

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Cafer KAYADELEN

**DOYGUN OLMAYAN İNCE DANELİ ZEMİNLERİN K₀
KOŞULLARINDAKİ YANAL BASINÇLARININ İNCELENMESİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2005

ÖZ

DOKTORA TEZİ

DOYGUN OLMAYAN İNCE DANELİ ZEMİNLERİN K_0 KOŞULLARINDAKİ YANAL BASINÇLARININ İNCELENMESİ

Cafer KAYADELEN

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. M.Arslan TEKİNSOY

Yıl : 2005 Sayfa : 156

Jüri : Prof. Dr. M. Arslan TEKİNSOY

Prof. Dr. M. Yener ÖZKAN

Prof. Dr. Orhan AKSOĞAN

Doç. Dr. Mustafa LAMAN

Doç. Dr. Hasan ÇETİN

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında suya doygun olmayan zeminlerin K_0 koşullarında yanıl zemin basınçları araştırılmıştır. Bu amaçla, doymamış koşullarda konsolidasyon deneylerinin yapılabildiği ve yanıl basınçların ölçülebildiği yeni bir düzenek tasarlanmış ve imal edilmiştir. Doymamış zeminlerin mekanik davranışı üzerinde önemli etkisi bulunan matrik emme basınçları eksen kaydırma tekniği ile kontrol edilmiştir. Zemin numunesinin uyguladığı yanıl basınçlar, ince cidarlı olarak imal edilen ödometre ringinin dış çevresine yapıştırılan strain gauge'ler ile ölçülmüştür. Ayrıca çalışmada doygun durumda da deneyler yapılarak doymamış koşullarda bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneylerde, kalıplanarak hazırlanmış killi ve kompaksiyon ile hazırlanmış siltli numuneler kullanılmıştır.

Deneyler sonunda, matrik emme basıncının, zeminin düşey yüklemelerden dolayı, uyguladığı yanıl basınçlar üzerinde önemli etkisi olduğu anlaşılmıştır. Düşey yük sabit tutulurken, matrik emme basıncı arttırıldığında zemin numunesine ait K_0 değerleri azalmaktadır. Başka bir ifade ile, zeminin doygunluk derecesi azaldıkça, K_0 değerleri de azalmaktadır

Anahtar kelimeler: Doymamış zemin, matrik emme, eksen kaydırma tekniği, sükunetteki yanıl zemin basıncı, K_0 koşulları,

ABSTRACT

Ph. D. THESIS

INVESTIGATION of LATERAL EARTH PRESSURES IN K_0 CONDITION FOR UNSATURATED FINE GRAINED SOILS
--

Cafer KAYADELEN

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF ÇUKUROVA

Supervisor : Prof.Dr. M.Arslan TEKİNSOY

Year : 2005 Page : 156

Jury : Prof. Dr. M. Arslan TEKİNSOY

Prof. Dr. M. Yener ÖZKAN

Prof. Dr. Orhan AKSOĞAN

Assoc. Prof. Dr. Mustafa LAMAN

Assoc. Prof. Dr. Hasan ÇETİN

In this study, the lateral earth pressures at-rest of unsaturated fine grained soils were investigated in the laboratory. For this aim, a new test apparatus, allowing to perform the consolidation test in unsaturated conditions and to measure the lateral pressure, was designed and manufactured. The matric suction, an important parameter of unsaturated soils, was controlled by using axis translation technique. The lateral pressures were measured by means of strain gauges embedded on the outer surface of the thin wall oedometer ring. The measurements of lateral pressure were, also, performed in saturated conditions and compared with those results of unsaturated counterparts. In the tests, reconstituted clayey and compacted silty specimens were used.

In conclusion, it was deduced that matric suction has an effect on lateral pressures. When the vertical pressures are kept constant, K_0 values of soil specimens decrease under increasing matric suction. In other words, when the degree of saturation decreases, K_0 values decrease.

Keywords: Unsaturated soils, matric suction, axis translation technique, lateral earth pressure at-rest, K_0 condition,

TEŞEKKÜR

Bana bu konuda çalışma olanağı sağlayan, çalışmalarımda beni yönlendiren, bilgi ve ilgisini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. M. Arslan TEKİNSOY'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Mustafa LAMAN'a da teşekkür ederim.

Bölüm hocalarıma ve çalışmalarımda bana yardımcı olan araştırma görevlisi arkadaşlarım Taha TAŞKIRAN ve Ahmet DEMİR'e teşekkür ederim. Ayrıca, bölümdeki değerli tüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı, Makine Mühendisliği Laboratuvarı ve Dekanlık Atölyesi personeline bana gösterdikleri yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Her zaman bana destek olan, her türlü yardım ve ilgilerini benden esirgemeyen aileme de sevgi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Zemin Emme Gerilmesi.....	3
2.1.1. Kapilarite.....	6
2.2. Emme Basıncının Ölçülmesi.....	7
2.2.1. Psikometre ile Toplam Emmenin Ölçülmesi.....	8
2.2.2. Filtre Kağıdı Yöntemi.....	9
2.2.3. Basınç Plakası.....	10
2.2.4. Tansiyometreler.....	11
2.2.5. Gözenekli Blok.....	12
2.2.6. Isıl İletkenlik Algılayıcıları İle Ölçüm.....	13
2.3. Doygun Olmayan Zeminler İçin Gerilme Durumu Değişkenleri...	13
2.3.1. Doygun Olmayan Zeminler İçin Kullanılan Efektif Gerilme Kavramı.....	14
2.4. Yanal Zemin Basınçları.....	16
2.4.1. Rankine Teorisi.....	16
2.4.2. Sükunetteki Yanal Zemin Basınç Katsayısı (Elastik Denge Durumu).....	18
2.4.3. Plastik Denge Durumu.....	21
2.4.3.1. Aktif Durum	21
2.4.3.2. Pasif Durum.....	25
2.5. Yanal Basınç Ölçmeleri İle İlgili alışmalar.....	28

2.5.1. Sükunetteki Yanal Zemin Basınç Katsayısının Ölçümü İçin	
Kullanılan Laboratuvar Düzenekleri.....	28
2.6. K_0 'ın Tahmini İçin Verilen Ampirik Yaklaşımlar.....	42
2.6.1. Normal Konsolide Zeminler.....	42
3.2.2. Aşırı Konsolide Zeminler.....	47
2.7. Arazide K_0 koşullarında yanal basınçların ölçülmesi.....	51
2.7.1. Presyometre Deneyi.....	51
2.7.2. Toplam Gerilme Hücresi Metodu.....	51
2.8. Önceki Araştırmalardan Yayımlanmış K_0 Değerleri.....	54
2.9. Doymamış Koşullarda Yapılan Deneylerde Kullanılan Teknikler	54
2.9.1. Eksen Kaydırma Tekniği.....	56
2.9.2. Ozmotik teknik.....	58
2.10. Doymamış Koşullarda Kullanılan Deney Düzenekleri.....	58
3. MATERYAL ve METOD.....	65
3.1. Araştırmada Kullanılan Yeni Deney Düzeneği.....	65
3.1.1. Ödometre Hücresi.....	65
3.1.2. Strain Gage.....	69
3.1.2.1. Strain Gage Uygulaması.....	70
3.1.3. Deformasyon Ölçer.....	73
3.1.4. Kalibrasyon.....	73
3.1.5. Ödometre Ringinin Sağlaması Gerekli Koşullar.....	76
3.1.6. Yüksek Hava Giriş Değerine Sahip Seramik Diskler.....	80
3.1.7. Boşluk Suyu Hacim Ölçülmesi	81
3.1.8. Sızan Hava Hacim Ölçer.....	82
3.1.9. Deney Düzeneğinin Kurulması.....	83
3.2. Deneylerde Kullanılan Zeminlerin Özellikleri.....	86
3.2.1. Kayapınar Kili.....	86
3.2.2. Havuzlubahçe Silti.....	88
3.2.3. Kullanılan Numunelerin Sınıflandırılması.....	91
3.3. Deneylerde İzlenen Yol	91
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	94
4.1. Deney Sonuçları.....	94

4.1.1. Doygun Durumda Konsolidasyon ve Yanal Basınç Ölçüm Sonuçları	94
4.1.2. Konsolidasyonlu Drenajlı Üç Eksenli Deneyler.....	102
4.1.3. Doymamış Koşullarda Kayapınar Kili'nin Konsolidasyon ve Yanal Basınç Ölçüm Sonuçları.....	106
4.1.4. Doymamış Koşullarda Havuzlubahçe Silti'nin Konsolidasyon ve Yanal Basınç Ölçüm Sonuçları.....	112
4.2. Matrik Emme ile K_0 Arasındaki İlişki.....	118
4.3. Doygunluk Derecesi ile K_0 Arasındaki İlişki.....	121
4.4. Bugüne Kadar Verilen Ampirik İfadeler İle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması.....	124
4.5. Numunelerin Su Tutma Potansiyelleri.....	141
5. SONUÇ.....	147
KAYNAKLAR.....	150
ÖZGEÇMİŞ.....	156

SİMGELER VE KISALTMALAR

A_f	Kırılma anındaki boşluk suyu basıncı parametresi
c	Kohezyon
c_v	Konsolidasyon katsayısı
e	Boşluk oranı
G_s	Özgöl ağırlık
I_p	Plastisite indisi
K_a	Aktif zemin basınç katsayısı
K_0	Sükunetteki zemin basınç katsayısı
$K_{0(AK)}$	Aşırı konsolide zeminlerde sükunetteki zemin basınç katsayısı
$K_{0(NK)}$	Normal konsolide zeminlerde sükunetteki zemin basınç katsayısı
K_p	Pasif zemin basınç katsayısı
L_L	Likit limit
AKO	Aşırı konsolidasyon oranı
P_h	Arazi yanal zemin basıncı
P_L	Plastik limit
P_g	Jeolojik basınç (derinlik basıncı)
u	Boşluk suyu basıncı
u_o	Başlangıç boşluk suyu basıncı
σ	Basınç veya gerilme
σ_1	Zemin elemanı üzerine etkiyen büyük asal gerilme
σ_3	Zemin elemanı üzerine etkiyen küçük asal gerilme
P_c	Ön konsolidasyon basıncı
σ_h	Yanal basınç
σ_a	Aktif yanal zemin basıncı
σ_p	Pasif yanal zemin basıncı
σ_v	Düşey basınç
μ	Poisson oranı

ε	Şekil değiştirme
τ	Kayma gerilmesi
ϕ	Kayma mukavemeti açısı
ϕ'	Efektif kayma mukavemeti açısı
w	Doğal su muhtevası
γ_n	Doğal birim hacim ağırlık
γ_s	Dane birim hacim ağırlık
D_r	Sıkılık
c_r	Kıvam indisi
Ψ	Zeminin toplam emme basıncı
R	Genel gaz sabiti (8.31432 J/(molK))
(u_a-u_w)	matrik emme
Π	Ozmotik basınç
β'	Tutma veya yapışma faktörü
u_a	Boşluk hava basıncı
χ	Zeminin doygunluk derecesine bağlı bir parametre
T	Mutlak sıcaklık [(273.16+t°) (K)]
H	Matrik emmeye göre elastisite modülü
u_w	Boşluk-suyu basıncı
$\bar{u}_{v0}$	Aynı sıcaklıkta saf su yüzeyi üzerindeki doygun su buhar basıncı
$\bar{u}_v$	Kısmi boşluk suyu buhar basıncı
ω_v	Su buharının molekül kütlesi (18.016 kg/kmol)
ρ_w	Suyun yoğunluğu (t°=20 C° de 998 kę/m³)
v_{w0}	Suyun özgül hacmi (1/ ρ_w m³/kg)
t	Sıcaklık (C°)
T_s	Suyun yüzey gerilimi
α	Değme açısı

ÇİZELGELER DİZİNİ**SAYFA**

Çizelge 2.1.	Emme basıncının ölçülmesi için kullanılan yöntemler (Zapata, 1999).....	8
Çizelge 2.2.	Ampirik ifadelerden hesap edilen K_o değerlerinin karşılaştırılması (Krizek ve Abdelhamid, 1977).....	48
Çizelge 2.3.	Farklı killi zeminler için yayımlanmış K_o değerleri (Bedişkan, 1993).....	55
Çizelge 3.1.	Kayapınar Kili'nin endeks özellikleri.....	87
Çizelge 3.2.	Havuzlubahçe Silti'nin endeks özellikleri.....	88
Çizelge 4.1.	Konsolidasyon deney listesi.....	95
Çizelge 4.2.	Kayapınar Kili'nin doymun koşuldaki konsolidasyon verileri....	96
Çizelge 4.3.	Havuzlubahçe Silti'nin doymun koşuldaki konsolidasyon verileri.....	97
Çizelge 4.4.	Kayapınar Kili'nin doymun durumda ölçülen yanal basınç değerleri.....	98
Çizelge 4.5.	Havuzlubahçe Silti'nin doymun durumda ölçülen yanal basınç değerleri	99
Çizelge 4.6.	Kayapınar Kili'nin 60 kPa matrik emme basıncı altında yapılan konsolidasyon deneyinin verileri.....	107
Çizelge 4.7.	Havuzlubahçe Silti'nin 50 kpa matrik emme basıncı altında yapılan konsolidasyon deneyinin verileri.....	113
Çizelge 4.8.	Kayapınar Kili'nin ölçülen K_o değerlerinin, ampirik ifadelerden bulunanlarla karşılaştırılması.....	125
Çizelge 4.9.	Havuzlubahçe Silti'nin ölçülen K_o değerlerinin, ampirik ifadelerden bulunanlarla karşılaştırılması.....	126
Çizelge 4.10.	Matrik emme kontrollü deneylerden elde edilen yenilme gerilmeleri.....	131

ŞEKİLLER DİZİNİ**SAYFA**

Şekil 2.1.	Suya doygun olamayan bir zemin elamanında dört fazın görülmesi (Fredlund ve Rahardjo, 1993).....	4
Şekil 2.2.	Kapiler su yükselmesinin fiziksel modellenmesi (Fredlund ve Rahardjo, 1993).....	6
Şekil 2.3.	Sabit sıcaklıklı psikometre banyosu (Krahn ve Fredlund, 1972)	9
Şekil 2.4.	Toplam ve matrik emmenin filtre kağıdı yöntemi ile ölçümü (Al-Khafaf ve Hanks, 1974).....	10
Şekil 2.5.	Basınç plakası (Tekinsoy, 2002).....	11
Şekil 2.6.	Tansiyometre (Morrison, 1983).....	12
Şekil 2.7.	Termal sensör (Phene ve ark., 1971).....	13
Şekil 2.8.	Doygun ve doymamış zeminler için gerilme durum değişkenleri ve gerilme tansörleri (Fredlund ve Rahardjo, 1993).....	15
Şekil 2.9.	Yanal zemin basınçlarının etkisindeki dayanma yapıları(Uzuner, 1992).....	16
Şekil 2.10.	İki boyutlu koşullarda, z derinliğindeki bir eleman.....	17
Şekil 2.11.	Sükunetteki zemin basıncı (Parcher ve Means, 1968).....	20
Şekil 2.12.	Plastik denge ve K_0 koşulu için Mohr dairesi (Bowles, 1988)...	20
Şekil 2.13.	K_0 durumu (Bowles, 1988).....	20
Şekil 2.14.	Aktif durum (Kumbasar ve Kip, 1973).....	22
Şekil 2.15.	Doymamış zeminlerde aktif durum için mohr dairelerinin oluşturulması (Fredlund ve Rahardjo, 1993).....	23
Şekil 2.16.	Derinlik boyunca sabit değişen matrik emme altında aktif zemin basınç dağılımı (Fredlund ve Rahardjo, 1993).....	24
Şekil 2.17.	Pasif durum(Kumbasar ve Kip, 1973).....	26
Şekil 2.18.	Doymamış zeminlerde pasif durum için mohr dairelerinin oluşturulması (Fredlund ve Rahardjo, 1993).....	27
Şekil 2.19.	Derinlik boyunca sabit değişen matrik emme altında pasif zemin basınç dağılımı (Fredlund ve Rahardjo, 1993).....	27

Şekil 2.20.	Hendron (1963) ödometresi.....	30
Şekil 2.21.	Dane kırılmalarının K_o 'a etkisi (Hendron, 1963).....	30
Şekil 2.22.	K_o 'ın aşırı konsolidasyon oranı (AKO) ve plastisite indisi (I_p) ile değişimi (Brokeer and Ireland ,1965).....	31
Şekil 2.23.	Sağlamer (1972)'nin kumlarda K_o ölçümünü gerçekleştirmek için oluşturduğu ödometre.....	32
Şekil 2.24.	Abdelhamid ve Krizek (1976)'ın deney düzeneği.....	33
Şekil 2.25.	Abdelhamid ve Krizek (1976)'nın deney sonuçları.....	34
Şekil 2.26.	K_o koşullarını sağlayan üç eksenli deney düzeneği (Menzies ve ark, 1977).....	36
Şekil 2.27.	Üç eksenli deney düzeneğinden elde edilen sonuçlar (Menzies ve ark, 1977).....	36
Şekil 2.28.	K_o deney tüpü (Edil ve Dhowian, 1981).....	37
Şekil 2.29.	Turbalarda K_o 'ın aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi (Edil ve Dhowian, 1981).....	37
Şekil 2.30.	Zhu ve Clark (1993)'ün yanal zemin basınçlarını dinamik koşullarda ölçmek için düzenek.....	38
Şekil 2.31.	Mesri ve Hayat (1993)'ün yanal zemin basınçlarının ölçülmesi için kullandığı düzenek.....	39
Şekil 2.32.	Ting ve ark. (1994)'ün yanal basınçları ölçmek için kullandığı düzenek.....	40
Şekil 2.33.	Yamamuro ve ark. (1996)'ın yüksek basınçlarda kum numunelerin yanal basınçlarını ölçmek için kullandığı düzenek	41
Şekil 2.34.	Efektif iç sürtünme açısı ile Hvorslev gerçek sürtünme açısı arasındaki ilişki (Abdelhamid ve Krizek, 1976).....	44
Şekil 2.35.	K_o 'ın Modifiye Rutletge analizi ile bulunuşu (Krizek ve Abdelhamid, 1977).....	46
Şekil 2.36.	Kumlu zeminlerde n 'nin değişimi (Bowles, 1988).....	50
Şekil 2.37.	Presyometre deney düzeneği (Yıldız ve Laman, 1996).....	52
Şekil 2.38.	Presyometre eğrisi (Yıldız ve Laman, 1996).....	52
Şekil 2.39.	Toplam gerilme hücresi metodu (Bowles, 1988).....	53

Şekil 2.40.	Glöztzl tipi ince cidarlı basınç hücresi ve koruma başlığı (Bowles, 1988).....	53
Şekil 2.41.	Eksen kaydırma yöntemi kullanarak ile boşluk suyu basıncının ölçülmesi (Fredlund ve Rahardjo, 1993).....	57
Şekil 2.42.	Ozmotik basıncın simülasyonu (Özocak, 2003).....	59
Şekil 2.43.	Ozmotik tekniğin deneylerde uygulanması (Özocak, 2003).....	59
Şekil 2.44.	Ozmotik teknikle matrik emmenin kontrol edildiği ödometre (Kassiff ve Ben Shalom, 1971).....	60
Şekil 2.45.	Ozmotik teknikle matrik emmenin kontrol edildiği ödometre (Delage ve ark., 1992).....	61
Şekil 2.46.	Sabit emme basıncı altında konsolidasyon gerçekleştirmek için modifiye edilmiş kesme kutusu (Gan ve Fredlund, 1988).....	62
Şekil 2.47.	Eksen kaydırma tekniği kullanılarak emme basınçlarının kontrol edildiği ödometre (Aversa ve Nicotera, 2002).....	63
Şekil 2.48.	Eksen kaydırma tekniği kullanılarak emme basınçlarının kontrol edildiği ödometre (Rahardjo ve Fredlund, 2003).....	64
Şekil 3.1.	Ödometre hücresi.....	66
Şekil 3.2.	İnce cidarlı ödometre ringinin planı ve kesiti.....	68
Şekil 3.3.	Elektriksel strain gauge.....	70
Şekil 3.4.	İnce cidarlı ödometre ringi duvarı üzerindeki strain gage'in görünümü.....	71
Şekil 3.5.	Strain gage'ler ile oluşturulan elektrik devresi (Wheaston köprüsü).....	71
Şekil 3.6.	Deformasyon ölçer.....	74
Şekil 3.7.	İnce cidarlı ödometre ringinin kalibrasyon eğrisi.....	75
Şekil 3.8.	Ödometre duvarında meydana gelen gerilmeler (Ertekin, 1991)	77
Şekil 3.9.	Boşluk suyu hacim değişim ölçer.....	81
Şekil 3.10.	Sızan hava hacminin ölçülmesi için düzenek.....	82
Şekil 3.11.	Matrik emme kontrollü ve yanal basınçların ölçülebildiği konsolidasyon deney düzeneği.....	84
Şekil 3.12.	Modifiye edilmiş konsolidasyon hücresi ve yükleme çerçevesi	85

Şekil 3.13.	Kayapınar kilinin dane dağılım eğrisi.....	87
Şekil 3.14.	Havuzlubahçe siltinin dane dağılım eğrisi.....	89
Şekil 3.15.	Havuzlubahçe siltinin kompaksiyon eğrisi.....	90
Şekil 3.16.	Plastisite kartı.....	91
Şekil 4.1.	Kayapınar kilinin doygun durumdaki konsolidasyon eğrisi.....	96
Şekil 4.2.	Havuzlubahçe siltinin doygun durumdaki konsolidasyon eğrisi.	97
Şekil 4.3.	Kayapınar kilinin doygun durumda ölçülen yanıl gerilmenin uygulanan düşey gerilme ile değışimi.....	100
Şekil 4.4.	Kayapınar kilinin doygun durumda ölçülen K_o değęerlerinin uygulanan düşey gerilme ile değışimi.....	100
Şekil 4.5.	Havuzlubahçe siltinin doygun durumda ölçülen yanıl gerilme değęerlerinin uygulanan düşey gerilme ile değışimi.....	101
Şekil 4.6.	Havuzlubahçe siltinin doygun durumda ölçülen K_o değęerlerinin uygulanan düşey gerilme ile değışimi.....	101
Şekil 4.7.	Kayapınar kil numuneleri üzerinde yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen gerilme deformasyon ilişkileri.....	103
Şekil 4.8.	Havuzlubahçe siltli numuneler üzerinde yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen gerilme deformasyon ilişkileri.....	104
Şekil 4.9.	Kayapınar kiline ait mohr daireleri.....	105
Şekil 4.10.	Havuzlubahçe siltine ait mohr daireleri.....	105
Şekil 4.11.	Kayapınar Kili'nin değışik matrik emme basınçları altında yarı logaritmik ölçekte konsolidasyon eğrileri.....	108
Şekil 4.12.	Kayapınar Kili'nin değışik matrik emme basınçları altında doğıl ölçek ile çizilen konsolidasyon eğrileri.....	109
Şekil 4.13.	Kayapınar Kili'nin farklı matrik emme basınçları altında ölçülen yanıl basınçlarının uygulanan düşey basınç ile değışimleri.....	110
Şekil 4.14.	Kayapınar Kili'nin farklı matrik emme basınçları altında ölçülen K_o değęerleri ile uygulanan düşey gerilme ile değışimleri.....	111

Şekil 4.15.	Havuzlubahçe Silti'nin farklı matrik emme basınçları altında yarı logaritmik ölçekte konsolidasyon eğrileri.....	114
Şekil 4.16.	Havuzlubahçe Silti'nin farklı matrik emme basınçları altında doğal ölçekte çizilen konsolidasyon eğrileri.....	115
Şekil 4.17.	Havuzlubahçe Silti'nin farklı matrik emme basınçları altında ölçülen yanal basınçlarının karşılaştırılması.....	116
Şekil 4.18.	Havuzlubahçe Silti'nin farklı matrik emme basınçları altında ölçülen K_0 değerlerinin karşılaştırılması.....	117
Şekil 4.19.	Kayapınar Kili'nin farklı düşey basınç altında K_0 ile matrik emme basıncı arasındaki değişimlerin karşılaştırılması.....	119
Şekil 4.20.	Havuzlubahçe Silti'nin farklı düşey basınç altında K_0 ile matrik emme basıncı arasındaki değişimlerin karşılaştırılması.....	120
Şekil 4.21.	Kayapınar Kili'nin ölçülen K_0 değerlerinin doyunluk dereceleri ile değişimlerinin düşey yüklemeler ile karşılaştırılması.....	122
Şekil 4.22.	Havuzlubahçe silti'nin ölçülen K_0 değerlerinin doyunluk dereceleri ile değişimlerinin düşey yüklemeler ile karşılaştırılması.....	123
Şekil 4.23.	Kayapınar Kili'nin ölçülen yanal basınçlarının içsel sürtünme açısına bağlı olarak tahmin edilen yanal basınçlar ile karşılaştırılması.....	127
Şekil 4.24.	Kayapınar Kili'nin ölçülen yanal basınçlarının plastisite indisine bağlı olarak tahmin edilen yanal basınçlar ile karşılaştırılması.....	128
Şekil 4.25.	Havuzlubahçe Silti'nin ölçülen yanal basınçlarının içsel sürtünme açısına bağlı olarak tahmin edilen yanal basınçlar ile karşılaştırılması.....	129
Şekil 4.26.	Havuzlubahçe Silti'nin ölçülen yanal basınçlarının plastisite indisine bağlı olarak tahmin edilen yanal basınçlar ile karşılaştırılması.....	130

Şekil 4.27.	Matrik emme kontrollü deneylerden bulunan yenilme gerilmelerinin matrik emme ile değişimi.....	132
Şekil 4.28.	Kayapınar Kili'nin sabit matrik emme altında, K_o değerlerinin $\text{Log}(AKO)$ ile değişimi.....	133
Şekil 4.29.	Havuzlubahçe Silti'nin sabit matrik emme altında, K_o değerlerinin $\text{Log}(AKO)$ ile değişimi.....	134
Şekil 4.30.	Kayapınar Kili'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=0 kPa	135
Şekil 4.31.	Kayapınar Kili'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=60 kPa.....	135
Şekil 4.32.	Kayapınar Kili'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=100 kPa.....	136
Şekil 4.33.	Kayapınar Kili'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=200 kPa.....	136
Şekil 4.34.	Kayapınar Kili'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=300 kPa.....	137
Şekil 4.35.	Kayapınar Kili'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=500 kPa.....	137
Şekil 4.36.	Havuzlubahçe Silti'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=0 kPa	138
Şekil 4.37.	Havuzlubahçe Silti'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=50 kPa.....	138
Şekil 4.38.	Havuzlubahçe Silti'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=100 kPa.....	139

Şekil 4.39.	Havuzlubahçe Silti'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanıl basınçlarının ölçülen değler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=160 kPa.....	139
Şekil 4.40.	Havuzlubahçe Silti'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanıl basınçlarının ölçülen değler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=200 kPa.....	140
Şekil 4.41.	Havuzlubahçe Silti'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanıl basınçlarının ölçülen değler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=300 kPa.....	140
Şekil 4.42.	Kayapınar Kili'nin farklı matrik emme altında su içeriğinin düşey basınç ile değışimi.....	142
Şekil 4.43.	Havuzlubahçe Silti'nin farklı matrik emme altında su içeriğinin düşey basınç ile değışimi.....	143
Şekil 4.44.	Kayapınar Kili'nin farklı düşey basınç altında matrik emme-doygunluk derecesi ilişkisi.....	144
Şekil 4.45.	Havuzlubahçe Silti'nin farklı düşey basınç altında matrik emme-doygunluk derecesi ilişkisi.....	145
Şekil 4.46.	Sabit matrik emme basıncı altında Kayapınar Kili'nin doygunluk derecesinin net düşey gerilme ile değışimi.....	146
Şekil 4.47.	Sabit matrik emme basıncı altında Havuzlubahçe Silti'nin doygunluk derecesinin net düşey gerilme ile değışimi.....	146

1. GİRİŞ

Zemin mekaniğinde yapılan hesaplar, güvenli tarafta kalmak amacıyla doymun koşullarda yapılmaktadır. Ancak; yeryüzünün önemli bir bölümünün kurak veya yarı kurak iklim koşullarında bulunması nedeni ile bu bölgelerdeki zeminler, hiçbir zaman doymun durumda bulunmamaktadır. Sonuçta bu bölgelerde yapılan mühendislik hesapları, doymun koşullara göre gerçekleştirildiği için, ekonomik açıdan, optimum koşulları sağlamamaktadır.

Kurak veya yarı kurak bölgelerdeki yer altı su seviyesinin derinlerde olması ve bu bölgelerin aşırı buharlaşmaya maruz kalması nedeni ile, sözü edilen bölge zeminleri, negatif boşluk suyu basıncı taşımaktadır. Başka bir ifade ile, kurak ve yarı kurak bölge zeminleri, emme basıncına sahiptirler. Bugüne kadar yapılan çalışmalar, doymamış zeminlere ait mekanik davranışların, emme basınçlarından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Örneğin, doymun olmayan zeminler daha yüksek mukavemet ve daha düşük sıkışabilirlik göstermektedir (Freundlund and Rahardjo, 1993).

Kaynaklarda, zemin mekaniğinin önemli bir parametresi olan sükunetteki yanal zemin basınç katsayısı (K_0) için yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu katsayının, killi zeminlerde genellikle 0.4~0.6, kumlu zeminlerde 0.3~0.5 arasında değerler aldığı belirtilmektedir (Tekinsoy ve Laman, 2002). İnce daneli zeminler için verilen K_0 değerleri, bugüne değin, doymun durumda gerçekleştirilen deneyler sonucunda tespit edilmiştir. Ancak suya doymun olmayan zeminlerin yanal basınçlarının veya K_0 değerlerinin, emme basınçlarından nasıl etkilendiğini gösteren herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Sonuç olarak bu çalışmada; bugüne değin yapılmamış olan, suya doymun olmayan zeminlerin, laboratuvar ortamında, K_0 koşullarındaki yanal zemin basınçlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca ulaşabilmek için yeni bir düzenek geliştirilmiş ve doymamış koşullarda konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Düşey yüklemelerden dolayı meydana gelen yanal gerilmeler, ince cidarlı olarak imal edilen ödometre ringinin dış çevresine yapıştırılan, strain gauge'ler ile

ölçülmüştür. Dört adet strain gauge Wheatstone köprüsü (Full bridge) oluşturacak şekilde ve karşılıklı olarak yapıştırılmıştır.

Emme basınçlarının K_o üzerindeki etkilerini görebilmek için matrik emme basınçları, eksen kaydırma yöntemi ile kontrol edilmiştir. Bu amaçla, zeminin altından su drenajını sağlamak ve zemin içinde istenilen hava basıncını sabit tutabilmek için, zemin numunesi altına 1500 kPa hava giriş değerine sahip, seramik poroz disk yerleştirilmiştir. Düşey yüklemeler için standart konsolidasyon düzeneğinin yükleme kolu modifiye edilmiş ve zemin üzerine uygulanan düşey yükün doğrudan ölçülmesi için, yükleme başlığına bir yük hücresi (load cell) monte edilmiştir. Düşey deplasmanlar LVDT (linear variable displacement transducer) kullanılarak ölçülmüştür. Deney sırasında zemin numunesinden çıkan boşluk suyu hacminin ölçümü için, 0.01 cm^3 duyarlılığa sahip, hacim değişim transducer'leri (volume change transducer) kullanılmıştır. Su drenajını sağlayan seramik diskler, her ne kadar havayı geçirmese de bir miktar hava suda çözünerek, su ile birlikte diskten geçmektedir. Bu olay, boşluk suyu hacim ölçmelerinde, hatalara neden olmaktadır. Sızan havanın ölçülmesi için DAVI (diffused air volume indicator) denilen ve kapalı bir ortam içinde büret sisteminden oluşan bir düzenek imal edilmiş ve sızan hava hacmi ölçülerek, boşluk suyu hacim ölçmeleri düzeltilmiştir. Verilerin okunması ve bilgisayar ortamına aktarılması için, data logger aleti ve DIALOG isimli bilgisayar programı kullanılmıştır.

Deneyler Diyarbakır'dan alınan killi ve Güney Adana bölgelerinden alınan siltli numuneler üzerinde yapılmıştır. Killi numuneler laboratuvarında kalıplanarak (reconstituted), siltli numuneler ise standart proktor deneyi ile, optimum su içeriğinde hazırlanmış ve deneylere tabi tutulmuşlardır.

Matrik emme basınç kontrollü olarak gerçekleştirilen deneylerde yanal basınçlar, düşey basınçlar, düşey deplasmanlar ve boşluk suyu hacmindeki değişimler ölçülmüştür.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde; ileride ve tez konusu içinde gerekli olan, suya doymuş ve doymamış zeminlerin çeşitli özelliklerini karşılaştırabilmek için, suya doymuş olmayan zeminlerin temel nitelikleri verilmiş ve doymuş zeminler ile kısa bir mukayesesi yapılmıştır.

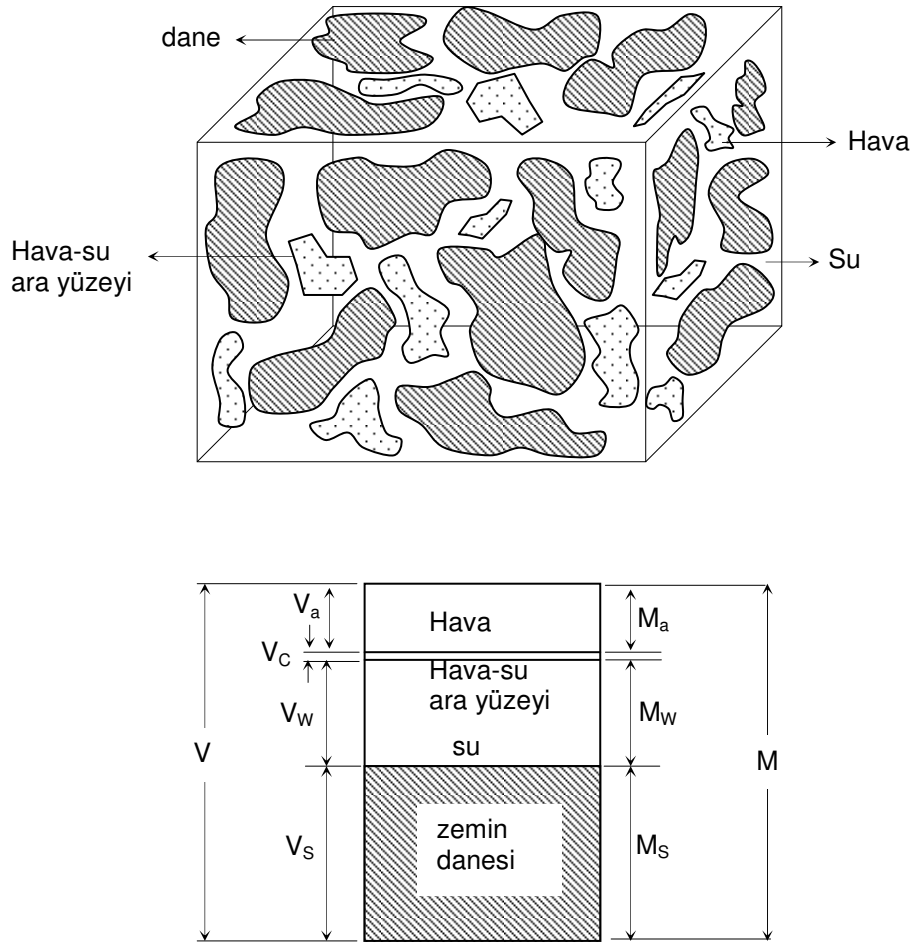
Klasik zemin mekaniğinde zeminlerin, zemin danesi, su ve hava fazından oluştuğu varsayılmaktadır. Su ve hava, zemin daneleri arasında bulunan boşluklarda yer alır. Boşlukların tamamı su ile dolu ise zemin, doymuş zemin olarak isimlendirilirken, boşlukların bir kısmında hava bulunuyorsa doymamış zemin olarak isimlendirilir. Boşluk hacmindeki suyun, toplam boşluk hacmine oranı, doymuşluk derecesi (S_r) olarak bilinmektedir. Pratik olarak zeminler, %98 doymuşluk derecesinin altında bulunduğu doymamış olarak kabul edilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, doymamış zeminlerde, hava-su ara yüzeyi (contractile skin) denilen bir fazın varlığının farkına varılmış ve doymamış zeminlerin dört fazdan oluştuğu görüşü yaygınlık kazanmıştır (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Şekil 2.1’de doymuş olmayan bir zemin elemanı, temsili olarak gösterilmiştir. Hava-su ara yüzeyi kalınlığı moleküler seviyede olduğu için, zemin elemanındaki kütle hacim ilişkilerinde ihmal edilmekte ve su fazının bir parçası olarak düşünülmektedir.

2.1. Zemin Emme Gerilmesi

Doymamış zeminlerin, mekanik davranışı üzerindeki en büyük etkenlerden biri olan zemin emme gerilmesi, ilk olarak 1900’lü yılların başında çalışılmaya başlanmıştır.(Buckingham, 1907; Richards, 1928 Corey ve Kemper, 1961). Zemin emmesi, zemin suyunun serbest enerji durumu olarak Edlefsen ve Anderson (1943) tarafından tanımlanmıştır. Söz konusu bu enerjinin, zemin suyunun kısmi buhar basıncına göre ölçülebileceği Richards (1965) tarafından verilmiştir. Zemin emmesi ile zemin suyunun kısmi buhar basıncı arasındaki ilişki, termodinamik teoremler kullanılarak aşağıdaki gibi yazılmaktadır (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

$$\psi = -\frac{RT}{v_{w0}\omega_v} \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right) \quad (2.1)$$

Burada; ψ =Zeminin toplam emme basıncı (kPa)



Şekil 2.1. Suyu doymun olamayan bir zemin elemanında dört fazın görülmesi (Fredlund ve Rahardjo, 1993)

R =Genel gaz sabiti (8.31432 J/(molK))

T =Mutlak sıcaklık [(273.16+ t°) (K)]

t° =Sıcaklık (C°)

v_{w0} =Suyun özgül hacmi ($1/\rho_w$ m³/kg)

ρ_w =Suyun yoğunluğu ($t^{\circ}=20$ C^o de 998 kg/m³)

ω_v =Su buharının molekül kütlesi (18.016 kg/kmol)

$\bar{u}_v$ =Kısmi boşluk suyu buhar basıncı (kPa)

$\bar{u}_{v0}$ =Aynı sıcaklıkta saf su yüzeyi üzerindeki doymuş su buhar basıncı

Bu denklemde, referans sıcaklık olarak $t=20$ C^o alınır ve diğer sabitler yerine konulursa aşağıdaki ifade bulunur.

$$\psi = -135022 \ln \left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}} \right) \quad (2.2)$$

Zeminin toplam emme basıncının, matrik emme (kılcal emme) ve osmotik emme (eriyik emme) olarak isimlendirilen iki bileşenden oluştuğu varsayılabilir.

$$\psi = (u_a - u_w) + \Pi \quad (2.3)$$

Burada ($u_a - u_w$), matrik emmeyi, Π ise, osmotik emmeyi göstermektedir.

Buharlaşma olmadan, zemin içindeki boşluk suyunu çıkartmak için gerekli olan enerjiye, matrik emme gerilmesi denilmekte ve ($u_a - u_w$) olarak gösterilmektedir. Burada, u_a hava basıncı, u_w negatif boşluk suyu basıncıdır. Osmotik basınç, boşluk suyu içindeki eriyik tuzların saf su ile olan osmotik basınç farkı olarak tarif edilmektedir (Önalp, 2002). Zeminin toplam emmesini, osmotik basınç baskın olmadığı zaman tanımlamak daha kolay olmaktadır. Çözünmüş tuz miktarının az olduğu durumlarda osmotik basınç ihmal edilmektedir (Tekinsoy, 2002).

2.1.1. Kapilarite

Matrik emme gerilmesi, zeminlerin su ile temasa geçtiğinde boşluklardan suyun yükselmesi olarak bilinen kapilarite olayı ile tanımlanmaktadır. Su, herhangi bir katı ile temasa geçtiğinde, yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisi ile temas noktalarında bir serbest enerji açığa çıkarır. Bu serbest enerji, şekil 2.2’de gösterildiği gibi suyun kapiler olarak yükselmesine neden olur. Suyun kapiler olarak yükselmesi şekilde gösterildiği gibi modellenmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Atmosfer koşullarında, cam tüp içinde yüzey geriliminden dolayı yukarı hareket eden su kütlesini dengede tutan kuvvetler eşitlenerek aşağıdaki denklem yazılmaktadır.

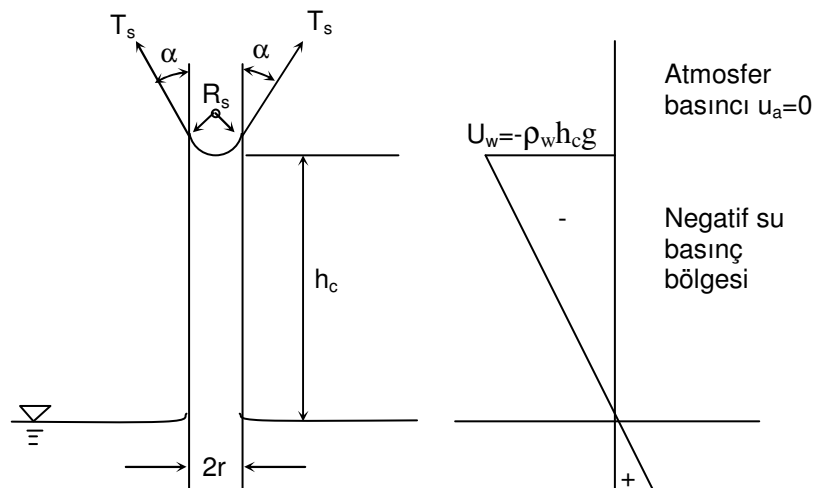
$$2\pi r T_s \cos \alpha = \pi r^2 h_c \rho g \quad (2.4)$$

r =kapiler tüpün yarı çapı

T_s =suyun yüzey gerilimi

α =değme açısı veya ıslanma açısı

h_c =kapiler yükseklik



Şekil 2.2. Kapiler su yükselmesinin fiziksel modellenmesi
(Fredlund ve Rahardjo, 1993)

Denklem (2.4) düzenlediğinde tüp içindeki suyun yükseleceği maksimum yükseklik bulunur.

$$h_c = \frac{2T_s}{\rho_w g R_s} \quad (2.5)$$

R_s =tüp içindeki suyun yaptığı menüsküs yarıçapı ($r/\cos\alpha$)

Öte yandan matrik emme gerilmesi yüzey gerilimi cinsinden, aşağıdaki gibi verilmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.6)$$

Bu eşitlikteki R_s değme açısının (α) sıfır olduğu bir zeminin gözenek yarı çapı olarak kabul edilmektedir. Denklem (2.6)'ya göre, gözenek yarı çapı küçük olan zeminlerin emme gerilmesi daha büyük olmaktadır.

2.2. Emme Basıncının Ölçülmesi

Yapılan çalışmalar sonunda, zeminlerin başlangıç su içeriğinin matrik emme ile doğrudan ilişkili olduğu ve osmotik basıncın su içeriğindeki değişmeden etkilenmediği anlaşılmıştır. Bu nedenle toplam emme basıncındaki değişim, matrik emme basıncındaki değişimi oldukça iyi temsil etmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Matrik emmenin hacımsal su içeriği ile olan değişimi, fiziksel bir yaklaşımla Tekinsoy (2002) tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$u_a - u_w = -(u_a - u_w)_s \left(\frac{\theta_s - \theta}{\theta - \theta_r} \right) \quad (2.7)$$

Burada θ , θ_s ve θ_r sırasıyla herhangi bir andaki hacımsal su içeriğini, doymun su içeriğini ve zeminin başlangıç su içeriğini gösterir. $(u_a - u_w)_s = \frac{2T_s}{R_s(\theta_s - \theta_r)}$ olup, zeminin kapiler doymun durumda suyu askıda tutan matrik emmedir (Tekinsoy, 2002).

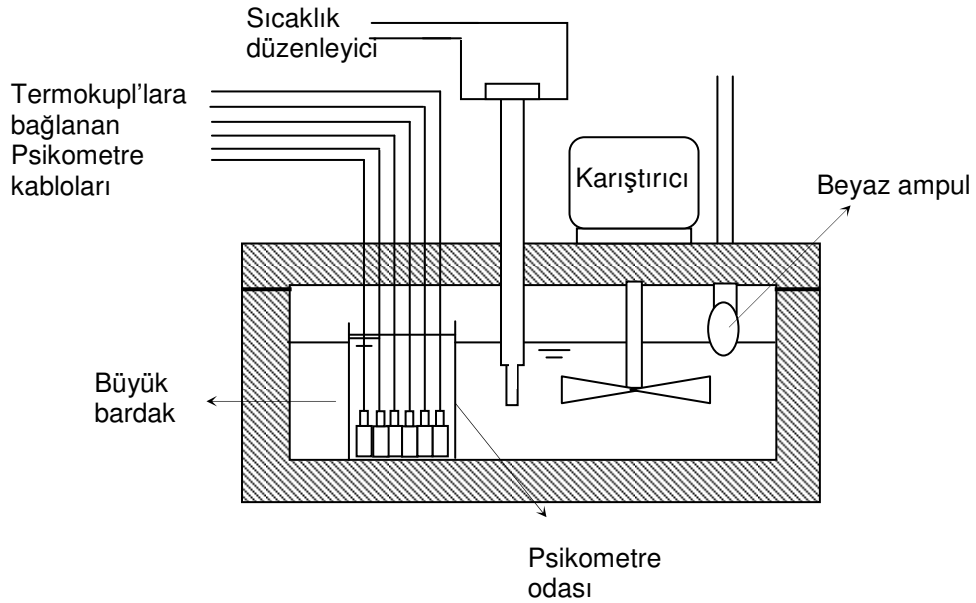
Değişik teknikler kullanılarak emme basıncının ölçümünde kullanılan aletler Çizelge 2.1 de kısaca verilmiştir.

Çizelge 2.1. Emme basıncının ölçülmesi için kullanılan yöntemler
(Zapata, 1999)

Aletin ismi	Ölçülen emme cinsi	Ölçme aralığı (kPa)
Psikometre	Toplam Emme	100-71000
Filtre Kağıdı	Toplam ve ozmotik emme gerilmesi	400-30000
Emme Plakası	Matrik Emme	0-90
Basınç Plakası	Matrik Emme	0-1500
Basınç Membranı	Matrik Emme	0-1500
Standart Tansiyometre	Matrik Emme	0-90
Osmotik Tansiyometre	Matrik Emme	0-1500
Gözenekli Blok	Matrik Emme	30-3000
Isı İletkenlik Sensörü	Matrik Emme	0-175

2.2.1. Psikometre ile Toplam Emmenin Ölçülmesi

Dolaylı emme ölçümü sağlayan psikometreler, bakır-nikel veya krom-nikel termokupl bağıl neme bağlı olarak elektromotif bir güç ortaya çıkarır. Bu elektromotif kuvvet ölçülerek ortamın nemi hakkında bilgi edinilir. Ancak ortam sıcaklığının değişmesi termokupl'ları etkiler ve ölçülen emmenin yanlış olmasına neden olur. Bu nedenle psikometre ölçümleri $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ da ve su banyosunda yapılır. Şekil 2.3.'te psikometre banyosu şematik olarak gösterilmiştir. Zeminlerin yüksek emme basınçlarının ölçülmesinde kullanılan psikometreler, sıcaklıktan etkilendikleri için, arazide sağlıklı sonuçlar vermemektedir.

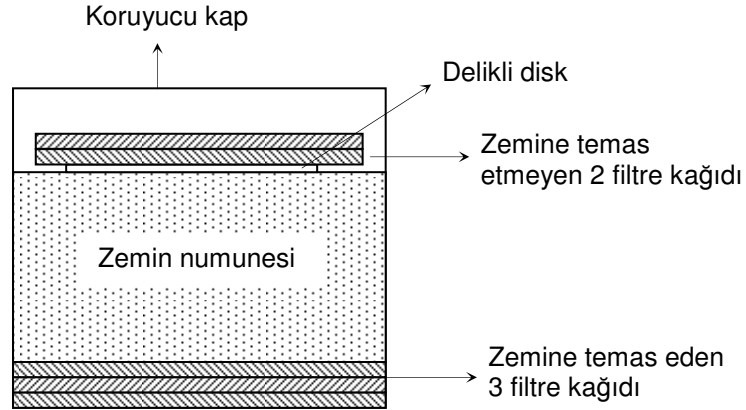


Şekil 2.3. Sabit sıcaklıklı psikometre banyosu (Krahn ve Fredlund, 1972)

2.2.2. Filtre Kağıdı Yöntemi

Dolaylı ölçüm yöntemlerinden olan bu yöntemde, kuramsal olarak hem toplam, hem de matrik emmeyi ölçmek mümkün olmaktadır. Emme-su içeriği ilişkisi önceden kalibrasyonlarla belirli filtre kağıtları kullanılarak çıkarılmaktadır. Matrik emme ölçümlerinde; filtre kağıdı zemin numunesi ile temas halinde yerleştirilerek, boşluk suyu akışı sağlanır ve dengeye gelene kadar (yaklaşık 6-8 gün) beklenir.

Denge sağlandıktan sonra filtre kağıdı yaş ve kuru olarak hassas terazide tartılarak, su içeriği hesaplanır ve kalibrasyon eğrisinden su içeriğine karşı gelen emme değeri bulunur. Toplam emme ölçümlerinde filtre kağıdı zemin numunesi ile temas ettirilmez ve bu durumda zemin ile filtre kağıdı arasında buhar alışverişi olur.

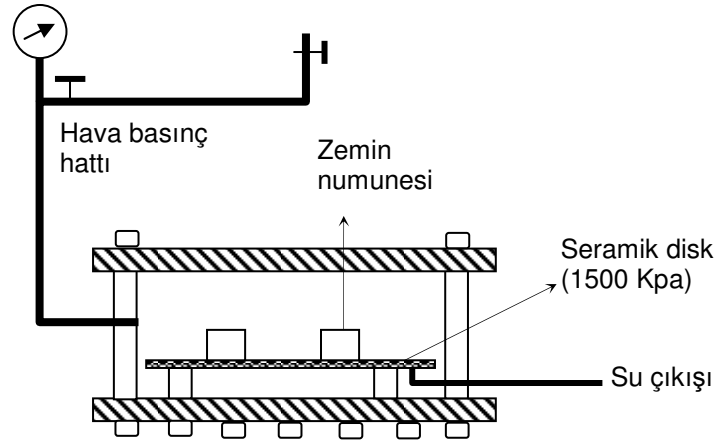


Şekil 2.4. Toplam ve matrik emmenin filtre kağıdı yöntemi ile ölçümü
(Al-Khafaf ve Hanks, 1974)

2.2.3. Basınç Plakası

Zeminlerin matrik emme su içeriği ilişkisini belirlemek için kullanılan diğer bir düzenek de basınç plakası deney düzeneğidir (Şekil 2.5). Bu düzenek ile 0-1500 kPa aralığında matrik emme uygulaması yapılmaktadır. Diğer bir adı basınç tenceresi olan bu düzeneğin ana parçası, yüksek basınca dayanıklı çelik tencereden ve hava basıncı sağlayan kompresörden oluşmaktadır. Çelik tencerenin içerisinde gözenek çapı çok küçük olan ve seramikten yapılan, yüksek hava giriş değerli poroz disk denilen bir parça bulunmaktadır. Seramik diskin alt kısmına, içinden geçen suyu dışarı çıkmaya zorlamak için sıkı şekilde bir membran monte edilmiştir. Bu deney düzeneğinde, ilk kez Hilf (1956) tarafından önerilen ve eksen kaydırma tekniği denilen bir yöntem ile matrik emme basınçları kontrol edilmiştir. Zemin numuneleri bir ring içerisine alındıktan sonra, bu seramik diskin üzerine oturtulur ve tencerenin kapağı sıkı bir şekilde kapatılır. Eksen kaydırma tekniğine göre tencere içerisine istenilen matrik emme değerine eşit bir hava basıncı uygulanır. Uygulanan hava basıncı zemin numunesinin boşluklarına girerken, boşluk suyunun da dışarı itilmesini sağlar. Zemin içinden çıkan su, seramik disk içinden geçtikten sonra, membrana bağlı drenaj borusundan tencere dışına tahliye olur. Seramik diskin hava giriş değeri aşılmadığı sürece, uygulanan hava, seramik içinden geçemediği için tencere içindeki

hava basıncı sabit kalmaktadır. Zemin numunesi içerisindeki su çıkışı sona erene kadar hava basınç kademesi değiştirilmez. Su çıkışı durduğunda uygulanan hava basıncı, zeminin matrik emmesi olarak alınır ve bu durumdaki su içeriği tespit edilir. Bu işlemler farklı hava basınç kademeleri için yapılarak, numunenin matrik emme su içeriği ilişkisi saptanır. Bu deney, aynı zamanda zemin numunesinin alt kısmı drenaja kapalı olarak yapılmaktadır. Bu durumda, seramik diskin alt kısmında bir su odacığı oluşturulur ve buradan aynı zamanda numune altına sabit su basıncı uygulanır. Su basıncı dengeye geldiğinde, uygulanan hava basıncı ile su basıncı arasındaki fark matrik emme ($u_a - u_w$) olarak alınmaktadır.



Şekil 2.5. Basınç plakası (Tekinsoy, 2002)

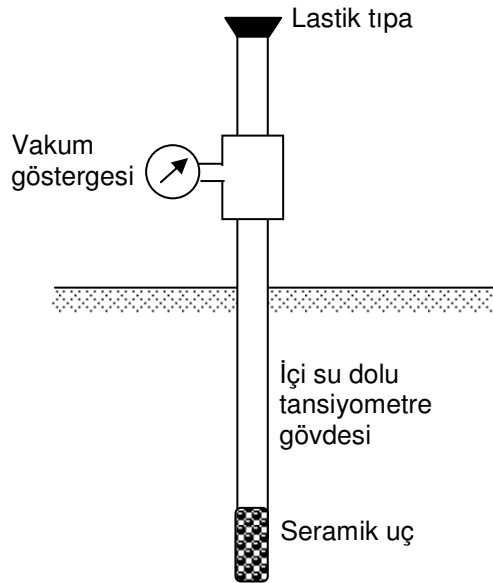
2.2.4. Tansiyometreler

Zeminin doğrudan matrik emme basıncını ölçmede kullanılan tansiyometreler üç ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla seramik uç, buna bağlı içi saf su ile dolu saydam bir boru ve boru içindeki suyun basıncını ölçmek için kullanılan bir manometredir (Şekil 2.6). Tansiyometrenin içindeki su ile, seramik ucun yakın çevresindeki zemin suyu arasında sürekli bir ilişki vardır. Suyu doymun olmayan zemin gözeneklerinin ancak bir kısmı su ile doludur ve hava-su ara yüzeyini oluşturan küresel yüzey, su kütlesinin bulunduğu tarafa doğru daha büyüktür. Başka

bir ifade ile su kütlesi içindeki su basıncı, boşluk hava basıncından daha büyüktür. Tansiyometre içindeki su, zemin suyu ile dengeye geldiğinde tansiyometre içindeki suyun basıncı, boşluk suyu basıncına eşdeğer olur. Buna göre tansiyometre gövdesindeki vakum göstergesi zemin suyuna ait basıncı gösterir.

2.2.5. Gözenekli Blok

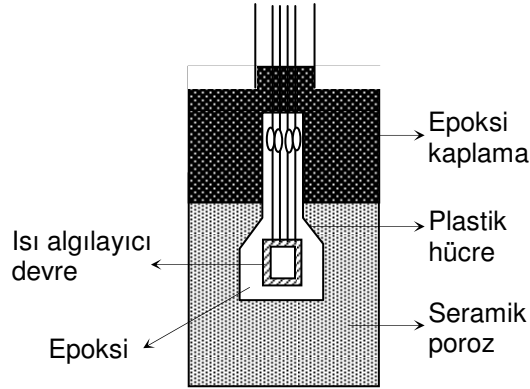
Bu yöntem için genellikle alçıtaşı, naylon ve fiberglas gözenekli blok olarak kullanılmaktadır. Zemin danesi yüzeyindeki soğurulmuş suyun elektriksel direnci, zemin numunesinin su içeriğine göre değişmesi, bu yöntemin temelini oluşturmaktadır. İçerisinde iki adet elektrod bulunan gözenekli bir blok zemin içine yerleştirilir. Zemindeki emme bloktaki emmeden büyükse, zemin ve blok aynı matrik emmeye gelene kadar zemine doğru su akışı olur. Eğer blok başlangıçta kuru ise dengeye gelene kadar zeminden su alacaktır. Bloğun elektriksel direnci daha sonra ölçülür ve kalibrasyon eğrisinden matrik emmesi bulunur (Özocak, 2003).



Şekil 2.6. Tansiyometre (Morrison, 1983)

2.2.6. Isıl İletkenlik Algılayıcıları İle Ölçüm

Bir zeminin, termal iletkenliğinin artması, su içeriğinin artması ile doğru orantılıdır. Bu özellikten yararlanılarak Şekil 2.7’deki sensör geliştirilmiştir. Sensör, gözenekli bir seramik gövde içine yerleştirilmiş, sıcaklık ölçen bileşik bir devre ile ısıtıcıdan oluşmaktadır. Seramik gövdenin su içeriği, seramik çevresinde bulunan zeminin, gövdeye uyguladığı kapiler basınca bağlı olarak değişir. Bu özellik yardımı ile sensörün kalibrasyonu, uygulanan emmeye karşı gelen ve sensörün verdiği milivolt okuması olarak yapılır.



Şekil 2.7. Termal sensör (Phene ve ark., 1971)

2.3. Doygun Olmayan Zeminler İçin Gerilme Durumu Değişkenleri

Zeminlerin hacim değişimi ve kayma mukavemeti gibi mekanik davranışları, zemin içinde meydana gelen gerilme durumlarının kombinasyonları ile tanımlanmakta ve bunlara gerilme durumu değişkenleri denilmektedir. Gerilme durumu değişkenleri, zeminin fiziksel özelliklerine bağlı değildir ve bunların sayısı zemin içinde mevcut olan farklı fazdaki madde sayısına bağlıdır (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

2.3.1. Doygun Olmayan Zeminler İçin Kullanılan Efektif Gerilme Kavramı

Suya doymun olan zeminler için kullanılan gerilme durumu değişkenleri veya efektif gerilme ifadesi, aşağıdaki gibi verilmektedir. Bu ifadeden görüldüğü gibi efektif gerilme tek değişkene bağlıdır.

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2.8)$$

σ' =efektif gerilme

σ =toplam gerilme

u_w =boşluk-suyu basıncı

Yukarıda ifade edildiği gibi, iç yapıları daha karmaşık ve üç fazlı bir yapıya sahip olan doymamış zeminlerdeki gerilme durumu değişkenlerini tanımlamak oldukça zordur. Bu alanda yapılan çalışmaların ilki Croney ve ark. (1952)'ye ait olup, doymamış zeminlerin efektif gerilme değişimleri, aşağıda verilen eşitlik ile ifade edilmeye çalışılmıştır.

$$\sigma' = \sigma - \beta' u_w \quad (2.9)$$

Bu eşitlikte, β' =tutma veya yapışma faktörü'dür.

Bishop (1963) doymamış zeminler için, yaygın şekilde kabul gören, aşağıdaki efektif gerilme ifadesini önermiştir.

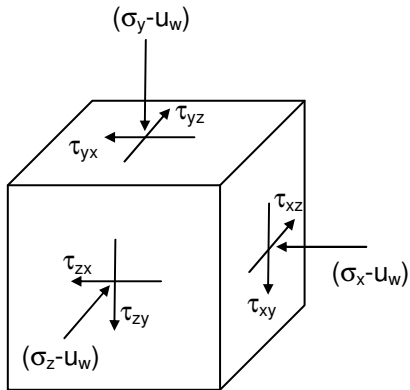
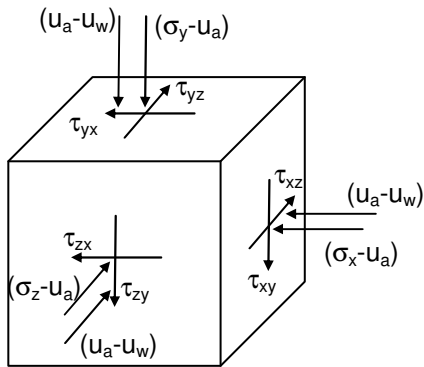
$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.10)$$

Bu eşitlikte u_a boşluk hava basıncını, χ ise zeminin doymunluk derecesine bağlı bir parametreyi gösterir.

Eğer zemin doymun duruma gelecek olursa, verilen (2.10) numaralı eşitlikteki $\chi=1$ değerini alır ve eşitlik (2.8) numaralı ifadeye dönüşür. Denklemden görüldüğü

gibi σ , u_a ve u_w gibi üç değişken, $(\sigma - u_a)$, $(u_a - u_w)$ gibi iki parametre söz konusudur. Yapılan deneysel çalışmalar sonunda bir çok araştırmacı, doymamış zeminlerin mekanik davranışını tanımlamak için $(\sigma - u_a)$ ve $(u_a - u_w)$ parametrelerinin kullanılabileceğini önermişlerdir. Şekil 2.8’de doymun ve doymun olmayan zeminler için verilen gerilme tansörleri ve bu tansörlerin etkidiği kübik zemin elemanı gösterilmiştir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

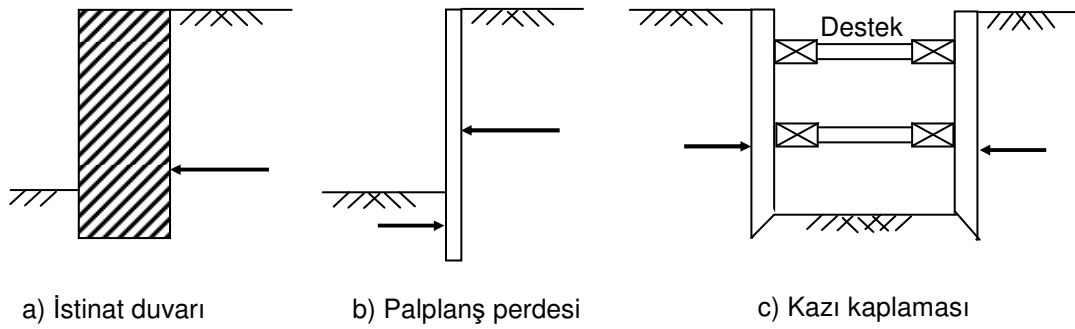
Doymun zemin	Doymamış zemin
$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_w) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - u_w) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u_w) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - u_a) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u_a) \end{bmatrix}$
	$\begin{bmatrix} (u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & (u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & (u_a - u_w) \end{bmatrix}$

Şekil 2.8. Doymun ve doymamış zeminler için gerilme durum değişkenleri ve gerilme tansörleri (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

2.4.Yanal Zemin Basınçları

Zemini farklı iki yüzeyde tutan ve yanal zemin basınçlarının etkisinde olan dayanma yapılarının hesaplanması (boyutlandırılması ve projelendirilmesi) için onlara gelen yanal zemin basınçlarının bilinmesi gerekir. Şekil 2.9.'da zemini yanal olarak tutan çeşitli dayanma yapıları görülmektedir.



Şekil 2.9. Yanal zemin basınçlarının etkisindeki dayanma yapıları(Uzuner, 1992)

Zeminin kendi ağırlığından veya ek düşey yüklerden kaynaklanan yanal gerilmeler o noktadaki düşey gerilmenin şiddetine bağlıdır. Genel olarak, bu ilişki aşağıdaki ifade ile verilir:

$$\sigma'_h = K \sigma'_v \quad (2.10)$$

Burada boyutsuz bir parametre olan K yanal toprak basıncı katsayısı olup, değeri zeminin cinsine, gerilme tarihçesi ve yükleme koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Das, 2002).

2.4.1. Rankine Teorisi

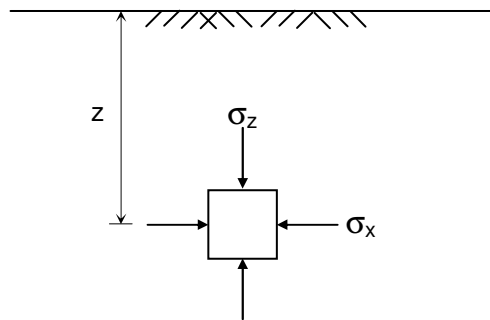
Kohezyonsuz zeminler için önerilen Rankine Teorisi, daha sonraları kohezyonlu zemin ve diğer durumlar için genelleştirilmiştir. Rankine Teorisi, bir zemin ortamında zeminin plastik denge durumuna ulaştığı andaki gerilmeleri dikkate

alır. Zemin ortamının her noktasında kırılma varsa böyle bir duruma plastik denge denilir. Rankine, zemin basıncı problemini aşağıdaki varsayımları yaparak çözüme ulaştırmıştır (Uzuner, 1992).

- a) Zemin homojen ve izotropdur
- b) Zeminin kayma direnci tek parametre ile ifade edilir (ϕ)
- c) Duvar arkasında kırılan zemin üçgen ve rijit bir kamadır
- d) Duvarla zemin arasında sürtünme yoktur
- e) Kırılma iki boyutlu bir problemdir (sonsuz duvar)

Bu varsayımlardan sonuncusu dışında, hemen hepsi gerçeklere uymamakla birlikte hesaplara büyük kolaylık getirmesi, buna karşın büyük hatalar yapmaması nedeniyle genel çözüm amaçları için kabul edilmektedir. Oysa bilindiği gibi zemin, homojen olsa bile izotrop değildir. İkinci varsayım kumlar dışında geçerli değildir. Özellikle killerde kohezyon, kayma direncinin en büyük bileşenidir. Üçüncü varsayım ise çoğu zeminde geçerli bulunmamaktadır, zira kama oluştuğunda kama yüzeyi bir parbole yakın oluşmaktadır. Duvarla zemin arasında sürtünme olmadığı varsayımı, bu teoremin en zayıf yanıdır. Örneğin eğik sırtlı beton bir duvarın kum dolgu ile yapılması durumunda, duvar-zemin sürtünme açısı önemli değerlere ulaşmaktadır.

İki boyutlu koşullarda, yarım sonsuz ortamda, z derinliğinde bir zemin elemanı ele alındığında (Şekil 2.10.) bu elemanın yatay ve düşey düzlemlerinde kayma gerilmeleri sıfır (0) olup elemana asal gerilmeler etki eder. Yarım sonsuz ortamda teorik olarak aşağıdaki iki farklı durum söz konusu olabilir.



Şekil 2.10. İki boyutlu koşullarda, z derinliğindeki bir eleman (Craig, 1987)

- a) Elastik denge durumu
- b) Plastik denge durumu

2.4.2. Sükunetteki Yanal Zemin Basınç Katsayısı (Elastik Denge Durumu)

Terzaghi (1925) tarafından önerildiği üzere sükunet durumunda, başka bir ifade ile K_o koşullarında, zemin içinde meydana gelen yanal deformasyonlar 10^{-3} mertebesinde küçük ve en genel halde bu şartlarda efektif düşey gerilmenin yatay gerilmeye oranına sükunetteki zemin basınç katsayısı denilmektedir. Burada sözü edilen yatay ve düşey gerilmeler asal gerilmelerdir. Asal gerilmelerin etkidikleri düzlem üzerinde, kayma gerilmeleri bulunmaz. Doymamış zeminlerde bu oran aşağıdaki gibi verilmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

$$K_o = \frac{(\sigma_h - u_a)}{(\sigma_v - u_a)} \quad (2.11)$$

Zeminin elastik bir malzeme olduğu varsayımı altında, sükunetteki yanal zemin basınç katsayısının ifadeleri, Hooke yasalarını kullanarak, doymun ve doymamış zeminler için, aşağıdaki şekilde verilmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

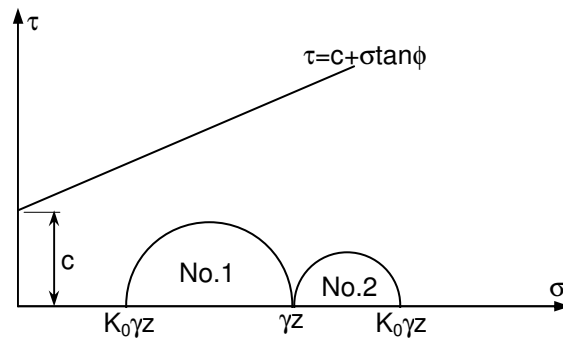
$$K_o = \frac{\mu}{1-\mu} \quad (\text{Doymun}) \quad (2.12)$$

$$K_o = \frac{\mu}{1-\mu} - \frac{E}{(1-\mu)H} \frac{(u_a - u_w)}{(\sigma_v - u_a)} \quad (\text{Doymamış}) \quad (2.13)$$

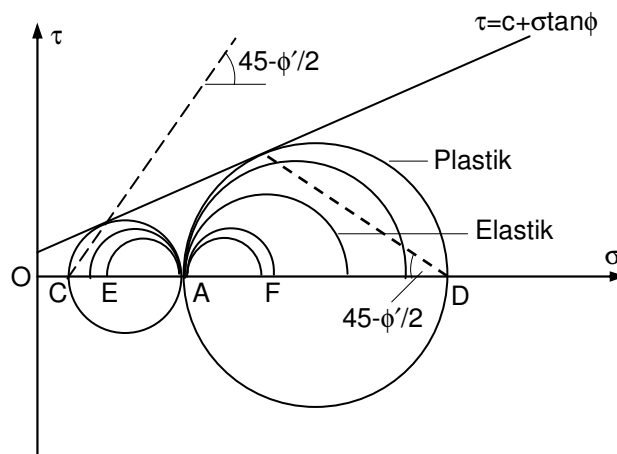
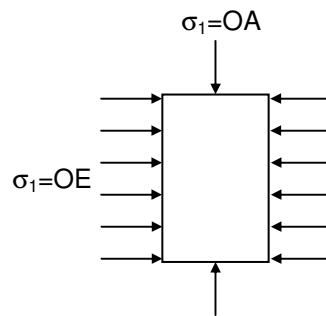
Burada, μ Poisson oranını H ise, matrik emmeye göre elastisite modülünü göstermektedir.

Elastik denge durumunda bulunan zemin kütlesinin bir elemanı asal gerilmelere maruzdur. Bu asal gerilmeler, zeminin özellikleri ve üzerindeki yük değişmedikçe zemini kırılma durumuna getiremez. Asal gerilmeler arasındaki ilişkiler zemine ait, porozite, birim hacim ağırlık, elastisite modülü gibi karakteristik özelliklerden etkilenir ve zemin bu koşullar altında şimdiki konumuna gelir. Kumlu bir zeminde herhangi bir noktadaki büyük asal gerilmenin küçük asal gerilmeye oranı, killi bir zemine göre farklılık gösterir. Doğal zeminlerde asal gerilmeler oranı, zeminin oluşumunu sağlayan sedimantasyon sürecinden ve farklı aşırı konsolidasyon oranına göre, gerilme tarihçesinden etkilenir (Tekinsoy ve Laman, 2002).

Yarı sonsuz uzay olarak kabul edilen zemin içinde herhangi bir z derinliğindeki efektif birim ağırlığa sahip bir nokta göz önüne alınırsa, bu noktadan geçen yatay düzlem üzerindeki efektif gerilmeler, zemin ağırlığından dolayı γz 'e eşit olur. Yine aynı noktadaki düşey düzlem üzerindeki gerilme $K_0 \gamma z$ olarak verilir. Bu durumda K_0 , 1'den küçük değerler alır. Zemin elemanının bu gerilme durumu Şekil 2.11' deki 1 nolu Mohr dairesi ile temsil edilir. Aşırı konsolide olmuş veya sıkıştırılmış zeminlerde düşey düzlem üzerindeki gerilmeler, yatay düzlem üzerindeki gerilmelerden büyük olabilir. Bu durumda ise K_0 , 1'den büyük değerler alır ve benzer şekilde sükunet durumu Şekil 2.11'deki 2 nolu daire ile gösterilir. Sükunet durumundaki zeminler kırılma durumundan uzak olduğu için, daima denge durumunun geçerli olduğu kabul edilir. İzotropik zeminin mukavemetinin, mukavemet zarfı ile yani $\tau = c + \sigma \tan \phi$ doğrusu ile temsil edildiği göz önüne alınırsa, sadece bu doğruya teğet olan gerilme daireleri, zemini kırılma durumuna getiren gerilmeleri ifade eder. K_0 koşullarında yani kırılmanın olmadığı durumda hiç bir gerilme dairesi bu doğruyu kesmez veya teğet olmaz. Bu şekilde derinlik boyunca sonsuz sayıda gerilme daireleri çizilebilir ve bu daireler elastik denge şartını temsil eder (Şekil 2.12 ve 2.13) (Parcher ve Means, 1968).



Şekil 2.11. Sükunetteki zemin basıncı (Parcher ve Means, 1968)

Şekil 2.12. Plastik denge ve K_0 koşulu için Mohr dairesi (Bowles, 1988)Şekil 2.13. K_0 durumu (Bowles, 1988)

2.4.3. Plastik Denge Durumu

2.4.3.1. Aktif Durum

Eğer yarım sonsuz ortam yanıl genişlemeye tabi tutulursa, zeminde aktif durum meydana gelir (Şekil 2.14). Aktif basınç minimum bir değeri olup, zeminin ileri doğru hareketi ile ortaya çıkan kırılma anında meydana gelir.

Aktif durumda elemana etkiyen düşey gerilme sabit kalırken, yatay gerilmenin değeri azalarak sabit bir değere varır. Bu durumda zemin yatayla $45+\phi/2$ 'lik açılar yapan düzlemler boyunca kırılır. Kuru danesel zeminler göz önüne alınırsa, bileşke gerilmenin (herhangi bir düzlem üzerinde) içsel sürtünme açısı olan ϕ 'den daha büyük değeri olamaz. Bu nedenle OR ve OQ, içine Mohr dairesinin çizilebileceği limit teğetleri gösterir. Bu koşulu sağlayan her daire, büyük ve küçük asal gerilmeleri belirleyen σ_1 ve σ_3 noktalarının yerini verir ve buna göre aşağıdaki ifadeler yazılabilir (Kumbasar ve Kip, 1973):

$$\sin \phi = \frac{RC}{OC} = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)}{\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)} = \frac{\gamma z - \sigma_3}{\gamma z + \sigma_3} \quad (2.14)$$

veya

$$\frac{\sigma_3}{\gamma z} = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.15)$$

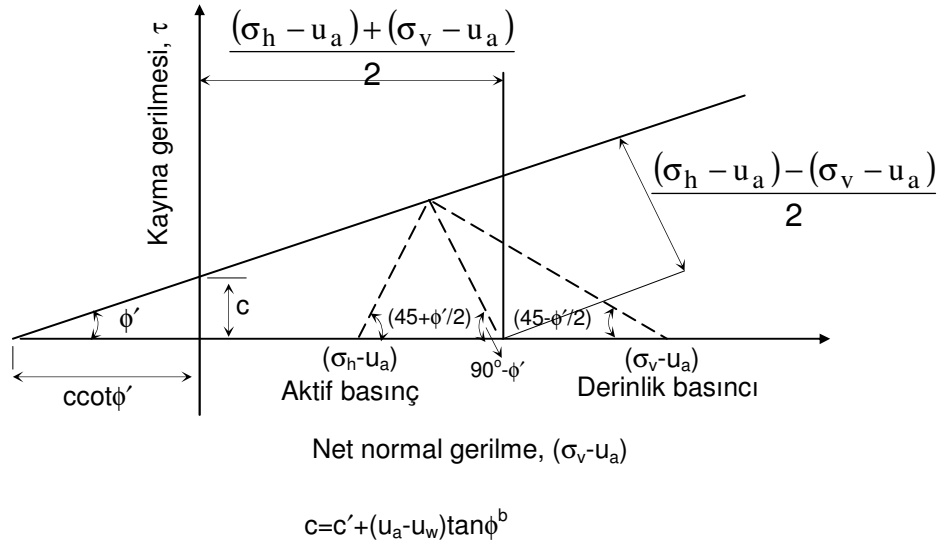
buradan da

$$\sigma_3 = \gamma z \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.16)$$

elde edilir. Sonuç olarak aktif zemin basınç katsayısı aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.17)$$

Şekil 2.15'te doymamış zeminlerde aktif durum için mohr dairelerinin oluşturulması gösterilmiştir. Buna göre aktif zemin basınç katsayısı K_a , Fredlund ve Rahardjo, (1993) tarafından aşağıda gösterildiği gibi verilmiştir:

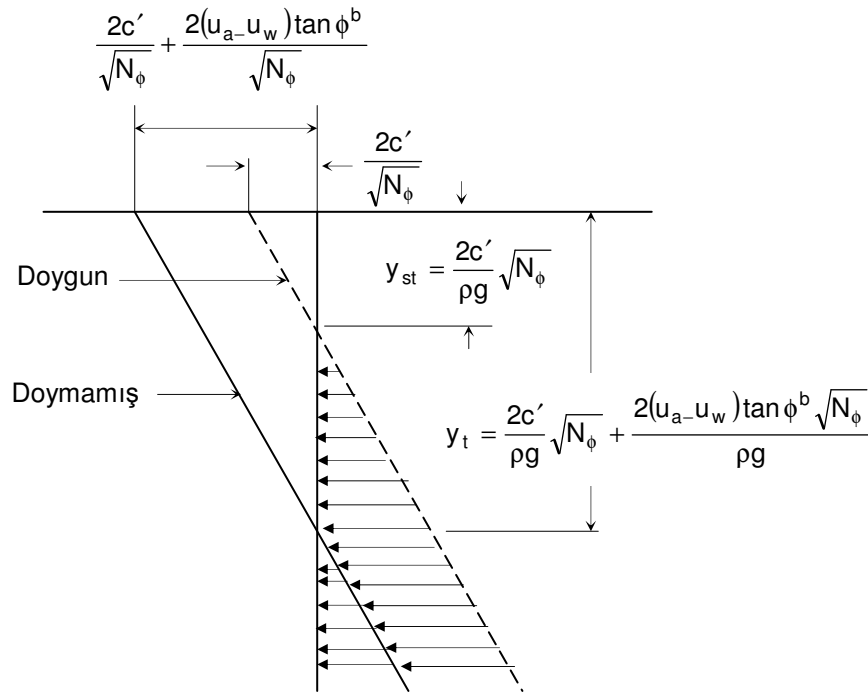


Şekil 2.15. Doymamış zeminlerde aktif durum için mohr dairelerinin oluşturulması (Fredlund ve Rahardjo, 1993)

$$K_a = \frac{1}{N_\phi} - \frac{2c'}{(\sigma_v - u_a)} \frac{1}{\sqrt{N_\phi}} - 2 \frac{(u_a - u_w)}{(\sigma_v - u_a)} \tan \phi^b \frac{1}{\sqrt{N_\phi}} \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{N_\phi} = \tan^2 \left[45 - \frac{\phi'}{2} \right]$$

Burada ϕ^b matrik emmeden dolayı mukavemete gelen katkı, diğer bir ifade ile, doymamış zeminlerde matrik emme ile kayma mukavemeti arasındaki nonlineer ilişkinin herhangi bir noktasındaki eğimi olarak verilmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Matrik emmenin etkisi göz önüne alınarak aktif zemin basınçları Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Derinlik boyunca sabit değişen matrik emme altında aktif zemin basınç dağılımı (Fredlund ve Rahardjo, 1993)

2.4.3.2. Pasif Durum

Eğer yarı sonsuz ortamda yanal bir sıkışma söz konusu ise, zemin ortamında pasif durum ortaya çıkar. Pasif basınç zeminin dayanabileceği maksimum basınç olup, zeminin kabarması sonucu kırılmanın meydana gelmesinden önce, duvarın maruz kaldığı en büyük basınçtır (Şekil 2.17).

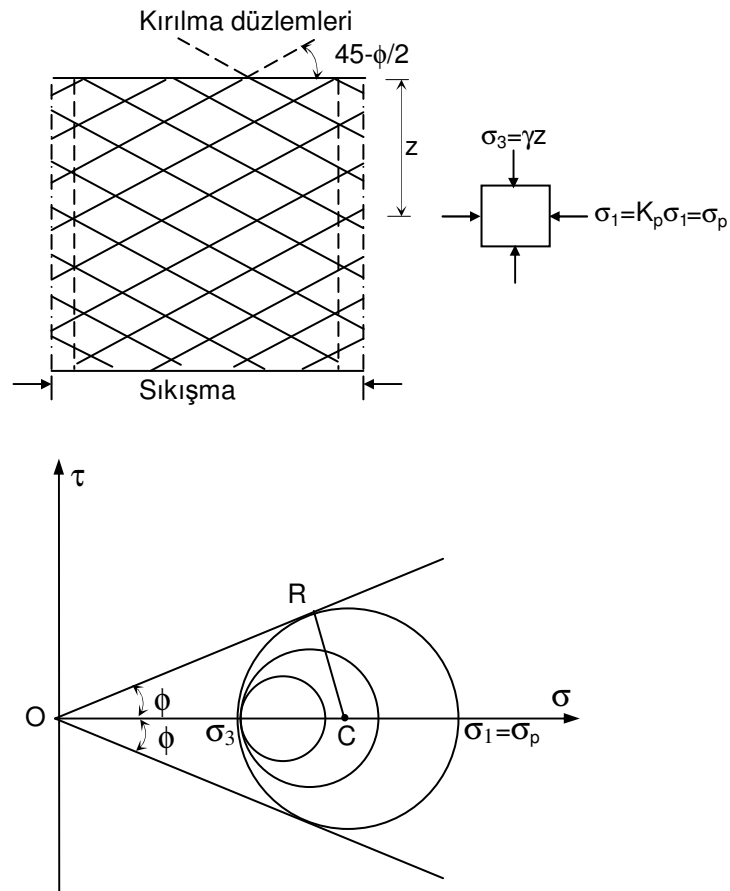
Pasif durumda elemana etkiyen düşey gerilme (küçük asal gerilme) sabit kalırken, yanal gerilme artarak sabit bir değere ulaşır. Zemin ortamı yatayla $(45-\phi/2)$ kadar açılar yapan düzlemler boyunca kırılır. Pasif durum için de aktif duruma benzer şekilde pasif zemin basınç katsayısı çıkarılır ve aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\sigma_1 = \sigma_p = K_p \sigma_3 = K_p \gamma_n z \quad (2.19)$$

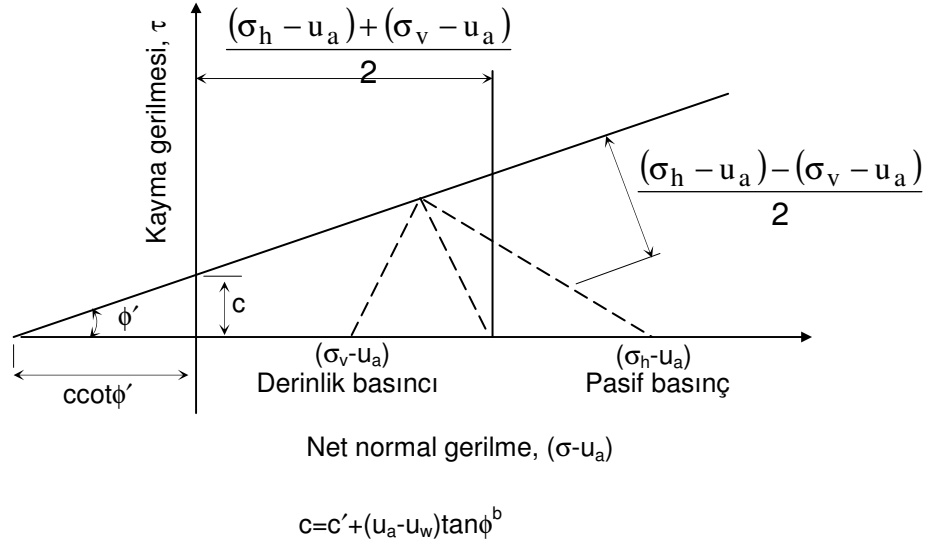
$$K_p = \tan^2(45 - \phi/2) \quad (2.20)$$

Şekil 2.18’de doymamış zeminlerdeki pasif durum için Mohr dairelerinin oluşturulması gösterilmiş ve pasif zemin basınç katsayısı K_p , aşağıda verildiği gibi elde edilmiştir. Şekil 2.19’da ise matrik emmenin etkisi göz önüne alınarak, pasif zemin basınçları gösterilmiştir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

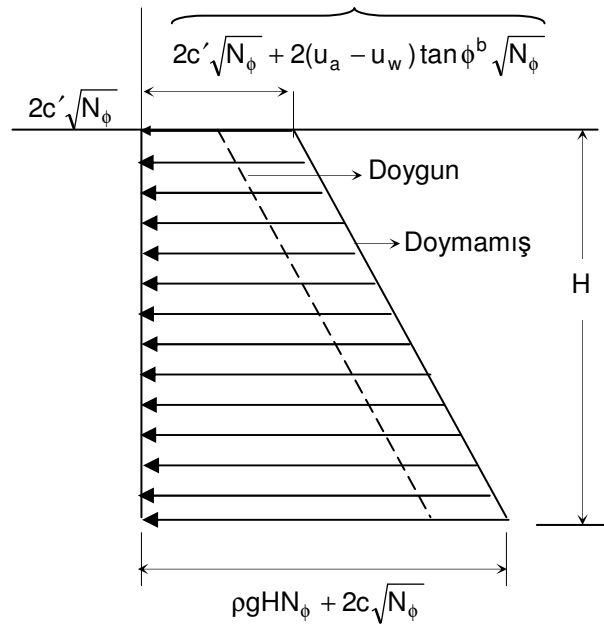
$$K_p = N_\phi + \frac{2c'\sqrt{N_\phi}}{(\sigma_v - u_a)} + 2 \frac{(u_a - u_w) \tan \phi^b \sqrt{N_\phi}}{(\sigma_v - u_a)} \quad (2.21)$$



Şekil 2.17. Pasif durum (Kumbasar ve Kip, 1973)



Şekil 2.18. Doymamış zeminlerde pasif durum için Mohr dairelerinin oluşturulması (Fredlund ve Rahardjo, 1993)



Şekil 2.19. Derinlik boyunca sabit değişen matrik emme altında pasif zemin basınç dağılımı (Fredlund ve Rahardjo, 1993)

2.5 YANAL BASINÇ ÖLÇMELERİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Kaynaklarda, sükunetteki yanal zemin basınçlarının laboratuvar ve arazide doğrudan ölçümü için birçok düzenek önerilmektedir. Ancak bu düzeneklerle doymuş koşullarda deneyler yapmak mümkün olmaktadır. Bunlar yanında, sükunetteki yanal zemin basınç katsayısının tahmini için, ampirik ve yarı ampirik ifadeler de mevcuttur. Bu bölümde, doymuş koşullarda K_o 'ın ölçümü için daha önce kullanılan deney düzenekleri ve K_o 'ın tahmini için verilen ampirik ilişkiler incelenecektir. Ayrıca doymuş olmayan koşullarda yapılan deneylerin yapılışı ve kullanılan düzenekler hakkında bilgi verilecektir.

2.5.1 Sükunetteki Yanal Zemin Basınç Katsayısının Ölçümü İçin Kullanılan Laboratuvar Düzenekleri

Sükunetteki yanal zemin basınç katsayısı ilk kez Donath (1891) tarafından incelenmiştir. Bu araştırmacı K_o 'ı; yatay yer değiştirmenin sıfır olduğu durumda, zemine uygulanan düşey gerilme altında yatay gerilmenin, düşey gerilmeye oranı olarak tanımlamıştır.

Terzaghi (1920), yaptığı deneyler sonucunda kaba kumlar için $K_o=0.42$ killi zeminler için $K_o=0.7$ değerini deneysel olarak vermiştir.

Kjellman (1936), üç eksenli deney aletine benzeyen karmaşık bir deney aleti ile kumlar üzerinde tek eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmiştir. K_o 'ın 0.5-1.5 arasında değerler aldığını belirtmiş ve ilk defa sükunetteki basınç katsayısının zeminin gerilme tarihçesine bağlı olduğunu ileri sürmüştür. Bayliss (1948), K_o deney şartlarını yaklaşık olarak sağlayan ve yanal zemin basınçlarını ölçebilen bir deney düzeneği geliştirmiştir. Bu düzeneği kullanarak gerçekleştirdiği deneylerde, orta plastisiteli inorganik bir kil numunesi için $K_o=0.5$ değerini ölçmüştür.

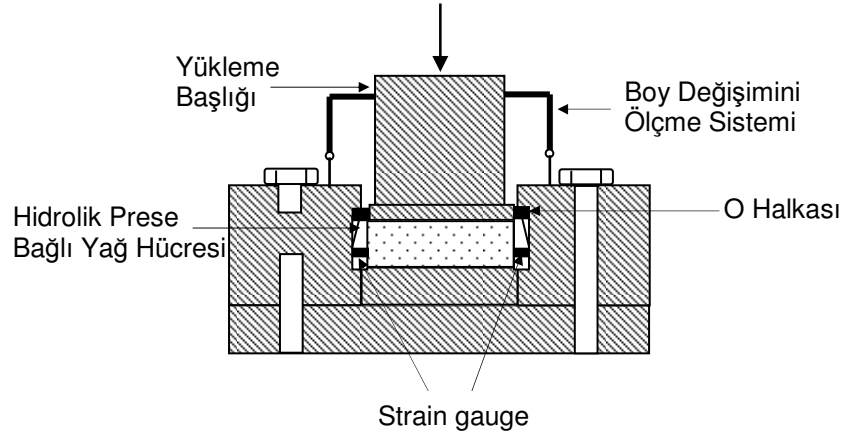
Bishop ve Eldin (1953), çeşitli yükleme ve drenaj şartlarında, kumların kayma direncini kontrol eden faktörleri incelemek amacıyla üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerde suya doymuş kum numunelerini, K_o koşullarında, konsolide ederek yanal basınçları ölçmüşlerdir. Normal yükleme

durumunda ölçülen yanal gerilmelerin düşey gerilmeler ile bir lineerlik gösterdiğini, ancak bu lineerliğin boşaltma durumunda ortadan kalktığını gözlemlemişlerdir.

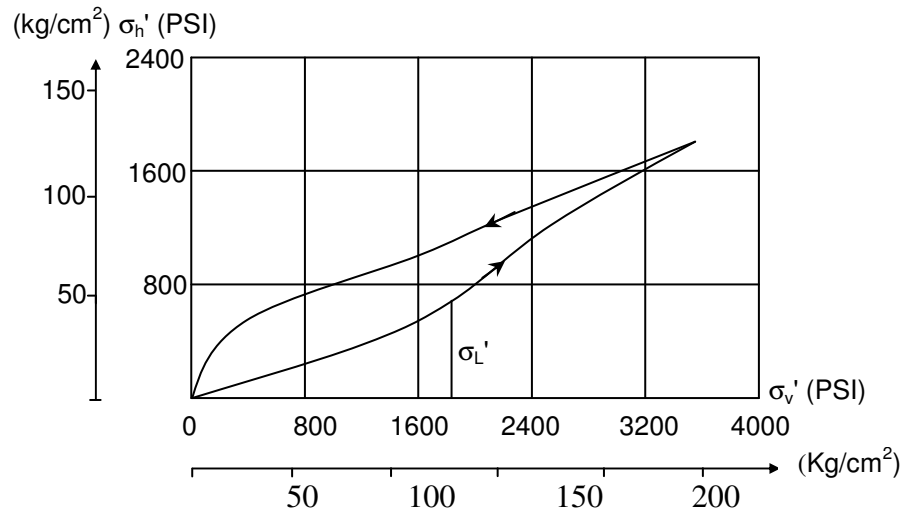
Başka bir yaklaşımla Şekil 2.20’de görülen özel bir ödometre Hendron (1963) tarafından oluşturulmuştur. Yanal basınçlar, ödometre ringine strain gauge’ler yapıştırmak sureti ile ölçülmüştür. Bu çalışmada yüksek basınç altında danelerin kırılmasının yanal basınç üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu deneylerde düşey gerilmenin 250 kg/cm^2 gibi çok yüksek değerlerine çıkılmış ve düşey gerilmenin belli bir değerinden sonra K_0 doğrusunun dikleştiği belirtilmiştir (Şekil 2.21). Daha sonra Hendron’un deneysel bulgularını kullanan Brooker ve Ireland (1965), plastisite indisi, aşırı konsolidasyon oranı ve K_0 arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir (Şekil 2.22).

Sağlamer (1972), kumlu zeminlerin sükunetteki yanal zemin basınçlarını doğrudan ölçmek amacı ile, özel bir ödometre hücresi (Şekil 2.23) geliştirmiş ve yaptığı deneylerde, zeminin rölatif sıklığının (D_r) ve gerilme tarihçesinin K_0 üzerine etkisini incelemiştir. Bu deneylerde, havada kurutulmuş, dane çapları, dane şekilleri ve minerolojik yapısı farklı olan dört cins kum numune kullanılmıştır. Bu düzenekte yanal basınçlar, ödometre ringinin karşılıklı yan yüzeylerine monte edilen kuvars basınç kristalleri vasıtasıyla ölçülmüştür. Sağlamer (1972), normal yükleme durumunda K_0 ’ı etkileyen en önemli faktörün zeminin relatif sıklığı (D_r) olduğunu vurgulamıştır. Aynı düşey gerilme altında gevşek kumlarda daha büyük yanal gerilmelerin ölçüldüğünü, başka bir ifade ile gevşek kumlarda K_0 değerlerinin daha büyük değerler aldığını göstermiştir. Boşaltma ve tekrar yükleme durumlarında ise, zeminin K_0 değerini etkileyen en önemli parametrenin aşırı konsolidasyon oranı ve rölatif sıklık olduğu bu çalışmada verilmiştir. Boşaltma durumunda K_0 değerlerinde artmalar, tekrar yükleme durumunda ise önemli azalmalar görüldüğü gözlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, başlangıç boşluk oranı ile içsel sürtünme açısı (ϕ') arasındaki ilişki incelenmiş ve başlangıç boşluk oranının kumların K_0 değeri üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir.

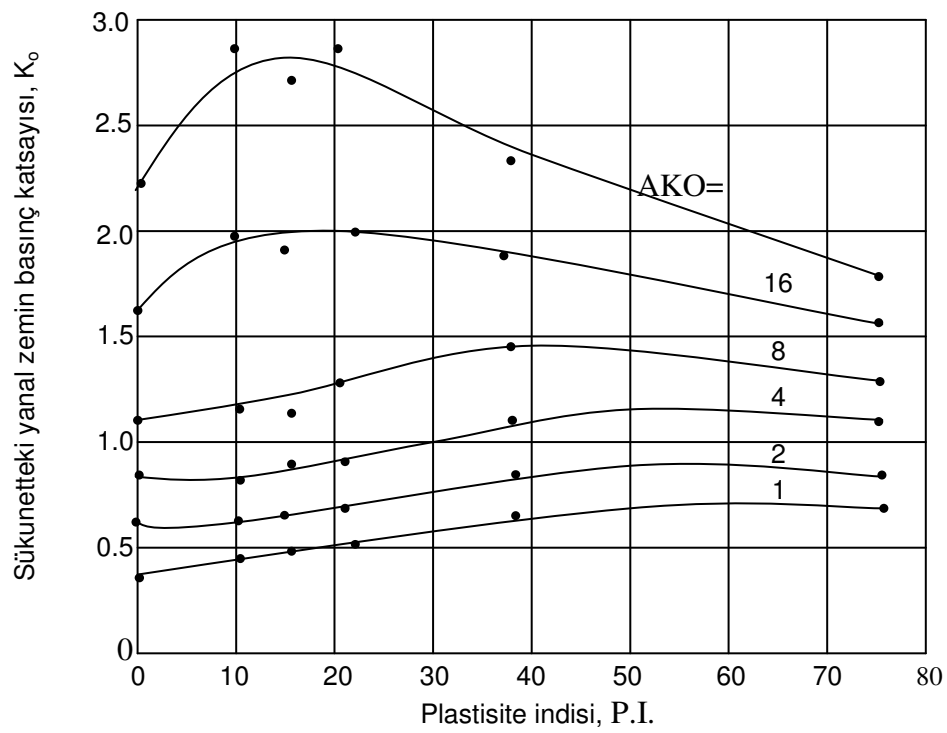
Abdelhamid ve Krizek (1976), yanal basınçları doğrudan ölçmeye olanak sağlayan bir deney düzeneği geliştirmişlerdir. Bu düzenek ile, konsolidasyon süresince, yanal basınçların ölçümü mümkün olmaktadır.



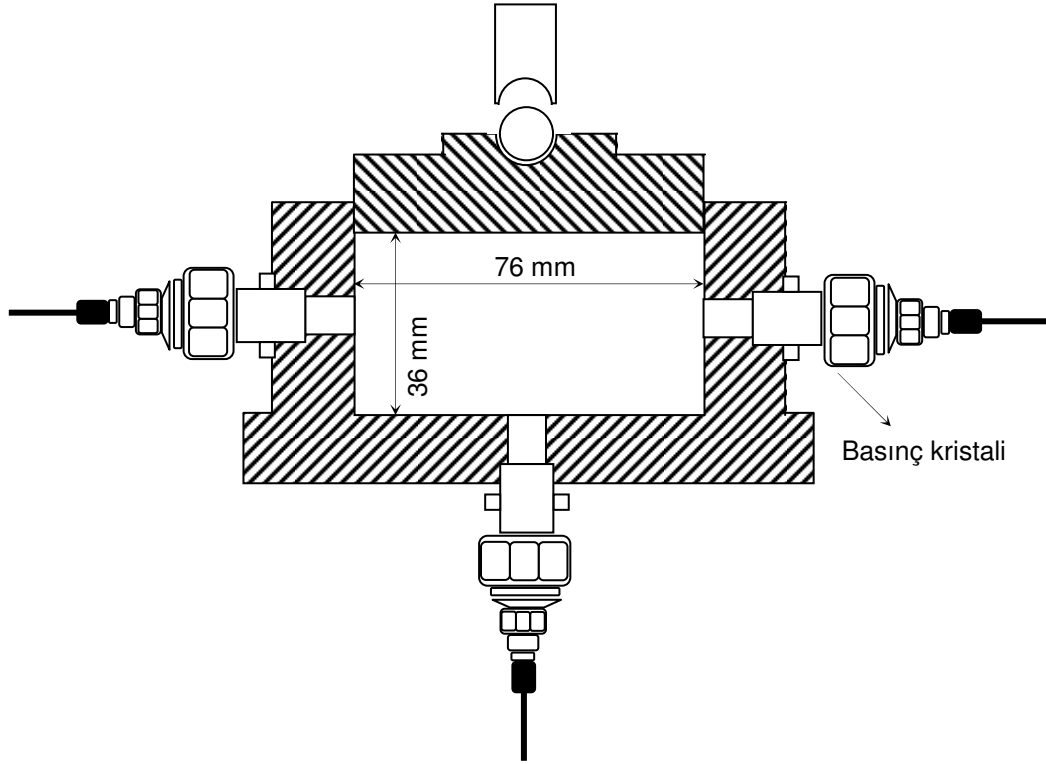
Şekil 2.20. Hendron (1963)'ün yanal basınçları ölçmek için geliştirdiği özel ödometre



Şekil 2.21 Dane kırılmalarının K_o 'a etkisi (Hendron, 1963)

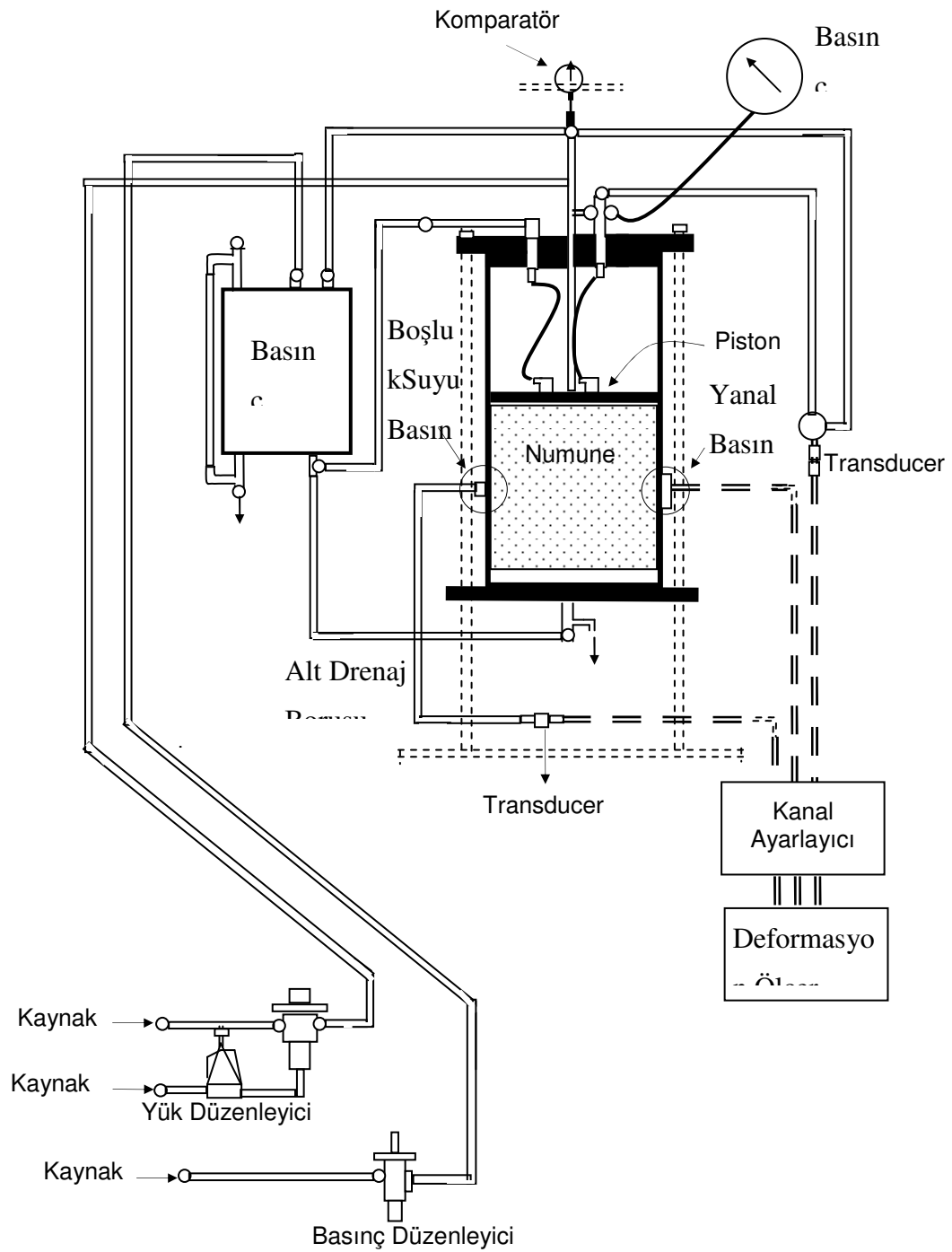


Şekil 2.22. K_0 'ın aşırı konsolidasyon oranı (AKO) ve plastisite indisi (I_p) ile değişim (Brokeer ve Ireland ,1965)

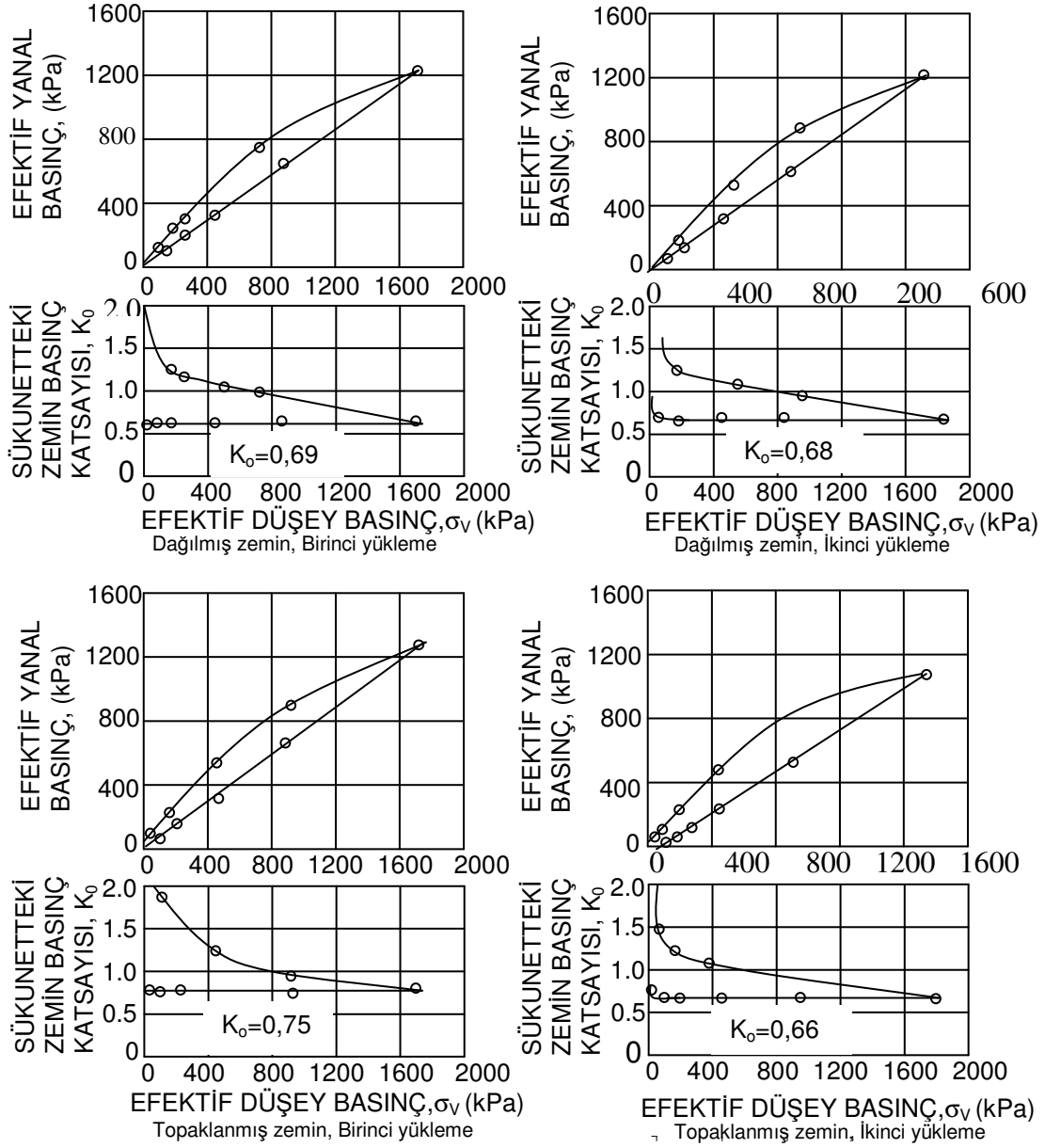


Şekil 2.23. Sağlamer (1972)'nin kumlarda K_o ölçümünü gerçekleştirmek için oluşturduğu ödometre

Abdelhamid ve Krizek (1976)'nın yaptığı deneylerde özgül ağırlığı 2,64; likit limiti %64; plastik limiti %34; doğal su içeriği %250; silt boyutlarındaki danelerin yüzdesi %4 ve kil boyutlarındaki danelerin yüzdesi %96 olan numuneler kullanılmıştır. Deney düzeneği 20 cm çapında, 50 cm yükseklikte ve 0,6 cm et kalınlığında oldukça büyük bir yükleme hücrelerinden oluşmaktadır. Toplam yanıl basıncın zamanla değişimini ve boşluk suyu basıncını ölçmek için, hücrenin dış duvarına ince borular monte edilmiştir. Bu düzenek Şekil 2.24'te gösterilmiştir. Deneylerde dağıtılmış (dispersed slurry) ve topaklanmış (flocculated slurry) olmak üzere hazırlanan numuneler kullanılmış ve toplam yanıl basınç, düşey basınç, düşey deformasyon ile boşluk suyu basıncının zamanla değişimi ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 2.25'te gösterildiği gibi özetlenmiştir. Araştırmacılar, bakir konsolidasyon süresince, efektif yanıl ve düşey gerilme arasındaki ilişkinin lineer olduğunu ve K_o 'ın sabit değerler aldığını vurgulamışlardır. Ayrıca düşey yüklemenin boşaltılması süresince, lineerliğin bozulduğunu ve K_o 'ın sabit kalmadığını belirtmişlerdir.



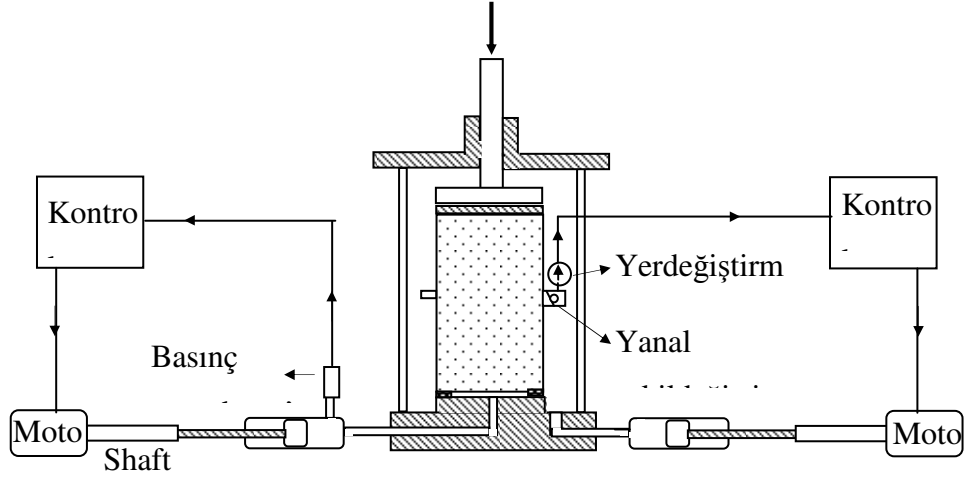
Şekil 2.24. Abdelhamid ve Krizek (1976)'ın deney düzeneği



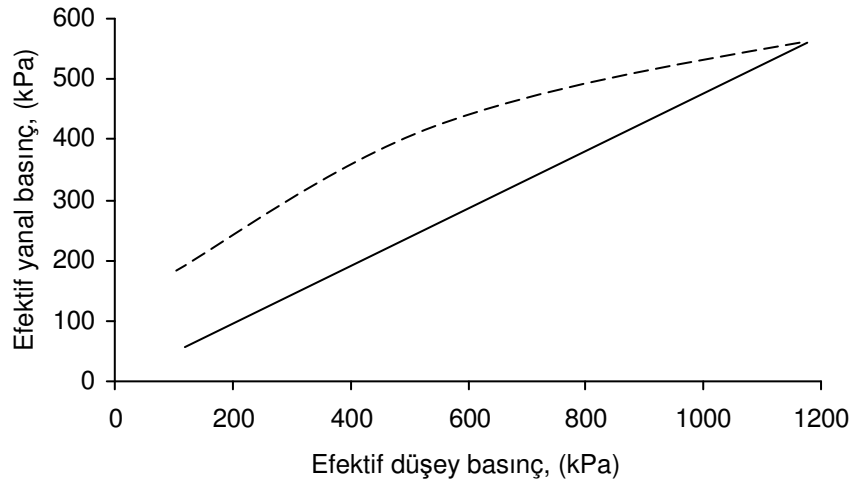
Şekil 2.25. Abdelhamid ve Krizek (1976)'nın deney sonuçları.

Yanal basınçların tespiti için kullanılan diğer bir düzenek, Menzies ve ark. (1977) tarafından, üç eksenli basınç düzeneği modifiye edilerek oluşturulmuştur (Şekil 2.26). Bu düzende, K_0 koşulları otomatik olarak sağlanmıştır. Numunenin sürekli değişen çapı ve yanal şekil değiştirmesi, yanal şekil değiştirme pergeli ile tespit edilmiştir. Pergel, şekil değiştirmelerin K_0 koşullarını sağlayacak düzeyde kalmasını kontrol etmek için bir geri besleme (feedback) mekanizmasına bağlanmıştır. Bu sistemde, düşey yükün uygulanması ile numunenin çapı değişmekte ve bu değişim K_0 koşulunu bozacak değere ulaştığında pergele bağlı kontrol mekanizması sinyal vererek deney kontrol edilmektedir. Bu çalışmada, başlangıç porozitesi %40 olan ve 10 cm çapında, 20 cm yüksekliğinde, doymun kaba kum üzerinde deneyler yapılmıştır. Araştırmanın sonuçları Şekil 2.27’de özetlenmiştir.

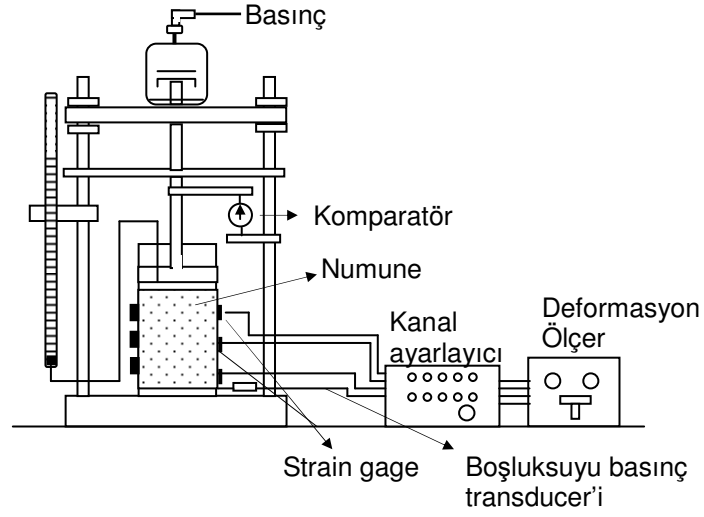
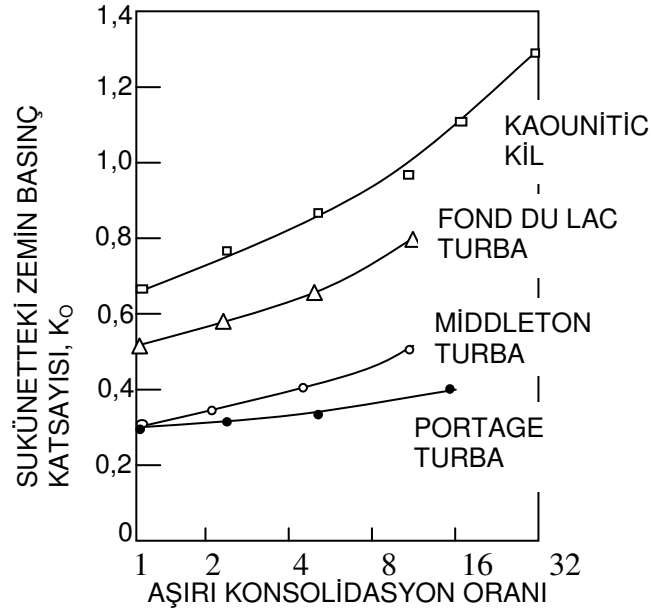
Edil ve Dhowian (1981), K_0 -Deney Tüpü denilen, çelikten yapılmış bir deney düzeneği oluşturmuşlardır (Şekil 2.28). Tüpün dış duvarına yapıştırılan strain gauge’ler vasıtası ile yanal basınçlar ölçülmüştür. K_0 -Deney Tüpü, çapı 7,25 cm, yüksekliği 25 cm, kalınlığı 0,2 cm olacak şekilde yapılmıştır. Deney tüpü deneylerde kullanılmadan önce kalibre edilmiştir. Kalibrasyon için deney tüpü içine değeri bilinen hava veya su basıncı uygulamak sureti ile, deney tüpü çevresine yapıştırılan strain gauge’lerde meydana gelen çevresel deformasyonlar ölçülmüş ve kalibrasyon katsayısı belirlenmiştir. Düşey basınç pistonu bağı hava ile uygulanmıştır. Bu çalışmada turba zeminlerin davranışı incelenmiş ve bunun için %20-40 lifer (lif) içrikli ve su içeriği %240-510 olan turba zemin numuneleri kullanılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 2.29’da gösterilmiştir. Bu çalışma sonunda, killi ve turba zeminlerin K_0 değerleri arasında önemli farkların olduğu gözlenmiş ve kullanılan zeminler için K_0 değerinin 0.3 ile 0.53 arasında ölçüldüğü rapor edilmiştir. Ayrıca bu zeminler lifer içrikli olduğu için, efektif içsel sürtünme açılarının ($\phi'=50^\circ$ - 57°) çok yüksek değerler aldığı ve bu nedenle de K_0 ’ın tahmini için verilen içsel sürtünme açısına bağı ifadelerden elde edilen K_0 değerlerinin deney sonucuna oldukça uzak kaldığı belirtilmiştir.



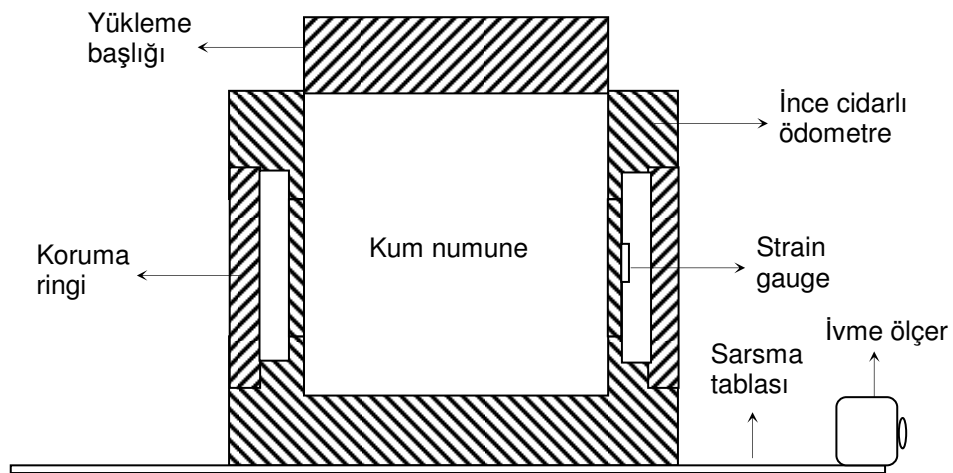
Şekil 2.26. K_0 koşullarını sağlayan üç eksenli deney düzeneği
(Menzies ve ark., 1977)



Şekil 2.27. Üç eksenli deney düzeneğinden elde edilen sonuçlar
(Menzies ve ark., 1977)

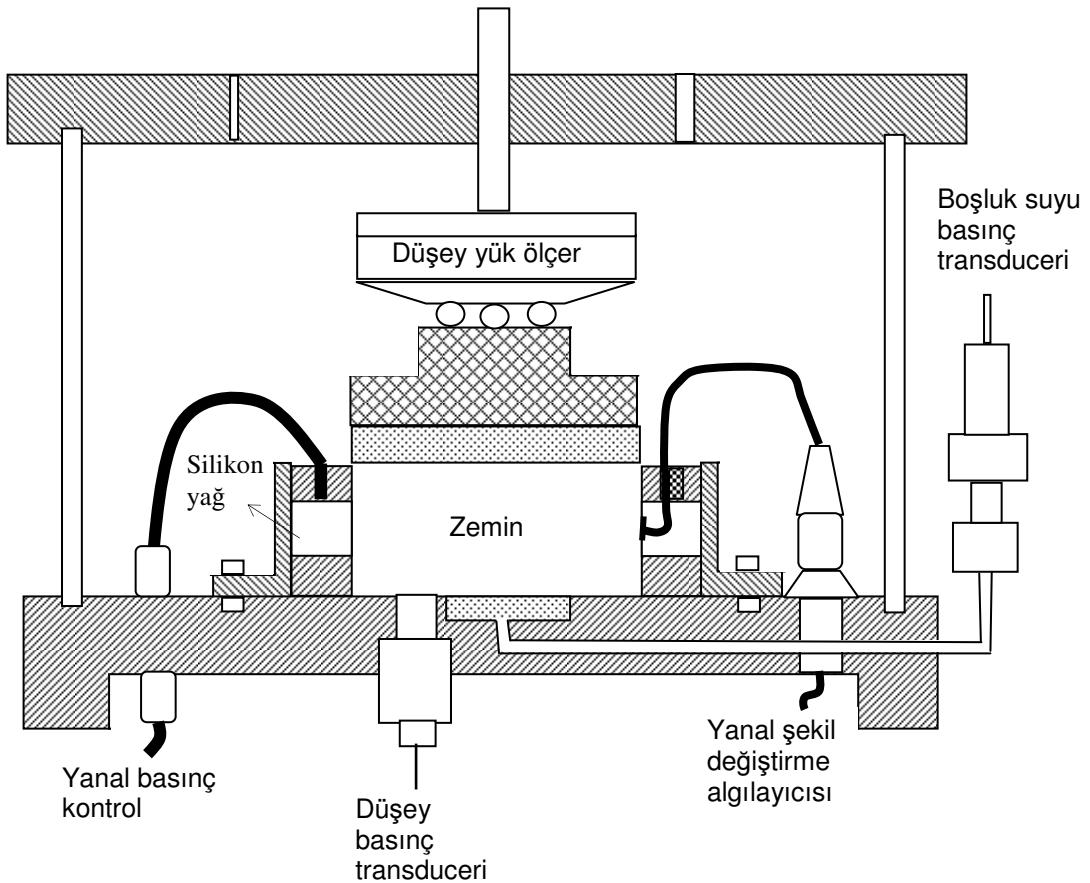
Şekil 2.28 K_0 deney tüpü (Edil ve Dhowian, 1981)Şekil 2.29. Turbalarda K_0 'ın aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi (Edil ve Dhowian, 1981)

Zhu ve Clark (1993), titreşim anında kumların yanıl basınçlarının ölçülebildiği özel bir ödometre düzeneği geliştirmişlerdir (Şekil 2.30). 61.3 mm iç çapında ve 70 mm yüksekliğe sahip olan bu düzene, bir sarsıntı tablasının üstüne monte edilmiştir. İvme ölçerin bağı olduğı sarsıntı tablasının, sarsıntı anındaki ivmesi ölçülmüştür. 1.5 mm et kalınlığına sahip ödometre ringinin dış çevresine strain gauge'ler yapıştırmak sureti ile ring gövdesindeki şekil değıştirmeler ölçülmüş ve buradan kum numunenin yaptığı yanıl basınçlara geçilmiştir. Ödometre ringi deneylerde kullanılmadan önce, hava basıncı uygulamak sureti ile kalibre edilmiştir. Deneylerde, ortalama dane çapı 0.54 mm, uniformluluk katsayısı (C_u) 1.24, dane özgül ağırlığı (G_s) 2.65, minimum boşluk oranı 0.49 ve maksimum boşluk oranı 0.73 olan kum numuneler kullanılmıştır. Bu çalışmaya göre, kum zeminin yanıl basınçları vibrasyon süresince artabilir veya azalabilir. K_0 'ın başlangıç değeri birden küçükse yanıl gerilmeler artmakta, birden büyükse yanıl gerilmeler azalmaktadır. Her iki durumda da zeminin deviatorik gerilmesi, izotropik gerilme durumu olan $K_0=1$ durumuna doğru bir eğilim göstermektedir. Normal konsolide kumlarda yanıl gerilmeler, vibrasyon süresince artmakta ve artış miktarı kumun sıkılığı ve titreşim şiddetine bağı kalmaktadır.



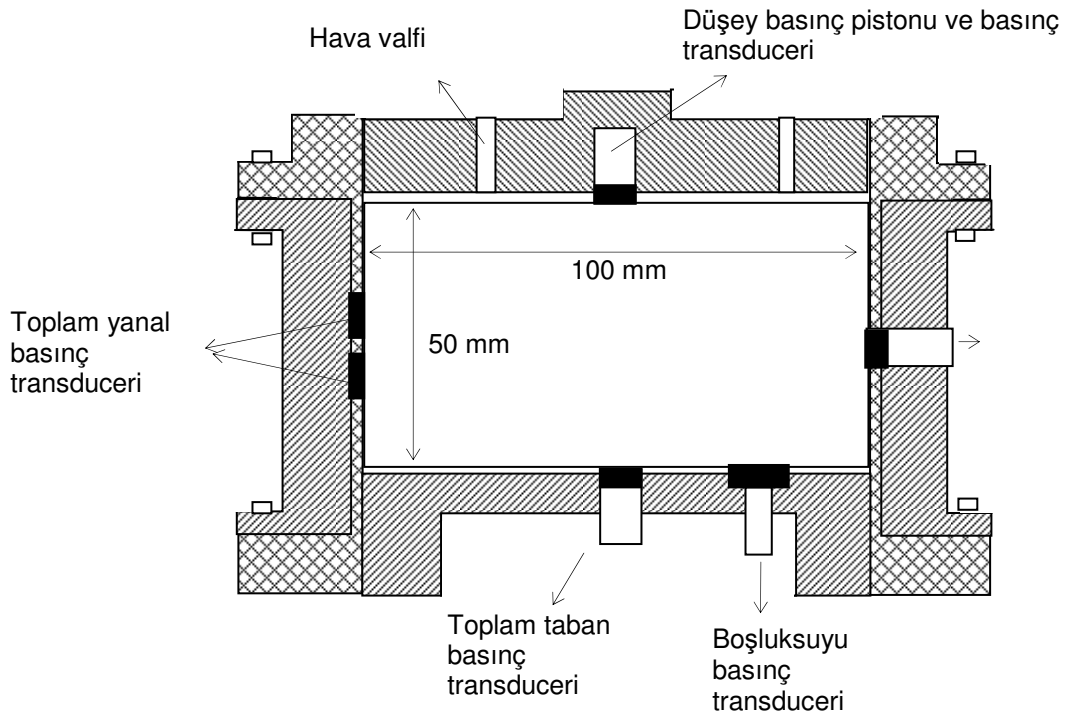
Şekil 2.30. Zhu ve Clark (1993)'ün yanıl zemin basınçlarını dinamik koşullarda ölçmek için oluşturduğu düzeneğin

Mesri ve Hayat (1993), Şekil 2.31’de görülen yanal basınçların ölçülebildiği özel bir konsolidasyon düzeneği ile örselenmemiş yumuşak killer üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde, birincil ve ikincil konsolidasyon süresince K_o ’ın davranışını incelemişlerdir. K_o ’ın ikincil konsolidasyon süresince sabit kalmadığını ve birincil konsolidasyonun tamamlanması için gerekli olan süreyi kullanarak K_o ’daki değişimin bulunabildiği, $K_o = K_{op}(t/t_p)^{C\alpha/Cc}$ gibi ampirik bir ilişki vermişlerdir. Burada t_p , birincil konsolidasyonun tamamlanması için gerekli olan süre, $C\alpha = \Delta e / \Delta \log(t)$ ikincil konsolidasyon sırasındaki sıkışma indeksi ve C_c ise birincil konsolidasyon sırasındaki sıkışma indeksi olarak verilmektedir.



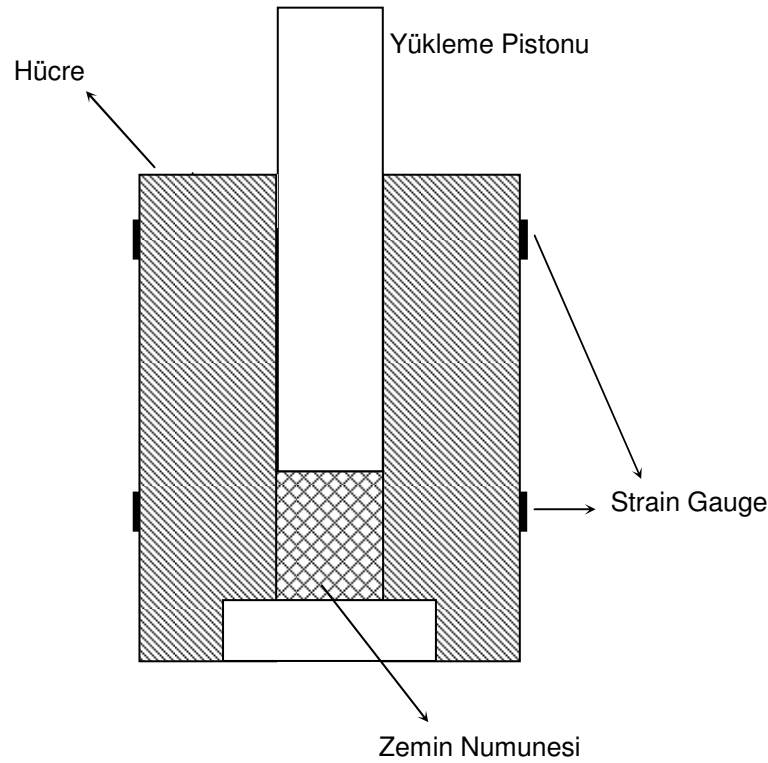
Şekil 2.31. Mesri ve Hayat (1993)’ün yanal zemin basınçlarını ölçmek için kullandığı düzeneğin

Ting ve ark. (1994), yumuşak zeminlerin K_0 koşullarındaki yanal zemin basınçlarını incelemek amacı ile özel bir konsolidasyon düzeneği oluşturmuşlardır (Şekil 2.32). Deneylerde, zemin numunesinin yaptığı şekil değiştirmeler kontrol edilerek küçük değerlerde tutulmuştur. Zemin numunesinin içinde boşluk suyu basıncının üniform olarak dağılımını sağlamak için, zeminin iki ucu arasındaki boşluk suyu basıncı, kontrol edilerek öngörülen değerde tutulmuştur. Böylece zemin numunesinin her noktasında efektif gerilmeler eşitlenmiştir. Bu çalışmada, yanal basınçların ve boşluk suyu basınçlarının ölçülmesi için, basınç transducer'leri kullanılmıştır. Deneylerde, kalıplanarak ve sedimantasyon işlemleri ile hazırlanan kaolin numuneleri test edilmiştir. Kalıplanmış numuneler (remoulded sample), likit limit değerinin iki katı su içeriğinde deniz suyu ve saf su kullanarak hazırlanmıştır. Sedimantasyon uygulanan numuneler, yine saf su ve deniz suyu kullanarak 1.5 kg kaolini, başlangıç birim ağırlığı 1.005 kg/cm^3 olacak şekilde hazırlanmıştır. Deneyler sonunda, K_0 'ın sabit bir parametre olmadığı belirtilmiş ve boşluk oranı ile lineer değiştiği, ayrıca düşük gerilmelerde K_0 ile ϕ' arasındaki ampirik korelasyonların kurulabileceği önerilmiştir.



Şekil 2.32. Ting ve ark. (1994)'ün yanal basınçları ölçmek için kullandığı düzenek

Yamamuro ve ark. (1996), kum numunelerin bir boyutlu konsolidasyonu süresince ve yüksek basınçlar altında yanıl basınçlarının ölçülebildiği bir düzenek oluşturmuşlardır (Şekil 2.33). Bu düzenek ile 850 Mpa'a kadar bir düşey gerilme uygulamak mümkün olabilmektedir. Numunenin düşey sıkışması süresince, yanıl basınçlarının ölçülmesi için, konsolidasyon hücresinin dış çevresine, yarım köprü konfigürasyonu (half bridge configurations) oluşturacak şekilde ve hücrenin zıt kenarlarına 2.5 cm yüksekliğe strain gauge'ler yapıştırılmıştır. Üç farklı minerolojik yapıya ve üç farklı başlangıç sıklığına sahip kumlar üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yüksek gerilmelerde başlangıç boşluk basıncının, K_o üzerinde etkisinin olmadığı araştırmacılar tarafından verilmiştir. Daha sert danelere sahip kumların K_o değerlerinin, yüksek düşey gerilmelerde küçük değerler aldığı ($K_o \approx 0.40$) ve sabit kaldığı belirtilirken, yumuşak danelere sahip kumlarda K_o 'ın arttığı ve daha büyük değerler ($K_o \approx 0.70$) aldığı belirtilmiştir.



Şekil 2.33. Yamamuro ve ark. (1996)'ın yüksek basınçlarda kum numunelerin yanıl basınçlarını ölçmek için kullandığı düzenek

2.6. K_o 'ın Tahmini İçin Verilen Ampirik Yaklaşımlar

2.6.1. Normal Konsolide Zeminler

Jacky (1944) granüler bir zeminin serbest halde bırakıldığında aldığı şev açısı ile K_o arasında ilişki kurmuştur. Bu şev açısını, içsel sürtünme açısı olarak kabul eden Jacky, bir takım geometrik ilişkiler kurarak aşağıdaki K_o eşitliğini vermiştir.

$$K_o = \frac{\left(1 + \frac{2}{3} \sin \phi'\right)(1 - \sin \phi')}{1 + \sin \phi'} \quad (2.22.a)$$

Daha sonra bu ilişki yine Jacky (1948) tarafından sadeleştirilerek aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$K_o = 1 - \sin \phi' \quad (2.22.b)$$

Burada ϕ' , kesme kutusu deneyinden bulunan içsel sürtünme açısıdır.

Hendron (1963), kumlu zeminler üzerinde yaptığı ödometre koşullarındaki K_o ölçümlerini, içsel sürtünme açısı, ϕ' , ile ilişkilendirerek aşağıdaki ifadeyi önermiştir:

$$K_o = \frac{1}{2} \frac{1 + \frac{\sqrt{6}}{8} - \frac{3\sqrt{6}}{8} \sin \phi'}{1 - \frac{\sqrt{6}}{8} + \frac{3\sqrt{6}}{8} \sin \phi'} \quad (2.23)$$

Brooker ve Ireland (1965), Jacky (1948) tarafından verilen K_o ifadesini modifiye ederek, aşağıdaki ifadeye dönüştürmüşlerdir:

$$K_o = 0,95 - \sin \phi' \quad (2.24)$$

Rowe (1958), kayma mukavemeti τ_f 'den küçük kayma gerilmelerine maruz, normal konsolide killerin denge durumu için, $c_e=0$ hipotezi denilen bir yaklaşım önermiştir. Bu çalışmada, bu koşullar altındaki bir zeminin creep yapacağı ve bunlara ait nihai gerilmelerin, çevre basıncından ve sürtünmelerden etkileneyeceği varsayımı ile aşağıdaki eşitlik verilmiştir:

$$K_o = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_{em}}{2} \right) \quad (2.25)$$

Burada ϕ_{em} , Hvorslev gerçek sürtünme açısına denk açıdır.

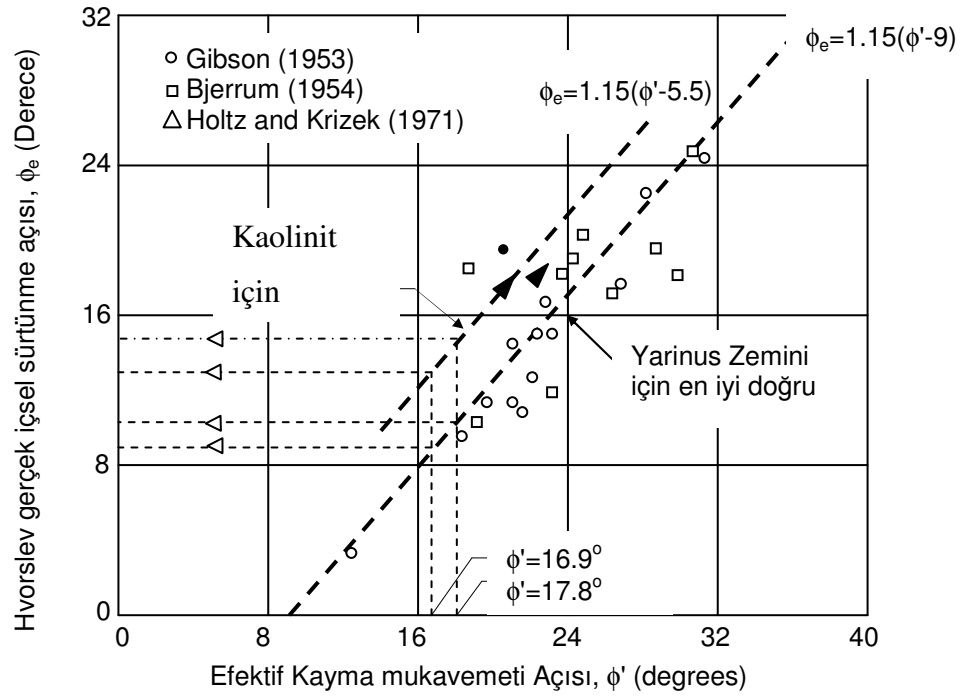
Hvorslev (1960) ise; ileri sürdüğü kayma mukavemeti teorisinde mukavemetin, su içeriğine ve efektif gerilmelere bağlı iki bileşeni olduğunu ileri sürmüştür. Bu varsayımlar altında normal konsolide killerde $\phi_{em}=0,75\phi_e$ alınmasının uygun olduğunu ileri sürmüştür.

Yukarıda verilen (2.25) numaralı ifadedeki ϕ_{em} 'in değişimi için ϕ_e ile ϕ arasındaki korelasyonun saptanması amacı ile bir dizi araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalarda, aynı cins zeminler kullanılarak, pek çok üç eksenli deneyler yapılmıştır. Bu deney sonuçları Şekil 2.34'te özetlenmiş ve efektif kayma mukavemeti açısının aşağıdaki istatistiksel eşitliğe uyduğu belirtilmiştir:

$$\phi_e = 1,15(\phi' - 9) \quad (2.26)$$

Burada ϕ' nin değeri derece olarak alındığında ϕ_e derece olarak çıkar.

Hold ve Krizek (1971) bu eşitliği, kaolin için aşağıdaki şekilde geliştirmişlerdir:



Şekil 2.34. Efektif iç sürtünme açısı ile Hvorslev gerçek sürtünme açısı arasındaki ilişki (Abdelhamid ve Krizek, 1976)

$$\phi_e = 1.15(\phi' - 5.5) \quad (2.27)$$

Öte yandan $\sigma_1' - \sigma_3'$ maksimum asal gerilmeler farkına genellikle killerin basınç mukavemeti adı verilmektedir. Bu mukavemet su içeriğine bağlı olup, boşluk suyu basıncından bağımsız olarak alınmaktadır. Bu nedenle mukavemetin, suya doygun killerde serbest basınç mukavemeti ile aynı olduğu varsayımı yapılmaktadır. Buna dayanılarak ön konsolidasyon basıncından sonra, K_o 'ın sabit değer aldığı varsayılmış ve aşağıdaki eşitlik verilmiştir (Rutledge, 1948):

$$K_o = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{\sigma_c} \quad (2.28)$$

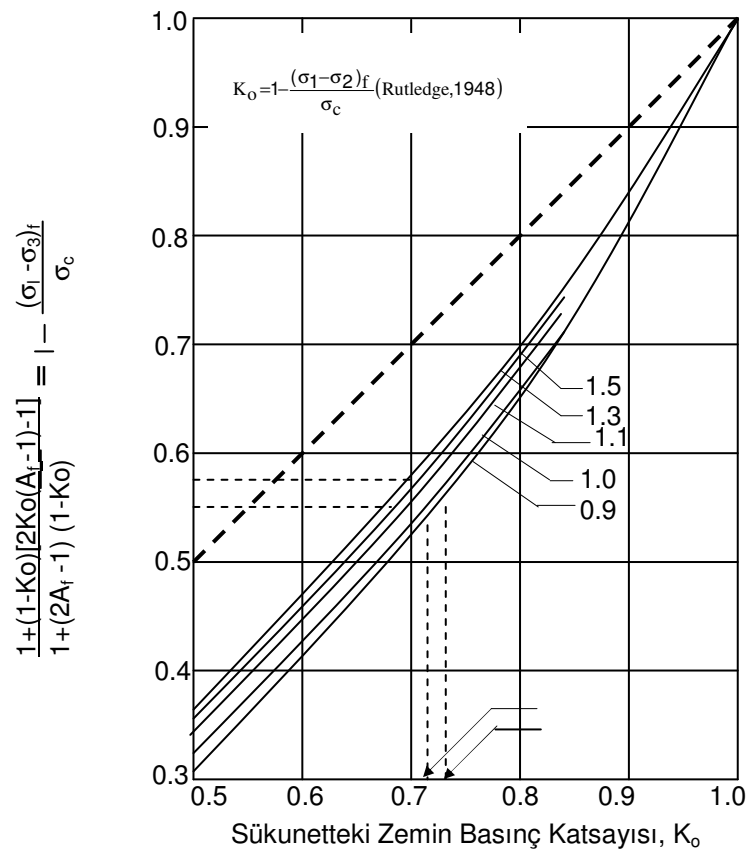
Burada $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ kırılma anındaki ve belli su içeriğine karşı gelen maksimum asal gerilme farkıdır. σ_c ise yine aynı su içeriği için büyük konsolidasyon asal gerilmesidir. Bu eşitlik özellikle ön konsolidasyon basıncının ihmal edilebildiği yüksek gerilmelerde iyi sonuçlar vermektedir.

Yukarıdaki (3.7) bağıntısının, aşağıdaki şekilde verilebileceği gösterilmiştir:

$$1 - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{\sigma_c} = \frac{1 + (1 - K_o)[2K_o(A_f - 1) - 1]}{1 + (2A_f - 1)(1 - K_o)} \quad (2.29)$$

Bu eşitlikte, A_f , kırılma anındaki Skempton boşluk suyu katsayısıdır. Yapılan pek çok deneyin grafiklenmesi sonucu, Şekil 2.35'te gösterilen eğriler elde edilmiştir.

Şekil 2.35'in incelenmesinden (2.28) eşitliği ile (2.29) eşitliği, verdiği değerlerin arasında %20'lik bir fark görülmektedir. Bunun nedeni (2.29) eşitliğinde Jacky ifadesinin de geçerli olduğu varsayılmasından olup bu eşitliğin $K_o \approx 1$ dolayında tatminkar sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Pratik amaçlar için K_o değeri, üç eksenli basınç deneyleri sonuçlarına göre, (2.29) ifadesi ile tayin edilebilir.



Şekil 2.35. K_0 'ın Modifiye Rutledge analizi ile bulunuşu
(Krizek ve Abdelhamid, 1977)

Diğer bir yaklaşım olarak Alpan (1967), normal konsolide killi zeminlerin plastisite indisine bağlı olarak, aşağıdaki istatistiksel ifadeyi geliştirmiştir:

$$K_o = 0,19 + 0,233 \log(I_p) \quad (2.30)$$

Burada I_p , plastisite indisidir.

Brooker ve Ireland (1965) killi zeminlerin K_o değeri için plastisite indisine bağlı olarak Şekil 2.22'deki $OCR=1$ eğrisinden elde edilen aşağıdaki istatistiksel eşitlikleri önermişlerdir..

$0 < I_p < 40$ için

$$K_o = 0,4 + 0,007(I_p) \quad (2.31)$$

$40 < I_p < 80$ için

$$K_o = 0,64 + 0,001(I_p) \quad (2.32)$$

Normal konsolide killi zeminler için verilen sükunetteki yanıl basınç katsayılarının karşılaştırılması amacı ile Çizelge 2.2 verilmiştir.

2.6.2. Aşırı Konsolide Zeminler

Alpan (1967) aşırı konsolide zeminlerde K_o için aşağıdaki ifadeyi önermiştir:

$$K_{o(AK)} = K_{o(NK)} \times AKO^n \quad (2.33)$$

Burada, AKO , aşırı konsolidasyon oranı; $K_{o(AK)}$, aşırı konsolide durumdaki; $K_{o(NK)}$ ise normal konsolide durumdaki K_o 'ı göstermektedir. İfadedeki n 'nin değeri, kumlar için Şekil 2.36'dan, killi zeminler için ise plastisite indisine bağlı olarak, aşağıdaki ilişkiden bulunmaktadır:

Çizelge 2.2. Killi zeminler için ampirik ifadelerden hesap edilen K_o değerlerinin karşılaştırılması (Krizek ve Abdelhamid, 1977)

Efektif Kayma Direnci Açısı : ϕ' (Derece)		16.9	17.8
$K_o = 1 - \sin \phi'$	Jaky (1944)	0.72	0.69
$K_o = 1 - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{\sigma_c}$	Rutledge (1948)	0.58	0.55
$K_o = \tan^2(45 - 1/2\phi_{em})$ $\phi_{em} = \phi_e = 1.15(\phi' - 9)$ $\phi_{em} = 0.75\phi_e = 0.86(\phi' - 9)$ $\phi_{em} = \phi_e = 1.15(\phi' - 5.5)$ $\phi_{em} = 0.75\phi_e = 0.86(\phi' - 5.5)$	Rowe (1958)	0.73 0.79 0.64 0.79	0.71 0.77 0.61 0.69
$K_o = 0.95 - \sin \phi'$	Brooker ve Ireland (1965)	0.72	0.69
$K_o = 0.4 + 0.007I_p$		0.61	
$K_o = 0.19 + 0.233 \log I_p$	Alpan 1967)	0.53	

$$n = 0,54 \times 10^{I_p / 281} \quad (2.34)$$

Ayrıca, Brooker ve Ireland (1965) benzer şekilde, fakat n değerini 0.5 alarak aşağıdaki eşitliği vermişlerdir.

$$K_{o(AK)} = K_{o(NK)} \times \sqrt{AKO} \quad (2.35)$$

Mayne ve Kulhawy (1982) yükleme, boşaltma ve tekrar yükleme durumlarında K_o için genel bir çözüm vermişlerdir.

$$K_{o(\text{boşaltma})} = K_{o(NK)} \times AKO^a \quad (2.36)$$

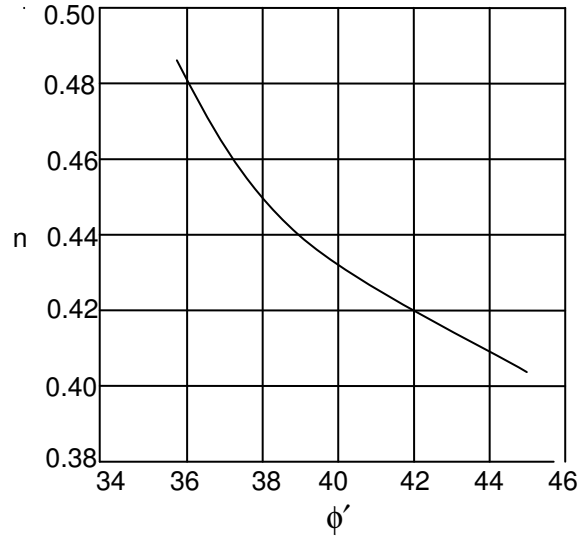
Burada, $K_{o(\text{boşaltma})}$ =düşey yükün boşaltılması sırasında ölçülen değerdir ve a ise yatay ekseninde $\log(AKO)$ değerleri, düşey ekseninde $\log[K_{o(\text{boşaltma})}]$ değerleri alınarak çizilen doğrunun eğimidir.

$$a = \frac{\log(K_{o(\text{boşaltma})}) - \log(K_{o(NK)})}{\log(AKO)} \quad (2.37)$$

Mayne ve Kulhawy (1982) a'nın tespiti için 171 datadan oluşan istatistiksel bir çalışma yaparak aşağıdaki ifadeleri önermişlerdir:

$$a = 0,018 + 0,974 \sin \phi' \quad (2.38)$$

$$a = 0,929 - 0,852 K_{o(NK)} \quad (2.39)$$

Şekil 2.36. Kumlu zeminlerde n 'nin değişimi (Bowles, 1988)

Mayne ve Kulhawy (1984) σ'_h ile σ'_v arasında lineer bir ilişki olduğunu varsayarak gerilme tarihçesine bağlı aşağıdaki K_o ifadesini geliştirmişlerdir. Bu ifade kullanılarak, gerilme izi boyunca (yükleme, boşaltma, tekrar yüklemeye) herhangi bir noktadaki K_o değeri hesaplanabilmektedir.

$$K_o = K_{o(NK)} \left(\frac{AKO}{(AKO_{max})^{(1-a)}} \right) + m_r \left(1 - \frac{AKO}{AKO_{max}} \right) \quad (2.40)$$

Burada $AKO_{max} = \frac{\sigma'_{vmax}}{\sigma'_{vmin}}$ ve $m_r = \frac{3}{4} K_{o(NK)}$; a, tekrar yüklemeye sabitidir.

Normal konsolide zeminler için $AKO_{max}=AKO=1$ ve $K_o=K_{o(NK)}$

Aşırı konsolide zeminlerde $AKO_{max}=AKO$ olarak alınmaktadır.

2.7. Arazide K_0 Koşullarında Yanal Basınçların Ölçülmesi

Bu bölümde K_0 koşullarında yanal basınçların ölçümü için arazide kullanılan teknikler kısaca anlatılacaktır.

2.7.1. Presyometre Deneyi

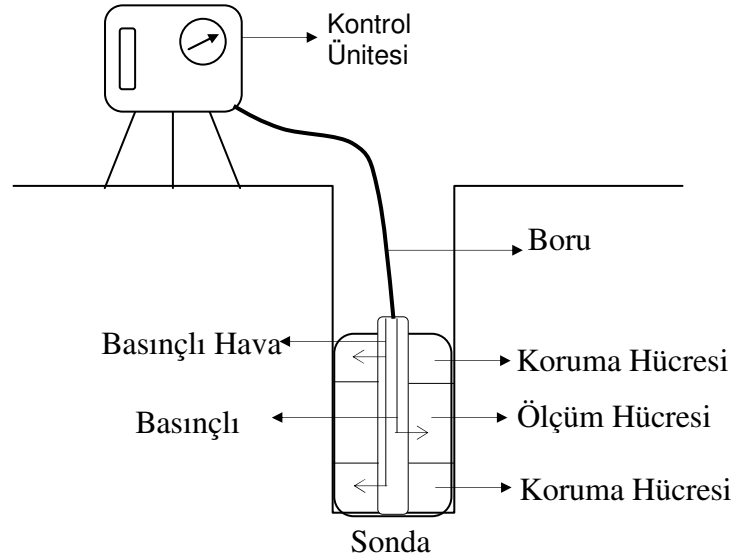
Presyometre deneyi, kısaca zeminde oluşturulan silindirik deliğin genişletilmesi yoluyla basınç ve deformasyon ilişkisinin ölçülmesidir. Uygulamada deneyin yapılacağı derinliğe kadar önce delik açılır. Sonda deliğe yerleştirilir ve basınçlı hava ile şişirilir. Sondanın şişirilmesi ile delik hacminde meydana gelen değişiklikler kaydedilir. Deney esnasında delik uzunluğunun değişmediği ve hacim artışlarının sadece deliğin radyal genişlemesi sonucu meydana geldiği kabul edilir. Presyometre Şekil 2.37’de şematik olarak gösterilmiştir (Yıldız ve Laman, 1996).

Deney esnasında kaydedilen basınç artımları ve hacim okumaları düzeltilmemiş değerler olduğu için bir takım düzeltmeler yapılarak presyometre deney eğrisi çizilir (Şekil 2.38). Şekilden görüldüğü gibi bu eğri üç karakteristik bölgeden oluşmaktadır. A noktasında zeminin tabii haldeki orjinal gerilme durumu yeniden oluşur. A ile B noktası arasında zemin elastik bir malzeme gibi davranır. B’den sonraki bölümde ise zeminde meydana gelen deformasyonlar kalıcı olur.

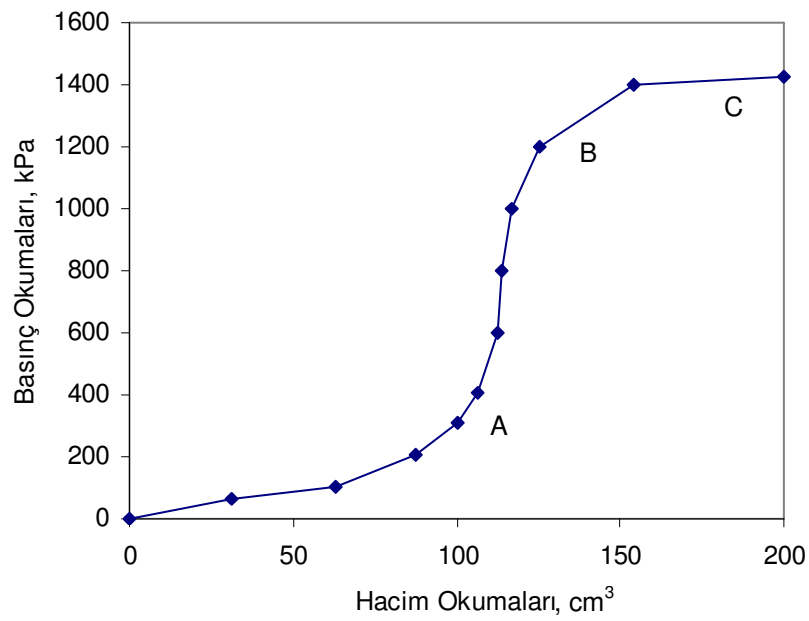
A noktası sükunet durumu olarak kabul edilir ve bu noktadaki basınç değeri yanal basınç olarak alınarak o noktadaki jeolojik basınca bölünür, bu suretle K_0 değeri bulunur.

2.7.2. Toplam Gerilme Hücresi Metodu

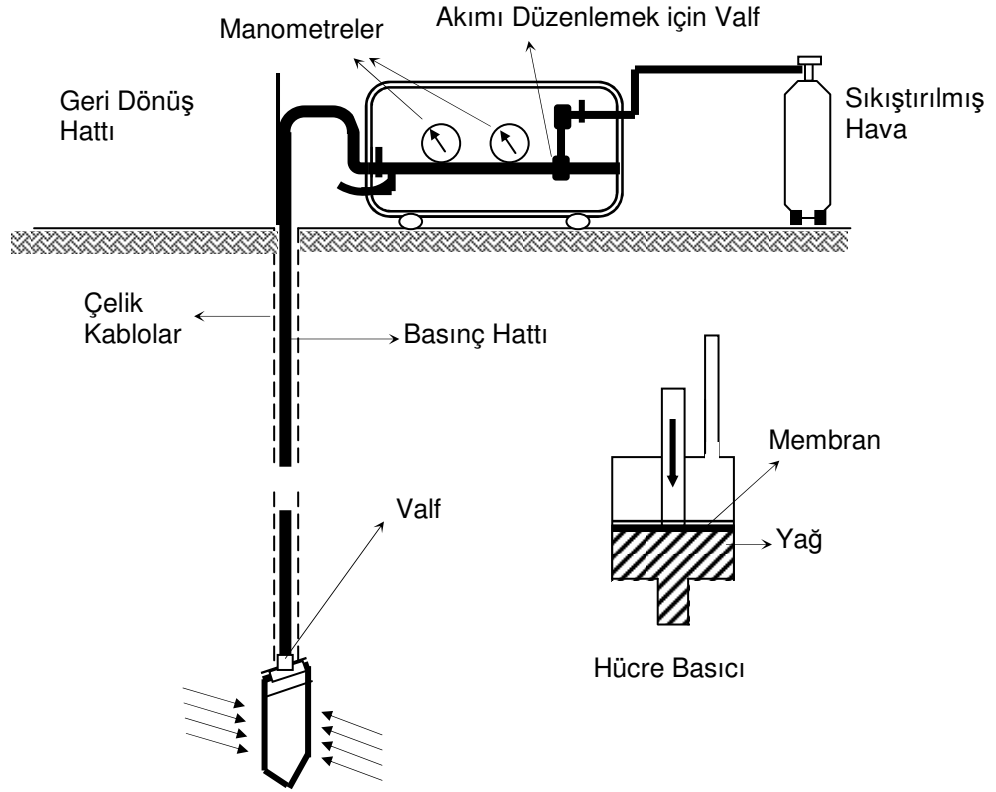
Massarsch ve Broms (1976) yaptıkları çalışmada Glötz tipi ince cidarlı basınç hücresiyle arazideki yatay gerilmeleri bulmuşlardır. Hücre kurulum aşamasında çelik koruma borusu ile korunur ve böylece istenilen derinliğe ayrıca da katı zemin tabakalarına kolaylıkla yerleştirilebilir. Şekil 2.39’da Toplam Gerilme Hücresi Metodu görülmektedir.



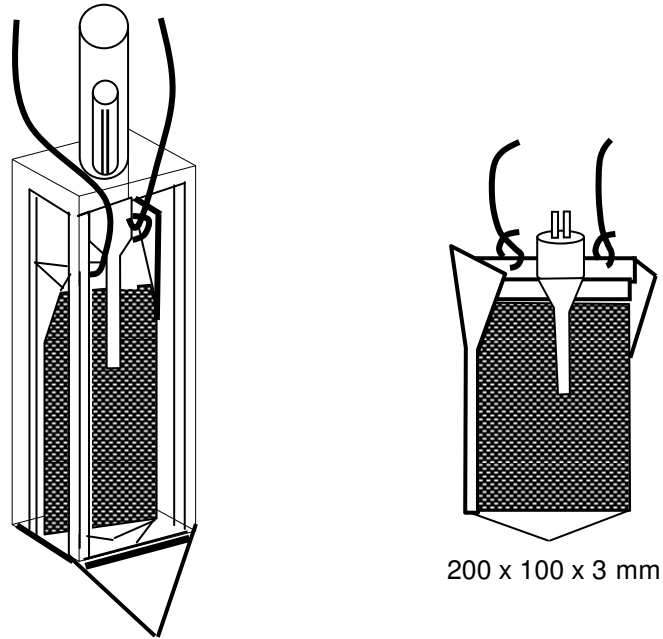
Şekil 2.37. Presyometre deney düzeneği (Yıldız ve Laman, 1996)



Şekil 2.38. Presyometre eğrisi (Yıldız ve Laman, 1996)



Şekil 2.39. Toplam gerilme hücresi metodu (Bowles, 1988)



Şekil 2.40. Glötlz tipi ince cidarlı basınç hücresi ve koruma başlığı (Bowles, 1988)

Zeminde meydana gelen yatay yer değiştirmeler hücre basıncının artmasıyla artar. Ölçümler yanal zemin basınçlarının zamanla azaldığını göstermiştir. Hücrenin yerleştirilmesinden yaklaşık üç gün sonra, fazla basınç boşaldığı zaman yanal toprak basıncı okunur. Bu basıncın sükunetteki yanal toprak basıncıyla ilişkili olduğu kabul edilir. Böylece ince cidarlı hücre vasıtasıyla zeminin yanal toprak basıncı lokal olarak belirlenmiş olur (Bowles, 1988).

Massarch ve Broms (1976) tarafından yapılan çalışmada, kendi kuyusunu açan presiyometre (SBPM) test sonuçlarıyla ince cidarlı Glötlz tipi hücre ile yapılan Toplam Gerilme Hücresi test sonuçları arasında benzerlikler görülmüştür.

Şekil 2.40'ta Glötlz tipi ince cidarlı (cidar kalınlığı 3mm) hücre gösterilmiştir. Bu hücre pönotik olarak hava basıncı ile kontrol edilmektedir.

2.8. Önceki Araştırmalardan Yayımlanmış K_0 Değerleri

Çizelge 2.3'te farklı killi zeminler için yayımlanmış K_0 değerleri özetlenmiştir.

2.9. Doymamış Koşullarda Yapılan Deneylerde Kullanılan Teknikler

Literatürde doymamış zeminler üzerinde, ödometre ve üç eksenli deneyler yapılmaktadır. Bu deneylerde, doymamış zeminlerin mekanik davranışı üzerinde önemli etkisi olan matrik emme basınçları, kontrol edilmekte veya ölçülmektedir. Çoğunlukla, matrik emmeler çeşitli teknikler uygulanarak kontrol edilmektedir. Matrik emme basınçlarının kontrolü için yaygın olarak eksen kaydırma, osmotik teknik kullanılmaktadır. Bunlara ilave olarak civalı basınç ölçer ve bağıl nem kontrol teknikleri de kullanılmaktadır.

Çizelge 2.3. Farklı killi zeminler için yayımlanmış K_0 değerleri
(Bedışkan, 1993)

No	Zemin İsmi	Doğal Su İçeriği (%)	Likit Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	Kil İçeriği (%)	ϕ'	K_0
1	Sidney Kili	-	50	16	-	30,7	0,48
2	Hydrite 10 Kaolini	-	62	28	96	17,8	0,69
3	Hydrite PX Kaolini	112	-	-	-	16,9	0,65
4	Avusturalya Kaolini	-	75	40	62	23	0,56
5	Kaolin	-	55	23	40	23,3	0,51
6	Londra Kili	32	95	65	52	20	0,65
7	Londra Kili	-	65	38	64	17,5	0,54
8	Drammen Kili	52	60	31	-	31,7	0,49
9	Drammen Kili	32	33	10	-	30	0,49
10	Weald Kili	-	41	21	39	22	0,54
11	Weald Kili	-	46	24	38	25,9	0,60
12	New York Kili	-	65	39	-	20,5	0,67
13	Seattle Kili	-	52	26	-	28,8	0,65
14	Seattle Kili	27	47	18	53	-	0,61
15	Hokkaido Kili	-	52	21	-	36,2	0,45
16	Hokkaido Kili	-	72	32	-	35,1	0,47
17	Nebraska Kili	-	-	42	-	-	0,59
18	Portsmouth Kili	50	35	15	-	32	0,42
19	Beaumont Kili	26	67	41	-	24	0,55
20	Boston Kili	-	33	15	30	26,5	0,48
21	Chicago Kili	-	28	10	36	26,3	0,46
22	Bombay Kili	-	115	70	48	24	0,63
23	Tarquinia Kili	28	43	24	39	-	0,58
24	Pisa Kili	24	57	36	44	-	0,44
25	Çin Kili	61	92	62	70	-	0,62
26	Parana Kili	32	55	33	69	-	0,65
27	Iriesta Kili	47	70	48	32	-	0,55
28	Khor-Al-Zubair Kili	42	55	35	-	27,3	0,49
29	Java kili	58	50	22	-	36,9	0,41

Çizelge 2.3'ün devamı

No	Zemin İsmi	Doğal Su İçeriği (%)	Likit Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	Kil İçeriği (%)	ϕ'	K_o
30	Ska Edeby Kili	70	55	30	-	-	0,52
31	Ursvik Kili	55	45	25	-	-	0,47
32	Kalix Kili	120	160	105	-	-	0,52
33	Norveç Kili	37	26	8	-	10	0,75
34	Midlleton Turbası	510	-	-	-	57,4	0,31
35	Kyoto Kili	-	88	57	52	32,5	0,45
36	Lagunillas Kili	-	61	37	30	26,8	0,53
37	Lös	21	35	11	18	31,5	0,36

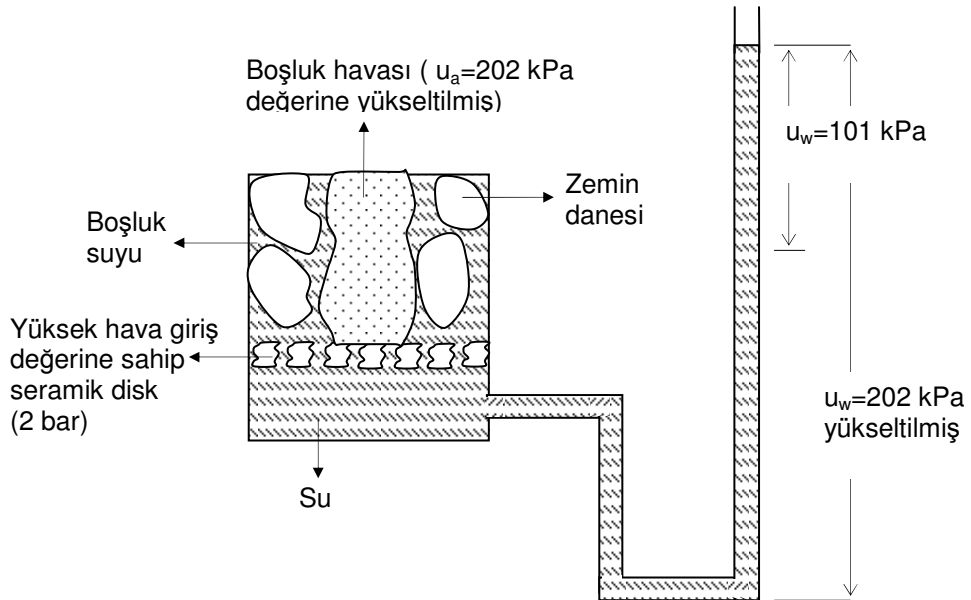
2.9.1. Eksen Kaydırma Tekniği

Bu yöntem, yüksek matrik emme altında gerçekleştirilen doymamış zeminlerin laboratuvar deneylerinin temelini teşkil etmektedir. Doymamış zeminlerde boşluk suyu basıncı, yüksek hava giriş değerine sahip seramik diskler kullanılarak, doğrudan ölçülmekte veya istenilen bir değerde kontrol edilmektedir.

Şekil 2.41'de eksen kaydırma yönteminin uygulaması görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi zeminin altına seramik bir disk yerleştirilmiştir. Bu seramik disk, doymamış durumda iken 2 bar'dan küçük hava basıncını geçirmemekte; ancak suyu geçirmektedir. Böylece zemin içindeki boşluk suyu, artan ortam basıncı nedeniyle seramik diskin içinden geçerek drene olabilmektedir. Artan hava basıncı seramik disk içinden geçemediği için zemin içindeki boşluklara dolan havanın basıncı sabit kalmaktadır. Seramik diskin altındaki su, eğer atmosfere açıksa ve

zemin içindeki boşluk suyu uygulanan hava basıncından dolayı drenajı sona erene kadar beklenildi ise uygulanan hava basıncı (u_a) zeminin o andaki matrik emmesi olarak kabul edilir. Eğer seramik diskin altındaki su bölmesi drenaja açık değilse, boşluk suyu basıncı ölçülür ve dengeye ulaştığında, ($u_a - u_w$) değerinin matrik emmeye eşit olduğu kabul edilir.

Bu yöntemde her ne kadar havanın seramik diskten geçemediği söylene de bir miktar hava suyun içinde çözünerek, başka bir ifade ile difüzyon yoluyla geçebilmektedir. Çözünen bu hava zemin içindeki hava basıncını etkilememektedir. Ancak zemin içindeki çıkan suyun miktarı ölçülmek istendiğinde hatalar vermektedir. Bu nedenle boşluk suyu hacim ölçmeleri yapılırken belli sürelerde sızan havanın da hacmi ölçülmelidir ve gerekli düzeltmeler yapılmalıdır. Sızan havanın ölçülmesi için iki tane büretten oluşan kapalı bir sistem kullanılmaktadır.



Şekil 2.41. Eksen kaydırma yöntemi kullanarak boşluk suyu basıncının ölçülmesi (Fredlund ve Rahardjo, 1993)

2.9.2. Osmotik Teknik

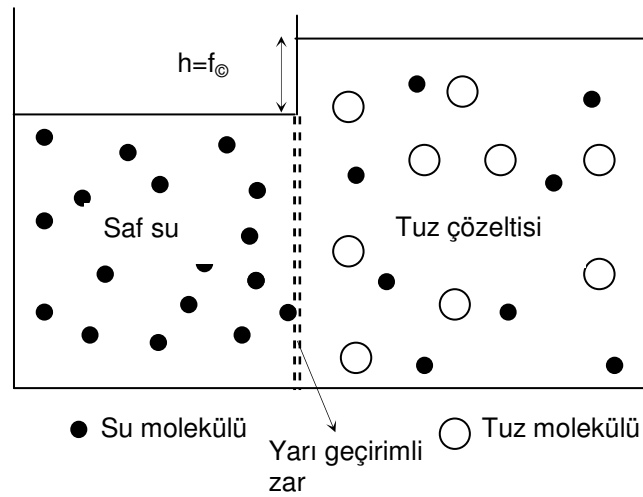
Şekil 2.42’de bu tekniğin ilkesi modellenmiştir. Bu tekniğe göre bir tuz çözeltisi ile saf su, sadece suyun geçişine imkan veren yarı geçirimli bir zar ile birbirinden ayrıldığında zar boyunca osmotik basınç oluşmaktadır. Burada kullanılan eriyik tuzun moleküler ağırlığı kullanılan zara göre önem arz etmektedir. Bu amaçla genellikle doymamış zemin deneylerinde polietilen glikol kullanılmaktadır. Saf su tuz çözeltisi tarafına akarak çözeltinin basınç seviyesini kendi difüzyon basıncına eşdeğer bir hidrostatik basınca kadar yükseltir. Yükselmenin durması ve dengeye gelmesi durumunda bu basınç osmotik basınç olarak alınmaktadır. Bahsedilen yöntem doymamış zemin deneyleri için modifiye edildiğinde zeminin matrik emmesi kontrol edilmektedir (Şekil 2.43)

2.10. Doymamış Koşullarda Kullanılan Deney Düzenekleri

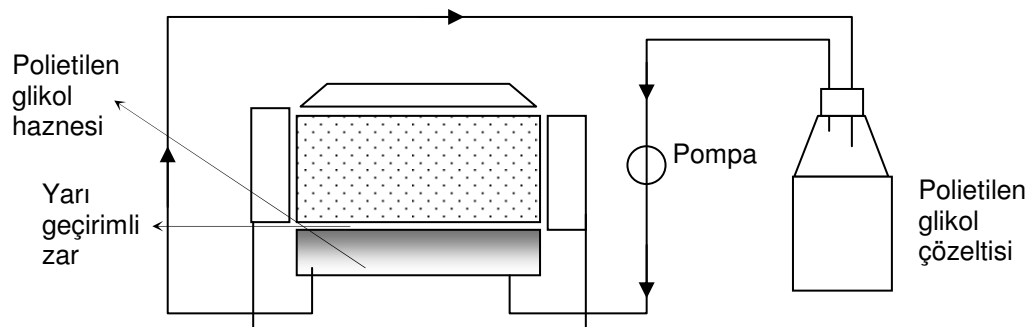
Doymamış koşullarda gerçekleştirilen deneylerin çoğunluğunda emme basınçları kontrol edilmektedir. Bunun için yukarıda bahsedildiği gibi eksen kaydırma veya osmotik teknik gibi bazı yöntemler kullanılmaktadır (Barden ve ark., 1969; Escario ve Saez, 1986; Romero ve ark., 1995):

Kassiff ve Ben Shalom (1971), osmotik tekniği kullanarak özel bir ödometre geliştirmişlerdir (Şekil 2.44). Bu düzenekte numunenin üst ve alt kısmına yarı geçirimli zar yerleştirilmiş ve polietilen glikol çözeltisine bağlantı kurularak numunede emme basıncı oluşturulmuştur.

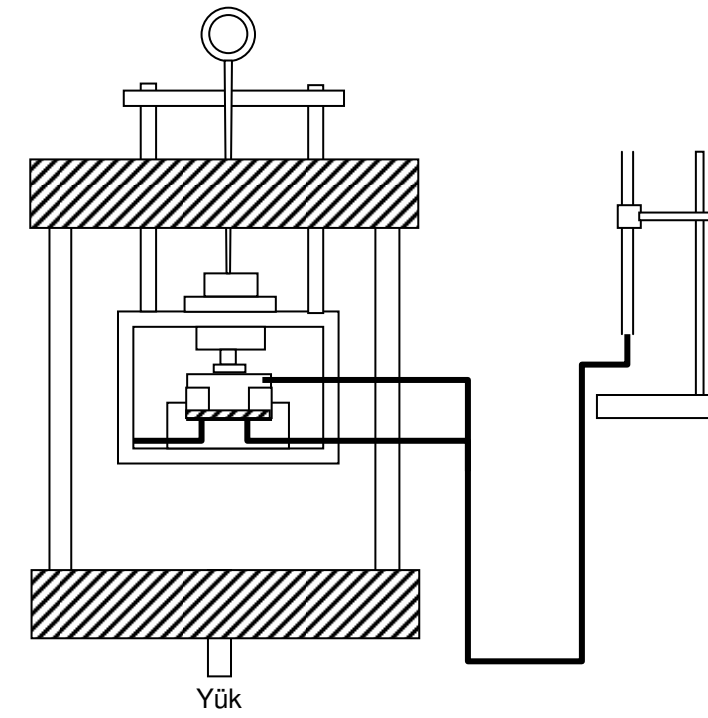
Delage ve ark. (1992), doymamış koşullarda ödometre deneyleri gerçekleştirebilmek için ödometre düzeneği kurmuşlardır (Şekil 2.45). Bu düzenekte matrik emme basınçları osmotik teknik ile kontrol edilmiş ve emme basınçlarını sabit tutmak için polietilen glikol çözeltisi numuneye sürekli dolaşım yaptırılmıştır. Ayrıca su içeriğindeki değişimin ölçülmesi için polietilen glikol çözeltisinin bulunduğu kabın içerisine ince bir tüp konulmuştur.



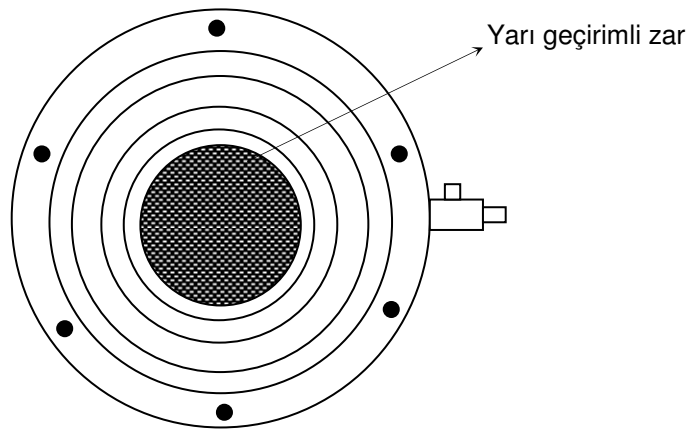
Şekil 2.42. Osmotik basıncın simülasyonu (Özocak, 2003)



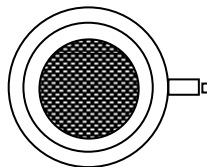
Şekil 2.43. Osmotik tekniğin deneylerde uygulanması (Özocak, 2003)



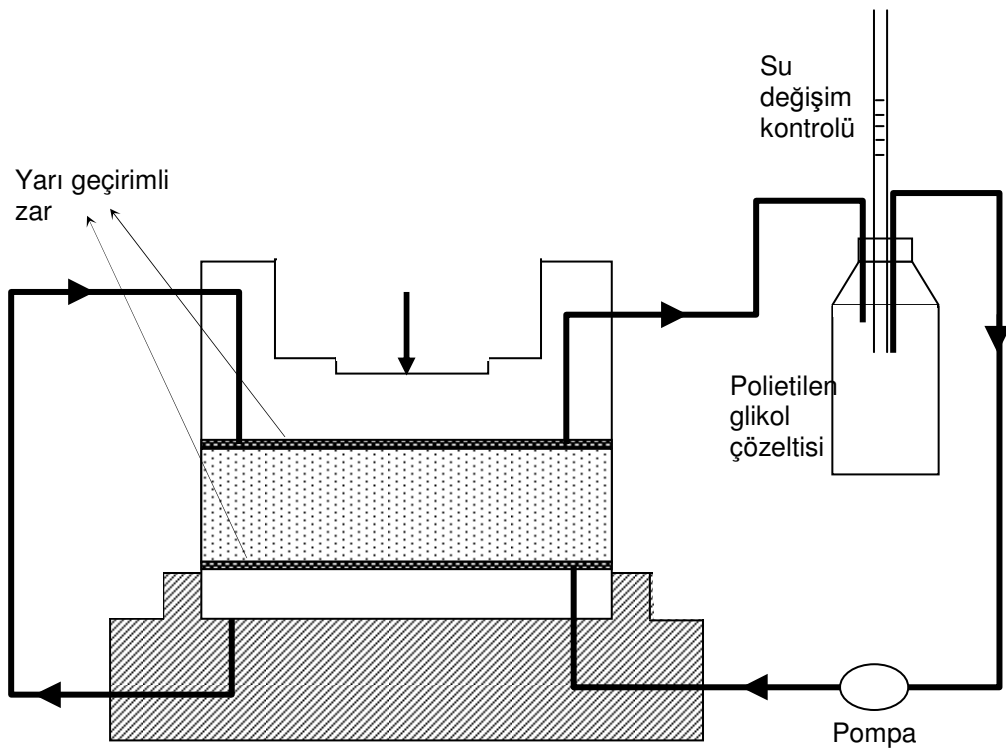
Tabandan görünüm



Başlık altından görünüm

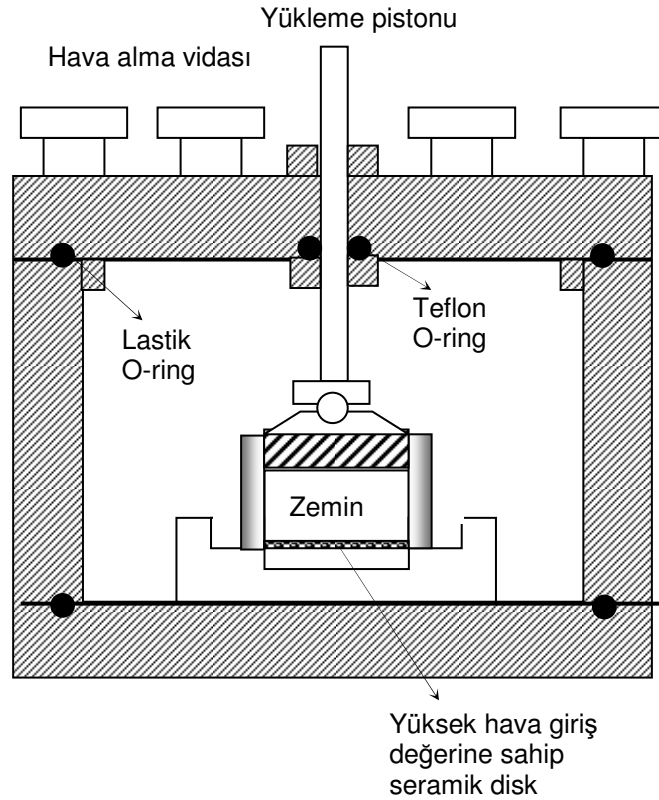


Şekil 2.44. Osmotik teknikle matrik emmenin kontrol edildiği
ödometre (Kassiff ve Ben Shalom, 1971)



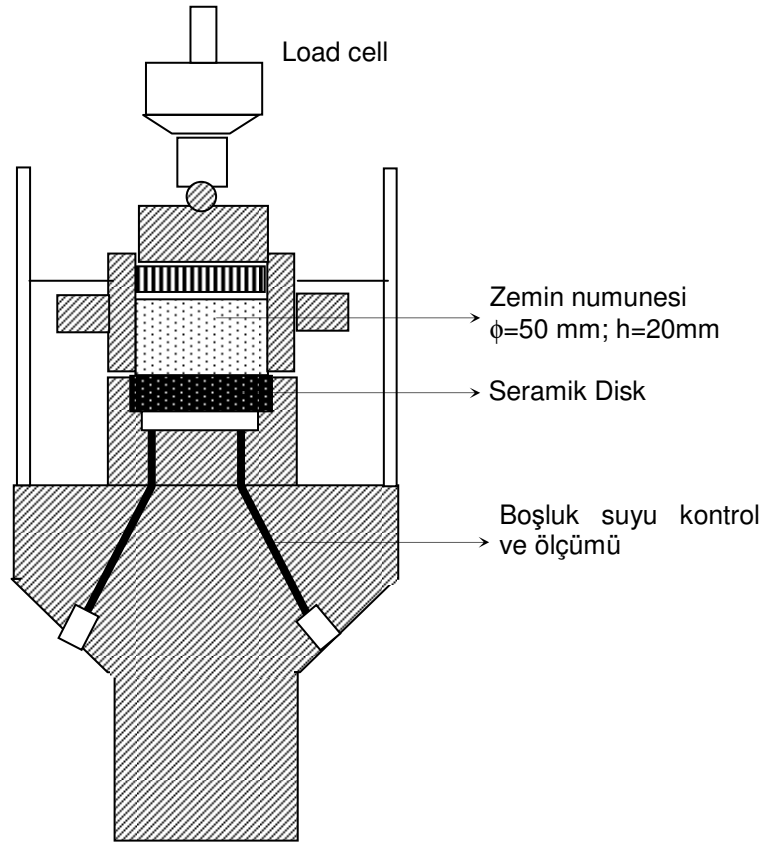
Şekil 2.45. Osmotik teknikle matrik emmenin kontrol edildiği ödometre (Delage ve ark., 1992)

Gan ve Fredlund (1988), doymamış koşullarda kesme kutusu deneyi gerçekleştirebilmek için Şekil 2.46’da gösterilen kesme kutusu deney düzeneğini geliştirmişlerdir. Standart kesme kutusunun modifiye hali olan bu düzenek ile matrik emme basınçları, eksen kaydırma tekniği kullanarak kontrol edilmiştir. Bu amaçla, hava giriş değeri 500 kPa olan ve 6 mm kalınlıktaki seramik disk, epoksi ile ringin tabanına monte edilmiştir. Seramik disk altına yapılan ve spiral şeklinde olan su kanalcıkları hem suyun drenajını sağlamakta hem de seramik diske destek olmaktadır. Ayrıca bu düzenek ile konsolidasyon deneyleri de gerçekleştirilmiştir.



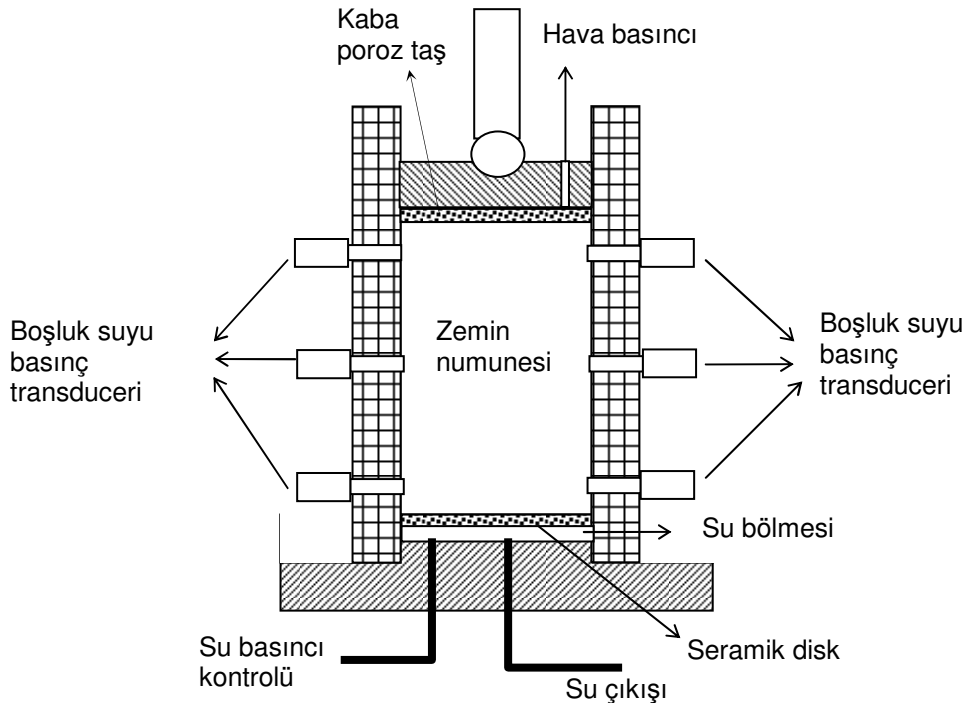
Şekil 2.46. Sabit emme basıncı altında konsolidasyon gerçekleştirmek için modifiye edilmiş kesme kutusu (Gan ve Fredlund, 1988)

Aversa ve Nicotera (2002), doymamış koşullarda matrik emmeleri kontrol ederek konsolidasyon deneyleri gerçekleştirmek için, özel bir ödometre hücresi geliştirmişlerdir (Şekil 2.47). Bu deney düzeneği, eksen kaydırma tekniği ile matrik emme basınçlarını kontrol etme olanağı sağlamaktadır. Numune içindeki hava basıncı, zemin numunesi altına konulan hava giriş değeri yüksek seramik disk vasıtasıyla sabit tutulmuştur. Çapı 56 mm ve yüksekliği 20 mm olan ödometre ringi içinde konsolidasyonu sağlanan zemin numunesinin su içeriğindeki değişim, ikiz büret sistemiyle ölçülmüş ve bu sayede numunenin tüm yükleme kademesi boyunca doygunluk derecesi kaydedilmiştir.



Şekil 2.47. Eksen kaydırma tekniği kullanılarak emme basınçlarının kontrol edildiği ödometre (Aversa ve Nicotera, 2002)

Rahardjo ve Fredlund (2003), doymamış zeminlerin hacim değiştirme davranışlarını deneysel olarak incelemek için konsolidasyon düzeneği oluşturmuşlardır (Şekil 2.48). Bu deneylerde, zemin numunesinin matrik emme basınçlarını kontrol etmek için eksen kaydırma tekniği kullanılmıştır. Drenajlı ve sabit su içeriğinde yapılan deneylerde toplam ve su hacmi değişimi deney süresince izlenmiştir. Sabit su içeriği deneyleri, net normal gerilme altında konsolidasyon ve matrik emme basıncı altında konsolidasyon olmak üzere, deneylerde üç farklı yükleme tipi kullanılmıştır. Yüksekliği 308 mm, iç çapı 102 mm olan konsolidasyon hücresinin duvarlarına, boşluk suyu basıncını ölçmek amacı ile özel pore-pressure transducer'ler monte edilmiştir. Yine bu kısımlarda eksen kaydırma tekniğinin uygulanabilmesi için, transduce'lerin başına hava giriş değeri yüksek seramik diskler monte edilmiştir. Böylece o bölgelerde seramik disk içinden geçen suyun basıncı ölçülmüştür. Boşluk suyu hacim değişimleri ikiz büret sistemi ile ölçülmüştür.



Şekil 2.48. Eksen kaydırma tekniği kullanılarak emme basınçlarının kontrol edildiği ödometre (Rahardjo ve Fredlund, 2003))

3. MATERYAL ve METOD

Bu bölümde araştırmada kullanılan alet ve araştırmaya konu olan malzeme hakkında bilgiler sunulacaktır.

3.1. Araştırmada Kullanılan Yeni Deney Düzeneği

K_0 koşullarında yanal zemin basınçlarını doğrudan ölçmeyi sağlayan, birçok deney düzeneği hakkındaki bilgiler önceki çalışmalar bölümünde verilmiş bulunmaktadır. Bu çalışmada, K_0 koşullarında yanal basınçları ölçmeye yarayan ve aynı zamanda doymamış koşullarda deney yapabilme olanağı sağlayan, bir düzenek tasarlanmıştır. Bu düzenek ile suya doygün olmayan zeminlerin, matrik emme basınçları eksen kaydırma yöntemi ile kontrol edilebilmektedir. Yanal basınçlar, ince cidarlı olarak imal edilen konsolidasyon hücresinin duvarlarına yapıştırılan, strain gauge'ler ile ölçülmüştür. Düşey gerilmenin ölçülmesi ise, numune üzerine yerleştirilen, load cell vasıtası ile gerçekleştirilmiştir. Düzenek kabaca dört ana parçadan oluşmaktadır;

- ince cidarlı ödometre hücresi,
- sızan hava hacim ölçer,
- su ve hava akımını sağlayan tesisat,
- verilerin okunduğu ve kaydedildiği bilgisayar sistemi,

Matrik emme basınçları, zemin numunesinin altına yerleştirilen yüksek hava giriş değerine sahip, seramik diskler vasıtası ile kontrol edilmiştir. Zemin içinden çıkan su hacmi, hacim ölçer vasıtası ile ölçülmüştür. Bu cihaz su hacmini $0,01 \text{ cm}^3$ hassasiyetle ölçebilmektedir. Zemin numunesinin çökme miktarının ölçümü için deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Deney sırasında elde edilen veriler, bir software ve data logger yardımı ile, bilgisayar ortamına aktarılarak kaydedilmiştir.

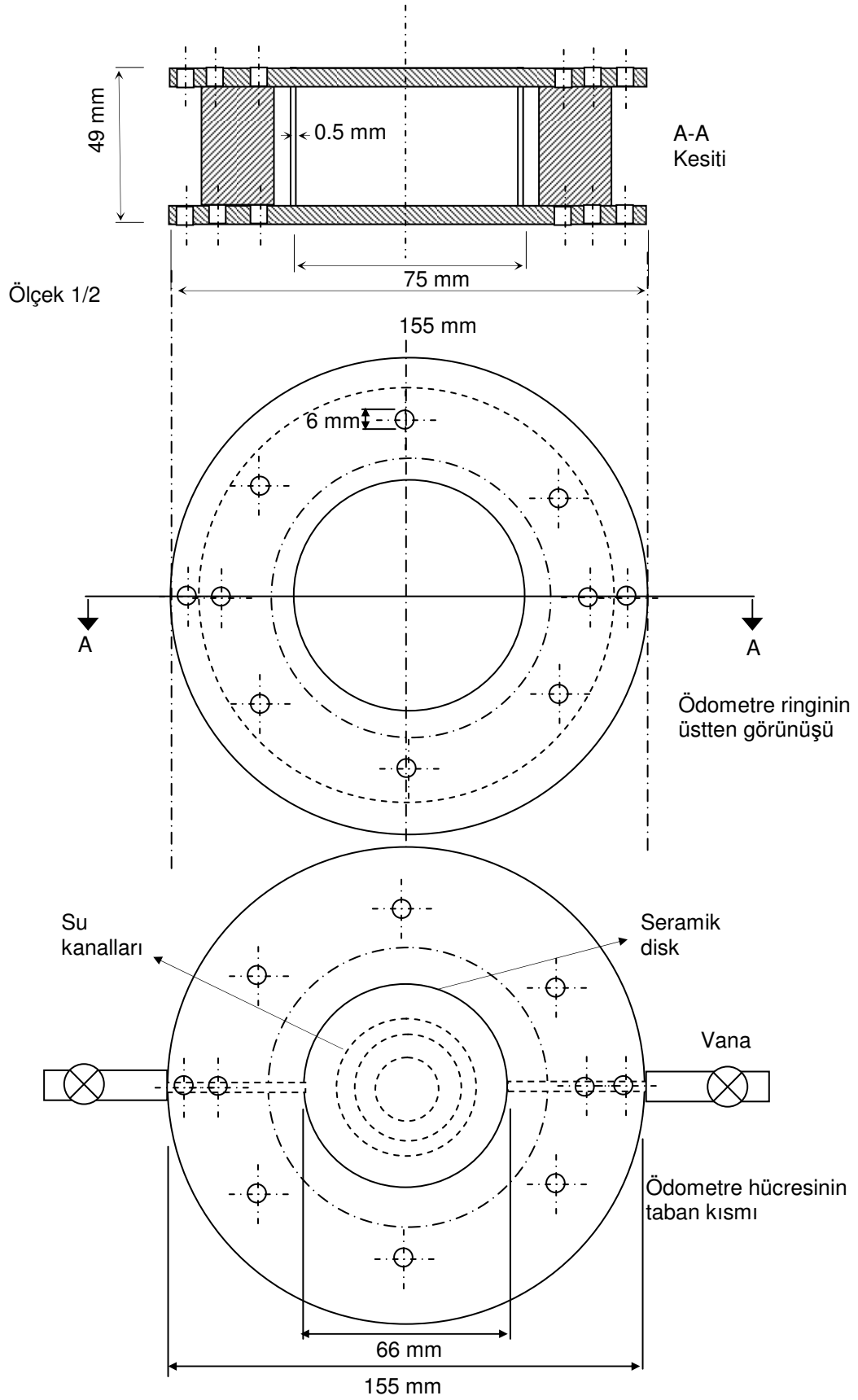
3.1.1. Ödometre Hücresi

Şekil 3.1'de görülen ödometre hücresi üç ana kısımdan oluşturulmuştur. Birinci kısım, ödometre ringinin altına monte edilen ve seramik poroz diskin

yapıştırıldığı taban kısmıdır. Seramik poroz diskin altında bir su odacığı oluşturulmuştur. Bu su odacığı, numuneden çıkan suyun iletilmesi için, süreklilik sağlamak ve aynı zamanda buradan boşluk suyu basıncı ölçülebilmektedir. Taban kısmına, su odacığına bağlı iki tane drenaj vana monte edilmiştir. Bu vanalardan bir tanesi çıkan su miktarını ölçmek için, su hacim ölçere (volume change transducer) bağlıdır. Aynı zamanda bu hat üzerinde bir tane boşluk suyu basınç ölçer (pore-water pressure transducer) bulunmaktadır. Diğer vana ise, by-pass yaparak su odacığı içindeki suyun tahliyesi için kullanılmakta olup, suyun tahliyesi sırasında basınç gerektiği için, sabit basınç sağlayan alete (constant pressure device) bağlanmıştır.

İkinci kısım, planı ve kesiti Şekil 3.2.'de gösterilen, ince cidarlı ödometre ringinden oluşmaktadır. İnce cidarlı ödometre ringi, malzeme kodu ç.4140 olan yüksek alaşımlı çelikten yapılmıştır. Standart ödometre çapında (iç çapı 75 mm olan ringin üst yakasının çapı 155 mm ve yakalarla birlikte toplam yüksekliği 49 mm) olarak yapılmıştır. Ringin et kalınlığı, üniform olacak şekilde, 0.50 mm'ye kadar inceltirilmiştir. Bu kalınlık yükleme durumunda; yanal deformasyonların sükunet durumu sınırı olan 10^{-3} mertebesini geçmeyecek şekilde tasarlanmıştır. Üst ve alt yakada toplam 10 adet civata deliği açılmıştır. Bunlardan 3 tanesi, ince cidarlı ödometre ringini alt kısma somunlarla bağlamak için kullanılmaktadır. Diğer delikler ise, ringin dış duvarını ortamdan ayırmak için, alt ve üst yaka arasına yerleştirilen metal parçanın montajı için yapılmıştır. Yanal basınçların ölçülmesi için, ince cidarlı ödometre ringinin dış duvarına, dört adet strain gauge yapıştırılmıştır. Bahsedilen kapalı bölme strain gauge'leri dış ortamdan korumaktadır. Strain gauge'ler Wheatstone köprüsü (full bridge) oluşturacak şekilde bağlanmıştır. Oluşturulan elektrik devrenin konfigürasyonu hakkında ileride daha geniş şekilde bahsedilecektir.

Üçüncü kısım ödometre ringinin üst kısmına monte edilen ve hava geçirmez bir ortam sağlayan bölümdür. Hava sızıntısını önlemek için O-ringler kullanılmıştır. Bu kısmın içinde, düşey yüklemeyi sağlamak için bir piston bulunmaktadır. Ayrıca sürtünme kayıpları ve diğer kayıpları elemine etmek için, yükleme başlığı ile piston arasına bir load cell yerleştirilmiştir. 5 mm kalınlığı olan yükleme başlığının çevresi konik şekilde imal edilmiştir.



Şekil 3.2. Ödometre hücresinin tabanı ve ince cidarlı ödometre ringi

3.1.2. Strain Gauge

Herhangi bir malzeme üzerinde, yüklemelerden dolayı meydana gelen gerilmeler doğrudan ölçülememektedir. Fakat gerilmeler, malzemenin diğer ölçülebilir parametrelerinden hesaplanabilmektedir. Örneğin deformasyonlar ölçülebilirse gerilmeleri hesaplamak mümkün olmaktadır. Bu nedenle gerilme ölçümünde önce deformasyonlar ölçülmektedir.

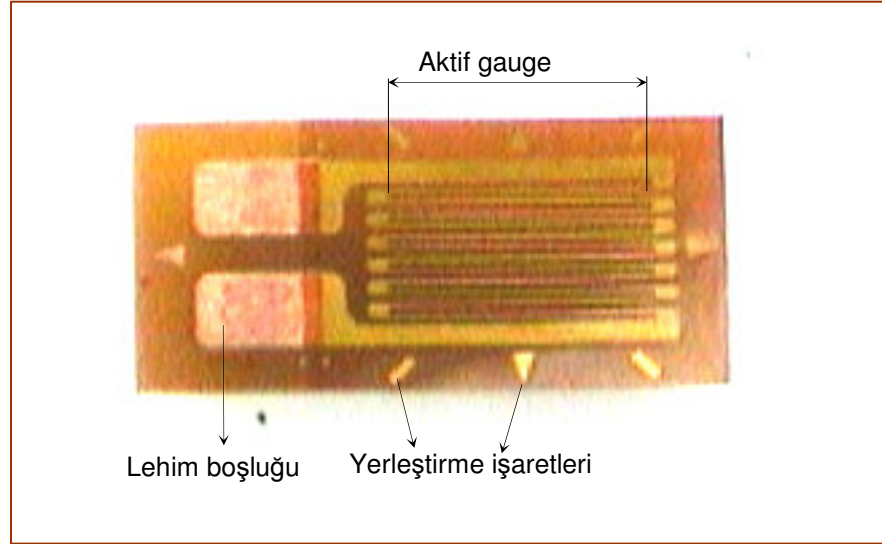
Uygulamalı mekanik dalında, gerilmelerin ölçümünde, kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler mekanik, optik, akustik, pnömatik ve elektriksel teknikler olmak üzerine sıralanabilir.

Elektriksel direnç olan strain gauge'ler (Şekil 3.3) ölçüm için malzeme üzerine, yükleme durumunda, birlikte çalışacak şekilde yapıştırılmaktadır. Bu durumda malzemede meydana gelen uzama, kısalma veya deformasyonlar, strain gauge'ler üzerinde aynı etkileri yaratırlar. Başka bir ifade ile strain gauge'ler de uzar veya kısalır. Gauge'lerde meydana gelen deformasyonlar, gauge'lerin boyu ile doğru orantılı olarak elektriksel direncini değiştirir. Bu özellikten yararlanılarak; dirençteki değişim bir ohmmetre ile, ölçülmek sureti ile, strain gauge'de meydana gelen boy değişimi veya deformasyon hesaplanabilir.

Gerilmelerin ölçülebilmesi için, strain gauge'lerin doğru şekilde monte edilmesi önem taşır. Hatalı yapıştırma işlemi, hatalı sonuçların alınmasına yol açmaktadır. Bu nedenle strain gauge yapıştırma işlemi oldukça titiz bir çalışma gerektirir. Bunun yanı sıra kullanılan yapıştırıcının da doğru seçilmesi önemlidir. Çünkü farklı malzemeler için farklı yapıştırıcıların kullanılması gerekir. Şekil 3.4'te strain gauge'lerin yapıştırma şeması gösterilmiştir.

Bu çalışmada Wheaston köprüsü oluşturacak şekilde 120 ohm dirence sahip dört tane strain gauge, 90°'lik açılarla, karşılıklı olarak ince cidarlı ödometre ringinin dış yüzeyinin orta noktasına, yapıştırılmıştır. Kullanılan bu devre sayesinde sıcaklık değişimi, eğilme ve burulmadan dolayı ortaya çıkabilecek etkiler ortadan kalkar. Bunlardan iki tanesi yatay, diğer ikisi de düşey düzlem boyunca yerleştirilmiştir. Gauge'lerin yatay olanları zemin numunesi yüklendikten sonra, aktif olarak çalışır ve

gerilmeleri ölçer. Dik olanlar ise; deney boyunca, sıcaklıktan dolayı meydana gelen deformasyonları dengeler (Şekil 3.5).



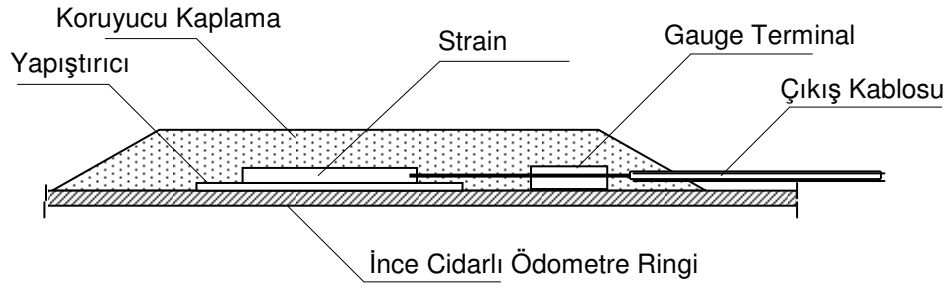
Şekil 3.3. Elektriksel strain gauge

31.2.1 Strain Gauge Uygulaması

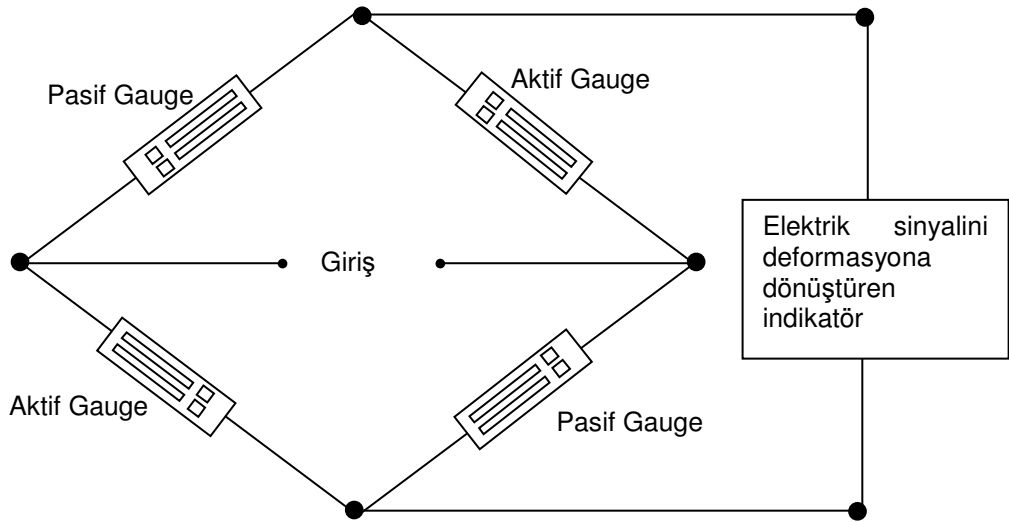
Bu çalışmada Çukurova Üniversitesi Yapı Laboratuvarında mevcut bulunan ve “Measurement Group” firması tarafından üretilen CEA kodlu yaprak gauge ve M-600 kodlu yapıştırıcı kullanılmıştır. Aşağıda strain gauge yapıştırma işlemi, sırası ile anlatılmıştır:

1. Yüzeyin temizlenmesi

Strain gauge'in yapıştırılacağı malzeme çelik olduğu için oksitlenmeler olabilir. Oksitlenmiş yerlerin temizlenmesi amacıyla gauge'in yapıştırılacağı yere “**Conditioner**” denilen sıvı dökülerek oksitlerin yumuşaması sağlanır. Islanan yüzey, zımpara kağıdı ile, oksitlenmeler çıkana kadar, zımparalanır. Daha sonra zımparalanan yer kağıt havlu ile tek yönlü silinir ve yüzey temizlenir.



Şekil 3.4. İnce cidarlı ödometre ringi duvarı üzerindeki strain gauge'in görünümü



Şekil 3.5. Strain gauge'ler ile oluşturulan elektrik devresi (Wheatstone köprüsü)

2. İşaretleme

Bir cetvel ve kurşun kalem kullanarak strain gauge'lerin yapışacağı yerler işaretlenir.

3.Nötralizasyon

Yapıştırma yüzeyi üzerinde, optimum alkaliniteyi elde etmek için uygulama malzemeleri içinde bulunan ve “**Neutralizer**” denilen maddeden birkaç damla damlatılır. Ucunda pamuk sarılı çubuk ile zımparalanmış yüzeye sürülür. Sonra kuruyana kadar beklenir. Bu işlemi takiben, en fazla 45 dakika sonra gauge'ler yapıştırılmalıdır.

4. Strain gauge'in Konumu

Strain gauge, boyca uzayacak veya büzülecek şekilde, deney numunesi üzerine yapıştırılmalıdır. Örneğin, aksenal çekmeye tabii tutulan bir numunenin aksenal şekil değiştirmesi ölçülmek isteniyorsa, strain gauge numunenin uzun kenarına paralel olacak şekilde yerleştirilmelidir.

5. Yapıştırma

Yüzeyin hazır hale gelmesinden sonra; strain gauge bir cımbız yardımı ile kutusundan alınarak, cam levha üzerine konulur. Daha sonra; 10 cm civarında şerit bant kesilir ve cam levha üzerinde duran gauge'in üzerine, düzgün bir şekilde, yapıştırılır. Şerit banda yapışan gauge cam levha üzerinden alınır ve daha önceden yapıştırılacak yüzey üzerindeki işaretli yer ile, gauge üzerindeki işaretler çıkışacak şekilde, geçici olarak yapıştırılır. Bunu takiben şerit bantın bir ucundan tutulur ve geriye doğru çekilerek, gauge'in yüzey üzerinden ayrılması sağlanır. Yine malzemeler arasında bulunan ve “**Katalizör**” denilen madde, gauge'in yapışma yüzeyine sürülür. Bu işlemin hemen arkasından, bir damla yapıştırıcı damlatılır ve gergin bir şekilde, şerit bantı çekerek gauge'in yapışması sağlanır. Birkaç dakika baş parmak ile bastırılır.

6. Lehimleme

Önce lehim çubuğu ısıtılır. Plastik kılıf ile kaplı kablo, ucundan bir miktar sıyrılır ve lehim ile strain gauge'e lehimlenir. Lehim çubuğu bir kaç saniyeden fazla tutulmamalıdır. Lehimleme bittikten sonra, son işlem olarak, gauge'leri dış ortamdan

yalıtmak için; yine özel olarak imal edilen, uygun koruma malzemesi ile gauge'in üzeri kapatılır.

3.1.3. Deformasyon Ölçer

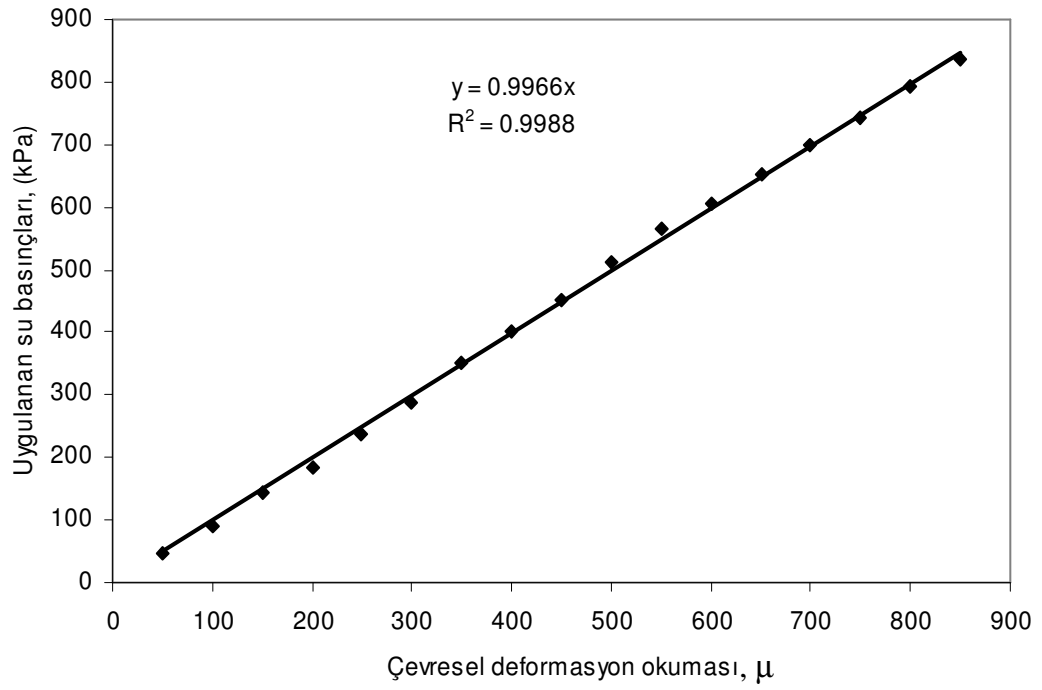
Strain gauge'lerde meydana gelen direnç değişimlerinin, diğer bir deyişle ince cidarlı ödometre duvarındaki çevresel deformasyonların okunması için, 'Tech Equipment' firması tarafından üretilen E10-MK serisi, dijital deformasyon ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.6). Deformasyon ölçer gerçekte bir galvanometredir. Alternatif akım veya içindeki şarjlı pil ile çalışan bu alet, ring üzerinde oluşturulan Wheatstone Köprüsü devresine akım sağlayan bir üreteçtir. Aynı zamanda direnç değişimlerini deformasyona çeviren bir dönüştürücüdür.

3.1.4. Kalibrasyon

Uygulanan düşey basınçlardan dolayı, zemin numunesinin oluşturduğu yanıl basınçları tespit etmek için, konsolidasyon ringinin önceden kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. İnce cidarlı ödometre ringinin kalibrasyonu genellikle, ringin içine su veya hava basıncı uygulayarak, ring duvarında meydana gelen çevresel deformasyonların okunması şeklinde yapılmaktadır (Edil ve Dhowian, 1981; Zhu ve Clark, 1993). Elde edilen okumalardan, uygulanan basınç ve deformasyon okumaları arasındaki ilişki değerlendirilerek, en uygun lineer fonksiyon bulunmakta ve bu fonksiyon kalibrasyon denklemi olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ince cidarlı ödometre ringi içine, su basınçları uygulanmış ve bunlara karşılık gelen çevresel deformasyonlar okunmuştur. Yapılan kalibrasyon işleminde; basınç ile çevresel deformasyonlar arasında, lineer bir ilişki olduğu görülmüştür. Elde edilen kalibrasyon eğrisi Şekil 3.7'de görülmektedir. Yapılan kalibrasyonun doğruluğunun görülmesi açısından, kalibrasyon bir çokkez yinelenmiş ve her defasında aynı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, yapılan her deney sonrasında, kalibrasyonlar tekrarlanmıştır.



Şekil 3.6. Deformasyon ölçer



Şekil 3.7. İnce cidarlı ödometre ringinin kalibrasyon eğrisi

3.1.5. Ödometre Ringinin Sağlaması Gerekli Koşullar

Yanal basınçları doğrudan ölçmeye yönelik, ödometre ringlerinin bazı koşulları sağlaması gerekir. Çünkü Terzaghi (1925) tarafından gösterildiği gibi yanal deformasyonların 10^{-3} mertebesinde küçük olmaları ve zeminin kırılma durumunda bulunmaması gerekmektedir. Bu yorum dikkate alınarak ringin et kalınlığı seçilmiştir. Bunun yanı sıra, strain gauge'lerin oluşan deformasyonları algılaması için, et kalınlığının yeterli olup olmadığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenlerle; ödometre ringinin sağlaması gerekli koşullar aşağıda verilmiştir (Ertekin, 1991).

Bu amaçla Şekil 3.8'de gösterilen, bir ödometre ringinde meydana gelen basıncılar dikkate alınmış ve elastisite teorisinden yararlanarak aşağıdaki ifadeler yazılmıştır (Ertekin, 1991).

R: Ringin iç yarıçapı

E: Ring malzemesinin elastisite modülü

t: Ringin et kalınlığı

P_i : Ringin iç duvarında oluşan basınç

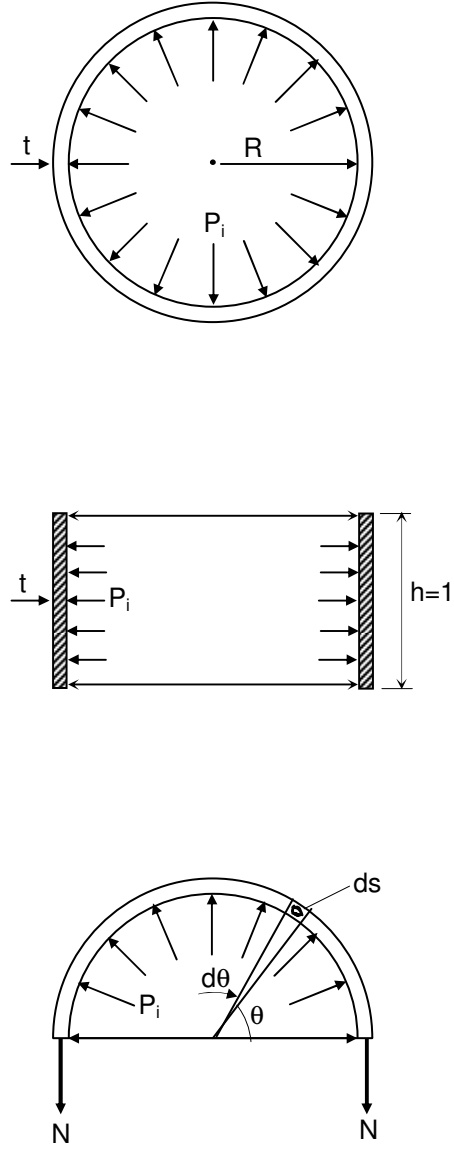
σ : Ringde oluşan çekme gerilmesi

ϵ : Ringde meydana gelen çevresel şekil değiştirmeler

dR: İç yarıçaptaki değişme

N: Ringin dik kesit alanı üzerine etkiyen normal kuvvet

A: Düşey kesit üzerindeki birim yüksekliğe sahip alan



Şekil 3.8. Ödometre duvarında meydana gelen gerilmeler (Ertekin, 1991)

$$N = \int_0^{\pi/2} p_i \sin \theta ds \quad (3.1)$$

$$ds = R d\theta \quad (3.2)$$

(3.2) ifadesi (3.1)'de yerine konulursa, aşağıdaki ifade elde edilir.

$$N = \int_0^{\pi/2} p_i \sin \theta R d\theta \quad (3.3)$$

$$\int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta = 1 \text{ olduğu için (4.3) ifadesi aşağıdaki şekli alır.}$$

$$N = p_i R \quad (3.4)$$

Bu durumda; ringin duvarında meydana gelen çekme gerilmesi, aşağıdaki şekilde verilir.

$$\sigma = p_i \frac{R}{A} \quad (3.5)$$

$$A = th \text{ veya } A = t1 = t \quad (3.6)$$

$$\sigma = p_i \frac{R}{A} = p_i \frac{R}{t} \quad (3.7)$$

$$p_i = \sigma \frac{t}{R} \quad (3.8)$$

Ödometre ringinin boyuna deformasyonları ϵ ise, Hooke yasası olarak bilinen ve tek eksenli gerilme durumundaki $\epsilon = \sigma/E$ eşitliğinde, (3.7) numaralı σ ifadesi, yerine konulursa aşağıdaki şekil değiştirme ifadesi bulunur.

$$\varepsilon = \frac{P_i R}{E t} \quad (3.9)$$

İç çapın genişlemesi ise, aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\varepsilon = \frac{[(R + dR)2\pi - 2\pi R]}{2\pi R} \quad (3.10)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{p_i R}{E t}$$

$$dR = \frac{p_i R^2}{E t} \quad (3.11)$$

Ödometre ringinin malzeme özellikleri

Çekme mukavemeti : $\sigma_d = 55 \times 10^4$ kPa

Elastisite modülü : $E = 2.1 \times 10^8$ kPa

olarak alınırsa, K_o koşullarını bozmayan veya kırılma durumundan uzak bulunan, deformasyona karşı gelen iç basıncın değeri

$$P_{\max} = 6 \times 10^3 \text{ kPa}$$

olur. Bu çalışmada kullanılacak en büyük düşey basınç

$$P_{v\max} = 1.6 \times 10^3 \text{ kPa}$$

olarak alınırsa ve $K_o = 0.9$ olduğu farz edilirse, yanal basınç

$$P_{h\max} = 1.6 \times 10^3 \times 0.9 = 1.44 \times 10^3 \text{ kPa}$$

bulunur. Buna göre maksimum deformasyon $\epsilon_{\max}=5.143 \times 10^{-4}$ veya 514 μ olur ve bu değer 1×10^{-3} veya 1000 μ dan daha küçüktür. Bu durumda K_o koşulları sağlanmış olur.

Ayrıca K_o koşullarını bozmadan, elastik dengenin korunması için, uygulanabilecek maksimum düşey basınç, aynı şekilde hesap edilirse,

$$P_{h\max}=2,8 \times 10^3 \text{ kPa}$$

$$P_{v\max}=2,8 \times 10^3 / 0.9 = 3,11 \times 10^3 \text{ kPa}$$

olarak bulunur.

3.1.6. Yüksek Hava Giriş Değerine Sahip Seramik Diskler

Doygun olmayan zemin deneylerinin genelinde eksen kaydırma tekniği uygulanmaktadır. Bu tekniğin uygulanmasında, özel işlemler uygulanarak kilden imal edilen ve yüksek hava giriş değerine sahip seramik diskler kullanılır. İmal ediliş özelliklerine göre bu diskler farklı hava giriş değerine, poroziteye, gözenek çapına ve geçirgenliğe sahiptir. Bu çalışmada, “SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORPORATION” firmasından alınan ve seri numarası B15M1 olan, seramik diskler kullanılmıştır. Yaklaşık 16 mikron gözenek çapına sahip olan bu seramik diskin hidrolik geçirgenliği 2.59×10^{-9} cm/sn, çapı 6.668 cm ve kalınlığı 0.714 cm’dir.

Seramik poroz disk, zemin numunesinin altına gelecek şekilde, konsolidasyon hücresinin taban kısmında oluşturulan yuvaya, epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Hava sızıntısının olmaması için bu işlem, çok dikkatli bir şekilde, yapılmış ve test edilmiştir. Seramik disk, deneyde kullanılmadan önce, suya doyurulmuştur. Seramik diskin suya tam doygün olması, boşluk-suyu hacim ölçmeleri için çok önemlidir. Eğer disk suya tam doygün değilse ölçülen su hacimleri hatalı sonuç verir.

Seramik diskin doyurulması için Fredlund ve Rahardjo (1993) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Seramik disk önceden konsolidasyon hücresi tabanına yerleştirilmiştir. Daha sonra konsolidasyon hücresi tamamıyla kurulmuş ve bütün vidaları sıkılarak kapalı bir ortam elde edilmiştir. Ancak daha önce, seramik diskin üzerinde bir miktar su (yaklaşık 25 mm su yüksekliği) konulmuştur. Hücrenin

hava bağlantısı yapılarak, su üzerine 600 kPa hava basıncı uygulanmıştır. Seramik diskin altında bulunan su odacığı drenaja kapatılmış ve yaklaşık bir saat, suyun poroz disk'in içine akmasına izin verilmiştir. Bu arada seramik disk içinde biriken hava, periyodik olarak dışarıya çıkartılmıştır. Bir saat sonra su odacığının vanası 10 dakika süre ile açılmış ve suyun disk içinden geçmesine müsaade edilmiştir. Daha sonra vana kapatılmış ve su odacığındaki basınç, basınç transducer'i ile ölçülmüştür. Ölçülen su basıncı, konsolidasyon hücresine uygulanan hava basıncına eşit olduğunda diskin suya doyduğu kabul edilmiştir.

3.1.7. Boşluk Suyu Hacminin Ölçülmesi

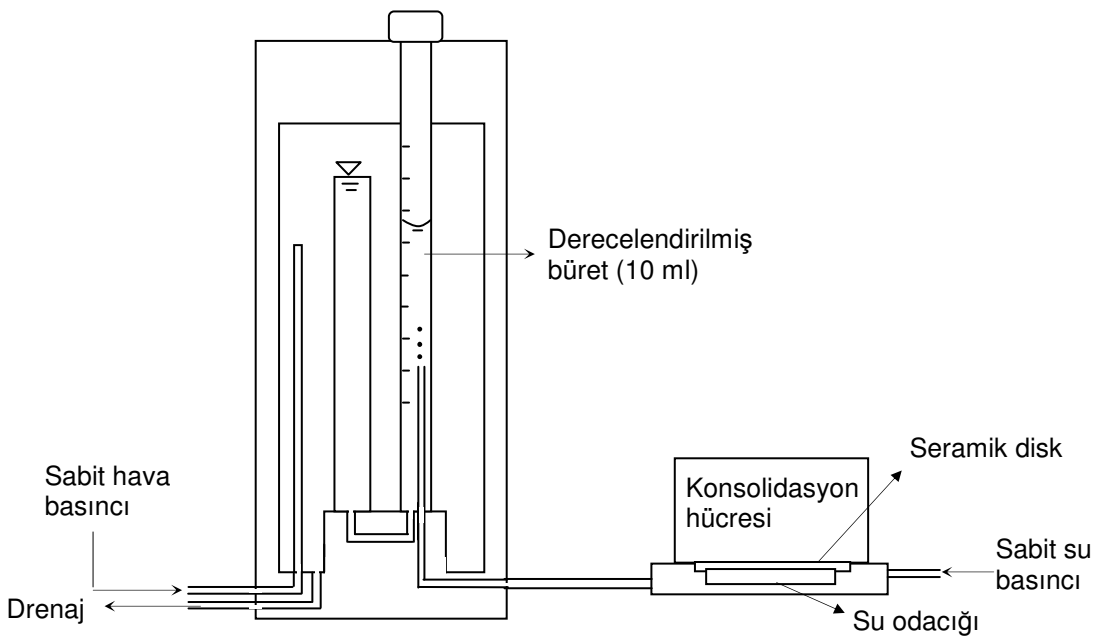
Zemin numuneleri içerisinde çıkan su hacimleri, "ELE" firması tarafından üretilen, hacim değişim transducer'i (volume change transducer) kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.9). Bu transducer, su hacim değişimlerini elektriksel olarak, 0.01 cm^3 hassasiyetle ölçmektedir. Deney sırasında, bir miktar hava su içerisinde çözünür ve yüksek hava giriş değerine sahip, seramik diskin içinden geçerek su odacığına ulaşır. Bu nedenle, belli periyotlarda, sızan havanın su odacığından tahliye edilmesi gerekir. Bu cihaz, ölçüm yapmadan suyun tahliyesine izin vermekte, başka bir deyişle, suyun by-pass olarak tahliyesini sağlamaktadır.



Şekil 3.9. Boşluk suyu hacim değişim ölçeri

3.1.8. Sızan Hava Hacminin Ölçülmesi

Seramik poroz disk, üzerine uygulanan havayı doğrudan geçirmemektedir. Ancak, zamanla bir miktar hava suyun içerisinde çözünerek disk içinden geçer ve disk altındaki su odacığı içerisinde hava baloncukları oluşturur. Bu durum; zemin içinden çıkan, boşluk suyu hacim ölçmelerinde hatalara yol açar. Bu nedenle sızan hava miktarının ölçülmesi gerekmektedir. Sızan havanın ölçümüne yarayan bazı düzeneklere kaynaklarda rastlanmaktadır. Bishop ve Donald (1961) tarafından önerilen “the bubble pump” ve Fredlund ve Rahardjo (1993) tarafından önerilen “DAVI” isimli düzenekler, en yaygın olarak kullanılanlarıdır. Bu çalışmada; Fredlund ve Rahardjo (1993) tarafından önerilen, sızan hava hacim ölçer (DAVI) imal edilmiş ve kullanılmıştır (Şekil 3.10). Bu düzeneğin çalışma prensibi kısaca şöyledir: Önce hava baloncuklarını çıkarmak için, seramik altındaki odacığa su basıncı uygulanır. Aynı anda uygulanan su basıncından 30 kPa kadar daha az bir hava basıncı, DAVI’nin içine uygulanır. Böylece hava baloncuklarının, DAVI içindeki, derecelendirilmiş bürete girmesi sağlanır. Havanın girmesi ile derecelenmiş büretteki su diğer bürete hareket eder ve büret okumları yapılarak kaydedilir.



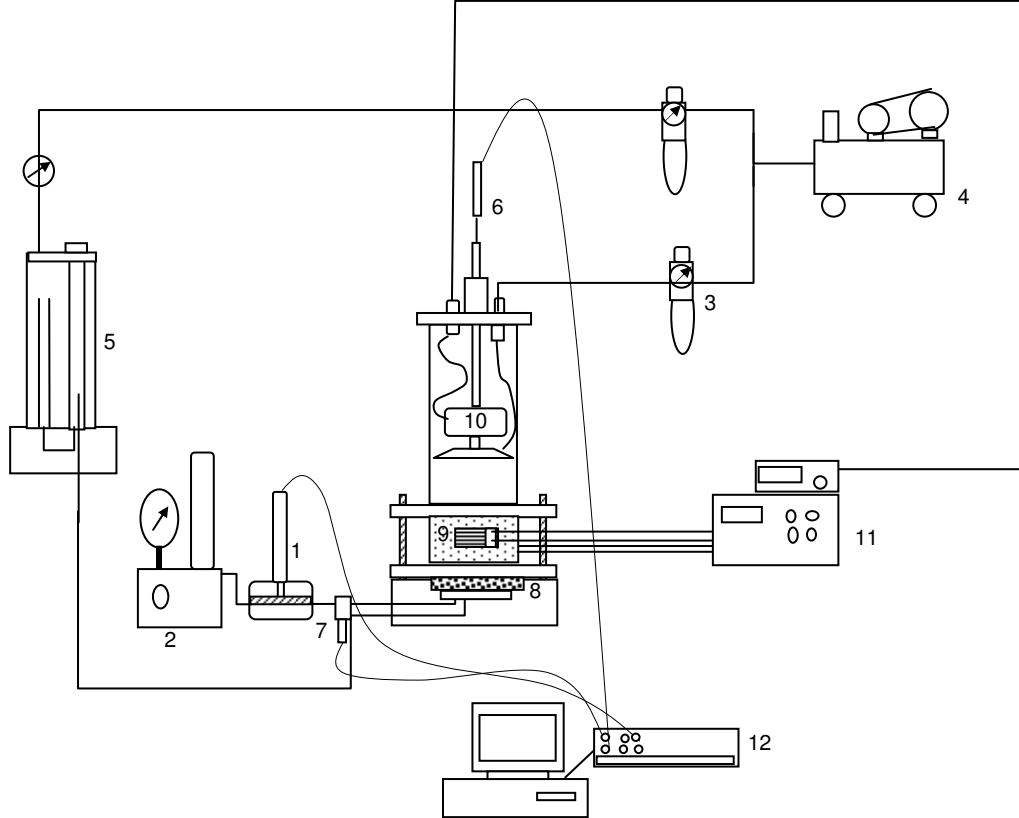
Şekil 3.10. Sızan hava hacminin ölçülmesi için düzenek

3.1.9. Deney Düzenekinin Kurulması

Bu çalışmada tasarlanan deney düzenek; Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Geoteknik Laboratuvarında oluşturulmuştur. Şekil 3.11’de deney düzenek ve tesisatı ile ilgili şema görülmektedir. Zemin numunesinin düşey yönde yüklenmesi için, standart konsolidasyon yükleme çerçevesi modifiye edilerek kullanılmıştır. Bu nedenle yükleme kolları uzatılmış ve konsolidasyon aletine monte edilmiştir (Şekil 3.12). Konsolidasyon hücresi hava geçirmeyecek şekilde imal edilmiş ve gerekli yerlerde O-ringler kullanılmıştır. Düşey yükün uygulanması, hücre üst kısmından giren bir piston vasıtasıyla sağlanmıştır. Numune üzerine uygulanan düşey yöndeki yükü duyarlı olarak ölçmek için, yükleme başlığı üzerine bir yükleme hücresi (load cell) monte edilmiştir. Bu yolla sürtünme ve diğer yük kayıplarından dolayı meydana gelen hatalar giderilmiştir edilmiştir.

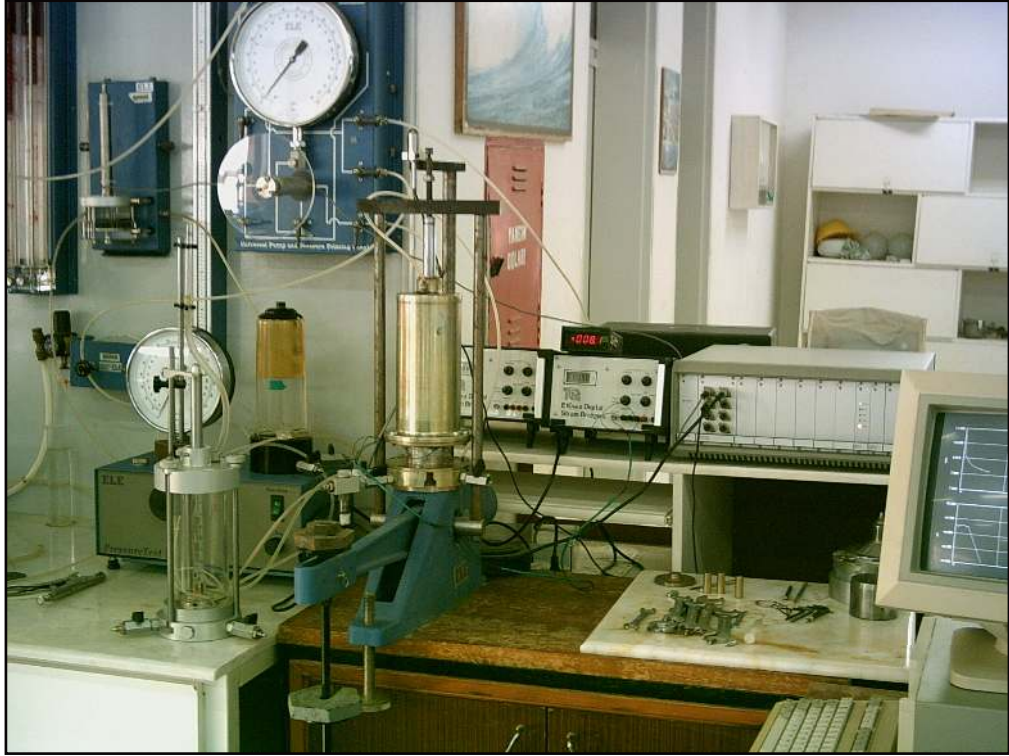
Deneyler emme kontrollü olarak gerçekleştirilmiş ve emme basınçlarının kontrolü için, eksen kaydırma tekniği uygulanmıştır. Bu amaçla, numune konsolidasyon hücresinin üst başlığından sabit hava basıncı uygulanmıştır. Deney sistemine hava basıncı bir kompresör vasıtasıyla uygulanmış ve hücre içerisinde havayı sabit tutabilmek için, iki tane hava basınç düzenleyici kullanılmıştır. Numune altına yerleştirilen seramik disk, hava giriş değeri olan 1500 kPa’lık basınç aşılmadığı sürece, seramik disk hücre içerisine uygulanan havayı geçirmemektedir. Bu sayede, konsolidasyon hücresi içerisindeki, hava basıncı sabit kalmaktadır. Seramik disk altındaki su odacığına iki tane çıkış vanası konulmuştur. Bu vanalardan biri sızan hava hacim ölçere bağlanmıştır. Sızan hava hacim ölçer, aynı zamanda, üzerindeki başka bir vana ile kompresöre bağlanmıştır. Su odacığına bağlı diğer vana ise, numune içinden çıkan su hacmini ölçmek için hacim ölçen transducer’e bağlanmıştır. Hacim ölçerin diğer çıkışı ise sabit basınç sağlayan alete bağlanmıştır. Bu alet su odacığına sızma yolu ile geçen havanın çıkarılması işlemi sırasında kullanılmaktadır. Buradan basınçlı su verilerek hava kabarcıklarının sızan hava hacim ölçerin (DAVI) içine girmesine zorlanmıştır. Bu arada hacim ölçen transducer,

by-pass konumuna getirilmiş ve DAVI içine uygulanan su basıncından, 20-30 kPa kadar daha küçük bir hava basıncı uygulanmıştır.



- | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| 1-hacim değişim ölçer | 8-1500 kPa hava giriş değerine |
| 2-sabit basınç sağlar | sahip seramik disk |
| 3-hava basınç düzenleyicisi | 9-zemin numunesi |
| 4-kompresör | 10- load cell |
| 5-sızan havanın ölçülmesi için düzene | 11- indikatör |
| 6-düşey deformasyon ölçer | 12-data logger |
| 7-boşluk suyu basınç ölçer | |

Şekil 3.11. Matrik emme kontrollü ve yanal basınçların ölçülebildiği konsolidasyon deney düzeneği



Şekil 3.12. Araştırma için imal edilen konsolidasyon hücresi ve yükleme çerçevesi

Deney süresince sonuçların okunması ve kaydedilmesi için, EL27-1495 seri numaralı ve 8 kanal girişli ADU (Autonomous Data Acquisition Unit) isimli, bir veri kayıt (data logger) cihazı kullanılmıştır. Veri kayıt cihazı; bilgisayar ortamına gelen sinyalleri, Dialog isimli bilgisayar programı ile, sayısal olarak kaydetmektedir.

3.2. Deneylerde Kullanılan Zeminlerin Özellikleri

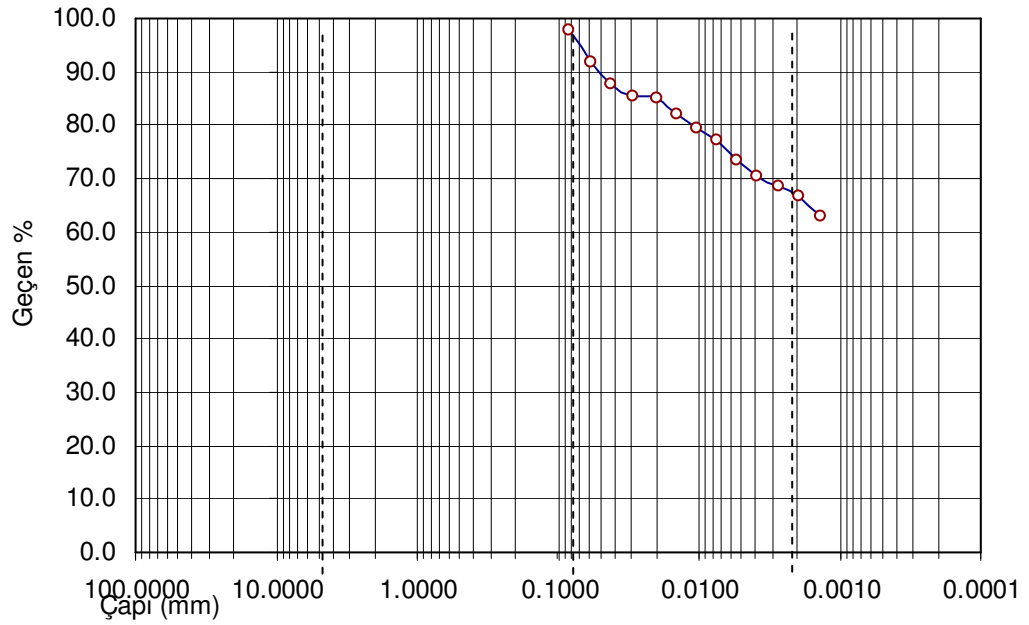
Doygun olmayan zeminlerin sükunetteki yanal basınçlarının incelenmesi amacıyla; yapılan deneysel çalışmada, Diyarbakır'ın Kayapınar beldesinden ve Adana'nın havuzlubahçe semtinden alınan, iki farklı zemin numunesi kullanılmıştır. Diyarbakır'dan alınan killi numuneler yeniden yapılandırılarak (reconstituted), Adana'dan alınan siltli numuneler ise kompaksiyon deneyi ile hazırlanmıştır.

3.2.1 Kayapınar Kili

Diyarbakır ilinin Kayapınar beldesinden alınan, yüksek plastisiteli killi zeminin endeks özellikleri, standart deneylerle (TSE-1900/1500), tespit edilmiş ve Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Zeminin dane dağılım eğrisi, hidrometre deneyi sonucunda, Şekil 3.13'teki gibi çizilmiştir. Bu eğriye göre zemin, yaklaşık %65 kil ve %30 silt danelerinden oluşmaktadır. Deneylerde, yeniden yapılandırılmış zemin numuneleri kullanılmıştır (Cunningham, ve ark.,2003, Özocak, A., 2003). Bu amaçla zemin kurutulduktan sonra 40 Nolu elekten elenmiş ve likit limit değerinin 1.5 katı su içeriğine sahip olacak şekilde, saf su ilave edilerek bulamaç haline getirilmiştir. Bulamacın homojen olması için önce elle, daha sonra bir mikser ile karıştırılmıştır. Homojen bir şekilde karıştırılan ve bulamaç haline getirilen zemin, bir hafta boyunca su içeriğini kaybetmeyecek şekilde bekletilmiştir. Daha sonra K_0 koşullarında konsolide etmek için özel yapılmış konsolidasyon ringi içine alınmış ve bir gün boyunca, kendi ağırlığı altında konsolide olması sağlanmıştır. 200 kPa'lık düşey yük değerine ulaşıncaya kadar, bulamaç numune küçük yük artımları ile yüklenmiştir. 200 kPa düşey yük düzeyinde, zemin numunesi tamamen çökene kadar beklenilmiş ve sonra doymamış koşullardaki deneylerde kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Kayapınar Kili'nin endeks özellikleri

Likit Limit (%)	77
Plastik Limit (%)	32
Plastisite İndisi	45
200 nolu elekten geçen (%)	95
Dane Birim Hacim Ağırlığı (γ_s)	2,65 gr/cm ³
Renk	Kahve
Grup Sembolü	CH



Kaba Daneli Zemin		İnce Daneli Zemin	
Çakıl	Kum	Silt	Kil

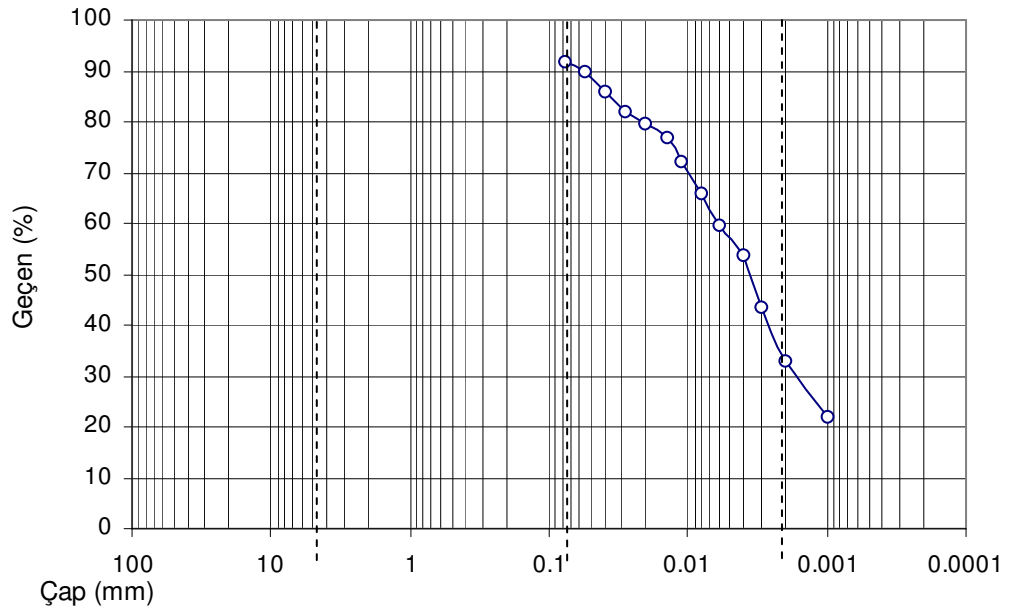
Şekil 3.13. Kayapınar Kili'nin dane dağılım eğrisi

3.2.2. Havuzlubahçe Silti

Adana'nın Havuzlubahçe semti civarından alınan siltli zeminin endeks özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Hidrometre deneyi sonucunda, Şekil 3.14'te görülen, dane dağılım eğrisi çıkarılmıştır (TSE, 1900/1500). Buna göre deneye tabi tutulan toplam numune ağırlığına göre, kil danelerinin oranı %32,8, silt danelerinin oranı %67,2 olarak belirlenmiştir. Deneylerde standart kompaksiyon ile hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Bu amaçla, zeminin kompaksiyon eğrisi Şekil 3.15'te gösterildiği gibi çizilmiş ve numuneler buna göre, optimum su içeriğinde, hazırlanmıştır. Numuneler, proktor kalıbı içinden, özel yaptırılan ve konsolidasyon ringine uygun, numune alıcı tüp ile alınmıştır. Daha sonra numuneler, kapiler olarak doymun hale getirmek için, desikatör içine konulmuştur. Numune alıcı tüpün alt kısmı bir bez parçası ile sarılmıştır. Desikatör içine, numune alıcı tüpün yarı seviyesine gelecek kadar, saf su ilave edilmiştir. Desikatörün kapağı kapatıldıktan sonra, birkaç gün beklenmiş ve üst kapaktan vakum uygulanmıştır. Numunenin üst kısmından su çıkışı görüldüğünde numunenin doymun olduğu varsayılmıştır.

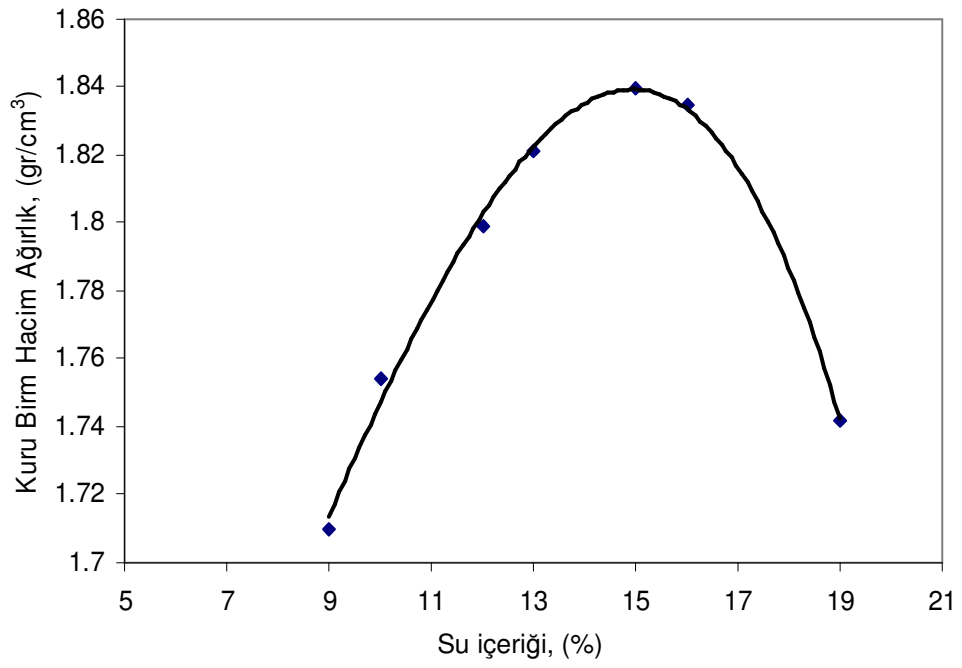
Çizelge 3.2. Havuzlubahçe Silti'nin endeks özellikleri

Likit Limit (L_L)	32 %
Plastik Limit (P_L)	11 %
Plastisite İndeksi (I_P)	21 %
200 nolu elekten geçen (%)	91
Dane Birim Hacim Ağırlığı (γ_s)	2,66 gr/cm ³
Renk	Gri
Grup Sembolü	CL



Kaba Daneli Zemin		İnce Daneli Zemin	
Çakıl	Kum	Silt	Kil

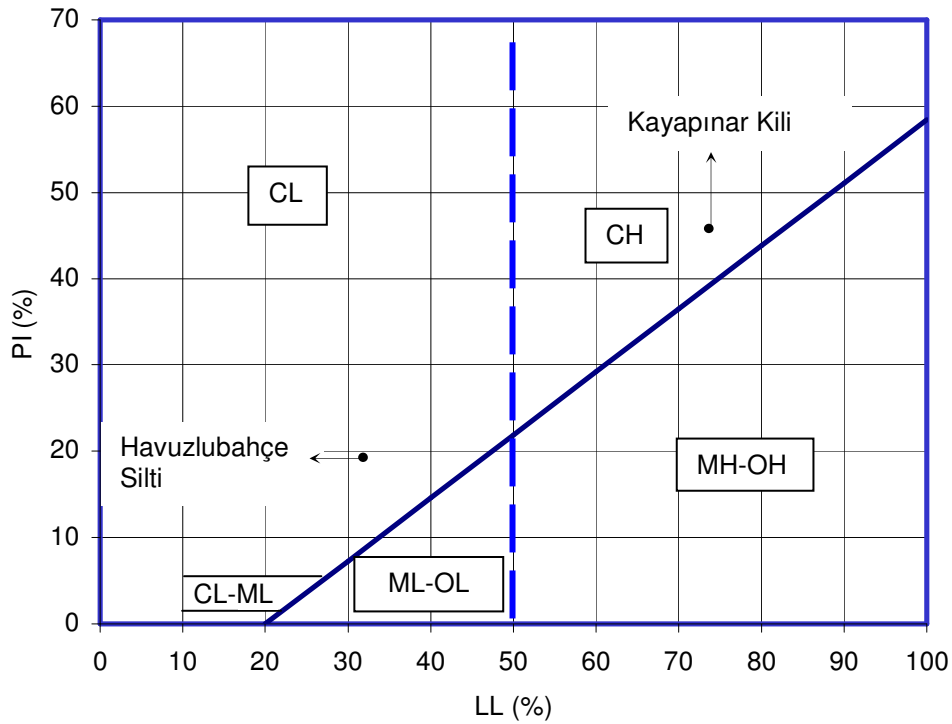
Şekil 3.14. Havuzlubahçe Silti'nin dane dağılım eğrisi



Şekil 3.15. Havuzlubahçe Silti'nin kompaksiyon eğrisi

3.2.3. Kullanılan Numunelerin Sınıflandırılması

Numuneler, Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemine göre sınıflandırılmıştır. Bu sistemde ince daneli zeminlerin sınıflandırılması için, Casagrande Plastisite Kartı kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan zemin numuneleri, ince daneli olduğu için bu kart hazırlanmış ve Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Plastisite kartı

3.3. Deneylerde İzlenen Yol

Deneylerden önce, zemin numunesinin altına konulan seramik poroz taşın doygun olup olmadığının tespiti, su içeriğinin değişiminin ölçülmesi açısından, oldukça önemlidir. Bu nedenle daha önceden bahsedildiği gibi, seramik disk, üzerine basınçlı su uygulayarak doyurulmuştur. Kompaksiyonla ve kalıplanarak hazırlanan numunelerin, deney başındaki matrik emme basınçlarının durumunun bilinmesi için, başlangıçta numuneler doyurulmuştur. Kalıplanarak hazırlanan numuneler, bulamaç halinde hazırlandığı için, zaten doygun durumdadır. Kompaksiyon ile hazırlanan

numuneler ise, desikatör içinde kapiler olarak doyurulmuştur. Bu durumda numunelerin deney başı matrik emme basınçları sıfır olarak kabul edilmektedir.

Ödometre hücresinin alt kısmında oluşturulan su odacığında hava bulunup, bulunmadığı deney başında kontrol edilmiştir. Bunun için; sabit basınç sağlayan alet ile, bu odacığa basınçlı su uygulayarak, boşluk suyu hacim ölçme hattından birkaç defa su geçirilmiştir. Deneyin kurulum ve takip aşamaları aşağıda, maddeler halinde verilmiştir:

1. Deneylerin başında sözü edilen hazırlıklar yapıldıktan sonra, numuneler tüpten dikkatli bir şekilde, özel yapılmış ödometre ringi içine alınmıştır.
2. Numunelerin ringe konulmadan önce, ağırlıkları hassas bir şekilde tartılmıştır.
3. Ödometre ringi, hücre alt tabanı üzerindeki yerine monte edilmiştir. Böylece zemin numunesi, yüksek hava giriş değerine sahip, seramik diskin üzerine oturtulmuştur
4. Hücre üst başlığı monte edilerek, ödometre hücresinin kurulması tamamlanmıştır.
5. Bilgisayar ve diğer kablo bağlantıları yapıldıktan sonra hacim ölçer, düşey deformasyon ölçer, düşey yük ölçer ve yanal basınç ölçer sıfırlanmıştır.
6. Hava basıncı, istenilen matrik emme değerine göre, hücre üst başlığından içeri uygulanmış ve bu arada düşey gerilme de uygulanmıştır.
7. Numune içinden çıkan su miktarının ölçülmesi için, taban kısmındaki drenaj vanası açılarak, suyun hacim ölçerden geçmesi sağlanmıştır.
8. Seramik diskin, her ne kadar havayı geçirmediği söylene de, bir miktar hava, sızma yoluyla su odacığına geçer. Sızan havanın ölçülmesi için, günde iki kez hacim ölçer, by-pass konumuna getirilerek, su odacığındaki havanın DAVI'ye girmesi sağlanmıştır.

Deney süresince; zemin numunelerine ait düşey çökmeler, numune içindeki hava basıncı, düşey yük, yanal basınçlar, boşluk suyu hacim değişimi ve boşluk suyu basıncı gibi, 6 farklı parametre ölçülmüştür. Her bir yükleme kademesi, oturmalar tamamlanıp matrik emme dengesi sağlanıncaya kadar devam ettirilmiştir. Matrik emme dengesi, zemin içinden çıkan su miktarı ile kontrol edilmiştir. Söz konusu bu kontrol, bilgisayar ekranı vasıtası ile izlenmiştir. Çıkan su miktarı sabit bir değere erişince, matrik emmenin dengeye geldiğine karar verilmiştir. Yanal basınç okumaları, matrik emme dengesi sağlandıktan sonra yapılmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, deneylerden elde edilen bulgular sunulmuş ve gözlenen ilişkiler tartışılmıştır.

4.1. Deney Sonuçları

Zemin numuneleri üzerinde hem doygun hem de farklı matrik emme basınçları altında, konsolidasyon deneyleri ile yanal basınçlar ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Doygun durumda ve matrik emme kontrollü olarak gerçekleştirilen ödometre deney listesi Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu tablonun birinci sütununda zeminin nereden geldiği belirtilmektedir. İkinci sütunda deneylerde kullanılan numunelere kod verilmiştir. Numune kodlarındaki ilk harf numunenin nasıl hazırlandığını göstermektedir (kalıplanmış=K veya sıkıştırılmış=S). İkinci harf ise zeminin içerdiği hakim zemin dane türünün baş harfini (kil=K veya silt=S) ve sonundaki rakam ise deney numarasını göstermektedir. Ödometre deneyleri süresince oturma miktarı, düşey basınç, zemin içinden çıkan su miktarı, boşluk-suyu basıncı, hava basıncı ve yanal basınçlar ölçülmüştür. Ayrıca kaynaklarda verilen bazı denklemler yardımı ile, K_0 değerleri hesaplanarak ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu denklemlerin kullanımı için gerekli olan efektif içsel sürtünme açılarının belirlenmesi amacıyla zemin numuneleri üzerinde, konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli deneyler yapılmıştır. Deneylerde, kalıplanarak hazırlanan killi ve standart kompaksiyon ile hazırlanan siltli zemin numuneleri kullanılmıştır.

4.1.1. Doygun Durumda Konsolidasyon ve Yanal Basınç Ölçüm Sonuçları

Killi ve siltli numuneler üzerinde, doygun koşullarda, yapılan konsolidasyon deneyinden elde edilen veriler Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’de verilmiştir. Boşluk oranı ile düşey basınç arasındaki değişimler ise, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekillere bakıldığında, ön konsolidasyon basıncının etkisi görülmektedir. Boşluk oranı değişimleri, ön konsolidasyon basıncından sonra, artmakta ve eğrilerin eğimleri

dikleşmektedir. Killi zemin için ön konsolidasyon basıncı, yaklaşık olarak, 200 kPa olarak bulunmuştur. Siltli zemin kompaksiyonla hazırlandığı için, konsolidasyon eğrisi daha yatık çıkmıştır.

Çizelge 4.1. Konsolidasyon deney listesi

Numunenin Geldiği Yer	Deney No	Matrik Emme Basıncı ($u_a - u_w$) (kPa)	Net Düşey Gerilme ($\sigma - u_a$) (kPa)
Kayapınar	KK0	0 (Doygun)	50~1000
Kayapınar	KK1	50	50~1000
Kayapınar	KK2	100	50~1000
Kayapınar	KK3	200	50~1000
Kayapınar	KK4	300	50~1000
Kayapınar	KK5	500	50~1000
Havuzlubahçe	SS0	0 (Doygun)	50~1000
Havuzlubahçe	SS1	50	50~1000
Havuzlubahçe	SS2	100	50~1000
Havuzlubahçe	SS3	160	50~1000
Havuzlubahçe	SS4	200	50~1000
Havuzlubahçe	SS5	300	50~1000

Her yükleme kademesi sonunda, ölçülen yanıl basınç değeri Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.3-Şekil 4.6'da ölçülen yanıl basınç ve K_o değeri nin uygulanan düşey basınç ile değişimleri görülmektedir. Çizelgeler ve şekiller incelendiğinde, ölçülen yanıl basınç ile uygulanan düşey basınç arasında lineere yakın bir ilişki olduğu görülmektedir. Düşük yüklemelerde ölçülen K_o 'ın daha büyük değeri aldığı ve yükleme arttıkça, bir sabite yaklaştığı gözlenmiştir. Bu davranışın ön konsolidasyon basıncından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kayapınar Kili için K_o , 0.74 ile 0.68 arasında değeri alırken, Havuzlubahçe Silti için 0.71 ile 0.42 arasında değeri bulunmuştur. Genel olarak K_o , yanıl basınç ile düşey basınç arasındaki ilişkinin eğimi olarak alınır sa, Kayapınar Kili için 0.677, Havuzlubahçe Silti için 0.427 yaklaşık değeri kullanılabilir.

Çizelge 4.2. Kayapınar Kili'nin doymun durumdaki konsolidasyon verileri

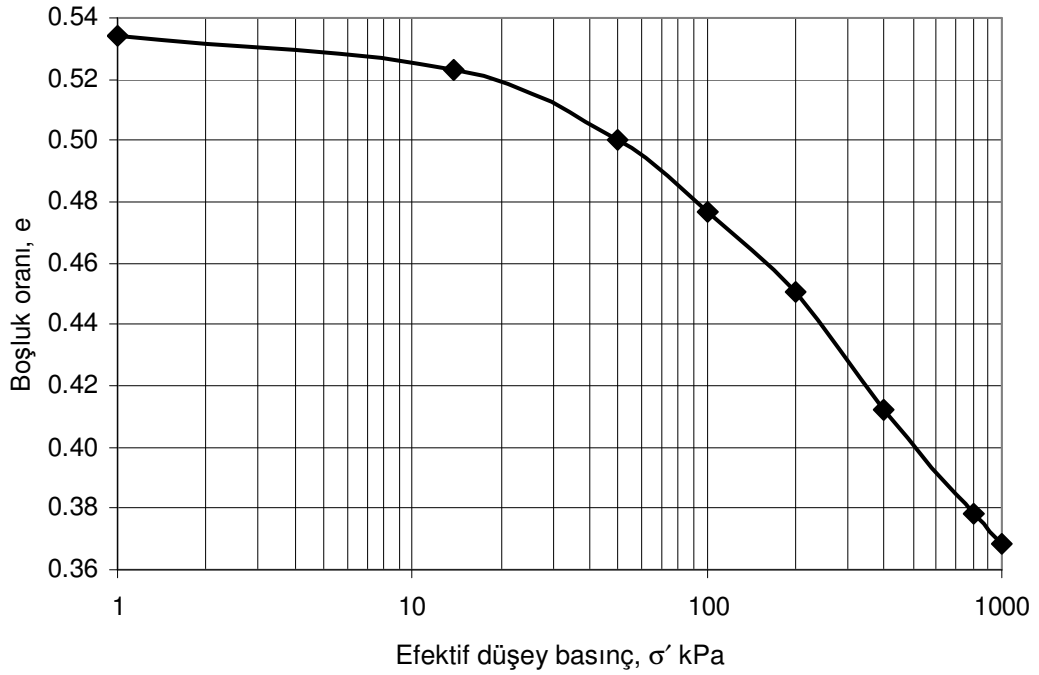
Numune çapı	Numune yükseklği	Deney başı su içeriği	Deney sonu su içeriği	Deney başı numune ağırlığı	
75 mm	49 mm	55 %	39 %	358 gr	
Düşey Gerilme P (kPa)	Oturma (mm)	Oturma Farkı ΔH (mm)	Boşluk. Oranı Değişim Δe cm^3/cm^3	Boşluk Oranı e cm^3/cm^3	Hacimsel Sıkışma Katsayısı m_v (1/kPa)
50	0.729	0.729	0.037	1.443	0.000302
100	1.165	0.436	0.022	1.421	0.000182
200	1.910	0.745	0.038	1.383	0.000158
400	6.434	4.524	0.229	1.154	0.000531
800	11.060	4.626	0.234	0.920	0.000305
1000	12.963	1.903	0.096	0.824	0.000264



Şekil 4.1. Kayapınar Kili'nin doymun durumdaki konsolidasyon eğrisi

Çizelge 4.3. Havuzlubahçe Silti'nin doymun durumdaki konsolidasyon verileri

Numune çapı	Numune yüksekliği	Deney başı su içeriği	Deney sonu su içeriği	Deney başı numune ağırlığı	
75 mm	49 mm	21 %	17 %	443 gr	
Düşey Gerilme P (kPa)	Oturma (mm)	Oturma Farkı ΔH (mm)	Boşluk. Oranı Değişim Δe cm^3/cm^3	Boşluk Oranı e cm^3/cm^3	Hacimsel Sıkışma Katsayısı m_v (1/kPa)
50	1.09	0.73	0.0228	0.5002	0.000304
100	1.84	0.75	0.0236	0.4766	0.000320
200	2.66	0.82	0.0257	0.4508	0.000177
400	3.89	1.23	0.0385	0.4123	0.000136
800	4.98	1.09	0.0341	0.3783	0.000062
1000	5.29	0.31	0.0096	0.3687	0.000035



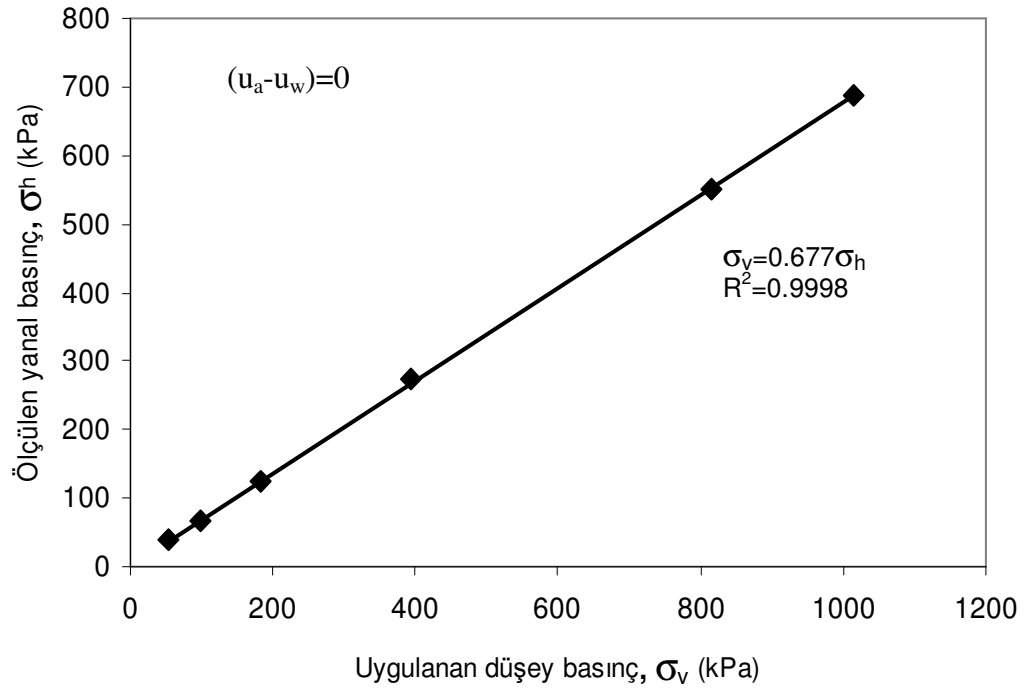
Şekil 4.2. Havuzlubahçe Silti'nin doymun durumdaki konsolidasyon eğrisi

Çizelge 4.4. Kayapınar Kili'nin doygun durumda ölçülen yanıl basınç değlerleri

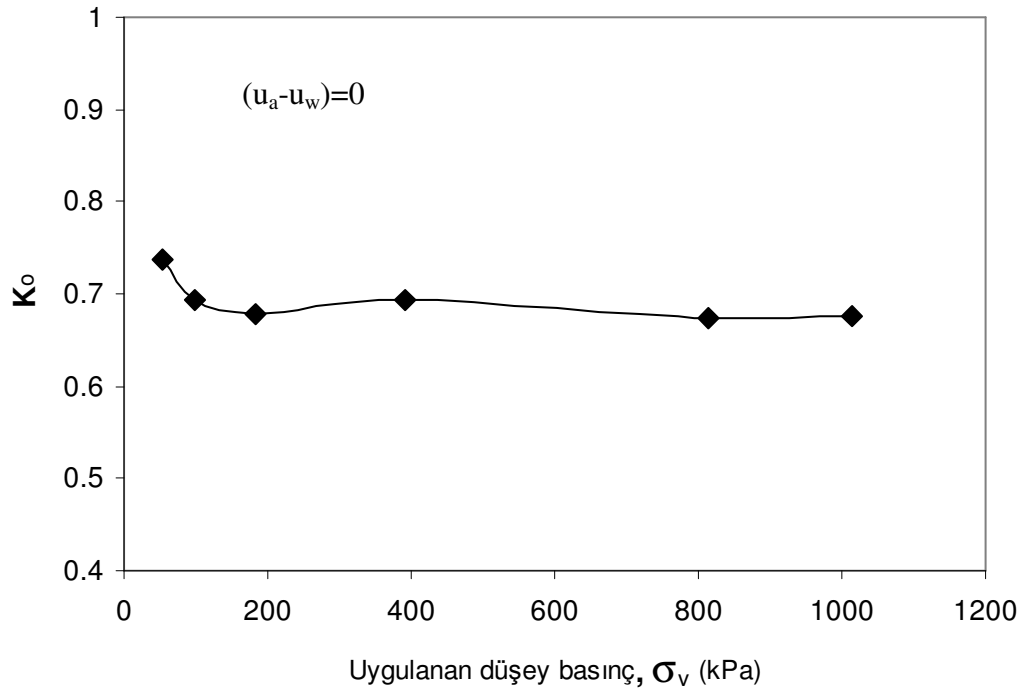
Numune Yüksekliğı		Boşluk oranı		
Başlangıç	Deney Sonu	Başlangıç	Deney Sonu	
49 mm	36.04 mm	1.48 cm ³ /cm ³	0.82 cm ³ /cm ³	
Yükleme Tipi	Boşluk Oranı e	Uygulanan Düşey Gerilme σ'_v (kPa)	Ölçülen Yatay Gerilme σ'_h (kPa)	K ₀
Bakir Yükleme	1.443	50	36.85	0.737
“	1.421	100	69.4	0.694
“	1.383	200	135.4	0.677
“	1.154	400	277.2	0.693
“	0.920	800	539.2	0.674
“	0.824	1000	676	0.676

Çizelge 4.5. Havuzlubahçe Silti'nin doymun durumda ölçülen yanal basınç değerleri

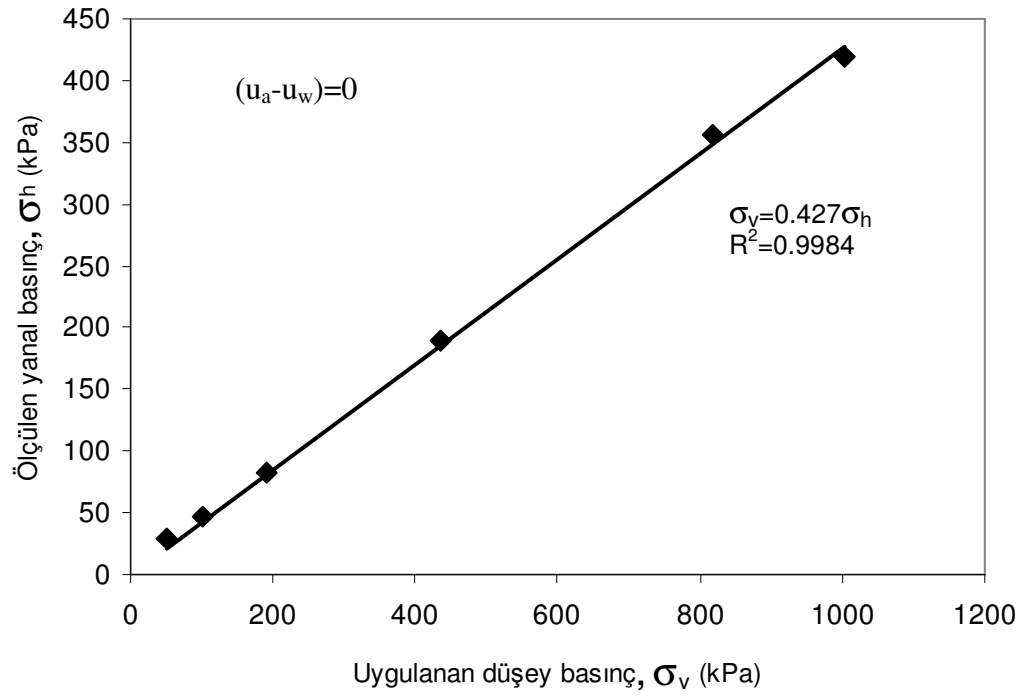
Numune Yüksekliği		Boşluk oranı		
Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	
49 mm	43.71 mm	0.53 cm ³ /cm ³	0.369 cm ³ /cm ³	
Yükleme Tipi	Boşluk Oranı e	Uygulanan Düşey Gerilme σ'_v (kPa)	Ölçülen Yatay Gerilme σ'_h (kPa)	K ₀
Bakir Yüklemeye	0.50	50	28.9	0.578
“	0.476	100	47	0.470
“	0.451	200	85.4	0.427
“	0.412	400	173.6	0.434
“	0.378	800	348.8	0.436
“	0.369	1000	418	0.418



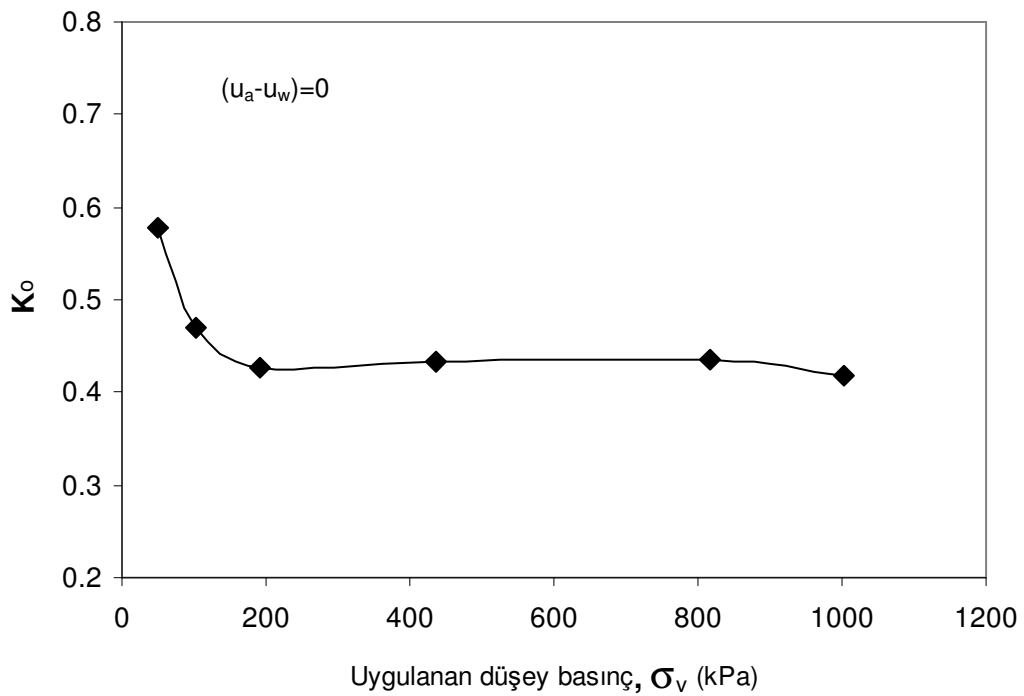
Şekil 4.3. Kayapınar Kili'nin doymun durumda ölçülen yanal basıncın uygulanan düşey basınç ile değişimi



Şekil 4.4. Kayapınar Kili'nin doymun durumda ölçülen K_o değerlerinin uygulanan düşey basınç ile değişimi



Şekil 4.5. Havuzlubahçe Silti'nin doymun durumdı ölçülen yanıl basınç değėrlėrėnėn uygulanan düşey basınç ılı değėşėmė



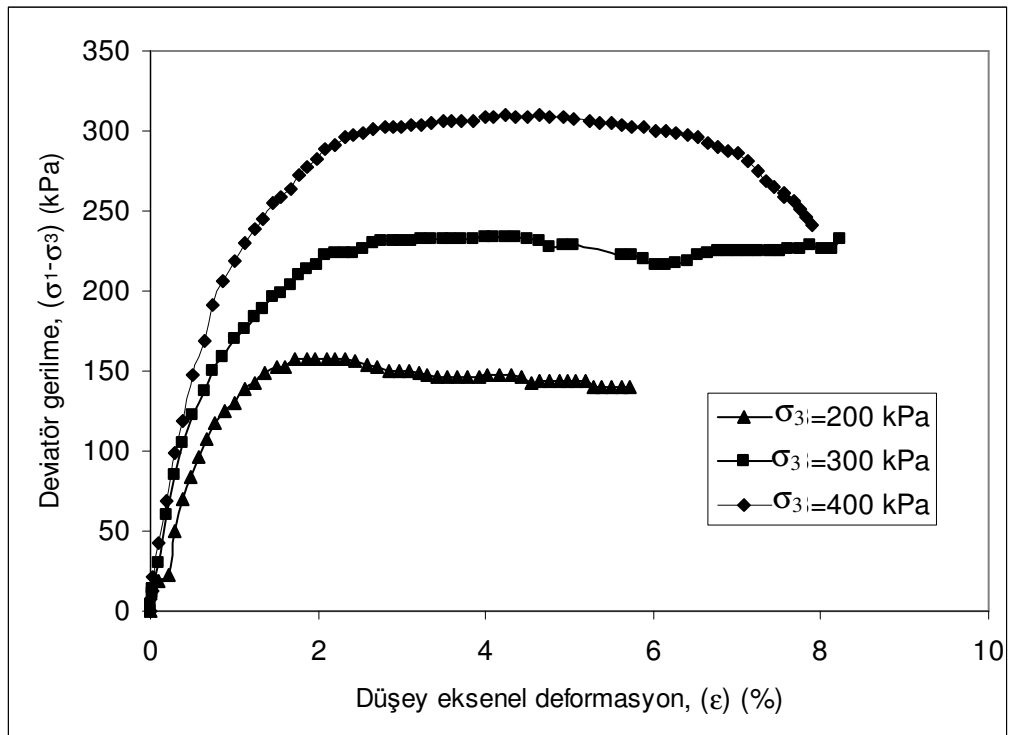
Şekil 4.6. Havuzlubahçe Silti'nin doymun durumdı ölçülen K_o basınç uygulanan düşey basınç ılı değėşėmė

4.1.2. Konsolidasyonlu Drenajlı Üç Eksenli Deneyler

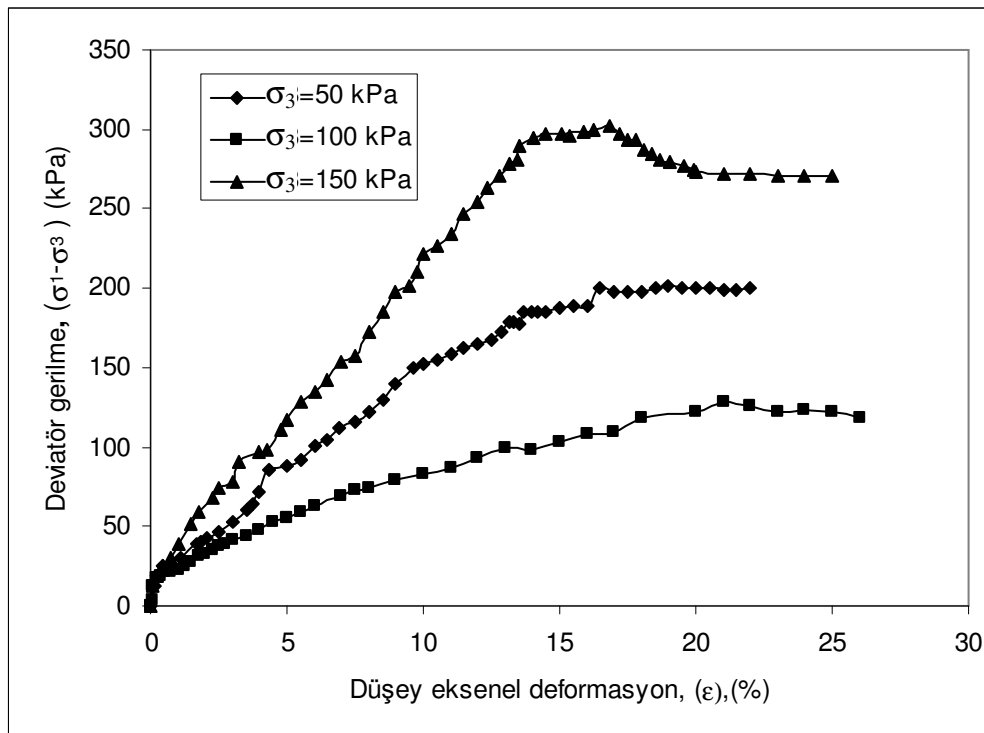
Çalışmada kullanılan numunelerin efektif içsel sürtünme açısı, ϕ' değerlerini belirlemek için, konsolidasyonlu ve drenajlı (CD) koşullarda, üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir. Kalıplanarak hazırlanan Kayapınar Kili, likit limit değerinin 1.5 katı su içeriğinde, bulamaç (slurry) halinde ve homojen bir şekilde hazırlandığı için doygun durumdadır. Bu nedenle numuneleri, üç eksenli deney aletinin hücresi içinde, doyurmaya gerek kalmamıştır. Standart kompaksiyon ile hazırlanan Havuzlubahçe silti ise, üç eksenli hücresi içinde, üstten geri basınç (back pressure) uygulayarak doyurulmuştur.

Numuneler önceden belirlenen bir hücre basıncı altında konsolidasyona bırakılmıştır. Hacim değişimleri, zeminin oturduğu taban kısımdaki drenaj vanasına bağlı, elektronik hacim ölçer (volume change transducer) vasıtasıyla ölçülmüştür. Yükleme esnasında, boşluk suyu basıncı oluşmaması için, yükleme hızı 0.004 mm/dak gibi küçük bir değer seçilmiştir.

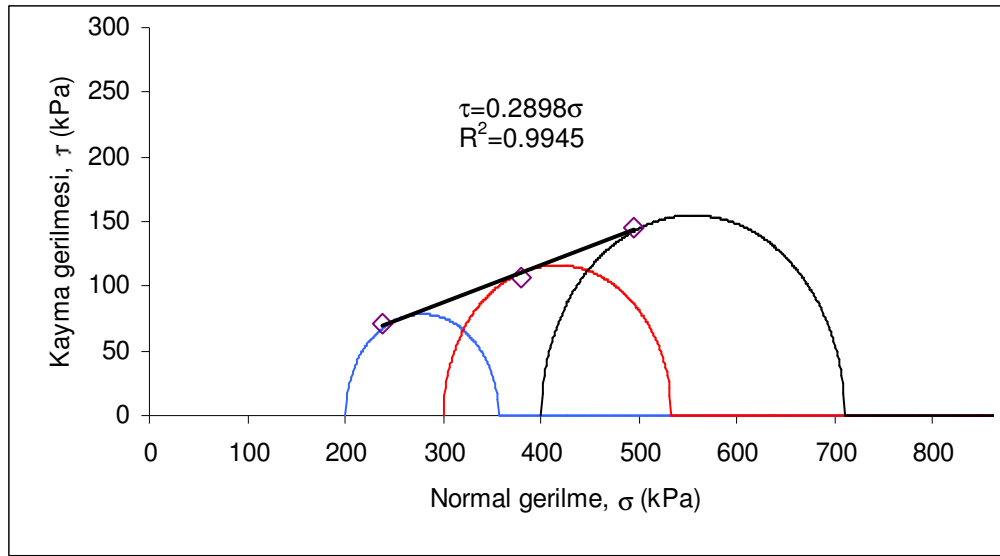
Şekil 4.7 ve Şekil 4.8, deneylerden elde edilen, eksenel deformasyon-deviator gerilme arasındaki ilişkileri göstermektedir. Tipik davranışların gözlendiği bu şekillerde, killi numuneler için, gerilme deformasyon eğrileri başlangıçta, siltli numunelere göre daha dik bir açıyla yörünge izlerken, siltli numunelerde daha yatık bir davranış göstermiştir. Her iki numunenin eğrileri, hücre basıncının etkisiyle, artım göstererek yukarı doğru kaymaktadır. Killi numuneler yaklaşık % 3 deformasyon değerlerinde mukavemetini kaybetmiştir. Siltli numunelerde ise eksenel yük 20 mm'lik deformasyon değerine kadar bir artış göstermektedir. Deformasyonlar, numune boyunun % 20 değerine ulaştığı durumda mukavemetin bittiği kabul edilmektedir. İçsel sürtünme açılarının belirlenmesi için oluşturulan Mohr daireleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Beklenildiği gibi, hücre basıncının artması ile, dairelerin çapları büyüyerek sağa doğru kaymaktadır. Killi bir zemin olduğu için, Kayapınar Kilinin'in ϕ' değeri 16° ve dane çapı daha büyük olan Havuzlubahçe Siltinin ϕ' değeri 28° derece olarak bulunmuştur.



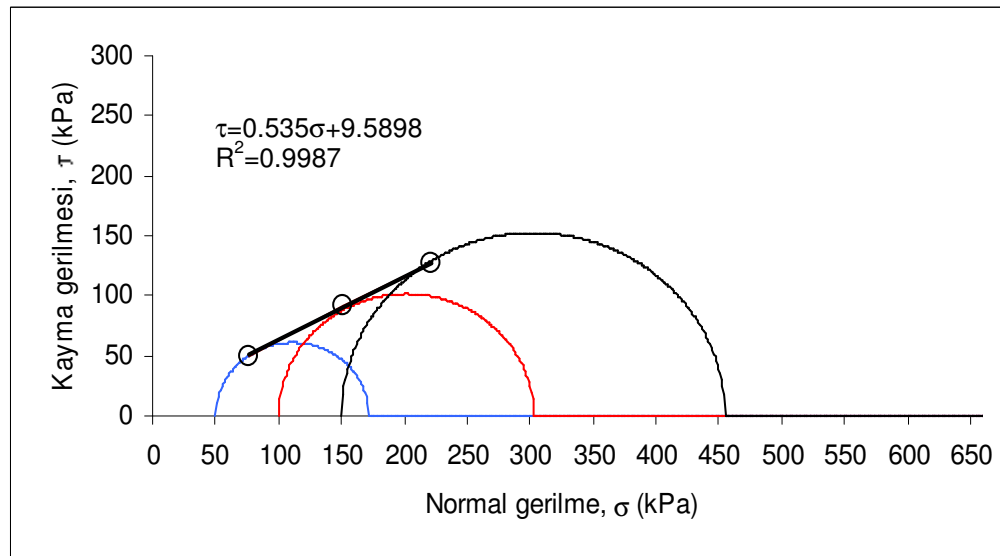
Şekil 4.7. Kayapınar Kili üzerinde yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen gerilme-deformasyon ilişkileri



Şekil 4.8. Havuzlubahçe Silti üzerinde yapılan üç eksenli deney sonucunda elde edilen gerilme deformasyon ilişkileri



Şekil 4.9. Kayapınar Kili'ne ait Mohr daireleri



Şekil 4.10. Havuzlubahçe Silti'ne ait Mohr daireleri

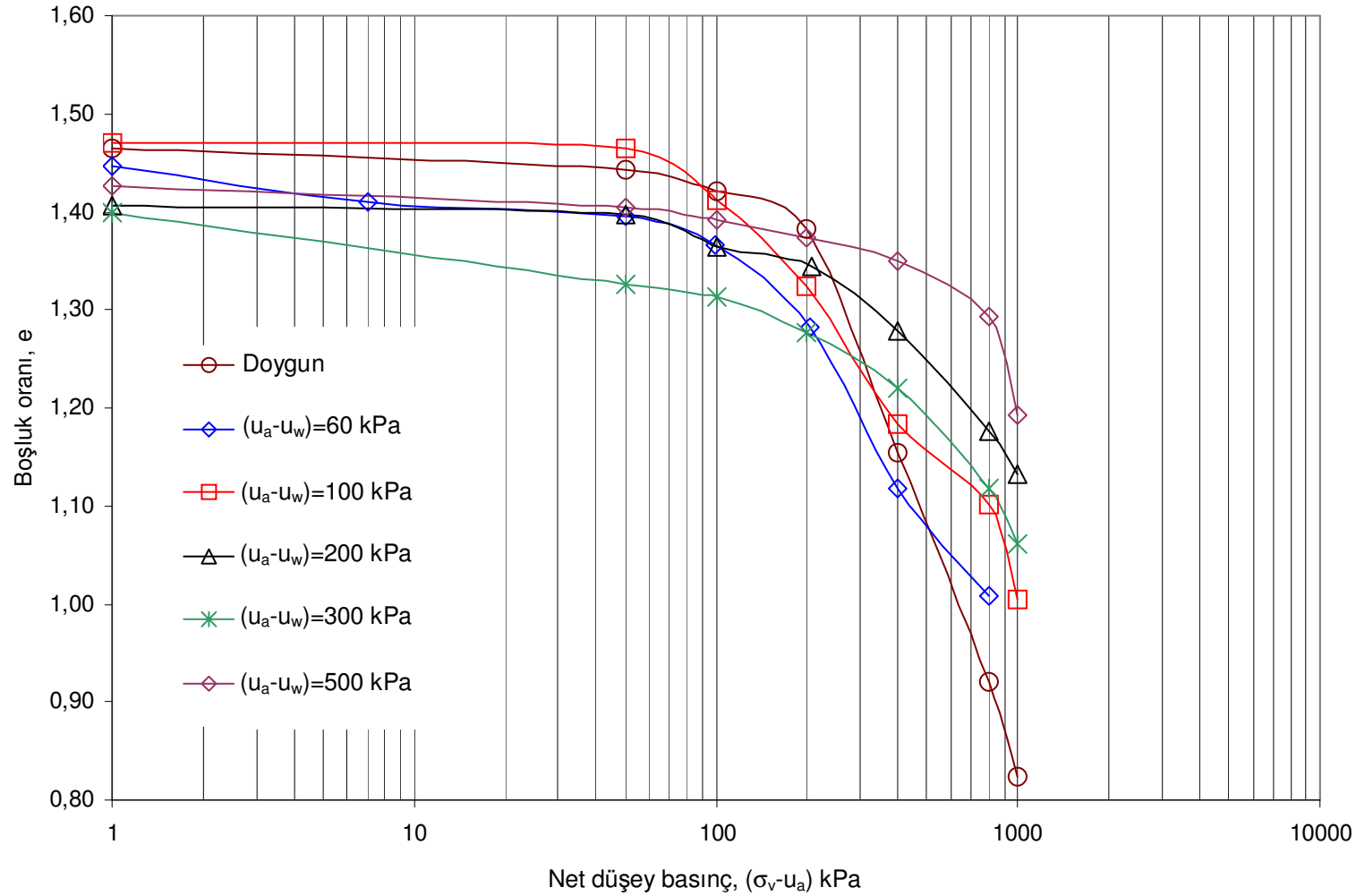
4.1.3. Doymamış Durumda Kayapınar Kili'ne Ait Ölçümler

Doymamış koşullarda yapılan deneylerde, matrik emme basınçları sabit tutulmuş ve düşey yüklemeler kademeli olarak artırılarak, yanal basınçlar ölçülmüştür. Yanal basınç ölçümleri, oturmalar ve su çıkışı sona erdiğinde alınmıştır. Bu deneylerde matrik emme değerleri 60 kPa-500 kPa arasında seçilmiştir. Çizelge 4.6'da 60 kPa matrik emme basıncı altında elde edilen konsolidasyon verileri sunulmuştur. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de, bu deneylerden elde edilen, boşluk oranı-efektif gerilme değişimleri görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi matrik emme basıncı artığında, zemin numuneleri daha az sıkışma göstermektedir. Aynı düşey basınç ve artan matrik emme basıncı altında, zemin numuneleri daha büyük boşluk oranına sahip olmaktadır. Bu davranış; matrik emme basıncının, zemin numunesine, ilave bir dayanım sağlamasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, doygun koşulda elde edilen konsolidasyon eğrilerine benzer şekilde eğriler edilmiştir. Burada da boşluk oranı değişimleri, belli bir düşey basınç değerinden sonra artmakta ve eğriler dikleşmektedir. Bu davranış ön konsolidasyon ve matrik emme basıncından kaynaklanmaktadır.

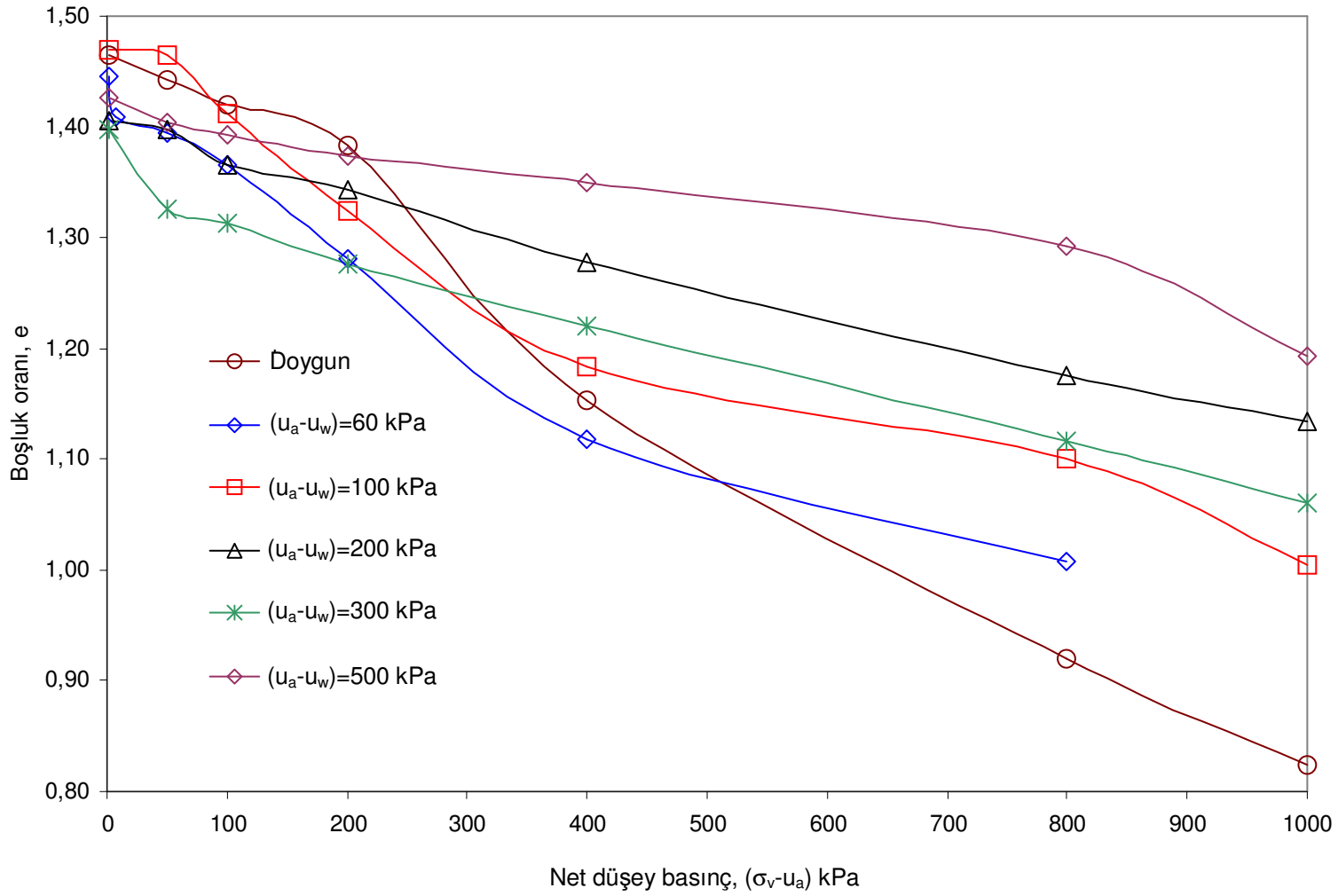
Sabit matrik emme ve artan düşey basınç altında ölçülen yanal gerilme ve K_0 değerlerinin, uygulanan düşey basınç ile değişimleri Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de verilmiştir. Doygun durumdakine benzer şekilde yanal basınç, uygulanan düşey basınç ile, yaklaşık lineer değişmektedir. Küçük düşey basınçlarda bir miktar sapmalar görülmekte ve buralarda K_0 daha büyük değerler almaktadır. Sabit matrik emme basıncı altındaki zemin numuneleri, küçük düşey basınçlarda, daha büyük S_r (Doygunluk derecesi) değerine sahip olduğu için bu davranış gözlenmektedir. Yine bu şekillerden görüldüğü gibi; matrik emme artıkça, aynı düşey basınç altında, zeminin uyguladığı yanal gerilme değerleri düşmekte ve K_0 değerleri azalmaktadır. K_0 değerinin düşmesi, matrik emme artıkça zemin numunesi daha rijit bir yapı kazanarak, basınç iletimini etkilemesinden kaynaklanmaktadır. 60 kPa'lık matrik emme basıncında K_0 değeri yaklaşık olarak 0.65 iken, 500 kPa matrik emme basıncında bu değer 0.40 civarına düşmektedir.

Çizelge 4.6. Kayapınar Kili'nin 60 kPa matrik emme basıncı altında yapılan konsolidasyon deneyinin verileri

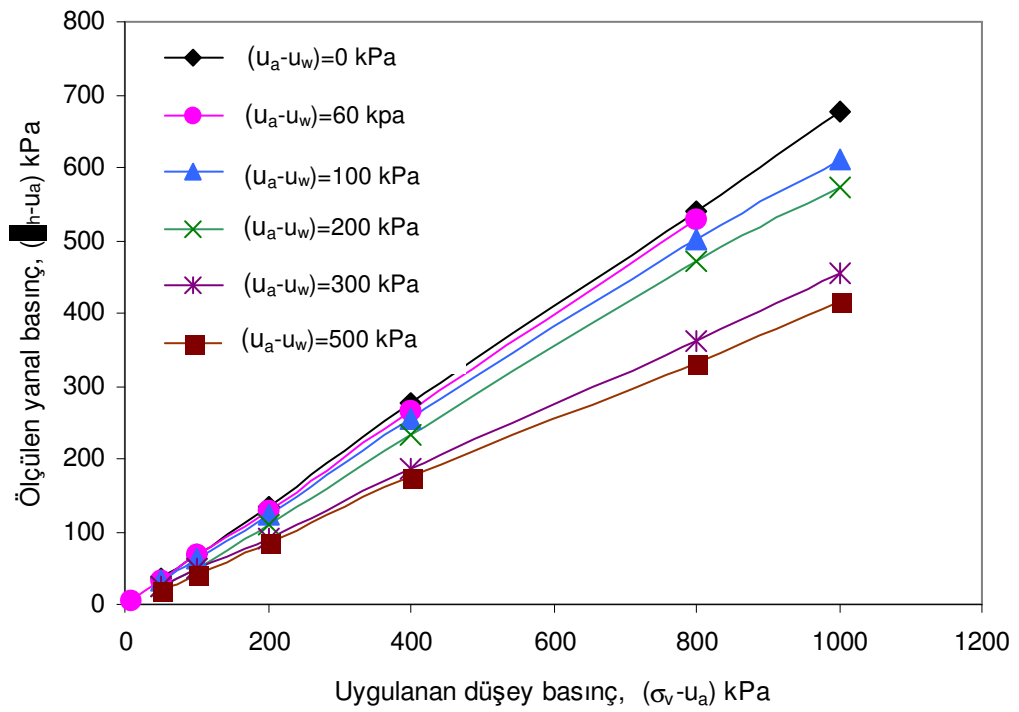
Numune çapı	Numune yüksekliği	Deney başı su içeriği	Deney başı numune ağırlığı	
75 mm	49 mm	54 %	352 gr	
Düşey basınç P (kPa)	Boşluk oranı e cm^3/cm^3	Doygunluk derecesi S_r cm^3/cm^3	Su içeriği w gr/gr	Sükunetteki Yanal basınç katsayısı K_o kPa/kPa
50	1.395	0.934	0.489	0.670
100	1.366	0.939	0.484	0.678
200	1.282	0.949	0.461	0.648
400	1.118	0.950	0.406	0.667
800	1.008	0.954	0.371	0.659



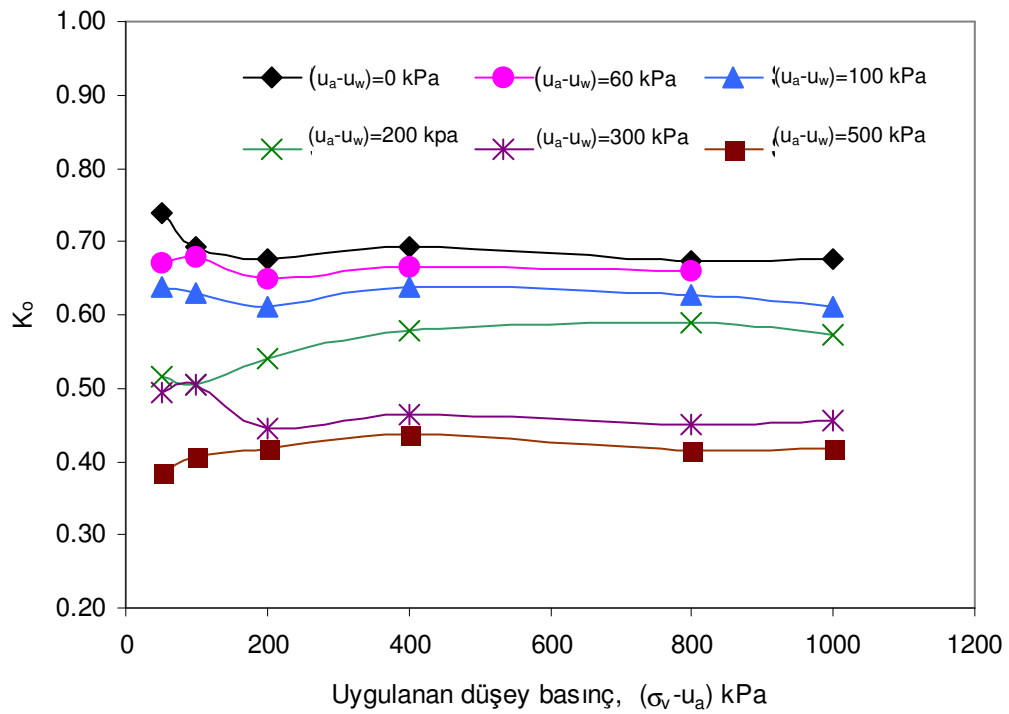
Şekil 4.11. Kayapınar Kili'nin değişik matrik emme basınçları altında yarı logaritmik ölçekte konsolidasyon eğrileri



Şekil 4.12. Kayapınar Kili'nin değişik matrik emme basınçları altında doğal ölçek ile çizilen konsolidasyon eğrileri



Şekil 4.13. Kayapınar Kili'nin farklı matrik emme basınçları altında ölçülen yanıl basınçlarının uygulanan düşey basınç ile değişimleri



Şekil 4.14. Kayapınar Kili'nin farklı matrik emme basınçları altında ölçülen K_0 değerleri ile uygulanan düşey basınç ile değişimleri

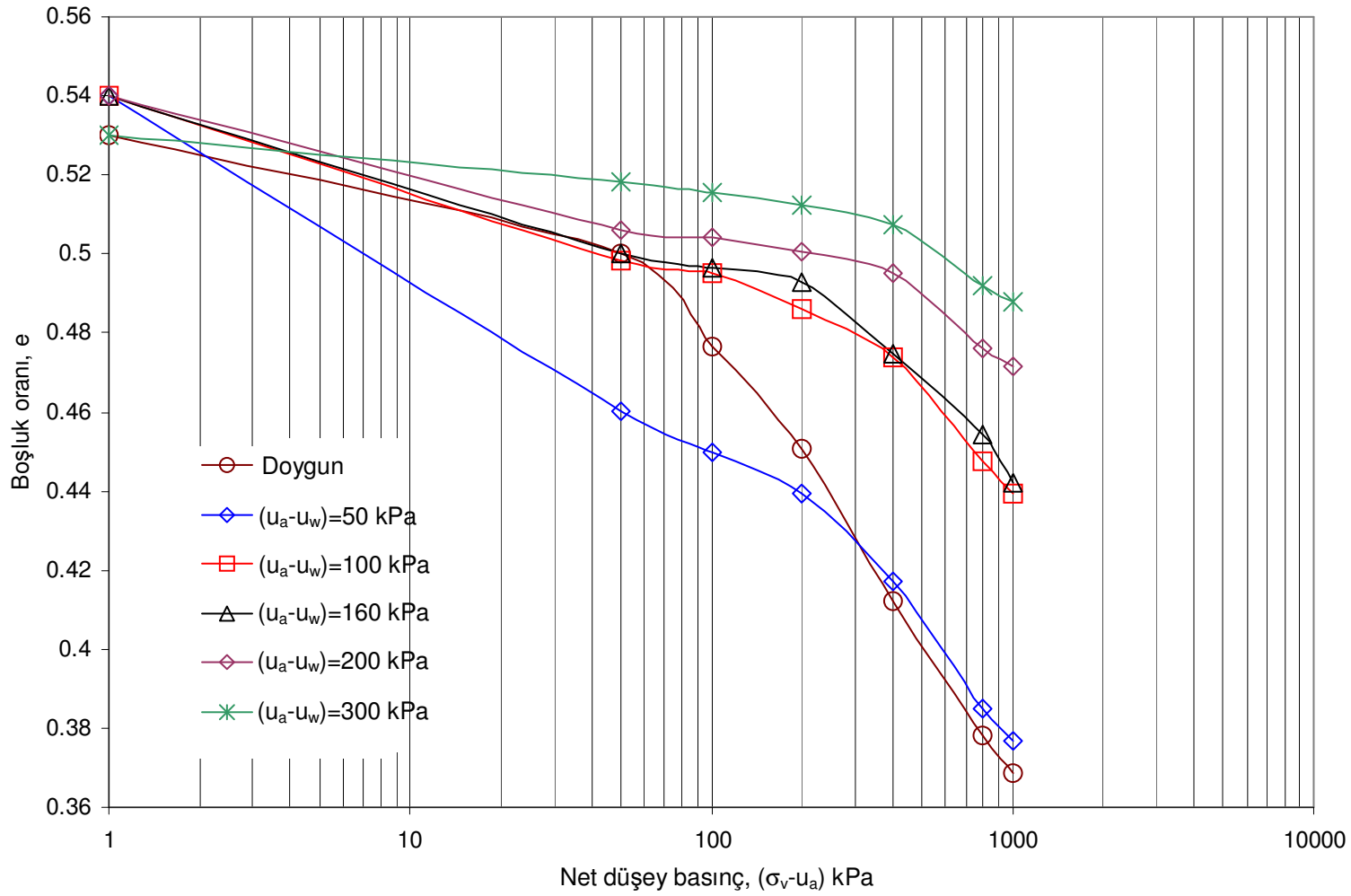
4.1.4. Doymamış Durumda Havuzlubahçe Silti'ne Ait Ölçümler

Standart kompaksiyon deneyi ile hazırlanan siltli zemin numunelerine, killi numunelere uygulanan deney işlemleri uygulanmıştır. Bu numuneler, başlangıçta doygun olmadığı için, desikatör içinde kapiler yolla doyurulmuştur. Bu amaçla zemin numuneleri, kompaksiyon kalıbından konsolidasyon hücresine, uygun bir tüple alınmış ve alt tarafı bir bezle kapatılarak su dolu desikatör içine konulmuştur. Desikatörün üst kısmındaki vanadan vakum uygulayarak, numunelerin suya doyması sağlanmış ve zemin üst yüzeyinden su çıkışı gözlemlendiğinde, doygun olduğuna karar verilmiştir. Zeminin deney başında doyurulması, başlangıçta matrik emmenin sıfırlanması açısından önemlidir. Zemin numuneleri doyurulduktan sonra konsolidasyon hücresine alınmıştır. Sıkıştırılmış zemin numuneleri üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde, matrik emme basınçları 50~300 kPa aralığında tutulmuştur. Bu deneylerden elde edilen, boşluk oranı-efektif gerilme ilişkisi Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Ayrıca 50 kPa'lık matrik emme basıncı altında yapılan konsolidasyon deney verileri, Çizelge 4.7'de verilmiştir. Siltli zemin numuneleri de, killi numunelere benzer şekilde, daha büyük matrik emme basınçları altında daha düşük sıkışma göstermiştir.

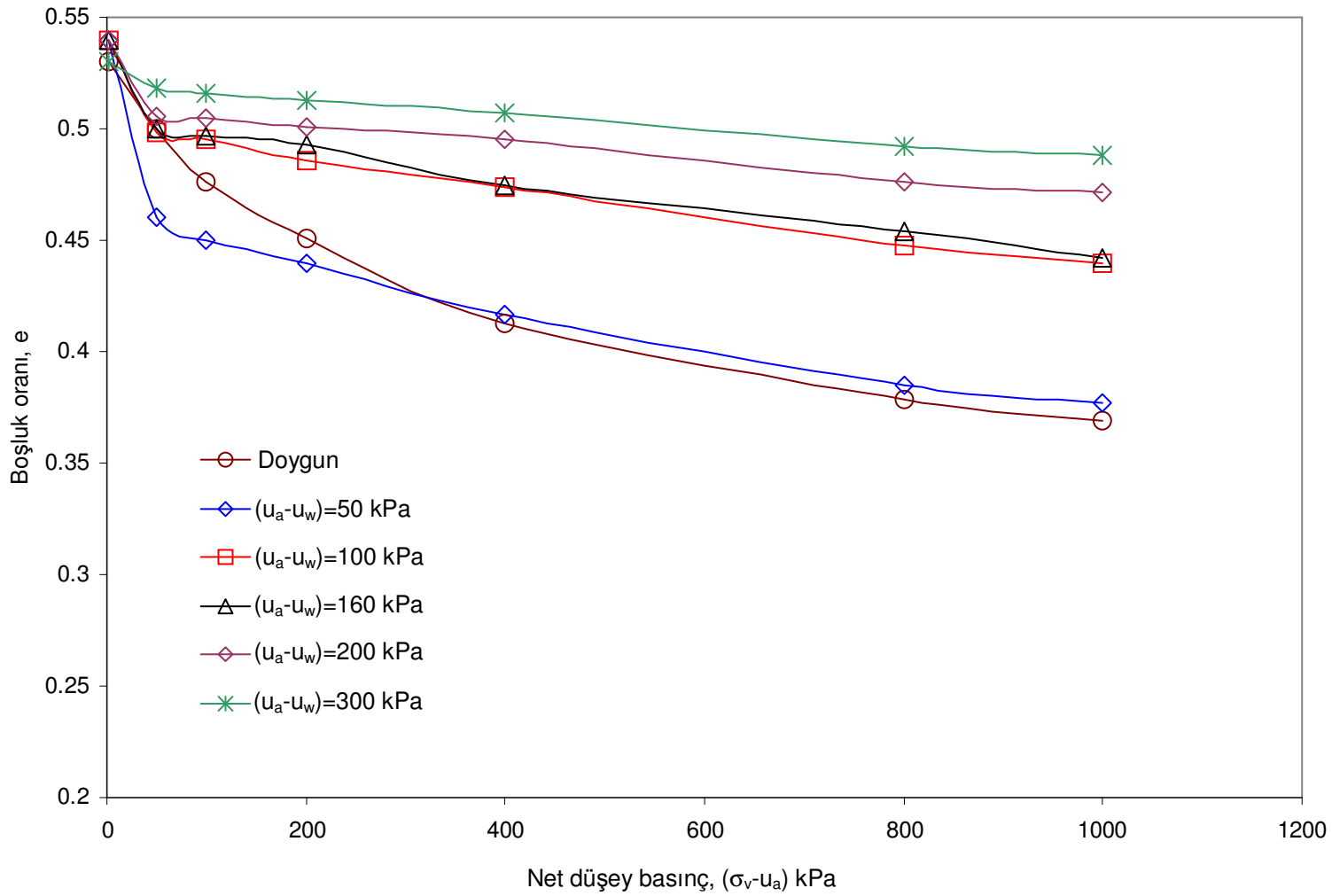
Havuzlubahçe silti için gerçekleştirilen yanal basınç ve K_0 ölçüm sonuçları topluca Şekil 4.17 ve Şekil 4.18' de verilmektedir. Daha önce killi numunelerin deney sonuçlarına benzer şekilde; bu deneylerde de, ölçülen yanal basınçlar ile uygulanan düşey basınçlar arasında, lineere yakın bir ilişki gözlenmiştir. Uygulanan matrik emme ve düşey basınç sınırları içerisinde, Havuzlubahçe silti için K_0 'ın 0.39 ile 0.30 arasında değerler aldığı gözlenmiştir. Küçük matrik emme basıncı altında yapılan konsolidasyon deneylerinde ölçülen K_0 değerleri, yüksek emme basıncı altında ölçülen değerlerden daha büyüktür. Bu davranışın, daha önce belirtildiği gibi, matrik emmenin basınç iletimini etkilemesinden kaynakladığı düşünülmektedir. Hem doygun durumda, hem de doymamış durumda; siltli numunelerin ölçülen K_0 değerlerinin, killi numunelerin K_0 değerlerinden küçük çıktığı gözlenmiştir.

Çizelge 4.7. Havuzlubahçe Silti'nin 50 kpa matrik emme basıncı altında yapılan konsolidasyon deneyinin verileri

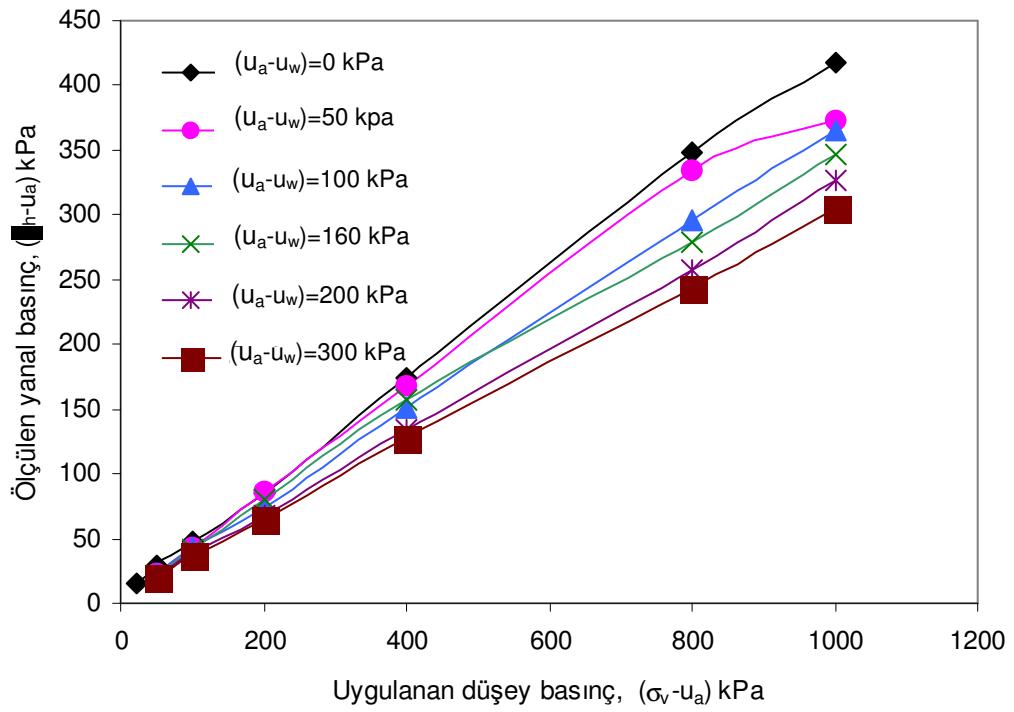
Numune çapı	Numune yüksekliği	Deney başı su içeriği	Deney başı numune ağırlığı	
75 mm	49 mm	21 %	457 gr	
Düşey basınç	Boşluk oranı	Doygunluk derecesi	Su içeriği	Sükunetteki Yanal basınç katsayısı
P	e	S _r	w	K _o
(kPa)	cm ³ /cm ³	cm ³ /cm ³	gr/gr	kPa/kPa
50	0,460	0,154	0,894	0,458
100	0,450	0,149	0,884	0,432
200	0,439	0,146	0,885	0,434
400	0,417	0,140	0,893	0,422
800	0,385	0,133	0,918	0,419
1000	0,376	0,130	0,92	0,373



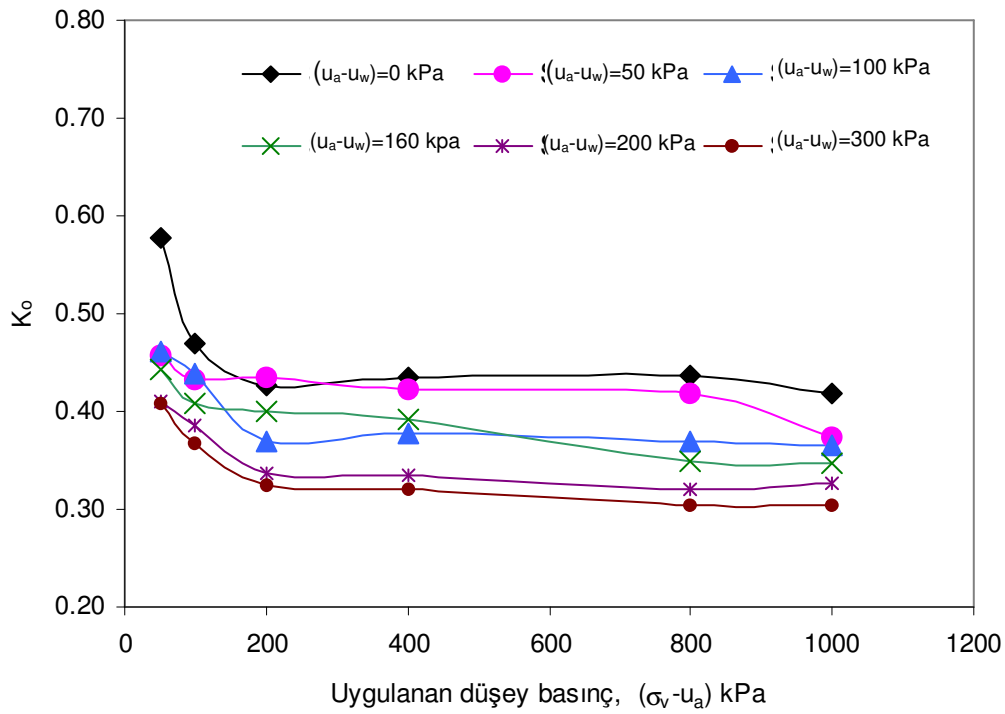
Şekil 4.15. Havuzlubahçe Silti'nin farklı matrik emme basınçları altında, yarı logaritmik ölçekte konsolidasyon eğrile



Şekil 4.16. Havuzlubahçe Silti'nin farklı matrik emme basınçları altında doğal ölçekte çizilen konsolidasyon eğri



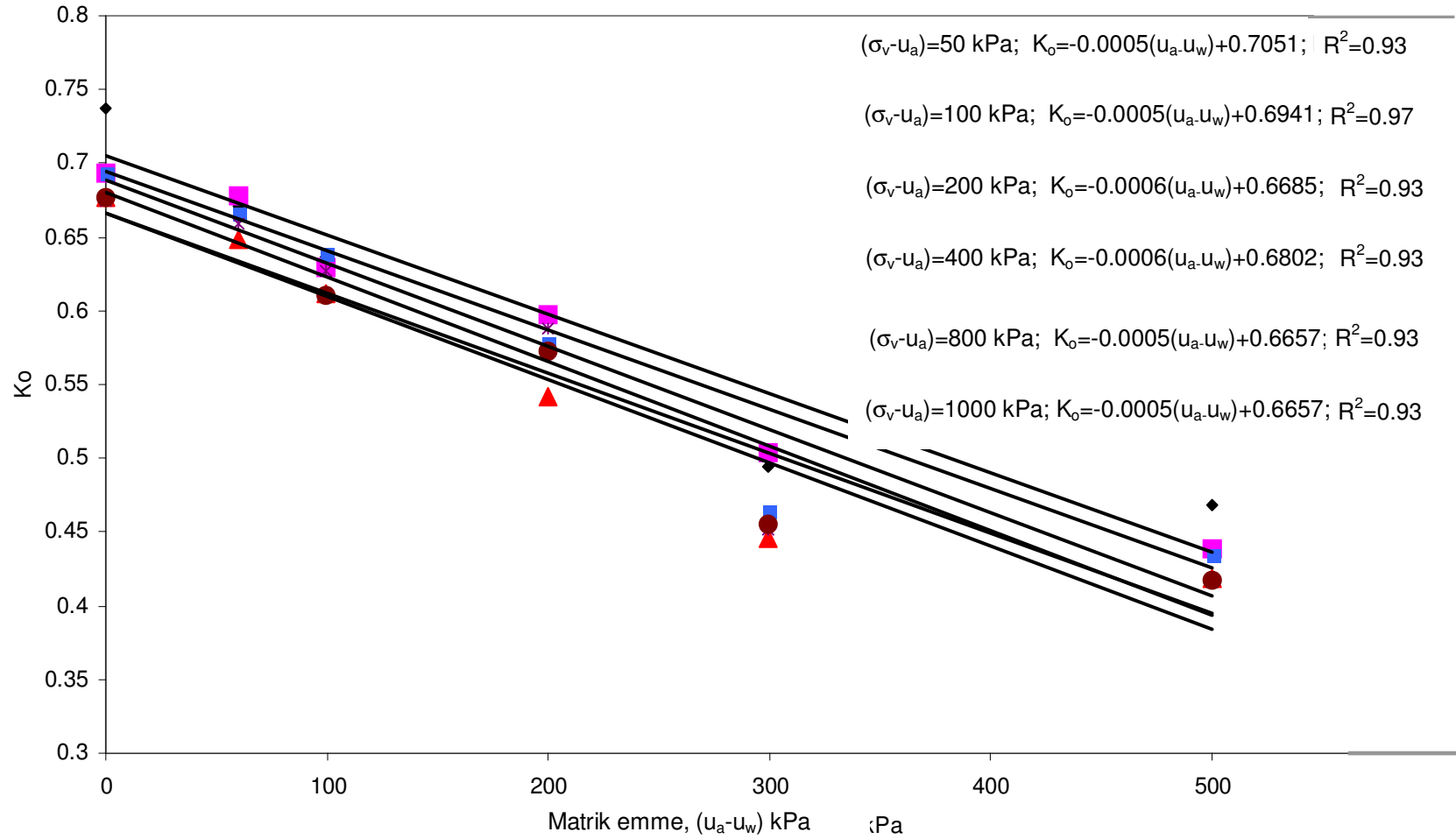
Şekil 4.17. Havuzlubahçe Silti'nin farklı matrik emme basınçları altında ölçülen yanıl basınçlarının karşılaştırılması



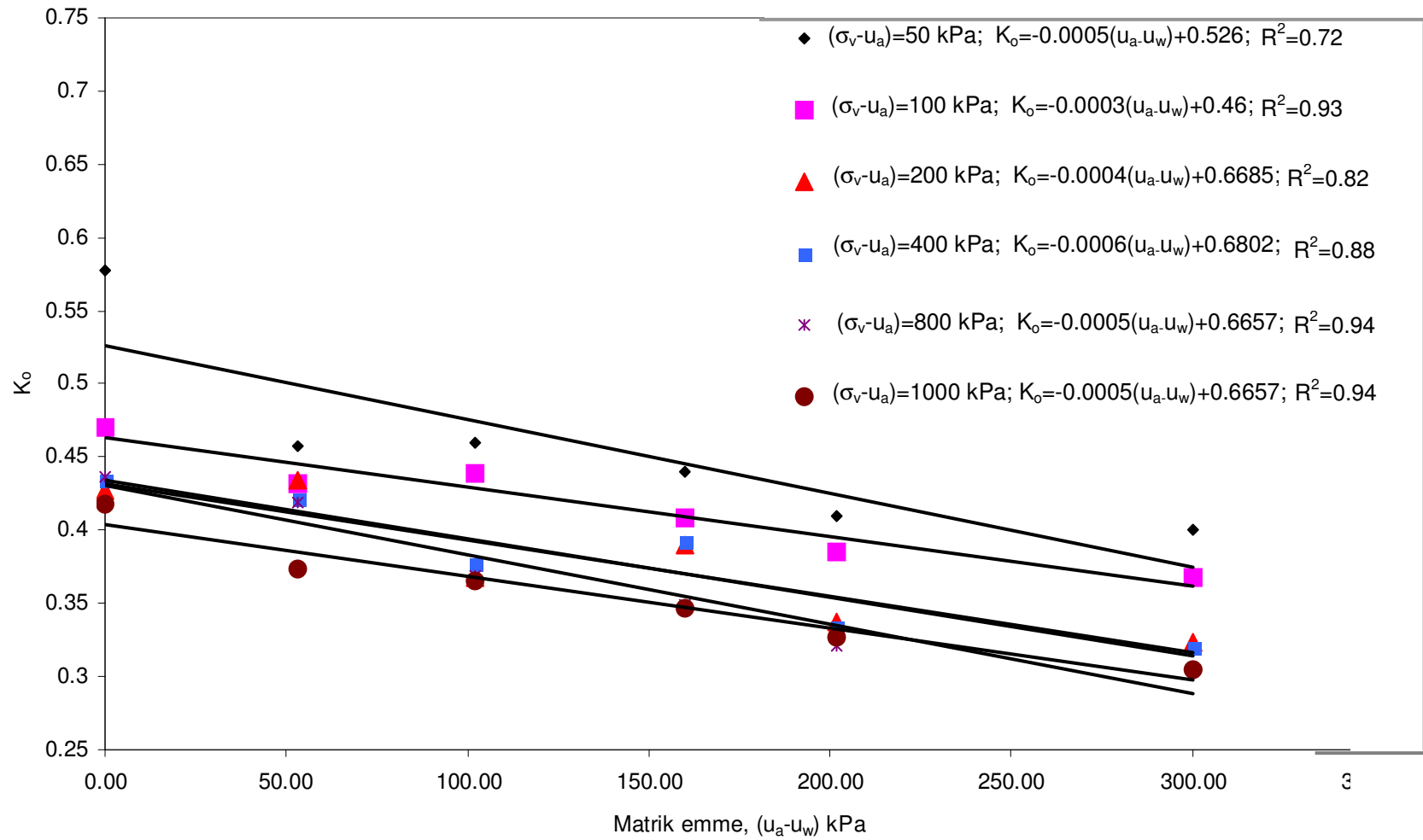
Şekil 4.18. Havuzlubahçe Silti'nin farklı matrik emme basınçları altında ölçülen K_0 değerlerinin karşılaştırılması

4.2. Matrik Emme ile K_0 Arasındaki İlişki

Konsolidasyon deneylerinde, matrik emme basınçları sabit tutularak, düşey gerilmeler kademeli olarak artırılmıştır. Tüm deneylerde, yükleme kademeleri benzer seçilmiştir. Yanal basınç ölçümleri, her yükleme kademesi sonunda, yapılmıştır. Her iki zemin türü için, beş farklı matrik emme değerinde, konsolidasyon gerçekleştirilmiştir. Matrik emme basınçlarının K_0 üzerindeki etkisini incelemek için, her bir konsolidasyon deneyinde, benzer düşey yüklemelerde ölçülen K_0 değerlerinin, matrik emme ile değişimleri Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, matrik emme basıncı arttıkça, K_0 düşmektedir. Başka bir ifade ile düşük doygunluk derecesinde, (yüksek matrik emme basıncında) aynı düşey yüklemeye sahip numunelerde, daha küçük yanıl basınçlar ölçülmüştür. Bütün deneylerde gözlenen bu davranış, artan matrik emme basıncı altında, zemin numunesi, daha kuru bir hal alarak, rijit bir yapı kazanmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, matrik emme basıncının, zemin danelerinin birbirini tutturucu etkisinin bulunması, bu davranışı belirlemektedir. Matrik emmelerle K_0 arasında, en küçük kareler yöntemi kullanılarak, yapılan lineer regresyon analizlerinde, Kayapınar Kili için korelasyon katsayıları %94 ile %90 arasında değişirken, Havuzlubahçe Silti için bu değerler % 73 ile %94 arasında değişmiştir. Özellikle Havuzlubahçe Siltinin, $(\sigma_v - u_a) = 50$ kPa ve $(\sigma_v - u_a) = 200$ kPa’lık düşey yüklemelerde lineer korelasyonun düşük olduğu gözlenmiştir. 800 kPa ve 1000 kPa düşey yüklemeler için, K_0 ile matrik emme arasındaki ilişki, lineere oldukça yakındır ($R^2 = 0.94$). Şekil 4.18. ve Şekil 4.19. incelendiğinde, doğrular paralel olarak, düşey yüklemeler arttıkça aşağı doğru kaymaktadır. Düşey yükleme arttırıldığında, zemin numunesi daha sıkı halde olduğu için bu davranış gözlenmektedir. Lineer regresyonla elde edilen $K_0 = a(u_a - u_w) + b$ ilişkisindeki, b değeri doğrunun K_0 eksenini kestiği noktayı, başka bir deyişle doygun durumdaki K_0 değerini gösterir. Bulunan istatistiksel K_0 -matrik emme ilişkisinin, düşey eksenini kestiği noktada matrik emme basıncı değeri sıfırdır. Bunun anlamı boşluk basıncının, boşluk suyu basıncına ve onun da atmosfer basıncına eşit olması demektir.



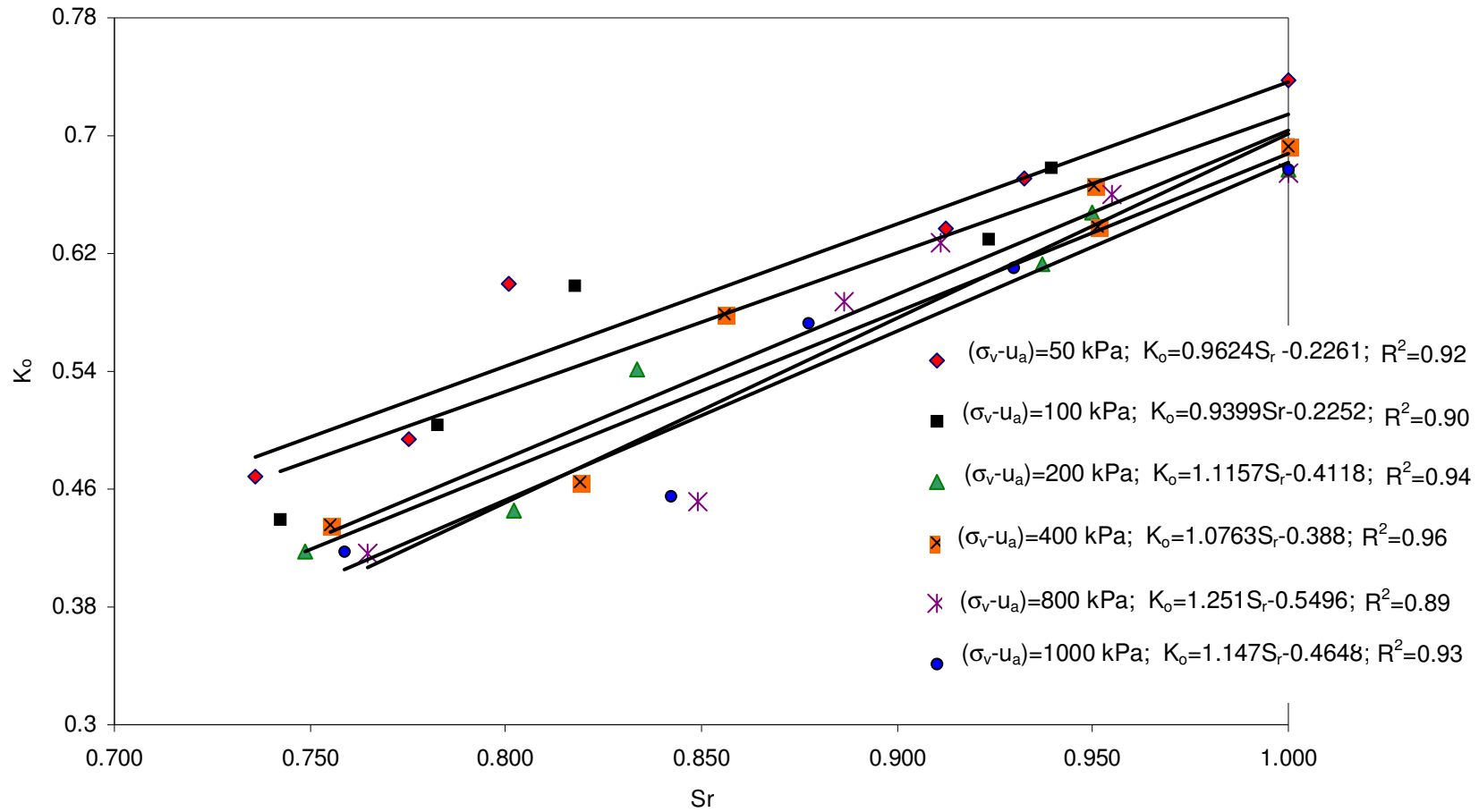
Şekil 4.19. Kayapınar Kili'nin farklı düşey basınç altında K_o ile matrik emme basıncı arasındaki değişimlerin karşılaştırılması



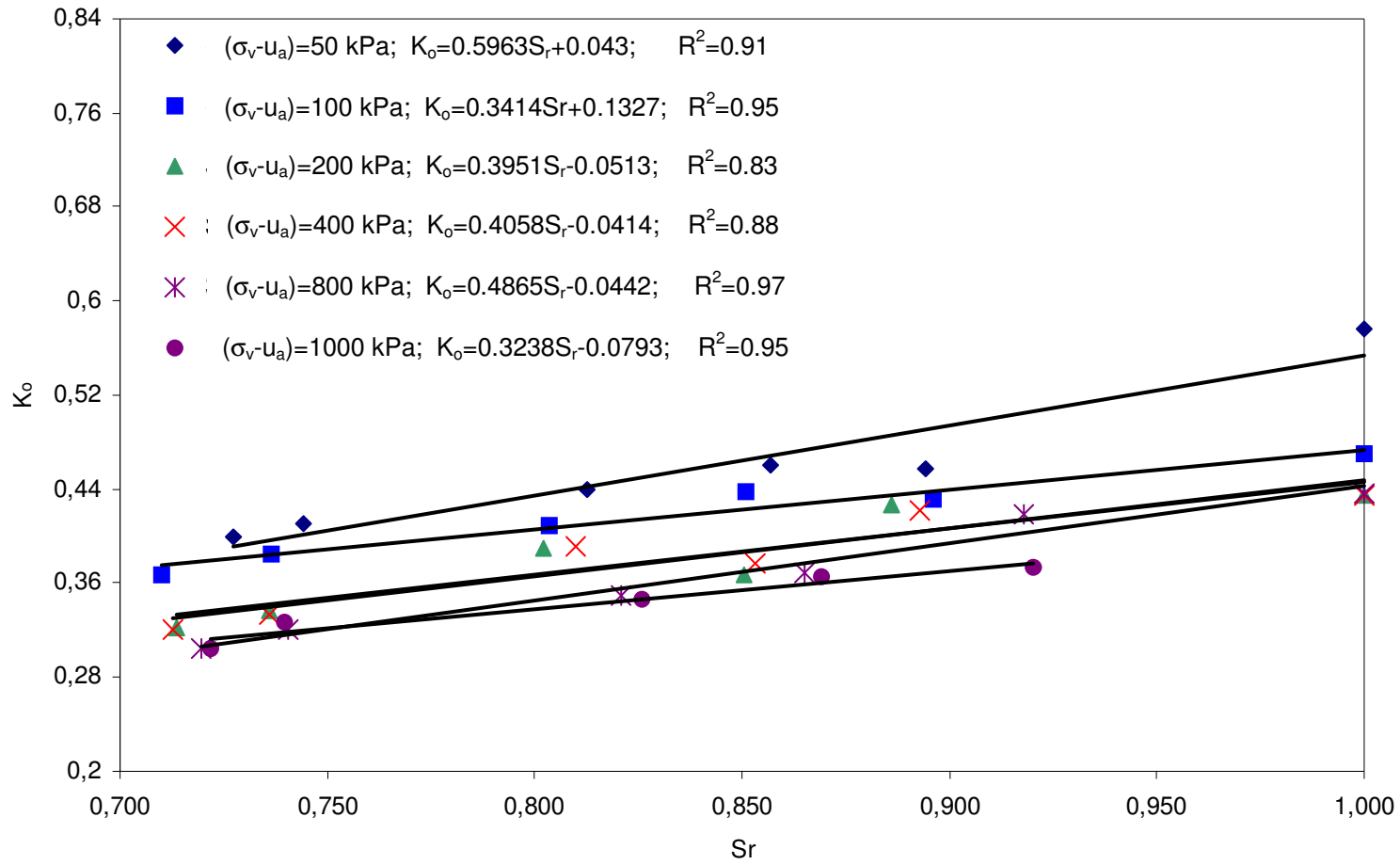
Şekil 4.20. Havuzlubahçe Silti'nin farklı düşey basınç altında K_0 ile matrik emme basıncı arasındaki değişimlerin karşılaştırılması

4.3. Doygunluk Derecesi ile K_0 Arasındaki İlişki

Doymamış zeminlerin davranışını belirleyen parametrelerin başında; zemin numunesinin, belirli matrik emme basıncı altında, sahip olduğu su içeriği veya doymunluk derecesi gelmektedir. Bu nedenle ölçülen K_0 değerleri ile, zemin numunesinin, doymunluk dereceleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu amaçla; sabit düşey yükleme ve artan matrik emme basıncı altında, zemin numunelerinin doymunluk dereceleri hesap edilerek, K_0 ile değişimleri Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir. Bu şekillere göre; ölçülen K_0 değerleri, doymunluk dereceleri ile, artmaktadır. Bunun sebebi daha önce de belirtildiği gibi, zemin numunelerinin daha kuru olmasından kaynaklanmaktadır. En küçük kareler yöntemi ile yapılan lineer regresyon sonucunda, Kayapınar kili için, korelasyon katsayısının (R^2), 0.89 ile 0.96 arasında değerler aldığı gözlenmiştir. Havuzlubahçe Silti için bu değer 0.88 ile 0.97 arasında bulunduğu görülmüştür. Bu değerlendirmeye göre, K_0 ile doymunluk derecesi (S_r) arasında, iyi bir lineer ilişki olduğu söylenebilir. Elde edilen doğruların eğimleri, Kayapınar Kili için 0.96 ile 1.25 arasında değerler alırken, Havuzlubahçe Silti için 0.37 ile 0.59 arasında değerler almaktadır. Yine bu doğrulara bakıldığında hepsinin, düşey gerilme ile, aşağı doğru kaydığı görülmektedir. Doğrulardan elde edilen $K_0=AS_r+B$ şeklindeki denklemlerde B katsayısı, zeminin tamamen kuru durumdaki K_0 değerini göstermektedir.



Şekil 4.21. Kayapınar Kili'nin ölçülen K_0 değerlerinin doygunluk dereceleri ile değişimlerinin düşey yüklemeler ile karşılaştırılması



Şekil 4.22. Havuzlubahçe Silti'nin ölçülen K_0 değerlerinin doygunluk dereceleri ile değişimlerinin düşey yüklemeler ile karşılaştırılması

4.4. Bugüne Kadar Verilen Ampirik İfadeler İle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Sükunetteki zemin basınç katsayısının tahmini için, Kaynaklarda çok sayıda, ampirik veya yarı ampirik ifadeler bulunmaktadır. Bu ifadeler kullanılarak K_0 değerinin hesaplanabilmesi için içsel sürtünme açısı (ϕ'), plastisite indisi (I_p) veya aşırı konsolidasyon oranı (AKO) gibi, zemin parametrelerine ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada kullanılan her iki zemin numunesi için söz konusu parametreler, standart deneyler yapılarak tespit edilmiştir (TSE-1900). Çizelge 4.8. ve Çizelge 4.9'da Kayapınar Kili ve Havuzlubahçe Silti için yapılan karşılaştırmalar, sırasıyla verilmiştir. Çizelgelerdeki K_0 'ın deneysel değerleri, doymun durumdaki K_0 'ın, düşey gerilme ile değişiminin, kararlı kaldığı bölgedeki değerlerin ortalaması olarak alınmıştır.

Çizelgelerden görüldüğü gibi; ampirik ifadelerden bulunan değerlerin bir kısmı ölçülen değerlerden büyük, bir kısmı ise küçük sonuçlar vermektedir. Çizelgede Jacky (1944,1948) tarafından verilen, içsel sürtünme açısına (ϕ') bağlı, iki eşitlik bulunmaktadır. Bunlardan birincisi teorik analiz sonucu verilmiş ve ikincisi ise bunun sadeleştirilmiş halidir. Bu denklemlerden ikincisi, Kayapınar Kili için ölçülen değere, en yakın sonucu vermektedir. Diğer taraftan Brooker ve Ireland (1965) tarafından önerilen, ϕ' açısına bağlı, ifade deneysel sonuçlara daha yakın değerler vermiştir. Plastisite indisine bağlı eşitliklerden, deneysel sonuçlara daha uzak değerler elde edilmektedir.

Havuzlubahçe Silti için, ölçülen K_0 değerine en yakın sonucu, Rowe (1958) tarafından verilen 1. denklem vermiştir. Jacky (1944) tarafından önerilen ifadeden, yine diğerlerine göre, daha yakın sonuç bulunmaktadır. Plastisite indisine bağlı eşitliklerden ise, ölçülen değerlere göre, daha kaba değerler elde edilmektedir.

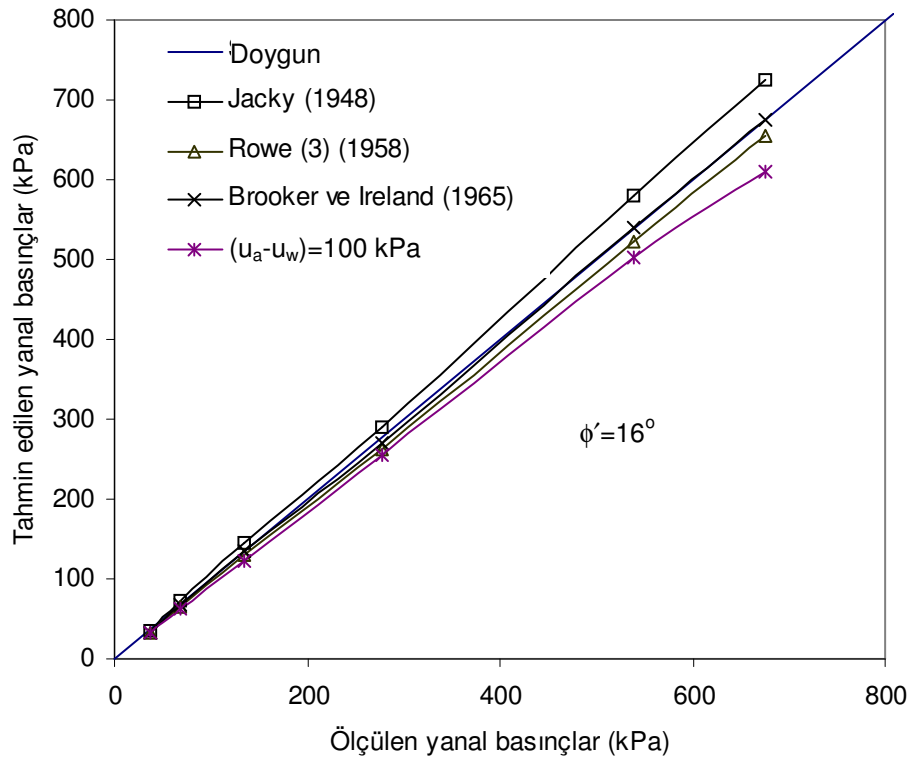
Normal konsolide durum için, ölçülen yanal basınçların, ampirik ifadelerden tahmin edilen yanal basınçlar ile karşılaştırılması Şekil 4.23'ten Şekil 4.26'ya kadar verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi bu ifadelerden hesaplanan değerler, doymun durumda ölçülen değerlere yakın sonuç verirken, 100 kPa matrik emmeye sahip aynı numunede yakın sonuç vermemektedir.

Çizelge 4.8. Kayapınar Kili'nin ölçülen K_o değerlerinin, ampirik ifadelerden bulunanlarla karşılaştırılması

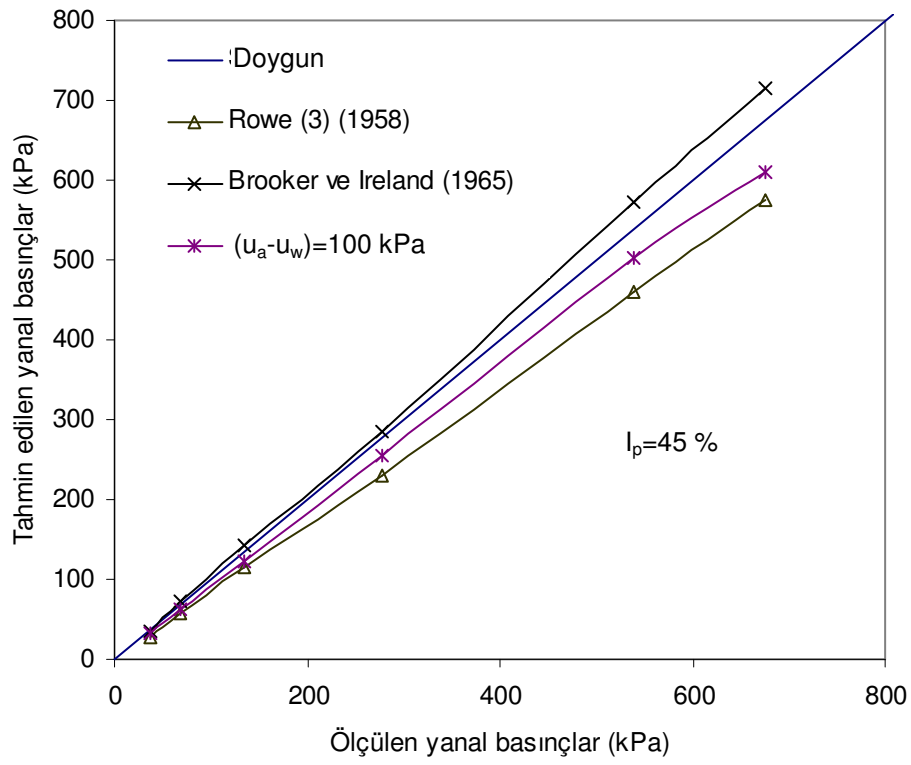
Efektif Kayma Direnci Açısı (ϕ')=16° Plastisite İndisi (I_p)=45	Kaynak	K_o
$K_o = \frac{\left(1 + \frac{2}{3} \sin \phi'\right)(1 - \sin \phi')}{1 + \sin \phi'}$	Jacky (1944)	0.672
$K_o = 1 - \sin \phi'$	Jacky (1948)	0.724
$K_o = \tan^2(45 - 1/2 \phi_{em})$		
$\phi_{em} = \phi_e = 1.15(\phi' - 9)$ (1)	Rowe (1958)	0.754
$\phi_{em} = 0.75 \phi_e = 0.86(\phi' - 9)$ (2)		0.810
$\phi_{em} = \phi_e = 1.15(\phi' - 5.5)$ (3)		0.654
$\phi_{em} = 0.75 \phi_e = 0.86(\phi' - 5.5)$ (4)		0.729
$K_o = 0.95 - \sin \phi'$ $K_o = 0.4 + 0.007 I_p$	Brooker ve Ireland (1965)	0.674 0.715
$K_o = \frac{1}{2} \frac{1 + \frac{\sqrt{6}}{8} - \frac{3\sqrt{6}}{8} \sin \phi'}{1 - \frac{\sqrt{6}}{8} + \frac{3\sqrt{6}}{8} \sin \phi'}$	Hendron (1963)	0.556
$K_o = 0.19 + 0.233 \log I_p$	Alpan (1967)	0.575
Doğrudan Ölçüm	$K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$	0.681

Çizelge 4.9. Havuzlubahçe Silti'nin ölçülen K_o değerlerinin, ampirik ifadelerden bulunanlarla karşılaştırılması

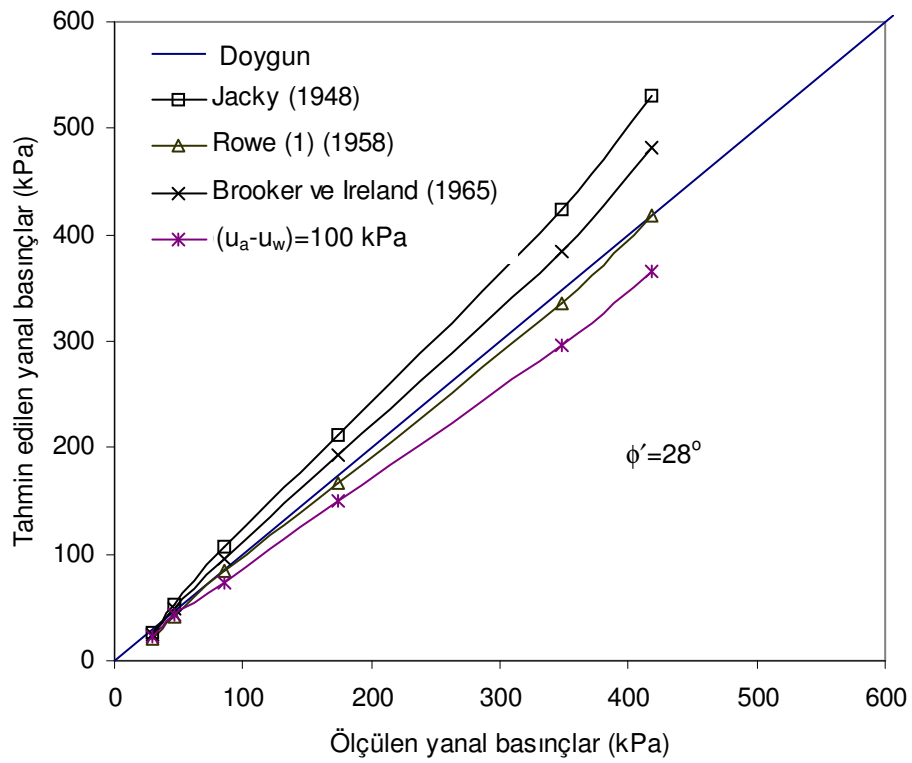
Efektif Kayma Direnci Açısı (ϕ')=28° Plastisite İndisi (I_p)=21	Kaynak	K_o
$K_o = \frac{\left(1 + \frac{2}{3} \sin \phi'\right)(1 - \sin \phi')}{1 + \sin \phi'}$	Jacky (1944)	0.474
$K_o = 1 - \sin \phi'$	Jacky (1948)	0.531
$K_o = \tan^2(45 - 1/2\phi_{em})$		
$\phi_{em} = \phi_e = 1.15(\phi' - 9)$ (1)	Rowe (1958)	0.419
$\phi_{em} = 0.75\phi_e = 0.86(\phi' - 9)$ (2)		0.527
$\phi_{em} = \phi_e = 1.15(\phi' - 5.5)$ (3)		0.392
$\phi_{em} = 0.75\phi_e = 0.86(\phi' - 5.5)$ (4)		0.502
$K_o = 0.95 - \sin \phi'$ $K_o = 0.4 + 0.007I_p$	Brooker ve Ireland (1965)	0.481 0.547
$K_o = \frac{1}{2} \frac{1 + \frac{\sqrt{6}}{8} - \frac{3\sqrt{6}}{8} \sin \phi'}{1 - \frac{\sqrt{6}}{8} + \frac{3\sqrt{6}}{8} \sin \phi'}$	Hendron (1963)	0.778
$K_o = 0.19 + 0.233 \log I_p$	Alpan (1967)	0.498
Doğrudan Ölçüm	$K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$	0.429



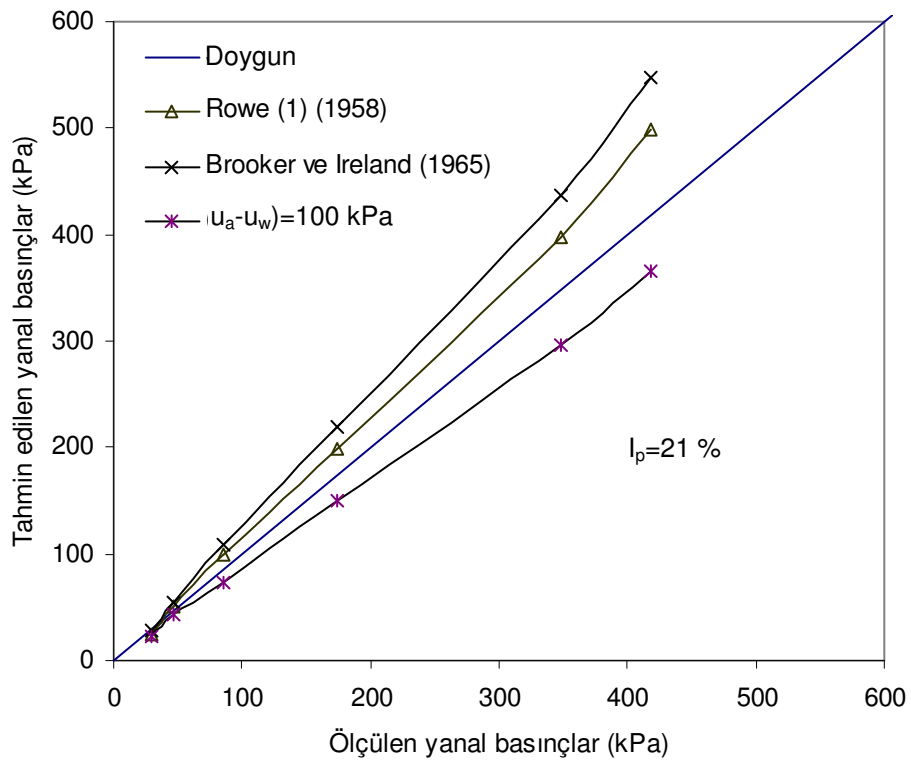
Şekil 4.23. Kayapınar Kili'nin ölçülen yanal basınçlarının içsel sürtünme açısına bağlı olarak tahmin edilen yanal basınçlar ile karşılaştırılması



Şekil 4.24. Kayapınar Kili'nin ölçülen yanal basınçlarının plastisite indisine bağlı olarak tahmin edilen yanal basınçlar ile karşılaştırılması



Şekil 4.25. Havuzlubahçe Silti'nin ölçülen yanal basınçlarının içsel sürtünme açısına bağlı olarak tahmin edilen yanal basınçlar ile karşılaştırılması



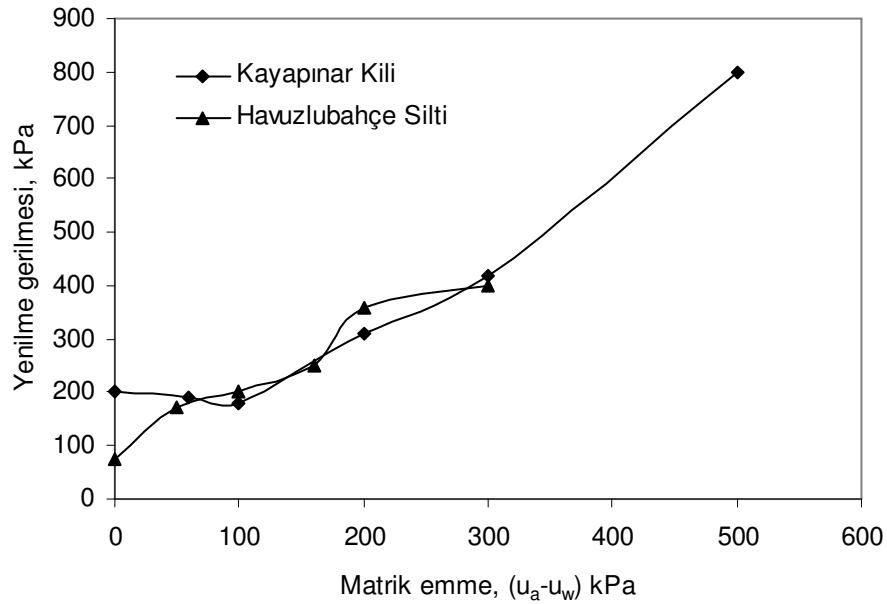
Şekil 4.26. Havuzlubahçe Silti'nin ölçülen yanal basınçlarının plastisite indisine bağlı olarak tahmin edilen yanal basınçlar ile karşılaştırılması

Doymamış koşullarda yapılan konsolidasyon deneylerinden elde edilen boşluk oranı- efektif gerilme grafiklerine (Şekil 4.11 ve Şekil 4.15) dikkat edildiğinde, matrik emmenin büyümesi ile eğrilerin sağa doğru kaydığı görülmektedir. Bu durum, matrik emme artışının yenilme gerilmesi (ön konsolidasyon basıncı) üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Matrik emme büyüdükçe, yenilme gerilmeleri de büyümektedir. Çizelge 4.10’da matrik emme kontrollü konsolidasyon deney sonuçlarından, Casagrande çizim yöntemi ile yaklaşık olarak hesaplanan yenilme gerilmesi değerleri verilmiştir. Şekil 4.27’de matrik emme ile yenilme gerilmeleri arasındaki değişim görülmektedir. Her iki zemin için bulunan yenilme gerilmelerinin, K_o üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, her yükleme kademesi için, aşırı konsolidasyon oranları (AKO) hesap edilmiştir. AKO’nun tahmini değerleri, bulunan yenilme gerilmesi değerlerinin, numunelerin üzerine uygulanan düşey yüke bölünmesi ile bulunmuştur.

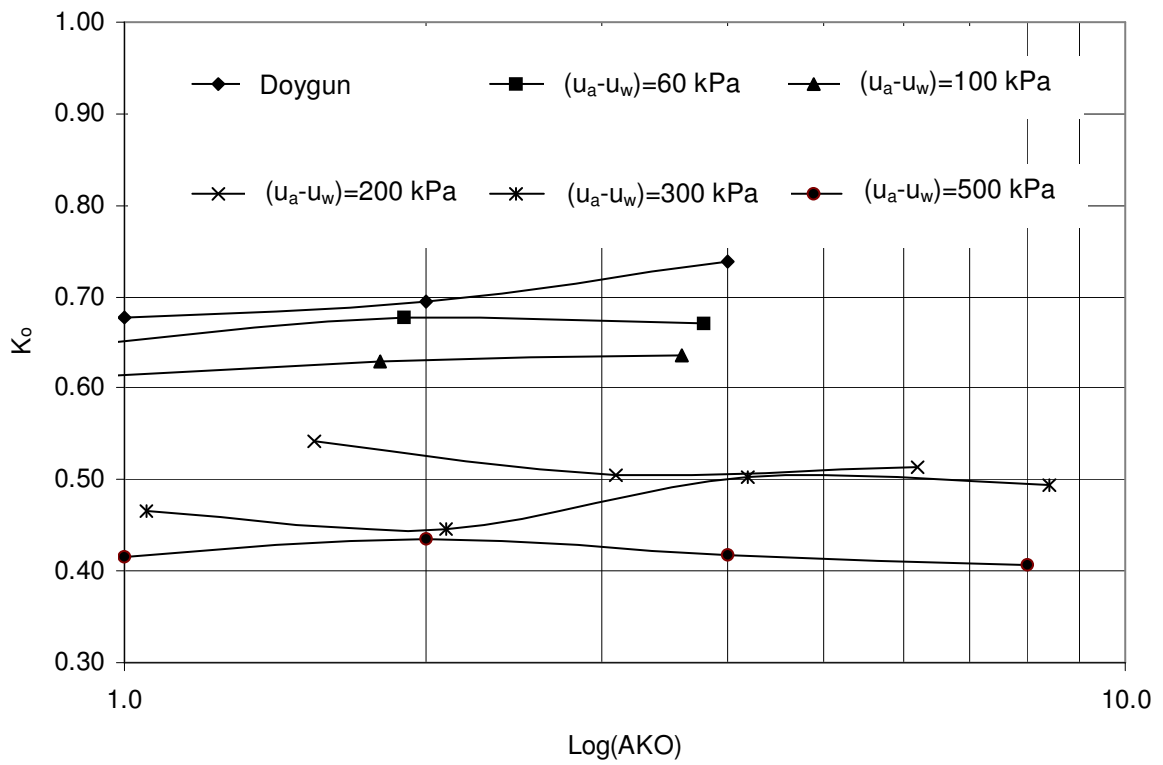
Çizelge 4.10. Matrik emme kontrollü deneylerden elde edilen yenilme gerilmeleri

Zemin	Matrik emme (kPa)	Yenilme gerilmesi (kPa)
Kayapınar Kili	0	200
	60	190
	100	180
	200	310
	300	420
	500	800
Havuzlubahçe Silti	0	75
	50	170
	100	200
	160	250
	200	360
	300	400

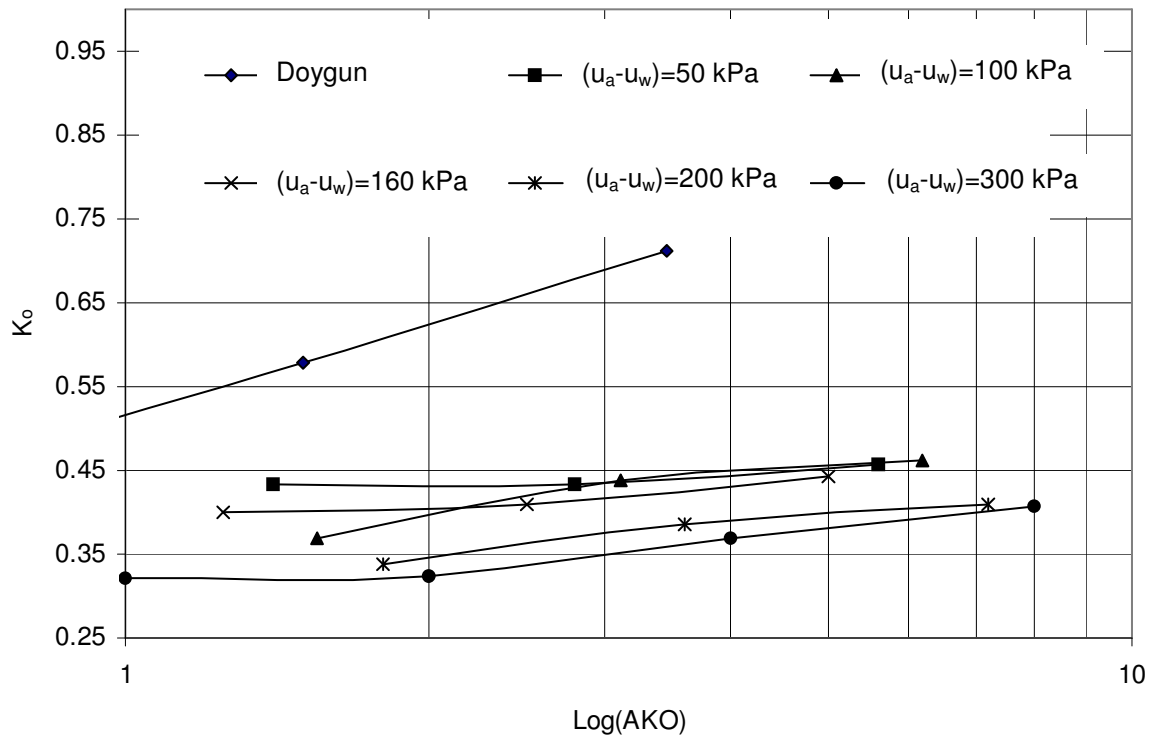
Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da sabit matrik emme altında ölçülen K_o değerlerinin $\text{Log}(AKO)$ değişimleri görülmektedir. Bu grafikler, AKO’nun birden büyük değerleri için çizilmiştir. Şekil 4.28’de, matrik emme basıncı altında, Kayapınar Kili’nin K_o değerlerinin AKO ile değişimi net bir şekilde belirli bir özellik göstermediği halde, Havuzlubahçe Silti için yapılan deneylerde, K_o ’ın AKO ile arttığı görülmektedir. Kaynaklarda, AKO’nun K_o üzerinde etkisi olduğunu gösteren çalışmalar mevcut olup bu konuda ampirik ifadeler verilmiştir. Brooker ve Ireland (1965) ve Alpan (1967) tarafından, aşırı konsolide durumlar için verilen K_o ifadeleri kullanılarak yanal basınçlar hesap edilmiş ve ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Şekil 4.30’dan Şekil 4.41’e kadar verilmiştir. Bu şekillere göre tahmin edilen yanal basınçlar, ölçülen değerlerden oldukça farklı sonuçlar vermiştir. Ancak, deney sonuçlarına göre; gerilme tarihçesinin suya doygun olmayan zeminlerin K_o değeri üzerinde etkisi olduğu görülmüştür.



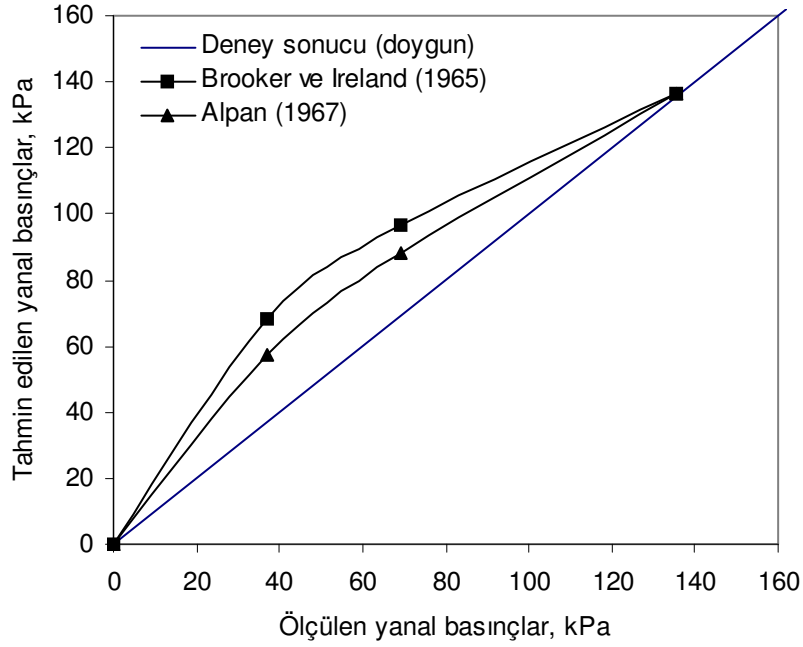
Şekil 4.27. Matrik emme kontrollü deneylerden bulunan yenilme gerilmelerinin matrik emme ile değişimi



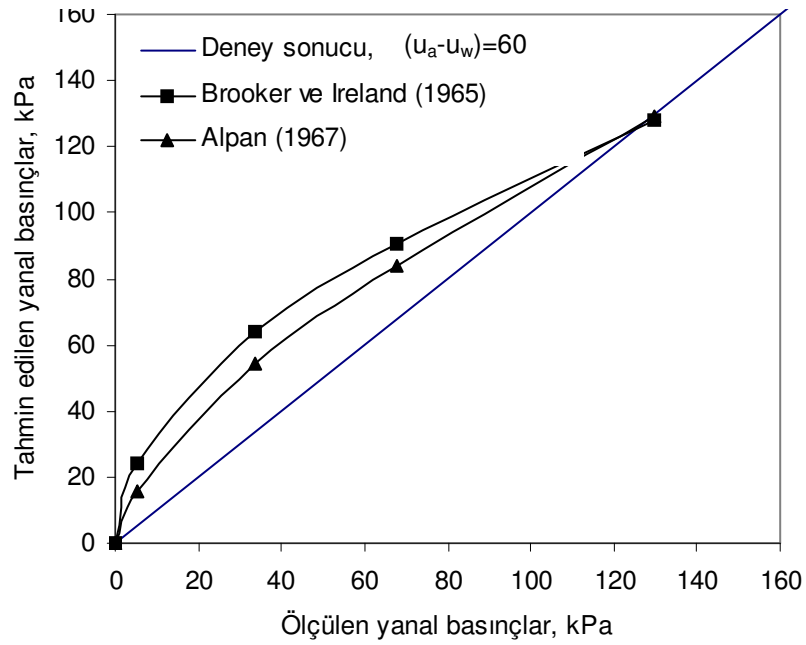
Şekil 4.28. Kayapınar Kili'nin sabit matrik emme altında, K_o değerlerinin Log(AKO) ile değişimi



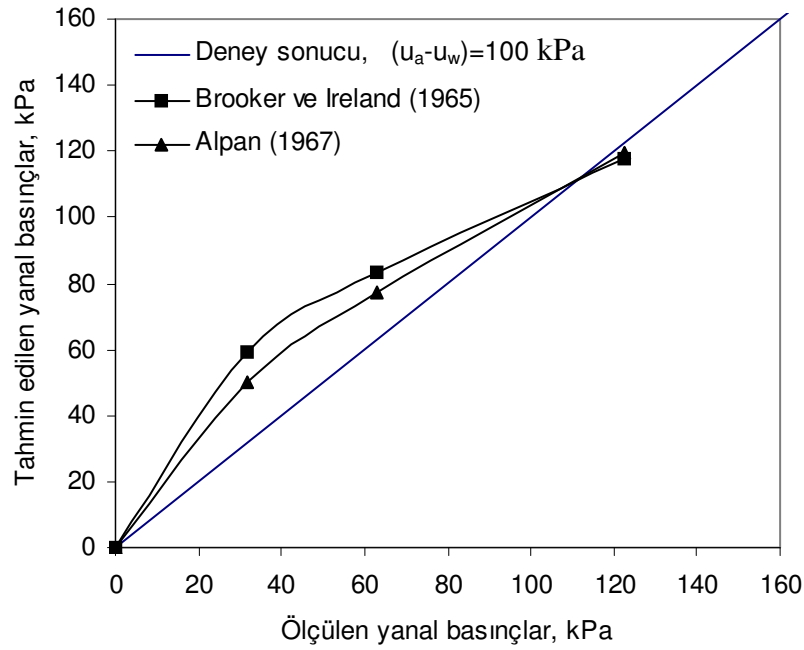
Şekil 4.29. Havuzlubahçe Silti'nin sabit matrik emme altında, K_o değerlerinin $\text{Log}(AKO)$ ile değişimi



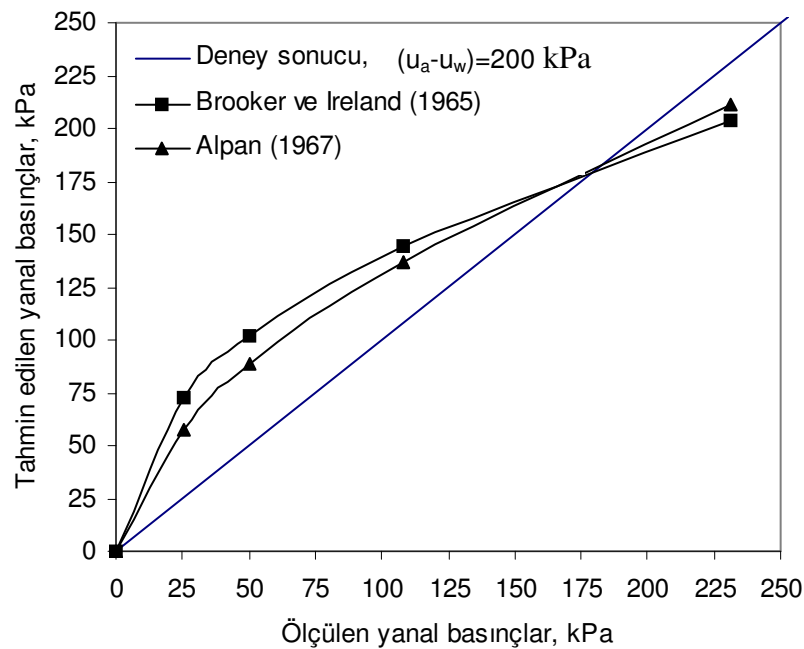
Şekil 4.30. Kayapınar Kili'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması ($u_a-u_w=0$ kPa)



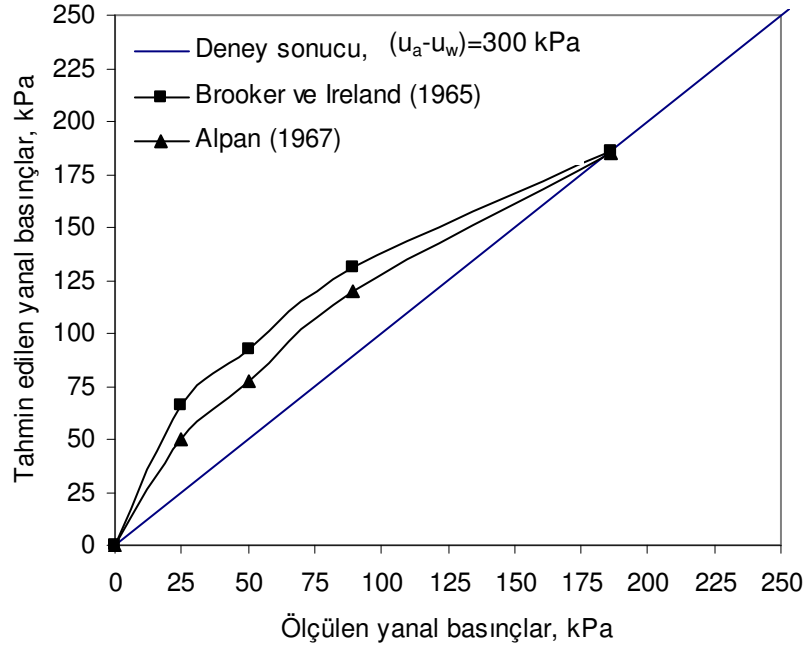
Şekil 4.31. Kayapınar Kili'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması ($u_a-u_w=60$ kPa)



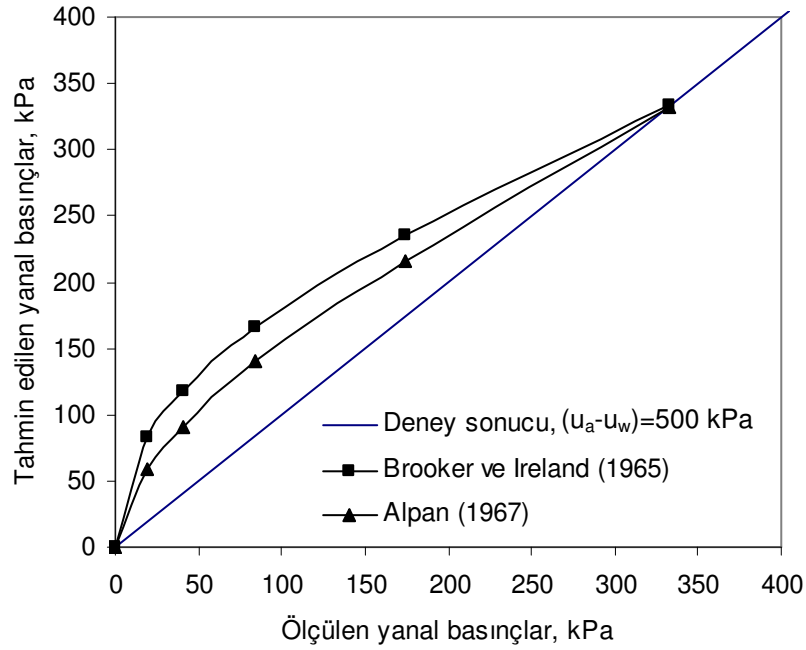
Şekil 4.32. Kayapınar Kili'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması ($u_a - u_w$)=100 kPa



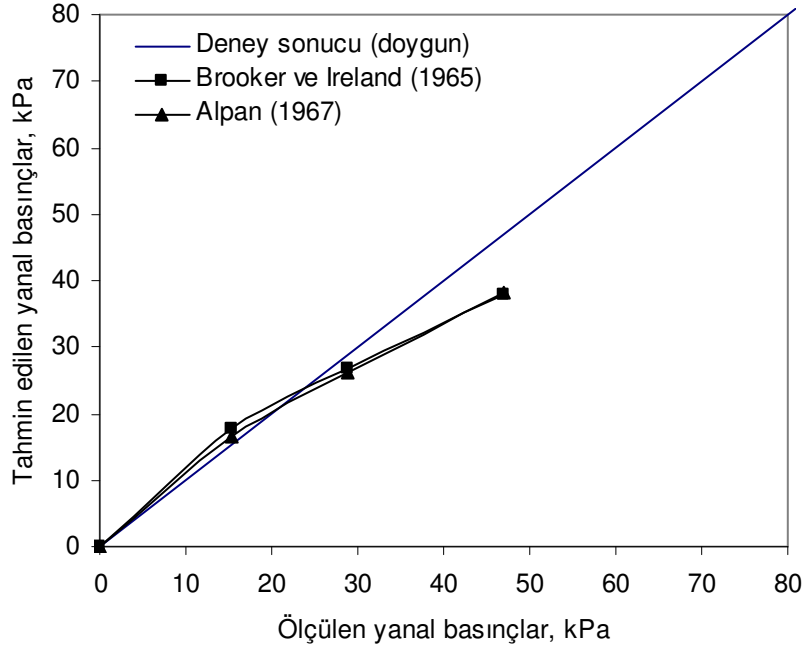
Şekil 4.33. Kayapınar Kili'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması ($u_a - u_w$)=200 kPa



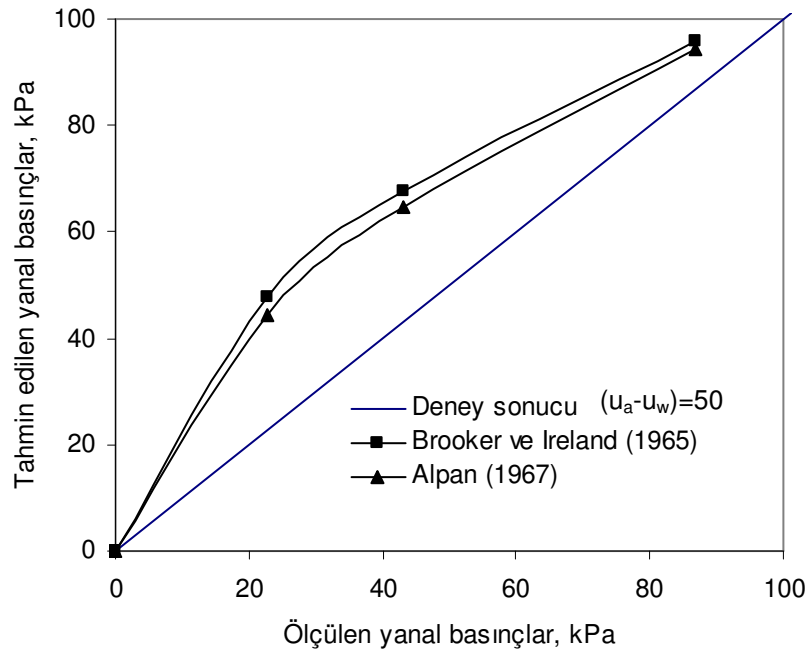
Şekil 4.34. Kayapınar Kili'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması $(u_a - u_w) = 300$ kPa



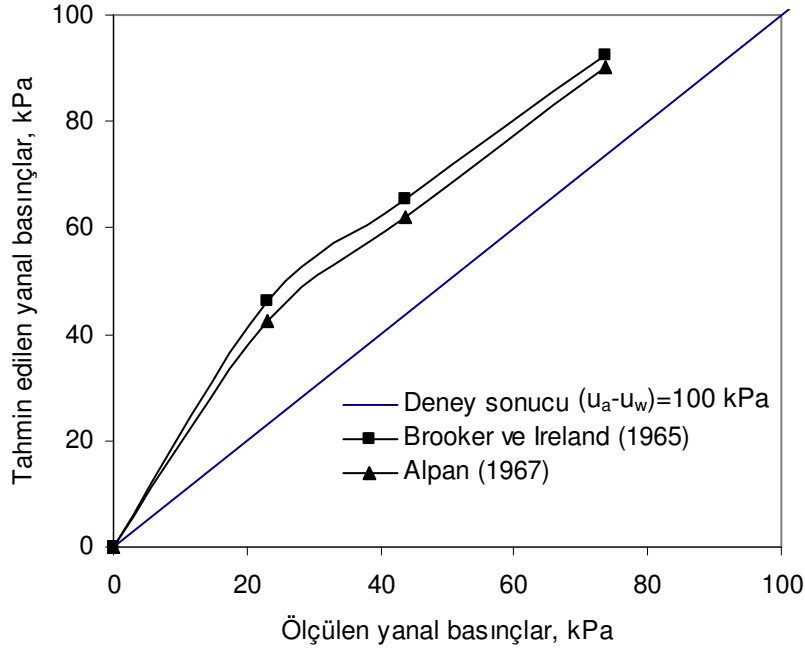
Şekil 4.35. Kayapınar Kili'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması $(u_a - u_w) = 500$ kPa



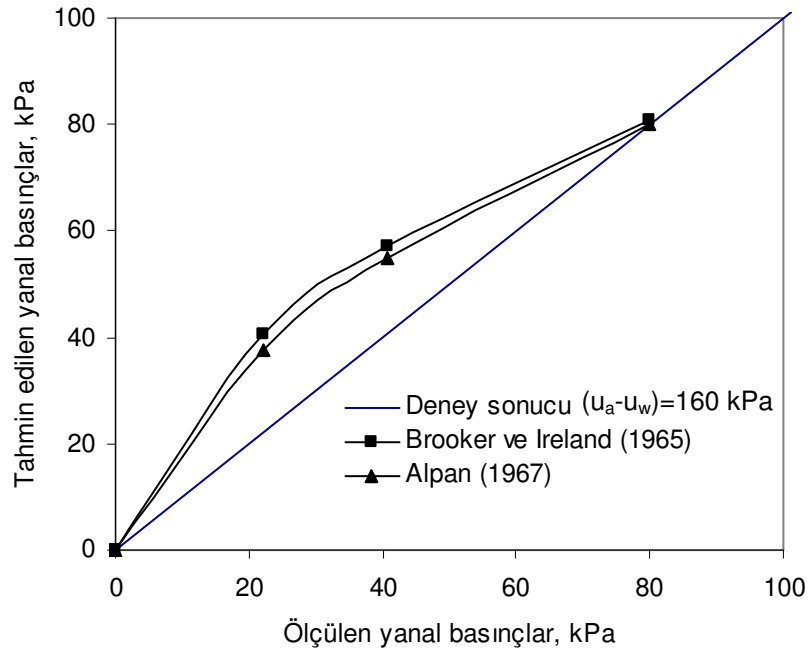
Şekil 4.36. Havuzlubahçe Silti'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması ($u_a - u_w = 0$ kPa)



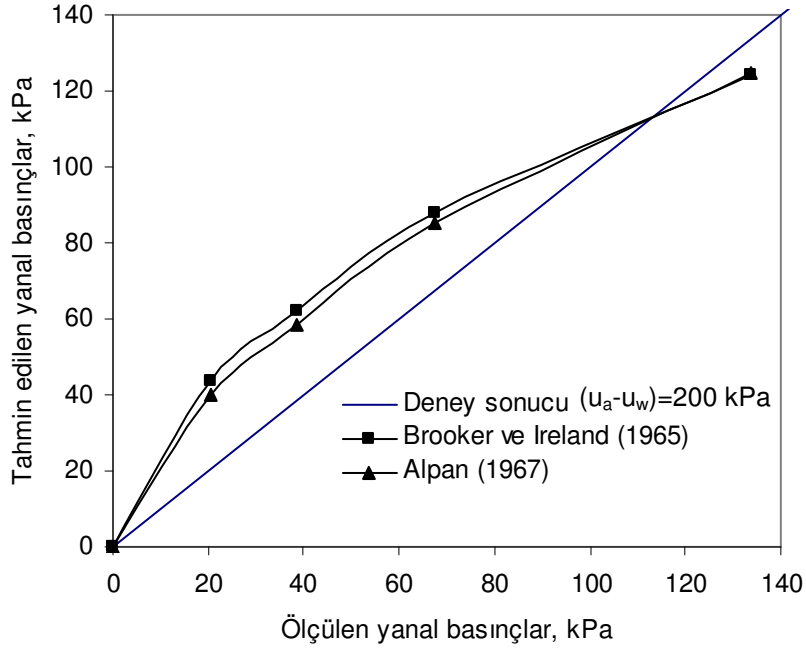
Şekil 4.37. Havuzlubahçe Silti'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması ($u_a - u_w = 50$ kPa)



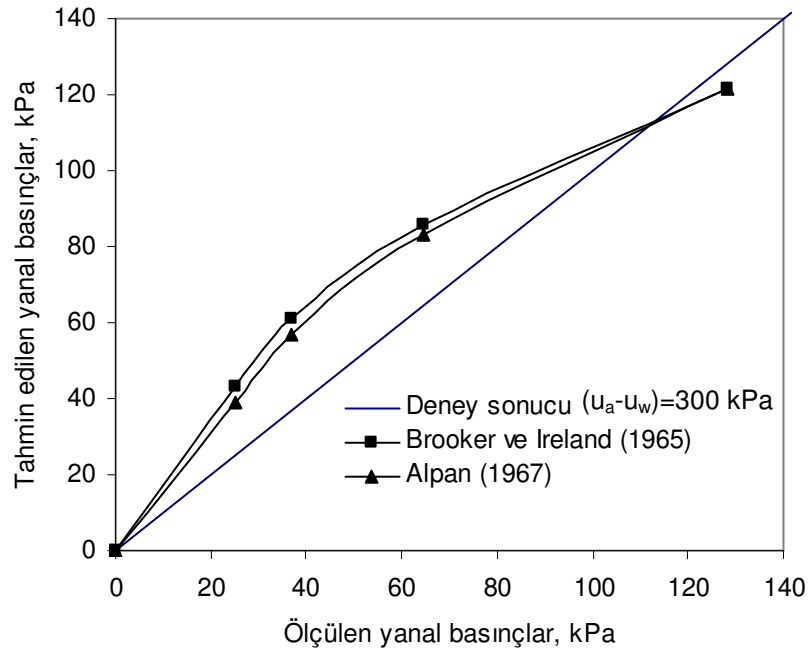
Şekil 4.38. Havuzlubahçe Silti'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=100 kPa



Şekil 4.39. Havuzlubahçe Silti'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=160 kPa



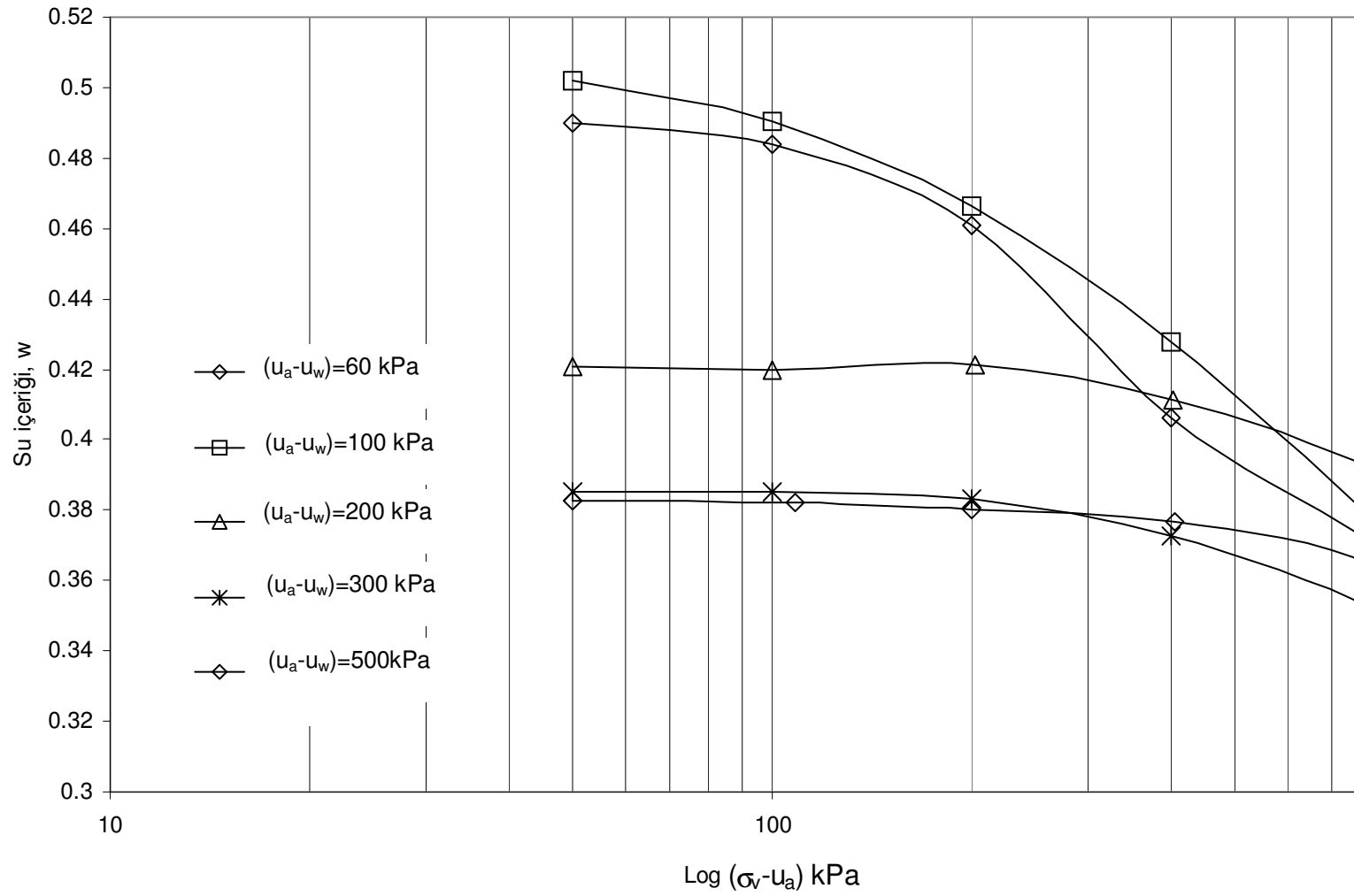
Şekil 4.40. Havuzlubahçe Silti'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=200 kPa



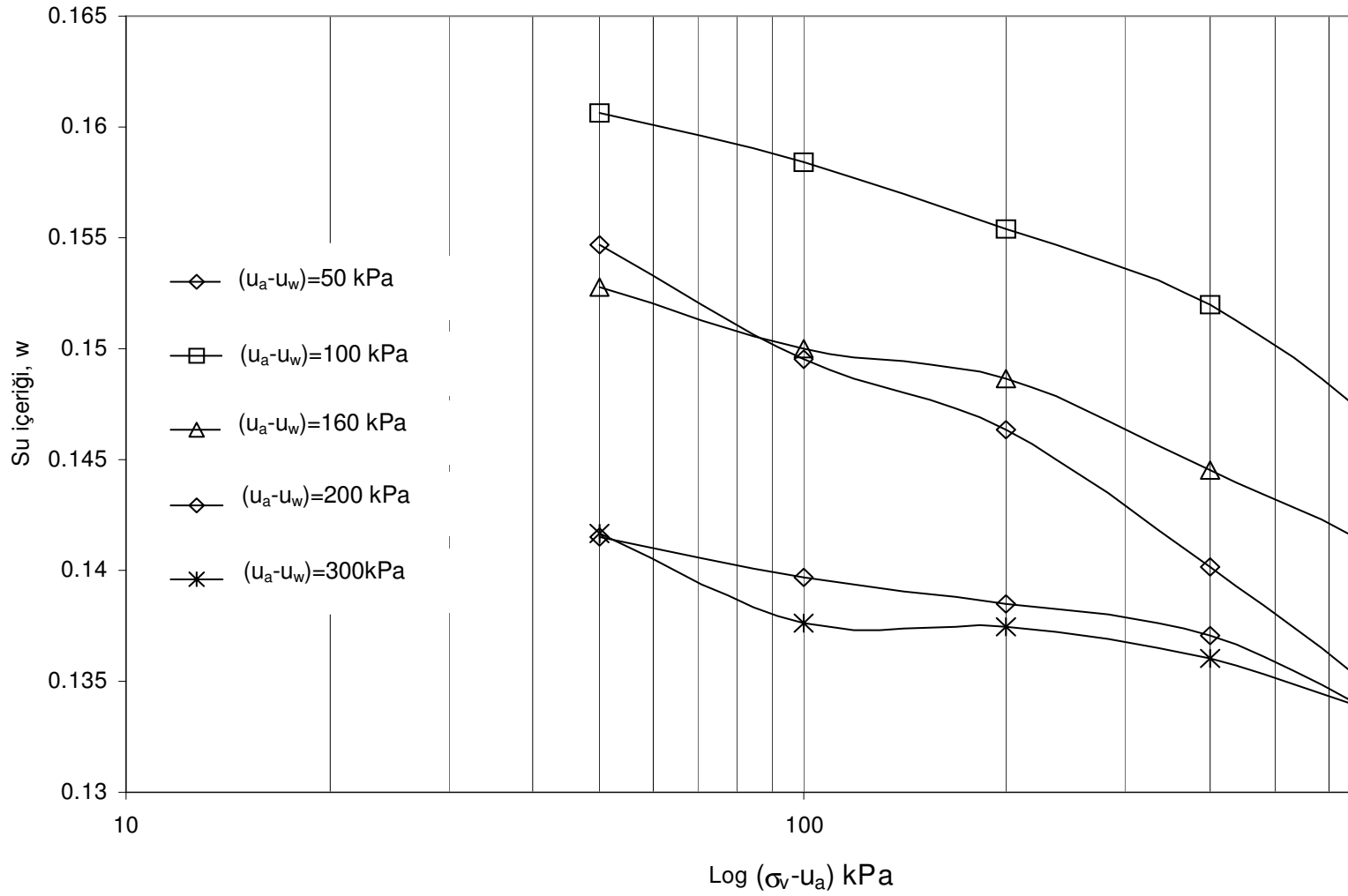
Şekil 4.41. Havuzlubahçe Silti'nin AKO'na bağlı olarak hesap edilen yanal basınçlarının ölçülen değerler ile karşılaştırılması (u_a-u_w)=300 kPa

4.5. Numunelerin Su Tutma Potansiyelleri

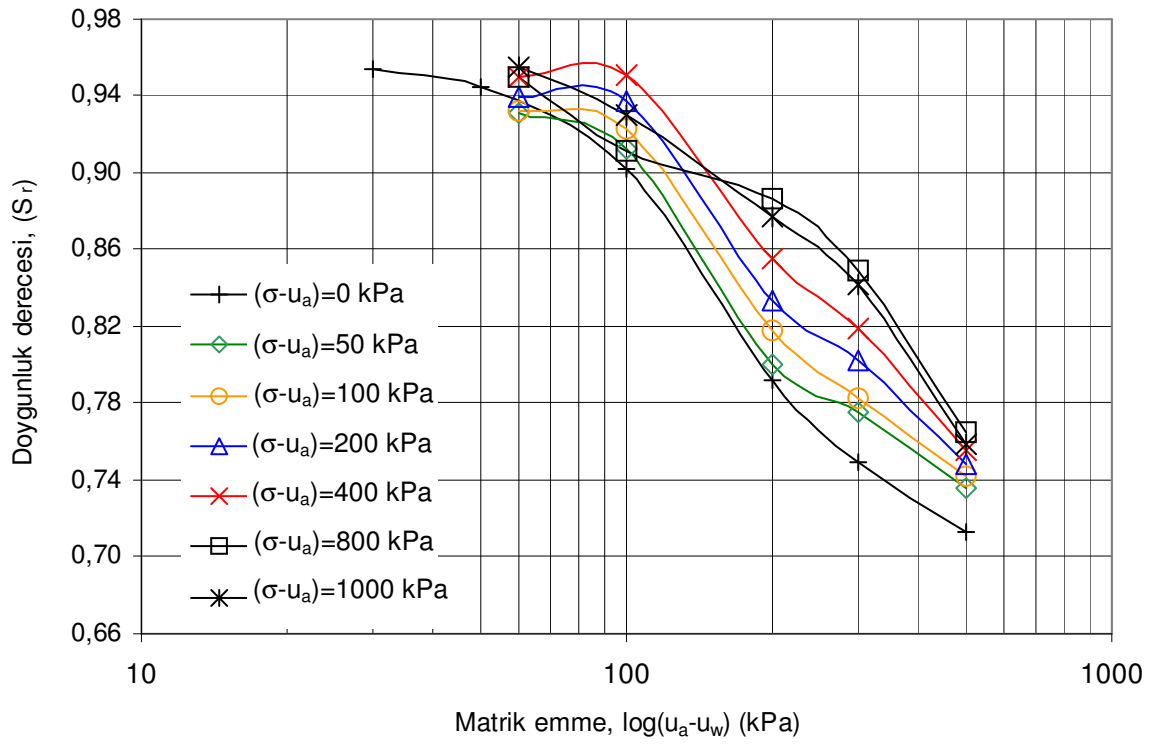
Matrik emme kontrollü olarak yapılan deneylerde, deney süresince zeminin su içeriği ölçülmüş ve Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te numunelerin her yükleme kademesi sonundaki su içerikleri gösterilmiştir. Şekil 4.44 ve Şekil 4.45 ise farklı düşey yüklemelerdeki zemin numunelerinin, matrik emme-doygunluk dereceleri ilişkilerini göstermektedir. Şekillerdeki sıfır düşey yüklemeli eğriler Basınç Plakası (Pressure Plate) deneyinden elde edilmiştir. Zemin-su karakteristik eğrisi denilen bu grafikler, farklı doygunluk derecelerinde zeminin sahip olduğu emme potansiyelini göstermektedir. Bu potansiyel zemin iskeletinin, bünyesindeki suyu tutması için sahip olması gereken enerjiyi ifade etmektedir. Doymamış zeminlerin mukavemet ve konsolidasyon parametreleri zemin-su karakteristik eğrileri ile ilişkilendirilmektedir (Tekinsoy ve ark., 2004). Şekillere dikkat edildiğinde, düşey yükleme arttıkça eğrilerin yukarı doğru kaydığı görülmektedir. Aynı matrik emme basıncı altında daha büyük düşey yüklemelerdeki doygunluk derecesi, daha büyük değerler almaktadır. Düşey yükleme arttıkça, zeminin birim ağırlığı artmakta ve gözenek çapı küçülmektedir. Bu durum; aynı matrik potansiyelde, zemin iskeletinin daha çok su tutmasına yol açmaktadır. Şekil 4.46. ve Şekil 4.47'de, sabit matrik emme basıncında artan, düşey yükleme ile doygunluk derecesinin değişimi görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi, doygunluk derecesi düşey yük ile artmaktadır. Sonuç olarak; bu çalışmada oluşturulan deney düzeneği ile doymamış zeminlerin önemli bir özelliği olan zemin-su tutma eğrileri, farklı düşey yüklemeler altında tespit edilebilmekte ve buna göre zeminin su tutma potansiyeli hakkında yorum yapılabilmektedir.



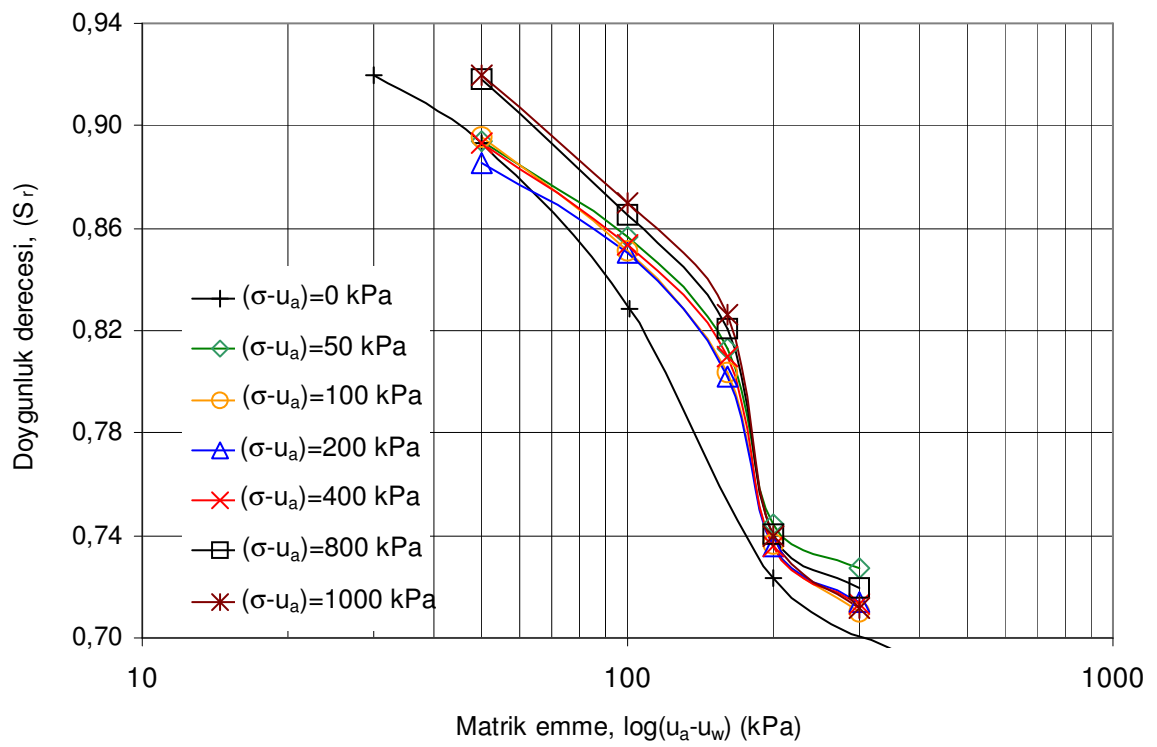
Şekil 4.42. Kayapınar Kili'nin farklı matrik emme altında su içeriğinin düşey basınç ile değişimi



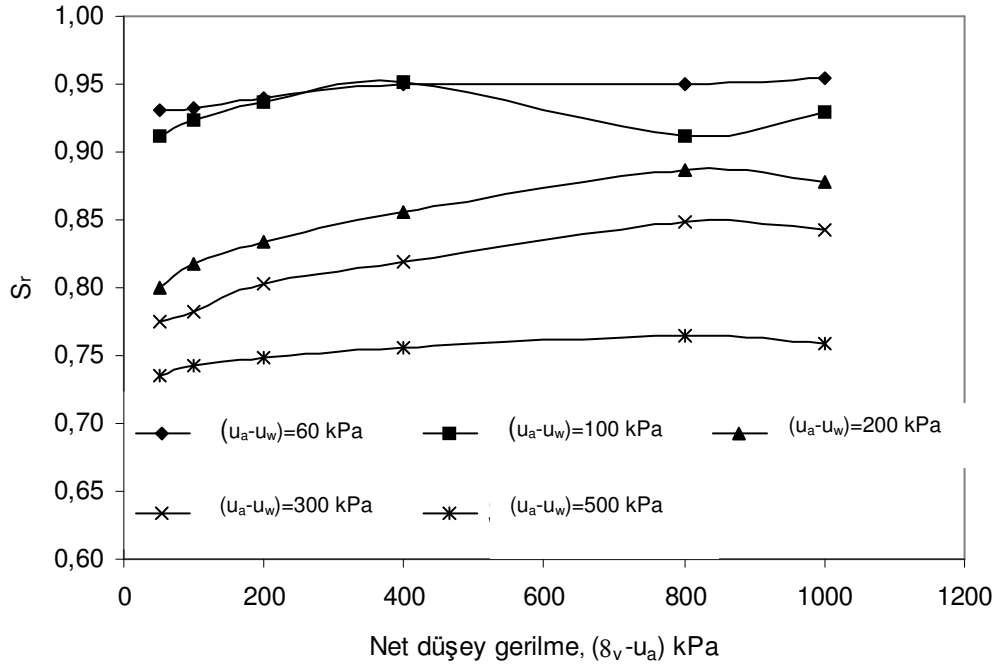
Şekil 4.43. Havuzlubahçe Silti'nin farklı matrik emme altında su içeriğinin düşey basınç ile değişimi



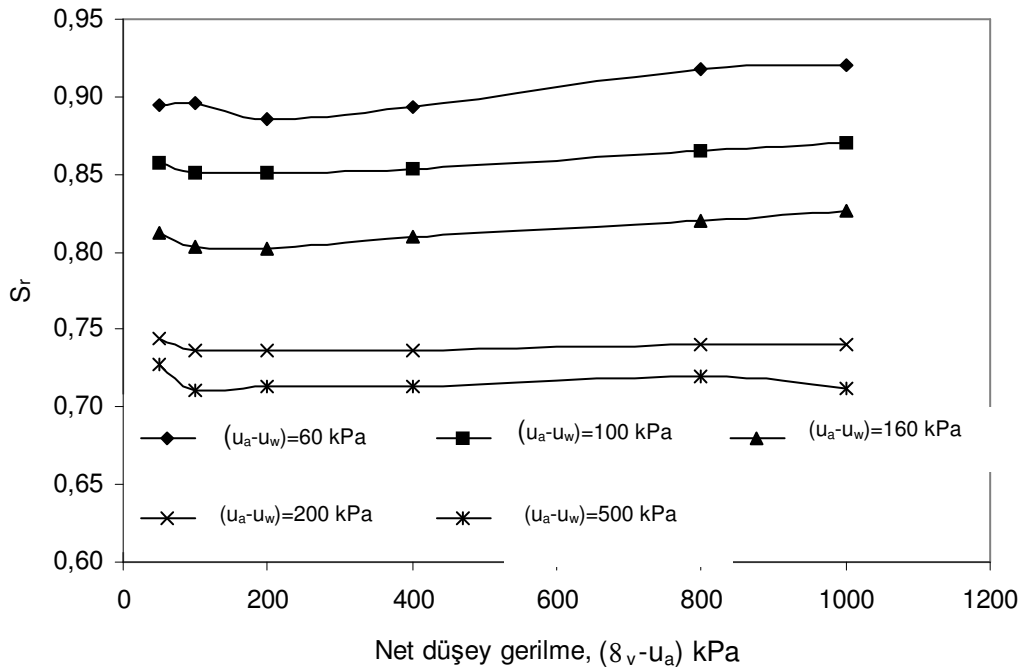
Şekil 4.44. Kayapınar Kili'nin farklı düşey basınç altında matrik emme-doygunluk derecesi ilişkisi



Şekil 4.45. Havuzlubahçe Silti'nin farklı düşey basınç altında matrik emme-doygunluk derecesi ilişkisi



Şekil 4. 46. Sabit matrik emme basıncı altında Kayapınar Kili'nin doygunluk derecesinin net düşey gerilme ile değişimi



Şekil 4. 47. Sabit matrik emme basıncı altında Havuzlubahçe Silti'nin doygunluk derecesinin net düşey gerilme ile değişimi

5. SONUÇ

Bu çalışmada; suya doygun olmayan zeminlerin, K_0 koşullarında, yanal zemin basınçlarını incelemek için, yeni bir deney düzeneği oluşturulmuş ve bu düzenek ile, matrik emme basınçları kontrol edilerek, yanal basınçlar ölçülmüştür. Elde edilen deney verilerinin değerlendirilmesi, aşağıdaki sonuçları vermiştir:

İmal edilen deney düzeneği ile, suya doygun olmayan zeminlerin konsolidasyonu yanında, yanal basınçlarının da ölçülmesi olanaklıdır. Sözü edilen deney düzeneğinde, matrik emme basınçları eksen kaydırma tekniği ile kontrol edilmektedir. Eksen kaydırma tekniğinde kullanılması zorunlu olan seramik diskler, yüksek basınçlar karşısında, çok kolay kırılabilir. Disklerin kırılabilirliği, önerilen deney düzeneğinde, dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan birisidir. Bunlara ek olarak; seramik disk'in doyurulması da, zemin-su içeriğinin doğru tayini bakımından önemli ikinci bir özelliktir.

Deneylerde, kalıplanarak hazırlanan killi ve standart kompaksiyon ile hazırlanan siltli numune olmak üzere, iki farklı zemin türü kullanılmıştır. Her iki tip zemin numunesi üzerinde yapılan konsolidasyon deneylerinde, matrik emme basıncı arttıkça sıkışabilirliğin azaldığı gözlenmiştir. Diğer bir ifade ile, aynı net düşey gerilme ve daha büyük matrik emme basınçları altında, oturmalar daha küçük olmaktadır.

Doygun durumda ölçülen yanal gerilmeler ile, uygulanan düşey gerilmeler arasındaki ilişkinin lineere oldukça yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, uygulanan düşey gerilme ile K_0 'ın değişimi incelendiğinde, K_0 'ın küçük yüklemelerde daha büyük değerler aldığı gözlenmiştir. Bu durum, ön konsolidasyon basıncının etkisinden kaynaklanmaktadır. Doygun durumda, killi zeminin K_0 değeri, ortalama olarak 0.67 olarak ölçülürken; siltli numuneye ait bu değer 0.43 olarak ölçülmüştür.

Doymamış koşullarda ve sabit matrik emme basıncı altında ölçülen yanal gerilmeler, uygulanan düşey gerilmeler ile yaklaşık olarak lineer değişmektedir. Bu durum hem killi, hem de siltli numunelerde gözlenmiştir. Uygulanan matrik emme basınç sınırları içerisinde killi zeminde K_0 , 0.66 ile 0.42 arasında değerler alırken, siltli zemin için bu değerler 0.39 ile 0.30 arasında kalmıştır.

Düşey basınç sabit kalırken matrik emme değeri artırıldığı zaman, yanal basınçlar azalmaktadır. Bu olay K_0 değerinin, söz konusu koşullar altında, azaldığını ifade eder. Yanal zemin basınç katsayısının işaret edilen azalma durumu hem kalıplanmış, hem de kompakte edilmiş her iki zemin türü için geçerliliğini korumuştur. Bu saptama, “sabit düşey gerilme altında matrik emmenin artması K_0 değerinin azalmasıyla sonuçlanır” gibi bir yargıya götürmüştür.

K_0 değerinin azalması, zemin numunesine ait su içeriği ve doygunluk derecesinin azalarak, artan matrik emme ile birlikte, daha kuru bir yapıya sahip olduğunu ifade eder. Zemin numunesinin kuruması, rijitliğinin artmasına ve yanal yönde gerilme iletkenliğinin azalmasına, hacımsal sıkışma katsayısının küçülmesine neden olmaktadır. Sonuçta, matrik emme ile K_0 arasında negatif bir ilişki söz konusudur. Bu ilişki, yaklaşık olarak, lineer bir ilişki olup, S_r doygunluk derecesinin de lineer olması sonucunu doğurmaktadır. Yapılan regrasyon analizleri; $K_0-(u_a-u_w)$ arasında (korelasyon katsayısı killi zeminler için %90-%94 ve siltli zeminler için %73-%94) lineer bir ilişki alınabileceğini vermiştir. Buna paralel olarak; K_0-S_r arasında da lineer bir ilişkiden söz edilebilir (Killi zemin için korelasyon katsayısı %89-%96; siltli numune için ise, %88-%97’dir).

Killi ve siltli zemin numunelerinin doymun durumda ölçülen K_0 değerleri, kaynaklarda verilen bazı ampirik ifadelerden bulunan değerler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda, ampirik ifadelerin bir kısmının ölçülen değerlerden büyük, diğer bir kısmının da küçük değerler verdiği görülmüştür. Killi numune için ölçülen K_0 değerine en yakın sonuç, Jacky (1944) ve Broker ve Ireland (1965) tarafından verilen, içsel sürtünme açısına bağlı, ifadelerden elde edilmiştir. Siltli numunenin, doymun durumda ölçülen K_0 değerine en yakın sonucu Rowe (1957) tarafından önerilen 1. denklem vermiştir. Sabit matrik emme altında yapılan deneylerde, matrik emme arttırıldığında yenilme gerilmelerinin (ön konsolidasyon basıncı) de arttığı gözlenmiştir. Bu durum değerlendirildiğinde, doymamış koşullarda da gerilme tarihçesinin K_0 üzerinde etkisi olduğu görülmüştür. Kaynaklardaki AKO değerine bağlı K_0 ifadeleri kullanılarak hesaplanan yanal basınçlar, matrik emme basıncı altında ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır. Ancak, hesaplanan değerlerin

ölçülen değerler ile uyum içinde olmadığı görülmüştür. Sonuç olarak AKO değerine bağlı olarak K_o 'ın hesaplanması, suya doymun olmayan zeminler için, uygun değildir.

Ayrıca imal edilen konsolidasyon aleti ile, yanal basınçlar daha doğru ölçülebilmektedir; Bu olanak dayanma yapılarının ve bodrum katı perde duvarlarının daha gerçekçi hesap olanağını sunmaktadır.

Öte yandan bilinen yolda su-karakteristik eğrisi, basınç plakası (Pressure Plate) denilen alet ile çıkarılmaktadır. Basınç plakası yönteminde zemin üzerine uygulanan ilave normal basınç ($\sigma-u_a$) bulunmamaktadır. Oysa geliştirilen yöntemde herhangi sabit normal gerilme altında su-karakteristik eğrisi çıkarılabilmektedir.

Su-karakteristik eğrisinin elde edilmesi hidrolik iletkenlik ve diffuzivite katsayısının, su içeriğinin değişiminin bulunmasında önemlidir. Hidrolik iletkenlik ve diffuzivite katsayısı, doymun olmayan zeminlerin drenaj problemlerinin çözümünde önem taşır. Buna ek olarak hidrolik parametrelerin bulunması, sulama projelerinin hazırlanmasında da kullanılan parametrelerdir. Sonuç olarak imal edilen düzenele, şimdiye kadar, klasik ödometre ile ölçülemiyen ve tayin edilemeyen zemin özellikleri ölçülebilmek olanağına kavuşmuştur.

KAYNAKLAR

- ABDELHAMID, M.S., and KRIZEK, R.J., 1976. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 7, 721.
- AL-KHAFAR, S. ve HANKS, R.J., 1974. Evaluation of the Filter Paper Method for Estimating Soil Water Potential. Soil Sci. Vol.117, pp.194-199
- ALPAN, I., 1967. The Empirical Evaluation of the Coefficient K_0 and K_{0R} . Soil Foundation, Vol 7, No. 1, pp 31-40.
- ANDRAWES, K.A., and EL-SHOBY, M.A., 1973. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 7, 527.
- AVERSA, S. and NICOTERA, M.V., 2002. A triaxial and Oedometer Apparatus for testing unsaturated soils. Geotechnical Testing Journal, Vol. 25, No. 1, 3-15.
- BARDEN, L., MADEDOR, A.O. and SIDES, G.R., 1969. Volume Change Characteristics of Unsaturated Clay. ASCE J:Soil Mech. Found. Div., Vol.95, SM1, pp.33-52.
- BAYLISS, J., 1948. Design, Calibration and Use of The Lateral Earth Pressuremeter. MS Thesis, Princeton University.
- BEDİŞKAN, E., 1993. Effects of Over Consolidation Ratio on Coefficient of Lateral Earth Pressure at-rest. M.S.Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 149s.
- BISHOP, A.W. and BLIGHT, G.E., 1963. Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils.. Géotechnique, Vol. 13, No. 3:177-197.
- BISHOP, A.W. and DONALD, I.B., 1961. the Experimental Triaxial Study of Partly Saturated Soil in the Triaxial Apparatus. in Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Paris France, Vol.1, pp.13-21.
- BISHOP, A.W. and ELDIN, A.K., 1950. Undrained Triaxial Tests on Saturated Sands and Their Significance in the General Theory of Shear Strength. Geotechnique, Vol.2, No.1, 13-22 p.
- BISHOP, A.W., and HENKEL, D.J., 1962. The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test. Second Edition. Arnold Publishing Comp. UK.

- BOWLES, J.E., 1988. Foundation Analysis and Desing. Mc.Graw-Hill Int.Edition, 4th Edition, New York, U.S.A.
- BROOKER, E.W., and IRELAND, H.O., 1965. Earth Pressure at-rest Related to the Stress History. Canadian Geotechnical Journal, Vol 2, No. 1, pp 1-15.
- BUCKINGHAM, E., 1907. Studies of the Movement of Soil Moisture. U.S.D.A. Bur. of Soils, Bulletin No. 38.
- COREY A.T., ve KEMPER W.D., 1961. Concept of Total Potential in Water and Its Limitations, Soil Sci., Vol.91, No.5, pp.299-305.
- CRONEY, D. COLEMAN, J.D. and BRIDGE, P.M., 1952. The Suction of Moisture Held in Soils and Other Porous Materials. Tech. Paper, Road Research Board, no.24, H.M.S.O., London.
- CUNNINGHAM, M.R., RIDLEY, A.M., DINEEN, K. and BURLAND, J. B., 2003. The Mechanical Behaviour of Reconstituted Unsaturated Silty Clay. Geotechnique, Vol. 53, No.2, 183-194
- DAS, B.M., 2002. Principles of Geotechnical Engineering. Brooks Cole. U.S.A. 589p.
- DELAGE, P., VICOL, T. and SURAJ DE SILVA, G.P.R., 1992. Suction Controlled Testing of Saturated Soils with an Osmotic Controlled Consolidometer. Proc. 7th ICES, Dallas, pp.206-211.
- DONATH, A.D.,1891. Untersuchungen Veber den Erddruck auf Stuetzwaende. Zeitschrift Fuer Bauwesen.
- EDİL, T.B and DHOWIAN, A.W., 1981. At-Rest Lateral Pressure of Peat Soils. Journal of Geo. Eng, Vol.107, 201220 p.
- EDLEFSEN N.E. ve ANDERSON A.B.C., (1943). Thermodynamics of Soil Moisture. Hilgardia, Vol.15 p.31-298.
- ERTEKİN, Y., 1991. Meassurement of Lateral Swell Pressure with Thin Wall Oedometer Technique. M.S. Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 114s.
- ESCARIO, V. and SAEZ, J.,1986. The strength of partly saturated soils. Géotechnique, Vol. 36, No. 3: 453-456.

- FREDLUND D.G. and RAHARDJO H., 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. New York, Wiley, 517s.
- FREDLUND D.G. and RAHARDJO H., 2003. K_o -Volume Change Characteristics of an Unsaturated Soil with Respect to Various Loading Paths. Geotechnical Testing Journal, Vol. 26, No.1, pp.1-13.
- GAN, J.K.M. and FREDLUND D.G., 1988. Multistage Direct Shear Testing of Unsaturated Soils. ASTM, Geotechnical Testing Journal, Vol.11 No.2, pp.132-138
- HENDRON, A.J., 1963. The Behaviour of Sand in One Dimensional Compression. Ph.D. Thesis, University of Illinois, U.S.A.
- HILF, J.W., 1956. An Investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soils. Ph.D. Dissertation, Tech. Memo. No.654, U.S. Dep. of The Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Div., Denver, Co, 654 pp.
- HOLD, R.M. and KRIZEK, R.J., 1971. Effects of Stress Path and Overconsolidation Ratio on the shear strength of a Kaolin Clay. Proc. 5th Regional Conf. for Africa on Soil. Mech. and Found. Eng. Luanda, Angola, Vol.1 No. 3, p. 17-25.
- HVORSLEV, M.J., 1960. Physical Components of the Shear Strength of Saturated Clays. Proc. of the Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils. ASCE, Boulder, Colo., pp.169-273.
- JACKY, J., 1944. The Coefficient of Earth Pressure at-rest. Journal for the Society of Hungarian Architects and Engineers, Budapest, Hungary, 355-358 p.
- JACKY, J., 1948. Pressure in Soils. 2nd edition, ICSMFE, Vol. 1, pp 103-107.
- KASSIFF, G. and BEN SHALOM, A., 1971. Experimental Relationship Between Swell Pressure and Suction. Geotechnique, Vol.21, No.3. 245-255 p.
- KJELLMAN, W., 1936. Report on Apparatus for the Consummate Investigation of the Mechanical Properties of Soils. Proceedings, 1st International Conference on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 2, 16-20.
- KRAHN, J. and FREDLUND, D.G., 1972. On Total Matric and Osmotic Suction. J. Soil Sci., Vol.114, No.5, pp.339-348.

- KRIZEK, R.J. and ABDELHAMID, M.S., 1977. Indirect Determination of K_0 from Multi-Stage Triaxial Compression Test. *Geotechnical Eng*, 8, 31.
- KUMBASAR, V., ve FAZIL, K., 1973. *Zemin Mekaniği*. İstanbul, 358s.
- MASSARCH, K.R., and BROMS, B.B., 1976. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 10, 1041.
- MAYNE, P.W. and KULHAWY, F.H., 1982. K_0 -OCR Relationships in Soil. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, @ASCE, Vol.108, no. GT6. 851-871 p.
- MENZIES, B.K., SUTTON H., and DAVIES, R.E., 1977. A New System for Automatically Simulating K_0 Swelling in the Conventional Triaxial Cell. *Geotechnique*, Vol. 27, No.4, 593-596 p.
- MESRI, G. and HAYAT, T.M., 1993. The Coefficient of Earth Pressure at-rest. *Can. Geotech. J.* Vol. 30. 647-666.
- MORRISON, R.D., 1983. *Ground Water Monitoring Technology. Procedures, Equipment and Applications*. Published by Timco Mfg., Inc., Prairie Du Sac, WI, 111pp.
- ÖNALP, A., 2002. *Geoteknik Bilgisi-I. Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği*. Birsen Yayınevi, İstanbul, 408s.
- ÖZOCAK, A., 2003. *Doygun Olmayan Siltli Zeminlerin Sıkışabilirliği*. Doktora Tezi. Sakarya Üniversitesi. Sakarya.
- ÖZAYDIN, K., 1989. *Zemin Mekaniği*. Meya Matbacılık ve Yayıncılık, İstanbul, 395s.
- PARCHER, J.V. and MEANS, R.E., 1968. *Soil Mechanics and Foundations*. E. Merrill Publishing Co. Columbus OH. 573 p.
- PHENE, C.J., HOFFMAN, G.J: and RAWLINS, S.L., 1971. Measuring Soils Matric Potential in Situ by Sensing Heat Dissipation with a Porous Body. *Theory and Sensor Construction*, *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, Vol.35 pp.27-32.
- RICHARDS B.G., 1965. Measurement of the Free Energy of Soil Moisture by the Psychrometric Technique Using Thermistors, in *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas*. A Symp. In Print. Australia: Butterworths. pp.39-46.

- RICHARDS L.A., 1928. The Usefulness of Capillary Potential to Soil Moisture and Plant Investigators. J. Agric. Res., Vol. 37, pp.719-742.
- ROMERO, E., LLORET, A. and Gens, A., 1995. Development of a New Suction and Temperature Controlled Oedometer Cell, Proc. 1st IC on Unsaturated Soils, UNSAT'95, Paris, Vol.2, pp.33-559.
- ROWE, P.W., 1958. General Report on Papers in Section 1. Proceeding of a Conference on Earth Pressure Problems, Belgium, Vol.3, 25-30 p.
- RUTLEDGE, P.C., 1948. Review of Cooperative Triaxial Research Program of the Corps of Engineers. Progress Report on Soil Mechanics Finding Survey. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- SAĞLAMER, A., 1972. Kohezyonsuz Zeminlerde Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısının Zemin Parametreleri Cinsinden İfadesi. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- UZUNER, B.A., 1992. Temel Zemin Mekaniği. Teknik Yayınevi, Ankara, 291s.
- TEKİNSOY, M.A. 2002. Doymamış Zeminlerin İndeks ve Hidrolik Özellikleri. S.D.Ü. Basımevi, Isparta, 797s.
- TEKİNSOY, M.A., ve LAMAN, M., 2000. Elastik Zemin Problemleri. Süleyman Demirel Üniversitesi Basımevi, Isparta, 316s.
- TEKİNSOY, M.A., KAYADELEN, C., KESKİN, S. ve SÖYLEMEZ, M., 2004. An Equation for Predicting Shear Strength Envelope with Respect to Matric Suction. Computers and Geotechnics Vol. 31 No.7, pp.589-593
- TEKİNSOY, M.A., and HAKTANIR, T., 1989. One-Dimensional Consolidation of Unsaturated Fine-Grained Soil. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 5, pp. 838-850.
- TERZAGHI, K., 1920. Old Earth Pressure Theories and New Test Result. Engineering News Records, Vol.14, No.85, 634p.
- TERZAGHI, K., 1925. Principles of Soil Mechanics, II-Compressive Strength of Clay. Engineering News Record, Vol 20, No. 95.
- TING, C.M.R., SILLS, G.C. and WIJEYESEKERA, D.C., 1994. Development of K_0 in Soft Soils. Geotechnique, Vol. 44. No.1, 101-109 p.

- TSE, TS 1500, 2000. İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması. TSE yayını, Ankara.
- TSE, TS 1900, 1987. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri. TSE yayını, Ankara.
- YILDIZ, A.A., ve LAMAN, M., 1996. Presyometre Verilerinden Yararlanılarak Temellerin Tasarımı. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sergi ve Seminerleri, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, s. 67-81.
- YAMAMURO, J.A., BOPP, P.A. AND LADE, P.V., 1996. One-Dimensional Compression of Sands at High Pressures. Journal of the Geotechnical Engineering, Vol. 122, no.2, 147-154 p.
- ZAPATA, C.E., 1999. Uncertainty in Soil Water Characteristic Curve and Impacts on Unsaturated Shear Strength Predictions, Ph.D. Thesis, Arizona State University.
- ZHU, F. and CLARK, J.I., 1994. The Effect of Dynamic Loading on Lateral Stress in Sand. Can. Geotech. J. Vol. 31. 308-311.

ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında Malatya'nın Darende ilçesinde doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimimi Adana'da tamamladım. 1997 yılında Niğde Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldum. Ocak 1998'de mezun olduğum fakültede araştırma görevlisi kadrosuna atandım. Aynı yıl Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne 35. Madde uyarınca atandım ve İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans çalışmalarına başladım. Temmuz 2001'de Yüksek Lisans'ı bitirerek doktora çalışmalarına başladım.