemin solüsyonu 400 devir/dakika hızda karıştırılmıştır. Bu karışımdan bir damla alınarak filtre kağıdına damlatılmış ve ilk anlarda koyu mavi dairesel bölge çevresinde dairesel temiz su bölgesi varken, deney sonunda koyu mavi bölge dışında açık mavi bölge ve temiz su bölgesi gözlenmiştir. Bu, metilen mavisinin suda çözünmesi sonucunda metilen mavisi katyonlarının ve klorid anyonlarının oluşmasından kaynaklanmaktadır. Metilen mavisi adsorpsiyonu, kilin katyon değişmesine ve yüzey alanına bağlıdır (Birand ve Çokça, 1991). Burada kil danelerinin yüzey alanı ve maviliğin tonundan da şişme potansiyeli belirlenmiştir.

Birand ve Çokça (1991), kısa zamanda fazla bir ekipmana ihtiyaç duymadan kolayca uygulanabilen bu tekniğin hassas sonuç elde etmedeki güçlüklerinden bahsetmişlerdir. Bunun yanında iyi kaliteli metilen mavisinde bile çok az miktarda yabancı kimyasal maddelerin olabileceği, bunun ve kil yapısının değişimine neden olan sıcaklık değişiminin metilen mavisi deneyinin sonuçlarını etkileyebileceği gibi sakıncalar üzerinde durulmuştur.

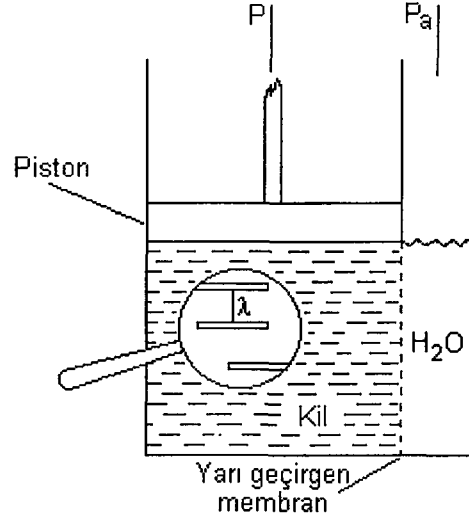
2.3 Şişme Basıncının Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar

Low (1987), smektit olarak da bilinen şişen kafes tabakalı alüminyum silikat minerallerinin tabakaları arasındaki mesafe (λ) ile şişme basıncı (II) arasındaki ilişkiyi, çift tabaka teorisini ve Na-smektitlerini kullanarak belirlemeye çalışmıştır. Araştırmacı, tipik bir smektitin bir silis tetrahedronu ile bir alüminyum oksit oktahedronundan oluştuğunu belirtmiştir.

Bir smektit kristaliyle temas ettirilen Şekil 2.16'daki gibi atmosfer basıncına (P_a) sahip suyun, kristal tabakaları arasına girerek tabakaları ayırmaya çalıştığı ve sonuçta kristalin kabardığı görülmüştür. Kabarmanın önlenmesi amacıyla kristale P_a basıncından büyük bir P basıncı uygulanmış ve dengedeki kristalin şişme yada parçalara ayrılma basıncı ($P-P_a$), şişme basıncına (II) eşit çıkmıştır. Benzer şekilde, yarı geçirgen bir membran ile P_a basıncındaki saf sudan ayrılan kilin sulu bir süspansiyonu gösterilmiştir. Suyun süspansiyonda oluşan transferden korunması amacıyla mutlak bir P basıncı, piston yardımıyla süspansiyona uygulanmıştır. Bu mutlak P basıncı, etrafı suyla çevrili kil partiküllerine üniform bir şekilde uygulanmış ve verilen λ değerleri için $(P-P_a)=II$ bulunmuştur. Bu sistem için aşağıdaki eşitlik verilmiştir.

$$(\bar{G}_w - G^{\circ}_w)_{P_a} = - \bar{U} \times (P - P_a) = - \bar{U} \times II \quad (2.18)$$

Burada $\bar{G}_w$ süspansiyondaki suyun kısmi molar serbest enerjisini, G°_w saf suyun kısmi molar serbest enerjisini ve $\bar{U}_w$ ise süspansiyondaki suyun kısmi molar hacmini göstermektedir.



Şekil 2.16 Kil fazında denge sağlamak amacıyla bir P basıncının uygulanmasını gerektiren iki fazlı (kil ve su) sistem (Low, 1987).

Süspansiyonun dengelenmesi için saf su yerine sulu elektrolit solüsyonu kullanılması durumunda G_w^o 'nin, solüsyon suyunun kısmi molar serbest enerjisiyle yeniden yerleştirilmesi gerektiği, herhangi bir faktörün G_w 'yi ve dolayısıyla II'yi etkileyebileceği ifade edilmiştir. Bazı araştırmacılar, G_w 'nin sadece tabakalar arasındaki solüsyonda bulunan iyon çözeltisinden etkilendiği için itici P basıncının tabakaları ayırmaya çalışacağını, bunun da tabakalar arasındaki ve tabaka dışındaki solüsyonların ozmotik basınçları arasındaki fark olduğunu kabul etmişler ve yüzey-su etkileşiminin P'yi etkilediğini de belirterek aşağıdaki eşitliği vermişlerdir.

$$P = 2 \times n \times k \times T \times \left(\cosh \frac{\sqrt{e} \times \Psi_h}{k \times T} - 1 \right) \quad (2.19)$$

Bu eşitliklerde;

n : harici solüsyondaki simetrik elektrolit konsantrasyonu,

k : Boltzman sabiti,

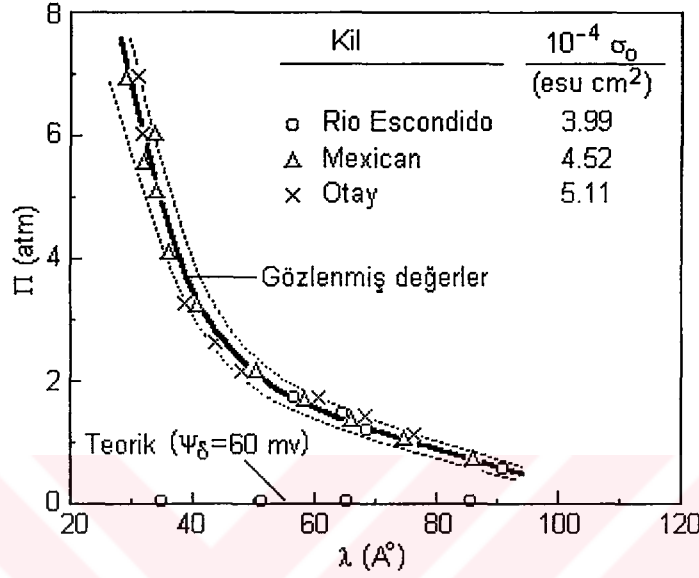
T : azami mutlak sıcaklık,

$\sqrt{e}$: iyon a ait değerlik,

e : elektronik yük ve

Ψ_h : paralel tabakalar arasındaki elektrik potansiyelidir.

İncelenen Na-smektitlerinin Ψ_h değerleri, içlerinden birisi de *elektiriksel çift tabaka teorisi* olan dört farklı yöntemle belirlenmiştir. Tüm metotlardan elde edilen sonuçlar birbirine yakın çıkmış ve Na-smektitleri için $\Psi_h=50$ mV alınmıştır. $\lambda \sim \Pi$ ilişkisi teorik bir eğriyle gösterilmiştir (Şekil 2.17).



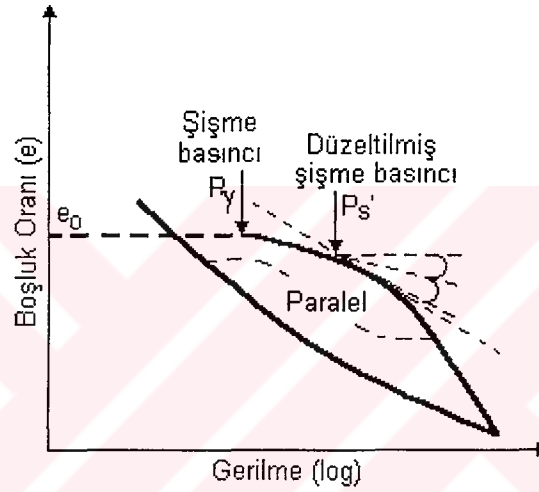
Şekil 2.17 Na-smektitleri için λ ve Π arasındaki ilişkiyi gösteren teorik ve gözlemsel olarak elde edilmiş eğriler (Low, 1987).

Bu teorik sonuç, Viani vd. (1983) tarafından Na-doygun smektitleri ve Li-vermikülitli kullanarak λ ve Π arasında elde edilen deneysel sonuçlarla uyumludur.

Toplam şişme miktarı ve şişme basıncının belirlenmesi amacıyla Sullivan ve Mc Cleland (1969) tarafından, örselenmemiş numuneleri “*sabit hacimli*” ödometre deneylerine tabi tutulmuştur. Zemin numunelerinin hacim değişimlerini önlemek amacıyla su girişiyle beraber yükleme yapılmıştır. Şişme basınçları bulunan numuneler tekrar boşaltılmış ve örnek alma esnasındaki örselenmelerden dolayı, laboratuvarda elde edilen basınçların arazideki değerlerden büyük çıktığı görülmüştür.

Fredlund vd. (1980) ve Fredlund (1983), Sullivan ve Mc Cleland (1969) tarafından yapılan çalışmaları esas alarak bu yöntemi geliştirmeye çalışmışlardır.

Şişme miktarının belirlenebilmesi için (2.12) eşitliğindeki gerilme değerleri, tabakaların ortalarında hesaplanmış ve buradaki P_o basıncının bulunabilmesi için başlangıçtaki toplam jeolojik yüke zeminin negatif boşluk suyu basıncını ifade eden bir değer ilave edilmiştir. Fakat bu değer doğru ölçülmesi zor olduğu için P_o değeri daima temsili zemin numuneleri üzerinde ödometre aletiyle belirlenen şişme basıncı değeri olarak dikkate alınmıştır. Deney, düşük yükte zemin numunesine su verildiği zaman kabarmayı engelleyen basıncın ölçüldüğü metotla yapılmış ve sonra normal konsolidasyon deneyinde olduğu gibi yükleme ve boşaltma uygulanmıştır. Fakat örnek alınırken örselenmenin etkisini dikkate almak için P_s şişme basıncının Şekil 2.18'deki gibi düzeltilmesi gerektiği ifade edilmiştir.



Şekil 2.18 Düzeltilmiş şişme basıncının belirlenmesi (Fredlund vd., 1980).

Şişme basıncının genellikle derinlikle azaldığı belirtilmiş ve P_f gerilmesinin bulunabilmesi için aşağıdaki eşitlik verilmiştir.

$$P_f = \sigma_v + \Delta\sigma - U_{wf} \quad (2.20)$$

Bu eşitlikte;

σ_v : başlangıçtaki toplam jeolojik yük,

U_{wf} : nihai boşluk suyu basıncı için belirlenen değer ve

$\Delta\sigma$: toplam gerilme değişimi (kazı, dolgu veya kaplama yükü) sonundaki net farktır.

Şişme indeksi (Cs), şişme basıncının belirlenmesi için yapılan ödometre deneylerindeki boşluk oranı ile basınç ilişkisinde yük boşaltma kısmının eğimidir. Şişme indeksinin belirlenmesinde, şişme eğrisinin başlangıçtaki boşluk oranına yaklaşan kısmının eğimi olarak dikkate alınması tavsiye edilmiş ve Cs'nin, bakir konsolidasyon eğrisinin eğimi olan sıkışma indeksi Cc'nin %10~20'si kadar olduğu ifade edilmiştir.

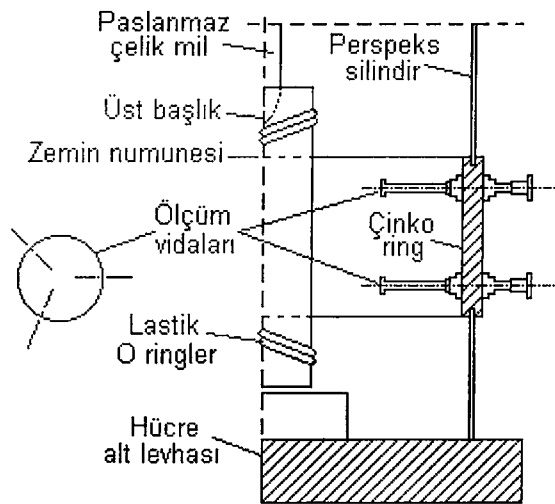
Fourie (1989), zeminlerin düşey ve yanal şişme basınçlarını belirlemeyi amaçlamış ve düşey şişme basıncı için *Dengeli Boşluk Oranları Metodu*'nu kullanmıştır. %22'lik su içeriğinde ve 14.2 kN/m^3 'lük kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılan zemin numuneleri ödometre deneyine tabi tutulmuştur. Zemin numuneleri gerekli düşey gerilmelerde dengeye ulaştıktan sonra ödometre hücresine su eklenerek kalınlık değişimleri ölçülmüş ve buradan da şişme basıncının en düşük değeri belirlenmiştir. Eksenel ve radyal basınçların gerilme kontrolü olarak verilebildiği üç eksenli basınç aletleri ise yanal şişme basınçlarının belirlenmesinde kullanılmıştır. %22'lik su içeriğinde ve 14.2 kN/m^3 'lük kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılan zemin numunelerinin etrafı yanal gerilme kayışı ile sarılmış ve bunlar klasik üç eksenli numunelerden ayrı olarak sadece alt ve üstlerinden değil, çevrelerinden de drene edilmiştir. Deneylerde sadece izotropik toplam gerilme durumları söz konusu olmuş, zemin numunesine her doğrultudan su verilmiş ve su girişiyle oluşan çap değişimleri not edilmiştir. Ayrıca dengeli boşluk oranları metoduna bağlı alternatif bir yaklaşım yoluna da gidilmiş ve bu amaçla yukarıda anlatılanlara uygun olarak hazırlanan bir seri zemin numunesi üç eksenli basınç aletinin hücrelerine yerleştirilmiştir. Farklı değerlerdeki hücre basınçlarına maruz bırakılan zemin numunelerine 50 kPa 'lık ters basınç uygulanmış ve denge sağlanıncaya kadar hacim değişikliği serbest bırakılmıştır. Kil permeabilitesinin çok düşük olmasından dolayı deneyler 3~4 hafta sürmüş, düşey ve yatay şişme karakteristiklerinin farklı olduğu sonucu ortaya çıkartılmıştır. Kassiff ve Zeitlen (1962) tarafından yapılan arazi gözlemleri neticesinde düşeydeki ve yataydaki şişme karakteristiklerinin farklı olduğu ispatlanmıştır.

Fourie (1989) 300 , 400 ve 600 kPa 'lık başlangıç hücre basınçlarında bu deneyleri tekrarlamış ve dengeli yanal deformasyon değişimlerindeki farkların %3'den az olduğunu ifade etmiştir. Bu teknik yardımıyla, *Hacim Değişikliğinin Olmadığı ve Serbest Şişme-*

Yükleme Metotları'ndan daha küçük şişme basıncına sahip basınç belirlenmiş ve arazideki yanal şişme basınçlarına benzeyen kesin yanal şişme değerleri bulunmuştur (Sridharan vd., 1986). Eksenel şişmenin bulunmasında Darkshanamurthy (1979) ve Jardine vd. (1984) tarafından benzer bir teknik kullanılırken, yanal şişmenin belirlenmesinde yanal gerilmelerin doğrudan ölçümü tavsiye edilmiştir.

Zeminlerin yanal deformasyonunun ölçebilmesi amacıyla Dif (1990) tarafından, üç eksenli basınç aletinin hücresinden faydalanarak modifiye edilen bir teknik geliştirmiştir (Şekil 2.19). Yalnızca *perspeks hücre* silindrinde basit değişikliklere ihtiyaç duyulan bu teknikte, sistemin değişik laboratuvarlarda diğer araştırmacılar tarafından da kolaylıkla kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu sistem, iki seviyede ve altı tane elle hareket eden paslanmaz çelik kolla vidalanarak tutturulan altı dairesel destekten ibaret olup zemin numunesinden ileri ve yana doğru hareket ettirilebilirler. Bu vidaları monte etmek için 1 kPa'lık hücre basıncı etkisiyle perspeks silindirin ölçülemeyen deformasyonunu da belirleyebilen sert pirinçten yapılmış bir ring oluşturulmuştur.

Dairesel destekle örnek arasındaki bağlantı, hücrenin arkasındaki hafif bir ışık kaynağı yardımıyla görülebilen ince ışık boşluğunun kapatılmasıyla tamamlanmıştır. Dönen desteğin numuneye temas ettiği anda okuma saati yardımıyla ringe doğru kol hareketi ölçülerek örnek çapındaki değişiklikler belirlenmiştir.



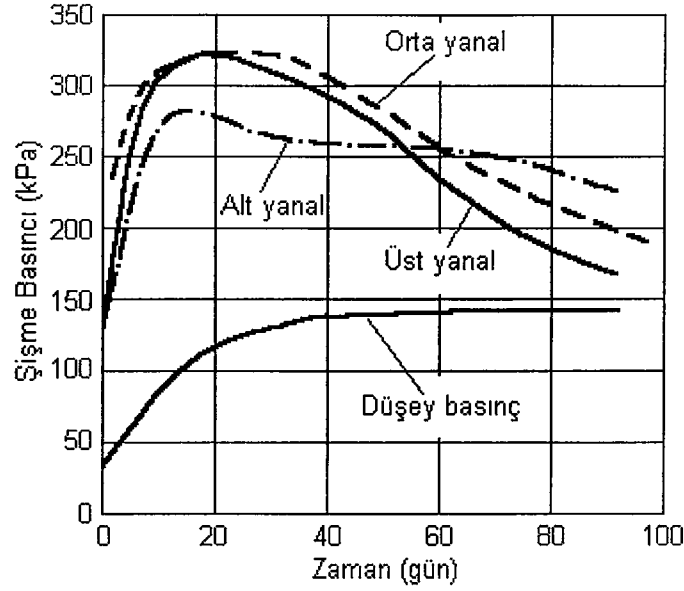
Şekil 2.19 Yanal deformasyon ölçüm elemanları ve üç eksenli hücre detayı (Dif, 1990).

Yıldırım ve Keskin (1992), laboratuvarıda sıkıştırılarak hazırlanan CH sınıfı numunelerin izotropik gerilme şartlarındaki yanal şişme basınçlarını belirlemek için modifiye edilmiş üç eksenli deney sistemi geliştirmişler, farklı efektif gerilmeler altındaki kil numunesinin şişme basınçlarını belirlemiş ve efektif gerilme arttıkça şişme basıncının azaldığını ifade etmişlerdir.

Keskin vd. (1992), sözü edilen zemin numunelerinin izotropik olmayan gerilme şartlarındaki yanal şişme basınçlarını belirlemek için modifiye edilmiş üç eksenli deney sisteminden faydalanmışlardır. Hücre üzerine düşey yönde ters çalışabilen bir başka hücre bağlayarak, yükleme miline dengeleme basıncı ile ek basınç uygulama imkanı sağlamışlardır.

Bu çalışmalardan, izotropik ve izotropik olmayan gerilme şartlarındaki zemin numunelerinin ihmal edilemeyecek boyutlardaki yanal şişme basınçları belirlenmiştir.

Chen (1988), düşey ve yanal şişme basıncına hacim ve kütle özelliklerinin etkisini araştırmış ve düşey şişme basıncının başlangıçtaki su içeriğinden ve sürşarj yükünden bağımsız olduğunu, kuru birim hacim ağırlığın bir üssü olarak arttığını gözlemiştir. Yanal şişme basıncının ise kuru birim hacim ağırlık, doygunluk derecesi ve sürşarj yükünün bir fonksiyonu olduğunu bulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, yanal şişme basıncının doygunluğun pik değeriyle hızla arttığı ve denge durumundan sonra azaldığı görülmüştür.



Şekil 2.20 Düşey ve yanal şişme basınçlarının zamanla değişimi (Chen, 1988).

Chen (1975), şişme basıncını belirlemek amacıyla incelediği doğal zemin numunelerinin 50 kPa'lık sürşarj yükünde su emerek tamamen şişmelerine izin vermiş ve nihai şişme değerlerine ulaştıktan sonra tekrar yükleme yapmıştır. Numunelerin eski hacimlerine dönebilmeleri için gerekli basınç değerleri bulunmuş ve bu değerler *şişme basıncı* olarak dikkate alınmıştır. Yapılan bu deneylerden, şişme yüzdesini etkileyen faktörler (sürşarj basıncı, numunenin başlangıçtaki su içeriği, suya doygunluk derecesi, örnek kalınlığı vb. gibi) belirlenmiş ve şişme basıncının pratikte sabit kaldığı fakat başlangıçtaki kuru birim hacim ağırlıkla doğru orantılı olduğu görülmüştür.

Wayne vd. (1984), temel tasarımlarında kullanılmak üzere hacim değişikliği, şişme basıncı ve muhtemel hasar arasındaki ilişkiyi gösteren aşağıdaki Çizelge 2.1'yi vermişlerdir.

Çizelge 2.1 Hacim değişikliği, şişme basıncı ve muhtemel hasar ilişkisi (Wayne vd., 1984).

Hacim Değişikliği (%)	Şişme Basıncı (kPa)	Muhtemel Hasar
0~1.5	0~50	Düşük
1.5~5	50~250	Orta
5~25	250~1000	Yüksek
>25	>1000	Çok yüksek

2.4 Şişme Yüzdesinin Belirlenmesi İçin Yapılan Çalışmalar

Brackley (1983), başlangıçtaki boşluk oranına, plastisite indeksine, sürşarj basıncına ve başlangıçtaki su içeriğine göre potansiyel şişme yüzdesinin değişimini incelemek için 25~52 arasında plastisite indeksine sahip üç farklı sıkıştırılmış zemin numunesi kullanmıştır. Başlangıçtaki su muhtevaları ve boşluk oranları farklı olarak sıkıştırılan ve farklı sürşarj basınçlarında doymun hale getirilen bu numuneler ödometre deneyine de tabi tutulmuşlardır.

Şişme yüzdesinin önceden belirlenebilmesi için bazı parametreler kullanılmasına rağmen, önceden tahmin edilen ve ölçülen şişme değerleri karşılaştırılarak iyi sonuç vermedikleri gözlenmiş ve tahmini değerler ölçülen değerlerden 0.5~6 kez daha farklı çıkmıştır. Bu bağıntının, örselenmemiş zemin numunelerindeki geçerliliği sağlanamamış ve böylece çok derin yeraltı su seviyesine sahip veya az yağışlı bölgelerde uygulanmasının doğru olmayacağı sonucu çıkartılmıştır.

Bandyopadhyay (1981), şişme yüzdesiyle plastisite indeksi ve kil yüzdesi ilişkisini araştırmak amacıyla optimum su içeriğinde %92'lik standart AASHTO kuru birim ağırlığında laboratuvarında sıkıştırılan numuneler kullanmıştır. Zemin numuneleri CBR deneyi ile optimum su içeriğinden itibaren 95 saat süreyle ıslatılmış ve 7 kpa'lık sürşarj yükünde ödometre deneyine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen ve Seed vd. (1962) tarafından bulunan ifadeye oldukça yakın olan bağıntının bütün zeminler için geçerli olabileceği ileri sürülmüş olmasına rağmen Schreiner (1987b), bunun sadece yukarıdaki deney şartlarını sağlayan zeminlerde geçerli olabileceğini savunmuştur.

Ladd ve Lambe (1961), başlangıç su içeriğinin ve plastisite indeksinin şişme yüzdesine etkisini araştırmak amacıyla laboratuvarında kompaksiyon yoluyla hazırladıkları killi zemin numunelerine 10 kPa sürşarj yükü uygulayarak ödometre deneyleri yapmışlardır. Deneylerde kullanılan numuneler kurudan ıslağa kadar değişen başlangıç su içeriği oranlarına sahip olup deney sonucunda bütün numunelerde tam doymunluk elde edilmiştir. Başlangıçta ıslak, kuru ve nemli olan numuneler için elde edilen değerler ile PI ve yüzde olarak bulunan şişme değerleri arasında eğriler çizilmiş, korelasyonlar bulunmuştur.

Nayak ve Christensen (1971), plastisite indeksi, kil fraksiyonu ve arazideki su içeriğinin şişme yüzdesiyle ilişkisini gösteren bir bağıntı geliştirmek amacıyla, Seed vd. (1962) tarafından elde edilen verileri kullanarak yaptıkları çalışmalarda, aynı şartlarda sıkıştırılan numunelere aynı deneyleri uygulamışlar ve korelasyon analizleri sonucunda aşağıdaki eşitliği bulmuşlardır.

$$S_p = (0.00229 \times PI) \times (1.45 \times C) / (W_o + 6.38) \quad (2.21)$$

Bu eşitlikte;

S_p : şişme yüzdesi (%),

PI : plastisite indeksi,

C : kil yüzdesi ve

W_o : başlangıçtaki su içeriğidir.

Bu denklem *Van't Hoff Eşitliği*'nden çıkartılmış olup elde edilen korelasyon bağıntısının teorik şişme mekanizmasıyla doğrudan ilişkili olduğu ve Seed vd. (1962) tarafından verilen sonuçlarla da uyum gösterdiği ifade edilmiştir.

Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973), likit limit, su içeriği ve arazi nem oranının şişme yüzdesine etkisini araştırmak amacıyla, örselenmemiş ve laboratuvarında sıkıştırılarak hazırlanmış olmak üzere iki ayrı zemin numunesi kullanmışlardır. Numuneler sabit hacimli şişme basıncı deneylerine tabi tutulmuş ve deney sırasında arazideki su içeriğinden başlayarak tam doygunluk sağlanmış, ayrıca 10 kPa'dan sonra yük boşaltması yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda şişme yüzdesi, likit limit ve başlangıç su içeriği arasında aşağıdaki ampirik bağıntı bulunmuş ve deney şartlarının, gerilme durumu ve doygunluk açısından arazi şartlarını tam olarak temsil etmediği ifade edilmiştir.

$$\text{Log } S_p = \frac{1}{12} \times (0.44 \times LL - W_o + 5.5) \quad (2.22)$$

Şişme yüzdesi ve şişme basıncının daha önceden belirlenmesi amacıyla yapılan laboratuvar deneylerinde genellikle izotropik gerilme şartlarının dikkate alındığı gözlenmiştir. Burada

yapılan çalışmada izotropik olmayan gerilme şartlarında killi zeminlerin şişme davranışlarının belirlenmesi amacıyla numunelere sukunetteki toprak basıncı katsayısı değeri kadar bir oranda izotropik olmayan gerilme uygulanmıştır. Belirlenmesi gereken K_0 katsayısının ve bunu etkileyen faktörlerin araştırılması konusunda yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

2.5 Boşluk Suyu-Emme Oranı ve Şişme Özelliği Arasındaki İlişki

Smith ve Arulanandan (1981) ile Sridharan ve Rao (1973) değişik dielektrik sabitleri ve boşluk suyunun şişme özelliklerine etkilerini inceledikleri çalışmalarında, boşluk suyunun killerin şişme davranışı üzerindeki önemini ve dielektrik sabitindeki azalmayla şişmenin de azaldığını göstermişlerdir. Daha sonra bazı araştırmacılarca yapılan çalışmalarda, azalan dielektrik sabitiyle efektif sürtünme açısının ve efektif kohezyonun arttığı ifade edilmiştir.

Zemin emmesi veya negatif boşluk suyu basıncı, kısmen doygun zeminlerin mekanik özelliklerinin kontrol edilmesinde oldukça önemlidir. Son yıllarda, şişme potansiyelinin ve arazideki hacim değişikliklerinin belirlenmesi amacıyla zemin emmesine dayanan farklı metotlar geliştirilmiştir. Zemin emmesinin ölçümlerinde, ısıyla çalışan nem ölçme aletlerinin kullanılmasından sonra zemin emmesinin ölçülmesi rutin bir yöntem olmuştur. Kısa süren bu deneyler, ödometre deneyleri için gerekli olan pahalı ekipman ihtiyacını ortadan kaldırmıştır (Schreiner, 1987b; Dhowian vd., 1990).

Zemin emmesine göre şişmenin belirlendiği metotlarda şişme, bir hacim değişikliği parametresinden dolayı zemin emmesinde oluşan değişikliğe bağlanmıştır. Bu parametre zeminin doğal bir özelliği olup konsolidasyon yöntemi için sıkışma indeksi (C_c) ile uyumludur (Dhowian vd., 1990).

Emmedeki herhangi bir değişiklikten dolayı zemin profilinde oluşan kabarmanın belirlenmesi amacıyla Aitchison (1973) tarafından aşağıdaki eşitlik vermiştir.

$$\Delta H = \frac{\partial e}{\partial \log \psi} \times H \times \log \psi \quad (2.23)$$

Burada incelenen zemin tabakasının kabarması ΔH , zemindeki düşey deformasyon ϵ , zemin emmesindeki değişiklik $\partial \log \psi$ ve kabaran tabaka kalınlığı H ile gösterilirken, $\frac{\partial \epsilon}{\partial \log \psi}$ terimi zemin emmesiyle değişen düşey kabarmaya bağlı *stabilitesizlik indeksi* olarak tanımlanmıştır.

Laboratuvar deneyleri yardımıyla bu parametrelerin zor ölçüldüğü, fakat problemin söz konusu olduğu arazideki zemin şartlarının sağlanması için Richard vd. (1983) tarafından verilen şişme-rötre deneyleri ile yaklaşık bir değer elde edilebileceği ifade edilmiştir.

Snethen ve Johnson (1977), laboratuvarlarda örselenmemiş zemin numunesinin spesifik hacminin ölçülmesiyle belirlenen ve farklı su muhtevalarından bağımsız olarak zemin emmesinin yerini tutan C_ψ emme indeksini tanımlamışlardır. Bu metotla şişme değeri aşağıdaki eşitlikle bulunabilir.

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{C_\psi}{1 + e_0} \times \log \frac{\psi_i}{\psi_f + \alpha \times \sigma_v} \quad (2.24)$$

Burada başlangıç ve nihai zemin emmeleri ψ_i ve ψ_f , düşey gerilme σ_v ve başlangıç oranı da e_0 ile gösterilmiştir. Zemin emmesine göre boşluk oranının değişim miktarını yansıtan emme indeksi, aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$C_\psi = \frac{\alpha \times G_s}{100 \times B} \quad (2.25)$$

Bu eşitlikte;

α : hacim sıkışabilirlik faktörü,

B : su içeriği eğrisine karşı gelen logaritmik emme eğimi ve

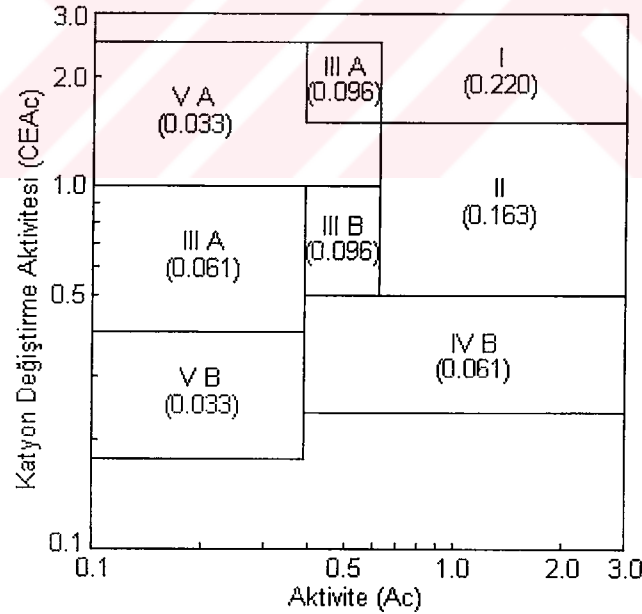
G_s : Dane birim hacim ağırlığıdır.

Laboratuvar verilerinin olmaması halinde sıkışabilirlik faktörü, plastisite indeksine bağlı olarak belirlenebilir (Snethen ve Johnson, 1977).

$$\begin{aligned} \text{PI} > 5 & \quad \alpha = 0 \\ \text{PI} > 40 & \quad \alpha = 1 \\ 5 < \text{PI} < 40 & \quad \alpha = 0.0275 \times \text{PI} - 0.125 \end{aligned}$$

Profildeki her bir tabaka için beklenen hacim değişiklikleri ayrı ayrı tanımlanmış ve bu değerler toplanarak toplam yüzey hareketi belirlenmiştir. Bu metotta α ve β değerlerinin belirlenebilmesi için farklı su muhtevalarındaki örselenmemiş zemin numunelerinin kuru birim hacim ağırlıkları ile zemin emmesinin ölçülmesi gerektiği belirtilmiştir. (2.25) eşitliğindeki ψ_f değerinin, aktif zon içindeki nihai emme profiline bağlı olarak değiştiği kabul edilmiştir.

Mc Keen (1981), C_ψ (emme indeksi) değerinin bulunabilmesi için aktiviteye (A_c) ve katyon değiştirme aktivitesine (CEA_c) bağlı olan alternatif bir yöntem geliştirmiştir (Şekil 2.21). CEA_c değeri (2.26) eşitliğinden bulunmuştur.



Şekil 2.21 Şişme indeksinin önceden belirlenebilmesini sağlayan kart (Dhowian vd., 1990).

$$CEA_c = \frac{CEC}{\%Kil} \quad (2.26)$$

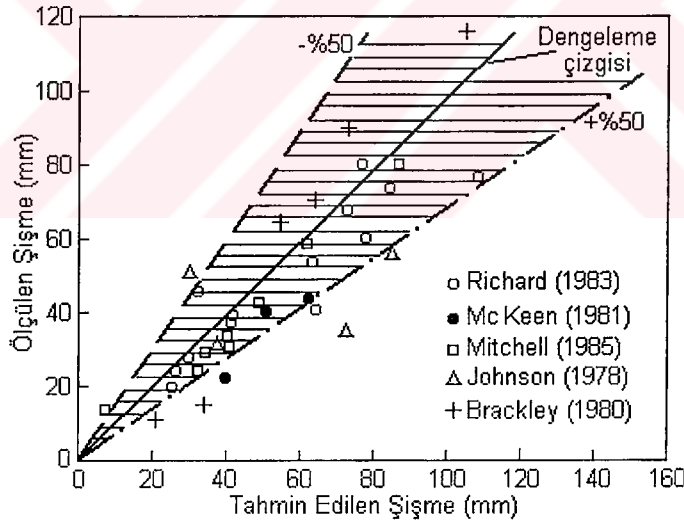
CEC zeminin katyon değiştirme kapasitesi olup, karttaki emme indeksi değerleri %100 kil ihtiva eden zeminler için verilmiştir (Dhowian vd., 1990).

Snethen ve Johnson (1977) metodunun bir benzeri, Mitchell ve Avalle (1985) ile Hamberg ve Nelson (1985) tarafından tanımlanmıştır. Brackley (1980), emme indeksinin (2.27) eşitliği ve şişme yüzdesinin ise (2.28) eşitliği ile bulunabileceğini ifade etmiştir. (2.28) eşitliğindeki ψ_i başlangıçtaki zemin emmesi, σ_v ise dūřey gerilmedir.

$$C_\psi = \frac{PI - 10}{10} \quad (2.27)$$

$$\frac{\Delta H}{H} = C_\psi \times \log \frac{\psi_i}{\sigma_v} \quad (2.28)$$

Ölçülen şişme değerleri ve zemin emmesi metodlarına dayanarak önceden belirlenen değerler arasında karşılaştırma yapılmış ve şekil 2.22’de grafik olarak verilmiştir.



şekil 2.22 Zemin emmesi metodlarına dayanarak önceden belirlenen değerler ve ölçülen şişme değerleri arasında karşılaştırma (Dhowian vd., 1990).

Erol (1990), *saykrometre yöntemi* yardımıyla emme basıncını ölçmek, ölçülen değerlerden kabarma miktarını belirlemek ve bu yöntemi standart ödometre tekniğiyle karşılaştırmak amacıyla yüksek şişme potansiyeline sahip killi şeyler kullanmış, sıkıştırılmış ve

örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde ödometre deneyleri ve emme basıncı ölçümleri yapmıştır. Toplam emme basıncı, saykrometre tekniği yardımıyla zemin boşluk suyunun kapalı bir ortamda denge durumundaki izafi nem oranından bulunmuştur. Toplam emme basıncı ve ölçülen izafi nem oranı arasındaki ilişki, aşağıdaki *Kelvin denklemi* kullanılarak elde edilmiştir.

$$\psi = \frac{R \times T}{V} \times \ln \frac{P}{P_0} \quad (2.29)$$

Burada toplam emme basıncı ψ , universal gaz sabiti R, mutlak sıcaklık T, özgül su hacmi V ve izafi nem oranı ise P/P_0 ile gösterilmiştir.

Ölçülen emme basınçlarından, şişme miktarının basit bir şekilde belirlenebildiği, uygulanabilir bir teknik olduğu ve değişik su içeriklerinden ortaya çıkabilecek kabarma miktarlarının da hesaplanabileceği ifade edilmiştir.

Bunun yanında, ödometre deneyindeki gibi standart şekil ve ebatlarda zemin numunelerine ihtiyaç duyulmadığından, kabaran zeminlerde olduğu gibi örnek alma ve hazırlama güçlükleriyle karşılaşılması belirtilmiştir.

Yapılan deneylerden, emme basıncı yöntemiyle ve ödometre metoduyla belirlenen şişme değerleri arasında bir fark olmadığı ortaya çıkarılmasına rağmen deneylerde emme basıncı yönteminin, rötre limiti ve plastik limit arasındaki sınırlı bir su içeriğinde geçerli olduğu ifade edilmiştir.

2.5.1 Şişmenin tahmini için geliştirilen diğer ampirik metotlar

Dhowian vd. (1990) tarafından şişmenin daha önceden belirlenmesiyle ilgili literatürdeki bazı ampirik özetlenmiştir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 Şişmenin önceden belirlenmesi için gerekli ampirik metotlar (Dhowian vd., 1990).

Bağıntı	Referans
$S_p = 0.00216 \times PI^{2.44}$	Seed vd. (1962)
$\Delta H = F \times e^{-0.377 D} \times (e^{-0.377 H} - 1)$	Van der Merwe (1964)
$\log S_p = 0.0526 \times \gamma_d + 0.033 \times LL - 6.8$	Vijayvergiya ve Sullivan (1973)
$\log S_p = 0.9 \times (PI/W_o) - 1.19$	Schneider ve Poor (1974)
$S_p = 23.82 + 0.7346 \times PI - 0.1458 \times H - 1.7 \times W_o + 0.00225 \times PI \times W_o - 0.0088 \times PI \times H \quad (PI > 40)$	Johnson (1978)
$S_p = -9.18 + 1.5546 \times PI + 0.08424 \times H + 0.1 \times W_o - 0.0432 \times PI \times W_o - 0.0215 \times PI \times H \quad (PI < 0)$	Johnson (1978)
$S_p = 0.00411 \times LL_w^{(4.17 \sigma_v - 3.86)} \times W_o^{-2.33}$	Weston (1980)
$Ps = 3.58 \times 10^{-2} \times PI^{1.12} \times C^2/W_o^2 + 3.79$	Nayak ve Christensen (1971)
$\log Ps = -2.132 + 0.0208 \times LL + 0.000665 \times \gamma_d - 0.0269 \times W_o$	Komornik ve David (1969)

Bu eşitliklerde;

S_p : şişme yüzdesi (%),

PI : plastisite indeksi,

ΔH : toplam kabarma,

F : kabarma derecesi için düzeltme faktörü,

D : kabarmayan tabaka kalınlığı,

H : kabaran tabaka kalınlığı,

LL : likit limit,

W_o : başlangıçtaki su içeriği,

γ_d : kuru birim hacim ağırlık,

C : kil yüzdesi,

σ_v : sürşarj yükü,

LL_w : ağırlaştırılmış likit limit ve

Ps : şişme basıncıdır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 GİRİŞ

Şişme olayının, belirli bir düzeyde montmorillonit gibi aktif kil minerali içeren zeminler üzerinde inşa edilen yapılar veya bu tip killerle inşa edilecek dolgu ve barajlar açısından oldukça önemli bir problemler doğurduğu bilinmektedir.

Şişme sonucunda üst yapıda oluşabilecek zararların azaltılması veya ortadan kaldırılabilmesi için üzerinde veya kendisi ile yapı inşa edilen kohezyonlu zeminlerin şişme karakteristikleri ve bunu etkileyen çevresel faktörler yeterince bilinmelidir.

Deneylerde fiziksel ve endeks özellikleri belirlenirken; şişme ve sıkışma deneyleri ödometrelerde yapılmıştır. Bu çalışmada, şişme potansiyeli oldukça yüksek olan Lüleburgaz-Babaeski kili ve bu kilin içinde bulunduğu karışımların yol dolgusundaki davranışı incelendiği için laboratuvar ve deney koşulları buna göre belirlenmiştir.

Bu bölümde, üzerinde çalışılan zemin örneğinin endeks ve fiziksel özellikleri, mineralojik yapısı ve deney programı hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca deney verilerini baz alarak örnek zemin ile inşa edilen bir yol dolgusu da modellenmiştir. Bilgisayar modellemesinde *ANSYS Sonlu Elemanlar Programı* kullanılmıştır. Dolgu ve üstyapı çalışması hakkında detaylı bilgi 4. Bölüm’de verilmiştir.

3.2 Seçilen Örneğin Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan örnek; Kınalı-Edirne Otoyolu Lüleburgaz civarında dolgu malzemesi olarak kullanılan Babaeski yeşil kilidir. Lüleburgaz-Babaeski civarında kullanılan yol dolgusunun ariyet sahasından alınmıştır. Selçuk Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı’na örselenmiş örnek olarak getirilmiştir. Örnek açık yeşil olup kuruyunca gri, açık yeşil renge dönüşmektedir. Fisürlü bir yapıya sahip ve aşırı konsolide olmuş görünmektedir. Örnek, deneylere hazırlanmak üzere içinde bulunan az miktardaki küçük ve büyük kireç taşları ayıklanmış ve öncelikle havada, sonra etüvde kurutulmuştur. Kompaksiyon deneylerini yapmak ve ödometre numunelerini hazırlamak üzere öğütülüp

944 cm³'lük kalıplara değişik su içeriklerinde Standart ve Modifiye Proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır.

Örneğe ait fiziksel ve endeks özellikleri, aşağıdaki bölümde verilmiştir.

3.3 Deneysel Çalışmalar

Bu araştırmada kullanılmak üzere Lüleburgaz-Babaeski'den getirilen zemin örneğinin fiziksel ve endeks özelliklerini belirlemek üzere likit limit, plastik limit, lineer rötre limiti, dane birim hacim ağırlığı, Standart ve Modifiye Proktor kuru birim hacim ağırlıkları ve zemin sınıflandırması aşağıda verilmiştir (Çizelge 3.1).

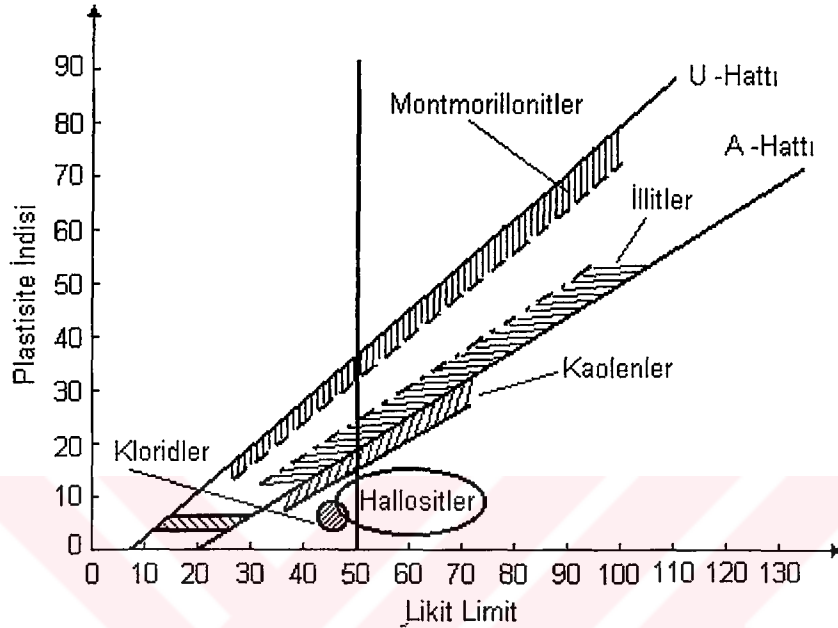
Çizelge 3.1 Babaeski kilinin fiziksel ve endeks özellikleri.

Fiziksel ve endeks özellikler	Değerler
Likit limit (%)	116
Plastik limit (%)	36
Lineer rötre limiti (%)	22
Çakıl (%)	-
Kum (%)	4
Silt-kil (%)	96
Renk	Yeşil
Zemin cinsi	CH
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (Standart Proktor) (kN/m ³)	12.5
Optimum su içeriği (Standart Proktor) (%)	30
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (Modifiye Proktor) (kN/m ³)	15.2
Optimum su içeriği (Modifiye Proktor) (%)	25
Dane birim hacim ağırlığı (kN/m ³)	26.78
Dane özgül ağırlığı	2.73

Kil mineralojisi hakkında bilgi edinmek amacıyla Şekil 3.1'deki *Casagrande Plastisite Kartı*'na yerleştirilen örneğin mineralojik yapısının çoğunlukla montmorillonitten oluştuğu görülmüştür.

İllit ve kaolen mineralleri çok az olup klorid ve hallosit mineralleri yok gibidir. Bunlar, 1948'de Casagrande tarafından geliştirilmiş olan *Mineral Belirleme Tekniği* ile tespit

edilmiştir (Mitchell, 1976). Bu yöntem basit olmakla birlikte bilgilerin mühendislik açısından değerlendirileceği düşünüldüğünde oldukça gelişmiş sistemler olan X- Işını Difraksiyonu ve DTA (Diferansiyel Termal Analiz) gibi çalışmalara oldukça yakın değerler vermektedir (Holtz ve Kovacs, 1981).



Şekil 3.1 Casagrande kartında, bilinen kil minerallerinin yerleşimi (Casagrande tarafından geliştirildi, 1948; içindeki bilgiler Mitchell, 1976).

3.4 Ödometre Deneyleri

Ödometre deneyi, killi zeminlerin şişme basıncının ve şişme yüzdesinin belirlenmesinde en çok ve yaygın kullanılan deneydir.

Bu çalışmadaki laboratuvar deneylerinin özünü ödometre deneyleri oluşturmaktadır. İncelenen zemin iki ayrı enerjide, Standart ve Modifiye Proktor olarak 944 cm³'lük kalıba konularak sıkıştırılmış ve değişik düşey yükler altında konsolidasyona tabi tutularak şişme ve sıkışma hareketleri gözlenmiştir.

Bu çalışmada temel amaç, ıslanma durumunda şişme veya göçme gösteren yol dolgularında oluşan aşırı kabarma ve göçmelerin oluşumunu, bilgisayarda gerçeğe yakın bir şekilde

modelleyebilmek ve bunların neden olduğu zararları ve özellikle üstyapıda oluşmaları değerlendirebilmektir..

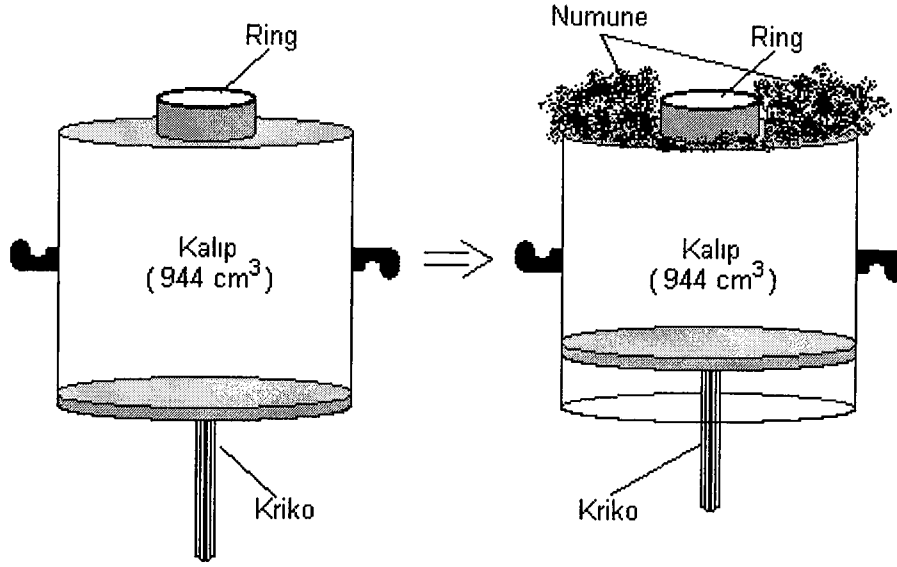
Bilgisayarda *Sonlu Elemanlar*la yapılacak modele data oluşturmak amacıyla bir dizi ödometre deneyleri yapılmıştır. Deneyler *Standart Proktor* ve *Modifiye Proktor* olmak üzere iki ayrı grupta yapılmıştır. Ayrıca her grup değişik su içeriklerinde sıkıştırılarak farklı düşey basınçlarla yüklenmişlerdir. Deney adımları aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.

3.5 Örneklerin Hazırlanması

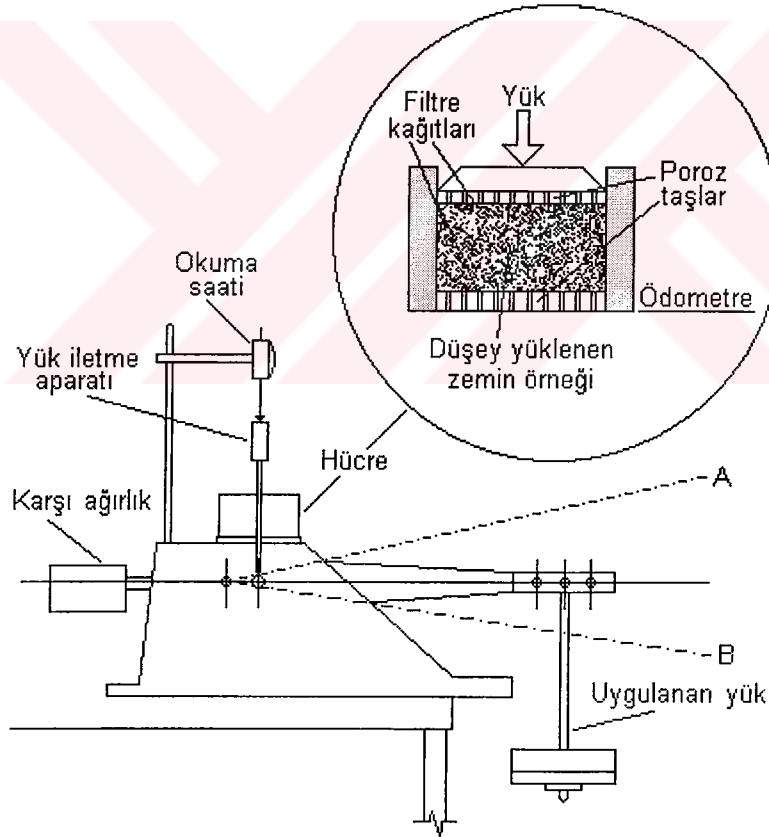
Örselenmiş olarak laboratuvara getirilen Babaeski kili öncelikle büyük kesekler halinde iken 105 °C’de etüvde kurutularak kaba olarak öğütülmüştür. Daha sonra içindeki kireçtaşı kumlar iyice ayıklandıktan sonra tekrar ince öğütme yapılmıştır. Öğütülen ince malzeme 40 no’lu elekten geçirildikten sonra eleğin üstünde kalanlar tekrar öğütülüp 40 no’lu elekten geçecek hale getirilmiştir. Elekten geçirmenin amacı, kompaksiyon işlemi ile birlikte zemine su ilave edilirken oluşan topaklanmaları önlemek ve homojen su içeriğine sahip zemin örneği elde etmektir. Ayrıca bunu sağlamak için zemine ilave edilen su, pulverize su damlacıkları halinde uygulanmıştır. Zemine ilave edilecek su miktarı optimum su içeriğinin (ω_{opt}) ya %5 altında ($\omega_{opt}-\%5$), ya %5 üstünde ($\omega_{opt}+\%5$), yada optimum su içeriği (ω_{opt}) civarlarında olmuştur. 944 cm³’lük kalıplara sıkıştırılan örnekler krikolar yardımıyla, örselenmeyi de en aza indirecek biçimde Şekil 3.2’deki gibi prinçten yapılmış 5 cm çapında ve 2 cm yüksekliğindeki halkalara yerleştirilmiştir. .

Ayrıca örnek hazırlama sürecini kısaltmak ve su içeriklerinin daha iyi korunmasını sağlamak amacıyla fazla zemin miktarı ve iki takım kompaksiyon kalıbı ile çalışılmıştır. İlk hazırlanan örnekler yükleme ünitesine konuluncaya kadar desikatörlerde saklanmıştır. Deneylerde şehir suyu kullanılmıştır.

Düşük su içeriğine sahip örnekler hazırlanırken oldukça zorluk çekilmiştir. Örnekte ufalanmalar olmuştur. Ayrıca yüksek su içerikli numuneler hazırlanırken de (özellikle Modifiye Proktorda) örneği kalıptan ayırmanın çok zor olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.2 Kompaksiyon kalıbından örselenmeyi en aza indirecek biçimde halkaya zemin örneği alınması.



Şekil 3.3 Düşey basınç yükleme düzeneği ve hücre detayı.

Örnekler halkalar içine alınıp fazla kısımları kesilerek tamamen düzlendikten sonra alt ve üst kısımlarına filtre kağıtları konularak, düşey basınç ünitesinin hücresine (ödometre aleti)

poroz taşlarla birlikte yerleştirilmiştir. Şekil 3.3’de düşey basınç yükleme ünitesi ve hücre detayları görülmektedir.

3.6 Ödometre Yöntemi ile Belirli Düşey Basınç Altında Islatma Deneyleri

Killi zeminlerin şişme basıncı ve miktarının belirlenmesinde ödometre deneyi en çok kullanılan yöntemdir.

Yurdumuzun Trakya Bölgesi’nin Lüleburgaz-Babaeski yöresinden getirilen yeşil Babaeski kili üzerinde bir dizi deneyler yapılmıştır. Farklı su içeriklerinde ve değişik yöntemlerle sıkıştırılan örnekler, değişik düşey basınçlar altında ıslanmaya tabi tutulmuştur.

Bir önceki bölümde anlatılan şekilde hazırlanan örnekler hücreye yerleştirildikten sonra daha önceden belirlenen miktarda (50, 100, 200, 400, 800, 1600 kPa) yüklenmiştir. İlk yapılan deneylerde şişme veya sıkışma hareketinin zeminin geçirimsizliğinin çok düşük olması nedeniyle 24 saatte tamamlanmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle ıslatma deneyleri 48 saatlik periyotlar halinde sürdürülmüştür.

Deneylerde üç ana değişken vardır. Bunlardan birincisi sıkıştırma enerjisidir. Yani *Standart ve Modifiye Proktor Sıkıştırma Tekniği*’dir. İkincisi, sıkıştırma su içeriğidir. Sıkıştırılan örnekler hem standart proktorda hem de modifiye proktorda su içeriği olarak optimum ve optimumun ± 5 değerlerinde sıkıştırılmışlardır. Böylelikle optimumun kuru ve ıslak tarafları hakkında bilgi edinilmiştir. Üçüncü değişken ise örneklerle uygulanan düşey basınçtır. Yol dolgusunun değişik katmanlarında oluşan düşey basınca eşdeğer olarak örneklerle 50 kPa’dan 1600 kPa’a kadar basınç uygulanmıştır.

Deneyde işlem sırası şu şekildedir. Daha önceden belirlenen su içeriğinde örnek Standart veya Modifiye Proktor olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan örnek, yükleme hücresine konulabilmesi için 5 cm çapında ve 2 cm yüksekliğinde halkalara sokulduktan sonra ödometre hücresi uygun şekilde yerleştirilip yükleme ünitesine konulmuştur. Saatler kalibre edilmiş ve yine daha önceden belirli basıncı elde edebilmek için gerekli ağırlıklar yükleme koluna yerleştirilir ve deney başlatılmıştır. Deney başladıktan yaklaşık 1-2 dakika

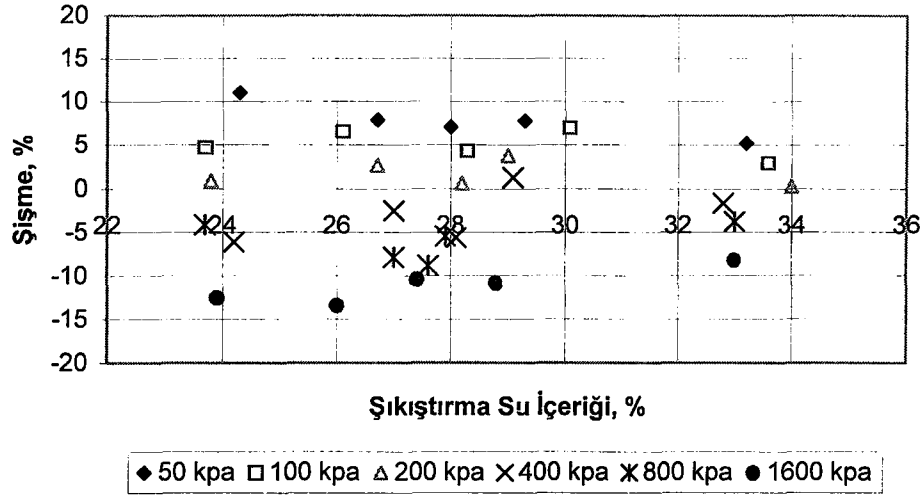
sonra hücre su ile doldurularak örneğin ıslatılmasıyla; şişmeye veya oturmaya bırakılmıştır. 48 saat sonra örnek nihai duruma ulaştıktan sonra şişme veya sıkışma miktarı belirlenmiş ve ödometre boşaltılıp örnek tartıldıktan sonra gerekli hesaplamalar için etüve bırakılarak kurutulmuştur.

Deneyin bu şekilde yapılmasının amacı, inşa edilen yol dolgularının ıslanmasının aynı şekilde gerçekleşmiş olması ve dolgu içindeki zemin davranışının modellenmesinde gerçekçi varsayımlarda bulunmak gerekliliğidir. Şişen zeminlerin şişme anındaki karşılaştığı sınır şartlarının şişme basıncı ve şişme miktarını etkileyen önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. (Srinidharan, Sivapulliah, 1986)

Ayrıca bu deneylerin amacı, şişen zeminlerle inşa edilen yol dolgularının nümerik analizini yaparken oluşturulacak olan dolgu modelinin malzeme parametrelerine veri sağlamaktır. Aşağıda Standart Proctor deneylerine ait sonuçlar Çizelge 3.2’de verilmiş ve Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Bu deneylere ait föy, hesap ve grafikler Ekler kısmında detaylı olarak sunulmuştur. Modifiye Proctor deneylerine ait sonuçlar ise Çizelge 3.3’de verilmiş ve Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Şekillerdeki ve çizelgelerdeki negatif şişme, sıkışmayı ifade etmektedir.

Çizelge 3.2 Standart Proctor Deney Sonuçları

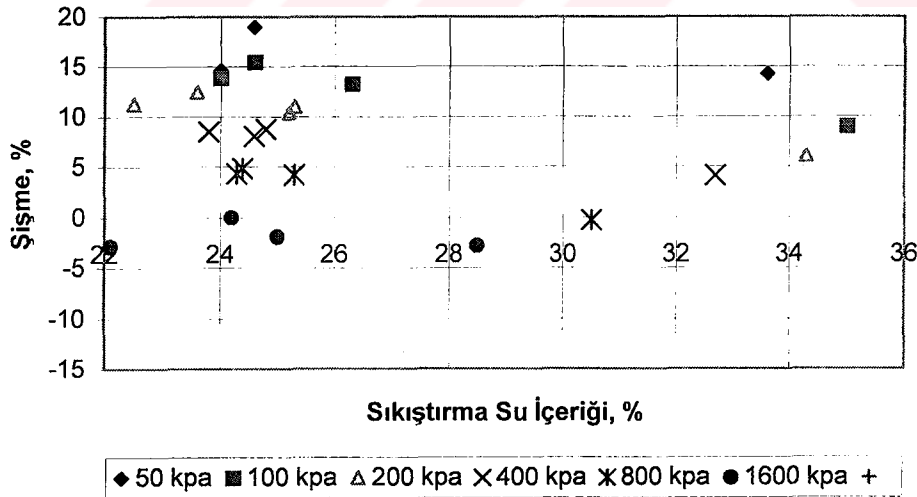
50 kpa		100 kpa		200 kpa		400 kpa		800 kpa		1600 kpa	
W (%)	Şişme (%)	w (%)	Şişme (%)	w (%)	Şişme (%)	w (%)	Şişme (%)	w (%)	Şişme (%)	w (%)	Şişme (%)
33,2	5,25	33,6	2,9	34	0,29	32,8	-1,65	33	-3,8	33	-8,15
29,3	7,85	30,1	6,95	29	3,8	29,1	1,3	27,9	-5,45	28,8	-10,8
28	7,05	28,3	4,3	28,2	0,62	28,1	-5,6	27,6	-8,85	27,4	-10,4
26,7	7,9	26,1	6,5	26,7	2,65	27	-2,5	27	-7,9	26	-13,4
24,3	11,05	23,7	4,65	23,8	0,91	24,2	-6,15	23,7	-4,15	23,9	-12,5



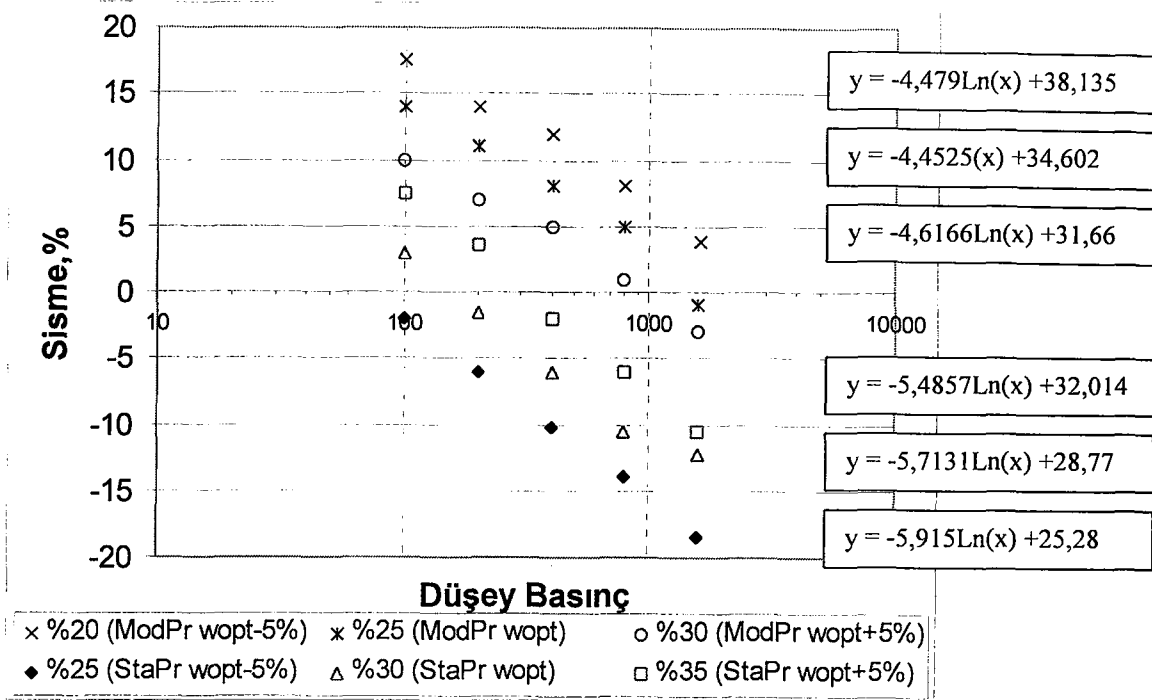
Şekil 3.4 Standart Proctor Deney Sonuçları

Çizelge 3.3 Modifiye Proctor Deney Sonuçları

50 kpa		100 kpa		200 kpa		400 kpa		800 kpa		1600 kpa	
W (%)	Şişme (%)	w (%)	Şişme (%)	w (%)	Şişme (%)	w (%)	Şişme (%)	w (%)	Şişme (%)	w (%)	Şişme (%)
33,6	5,25	33,6	8,95	34,3	6,075	32,7	4,1	30,5	-0,25	28,5	-2,75
0	7,85	30,1	13,25	25,2	10,35	24,6	8,05	24,3	4,35	22,1	-2,85
24,6	7,05	28,3	15,5	23,6	12,5	24,8	8,75	25,3	4,25	25	-1,85
24	7,9	26,1	13,9	25,3	11	23,8	8,55	24,4	4,9	24,2	0,025
0	11,05	23,7	12,8	22,5	11,25	21,4	9,8	21,8	3,9	21,9	1,2



Şekil 3.5 Modifiye Proctor Deney Sonuçları



Şekil 3.6 Modifiye ve Standart Proctor Deney Sonuçları Düşey Basınç – Şişme İlişkileri

3.7 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çizelge 3.2, 3.3 ve Şekil 3.4, 3.5, 3.6 incelendiğinde hem Modifiye hem de Standart Proctor deneylerinde düşey basınçlar arttıkça şişme yüzdelерinin azaldığı ve büyük düşey basınçlarda oturma olduğu görülmektedir. Dolgulara üst katmanlardan aşağıya inildikçe düşey basıncın büyüdüğü düşülmürse; şişmeye en çok katkıda bulunacak katmanların üst katmanlar olduğu söylenebilir. Dolayısıyla sadece üst katmanlarda yapılacak iyileştirme veya zemin değişimi şişme miktarlarında önemli azalmalara neden olacaktır. Bu teknik, suyun şişme potansiyeli yüksek zeminle tanışmaması için bir yalıtım tabakası olarak da görev yapması açısından ayrıca önemlidir.

Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5’de Modifiye ve Standart Proctor deneylere ait şişme yüzdeleri ve şişme basınçları verilmiştir. Bu çizelgeler incelendiğinde su içeriği azaldıkça şişme yüzdesi ve basınçlarının her ikisinde arttığı görülmektedir. Buna göre şişme potansiyelini düşürmek ve şişme basıncını azaltmak için şişen killeri düşük enerjide ve yüksek su içeriğinde sıkıştırılması gerektiği açıktır. Standart Proctor enerjisinde ve ıslak tarafta (OSİ

+ %5) sıkıştırılan örneklerde şişmenin en az olacağı görülmektedir. Bu şartlar sağlanırken mukavemet ve sıkışma (oturma) kriterlerinin sağlandığı kabul edilmektedir.

Çizelge 3.4 Standart Proctor Deneylerinde Sıkıştırma Su İçeriğinin Şişme Özelliklerine Etkisi

	Sıkıştırma Su İçeriği		
	(wopt-%5)	(wopt)	(wopt+%5)
Şişme , %	22	18	14
Şişme Bas. kPa	340	150	70

Çizelge 3.5 Modifiye Proctor Deneylerinde Sıkıştırma Su İçeriğinin Şişme Özelliklerine Etkisi

	Sıkıştırma Su İçeriği		
	(wopt-%5)	(wopt)	(wopt+%5)
Şişme , %	38	26	23
Şişme Bas. kPa	4950	2350	950

Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5’de Modifiye ve Standart Proctor deneylere ait şişme yüzdeleri ve şişme basınçları laboratuvar deney verileri olup arazi ölçüm verilerinden daha yüksek olduğu kabul edilmektedir. Örselenmiş zeminlerin arazidekine oranla aynı şartlarda laboratuvar da daha fazla şiştiği ve daha büyük şişme basıncına sahip olduğu bilinmektedir. (El Sohby ve Elleboudy;1993)

Bazı şartname ve yönetmeliklerde sadece kuru birim hacim ağırlığına bağlı rölatif kompaksiyon uygulamasının; şişen zeminlerle inşa edilen dolgularda ne kadar eksik bir tarifleme olduğu açıktır. Kuru birim hacim ağırlığına ulaşmak için yüklenici kişilerin az su verme ve çok sıkıştırma eğiliminde olmaları söz konusudur. Bu durum, şişen zeminin şişme potansiyelini ve şişme basıncını kat kat artıracaktır. Böylece şartname ve yönetmeliğe uygun sıkıştırma elde edilmesine karşın fazla enerji ve az su ile sıkıştırılan kilin su ile tanıştığında çok fazla şişme yapacağı açıktır. Rölatif kompaksiyon belirlenirken sıkıştırma tekniği (enerjisi) ve su içeriği (optimuma göre konumu) belirlenmelidir. Aksi halde mukavemet ve sıkışma kriterlerini iyileştirirken şişmede tehlikeli boyutlara ulaşmak söz konusudur. Kınalı-Edirne Otoyolunda bu yanlışlık görülmüştür (TRL,1995).

Ayrıca kil veya killi zeminlerle inşa edilecek dolgularda zemin sınıflandırması, endeks özellikleri, kuru birim hacim ağırlığı gibi kriterlerin yanında şişme kriterleri de sıkıştırma su içeriği, sıkıştırma enerjisi ve kuru birim hacim ağırlığına bağlı olarak ayrıca araştırılmalıdır. Bu durum şartname ve yönetliklerde açıkça belirlenmelidir.

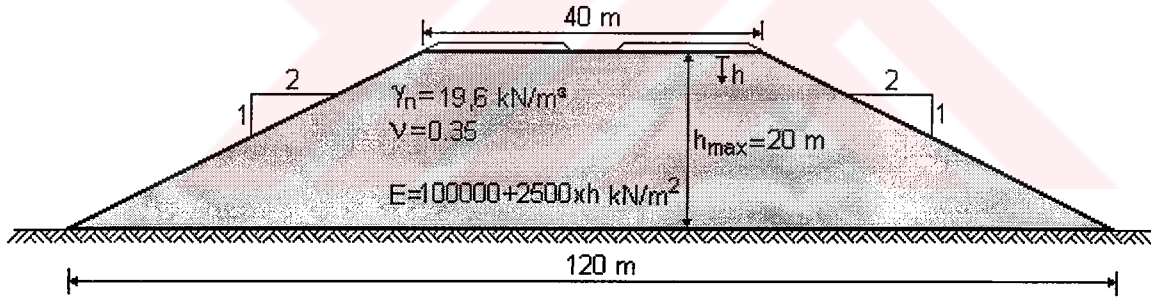


4. NUMERİK MODELLEME

4.1 GİRİŞ

Bu çalışmanın ikinci ana kısmını numerik modelleme çalışması oluşturmaktadır. Bu kısmın amacı; malzeme ve şişme özellikleri bilinen killeri inşa edilen dolguların ıslanma sonucu oluşan tüm gerilme ve birim şekil değiştirmelerinin teorik bir modelde izlenmesini ve aşırı deformasyon sonucu üstyapıda ve dolguda oluşan çatlakların; bölge, yoğunluk, derinlik ve gelişim özelliklerini tahmin ederek, büyük maddi kayıplara neden olan otoyol hasarlarını en aza indirecek koşulların saptanmasına yardımcı olmaktır.

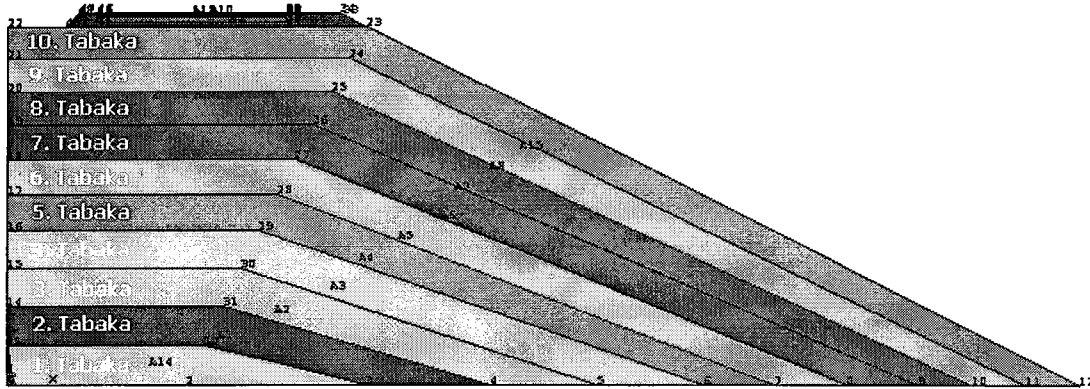
Bilgisayar çalışmasının temeli olan yazılım, ANSYS olarak bilinen ABD menşeli bir *Sonlu Elemanlar Programı*dır. Çalışmaya esas olan model dolgu ve üstyapının geometri ve özellikleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Şekildeki yol üstyapısının herbiri 1 metre iç banket, üç adet 3,5 metrelik 1.,2.,3. şeritler ve 3 metrelik acil park şeridi olmak üzere toplam 14,5 metre genişliğinde iki taşıma yolundan oluşmaktadır.



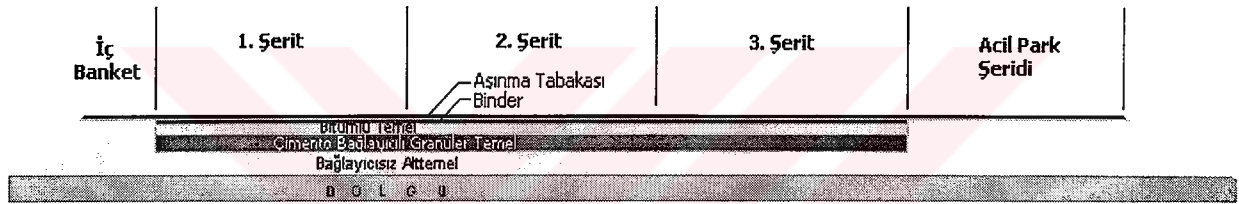
Şekil 4.1 Modellemesi yapılan kil zemin dolgusunun geometrisi ve özellikleri.

Dolguda simetri söz konusu olduğu için bilgisayarda çözüm zamanını kısaltmak ve fazla hafıza ihtiyacını azaltmak amacıyla sistem yarı olarak oluşturulmuş ve mesnet şartları buna göre belirlenmiştir (Şekil 4.2 ve 4.3). Dolgu düşey gerilmeler baz alınarak 10 ayrı tabakaya ayrılmıştır. Böylece düşey basıncın bir fonksiyonu olan şişme ve sıkışma hareketi, her tabaka için ayrı ayrı belirlenerek hassas bir şekilde temsil edilmiştir. Üstyapı ise arazide inşa olduğu gibi beş farklı tabakadan oluşmaktadır. İki ayrı sıkıştırma enerjisi, üç değişik sıkıştırma su içeriği ve beş farklı yükleme koşulunun kombinasyon durumlarında 30 ayrı

model analizi yapılmıştır. Ayrıca yüksüz (ıslanma olmaksızın), sadece üstyapı ve dolgu ağırlıkları ile yapılan analiz ile birlikte toplam 31 analiz yapılmıştır.



Şekil 4.2 Üstyapı ve Dolgu Tabakaları



Şekil 4.3 Üstyapı Tabakaları

4.2 Gerilme – Şekil Değiştirme İlişkisi

Bu bölümde modellemelerde lineer analiz yapıldığı için lineer malzemelerin Gerilme-Şekil Değiştirme ilişkisi anlatılmıştır. Bu ilişki aşağıdaki;

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon^{el}\} \quad (4.1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada;

$$\{\sigma\} : \text{Gerilme vektörü} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yx}, \sigma_{xz}]^T$$

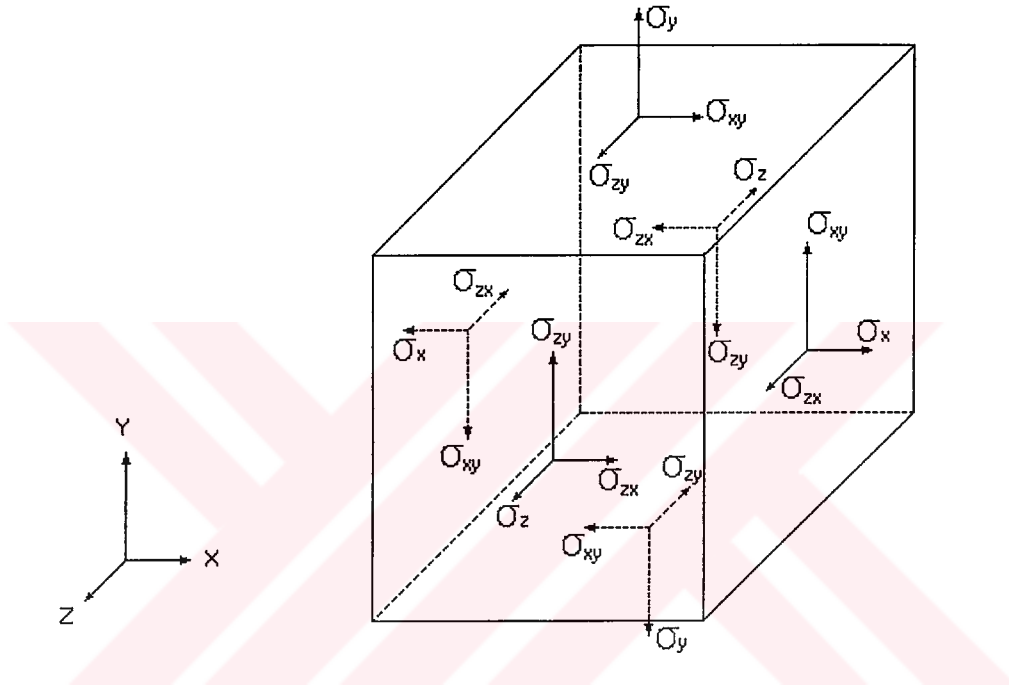
$[D]$: Elastisite matrisi

$$\{\epsilon^{el}\} : \{\epsilon\} - \{\epsilon^{th}\}$$

$$\{\epsilon\} : \text{Toplam şekil değiştirme vektörü} = [\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yx}, \epsilon_{xz}]^T$$

$\{\epsilon^{th}\}$: Isıl şekil değiştirme vektörü'nü ifade etmektedir.

Gerilme vektörü Şekil 4.4’de gösterildiği gibidir. Tüm ANSYS programında kullanılan işaret tanımlamaları; gerilme pozitif, basınç negatif şeklindedir. Bu tanımlama Zemin Mekaniği işaret tanımlamasının tersidir. Ancak ANSYS programı genel mühendislik amaçlı olduğun için bu şekilde programlanmıştır. Analiz sonuçları irdelenirken negatif değerler basınç bölgelerini; pozitif bölgeler ise çekme bölgelerini göstermektedir. Kayma deformasyonları tensör kayma deformasyonu değil, mühendislik (vektörel) deformasyondur.



Şekil 4.4 Gerilme vektörü tanımlaması

4.1 eşitliği aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir.

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon^{th}\} + [D]^{-1} \{\sigma\} \quad (4.2)$$

Üçboyutlu durum için ısıl deformasyon vektörü;

$$\{\epsilon^{th}\} = \Delta T [\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z, 0, 0, 0]^T \quad (4.3)$$

şeklindedir. Burada ;

α_x : x yönünde ısıl genleşme katsayısı

ΔT : $T - T_{ref}$

T : ilgili noktada son sıcaklık

T_{ref} : Gerilmeden bağımsız referans sıcaklığını ifade etmektedir.

$[D]^{-1}$; kolon-normalize formatında olduğunda,

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_x & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_x & -\nu_{zy}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

veya sıra-normalize formatında olduğunda;

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\bar{\nu}_{xy}/E_x & -\bar{\nu}_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\bar{\nu}_{yx}/E_x & 1/E_y & -\bar{\nu}_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\bar{\nu}_{zx}/E_x & -\bar{\nu}_{zy}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

şeklindedir. Burada belirtilen terimlerden;

E_x : x yönündeki elastisite modülü

ν_{xy} : küçük poisson oranı

$\bar{\nu}_{xy}$: büyük poisson oranı

G_{xy} : xy düzlemindeki kayma modülü'nü ifade etmektedir.

$[D]^{-1}$ matrisi pozitif olmalıdır. Ortotropik malzemelerde aşağıdaki eşitliklerin sağlanabilmesi için bu matrisin simetrik olduğu kabul edilir.

$$\frac{\nu_{yx}}{E_x} = \frac{\nu_{xy}}{E_y} \quad (4.6)$$

$$\frac{\nu_{zx}}{E_x} = \frac{\nu_{xz}}{E_z} \quad (4.7)$$

$$\frac{\nu_{zy}}{E_y} = \frac{\nu_{yz}}{E_z} \quad (4.9)$$

veya

$$\frac{\bar{\nu}_{yx}}{E_y} = \frac{\bar{\nu}_{xy}}{E_x} \quad (4.9)$$

$$\frac{\bar{\nu}_{zx}}{E_z} = \frac{\bar{\nu}_{xz}}{E_x} \quad (4.10)$$

$$\frac{\bar{\nu}_{zy}}{E_z} = \frac{\bar{\nu}_{yz}}{E_y} \quad (4.11)$$

Yukarıdaki ilişki nedeniyle ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{zx} , $\bar{\nu}_{yx}$, $\bar{\nu}_{yz}$, $\bar{\nu}_{zy}$ değerleri bağımsız ifadeler değildir. Bu nedenle de problemde bir veri oluşturmazlar.

Ortotropik malzemelerde poisson oranı kullanımı bazen karışıklığa neden olabilmektedir. Bu nedenle bu oranın kullanımında dikkatli olunmalıdır. Pratikte, ortotropik malzeme verileri $\bar{\nu}_{xy}$ veya büyük poisson oranı formatında verilir. $\bar{\nu}_{xy}$, büyük poisson oranını ifade etmektedir ve E_x değerinin E_y 'den büyük olduğu kabul edildiği için, ν_{xy} değerinden büyüktür.

Kolaylık olması için, bölümün ilerleyen kısımlarında ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{zx} kullanılacak; $\bar{\nu}_{xy}$, $\bar{\nu}_{xz}$, $\bar{\nu}_{zx}$ kullanılmayacaktır. İzotropik malzemelerde ise elastisite modülleri ve poisson oranları her yönde eşit kabul edildiği için hangi verinin olduğu önemli değildir. Ortotropik malzemelerde ise kullanıcı hangi tip verinin uygun olduğunu araştırmalıdır. 4.2 eşitliğini , 4.3, 4.4 ve 4.6'dan 4.8'e kadar olan eşitlikler yardımıyla açtığımızda aşağıdaki eşitlikleri elde ederiz.

$$\varepsilon_x = a_x \Delta T + \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{xy}\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{xz}\sigma_z}{E_z} \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_y = a_y \Delta T - \frac{\nu_{xy}\sigma_x}{E_y} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{yz}\sigma_z}{E_z} \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_z = a_z \Delta T - \frac{\nu_{xz}\sigma_x}{E_z} - \frac{\nu_{yz}\sigma_y}{E_z} + \frac{\sigma_z}{E_z} \quad (4.14)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G_{xy}} \quad (4.15)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G_{yz}} \quad (4.16)$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\sigma_{xz}}{G_{xz}} \quad (4.17)$$

Burada;

ε_x : x yönündeki birim deformasyon

ε_{xy} : xy yönündeki birim kayma deformasyonu

σ_x : x yönündeki gerilme

σ_{xy} : xy yönündeki kayma gerilmesi' ni ifade etmektedir.

Buna alternatif olarak 4.1 eşitliğini önce 4.4 eşitliği ile sonra sonucu 4.3 ve 4.6 – 4.8 'e olan eşitliklerle birleştirildiğinde altı açık denklem ortaya çıkar.

$$\sigma_x = \frac{E_x}{h} \left(1 - (\nu_{yz})^2 \frac{E_y}{E_z} \right) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_x}{h} \left(\nu_{xy} + \nu_{xz} \nu_{yz} \frac{E_y}{E_z} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_x}{h} (\nu_{xz} + \nu_{yz} \nu_{xy}) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (4.18)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{h} \left(\nu_{xy} + \nu_{xz} \nu_{yz} \frac{E_x}{E_z} \right) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} \left(1 - (\nu_{xz})^2 \frac{E_x}{E_z} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_y}{h} \left(\nu_{yz} + \nu_{xz} \nu_{xy} \frac{E_x}{E_y} \right) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (4.19)$$

$$\sigma_z = \frac{E_z}{h} (\nu_{xz} + \nu_{yz} \nu_{xy}) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_z}{h} \left(\nu_{yz} + \nu_{xz} \nu_{xy} \frac{E_x}{E_y} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h} \left(1 - (\nu_{xy})^2 \frac{E_x}{E_y} \right) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T) \quad (4.20)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy} \varepsilon_{xy} \quad (4.21)$$

$$\sigma_{yz} = G_{yz} \varepsilon_{yz} \quad (4.22)$$

$$\sigma_{xz} = G_{xz} \varepsilon_{xz} \quad (4.23)$$

burada;

$$h = 1 - (\nu_{xy})^2 \frac{E_x}{E_y} - (\nu_{yz})^2 \frac{E_y}{E_z} - (\nu_{xz})^2 \frac{E_x}{E_z} - 2 \nu_{xy} \nu_{yz} \nu_{xz} \frac{E_x}{E_z}$$

$$G_{xy} = \frac{E_x E_y}{E_x + E_y + 2 \nu_{xy} E_x} \quad (4.24)$$

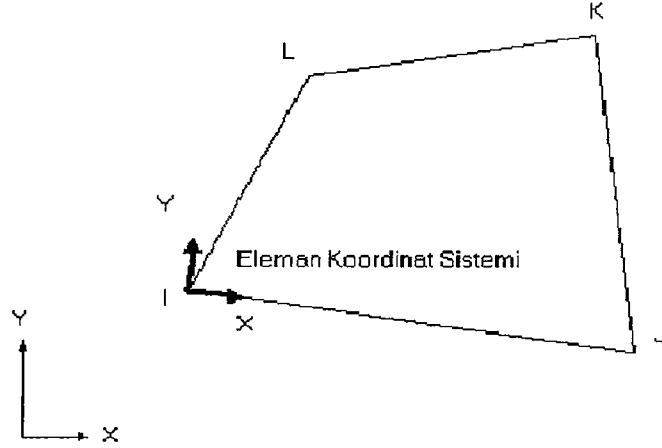
$$G_{yz} = G_{xy} \quad (4.25)$$

$$G_{xz} = G_{xy} \quad (4.26)$$

Eğer kayma modülleri özel olarak verilmezlerse, aşağıdaki gibi hesaplanırlar. Ortotropik malzemelerin kayma modülleri araştırılmalıdır. Yukarıdaki kayma modülleri izotropik malzemeler için geçerlidir.

[D] matrisi pozitif olmalıdır. ANSYS her malzeme parametresini [D] nin pozitif olmasını sağlamak için kontrol eder. Isıl yükleme durumunda ısıya bağlı malzeme özellikleri için değerlendirme uniform ısı durumunda yapılır. Malzeme, izotropik veya poisson oranı sıfır ise her zaman pozitif tanımlanmalıdır. Buna örnek olarak da pozitif tanımlanmamış bir malzemede E_y değerinin $E_x(\nu_{xy})^2$ değerine eşit veya daha küçük çıkmasıdır. (ANSYS Theory Manual,1996)

Sonlu elemanlar modelinde PLANE42 adı verilen iki boyutlu, düzlem gerilme veya düzlem deformasyon katı modellemelerde kullanılan ve dört düğümden oluşan eleman kullanılmıştır. Her düğüm x ve y yönlerinde ötelenme şeklinde olmak üzere ikinci dereceden serbestliğe sahiptir. Elemana ait geometri, düğüm konumu ve koordinat sistemi Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Sonlu eleman geometri, düğüm sayısı ve koordinat sistemi

4.3 Şişen Zemin Modeli ve Analojisi

Sonlu elemanlar model davranışının belirlenmesinde zemine ait E değerinin doğru saptanması çok önemlidir. E değeri bir takım deneylerle bulunmakla birlikte, literatürdeki ampirik bağıntılar da bunun tahmininde kullanılabilir. E değerini etkileyen zemin gerilme tarihçesi, gerilme seviyesi, zemin cinsi, yükleme tipi, örselenme derecesi ve zaman gibi etkenler söz konusudur (Günalan, 1986). E değerinin en doğru ölçülmesi arazide yerinde yapılması olduğunu belirtmektedir. Arazide E değerinin derinlikle değişimi ilk kez Gibson (1967) tarafından ortaya atılmış ve tahmin için aşağıdaki eşitliği vermiştir.

$$E_s = E_0 + m \cdot z \quad (4.27)$$

Burada;

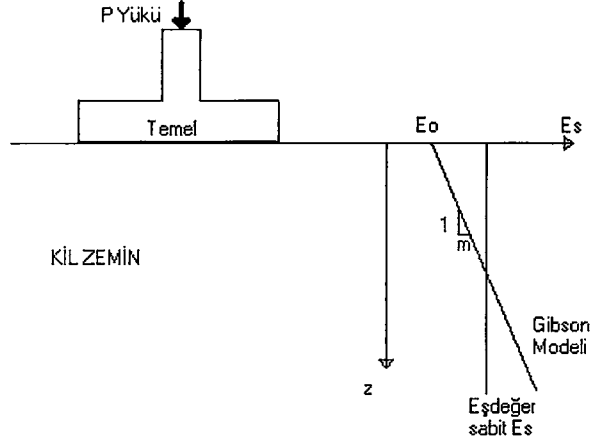
E_s : Zemin Elastik Modülü

E_0 : Dolgu en üst tabakasındaki elastik modül

m : Eğim (1mt derinlik arttığında E_s artışı)

z : Derinlik, mt

Bu eşitlik aşağıdaki Şekil 4.6’da açıklanmıştır.



Şekil 4. 6 Gibson’un derinlikle değişen elastisite modeli (Gibson, 1967)

Bu çalışmada gerçek zemin yerine basitleştirilmiş, homojen, izotropik, lineer elastik ve derinlikle E değeri artan bir model geliştirilmiştir. Modelin E eşitliği aşağıdaki gibidir.

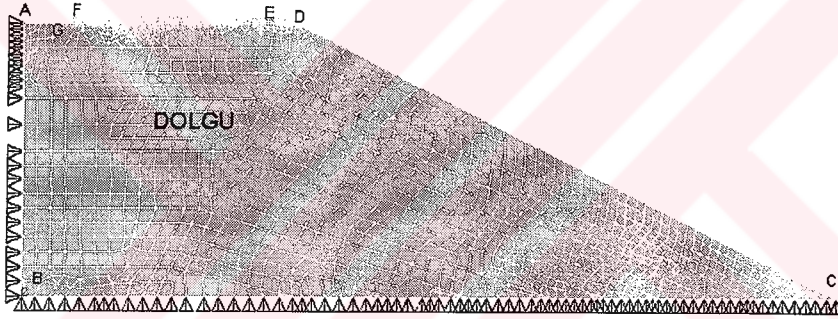
$$E_s = 1.0E5 + 2.5E3 \times z \quad (4.28)$$

Burada E_s ’ in birimi kPa (kN/m^2) dır. z, derinlik birimi ise metredir.

Dolgu en üst tabakası E_s tahmini yapılırken zemin genelde Modifiye Proctor, hatta bazen de Modifiye Proctor enerjisinin üzerinde sıkıştırıldığı (TRL, 1995) için sert kil gibi kabul edilmiştir. Sert bir kilin yaklaşık elastik modül aralığı 50-100 MN/m² (Bowles,1988) kabulünden faydalanılmıştır. Bu kabul yuvarlatılarak 4.28 eşitliği elastik modül fonksiyonu kabul edilerek sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmıştır. Bu eşitlik dolgu malzemesi için geçerli olup üst yapı tabakalarına ait elastik modüller Karayolları şartnamesinin gerektirdiği değerlerdir. Dolgu ve üst yapı tabakalarına ait özellikler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Dolgu ve üstyapı tabakaları malzeme özellikleri

Üstyapı ve Dolgu Tabakaları	E, kPa	γ , kPa	ν	Kalınlık, cm
Aşınma	3.100.000	23,5	0,35	5
Binder	2.950.000	22,6	0,35	8
Bitümlü Temel	2.400.000	21,6	0,35	12
Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel	1.450.000	21,6	0,25	22
Bağlayıcısız Alt Temel	1.050.000	19,6	0,4	28
10. Tabaka	102.500	19,6	0,35	200
9. Tabaka	107.500	19,6	0,35	200
8. Tabaka	112.500	19,6	0,35	200
7. Tabaka	117.500	19,6	0,35	200
6. Tabaka	122.500	19,6	0,35	200
5. Tabaka	127.500	19,6	0,35	200
4. Tabaka	132.500	19,6	0,35	200
3. Tabaka	137.500	19,6	0,35	200
2. Tabaka	142.500	19,6	0,35	200
1. Tabaka	147.500	19,6	0,35	200



Şekil 4.7 Sonlu elemanlar modelinde eleman ve mesnet şartları

Daha sonra sistem kendi ağırlığında çözülerek, elemanlara ve düğüm noktalarına gelen gerilmeler hesaplanmıştır. Çözümlerde oldukça sık bir düğüm noktası ağı belirlenmiştir. Özellikle üstyapı bölgesi çok küçük elemanlardan oluşmuştur. Bunun amacı, model davranış hassasiyetini kaybetmemektir. Şekil 4.7’de, oluşturulan model düğüm noktaları, eleman ve mesnet şartları görülmektedir. AB eksenini düşey simetri eksenine olduğu için buradaki mesnetlerde sadece düşey harekete izin verilmiş ve yatay yönde deplasman olmadığı kabul edilmiştir. BC eksenindeki mesnetlerde ise yatay harekete izin verilmiş ve dolgu altındaki oturma veya kabarma olmadığı kabul edildiği için düşey yönde harekete izin verilmemiştir. Dolgunun kendi ağırlığından dolayı oluşan gerilmeler Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Islanma durumunda oluşacak gerilme ve deformasyonlar daha sonraki bölümlerde ele alınacaktır.

gösterilmiştir. Islanma durumunda oluşacak gerilme ve deformasyonlar daha sonraki bölümlerde ele alınacaktır.



Şekil 4.8.a Dolgu ve üstyapı da kendi ağırlıkları sonucu oluşan SX yatay gerilme izobarları



Şekil 4.8.b Dolgu ve üstyapıda kendi ağırlıkları sonucu oluşan düşey gerilme SY izobarları

Üzerinde çalıştığımız sıkıştırılmış kil tamamen suya doymun değildir. Literatürde var olan zemin davranış modellerinin tümü suya doymun zeminler için geçerlidir. Bünyesine su girişi ile şişen veya göçme gösteren yarı doymun zeminleri birebir modelleyebilecek matematik model ve sonlu elemanlar programı üzerinde çalışmalar yapılmasına rağmen henüz mevcut değildir. Bu çalışmada zemindeki şişmeyi modelleyebilmek için bir analogi kurulmuştur. Bu analogide; dolgu bünyesine giren suyun şişmeye veya sıkışmaya neden olması; ısı olarak sıcaklığı artan bir metal veya malzemenin ısıl genişmesi veya negatif ısıl genişleme katsayısı tanımlanarak, ısı artışı ile büzülmesi şeklinde tanımlanmıştır.

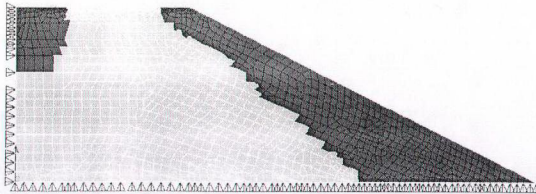
Analizde ve malzeme parametrelerinde kurulan analogi Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Analizde ve malzeme parametrelerinde kullanılan analogi

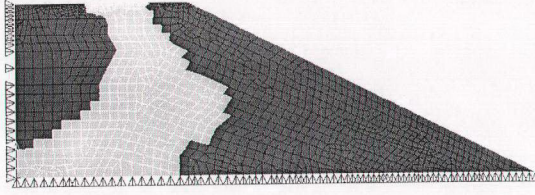
Su Girişi	→	Isı Artışı
Su	→	Isı
Su içeriği	→	Sıcaklık
Şişme yüzdesi	→	Isıl genleşme katsayısı
Sıkışma yüzdesi	→	(-) Isıl genleşme katsayısı
Şişme	→	Genleşme
Sıkışma (Göçme)	→	Büzülme

4.4 Yükleme ve Mesnet Koşulları

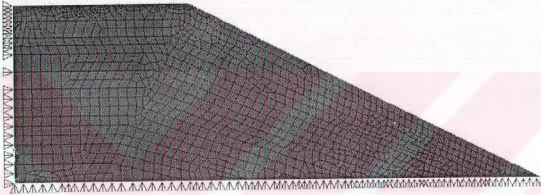
Analizler 5 değişik yükleme durumuna göre yapılmıştır. Yükleme koşulları sırasıyla az ıslanma, çok ıslanma, tüm ıslanma, az kuruma, çok kuruma şeklindedir. Yükleme ve mesnet koşulları Şekil 4.9’da verilmiştir. Böyle bir yükleme sıralaması, yağışlar sonucu dolguda gelişen ıslanmanın tüm dolguya yayılması (tamamen suya doymun hale gelmesi) daha sonra kurumasını (yarı doymun hale gelmesini) modelleyebilmek için yapılmıştır. Gerçek durumda ıslanma-kuruma çevrimleri; yağış süresi, miktarı, drenaj, koruma şartları ve sıcaklık gibi etkenlere bağlıdır. Burada belirlenen yükleme koşulları olabilecek en olumsuz durumu yansıtmaktadır. Ayrıca düşey mesnetler simetri ekseninde bulunduğu için düşey yönde ötelenebilir; yatay yönde tutulu olarak düzenlenmiştir. Dolgu altındaki yatay mesnetler ise; dolgu altı zemininde olan oturmalar hesaba katılmadığı için düşey yönde tutulu; yatay yönde hareketin engellenmediği için de ötelenebilir (kayar) mesnet olarak seçilmiştir.



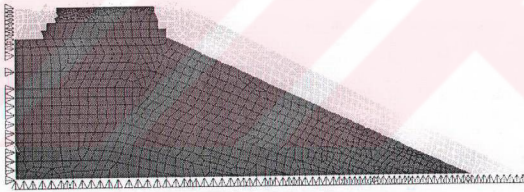
Şekil 4.9.a Yükleme 1 (az ıslanma)



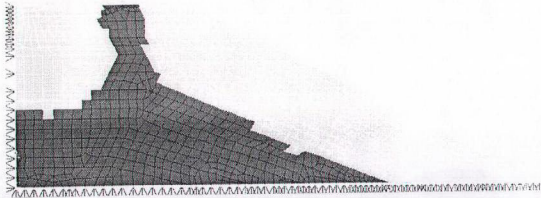
Şekil 4.9.b Yükleme 2 (çok ıslanma)



Şekil 4.9.c Yükleme 3 (tüm ıslanma)



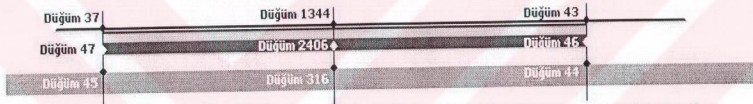
Şekil 4.9.d Yükleme 4 (az kuruma)



Şekil 4.9.e Yükleme 5 (çok kuruma)

4.5 Numerik Modelleme Çalışması Sonuçları ve Değerlendirmesi

Dolgu ve üstyapıdaki çatlaklar çekme gerilmeleri sonucu oluşmaktadır. Bu nedenle analiz sonuçları Şekil 4.10'da belirtilmiş düğüm noktalarındaki çekme gerilmelerine ve Ek III verilerine göre değerlendirilmiştir. Ancak değerlendirmeler nicel olmaktan çok, nitel olarak yapılabilmektedir. Lineer olarak yapılan analizlerde akma gözönüne alınamadığı için sürekli deformasyon yapan elemanlarda çekme gerilmeleri çok yüksek değerlere ulaşmaktadır. Gerilmeler ancak göreceli olarak değerlendirilebilmektedir. Bununla birlikte lineer analizdeki maksimum gerilme bölgeleri non-lineer analizdeki akma bölgelerine karşılık geldiği bilinmektedir (Ansys Theory Manual, 1996).



Şekil 4.10 Üstyapı üzerinde sonuçların irdelendiği düğüm numara ve konumları

Buna göre Ek III 'de verilen analiz sonuçları dikkatle incelendiğinde Yükleme 1 'de (az ıslanma) bütün sıkıştırma su içeriklerinde (Şekil Ek3.1,6,11,16,21,26) acil park şeridi dış kısımları ve iç banket bölgeleri sürekli maksimum gerilmelerine sahip olmaktadır. Özellikle maksimum gerilmelerin yoğunluğu acil park şeridinin dış bölgelerine yakın olmaktadır. Yükleme 2 'de (çok ıslanma) Modifiye Proctorda sıkıştırılan dolguların tümünde, Standart Proctor optimumunda ve kuru tarafında sıkıştırılanlarda, çekme gerilmeleri 1. şeritte yoğunlaşmakta ve acil park şeridinin iç kısımlarına doğru ilerlemektedir (Şekil Ek3.2,7,12,17). Ayrıca Modifiye Proctorda sıkıştırılan dolguların tümünde, 2. ve 3. Şeritlerde üstyapının üst kısımlarında basınç bölgeleri hakim olurken alt kısımlarında, dolgu ile birleştiği yerlerde çekme bölgeleri oluşmaktadır. Alt kısımlarda gelişen bu çekme bölgeleri acil park ve 1. şeritteki gerilme bölgeleri ile birleşmektedir (Şekil Ek3.2,7,12). Standart Proctor optimumunun kuru tarafında sıkıştırılan dolguda ise bu çekme bölgeleri tüm olmamakla birlikte birbirinden kopuk küçük bölgeler halinde görülmektedir (Şekil Ek3.17). Standart Proctorun optimumunda sıkıştırılan dolguda ise 3. şerit altında küçük bir alanda çekme gerilmesi oluşmaktadır (Şekil Ek3.22. Standart Proctor optimumunun ıslak tarafında sıkıştırılan dolguda ise 1. şeritte çekme gerilmesi

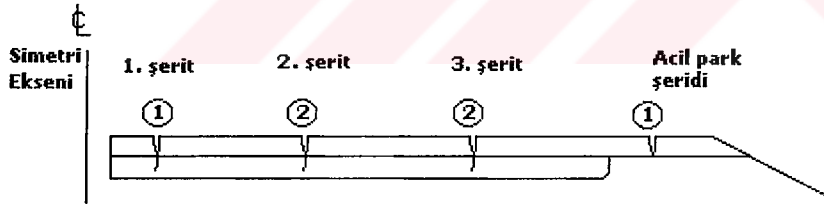
gelişmemekle birlikte 3. Şerit altında çok küçük bir alanda oluşmaktadır (Şekil Ek3.27). Yükleme 3 'de (tam ıslanma) ise Standart Proktor optimumu ve ıslak tarafında sıkıştırılan dolguların haricindekilerin hepsinde gerilme bölgeleri tüm şeritlerin üst kısımlarında gelişmekle birlikte 2. ve 3. şeritlerde yoğunlaşmaktadır (Şekil Ek3.8,13,18). Standart Proktorun optimumunda sıkıştırılan dolgunun üstyapısının üst bölgesinde çekme bölgesi acil park şeridinde kalıp 3. Şeridin alt kısımlarına uzanmaktadır ve üstyapının diğer tüm bölgelerinde basınçlar oluşmuştur (Şekil Ek3.23). Standart Proktor' un ıslak tarafında sıkıştırılan dolguda ise çekme hiç görülmemekte ve basınç değerleri daha yüksek değerlere ulaşmaktadır (Şekil Ek3.28). Yükleme 4 ve 5'de (az ve çok kuruma) ise üstyapının üst kısmında Standart Proktor'un ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun haricindekilerde gerilme bölgeleri hakim olmuş ve maksimum bölgeler 2. ve 3. şeritlerde yoğunlaşmıştır. Standart Proktor'un ıslak tarafında sıkıştırılan dolguda ise üst yapıda basınç bölgeleri hakim olmuştur (Şekil Ek3.2,4,5,9,10,14,15,19,20,24,25).

Analizler oturmalar açısından değerlendirildiğinde ise tüm yükleme durumlarında, Modifiye Proktor'da sıkıştırılan dolguların hepsinde ve Standart Proktor'un kuru tarafında sıkıştırılan dolguda şişme hakim olmuştur (Şekil Ek3.1'den 20'ye kadar). Standart Proktor'un optimumunda sıkıştırılan dolguda Yükleme 1, 2, 3 'de şişme; (Şekil Ek3.21,22,23) Yükleme 4 'de kısmen şişme (orta bölgeler=2 ve 3. şeritler) kısmen de sıkışma (acil park ve 1. Şerit, Şekil Ek3.24) gözlenmektedir. Yükleme 5'de ise tamamen oturma oluşmuştur. Standart Proktor' un ıslak tarafında sıkıştırılan dolguda ise Yükleme 1' de kısmi (acil park ve 1. serit) şişme görülürken diğer yüklemelerde oturmalar hakim olmuştur Şekil Ek3.21,22,23,,24,,25). Bu durum şişmeye en çok katkıda bulunan katmanların üstte yer aldığını göstermektedir. Buna göre Yükleme 1, acil park şeridinin dış tarafında ve 1. şeritte çatlamaya neden olabilecektir. Yükleme 2, acil park şeridinin iç tarafları ve 1. şeridin ve 2. şerite yakın kısımlarında çatlamalara neden teşkil edebilecektir. (Standart Proktor'un ıslak tarafında sıkıştırılan dolgu hariç). Ayrıca 2. ve 3. şeritlerde üst tabakalarda çekme gerilmesi görülmemesine karşın alt kısımlarda görülmektedir. Arazide yapılan gözlemlerde ise bu şeritlerde bazen aşınma tabakasında çatlama görülmemesine karşın çimento bağlayıcı granüler temelde çatlaklara rastlanması; (TRL, 1995) modellemenin arazi koşullarını belirleyebildiğini göstermektedir. Yükleme 3; her şeritte

hasar yapabilmekle birlikte 2. ve 3. şeritlerde daha çok çatlamaya neden olabilmektedir (Standart Proktor'un optimumu ve ıslak tarafında sıkıştırılan dolgular hariç). Yükleme 4 ve 5 'de ise gerilme bölgeleri 2. ve 3. şeritlerde sınırlı kalmakta ve bu şeritlerde çatlamaya neden olabilmektedir. (Standart Proktor'un ıslak tarafında sıkıştırılan dolgu hariç). Olasılığı en yüksek durumun Yükleme 1 olduğu açıktır. Buna göre Modifiye Proktor'larda sıkıştırılan dolguların tümünde ve Standart Proktor'un kuru tarafında sıkıştırılan dolguda acil park şeridinde ve 1. şeritlerde çatlama görülmesi olasılığı en yüksektir. Daha sonraki yüklemelerde çatlaklar sırasıyla 2. ve 3. şeritlerde görülme eğiliminde olacaktır (Şekil 4.11a). Buna göre şişme karakterinin hakim olduğu dolgularda çatlama ilk önce acil park ve 1. Şeritte görülecek ve daha sonra 2. ve 3. şeritlerde görülecektir (Şekil 4.11a). Burada kısa zaman aralıkları öncelik belirlememektedir. Ancak kısa zaman aralıklarının sıralamada önemli olması durumunda çatlak gelişimi Şekil 4.11a 'da gösterilmiştir.



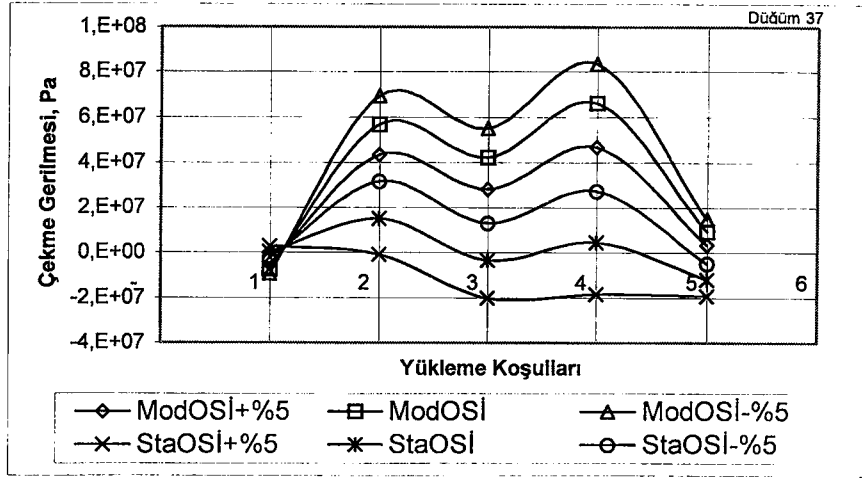
Şekil 4.11a. Analiz sonucu beklenen çatlak gelişim sırası



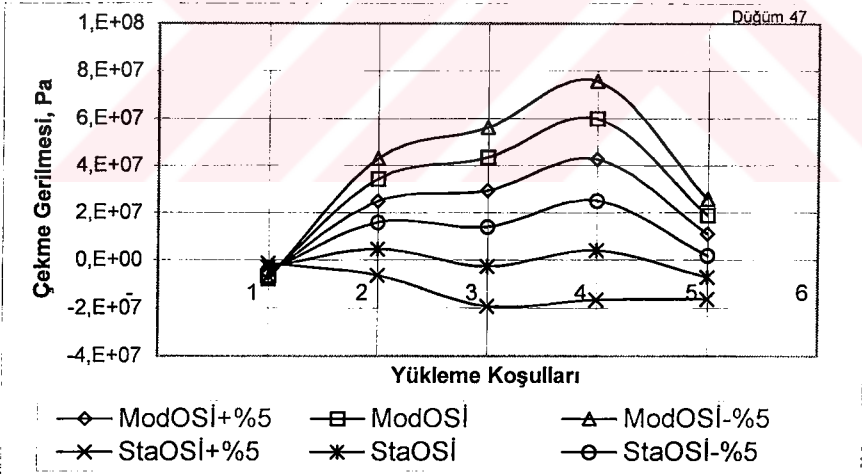
Şekil 4.11b. Otoyolda gözlenen çatlak gelişim sırası (TRL, 1995)

Kısa zaman aralıklarının sıralamada önemsiz olduğu durum (Şekil 4.11.a) ise arazide gözlemlenen (Şekil 4.11.b) çatlama sırasının aynısıdır (TRL, 1995). Otoyol çatlaklarının ortalama %64'ü acil park şeridinde %21'i 1. şeritte, %8'i 2. şeritte, %5'i 3. şeritte %2'si ise iç bankette görülmüştür (TRL, 1995). Bu oranlar model analizlerini desteklemektedir.

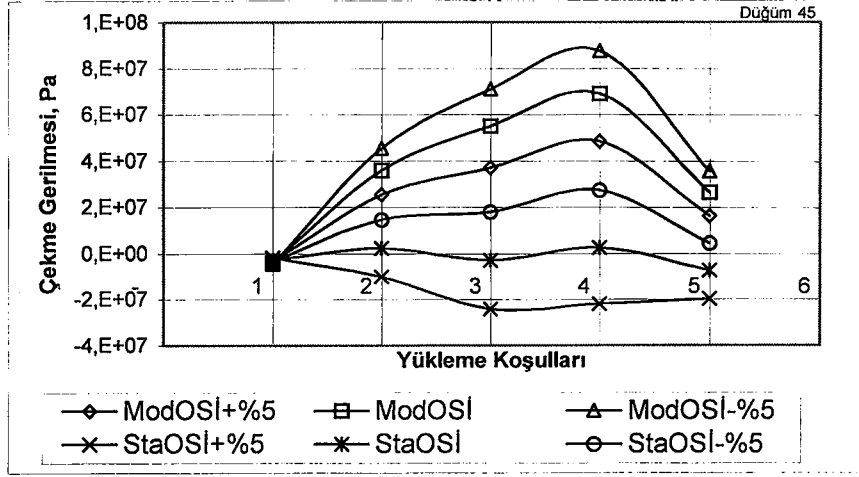
Ayrıca Şekil 4.10’da gösterilen düğüm noktalarındaki çekme gerilmeleri sıkıştırma enerjisi, sıkıştırma su içeriği ve yükleme durumlarına göre karşılaştırılmıştır. Sonuçlar grafikler halinde Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



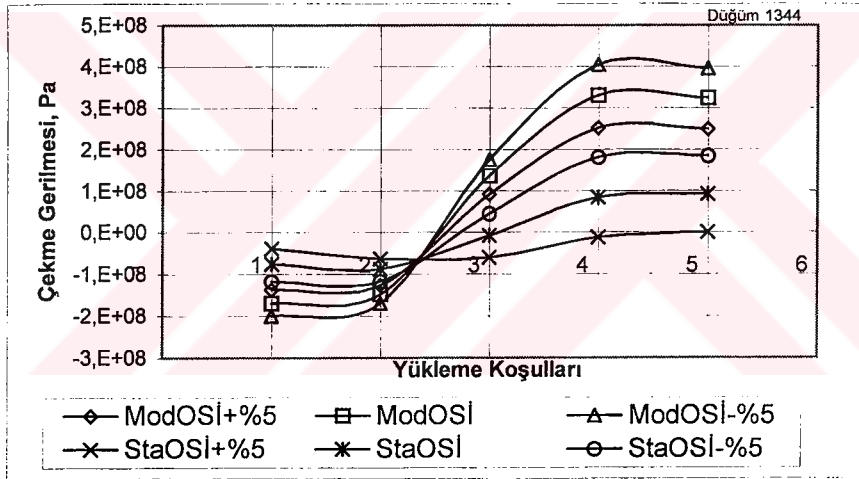
Şekil 4.12.a Düzüm 37’de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yükleme koşulları ilişkisi



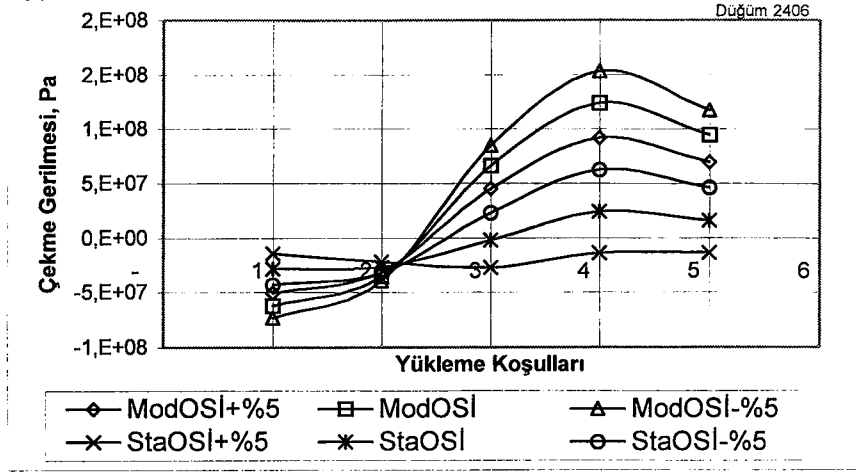
Şekil 4.12.b Düzüm 47’de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yükleme koşulları ilişkisi



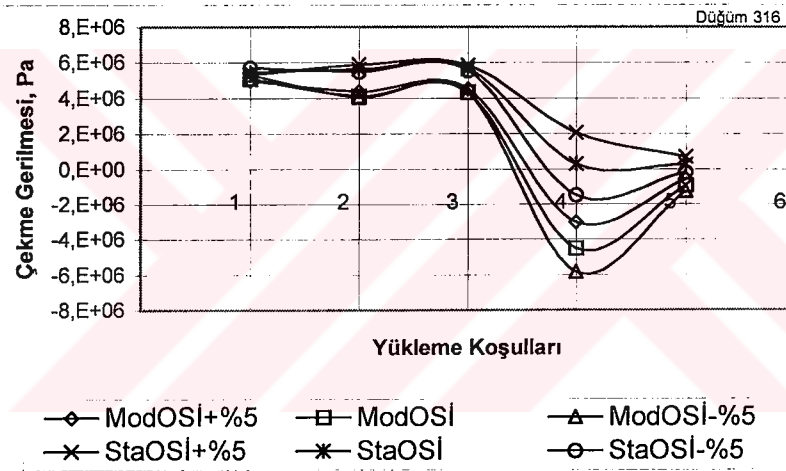
Şekil 4.12.c Düğüm 45’de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi



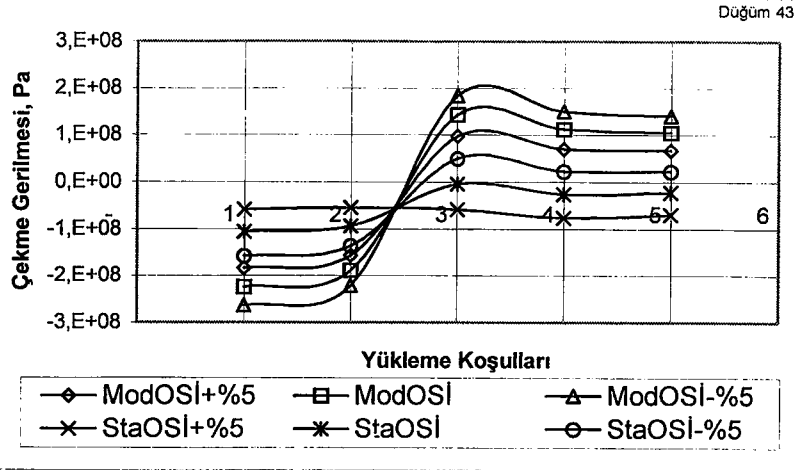
Şekil 4.12.d Düğüm 1344’de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi



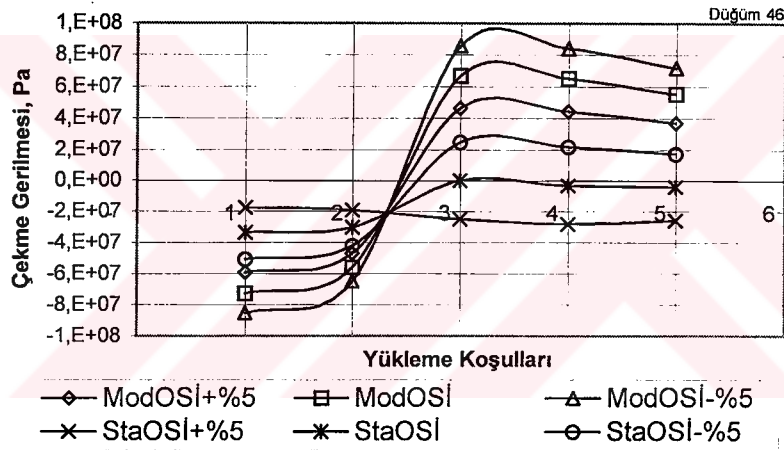
Şekil 4.12.e Düğüm 2406’de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi



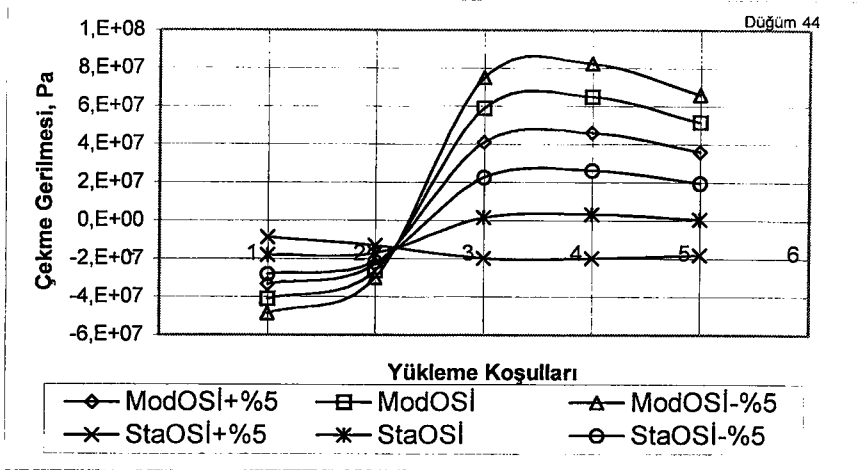
Şekil 4.12.f.Düğüm 316’de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yüklem koşulları ilişkisi



Şekil 4.12.g Düğüm 43’de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yükleme koşulları ilişkisi



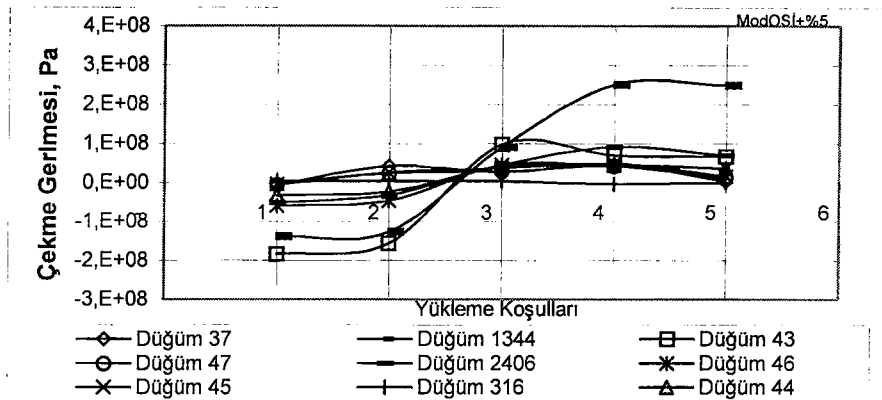
Şekil 4.12.h Düğüm 46’de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yükleme koşulları ilişkisi



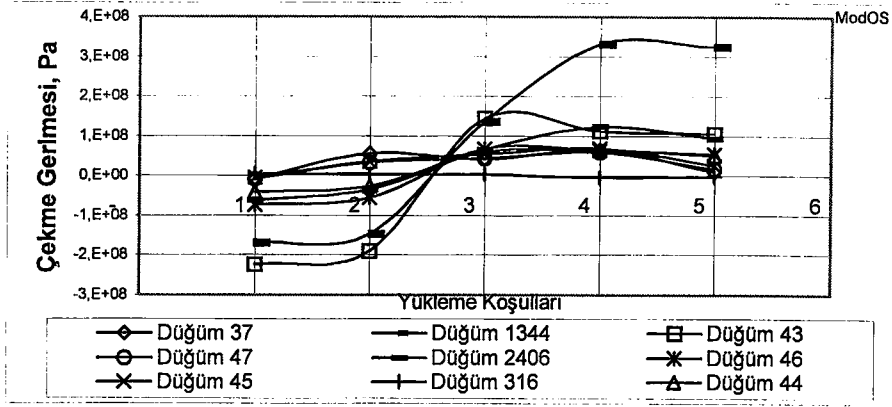
Şekil 4.12.i Düşüm 44'de farklı sıkıştırma enerjisi ve su içeriğinde çekme gerilmesi - yükleme koşulları ilişkisi

Şekil 4.12 ve 4.13 incelendiğinde Standart Proctor' un ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun üst tarafında diferansiyel hareketlerin en az ve basınç gerilmeleri hakim ve düşük seviyelerde olduğu gözlenmektedir. Böyle bir dolguda ıslanma nedeniyle çatlama olmayacağı açıktır. Dalguda sıkıştırma enerjisi arttıkça ve sıkıştırma su içeriği düşürüldükçe, şişme potansiyeli ve dolayısıyla üst yapıda çatlama riski artmaktadır. Gerilme mertebesinin, deformasyon mertebesi ile ilişkili olduğu açıktır.

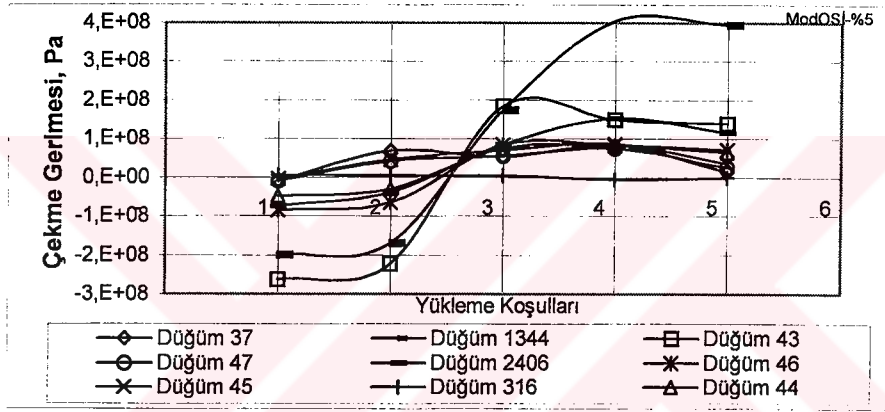
Şekil 4.13'de ise belirli enerji ve su içeriğinde sıkıştırılan dolguda değişik düşüm noktalarındaki çekme gerilmeleri göreceli olarak gösterilmiştir.



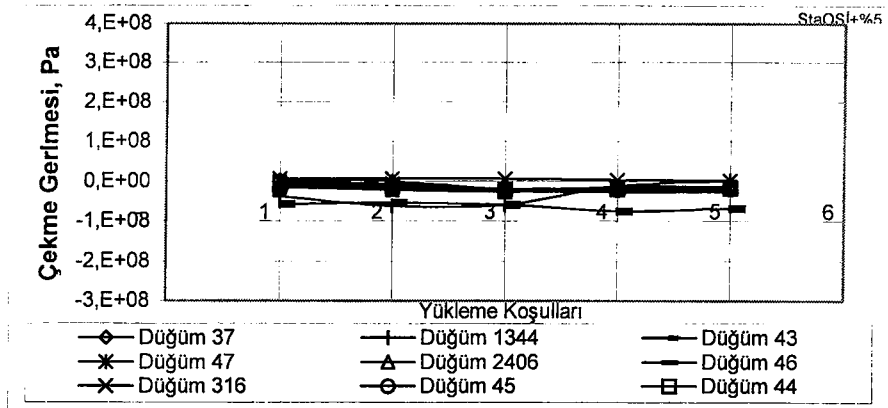
Şekil 4.13.a Modifiye Proctor ıslağında sıkıştırılan dolgunun farklı düşüm noktalarında çekme gerilmesi-yükleme koşulları ilişkisi



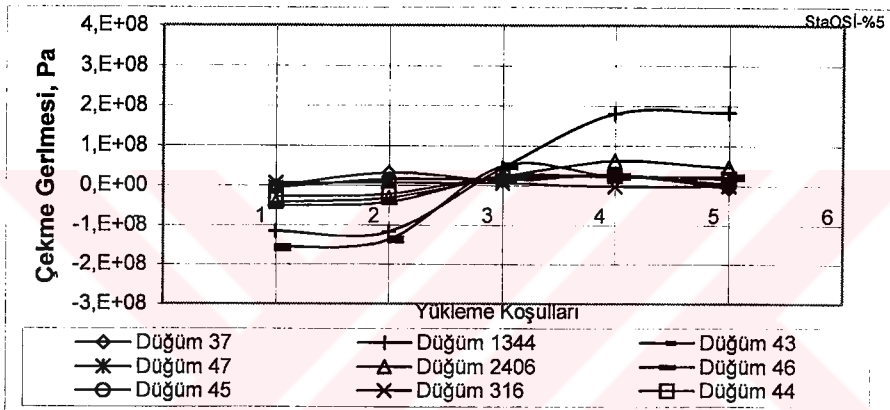
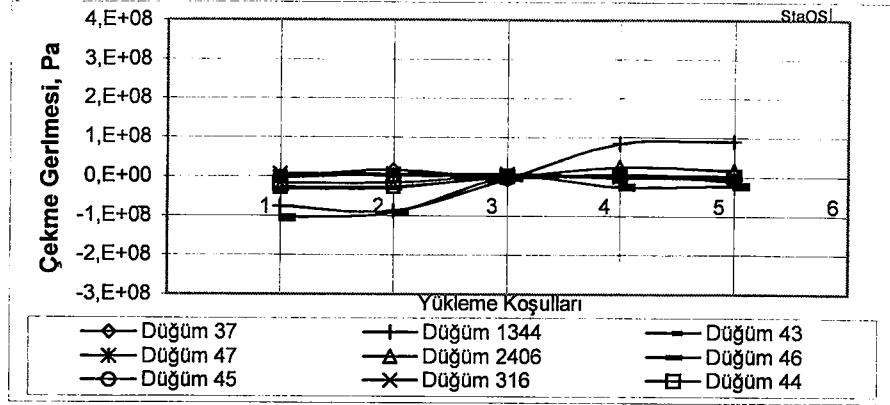
Şekil 4.13.b Modifiye Proctor optimumunda sıkıştırılan dolgunun farklı düğüm noktalarında çekme gerilmesi-yükleme koşulları ilişkisi



Şekil 4.13.c Modifiye Proctor kurusunda sıkıştırılan dolgunun farklı düğüm noktalarında çekme gerilmesi-yükleme koşulları ilişkisi



Şekil 4.13.d Standart Proctor ıslağında sıkıştırılan dolgunun farklı düğüm noktalarında çekme gerilmesi-yükleme koşulları ilişkisi



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Aktif kil minerali içererek şişme özelliği gösteren killi zeminler, dünyanın birçok yerinde olduğu gibi ülkemizde de büyük alanlar oluşturmaktadır. Şişme; suya doygun olmayan, özellikle aşırı konsolide olan killi zeminlerde görülen önemli bir mühendislik sorunudur. Bu tür zeminlerle ilgili mühendislik uygulamalarında bu zeminlerin tanımlanmasının, şişme basıncının ve şişme miktarlarının önceden belirlenmesinin önemi büyüktür. Bu amaçla Lüleburgaz-Babaeski civarından alınan fisürlü kil zemin örneklerinin incelenmesi, bu çalışmanın deneysel kısmını oluşturmuştur.

Bu çalışmada şişme potansiyeli olan zeminlerle inşa edilen dolguların ıslanma durumunda yaptığı şişme veya sıkışma hareketi deneysel çalışma ve numerik analizler ile incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu sıkıştırma enerjisi, sıkıştırma su içeriği ve zeminin (şişmeye karşı) sınırlandırmasını belirleyen düşey basınç faktörlerine bağlı olarak şişme ve sıkışma oranları belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçları üzerinde regresyon analizleri yapılmış ve şişme miktarı için ampirik bağıntılar verilmiştir (Ekler I ve II). Elde edilen bu değerler nümerik analize veri oluşturmuştur. Nümerik analiz ile şişme ve sıkışmanın üstyapıdaki etkileri araştırılmıştır. Çıkan sonuçlar ise arazi gözlemleri ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel iki değişik sıkıştırma enerjisinde, optimum su içeriğinin $\pm$ %5 ıslak ve kuru taraflarında sıkıştırılan ve değişik düşey basınçlar altında ıslatılan örneklerle ait şişme ve sıkışma deformasyonları literatürle uyum halindedir. (Srinidharan ve Sivapulliah, 1986) Bu konuda sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan numerik analiz sonuçları üstyapıda çatlak gelişim bölgeleri ve oluşum zamanları arazide yapılan gözlemler ile benzerlik göstermektedir (TRL, 1995).

Laboratuvar deney çalışmalarına göre, sıkıştırma enerjisi arttıkça şişen kil zeminin şişme potansiyelinin önemli derecede arttığı görülmüştür. Yine bu deneyler sonucunda sıkıştırma su içeriğinin artırılmasının şişme potansiyelini azalttığı gözlenmiştir. Ayrıca şişen zeminlerde şişmenin engellenme derecesinin de şişmede etkili olduğu, ıslatılan örneğin üstündeki düşey basınç arttıkça şişme eğiliminin azaldığı görülmüştür. Buradan da düşey

basıncı düşük mertebelerde olan dolgu üst tabakalarının şişmeye önemli katkıda bulunduğu ortaya çıkmaktadır.

Bu tür kil zeminlerle inşa edilen bir otoyol dolgusunun ıslanma durumunda davranışı; düşey gerilmelere göre şişme oranlarının belirlendiği sonlu elemanlar yöntemi ile lineer analiz yapılarak çözüldüğünde; deformasyon ve şekil değiştirme davranışı gerçekçi olmakla birlikte; gerilme düzeyleri aşırı yüksek olarak hesaplanmış ve gerçek değerlere yeterince yaklaşamamıştır.

Analizlerde kullanılan dolgularda elastik modül ve poisson oranları ampirik olarak belirlenmiştir. Daha gerçekçi bir yaklaşım olarak; bu parametrelerin arazi veya laboratuvar deneylerinde elde edilmesi ve su girişi ile zamana bağlı olarak değişen su içeriklerine göre değişimlerinin bilinmesi model başarısını daha çok arttıracaktır. Böylece ıslanma sonucu oluşan deformasyonlar zamana bağlı olarak ve mukavemet parametrelerinin de daha gerçekçi belirlenmesi ile model performansını arttıracaktır. Daha fazla veri ile böyle karmaşık bir olay daha iyi temsil edilecektir.

Bu çalışmada ancak düşey hareketler irdelenebilmiştir. Zeminlerin yanal şişmesinin de belirlenmesi ve analizlerde anizotropik malzeme davranışının sağlanması şişme olayını ve olası üstyapı çatlama gelişiminin daha iyi araştırılmasını sağlayacaktır.

Edirne-Kınalı otoyolunda görülen boyuna çatlakların oluşma yeri, sırası ve gelişimi ile yapılan gözlemlerle paralel teorik sonuçlar elde edilmesi pratikte dolguların yapım öncesinde davranışlarının önceden belirlenmesi için cesaret verici bir adım olarak yorumlanmaktadır. Yurdumuzda dolguların yapımına ilişkin yanlış koşullanmalar vardır. Bunlar; sıkıştırma su içeriğini belirleyen teknik şartnamelerin oldukça büyük aralıkta zemin su içeriğinde sıkıştırmaya izin veren koşullarının yanısıra yapımcının gereksiz ve fazladan yaptığı işten kaynaklanmaktadır. Özellikle kurak mevsimlerde yapılan dolgularda optimum su içeriği veya üzerine getirmenin zorluğu ve maliyeti bilindiğinden zeminlerin genelde (şartnamelerin izin verdiği) kuru tarafta sıkıştırılmaları tercih edilmektedir. Belirlenen sıkışma yüzdesinin elde edilmesine ise ağır silindirlerle çok sayıda geçiş yapılarak gayret

edilmektedir. Kil zeminin fazla enerji ile sıkıştırılmasıyla oldukça sert ve şişme potansiyeli yüksek dolgu elde edilmektedir. İncelenen sıkıştırılma kayıtları arazide laboratuvar sıkışmasına göre %110' a varan sıkılıkların elde edildiğini göstermektedir.

Kuru tarafta ve fazla enerji ile sıkıştırılarak elde edilen dolgular daha sonra olması kaçınılmaz ıslanmalar için önemli şişme potansiyeli olan kütleler anlamına gelmektedir. Yol kesitlerinde bırakılan orta refüj genişliğinin 10 m' ye varan genişlikleri alması alınan tüm önlemlere karşın dolgunun zamanla su almasını önleyememektedir. Diğer yandan dolgu eteklerinde peyzaj çalışmalarının (bitkilendirmenin) hemen yapılmayışı dolgunun diğer ıslanma nedeni olmaktadır. Yurdumuzda orta refüj direnlerinin işçilik ya da yanlış filtre tasarımı nedeniyle yapımından kısa süre sonra işlevini yerine getirmediği, dolgu eteklerinin ıslanma-kuruma çevrimleri sonucu yüzey çatlaklarının oluştuğu bir gerçektir. Kısacası dolgunun yapım sırasındaki su içeriğinin sabit tutulması olanaksız görülmektedir. Bu durumda dolguları yeterli mukavemeti sağlayacak, oturmaları kısıtlayacak kadar yeterince ıslak tarafta ve gereğinden fazla sıkıştırmadan yapmak daha mühendisce bir çözüm olarak görülmektedir.

KAYNAKLAR

Aitchison, G.D., (1973), "A Quantitative Description of The Stress Deformation Behaviour of Expansive Soils ", Proc. 3rd Int. Conf. on Expansive Soils, 2:79-82.

ASTM, (1986), "Standard Test Methods for One Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils", Annual Book of ASTM Standards, 4(08):992-1101.

Abeysekera, R.A. and Lowell, C.W., (1981), "Volume Changes in Compacted Clays and Shales on Saturation", Transp. Res. Rec., 79:67-73.

Bandyopadhyay, S.S., (1981), "Prediction of Swelling Potential for Natural Soils", Journal of Eng. Geology Div., ASCE, 107(5):658-661.

Baveye, P., Verburg, K. and Biielders, C., (1990), "Capillary Phenomena and Soil Swelling", Nato Arw.

Birand, A.A., (1977), "Propensity to Water Intake - A Method for Prediction of Expansiveness of Soils", Journal of Pure and Applied Sciences, 9(3):367-392, METU, Ankara.

Birand, A.A. ve Çokça, E., (1991), "Metilen Mavisi Deneyi ile Killerin Yüzey Alanının Tespiti", 5. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 159-173, Anadolu Üniversitesi, Eylül, Eskişehir.

Bolt, G.H., (1956), "Physico-Chemical Analysis of The Compressibility of Pure Clays", Geotechnique, 6(1):86-93.

Brackley, I.J.A., (1975), "Swell Under Load", 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Found. Eng., 2:65-70, Durban.

Brackley, I.J.A., (1980), "Prediction of Soil Heave From Suction Measurements", Proc. 7th African Reg. Conf. on SMFE, 159-166.

Brackley, I.J.A., (1983), "An Empirical Equation for The Prediction of Clay Heave", Proc. 7th Asian Reg. Conf. on SMFE, 1:8-14, Haifa, Israel.

Brindley, G.W. and Brown, G., (1980), "Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification", Mineralogical Society, London.

Casagrande, A., (1948), "Classification and Identification of Soils", Transactions, ASCE 113, 901-930.

Chen, F.H., (1975), "Foundation on Expansive Soil", Elsevier, New York.

Chen, F.N., (1983), "Behaviour Soils Under Influence of Temperature Gradient", Research Report, Science of Architecture.

Chen, F.H., (1988), "Foundation on Expansive Soils", Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.

Chan, K.Y., (1982), "Shrinkage Characteristics of Soil Clods From a Grey Clay Under Intensive Cultivation", Aust. J. Soil Res., 20:65-68.

Chu, T. and Mou, C.H., (1973), "Volume Change Characteristics of Expansive Soils Determined by Controlled Suction Tests", Proceedings of The Third International Conference on Expansive Soils, Haifa, Israel.

Dakshanamurthy, V. ve Raman, N., (1973), "A Simple Method of Identifying an Expansive Soil", Soil and Founds, 13(1):97-104.

Darkshanamurthy, V., (1979), "A Stress Controlled Study of Swelling Characteristics of Compacted Expansive Clays", Geo. Testing J., 2(1):57-60.

Daniells, I.G., (1989), "Degradation and Restoration of Soil Structure in a Cracking Grey Clay Used for Cotton Production", Aust. J. Soil Res., 27:455-469.

Dhowian, A.W., Erol, A.O. and Youssef, A., (1990), "Evaluation of Expansive Soils and Foundation Methodology in The Kingdom of Saudi Arabia", Research Report, King Saud University Press-1410 A.H., 32, Riyadh.

Dif, A.E., (1990), "Anisotropic Behaviour of Expansive Soils", Ph. D. Thesis, El-Mansoura University, El-Mansoura, Egypt.

Donaldson, G.W., (1971), "Foundations for a Pipeline Over Expansive Soil", 5th Reg. Conf. for Africa, 21:3-33, 41-43, Luanda.

El, Sohby M.A ve Elleboudy A.M. Compaction characteristics of some arid swelling soils. Proceedings of conference Engineered fills 93. Newcastle, September 1993 p.189.

Erol, O., (1990), "Prediction of Swell by The Suction Method", Digest 90, April, 1(2):99-105.

Erol, O., (1990), "Gerçek Kabarmaların Şişme-Ödometre Metodu ile Karşılaştırılması", Teknik Rapor, ODTÜ, Ankara.

Erol, O. and Dhowian, A.W., (1990), "Swell Behaviour of Arid Climate Shales From Saudi Arabia", Quarterly Journal of Eng. Geology, 23:243-254.

Fredlund, D.G., Hasan, J.U. and Filson, H.L., (1980), "The Prediction of Total Heave", Proc. 4th Int. Conf. on Expansive Soils, ASCE, 1:1-7, Denver, Colorado.

Fredlund, D.G., (1983), "Prediction of Ground Movements in Swelling Clays", Proceeding of 31st Annual Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference, Minnesota.

Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., (1987), "Soil Mechanics Principles for Highway Engineering in Arid Regions", Transportation Research Record 1137, 1-11.

Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., (1991), "Stress State Variable Approach to The Prediction of Heave", International Workshop on Cornell University, August, 12-16, Ithaca, New York.

Fourie, A.B., (1989), "Laboratory Evaluation of Lateral Swelling Pressure", Journal of Geotechnical Engineering, October, 115(10):1481-1487.

Gillot, J.E., (1963), "Clay in Engineering Geology", Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.

Giraldez, J.V., Sposito, G., and Delgado, C., (1983), "A General Soil Volume Equation: I. The Two Parameter Model", Soil Sci. Soc. Am. J., 47:419-422.

Grim, R.E., (1962), "Applied Clay Mineralogy", Mc Graw-Hill, New York.

Gromko, G.J., (1974), "Review of Expansive Soils", Journal of Geotechnical Engineering, Division, June.

Hamberg, D.J. and Nelson, J.D., (1985), "Prediction of Floor Slab", Proc. 5th Int. Conf. on Expansive Soils, 137-140.

Hettiaratchi, D.R.P., (1990), "Critical State Soil Mechanics and The Volume Change Behaviour of Expansive Soils".

Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., (1981), "An Introduction to Geotechnical Engineering", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Holtz, W.G. and Gibbs, H.J., (1956), "Engineering Properties of Expansive Clays", Transactions, ASCE 121, 641-663.

Holtz, W.G., (1959), "Expansive Clay-Properties and Problems", Colorado School of Mines Quarterly, 54(4).

Hunter, R.J., (1989), "Foundation of Colloid Science I", Oxford University Press, Oxford.

Grant, C.D. ve Dexter, A.R., (1990), "Air Entrapment and Differential Swelling as Factors in The Mellowing of Moulded Soil During Rapid Wetting", Aust. J. Soil Res., 28:361-369.

Jardine, R.J., Symes, M.J. and Burland, J.M., (1984), "The Measurement of Soil Stiffness in The Triaxial Apparatus", Geotechnique, 34(3):323-340.

Johnson, L.D., (1978), "Predicting Potential Heave and Heave With Time in Swelling Foundation Soils ", Technical Report, USAWES, 7-78.

Johnson, L.D. and Snethen, D.R., (1978), "Prediction of Potential Heave of Swelling Soils", Geotechnical Testing Journal, 1(3):117-127.

Jones, D.E. and Jones, K.A., (1987), "Treating Expansive Soils", Civ. Eng., ASCE, 57(8): 62-65.

Justo, J.L., Delgado, A. and Ruiz, J., (1980), "The Influence of Stress Path in The Collapse-Swelling of Soils in The Laboratory", Proc. 5th Int. Conf. on Expansive Soils, 67-71, (preprints), Adelaide.

Kassiff, G. and Zeitlen, J.G., (1962), "Behaviour of Pipes Buried in Expansive Clays ", J. Soil Mech. and Found. Eng. Div., ASCE, 88(2):133-148.

Kellar, W.D., (1964), "Processes of Origin and Alternation of Clay Minerals", Seminar on Soil Clay Mineralogy, University of North Carolina Press, Chapel Hill, 3-76.

Keskin, S.N. ve Şenol, A., (1992), "Zeminlerde Su İçeriği Değişikliğine Bağlı Olarak Şişme ve Büzülme Davranışlarının Önceden Tahmini ile İlgili Çalışmalar", 7. Mühendislik Haftası Bildiriler Kitabı, Mayıs, Isparta.

Keskin, S.N., Yıldırım, H. ve Ansal, M.A., (1992), "Killi Zeminlerde Yanal Şişme Davranışları", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi I, 14-31, İTÜ, Ekim, İstanbul.

Komornik, A. and David, D., (1969), "Prediction of Swelling Potential of Clays", Proc. JSMFD, ASCE, 95(1):209-225.

Kraynski, L.M., (1973), "The Need for Uniformity in Testing of Expansive Soils", Proceedings of Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction I.

Ladd, C.C. and Lambe, T.W., (1961), "The Identification and Behaviour of Compacted Expansive Clays", Proc. 5th ICSMF, 1:201-205.

Lambe, T.W. and Whitman, R.V., (1969), "Soil Mechanics", John Wiley and Sons, New York.

Low, P.F., (1987), "Structural Component of Swelling Pressure of Clays", American Chemical Society, 18-25.

Mc Garry, D. and Malafant, K.W., (1987), "The Analysis of Volume Change in Unconfined Units of Soil", Soil Sci. Soc. Am. J., 51:290-297.

Mc Keen, G.R., (1981), "Field Studies of Airport Pavements on Expansive Clay", Proc. of 4th Int. Conf. on Expansive Soils, 1:241-261, Colorado.

Millot, G., (1970), "Geology of Clays", Masson et Cie, Paris.

Mitchell, J.K., (1976), "Fundamentals of Soil Behaviour", John Wiley & Sons, Inc., 422, New York.

Mitchell, P.W. and Avalle, D.L., (1985), "A Technique to Predict Expansive Soil Movements", Proc. 5th Int. Conf. on Expansive Soils, 124-130, (preprints), Adelaide.

Moore, C.A., (1970), "Suggested Method for Applications of X-Ray Diffraction of Clay Structural Analysis to The Understanding of The Engineering Behaviour of Soils", Special Procedures for Testing Soil and Rock, ASTM, STP 479, 291-300.

Morgenstern, N.R. and Balasubramanian, B., (1980), "Effects of Pore Fluid on The Swelling of Clay Shales", Proc. 4th Int. Conf. on Expansive Soils, 190-205, Denver, Colorado.

Nagaraj, T.S. and Srinivasamurthy, B.R., (1983), "An Approach for Prediction of Swelling Soil Behaviour", Proc. 7th Asian Reg. Conf. on SMFE, 1:52-55, Haifa, Israel.

Nayak, N.V. and Christensen, R.W., (1971), "Swelling Characteristics of Compacted Expansive Soils", Clays and Clay Minerals, 19(4):251-261.

Obermeier, S.I., (1973), "Evaluation of Laboratory Techniques for Measurement of Swell Potential of Clays", Proceedings of Workshop on Expansive Clay and Shale in Highway Design and Construction I.

Olliver, C., (1984), "Weathering", 2nd Edition, Longman, New York.

Paige-Green, P., (1980), "The Clay Mineralogy of Dwyka Tillite in Southern Africa and Its Effect on The Geotechnical Properties", Nat. Inst. for Transp. and Road Res. CSIR, Pretoria and Trans. Geol. Soc. S.A., 83:291-296.

Parker, J.C., Zelazny, L.W. and Amos, D.F., (1980), "Swelling Components of Compacted Ca-Montmorillonit", Clays-Clay Miner., 28(2):135-141.

Parker, J.C., (1986), "Hydrostatics of Water in Porous Media", Soil Physical Chemistry, CRC Press N., 209-296, Boca Raton Florida.

Peck, R.B., Hanson, W.E. and Thornburn, T.H., (1974), "Foundation Engineering", John Wiley and Sons.

Reeve, M.J. and Hall, D.G.M., (1978), "Shrinkage in Clays Subsoils of Contrasting Structure", J. Soil Sci., 29:315-323.

Richard, B.G., Peter, P. and Emerson, W.W., (1983), "The Effects of Vegetation on The Swelling and Shrinking of Soils in Australia", *Geotechnique*, 33:127-139.

Richards, B.G., (1980), "Measurement of Soil Suction in Expansive Clays", *Inst. Eng. Australia, Civ. Eng. Trans.*, CE 22(3):252-261.

Schneider, G.L. and Poor, A.R., (1974), "The Prediction of Soil Heave and Swell Pressures Developed by an Expansive Clay ", *Research Report, TR-9-74, Construction Research Center, University of Texas.*

Schreiner, H.D., (1987a), "Measurement of Solute Suction in High Plasticity Clays", *Proc. 9th African Reg. Conf. on SMFE.*

Schreiner, H.D., (1987b), "State of The Art Review on Expansive Soils", *Transported and Road Research Laboratory Report, Ministry of Transport Crowthorne Berkshire, March, England.*

Seed, H.B., Woodward, R.J. and Lundgreen, R., (1962), "Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE*, 88.

Smith, A.W., (1973), "Method for Determining The Potential Vertical Rise, PVR (Texas Test Method Tex-126-E)", *Proceedings of Workshop on Expansive Clay and Shale in Highway Design and Construction, University of Wyoming*, 1:189-205, Laramie.

Smith, S.S. and Arulanandan, K., (1981), "Relationship of Electrical Dispersion to Soil Properties", *Proc. JGED, ASCE*, 107(GTS):591-604.

Snethen, D.R. and Johnson, L.D., (1977), "An Investigation of Natural Microscale Mechanism That Cause Volume Changes in Expansive Clays", *Research Report, FHWA-RD-77-75.*

Snethen, D.R., (1984), "Evaluation on Expedient Methods for Identification on Classification of Potentially Expansive Soils", *Proc. 5th Int. Conf. on Expansive Soils*, 22-26, Adelaide.

Sposito, G. and Giraldez, J.V., (1976), "Thermodynamic Stability and The Law of Corresponding States in Swelling Soils", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40:352-358.

Sridharan, A. and Rao, G.V., (1973), "Mechanisms Controlling Volume Change for Saturated Clays and The Role of The Effective Stress Concept", *Geotechnique*, 23(3):359-382.

Sridharan, A. and Jayadeva, M.S., (1982), "Double Layer Theory and Compressibility of Clays", *Geotechnique*, 32(2):44-133.

Sridharan, A., Rao, A.S. and Sivapullaiah, P.V., (1986), "Swelling Pressure of Clays", *Geotechnical Testing Journal*, 9(1):24-33.

Sullivan, R.A. and Mc Cleland, B., (1969), "Predicting Heave of Buildings on Unsaturated Clay", Collage Station, 404-420, Texas.

Tadanier, R. and Nguyen, V.U., (1984), "Index Properties of Expansive Soils in New South Wales", Proc. 5th Int. Conf. on Expansive Soils, 321-326, (preprints), Adelaide.

Talibudeen, O., (1981), "Cation Exchange in Soils in The Chemistry of Processes", Greenland, D.J., Hayes, M.B.H. (eds.), John Willey and Sons., Chichester.

Taylor, R.K. and Cripps, J.C., (1984), "Mineralogical Controls on Volume Change in Ground Movements and Their Effects on Structures", Attawell, P.B. and Taylor, R.K. (eds.), Surrey University Press, 268-297.

TRL ; (1995) Boyuna Çatlaklar Üzerine Araştırma; Edirne Kınalı Otoyolu, Türkiye Cilt 1, sh. 138

Ülker, R., (1971), "Zeminlerin Strüktür Arızaları ve Buzullardan Oluşan Killere Uygulama", Doçentlik Tezi.

Van der Merwe, D.H., (1964), "The Prediction of Heave From The Plasticity Index and Percentage Clay Fraction", Trans. S.A. Inst. Civ. Eng., 6(5):103-107.

Viani, B.E., Low, P.F. and Roth, C.B.J., (1983), "Colloid Interface Science", 96-229.

Vijayvergiya, U.N. and Ghazzaly, O.I., (1973), "Prediction of Swelling Potential for Natural Clays", Proc. 3rd Ind. Conf. on Expansive Soils, 1:227-236, Haifa, Israel.

Vijayvergiya, U.N. and Sullivan, R.A., (1973), "Simple Technique for Identifying Heave Potential ", Proc. of Workshop on Expansive Clays and Shales, 2:149-154.

Wayne, A.C., Osman, M.A. and Elfatih, M.A., (1984), "Construction on Expansive Soils in Sudan", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 110(3):359-379.

Weston, D.J., (1980), "Expansive Roadbed Treatment for Southern Africa", Proc. 4th Int. Conf. on Expansive Soils, 1:339-360.

Williams, A.B., (1958), "Discussion of Paper The Prediction of Total Heavy From The Double Odometer Test", Trans. S.A. Inst. Civ. Eng., 8(6):8-121.

Williams, A.A.B. and Donaldson, G.W., (1980), "Building on Expansive Soils in South Africa 1973-1980", Proc. 4th Int. Conf. on Expansive Soils, 834-844, Denver, Colorado.

Yıldırım, H. ve Keskin, S.N., (1992), "Killi Zeminlerin Şişme Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi", 7. Mühendislik Haftası Bildiriler Kitabı, Mayıs, Isparta.

Yong, R.N., Sadana, M.L. and Gohl, W.B., (1984), "A Particle Interaction Energy Model for Assessment of Swelling of on Expansive Soil", Proc. 5th Int. Conf. on Expansive Soils, 4-12, (preprints), Adelaide.



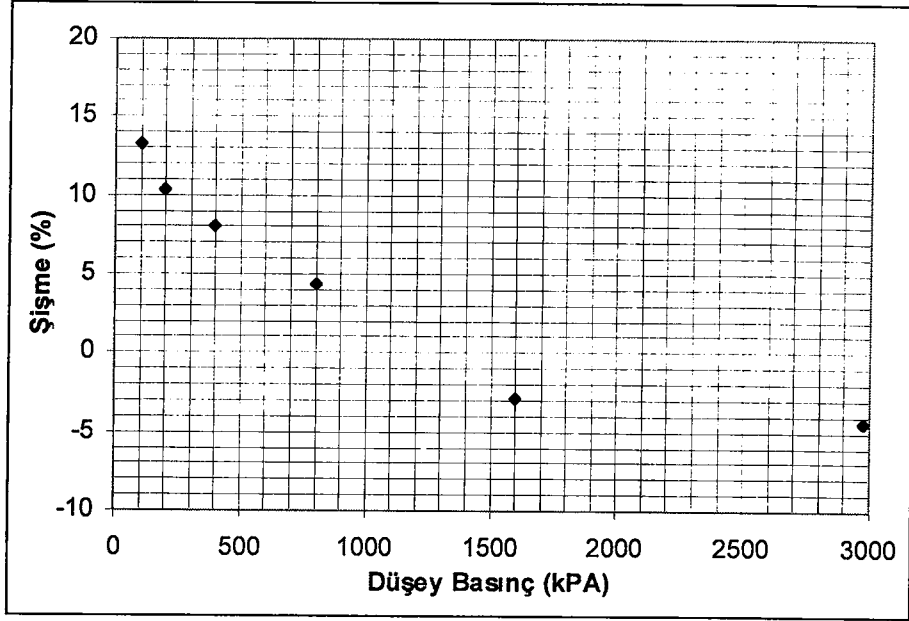
EKLER

A large, stylized, light pink watermark consisting of two overlapping 'X' shapes is centered on the page, behind the word 'EKLER'.

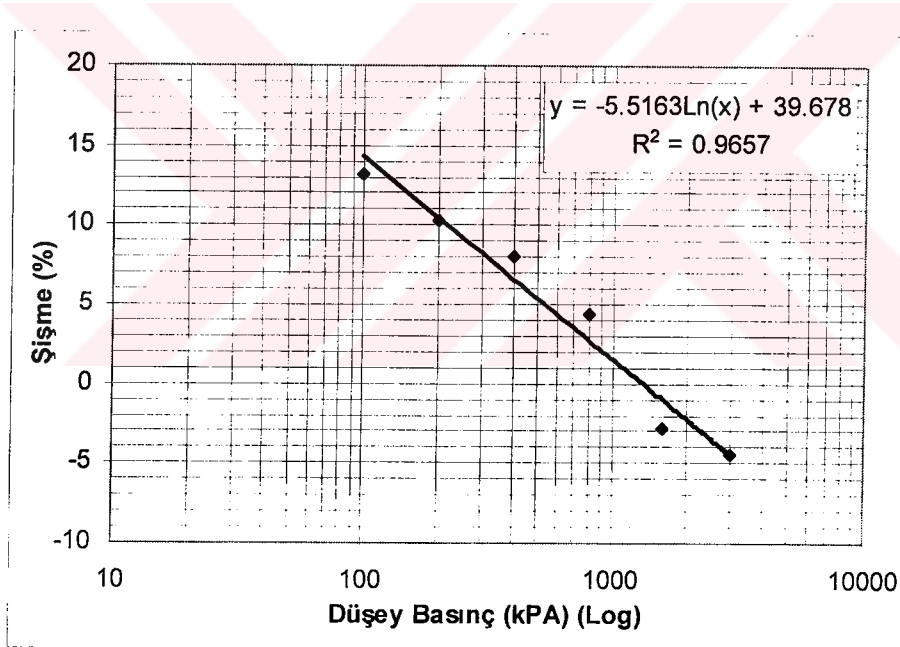
EK 1. Modifiye Proktor Örneklerinin Ödometre Deney Föyleri ve Hesapları ile Bunlara Ait Grafikler

Çizelge 1.1 Ödometre deney föyleri ve hesapları ($\omega=24.00$ Modifiye Proktor).

	Konsolidasyon					
	1	2	3	4	5	6
Ring Ağırlığı (gr)	118.82	72.26	74.04	73.09	75.82	74.49
Ring Çapı (cm)	7.50	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ring Yüksekliği (cm)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
(DÖ) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	285.58	150.15	149.39	149.80	151.41	148.13
(DS) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	297.08	157.02	157.43	155.57	157.12	152.41
(DS) Ring+Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	256.65	133.94	134.21	134.67	136.64	134.79
Düşey Basınç (kPA)	2973.00	100.00	200.00	400.00	800.00	1600.00
Şişme Miktarı (mm)	-0.89	2.65	2.07	1.61	0.87	-0.57
GÖZLEM						
SIKIŞTIRMA TÜRÜ	MODİFİYE PROKTOR					
ARA HESAPLAR						
Ring Alanı (cm²)	44.179	19.635	19.635	19.635	19.635	19.635
(DÖ) Su Miktarı (gr)	28.930	16.210	15.180	15.130	14.770	13.340
(DS) Su Miktarı (gr)	40.430	23.080	23.220	20.900	20.480	17.620
Kuru Zemin Ağırlığı (gr)	137.830	61.680	60.170	61.580	60.820	60.300
KÜTLE DİYAGRAMINDA						
$H_s=M_s/(G_s \cdot A_{ring} \cdot \gamma_w)$	1.143	1.151	1.123	1.149	1.135	1.125
$H_s=H_i+\Delta H_{swell}-H_{vf}$	0.996	1.090	1.024	1.097	1.044	1.046
(DÖ) $H_w=M_w/A_{ring}$	0.655	0.826	0.773	0.771	0.752	0.679
(DS) $H_w=M_w/A_{ring}$	0.915	1.175	1.183	1.064	1.043	0.897
(DS) $H_{vf}=M_w/A_{ring}$	0.915	1.175	1.183	1.064	1.043	0.897
Dane Birim Hacim Ağırlığı, G_s						
			2.730			
Sıkıştırma Su İçeriği, W (%)						
			24.00			
Sıkıştırılmış Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m³)						
			14.80			
DENEY ÖNCESİ						
Örnek Ağırlığı (gr)	166.760	77.890	75.350	76.710	75.590	73.640
Su İçeriği, w (%)	20.990	26.281	25.229	24.570	24.285	22.123
Doygunluk, S (%)	65.214	90.676	79.246	85.293	78.682	71.188
Boşluk Oranı, e (%)	75.009	73.811	78.173	74.093	76.269	77.789
Şişme Yüzdesi (%)	1.008	0.836	0.952	0.824	0.916	0.913
DENEY SONRASI						
Örnek Ağırlığı (gr)	178.260	38.200	38.610	36.750	38.300	33.590
Su İçeriği, w (%)	29.333	37.419	38.591	33.940	33.673	29.221
Doygunluk, S (%)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Boşluk Oranı, e (%)	0.801	1.022	1.054	0.927	0.919	0.798
Şişme Yüzdesi (%)	-4.450	13.250	10.350	8.050	4.350	-2.850



(a)



(b)

Şekil Ek1.1 Çizelge Ek 1.1'e ait grafikler.
 (a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.

Çizelge Ek 1.2 Ödometre deney föyleri ve hesapları ($\omega=\%24.85$ Modifiye Proktor).

	Konsolidasyon					
	1	2	3	4	5	6
Ring Ağırlığı (gr)	116.48	76.34	74.72	76.93	78.57	76.09
Ring Çapı (cm)	7.50	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ring Yüksekliği (cm)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
(DÖ) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	286.75	149.92	151.58	151.86	156.25	152.63
(DS) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	307.25	157.87	158.69	158.09	161.27	156.27
(DS) Ring+Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	253.83	135.66	136.05	137.47	141.03	137.70
Düşey Basınç (kPA)	50.00	100.00	200.00	400.00	800.00	1600.00
Şişme Miktarı (mm)	2.93	2.78	2.20	1.71	0.98	0.05

GÖZLEM**SIKIŞTIRMA TÜRÜ****MODİFİYE PROKTOR****ARA HESAPLAR**

Ring Alanı (cm ²)	44.179	19.635	19.635	19.635	19.635	19.635
(DÖ) Su Miktarı (gr)	32.920	14.260	15.530	14.390	15.220	14.930
(DS) Su Miktarı (gr)	53.420	22.210	22.640	20.620	20.240	18.570
Kuru Zemin Ağırlığı (gr)	137.350	59.320	61.330	60.540	62.460	61.610

KÜTLE DİYAGRAMINDA

$H_s = M_s / (G_s \cdot A_{ring} \cdot g_w)$	1.139	1.107	1.144	1.129	1.165	1.149
$H_s = H_i + \Delta H_{swell} - H_{vf}$	1.084	1.147	1.067	1.121	1.067	1.059
(DÖ) $H_w = M_w / A_{ring}$	0.745	0.726	0.791	0.733	0.775	0.760
(DS) $H_w = M_w / A_{ring}$	1.209	1.131	1.153	1.050	1.031	0.946
(DS) $H_{vf} = M_w / A_{ring}$	1.209	1.131	1.153	1.050	1.031	0.946

Dane Birim Hacim Ağırlığı, G_s

2.730

Sıkıştırma Su İçeriği, W (%)

24.85

Sıkıştırılmış Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m³)

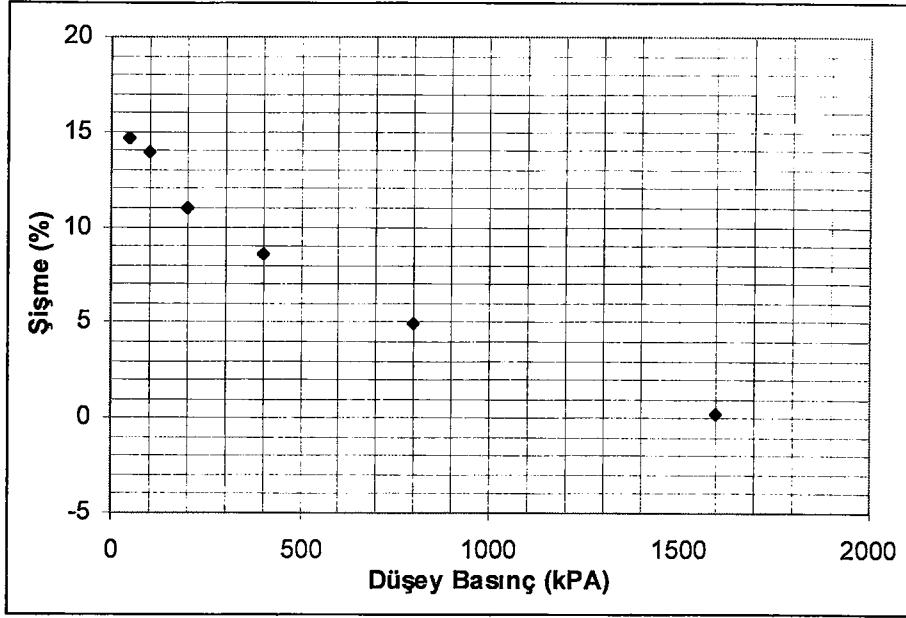
14.80

DENEY ÖNCESİ

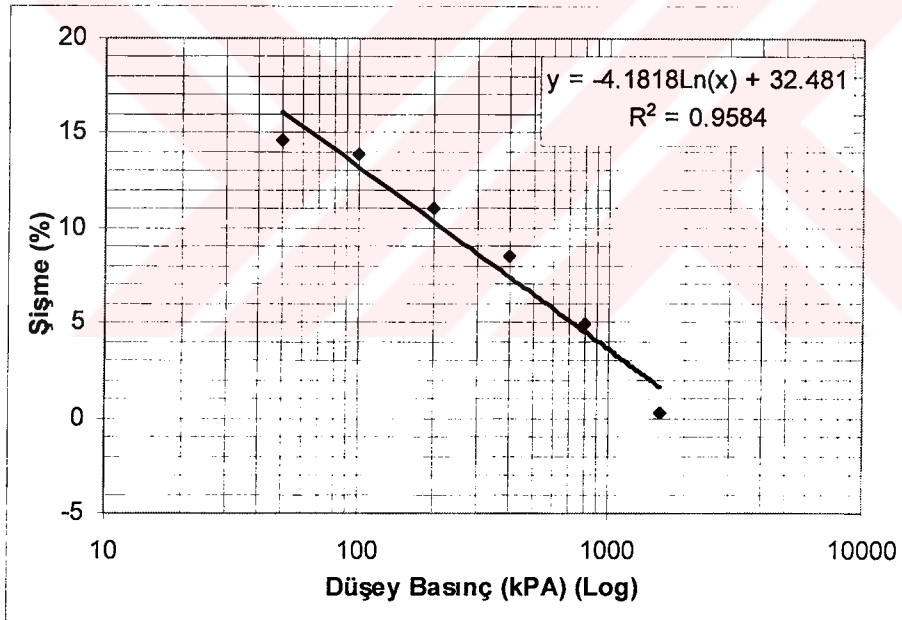
Örnek Ağırlığı (gr)	170.270	73.580	76.860	74.930	77.680	76.540
Su İçeriği, w (%)	23.968	24.039	25.322	23.769	24.368	24.233
Doygunluk, S (%)	81.333	85.127	84.769	83.360	83.098	80.826
Boşluk Oranı, e (%)	75.621	80.726	74.803	77.084	71.641	74.009
Şişme Yüzdesi (%)	0.845	0.744	0.874	0.784	0.874	0.888

DENEY SONRASI

Örnek Ağırlığı (gr)	190.770	41.390	42.210	41.610	44.790	39.790
Su İçeriği, w (%)	38.893	37.441	36.915	34.060	32.405	30.141
Doygunluk, S (%)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Boşluk Oranı, e (%)	1.062	1.022	1.008	0.930	0.885	0.823
Şişme Yüzdesi (%)	14.650	13.900	11.000	8.550	4.900	0.250



(a)

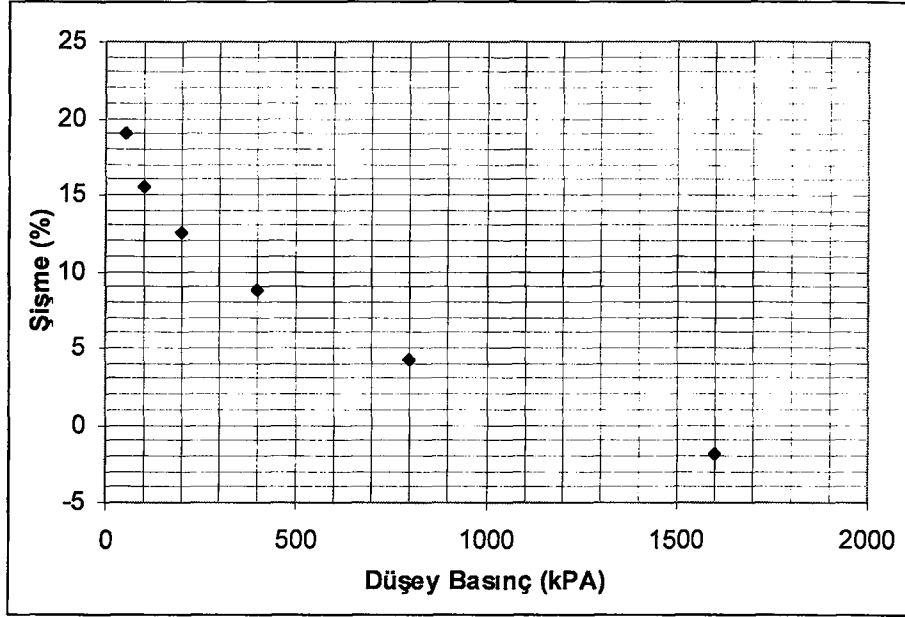


(b)

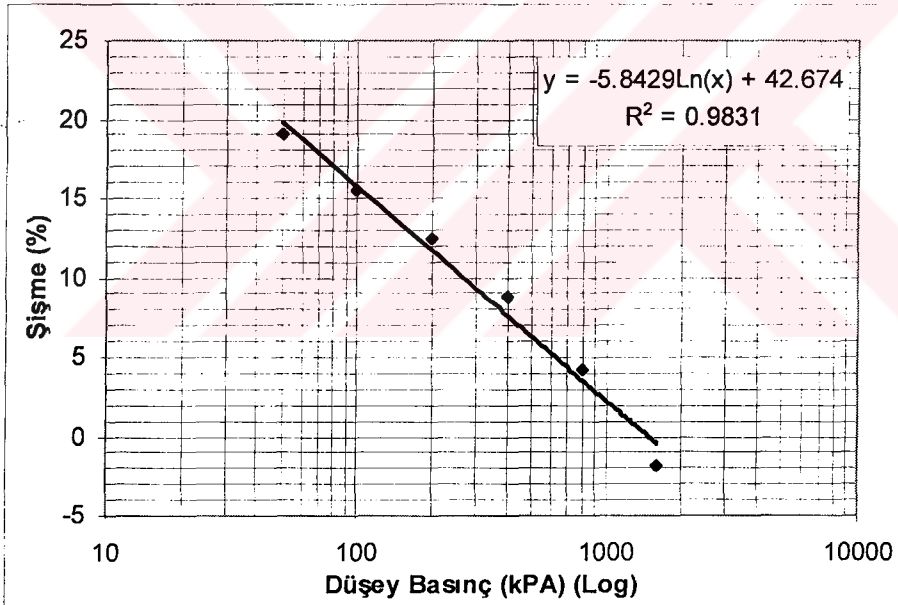
Şekil Ek1.2 Çizelge Ek 1.2'ye ait grafikler.
 (a) Şişme-Düsey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düsey basınç (Log) ilişkisi.

Çizelge Ek 1.3 Ödometre deney föyleri ve hesapları ($\omega=\%25.60$ Modifiye Proktor).

	Konsolidasyon					
	1	2	3	4	5	6
Ring Ağırlığı (gr)	118.86	73.12	72.30	74.52	74.07	75.80
Ring Çapı (cm)	7.50	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ring Yüksekliği (cm)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
(DÖ) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	287.35	148.08	147.06	151.74	151.39	152.65
(DS) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	309.11	156.21	155.39	157.96	156.50	156.56
(DS) Ring+Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	254.09	133.28	132.81	136.38	135.77	137.32
Düşey Basınç (kPA)	50.00	100.00	200.00	400.00	800.00	1600.00
Şişme Miktarı (mm)	3.80	3.10	2.50	1.75	0.85	-0.37
GÖZLEM						
SIKIŞTIRMA TÜRÜ	MODİFİYE PROKTOR					
ARA HESAPLAR						
Ring Alanı (cm²)	44.179	19.635	19.635	19.635	19.635	19.635
(DÖ) Su Miktarı (gr)	33.260	14.800	14.250	15.360	15.620	15.330
(DS) Su Miktarı (gr)	55.020	22.930	22.580	21.580	20.730	19.240
Kuru Zemin Ağırlığı (gr)	135.230	60.160	60.510	61.860	61.700	61.520
KÜTLE DİYAGRAMINDA						
$H_s=M_s/(G_s \cdot A_{\text{ring}} \cdot g_w)$	1.121	1.122	1.129	1.154	1.151	1.148
$H_s=H_i+\Delta H_{\text{swell}}-H_{vf}$	1.135	1.142	1.100	1.076	1.029	0.983
(DÖ) $H_w=M_w/A_{\text{ring}}$	0.753	0.754	0.726	0.782	0.796	0.781
(DS) $H_w=M_w/A_{\text{ring}}$	1.245	1.168	1.150	1.099	1.056	0.980
(DS) $H_{vf}=M_w/A_{\text{ring}}$	1.245	1.168	1.150	1.099	1.056	0.980
Dane Birim Hacim Ağırlığı, G_s			2.730			
Sıkıştırma Su İçeriği, W (%)			25.60			
Sıkıştırılmış Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m³)			14.51			
DENEY ÖNCESİ						
Örnek Ağırlığı (gr)	168.490	74.960	74.760	77.220	77.320	76.850
Su İçeriği, w (%)	24.595	24.601	23.550	24.830	25.316	24.919
Doygunluk, S (%)	86.995	87.869	80.639	84.657	81.947	76.779
Boşluk Oranı, e (%)	78.374	78.203	77.172	73.305	73.755	74.263
Şişme Yüzdesi (%)	0.763	0.751	0.818	0.859	0.943	1.034
DENEY SONRASI						
Örnek Ağırlığı (gr)	190.250	37.350	36.530	39.100	37.640	37.700
Su İçeriği, w (%)	40.686	38.115	37.316	34.885	33.598	31.274
Doygunluk, S (%)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Boşluk Oranı, e (%)	1.111	1.041	1.019	0.952	0.917	0.854
Şişme Yüzdesi (%)	19.000	15.500	12.500	8.750	4.250	-1.850



(a)



(b)

Şekil Ek1.3 Çizelge Ek 1.3'e ait grafikler.

(a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.

Çizelge Ek 1.4 Ödometre deney föyleri ve hesapları ($\omega=31.00$ Modifiye Proktor).

	Konsolidasyon					
	1	2	3	4	5	6
Ring Ağırlığı (gr)	116.55	74.77	76.94	76.10	76.34	78.58
Ring Çapı (cm)	7.50	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ring Yüksekliği (cm)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
(DÖ) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	285.12	151.71	151.17	152.32	151.46	153.87
(DS) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	297.50	156.34	155.43	155.51	153.00	154.48
(DS) Ring+Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	249.04	135.21	135.32	135.93	135.10	137.65
Düşey Basınç (kPa)	50.00	100.00	200.00	400.00	800.00	1600.00
Şişme Miktarı (mm)	2.85	1.79	1.22	0.82	-0.05	-0.55

GÖZLEM						
SIKIŞTIRMA TÜRÜ	MODİFİYE PROKTOR					

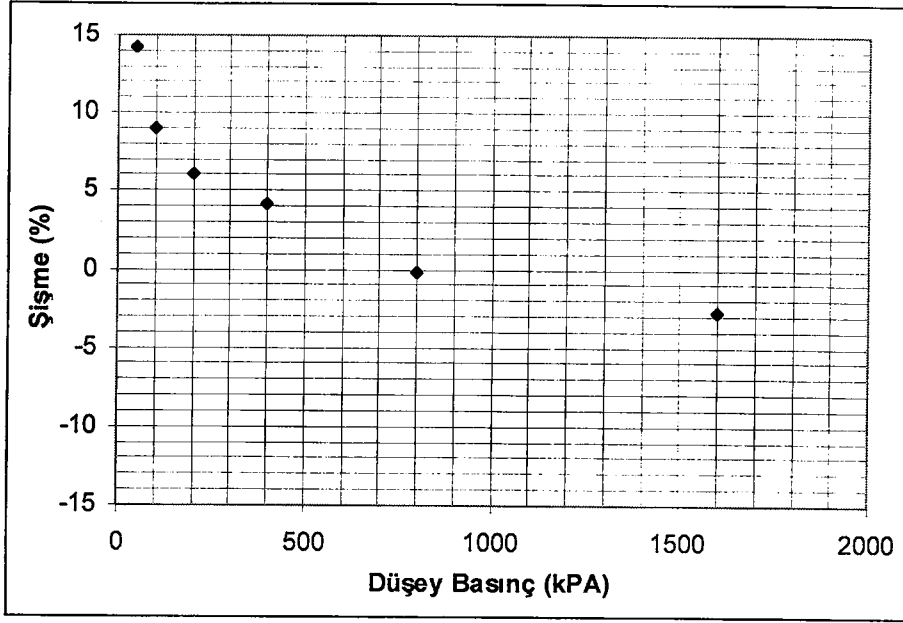
ARA HESAPLAR						
Ring Alanı (cm ²)	44.179	19.635	19.635	19.635	19.635	19.635
(DÖ) Su Miktarı (gr)	36.080	16.500	15.850	16.390	16.360	16.220
(DS) Su Miktarı (gr)	48.460	21.130	20.110	19.580	17.900	16.830
Kuru Zemin Ağırlığı (gr)	132.490	60.440	58.380	59.830	58.760	59.070

KÜTLE DİYAGRAMINDA						
$H_s = M_s / (G_s \cdot A_{\text{ring}} \cdot g_w)$	1.099	1.128	1.089	1.116	1.096	1.102
$H_s = H_i + \Delta H_{\text{swell}} - H_{vf}$	1.188	1.103	1.097	1.085	1.083	1.088
(DÖ) $H_w = M_w / A_{\text{ring}}$	0.817	0.840	0.807	0.835	0.833	0.826
(DS) $H_w = M_w / A_{\text{ring}}$	1.097	1.076	1.024	0.997	0.912	0.857
(DS) $H_{vf} = M_w / A_{\text{ring}}$	1.097	1.076	1.024	0.997	0.912	0.857

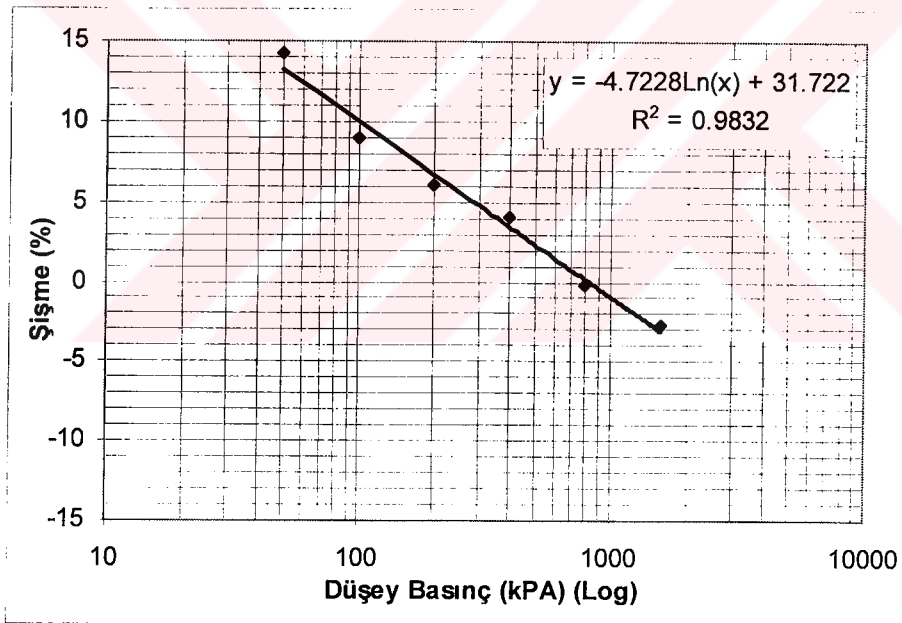
Dane Birim Hacim Ağırlığı, G_s	2.730					
Sıkıştırma Su İçeriği, W (%)	31.00					
Sıkıştırılmış Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	14.20					

DENEY ÖNCESİ						
Örnek Ağırlığı (gr)	168.570	76.940	74.230	76.220	75.120	75.290
Su İçeriği, w (%)	27.232	27.300	27.150	27.394	27.842	27.459
Doygunluk, S (%)	100.588	93.668	89.425	91.208	90.898	90.564
Boşluk Oranı, e (%)	82.063	77.377	83.636	79.186	82.449	81.491
Şişme Yüzdesi (%)	0.683	0.813	0.823	0.844	0.846	0.838

DENEY SONRASI						
Örnek Ağırlığı (gr)	180.950	39.790	38.880	38.960	36.450	37.930
Su İçeriği, w (%)	36.576	34.960	34.447	32.726	30.463	28.492
Doygunluk, S (%)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Boşluk Oranı, e (%)	0.999	0.954	0.940	0.893	0.832	0.778
Şişme Yüzdesi (%)	14.250	8.950	6.075	4.100	-0.250	-2.750



(a)



(b)

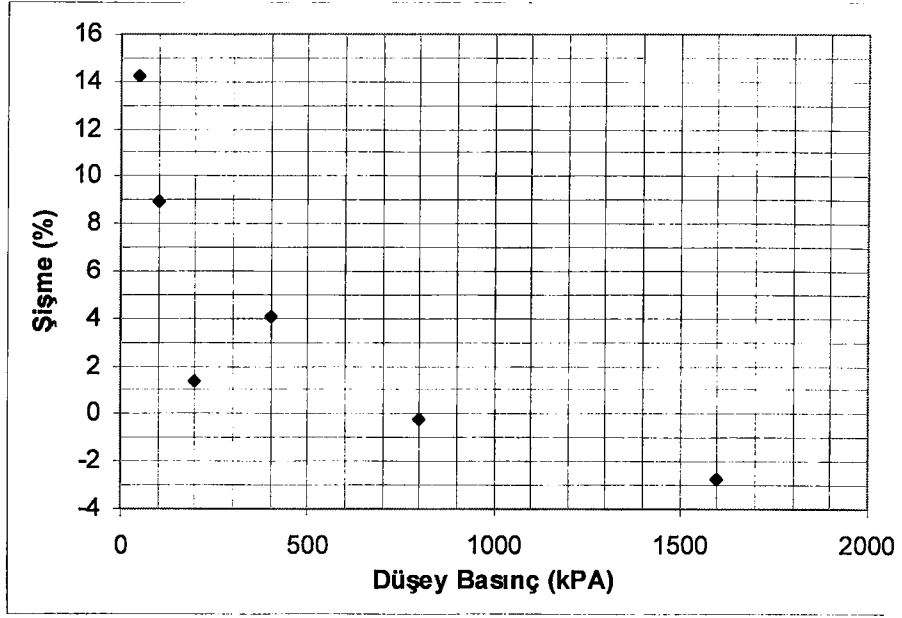
Ŗekil Ek1.4 Çizelge Ek 1.4'e ait grafikler.

(a) ŖiŖme-DüŖey basınç iliŖkisi. (b) ŖiŖme-DüŖey basınç (Log) iliŖkisi.

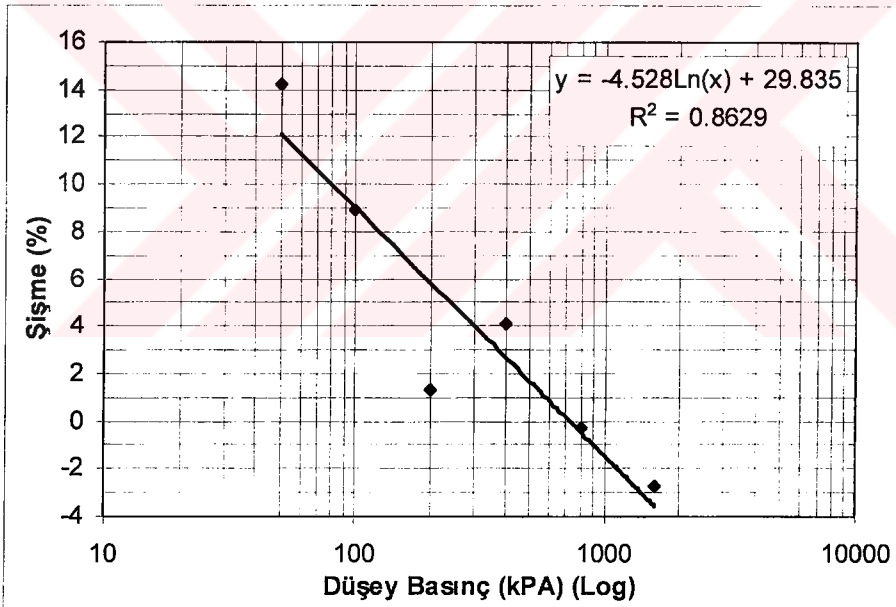
EK 2. Standart Proktor Örneklerinin Ödometre Deney Föyleri ve Hesapları ile Bunlara Ait Grafikler

Çizelge Ek 2.1 Ödometre deney föyleri ve hesapları ($\omega=\%27.60$ Standart Proktor).

	Konsolidasyon					
	1	2	3	4	5	6
Ring Ağırlığı (gr)	116.55	74.77	76.94	76.10	76.34	78.58
Ring Çapı (cm)	7.50	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ring Yüksekliği (cm)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
(DÖ) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	285.12	151.71	151.17	152.32	151.46	153.87
(DS) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	297.50	156.34	155.43	155.51	153.00	154.48
(DS) Ring+Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	249.04	135.21	135.32	135.93	135.10	137.65
Düşey Basınç (kPA)	50.00	100.00	200.00	400.00	800.00	1600.00
Şişme Miktarı (mm)	2.85	1.79	0.27	0.82	-0.05	-0.55
GÖZLEM	Karışım kuru, ringe örnek sokulması zor ve ufalanma oluyor.					
SIKIŞTIRMA TÜRÜ	STANDART PROKTOR					
ARA HESAPLAR						
Ring Alanı (cm²)	44.179	19.635	19.635	19.635	19.635	19.635
(DÖ) Su Miktarı (gr)	36.080	16.500	15.850	16.390	16.360	16.220
(DS) Su Miktarı (gr)	48.460	21.130	20.110	19.580	17.900	16.830
Kuru Zemin Ağırlığı (gr)	132.490	60.440	58.380	59.830	58.760	59.070
KÜTLE DİYAGRAMINDA						
$H_s=M_s/(G_s \cdot A_{ring} \cdot g_w)$	1.099	1.128	1.089	1.116	1.096	1.102
$H_s=H_i+\Delta H_{swell}-H_{vf}$	1.188	1.103	1.003	1.085	1.083	1.088
(DÖ) $H_w=M_w/A_{ring}$	0.817	0.840	0.807	0.835	0.833	0.826
(DS) $H_w=M_w/A_{ring}$	1.097	1.076	1.024	0.997	0.912	0.857
(DS) $H_{vf}=M_w/A_{ring}$	1.097	1.076	1.024	0.997	0.912	0.857
Dane Birim Hacim Ağırlığı, G_s	2.730					
Sıkıştırma Su İçeriği, W (%)	27.60					
Sıkıştırılmış Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m³)	12.20					
DENEY ÖNCESİ						
Örnek Ağırlığı (gr)	168.570	76.940	74.230	76.220	75.120	75.290
Su İçeriği, w (%)	27.232	27.300	27.150	27.394	27.842	27.459
Doygunluk, S (%)	100.588	93.668	80.951	91.208	90.898	90.564
Boşluk Oranı, e (%)	82.063	77.377	83.636	79.186	82.449	81.491
Şişme Yüzdesi (%)	0.683	0.813	0.994	0.844	0.846	0.838
DENEY SONRASI						
Örnek Ağırlığı (gr)	180.950	81.570	78.490	79.410	76.660	75.900
Su İçeriği, w (%)	36.576	34.960	34.447	32.726	30.463	28.492
Doygunluk, S (%)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Boşluk Oranı, e (%)	0.999	0.954	0.940	0.893	0.832	0.778
Şişme Yüzdesi (%)	14.250	8.950	1.350	4.100	-0.250	-2.750



(a)



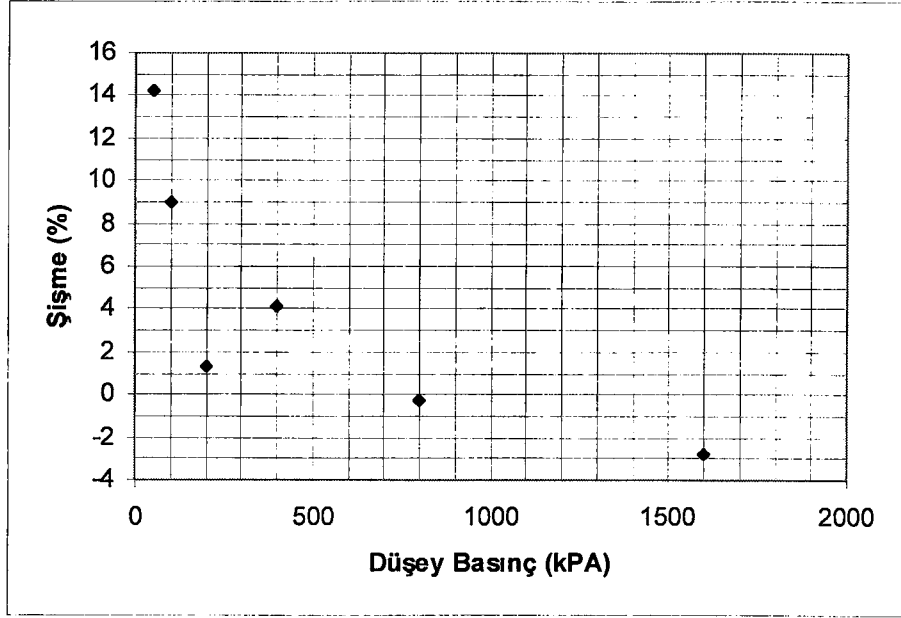
(b)

Şekil Ek2.1 Çizelge Ek 2.1'e ait grafikler.

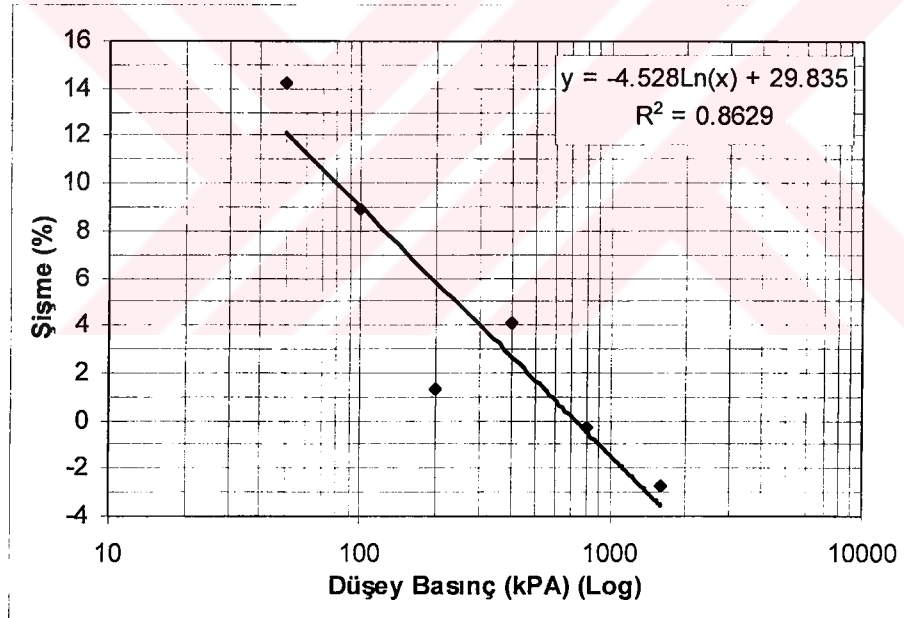
(a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.

Çizelge Ek 2.2 Ödometre deney föyleri ve hesapları ($\omega=\%28.00$ Standart Proktor).

	Konsolidasyon					
	1	2	3	4	5	6
Ring Ağırlığı (gr)	116.55	74.77	76.94	76.10	76.34	78.58
Ring Çapı (cm)	7.50	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ring Yüksekliği (cm)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
(DÖ) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	285.12	151.71	151.17	152.32	151.46	153.87
(DS) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	297.50	156.34	155.43	155.51	153.00	154.48
(DS) Ring+Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	249.04	135.21	135.32	135.93	135.10	137.65
Düşey Basınç (kPA)	50.00	100.00	200.00	400.00	800.00	1600.00
Şişme Miktarı (mm)	2.85	1.79	0.27	0.82	-0.05	-0.55
GÖZLEM	Karışım kuru, ringe örnek sokulması zor ve ufalanma oluyor.					
SIKIŞTIRMA TÜRÜ	STANDART PROKTOR					
ARA HESAPLAR						
Ring Alanı (cm²)	44.179	19.635	19.635	19.635	19.635	19.635
(DÖ) Su Miktarı (gr)	36.080	16.500	15.850	16.390	16.360	16.220
(DS) Su Miktarı (gr)	48.460	21.130	20.110	19.580	17.900	16.830
Kuru Zemin Ağırlığı (gr)	132.490	60.440	58.380	59.830	58.760	59.070
KÜTLE DİYAGRAMINDA						
$H_s=M_s/(G_s \cdot A_{ring} \cdot g_w)$	1.099	1.128	1.089	1.116	1.096	1.102
$H_s=H_i+\Delta H_{swell}-H_{vf}$	1.188	1.103	1.003	1.085	1.083	1.088
(DÖ) $H_w=M_w/A_{ring}$	0.817	0.840	0.807	0.835	0.833	0.826
(DS) $H_w=M_w/A_{ring}$	1.097	1.076	1.024	0.997	0.912	0.857
(DS) $H_{vf}=M_w/A_{ring}$	1.097	1.076	1.024	0.997	0.912	0.857
Dane Birim Hacim Ağırlığı, G_s	2.730					
Sıkıştırma Su İçeriği, W (%)	28.00					
Sıkıştırılmış Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m³)	12.36					
DENEY ÖNCESİ						
Örnek Ağırlığı (gr)	168.570	76.940	74.230	76.220	75.120	75.290
Su İçeriği, w (%)	27.232	27.300	27.150	27.394	27.842	27.459
Doygunluk, S (%)	100.588	93.668	80.951	91.208	90.898	90.564
Boşluk Oranı, e (%)	82.063	77.377	83.636	79.186	82.449	81.491
Şişme Yüzdesi (%)	0.683	0.813	0.994	0.844	0.846	0.838
DENEY SONRASI						
Örnek Ağırlığı (gr)	180.950	81.570	78.490	79.410	76.660	75.900
Su İçeriği, w (%)	36.576	34.960	34.447	32.726	30.463	28.492
Doygunluk, S (%)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Boşluk Oranı, e (%)	0.999	0.954	0.940	0.893	0.832	0.778
Şişme Yüzdesi (%)	14.250	8.950	1.350	4.100	-0.250	-2.750



(a)



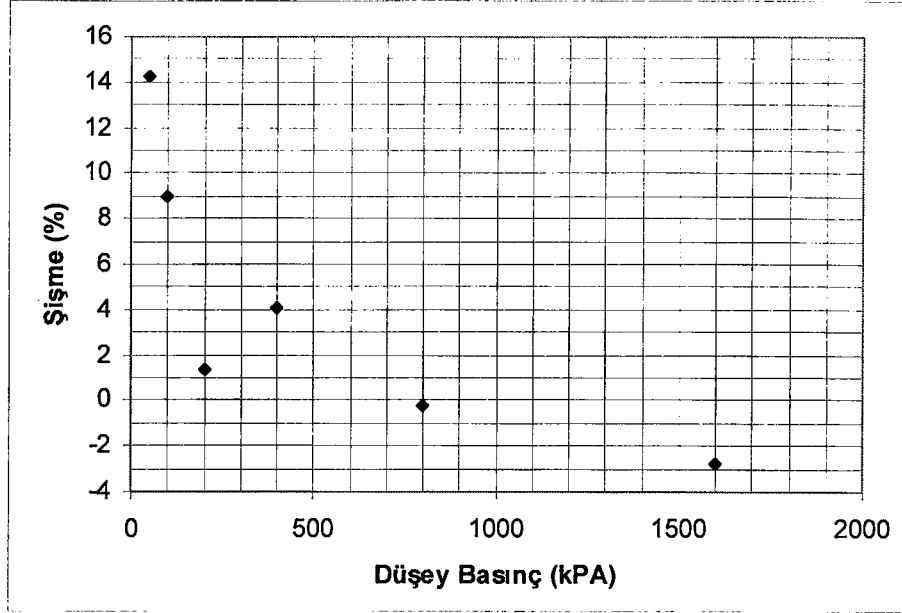
(b)

Şekil Ek2.2 Çizelge Ek 2.2'ye ait grafikler.

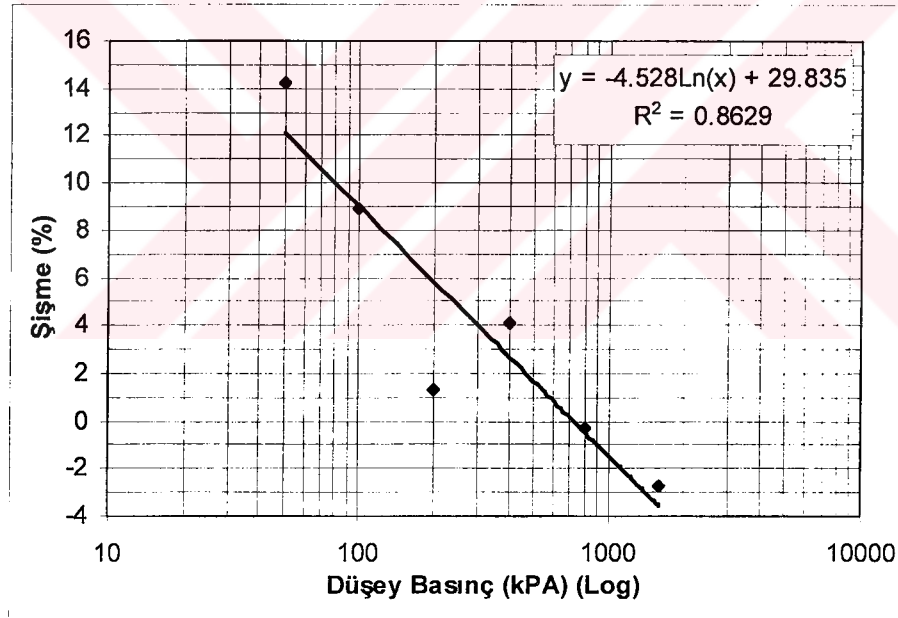
(a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.

Çizelge Ek 2.3 Ödometre deney föyleri ve hesapları (ω =%29.00 Standart Proktor).

	Konsolidasyon					
	1	2	3	4	5	6
Ring Ağırlığı (gr)	116.55	74.77	76.94	76.10	76.34	78.58
Ring Çapı (cm)	7.50	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ring Yüksekliği (cm)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
(DÖ) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	285.12	151.71	151.17	152.32	151.46	153.87
(DS) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	297.50	156.34	155.43	155.51	153.00	154.48
(DS) Ring+Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	249.04	135.21	135.32	135.93	135.10	137.65
Düşey Basınc (kPA)	50.00	100.00	200.00	400.00	800.00	1600.00
Şişme Miktarı (mm)	2.85	1.79	0.27	0.82	-0.05	-0.55
GÖZLEM	Karışım kuru, ringe örnek sokulması zor ve ufalanma oluyor.					
SIKIŞTIRMA TÜRÜ	STANDART PROKTOR					
ARA HESAPLAR						
Ring Alanı (cm²)	44.179	19.635	19.635	19.635	19.635	19.635
(DÖ) Su Miktarı (gr)	36.080	16.500	15.850	16.390	16.360	16.220
(DS) Su Miktarı (gr)	48.460	21.130	20.110	19.580	17.900	16.830
Kuru Zemin Ağırlığı (gr)	132.490	60.440	58.380	59.830	58.760	59.070
KÜTLE DİYAGRAMINDA						
$H_s=M_s/(G_s \cdot A_{ring} \cdot g_w)$	1.099	1.128	1.089	1.116	1.096	1.102
$H_s=H_i+\Delta H_{swell}-H_{vf}$	1.188	1.103	1.003	1.085	1.083	1.088
(DÖ) $H_w=M_w/A_{ring}$	0.817	0.840	0.807	0.835	0.833	0.826
(DS) $H_w=M_w/A_{ring}$	1.097	1.076	1.024	0.997	0.912	0.857
(DS) $H_{vf}=M_w/A_{ring}$	1.097	1.076	1.024	0.997	0.912	0.857
Dane Birim Hacim Ağırlığı, G_s	2.730					
Sıkıştırma Su İçeriği, W (%)	29.00					
Sıkıştırılmış Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m³)	12.56					
DENEY ÖNCESİ						
Örnek Ağırlığı (gr)	168.570	76.940	74.230	76.220	75.120	75.290
Su İçeriği, w (%)	27.232	27.300	27.150	27.394	27.842	27.459
Doygunluk, S (%)	100.588	93.668	80.951	91.208	90.898	90.564
Boşluk Oranı, e (%)	82.063	77.377	83.636	79.186	82.449	81.491
Şişme Yüzdesi (%)	0.683	0.813	0.994	0.844	0.846	0.838
DENEY SONRASI						
Örnek Ağırlığı (gr)	180.950	81.570	78.490	79.410	76.660	75.900
Su İçeriği, w (%)	36.576	34.960	34.447	32.726	30.463	28.492
Doygunluk, S (%)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Boşluk Oranı, e (%)	0.999	0.954	0.940	0.893	0.832	0.778
Şişme Yüzdesi (%)	14.250	8.950	1.350	4.100	-0.250	-2.750



(a)



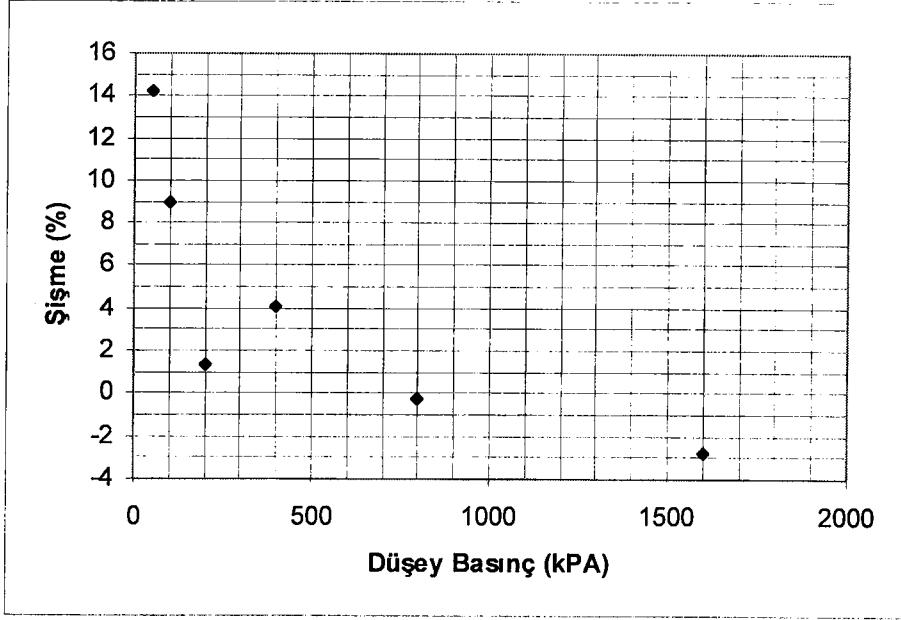
(b)

Şekil Ek2.3 Çizelge Ek 2.3'e ait grafikler.

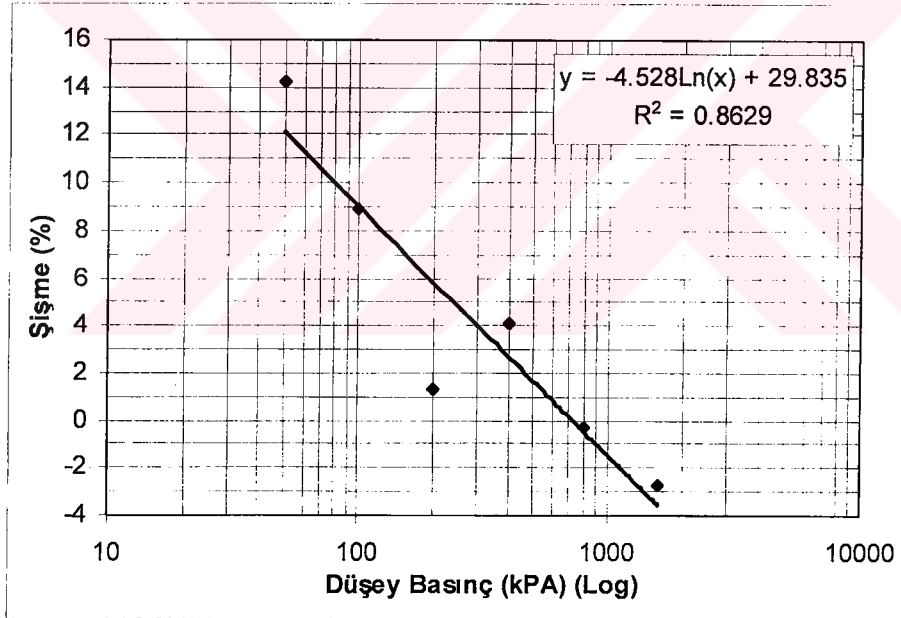
(a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.

Çizelge Ek 2.4 Ödometre deney föyleri ve hesapları (ω =%33.60 Standart Proktor).

	Konsolidasyon					
	1	2	3	4	5	6
Ring Ağırlığı (gr)	116.55	74.77	76.94	76.10	76.34	78.58
Ring Çapı (cm)	7.50	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ring Yüksekliği (cm)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
(DÖ) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	285.12	151.71	151.17	152.32	151.46	153.87
(DS) Ring+Örnek Ağırlığı (gr)	297.50	156.34	155.43	155.51	153.00	154.48
(DS) Ring+Kuru Örnek Ağırlığı (gr)	249.04	135.21	135.32	135.93	135.10	137.65
Düşey Basınç (kPA)	50.00	100.00	200.00	400.00	800.00	1600.00
Şişme Miktarı (mm)	2.85	1.79	0.27	0.82	-0.05	-0.55
GÖZLEM Karışım kuru, ringe örnek sokulması zor ve ufalanma oluyor.						
SIKIŞTIRMA TÜRÜ STANDART PROKTOR						
ARA HESAPLAR						
Ring Alanı (cm²)	44.179	19.635	19.635	19.635	19.635	19.635
(DÖ) Su Miktarı (gr)	36.080	16.500	15.850	16.390	16.360	16.220
(DS) Su Miktarı (gr)	48.460	21.130	20.110	19.580	17.900	16.830
Kuru Zemin Ağırlığı (gr)	132.490	60.440	58.380	59.830	58.760	59.070
KÜTLE DİYAGRAMINDA						
$H_s=M_s/(G_s \cdot A_{ring} \cdot g_w)$	1.099	1.128	1.089	1.116	1.096	1.102
$H_s=H_i+\Delta H_{swell} \cdot H_{vf}$	1.188	1.103	1.003	1.085	1.083	1.088
(DÖ) $H_w=M_w/A_{ring}$	0.817	0.840	0.807	0.835	0.833	0.826
(DS) $H_w=M_w/A_{ring}$	1.097	1.076	1.024	0.997	0.912	0.857
(DS) $H_{vf}=M_w/A_{ring}$	1.097	1.076	1.024	0.997	0.912	0.857
Dane Birim Hacim Ağırlığı, G_s 2.730						
Sıkıştırma Su İçeriği, W (%) 33.60						
Sıkıştırılmış Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m³) 12.15						
DENEY ÖNCESİ						
Örnek Ağırlığı (gr)	168.570	76.940	74.230	76.220	75.120	75.290
Su İçeriği, w (%)	27.232	27.300	27.150	27.394	27.842	27.459
Doygunluk, S (%)	100.588	93.668	80.951	91.208	90.898	90.564
Boşluk Oranı, e (%)	82.063	77.377	83.636	79.186	82.449	81.491
Şişme Yüzdesi (%)	0.683	0.813	0.994	0.844	0.846	0.838
DENEY SONRASI						
Örnek Ağırlığı (gr)	180.950	81.570	78.490	79.410	76.660	75.900
Su İçeriği, w (%)	36.576	34.960	34.447	32.726	30.463	28.492
Doygunluk, S (%)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Boşluk Oranı, e (%)	0.999	0.954	0.940	0.893	0.832	0.778
Şişme Yüzdesi (%)	14.250	8.950	1.350	4.100	-0.250	-2.750



(a)

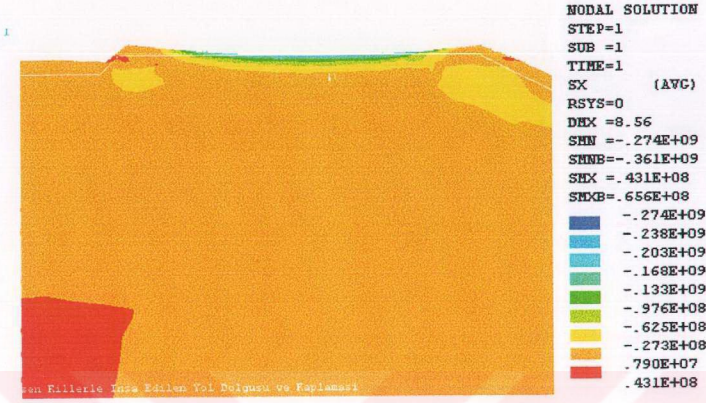


(b)

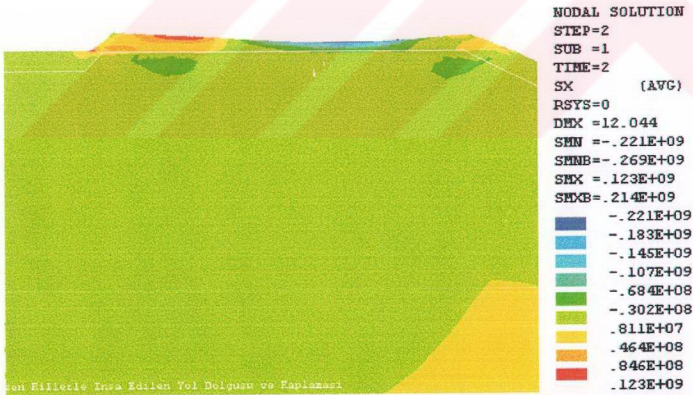
Şekil Ek2.4 Çizelge Ek 2.4'e ait grafikler.

(a) Şişme-Düşey basınç ilişkisi. (b) Şişme-Düşey basınç (Log) ilişkisi.

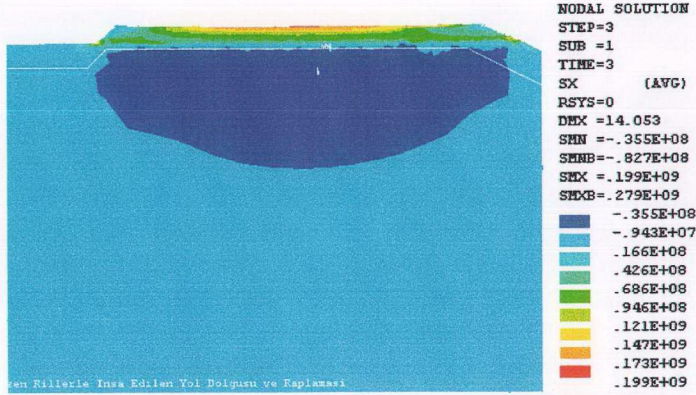
EK 3. Numerik Analiz Sonuçları



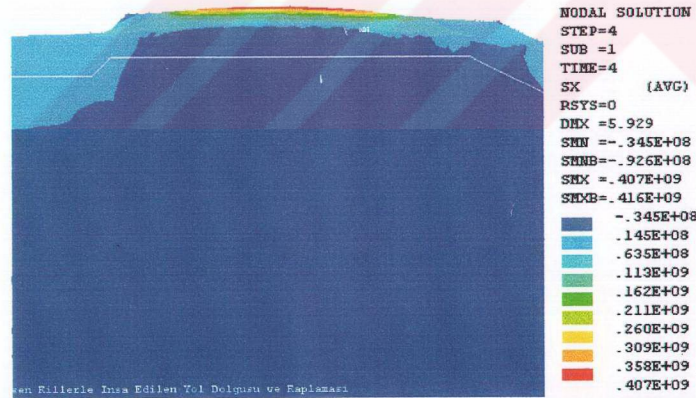
Şekil Ek3.1 Modifiye Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 1 (az ıslanma) durumunda üstüyaşda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



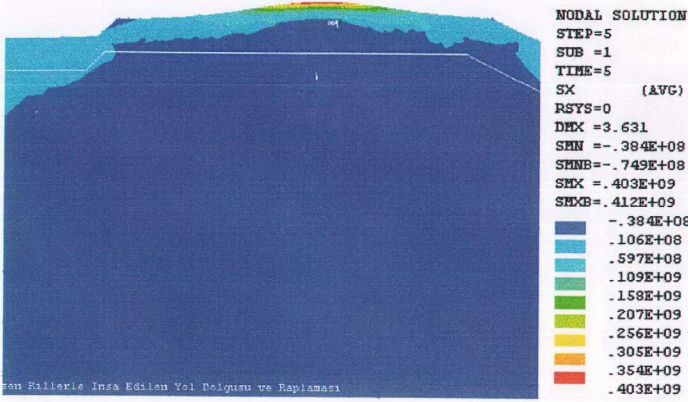
Şekil Ek3.2 Modifiye Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 2 (çok ıslanma) durumunda üstüyaşda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



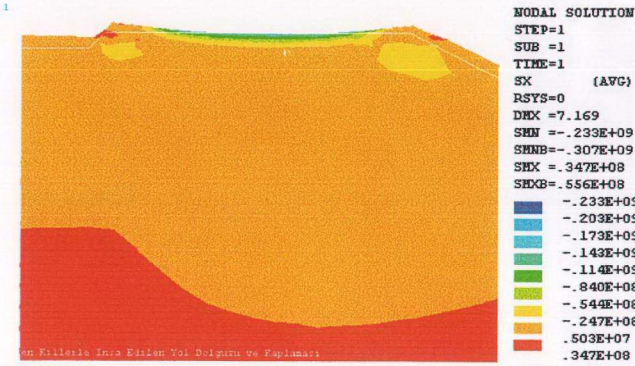
Şekil Ek3.3 Modifiye Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 3 (tüm ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



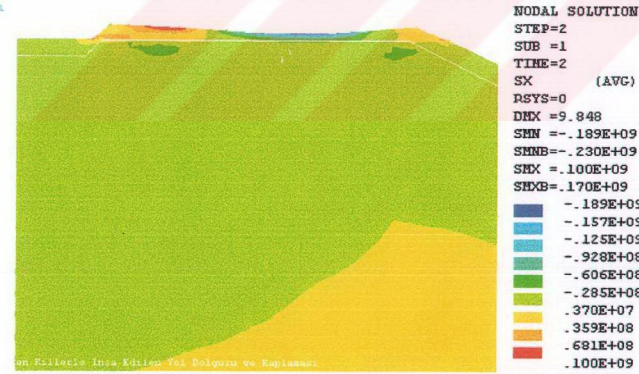
Şekil Ek3.4 Modifiye Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 4 (az kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



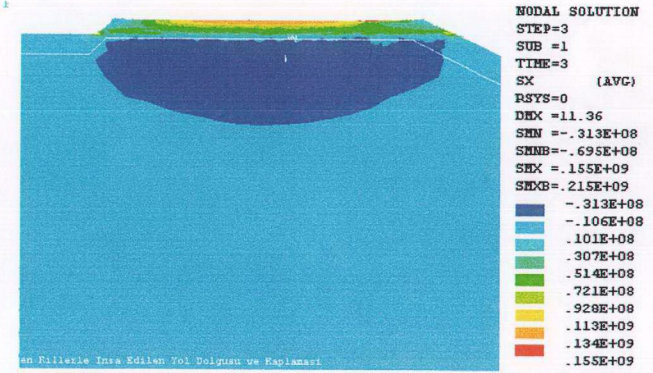
Şekil Ek3.5 Modifiye Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 5 (çok kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



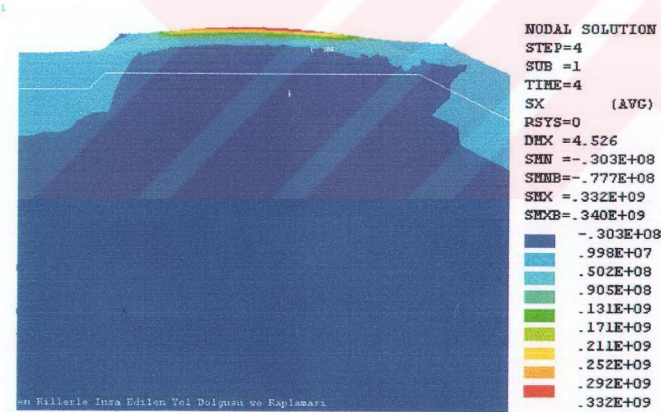
Şekil Ek3.6 Modifiye Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 1 (az ısılama) durumunda üsttyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



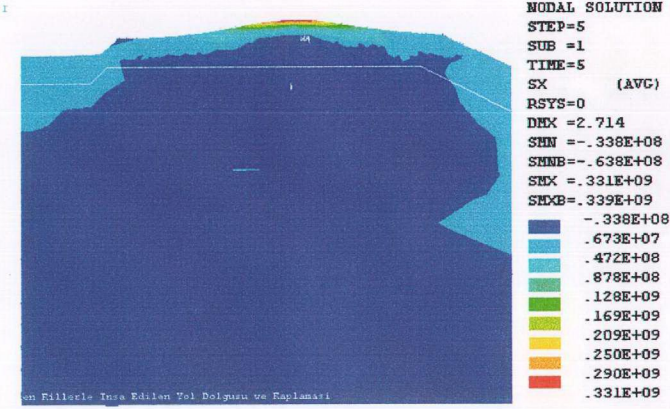
Şekil Ek3.7 Modifiye Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 2 (çok ısılama) durumunda üsttyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



Şekil Ek3.8 Modifiye Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 3 (tüm ısıtma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



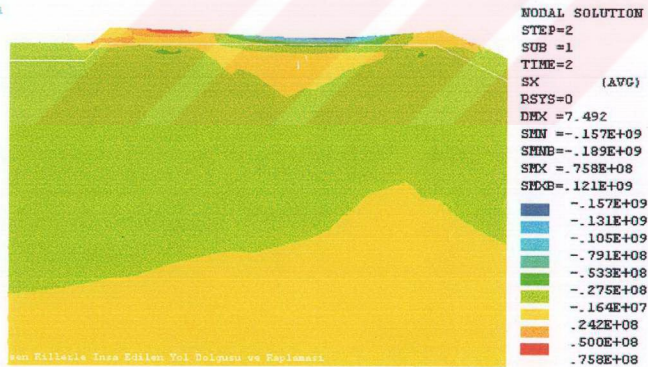
Şekil Ek3.9 Modifiye Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 4 (az kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



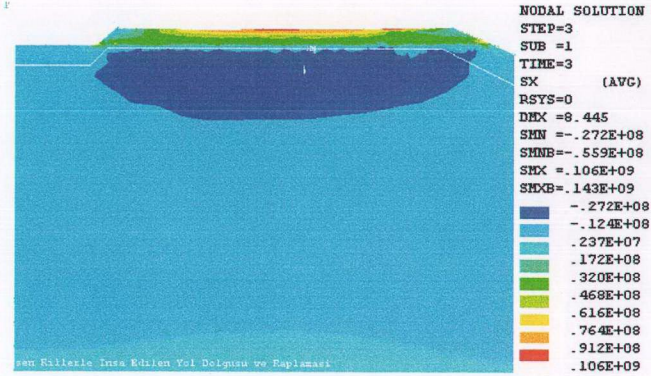
Şekil Ek3.10 Modifiye Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 5 (çok kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



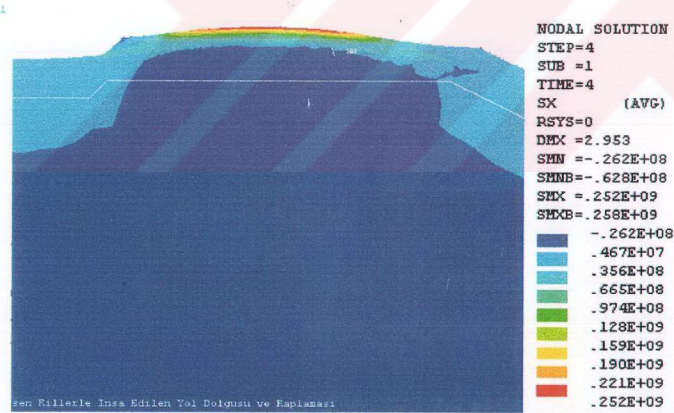
Şekil Ek3.11 Modifiye Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 1 (az ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



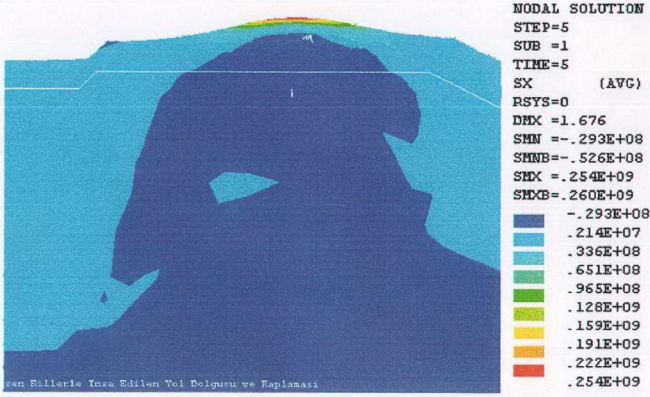
Şekil Ek3.12 Modifiye Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 2 (çok ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



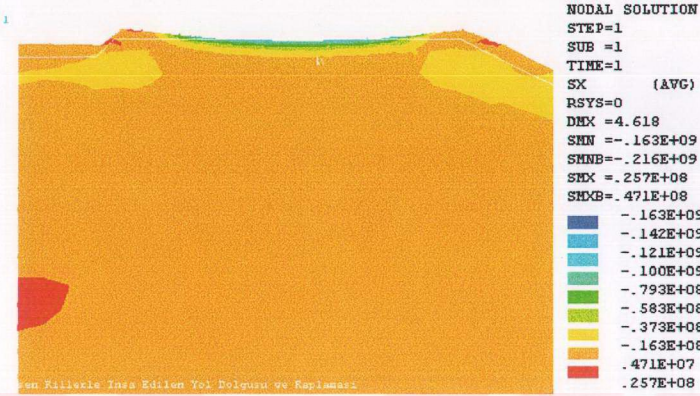
Şekil Ek3.13 Modifiye Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 3 (tüm ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



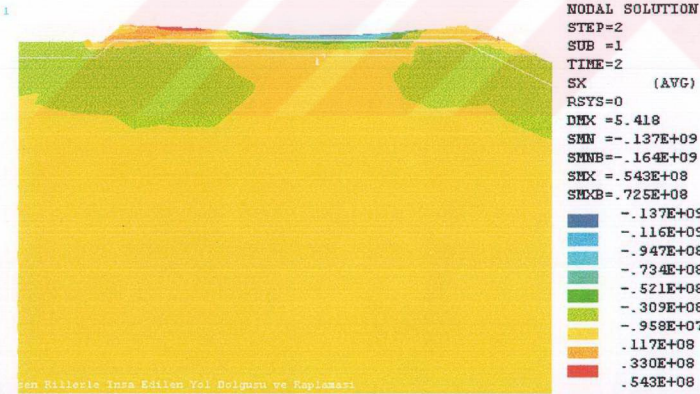
Şekil Ek3.14 Modifiye Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 4 (az kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



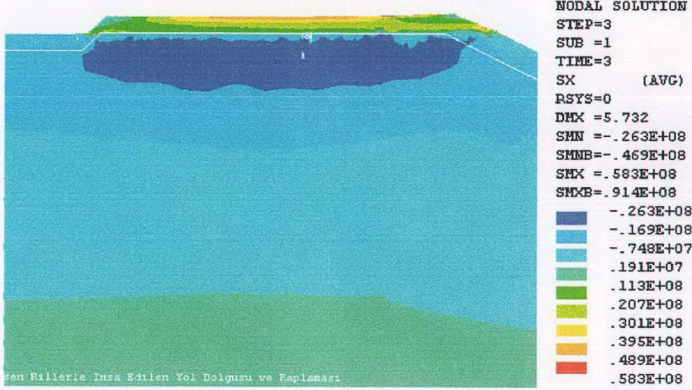
Şekil Ek3.15 Modifiye Proktor'un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 5 (çok kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



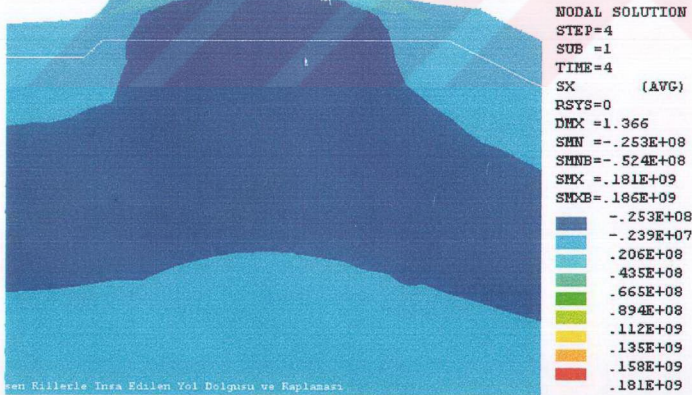
Şekil Ek3.16 Standart Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 1 (az ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



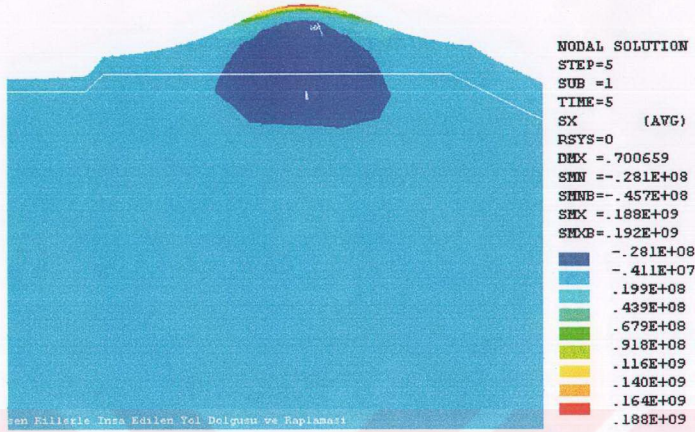
Şekil Ek3.17 Standart Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 2 (çok ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



Şekil Ek3.18 Standart Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 3 (tüm ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



Şekil Ek3.19 Standart Proktor' un optimumunun %5 kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 4 (az kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB =1

TIME=1

SX (AVG)

RSYS=0

DMX =2.796

SMN =-.110E+09

SMNB=-.144E+09

SMX =.210E+08

SEXB=.373E+08

-.110E+09

-.950E+08

-.805E+08

-.660E+08

-.515E+08

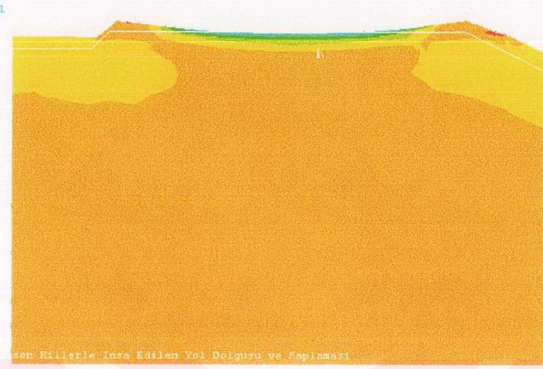
-.370E+08

-.225E+08

-.802E+07

.647E+07

.210E+08



Şen Etilerle İnşa Edilen Yol Dolgusu ve Kaplaması

Şekil Ek3.21 Standart Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 1 (az ısınlama) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri

NODAL SOLUTION

STEP=2

SUB =1

TIME=2

SX (AVG)

RSYS=0

DMX =2.531

SMN =-.957E+08

SMNB=-.112E+09

SMX =.276E+08

SEXB=.462E+08

-.957E+08

-.820E+08

-.683E+08

-.546E+08

-.409E+08

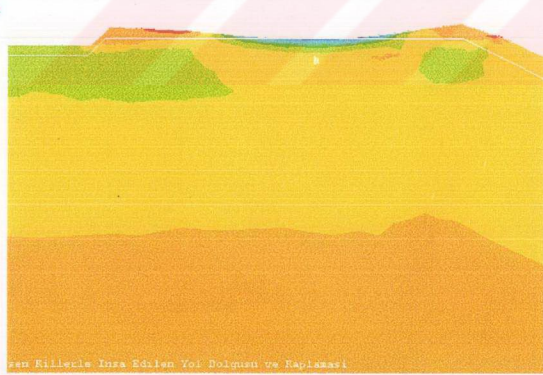
-.272E+08

-.135E+08

220043

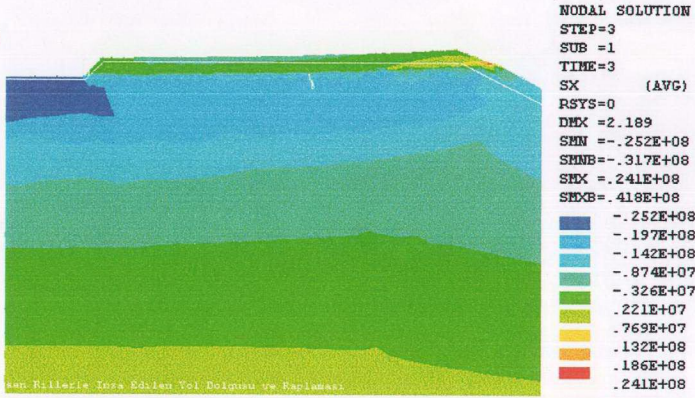
.139E+08

.276E+08

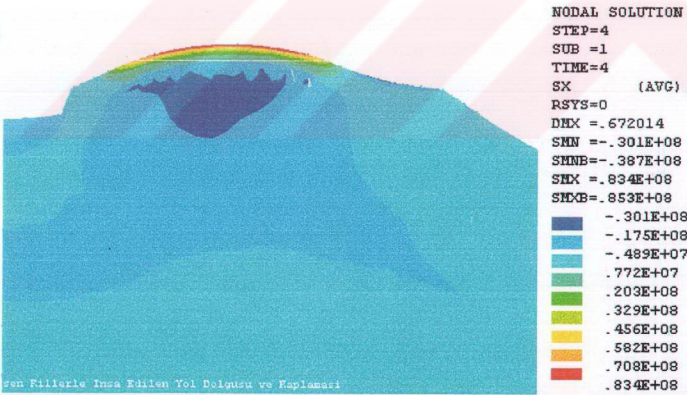


Şen Etilerle İnşa Edilen Yol Dolgusu ve Kaplaması

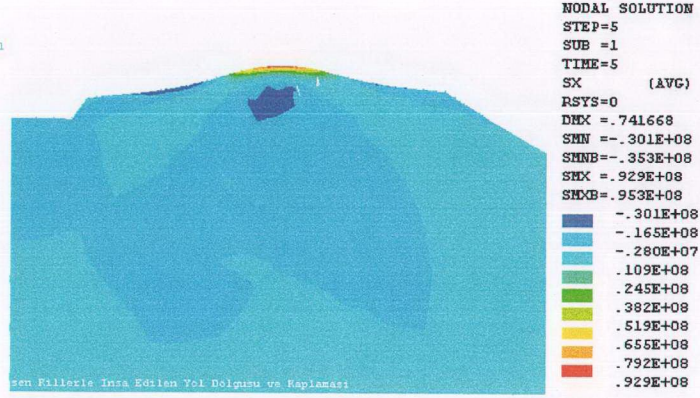
Şekil Ek3.22 Standart Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 2 (çok ısınlama) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



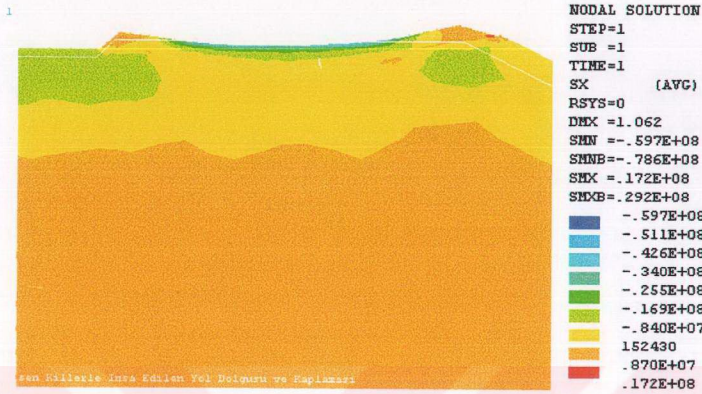
Şekil Ek3.23 Standart Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 3 (tüm ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



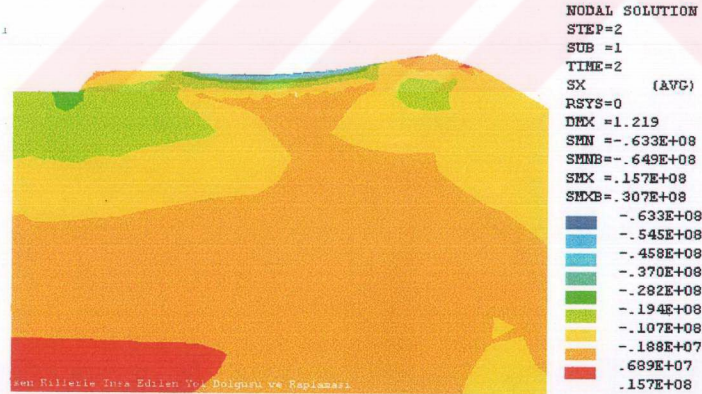
Şekil Ek3.24 Standart Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 4 (az kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



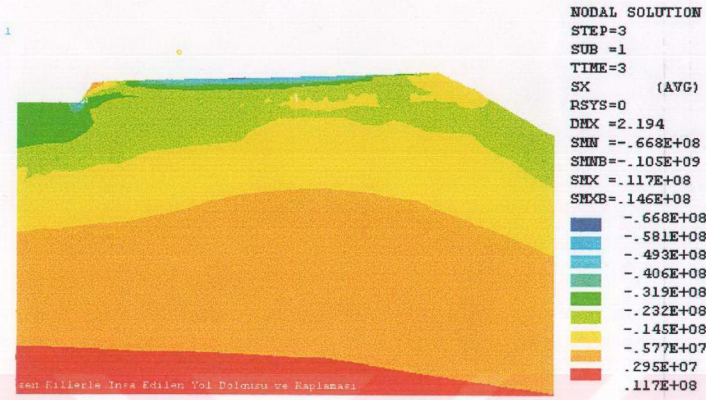
Şekil Ek3.25 Standart Proktor' un optimumunda sıkıştırılan dolgunun Yükleme 5 (çok kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



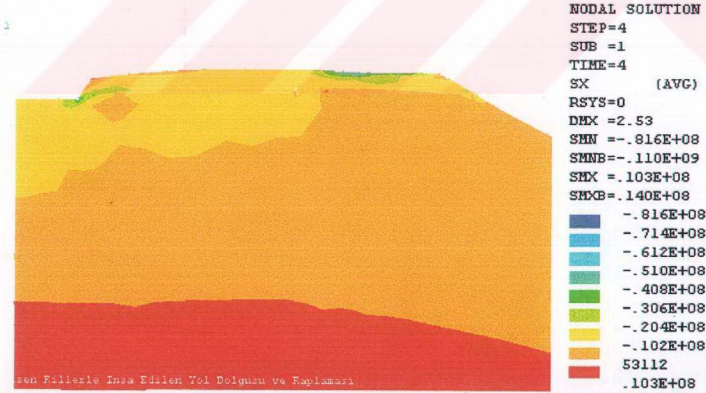
Şekil Ek3.26 Standart Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 1 (az ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



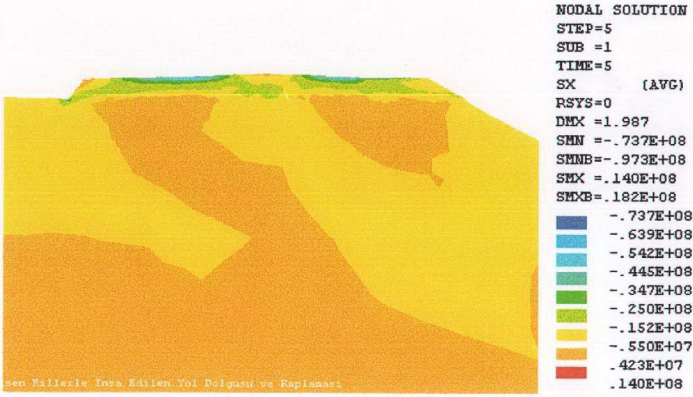
Şekil Ek3.27 Standart Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 2 (çok ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



Şekil Ek3.28 Standart Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 3 (tüm ıslanma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



Şekil Ek3.29 Standart Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun Yükleme 4 (az kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri



Şekil Ek3.30 Standart Proktor' un optimumunun %5 ıslak tarafında sıkıştırılan dolgunun
 Yükleme 5 (çok kuruma) durumunda üstyapıda gelişen çekme gerilmeleri ve bölgeleri

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	19.06.1968	
Doğum yeri	Konya	
Lise	1979-1985	Konya Özel Gündoğdu Lisesi
Lisans	1985-1990	Boğaziçi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1990-1993	İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Geoteknik Programı
Çalıştığı kurum(lar)	1991-1995	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü Geoteknik Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi
	1995-Devam ediyor	Selçuk Üniversitesi Müh. Mim. Fak. İnşaat Müh. Bölümü Araştırma Görevlisi

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**