

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPILARA AKTARILAN ŞİŞME BASINÇLARININ ÖLÇÜLMESİ VE
SIKIŞABİLİR MALZEMELER KULLANILARAK AZALTILMASI

139255

İnşaat Yük. Müh. S. Banu İKİZLER

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"Doktor"
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09. 06. 2003

Tezin Savunma Tarihi : 08. 07. 2003

139255

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mustafa AYTEKİN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fikri BULUT

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ

Trabzon 2003

TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÖNSÖZ

Yapılara aktarılan şişme basınçlarının ölçülmesi ve sıkışabilir malzemeler (gefoam) kullanılarak azaltılması konusundaki bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Doktora tez danışmanlığımı üstlenerek, ilgi duyduğum bir konu üzerinde çalışmamı sağlayan, çalışmalarım sırasında bilgisini ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Mustafa AYTEKİN'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tezimin hazırlanması ve deneysel çalışmalarımın sürdürülmesi sırasında çok değerli yardımlarından dolayı Arş.Gör. Evin NAS, Yrd. Doç. Dr. Serkan NAS, Öğr. Gör. Erkan NAS, Arş.Gör. Ferkan SİPAHİ, Arş.Gör. Raif KANDEMİR, Teknisyen Fikret BÜLBÜL, Uzman Ali SEMERCİ ile İnşaat Mühendisliği bölümündeki tüm hocalarım ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu çalışmayı, 20.112.001.3 numaralı proje olarak maddi açıdan destekleyerek, gerekli olan malzeme ve aletlerin alınmasını sağlayan, K.T.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Ayrıca doktora çalışmalarım sırasında bana gerek maddi, gerekse manevi konularda destek olan babam Osman HALİLOĞLU'na , annem Ergül HALİLOĞLU'na, eşim Öğr. Gör. Dr. Nuri İKİZLER'e, kızım Doğa İKİZLER'e, kardeşlerim Nergis HALİLOĞLU ve Selin KILIÇ'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Deneysel düzeneklerimin yapım ve tasarım aşamasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Hüseyin KADIOĞLU şahsında DEMİRTAŞ A.Ş.ve çalışanlarına, Makine Mühendisliği Bölümü elemanlarından İbrahim OKUTAN teşekkür eder, yapılan bu çalışmanın ileride yapılacak çalışmalar için faydalı olmasını dilerim.

S. Banu İKİZLER
Trabzon 2003

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Çalışmanın Amacı.....	2
1.3. Literatür Çalışması.....	3
1.3.1. Kil Mineralleri	3
1.3.1.1. Montmorillonit Minerali.....	7
1.3.1.2. Katyon Değişirme Kapasitesi	10
1.3.1.3. Kil ve Su	13
1.3.1.4. Kil Minerallerinin Mühendislik Özellikleri.....	18
1.3.2. Şişen Zeminler	19
1.3.2.1. Şişen Zeminlerin Belirlenmesi	22
1.3.2.1.1. Mineralojik Tanımlama	22
1.3.2.1.1.1. X Işını Analizi.....	23
1.3.2.1.1.2. Diferansiyel Termal Analiz.....	23
1.3.2.1.1.3. Boya Adsorbsiyonu	24
1.3.2.1.1.4. Kimyasal Analiz.....	25
1.3.2.1.1.5. Elektron Mikroskobunda Belirleme.....	25
1.3.2.1.2. Tekil İndeks Yöntemi	25
1.3.2.1.2.1. Atterberg Limiti Deneyleri.....	26
1.3.2.1.2.2. Lineer Büzülme Deneyleri	26
1.3.2.1.2.3. Serbest Şişme Deneyleri	27

1.3.2.1.2.4.	Kolloid İçeriği Deneyleri	27
1.3.2.1.3.	Sınıflandırma Yöntemleri	28
1.3.2.1.3.1.	USBR Yöntemi	29
1.3.2.1.3.2.	Aktivite Yöntemi	31
1.3.2.1.3.3.	USAEWES Yöntemi.....	32
1.3.2.1.4.	Dolaylı Ölçümler.....	33
1.3.2.1.4.1.	PVC Ölçümü.....	33
1.3.2.1.4.2.	Genleşme İndisi	34
1.3.2.1.4.3.	Şişme İndisi.....	35
1.3.2.1.5.	Doğrudan Ölçümler	36
1.3.2.2.	Şişmenin Oluşma Biçimi	38
1.3.3.	Şişme Karakteristiklerinin Belirlenmesi	43
1.3.3.1.	Şişme Potansiyeli	44
1.3.3.2.	Şişme Basıncı.....	44
1.3.4.	Şişme Tahmini İçin Kullanılan Yöntemler	45
1.3.4.1.	Ödometrik Yöntemler	45
1.3.4.1.1.	Sabit Yük Ödometre Deneyleri.....	49
1.3.4.1.1.1.	Serbest Şişme Ödometre Deneyi.....	49
1.3.4.1.1.2.	Çift Ödometre Deney Yöntemi	51
1.3.4.1.1.3.	Yüklenmiş Şişme Ödometre Deneyi.....	53
1.3.4.1.1.4.	Direkt Model Yöntemi.....	55
1.3.4.1.1.5.	Çin Yöntemi.....	56
1.3.4.1.2.	Sabit Hacim Ödometre Deneyleri	57
1.3.4.1.2.1.	Sabit Hacim Ödometre Deney Yöntemi	57
1.3.4.1.2.1.1.	Numune Alma Sırasındaki Örselenmeler İçin Düzeltme.....	59
1.3.4.1.2.2.	Sullivan ve McClelland Yöntemi.....	61
1.3.4.1.2.3.	Deformasyon Kontrollü Deney Yöntemi	62
1.3.4.1.3.	Çeşitli Ödometrik Yöntemlerin Karşılaştırılması	63
1.3.4.2.	Ampirik Yöntemler.....	69
1.3.4.2.1.	Şişme Potansiyelinin Belirlenmesi İle İlgili Çalışmalar	69
1.3.4.2.2.	Şişme Basıncının Belirlenmesi İle İlgili Çalışmalar	72
1.3.4.3.	Emme Gerilmesi Yöntemleri	74
1.3.5.	Şişmeye Etki Eden Faktörler.....	76

1.3.5.1.	Şişme Potansiyeline Etki Eden Faktörler.....	76
1.3.5.1.1.	Başlangıç Su Muhtevası.....	76
1.3.5.1.2.	Başlangıç Kuru Birim Hacim Ağırlığı.....	78
1.3.5.1.3.	Sürşarj Yüğü	81
1.3.5.1.4.	Kompaksiyon Etkisi.....	82
1.3.5.1.5.	Kil İçeriğı ve Kil Minerali Tipinin Etkisi	83
1.3.5.2.	Şişme Basıncını Etkileyen Faktörler.....	84
1.3.6.	Yanal Şişme Basıncı	86
1.3.6.1.	Şişen Zeminlerde Yanal Basınc Tahmin Yöntemleri	89
1.3.6.1.1.	Yanal Şişme Basıncı Ölçümlerinde Kullanılan Başlıca Deneysel Analizler.....	89
1.3.6.1.1.1.	Ödometre Halkası İle Yanal Basıncın Ölçülmesi	102
1.3.6.1.1.2.	Değıştirilmiş Üç Eksenli Düzenek İle Yanal Basıncın Ölçülmesi.....	107
1.3.6.1.1.3.	Laboratuar Model Deneşleri İle Yanal Basıncın Ölçülmesi	112
1.3.6.1.1.4.	Arazi Deneşleri İle Yanal Basıncın Ölçülmesi	115
1.3.6.2.	Yanal Şişme Basıncını Etkileyen Faktörler	118
1.3.6.2.1.	Kuru Birim Hacim Ağırlıının Etkisi	118
1.3.6.2.2.	Doygunluk Derecesinin Etkisi	119
1.3.6.2.3.	Sürşarj Yüğüünün Etkisi	119
1.3.6.2.4.	Derinlik Faktörünün Etkisi	119
1.3.6.2.5.	Kompaksiyon Yönteminin Etkisi.....	119
1.3.7.	Şişme Basınclarının Azaltılması	120
1.3.7.1.	EPS (Genleştirilmiş Polistiren).....	122
1.3.7.1.1.	EPS'in Mühendislik Uygulamalarında Kullanımı	122
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR ve BULGULAR	125
2.1.	Deneşsel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	126
2.1.1.	Şiran-2 Kili	126
2.1.1.1.	Şiran Yöresinin Jeolojisi.....	126
2.1.1.2.	Mineralojik Özellikler.....	127
2.1.1.2.1.	Diferansiyel Termal Analiz.....	128
2.1.1.2.2.	X Işını Analizi.....	129
2.1.1.2.3.	Kimyasal Analiz.....	130
2.1.1.3.	Temel Özellikler	131

2.1.1.3.1.	Kıvam Limitleri	131
2.1.1.3.2.	Zeminin Sınıflandırılması	132
2.1.1.4.	Kompaksiyon Özellikleri	134
2.1.1.5.	Geçirimlilik Özellikleri	134
2.1.1.6.	Dayanım Özellikleri	134
2.1.1.7.	Şişme Özellikleri	135
2.1.2.	Bentonit	137
2.1.2.1.	Mineralojik Özellikler	137
2.1.2.1.1.	Diferansiyel Termal Analiz	137
2.1.2.1.2.	X Işını Analizi	138
2.1.2.2.	Temel Özellikler	139
2.1.2.2.1.	Kıvam Limitleri	139
2.1.2.2.2.	Zeminin Sınıflandırılması	140
2.1.2.3.	Kompaksiyon Özellikleri	140
2.1.2.4.	Dayanım Özellikleri	141
2.1.2.5.	Şişme Özellikleri	141
2.1.3.	Karışık Zemin	143
2.1.3.1.	Temel Özellikler	143
2.1.3.1.1.	Kıvam Limitleri	143
2.1.3.1.2.	Zeminin Sınıflandırılması	143
2.1.3.2.	Kompaksiyon Özellikleri	144
2.1.3.3.	Geçirimlilik Özellikleri	145
2.1.3.4.	Dayanım Özellikleri	145
2.1.3.5.	Şişme Özellikleri	146
2.1.4.	Kohezyonlu Şişmeyen Zemin	146
2.1.4.1.	Mineralojik Özellikler	147
2.1.4.1.1.	Diferansiyel Termal Analiz	147
2.1.4.1.2.	X Işını Analizi	148
2.1.4.2.	Temel Özellikler	149
2.1.4.2.1.	Kıvam Limitleri	149
2.1.4.2.2.	Zeminin Sınıflandırılması	149

2.1.4.3.	Kompaksiyon Özellikleri	151
2.1.4.4.	Geçirimsizlik Özellikleri.....	151
2.1.4.5.	Dayanım Özellikleri.....	152
2.1.5.	EPS (Genleştirilmiş Polistiren).....	152
2.1.5.1.	Yoğunluk	152
2.1.5.2.	Sıkışma.....	153
2.1.5.2.1.	Basınç Dayanımı ve Gerilme-Şekil Değişirme Eğrisi	153
2.1.5.2.2.	Başlangıç Elastisite Modülü	154
2.1.5.2.3.	Poisson Oranı	155
2.1.5.2.4.	Yükleme Oranı Etkisi	156
2.1.5.2.5.	Tekrarlı Yüklemeler.....	156
2.1.5.3.	Çekme	156
2.1.5.4.	Eğilme.....	156
2.1.5.5.	Akma.....	157
2.1.5.6.	Ara Yüzey Sürtünmesi.....	157
2.1.5.7.	Isıl Dayanım.....	157
2.1.5.8.	Ültraviyole Etkisi	158
2.1.5.9.	Yanıcılık	158
2.1.5.10.	Su Emme Oranı.....	158
2.1.5.11.	Enerji Absorpsiyonu	159
2.1.5.12.	Akustik Özellikler	159
2.1.5.13.	Dayanıklılık.....	160
2.1.5.14.	Çevresel Etki.....	160
2.2.	Yanal Şişme Basınçlarının Ölçülmesi	160
2.3.	Yanal ve Düşey Şişme Basınçlarının Ölçülmesi.....	166
2.4.	Düşey Şişme Basınçlarının Ölçülmesi.....	186
3.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	192
4.	ÖNERİLER.....	197
5.	KAYNAKLAR	198

ÖZET

Zeminlerin önemli bir bölümü, su muhtevasındaki değişime bağlı olarak şişme ve büzölmeye uğrarlar. Şişen zemin olarak isimlendirilen bu tür zeminlerin üzerine yapılacak yapılarla serbestçe şişmeleri engellendiğı zaman, şişme basıncı olarak tanımlanan büyük gerilmeler doğmaktadır. Meydana gelen bu gerilmelerle, şekil değıştirmelerin belirlenmesi çok önemli bir problemdir. Ayrıca çoğı durumda doğru arazi verilerini elde etmek de çok zordur.

Bu çalışmada, şişen killer üzerine veya içine inşa edilecek olan yapılara aktarılan şişme basınçlarının deneysel modeli kurularak, bu basınçların ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu basınçların önceden belirlenmesi ve şişmeye etki eden faktörlerin incelenmesi ile, üzerine yatırım yapılacak zeminlerin hacim değıştirmesi ile meydana getireceğı hasarlar önceden tahmin edilerek, gerekli önlemleri almak mümkün olacaktır. Bu amaç doğrultusunda laboratuarda iki tane model kurulmuştur. Bunlardan birincisi 80*105*20 cm. boyutlarında olan büyük deney düzeneğı, ikincisi ise daha küçük olan 25*25*30 cm. boyutlarındaki küçük deney düzeneğidir. Çalışmada kurulan büyük deney düzeneğinde, yanal şişme basınçlarının belli bir derinliğe kadar arttığı bu derinlikten sonra azaldığı gözlenmiştir. Küçük deney düzeneğı ve ödometre aletinde şişme basınçlarını belirlemek amacı ile EPS (Expanded Polystyrene Sytrofor) ve kohezyonlu şişmeyen zeminle (KŞZ) yapılan deneylerde, bu malzemelerin hem yanal hem de düşey basınçları büyük ölçüde azalttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, yanal ve düşey şişme basınçlarının EPS kalınlığının artması ile azaldığı ve deney düzeneğinin yan yüzeyine yerleştirilen EPS'in, şişme basınçlarını azaltmada aynı kalınlıktaki KŞZ'ye göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

Ülkemizde her yıl bir çok yapının inşa edildiğı ve bir o kadarının da hasara uğradığı göz önüne alındığında, şişen zeminlerin neden olduğu hasarların ortadan kaldırılması ülke ekonomisine büyük yarar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Şişen Zeminler, Genleşen Zeminler, Şişme Yüzdesi, Yanal Şişme Basıncı, Düşey Şişme Basıncı, EPS.

SUMMARY

Measurement Swelling Pressures Transmitted to Structures and Reducing These Pressures by Compressible Materials

Some soils can swell and shrink due to the variation of their water contents. When the soils, named as swelling soils or expansive soils, are blocked to swell freely by building up the constructions to their upper surface, a big amount of stretches, defined as swelling pressure, can be appeared. Determining the shape transformation by these stretches is a very important problem. Also, getting the correct field data is very difficult in most conditions.

The aim of this study is the measurement of applied pressure by establishing with the experimental model of applied pressure above or inside the swelling clays, structures. The volume changes of the investigated fields can be predicted with the estimation of these pressures and factors which effect the swelling. So, required preventations could be possible. Two models have been assembled for this aim direction. Respectively, large model in 80*105*20 cm. dimensions and small model in 25*25*30 cm. dimensions. Increment of the lateral swelling pressures at the certain depth and reduction of swelling pressure at the same depth, have been observed at a large laboratory model which was assembled at this study. Expanded Polysytrene Sytrofor (EPS) and cohesive nonswelling soils (CNS) have been used in a smaller experimental model and odemeter tool, in order to reduction transmitted swelling pressure. A very important amount reduction on the lateral and vertical swelling pressures have been determined. According to the results, lateral and vertical swelling pressures have been reduced by increasing of EPS thickness. Also, EPS which has been placed the backing of laboratory model has been found more effective in order to reduce swelling pressures, compared with the CNS at the same thickness of EPS.

Reduction of transmitted swelling pressures will provide a great amount of benefit to the economy, considering construction of many structures which are damaged due to transmitted swelling pressures every year in our country.

Key Words: Swelling Soils, Expansive Soils, Swelling Percentage, Lateral Swelling Pressure, Vertical Swelling Pressure, EPS.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Tetrahedral tabaka	6
Şekil 2. Oktahedral tabaka	8
Şekil 3. Tetrahedronların çift zincirinin gösterimi (a) Perspektif görünümü (b) Tetrahedronların taban düzlemlerinin planı	9
Şekil 4. Montmorillonit yapısının taslağı.....	10
Şekil 5. Sudaki oksijen ve hidrojenin düzeni.....	15
Şekil 6. Suyun gösterilişi	16
Şekil 7. Su molekülü.....	17
Şekil 8. Killerin etrafındaki çift tabakadaki adsorbe su ve katyonlar	18
Şekil 9. Şişme potansiyeli ile kil boyutu yüzdesi arasındaki ilişki	28
Şekil 10. Kolloid içeriği, plastisite indisi ve büzülme limitinin, hacim değişimi ilişkisi	29
Şekil 11. Hacim değişimi, plastisite indisi ilişkisi	31
Şekil 12. Şişme potansiyeli sınıflandırma kartı	32
Şekil 13. Şişme indisi, potansiyel hacim değişimi ilişkisi	34
Şekil 14. Likit limit, şişme indisi ilişkisi	36
Şekil 15. Saf sudaki kil miseli	39
Şekil 16. İki kil danesi arasındaki gerilmeler.....	39
Şekil 17. Osmotik basınç	41
Şekil 18. Kil parçacıkları etrafındaki çift tabaka	42
Şekil 19. Şişme tahmin metotları.....	47
Şekil 20. Serbest şişme ödometre deneyi.....	49
Şekil 21. Çift ödometre metodu.....	52
Şekil 22. Yüklenmiş şişme ödometre deneyi	53
Şekil 23. Direkt model yöntemi	55
Şekil 24. Çin yöntemi	56
Şekil 25. Örselenmemiş Regina kilinin, Çin yöntemi kullanılarak tespit edilen şişme basıncı-önceden tanımlanmış basınç ilişkisi.....	57
Şekil 26. Sabit hacim deney yöntemi.....	59

Şekil 27. Numune alma sırasındaki örselenmelerin düzeltilmesi	60
Şekil 28. Düzeltilmiş ve düzeltilmemiş şişme basıncı verilerinin karşılaştırılması	61
Şekil 29. Sullivian, McClelland yöntemi	62
Şekil 30. Deformasyon kontrollü deney yöntemi.....	63
Şekil 31. Sıkıştırılmış Regina kilinin boşluk oranı-şişme basıncı ilişkisinin farklı deney yöntemlerine göre karşılaştırılması	64
Şekil 32. Onderstepoort zemininin farklı deney yöntemleri ile şişme basıncı ve kabarmasının karşılaştırılması.....	64
Şekil 33. Serbest şişme ödometre ve sabit hacim ödometre deneylerinden elde edilen şişme basınçlarının karşılaştırılması	65
Şekil 34. İki bölgede ölçülen ve tahmin edilen şişmenin karşılaştırılması	66
Şekil 35. Sıkıştırılmış Regina kilinin boşluk oranı-şişme basıncı ilişkisi	68
Şekil 36. Zeminlerin şişme potansiyelinin tahmini.....	72
Şekil 37. Su muhtevasının hacim değişmesine etkisi	77
Şekil 38. Başlangıç su muhtevasının şişme basıncına etkisi.....	77
Şekil 39. Başlangıç su muhtevasının şişme yüzdesine etkisi.....	78
Şekil 40. Başlangıç su muhtevası ve likit limitin şişme yüzdesi ile ilişkisi.....	79
Şekil 41. Başlangıç su muhtevasının, şişmeye etkisi	79
Şekil 42. Kuru birim hacim ağırlığının hacim değişimine etkisi	80
Şekil 43. Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının şişmeye etkisi.....	81
Şekil 44. Şişme yüzdesi-sürşarj yükü ilişkisi.....	82
Şekil 45. Sürşarj yükünün hacim değişimine etkisi	83
Şekil 46. Kompaksiyon yönteminin şişme miktarına etkisi.....	83
Şekil 47. Başlangıç su muhtevası, şişme basıncı ilişkisi	86
Şekil 48. Kil içeriği, şişme basıncı ilişkisi.....	87
Şekil 49. Palplanşa etki eden yanıl basınçlar.....	88
Şekil 50. Duvar ile şişen zemin arasına, değişik kalınlıklarda kohezyonlu şişmeyen zemin (KŞZ), sadece şişen zemin veya sadece kohezyonlu şişmeyen zemin koyulması durumunda yatay basınçların derinlikle değişimi.....	98
Şekil 51. Şişen zeminin üzerine, değişik kalınlıklarda kohezyonlu şişmeyen zemin (KŞZ), sadece şişen zemin veya sadece kohezyonlu şişmeyen zemin koyulması durumunda yatay basınçların derinlikle değişimi.....	99
Şekil 52. Duvar arkası ve şişen zeminin üstünde, değişik kalınlıklarda kohezyonlu şişmeyen zemin (KŞZ), sadece şişen zemin veya sadece kohezyonlu şişmeyen zemin koyulması durumunda yatay basınçların derinlikle değişimi.....	100

Şekil 53.	Düşey hareketin, hem düşey hem de yatay basınca göre değişimi	103
Şekil 54.	Tipik bir birim hacim ağırlık-serbest şişme yüzdesi-yanal şişme basıncı ilişkisi.....	104
Şekil 55.	Kompaksiyon yönteminin, yanal şişme basıncı ve düşey şişmeye etkisi	105
Şekil 56.	Zamanın, yanal şişme basıncı ve düşey şişmeye etkisi.....	106
Şekil 57.	Sabit hacim yöntemi ile elde edilen, yanal şişme basıncı davranışları	106
Şekil 58.	Sabit hacim deneyi ile bulunan şişme basıncı değerleri	107
Şekil 59.	Uygulanan başlangıç hücre basıncıyla, nihai yanal deformasyonun değişimi.....	108
Şekil 60.	Yanal ve düşey basınçların ölçülmesi için değiştirilmiş üç eksenli düzenek	109
Şekil 61.	Yanal sınırlama basıncının, hacim değişimi ve düşey şişme basıncı ile değişimi.....	110
Şekil 62.	Farklı efektif gerilmeler altında ve izotropik gerilme durumunda ölçülen yan şişme basıncının zamana bağlı olarak değişimi.....	111
Şekil 63.	Farklı efektif gerilmeler altında ve izotropik gerilme durumunda ölçülen yanal şişme basıncının zamana bağlı olarak değişimi.....	111
Şekil 64.	Yanal şişme basıncı ölçüm düzeneği.....	112
Şekil 65.	Yanal ve düşey şişme basınçlarının zamanla değişimi.....	113
Şekil 66.	3. aşamada metal duvarın orta panelinde ki toplam yanal itki.....	114
Şekil 67.	Gerçek ölçekli deney düzeneği	115
Şekil 68.	Gerçek ölçekli deneyde yanal basıncın, derinlikle değişimi.....	116
Şekil 69.	Yanal şişme basıncı sondası	117
Şekil 70.	Arazi sondası ile bulunan yanal şişme basıncı ve düşey şişmenin zaman bağlı olarak değişimi	118
Şekil 71.	Geoteknik uygulamalarında sıkışabilir malzemenin kullanımı	121
Şekil 72.	Şiran yöresinin jeolojik haritası ve örnek alım yeri	127
Şekil 73.	Şiran-2 kilinin diferansiyel termal analiz sonucu	128
Şekil 74.	Şiran-2 kilinin X ışını analiz sonucu	129
Şekil 75.	Şiran-2 kilinin granülometri eğrisi.....	132
Şekil 76.	Şiran-2 kilinin birleştirilmiş sınıflandırma sistemi plastisite kartındaki yeri.....	133
Şekil 77.	Şiran-2 kilinin kompaksiyon eğrisi.....	135
Şekil 78.	Kuru haldeki numunenin kayma direnci parametreleri	136
Şekil 79.	Doğgun haldeki numunenin kayma direnci parametreleri.....	136

Şekil 80. Şiran-2 kilinin şişme basıncı.....	137
Şekil 81. Bentonitin diferansiyel termal analiz sonucu.....	138
Şekil 82. Bentonitin X ışını analiz sonucu.....	139
Şekil 83. Bentonitin kompaksiyon eğrisi	141
Şekil 84. Bentonitin kayma direnci parametreleri.....	142
Şekil 85. Bentonitin şişme basıncı	142
Şekil 86. Karışık zeminin kompaksiyon eğrisi	144
Şekil 87. Doygun haldeki karışık zeminin kayma direnci parametreleri	145
Şekil 88. Karışık zeminin şişme basıncı	146
Şekil 89. Kohezyonlu şişmeyen zeminin diferansiyel termal analiz sonucu	147
Şekil 90. Kohezyonlu şişmeyen zeminin X ışını analiz sonucu	148
Şekil 91. Kohezyonlu şişmeyen zeminin granülometri eğrisi.....	150
Şekil 92. Zeminin birleştirilmiş sınıflandırma sisteminde plastisite kartındaki yeri	151
Şekil 93. Kohezyonlu şişmeyen zeminin kompaksiyon eğrisi.....	152
Şekil 94. Doygun haldeki kohezyonlu şişmeyen zeminin kayma direnci parametreleri	153
Şekil 95. Gerilme şekil değiştirme eğrisi.....	154
Şekil 96. Başlangıç elastisite modülünün yoğunluğa bağlı olarak değişimi.....	155
Şekil 97. Farklı yoğunluklardaki EPS levhaların tamamen suya batırılmış durumda su emme oranlarının zamanla değişimi	159
Şekil 98. İstinat duvarı modelinin şematik gösterimi	162
Şekil 99. İstinat duvarı modeli	162
Şekil 100. İstinat duvarı modelinin son hali (a) Genel görünümü (b) Yandan görünümü.....	163
Şekil 101. İstinat duvarı modelinin yapım çizimi.....	164
Şekil 102. Şişme basıncı- zaman ilişkisi.....	165
Şekil 103. Yanal şişme basıncı-derinlik ilişkisi.....	165
Şekil 104. İstinat duvarı düzeneğinin derinlik-su muhtevası ilişkisi	166
Şekil 105. Küçük deney düzeneği (a) Genel görünümü (b) Su içerisine yerleştirilmiş düzeneğin üstten görünümü	167
Şekil 106. Küçük deney düzeneğinin şematik çizimi	168
Şekil 107. Düşey şişme basıncı-zaman ilişkisi	169
Şekil 108. Yanal şişme basıncı-zaman ilişkisi.....	169
Şekil 109. Düşey şişme basıncı-yanal şişme basıncı ilişkisi.....	170

Şekil 110. Küçük deney düzeneğinin derinlik-su muhtevası ilişkisi	171
Şekil 111. Düşey şişme basıncı-zaman ilişkisi	172
Şekil 112. Yanal şişme basıncı-zaman ilişkisi.....	172
Şekil 113. Düşey şişme basıncı-yanal şişme basıncı ilişkisi.....	173
Şekil 114. Küçük deney düzeneğinin derinlik-su muhtevası ilişkisi (0.9 cm. EPS).....	173
Şekil 115. Düşey şişme basıncı-zaman ilişkisi	174
Şekil 116. Yanal şişme basıncı-zaman ilişkisi.....	175
Şekil 117. Düşey şişme basıncı-yanal şişme basıncı ilişkisi.....	175
Şekil 118. Küçük deney düzeneğinin derinlik-su muhtevası ilişkisi (2.5 cm. EPS).....	176
Şekil 119. Düşey şişme basıncı-zaman ilişkisi	177
Şekil 120. Yanal şişme basıncı-zaman ilişkisi.....	177
Şekil 121. Düşey şişme basıncı-yanal şişme basıncı ilişkisi.....	178
Şekil 122. Küçük deney düzeneğinin derinlik-su muhtevası ilişkisi (5 cm. EPS).....	178
Şekil 123. Düşey şişme basıncı-zaman ilişkisi	179
Şekil 124. Yanal şişme basıncı-zaman ilişkisi.....	180
Şekil 125. Düşey şişme basıncı-yanal şişme basıncı ilişkisi.....	180
Şekil 126. Küçük deney düzeneğinin derinlik-su muhtevası ilişkisi (5 cm. KŞZ)	181
Şekil 127. Küçük deney düzeneğinde düşey şişme basınçlarının zamanla değişimi	182
Şekil 128. Küçük deney düzeneğinde yanal şişme basınçlarının zamanla değişimi.....	183
Şekil 129. Küçük deney düzeneğinde EPS kalınlığı ile düşey şişme basıncı ilişkisi	184
Şekil 130. Küçük deney düzeneğinde EPS kalınlığı ile yanal şişme basıncı ilişkisi	184
Şekil 131. EPS kalınlığının, küçük deney düzeneğinin yüksekliğine oranı ile düşey şişme basıncı arasındaki ilişki	185
Şekil 132. EPS kalınlığının, küçük deney düzeneğinin yüksekliğine oranı ile yanal şişme basıncı arasındaki ilişki.....	185
Şekil 133. 1 cm. karışık zeminin şişme basıncı grafiği.....	186
Şekil 134. EPS ile yapılan şişme deneyinde ki ödometre aletinin şematik gösterimi	187
Şekil 135. 1 cm. karışık zeminin üzerine 0.43 cm. EPS koyularak yapılan şişme deneyinin şişme basıncı grafiği	188
Şekil 136. 1 cm. karışık zeminin üzerine 0.715 cm. EPS koyularak yapılan şişme deneyinin şişme basıncı grafiği	188

Şekil 137. 1 cm. karışık zeminin üzerine 1 cm. EPS koyularak yapılan şişme deneyinin şişme basıncı grafiği	189
Şekil 138. 1 cm. karışık zeminin üzerine 1 cm. KŞZ koyularak yapılan şişme deneyinin şişme basıncı grafiği	190
Şekil 139. Ödometre aletinde yapılan serbest şişme deneyinde, d_{EPS}/H oranı ile serbest şişme arasındaki ilişki	191
Şekil 140. Ödometre aletinde yapılan serbest şişme deneyinde, d_{EPS}/H oranı ile şişme basıncı arasındaki ilişki.....	191



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Kil minerallerinin genel yapısı ve sınıflandırması.....	4
Tablo 2. Bazı kil minerallerinin özellikleri.....	5
Tablo 3. Kil minerallerinin katyon değiştirme kapasitesi	12
Tablo 4. Şişen zeminlerin ABD’de yarattığı yıllık hasar	19
Tablo 5. Saf kil zeminlerin şişme potansiyeli	20
Tablo 6. Zemin sınıflandırma yöntemi	21
Tablo 7. Arazi yükünde, şişme testi sonuçlarına göre, şişen zeminlerin tipik bir sınıflandırması	22
Tablo 8. Plastisite indisi ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki	26
Tablo 9. Lineer büzülme ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki	27
Tablo 10. İndeks özellikleri ve olası hacim değişikliği	30
Tablo 11. USAEWES sınıflandırma yöntemi	32
Tablo 12. PVC oranları	33
Tablo 13. Şişen zeminlerin sınıflandırılması	35
Tablo 14. Tamamıyla aynı numunelerle, farklı deney yöntemleri kullanarak bulunan şişme basıncı değerleri	67
Tablo 15. Farklı yöntemlerden elde edilen şişme basıncı değerleri.....	67
Tablo 16. Flandres kilinin şişme basıncı.....	67
Tablo 17. Şişme potansiyeli, toplam şişme ve plastisite indisi arasındaki ilişki	70
Tablo 18. İndeks özellikleri ve olası hacim değişikliği	71
Tablo 19. Şişme tahmini için geliştirilen bağıntılar.....	73
Tablo 20. Şişen killerde olası hacim değişiklikleri için veriler	74
Tablo 21. Hacim değişikliği, şişme basıncı ve muhtemel hasar arasındaki ilişki.....	74
Tablo 22. Şişme basıncı ile ilgili ampirik yöntemler	75
Tablo 23. Şişmeye etki eden faktörler	85
Tablo 24. EPS uygulamaları	123
Tablo 25. Şiran-2 kilinin kimyasal analiz sonuçları	130
Tablo 26. Zeminin fiziksel özellikleri.....	131
Tablo 27. Zeminin fiziksel özellikleri.....	149

Tablo 28. EPS'in basınç dayanımları.....	154
Tablo 29. Poisson oranları	155
Tablo 30. EPS'in eğilme dayanımı	156



SEMBOLLER DİZİNİ

A	:Aktivite
A_1	:İki kil parçacığı arasındaki toplam çekim gerilmesi
Å	:Angstrom
b	: $((d/d_0)/(p/q_{sw}))$ ile d/d_0 ilişkisi için en uygun düz çizginin eğimi
C	:0.002mm.'den küçük kil boyutu yüzdesi
c, ϕ	:Kayma direnci parametreleri
c_1	:Çözünmüş maddenin konsantrasyonu
c_a	:Yarı geçirgen zarın her iki yanındaki çözünmüş madde konsantrasyonunu
c_b	:Yarı geçirgen zarın her iki yanındaki çözünmüş madde konsantrasyonunu
C_c	:Eğrilik katsayısı
c_c	:Orta düzlemde katyon ve anyonlardan oluşan toplam iyon konsantrasyonu
c_o	:Serbest sudaki katyon ve anyonlardan oluşan toplam iyon konsantrasyonu
C_s	:Şişme indisi
c_u	:d derinliğine bağlı vane kesme mukavemeti
C_u	:Üniformluluk sayısı
D	:Kabarmayan tabakanın kalınlığı
d	:Derinlik
d_0	:Birim derinlik
d_1	:Kristallerdeki atomik düzlemler arasındaki mesafe
d/d_0	:Derinlik oranı
d_{EPS}	:EPS kalınlığı
DTA	:Diferansiyel termal analiz
D_w	:Su seviyesinin derinliği
e_0	:Başlangıç boşluk oranı
e_1	: $\Delta\sigma$ kadar bir gerilme artışı ile oluşan boşluk oranı
e_2	: $(\sigma_v + V_{wf})$ efektif gerilme değerine karşılık gelen boşluk oranı değeri
e_3	: σ_v yük artışı ile oluşan nihai boşluk oranı
EI	:Genleşme indisi
EPS	:Genleştirilmiş polistiren köpük (expanded polystyrene)
F	:Şişme derecesi için düzeltme faktörü

FS	:Serbest şişme yüzdesi
H	:Kabaran tabakanın kalınlığı
H ₀	:Numunenin ilk yüksekliği
H ₁	:Şişmeden sonra numunenin yüksekliği
H _T	:Küçük deney düzeneğinin yüksekliği
I _p	:Plastisite indisi
I _s	:Şişme indisi
K	:Kil tipine bağlı bir katsayı
K ₀	:Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
K _s	:Yanal şişme basıncı katsayısı
m.e.	:Mili eşdeğer
m ₀	:Orijinal su muhtevası
MH	:Yüksek plastisiteli silt
m _s	:Numune suya yerleştirildiğinde, şişmenin olmadığı durumdaki sıkıştırılmış su muhtevası
n	:Tam sayı
P	:d derinliğine bağlı yanal şişme basıncı
P _{KŞZ}	:Uygun derinlik için CNS malzemesinin yanal basıncı
P _L	:Dizayn yanal basıncı
P _o	:Osmotik basınç
P _s	:Şişme basıncı
P _s '	:Düzeltilmiş şişme basıncı
P _{s1}	:Serbest şişme yöntemi ile bulunan şişme basıncı
P _{s2}	:Sabit hacim yöntemi ile bulunan şişme basıncı
P _{s3}	:Yüklenmiş şişme yöntemi ile bulunan şişme basıncı
P _{s4}	:Çift ödometre yöntemi ile bulunan şişme basıncı
q _{sw}	:Düşey şişme basıncı
q _{şz}	:Etüvde kurumuş şişen zeminin, hacim değişimi olmadığı durumda ki şişme basıncı
R	:Gaz sabiti
R ₁	:Şişmeden esas olarak sorumlu kil danecikleri arasındaki ilişkiyi doğan itme gerilmesi
S	:Optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış bir zemin numunesinin, 1 psi sürşarj yükü altındaki şişme potansiyeli

S_M	:Zeminin matris emme gerilmesi
S_p	:Şişme yüzdesi
S_r	:Doygunluk derecesi
T	:Mutlak sıcaklık
T_1	:Başlangıçtaki numune yüksekliği
T_2	:Denei sonundaki numune yüksekliği
USAEWES:	United States Army Engineer Waterways Experiment Station
USCS	:Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi
V_{wf}	:Negatif boşluk suyu basıncı
W	:Doğal su muhtevası
W_0	:Arazideki su muhtevası
W_L	:Likit limit
W_p	:Plastik limit
W_{WL}	:Ağırlıklı likit limit
X	:Kil tipine bağlı bir üst
z	:Derinlik
α	:Zemin üzerindeki dış basıncın belirlenen bileşeni için bir katsayı
σ	:Dış basınç
σ_1	:Gerilme
$\bar{\sigma}$:Efektif gerilme
σ_v	:Sürşarj yükü
θ	:Kırılma açısı
ε	:Şekil değiştirme
δ	:Şişme oranı
λ	:X ışınının dalga boyu
λ_1	:Likit limit ve arazideki su muhtevasına bağlı bir katsayı
π_A	:Osmotik solüsyon basıncı
π_{SS}	:Zemin suyundaki tuzdan dolayı osmotik basınç
ΔH	:Toplam kabarma
ΔH_n	:Yükseklikteki değişim
$\Delta\sigma$:Gerilme artışı
γ_d	:Doygun birim hacim ağırlığı
γ_k	:Kuru birim hacim ağırlık

γ_n :Doğal birim hacim ağırlık
 γ_s :Dane birim hacim ağırlık



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Killerin mühendislik açısından en önemli özelliklerinden biri de, üzerindeki yükten bağımsız olarak, su içeriğindeki değişimle şişme ve büzülme yoluyla hacim değiştirmesidir. Su içeriğindeki değişmelerin neden olduğu önemli şişme basıncı ve hacimsel değişmelerden dolayı, bu tür zeminler şişen zemin olarak nitelendirilirler.

Şişen zeminler genellikle doymun olmayan zeminlerdir. Bu tür zeminlerin çoğu kurak veya yarı kurak bölgelerde, su muhtevalarındaki artışla, az veya çok şişme eğilimi gösterirler. Bu eğilim kaolin grubu killerde çok az, illit grubu killerde orta, smektit (smectite) grubu killerde ise oldukça büyük oranlardadır. Su muhtevastındaki artışlar zeminin şişmesine, azalmalar ise büzülmesine sebep olmaktadır. Meydana gelecek hacim artışları (şişmeler), çevredeki zeminler, dayanma duvarları veya bodrum duvarları gibi yapılar tarafından engellendiğinde, bu tür zeminlerin serbest şişmeleri engellenmiş olacağından, büyük gerilmeler oluşacaktır. Zemin kütesinin serbestçe şişmesinin engellenmesinden dolayı meydana gelen gerilmelerle, şekil değiştirmelerin belirlenmesi çok önemli bir problemdir. Ayrıca çoğu durumda doğru arazi verilerini elde etmek de çok zordur.

Şişen zeminlere dünyanın birçok yerinde rastlanmaktadır. Bu tür zeminlerin özellikle tropikal ve ılık iklime sahip kurak ve yarı kurak ülkelerde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu ülkelerin başında ABD, Kanada, Avustralya, Arjantin, Hindistan, İsrail ve Suudi Arabistan gelmektedir. Bu ülkelerde şişen zeminlerle ilgili bir çok araştırma yapılmış olmasına rağmen, ülkemizde bu tür zeminler üzerinde yeterli düzeyde çalışmanın olmadığı görülmektedir. 1920'li yılların öncesinde yapıların çoğunluğunun hafif yüklü, ahşap olmasından ve gözle görülür çatlaklara yol açmadan hareket etme yeteneğine sahip olmalarından dolayı, 1930 yılına kadar şişen zemin problemi mühendislerce anlaşılammıştır. 1930'lu yıllarda yaygınca kullanılmaya başlayan tuğla yapıların duvarlarındaki çatlakların, şişen zeminin rolü bilinmediğinden zemindeki konsolidasyon oturmasından ya da temelin yapısal projelendirilmesindeki hatalarından kaynaklandığı düşünölmüştür. Problem anlaşılmadığı için önerilen çözümlerde de genellikle başarılı sonuçlar alınamamıştır. 1940'lı yıllarda ise havaalanı, karayolu kaplamaları ve su kanalları

gibi hafif yapıların artması ile, hasarların oturma dışında başka sebeplerden kaynaklandığı düşünölmüş ve şişen zemin problemi araştırılmaya başlanmıştır. O tarihten günümüze kadar dünyanın birçok yerinde devam eden araştırmalar, uygun tasarım yöntemlerini beraberinde getirmiştir (Fenner vd., 1983).

Zeminlerin şişme davranışlarının incelenmesine yol açan nedenlerin başında, şişmeden dolayı meydana gelen zararların çok büyük olması gelmektedir. Zira şişen zeminlerin yarattığı problemler maddi açıdan küçömsenemeyecek boyuttadır. Son yapılan araştırmalara göre sadece ABD'de yıllık 9 Milyar dolarlık bir zarara yol açmaktadırlar (Jones, Jones, 1987). Bu miktar kasırğa , deprem , sel vb. gibi tüm doğal afetlerin yol açtığı zararın da üzerindedir (Holtz, 1984; Rao vd., 1988).

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, Gümüşhane ilinin Şiran ilçesinin Mertekli köyünden alınan Şiran-2 kiline, Karakaya Bentonit Firmasından temin edilen bentonitin % 48 oranında katılması ile hazırlanan karışık zemin kullanılarak;

- Dayanma duvarlarına aktarılan yanal basınçların ölçölmesi,
- Dayanma duvarlarına aktarılan yanal basınçların, duvar arkasına farklı kalınlıklarda yerleştirilen Genleştirilmiş Polistiren Köpük (EPS, expanded polystyrene) ile azaltılması,
- Dayanma duvarı arkasına yerleştirilen EPS kalınlığının, düşey basınçları hangi oranda azalttığıının incelenmesi,
- Dayanma duvarı arkasına EPS ile aynı kalınlıkta kohezyonlu şişmeyen zemin (KŞZ), yerleştirilmesi durumunda yatay basınçların değişiminin incelenmesi,
- Serbest şişme deneyi ile bulunan düşey basınçlarını, zemin üzerine yerleştirilen EPS kalınlığının hangi oranda azalttığıının araştırılması,
- Serbest şişme deneyinde zemin üzerine EPS ile aynı kalınlıkta, KŞZ yerleştirilmesi durumunda düşey basınçların değişiminin incelenmesi amaçlanmaktadır.

1.3. Literatür Çalışması

1.3.1. Kil Mineralleri

Kil minerallerinin oluşumu, özellikleri ve bileşimi hakkında bugüne kadar bir çok çalışma yapılmıştır (Grim, 1953; Marshall, 1949; Brindley, 1951; Jasmund, 1955; Sudo, 1959). Günümüzde kil minerallerinin bilimsel anlamda sınıflandırılmasında herhangi bir birliktelik yoktur. Bununla birlikte kil minerallerini, birkaç genel başlık altında gruplandırmak mümkündür.

Kil mineralleri nispeten karışık yapıya kristaller şeklinde olup, bu kristallerin düzenlenmesine göre gruplandırılıp, aynı gruba ait kil mineralleri de aşağı yukarı benzer özelliklerle birbirine bağlı olmaktadır. Bu mineraller karışık kristal yapısı gösterdiğinden günümüze kadar ortak bir sınıflandırma sistemi sunulamamıştır. Buna rağmen Uluslararası Kil Komitesi üç yılda bir toplanarak yeni gelişmeleri incelemektedirler. Buna göre sınıflandırma yapıları;



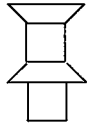
- 1) Bir hücre veya tabakanın kalınlığı,
- 2) Tabakanın di- veya tri-oktahedral özelliği ve iyon içeriği,
- 3) Tabakaların dizilişi ve diziliş düzeni,

özellikleri esas alınmaktadır. Bu şekilde ele alınan kil mineralleri dokuz grupta incelenmektedir (Önalp, 1997). Bunlar;

- 1) Kaolinit-Serpantinit grubu.
- 2) Profillit-Talk grubu.
- 3) Smektit grubu.
- 4) Vermikülit grubu.
- 5) Mika grubu.
- 6) Gevrek mika grubu.
- 7) Klorit grubu.
- 8) Karışık tabakalı killer grubu.
- 9) Kristal yapısı olmayan killer grubu (Tablo 1).

Kil minerallerinin mühendislik açısından incelenmesi literatürlerde ayrıntılı olarak verilmektedir (Mitchell, 1976). Tablo 2’de sıkça karşılaşılan ve özellikleri birbirinden çok farklı olan üç ana kil türünün basit özellikleri verilmektedir.

Tablo 1. Kil minerallerinin genel yapısı ve sınıflandırması (Carroll, 1970; Grim, 1968; Mitchell, 1976).

TİP	GRUP	ALTGRUP	ÖRNEK MİNERALLER	TEMEL YAPI*	BOYUT (Å)
1:1	Kandıt	Kaolinler	Kaolinit, Dikit, Nakrit, Halloysit.		7.2 (10.1)
		Serpantinler (ve Septekloritler)	Serpantinler, Krizotil, Lizardit, Amezit, Şamozit, Grinalit.		
2:1	Profillit	Profillitler	Profillit		10
		Talklar	Talk		14
	Smektitler	Montmorillonitler	Montmorillonit, Beydelit, Nontronit.		10.5-14
		Saponitler	Saponit, Hektorit, Sokonit		10
	Vermikülit	Diok.Vermikülitler	Diok.Vermikülitler		10
		Triok.Vermikülitler	Triok.Vermikülitler		
	Mika	Diok. Mikalar	Muskovit, Paragonit, Seladonit		10
		Triok. Mikalar	Biyotit, Flogopit		
	İllit	Diok. İllitler	İllit, Bramalit, Glokonit		10
		Triok.İllitler	Triok. İllitler		
Gevrek Mika	Diok.G.Mikalar	Margarit	10		
	Triok.G.Mikalar	Klintonit			
2:1:1	Klorit	Diok.Kloritler	Diok.Kloritler		14
		Triok.Kloritler	Peninit, Klinoklar, Proklorit		
Kar ma	Düzenli		Allevardit, Rektorit, Proklorit		
	Düzensiz		Mika+Mont., İllit+Verm Verm.+Klorit		
İplik si	Hormitler		Paligorskit, Sepyolit	Zincir	
Amo rf	Alofan		Alofanlar	Amorf	

* □ Gibsit/Brusit; ▽ Silika

Tablo 2. Bazı kil minerallerinin özellikleri (Önalp, 1982).

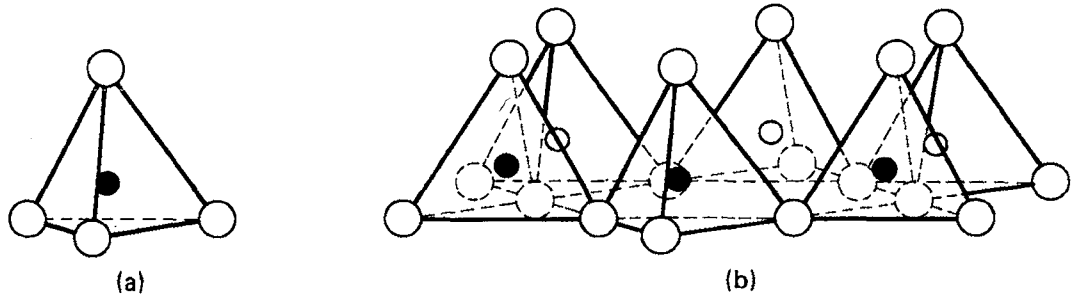
	MONTMORİLLONİT	İLLİT	KAOLİNİT
DANE BÜYÜKLÜĞÜ (Å)	10 - 1	0,1 - 2	0,1 - 5
DANE ŞEKLİ	Eş boyutlu	Yaprak pul	6 köşeli pul
DANE KALINLIĞI (Å)	10	30	0,05 – 2
TİPİK FÖRMÜLÜ	$\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	$\text{Si}_8\text{Fe}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	$\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
ÖZGÜL YÜZEYİ (m^2/g)	50-800	65-100	10-20
LİKİT LİMİTİ (%)	110-710	60-120	29-120
PLASTİSİTE İNDİSİ	51-100	34-60	26-38
ŞİŞME-BÜZÜLME YETENEĞİ	Yüksek	Orta	Düşük
CEC (Meşd/100 g)	80-150	10-40	3-15
ÖZGÜL AĞIRLIK	2.35-2.7	2.6-3.0	2.6-2.8
DOĞADA BELİRME	Sık	Sık	Sık

Kimyasal olarak killer, sıvı içeren (hydrous) alüminosilikatlar ve buna ilave olarak diğer metalik iyonlardan ibarettir. Bütün kil mineralleri sadece elektron mikroskobu ile görülebilen, çok küçük, koloidal boyutlu (çapları 2 μm 'den küçüktür) kristallerdir. Tek başına kristaller ince plakalar şeklinde görülürler. X ışını analizi çalışan bilim adamları, bu ince plakaların, tekrarlı atomik yapıya sahip olan bir çok kristal tabakasından ibaret olduğunu belirtmişlerdir (Holtz, Kovacs, 1981). Gerçekte kil minerali yapısında 2 ana yapı bloğu bulunmaktadır.

1) Tetrahedral (silika) tabakası

2) Oktahedral tabakası

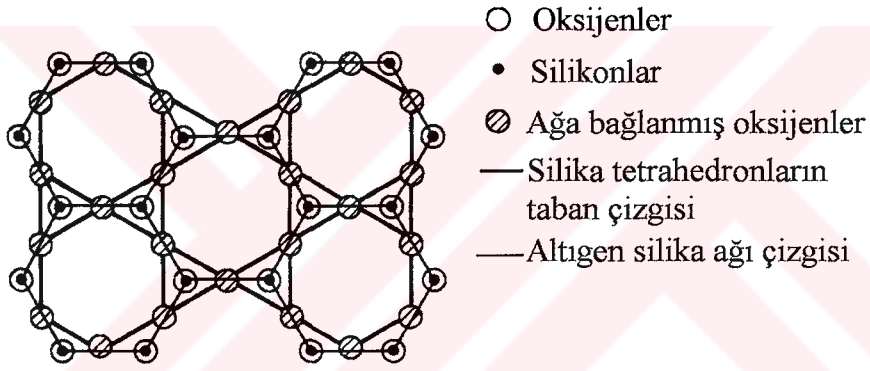
Bu tabakalar kristal kafesinde farklı metalik iyonlar ve farklı bağlanmayla bir arada istiflenmişler ve böylece farklı kil minerallerini oluşturmuşlardır. Tetrahedral tabaka temel olarak tek bir silikon atomunun etrafında, köşede 4 oksijen veya hidroksil atomundan oluşan silika tetrahedron birimlerinin birleşiminden ibarettir. Şekil 1a'da tek bir silika tetrahedronu, Şekil 1b'de de her bir tetrahedronun tabanındaki oksijen atomunun tabakalı yapıyı oluşturmak için nasıl birleştiği görülmektedir. Her bir tetrahedronun tabanındaki oksijenler aynı düzlemedir ve eğer yapıyı dengelemeye ihtiyaç duyulmazsa silikon atomu oksijen veya hidroksillere eşit mesafededirler. Tetrahedral tabakasının şematik gösterimi Şekil 1c'de ve silika tabakasının üstten görünümü de Şekil 1d'de görülmektedir.



○ ve ○ = Oksijenler ○ ve ● = Silikonlar



(c)



(d)

Şekil 1. Tetrahedral tabaka (Grim, 1959).

Tetrahedron grupları, $\text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_4$ bileşiminin bir tabakasını meydana getirmek üzere sonsuz tekrarlanan bir altıgen ağı oluşturmak üzere dizilmişlerdir. Açık altıgen ağın 120° açıda kesişen oksijen atomlarının, üç dizisinden oluştuğu düşünülebilir. Tetrahedron tabakasında oksijenler arasındaki mesafe 2.55 \AA ve tetrahedron koordinasyonunda atomlar için mevcut olan boşlukta 0.55 \AA civarındadır. Sonuç olarak kil minerali yapısındaki bir birimin kalınlığı 4.93 \AA 'dur.

Oktahedral koordinasyonuna yerleşmiş alüminyum veya magnezyum atomlarına 6 oksijen veya hidroksilin bağlanmasıyla oluşan birimlerin birleşiminden oktahedral yapı oluşmaktadır. Bu yapıda alüminyum veya magnezyum, oksijen veya hidroksilden eşit

mesafededir. Tek bir oktahedron yapısı Şekil 2a'da, bir tabaka yapısını oluşturmak için oktahedronların nasıl birleştiği Şekil 2b'de, oktahedronların şematik gösterimi Şekil 2c'de, oktahedral tabakasının üstten görünümü de Şekil 2d'de görülmektedir.

Oktahedral tabakada oldukça yaygın olan farklı kationların yer değiştirmesi farklı kil minerallerinin oluşmasını sağlamaktadır. Yer değiştiren iyonlar yaklaşık olarak aynı boyutta olduğundan bunlar izomorfoz olarak adlandırılmaktadırlar. Bazen oktahedronların hepsi kation içermemekte ve bu durum da, biraz farklı fiziksel özellikler ve farklı bir kil minerali ile birlikte farklı kristal yapılarının oluşmasına neden olmaktadır. Oktahedral tabakanın bütün anyonları, hidroksillerden ibaret ise ve kationların boşluklarının üçte ikisi yapıyı dengelemek için alüminyum ile doldurulmuşsa, bu mineral gibsit $[Al_2(OH)_6]$ adını almaktadır. Şayet boşluklar, alüminyum yerine magnezyum ile doldurulmuşsa, mineral brusit $[Mg_3(OH)_6]$ adını almaktadır. Oksijenler arasındaki ortalama mesafe 2.6 Å, hidroksillerin arasındaki mesafe ise 3 Å'dur. Bu yapı biriminde OH'lerin arasındaki mesafe 2.94 Å ve oktahedral koordinasyonda atomların mevcut boşlukları da yaklaşık 0.61Å'dur. Sonuç olarak kil minerali yapısındaki bir birimin kalınlığı 5.05 Å'dur. Tabaka yapılarındaki değişimler, tanımlanmış düzinelere kil mineralini meydana getirmektedirler. Mühendisler, killi zeminlerde bulunan en yaygın kil mineralinin sadece birkaçını tanımlamada yeterli olmayı amaçlamaktadırlar (Holtz, Kovacs, 1981).

Kil minerallerinin bazıları, liflidir ve farklı yapı bloklarından oluşmaktadır. Bu mineraller amfibole benzemektedir ve basit yapısal birim, Si_4O_{11} bileşiminin çift zincirinde birleşen tetrahedronlardan oluşmaktadır (Şekil 3).

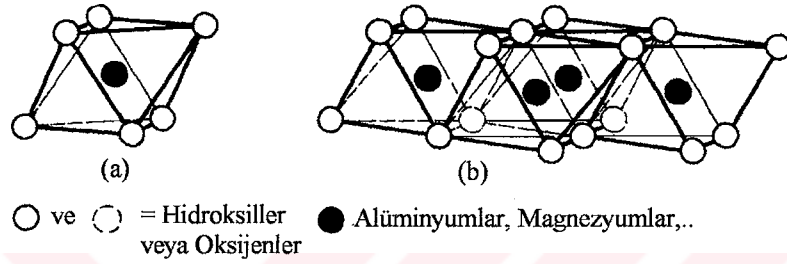
Bu yapı sadece tek doğrultuda devam etmesi dışında tabaka minerallerindeki tetrahedronlara benzemektedir. Diğer doğrultuda 12 Å genişlikle sınırlanmıştır.

Zincirler birbirlerine alüminyum ve magnezyum atomları ile bağlıdırlar. Böylece her atom silika ile bir bağ oluşturan 6 aktif oksijen atomu ile sarılmıştır. Bundan dolayı da tetrahedronların uçlarında ve zincirlerin kenarında bulunurlar.

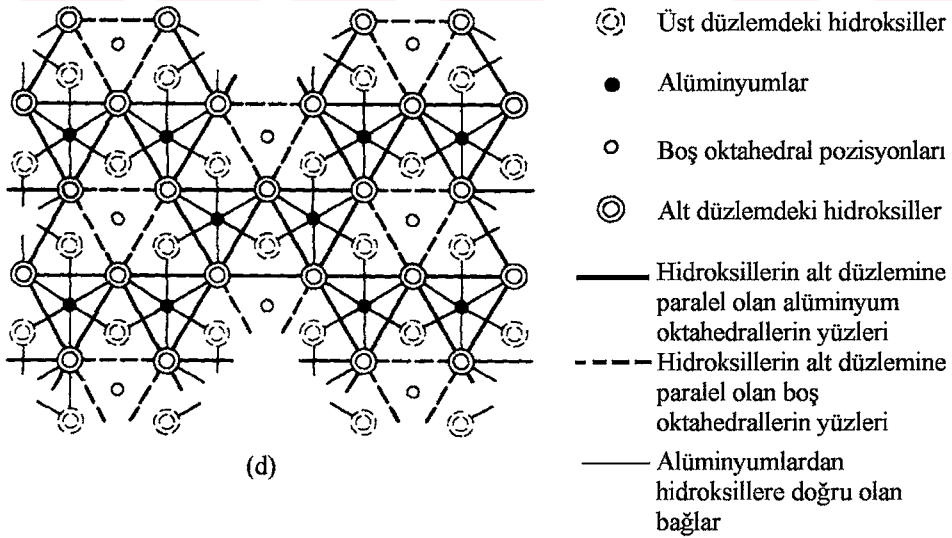
1.3.1.1. Montmorillonit Minerali

Bazen smektit olarak da isimlendirilen montmorillonit mineralleri çok küçük parçacıklardan oluştuğundan, tek başına X ışını analizi ile tanımlanamazlar. Yapısal kavramlar bu nedenle toz verilerinden ve daha iyi bilinen yapılardan ortaya çıkarılır. Montmorillonit mineralleri için günümüzde kabul edilen yapıyı, Hofman vd. (1933) ortaya

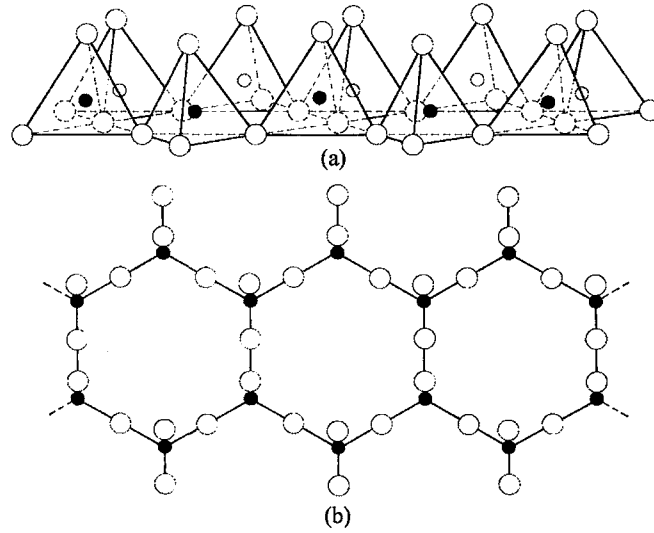
atmış, daha sonra bu yapı Marshall (1935), Maegdefrau, Hofman (1937) ve Hendricks (1942) tarafından geliştirilip düzenlenmiştir. Buna göre montmorillonit, alüminyum oktahedral bir tabakanın etrafında iki adet silika tetrahedral tabaka bulunan birimlerden oluşmaktadır. Her bir silika tabakasının tetrahedronlarının uçları ve oktahedral tabakanın hidroksil tabakalarından biri ortak bir tabaka oluşturmaktadır. Ayrıca tetrahedral ve oktahedral tabakada ortak olan atomlar hidroksillerin yerine oksijenleri oluşturmaktadırlar.



(c)



Şekil 2. Oktahedral tabaka (Grim, 1959).



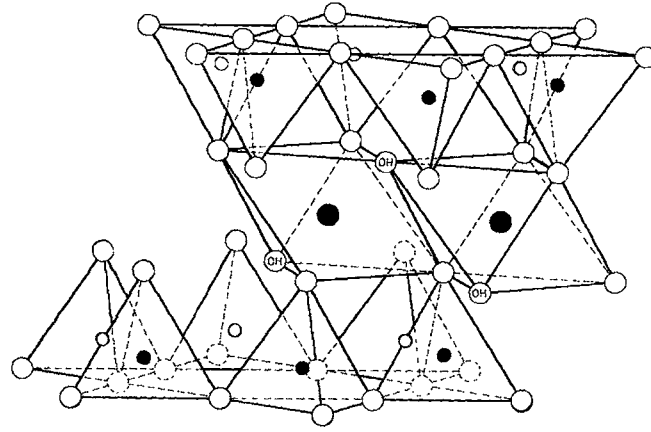
Şekil 3. Tetrahedronların çift zincirinin gösterimi (a) perspektif görünümü (b) tetrahedronların taban düzlemlerinin planı (Grim, 1962).

Silis – alüminyum – silis birimlerinin yığılmasında, her bir birimin oksijen katmanları diğer komşu birimlerin oksijenlerine bitişiktir. Tabakalar arası bağ Van der Waals ve kationlarla sağlandığından çok zayıftır. Montmorillonit yapısının en önemli özelliği, kesin organik moleküller olan su veya polar moleküllerinin birim katmanlar arasına girip bunların ayrılmasına neden olmasıdır. Teoriksel bileşimi $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ olan bu grup minerallerinden montmorillonit 20 kata kadar suyu tabaka aralarına alabilmektedir (Önalp, 1982). Şekil 4’de montmorillonit yapısının bir taslağı görülmektedir.

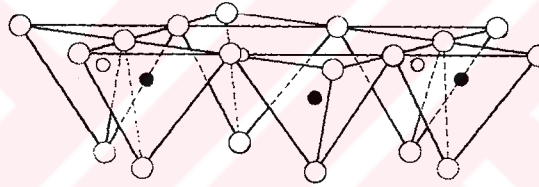
Değişebilir kationlar silika tabakaları arasında oluşturmaktadırlar. Silika birimleri arasındaki su, katmanlarının kalınlığına aynı zamanda da verilen su buharı basıncındaki değişebilir kationların doğasına bağlıdır. Normal şartlar altında, bir montmorillonit sodyum ile bir moleküler su katmanı ve aşağı yukarı 12.5 Å’luk boşluk, kalsiyum ile de iki moleküler su katmanı ve 15.5 Å’luk bir boşluk oluşturmaktadır.

Bazı durumlarda birim katmanlar sabit bir periyodik sıralama olmaksızın birbiri üstüne yığılırlar. Oysa diğer durumlarda bu yönlerde bir düzen görülmemektedir. Yukarıda verilen yapı için teorik formül $(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20n}(\text{iç katman})\text{H}_2\text{O}$ ve iç katman malzemesi olmadan teorik bileşim ise % 66.7 SiO₂, % 28.3 Al₂O₃ ve % 5 H₂O’dur. Montmorillonit her zaman yukarıda verilen teorik formülden farklıdır. Bunun nedeni alüminyum kafes

içindeki değişikliklerdir (tetrahedral koordinasyonda silikon yerine fosfor ve oktahedral tabakada alüminyumun yerine demir, lityum, nikel, magnezyumun koyulması).



Değişebilir Katyonlar
 nH_2O



○ Oksijenler ⊕ Hidroksiller ● Alüminyum, Demir, Magnezyum
○ ve ● Silikon, bazen de Alüminyum

Şekil 4. Montmorillonit yapısının taslağı (Grim, 1962).

Montmorillonit içeren zeminler su muhtevası değişince şişmeye karşı dayanıksız hale gelmekte böylece hafif yapılara ve otoyolu kaplamalarına kolaylıkla zarar verebilmektedirler. Montmorillonit bu özelliği itibari ile sondaj çamurunda birinci bileşen olarak kullanılmaktadır. Ayrıca çikolata yapımında, ilaç ve endüstriyel sanayiinde de kullanılmaktadır.

1.3.1.2. Katyon Değişirme Kapasitesi

İzomorf yer değiştirme nedeniyle kil daneleri negatif yüke sahip olmaktadır. Bu dengesizliği önlemek amacıyla ortamdaki katyonlar kil danelerinin kenarlarına ve bazı türlerde de birim blokların arasına girmekte ve bir çok durumda da yerlerini başka bir

katyona bırakabildiklerinden bu katyonlara değişebilir katyonlar adı verilmektedir. Yük dengesizliğini giderebilmek için gerekli olan katyon miktarına katyon değiştirme kapasitesi (cec) denir (Önalp, 1982). Cec genellikle 100 g. kuru kilde mili-eşdeğer cinsinden ifade edilmektedir. Kil için mili-eşdeğer;

$$m.e. = (1000 \times \text{element ağırlığı} / \text{atomik ağırlık}) * \text{değerlik} \quad (1)$$

olarak ifade edilmekte ve bir eşdeğerde ki katyon sayısı da Avagadro katsayısının değerliliğe bölünmesiyle bulunmaktadır.

Tablo 3’de kil minerallerinin katyon değişme kapasitesinin sınırları verilmiştir (Grim, 1953). Buradan, verilen herhangi bir grup kil minerali için tek bir kapasite değerinin olmadığı görülmektedir.

Kil minerallerinin katyon değişme kapasitelerini etkileyen 3 ana neden bulunmaktadır.

- 1) Silis – alüminyum birimlerin kenarlarının çevresindeki kırık bağlar, adsorbe katyonlar ile dengelenmiş doygun olmayan yükleri yükseltmek için verilmektedir. Kırık bağların sayısı arttıkça parçacık boyutu küçülmektedir. Kaolinit ve halloysit minerallerinde kırık bağlar değişme kapasitesinin değişmesinin en önemli nedenidir. İllit, klorit ve sepiolit-attapuljit mineralleri içinde durum aynıdır. Montmorillonit ve vermikülit minerallerinde ise diğerlerine göre daha az bir oranda (yaklaşık %20) katyon değişme kapasitesine kırık bağların etkisi vardır.
- 2) Tetrahedral tabakada dört değerli silikon için, üç değerli alüminyum kafesi içindeki değişiklikler katyon değişme kapasitesini etkileyen diğer bir faktördür. Montmorillonitte ve vermikülitte kafes içindeki değişiklikler toplam katyon değişme kapasitesinin % 80’nin sebebidir. İllit, klorit ve sepiolit-attapuljit mineralleri içinde değişme kapasitesinin nedeni kafes içindeki değişmelerdir.
- 3) Değişebilen bir katyon ile hidroksillerin açığa çıkardığı hidrojenler yer değiştirebilmektedirler. Bazı hidroksil grupları bütün kil minerallerinin kırık kenarlarının çevresinde açığa çıkar ve katyonlar kırık bağlar yüzünden bu hidroksillerde bulunan hidrojenler ile yer değiştirirler. Bu da katyon değişmesinin önemli sebepleri arasında yer almaktadırlar.

Tablo 3. Kil minerallerinin katyon değiştirme kapasitesi

Kil Minerali	Katyon Değ. Kapasitesi
Kaolinit	3-15
Halloysit 2H ₂ O	5-10
Halloysit 4H ₂ O	10-40
Montmorillonit	80-150
İllit	10-40
Vermikülit	100-150
Klorit	10-40
Sepiolit-attapuljit	20-30

Kil minerallerinde değişebilen katyonlar genelde ince tabakanın kenarında tutulmaktadır. Nispeten az miktarda adsorbe su ile birlikteki kil kümelerindeki adsorbe katyonlar, kil mineral yüzeyi ile direkt temasa tutulurlar. Kil su sistemlerinde değişebilen katyonlar kil mineral yüzeylerinden oldukça uzaktadırlar ve kil mineral yüzeylerinden su molekülleri ile ayrılırlar. Bu tipte verilen herhangi bir sistem için değişebilen katyonların kil mineral yüzeylerine göre pozisyonları aynı değildir, hatta aynı cinsteki katyonların bile bağlı pozisyonları aynı olmamaktadır. Marshall (1949), bu konuda elde ettiği bilgileri özetleyerek, iyonize katyonların yüzdesinin kil mineralinin tipine, su miktarına, katyonların doğasına ve katyonların bağlı konsantrasyonuna bağlı olduğunu göstermiştir. İyonlaşma hakkındaki yapısal çalışmalar halen daha tam olmamakla birlikte, tek bir katyonun değişik bağ enerjileri ile verilen bir kil minerali ile tutulabildiği açıktır.

Katyon değişimi ile ilgili ilk çalışmalarda, katyonların eşit olarak yer değiştirmediği ve aynı yer değiştirme gücüne de sahip olmadığı belirtilmiştir. Bu alanda ki çalışmaların ilklerinden olan Way (1850)'in çalışmasında, genel bir takım iyonların yer değiştirme gücünün aşağıdaki sırada olduğu görülmektedir (Yukarıdan aşağıya doğru artmaktadır).

- Sodyum
- Potasyum
- Kalsiyum
- Magnezyum
- Amonyum

Bunun anlamı kalsiyumun sodyum ile yer değiştirmesinin, sodyumun kalsiyum ile yer değiştirmesine nazaran daha kolay olmasıdır. Katyon yer değiştirme reaksiyonu dikkate alındığında tek ve genel bir yer değiştirme serisinin olmadığı açıktır. Bu seriler deney şartlarına, eklenen anyonlara ve kil mineraline bağlı olarak değişmektedir.

Kil mineralindeki değişebilen katyonların doğası genelde pH hesabı ile gösterilir. pH'ın 9 değeri sodyumu, 7.5 değeri kalsiyumu, 7'den azı ise hidrojeni göstermektedir.

1.3.1.3. Kil ve Su

Kil minerali danelerinin uçları pozitif ve negatif yüke sahipken, yüzeyi negatif net elektrik yükü ile yüklüdür. Bu olay moleküler gruplaşma ve iyonların düzenlenmesinin bir sonucudur. Bununla birlikte bu yükler üniform değildir ve daneler üzerinde farklı bölgelerde değişik yoğunluktadırlar. Kil danelerinin aşırı derecede küçük boyutta ve dane yüzeyinin, dane kütlesine oranının çok yüksek olmasından dolayı, bu danelerin mühendislik davranışı yüzey elektrik yükleri tarafından önemli ölçüde etkilenmektedir.

Bir su tabakası, altıgen bir ağa yayılmış altıgen gruplar ile birleşmiş su moleküllerinden oluşmaktadır. Bu sıralama su molekülünün etrafında kısmi bir tetrahedral yük dağılımı sonucunu doğurmaktadır. Tetrahedronun iki köşesinde hidrojen atomları, diğer iki köşesinde de elektronlar bulunmaktadır. Altıgenin her bir kenarı bir hidrojen bağına uygun olmalıdır. Bir su molekülünün hidrojeni, komşu molekülün negatif yüküne doğru yönlendirilmiştir. Hidrojen atomlarının dörtte birinde veya su moleküllerinin yarısında bir hidrojen atomu aę içindeki bağa katılmamaktadır.

Kil minerallerinin yüzeyi hidroksil grubu içerdii zaman, hidroksillerin bir bölümü su tabakası içinde, hidrojenden oksijen atomları boyunca bir bağ oluşturmak için serbest bırakılmaktadırlar.

Hendricks, Jefferson (1938), tarafından tavsiye edilen yapıda, adsorbe suyun birim hacim ağırlığı birden azdır. Birden fazla ve birden az birim hacim ağırlığı değerleri, Grim (1953) tarafından literatürde belirtilmiştir.

Bu su molekülleri, düşük sıcaklıklarda kil malzemesi tarafından tutulan ve 100-150⁰ sıcaklıklarda ısıtılarak atılan suyu içine almaktadır. Bu sıcaklıklardaki su kaybı üç kategoride sınıflandırılabilir.

- Yüzeydeki gözeneklerdeki sular ve mineralin kenarlarının çevresindeki ayırık parçacıklar,

- Vermikülit, montmorillonit ve halloysitin hidrat şekli minerallerinde, birim silika tabakaları arasında yer alan iç su katmanı,
- Sepiolit-attapuljit minerallerinde uzatılmış yapısal birimler arasındaki kanallarda bulunan su.

Birinci kategorideki suyun ayrılması için çok küçük bir enerji yeterlidir. Kuruma sıcaklıkları oda sıcaklığının biraz üstündedir. Diğer iki sınıfa giren suların ayrılması için gereken enerji oranları ise literatürde tanımlanmaktadır (Grim, 1953). Halloysitin hidrat şeklinde, oda sıcaklığındaki bir kurumada iç katmandaki sular ayrılabilir, fakat tam bir kuruma için daha yüksek sıcaklıklar gerekmektedir. Vermikülit ve montmorillonit minerallerinde iç katman sularının kuruması için gereken sıcaklık 100⁰ civarındadır. İç katmanda bulunan suyun ayrılma oranı sıcaklık arttıkça artmaktadır. Sepiolit-attapuljit minerallerinde uzatılmış yapısal birimler arasındaki kanallarda bulunan su, kil minerallerinin iç katmanlarında bulunan su ile aynı sıcaklıklarda kaybolur. Eğer düşük sıcaklıklarda bir kuruma işlemi yapılırsa, kanallardaki su kolayca yeniden kazanılabilir.

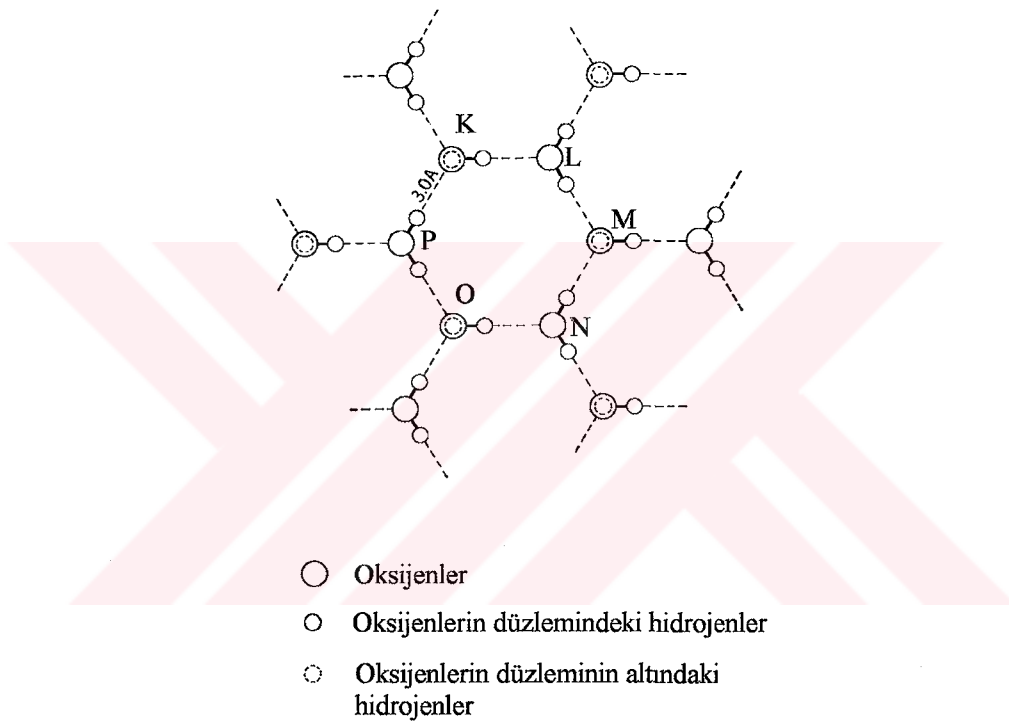
Langmuir (1917), Goldschmidt (1926) ve bir çok bilim adamı, kil minerallerinin yüzeyinde direkt olarak tutulan suyun, likit sudan daha farklı bir fiziksel durumda olduğunu göstermişlerdir. Likit sudan, normal suya (kil minerallerinin yüzeyinde direkt olarak tutulan su) geçişler kil mineralinin doğasına ve kil mineral yüzeylerinde adsorbe edilen iyonların karakterine bağlı olarak aniden oluşmaktadır.

Sıradan olmayan veya likit olmayan suyun kalınlığı düzensiz yüzeylerde nispeten küçük (kil mineral parçacıklarının kenarlarının çevresinde) ve kil minerallerinin düz yüzeylerinde ise nispeten büyüktür. Gözeneklerin yüzeyinde likit su, likit olmayan su ile ince bir film gibi şekillenir ve komşu kil mineral parçacıkları bir araya gelirler.

Likit olmayan suyun doğasını tam olarak tanımlayacak genel bir açıklama mevcut değildir. Bununla birlikte genel olarak suyun içinde var olan bazı su molekül şekillerinin kil mineral yüzeyinde aniden adsorbe edildiği bilinmektedir. Hendricks, Jefferson (1938), Şekil 5’de ve Şekil 6’da verilen şekli önermişlerdir.

Su molekülü Şekil 7’de gösterilen biraz olağandışı bir dizilişe sahiptir. Şekil 7e’de gösterilen elektron bulutu şekli hemen hemen tek bir davranıştan kaynaklanmaktadır. Elektron bulutu terimi yörüngedeki elektronlar tarafından hareket ettirilen boşluğun değişik bölgeleri anlamına gelmektedir. Şekil 7c,e oksijen atomunun dış yörüngesindeki altı elektronu göstermektedir. Sonuçta su molekülü bir uçta pozitif yüke, diğer uçta da negatif yüke sahip olan bir topluluk olduklarından, polar moleküller olarak

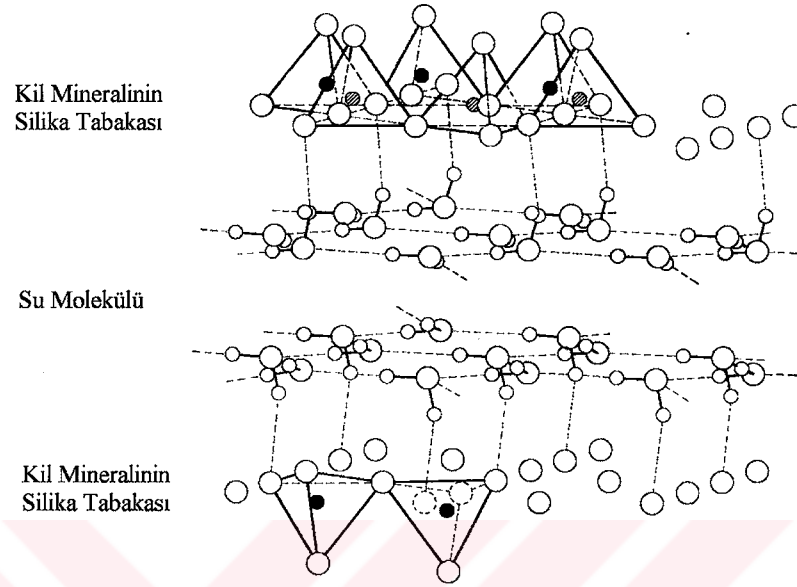
gösterilmektedirler (Şekil 7f). İki elektron bulutu kolları yakın bir su molekülündeki hidrojen atomlarının pozitif kısmi yüklerini çekebilen, negatif bir yüke sahiptir. Yer altı suyu nadiren saf olarak bulunmakta, diğer durumlarda da çözülmüş gazları, mineralleri, süspansiyon veya solüsyondaki diğer bileşenleri içermektedir. Yer altı suyu asidik ($\text{pH}<7$) veya alkalik ($\text{pH}>7$) olması, yer altı suyunun çeşitli kayalar ve minerallerin bileşen katyonlara (pozitif yüklenmiş iyonlara veya atom gruplarına) ve anyonlara (negatif yüklenmiş iyonlara) ayrılmasına neden olmaktadır.



Şekil 5. Sudaki oksijen ve hidrojenin düzeni (Grim, 1953).

Kil minerali daneleri yüzeydeki net negatif yüklerden dolayı, kenar yüze temas yapılmadıkça birbirlerini itme eğilimindedirler. Net negatif yüklerden dolayı daneler, elektriksel dengeyi elde etmek için, zemin neminde bulunan potasyum, sodyum, kalsiyum ve alüminyum gibi katyonları (pozitif iyonları) çekmektedir. Ayrıca katyonların net pozitif yüklerinden dolayı, bunlar sırayla negatif yükleri çekebilmekte ve bu olayın sonucunda da, su katyonlara bağlanmış olmaktadır. Sırayla kil daneleri tarafından tutulan su moleküllerinin negatif uçları çekilmekte ve katyonlara tutunmaktadır. Sonuç olarak kil

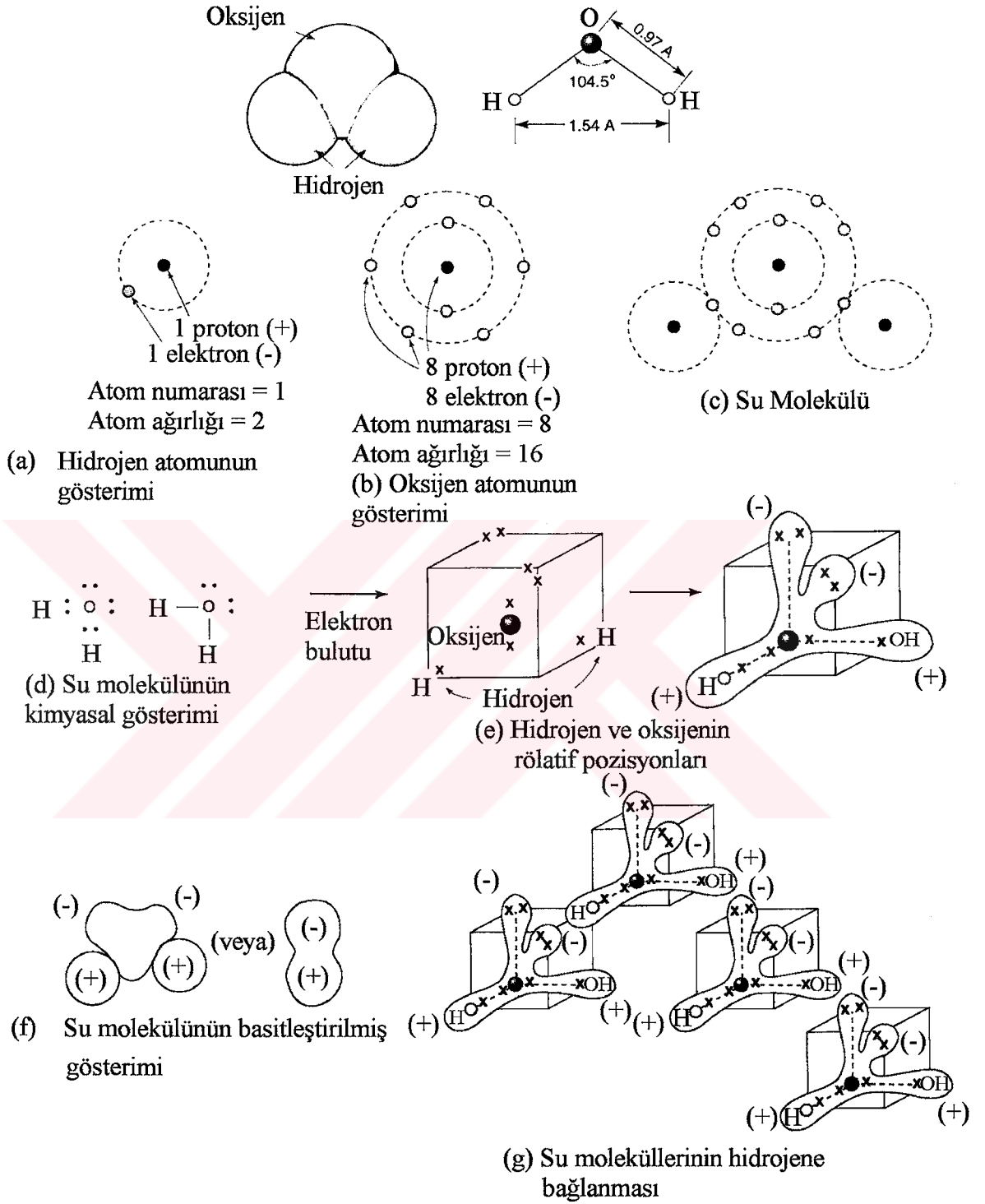
danelerinin boyut ve ağırlığına göre, su kile bağlanmış olmaktadır. Şekil 8, çekim ve bağlanmanın çeşitli özelliklerini göstermektedir.



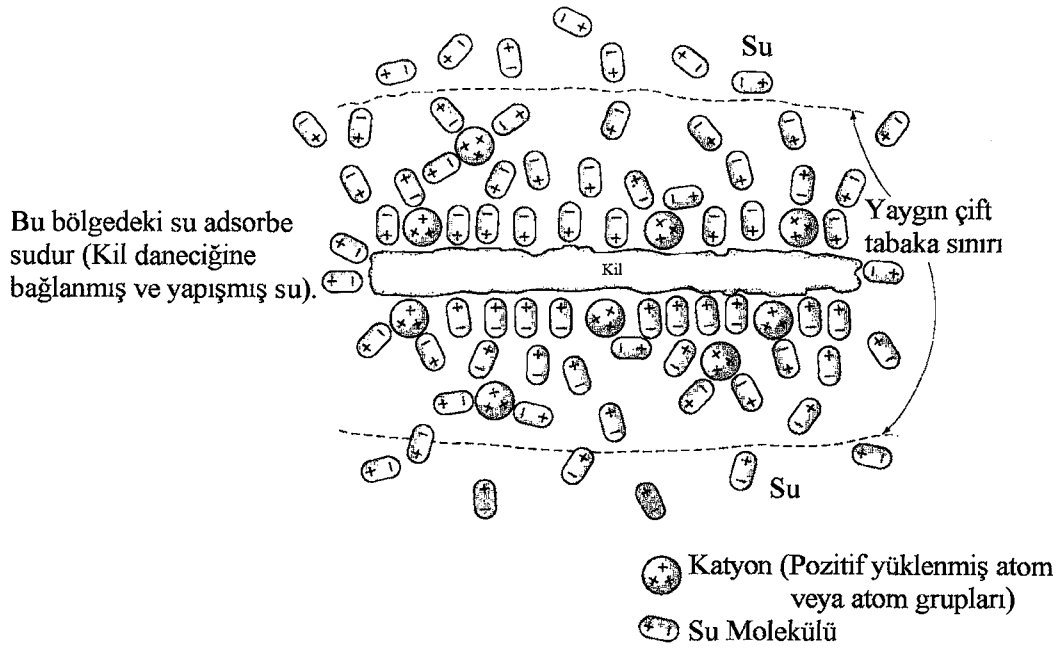
Şekil 6. Suyun gösterilişi

Su molekülleri ile çok güçlü bir şekilde bağ oluşturan kil danelerinin etrafındaki moleküllerin üst tabakasının ötesine yayılmış negatif yükü dengelemek için katyonların çekimi gereklidir. Danecik yüzeyinden daha uzakta, daha zayıf bir çekimin oluşmasından dolayı katyonların konsantrasyonu azaltılmış olur. Sonuç olarak, danecikten daha uzakta ve daha zayıf bir çekimle, su molekülleri kil danecikleri tarafından dolaylı olarak çekilmektedir. Katyonların ötesinde bir mesafede, su molekülleri kil daneciği tarafından çekildiğinden dolayı, zemindeki su gevşek yada normal boşluk suyu olarak dikkate alınmaktadır.

Kil danecik yüzeyinden çekim limitine kadar olan ve daneciği çevreleyen yaklaşık kalınlığı $1 \cdot 10^{-6}$ mm. olan bu su tabakası çift tabaka (diffuse double layer) adını almaktadır. Danecik yüzeyindeki negatif yüklerle, daneciğe yakın tutulmuş katyon yüklerinin dağılımı ile ilgilidir (Şekil 8).



Şekil 7. Su molekülü (Mccarthy,1998).



Şekil 8. Killerin etrafındaki çift tabakadaki adsorbe su ve kasyonlar

1.3.1.4. Kil Minerallerinin Mühendislik Özellikleri

Kil minerallerinin bileşiminin bilinmesi, problemlerin çözümünde ve yapım hatalarının engellenmesinde oldukça yararlı olan deneysel verilerin anlaşılmasını sağlamaktadır. Diğer özellikler, sıkıştırılabilirlik, kayma mukavemeti ve önceki gerilme tarihi (jeolojik tarih) kontrol edici faktörler arasında yer almaktadır.

Yapı mühendisleri sık sık kil malzemeler kullanarak binaları inşa etmek zorunda kalırlar. Buradaki alışılmış prosedür kil minerallerin karot numunelerini elde etmek ve bir dizi laboratuvar deneyi ile özelliklerini belirlemektir. Bu tip deneylerin sonuçları ve kazanılan deneyimler yapıların tasarımında ve inşasında oldukça yardımcı olmaktadır. Kil mineral hesaplamalarının ve laboratuvar deney sonuçlarının zeminin özelliklerini tam olarak yansıtmayacağı da açıktır.

Kil minerali analizleri incelenecek zeminlerin ayrıntılı özelliklerinin elde edilmesi ve kilde olağan dışı bir durum olması durumunda mühendisin uyarılması amacı ile yapılmaktadır. Burada en önemli nokta kil analizinin çok iyi bir şekilde yapılmasıdır. Eksik ya da yanlış yapılan analizler ileride çok büyük hasarlara neden olabilmektedir (Grim, 1953).

1.3.2. Şişen Zeminler

Belli tipte kil zeminler, ıslatıldığında genişleme, kurutulduğunda da büzülme özelliğine sahiptirler. Bu tip zeminler şişen zemin olarak adlandırılmaktadırlar. Zeminlerin su muhtevalarındaki bu değişiklikten kaynaklanan şişme ve büzülmeden dolayı şişen zeminler yapılarda hasara neden olmaktadır. Bu zeminler sadece Amerika Birleşik Devletlerinde binalarda, yollarda, havalimanlarında, su borularında ve diğer yapılarda aşağı yukarı yılda 9 milyar dolarlık bir zarara neden olmaktadır. Bu rakam depremlerin, su baskınlarının, kasırga ve fırtınaların neden olduğu toplam zararın aşağı yukarı iki katı bir değerdedir. Bu hasarların dağılımı Tablo 4’de verilmektedir.

Tablo 4. Şişen zeminlerin ABD’de yarattığı yıllık hasar (Jones, Jones, 1987).

Kategori	Yıllık Hasar (\$)
Karayolu ve caddeler	4.550.000.000
Ticari binalar	1.440.000.000
Evler	1.200.000.000
Yaya yolları, park alanları	440.000.000
Kazı çalışmaları	400.000.000
Çok katlı binalar	320.000.000
Hava alanı tesislerinde	160.000.000
Şehir içindeki toprak kaymaları	100.000.000
Diğer	390.000.000
Yıllık Toplam Hasar (1987)	9.000.000.000

Şişen zeminlerin oluşturduğu zararlar çoğu zaman basit görünümlü ve estetik sorunlar taşımaktadırlar. Fakat çoğu zaman durum daha da kötü olmakta ve büyük yapısal kayıplara neden olmaktadır. Holtz, Hart (1978)’a göre her yıl 250.000 yeni evin % 60’ı Amerika Birleşik Devletlerinde şişen zeminler üzerine yapılmakta ve bunların % 10’nun üzerinde, çoğu zaman onarılması gereken ciddi hasarlar oluşmaktadır. Temel zeminindeki şişen zeminin neden olduğu tipik hasarlar, bina duvarlarının çatlamasına, döşemelerin şeklinin bozulmasına ve zemine gömülü boru hatlarının kırılmasına neden olmaktadır. Karşılaşılan ilk ve en önemli problem, şişen zeminlerin beraberinde getirdiği ve çevreden zeminin suyu

emmesi ile oluşan (drenaj ve yağışla) hacim değişikliği ve yüksek şişme basıncıdır. Serbest şişme deneyinden, yüksek şişme özelliğine sahip bentonitin serbest şişme değerinin % 1200-2000 arasında olduğu bulunmuştur (Holtz, Gibbs, 1956). Deney sonunda bulunan şişme basıncı değeri birkaç tons per square foot olmakta ve çoğu kez hafif yüklenmiş bir yapıdan zemine iletilen standart tasarım yükünü fazlasıyla aşmaktadır (Wray, 1995). Her ne kadar bugün için inşa edilen binalara ait istatistikler daha iyi olsa bile, şişen zeminler hala önemli bir problem olmaya devam etmektedir.

Zemin hareketleri oldukça yavaş seyrettiğinden oluşan hasarlar, kasırgalar veya depremlere göre ciddi olmamaktadır. Ayrıca bu hasarlar belli bir alanda oluşmayıp geniş bir alana doğru yayılmaktadırlar. Ancak oluşan hasarın maddi boyutları daha öncede belirtildiği gibi oldukça büyüktür ve bu hasarlardan uzak durulması için başlangıçta problemin çok iyi tanımlanması, ölçümlerin ve tasarımın çok iyi yapılması gerekmektedir.

Şişmeye karşı hassaslığı farklı olan çok çeşitli kil mineralleri vardır (Tablo 5). Su, kil daneciklerinin içine girdiği zaman onların ayrılmasına neden olarak şişmesini sağlamaktadır. Güçlü hidrojen bağlarının varlığıyla, bireysel kil daneciklerinin bir arada tutulmasından dolayı kaolinit hemen hemen hiç şişmemektedir. İllit daha zayıf potasyum bağları içerdiği için sınırlı miktarda şişmeye izin vermektedir. Montmorillonit danecikleri ise zayıf bağlarla birbirlerine bağlandığından su, montmorillonit danecikleri içine girmekte ve danecikleri birbirinden ayırmaktadır. Arazi gözlemlerine göre, içinde montmorillonit bulunan zeminler çok büyük problemlere neden olmaktadır.

Tablo 5. Saf kil zeminlerin şişme potansiyeli (Coduto, 1998).

Sürşarj Yükü (kPa)	Şişme Potansiyeli (%)		
	Kaolinit	İllit	Montmorillonit
9.6	İhmal edilebilir	350	1500
19.1	İhmal edilebilir	150	350

Şişen zeminlerin problem yarattığı alanlarda çalışıldığı zaman, geoteknik mühendisleri problemlili zeminlerin şişme potansiyelinin tanımlanma ve değerlendirilmesinde sistematik bir yöntem izlerler (Nelson, Miller, 1992). Buradaki en önemli amaç, arzulanan projenin başarı ile tamamlanması için en uygun tasarım yönteminin bulunmasıdır.

Deneyimli geoteknik mühendisleri potansiyel olarak şişme özelliğine sahip zeminleri görsel olarak bulabilmektedirler. Şişme için zeminin önemli kil içeriğine sahip olması gerekmektedir. Buda muhtemelen CL veya CH gibi sembollerden biri ile gösterilen killerde görülmektedir.

Şişen zeminler kuruduğu zaman belirgin büzülme çatlakları ve daha önceki şişme ve büzülmelerine ait diğer kanıtlar ortaya çıkmaktadır. Buna rağmen görsel tanımlama ilk basamaktır. Özel tasarım tavsiyeleri geliştirmeden önce mutlaka daha fazla bilgi sağlanmalıdır.

İşlemlerdeki ikinci adım ise, oldukça zor olan şişmenin derecesinin hesabıdır. Bu aşamada geniş deney ve hesap yöntemleri mevcuttur, fakat hiçbiri çok geniş çapta kabul görmemiştir. Bazı önemli basit tekniklerde, Atterberg limitleri belirlenerek şişmenin sınıflandırılması yapılmaktadır. Tablo 6'da bu tip bir sınıflandırma yöntemi gösterilmektedir. Buna alternatif olarak bir şişme deneyi uygulanabilmektedir. Bu deneyde konsolidasyon aletine benzeyen bir alete numune yerleştirilerek, ıslatılmakta ve sonuçta bulunan şişme, şişme potansiyelinin hesaplanmasında araştırmacılara yardımcı olmaktadır.

Tablo 6. Zemin sınıflandırma yöntemi (Holtz, 1969; Gibbs, 1969).

Kil Yüzdesi	Plastisite İndisi	Büzülme Limiti	Likit Limit	Şişme Potansiyeli
<15	<18	<15	<39	Düşük
13-23	15-28	10-16	39-50	Orta
20-31	25-41	7-12	50-63	Yüksek
>28	>35	>11	>63	Çok Yüksek

Snethen (1984), potansiyel şişmeyi, dikey doğrultudaki hacim değişmesi veya ödometre deneyinden elde edilen deformasyon olarak tanımlamaktadır. Kısaca potansiyel şişme, örselenmiş bir zeminin, arazideki üst tabaka basıncına eşit bir yükte yüklü ve doymun durumda iken, orijinal yüksekliğinin değişme yüzdesi olarak yorumlanabilmektedir. Snethen (1984), uygulanan yükün temellerde olduğu gibi herhangi bir dış yük olarak göze önüne alınması gerektiğini belirtmiş ve şişme kriterini kullanarak zeminlerin şişme özelliğini Tablo 7'de olduğu gibi sınıflandırmıştır.

Tablo 7. Arazi yükünde, şişme testi sonuçlarına göre, şişen zeminlerin tipik bir sınıflandırması (Snethen, 1984).

Şişme Potansiyeli (%)	Şişme Sınıflandırması
< 0.5	Düşük
0.5-1.5	Sınırdadır
>1.5	Yüksek

1.3.2.1. Şişen Zeminlerin Belirlenmesi

Arazide potansiyel olarak şişen zeminin mevcudiyeti onun genellikle fisürlü ve parçalı olan yapısından ve parçaların parlak yüzeylerinden anlaşılabilir. Ayrıca bu tür zeminlerin kurak mevsimlerde geniş ve derin büzülme çatlaklarına sahip olmaları ve kuru iken kaya kadar sert, ıslanınca da yumuşak ve yapışkan görünüme sahip olmaları gözlemsel olarak tanımlanmalarında dikkate alınması gereken önemli özelliklerindedir.

Potansiyel olarak şişen zeminler beş değişik yöntemle sınıflandırılmaktadırlar.

1.3.2.1.1. Mineralojik Tanımlama

Şişen zeminlerin mineralojik bileşiminin, şişme potansiyeli ile oldukça önemli bir ilişkisi bulunmakta ve şişme özellikleri hakkında bizlere bilgi vermektedir. Böylece kilin ana mineralinin belirlenmesi ile şişme potansiyeline sahip olup olmadığına karar verilebilmektedir. Kil minerallerinin yüzeyindeki negatif elektrik yükleri ve katyon değişim kapasitesi kilin şişme potansiyelini etkilemektedir. Bu nedenle, kil mineralojistlerinin iddiasına göre, herhangi bir kilin şişme potansiyeli o kilin bütünü oluşturduğu mineralin aşağıdaki tekniklerle tanımlanması sonucunda değerlendirilmektedir.

- X ışını analizi
- Diferansiyel termal analiz
- Boya adsorpsiyonu
- Kimyasal analiz
- Elektron mikroskopunda belirleme.

1.3.2.1.1.1. X Işını Analizi

X ışını analizinde, standart maddelerin kırınım çizgileri kullanılarak tanımlama yapılmaktadır. Brindley (1951), killerin tanımlanmasında fotoğraf tekniklerinin yerine kendi kendine kayıt yapabilen sayaç spektrometrelerinin kullanılmasının, yöntemin hem doğruluğunu hem de uygunluğunu artırdığını ileri sürmüştür. Buna ek olarak nicel tanımlama için bu yöntemin çok büyük bir titizlikle uygulanması gerektiğini belirtmiştir.

Max von Laue (1912)'nin önerisi ile ilk defa X ışınları kristallerde kullanılmışlardır. Bakır sülfatta yapılan deneylerin bir sonuç vermemesi üzerine, deneyler sfaleritte yapılmak suretiyle bir çok maddenin yapısı belirlenmiştir. Bu analizde toz haline getirilen numune cam plaka üzerine konulmakta ve X ışınları sabit bir kaynaktan gelecek şekilde ayarlanarak zemin, X ışınları aletinin örnek yuvasına yerleştirilmektedir. Kaydedici, sabit bir hızla döndürülen numunede, dönme sırasında X ışınının açısının herhangi bir atomik düzlemde denklem (2)'de verilen Bragg eşitliğini verene kadar, temel X ışınlarını kaydetmektedir.

$$2d_1 \sin\theta = n\lambda \quad (2)$$

burada;

d_1 : Kristallerdeki atomik düzlemler arasındaki mesafeyi,

λ : X ışınının dalga boyunu,

n : Tam sayıyı,

θ : Kırılma açısını ifade etmektedir (Tüdeş,1996).

Numunenin sürekli dönmesinden dolayı değişik zamanlarda grafik kağıdında oluşan pikler, X ışınının şiddetinin yükseldiği yani Bragg eşitliğinin sağlandığı anı temsil etmektedir. Daha sonra analizde piklerin 2θ açıları okunarak, Bragg eşitliği hesaplanmakta ($n=1$) ve eldeki d_1 mesafelerine göre hazırlanmış bilgisayar programından zemin cinsi belirlenmektedir.

1.3.2.1.1.2. Diferansiyel Termal Analiz

Diferansiyel termal analiz (DTA), X ışını ve kimyasal analiz yöntemleri ile birlikte tanımlanması zor olan maddelerin analizinde kullanılmaktadır. Bu analiz, sıcaklıkla

karakteristik değişime uğrayan maddelerin kontrolünde kullanılan uygun bir yöntemdir. Şişen zeminlerin tanımlanmasında farklı diferansiyel termal analiz tekniklerinin kullanılması her zaman doğru olmamaktadır (Dodd, 1955).

1700'lü yıllarda Fransızlar tarafından bulunan bu analiz, iki tane termal bağlantı üzerinde ısıtma sonucu, farklı ısınmadan dolayı oluşan gerilim farkının ısıya bağlı olarak değişiminin incelenmesinden ibarettir. DTA, aynı sıcaklık altında, incelenecek olan malzeme ile, inert (Al_2O_3 , MgO veya camtozu) adı verilen ve hiç su içermeyen bir bileşimin birbirlerine göre sıcaklık farklarının incelenmesi koşuluna dayanmaktadır. İncelenen malzemede meydana gelen kimyasal bir tepkime, faz değişimi gibi nedenlerden kaynaklanan sıcaklık farkının oluşmasıyla çizilen eğride pikler oluşturmaktadır (Tüdeş,1996).

Bu analizde yüzdürme yöntemi uygulanıp, etüve koyulan malzeme kurutulduktan sonra dövülüp toz haline getirilmektedir. İneret maddeyi platin veya porselenden yapılan özel kaplar içine, zeminimizi de termokapılların (platin-iridyum) üzerine yerleştirerek, 1000-1600 °C'ye kadar ısıtma yapılmaktadır. Oluşan bu ısıyla alet tarafından çizilen eğri üzerinde pikler belirlenmekte ve ısı cetvelin yardımıyla da ısı eğrisini çizdiği nokta belirlenerek, mineralin cinsi tespit edilmektedir.

1.3.2.1.1.3. Boya Adsorbsiyonu

Tipik renkleri tanımlayan boya maddeleri ve diğer ayıraçlar, kil tarafından adsorbe edildiğinde killerin tanımlanmasında kullanılabilirler. Bir kil numunesi asitle işleme tabi tutulduğunda oluşan renk, mevcut çeşitli kil minerallerinin baz değişim kapasitesine bağlı olarak karakteristlik özellik göstermektedir. Şayet zemindeki montmorillonit miktarı % 5-10'dan fazla ise montmorillonit varlığı tespit edilmektedir. Nispeten basit deney yöntemleri ve boyama deneylerinin hızı, X ışını analizi ve diferansiyel termal analiz ile karşılaştırılırsa, bu yöntemin uygulamasının daha kolay olduğu görülmektedir (Chen, 1988).

1.3.2.1.1.4. Kimyasal Analiz

Killerin tanımlanmasında kimyasal analiz yöntemi, diğer yöntemlere ilave olarak kullanılabilir. Montmorillonit minerallerinde, kimyasal analiz izomorfizmin tanımlanmasında ve kafesteki yüklerin konumunun gösterilmesinde kullanılabilir. Kelley (1955)'e göre, montmorillonitin izomorfizm karakteri başka bir şekilde gösterilememektedir. İzomorfizm, kafeste tetrahedral yapıda Al yerine Si, oktahedral koordinasyonda Fe yerine Al, oktahedral yapıda da Mg yerine Al kullanımı şeklinde üç farklı varyasyondan oluşmaktadır.

1.3.2.1.1.5. Elektron Mikroskobunda Belirleme

Kil minerallerinin mikroskobik tanımlaması maddelerin direkt olarak incelenmesine imkan tanımaktadır. İki farklı kil minerali bazen aynı X ışını şablonu ve diferansiyel ısı eğrisini verebilmektedir. Fakat killer elektron mikroskobu altında farklı morfolojik özellikler göstermektedirler. Mikroskobik incelemenin esas amacı mineralojik bileşimin, dokunun ve iç yapının tanımlanmasıdır.

Ravina (1973), şişen killerin mineralojik bileşiminin elektron mikroskobu ile taranması konusunda kapsamlı bir araştırma yapmıştır. Bu araştırma sonucunda montmorillonit kırışık ve peteğe benzer bir dokuya sahipken, şişmeyen killerin de düz ve nispeten kalın plakalar şeklinde olduğunu tespit etmiştir. Böylece elektron mikroskobu taraması ile daneler arasındaki bağ gözlenerek, şişen killerin bazı özelliklerini değerlendirmek mümkün olabilmektedir.

1.3.2.1.2. Tekil İndeks Yöntemi

Zemin özelliklerini belirlemek amacı ile yapılan deneylerin bazıları, şişen zeminlerin şişme potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılabilirler. Yapılması kolay olan bu deneyler;

- Atterberg (kıvam) limiti deneyleri,
- Lineer büzülme deneyleri,
- Serbest şişme deneyleri,

- Kolloid içeriği deneyleridir.

1.3.2.1.2.1. Atterberg Limiti Deneyleri

Pek çok kilin şişme karakteristiklerinin tanımlanmasında plastisite indisi ve likit limitin önemli bir gösterge olduğu Holtz, Gibbs (1956) tarafından belirtilmiştir. Seed vd. (1962)'de bir çok şişen kilin tanımlanmasında plastisite indisinin tek başına ilk gösterge olarak kullanılabileceğini söylemişlerdir. Peck vd. (1974) tarafından da killerin şişme potansiyeli ile plastisite indisi arasındaki ilişki, Tablo 8'de ki gibi tanımlanmıştır.

Tablo 8. Plastisite indisi ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Peck vd., 1974).

Plastisite İndisi	Şişme Potansiyeli
0-15	Düşük
10-35	Orta
20-35	Yüksek
≥ 35	Çok Yüksek

Buradan plastisite indisi yüksek olan zeminlerin, yüksek şişme potansiyeline sahip oldukları kolayca görülmektedir.

1.3.2.1.2.2. Lineer Büzülme Deneyleri

Şişme potansiyelinin, basit deney yöntemleri ile ölçülen lineer büzülme özelliklerine bağlı olduğu varsayılmaktadır. Bu teoriye göre, kilin büzülme özellikleri şişme potansiyeli için tutarlı ve güvenlidir (Chen, 1988). Altmeyer (1955), lineer büzülme ve büzülme limitlerinin çeşitli değerleri için potansiyel şişmenin tanımlanmasında yol göstermek amacı ile Tablo 9'u önermiştir. Bununla birlikte son yıllarda yapılan araştırmalar şişme potansiyeli ve büzülme limitleri arasındaki karşılıklı ilişkinin kesin kanıtlarını ortaya koyamamıştır (Chen, 1988).

Tablo 9. Lineer bütülme ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Altmeyer, 1955).

Bütülme Limiti (%)	Lineer Bütülme (%)	Şişme Derecesi
< 10	> 8	Kritik
10 – 12	5 – 8	Marjinal
> 12	0 - 5	Kritik Değil

1.3.2.1.2.3. Serbest Şişme Deneyleri

Serbest şişme deneyleri, bilinen bir hacimdeki kuru zeminin herhangi bir sürşarj yükü olmaksızın suya doygun hale getirilmesi ile oluşan şişmenin ölçülmesinden ibarettir. Bu deneylerde başlangıç ve nihai hacimler arasındaki fark, başlangıç hacminin yüzdesi olarak tanımlanan serbest şişme değerini vermektedir.

Holtz, Gibbs (1956) tarafından yapılan deneylerde, yüksek şişme özelliğine sahip bentonitin serbest şişme değerinin % 1200-2000 arasında değiştiği görülmüştür. Holtz, serbest şişme değeri % 100 civarında olan zeminlerin, hafif yüklenmiş yapılarda önemli hasarlara neden olabileceğini, % 50'nin altında olan zeminlerin ise çok hafif yüklerin altında bile gözle görülebilir hacim değişiklikleri gösterebileceğini belirtmiştir (Chen, 1988).

1.3.2.1.2.4. Kolloid İçeriği Deneyleri

Bir kilin dane boyutu özellikleri, onun şişme potansiyeli, özellikle de kolloid içeriği ile ilgilidir. Seed vd., (1962), şişme potansiyeli ile kil boyutu yüzdesi arasında bir ilişki olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bununla birlikte kilin şişme miktarı, zeminde mevcut olan kil miktarının artması ile artmaktadır (Şekil 9).

Verilen herhangi bir kil minerali için, şişme potansiyeli ve kil boyutu yüzdesi arasındaki ilişki (3) denklemi yardımıyla ifade edilebilir (Bandyopadhyay, 1981):

$$S = KC^x \quad (3)$$

burada;

S: Şişme potansiyeli (Optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış bir zemin numunesinin 1 psi sürşarj yükü altındaki şişme yüzdesi),

C: 0.002mm.'den küçük kil boyutu yüzdesi,

X: Kil tipine bağlı bir üst,

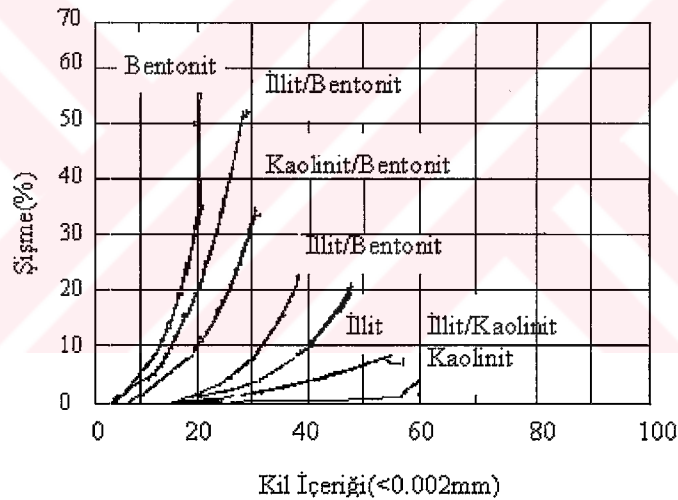
K: $a A^b$ eşitliğinden elde edilen, kil tipine bağlı bir katsayıdır. Burada A, kilin aktivitesini, a ve b katsayıları ise değişik plastisite indisi değerleri için aşağıdaki gibi değişen sayıları ifade etmektedir.

$$I_p \leq 20 \text{ için } a = 3.28 \times 10^{-5}; b = 2.259$$

$$20 < I_p \leq 30 \text{ için } a = 2.40 \times 10^{-5}; b = 2.573$$

$$30 < I_p \leq 40 \text{ için } a = 1.44 \times 10^{-5}; b = 2.559$$

$$40 < I_p \leq 60 \text{ için } a = 0.72 \times 10^{-5}; b = 2.669$$



Şekil 9. Şişme potansiyeli ile kil boyutu yüzdesi arasındaki ilişki (Seed vd., 1962).

1.3.2.1.3. Sınıflandırma Yöntemleri

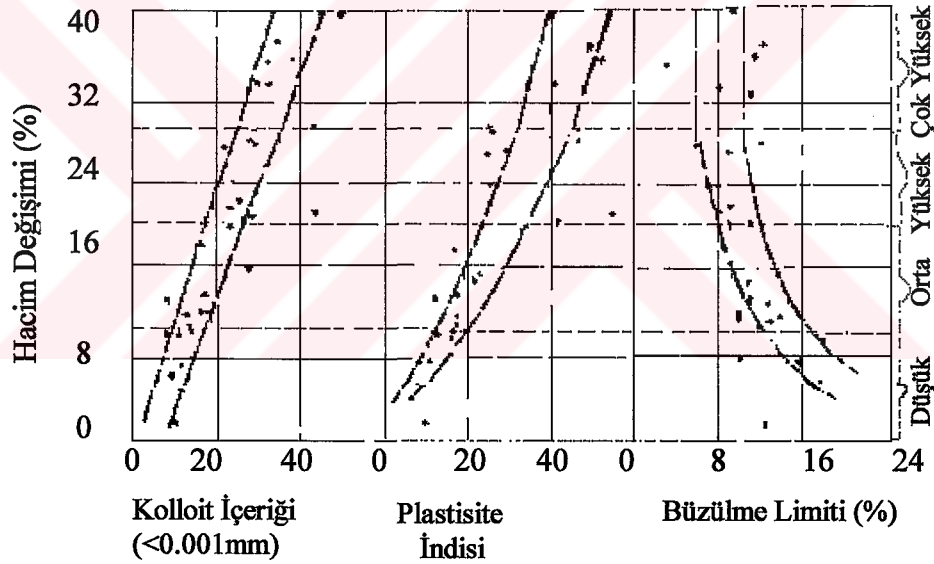
Sınıflandırma, potansiyel olarak şişen zemin problemlerinin tanımlanmasına yardımcı olan bir çalışmadır. Geçerli bir sınıflandırma kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası ve zemin emmesi gibi indeks özelliklerini içermelidir. Şişen zeminler bir çok kişi ve kuruluş tarafından farklı şekillerde sınıflandırılmaktadırlar. Bu yöntemlerden bazıları şunlardır:

- USBR yöntemi

- Aktivite yöntemi
- USAEWES yöntemi

1.3.2.1.3.1. USBR Yöntemi

Holtz, Gibbs (1956) tarafından geliştirilen bu yöntem, çeşitli zemin özelliklerinin bir arada kullanılması esasına dayanmaktadır. 1 μm 'den (ağırlık yüzdesi) az olan kolloid içeriği ve büzülme limitleri bu sınıflandırmada etkin olan parametrelerdir. Bu parametrelere ek olarak plastisite indisi ve şişme yüzdesi de kullanılmaktadır. Şişme potansiyeli ile bu özellikler arasındaki tipik bir ilişki Şekil 10'da verilmektedir (Holtz, Gibbs, 1956).



Şekil 10. Kolloid içeriği, plastisite indisi ve büzülme limitinin, hacim değişimi ilişkisi (Holtz, Gibbs, 1956).

Şekil 10'da verilen eğrilere dayanarak Holtz (1959), şişen killeri tanımlama kriterlerini Tablo 10'da verildiği gibi göstermektedir. Şekil 10, 45 adet örselenmiş ve örselenmemiş numune üzerinde yapılan gerçek şişme deneylerine dayanmaktadır. Fakat ölçülen şişme değerleri arasında doğru bir ampirik ilişki elde etmek için veri toplamak yeterli değildir. Örselenmiş ve örselenmemiş numuneler arasındaki zemin davranışlarının farklı olmasına özellikle dikkat edilmelidir.

Tablo 10. İndeks özellikleri ve olası hacim değişikliği Holtz (1959).

Kolloid Muhtevası (<0.001 mm)	Plastisite İndisi	Büzülme (Rötre) Limiti	Toplam Hacmin Yüzdesi Olarak Olası Şişme*	Şişme Derecesi
>28	>35	<11	>30	Çok yüksek
20-13	25-41	7-12	20-30	Yüksek
13-23	15-28	10-16	10-30	Orta
<15	<18	>15	<10	Düşük

*1 psi düşey yük altında ve kuru durumdan suya doymuş duruma gelmesi için.

Chen (1988), son 30 yılı aşkın bir süredir potansiyel şişme ve indeks özellikleri üzerinde binlerce deney yapmıştır. 321 örselenmemiş numune üzerinde yaptığı bu deney sonuçlarından elde edilen regresyon eğrisi Şekil 11'de verilmektedir. Şişme potansiyeli ve plastisite indisi arasındaki ilişki de, denklem (4)'de verildiği gibidir;

$$S = B \cdot e^{A(I_p)} \quad (4)$$

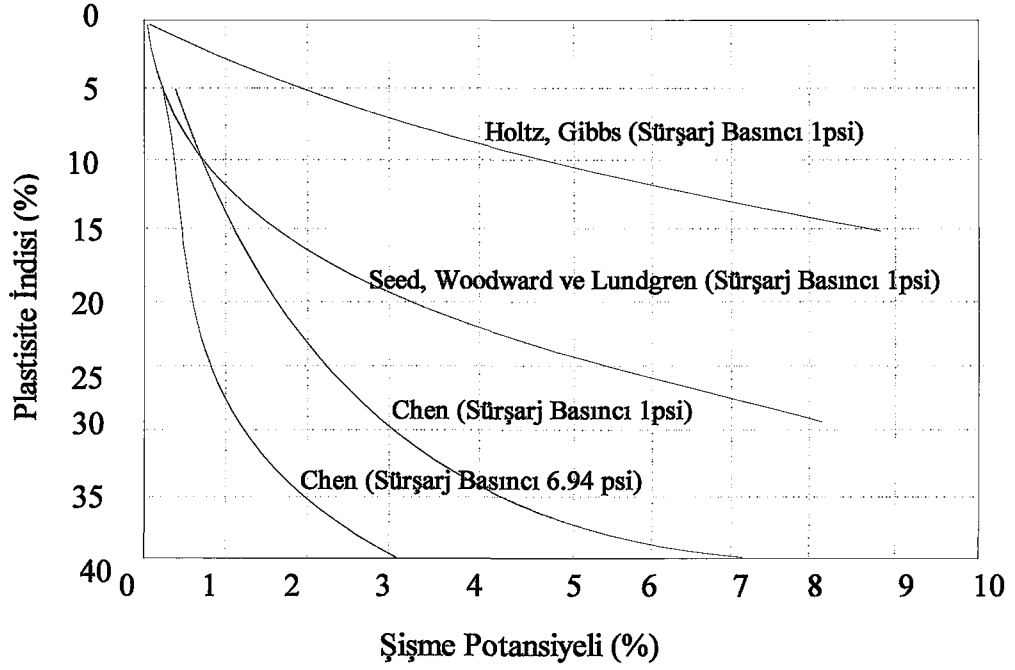
burada;

S : Şişme potansiyeli

A : 0.0838

B : 0.2558'dir.

Şekil 11'den, plastisite indisinin artması ile şişme potansiyelinin arttığı, Holtz, Gibbs (1956) ve Seed vd., (1962) tarafından tahmin edilen şişme potansiyelinin, Chen (1988) tarafından tahmin edilen şişme potansiyelinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bütün deneyler 1 psi sürşarj yükü, %15-25 su muhtevası ve 100-110 pcf kuru birim hacim ağırlığındaki numuneler üzerinde yapılmıştır.



Şekil 11. Hacim değişimi, plastisite indisi ilişkisi (Chen 1988).

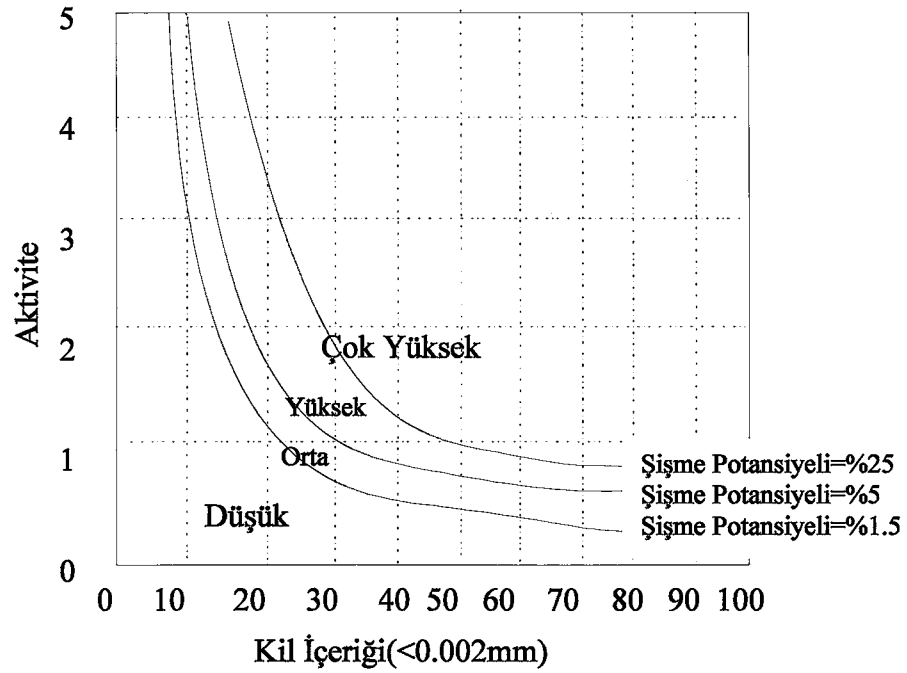
1.3.2.1.3.2. Aktivite Yöntemi

Seed vd., (1962) tarafından sunulan aktivite yönteminin esasını, laboratuarda hazırlanmış bentonit, illit, kaolinit ve ince kumun karışımından ibaret olan zeminler oluşturmaktadır (Ertekin, 1991). Şişme, maksimum kuru birim hacim ağırlıkta ve optimum su muhtevasında sıkıştırılan zeminin, 1 psi sürşarj yükü altında serbest su girişi ile şişmesi sonucu ölçülen kabarma yüzdesidir. Suni olarak hazırlanan bu numunelerin aktivitesi;

$$\text{Aktivite} = \frac{I_p}{C-10} \quad (5)$$

bağıntısından hesaplanmaktadır. Burada C, 0.002mm.'den daha küçük olan kil yüzdesini göstermektedir. Bu yöntem için Seed vd. (1962) tarafından önerilen sınıflandırma kartı da Şekil 12'de verildiği gibidir (Ertekin, 1991).

Aktivite yöntemi şişme potansiyelinin değerlendirilmesinde büzülme limitini dikkate almayan USBR yönteminden daha gelişmiş bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 12. Şişme potansiyeli sınıflandırma kartı

1.3.2.1.3.3. USAEWES Yöntemi

USAEWES (United States Army Engineer Waterways Experiment Station), potansiyel şişme için likit limit, plastisite indisi ve başlangıç (arazi) zemin emmesinin kullanıldığı bir sınıflandırma sistemi önermiştir (Tablo 11). Potansiyel şişme, 2.5 kPa'lık bir oturma yükü altındaki serbest şişme deneyinden $(\Delta H/H) \cdot 100$ olarak hesaplanmaktadır (Ertekin,1991).

Tablo 11. USAEWES sınıflandırma yöntemi

W_L (%)	I_P (%)	Başlangıç Zemin Emmesi (Tons/sq.ft)	Potansiyel Şişme (% Şişme)	Şişme Derecesi
< 50	< 25	< 1.5	< 0.5	Düşük
50-60	25-35	1.5-4.0	0.5-1.5	Orta
> 60	> 35	> 4.0	> 1.5	Yüksek

1.3.2.1.4. Dolaylı Ölçümler

Şişen zeminlerde şişme potansiyelinin dolaylı ölçümü, bir çok araştırmada kullanılmakta olan bir yöntem olup, PVC ölçümü ve ampirik bağıntıları içermektedir. Zemin emme gerilmesi yöntemi şişme basıncı ve şişme potansiyelinin ölçülmesinde yeni bir yaklaşım olarak düşünülürken, PVC ölçümü ile desteklenen Ladd ve Lambe yöntemi en basit ve hızlı olan yöntemdir (Chen, 1988).

1.3.2.1.4.1. PVC Ölçümü

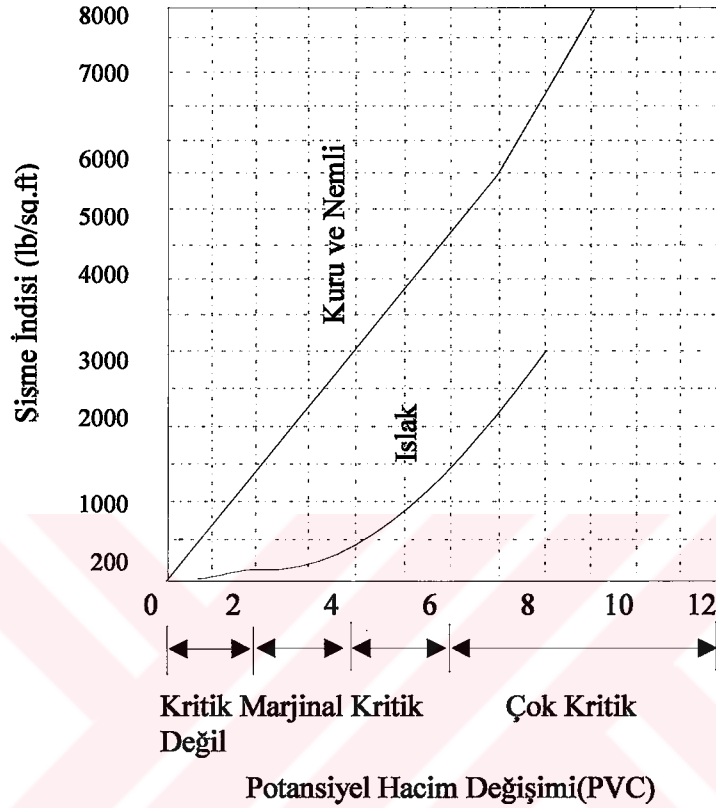
Zeminin potansiyel hacim değişiminin (PVC) tanımlanmasını sağlayan ve Federal İskan Yönetimi (Federal Housing Administration) himayesinde Lambe tarafından geliştirilen bu yöntemde örselenmiş numuneler kullanılmaktadır. Bu yöntemde numune ilk önce 55.000 ft.-lbs per cu. ft.'lik bir kompaksiyon kuvveti ile sabit bir konsolidasyon halkasında sıkıştırılmış, daha sonra 200 psi'lik bir ön basınç uygulanarak, bir yük halkası vasıtası ile kısmen düşey yöndeki şişmesi engellenerek su verilmiştir. Bu işlemlerin ardından iki saat sonunda yük halkasından alınan okuma değeri basınca dönüştürülmüş ve bu değer şişme indisi olarak isimlendirilmiştir. Elde edilen bu şişme indisi Şekil 13 yardımıyla potansiyel hacim değişimine dönüştürülebilmektedir. Lambe, PVC oranlarının sınırlarını Tablo 12'deki gibi vermiştir (Chen, 1988).

Tablo 12. PVC oranları (Chen, 1988).

PVC Oranları	Kategori
< 2	Kritik değil
2 – 4	Marjinal
4 – 6	Kritik
> 6	Çok kritik

PVC ölçüm deneyleri şişme potansiyelinin ölçülmesinde kullanılmayıp, sadece çeşitli şişen zeminlerin mukayesesinde kullanılabilir. Hem şişme hem de bütülmeden kaynaklanan potansiyel hacim değişimine göre sınıflandırılan zeminler aracılığı ile

önerilen bir sınıflandırma sistemi olan bu yöntem çok geniş ilgi görmemiştir (Ladd, Lambe 1961).



Şekil 13. Şişme indisi, potansiyel hacim değişimi ilişkisi (Chen, 1988).

1.3.2.1.4.2. Genleşme İndisi

Son zamanlarda, ASTM komitesi genleşme indisini şişen zeminlerin karakteristiklerinin belirlenmesinde, birleştirilmiş bir yöntem olarak kullanmaktadır. Buna göre genleşme indisinin zeminin basit bir indeks özelliği olduğu iddia edilmekte, bu nedenle de zeminin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi gibi özelliklerine benzediği ileri sürülmektedir.

Bu yöntemde zemin öncelikle 4 nolu elekten elendikten sonra, % 49-51 arasındaki doygunluk derecesine ulaşmaya kadar su ilave edilmekte ve toplam sıkıştırma derinliği yaklaşık 2 inch olacak şekilde, 40 inch çapındaki bir kalıpta 2 tabaka halinde sıkıştırılmaktadır. Her bir tabaka 12 inch yükseklikten, 5.5 lb.'lik bir tokmağın, 15 kez

düşürülmesi ile sıkıştırılmaktadır. Bu şekilde hazırlanan numuneler, 10 dk.'lık bir süreçle, 1 lb./sq. in.'lik bir basınç altında konsolide edilmekte ve şişme tamamlanana kadar numuneye su verilmeye devam edilmektedir.

Bu yöntemde genleşme indisi:

$$EI = \frac{\Delta H_n}{T_1} * 1000 \quad (6)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada;

ΔH_n =Yükseklikteki değişim (T_2-T_1)

T_1 =Başlangıçtaki numune yüksekliği (cm)

T_2 =Deney sonundaki numune yüksekliği (cm)'dir.

Potansiyel olarak şişen bir zeminin sınıflandırılması Tablo 13 yardımı ile yapılmaktadır.

Tablo 13. Şişen zeminlerin sınıflandırılması (Chen, 1988).

Genleşme İndeksi (EI)	Potansiyel Şişme
0 – 20	Çok düşük
21 – 50	Düşük
51 – 90	Orta
91 – 130	Yüksek
> 130	Çok yüksek

Örselenmiş numunelerin kullanıldığı bu yöntem, şişen zemin karakteristiklerinin karşılaştırılması için basit bir deney yöntemidir. Bununla birlikte, örselenmemiş zeminin özelliklerinin, örselenmiş zemininkinden oldukça farklı olduğu da unutulmamalıdır.

1.3.2.1.4.3 Şişme İndisi

Vijayvergiya, Ghazzaly (1973), killerin şişme potansiyelini tanımlamak amacı ile şişme indisi kavramına dayanan basit bir yöntem ortaya koymuşlardır. Buna göre şişme indisi:

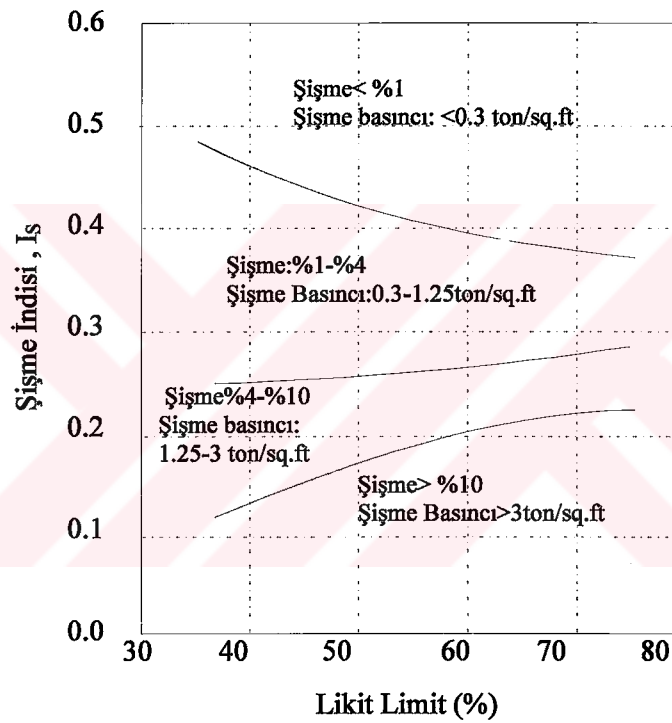
$$I_s = \frac{W}{W_L} \quad (7)$$

olup, burada;

W: Doğal su muhtevası (%)

W_L: Likit limiti (%) ifade etmektedir.

Geniş bir likit limit aralığı için, I_s ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki Şekil 14'de verilmektedir.



Şekil 14. Likit limit, şişme indisi ilişkisi (Vijayvergiya, Ghazzaly, 1973).

1.3.2.1.5. Doğrudan Ölçümler

Şişen bir kilin şişme basıncı ve şişme potansiyelinin tanımlanmasında en uygun ve doğru deney yöntemi doğrudan ölçümlerdir. Şişen zeminlerin doğrudan ölçülmesi geleneksel bir boyutlu konsolidasyon aleti kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Yük, Conbel konsolidasyon düzeneğinde hava vasıtası ile, konsol konsolidasyonda direkt ağırlık olarak uygulanmaktadır. Bu düzenekte zemin numunesi metal bir halka ile sınırlanmış ve iki

gözenekli plaka arasında hapsedilmiştir. Halkanın çapı numune alıcının tipine bağlı olarak 2-4 inch arasında, numunenin kalınlığı da 1-1.5 inch arasında değişmektedir. Zemin numunesinin hem alttan hem de üstten su alması sağlanmakta ve düşey şişmenin ölçümü, numunenin yükseklik değişiminin yüzdesi olarak, şişme yüzdesi adı altında hesaplanmaktadır.

Böyle bir düzenek, çeşitli şartlar altında bir kilin şişme potansiyelinin doğru ve kolay olarak tespit edilmesine imkan sağlamaktadır. Zemin maksimum hacim artışına ulaştıktan sonra, ilk yüksekliğine ulaşıncaya kadar yüklenmekte ve ilk yüksekliğine ulaştığı andaki yük değeri de, şişme basıncı olarak kaydedilmektedir. Böylece zemin hacmini sabit tutan düzeneğe ihtiyaç kalmaksızın şişme basıncı tespit edilebilmektedir.

Konsolidasyon düzeneği kullanılarak yapılan şişme deneyleri, zemin mühendisleri ve akademik kuruluşların arşivlerinde bir çok verinin toplanmasını sağlamaktadır. Fakat farklı deney yöntemleri kullanıldığından, deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılması zor olmaktadır (Vijayvergiya, Ghazzaly; 1973). Tipik bir şişme deneyinin yapılması sırasındaki en önemli değişkenler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Numunenin durumu: Örselenmemiş bir numune için, bu durum numune alma yöntemini, numunenin gerilme tarihçesini ve numune durumunu kapsamaktadır. Örselenmiş numuneler için de, kompaksiyon yöntemi, kompaksiyon öncesi ve sonrasındaki kür süresini ve kompaksiyon birim hacim ağırlığını kapsamaktadır.
- Su muhtevası: Başlangıç su muhtevası ne kadar düşük olursa, şişme o kadar yüksek olmaktadır. Başlangıç su muhtevası da, ıslatmadan önce numunenin halkada kalma süresine, numune halkada iken izin verilen buharlaşma miktarına ve laboratuvarın sıcaklık ve nemine bağlı olarak değişmektedir.
- Sürşarj yükü: Uygulanan yükün artması şişmeyi azalmaktadır. Bir çok laboratuvar uygulamasındaki sürşarj yükü 1-10 psi arasında değişmektedir.
- Zaman: Şişme süreci boyunca ihtiyaç duyulan zaman, kilin permeabilitesine, kuru birim hacim ağırlığına ve numunenin kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. 1 inch kalınlığındaki örselenmemiş bir zemin numunesinin toplam mevcut şişmesinin tamamlanması oldukça uzun zaman almaktadır.

Sonuç olarak direkt ölçüm yönteminin en önemli ve güvenilir deney yöntemi olduğu görülmektedir.

1.3.2.2. Şişmenin Oluşma Biçimi

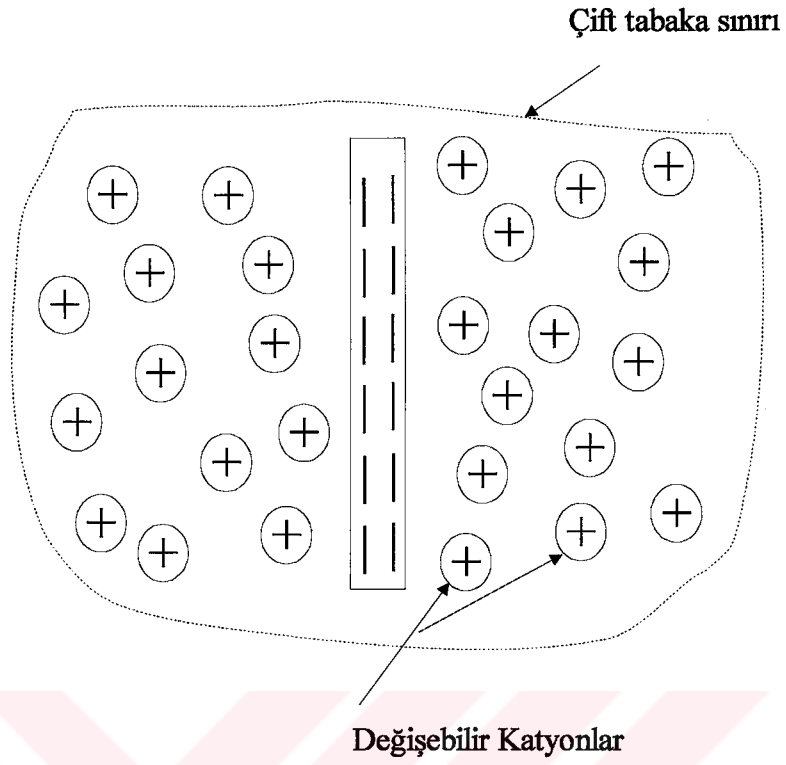
Kil minerallerinin yüzeyinde gelişen zayıf çekici elektriksel kuvvetler olan Van Der Waal kuvvetleri, komşu kil mineral yüzeyleri arasında bulunup, yüzeyleri birbirine bağlama eğilimindedirler. Bu kuvvetler, kuru ve ıslak durumlarda, suyun emilmesini kontrol ederek emme başladıktan sonra, su moleküllerini kil yüzeyine bağlamada küçük bir rol oynamaktadırlar. Van Der Waal kuvvetleri sırasıyla, dipol-dipol kuvvetleri, indüksiyon etki kuvvetleri ve London kuvvetleri olmak üzere üç tip zayıf çekici kuvvet tipini içermektedir.

Dipol-dipol etki kuvvetleri, kısmen su moleküllerini yönlendirerek bu molekülleri kil mineral yüzeyine bağlanmaktadır.

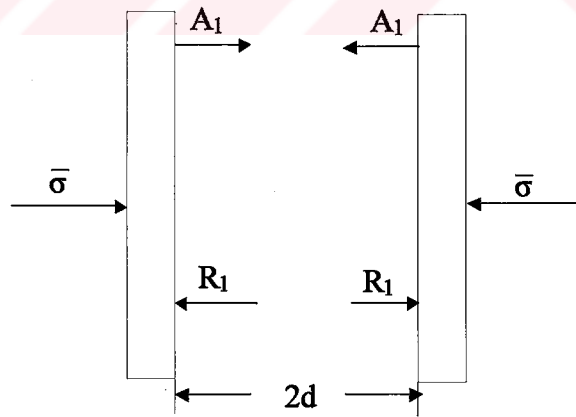
İndüksiyon etki kuvvetleri, dipol-dipol kuvvetlerine benzemekte olup bir dipol ile diğer dipolün kutuplanmış elektronlarının arasındaki etkileşim sebebiyle yönlendirilmemiş moleküller arasında ortaya çıkmaktadır. London kuvvetleri, ayırık kuvvetler olarak da ifade edilir ve bütün moleküllerde veya özellikle çok küçük parçacıklarda ortaya çıkabilmektedir. Van der Waal kuvvetlerinin etkisi, çift katmanın suyun kil minerallerine çekildiği durumlar altındaki gelişimi ile ortadan kaldırılmıştır (White, 1979). Bahsedilen bu olgunun ölçümü oldukça zordur. Bu nedenle hacim değişikliklerinden sorumlu mikro ölçekli mekanizmaların sayısı üçe indirgenebilmektedir. Bunlar kil parçacık çekimi, katyon hidrasyonu ve osmotik gerilmedir. Bir çok durumda bu üç mekanizma şişmeden birinci derecede sorumludur. Islak olarak nitelendirilebilen optimum su muhtevasına sahip zeminlerde şişmeye, osmotik gerilmeler, kuru olarak nitelendirilebilen optimum su muhtevasına sahip zeminlerde ise şişmeye sırasıyla katyon hidrasyonu, suyun kil parçacık yüzeyine çekimi, London van der Waal kuvvetleri, elastik sönme, danelerin konumu, havanın varlığı ve osmotik gerilme etki etmektedir (Ladd, 1960).

Doymuş bir kildeki herhangi bir hacim artışı, kildeki suyun hacmindeki artışa eşit olarak göz önüne alınabilmektedir. Şekil 15’de bir kil parçacığı saf suya daldırılmış ve yeteri miktarda değiştirilebilir katyonlar, parçacığı elektriksel olarak nötr bir sistem haline getirmek amacıyla çevirmiştir. Bu sistem “misel” olarak adlandırılmaktadır. Misel içindeki iyonlar ve su çift tabakayı oluşturmaktadır.

Şişmeden esas olarak sorumlu kil danecikleri arasındaki ilişkiden doğan itme gerilmesi R_1 , toplam çekim gerilmesi de A_1 olarak Şekil 16’daki gibi gösterilmektedir.



Şekil 15. Saf sudaki kil miseli (Ladd, 1960).



Şekil 16. İki kil danesi arasındaki gerilmeler (Ladd, 1960).

Standart bir konsolidasyon deneyinde numune etrafındaki gerilmenin şiddeti doğrudan efektif gerilmenin azalması ile ilişkilidir. Kil parçacıkları arasında rol oynayan fiziko-kimyasal kuvvetlerle ilişkili efektif gerilme (8) denklemi ile verilmektedir.

$$\bar{\sigma} = R_1 - A_1 \quad (8)$$

burada, $\bar{\sigma}$ = efektif gerilmedir. Şişen bir zeminde şişmenin oluşması için, R_1 değerinin, A_1 değerinden mutlaka büyük olması gerekmektedir.

Zemin suyu içindeki çözülmüş maddenin varlığı, kendisinin termodinamik özelliklerini etkilemekte ve onun potansiyel enerjisini azaltmaktadır. Çözülmüş madde diğer yandan da zemin suyunun buhar basıncını düşürmektedir. Suyun potansiyel enerjisindeki bu azalma sıvının akışkanlığını önemli ölçüde azaltmakta ancak önüne akışı engelleyen bir engel ya da zar geldiğinde suyun geçişi eskisi kadar rahat olmamaktadır.

Şekil 17'de solüsyondan (örneğin sudaki tuz katyonları) yarı geçirgen bir zar ile ayrılan bir saf çözücünün (örneğin su) şematik temsili yapılmaktadır. Çözücü zardan geçerek solüsyon bölümüne girmekte ve solüsyon seviyesini soldaki bölümde yukarı çekmektedir. Bu olay, soldaki sulandırılmış solüsyonun bulunduğu kolondaki hidrostatik basıncın, solüsyona zar boyunca geçen çözücü moleküllerinin akışına karşı koymaya yetinceye kadar devam etmektedir. Çözücü moleküller zarda eşit oranlarda her iki yöne doğru geçiş yaptıklarında, dengedeki hidrostatik basınç solüsyonun osmotik basıncıdır.

Yarı geçirgen zar, oluşan osmotik basıncın esasını teşkil etmektedir. Zarın yapısı içinde yüksek sayıda, sıvı solüsyonun geçmediği çok ince kanalcıklar bulunabilmektedir. Buradan sıvı halde geçmeyen çözücü moleküllerinin, bu kanalcıklardan buhar olarak geçme ihtimalleri bulunmaktadır. Su molekülleri hava boşluklarında buharlaşarak çözülmüş maddeyi geride bıraktıklarından, hava boşlukları yarı geçirgen zarlar için güzel bir kaynak olmaktadır. Misel kili aynı zamanda yarı geçirgen bir zar gibi de davranmaktadır.

Sulu bir solüsyon, yarı geçirgen bir zar ile saf sudan ayrıldığı zaman, su, zardan solüsyona doğru geçme eğilimi göstermekte ve bu olay osmos olarak isimlendirilmektedir. Yarı geçirgen zardan solüsyona doğru suyun akışını engellemek için, solüsyona uygulanan basınç da solüsyonun osmotik basıncı olarak isimlendirilmektedir. Osmotik basıncın hesaplanması için formüller vardır. Bunların en basit olanlarından biri (9) denklemi ile verilen van't Hoff bağıntısıdır.

$$P_0 = R.T.c_1 \quad (9)$$

burada;

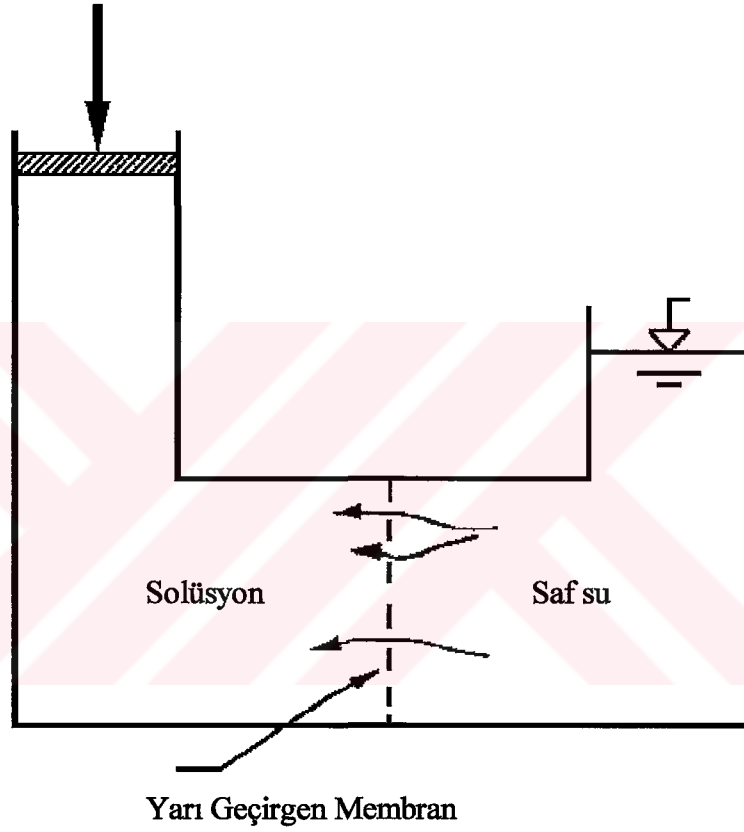
P_o : Osmotik basınç,

R: Gaz sabiti,

T: Mutlak sıcaklık,

c_1 : Çözünmüş maddenin konsantrasyonudur.

P_o =Osmotik Basınç



Şekil 17. Osmotik basınç (Aytekin, 1992).

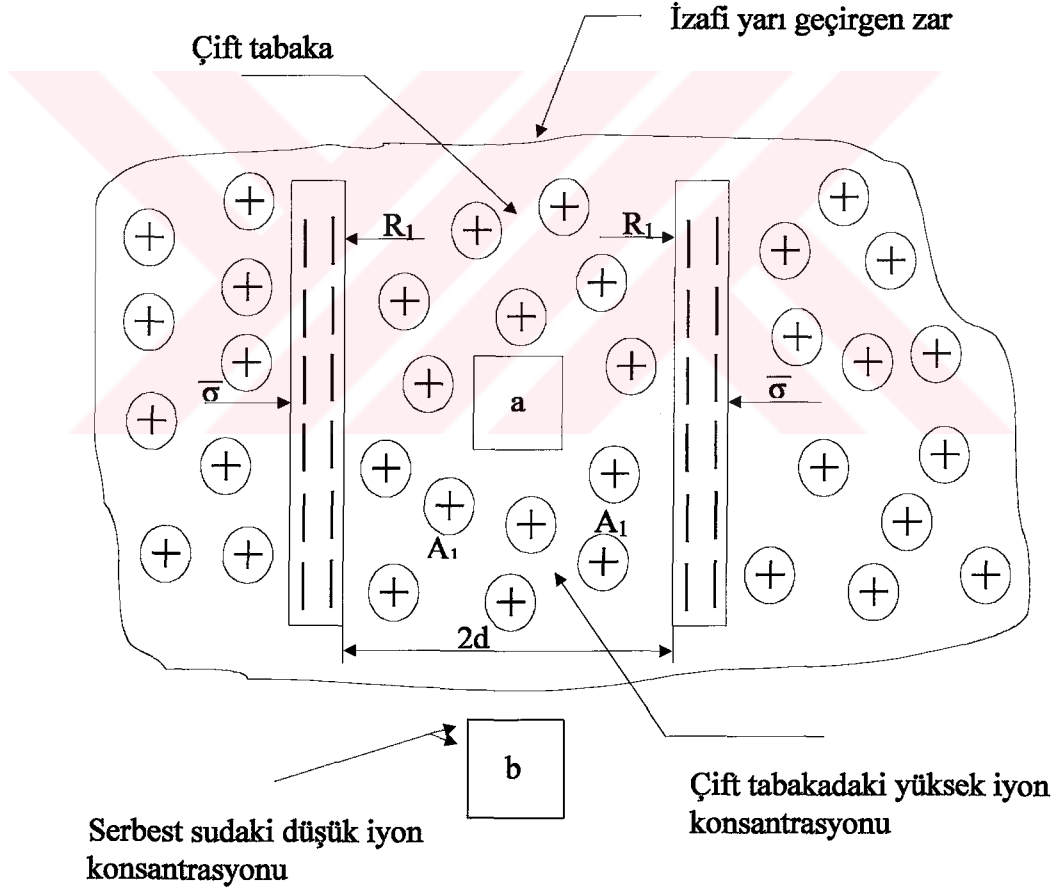
Osmotik basınç çok yüksek değerlere ulaşabilmekte ve konsantrasyonları eşit olmayan iki solüsyon arasında da gelişebilmektedir. Bu durum (10) denklemi ile gösterilmiştir.

$$P_o = R.T. (c_a - c_b)$$

(10)

Burada c_a ve c_b yarı geçirgen zarın her iki yanındaki çözülmüş madde konsantrasyonunu göstermektedir. Osmotik basınç killerde, çözülmüş madde konsantrasyonunda eksikliğin bulunduğu ve negatif olarak yüklenmiş kil danecikleri etrafındaki elektrik alanının yarı geçirgen bir zar olarak rol oynadığı durumlarda görülmektedir.

Değiştirilebilir katyonlar, daneciklerdeki negatif yüklerden oluşan net negatif elektrik alan vasıtasıyla kil daneciklerine doğru çekilirler. Böylece, elektrik alan suyun çift tabakaya girmesine izin veren, fakat değiştirilebilir katyonların bu tabakadan ayrılmasına izin vermeyen yarı geçirgen bir zar olarak rol oynamaktadır. Şekil 18'deki sınır çizgisi bu yarı geçirgen zarı göstermektedir.



Şekil 18. Kil parçacıkları etrafındaki çift tabaka (Ladd, 1960).

Şekil 18'de su, a bölgesinden b bölgesine doğru akmak istemektedir. Efektif gerilme $\bar{\sigma}$ ve çekici basınç A_1 , şişmeyi veya daneler arasındaki boşluklardaki artışı önlemek için

gereklidir. Eğer $A_1 + \bar{\sigma}$ azaltılırsa, su a bölgesinden b bölgesine doğru akar ve böylelikle a bölgesindeki iyon konsantrasyonu azalır.

Danecikler arasındaki osmotik itici basıncı hesaplayan iyon konsantrasyonu farkı; parçacıklar arasında orta düzlemdeki iyon konsantrasyonundan serbest sudaki iyon konsantrasyonunun çıkarılması şeklinde tanımlanmaktadır. Böylece, van't Hoff eşitliğine dayanan osmotik basınç;

$$P_0 = R.T.(c_c - c_0) \quad (11)$$

şeklini almaktadır. Burada c_c ve c_0 parametreleri sırasıyla orta düzlem ve serbest sudaki katyon ve anyonlardan oluşan toplam iyon konsantrasyonunu göstermektedir.

Şişme olayını etkileyen diğer mekanizmalar ise, katyon hidrasyonu, kapiler (kılcallık) emme ve elastik gevşemedir. Fiziksel hidrasyon kil parçacıklarında değişiklik oluşturur. Katyonlar su ile karışıp bileşik oluşturdukları zaman (hidrasyon olayı), iyonik ışıınımları artmakta ve zemin kütlelerinde net bir hacimsel değişiklik ortaya çıkmaktadır. Suyun bir kil kütlelerine doğru hareketi kapiler emmesi olarak adlandırılır. Boşluklardaki suyun menüsküsü ile sıkıştırıcı kuvvetler kil parçacıklarına uygulanır. Serbest su, doymun olmayan kil kütleleri için hazır hale geldiğinde, boşluk suyu menüsküsü genişlemeye başlar ve kil parçacıklarında uygulanan sıkıştırıcı güçler azalır. Kapilarite filmi genişleyerek, zemin hacminde değişim meydana getirmekte veya diğer şişme mekanizmalarından biri için bir su kaynağı olarak davranmaktadır.

Doymun olmayan zeminlerde, şişme sürecini zemin su etkileşimi oluşturmaktadır. Doymun olmayan zemin problemlerinin çözümü ve formülasyonu genelde sayısal teknikler veya tahminlere dayanan doğrudan olmayan analiz yöntemleri gerektirmektedir (Aytekin, 1992).

1.3.3. Şişme Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Zeminlerin su içeriğindeki değişimlerden dolayı hacimlerinde meydana gelen artışa yani şişmeye neden olan kil minerali montmorillonittir. Killerin mineralojik özelliklerinin yanında, zeminin su içeriğindeki değişimden etkilenen emme kapasitesi de, kil zeminlerde şişmeye yol açan önemli bir faktördür (Hekimoğlu, 1996). Bunların dışında başlangıç su muhtevası, kuru birim hacim ağırlık, bölgedeki çevre şartları ve bitki örtüsü, yağış sıklığı,

buharlaşma oranı, şişen zeminlerin miktar ve derinliği, kilin orijini, kil plakalarının yerleşim biçimi, zeminin gerilme tarihçesi, permeabilitesi, boşluk oranı ve kilin aktivitesi şişmeye neden olan parametreler arasında yer almaktadır.

şişmeyle hacimde meydana gelen değişiklik, zemin yapısının stabilitesini bozmakta ve buna bağlı olarak da üst yapıda deformasyonlar oluşmaktadır. Bu hacim artışı genellikle şişme potansiyeli olarak tanımlanan şişme yüzdesi ve şişme basıncı olarak iki parametre ile ifade edilmektedir. şişmenin üst yapıda meydana getireceği hasarların önceden belirlenebilmesi içinde bu iki parametrenin önceden belirlenmesi gerekmektedir.

1.3.3.1. şişme Potansiyeli

Laboratuarda belli şartlarda sıkıştırılan veya doğal zemin numunesinin belirli bir sürşarj yükü altında, sıfır yanal deformasyon durumunda, suya doygun hale gelinceye kadar oluşturduğu düşey şişme miktarının, başlangıçtaki yüksekliğine oranı olarak ifade edilmektedir. Bu hacimsel artış yüzdesi iki şekilde tanımlanabilir. Birincisi; sabit ve küçük bir sürşarj yükü altında numune doygun hale gelirken, sıfır yanal deformasyon durumunda oluşan düşey boy değişimi, ikincisi ise; düşey deformasyonların engellenmesi durumunda, zeminin yanal şişme yüzdesinin, çapındaki değişime bağlı olarak ifade edilmesidir. Bu değer sıfır yanal deformasyon şartlarında aynı zamanda hacimsel artış yüzdesini ifade etmektedir.

şişme potansiyeli numune durumundan, sürşarj yükünden, başlangıç su muhtevasından, zeminin içerdiği kil yüzdesinden, kil mineralinin cinsinden, çökelme koşullarından, arazideki gerilme şartlarından, kilin gerilme geçmişinden, zeminin kuru birim hacim ağırlığından, danelerin yerleşim biçiminden, suya doygunluk derecesinden, boşluk oranından, geçirgenlikten, şişen zemin tabakasının kalınlığı ve derinliğinden, dış yüklerden, iklim şartları ve bitki örtüsünden, sıkıştırılmış zeminler için kompaksiyon yönteminden ve çevresel şartlardaki değişikliklerden etkilenmektedir.

1.3.3.2. şişme Basıncı

şişme potansiyeline sahip olan killi zeminin, su içeriğindeki artışla hacminde meydana gelecek değişikliğe engel olabilecek basınca şişme basıncı denir. Yani şişme

basıncı, zeminin başlangıç hacmini korumasını sağlayan basınçtır. Şişme basıncı herhangi bir doğal zemin için başlangıç kuru birim hacim ağırlığına bağlı olarak sabit alınabilmektedir. Sıkıştırılmış zeminler için de kompaksiyon derecesine bağlıdır. Yol kaplamaları, havaalanı kaplamaları ve atık depolama sahalarındaki kil dolgusunda şişme basıncı, kompaksiyon enerjisi ve kuru birim hacim ağırlıklarının bir fonksiyonudur. Sıkıştırılmış bir kilin şişme basıncı, optimum su muhtevasında sıkıştırılmış bir zeminin, hacmini koruyabilmesi için gerekli basınç olarak da tanımlanabilmektedir. Bir zeminde şişme basıncı önceden belirlenebildiği takdirde, zeminin şişme özelliklerinin tanımlanmasında doğrudan kullanılabilir (Keskin, 1993).

1.3.4. Şişme Tahmini İçin Kullanılan Yöntemler

Zeminlerdeki şişme miktarının çeşitli yöntemlerin yardımıyla önceden tahmin edilmesi sonucu, şişmenin üst yapıda meydana getireceği problemlere, uygun tasarım yöntemleri ve çözümler getirilerek bu hasarlar minimize edilecek, zeminin ıslah yöntemi kolaylıkla belirlenecek ve uygun temel sisteminin seçimi sağlanacaktır. Şişme miktarının istenilen doğrulukta tahmin edilemeyişinin nedeni, şişme mekanizmasını etkileyen faktörlerin nicelik olarak belirlenmesinin zorluğu ve bu mekanizmayı etkileyen faktörlerin çokluğudur.

Şişme tahmini için verilen bir çok yöntem olmasına rağmen bunlar kısaca 3 ana başlık altında toplanabilirler;

- Ödometrik yöntemler,
- Ampirik yöntemler,
- Emme gerilmesi yöntemleri.

1.3.4.1. Ödometrik Yöntemler

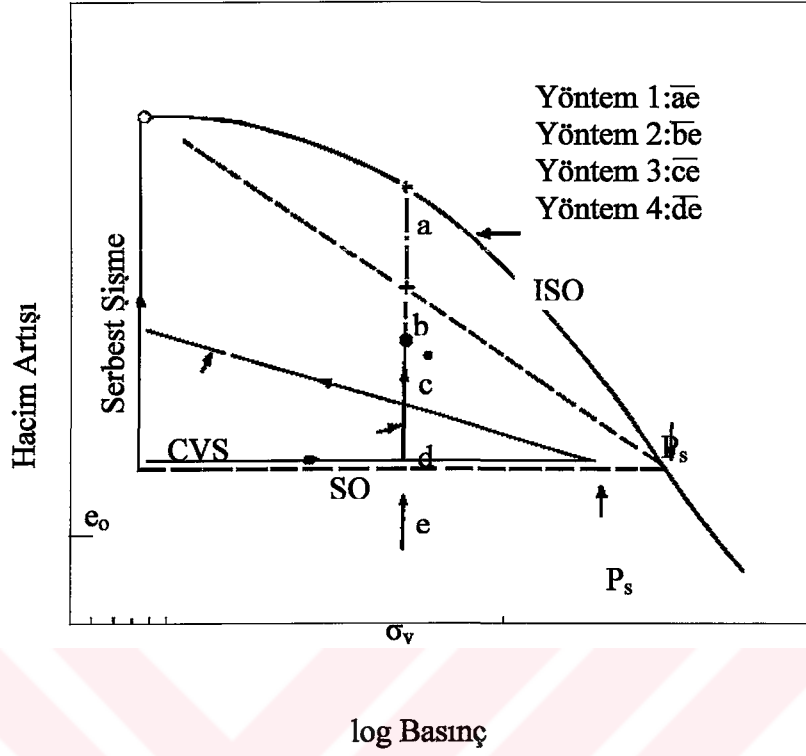
Şişen zeminlerde meydana gelen hacim artışının engellenmesi durumunda büyük basınçlar oluşmaktadır. Bu basınçlar da yapılarda çeşitli zararlara neden olmaktadır. Bu nedenle basınçları bulmak için çeşitli laboratuvar deneyleri geliştirilmiştir. Bu deneyler genellikle bir boyutlu konsolidasyon aleti (ödometre) ile yapılmakta ve uygulamada geniş yer bulmaktadır.

Dhowian vd. (1984), Suudi Arabistan'da şişen zemin problemlerinin sıkça rastlandığı bölgelerden aldıkları örselenmiş, şişen zemin numuneleri üzerinde 4 alternatif ödometre yöntemini kullanarak yaptıkları deneylerde, zeminlerin arazi şartlarında maruz kalacağı gerilmeleri yansıtmamanın önemli olduğunu ve arazi şartlarının deneylere yansıtılması için farklı görüşlerin ortaya atıldığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte drenaj, zeminde var olan su ve yanıl sınırlama etkileri gibi çevresel faktörleri çok iyi yansıtamamışlardır. Önerilen bu 4 deney yönteminde de serbest su girişine izin verilen, yanıl olarak genişlemesi engellenmiş ve düşey doğrultuda yüklenmiş zemin numuneleri kullanılmıştır

- Birinci yöntemde, belirli bir oturma basıncı altında , numuneye su verilerek birincil şişmesi tamamlanana kadar serbestçe şişmesi sağlanır. Sonra ön konsolidasyon basıncına ek olarak temel seviyesindeki gerilmeye eşdeğer olana dek yani tahmini olarak arazideki gerilmeye (σ_v) ulaşınca dek yüklenir. Oluşan gerilme izi ile hacim değişikliği kaydedilir (Şekil 19).
- İkinci yöntemde, numuneye konsolidasyon (ödometre) aleti içinde düşük bir hücre basıncı altında su verilerek şişmesi sağlanır ve şişme miktarı hesaplanır. Şişme tamamlandıktan sonra numune, başlangıçtaki boşluk oranına ulaşınca dek yüklenir. Bu boşluk oranına ulaşıldığı andaki gerilme değeri P_s , şişme basıncı olarak kaydedilir (Şekil 19).
- Üçüncü yöntemde numune, σ_v gerilmesine kadar yüklenir. Ardından su verilerek numunenin bu gerilme altında doygun hale gelmesi sağlanır. Birincil şişme tamamlanana kadar numunenin şişmesine izin verilir. Düşey aralık (ce) ile verilen hacim değişimi ve gerilme izi tespit edilir (Şekil 19).
- Dördüncü yöntemde ,konsolidasyon aletinin içindeki numunenin hacmi sabit kalacak şekilde yeterli yükleme yapılarak suya doygun hale getirilir. Suyun içindeki numunenin gerilme değeri, σ_v değerine gelinceye kadar yük azaltılır. Düşey aralık (ed) ile verilen hacim değişimi ve gerilme izi sabit hacim deneyi ile bulunur (Şekil 19).

Şişme indisi (C_s), şişme basıncı tayini için yapılan ödometre deneyleri sonucunda elde edilen e -log σ eğrisinin yük boşaltma (şişme) kısmının eğiminden bulunabilir. C_s değerinin hesaplanmasında şişme eğrisinin, başlangıç boşluk oranına yaklaştığı kısmın eğimi olarak alınması da tavsiye edilmektedir.

Şişme değerinin belirlendiği bu yöntemler, şişme davranışını karakterize eden ve şişme parametreleri olan serbest şişme, şişme basıncı ve şişme indisini belirlemektedir.



Şekil 19. Şişme tahmin metotları (Erol vd., 1987).

Çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiş bu ödometre deney yöntemleri standardize edilerek ASTM deney yöntemleri geliştirilmiştir. Şişen zeminlerde şişme karakteristiklerini belirlemek için bugüne kadar birçok deney tekniği geliştirilmiş olmasına rağmen, arazi koşullarına tam olarak uyan bir yöntem bulunamamıştır. Numunenin, yanal genişlemesine izin vermeyen, düşey doğrultuda yüklendiği ve suyla temasta olduğu kabulüne dayanan, şişme ile ilgili ASTM deney yöntemleri kısmen örselenmiş veya sıkıştırılmış kohezyonlu zeminlerin şişme potansiyeli ve şişme basıncını belirlemek için üç alternatif laboratuvar deney yöntemini kapsamaktadır. Bu yöntemler;

- Belli bir düşey basınç altında meydana gelecek olan şişme veya oturmanın büyüklüğünü,
- Yanal genişlemesine izin verilmeyen deney numunesinin, hacim değişimini engelleyecek olan düşey basıncın büyüklüğünü belirlememizi sağlamaktadır.

Deney numunesinin yanal genişlemesine izin verilmediği, düşey doğrultuda yüklendiği ve suyla temasta olduğu kabulüne dayanan ASTM D4546 (1986), deney yöntemleri 3 ana grupta incelenmektedir.

- Metot A'da konsolidasyon aleti içinde su altında bırakılan numunenin 1 kPa'lık bir yükü (para yük) düşey olarak serbest şişmesi sağlanır. Şişme tamamlanana kadar belli sürelerde deformasyonlar kaydedilir. Şişme tamamlandıktan sonra, her basıncın sabit tutulduğu 5, 10, 20, 40....kPa'lık düşey yükler, numune başlangıç boşluk oranı/yükseklik elde edilinceye kadar uygulanır.
- Metot B'de konsolidasyon aletine serbest suyun girişine izin verilmeden önce, numune oturma basıncını aşan bir basınca maruz bırakılır. Bu düşey basıncın değeri genellikle jeolojik basınca ya da yapı yüküne eşdeğerdir. Fakat deney sonuçlarının uygulanmasına bağlı olarak da değişebilir. Sonrasında numuneye su verilerek, şişme tamamlanana kadar Metot A'ya benzer şekilde deformasyonlar kaydedilir ve numune düşey doğrultuda yüklenir. Şişme ya da oturmanın miktarı hareketin ihmal edilebilir olduğu durumdaki basınçla ölçülür.
- Metot C'de şişme basıncının hesaplanması için numuneye su verildikten sonra yüksekliğin değişmemesi için uygulanacak düşey basınç ayarlanır. Numune şişme eğilimi göstermediği durumda konsolidasyon deneyine tabi tutulur. Boşaltma verileri şişme potansiyelinin belirlenmesinde kullanılır. Bu deneyde yük artımları konsolidasyon eğrisi üzerinde maksimum eğrilik noktası ve doğal sıkışma eğrisinin eğimini belirlemek için yeterli olmalıdır.

Holtz, Gibbs (1956), Jennings, Knight (1957) ve Lambe, Whitman (1959), şişen zeminlerin kabarmasını tahmin etmede ödometre deneylerini ilk kullanan araştırmacılar arasında yer almaktadırlar. Buna göre, bir zeminin şişme basıncını tanımlamada en yaygın olarak kullanılan deney yöntemlerini;

- Serbest şişme ödometre deneyi,
- Yüklenmiş şişme ödometre deneyi,
- Sabit hacim ödometre deneyi

olarak gruplandırmışlardır.

Kullanılan bu ödometre deney yöntemleri 2 kısımda incelenebilir.

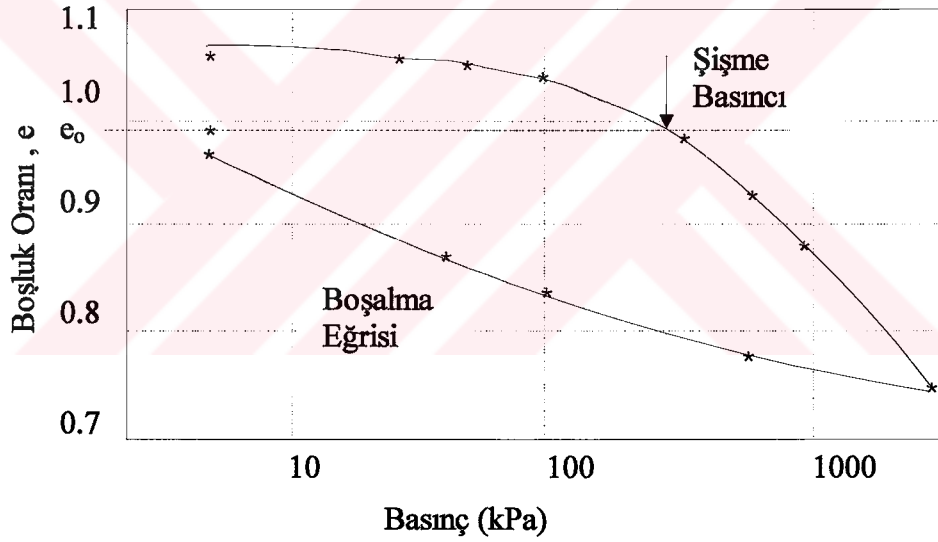
- Sabit yük ödometre deneyleri,
- Sabit hacim ödometre deneyleri

1.3.4.1.1. Sabit Yük Ödometre Deneyleri

Bu kategorideki numunelere, deney sırasında sabit bir yük uygulanmaktadır.

1.3.4.1.1.1. Serbest Şişme Ödometre Deneyi

Serbest şişme ödometre deneyinde (ASTM D4546), zemin numunesine para yük uygulanarak, suyun içerisinde serbest şişmesine müsaade edilmektedir. Sonra, zemin ilk hacmine geri dönene kadar adım adım konsolide edilmektedir (Şekil 20). Şişme basıncı, zeminin ilk hacmine inmesi için gerekli olan gerilme olarak tanımlanmaktadır (Hardy, 1965; Sridharan vd., 1986).



Şekil 20. Serbest şişme ödometre deneyi (Fredlund, 1995).

Bu yöntem, ilk kez Jennings vd. (1973) tarafından basit ödometre deneyi olarak ortaya atılmıştır. Buna yöntemine göre, numuneye uygulanan ilk yük üst tabakanın arazideki düşey efektif basıncıdır. Daha sonra yük boşaltılarak, para yük yüklenir ve numuneye su verilir. Şişme durduğunda, numune ilk hacmine ulaşmaya kadar adım adım konsolide edilir. Bu gerilme, numunenin ilk boşluk oranına ulaşması için gereklidir. Numunenin su verilmeden önceki ilk yüksekliğine ulaşması için gerekli olan gerilme değeri de şişme basıncı olarak tanımlanmaktadır.

Serbest şişme yönteminin diğeri bir değiştirilmiş şekli de ASTM D4546'da Metot B olarak tanımlanmıştır. Buna göre numune para yükten daha fazla olan bir düşey basınca maruz bırakıldıktan sonra doğgun hale gelmesi sağlanmaktadır. Düşey basıncın büyüklüğü genellikle arazideki düşey efektif basınca veya yapısal yüke eşit olmaktadır.

Smith (1973)'in serbest şişme ödometre yönteminde de örselenmemiş numune, arazideki gerilme değerine veya inşaat sonrasındaki gerilme değerine ulaşıncaya kadar yüklenir. Daha sonra serbest su girişine izin verilerek şişmesinin tamamlanması sağlanır. Şişme tamamlandıktan sonra, ilk boşluk oranına veya hacmine ulaşması için gerekli olan basınç şişme basıncı olarak kaydedilir. Numune alınması sırasında meydana gelen örselenmelerden dolayı tahmin edilen şişme değeri, arazideki gerçeri şişme değerinden küçük olmaktadır.

Diğeri bir yöntem, serbest şişme metoduna benzeyen şişme-konsolidasyon deney yöntemidir. Bu yöntem daha çok Amerika Birleşik Devletleri'nde Rocky Dağları Bölgesinde, arazideki şişme potansiyelini tanımlamada kullanılmaktadır (Chen, 1975; Porter, Nelson, 1980; Kumar, 1984). Bu yöntemde göre numuneler, 25 kPa ile 100 kPa aralığında değişen bir düşey basınca maruz bırakılır. Uygulanan gerilmeler arazi şartlarını önceden tahmin etmeye bağlıdır. 24 saat sonunda numuneye damıtık su verilir ve uygulanan yük, numune ilk yüksekliğine ulaşıncaya kadar artırılır. Numunenin su verilmeden önceki ilk yüksekliğine ulaşması için gerekli olan gerilmeye şişme basıncı adı verilir.

Shanker vd. (1982), serbest şişme yönteminin değiştirilmiş bir şeklini kullanarak örselenmiş siyah pamuk kellerle şişme basıncı ölçümleri yapmışlardır. Bu ölçümlerde öncelikle numuneler, çeşitli sürşarj yükleri altında serbest şişmeye bırakılmış daha sonra da ilk hacimlerine ulaşıncaya kadar konsolide edilmişlerdir. Numunenin ilk hacmine ulaşması için gerekli olan yük, şişme basıncı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda sürşarj yükünün büyüklüğünün, ölçülen şişme basıncı değerine herhangi bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Aynı gözlemler Chen (1975) tarafından da elde edilmiştir. Bu durumda şişme basıncı, numunenin ıslatmadan önceki ilk yüksekliğine ulaşması için uygulanması gereken gerilme olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, sürşarj yükünün 5 kPa'dan küçük olması durumunda önceden tahmin edilen şişme basıncının artacağını belirten Justo vd. (1984)'nin çalışmaları ile çelişmektedir.

Serbest şişme ödometre deneyi hakkında birtakım tartışmalar vardır. Bu yöntem hakkındaki en ciddi eleştiri yüklemelerin normal bir düzen göstermemesidir. Arazideki zemin, suyu emmeyecek ve şişecektir (Brackley, 1975; Justo ve diğ., 1984; El Sayed ve Rabba, 1986). Bu yöntemin diğeri bir sakıncası da hem hacim artışına hem de azalmasına ihtiyaç duymasıdır. Bu nedenle yöntem, arazideki gerilme durumunun tahmininde tekrarlı hacim artış ve azalmalarına ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte bu yöntemin avantajı, numune alma sırasındaki örselenmelerin etkilerini gidermesidir. Sonuç olarak ölçülen şişme basıncı, sabit hacim deneyiyle bulunan düzeltilmemiş şişme basıncı değerinden daha büyük olmaktadır (Fredlund, 1995). Jennings vd. (1973), yaptıkları bir seri deneyler sonucunda serbest şişme deney yönteminin, Güney Afrika'da iki bölgede gözlenen arazideki şişme davranışlarının önceden tahmin edilmesinde başarılı olduğunu göstermişlerdir.

1.3.4.1.1.2. Çift Ödometre Deney Yöntemi

Çift ödometre deney yöntemi ilk kez, göçen zemin çalışmalarında kullanılmak amacıyla Jennings, Knight (1957) tarafından ortaya atılmıştır. Yöntem, daha sonra şişen zemin deneylerinde geniş kabul görür olmuş ve değiştirilerek en son halini Jennings vd. (1973) tarafından almıştır.

Çift ödometre deneyinde 2 numune kullanılmaktadır. İlk numune serbest şişme deney yöntemindeki numune gibi, ikinci numune de doğal su muhtevsındaki zemin numunesidir. Numuneler başlangıçta 1 kPa'lık para yüke maruz bırakılmaktadır. Bu durumda numune doğal su muhtevsındadır ve ödometre kabında su bulunmamaktadır.

Jennings, Knight (1958)'in çift ödometre deney yönteminde, aynı yerden iki örselenmemiş numune alarak, bunlardan bir tanesini doğal su muhtevsında, diğeri ise doymun hale getirerek konsolidasyon deneyine tabi tutmuşlardır. Daha sonra iki numuneye de ait e-log σ eğrisi çizilerek, bu eğrilerin lineer kısımları Şekil 21'de olduğu gibi karşılaştırılmıştır. Doğal su muhtevsına sahip olan numuneye ait eğri, toplam gerilmelere; suya doymun olan numuneye ait eğri ise, efektif gerilmelere tekabül etmektedir.

Şekil 21'deki $\sigma_v = \gamma \cdot z$ değeri, z derinliğindeki gerilmeyi ifade etmektedir. $\Delta\sigma$ kadar bir gerilme artışından kaynaklanacak olan oturma miktarı ($e_0 - e_1$) farkından bulunur. Bir yükleme olmaksızın yüzeyin bina vs. ile kaplanması durumunda su muhtevası artacaktır. Su seviyesinin derinliği D_w ile gösterilirse, negatif boşluk suyu basıncı değerinin;

$$V_{wf} = \gamma_w (D_w - z) \quad (12)$$

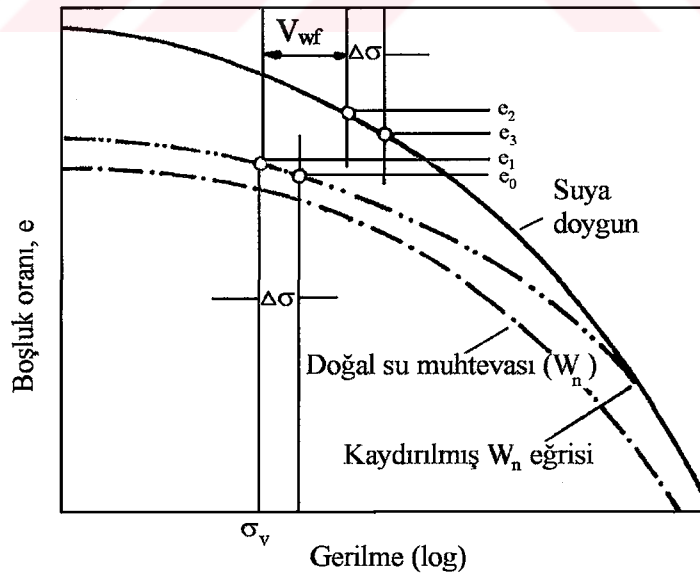
olduğu kabul edilir. Bu durumda efektif gerilme ($\sigma_v + V_{wf}$) ve buna karşılık gelen boşluk oranı değeri de e_2 'dir. σ_v kadar yük artışı ile oluşan nihai boşluk oranı da e_3 olur. H kalınlığındaki bir tabaka veya ara tabakaların ortasındaki σ_v , $\Delta\sigma$ ve V_{wf} değerleri kullanılarak;

$$\text{Yüklemesiz şişme} = \frac{H}{1 + e_0} (e_0 - e_2) \quad (13)$$

$$\text{Yüklemeden dolayı oturma} = \frac{H}{1 + e_0} (e_0 - e_1) \quad (14)$$

$$\text{Net şişme} = \frac{H}{1 + e_0} (e_0 - e_3) \quad (15)$$

olarak bulunur.



Şekil 21. Çift ödometre metodu (Jennings, Knight, 1958).

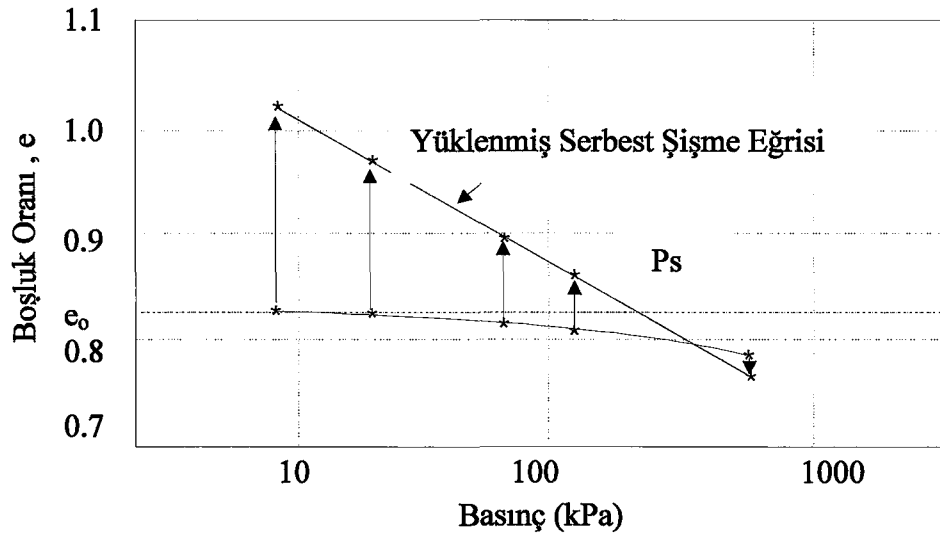
Bir çok çift ödometre deneyi yüksek basınçlarda iki eğrinin üst üste çakıştığını göstermiştir. Bu çakışma noktasında uygulanan basınç, şişme basıncı olarak adlandırılmaktadır. Başka bir deyişle şişme basıncı, numune su içerisinde iken şişmenin olmadığı basınçtır.

Numune kurduğunda, iki eğri şişme basıncında üst üste geçmektedir. Bu nedenle Justo vd. (1984), Jennings vd. (1973) tarafından gösterilen deney sonuçlarının ayarlanması gerektiğini ve sonuçların sadece çok ıslak killer için düzeltilebileceğini ileri sürmüşlerdir.

Fredlund vd. (1980), çift ödometre deneyi kullanılarak tahmin edilen şişme basıncının bu yöntemin numune alma sırasındaki örselenme etkilerini gidermesinden dolayı tatmin edici olduğunu belirtmişlerdir. Başka bir deyişle doğal su muhtevası eğrisi, numune alma sırasındaki örselenmelerin etkisini göstermektedir.

1.3.4.1.1.3. Yüklenmiş Şişme Ödometre Deneyi

Yüklenmiş şişme ödometre deneyinde bir seri özdeş numuneler, farklı başlangıç yüklerine maruz bırakılmakta ve serbest şişmelerine müsaade edilmektedir. Sıfır hacim değişimine karşılık gelen gerilme, şişme basıncı olarak kaydedilmektedir (Şekil 22) (Skempton, 1961; Gizienski, Lee, 1965; Noble, 1966; Matyas, 1969).



Şekil 22. Yüklenmiş şişme ödometre deneyi (Shuai, 1996).

Çin'de yüklenmiş şişme ödometre deney yönteminin bir değişik şekli, pratikte şişen zeminler için referans bilgi elde etmede geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yöntemle göre, bir çok numune hazırlanarak farklı başlangıç yüklerine maruz bırakılmış daha sonra da doygun hale getirilmiştir. Her bir yük için şişme oranı, denklem (16)'dan hesaplanmıştır;

$$\delta = \frac{H_1 - H_0}{H_0} \quad (16)$$

burada;

δ = Şişme oranı,

H_1 = Şişmeden sonra numunenin yüksekliği,

H_0 = Numunenin ilk yüksekliğidir.

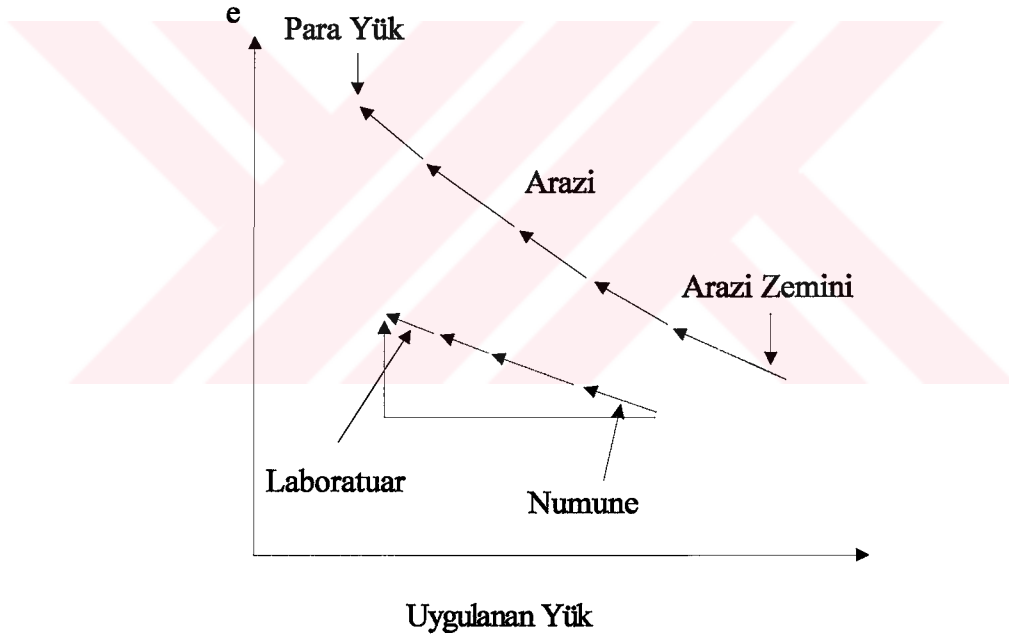
Değişik şişme oranlarının, uygulanan yüklerle olan ilişkisi çizilmiş ve eğrinin sıfır şişme yüzdesi eksenini kestiği nokta, şişme basıncı olarak kaydedilmiştir.

Bir seri yüklenmiş şişme deneyi, Gilchrist (1963) ve Noble (1966) tarafından Regina kili üzerinde yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda, sabit başlangıç su muhtevası ve boşluk oranına sahip Regina kili için, şişme ile yükün logaritması arasında lineer bir ilişki olduğu saptanmıştır. Başlangıç boşluk oranının farklı değerlerine karşılık gelen şişme basıncı değerlerini tespit ederken, sıfır hacim değişimi noktasında şişmeye karşılık uygulanan logaritmik yük ilişkisini veren eğride ekstrapolasyon yapmak mümkündür. Aynı sonuçlar Onderstepoort zemini için Yevnin, Zaslavsky (1970) ve Brackley (1975) tarafından da bulunmuştur.

Birbirine özdeş birkaç tane örselenmemiş numuneye ihtiyaç duyan yüklenmiş şişme ödometre deney yöntemi, diğer yöntemlere göre, yükleme-ıslatma sürecinin arazide de aynı sırayı takip etmesi gibi önemli bir avantaja sahiptir. Bu süreç, öncelikle zemine yük uygulanması ve bu yükleme sonucunda zeminin sıkışması, daha sonra da suyla buluşup, şişmenin gerçekleşmesi şeklinde işlemektedir. Yüklenmiş şişme ödometre deney yöntemi, tipik arazi gerilme izlerinin bu yöntemle benzerliğinin bir sonucu olarak kullanılmaktadır (Brackley, 1975; El Sayed, Rabbaa, 1986).

1.3.4.1.1.4. Direkt Model Yöntemi

Direkt model yöntemi (Jennings, 1969), ilk olarak Texas otoyol bölümünün deney yöntemleri el kitabında (TEX-124-E) tanımlanmış ve örselenmemiş zeminlerin kabarmasını tahmin etmek amacı ile kullanılmıştır. Direkt model yöntemi aslında bir dizi yüklenmiş şişme ödometre deneyini içermektedir. Numuneler, arazideki üst katman basıncına veya inşaat sonunda varolacak olan yüke maruz bırakıldıktan sonra doygun hale getirilmektedir. Geleneksel iki boyutlu durum için çizilen deney verileri Şekil 23’de verilmektedir. Bu yöntemde son hacim değişikliklerinin, uygulanan yüklerle olan ilişkisi çizilmiş ve sıfır hacim değişimine karşılık gelen yük değeri şişme basıncı olarak isimlendirilmiştir.



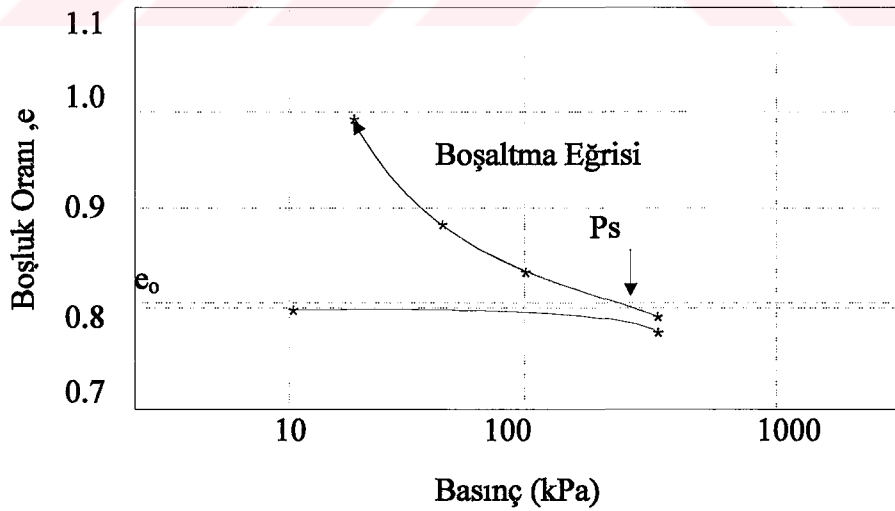
Şekil 23. Direkt model yöntemi (Fredlund vd., 1980).

Şişme basıncı ve şişme değeri arazidekinden oldukça az tahmin edilmiştir. Jennings ve Kantey (Jennings, 1969), bu yöntemi bilinen bir analizi desteklemek için kullanmış ve var olan bir binadaki şişmeyi hesaplamışlardır. Sonuç tahminlerinin, gözlenen şişmenin yaklaşık % 50’si kadar olduğu tespit edilmiştir. Fredlund vd. (1980), numune alma sırasındaki örselenmelerin dikkate alınmamasından dolayı gerçek değerinin altında tahminler yapıldığını belirtmişlerdir.

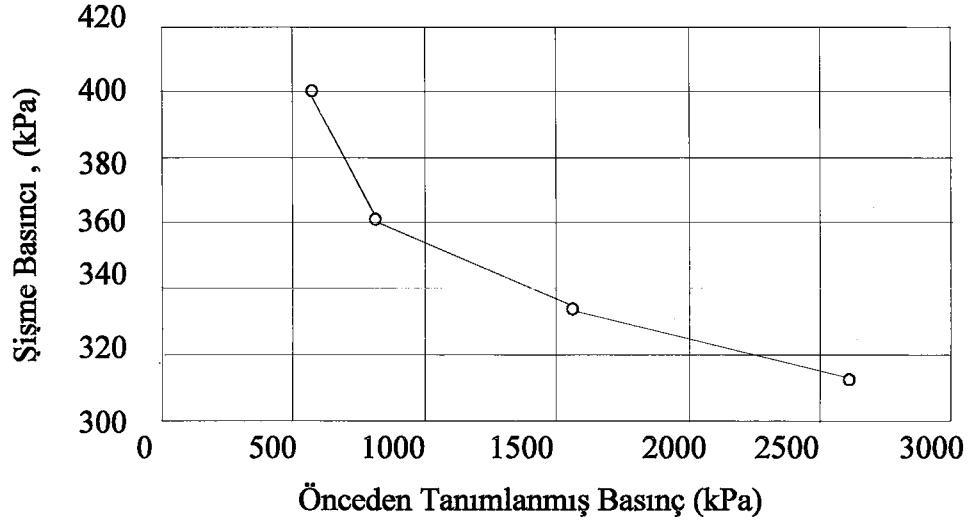
1.3.4.1.1.5. Çin Yöntemi

Çin deney yöntemi, şişen zeminlere oturan temellerdeki deformasyon analizini yapmak için referans bilgi elde etmede kullanılmaktadır (şişen zemin bölgelerinde inşaat yapmak için verilen Çin teknik kanunu, GBJ112-87). Bu yöntemde, tek bir zemin numunesi, önceden kararlaştırılan bir basınca maruz bırakılmakta, daha sonra da doymun hale getirilmesi sağlanmaktadır. Önceden kararlaştırılan basınç, yapı alanı ihtiyaçlarına göre belirlenmekte ve beklenen şişme basıncından çok az daha büyük olmaktadır. Denge şartlarına ulaştıktan sonra, zemin numunesinin geleneksel ödometre deney yöntemine göre üzerindeki yük boşaltılmaktadır. Boşaltma eğrisinin, başlangıç boşluk oranı çizgisi ile kesişme noktasındaki basınç, şişme basıncı olarak isimlendirilmektedir (Şekil 24).

Çin yöntemi, hem şişme basıncının (P_s) hemde şişme indeksinin (C_s) tek bir numune ile belirlenebilmesi özelliğinden dolayı, Çin'de pratik mühendislikte geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bununla birlikte bu yöntem yardımı ile belirlenen şişme basıncı, önceden kararlaştırılan basıncın artması ile azalmakta ve diğer yöntemlerle belirlenen şişme basıncından daha küçük olmaktadır (Şekil 25) (Institute of Construction Science, 1982; Institute of Yangzi River Hydroelectric Power Research, 1986; Feng, 1995).



Şekil 24. Çin yöntemi (Shuai, 1996).



Şekil 25. Örselenmemiş Regina kilinin, Çin yöntemi kullanılarak tespit edilen şişme basıncı-önceden tanımlanmış basınç ilişkisi (Shuai, 1996).

1.3.4.1.2. Sabit Hacim Ödometre Deneyleri

Bu gruptaki deney yöntemleri, deney sırasında uygulanan yükün değişmesine izin vermektedir.

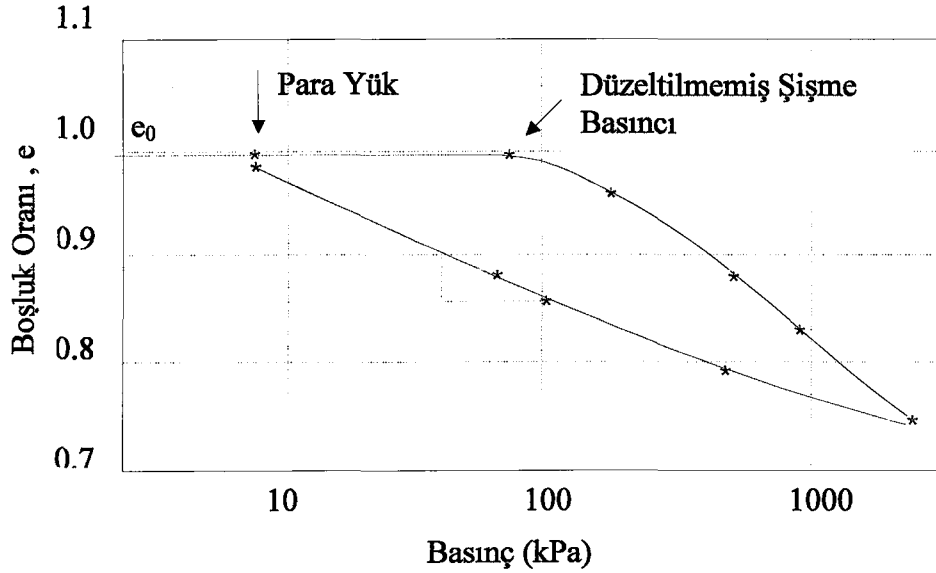
1.3.4.1.2.1. Sabit Hacim Ödometre Deney Yöntemi

Sabit hacim deney yönteminde, numune para yükle yüklendikten sonra, suya batırılmaktadır. Numune hacminin deneyin birinci kısmı boyunca numuneye değişik yükler uygulayarak sabit kalması sağlanmakta ve bu işlem şişme eğilimi görülene kadar devam ettirilmektedir. Tam bu noktada uygulanan yük, düzeltilmemiş şişme basıncını (P_s) vermektedir. Bundan sonra geleneksel ödometre deneyindeki gibi, zemin numunesine yük ilave edilmekte, bunu takiben de yük boşaltılmaktadır. Deney sonuçları Şekil 26'da olduğu gibi çizilmektedir.

Sabit hacim, yük halkası vasıtasıyla muhafaza edilebilir. Palit (1953); Alpan (1957); Finn, Strom (1958); Seed vd., (1962) ve Sing (1967), yük halkasını kullanarak şişme basıncının ölçülmesi için, birkaç girişimde bulunmuşlardır (Shuai, F., 1996). Palit (1953)'in kullandığı düzenek, 76.2 mm. çapında ve 101.6 mm. yüksekliğinde zemin numunesine ihtiyaç duymaktadır. Zeminlerin şişmesi, şişme basıncı aralıksız ölçülürken,

bir çerçeveye bağlı piston ve yük halkası vasıtası ile engellenmiştir. Seed vd. (1962)'de Palit'in kullandığı düzenekte yük halkasının yerini alan bir yük çubuğu dışında benzer bir düzene kullanmışlardır. Yük halkaları veya çubukları vasıtası ile sabit hacmi muhafaza etmek için numuneye uygulanması istenen düşey yükün otomatik olarak uygulanabilmesi bunun avantajıdır. Bununla birlikte yük halkası kullanılarak şişme basıncının ölçülmesi, halkada bazı deformasyonlara neden olmaktadır. Bu da ölçülen şişme basıncının azalmasıyla sonuçlanmaktadır. Seed vd. (1962), bu etkilerini tanımlayabilmek için aynı numunelerinin şişme basınçlarını farklı rijitliğe sahip yük halkaları vasıtasıyla ölçmüşlerdir. En rijit ölçme sistemi kullanılarak ölçülen şişme basıncı en yüksek şişme basıncı değerini vermektedir. Sabit hacim yöntemi ile şişme basıncını daha doğru olarak ölçebilmek için, ölçüm düzeneğinin rijitliği artırılmıştır (Seed vd., 1962; Kassiff vd., 1965). Bununla birlikte aşırı derecede rijit olan yük halkası veya yük hücresi kullanılması durumunda düzeneğin basıncından dolayı zemin numunelerinde şişme olmaktadır. Buna ek olarak aşırı rijit yük ölçüm düzeneği kullanıldığında, küçük yüklerde doğru ölçümler elde edilemeyebilmektedir. Bu yükleme halkası ölçüm sistemi, çok küçük hacim değişikliklerine ve numuneye uygulanan yükün ayarlanarak dengelenmesine müsaade etmektedir. Bu nedenle, zemin şişme eğilimi göstermeyene kadar sabit hacim muhafaza edilmiştir (Holtz, Gibbs, 1956; Salas, Serratos, 1957; Iyer, 1972; Agarwal, Sharma, 1973; Shanker vd., 1982; Sridharan vd., 1986) (Shuai, F., 1996). Deney sırasında ödometre düzeneğinin sıkışabilirliğinin etkilerinin giderilebilmesi, yükleme halkası ölçüm sisteminin avantajları arasında yer almaktadır. Fredlund (1969), sabit hacim yöntemi ile düzeltilmiş şişme basıncını belirleyebilmek için, tekrarlanan sabit hacim deneyinden önce ödometre düzeneğinin sıkışabilirliğinin belirlenmesi gerektiği ileri sürmüştür.

Sabit hacim deney yöntemi, hacim değişimine gerek duymaması ve arazideki gerilme durumu tahminine tekrarlılığı katmaması açısından ASTM D4546; Frydman, Calabresi (1987) ve Iyer (1987) tarafından tavsiye edilmektedir (Shuai, F., 1996). Bununla birlikte, sabit hacim deney yöntemi, numune alma sırasındaki örselenme etkilerini dikkate almamaktadır. Bunu yok etmek için de Fredlund vd. (1980) tarafından önerilen ampirik bir yöntem kullanılmaktadır.



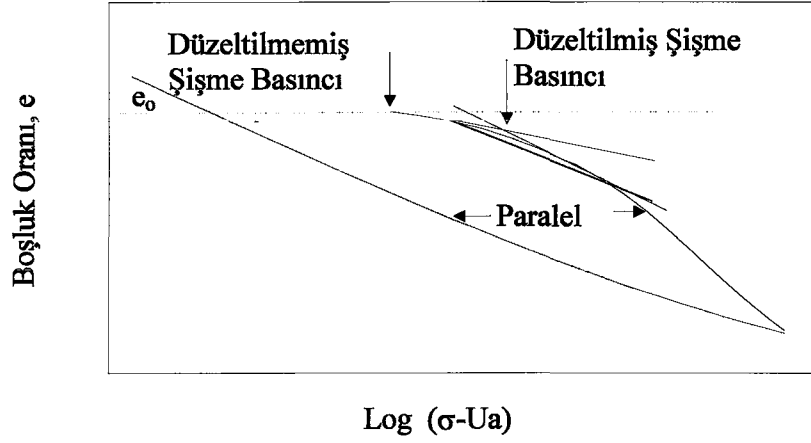
Şekil 26. Sabit hacim deney yöntemi (Fredlund, 1995).

1.3.4.1.2.1.1. Numune Alma Sırasındaki Örselenmeler İçin Düzeltme

Numune alma sırasındaki örselenmeler zeminin sıkıştırılabilirliğini artırmakta ve laboratuvar örneklerinin arazideki boşluk oranında, arazideki gerilme durumuna geri dönmesine izin vermemektedir. Ödometre deneyinde, numune alımından sonra, efektif gerilme-boşluk oranı ilişkisinde (konsolidasyon eğrisi gibi) eğriliği göstermeden, zemin numunelerinin arazideki gerilme durumuna geri dönmesi imkansızdır. Geoteknik mühendisleri, doymun zeminlerde ön konsolidasyon basıncının tanımlanmasında, numune alma sırasındaki örselenme etkilerini çok uzun zamandır kabul etmişlerdir. Bununla birlikte, şişme basıncı ölçümlerinde henüz son yıllarda numune alma sırasındaki örselenmelerin öneminin farkına varılmıştır (Fredlund vd., 1980).

Numune alma sırasındaki örselenmeler geleneksel olarak tanımlanan şişme basıncının, doğru olan şişme basıncının altına düşmesine neden olmaktadır. Fredlund vd. (1980), numune alma sırasındaki örselenme etkilerini yok edebilmek için deneysel bir yöntem önermişlerdir. Bu deney yöntemi, sabit hacim deney yöntemidir. Düzeltme yapılmadan önce, ödometre aletinin sıkışabilirliği dikkate alınarak, laboratuvar verilerinde bir ayarlama yapılması gerekmektedir. Yapılması gereken ikinci düzeltme de numune örselenmesidir. Numune alma her zaman zeminin sıkışabilirliğini artırmakta ve laboratuvar numunesinin arazi boşluk oranında, arazi gerilme durumuna ulaşmasını engellemektedir.

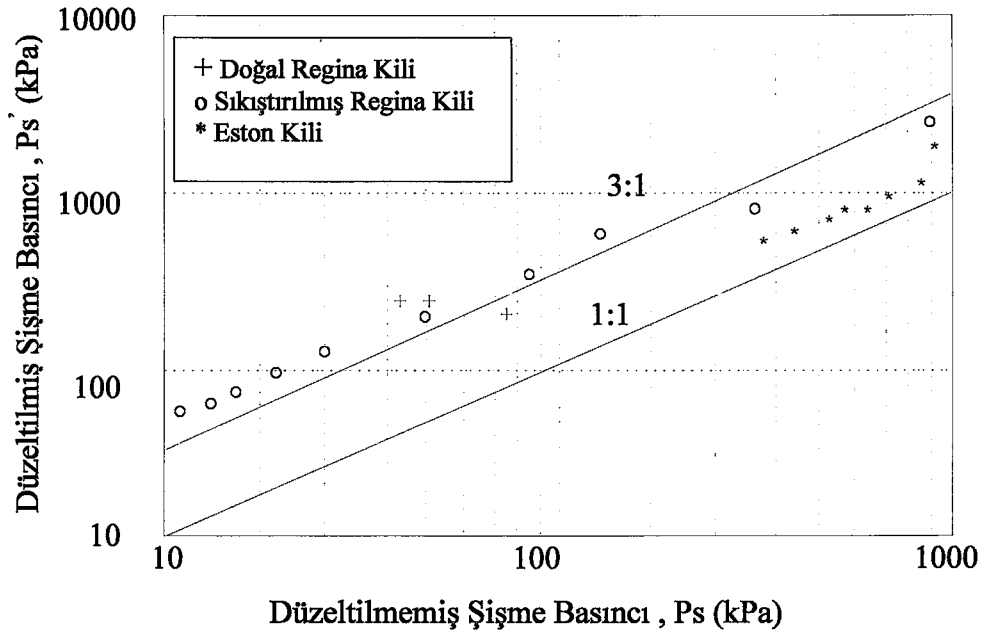
Fredlund vd. (1980), Şekil 27’de görülen yöntemi, düzeltilmiş şişme basıncının (P_s') elde edilmesi amacıyla sunmuşlardır.



Şekil 27. Numune alma sırasındaki örselenmelerin düzeltilmesi (Fredlund vd., 1980).

Düzeltilmenin yapılabilmesi için boşluk oranı – log basınç eğrisinin aşağıya döndüğü yerde maksimum eğrilik noktası belirlenir. Bu noktadan bir yatay ve bir de teğet çizilir. Bu iki çizginin açısı ortayı belirlenir. Konsolidasyon eğrisinin şişme kısmına paralel çizilen teğetin açısı ortayı ile kesişme noktası düzeltilmiş şişme basıncı P_s' değerini verir.

Zeminin toplam şişme miktarının tahmininde düzeltilmemiş şişme basıncının kullanılmasının, şişmenin düşük tahmin edilmesine neden olduğundan, laboratuarda ölçülen şişme basıncının düzeltilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Düzeltilme yapılmasının diğer bir nedeni de, kuru zeminlerde yapılan ödometre deney sonuçları analizinin, eğer numune örselenmesi nedeniyle düzeltilme yapılmamışsa, sonuçların yorumlanmasının oldukça zor olmasıdır. Şekil 28’de iki zemin çeşidinin, düzeltilmiş ve düzeltilmemiş şişme basıncı verilerinin karşılaştırılması verilmektedir (sabit hacim ödometre deneyi ile). Bu sonuçlar düzeltilmiş şişme basıncının, düzeltilmemiş şişme basıncından 3 kattan daha fazla olmasının mümkün olduğunu göstermektedir.



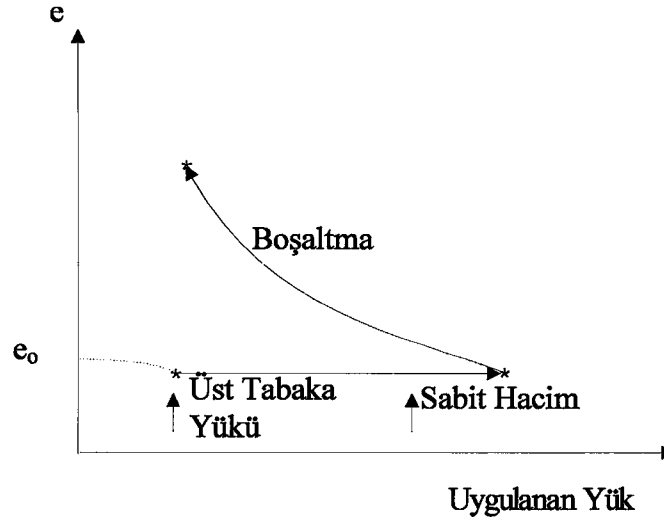
Şekil 28. Düzeltmiş ve düzeltilmemiş şişme basıncı verilerinin karşılaştırılması (Fredlund, Rahardjo, 1993).

1.3.4.1.2.2. Sullivan ve McClelland Yöntemi

Sullivan, McClelland (1969) yöntemi, başlangıçta üst tabakanın efektif basıncına maruz bırakılan, örselenmemiş numunelerle gerçekleştirilen sabit hacim ödometre deneyine dayanmaktadır. Bu yöntemde şişme basıncına ulaşılır ulaşılmaz, zemin numunesi üzerindeki yük boşaltılmakta ve hacim değişimi ile normal gerilme ilişkisinin izah edilmesinde boşaltma eğrisi kullanılmaktadır (Şekil 29).

Oturma, kabarma konsolidasyon eğrisinden tahmin edildiği gibi, boşaltma eğrisinden de tahmin edilebilmektedir. Şişmenin olduğu bütün yükleme şartlarını değerlendirmek için, sadece bir deneye ihtiyaç vardır. İlave deneyler her bir farklı başlangıç birim hacim ağırlığı ve su muhtevası için yapılmalıdır.

Bu konuda yapılan çalışmalar sınırlı olmasına rağmen, bu yöntemde numune alma sırasındaki örselenmelerin dikkate alınmamasından dolayı, şişme basıncı ve kabarma miktarının gerçek değerinin altında tahmin edildiği görülmektedir.

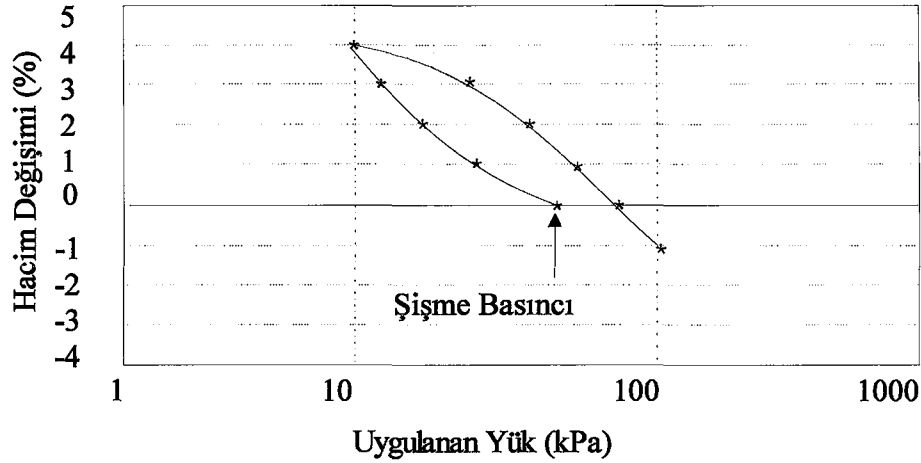


Şekil 29. Sullivan, McClelland yöntemi (Fredlund vd., 1980).

1.3.4.1.2.3. Deformasyon Kontrollü Deney Yöntemi

Deformasyon kontrollü şişme deneyinde (Porter, Nelson, 1980), zemine su eklendiğinde hacim değişimi meydana gelmeyecek şekilde, yükleme çerçevesi vasıtasıyla sınırlandırılır. Zemin numunesine su verildikten sonra, düşey basıncın maksimum bir değere ulaşması sağlanarak, bu basınca (şişme basıncı) ulaşılmaz, numunenin şişmesine izin verilmekte ve son düşey basınç tekrar ölçülmektedir. Bu işlem, kaydedilen düşey basınç düşük bir değere indirilinceye kadar, artışlarla tekrarlanmaktadır. Daha sonra numune ilk yükseklğine gelinceye kadar sıkıştırılmaktadır. Deney sonuçlarının geleneksel iki boyutlu olarak çizilmiş şekli Şekil 30'da verilmektedir.

Gerilme kontrollü şişme deneyi, hem şişme basıncını hem de şişme indeksini belirlemek için tek bir numuneye ihtiyaç duyması açısından bir çok araştırmacı tarafından tavsiye edilmektedir (Porter, Nelson, 1980; Morgenstern, Balasubramonian, 1980; Mesri vd., 1994). Bununla birlikte bu yöntem numune alma sırasındaki örselenmelerin yarattığı etkileri dikkate almamaktadır.



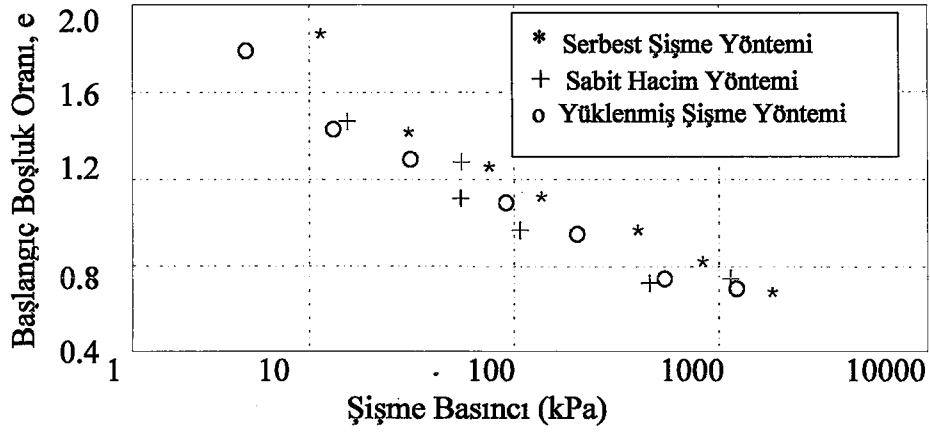
Şekil 30. Deformasyon kontrollü deney yöntemi

1.3.4.1.3. Çeşitli Ödometrik Yöntemlerin Karşılaştırılması

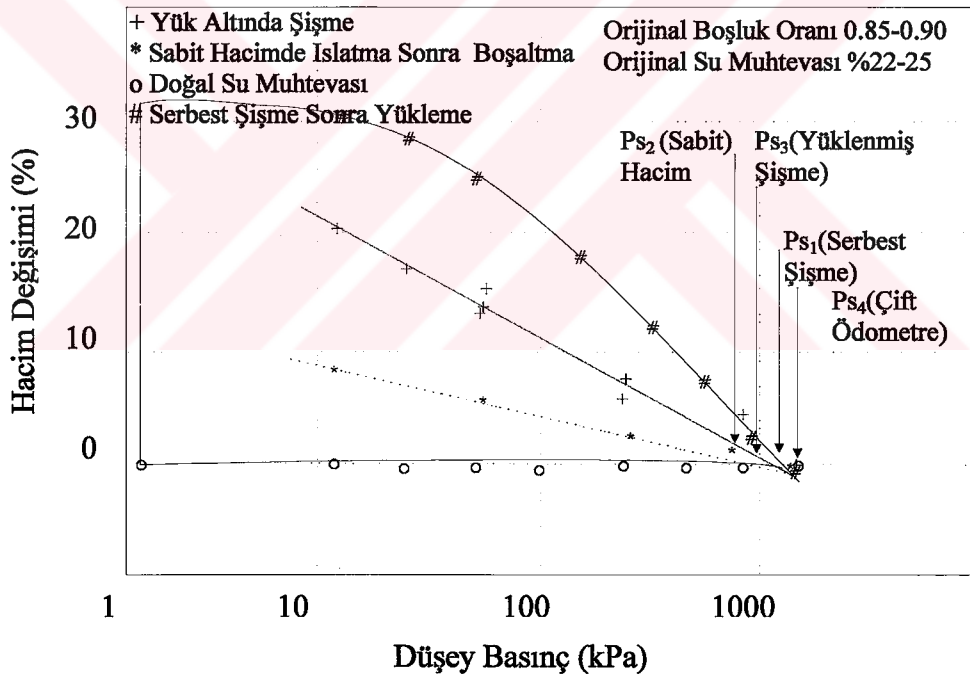
Verilen deney yöntemleri karşılaştırılırsa, kullanılan deney yöntemlerine bağlı olarak, önceden tahmin edilen şişme basınçları arasında önemli farklar olduğu görülmektedir (Brackley, 1975; Ali, Elturabi, 1984; Sriharan vd., 1986).

Gilchrist (1963), tarafından sıkıştırılmış Regina kilinin bir boyutlu şişme davranışı üzerine yapılan araştırmalar, sabit hacim ve yüklenmiş şişme yöntemi kullanılarak elde edilen şişme basınçlarının, serbest şişme yöntemi ile elde edilen şişme basınçlarından daha küçük olduğunu göstermiştir (Şekil 31). Şişme basıncı değerleri arasındaki fark, serbest şişme ve sabit hacim yöntemi vasıtası ile tanımlanmış ve şişme basıncının artması ile başlangıç boşluk oranının azaldığı gözlenmiştir (Şekil 31). Bu fark daneler arasındaki mukavemetten kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak şişme basıncının, serbest şişme deney sonuçlarından elde edilemeyeceği söylenebilir.

Onderstepoort zemininin 4 farklı yöntemle göre şişmesini incelenmiştir (Şekil 32) (Brackley, 1975). Genellikle uygulamada kullanılan yöntemler aracılığıyla, 4 farklı deney yöntemi kullanılarak şişme basınçları tespit edilmiştir. Bu basınçlar sırasıyla P_{s1} , P_{s2} , P_{s3} , P_{s4} olarak verilmiştir.



Şekil 31. Sıkıştırılmış Regina kilinin boşluk oranı-şişme basıncı ilişkisinin farklı deney yöntemlerine göre karşılaştırılması (Gilchrist, 1963).



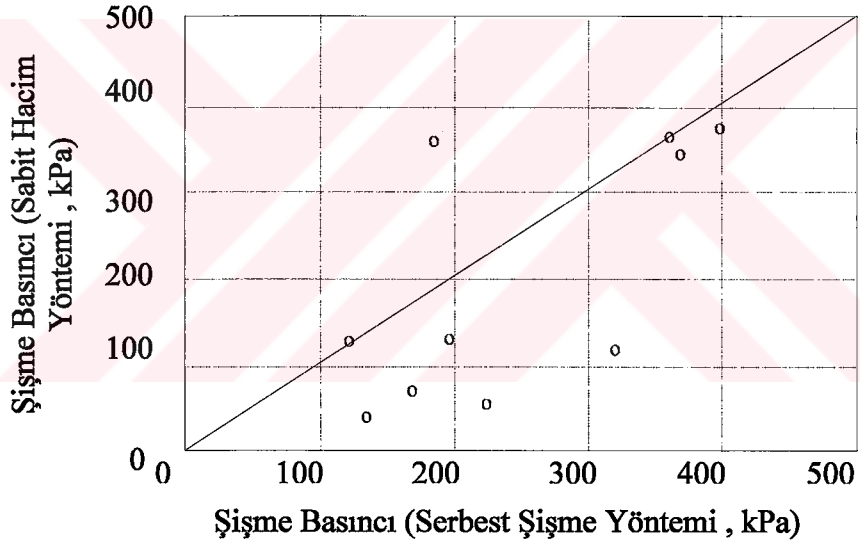
Şekil 32. Onderstepoort zemininin farklı deney yöntemleri ile şişme basıncı ve kabarmasının karşılaştırılması (Brackley, 1975).

Farklı deney yöntemlerinden elde edilen şişme basıncı değerlerini karşılaştırmak için, Ali, Elturabi (1984), hem örselenmemiş hem de sıkıştırılmış numunelerin kullanıldığı bir deney programı ortaya koymuşlardır. Örselenmemiş numuneler Sudan'ın güney batısından,

sıkıştırılmış numunelerde orta Sudan bölgesinden alınmıştır. Tamamıyla aynı olan numuneler serbest şişme ödometre ve sabit hacim ödometre deneylerine tabii tutulmuşlardır. Sonuç olarak serbest şişme ödometre yönteminin, sabit hacim ödometre yöntemine göre daha yüksek şişme basıncı değerleri verdiği tespit edilmiştir (Şekil 33).

El Sayed, Rabbaa (1986), farklı deney yöntemlerini kullanarak elde ettikleri farklı şişme basıncı değerlerini Tablo 14’de sunmuşlardır.

El Sayed, Rabbaa (1986), zemin daneleri tarafından emilmiş suyu uzaklaştırmak için büyük enerjiye ihtiyaç duyulduğundan dolayı serbest şişme ve çift ödometre deney yöntemleri kullanılarak bulunan şişme basınçlarının daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Yüklenmiş şişme deney yönteminin, laboratuvar sonuçlarından, şişen bir zeminin arazideki davranışının tahmin edilebilmesi için en uygun yöntem olduğu tavsiye edilmiştir.



Şekil 33. Serbest şişme ödometre ve sabit hacim ödometre deneylerinden elde edilen şişme basınçlarının karşılaştırılması (Ali, Elturabi, 1984).

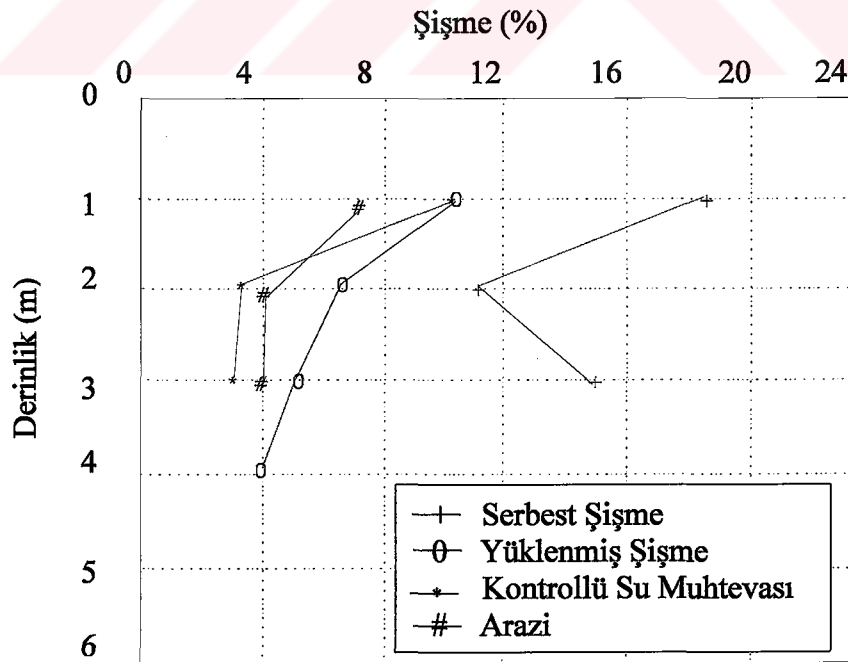
Çin’de Yangzi Irmağı Hidroelektrik Elektrik Araştırma Enstitüsünde yapılan araştırmada (1986), yüklenmiş şişme yöntemi kullanılarak elde edilen şişme basınçlarının, serbest şişme yöntemi ile bulunan şişme basınçlarından daha düşük olduğu gözlenmiştir. Düzenegin sıkışabilirliği hesaba katılırsa, sabit hacim metodu kullanılarak belirlenen şişme basıncı değerleri serbest şişme basıncıyla bulunan değerlere hemen hemen eşit olmaktadır.

Sudan’da iki bölgede ödometre deneyleri ile arazideki kabarmanın aşırı tahmin edilmesi Osman, El Sharief (1987) tarafından incelenmiştir. Bu incelemeler uzun bir süre

su verildikten sonra, derinliğe bağlı olarak hareketlerin ölçülmesini içermektedir. Ödometre şişme deneylerinin (serbest şişme ve yüklenmiş şişme deneyi), arazideki kabarmayı aşırı tahmin ettiği bulunmuştur (Şekil 34). Buna ek olarak arazi su muhtevası, son ödometre su muhtevasından daha düşük çıkmıştır. Bu nedenle ödometre şişme deneyleri, su muhtevası şartları kontrol edilerek yapılmıştır. Numunenin su muhtevası, numunenin altında ve üstünde iki filtre kağıdı teli kullanılarak, numuneye istenilen su miktarının eklenmesi ile kontrol edilmektedir. Su verilmesinden sonra, numunenin sonuç su muhtevası, arazideki zemin tabakasının su muhtevasına benzer olarak bulunmuştur. Deney sonuçlarından, gerçek şişmeye yakın değerler verdiği görülmektedir (Şekil 34).

Sorochan (1991), Khvalynsk, Sarmatsk ve Aral'sk killerin farklı deney yöntemleri ile şişme basınçlarının karşılaştırılmasını vermiştir. Arazi araştırmalarından elde edilen, arazideki şişme basınçları Tablo 15'de verilmiştir. Sonuç olarak serbest şişme deneyi yüklenmiş şişme deneyi ile karşılaştırıldığında, serbest şişme deneyinin daha yüksek şişme basıncı değerleri verdiği görülmektedir.

Sorochan (1991), yüklenmiş şişme deneyinin zeminin arazideki sürecini en iyi göstermesi bakımından, şişme basıncının belirlenmesinde kullanılması gerektiğini belirtmiştir.



Şekil 34. İki bölgede ölçülen ve tahmin edilen şişmenin karşılaştırılması (Osman, El Sharief 1987).

Tablo 14. Tamamıyla aynı numunelerle, farklı deney yöntemleri kullanarak bulunan şişme basıncı değerleri (El Sayed, Rabbaa, 1986).

Yöntem	Şişme Basıncı (kPa)
Yüklenmiş şişme	1800
Serbest şişme	2200
Çift ödometre	3400
Sabit hacim	1900

Tablo 15. Farklı yöntemlerden elde edilen şişme basıncı değerleri (Sorochan, 1991).

Kil Tipi		Çeşitli Metotlardan Elde Edilen Şişme Basıncıları (kPa)		
		Yüklenmiş Şişme	Serbest Şişme	Arazi İncelemeleri
Khvalynsk	Örselenmemiş	570	870	450
	Örselenmiş	250	510	-
Sarmatsk	Örselenmiş	250	690	-
Aral'sk	Örselenmemiş	420	700	300

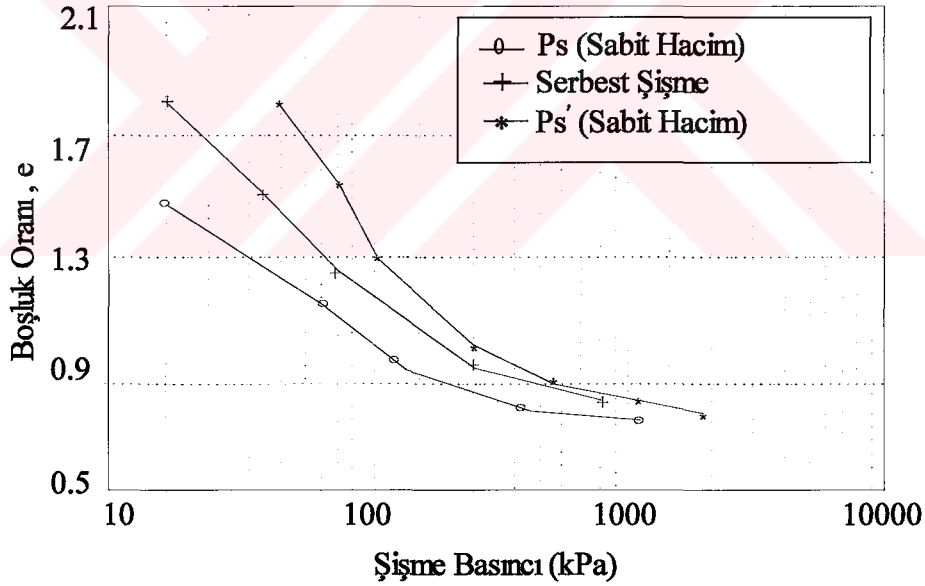
Son zamanlarda, Khaddaj vd. (1992), tarafından Flandres kili üzerinde farklı ödometre deney yöntemleri denenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, serbest şişme deneyi ile bulunan şişme basıncı değerlerinin, yüklenmiş şişme ve sabit hacim yöntemi ile bulunan şişme basıncı değerlerinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Tablo 16).

Tablo 16. Flandres kilinin şişme basıncı (Khaddaj vd., 1992).

Yöntem	Şişme Basıncı (kPa)
Serbest Şişme	300-360
Sabit Hacim	275
Yüklenmiş Şişme	185

Şişme basıncı deney sonuçları için doğru bir yorum yapabilmek için, numune alma sırasındaki örselenme etkilerini dikkate almak gerekmektedir. Bu örselenmeler sabit hacim

deneyi ile bulunan geleneksel şişme basıncının (P_s), ideal ve düzeltilmiş şişme basıncı değerinin (P'_s) altına düşmesine neden olmaktadır. Serbest şişme ve çift ödometre deney yöntemi, numune alma sırasındaki örselenme etkilerini dolaylı olarak giderdiğinden, her iki deneyden elde edilen şişme basıncının, düzeltilmiş şişme basıncına yakın olacağı düşünülebilmektedir. Diğer taraftan, sabit hacim ve yüklenmiş şişme deneyinden elde edilen şişme basıncı, numune alma sırasındaki örselenme etkilerinden dolayı, düzeltilmiş şişme basıncından daha düşük olacaktır. Şekil 35, sıkıştırılmış Regina kilinin düzeltilmiş ve düzeltilmemiş şişme basıncı değerlerini ve aynı zemin için yapılan bir seri serbest şişme ödometre deney sonuçlarını göstermektedir (Fredlund vd., 1980). Serbest şişme ödometre deneyinden elde edilen şişme basınçları, düzeltilmiş sabit hacim ödometre deneyinden elde edilen şişme basıncı değerlerinden bir miktar daha küçüktür. Bununla birlikte, sabit hacim ödometre deneyinden elde edilen düzeltilmemiş şişme basıncı, düzeltilmiş şişme basıncından çok daha küçüktür.



Şekil 35. Sıkıştırılmış Regina kilinin boşluk oranı-şişme basıncı ilişkisi (Fredlund vd., 1980).

Şişme basıncının tanımlanması için verilen çeşitli ödometre deney yöntemleri arasındaki farklar şu şekilde özetlenebilir;

- Serbest şişme ödometre deneyi daha yüksek şişme basıncı değeri verme eğilimindedir. Yüklenmiş şişme deneyi en düşük değeri, sabit hacim deneyi de (numune alma sırasındaki örselenmeler düzeltilmeden) orta değerler vermektedir.
- Numune alma sırasındaki örselenmeler, deney sırasında ölçülen şişme basıncını önemli miktarda azalttığından, şişme basıncı ölçümlerinde dikkate alınmalıdır.
- Şimdiye kadar, çeşitli ödometre deneyleri sırasında tanımlanan boşluk suyu basıncı ve hacim değişimi davranışı için kapsamlı bir teorik model elde edilememiştir.

1.3.4.2. Ampirik Yöntemler

Araştırmacılar, şişme potansiyeli ve şişme basıncının belirlendiği ödometre deneylerinin çok zaman alması nedeniyle, ödometre deneyi verilerini toplayarak, zeminin fiziksel özellikleri ile birlikte korelasyon kurma yoluna gitmişlerdir. Korelasyonlar likit limit, plastisite indisi, doğal su muhtevası, kuru birim hacim ağırlık gibi indeks özellikleri ile şişme potansiyeli ve şişme basıncı arasında kurulmuştur.

1.3.4.2.1. Şişme Potansiyelinin Belirlenmesi İle İlgili Çalışmalar

Şişme potansiyelinin belirlenmesi için birçok ampirik yöntem sunulmaktadır. Chen (1988), son 30 yılı aşkın bir süredir potansiyel şişme ve indeks özellikleri üzerinde yaptığı şişme deneylerinden, şişme potansiyeli ve plastisite indisi arasındaki ilişkiyi denklem (4)'de olduğu gibi ifade etmiştir.

Seed vd. (1962), şişme potansiyelini, standart kompaksiyon deneyine uygun olarak optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmış ve yanal olarak genişlemesi engellenmiş numuneye, 1 psi sürşarj yükü altında su verilmesi halindeki şişme yüzdesi olarak tanımlamış ve (17) denklemini elde etmişlerdir. Ayrıca, %8 ile %65 arasında kil muhtevasına sahip olan tabii zeminlerin şişme potansiyelini, %33 hata ile plastisite indisine bağlı olarak (17) denklemini yardımı ile hesaplanabileceğini belirtmişlerdir.

$$S = 2.16 \cdot 10^{-3} (I_p)^{2.44} \quad (17)$$

Ayrıca bu eşitliğin gerçek şişme miktarını tam olarak yansıtmayacağını, ancak zeminin şişme kabiliyetini göstereceğini belirtmişlerdir. Verilen bu denkleme bağlı olarak, şişme potansiyeli, toplam şişme ve plastisite indisi arasındaki ilişkiyi de Tablo 17'deki gibi vermişlerdir.

O'Neil&Ghazzaly (1980), A katsayısı olarak bilinen $I_p/(C-n)$ (n değeri doğal zeminler için 5, yoğrulmuş zeminler için 10'dur) ifadesinin şişen zeminlerin üzerine oturan yapılara etkisini araştırmışlardır (Hekimoğlu, 1996). Deneyler sonunda,

$$S = 2.27 + 0.131 W_L - 0.274 W_0 \quad (18)$$

ve;

$$S_{min}(\%) = 0.2 W_L + 9 \quad (19)$$

denklemlerini önermişlerdir.

Tablo 17. Şişme potansiyeli, toplam şişme ve plastisite indisi arasındaki ilişki (Seed vd. 1962).

Plastisite İndisi (%)	Şişme Potansiyeli (%) [*]	Toplam Şişme (%) ⁺
10	0.4-1.5	4.5-10
20	2.2-3.8	13.5-18.7
30	5.7-12.2	21.4-18.0
40	11.8-25	28.0-35.0
50	20.1-42.6	33.0-40.0

^{*}Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunenin, 1 psi düşey yük altında şişmesi için.

⁺1 psi düşey yük altında, havada kurutulmuş durumdan suya doygun duruma gelmesi için.

Holtz, Gibbs (1956), şişme potansiyelini zeminin içerdiği kil tipini ve yüzdesini yansıtan indeks özelliklerine bağlı olarak ifade etmişlerdir (Tablo 18).

Çimentolu ve örselenmemiş şişebilen kil zeminlerin deformasyonlara karşı dirençleri yüksektir ve şişme basıncını büyük ölçüde sönmölmektedirler. Sıkıştırılmış şişen zeminler, örselenmemiş şişen zeminlere göre daha çok şişme eğilimindedirler. Yapıları itibari ile düşük geçirimsizliğe sahip olan şişen zeminlerin içinde su transferi yavaş

olduğundan şişme süreci uzun zaman almaktadır. Sonuç olarak yüksek geçirimsizliğe sahip, düşük şişme potansiyelli killer, daha büyük şişme potansiyeline sahip olan killerden tek bir ıslatma süreci içinde daha fazla şişebilmektedir. Buna dayanarak Bell (1992), killi zeminlerin şişme potansiyelinin kil mineralojisinin yanı sıra zemin yapısına da bağlı olduğunu belirtmiştir.

Tablo 18. İndeks özellikleri ve olası hacim değişikliği (Holtz, Gibbs, 1956).

Kolloid Muhtevası (<0.001 mm)	Plastisite İndisi	Büzülme (Rötre) Limiti	Toplam Hacmin Yüzdesi Olarak Olası Şişme*	Şişme Derecesi
>28	>35	<11	>30	Çok yüksek
20-31	25-41	7-12	20-30	Yüksek
13-23	13-28	10-16	10-20	Orta
<15	<10	>15	<10	Düşük

*1 psi düşey yük altında ve kuru durumdan suya doymuş duruma gelmesi için.

Vijayvergiya, Ghazzaly (1973), ödometre yardımıyla şişme potansiyelinin, doğal su muhtevası ve likit limitin bir fonksiyonu olarak ifade edildiği bir denklem geliştirmiştir.

$$\log S_p = \frac{(0.44W_L - W_0 + 5.5)}{12} \quad (20)$$

Bandyopadhyay (1981), verilen herhangi bir kil minerali için, şişme potansiyeli ve kil boyutu yüzdesi arasındaki ilişkiyi (3) denklemi yardımıyla ifade etmiştir.

Nayak, Christensen (1971), aynı şartlarda sıkıştırdıkları zemin numuneleri üzerinde yaptıkları deneylerin, korelasyon analizleri sonucunda şişme potansiyelini, plastisite indisi, kil yüzdesi ve arazideki su muhtevasına bağlı olarak veren (21) denklemini geliştirmişler ve bu denklemin teorik şişme mekanizması ile doğrudan ilişkili olduğunu ve de verilen sonuçlarla uyum gösterdiğini belirtmişlerdir.

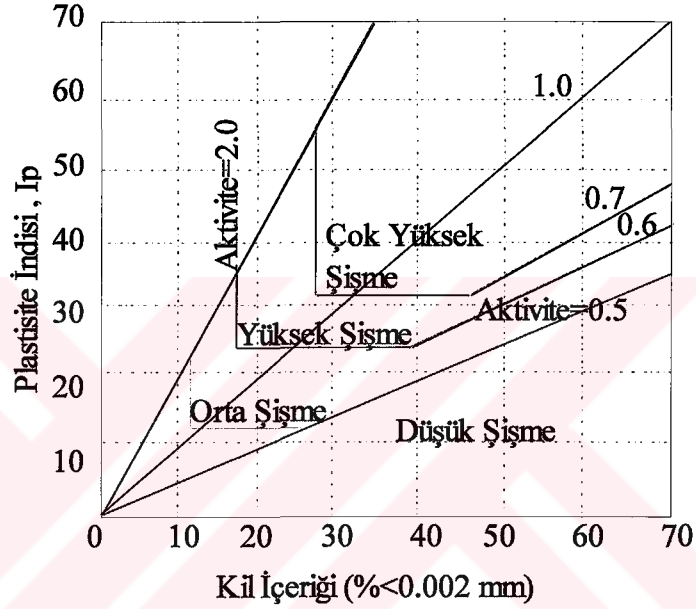
$$S_p = \frac{(0.00229 I_p)(1.45 C)}{W_0} + 6.38 \quad (21)$$

burada;

C = Kil yüzdesi,

W_0 = Arazideki su muhtevasıdır.

Gromko (1974), bir zeminin şişme potansiyelinin tahmininde, laboratuvar sınıflandırma deneylerinden faydalanılabileceğini belirterek, kil yüzdesi, plastisite indisi ile şişme potansiyeli arasındaki ilişkiyi veren bir abak geliştirmiştir (Şekil 36).



Şekil 36. Zeminlerin şişme potansiyelinin tahmini (Gromko, 1974).

Erol vd. (1987), tarafından verilen ve şişme tahmininde kullanılan diğer yöntemler Tablo 19'da verilmiştir.

1.3.4.2.2. Şişme Basıncının Belirlenmesi İle İlgili Çalışmalar

Chen (1975), doğal zeminlerin küçük yapılara uygulayacağı 50 kN/m^2 yük altında yaptığı şişme basıncı tahminini, indeks özellikleri ve SPT değerlerini göz önüne alarak Tablo 20'deki gibi vermişlerdir.

Tablo 20'ye benzer bir tabloda temel tasarımında kullanılmak üzere Wayne vd.(1984), tarafından Tablo 21'deki gibi verilmiştir.

Tablo 19. Şişme tahmini için geliştirilen bağıntılar (Erol vd., 1987).

Referans	Bağıntı
Van Der Merve	$\Delta H = F \cdot e^{-0.377D} \cdot (e^{-0.377H} - 1)$
Vijayvergiya ve Sullivan	$\text{Log } S_p = 0.0526 \gamma_d + 0.033 W_L - 6.8 (\gamma_d = \text{lb/ft}^3)$
Vijayvergiya ve Sullivan	$\text{Log } S_p = 1/12(0.44 \cdot W_L - W_0 + 5.5)$
Schneider ve Poor	$\text{Log } S_p = 0.9(I_p/W_0) - 1.19$
Johnson	$I_p \geq 40, S_p = 23.82 + 0.7346 I_p - 0.1458H - 1.7W_0 + 0.0025 I_p \cdot W_0 - 0.00884 I_p H$
Johnson	$I_p \leq 40, S_p = -9.18 + 1.5546 I_p + 0.08424H + 0.1W_0 - 0.0432 I_p \cdot W_0 - 0.0215 I_p H$
Weston	$S_p = 0.00411 (W_{WL})^{4.17} \sigma_v^{-3.86} W_0^{-2.33}$

burada;

S_p : Şişme yüzdesi,

I_p : Plastisite indisi,

W_L : Likit limit,

F : Şişme derecesi için düzeltme faktörü,

H : Kabaran tabakanın kalınlığı,

ΔH : Toplam kabarma,

D : Kabarmayan tabakanın kalınlığı,

γ_d : Kuru birim hacim ağırlığı,

W_0 : Başlangıç su muhtevası,

W_{WL} : Ağırlıklı likit limit,

σ_v : Sürşarj yüküdür.

Livneh (1970), seri deneylerden sonra şişme basıncının hesaplanması için,

$$\text{Log } P_s = -0.07 - 0.018n + 0.021 \lambda_1 \quad (22)$$

$$\lambda_1 = W_L - 1.3W_0 \quad (23)$$

denklemlerini önermiştir.

Tablo 20. Şişen killerde olası hacim değişiklikleri için veriler (Chen, 1975).

Laboratuar ve Arazi Verileri			Toplam Hacim Yüzdesi Olarak Muhtemel Şişme	Şişme Basıncı (kN/m ²)	Şişme Derecesi
200 nolu Elekten Geçen Yüzde	Likit Limit (%)	SPT Darbe Sayısı			
>35	>60	>30	>10	>1000	Çok Yüksek
60-95	40-60	20-30	3-10	250-1000	Yüksek
30-60	30-40	10-20	1-5	150-250	Orta
<30	<30	<30	<1	50	Düşük

Tablo 21. Hacim değişikliği, şişme basıncı ve muhtemel hasar arasındaki ilişki (Wayne vd., 1984).

Hacim Değişikliği (%)	Şişme Basıncı (kN/m ²)	Muhtemel Hasar
0-1.5	0-50	Düşük
1.5-5	50-250	Orta
5-25	250-1000	Yüksek
>25	>1000	Çok yüksek

Şişme basıncı ile ilgili diğer ampirik yöntemler Dhowian vd. (1990) tarafından Tablo 22'de sunulmuştur (Kaya, 1992).

1.3.4.3. Emme Gerilmesi Yöntemleri

Son yıllarda serbest şişme ve şişme potansiyelinin belirlenmesi için suya kısmen doygun olan zeminlerin hacim ve mukavemet özellikleri üzerine nemin etkisini gösteren, zemin daneleri ile su arasındaki karşılıklı etkiyi tanımlayan ve boşluk suyu basıncı olarak da bilinen zemin emme gerilmesi teorisine dayanan çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (basıncılı hücre, termokupl saykrometre, ısı transferi sensörleri, filtre kağıdı, cam lifli nem

hücresi ve jips bloğu yöntemleri gibi). Bu yöntemlerin benimsenmesindeki en önemli etken, şişme basıncının, şişmeyi kontrol eden en etkin parametre olmasıdır.

Tablo 22. Şişme basıncı ile ilgili ampirik yöntemler

Referans	Bağıntı
Komornik vd.	$\text{Log } P_s = -2.132 + 0.0208 W_L + 0.000665 \gamma_d - 0.0269 W_0$ ($\gamma_d \rightarrow \text{kg/m}^3$)
Nayak	$P_s = (3.58 * 10^{-2}) I_p^{1.12} C^2 / W_0^2 + 3.79$ ($P_s = \text{psi}$)

Ödometrik yöntemlere göre emme gerilmesi yöntemi, daha hassas, basit, ucuz ve kısa sürelidir. Ayrıca zemin şişme özelliklerini daha gerçekçi bir biçimde yansıtmaktadır (Snethen, 1984). En yaygın kullanılan emme gerilmesi ölçümü saykrometre (psychrometer) adı verilen bir aletle yapılmaktadır. Ödometre deneylerinde silindirik numunelere ihtiyaç varken, bu teknikle yapılan ölçümlerde, standart geometrik bir şekli olan numunelere ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu yöntemin avantajlarından biri de hem arazi emme gerilmesi ölçümlerinde kullanılabilmesi hem de değişik su muhtevalarında şişme miktarını belirleyebilmesidir.

Belli bir geometrik şekle sahip olmayan 10 cm³'lük zemin numunelerinden birkaçı doğal su muhtevasında, diğerleri de kurutma veya değişen su muhtevalarında hazırlanarak, içleri boyanıp, parafinle kaplanmış cam veya metal olan özel kaplara yerleştirilmektedir. Bu kapların ağızları da lastik bir tıkaçla sıkıca kapatılmaktadır. Saykrometreler lastik tıkaç içinden geçerek, uçları en az 2 cm. kap içine inecek şekilde yerleştirilmekte 48 saatlik bir süre, sabit bir sıcaklıkta, denge buhar basıncı oluşumu için beklenmektedir. Bu süre sonunda zemin emme gerilmesi ölçülür. Ölçüm sonunda standart yöntemler kullanılarak zemin numunelerinin hacimleri, su muhtevaları ve birim ağırlıkları belirlenir. Bu ölçümlerden zeminin emme gerilmesi-su içeriği ve su içeriği-hacim değişimi ilişkileri deneysel olarak bulunmaktadır.

Bununla beraber filtre kağıdı yöntemi de, diğer yöntemler gibi uzun ölçüm süresi, pahalı ve özel ekipmanlar gerektirmediğinden uygulamadaki pratikliği açısından tercih edilen diğer bir yöntemdir. Bu yöntemde numune giderek artan su muhtevalarında hazırlanarak, üzerinde oluşturulan düzgün bir yüzeye Whatman 42 filtre kağıdı yerleştirilmekte ve su muhtevasını kaybetmeyecek biçimde kapalı kaplarda

saklanmaktadır. Dengeye ulaşması için 7 gün süreyle bekletildikten sonra, 0.001 duyarlılıklı elektronik terazi yardımıyla tartılarak filtre kağıtlarının su muhtevaları belirlenmekte ve söz konusu filtre kağıdı için hazırlanmış kalibrasyon eğrisinden emme gerilmesi değerleri tespit edilmektedir (ASTM D5298).

1.3.5. Şişmeye Etki Eden Faktörler

1.3.5.1. Şişme Potansiyeline Etki Eden Faktörler

Şişme potansiyeline sahip olan bir zeminin arazide şişme gösterip göstermeyeceği aşağıdaki etkenlere bağlıdır.

1.3.5.1.1. Başlangıç Su Muhtevası

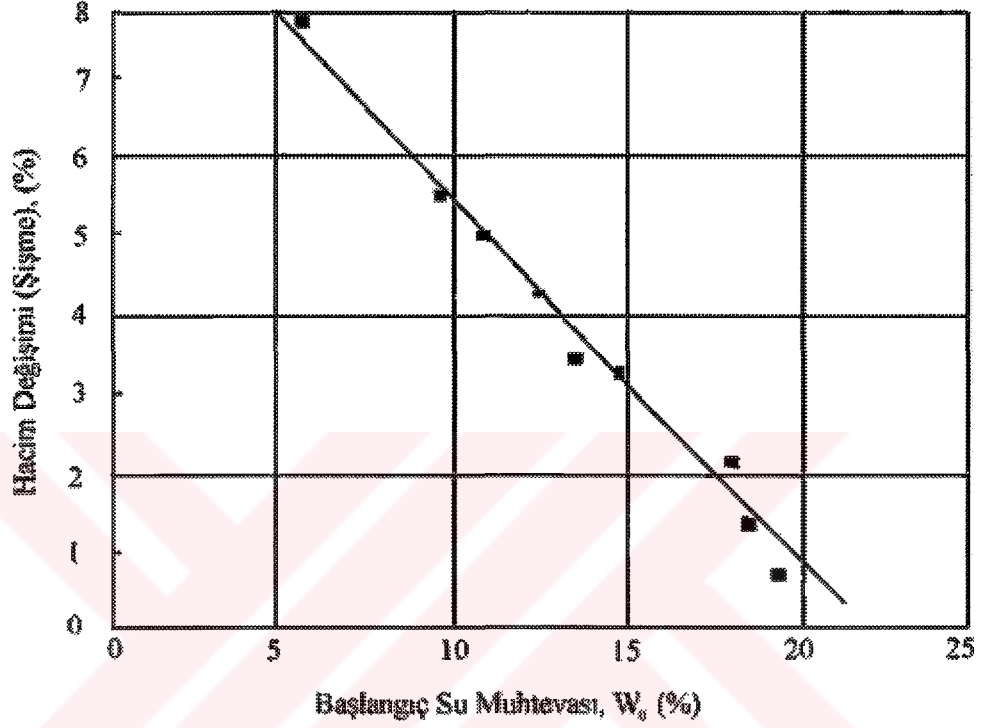
Zeminler yüksek şişme potansiyeline sahip olsa da, su muhtevalarında bir artış olmazsa şişme eğilimi göstermezler. Doğal su muhtevası %15' in altında olan killer çok tehlikelidirler. Bu killer %35 su muhtevasına kadar su emerek şişer ve üzerindeki yapılara da zarar verirler. Buna karşın %30 su muhtevasına sahip olan killerde şişmenin önemli bir bölümü gerçekleştiğinden, fazla bir şişme beklenmez. Yer altı su seviyesinin düşmesi veya fiziksel koşulların değişmesi durumunda ıslak killer kuruyabilir. Bu killerin tekrar ıslanması durumunda da şişme potansiyeli yeniden ortaya çıkmaktadır (Kaya, 1992).

Chen (1975), yaptığı bir seri deneyler sonucunda sabit birim hacim ağırlığında sıkıştırılan zeminlerin hacimsel şişmelerinin, su muhtevasının artması ile azaldığını belirtmiştir (Şekil 37).

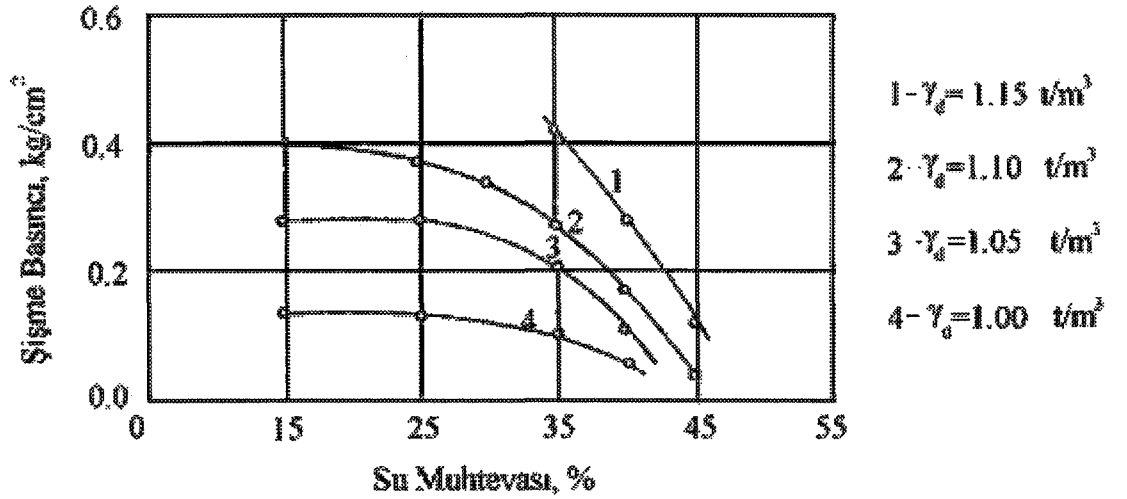
Kassiff (1971), başlangıç su muhtevasının, şişme basıncı ve şişme yüzdesine etkisini araştırmıştır. Sonuçlar Şekil 38 ve Şekil 39'da görülmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi sabit birim hacim ağırlıkta su muhtevasındaki artış, şişme yüzdesi ve şişme basıncını azaltmaktadır.

Komornik, David (1969), şişme basıncını tahmin etmek için yaptıkları deneylerde, su muhtevasının azalmasıyla şişme basıncının arttığını belirtmişlerdir.

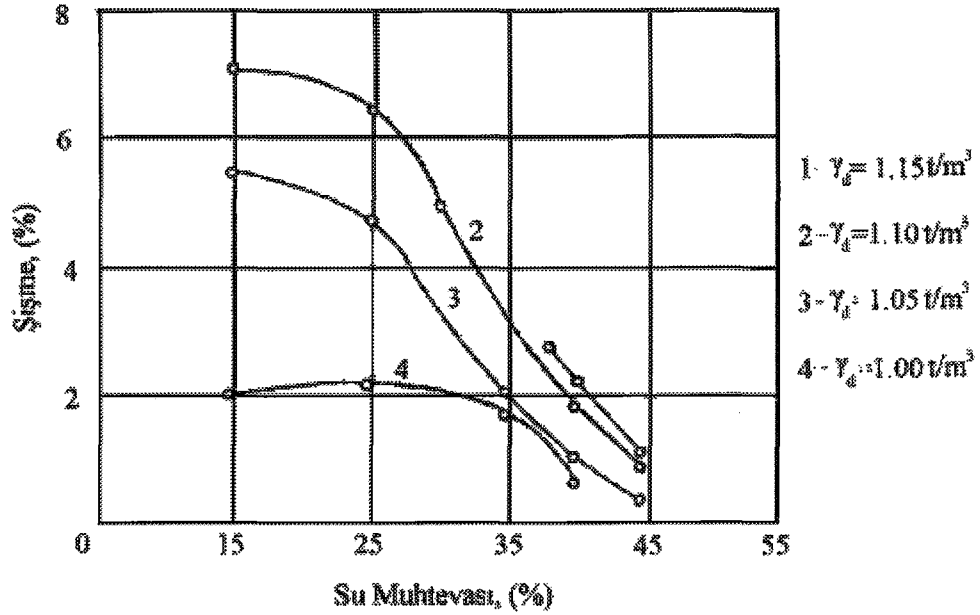
Keskin (1993), yaptığı laboratuvar deneylerinin sonucunda, başlangıç su muhtevasının, killi zeminlerin şişme davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiş ve başlangıç su muhtevasının artması ile şişme basıncının azaldığını belirtmiştir.



Şekil 37. Su muhtevasının hacim değişmesine etkisi (Chen, 1975).



Şekil 38. Başlangıç su muhtevasının şişme basıncına etkisi (Kassiff, 1971).



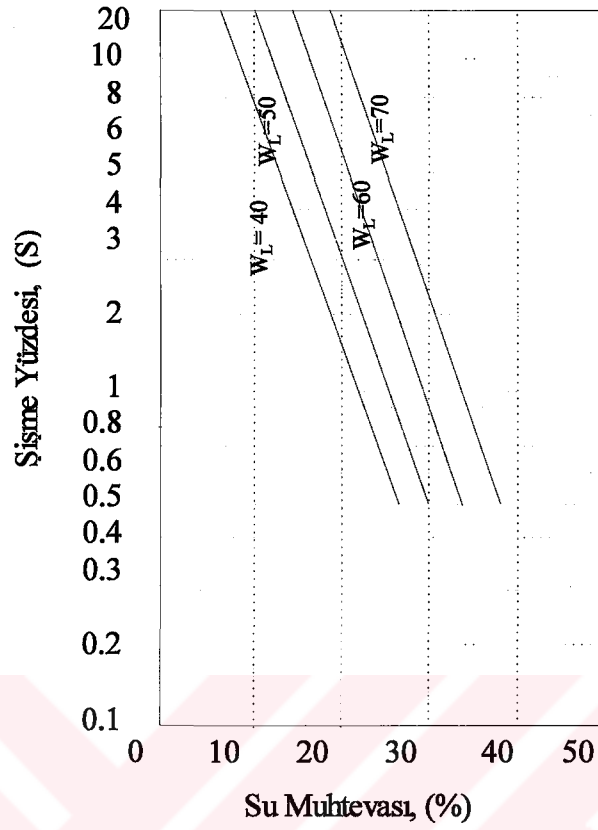
Şekil 39. Başlangıç su muhtevasının şişme yüzdesine etkisi (Kassiff, 1971).

Vijayvergia, Ghazzaly (1973), doğal killi zeminler için başlangıç su muhtevası ve likit limite bağlı olarak şişme yüzdesinin tahmini için bir kart önermişlerdir. Buna göre düşük başlangıç su muhtevası ve yüksek likit limite sahip olan killer daha çok şişme eğilimindedirler (Şekil 40).

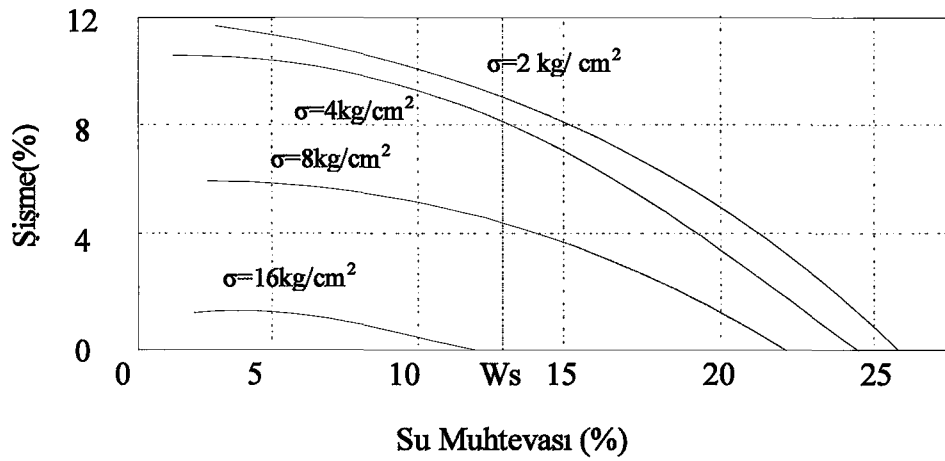
El-Sohby, Rabba (1981), doğal zeminlerden, aynı kuru birim hacim ağırlıkta ve farklı başlangıç su muhtevalarında 5 adet örselenmiş numune üzerinde yaptıkları deneylerin sonucunda başlangıç su muhtevasının, örselenmiş numunelerin şişme yüzdesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve başlangıç su muhtevasının azalmasıyla, şişme miktarının artacağını tespit etmişlerdir (Şekil 41).

1.3.5.1.2. Başlangıç Kuru Birim Hacim Ağırlığı

Başlangıç kuru birim hacim ağırlığı, şişme parametresini etkileyen en önemli faktördür. Aynı su muhtevasındaki numunelerin, başlangıç kuru birim hacim ağırlığının artması ile şişme yüzdesi ve şişme basıncının arttığı bilinmektedir. Kuru birim hacim ağırlık değerlerinin büyük olması, killerin arasındaki mesafenin azalmış olduğunu göstermekte ve bu durumda da şişme değerleri büyük olmaktadır.

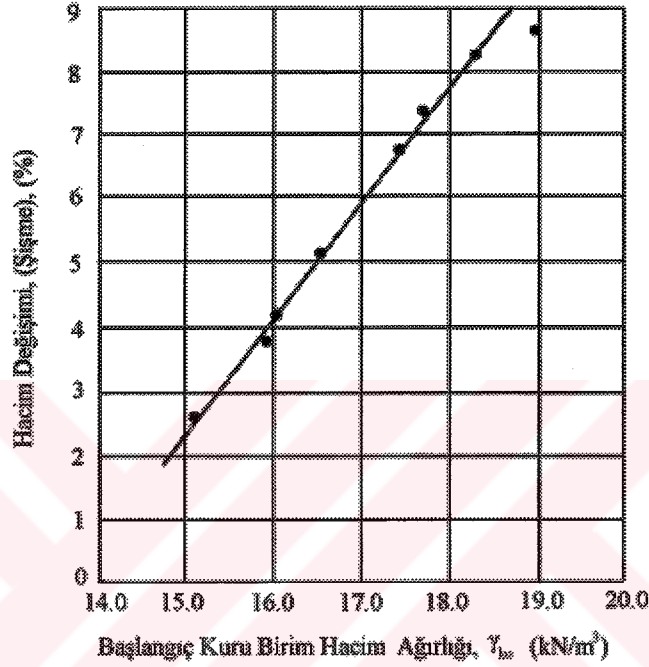


Şekil 40. Başlangıç su muhtevası ve likit limitin şişme yüzdesi ile ilişkisi (Vijayvergia, Ghazzaly, 1973).



Şekil 41. Başlangıç su muhtevasının, şişmeye etkisi (El-Sohby, Rabba, 1981).

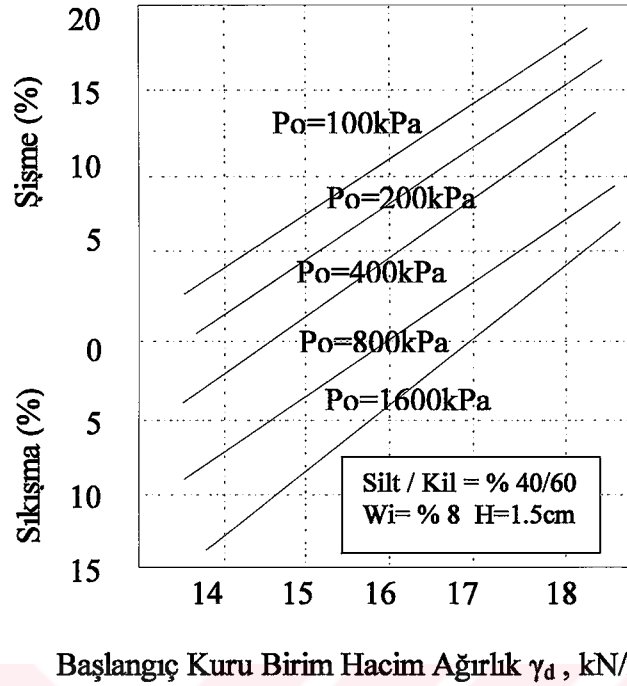
Chen (1975), başlangıç su muhtevası sabit olan numuneler üzerinde yaptığı deneylerde, kuru birim hacim ağırlığının artması ile şişme basıncı ve şişme yüzdesinin arttığını ifade etmiştir (Şekil 42). Aynı yaklaşım bir çok araştırmacı tarafından da belirtilmiştir (Kassiff, 1971; Komornik, David, 1969).



Şekil 42. Kuru birim hacim ağırlığının hacim değişimine etkisi

Abeysekara, Lovell (1981), El Sohby, Rabbaa (1984), zeminin tamamen suya doymun hale gelmesi ile oluşan hacim değişiminde başlangıç kuru birim hacim ağırlığının etkili olduğunu göstermişlerdir.

El-Sohby, Rabba (1981), farklı kuru birim hacim ağırlık ve üst tabaka gerilmesine sahip zeminler üzerinde geleneksel ödometre deneyi yapmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda kuru birim hacim ağırlığının artmasıyla, şişme yüzdesi ve şişme basıncının da arttığını belirlemişlerdir. Laboratuarda hazırlanan deney numuneleri siltli kil ve kumlu kil karışımından ibarettir. Farklı üst tabaka gerilmeleri için çizilen şişme yüzdesi – başlangıç kuru birim hacim ağırlık ilişkisi Şekil 43’de verilmektedir.



Şekil 43. Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının şişmeye etkisi (El-Sohby, Rabba 1981).

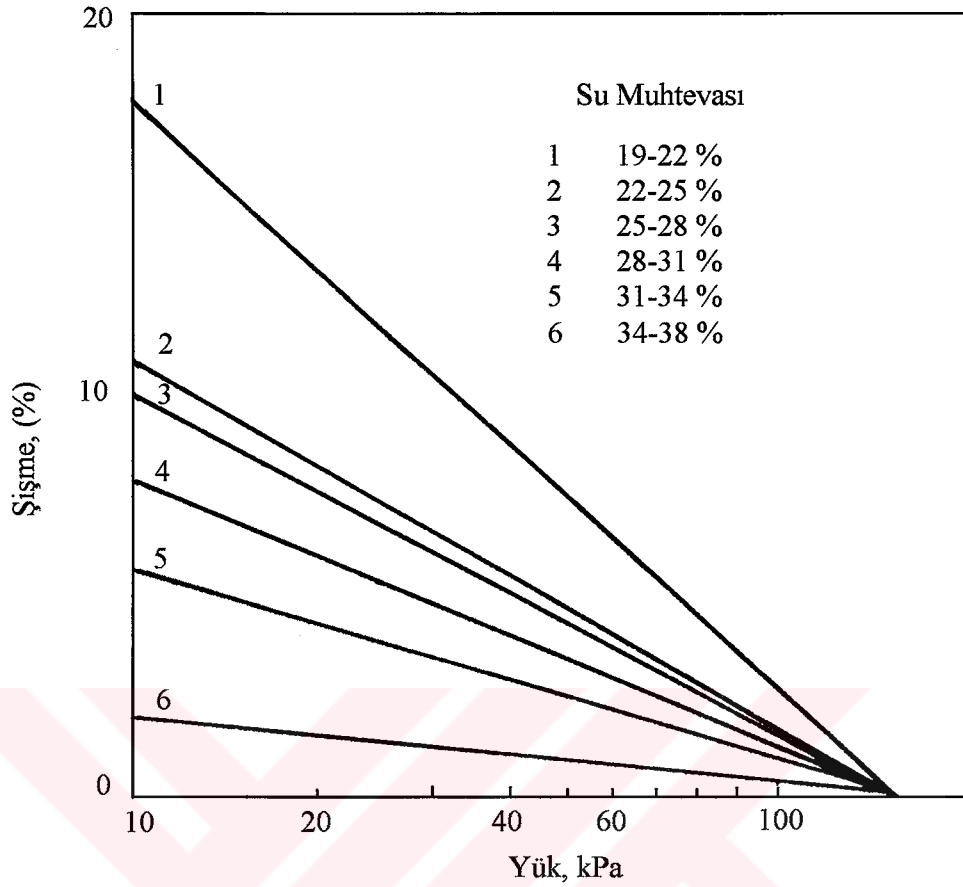
1.3.5.1.3 Sürşarj Yüğü

Çeşitli sürşarj yükleri altında sıkıştırılmış numuneler üzerinde yapılan ilk araştırmalarda, sürşarj yükü arttırıldığında şişmenin azaldığı belirtilmiştir (Rengmark, Erikson, 1953). Bu nedenle ağır yapılardan ziyade, yol, havaalanı kaplamaları, az katlı binalar gibi hafif yapılar, şişme deformasyonlarından daha fazla zarar görmektedir.

Brackley (1975), sıkıştırılmış zeminler için şişme-sürşarj yükü ilişkisinin ters logaritmik bir ilişki olduğunu belirtmiştir (Şekil 44).

Kassiff (1971), yaptığı şişme deneylerinde, şişme-sürşarj yük ilişkisinin lineer olmayıp, yukarı konkav bir eğri olduğunu belirtmiştir.

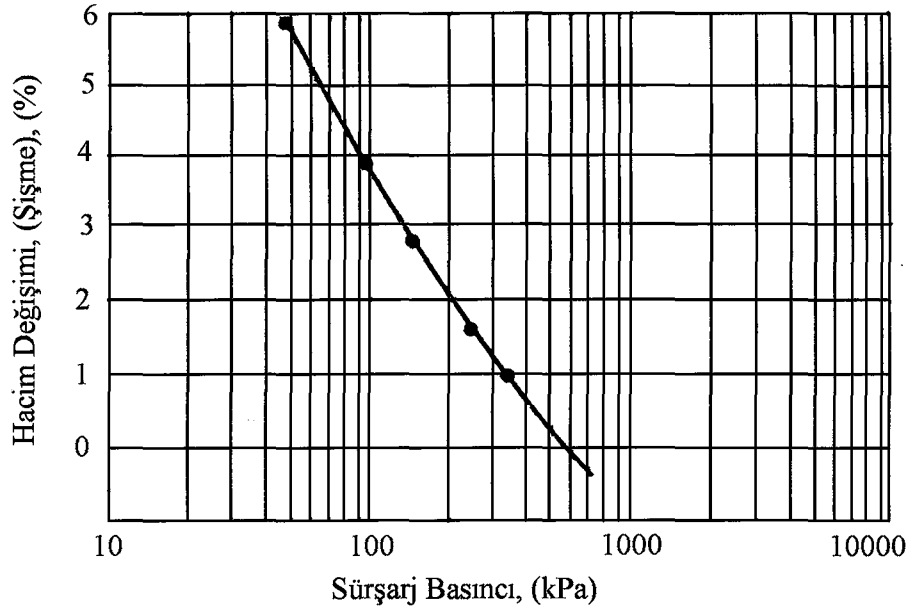
Chen (1975), sürşarj yükünün hacim değişimini azaltırken, şişme basıncına etkisinin olmadığını belirlemiştir (Şekil 45).



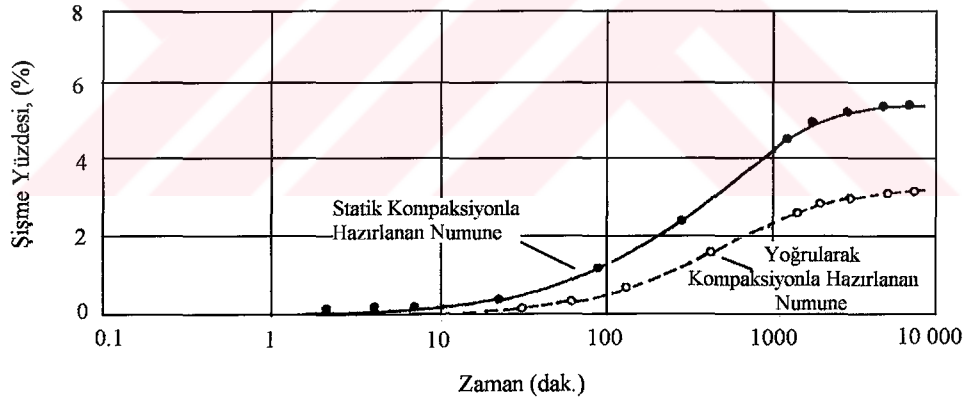
Şekil 44. Şişme yüzdesi-sürşarj yükü ilişkisi (Brackley, 1975).

1.3.5.1.4. Kompaksiyon Etkisi

Sıkıştırılmış dolgu zeminin su muhtevasının artmasıyla oluşacak olan şişme miktarı, zeminin sıkıştırma kuru birim hacim ağırlığına, su muhtevasına ve kompaksiyon yöntemine bağlıdır. Killer, optimum su muhtevasından daha düşük bir su muhtevasında sıkıştırılırsa daha fazla şişme eğilimi gösterirler. Seed vd. (1962), aynı su muhtevası ve birim hacim ağırlığına sahip olan zeminlerin örselenmesinin, şişme potansiyelini ve şişme basıncını arttırdığını belirtmişlerdir. Numune hazırlarken uygulanan kompaksiyon yönteminin, şişme yüzdesine etkisini de Şekil 46'da olduğu gibi göstermişlerdir. Burada statik kompaksiyon sonucu elde edilen şişme yüzdelерinin, dinamik kompaksiyon sonucu elde edilen yüzdelерden büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 45. Sürşarj yükünün hacim değişimine etkisi Chen (1975).



Şekil 46. Kompaksiyon yönteminin şişme miktarına etkisi (Seed vd., 1962).

1.3.5.1.5. Kil İçeriği ve Kil Minerali Tipinin Etkisi

Yüzey aktivitesi ve molekül yerleşiminden dolayı, kil minerallerinin yüzeyleri dipolar su moleküllerini ve çeşitli katyonları çekmek için olağanüstü bir yeteneğe sahiptir. Lambe, Whitman (1969), şişmenin, kil mineralinin tipine bağlı olarak değiştiği ve sırasıyla

montmorillonit, illit, attapuljit ve kaolinit olarak azaldığını belirtmişlerdir. Bunlara ek olarak şişme değişebilir iyonlara da bağlı olarak değişmektedir.

Grim (1962), çeşitli kil minerallerinin yapılarını tanımlayarak kil-su ilişkisini anlatmıştır. Yapılan bir çok araştırma kil yüzdesinin artması ile şişme potansiyelinin arttığını göstermiştir.

Karayolu ve hava alanı kaplamaları altında genellikle doğal zemin yerine sıkıştırılmış zeminler yer almaktadır. Örselenmiş olan bu zeminlerin şişme davranışları ise;

- Sıkıştırılan zeminin ihtiva ettiği kil tipi ve kil miktarına,
- Sıkıştırılan zeminin kuru birim hacim ağırlığına,
- Sıkıştırmadaki su muhtevasına,
- Sıkıştırma (kompaksiyon) yöntemine,
- Sürşarj basıncına,
- Tabaka kalınlığına,
- Zamana bağlı olarak değişmektedir (Acar, 1994).

Dhowain vd. (1984), şişen zeminlerdeki hacim değişikliklerine neden olan faktörleri, osmotik itme basıncı, kil partiküllerinin çekimi, katyon hidrasyonu, London-van der Waals kuvvetleri ve kapiler emme gerilmesi olarak sıralamış ve Tablo 23'de görüldüğü gibi ifade etmişlerdir.

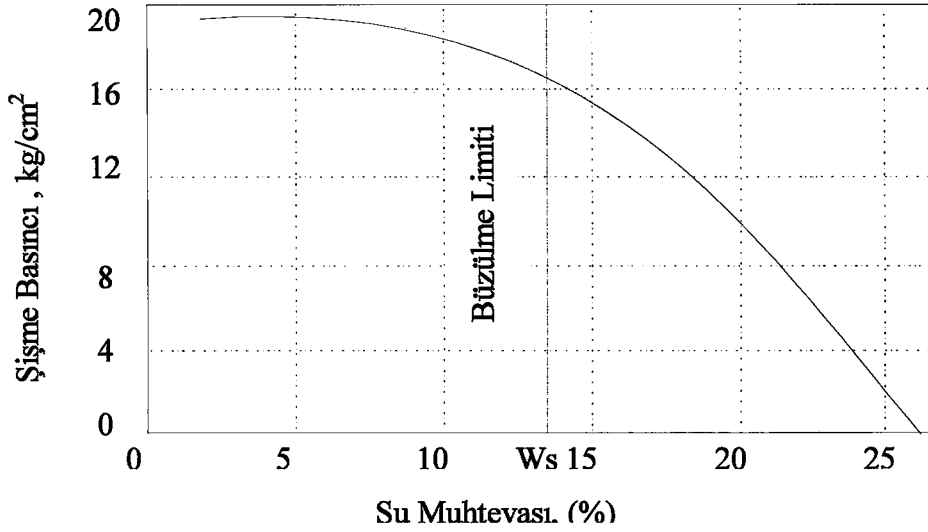
1.3.5.2. Şişme Basıncını Etkileyen Faktörler

Killerin şişme basıncını etkileyen bir çok faktör vardır. Arazi veya yerleştirme su muhtevası, arazideki kuru birim hacim ağırlık, kompaksiyon miktarı ve yöntemi şişme basıncını etkileyen fiziksel faktörler arasında sayılabilir. Bunlara ek olarak, fiziko-kimyasal davranış, daneler arası ve daneler içi kuvvetler ve reaksiyonlar zemin çeşidi tarafından kontrol edildiğinden dolayı, zemin çeşidi de tek başına önemli bir faktör olarak sıralanmaktadır.

Başlangıç su muhtevası ve şişme basıncı arasında, başlangıç su muhtevası artınca, şişme basıncının azaldığı, lineer olmayan bir ilişki mevcuttur (Şekil 47). Yapılan araştırmalara göre başlangıç su muhtevası bütülme limitine ulaşıncaya kadar hem şişme hem de şişme basıncı üzerinde küçük bir etkiye sahiptir (El-Sohby, Rabba,1981). Benzer sonuçlar El-Ramli (1965) tarafından da sunulmuştur (Karahan, 1999).

Tablo 23. Şişmeye etki eden faktörler (Dhowain vd., 1984).

Faktör	Tanım
Zeminlerin oluşturduğu mineraller	Aktif kil mineralleri-Montmorillonit ve diğer kil mineralleri ile montmorillonit karışımı tabakaların kombinasyonu
Boşluk suyu tuz konsantrasyonu	Boşluk suyundaki yoğun katyon konsantrasyonunun, zemin hacim değişimlerini azaltıcı etkisi vardır. Osmotik şişmenin uzun süreli etkisi düşünebilir.
Boşluk suyu bileşimi	Bir değerli katyonların baskın olduğu ortamda, şişme ve rötreyi azaltmaktadır.
Yapı	Sementasyona sahip partiküller, şişmeyi azaltıcı etkiye sahiptir. Su emme eğilimine sahip killer, diğerlerine göre daha fazla şişme gösterirler.
İklim	Kuru iklimler, zemin profilinin kurummasına, nemli iklimler ise profilin ıslak olmasına neden olurlar.
Yer altı suyu	Yer altı suyu seviyesinin düşük oluşu ve su seviyesindeki dalgalanmalar, şişme ve kabarmaların ortaya çıkmasına yol açar.
Drenaj	Zayıf yüzey drenajı, nem birikimi ve göllenmelere neden olur.
Bitki örtüsü	Ağaçlar, çalılar ve otlar, terleme ile zemindeki suyun tüketilmesini sağlar. Bitki örtüsünden arındırılmış alanlarda, nem birikimi söz konusu olabilmektedir.
Yanal etkiler	Büyük yanal basınçlar, şişmenin azalmasına neden olur. Hafriyat nedeniyle açılan yarmalarda şişme görülmesi çok daha olasıdır. Genelde yanal basınç, düşey sürşarj basıncına eşit olmayabilir.
Zemin geçirgenliği	Fisürler, geçirimliliği artırıcı etki yaptığından, şişme artışlarının daha hızlı olmasını sağlar.

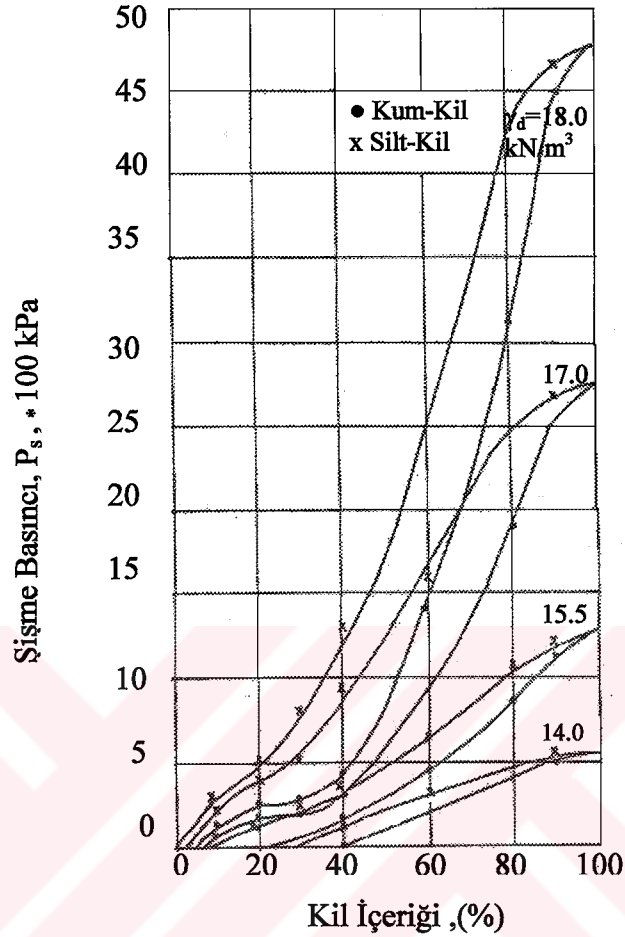


Şekil 47. Başlangıç su muhtevası, şişme basıncı ilişkisi (El-Sohby, Rabba, 1981).

El-Shohby, Rabba (1981), farklı kil içeriğine ve kuru birim hacim ağırlığına sahip değişik zeminlerle bir takım deneysel çalışmalar yapmışlar ve sonuç olarak şişme basıncının ön tahmini için, kuru birim hacim ağırlık ve kil içeriği yüzdesine bağlı olarak bir kart hazırlamışlardır (Şekil 48).

1.3.6. Yanal Şişme Basıncı

Şişen zeminler düşey doğrultuda hacim artışı gösterdiğinden, bu konuda yapılan ilk araştırmalar, düşey şişme davranışlarını kapsamaktaydı (Hatipoğlu, 1993). Şişen zeminlerde hacim artışının olması, şişmeyi engelleyecek bir sınırlamanın olmadığını göstermektedir. Zemin yüzeyinde fisür ve çatlakların olması durumunda, şişmeyle meydana gelen hacim artışıyla birlikte bu boşlukların kapanması, hacimdeki yanal artışa yer teşkil etmektedir. Bununla birlikte fisür ve çatlaklar yoksa ya da çok küçükse, zemin yatay doğrultuda sınırlanmakta ve böylece hacim değişimi olmazken, yatay şişme basıncı oluşmaktadır (Aytekin, 1992).



Şekil 48. Kil içeriği, şişme basıncı ilişkisi (El-Sohby, Rabba, 1981).

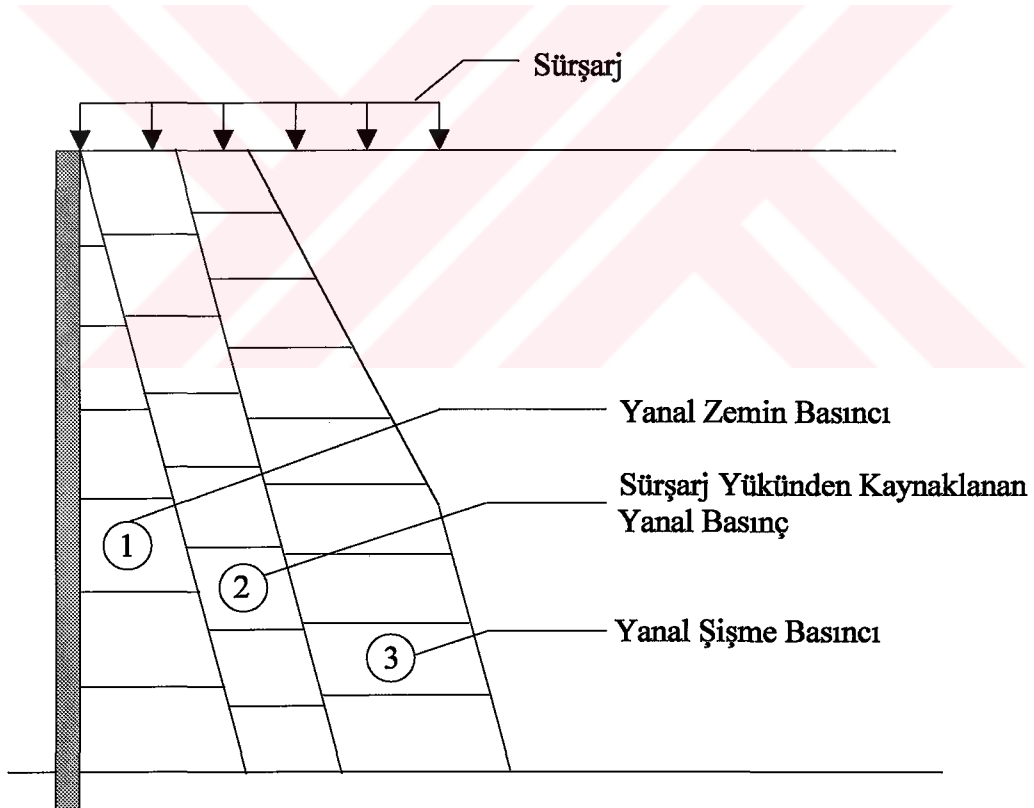
Killerin su muhtevası artışı ile şişmesi sonucu yapılaraya uygulanan yanal basınç artmaktadır. Şişen killerin içine inşa edilen yapıların yan duvarları, büyük yanal basınçlara maruz kalmaktadırlar. Karayolu ve hava alanı kaplamaları, istinat duvarları, kazıklar ve gömülü yapılarda yeterli araştırma yapılmazsa aşırı hasarlar olabilmektedir. İsrail'de yapılan araştırmalar, kazıklar ve kile gömülü yapılarda ki hasarların düşey kuvvetin olduğu kadar, yatay şişme kuvvetlerinin etkisinden de kaynaklandığını göstermektedir (Zeitlen, Komornik, 1965; Kassiff, Zeitlen, 1962).

Kassiff, Zeitlen (1962), arazi çalışmaları ile, şişen killere gömülü olan boru hatlarındaki hasarları tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, şişme sırasında kil anizotropik davranış gösterdiğinden, yatay ve düşey şişme davranışları arasındaki eşitsizliklerin, boru hatlarında çok büyük gerilmelere neden olduğuna karar vermişlerdir.

Richards, Kuzeme (1973), 7.5 m.lik sert kille dolu olan bir dayanma duvarında yaptıkları şişme basıncı ölçümlerinde, yatay şişme gerilmelerinin, üst tabakanın efektif basıncına göre 1.3-5 kat stabilize olduğunu göstermişlerdir (Fourie, 1988).

Dayanma duvarlarının dizaynında yanal şişme basıncı, dolgu zemininden dolayı çok az dikkate alınır. Chen (1987), Güney Denver'da yüksek şişme kapasitesine sahip zeminin bulunduğu bir alanda yaptığı araştırmada bir çok evde yaklaşık 15 cm. civarında yatay eğilmenin oluştuğunu gözlemlemiştir. Hasarın nedeninin de yetersiz donatı, yetersiz bodrum katı desteğinden ve yanal zemin basıncının ihmal edilmesinden kaynaklandığı anlaşılmıştır.

Şişen zeminlerin olduğu ortamlarda inşa edilen dayanma duvarlarına gelen toplam yanal basınç, yanal zemin basıncı, sürşarj basıncı ve yanal şişme basıncından oluşmaktadır. Şekil 49'da palplanşa etki eden yanal basınçın şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 49. Palplanşa etki eden yanal basınçlar

1.3.6.1. Şişen Zeminlerde Yanal Basınç Tahmin Yöntemleri

Literatürlerdeki yayınların çoğu, yeterli potansiyele sahip şişen zeminlerin yanal basıncını tahmin etme konusunu, teorik ve deneysel analiz olmak üzere iki grupta incelemiştir. Teorik analizlerin çoğunda da belli faktörleri değerlendirmek için, laboratuvar deneyleri kullanılmıştır. Deneysel analizlerde de örselenmemiş veya arazideki zemin numunelerinden ziyade, örselenmiş veya sıkıştırılmış zeminler kullanılmıştır.

1.3.6.1.1. Yanal Şişme Basıncı Ölçümlerinde Kullanılan Başlıca Deneysel Analizler

Parcher, Liu (1965), kompaksiyon yönteminden bağımsız olarak, sıkıştırılmış şişen zeminlerde laboratuvar deney yöntemleri kullanılarak, her zaman yanal doğrultudaki birim şişmenin hemen hemen, düşey doğrultudaki birim şişmeden fazla olduğunu bulmuşlardır. Bunu, zemin yapısına ve çift tabaka olayına bağlayarak, şişme basıncı ve kabarmanın büyüklüğünü etkileyen 8 faktör belirtmişlerdir.

- Zemin bileşenlerinin mineralojik yapısı, zeminin büzülme veya şişme potansiyelini tanımlamada ana etkidir.
- Başlangıçta kuru olup, daha sonra su emmesine izin verilen şişen zeminler, ilk önce ıslak olup, su emmesine izin verilenlere göre daha çok şişerler. Bunun terside, büzülme için geçerlidir.
- Kil plaka partikülleri birbirlerine paralel olarak düzenlenirler ve şişme doğrultusuna dik doğrultuda daha büyük şişme ve farklı dizilmiş danelerden oluşan zeminden daha büyük şişme basıncı gösterirler.
- Zeminin hacminde bir artış olması için serbest su kaynağı olmalıdır. Aynı zamanda, boşluk suyundaki çözülmüş değişebilir katyonlar, şişen zeminlerin suya eğilimini de etkilemektedir.
- Şişen zeminlerde şişmenin engellenme miktarı zemine etki eden çevre basıncı olarak kabul edilebilir.
- Laboratuvar da hazırlanmış numuneler, bir kür süresine sahiptir. Genelde deneylerde, hava da kurumuş zemin kullanılır ve istenen serbest su miktarı zemine eklenir. Böylece zemin belli bir başlangıç su muhtevasına sahip olur. Numunenin su

muhtevasının, deneye başlamadan önce homojen olmasını garantilemek için, izin verilen su miktarı yeterli sürede numuneye baştan başa eksiksiz dağıtılır.

- Numunenin mineralojik bileşenleri ve zemin yapısı, eklenmiş suyun numuneye bütünüyle dağılma oranını etkiler.
- Sıcaklık, hem çift tabakanın kalınlığını, hem de permeabilite oranını etkiler. Artan sıcaklıklar, daha hızlı bir şekilde suyun nüfuz edilmesini sağlar, fakat artan sıcaklıklar daha ince bir çift tabaka ile sonuçlanır.

Blight (1967), K_0 'ın kilin gerilme tarihine bağlı olduğunu ve aşırı konsolidasyon oranının artması ile arttığını söylemiştir. Aşırı konsolidasyon oranı 5, 6'yı aştığında K_0 , 1'den büyük olmaktadır. Blight, Skempton'un fikirlerini örselenmemiş numune alınmasından sonra zemindeki izotropik efektif gerilme ile arazideki üst tabaka efektif gerilmesini karşılaştırarak, arazideki killerin K_0 değeri hakkında bilgi edinilebileceği şeklinde özetlemiştir. Buda yatay efektif gerilmenin, kilin pasif basınç mukavemetine eşit olduğu sonucunu doğurmaktadır. Blight, iki Güney Afrika zemini üzerinde yaptığı K_0 ölçümleri sonunda 3 sonuca ulaşmıştır;

- Kurutma ve sonra yeniden ıslatma ile aşırı konsolide olan doygun göl kilinin arazideki yatay efektif gerilmesi, çatlamış killerin pasif basınç mukavemetine yaklaşabilir.
- Yeraltı su seviyesinin alçalması ile kil kurursa ve büzülme kilin kuruması ile büyürse yatay efektif gerilme azalacaktır.
- Şayet kil kapalı bir yüzeyin altında tamamen kabarırsa, gölsel bir kaynakla şişen killerde sükunetteki yatay gerilme kilin minimum pasif basınç mukavemetinden daha küçük olacaktır.

Ahmed (1967), duvar yüksekliği ile dolgu kalınlığı arasındaki oranla, yatay kuvvet arasında bir ilişki bulmuştur. Araştırmacı, bir dayanma duvarı modeli üzerinde laboratuvar deneyleri yapmış ve bu çalışmalarda, duvar yüksekliği ile dolgu kalınlığı arasındaki oranın yaklaşık olarak 0.5 olduğunda duvara iletilen yatay kuvvette herhangi bir artış olmadığını göstermiştir.

Komornik, Livneh (1968), yaptıkları laboratuvar araştırmaları sonucunda, şişme miktarının kompaksiyona bağlı olarak daha da artacağını göstermişlerdir. Bunun kompaksiyon doğrultusuna dik olarak dizilmiş montmorillonit kilinin plaka yapısından kaynaklandığını düşünmektedirler. Aynı miktardaki düşey şişme için, ölçülen yanal şişme basıncı, baskın bir paralel dizilişte, baskın bir dik dizilişe göre daha küçük olmaktadır. Bu

bulgulara göre, dayanma duvarı arkasında sıkıştırılmış dolgu kullanıldığında oluşan yanal basınç, laboratuvar deneylerinde örselenmemiş zemin kullanılarak tahmin edilen yanal basınçtan daha azdır. Zeminin anizotropisinin düşük düşey basınç durumunda, yanal şişme basıncını %40 ile %50 arasında etkilediğini tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, bir yapının çevresindeki killerin yapısıyla ilgili yapılan deneylerde, diziliş etkisinin hesaba katılması gerektiği vurgulanmaktadır.

Saito, Yanai (1969), yaptıkları araştırmalarda, sıkıştırılmış numuneleri yanal olarak sınırlandırılmış koşullarda suya batırmışlardır. Araştırmacılar, ilerleyen bir yükleme programı süresince şişme basınçlarını ölçmüşler ve aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir:

- Plastisite indisinin artması ile optimum su muhtevsındaki maksimum şişme basıncı ve şişme yüzdesi artmaktadır.
- Plastik oran (plastisite indisinin, plastik limite oranı) büyüdüğünde, kuru birim hacim ağırlığının değişiminin bir fonksiyonu olarak, şişme basıncı değişim oranı da büyümektedir.
- Sıkıştırılmış zeminin su muhtevası, optimum su muhtevsından büyük olduğunda, zeminin daha büyük darbelerle sıkıştırılması, daha az bir şişme ile sonuçlanmaktadır.
- Plastisite indisi ne kadar büyürse, ıslatmadan önceki drenajsız mukavemet ile ıslatmadan sonraki drenajsız mukavemet arasındaki fark da o kadar büyümektedir.

Satyanarayana (1969), şişen killerin, şişme basıncının azalmasına, bir kum tabakası kullanılmasının ve şişen kille kumun karıştırılmasının etkilerini araştırmıştır. Laboratuvar araştırmalarında, sıkıştırılmış Hindistan siyah pamuk zemin numuneleri kullanılmıştır. Şişme basıncı, bir konsolidasyon aletinden basınç yükü uygulanarak ölçülmüş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Şişme basıncındaki azalma yüzdesi, kum eklenmesi durumunda büyümektedir.
- Şişme basıncının artmasına, kil daneciklerinin net şişme hacmi neden olmaktadır. Kumun daha düşük yüzdelerinde (az kum yüzdesine sahip), kum danecikleri tarafından oluşturulan boşluklarda kil, dolgu malzemesi rolü görmektedir.
- Yapılan şişme basıncı ölçümleri yorumlanacaksa, deneyleri özel bir dikkatle yapmak gerekmektedir.

Komornik, Zeitlen (1970), farklı yerleştirme şartları altında, sıkıştırılmış killerin hem yanal hem de düşey basınçlarının artışı, laboratuvar deneyleri ile ölçmüşler ve aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir.

- Numuneler, sabit bir birim hacim ağırlıkta ve daha düşük bir su muhtevasında sıkıştırılırlarsa, oluşacak olan şişme miktarı, diğer özellikler sabit kalmak şartı ile daha yüksek su muhtevasında sıkıştırılan numunelere göre daha büyük olmaktadır.
- Şişme miktarı, numuneler yüksek bir birim hacim ağırlıkta sıkıştırıldığında, sabit su muhtevasında daha büyük olmaktadır.
- Numuneler aynı birim hacim ağırlığa sahip olduğunda , şişme basıncı (düşey hareket yok) su muhtevasının değişimi ile büyük değişiklikler göstermektedir.
- Birim hacim ağırlık ne kadar büyük olursa, numunelerin su muhtevası ne olursa olsun, düşey şişme basıncı da o kadar büyük olmaktadır.

Kassiff vd. (1973), bilinen boşluk suyu çözünmüş madde konsantrasyonunun, şişme üzerindeki etkilerini ölçmek için bir laboratuvar deneyi bulmuşlardır. Araştırmacılar, hacim, basınç ve emme gerilmesi değişimleri arasındaki ilişkinin rasyonel formülasyonu için, varsayımına dayanan görüşleri tartışmışlardır. Sonuç olarak, yüksek birim hacim ağırlıkta ve küçük bir emme gerilmesi değişiminde şişme-basınç ilişkilerinin, emme gerilmesi değişimine değil, kil tipine bağlı olarak değiştiğini ileri sürmüşlerdir.

Brackley (1973), dinamik olarak sıkıştırılmış Güney Afrika şişen kil zeminleri üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda; şişme basıncının, boşluk oranının bir fonksiyonu olduğunu belirlemiştir. Şişme basıncının, su muhtevası-emme gerilmesi eğrisinden tahmin edilebileceğini belirtmiştir. Ayrıca bu çalışmada, serbest şişme yüzdesini tahmin etmede kullanılabilecek olan (24) denklemi önerilmiştir.

$$FS = \frac{m_s - m_0}{0.36 + m_0} * 100 \quad (24)$$

burada;

FS: Serbest şişme yüzdesi,

m_0 : Orijinal su muhtevası,

m_s : Numune suya yerleştirildiğinde, şişmenin olmadığı durumdaki sıkıştırılmış su muhtevasıdır.

Snethen, Haliburton (1973)'un amacı, sıkıştırılmış zeminlerin yanal şişme basıncını direkt ölçmek ve yüksek plastisite ve şişme potansiyelini azaltan, iki Oklahama kohezyonlu zemininin yanal şişme basıncının rölatif büyüklüğünü ölçmek için bir alet geliştirmekti. Yazarlar düşey doğrultuda olduğu gibi, yanal doğrultuda da genişlemesine

izin verilmeyen zemin numunelerini kullanabilecekleri bir alet kullanmışlardır. Her iki zemin içinde hemen hemen aynı başlangıç su muhtevası şartlarında düşey şişme basıncı, yanal şişme basıncından fazla olmuştur. Düşey şişme basıncının yanal şişme basıncına oranı, her iki zemin içinde optimumun üzerindeki su muhtevasında yaklaşık 1 olarak tespit edilmiştir. Maksimum yanal şişme basıncını da yaklaşık olarak 6.5 psi. olarak ölçmüşlerdir.

Massarsch (1975), kohezyonlu zeminlerde toplam yatay gerilmeyi ölçmek için, yeni bir yöntem tanımlamıştır. Buna göre, yatay efektif gerilme, gerilme değişimi ve sükunetteki zemin basıncı katsayısı (K_0), boşluk basıncı ölçümlerinin birleşimi ile kullanıldığında hesaplanabilmektedir. Bu yeni yöntemi kullanarak araştırmacı, 5 m. derinlikteki 0.58 ile 0.62 arasındaki yatay toplam gerilme ve boşluk basıncı ölçümlerinden K_0 değerini hesaplamıştır.

Kate, Katti (1975), gerçek boyutta yaptıkları laboratuvar deneylerinde, alttaki şişen Hindistan siyah pamuk zeminin üzerine, 1-1.2 m. kalınlığında kohezyonlu şişmeyen zemin koyulduğunda, kabarma olmadığını bulmuşlardır. Bu çalışmalar, uygun kalınlıktaki kohezyonlu şişmeyen tabakanın altındaki şişen zeminin yanal basıncının, şişen zeminde hacim değişiminin olmadığı derinlikteki yanal basınca eşit olduğunu göstermiştir.

Joshi, Katti (1980), yanal şişme basıncını ölçmek için, gerçek büyüklükteki laboratuvar deney modelinde Hindistan siyah pamuk zeminini kullanmışlar ve aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir:

- Üç eksenli deneyde, doygunluktan sonra ki yanal ve düşey şişme basıncı hemen hemen aynı olmaktadır.
- Yanal şişme basıncı yüzeyden 3 ft. derinliğe kadar artmasına rağmen, 3 ft. altında yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.
- Doygunluktan sonra, yanal şişme basıncı zamanla artmaktadır. 20-30 günde de yaklaşık olarak maksimuma ulaşmakta ve daha sonra da yavaşça azalarak sabit kalmaktadır.
- Sürşarj (ekyük) arttığında K_0 azalmakta fakat yaklaşık olarak minimum 2.0 değerine doğru yaklaşmaktadır.
- Yanal basıncın gelişimi, artan sürşarj altında (yaklaşık olarak $2,19 \text{ kg/cm}^2$ (2 tsf)) lineer ve hızlı olmaktadır.
- Yanal basınçtaki artma, şişme basıncı oranı dışında şişmeyen zeminlerdekine benzer görünmektedir.

Komornik vd. (1980), sıkıştırılmış kil numunelerin şişmeleri ve üç eksenli kesme mukavemeti için laboratuvar ekipmanlarının gelişimini anlatmışlardır. Gerilme ilişkisi için (25) denklemini kullanmışlardır.

$$\sigma - \pi_A = \alpha \sigma - S_M - \pi_{SS} \quad (25)$$

burada;

σ = Dış basıncı,

S_M = Zeminin matris emme gerilmesini,

π_{SS} = Zemin suyundaki tuzdan dolayı osmotik basıncı,

π_A = Osmotik solüsyon basıncını,

α = Zemin üzerindeki dış basıncın, belirlenen bileşeni için katsayıyı ifade etmektedir.

Araştırmacılar, tuz konsantrasyonunun, zemin suyunda ve osmotik solüsyonda eşit olarak dağılmasından dolayı, denklem (25)'deki π_{SS} 'i ihmal etmişlerdir. Sonuç olarak aşağıdaki ilişkileri geliştirmişlerdir:

- Kısmen doygun şartlar altında ve denge durumunda kil numunelerde gelişen şişme miktarı ve şişme basıncı arasında karşılıklı bir ilişki mevcuttur.
- Bulunan diğer bir karşılıklı ilişkide, zemin emme gerilmesi ve denge halindeki şişmeden sonra drenajsız üç eksenli deneyden bulunan mukavemet arasındadır.

Sonuç olarak, kısmen doygun şartlar altında, dengedeki şişme basıncı ile emme gerilmesi arasında lineer bir ilişki olduğuna karar vermişlerdir.

Sudhindra, Moza (1982), yaptıkları gerçek büyüklükteki deneylerde, şişen zeminlerde yanal basınç ve vane kesme mukavemetinin derinlikle birlikte değişimi arasında, denklem (26)'daki ilişkiyi vermişlerdir (Aytekin, 1992).

$$P = \frac{q_{sw} \frac{d}{d_0}}{(C + b \frac{d}{d_0})} \quad (26)$$

burada;

P = d derinliğine bağlı yanal basınç (kPa),

q_{sw} = Şişme basıncı (kPa),

d = Derinlik (cm.),

d_0 = Birim derinlik (cm.),

d/d_0 = Derinlik oranı,

C = Kil muhtevası (2μ dan geçen),

$b = ((d/d_0)/(p/q_{sw}))$ ile d/d_0 ilişkisi için en uygun düz çizginin eğimidir.

Araştırmacılar, deneye tabi tuttıkları 3 zemin içinde b değerini, 0.6 olarak tespit etmişler ve böylece şişen zeminler için b değerinin sabit bir parametre olarak alınabileceğini ileri sürerek, (26) denklemini,

$$p = \frac{q_{sw} \frac{d}{d_0}}{(C + 0.6 \frac{d}{d_0})} \quad (27)$$

haline indirgemişlerdir.

Laboratuar çalışmaları sonucunda vane (kanatlı sonda) kesme mukavemeti ile derinlik arasında bir ilişki bulmuşlardır.

$$c_u = \frac{q_{sw} \frac{d}{d_0}}{3(C + \frac{d}{d_0})} \quad (28)$$

burada;

c_u = d derinliğine bağlı vane kesme mukavemeti (kPa),

q_{sw} = Şişme basıncı (kPa),

C = Kil muhtevası,

d = Derinlik (cm),

d_0 = Birim derinlik (cm)'dir.

Katti vd. (1983), çok kapsamlı, gerçek büyüklükteki laboratuar model deneyleriyle, şişmeyen kohezyonlu zeminin ve kumun, Hindistan siyah pamuk zemininin şişme basıncı üzerine etkisini araştırmışlardır. Laboratuar modelinde, duvarın hareketine izin verilmemiştir. Bu nedenle deneylerdeki değerler, sükunetteki zemin basıncı şartlarını (K_0) temsil etmektedir. Şişen zeminle yapı arasına, şişmeyen bir kil zemin yerleştirildiğinde

zeminin şişmesi azaldığından, Katti vd. (1983), şişmeden kaynaklanan bu basınçların yapılara iletilmesini ileri sürmüşler ve doğal bir şişen zemin ve duvar arasına dolgu malzemesi olarak, şişmeyen bir kil yerleştirildiğinde dayanma duvarına iletilen yanal şişme basıncını tahmin etmek için, bir seri deney yapmışlardır. Deneysel çalışmalarda, sükunet zemin basıncı koşullarının sağlanması için, yanal duvar hareketi engellenmiştir. Bu deneylerde, farklı şartlarda yerleştirilmiş üç farklı zemin türü kullanılmıştır.

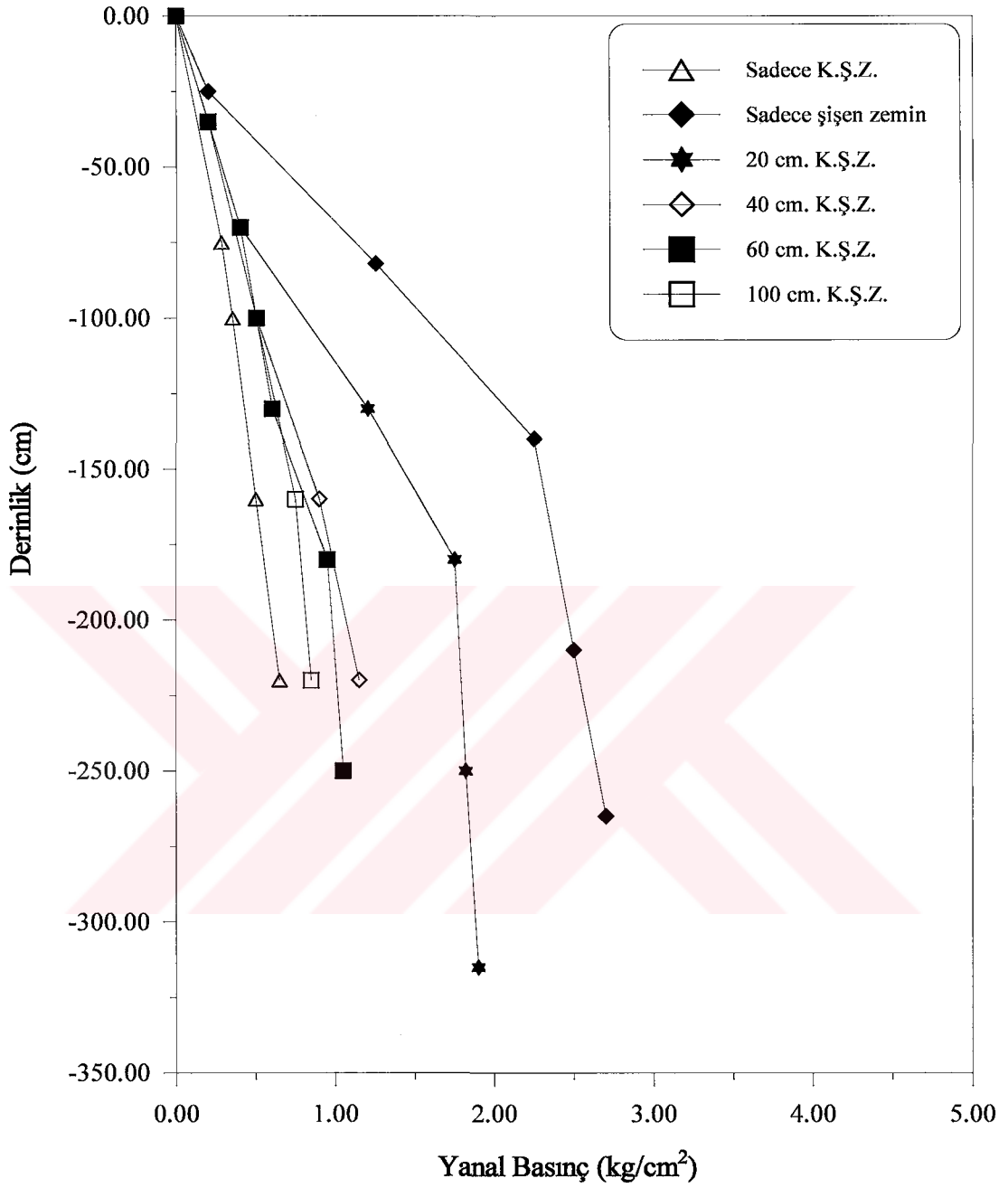
- Havada kurumuş zemin (herhangi bir mekanik kompaksiyon olmaksızın, standartlaştırılmış serbest düşü şartları altında yerleştirilmiştir).
- Havada kurumuş, sıkıştırılmış zemin.
- Sıkıştırılmış, doymuş zemin.

Araştırmacıların ilk sonuçları, şişen siyah pamuk zemininin tamamen doymuş hale gelmesi için yaklaşık 45 gün serbest su girişine ihtiyacı olduğu şeklindeydi. Bununla birlikte, zeminin doymuş olduğundan emin olabilmek için, zemine 70 günlük süre tanımışlardır. Bu zeminlerin homojenliğini garantilemek için, su muhtevası ölçümleri, zemin deney tankına yerleştirilirken, her 7.5 cm. de bir yapılmıştır. Yanal basınçlar da, 60cm. düşey aralıkla, tepkili kriko ve yük halkası kullanılarak ölçülmüştür.

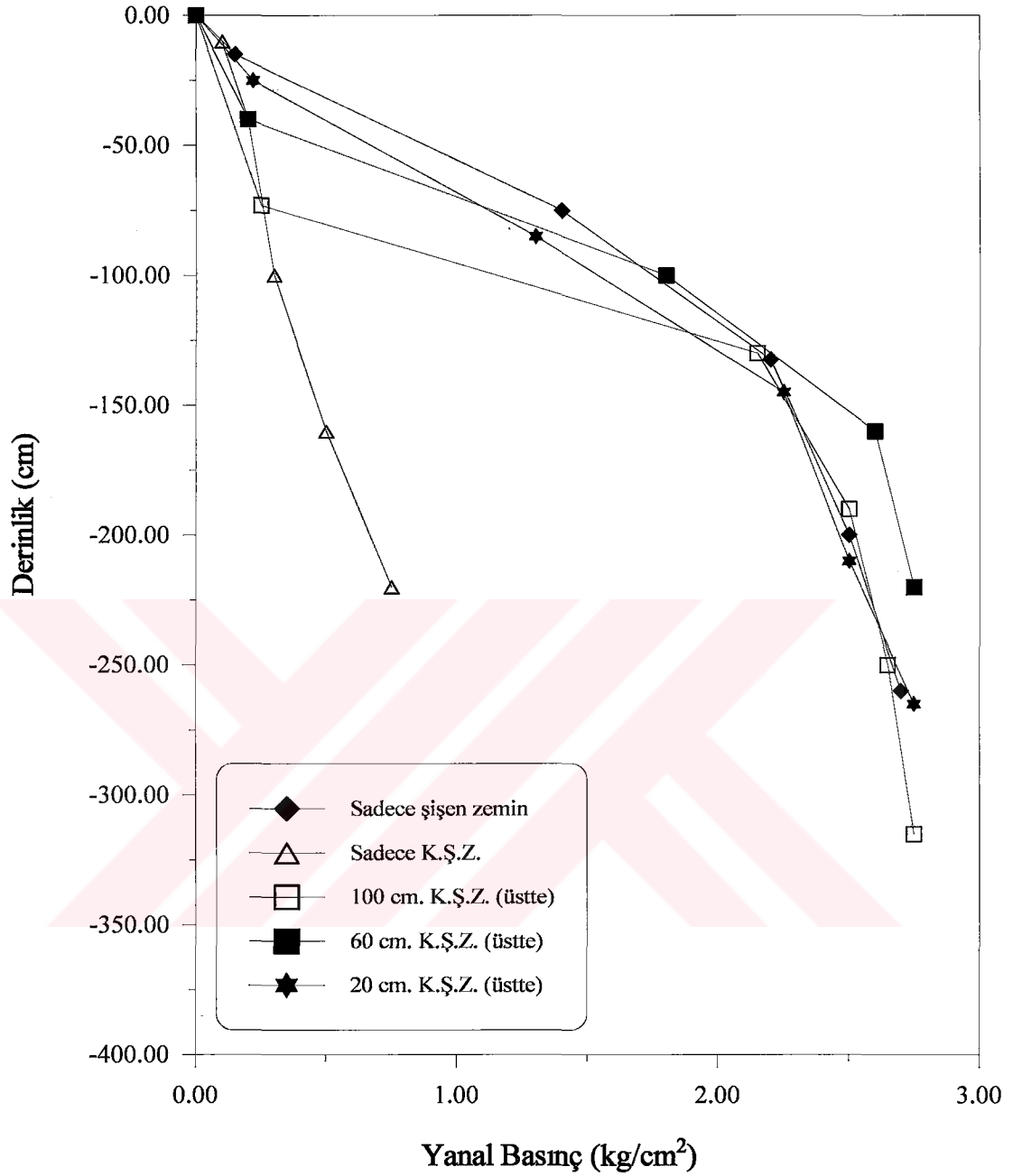
Şu andaki çalışmalarda, araştırmacılar kendi sayısal model sonuçlarını, Katti vd. (1983)'nin gerçek boyuttaki laboratuvar deney programındaki yanal basıncın derinlikle değişimi ile karşılaştırmışlardır. Katti vd. (1983)'nin deneysel olarak ulaştığı sonuçların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

- 1) Jakky'nin denklemi $K_0 = 1 - \sin \phi$ kuru ve gevşek yerleştirilmiş zemin için uygun fakat sıkıştırılmış zeminler için uygun değildir.
 - Yanal basınç ölçümlerinden K_0 değerini, havada kurumuş kum için 0.63, havada kurumuş kohezyonlu şişmeyen zemin için 0.48 ve siyah pamuk zemin için de 0.26 olarak bulmuşlardır. K_0 , Jakky'nin denkleminde aynı şartlarda hesaplanarak sırasıyla 0.625, 0.48 ve 0.59 olarak bulunmuştur.
 - Havada kurumuş zeminler sıkıştırıldığında K_0 değeri, her bir zemin çeşidi için 1'den büyük çıkmaktadır. Kumlar için K_0 değeri 2.33, kohezyonlu şişmeyen zeminler için 1.16, şişen siyah pamuk zemin için 1.1'dir.
 - Sıkıştırılmış zeminler doyduğunda, kum ve kohezyonlu şişmeyen zeminler için K_0 değeri, doymuş kumlarda 2.33'den 2.58'e, doymuş şişmeyen kohezyonlu zeminlerde de 1.16'dan 1.50'ye yükselmiştir.

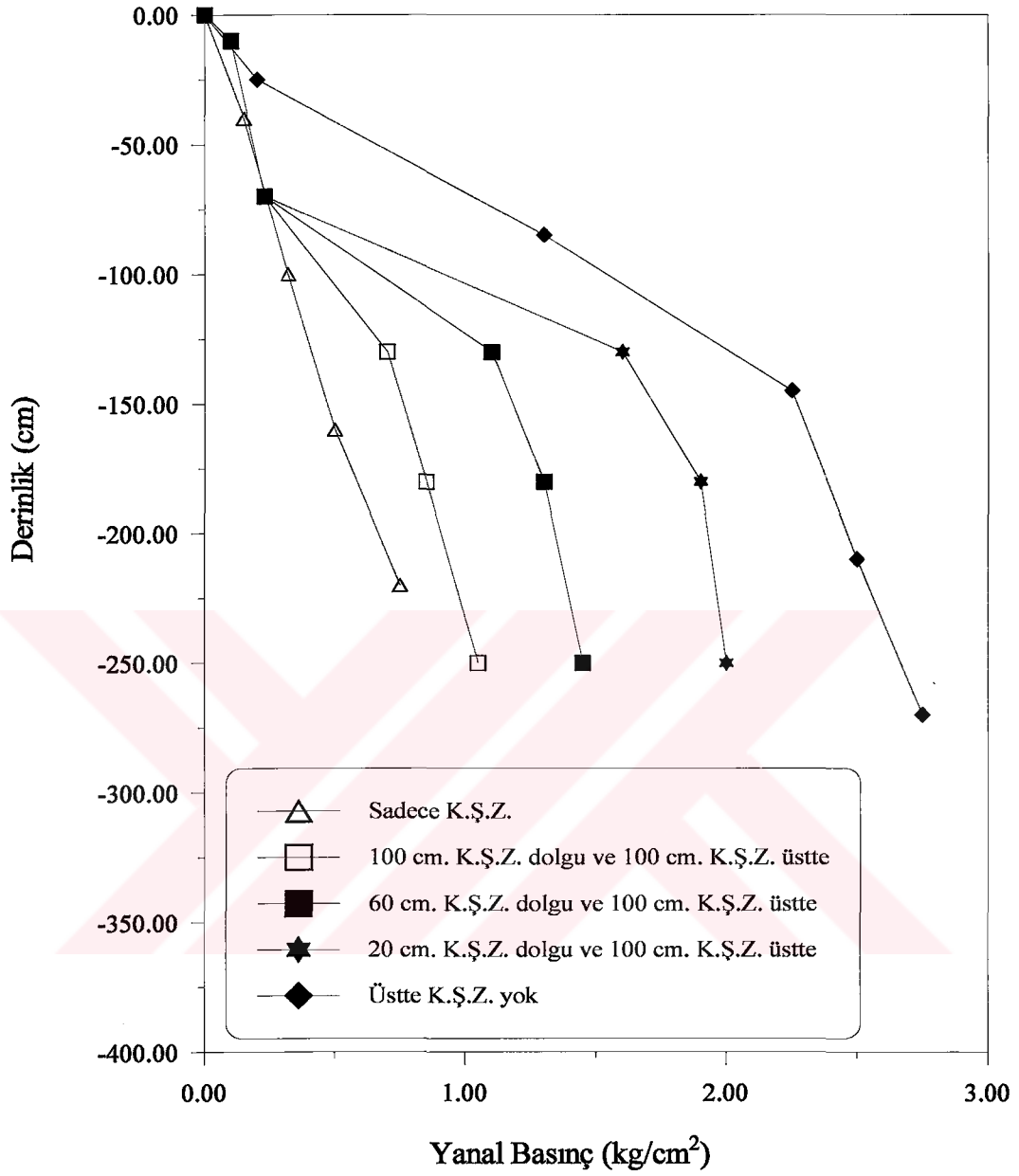
- Yanal basınç dağılımının derinlikle değişimi dokuz deneyden yedi tanesi için lineer olarak bulunmuştur. Deneyler sırasıyla havada kurumuş kum, havada kurumuş kohezyonlu şişmeyen zemin, havada kurumuş şişen zemin, sıkıştırılmış havada kurumuş kum, sıkıştırılmış havada kurumuş kohezyonlu şişmeyen zemin, sıkıştırılmış havada kurumuş şişen zemin, doymuş sıkıştırılmış kum, doymuş sıkıştırılmış kohezyonlu şişmeyen zemin, doymuş sıkıştırılmış şişen zeminlerle yapılmıştır. Ölçülmüş yanar basınç veri değerlerinin hepsi Şekil 50, 51 ve 52’de, derinliğin bir fonksiyonu olarak düz bir çizgi ile birbirine bağlanmaktadır.
- 2) Şişmesine müsaade edilen sıkıştırılmış şişen zemin için, ölçülen yanar basınçlarla derinlik arasındaki ilişkinin lineer olmadığı ve yüzeyden yaklaşık olarak 145 cm. derinliğe inildikçe çok hızlı bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Bu derinlikten aşağıda yanar basınç, aynı oranda olmasa da artmaya devam etmektedir.
- 3)En büyük yanar şişme basıncının, %100’den daha küçük doymuşluk derecesinde oluştuğu belirlenmiştir.
- 4)Kohezyonlu şişmeyen zeminin kalınlığının değişiminin etkisini tanımlamak amacı ile üç farklı deney yapılmıştır: (1) Şişen zeminin en üstüne kohezyonlu şişmeyen zemin yerleştirilmiştir. (2) Kohezyonlu şişmeyen zemin, duvar ile şişen zeminin arasına yerleştirilmiştir. (3) Kohezyonlu şişmeyen zemin, 1.ve 2. durumun kombinasyonu şeklinde yerleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda:
- Duvar ile şişen zemin arasındaki kohezyonlu şişmeyen zeminin kalınlığı sıfırdan 1 metreye artırıldığında, ölçülmüş yanar basıncın büyüklüğü artarak, doymuş sıkıştırılmış kohezyonlu şişmeyen zeminin yanar basıncına yaklaşmaktadır.
 - Ölçülen yanar basıncın büyüklüğü, ölçülebilir bir şekilde artmamaktadır. Buna karşın duvar ile şişen zemin arasındaki kohezyonlu şişmeyen zeminin kalınlığı sıfırdan bir metreye artırıldığında, düşey kabarma azalarak, durmaya yaklaşmaktadır.
 - Duvar ile şişen zemin arasındaki kohezyonlu şişmeyen zeminin kalınlığı sıfırdan bir metreye artırıldığında, hem ölçülmüş yanar basınç hem de düşey kabarmanın büyüklüğü azalmaktadır.



Şekil 50. Duvar ile şişen zemin arasında, değişik kalınlıklarda kohezyonlu şişmeyen zemin (KŞZ), sadece şişen zemin veya sadece kohezyonlu şişmeyen zemin koyulması durumunda yatay basınçların derinlikle değişimi (Katti vd., 1983).



Şekil 51. Şişen zeminin üzerine, değişik kalınlıklarda kohezyonlu şişmeyen zemin (KŞZ), sadece şişen zemin veya sadece kohezyonlu şişmeyen zemin koyulması durumunda yatay basınçların derinlikle değişimi (Katti vd., 1983).



Şekil 52. Duvar arkası ve şişen zeminin üstünde, değişik kalınlıklarda kohezyonlu şişmeyen zemin (KŞZ), sadece şişen zemin veya sadece kohezyonlu şişmeyen zemin koyulması durumunda yatay basınçların derinlikle değişimi (Katti vd., 1983).

Katti vd. (1983), yaptıkları bu deneyler sonucunda tasarımcılara, dizayn yatay basıncını tahmin etmeleri için (29) denklemini önermişlerdir.

$$P_L = p_{KŞZ} + 0.2 (q_{ŞZ} - p_{KŞZ}) \quad (29)$$

burada;

P_L = Dizayn yanal basıncı (kg/cm^2),

$P_{KŞZ}$ = Uygun derinlik için CNS malzemesinin yanal basıncı (kg/cm^2),

$q_{ŞZ}$ = Etüvde kurumuş şişen zeminin, hacim değişimi olmadığı durumda ki şişme basıncıdır (kg/cm^2).

Sonuç olarak, bu çok kapsamlı laboratuvar deney programından, şişen zemin ile duvar arasına belli bir kalınlıkta, başka bir kohezyonlu şişmeyen zemin malzemesi eklemenin, şişen zeminden duvara iletilen yanal basıncı etkili bir şekilde azalttığı tespit edilmiştir.

Sridharan vd. (1986), bazı laboratuvar deneyleri yaparak killerin şişme basıncını tahmin etmede kullanılan 3 yöntemin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Bu yöntemler (1) Geleneksel konsolidasyon yöntemi (2) Farklı konsolidasyon basınçlarında, boşluk oranı denge yöntemi (3) Sabit hacim yöntemidir. Bu yöntemler, birbirinden çok farklı değerler vermektedir. Araştırmacılar, bu üç yöntemin değerleri arasında, çok açık bir ilişki olmadığını gördüğünü belirtmişlerdir. Bununla birlikte ilk yöntemin, en yüksek değeri, ikinci yöntemin, en küçük değeri ve üçüncü yöntemde diğer ikisinin arasında bir değer verdiği gözlenmiştir. İlk yöntemle bulunan şişme basıncı, ikinci yöntemle bulunan şişme basıncından yaklaşık olarak 4 kat daha büyüktür.

Üçüncü deneyi yapmak daha hızlıdır ve sadece bir numuneye ihtiyaç duyduğundan diğer iki yönteme göre daha avantajlıdır. Bununla birlikte bu yöntemin sonuçları, hem yük artışı hem de yük oranı bakımından hassastır. En düşük yük oranı veya en küçük yük artışı daha yüksek maksimum şişme büyüklüğü ile sonuçlanmaktadır. İkinci yöntem, ilk yönteme göre daha hızlıdır fakat benzer üç numuneye ihtiyaç duyduğundan dezavantajlıdır. Sonuç olarak araştırmacılar aşağıdaki bulguları elde etmişlerdir.

- Şişme basıncı her şeyden önce başlangıç kuru birim hacim ağırlığına ve zeminin boşluk oranına bağlıdır.
- Başlangıç su muhtevasının, şişme basıncına etkisi, diğer iki faktörden (başlangıç kuru birim ağırlığı ve zeminin boşluk oranı) daha azdır.
- Şişme büyüklüğü – zaman ilişkisi ve şişme basıncı (sabit hacim) – zaman ilişkisi diktörtgen bir hiperbol ile tanımlanmaktadır.

Clayton vd. (1991), yanal basınçları ölçmek için yerleştirme, sıkıştırma ve gömme (sabit su muhtevasında yatay toplam gerilme azalması, orta veya yüksek plastisiteli kil kullanılarak sabit düşey gerilme altında şişme veya konsolidasyon) aşamalarından oluşan

küçük ölçekli ve kılavuz ölçekli deneyler yapmışlardır. Deneylerde yanal şişme basıncını yaklaşık olarak 322 kPa olarak kaydetmişlerdir.

Day (1991), sıkıştırılmış çakıllı kil üzerinde, şişme deneyinde hesaba katılmayan çakıl dane büyüklüğünün etkisini araştırmıştır. Bu çalışmalar sonucunda Day, sıkıştırılmış çakıllı killerdeki şişme davranışının, çakıldan etkilenen hacimdeki azalmaya bağlı olduğunu tespit etmiştir. Sabit kompaksiyon gücündeki şişme deneyleri için, çakıl daneleri kompaksiyonu engellemektedir.

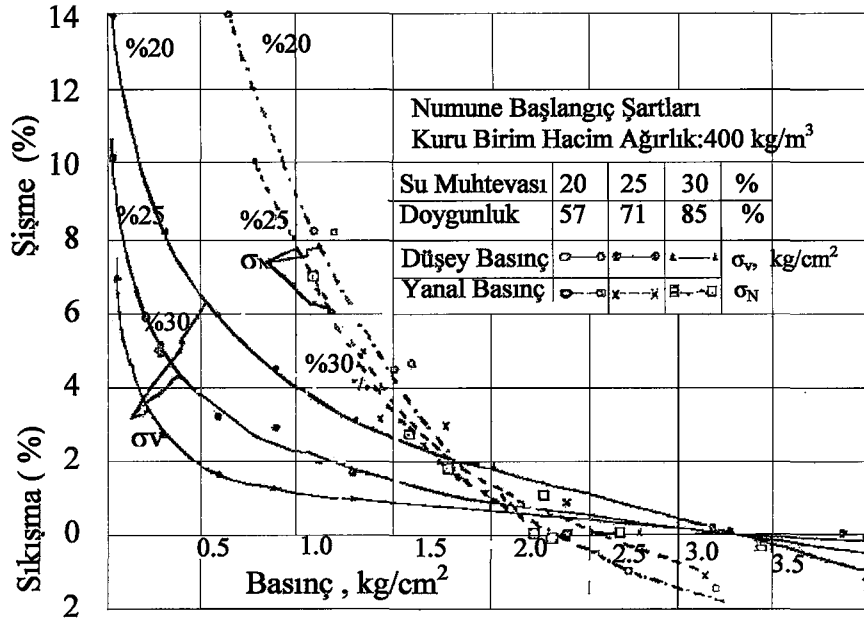
Dif, Blumel (1991), laboratuarda gerçek yük hareketi altında, şişen zemin numunelerinin şişme-büzülme davranışı çalışmasına bir yaklaşım getirmişlerdir. Araştırmalarında değiştirilmiş ödometre kullanarak bazı sonuçlara varmışlardır:

- Şişen zeminlerin şişme ve büzülmesinin olduğu bir üst ve bir de alt limit su muhtevası vardır. Alt limit, büzülme limitinden, üst limit de tamamen doymuş haldeki su muhtevasından küçüktür. Zemin deneyleri için her bir ıslanma-kuruma çevriminden sonra, hacimdeki azalma, sabit limitler arasında olan şişme, büzülme bir dengeye ulaşılan kadar daha küçük olmaktadır.
- Islanma ve kuruma çevriminden sonra, şişen zeminlerin yorulması, zemin danelerinin sürekli yeniden düzenlenmesine, çatlakların oluşumundan sonra yanal sınırlama kayıplarının gelişimine ve zemindeki kil mineralinin tipine bağlıdır.

Yanal şişme basıncının ölçülmesi için yapılan deneysel analizler, ödometre aleti, değiştirilmiş üç eksenli düzenek, laboratuvar model deneyleri ve arazi deneylerini kapsamaktadır.

1.3.6.1.1.1. Ödometre Halkası İle Yanal Basıncın Ölçülmesi

Komornik, Zeitlen (1965), şişen zeminlerin doymuş halde iken yanal basınçlarını ölçmek için, geleneksel konsolidasyon hücresini değiştirerek özel bir alet geliştirmişlerdir. Bu alet, bir konsolidasyon halkasının orta bölümünde ince bir duvarın kullanılmasından ibarettir. Bu durum, elektriksel birim uzama tellerinin, uygulanan iç basıncın hesaplanmasında kullanılmasına izin vermektedir. Şekil 53, düşey hareketin, hem düşey hem de yatay basınca göre değişimini vermektedir. Şişme olduğunda yanal basınçlar, düşey basınçtan daha fazla olmaktadır.

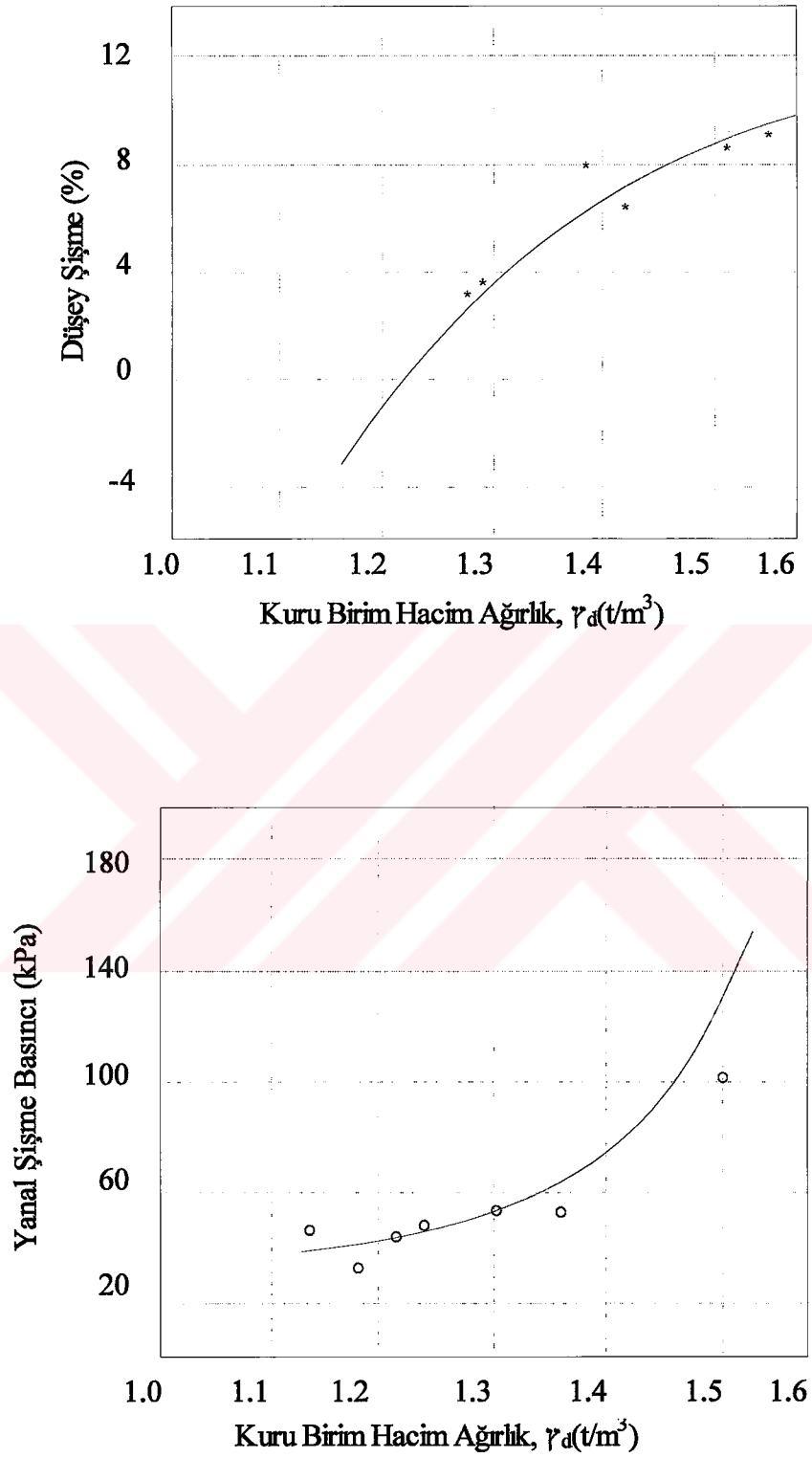


Şekil 53. Düşey hareketin, hem düşey hem de yatay basınca göre değişimi (Komornik, Zeitlen, 1965).

Ofer (1980), yanal şişme basınç halkası (LSP Ring) adı verilen ve laboratuarda yanal şişme basıncını ölçen bir alet geliştirmiştir. Halka, değiştirilmiş ince duvarlı bir ödometre halkasıdır. Bu halka, düzlem sonlarının birbirleri ile bağlanmasıyla kalibre edilmektedir. Halkanın iç bölümüne hava basıncı uygulanarak, uygun birim uzama, bir dijital birim uzama göstericisi ve kaydedicisi ile kaydedilmektedir. Deneyler şişen killerle, yanal şişme basıncı halkasında ve 19 kPa sabit düşey basınç altında yapılmıştır. Tipik bir birim hacim ağırlık-serbest şişme yüzdesi-yanal şişme basıncı ilişkisi Şekil 54'de görülmektedir.

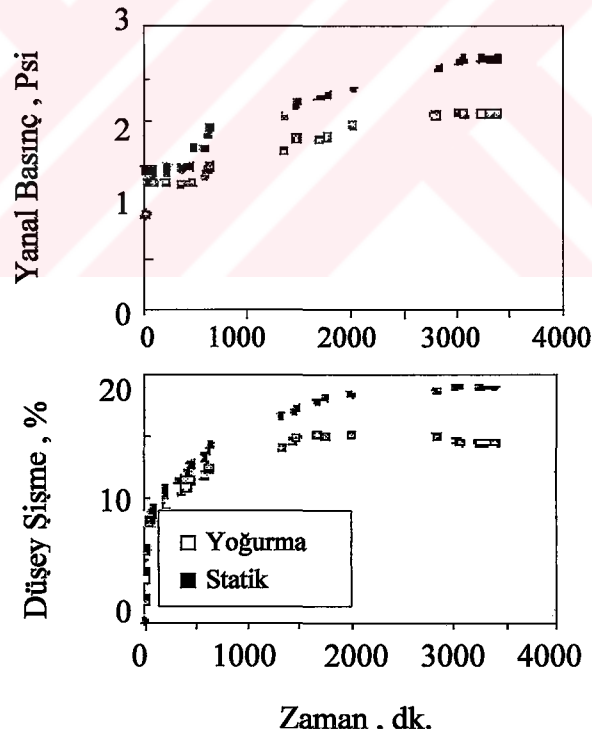
Edil, Alanazy (1992), Ofer (1980)'ın geliştirdiği düzeneğe benzer bir düzenek geliştirerek başlangıç su muhtevası, sürşarj yükü ve kompaksiyon yönteminin, şişme davranışı ve yanal şişme basıncı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçları da Şekil 55, 56 ve 57'de sunmuşlardır.

Erol, Ergun (1994), ince duvarlı ödometre halkasını kullanarak, laboratuarda sabit hacim şişme ve yüklenmiş şişme deneyleri ile, sıkıştırılmış şişen zeminlerin yatay ve düşey şişme basınçları arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Ayrıca çalışmalarında, başlangıç su muhtevası ve sürşarj yükünün şişme davranışlarına etkisini inceleyerek, yanal şişme basınçlarını da belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar;

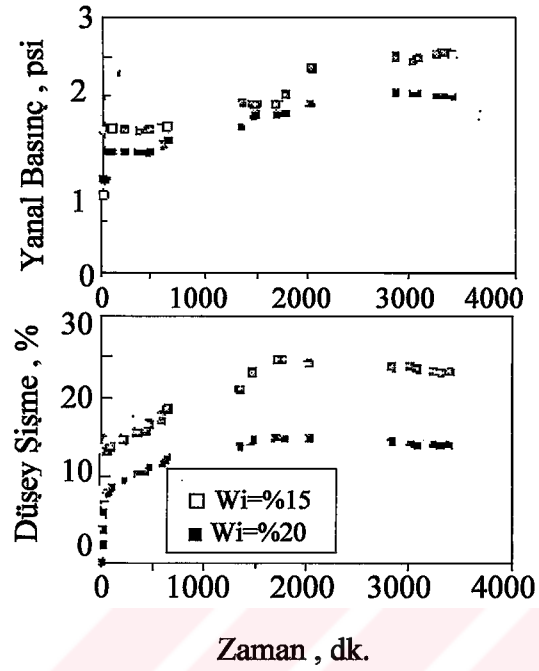


Şekil 54. Tipik bir birim hacim ağırlık-serbest şişme yüzdesi-yanal şişme basıncı ilişkisi (Ofer, 1980).

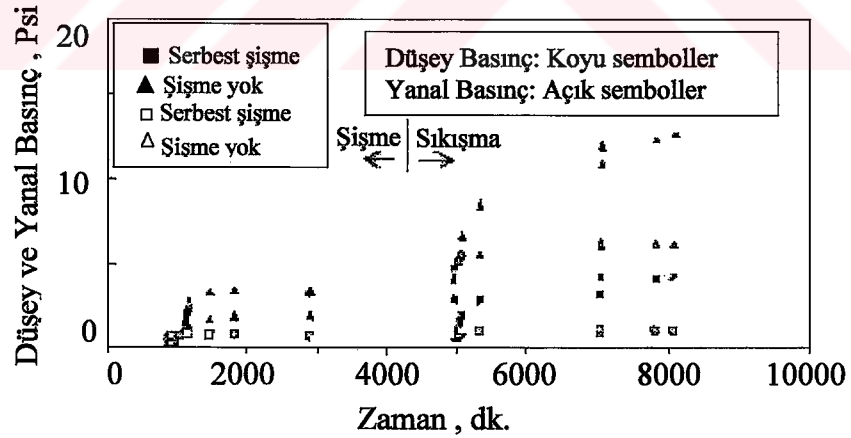
- Sabit hacim şişme deneyi ile bulunan, yanal şişme basınçları, düşey şişme basınçlarına eşit veya daha büyük olmaktadır. Şişme basıncı oranları, incelenen su muhtevası aralığında 1-1.55 arasında değişmektedir (Şekil 58).
- Hem yanal hem de düşey şişme basıncı değerleri, başlangıç su muhtevasının artması ile azalmaktadır.
- Yüklenmiş şişme deneyi ile bulunan yanal şişme basıncı, sürşarj yüküne bağlı olarak değişmektedir. Belirli killerde, düşük sürşarj basınçları için (100 kPa veya daha az) yanal basınçlar, maksimum değerine ulaştıktan sonra sert bir şekilde azalma göstermektedir. Yüksek sürşarj basınçları için, maksimum ve nihai yanal basınçlar arasındaki fark önemli değildir.
- Pratik uygulamalarda, yanal şişme basınçlarının hem maksimum hem de nihai değerlerinin, katman yükünden oluşan gerilmeye bağlı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.



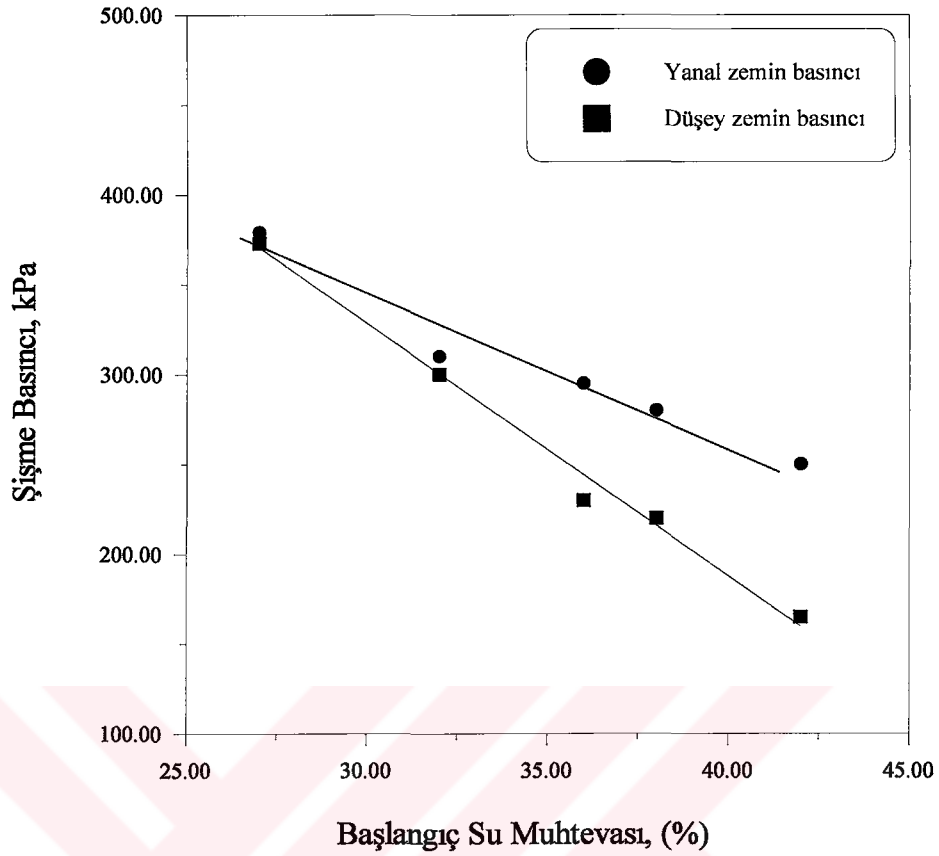
Şekil 55. Kompaksiyon yönteminin, yanal şişme basıncı ve düşey şişmeye etkisi (Bütün deneylerde, sürşarj yükü: 6.9 kPa ve başlangıç yüksekliği 25.4 mm.'dir)



Şekil 56. Zamanın, yanıl şişme basıncı ve düşey şişmeye etkisi (Bütün deneylerde, sürşarj yükü: 6.9 kPa ve başlangıç yüksekliği 25.4 mm.'dir)



Şekil 57. Sabit hacim yöntemi ile elde edilen, yanıl şişme basıncı davranışları (Edil, Alanazy, 1992).



Şekil 58. Sabit hacim deneyi ile bulunan şişme basıncı değerleri (Erol, Ergun, 1994).

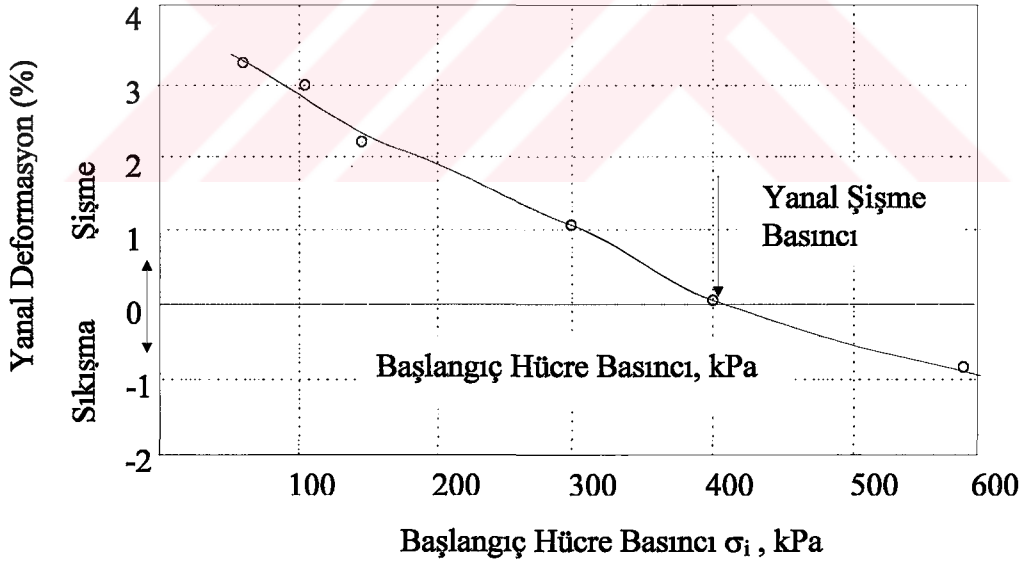
1.3.6.1.1.2. Değiştirilmiş Üç Eksenli Düzenek İle Yanal Basıncın Ölçülmesi

Bishop, Wesley (1975), tarafından gerilme izi deneyini kontrol etmek için tanımlanan özel hidrolik üç eksenli düzenek, hem düşey hem de radyal basınçların gerilme kontrollü yüklenmesine izin vermektedir. Bu düzenekte, üç eksenli hücreyi doldurduktan sonra numune, ıslatılmadan önce istenilen bir düşey toplam gerilme/yatay toplam gerilme oranı ile yüklenir. Deneylerde izotropik toplam gerilme şartları kullanılmıştır. Zemin numunesinin su alımı, alt ve üst yükleme levhaları ve düşey drenler vasıtasıyla sağlanmıştır. Gerçekte sürekli artan hücre basıncı prensibi vasıtasıyla benimsenen bu yöntemde, çaptaki artış yanıl uzama kemeri vasıtasıyla tespit edilmektedir. Bir alternatif yaklaşım denge boşluk oranı yöntemine dayanan bu yöntem, Sridharan vd. (1986) tarafından ilk olarak kullanılmış ve daha sonra Fourie (1988) tarafından geliştirilmiştir. Birbirinin benzeri olarak hazırlanmış bir numune dizisi hidrolik üç eksenli hücresinde

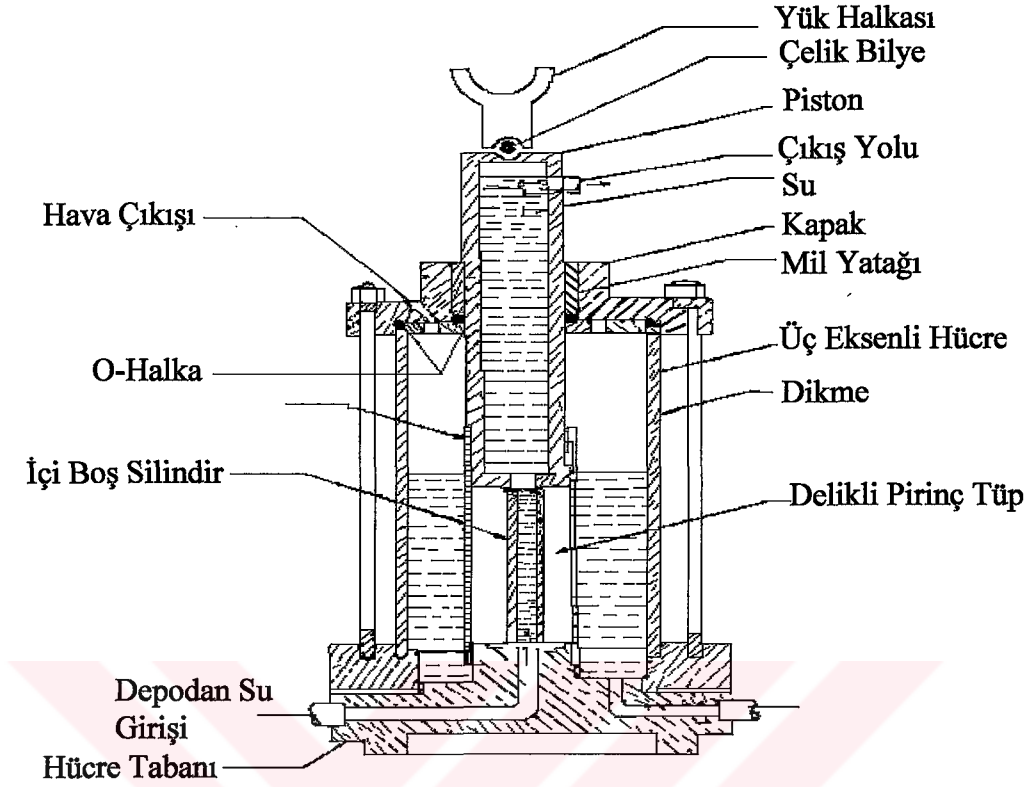
konulmuş ve değişik başlangıç hücre basınçlarına tabi tutulmuştur. Numuneye 50 kPa'lık iç basınç uygulanmış ve uygulanan bu basınçla birlikte dengeye ulaşıncaya kadar hacim değişimine müsaade edilmiştir. Birim uzama kemeri okumasının sabit bir değerde dengelendiği an, denge durumu olarak alınmıştır. Denge boşluk oranları metodu deney tekniği için değiştirilmiş üç eksenli düzeneğe kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 59'da verilmiştir.

Düşey eksen, birim uzama kemeri tarafından ölçülen nihai yanal birim uzamadır (ya şişme yada basınç). Eğrinin sıfır yanal birim uzama çizgisini (yatay eksen) kestiği nokta, sıfır yanal uzama durumunda ortaya çıkan yanal şişme basıncı olarak yorumlanmaktadır.

Dhawan vd. (1982), değiştirilmiş üç eksenli düzeneği kullanarak bir takım deneyler yapmışlardır (Şekil 60). Bu düzenekte, boşluklu silindirik siyah pamuk zeminler kullanmıştır. Deneyler, yanal şekil değiştirmesi engellenen değişik basınçlar için Hindistan'dan alınan, farklı birim hacim ağırlıkta ve optimum su muhtevsındaki numunelerle yapılarak, Şekil 61'de verilen sonuçları elde etmişlerdir.



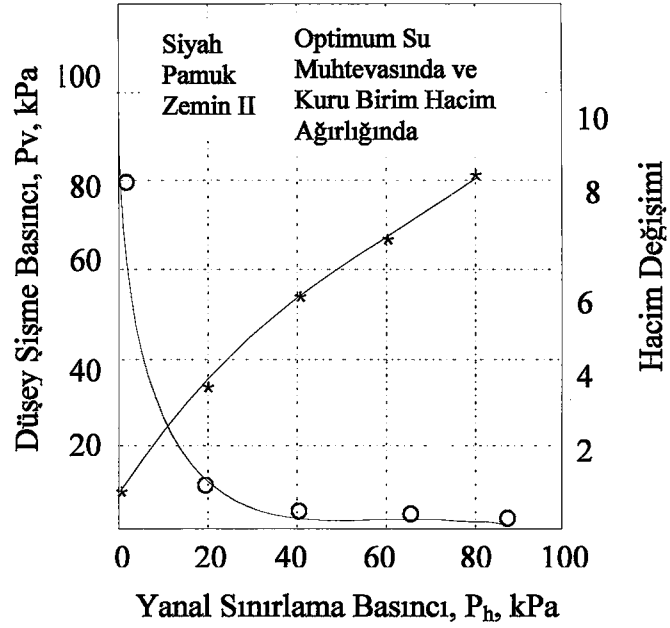
Şekil 59. Uygulanan başlangıç hücre basıncıyla, nihai yanal deformasyonun değişimi (Fourie, 1988).



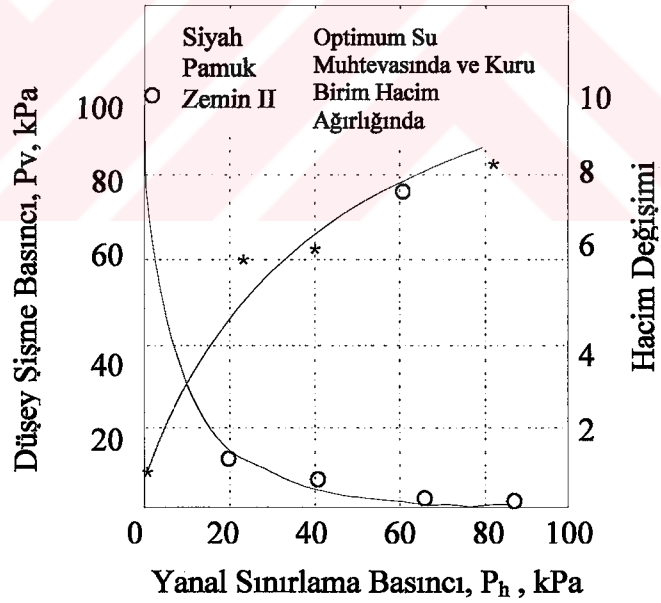
Şekil 60. Yanal ve düşey basınçların ölçülmesi için değiştirilmiş üç eksenli düzenek (Dhawan vd., 1982).

Keskin vd., (1991), Bolu kilindeki yanıl şişme basıncını araştırmak için, değiştirilmiş üç eksenli deneyler yapmışlardır. Başlangıçta, numunelerin şişmesine izin verilmiş ve izotropik gerilme şartları altında toplam şişme miktarları ölçülmüştür. Daha sonra, numunenin düşey doğrultudaki şişmesi engellenmiş ve hücre basıncı sabitken, farklı efektif gerilmelere neden olan iç basınçlar uygulanmıştır. Zamana bağlı olarak yanıl şişme basıncı, hücreye bağlanan bir basınç ölçer vasıtası ile kaydedilmiştir. Sonuç olarak izotropik gerilme şartları altında Bolu kilinin yanıl şişme basıncı tanımlanmıştır.

İkinci bir dizi deneyde, yanıl şişme basıncının miktarı farklı efektif gerilmeler altında, hücreye bağlanan kapalı bir büret sistemi vasıtasıyla ölçülmüştür. Anizotropik deneylerde uygulanan gerilmeleri bulmak için, sükunetteki zemin basıncı katsayısı K_0 tanımlanmıştır. Farklı efektif gerilmeler altında ve izotropik gerilme durumunda ölçülen yanıl şişme basıncının zamana bağlı olarak değişimi Şekil 62'de verilmiştir. Anizotropik gerilme şartlarında ve farklı efektif gerilmeler altında yanıl şişme basıncının zamana bağlı olarak değişimi de tespit edilerek Şekil 63'de verilmiştir.

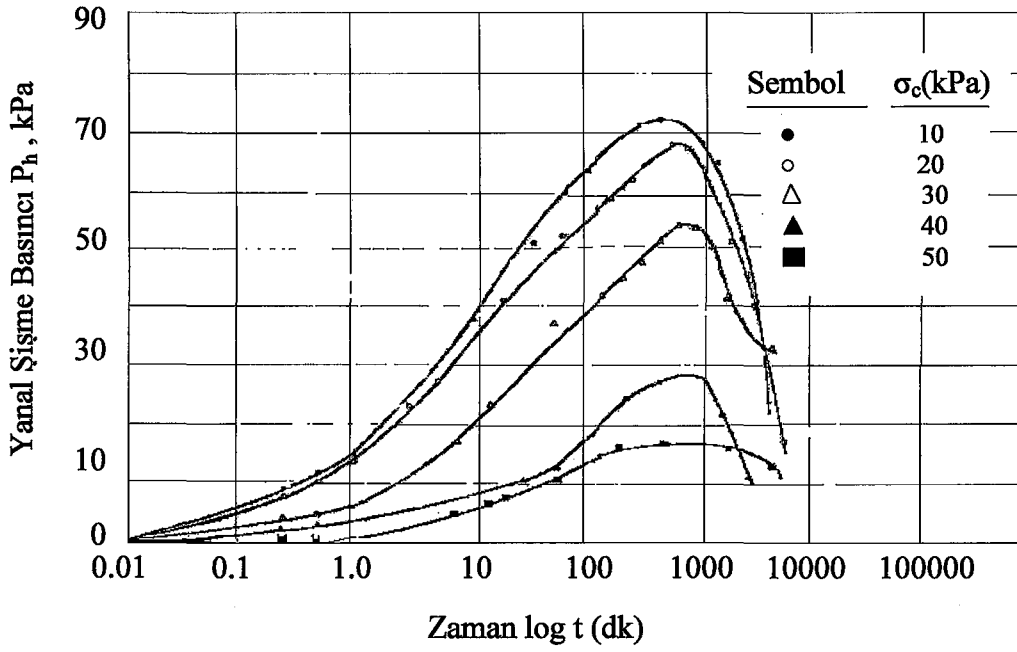


- * — * Yanal Sınırlama Basıncı-Düşey Şişme Basıncı
 o — o Yanal Sınırlama Basıncı-Hacim Değişimi

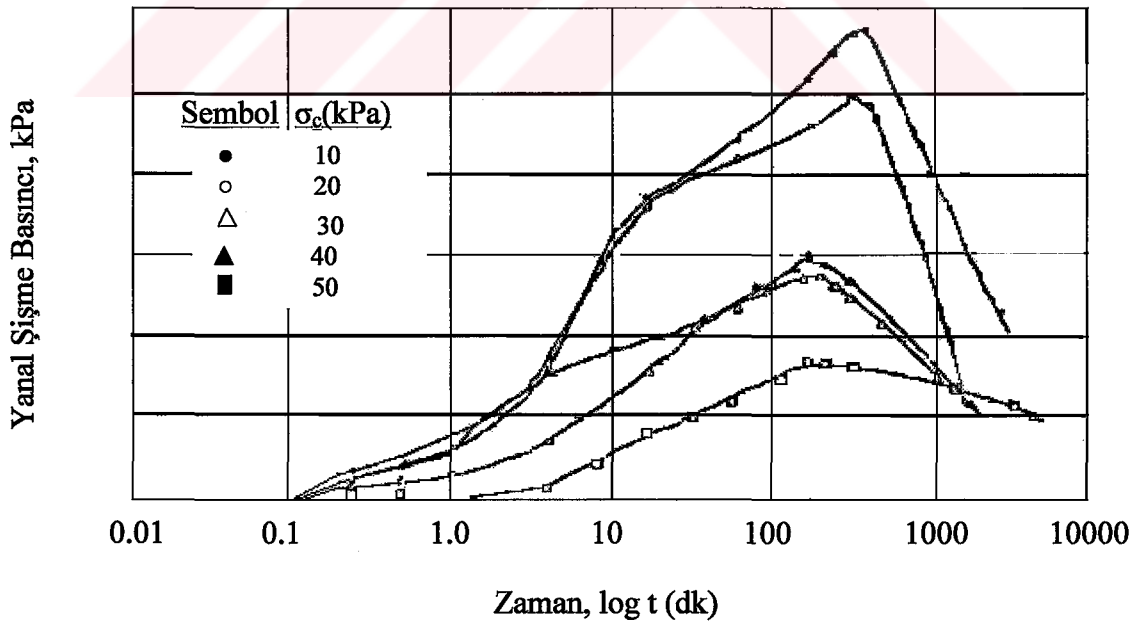


- * — * Yanal Sınırlama Basıncı-Düşey Şişme Basıncı
 o — o Yanal Sınırlama Basıncı-Hacim Değişimi

Şekil 61. Yanal sınırlama basıncının, hacim değişimi ve düşey şişme basıncı ile değişimi (Dhawan vd. 1982).



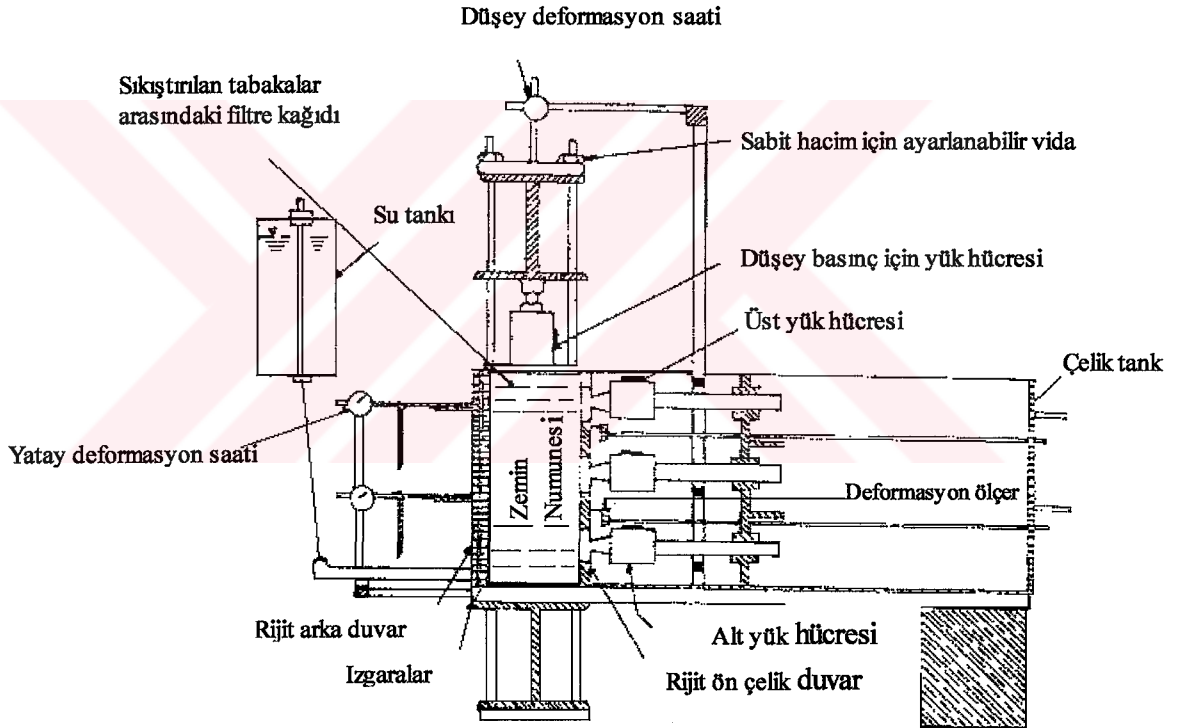
Şekil 62. Farklı efektif gerilmeler altında ve izotropik gerilme durumunda ölçülen yanal şişme basıncının zamana bağlı olarak değişimi (Keskin vd., 1992).



Şekil 63. Farklı efektif gerilmeler altında ve izotropik gerilme durumunda ölçülen yanal şişme basıncının zamana bağlı olarak değişimi (Keskin vd., 1992).

1.3.6.1.1.3. Laboratuvar Model Deneyleri İle Yanal Basıncın Ölçülmesi

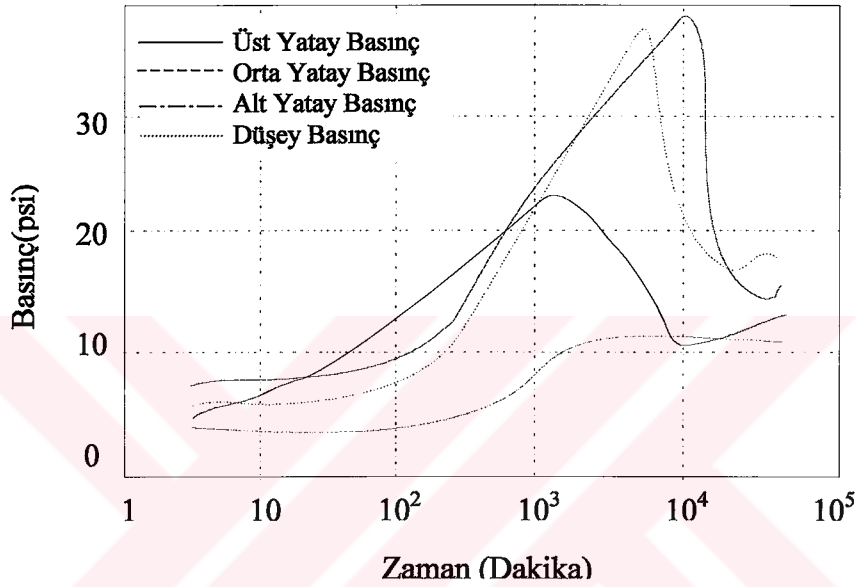
Chen, Huang (1987), rijit bir duvardaki yanal şişme basıncını belirlemek amacıyla, küçük ölçekli bir laboratuvar deney düzeneği geliştirmişlerdir (Şekil 64). Duvarın etrafını çeviren numune kutusu rijit olduğundan, zeminin şişmesi sırasındaki eğilmeler çok küçük olmaktadır. Amerika'nın Denver bölgesinden alınan kil numunesi, 1 inch'lik tabakalar halinde, maksimum birim hacim ağırlığında kutunun içinde sıkıştırılmıştır. Suyun tabakalar arasında kolay geçişini sağlamak için, sıkıştırılan bu tabakalar arasına filtre kağıdı yerleştirilmiştir.



Şekil 64. Yanal şişme basıncı ölçüm düzeneği (Chen, Huang, 1987).

Zemin, boyutları 15"x15"x12" olan kutuya, optimum su muhtevasından çok az daha düşük olan bir su muhtevasında yerleştirilmiştir. Numune 0.04 kPa başlangıç sürşarj yükü ile yüklendikten sonra, sabit hacminin korunması sağlanmıştır. Üç adet yük hücresi bu duvarın üst, orta ve alt kısmına yerleştirilmiştir. Ayarlanabilir bir plaka, vidalı bir düzenek

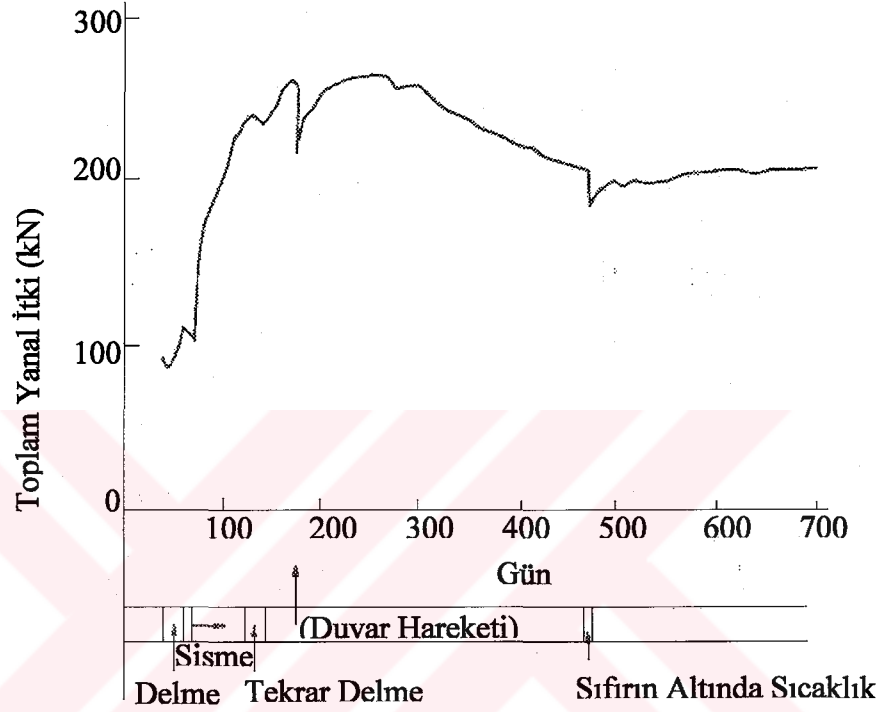
vasıtası ile numunenin üst kısmına yerleştirilmiştir. Diğer iki yük hücresi de, düşey şişme basıncını ölçmek amacı ile numunenin üst kısmına yerleştirilmiştir. Kutuda herhangi bir hareket olup olmadığı, yerleştirilen strenggeyç vasıtası ile tespit edilebilmektedir. Numuneye su girişi, numunenin arkasına yerleştirilen çelik bir ızgara plaka vasıtası ile sağlanmıştır. Bu deneyin sonuçları Şekil 65’de sunulmaktadır.



Şekil 65. Yanal ve düşey şişme basınçlarının zamanla değişimi (Chen, Huang, 1987).

Survey Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde, Symons vd. (1989) tarafından, kılavuz ölçekli dayanma duvarı, laboratuarda depo tipi büyük bir binaya yerleştirilmiştir. Üç aşamada gerçekleştirilen araştırmalarda, dolgu malzemesi olarak Londra kili kullanılmıştır. İlk aşamada kil dayanma duvarı içine yerleştirilerek, 3 m. derinlikte sıkıştırılmıştır. Doldurma işlemi bittikten sonra ölçülen toplam yanıl basınçların, hesaplanan aktif ve sükunet değerlerinden oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir. İkinci aşamada, 4 haftalık bir bekleme periyodu sırasında, her iki dayanma duvarındaki yanıl basınçlarda da önemli azalmalar ölçülmüştür. Son olarak üçüncü aşamada, 20 aylık şişme safhasında, kum drenleri yerleştirilmiş ve dolgunun yüzeyinde ki su seviyesinin sabit kalması sağlanmıştır. Her iki duvarda da, toplam yanıl basıncın ortalaması, şişme başladıktan sonra yaklaşık altı ay içinde hızla yükselerek maksimum değere ulaşmış, daha

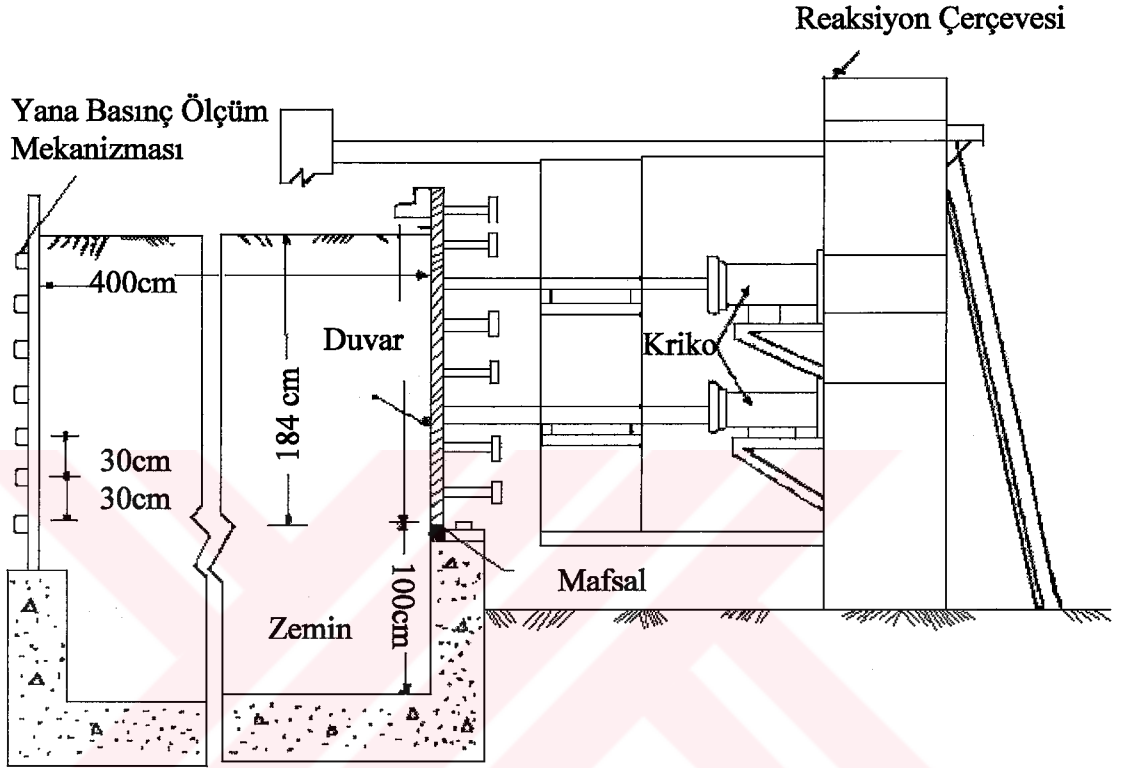
sonra da bunu takiben 7 aydan daha fazla bir sürede azalmıştır. Sonuçta da, çalışmalar tamamlanana kadar, değişmezliğini koruduğu sabit bir değere ulaşmıştır. 3. aşamada metal duvarın orta panelinde ki toplam yanıl itki Şekil 66'da gösterilmektedir.



Şekil 66. 3. aşamada metal duvarın orta panelinde ki toplam yanıl itki

Katti, Katti, (1987), Şekil 67'de görülen gerçek ölçekli deney düzeneğini kullanmıştır. Bu deney düzeneği, 4 m. boyunda 3.32 m. yüksekliğinde ve 1.10 m. genişliğindedir. Dönen duvarın boyutları da 2 m. yüksekliğinde ve 1.10 m. genişliğindedir. Bu duvar aynı zamanda tabanda dönme yeteneğine sahiptir. Gerilmenin ölçülebilmesi için, duvarın merkezine yakın bir yere alet yerleştirilmiştir. Ölçümlerde mekanik ve elektrik basınç hücreleri kullanılmıştır. Kuvvet uygulamak için mafsaldan, duvar yüksekliğinin 1/3 ve 2/3 mesafelerine iki küçük kontrollü kriko yerleştirilmiştir. Yer değiştirmeleri kontrol etmek için, yan tarafta bir seri civata ve üst kısımda da taşınabilir bir üst kiriş kullanılmıştır. Deney sırasında ön yüz zemine doğru itilirken, basınç hücreleri ile monte edilen rijit plaka da, basınçtaki değişiklikleri kaydetmek amacı ile arka tarafa yerleştirilmiştir. Deney aşamaları yanıl ölçüm aletinin ve krikoların kurulması, zeminin yerleştirilmesi,

kompaksiyon, doygunluk ve son olarak da okumalar kaydedilirken duvarın döndürülmesinden ibarettir. Şekil 68’de, üç farklı şişen kille yapılan gerçek ölçekli laboratuvar deneyinde, yanal şişme basıncının derinlikle değişimi gösterilmektedir.



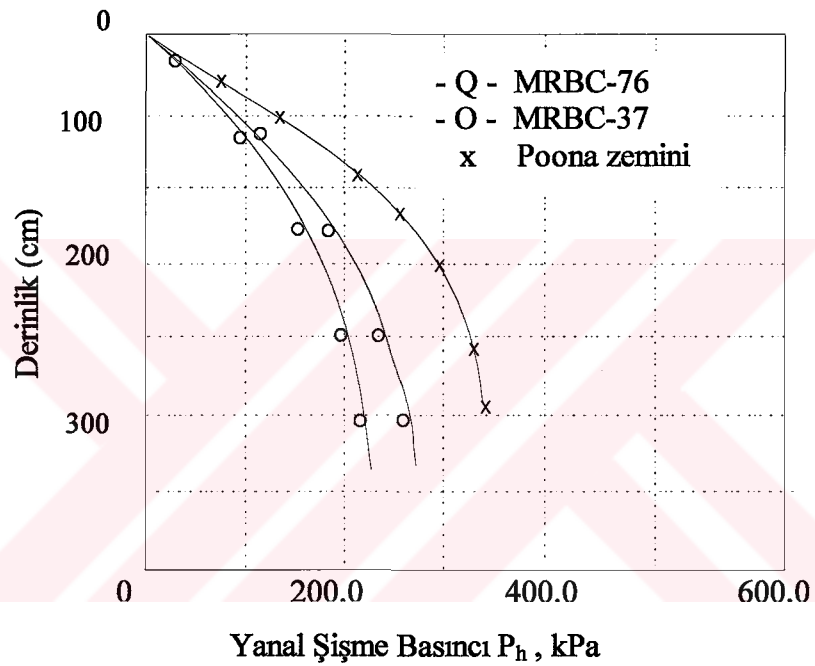
Şekil 67. Gerçek ölçekli deney düzeneği (Katti, Katti, 1987).

1.3.6.1.1.4. Arazi Deneyleri İle Yanal Basıncın Ölçülmesi

Ofer (1980), arazide oldukça küçük, ön sondaj deliğine girebilen kesici, ıslatma ve ölçüm modülü olmak üzere 3 ana modülden oluşan, bir yanal şişme basıncı sondası geliştirmiştir. Arazide geliştirilen bu şişme sondasının bir şeması Şekil 69’da görülmektedir.

Kesici modül, dış çapı 90 mm. olan boşluklu bir silindir ve çapı üstte 70 mm. den altta 89.7 mm’ye değişen konik içten ibarettir. Konik iç, en az 40 mm. koninin çevresindeki zeminin örselenmesini en aza indirmek için 7.1°’lik koniye sahiptir. Ölçüm birimi, dış çapı 90 mm., iç çapı 70 mm. olan boşluklu bir silindirden ibarettir. Su geçirmez deformasyon

ölçerler tam bir köprü düzeneğinde, yarık içindeki silindirin düşey kesitine yerleştirilmişlerdir. İki ıslatma halkası da ölçme biriminin sonuna yerleştirilmiştir. Her bir halka 10 mm. genişlik ve kum- epoksi reçine karışımı ile dolu olan 3mm. derinliğindeki yarıktan oluşmaktadır. Su, yüzeye yerleştirilmiş olan su haznesinden tedarik edilmektedir. Ölçüm birimi, bu birimi kuşatan hava geçirmez bir silindir ile kalibre edilmiştir. Hava basıncı, en dıştaki silindirde ortaya çıkmıştır ve ince duvarın şekil değiştirmeleri 0-600 kPa aralığında kaydedilmiştir.

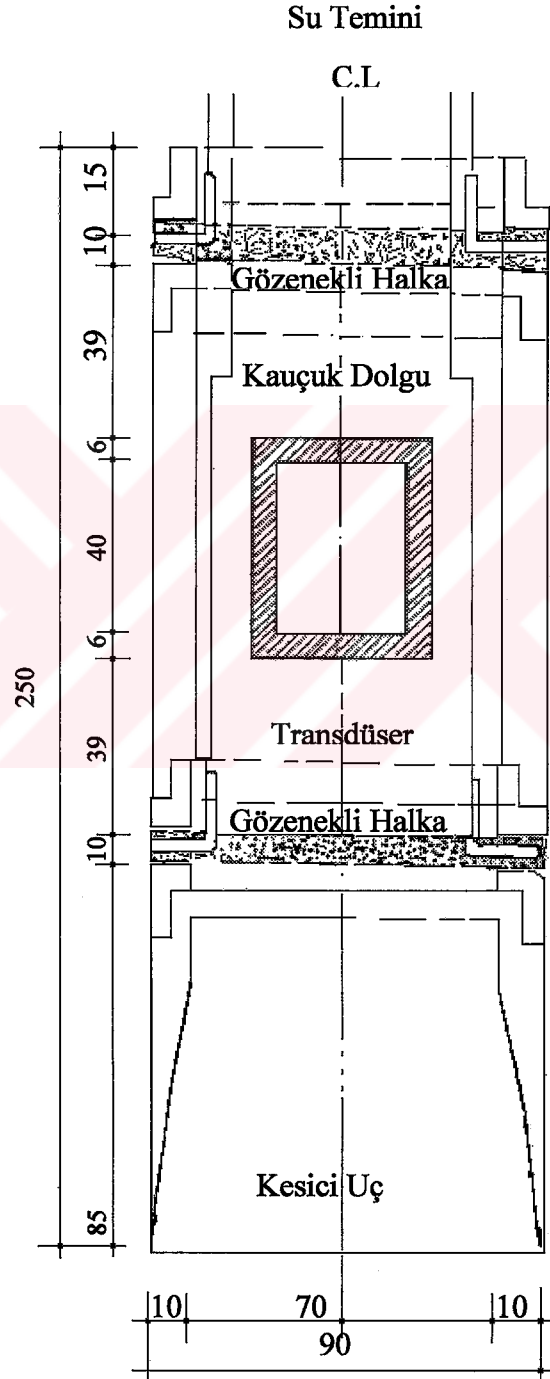


Şekil 68. Gerçek ölçekli deneyde yanıl basıncın, derinlikle değışimi (Katti, Katti, 1987).

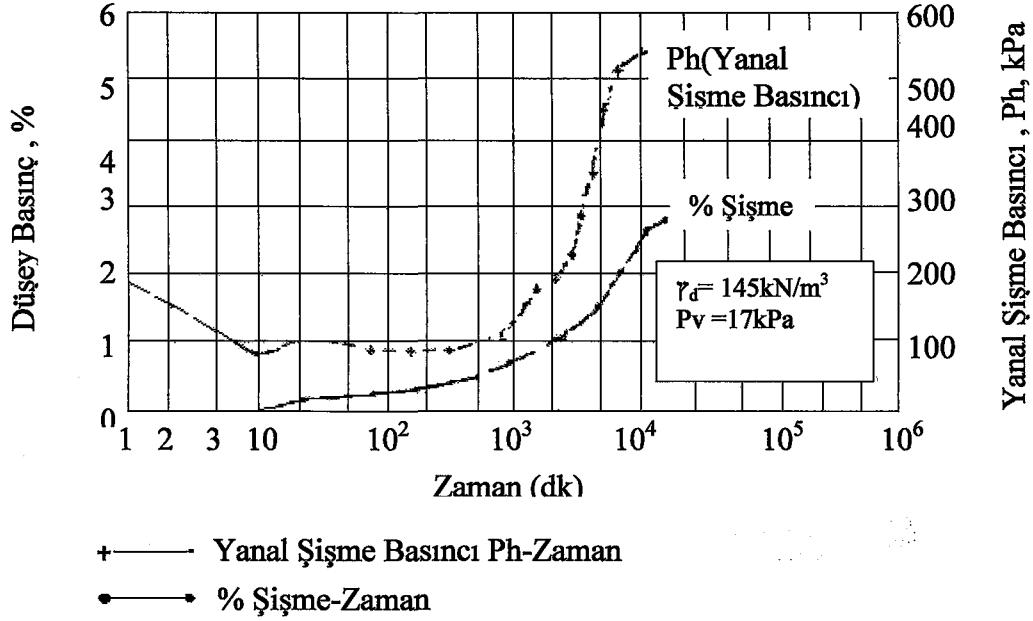
Arazideki yanıl basıncı ölçmek için, belli derinliklerde birtakım deneyler yapılmıştır. Yanıl şişme basıncı sondası 88 mm. çapında ön sondaj deliğine sokulmuştur. Kil, ıslatma halkaları vasıtasıyla suyla tanışmıştır. Dengeye ulaşınca kadar sonuç deformasyonlar kaydedilmiştir. Deney sırasındaki yüzde şişme ve yanıl şişme basıncı kaydedilmiş ve bunların zamanla ilişkileri Şekil 70'deki gibi çizilmiştir.

Ofer, Blight (1985), numunenin büyüklüğünün, yanıl yer değıştirmenin engellenme derecesinin ve numune sınırlarının kilin davranışları ve şişme özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda da arazi deneyleri

ile bulunan yanal şişme basıncının, laboratuarda bulunan yanal şişme basıncından daha düşük olduğunu, bu farkın da bu nedenlerden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak delik açma ve ilerleme yöntemlerinin arazideki yanal şişme basıncının ölçülmesi amacıyla uygun olması gerektiğine karar vermişlerdir.



Şekil 69. Yanal şişme basıncı sondası (Ofer, 1980).



Şekil 70. Arazi sondası ile bulunan yanal şişme basıncı ve düşey şişmenin zaman bağlı olarak değişimi (Ofer, 1980).

1.3.6.2. Yanal Şişme Basıncını Etkileyen Faktörler

Yanal basınçla ilgili olarak yapılan araştırmalar, yanal şişme basıncının başlangıç kuru birim hacim ağırlığından, doygunluk derecesinden, sürşarj yükünden ve derinlik faktöründen etkilendiğini göstermiştir.

1.3.6.2.1. Kuru Birim Hacim Ağırlığının Etkisi

Düşey yöndeki şişme, kuru birim hacim ağırlığının artmasıyla daha da artmaktadır. Chen (1975) ve Ofer (1980), hem yatay hem de düşey doğrultudaki şişme basıncının kuru birim hacim ağırlığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Sabit düşey sürşarj yükü altında yapılan deneylerde yanal şişme basıncının artmasıyla, birim hacim ağırlıkla birlikte düşey şişme basıncının da arttığı tespit edilmiştir.

1.3.6.2.2. Doğunluk Derecesinin Etkisi

Katti vd. (1969), yanal şişme basıncının su girişi ile birlikte arttığını daha sonra da maksimum değere ulaştığını belirtmiştir. Bu maksimum değerden sonra yanal şişme basıncı azalarak bir denge değerine ulaşır. Maksimum yanal şişme basıncı da zemin tamamen doğun olmadan önce oluşur.

1.3.6.2.3. Sürşarj Yükünün Etkisi

Joshi, Katti (1980) ve Ofer (1981), denge yanal şişme basıncının, başlangıç sürşarj yükünün artması ile hızlı bir şekilde arttığını göstermişlerdir. Büyük sürşarj yükleri altında yanal şişme basıncındaki artış daha da az olmaktadır. Düşük sürşarj yükü durumunda denge yanal basıncının düşey basınca oranı 10 gibi yüksek bir değere ulaşır ve bu oran sürşarj yükü arttından hızlı bir şekilde artar.

1.3.6.2.4. Derinlik Faktörünün Etkisi

Katti vd. (1984)'nin yaptığı gerçek ölçekteki deneylerde dengedeki yanal şişme basıncı, zemin yüzeyinde sıfırdan başlayıp 3.5 ft. derinliğinde sabit bir değere ulaşmaya kadar değişiklik göstermektedir. Bu derinlikten sonra sabit bir yanal şişme basıncı, zeminin ağırlığından kaynaklanan düşey şişme basıncına eşit olana kadar muhafaza edilir.

1.3.6.2.5. Kompaksiyon Yönteminin Etkisi

Edil, Alanazy (1992), laboratuarda yanal şişme basıncını ölçmek amacıyla geliştirdikleri düzenekte, kompaksiyon yönteminin yanal şişme basıncı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yoğurma yöntemi ile yapılan deneylerde bulunan yanal şişme basıncının, statik kompaksiyonla yapılan deneylerde bulunan yanal şişme basıncından daha küçük olduğunu göstermişlerdir.

1.3.7. Şişme Basınçlarının Azaltılması

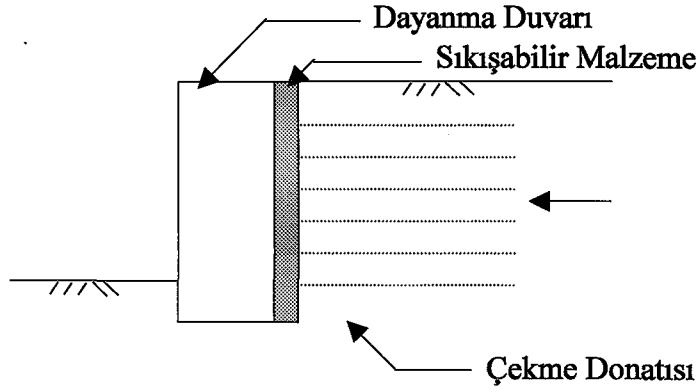
Zeminlerde ortaya çıkan ve yapılara aktarılan basınçlar yanıl ve düşey basınçlar olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Yapılara aktarılan yanıl basınç, duvar arkası dolgudan kaynaklanan yanıl zemin basıncı, zeminlerin şişmesi, deprem yükleri ve patlamalar sonucu ortaya çıkan basınçlardan, düşey basınçlar da zeminlerin düşey yöndeki şişmesinden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada, zeminlerde şişmeden kaynaklanan basınçlar incelendiğinden, şişme basınçlarının azaltılması konusu üzerinde durulacaktır.

Bilindiğı gibi hacim değışimine uğrayacak bir malzemenin, serbestçe davranması engellendiğinde çok büyük gerilmeler ortaya çıkmaktadır. Fakat hacim değışimine kısmen müsaade edildiğinde de, bu gerilmelerin değeri hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu nedenle yapılara gelen şişme basınçlarını azaltmak amacıyla, yapı ile zemin arasına, yatay ve düşey doğrultularda, değışik kalınlıklarda sıkışma kapasitesi yüksek olan bir malzeme kullanılması gerekmektedir.

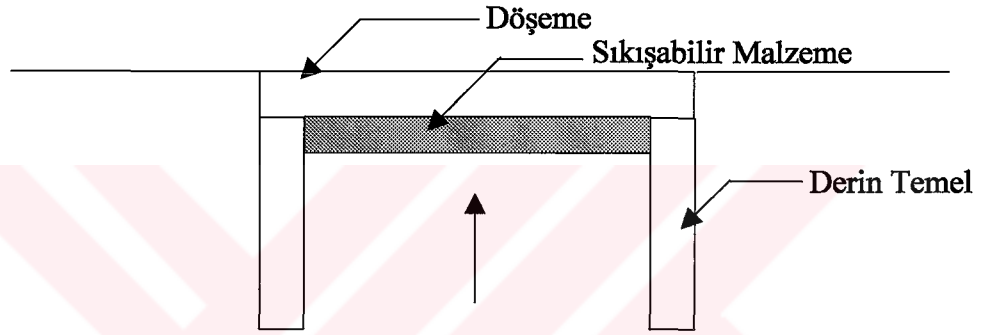
Geoteknik uygulamalarında, basınçları azaltmak amacıyla sıkışabilir bir malzemenin kullanımı eskilere dayanmaktadır. Bu malzemelerin geoteknik uygulamalarında kullanımı 3 kategoride incelenebilir.

- Dayanma duvarının arkasında (Şekil 71a),
- Temel elemanlarının altında (Şekil 71b),
- Boru, menfez ve tünellerin üstünde (Şekil 71c).

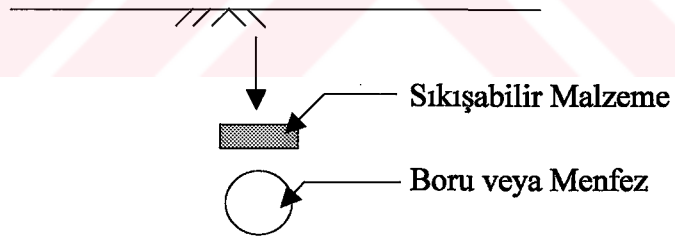
Şekil 71c’de görüldüğü gibi, 20. yüzyılın başlarından beri saman balyaları boruların üzerinde, düşey doğrultuda kemer gibi uzatılarak kullanılmaktaydı. Zemin dayanma yapılarında ise, Şekil 71a’da görüldüğü gibi cam elyafı yalıtımı ve mukavva kullanılmaktaydı. Buna ek olarak mukavvalar Şekil 71b’de gösterilen uygulamalarda da kullanılmaktaydı. Genellikle, bu malzemelerin gerilme-deformasyon davranışının tahmin ve kontrol edilemeyişi, karşılaşılan en önemli problemler arasında yer almaktadır. Ayrıca cam elyafının oldukça fazla sıkışma özelliğine, mukavva ve samanın da çevreye zarar vermeden toprakta çözünebilme özelliğine sahip olması bu malzemelerin avantajlı olmasını sağlamaktaydı. Fakat daha sonraları mukavva ve saman sınırlı bir boşlukta hapsedildiğinde, metan gazı oluşumundan dolayı tehlikeli olabilecek patlamalara neden olabileceğinden ve organik maddelerin bozulmasının da, kaplama zemininin çözülmesine ve yüzeyin çökmesine neden olacak olan bir boşluk oluşturacağından uygulamada kullanılmaktan vazgeçilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 71. Geoteknik uygulamalarında sıkışabilir malzemenin kullanımı (Horvarth, 1996).

Bütün bu dezavantajlar tasarımcıları, mühendislikte kullanılmak amacıyla başka bir malzemenin bulunmasına yöneltmiştir. Geofom da bu malzemelerden biri olmuş ve kullanımı sırasında yukarıda bahsedilen kusurların herhangi biriyle karşılaşılmadığından uygulamalarda kullanılır hale gelmiştir. Bir çok geofom malzemesi vardır. Uygun geofom malzemesinin seçimi, mühendislik özelliklerinin göz önünde bulundurulmasına, maliyet ve çevresel faktörlere bağlıdır. Sıkışabilirlik uygulamalarında, esas yer değiştirme

doğrultusunda, geofoamın rijitliği en önemli özelliktir. Rijitlik, geofoamın yüzeyine uygulanan gerilmenin, bu gerilmenin uygulandığı doğrultuya paralel doğrultuda oluşan, yüzey yer değiştirmesine oranından bulunmaktadır. Deneyimler sıkışabilirlik özelliği açısından en yararlı geofoam malzemesinin, genişleştirilmiş polistiren köpük (expanded polystyrene, EPS) olduğunu göstermiştir. EPS hem en ucuz geofoam malzemesi olma hem de diğer geofoam malzemelerinden daha düşük rijitlikte üretilebilme özelliğine sahiptir.

1.3.7.1. EPS (Genleştirilmiş Polistiren)

EPS, petrolden elde edilen, köpük halindeki, termoplastik, kapalı gözenekli, tipik olarak beyaz renkli, polistiren taneciklerinin şişirilmesi ve birbirine kaynaşması ile elde edilen bir malzemedir. EPS'in Horvath (1995) tarafından belirtilen bugünkü tanımı, kapalı gözenekli, gazla doldurulmuş hücrelerden oluşmuş ve bir genişleme işlemi süreciyle üretilmiş bir malzeme olduğu şeklindedir. Bu hücre duvarları, gazları geçirmesine rağmen katıdır.

EPS, Polistiren daneciklerinin şişirilmesi ve birbirine kaynaşması ile elde edilmektedir. Bu aşamada, daneciklerin şişirilmesi ve köpük elde edilmesi amacıyla kullanılan şişirici gaz pentan, danecikler içinde çok sayıda küçük gözeneklerin oluşmasını sağladıktan sonra, üretimi takiben ve üretim sırasında çok kısa bir sürede hava ile yer değiştirmektedir. Bunun sonucu olarak da durgun hava, levhaların bünyesinde bulunan çok sayıda küçük kapalı gözenekli hücreler içinde hapsolmektedir. Bu nedenle malzemenin % 98'i hareketsiz ve kuru hava, %2'si de polistirenden ibarettir.

1.3.7.1.1. EPS'in Mühendislik Uygulamalarında Kullanımı

1950'li yıllarda Almanya'da BASF firması tarafından geliştirilen EPS, yoğunluk, sıkışabilirlik ve ısı mukavemet gibi önemli özellikleri sayesinde, hafif yapı malzemesi olarak mühendislik problemlerinin çözümünde önemli rol oynamıştır. EPS'in en yararlı özelliklerinden biri de çok geniş bir birim hacim ağırlık aralığında üretilebilmesidir. Bu özellikler oturma, şev stabilitesi ve taşıma kapasitesi problemleri gibi bir çok problemim çözümlerine imkan tanımaktadır. Çoğu kez bu tür problemlerin çözümünde, geleneksel geoteknik çözümler ekonomik olarak uygun olmamaktadır. Tablo 24, EPS'in bazı mühendislik uygulamalarını göstermektedir.

Tablo 24. EPS uygulamaları (Elragi, 2000).

Uygulamalar	Yoğunluk	Sıkışabilirlik	Sönümlenme	Yalıtım	Kohezyon
Şev stabilitesi	x		x		x
Dolgular	x		x	x	x
Köprü yaklaşım yolları	x		x	x	x
Zemin dayanma yapıları	x	x	x	x	x
Köprü kenar ayakları	x	x	x		x
Gömülü borular		x	x	x	
Taşkın kontrol koruma seddesi	x				x
Doğa mimarisi	x				x
Bodrum izolasyonu				x	
Demiryolları			x		x

Fazlasıyla hafif, kapalı gözenekli, rijit ve plastik köpük olan EPS, şu anda dünyanın bir çok yerinde başarılı olarak kullanılmaktadır (Norveç, Hollanda, Amerika, Japonya, Almanya ve Malezya). Norveç'te ilk yol yalıtım projesi 1965'de (Aaboe, 2000), ilk yol dolgusu projesi de 1972'de tamamlanmıştır (Frydenlund, 1991). Amerika'da EPS kullanımı çoğu ülkelerden daha önce başlamasına rağmen, sonraki süreç yavaş olmuştur. Fakat son zamanlarda, bir çok uygulamada kullanılmaya başlanmıştır. Japonya'da ilk uygulama 1985 yılında, EPS'in dolgularda kullanılmasıyla yapılmıştır (Miki, 1996). Bu uygulamada 15 m. yüksekliğinde EPS dolgusu yapılmıştır (Yamanaka vd., 1996). Almanya'da ilk kullanım, kaplamaları donmaktan koruma tabakaları olarak, 1960'lı yıllarda olmasına rağmen, ilk kez Mart 1995'de (Hillmann, 1996) karayolu yapımında, köprü yaklaşım yolunun farklı oturmalarını en aza indirmek amacıyla kullanılmıştır. Hafif dolgu malzemesi olarak EPS Malezya'da ilk kez, 1992'de kullanılmıştır (Mohamad, 1996).

EPS, geoteknik mühendisliği arazi uygulamalarında dayanma duvarının arkasındaki dolgularda, yanal zemin basıncını azaltmak amacı ile kullanılmaktadır. Dolgu yapımında

kullanıldığında da oturmaları azaltmaktadır. Köprü yaklaşım yolu dolgularında EPS kullanılması, köprü döşemesi ile yaklaşım yolu dolguları arasındaki farklı oturmaları azaltacağından, oturmaların azalmasını sağlamaktadır. Şev stabilitelerinde EPS kullanımı, doğal şev eğiminin muhafaza edilmesini, arazideki çevresel zararların azalmasını ve şevin güvenlik sayısının artmasını sağlamaktadır. Ayrıca EPS kullanımı, sismik yüklerin neden olduğu basınçlarında azalmasını sağlamaktadır. Sıkışabilirlik özelliği ile zemin etkileşim problemlerinde de kullanılabilir.

Zemin dayanma yapılarında, EPS'in sıkışabilirlik özelliğinin kullanılması bir çok faydalar sağlamaktadır.

- Yanal zemin basıncının azalmasına neden olmaktadır.
- Zemin içerisindeki fiziksel değişiklikler hacim değişimine neden olmaktadır (şişen zemin, donan zemin ve su emme, mineral değişimi ve tektonik gerilmelerin yarattığı şişen kayalar). Sıkışabilirlik özelliği de, zeminin hacim değişimine yer sağlamaktadır. Dayanma yapılarının yanında, bu tür malzemelerin bulunması durumunda, şişen zemin veya kayalar tarafından oluşturulan yanal basınç çok önemli olabilir. Dayanma yapıları ile zemin arasında sıkışabilir bir malzemenin kullanılması yapıya gerilmenin çok az bir miktarının iletilmesini sağlarken, zemin veya kayanın hacim değişimine imkan sağlamaktadır. Dünya çapında bu tür zeminler geniş miktarda oluşum alanına sahip olduğunda, bu malzemenin kullanılmasının şişen zeminlerin oluşturduğu yanal basıncı azaltması çok önemlidir. Dizayn aşamasında bu zeminlerin etkisinin ihmal edilmesi, bir çok alanda önemli mali hasarların oluşmasına neden olmaktadır.
- Yanal zemin basıncı dışındaki dış faktörlerin oluşturduğu zemin dayanma yapısının, yanal doğrultuda ki hareketine yer teşkil etmektedir.
- Oturmaların azalmasını sağlamaktadır. Şimdiye kadar yapılan uygulamalarda yatay yönde sıkışabilir bir malzemenin kullanılması konusu çok tartışılmıştır. Fakat son araştırmalar göstermiştir ki, Şekil 71a' da gösterildiği gibi sıkışabilir bir malzemeye ilave olarak çekme donatısının kullanılması, dayanma duvarının arkasındaki dolgunun oturmasının azalmasını sağlamaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR ve BULGULAR

Düşük su muhtevasına sahip olan şişen zeminlerin, üzerlerindeki basıncın azalması ve su muhtevalarının değişimi sonucu meydana gelen hacim değişikliği, zeminlerin şişme özelliği olarak tanımlanmaktadır. Bu tip zeminlerin hacim artışının engellenmesi sonucunda üzerlerindeki yapılara aşırı basınç uygulamaları, şişme davranışlarının incelenmesine neden olmuştur. Zeminlerin şişmesi genellikle şişme potansiyeli olarak tanımlanan şişme yüzdesi ve şişme basıncı olarak iki parametre ile ifade edilmektedir. Şişmenin üst yapıda meydana getireceği hasarların önceden belirlenmesi ve gerekli mühendislik önlemleri alınarak oluşacak hasarların minimuma indirilmesi içinde bu iki parametrenin önceden belirlenmesi gerekmektedir.

Şişme olayı bugüne kadar bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Fakat bu çalışmaların çoğunda, şişme basıncı ve şişme miktarının önceden tahmininde, düşey doğrultudaki şişmenin dikkate alındığı ödometrik yöntemler kullanılmış, düşey deformasyonun önlenmesi ile ölçülecek olan yanal şişme davranışı dikkate alınmamıştır.

Zeminlerde şişme davranışının önceden belirlenebilmesi için çeşitli laboratuvar ve arazi deney sistemleri geliştirilmiştir. Yapılan çalışmaların çoğunda ise sadece düşey doğrultudaki şişmenin dikkate alındığı ödometrik yöntemler kullanılmıştır (Chen, 1975). Buna rağmen, şişen zeminlerde, yanal şişme basınçlarının ihmal edilemeyecek boyutlarda olduğu hatta, bunun bazen düşey yöndeki şişmenin 2-3 katına çıktığı belirtilmiştir (Fourie, 1989), (Erol, Ergun, 1994). Ayrıca yanal ve düşey şişme davranışları arasında farklılıklar olduğundan, bu zeminler içerisinden geçen boru hatlarında da büyük hasarlar olabileceği belirtilmiştir (Kassiff, Zeitlen, 1962). Bununla birlikte şişen zeminler önüne inşa edilen istinat yapıları için de yanal şişme basıncı ve potansiyeli oldukça önemli bir problem teşkil etmektedir.

Bu çalışmada problemin daha iyi anlaşılması ve çözümlenmesi için, dayanma yapılarına aktarılan yanal ve düşey şişme basınçlarının ölçülmesi ve EPS kullanılarak azaltılması amacıyla laboratuvar ortamında kontrol edilebilen ve arazideki şartları en iyi şekilde yansıtan deneysel modeller geliştirilerek çalışmalar bu modeller üzerinde yapılmıştır.

2.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Bu çalışmada, dayanma yapılarına aktarılan şişme basınçlarını ölçmek amacı ile, Gümüşhane ili, Şiran ilçesinin Mertekli köyünden alınan Şiran-2 kili, Karakaya Bentonit Firmasından temin edilen bentonit, Şiran-2 kiline % 48 oranında bentonit katkısı ile hazırlanan karışık zemin, kohezyonlu şişmeyen zemin ve 12 kg/m³ yoğunluğundaki EPS kullanılmıştır.

2.1.1. Şiran-2 Kili

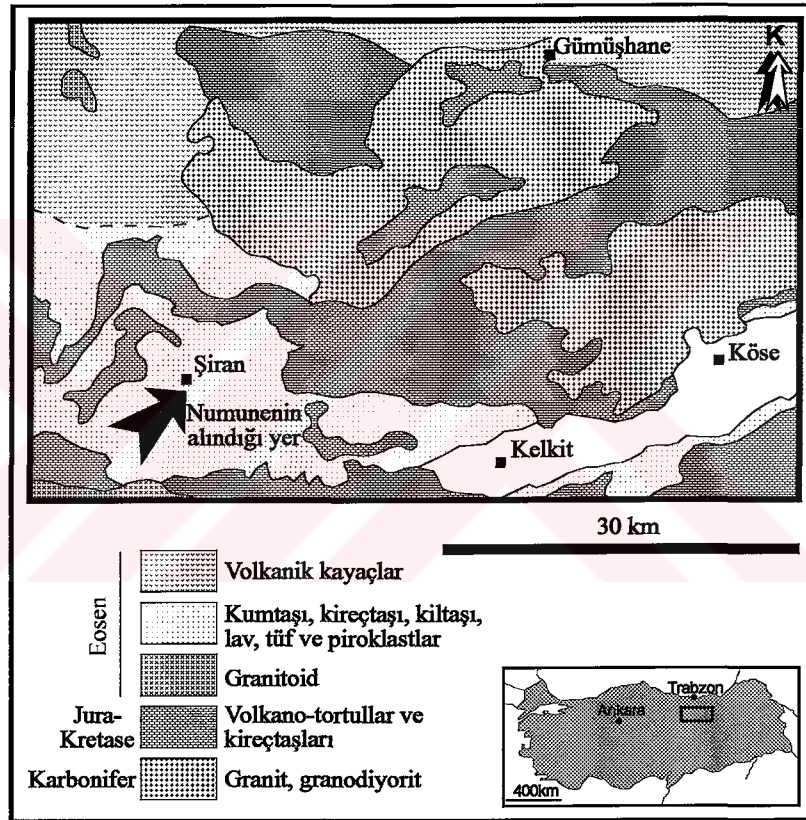
Şiran-2 kilinin alındığı yörenin jeolojisi, bu kilin mineralojisi, fiziksel ve plastisite özellikleri, dane dağılımı, kompaksiyon, geçirimsizlik, dayanım ve şişme özellikleri laboratuarda ve arazide yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir.

2.1.1.1. Şiran Yöresinin Jeolojisi

Şiran ve yakın çevresi kuzeydoğu Türkiye'nin iç kesiminde, Türkiye'nin ana tektonik birliklerinden biri olan Pontidler (Ketin, 1966)'de yer almaktadır. Pontidler, Bektaş vd. (1995, 1999) tarafından yapılan çalışmalarla, sunmuş oldukları sedimantolojik, tektonik ve magmatik farklılıklara bağlı olarak; "Kuzey Zon", "Güney Zon" ve "Eksen Zonu" olmak üzere üç ana alt birliğe ayrılmıştır. Bu çalışmanın gerçekleştirildiği saha Doğu Pontidler' in Güney Zonunda yer almaktadır.

Örnek alınan saha ve yakın yöresinin jeolojisi ve stratigrafisi şu şekildedir; Doğu Pontidler' in güney zonunda en yaşlı birimleri Paleozoyik yaşlı, metamorfik kayalar ve bunları kesen granitoidik kayalar oluşturur. Bu temel üzerine Jura-Kretase yaşlı kayalar gelmektedir. Bu birimler tabanda alttaki temel üzerine uyumsuz olarak oturmaktadır ve genel özellikleriyle volkano-tortul karakteristiklere sahiptirler. Bu birim üzerine uyumlu olarak gelen kireçtaşları bulunmaktadır. Jura-Kretase yaşlı birimlerin en üst seviyesi derin deniz ortamında çökelmiş türbiditik çökellerden ve resifal kireçtaşı mercekleri içeren kumtaşları tarafından aşılmalı uyumsuzlukla üzerlenmektedir. Bu birimler üzerine uyumsuz olarak Alt Eosen yaşlı içerisinde yer yer kireçtaşı blokları içeren sedimanter bir karışık yer almaktadır. Eosen yaşlı birimler inceleme alanında çok farklı litolojilere sahiptir ve farklı

adlarla tanımlanmışlardır. Çalışmanın konusunu oluşturan killler, Gürsoy (1989) tarafından Özen Formasyonu olarak adlandırılan birim içerisinde yer almaktadır. Birim ilk defa Gürsoy (1989) tarafından Kelkit' in Özen Köyü ve civarında yüzeylendiği için bu adla tanımlanmıştır. Özen Formasyonu kirli sarı, gri-açık yeşil renkli ince tabakalanmalı yer yer kömür mercekleri içeren çok ince jips ara bantlı kumtaşı-silttaşı-kiltaşı-marn-şeyl ardalanmasından oluşmaktadır. Birimin yaşı Gürsoy (1989) tarafından Orta-Geç Lütésiyan olarak belirlenmiştir.



Şekil 72. Şiran yöresinin jeolojik haritası ve örnek alım yeri (Okay, Şahintürk, 1997).

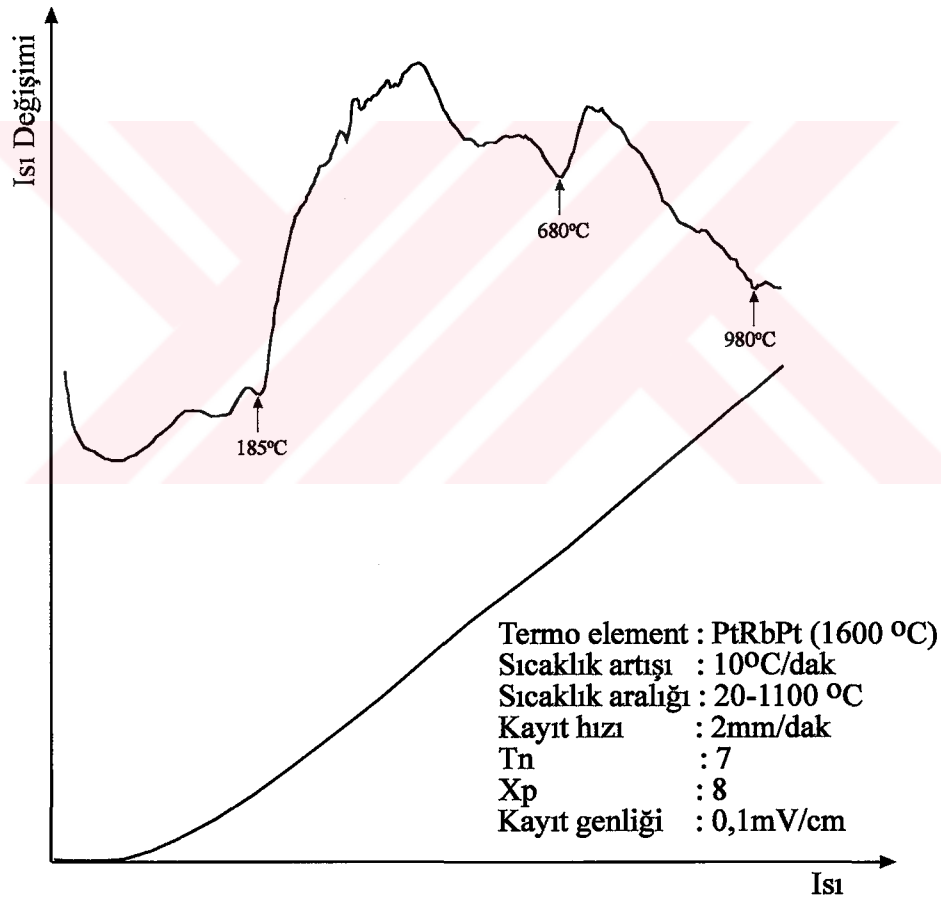
2.1.1.2. Mineralojik Özellikler

Şiran-2 kilinin mineralojik özelliklerini belirlemek amacı ile, diferansiyel termal analiz, X ışını analizi ve kimyasal analizi yapılmıştır.

2.1.1.2.1. Diferansiyel Termal Analiz

Yüzdürme yöntemi uygulanarak etüve koyulan malzeme, kurutulduktan sonra dövülüp toz haline getirilmiştir. İnert madde, platin veya porselenden yapılan özel kaplar içerisine, Şiran-2 kili de termokapılların (platin-iridyum) üzerine yerleştirilerek, 1000-1600 °C'ye kadar ısıtılmış daha sonra da oluşan bu ısıyla alet tarafından çizilen eğri üzerinde pikler belirlenmiştir (Şekil 73).

Sonuç olarak ısı cetvelin yardımıyla mineralin montmorillonit ve vermikülitten oluştuğu tespit edilmiştir.

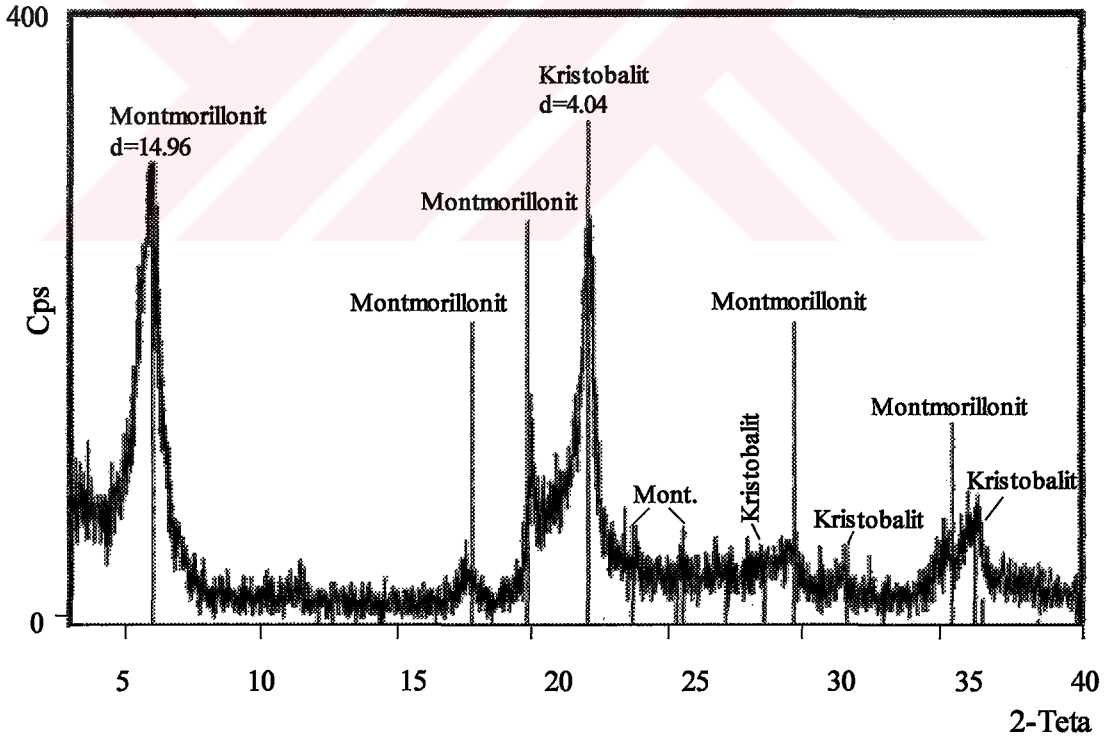


Şekil 73. Şiran-2 kilinin diferansiyel termal analiz sonucu

2.1.1.2.2. X Işını Analizi

Bu analizde öncelikle toz haline getirilen numune cam plaka üzerine koyulmuş daha sonra da X ışınları sabit bir kaynaktan gelecek şekilde ayarlanarak zemin, X ışınları aletinin örnek yuvasına yerleştirilmiştir. Sabit bir hızla döndürülen numunede dönme sırasında X ışınının açısı, herhangi bir atomik düzlemde (2) denklemde verilen Bragg eşitliğini verene kadar, kaydedici sadece temel X ışınlarını kaydetmektedir.

Numunenin sürekli dönmesinden dolayı değişik zamanlarda grafik kağıdında oluşan pikler, X ışınının şiddetinin yükseldiği yani Bragg eşitliğinin sağlandığı anı temsil etmektedir. Numunenin sürekli dönmesiyle değişik zamanlarda oluşan piklerin 2θ açıları okunarak, Bragg eşitliği hesaplanmış ($n=1$), daha sonrada eldeki d_1 mesafelerine göre hazırlanmış "sigma-plot" bilgisayar programından zemin cinsi belirlenmiştir. Bu analiz sonucunda ana mineralin montmorillonit olduğu tespit edilmiştir (Şekil 74).



Şekil 74. Şiran-2 kilinin X ışını analiz sonucu

Parajenez : Montmorillonit + Kristobalit

2.1.1.2.3. Kimyasal Analiz

Toz haline getirilen Şiran-2 kili, MTA Ankara Genel Müdürlüğüne gönderilerek kimyasal analiz yaptırılmış ve Tablo 25'de sunulan sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan kimyasal analiz sonucunda elde edilen montmorillonitin kimyasal formülü $(Ca_{0.15} K_{0.03} Na_{0.05})_{0.23} (Al_{0.93} Mg_{0.19} Fe_{0.04})_{1.16} (Si_{4.58}) O_{10} (OH)_2$ olarak bulunmuştur.

Şiran-2 kilinin mineralojik özelliklerini belirlemek amacı ile yapılan diferansiyel termal analiz, X ışını analizi ve kimyasal analiz sonucunda mineralin Ca-Smektit olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 25. Şiran-2 kilinin kimyasal analiz sonuçları

Oksitler	% Miktar	11 oksijene göre hesaplama	
SiO ₂	71.85	Si ⁺⁴	4.58
Al ₂ O ₃	12.35	T.Y. ¹	2.32
Fe ₂ O ₃	0.90	Al ⁺³	0.93
CaO	2.25	Fe ⁺³	0.04
MgO	2.00	Mg ⁺²	0.19
K ₂ O	0.65	O.Y. ²	-2.71
Na ₂ O	0.25	T.T.Y. ³	-0.39
Kızdırmazlık kaybı	7.30	Ca ⁺²	0.15
		K ⁺	0.03
		Na ⁺	0.05
		T.Y.Y. ⁴	0.38

¹T.Y.: Tetrahedral yük

²O.Y.: Oktahedral yük

³T.T.Y.: Toplam tabaka yükü

⁴T.Y.Y.: Toplam yapraklar arası yük

2.1.1.3 Temel Özellikler

Zeminin fiziksel özelliklerini belirlemek amacı ile öncelikle araziden alınan örselenmiş numuneler üzerinde su taşıma yöntemiyle doğal birim hacim ağırlığı, piknometre yöntemi ile dane birim hacim ağırlığı, doğal su muhtevası tespit edilmiş ve zeminimize ait diğer fiziksel özellikler belirlenmiştir (Tablo 26).

Tablo 26. Zeminin fiziksel özellikleri

Doğal birim hacim ağırlık (γ_n , kN/m ³)	19.2
Dane birim hacim ağırlık (γ_s , kN/m ³)	24.5
Doğal su muhtevası (W_n , %)	43.05
Doygunluk derecesi (S_r)	1.278

Doygunluk derecesi (S_r), doymuş zeminlerde 1, kuru zeminlerde 0'dır. Yani S_r , şişme özelliğine sahip olmayan zeminlerde 0-1 arasında değişen bir değere sahiptir. Şişme özelliğine sahip olan bu zeminde doymuşluk derecesi değerinin birden büyük çıkmasının nedeni, normal zeminlerde boşluk hacminin sabit olması, buna karşın şişen zeminlerde zeminin doymuş duruma gelişiyle boşluk hacminin artmasıdır. Eğer bu artış dikkate alınıp boşluk hacmine eklenirse, S_r bire eşitlenecektir.

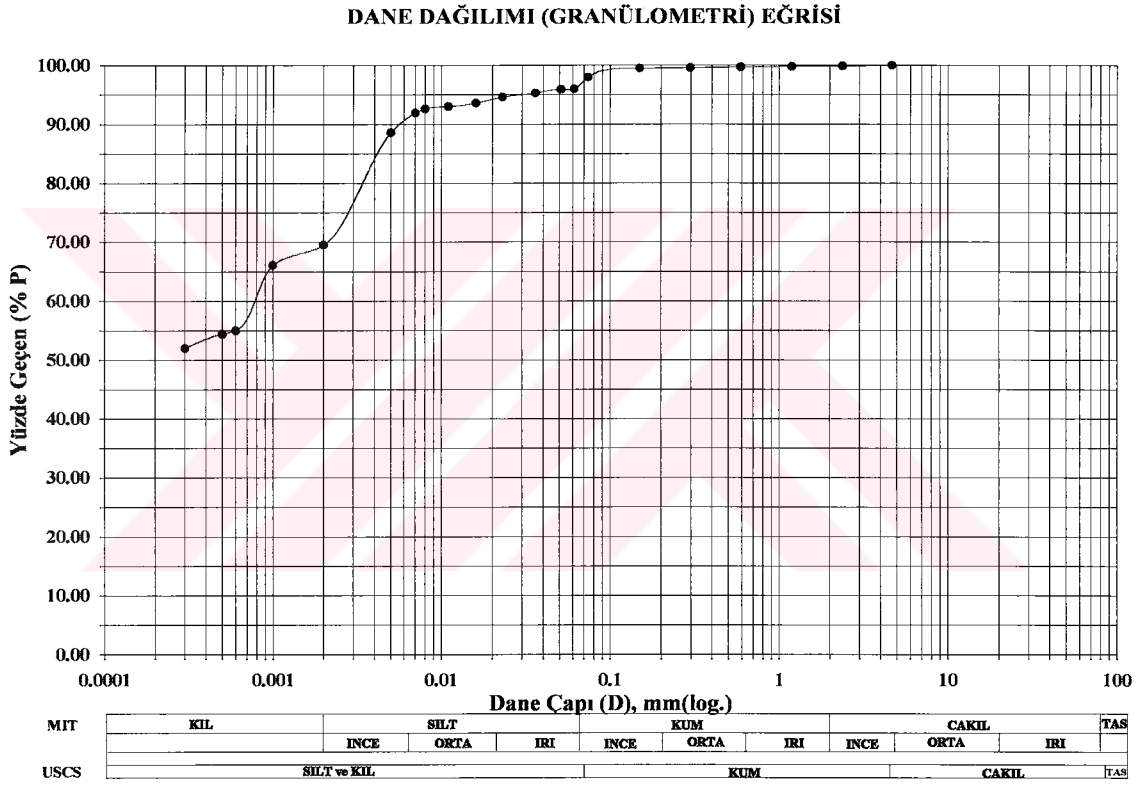
2.1.1.3.1. Kıvam Limitleri

Kohezyonlu zeminler su muhtevalarındaki değişime bağlı olarak değişik davranışlar göstermektedirler. Atterberg (1911), bu durumları ayıran su muhtevalarını tanımlamış ve kıvam limitleri olarak adlandırmıştır. Şiran-2 kilinin likit limiti %106.5, plastik limiti ise %57 olarak tespit edilmiştir. Lineer büzülme değeri de % 22.03 olarak bulunmuştur.

Şiran-2 kili yüksek plastisiteli olup, plastisite indisi %49.5, likitlik indisi -0.28 ve kıvam indisi de 1.28'dir.

2.1.1.3.2. Zeminin Sınıflandırılması

Bu çalışmada dane çapına göre sınıflandırma ve birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi kullanılmıştır. Öncelikle dane çapına göre sınıflandırmayı yapmak ve dane dağılım eğrisini çizmek amacı ile, iri daneli kısım için yıkamalı elek analizi (elek analizi), ince daneli kısım içinde hidrometre analizi (ıslak analiz) yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlara göre zeminin granülometri eğrisi çizilmiştir (Şekil 75).

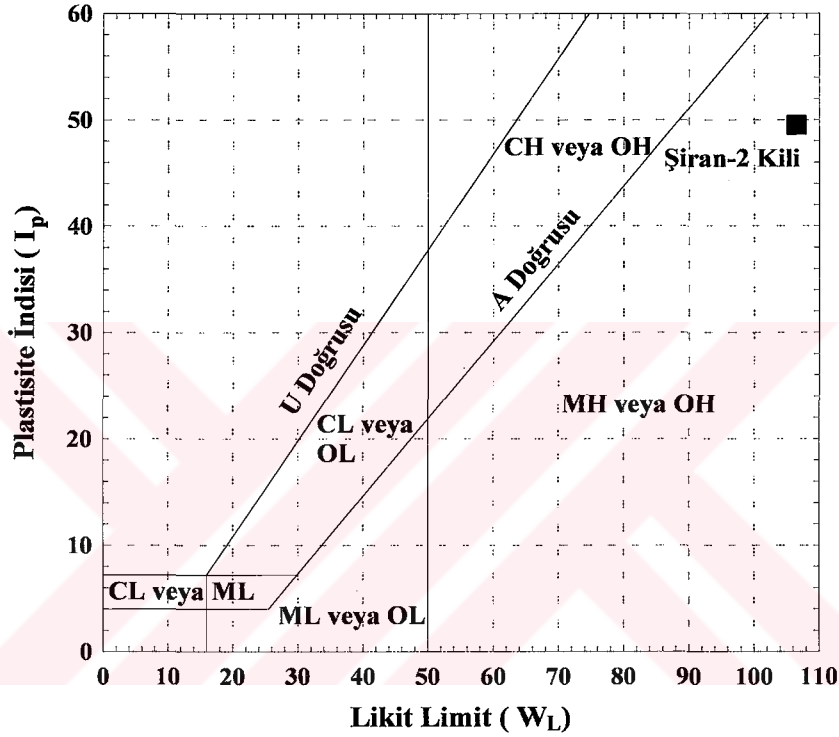


Şekil 75. Şiran-2 kilinin granülometri eğrisi

Bu sınıflandırmaya göre zeminde, %2 kum, %28.5 silt, %69.5 kil bulunmaktadır. Buna göre zemin de egemen grup kildir. Kum yüzdesi 2. derece önemlidir. Sonuç olarak zemin, kabaca “siltli kil” olarak adlandırılabilir.

Bu sınıflandırma sistemi, kıvam limitlerini dikkate almayıp sadece dane çaplarına göre zemini sınıflandırdığından fazla tercih edilmemektedir.

Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sisteminde de (USCS), 200 nolu ve 4 nolu eleklerle ait geçen yüzdeler, C_u , C_c , W_L ve I_p değerleri kullanılarak zeminler sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada zeminler iki harf kullanılarak isimlendirilmektedirler. İnce daneli zeminler, likit limit ve plastisite indisi kullanılarak, Şekil 76'da Casagrande tarafından verilen plastisite grafiğine göre isimlendirilmektedir (Casagrande, 1938).



Şekil 76. Şiran-2 kilinin birleştirilmiş sınıflandırma sistemi plastisite kartındaki yeri

Zeminin organik olup olmadığını anlamak için;

$$\frac{\text{Likit Limit (Etüvde Kurutulmuş)}}{\text{Likit Limit (Kurutulmamış)}} \leq 0.75 \quad (30)$$

bağıntısı kullanılır. Bu oran gerçekleşiyorsa zemin, organik olarak adlandırılır.

$$\frac{\text{Likit Limit (Etüvde Kurutulmuş)}}{\text{Likit Limit (Kurutulmamış)}} = \frac{106.5}{113} = 0.94 > 0.75 \quad \text{olduğundan zemin organik}$$

değildir.

Zemine ait veriler plastisite grafiğinde yerine koyulursa, zeminin A doğrusu altına düştüğü görülmür. Bütün bu veriler göz önünde bulundurularak USCS'ye göre zemin sınıflandırılırsa, MH (yüksek plastisiteli silt) grubu bir malzeme olduğu tespit edilir (Şekil 76). Daha önce yapılan X ışını analizi, diferansiyel termal analiz ve kimyasal analize göre, zemin cinsi montmorillonit yani kil olarak tespit edildiğinden bu sınıflandırma yönteminin şişen zeminler için çok sağlıklı sonuçlar vermediği söylenebilir.

2.1.1.4. Kompaksiyon Özellikleri

Araziden alınan örselenmiş numuneler üzerinde kompaksiyon parametreleri olan maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerlerini belirlemek amacı ile Standart Proctor Deneyi yapılmıştır. Bu deneyden elde edilen veriler kullanılarak Şekil 77'deki kompaksiyon eğrisi çizilmiş ve maksimum kuru birim hacim ağırlık 12.2 kN/m^3 , optimum su muhtevası da % 8.52 olarak bulunmuştur. Şekil 77'de de görüldüğü gibi kompaksiyon eğrisi tipik (kubbe şekilli) bir kompaksiyon eğrisi olmayıp, yarım tepeli kompaksiyon eğrisidir. Yapılan çalışmalar likit limiti 70'den büyük olan killerde kompaksiyon eğrisinin bu şekilde olduğunu göstermiştir (Das, 1985).

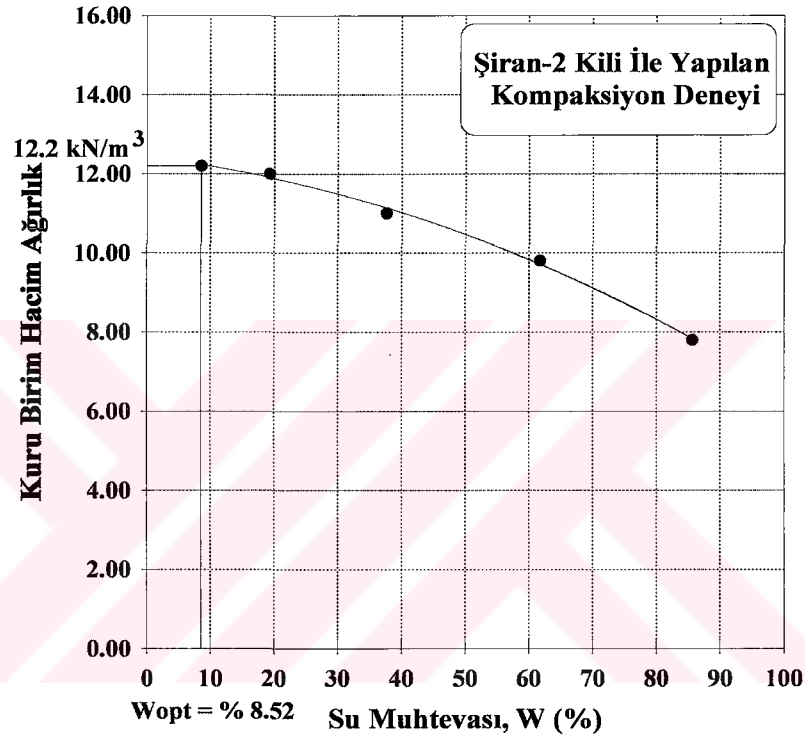
2.1.1.5. Geçirimsizlik Özellikleri

Terzaghi, Peck (1967) tarafından önerilen düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılarak, zemine ait geçirimsizlik katsayısı belirlenmiştir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numune üzerinde yapılan bu deney sonucunda geçirimsizlik katsayısı $1.3 \times 10^{-7} \text{ cm/sn}$ olarak bulunmuştur. Casagrande (1938) tarafından yapılan araştırma, elde edilen bu katsayıya göre zemini geçirimsiz olarak değerlendirmektedir.

2.1.1.6. Dayanım Özellikleri

Malzemenin kayma direnci parametrelerini belirlemek amacı ile direkt kesme ve serbest basınç deneyleri yapılmış, kayma direnci parametreleri (c , ϕ) belirlenmiştir. Direkt kesme deneyi, kuru ve doymuş haldeki numuneler üzerinde, serbest basınç deneyi ise optimum su muhtevasında sıkıştırılan numuneler üzerinde yapılmıştır. Direkt kesme

deneyinden elde edilen verilere göre; kuru haldeki numunenin kayma direnci parametreleri $c = 0$, $\phi = 34.32^\circ$ (Şekil 78), drenajlı koşullarda yapılan doymun haldeki numunenin kayma direnci parametreleri $c=30.53$ kPa., $\phi = 2.34^\circ$ dir (Şekil 79). Optimum su muhtevsındaki numunelerle yapılan serbest basınç deneyinden, Şiran-2 kilinin serbest basınç dayanımı, $q_u = 557.02$ kPa, kohezyonu $c_u = 278.51$ kPa.'dır.

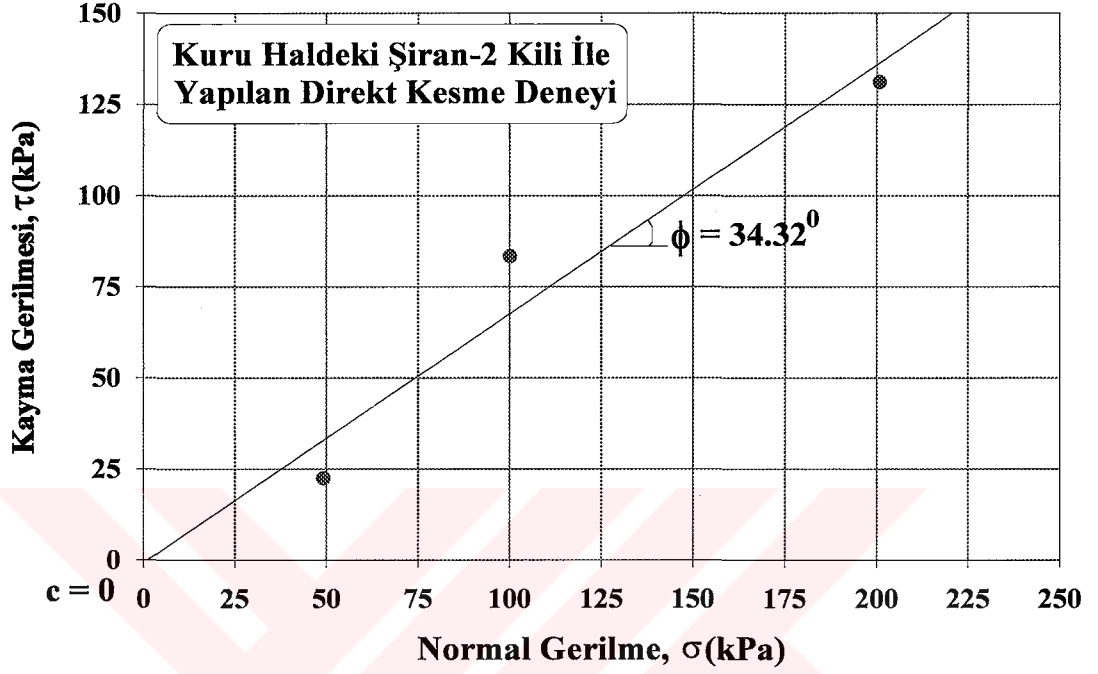


Şekil 77. Şiran-2 kilinin kompaksiyon eğrisi

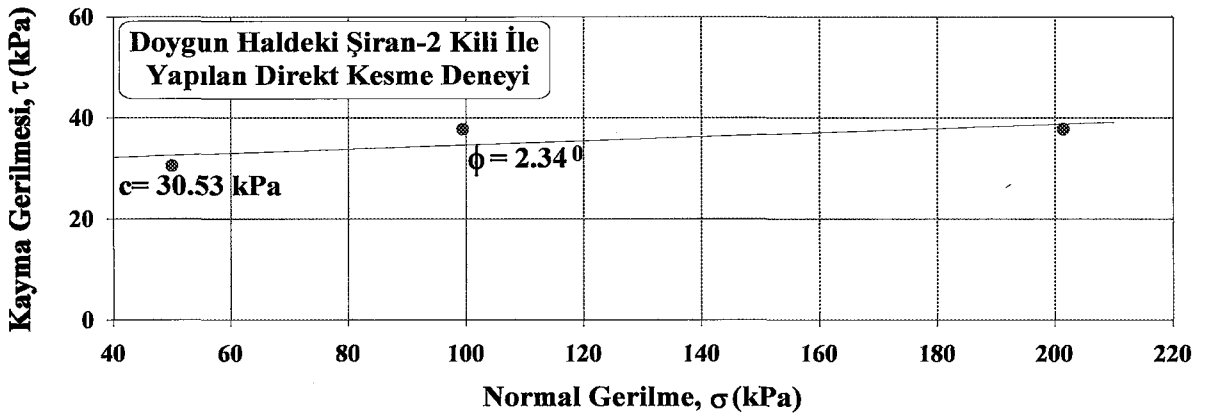
2.1.1.7. Şişme Özellikleri

Bu çalışmada, ASTM D4546 (1986) deney yöntemlerinden A metodu kullanılmıştır. Zeminin serbest şişmesi optimum su muhtevsında sıkıştırılan ve 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılan numuneler için % 18.7 olarak tespit edilmiştir. Şişme potansiyelini belirlemek için de şişme tamamlandıktan sonra her basıncın sabit tutulduğu 5, 10, 20, 40, 80... kPa'lık düşey basınçlar numunenin başlangıç yükseklik değerine ulaşınca kadar uygulanmıştır (Metod A). Elde edilen bu verilerle e-log p eğrisi çizilerek şişme basıncı 64 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 80).

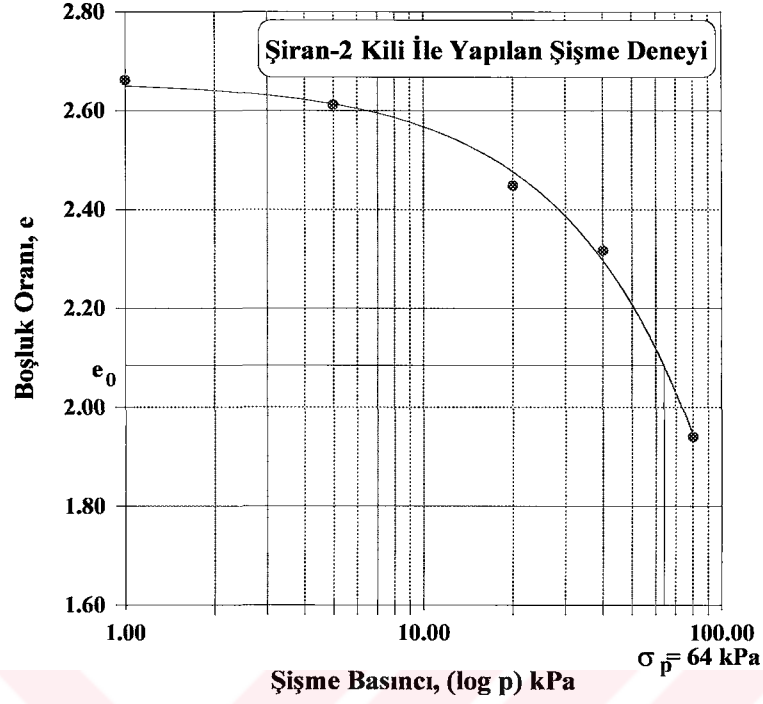
Bu şişme basıncına göre Şiran-2 kili, orta derecede şişme özelliğine sahiptir (Wayne vd., 1984).



Şekil 78. Kuru haldeki numunenin kayma direnci parametreleri



Şekil 79. Doymun haldeki numunenin kayma direnci parametreleri



Şekil 80. Şiran-2 kilinin şişme basıncı

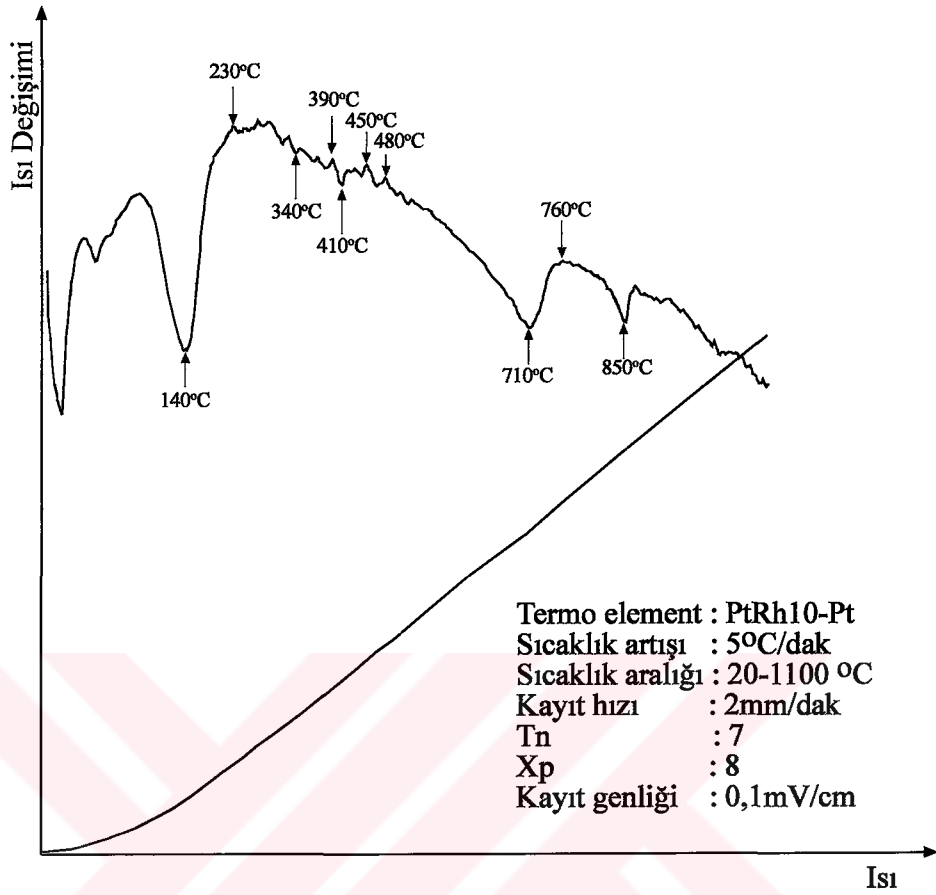
2.1.2. Bentonit

Bu çalışmada, Karakaya Bentonit Firmasından alınan bentonit kullanılmış ve bu kilin mineralojisi, fiziksel ve plastisite özellikleri, kompaksiyon, dayanım ve şişme özellikleri laboratuarda yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir.

2.1.2.1. Mineralojik Özellikler

2.1.2.1.1. Diferansiyel Termal Analiz

Yüzdürme yöntemi ile hazırlanan numunenin daha önce de anlatıldığı gibi ısıtılmasıyla oluşan ısıyla alet tarafından çizilen eğri üzerindeki pikler Şekil 81'deki gibi belirlenerek mineralin montmorillonit olduğu tespit edilmiştir.



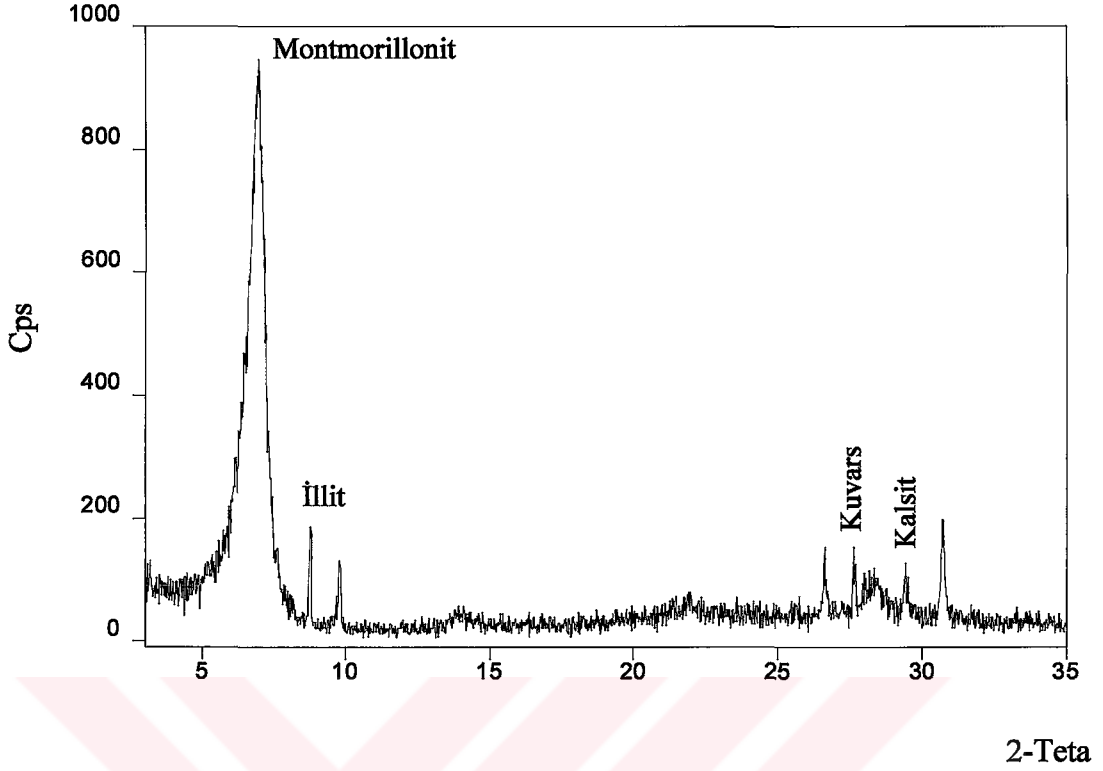
Şekil 81. Bentonitin diferansiyel termal analiz sonucu

2.1.2.1.2. X Işını Analizi

Toz haline getirilerek cam plaka üzerine yerleştirilen numune ile yapılan X ışını analizinde grafik kağıdındaki 2θ açıları okunarak, her bir pik için d mesafeleri hesaplanmış ve "sigma-plot" bilgisayar programı ile numune belirlenmiştir (Şekil 82).

Parajenez : Montmorillonit + İllit + Kalsit + Kuvars

Mineralojik inceleme sonucunda bentonitin Na-Smektit olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 82. Bentonitin X ışını analiz sonucu

2.1.2.2. Temel Özellikler

Numune araziden direkt alınmayıp, firma tarafından gönderildiği için doğal su muhtevası ve doğal birim hacim ağırlığı tespit edilememiştir. Piknometre ile tespit edilen dane birim hacim ağırlığı da 22.69 kN/m^3 olarak bulunmuştur.

2.1.2.2.1. Kıvam Limitleri

Bentonitin, Casagrande Yöntemi ile yapılan likit limit deneyinden elde edilen sonuçlara göre likit limit değeri % 461.5, plastik limiti ise % 28.5 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre zeminimiz yüksek plastisiteli ve yüksek şişme özelliğine sahip olup, plastisite indisi % 433'tür. Yarıçapı uzunluğuna göre küçük olan yarım silindir şeklindeki kabın içine likit limitte doldurulan zeminin kurutulması sonucunda, boyunda meydana gelen kısaltmalar ölçülerek hesaplanan lineer büzülme değeri de % 44.95 olarak bulunmuştur.

2.1.2.2.2. Zeminin Sınıflandırılması

Zemini dane çapına göre sınıflandırmak amacı ile, iri daneli kısım için yıkamalı elek analizi (elek analizi) yapılmış ve zeminin tamamının 200 nolu elekten geçtiği gözlenmiştir. İnce daneli kısmı analiz edebilmek için yapılması gereken hidrometre analizi (ıslak analiz) zeminin su ile karşılaştığında şişmesi ve stokes yasası kurallarına uymamasından dolayı yapılamamaktadır.

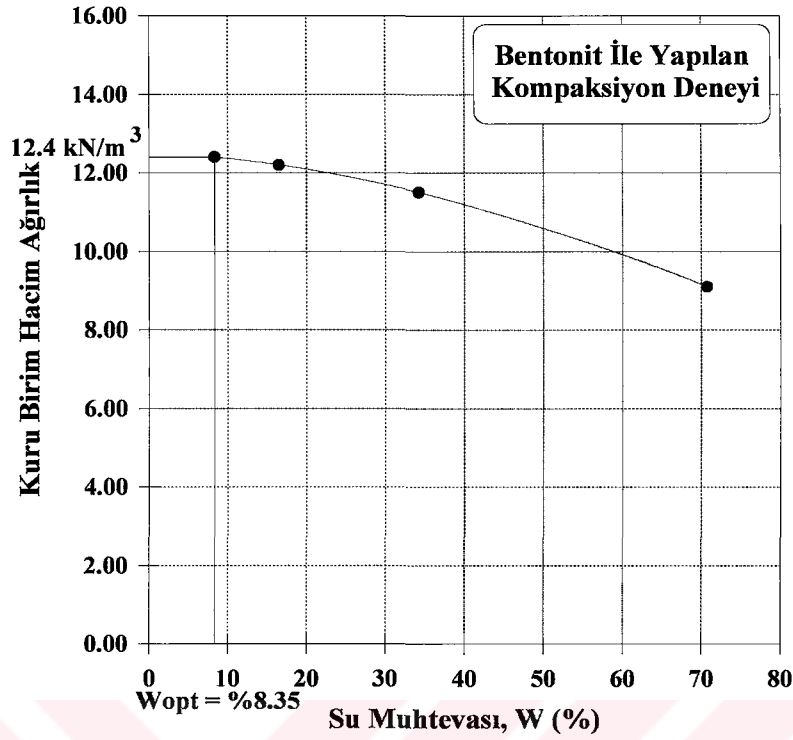
İnce daneli zeminler, likit limit ve plastisite indisi kullanılarak, Şekil 76'da Casagrande tarafından verilen plastisite grafiğine göre isimlendirilmekteydi. Öncelikle zeminin organik olup olmadığını anlamak için etüvde kurutulmuş ve kurutulmamış likit limit değerleri bağıntı (30)'da yerine koyulursa

$$\frac{\text{Likit Limit (Etüvde Kurutulmuş)}}{\text{Likit Limit (Kurutulmamış)}} = \frac{461.5}{455} = 1.014 > 0.75 \quad \text{zeminin organik olmadığı}$$

görülmür. Zemine ait veriler plastisite grafiğinde yerine koyulursa, zeminin A doğrusu üstüne düştüğü görülmür. Bütün bu veriler göz önünde bulundurularak USCS'ye göre zemin sınıflandırılırsa, "CH (yüksek plastisiteli kil)" grubu bir malzeme olduğu tespit edilir.

2.1.2.3. Kompaksiyon Özellikleri

Örselenmiş numuneler üzerinde kompaksiyon parametreleri olan maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerlerini belirlemek amacı ile Standart Proctor Deneyi yapılmıştır. Bu deneyden elde edilen veriler kullanılarak Şekil 83'deki kompaksiyon eğrisi çizilmiş ve maksimum kuru birim hacim ağırlık 12.4 kN/m^3 , optimum su muhtevası ise % 8.35 olarak bulunmuştur. Bentonitin likit limit değerinin 70'den büyük olmasından dolayı, bu kompaksiyon eğrisinin de tipik (kubbe şekilli) bir kompaksiyon eğrisi olmadığı, yarım tepeli kompaksiyon eğrisi olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalar da likit limiti 70'den büyük olan killerde kompaksiyon eğrisinin bu şekilde olduğunu göstermektedir (Das, 1985).



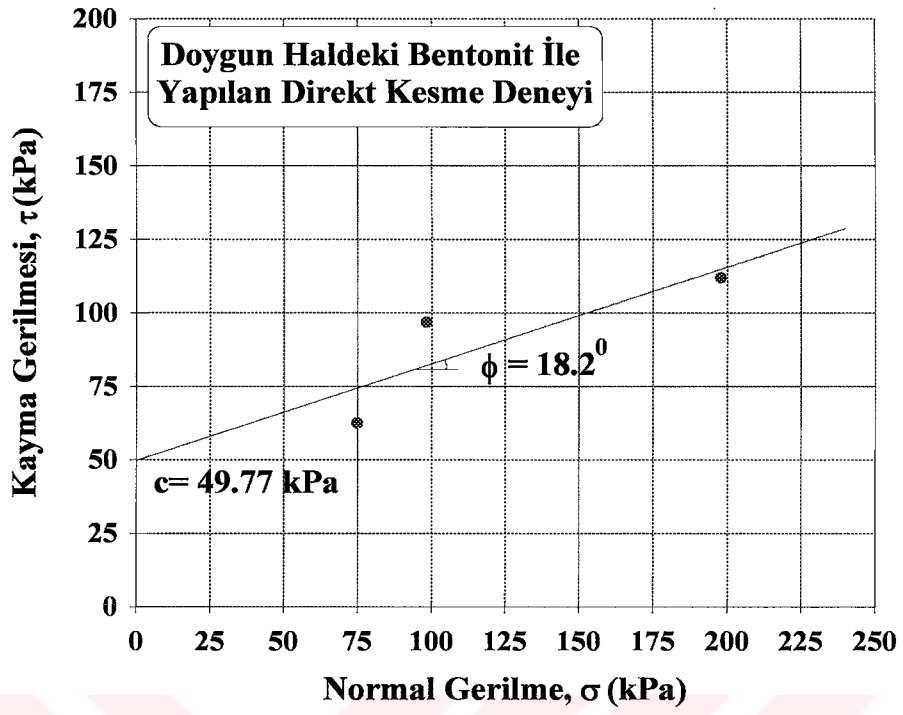
Şekil 83. Bentonitin kompaksiyon eğrisi

2.1.2.4. Dayanım Özellikleri

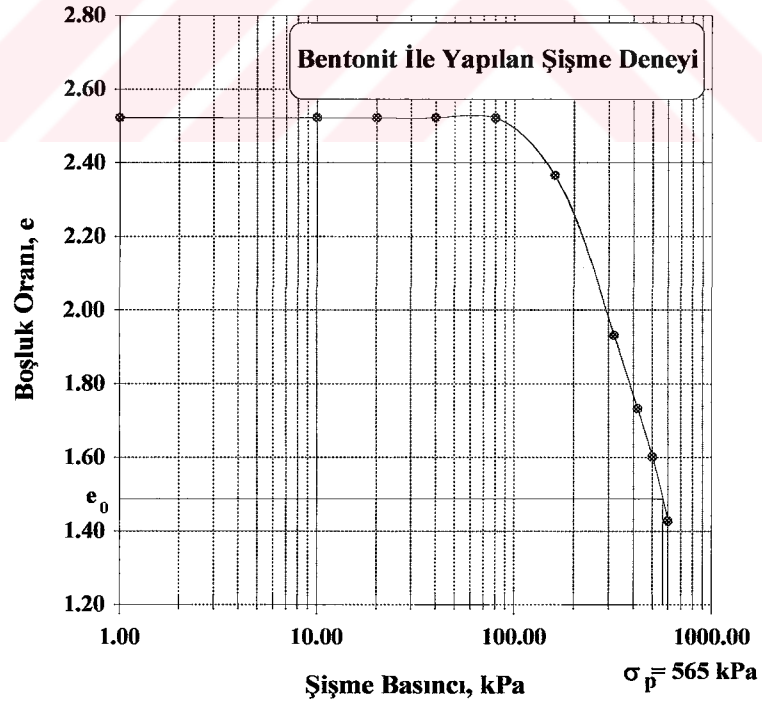
Malzemenin kayma direnci parametrelerini belirlemek amacı ile doygun haldeki numuneler üzerinde direkt kesme deneyi yapılmıştır. Bu deneyden elde edilen verilere göre numunenin kayma direnci parametreleri $c = 49.77$ kPa., $\phi = 18.2^\circ$ dir (Şekil 84).

2.1.2.5 Şişme Özellikleri

ASTM D4546 (1986)'ya göre yapılan şişme deneyinden bentonitin serbest şişmesi optimum su muhtevasında sıkıştırılan ve 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılan numuneler için % 220.45 olarak tespit edilmiştir. Şişme potansiyelini belirlemek için de şişme tamamlandıktan sonra her basıncın sabit tutulduğu 5, 10, 20, 40, 80... kPa'lık düşey basınçlar numunenin başlangıç yükseklik değerine ulaşınca kadar uygulanmıştır. Elde edilen bu verilerle e-log p eğrisi çizilerek şişme basıncı 565 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 85). Bu basınca göre bentonit, yüksek şişme özelliğine sahiptir (Wayne vd., 1984).



Şekil 84. Bentonitin kayma direnci parametreleri



Şekil 85. Bentonitin şişme basıncı

2.1.3. Karışık Zemin

Şiran-2 kilinin şişme kapasitesi düşük olduğundan, Karakaya Bentonit Firmasından temin edilen bentonit, bu zeminin içine % 48 oranında karıştırılarak, karışık zemin elde edilmiştir. Elde edilen bu zeminin fiziksel ve plastisite özellikleri, kompaksiyon, geçirimsizlik, dayanım ve şişme özellikleri laboratuarda yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir.

2.1.3.1. Temel Özellikler

Numune, doğal bir zemin olmayıp karışım olarak hazırlandığından doğal su muhtevası ve doğal birim hacim ağırlığı tespit edilememiştir. Piknometre ile tespit edilen dane birim hacim ağırlığı da 23.2 kN/m^3 olarak bulunmuştur.

2.1.3.1.1. Kıvam Limitleri

Casagrande Yöntemi ile yapılan likit limit deneyinden elde edilen sonuçlara göre karışık zeminin likit limiti % 284.5, plastik limiti ise % 55.6 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre zemin yüksek plastisiteli olup, plastisite indisi % 228.9'tür. Lineer büzülme ise % 36.55'tir. Elde edilen bu değerlere göre zeminimiz plastisitelidir.

2.1.3.1.2. Zeminin Sınıflandırılması

Zemini dane çapına göre sınıflandırmak amacı ile, iri daneli kısım için yıkamalı elek analizi (elek analizi) yapılmış ve zeminin tamamının 200 nolu elekten geçtiği gözlenmiştir. İnce daneli kısım analiz edebilmek için yapılması gereken hidrometre analizi (ıslak analiz), zeminin su ile karşılaştığında şişmesi ve stokes yasası kurallarına uymamasından dolayı yapılamamıştır.

İnce daneli zeminler, likit limit ve plastisite indisi kullanılarak, Şekil 76'da Casagrande tarafından verilen plastisite grafiğine göre isimlendirilmekteydi. Öncelikle zeminin organik olup olmadığını anlamak için etüvde kurutulmuş ve kurutulmamış likit limit değerleri bağıntı (30)'da yerine koyulursa

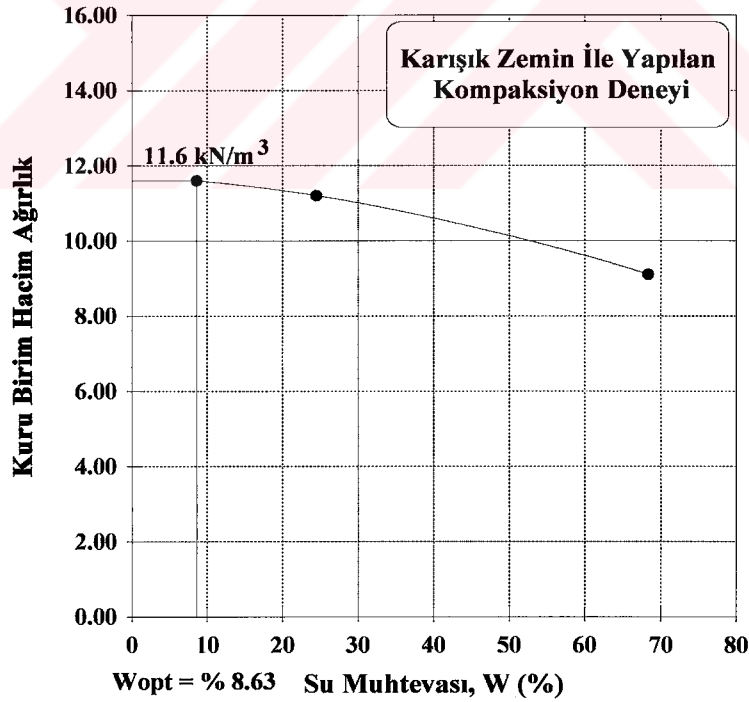
$$\frac{\text{Likit Limit (Etüvde Kurutulmuş)}}{\text{Likit Limit (Kurutulmamış)}} = \frac{284.5}{264.5} = 1.076 > 0.75 \text{ olduğundan zemin organik}$$

değildir.

Zemine ait veriler plastisite grafiğinde yerine koyulursa, zeminin A doğrusu üstüne düştüğü görülür. Bütün bu veriler göz önünde bulundurularak USCS'ye göre zemin sınıflandırılırsa, "CH (yüksek plastisiteli kil)" grubu bir malzeme olduğu tespit edilir.

2.1.3.2 Kompaksiyon Özellikleri

Örselenmiş numuneler üzerinde kompaksiyon parametreleri olan maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerlerini belirlemek amacı ile Standart Proctor Deneyi yapılmıştır. Bu deneyden elde edilen veriler kullanılarak Şekil 86'daki kompaksiyon eğrisi çizilmiştir ve maksimum kuru birim hacim ağırlık 11.6 kN/m^3 , optimum su muhtevası % 8.63 olarak bulunmuştur.



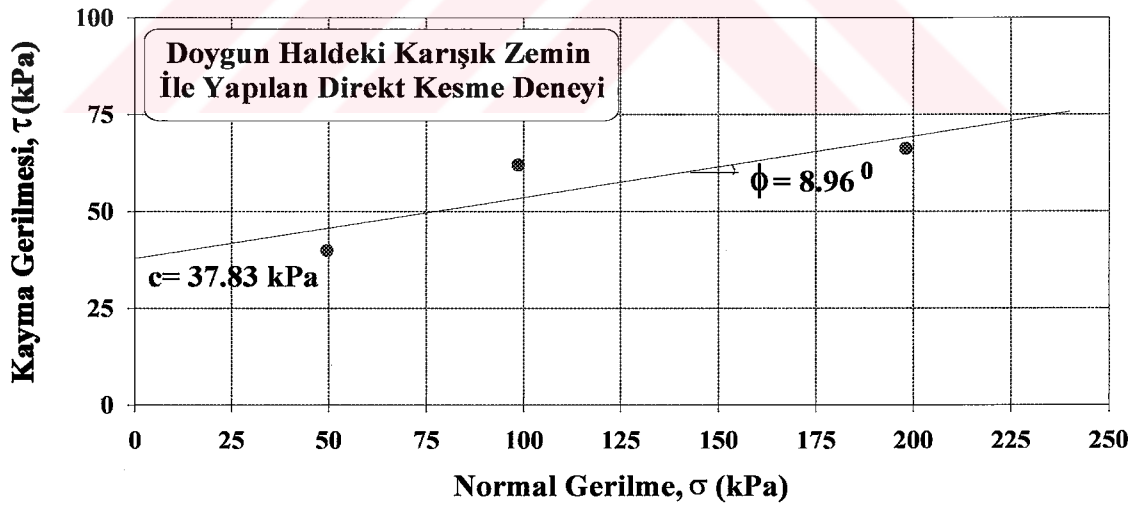
Şekil 86. Karışık zeminin kompaksiyon eğrisi

2.1.3.3 Geçirimsizlik Özellikleri

Zeminin geçirimsizlik katsayısını tespit edebilmek için, optimum su muhtevasında sıkıştırılan numune, düşen seviyeli permeabilite aleti içine yerleştirilmiştir. Deney sonunda geçirimsizlik katsayısı 1.78×10^{-9} cm/sn olarak bulunmuştur. Casagrande (1938) tarafından yapılan araştırma, elde edilen bu katsayıya göre zemini geçirimsiz olarak değerlendirmektedir.

2.1.3.4 Dayanım Özellikleri

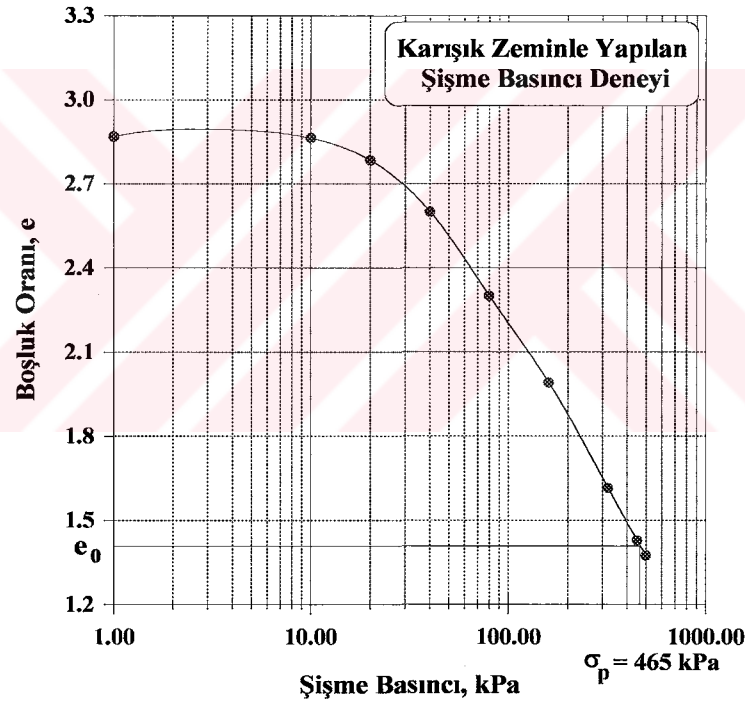
Malzemenin kayma direnci parametrelerini belirlemek amacı ile direkt kesme deneyi yapılmış, kayma direnci parametreleri (c , ϕ) belirlenmiştir. Bu deneyde optimum su muhtevasında sıkıştırılan numuneler, 72 saat sonunda doymun hale getirilerek 18, 36, 72 kg. yükler altında kesilmiştir. Elde edilen verilere göre; doymun haldeki numunenin kayma direnci parametreleri $c = 37.83$ kPa., $\phi = 8.96^\circ$ (Şekil 87) dir.



Şekil 87. Doymun haldeki karışık zeminin kayma direnci parametreleri

2.1.3.5 Şişme Özellikleri

ASTM D4546 (1986)'ya göre yapılan şişme deneyinden karışık zeminin serbest şişmesi optimum su muhtevasında sıkıştırılan ve 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılan numuneler için % 133.25 olarak tespit edilmiştir. Şişme potansiyelini belirlemek için de şişme tamamlandıktan sonra her basıncın sabit tutulduğu 5, 10, 20, 40, 80... kPa'lık düşey basınçlar numunenin başlangıç yükseklik değerine ulaşınca kadar uygulanmıştır. Elde edilen bu verilerle e-log p eğrisi çizilerek şişme basıncı 465 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 88). Bu sonuçlara göre zeminimiz yüksek şişme özelliğine sahiptir (Wayne vd., 1984).



Şekil 88. Karışık zeminin şişme basıncı

2.1.4. Kohezyonlu Şişmeyen Zemin

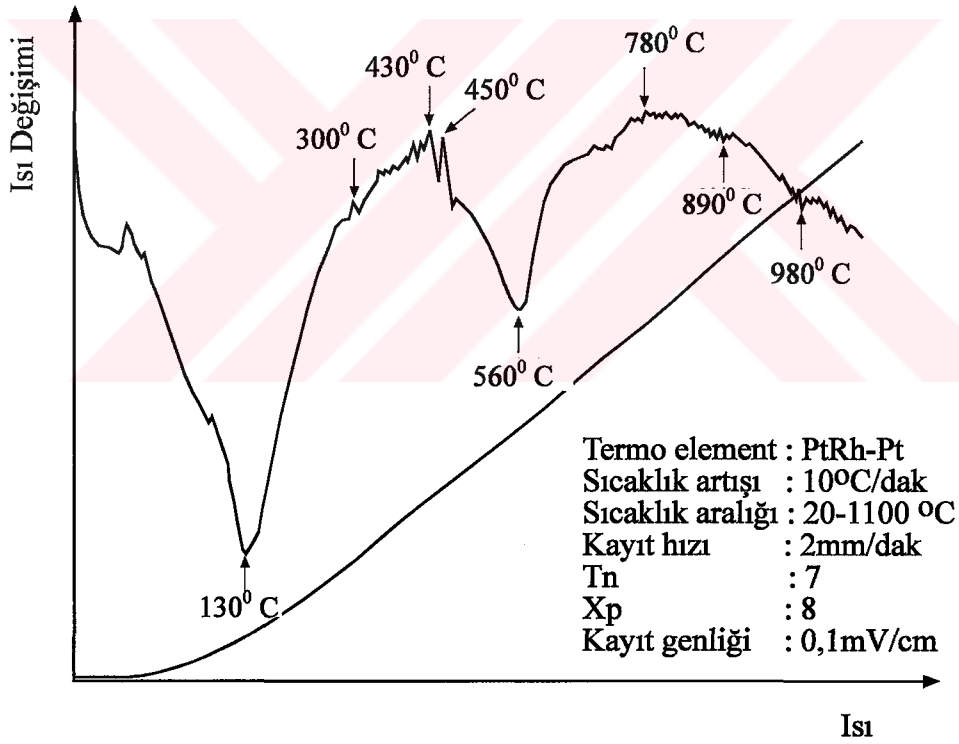
Şişen zeminlerde yanal zemin basıncı azaltmak amacı ile istinat duvarının yan yüzüne yerleştirilmek için, KTÜ Geoteknik Laboratuvarının arka kısmından alınan örselenmiş kohezyonlu şişmeyen zemin (KŞZ) numunelerinin mineralojisi, fiziksel ve plastisite

özellikleri, dane dağılımı, kompaksiyon, geçirimsizlik ve dayanım özellikleri laboratuarda yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir.

2.1.4.1. Mineralojik Özellikler

2.1.4.1.1. Diferansiyel Termal Analiz

Yüzdürme yöntemi ile hazırlanan numunenin daha önce de anlatıldığı gibi ısıtılmasıyla oluşan ısıya alet tarafından çizilen eğri üzerindeki pikler Şekil 89'daki gibi belirlenerek mineralin kaolinit ve illit olduğu tespit edilmiştir.



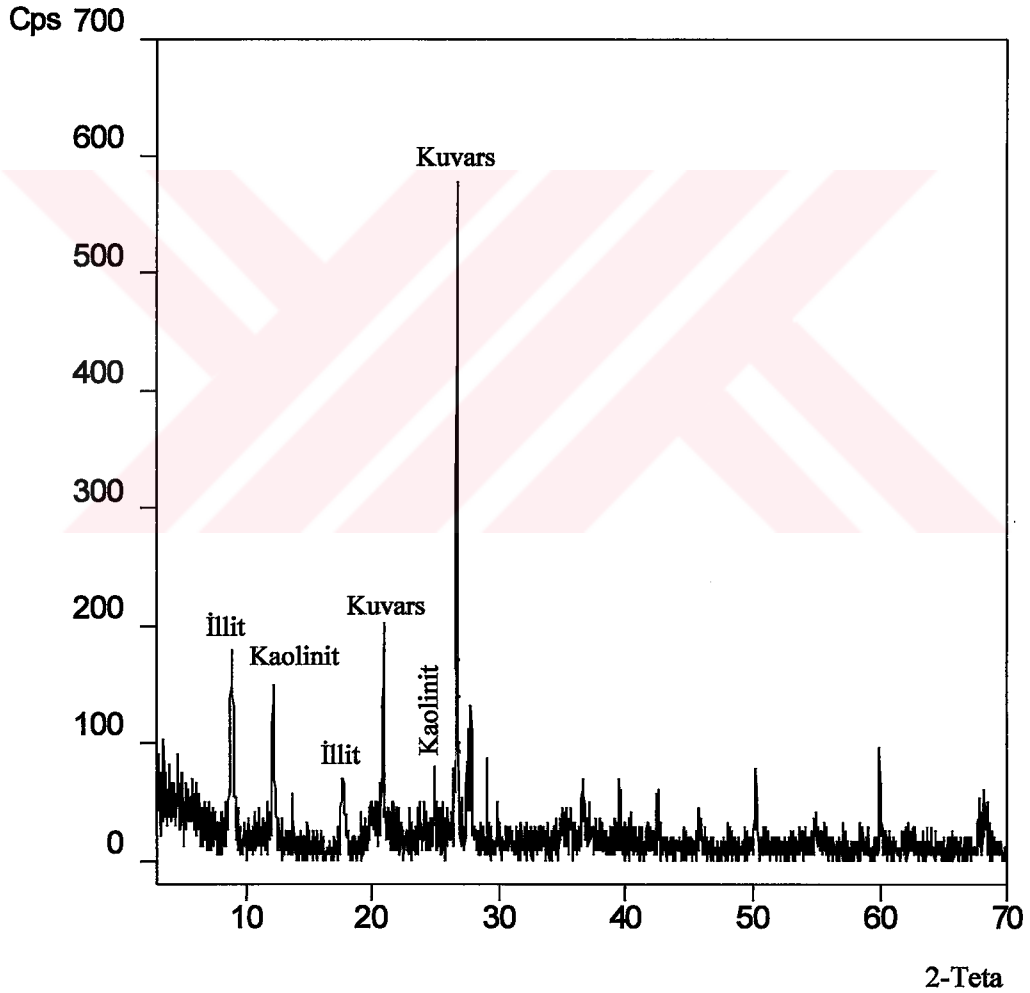
Şekil 89. Kohezyonlu şişmeyen zeminin diferansiyel termal analiz sonucu

2.1.4.1.2. X Işını Analizi

Toz haline getirilerek cam plaka üzerine yerleştirilen numune ile yapılan X ışını analizinde grafik kağıdındaki 2θ açıları okunarak, her bir pik için d mesafeleri hesaplanmış ve sigma-plot bilgisayar programı ile numune belirlenmiştir (Şekil 90).

Parajenez : İllit + Kaolinit + Kuvars

Mineralojik incelemeler sonucunda mineralimizin kumlu killi (kaolinit, illit) olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 90. Kohezyonlu şişmeyen zeminin X ışını analiz sonucu

2.1.4.2. Temel Özellikler

Zeminin fiziksel özelliklerini belirlemek amacı ile öncelikle araziden alınan örselenmiş numuneler üzerinde piknometre yöntemi ile dane birim hacim ağırlığı ve doğal su muhtevası belirlenmiştir (Tablo 27).

Tablo 27. Zeminin fiziksel özellikleri

Su Muhtevası (%)	Dane B. H. A. (kN/m ³)
28.58	25.7

2.1.4.2.1. Kıvam Limitleri

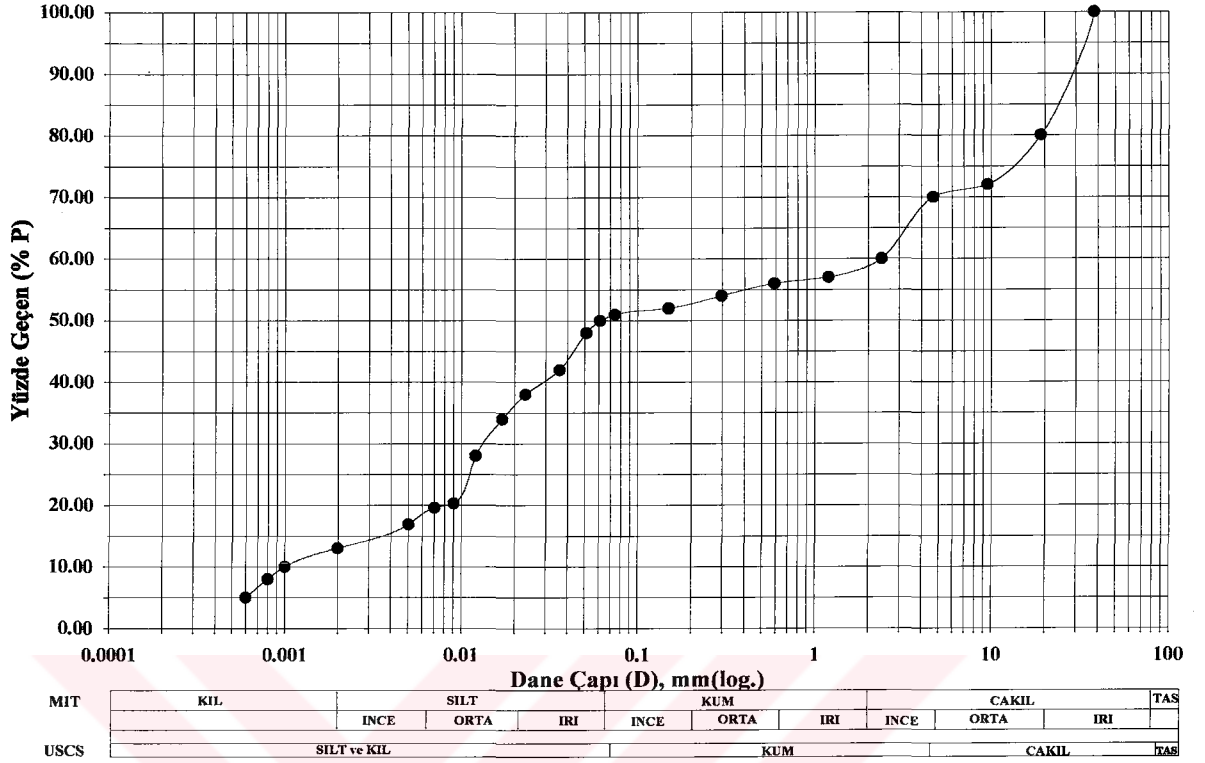
Kohezyonlu zeminler su muhtevalarındaki değişime bağlı olarak değişik davranışlar göstermektedirler. Atterberg (1911), bu durumları ayıran su muhtevalarını tanımlamış ve kıvam limitleri olarak adlandırmıştır. Casagrande Yöntemi ile yapılan likit limit deneyinden elde edilen sonuçlara göre akma doğrusu çizilmiş ve bu doğruya göre likit limit % 37.2, plastik limit ise % 27.95 olarak bulunmuştur. Bu deney sonuçlarına göre zemin düşük plastisiteli olup, plastisite indisi % 9.25 , likitlik indisi 0.068 ve kıvam indisi de 0.93'dür. Elde edilen bu bilgilerden likitlik indisinin sıfırdan büyük, kıvam indisinin de birden küçük olması zeminin arazide plastik durumda bulunduğunu göstermektedir.

2.1.4.2.2. Zeminin Sınıflandırılması

Öncelikle dane çapına göre sınıflandırmayı yapmak ve dane dağılım eğrisini çizmek amacı ile, iri daneli kısım için yıkamalı elek analizi (elek analizi), ince daneli kısım içinde hidrometre analizi (ıslak analiz) yapılmıştır. Dane boyu analizlerinden elde edilen sonuçlara göre zeminin granülometri eğrisi çizilmiştir (Şekil 91).

Bu sınıflandırmaya göre zeminde, % 15 çakıl, % 9 kum, % 36 silt, % 12 kil bulunmaktadır. Buna göre zemin de egemen grup silttir. Çakıl, ve kil yüzdeleri 2.ve 3. derece önemlidir. Sonuç olarak zeminimiz, kabaca çakıllı killi silt olarak adlandırılabilir. Bu sınıflandırma sistemi, kıvam limitlerini dikkate almayıp sadece dane çaplarına göre zemini sınıflandırdığından fazla tercih edilmemektedir.

DANE DAĞILIMI (GRANÜLOMETRİ) EĞRİSİ

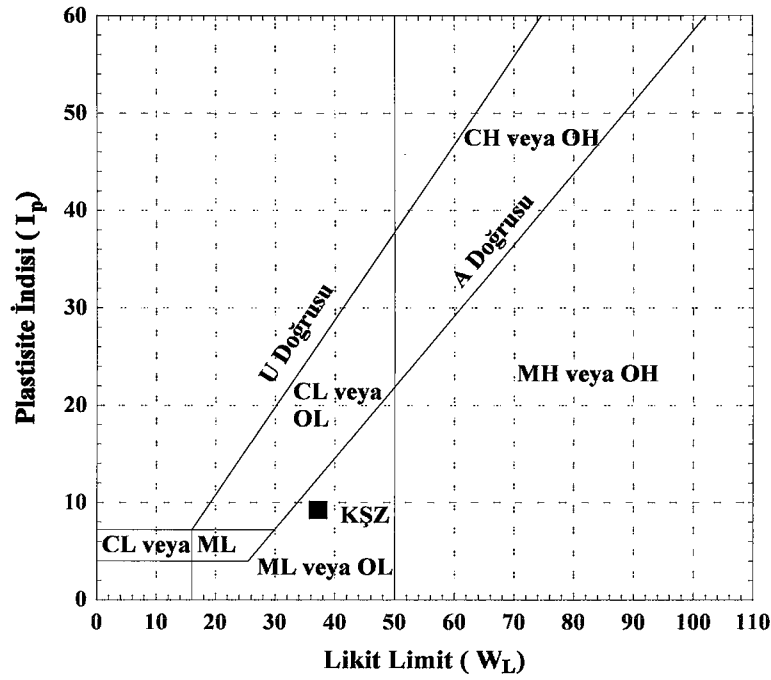


Şekil 91. Kohezyonlu şişmeyen zeminin granülometri eğrisi

Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sisteminde de (USCS), 200 nolu ve 4 nolu eleklerle ait geçen yüzdelere, C_u , C_c , W_L ve I_p değerleri kullanılarak zeminler sınıflandırılır. İnce daneli zeminler, likit limit ve plastisite indisi kullanılarak, Şekil 76'da Casagrande tarafından verilen plastisite grafiğine göre isimlendirilmekteydi. Öncelikle zeminin organik olup olmadığını anlamak için etüvde kurutulmuş ve kurutulmamış likit limit değerleri

$$\text{bağıntı (30)'da yerine koyulursa; } \frac{\text{Likit Limit (Etüvde Kurutulmuş)}}{\text{Likit Limit (Kurutulmamış)}} = \frac{37.2}{36.8} = 1.01 > 0.75$$

zeminin organik olmadığı görülür. Zemine ait veriler plastisite grafiğinde yerine koyulursa, zeminin A doğrusu altına düştüğü görülür (Şekil 92). Bütün bu veriler göz önünde bulundurularak USCS'ye göre zemin sınıflandırılırsa, ML (silt) grubu bir malzeme olduğu tespit edilir.



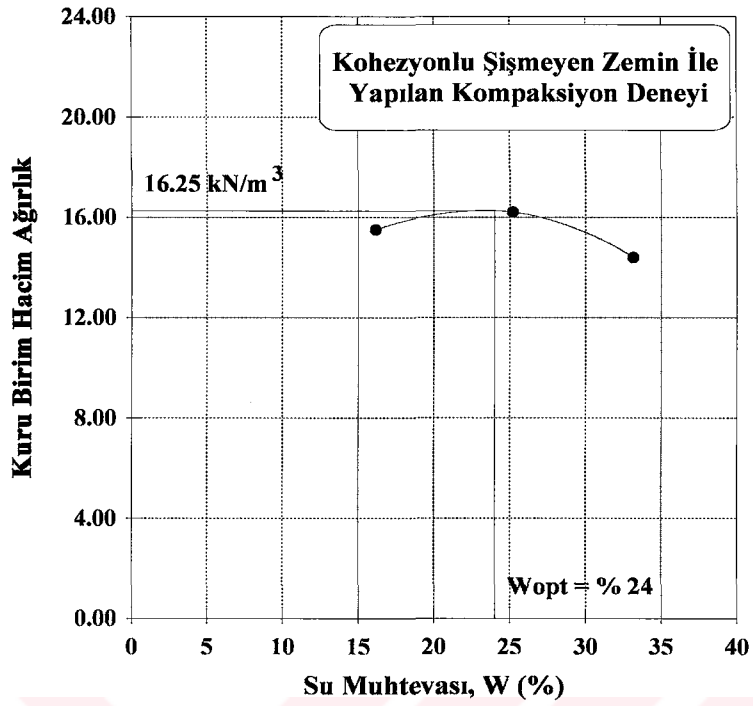
Şekil 92. Zeminin birleştirilmiş sınıflandırma sisteminde plastisite kartındaki yeri

2.1.4.3. Kompaksiyon Özellikleri

Araziden alınan örselenmiş numuneler üzerinde kompaksiyon parametreleri olan maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerini belirlemek amacı ile Standart Proctor Deneyi yapılmıştır. Bu deneyden elde edilen veriler kullanılarak Şekil 93'deki kompaksiyon eğrisi çizilmiştir ve maksimum kuru birim hacim ağırlık 16.25 kN/m^3 , optimum su muhtevası da % 24 olarak bulunmuştur.

2.1.4.4. Geçirimsizlik Özellikleri

Terzaghi, Peck (1967) tarafından önerilen, düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılarak zemine ait geçirimsizlik katsayısı belirlenmiştir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numune üzerinde yapılan bu deney sonucunda geçirimsizlik katsayısı $2.04 \times 10^{-5} \text{ cm/sn}$ olarak bulunmuştur. Casagrande (1938) tarafından yapılan araştırma, elde edilen bu katsayıya göre zemini az geçirimsiz olarak değerlendirmektedir.



Şekil 93. Kohezyonlu şişmeyen zeminin kompaksiyon eğrisi

2.1.4.5. Dayanım Özellikleri

Malzemenin kayma direnci parametrelerini belirlemek amacı ile, doymun haldeki numuneler üzerinde direkt kesme deneyi yapılmış, kayma direnci parametreleri (c , ϕ) belirlenmiştir. Bu deneyden elde edilen verilere göre; kayma direnci parametreleri $c=9.63$ kPa., $\phi=3.3^\circ$ (Şekil 94)'dir.

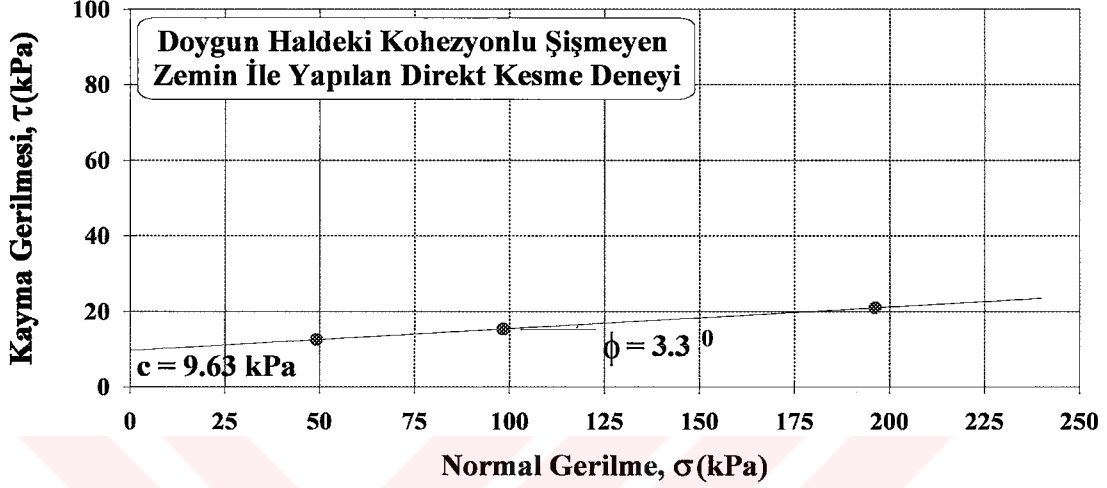
2.1.5. EPS

EPS'in en belirgin özelliği, yoğunluk, sıkışma davranışı, ara yüzey sürtünmesi, zamana bağlı davranış ve gerilme davranışdır.

2.1.5.1. Yoğunluk

EPS'in yoğunluğu, mekanik özelliği ile ilişkisi olan ana parametre olarak gözükmektedir. Basınç dayanımı, kayma direnci, çekme dayanımı, eğilme dayanımı,

rijitlik, akma davranışı ve diğer mekanik özellikler, yoğunluğa bağlı olarak değişmektedir. Bir EPS bloğunun üretim maliyeti genellikle yoğunluğu ile doğru orantılı olarak değişmektedir.



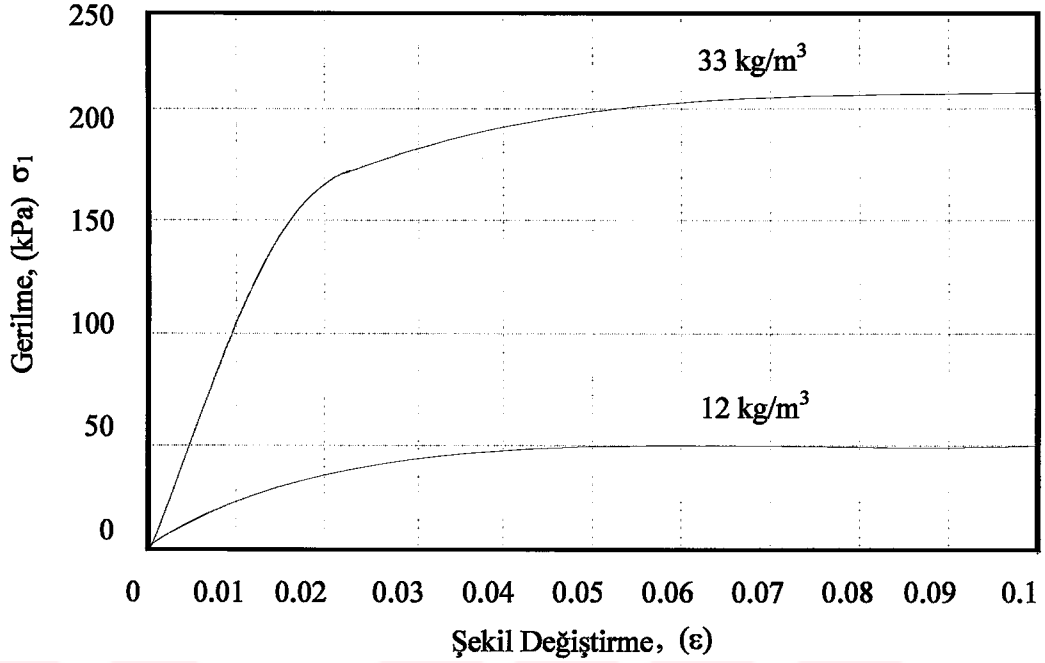
Şekil 94. Doygun haldeki kohezyonlu şişmeyen zeminin kayma direnci parametreleri

İnşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan EPS'in yoğunluğu, 11-30 kg/m³ aralığında değişmektedir. Yalıtım gibi diğer uygulamalarda daha yüksek yoğunluklar daha etkili sonuç vermektedir (van Dorp, 1988). Yoğunluğu düşük olan EPS bloklarının hafif olması nedeniyle, üretim sonrası taşıma ve araziye yerleşmesi de kolay olmaktadır.

2.1.5.2. Sıkışma

2.1.5.2.1. Basınç Dayanımı ve Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi

Şekil 95'de, 12 ve 38 kg/m³ yoğunluğa sahip olan EPS'in gerilme-şekil değiştirme eğrisi görülmektedir. Bunlar, şimdiye kadar bir çok mühendislik uygulamalarında kullanılan sınır yoğunluk değerleridir. Şekilden, gerilme şekil değiştirme eğrisinin basitçe iki düz ana çizgiye bölünebileceği görülmektedir. Her iki düz çizginin de eğimi yoğunlukla birlikte artmaktadır. EPS daneciklerinin boyutunun, kesilmiş numunelerin sıkışabilirliği üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır (BASF Corp., 1968).



Şekil 95. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Negussey, Elragi, 2000).

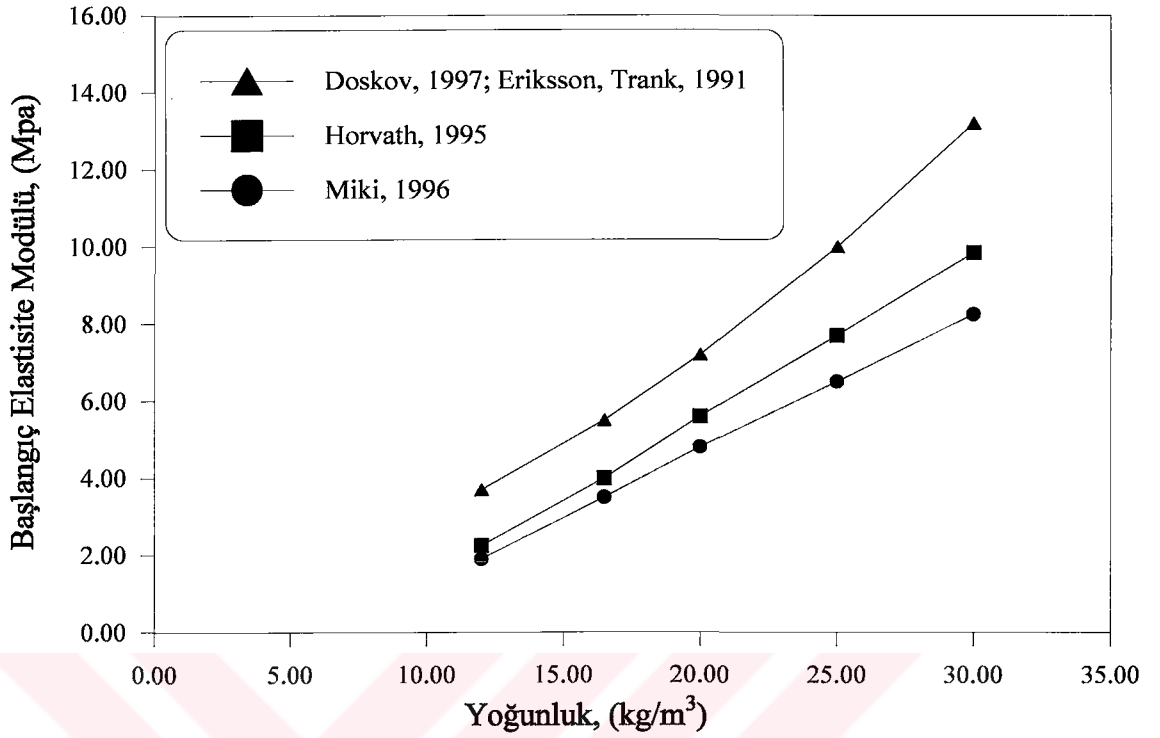
EPS'in basınç dayanımları Tablo 28'de verilmektedir (ASTM C578).

Tablo 28. EPS'in basınç dayanımları (ASTM C578).

Yoğunluk (kg/m ³)	12	15	18	22	29
%10 Şekil Değiştirmede	35	69	90	104	173
Basınç Dayanımı (kPa)					

2.1.5.2.2. Başlangıç Elastisite Modülü

Gerilme şekil değiştirme eğrisi, başlangıçta lineer bir kısma sahiptir. Bu kısmın eğimi elastisite modülü (Young Modülü) olarak tanımlanır. EPS'in elastisite modülü, yoğunluğa bağlı olarak değişmektedir (Şekil 96). Bu şekilden de görüldüğü gibi çeşitli araştırmacılar, her bir yoğunluk için verilen, sabit bir başlangıç elastisite modülü üzerinde anlaşamamışlardır. Elragi vd. (2000), bunun nedeninin farklı araştırmacıların farklı boyutlardaki numuneler üzerinde çalışmalarını olduğunu göstermiştir. Bu araştırmalara göre daha büyük numuneler, daha büyük başlangıç elastisite modülüne sahip olmaktadır.



Şekil 96. Başlangıç elastisite modülünün yoğunluğa bağlı olarak değişimi (Elragi, 2000).

2.1.5.2.3. Poisson Oranı

Poisson oranı EPS'in yanal basıncının bir göstergesi olup 0.05 ile 0.5 arasında değişen bir değere sahiptir (Tablo 29).

Tablo 29. Poisson oranları (Elragi, 2000).

Kaynak	Yamanaka vd., (1991)	Negusse, Sun, (1996)	GeoTec, (1999)	Duskov vd., (1998)	Ooe vd., (1996)	Sanders, (1996)	Momoi, Kokusy, (1996)
Poisson Oranı	0.75	0.09 ve 0.33	0.05	0.1	0.08	0.05-0.2	0.5

2.1.5.2.4. Yükleme Oranı Etkisi

EPS'in basınç davranışı, şekil değiştirme oranına bağlıdır (Negussey, 1997). Şekil değiştirme oranı da, başlangıç elastisite modülü ve basınç dayanımı ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

2.1.5.2.5. Tekrarlı Yükleme

EPS bir çok durumda, trafik ve dinamik yükleri gibi tekrarlı yüklere maruz kalabilir. Yapılan arazi gözlemleri ve laboratuvar çalışmalarının bir çoğu, blok şeklindeki EPS'lerin tekrarlı yük davranışının, şekil değiştirmelerin yaklaşık olarak %1'den büyük olmaması şartıyla, lineer elastik olduğunu göstermiştir.

2.1.5.3. Çekme

EPS malzemesinin çekme dayanımı, ön genleştirme kalitesi tarafından etkilenebilmekte ve yoğunluğa bağlı olarak da artmaktadır (Horvath, 1995).

2.1.5.4. Eğilme

Eğilme dayanımı deneyleri, EPS üreten fabrikalarda kalite kontrol deneyi olarak kapsamlı bir şekilde yapılmaktadır. Malzeme kopmaya kadar lineer elastik olarak kabul edilerek, maksimum gerilme hesaplanmaktadır. Bu kabul doğru olmamasına rağmen, hesaplanan değerler kalite kontrolde kapsamlı olarak kullanılmaktadır. Eğilme dayanımı malzemenin yoğunluğunun artması ile artmaktadır (Tablo 30).

Tablo 30. EPS'in eğilme dayanımı (ASTM C578).

Yoğunluk (kg/m ³)	12	15	18	22	29
Minimum Eğilme Dayanımı (kPa)	70	173	208	276	345

2.1.5.5. Akma

EPS'e sabit bir gerilme uygulandığında, zamana bağlı olarak oluşan akmaya karşı direnci yoktur. EPS'in akma davranışını etkileyen bir çok parametre vardır. Bu parametrelerden biri olan yoğunluğun artması ile akma deformasyonları azalmaktadır (Sun, 1997).

2.1.5.6. Ara Yüzey Sürtünmesi

Sheeley (2000), büyük ve küçük numuneler üzerinde, EPS'in ara yüzey kesme davranışı konusunda kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Pratikte kullanılan değerler arasındaki normal gerilmeler kullanılmış ve farklı ara yüzler araştırılmıştır. EPS'in ara yüzey dayanımına, yoğunluğun etkisi ihmal edilmiştir. Kısa süreli suya maruz kalma durumunda ve pratikte kullanılan normal gerilme aralığında EPS'in, ıslak ve kuru ara yüzey dayanımları arasında fark olduğu saptanmıştır. Ayrıca yapılan araştırmalarda, EPS ve yerinde dökülen betonun ara yüzleri arasında güçlü bir bağ olduğu görülmüştür (Elragi, 2000).

2.1.5.7. Isıl Dayanım

EPS'in %98'i hava, %2'si de polistirenden oluşmaktadır (BSAF Corp., 1997). Malzemenin içinde hap solunan hava, ısı iletiminin zayıf olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle EPS, mükemmel bir ısı yalıtım malzemesidir. EPS levhalarının ısı iletkenliği hesap değeri 0.033 W/mK ile 0.040 W/mK arasında değişmektedir. Yoğunluğun azalması ile ısı iletkenliği de azalmaktadır. EPS üretiminde kullanılan şişirici gaz, hava ile çok hızlı bir şekilde yer değiştirdiğinden, bu malzemenin ısı iletkenliği, üretimi takiben nihai değerine ulaşmakta ve zamanla azalmamaktadır. Ayrıca, ısı iletkenliği ve ısı dayanım kullanım ömrü boyunca sabit kalmaktadır.

2.1.5.8. Ültraviyole Etkisi

EPS'in ultraviyoleye maruz kalması, yüzeyinin sararmasına neden olmakta ve pudra gibi bir yapı ortaya çıkmaktadır. Sheeley (2000), bu yeni yüzeyin, EPS levhaları arasındaki ara yüzey sürtünmeleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sonuç olarak ultraviyole parçalanmasının, EPS ve yerinde dökülen beton arasındaki uç ara yüzey dayanımını azalttığını tespit etmiştir.

2.1.5.9. Yanıcılık

EPS kolay alev alan bir malzeme olduğundan direkt olarak aleve maruz bırakılmamalıdır. Yanma sonucu karbon monoksit, karbondioksit, su ve is ortaya çıkmaktadır. Üreticiler üretim sırasında yanmayı geciktirici katkı malzemesi kullanabilmektedirler. Polistirenin erime sıcaklığı 150°C'dir (Mandal, 1995).

2.1.5.10. Su Emme Oranı

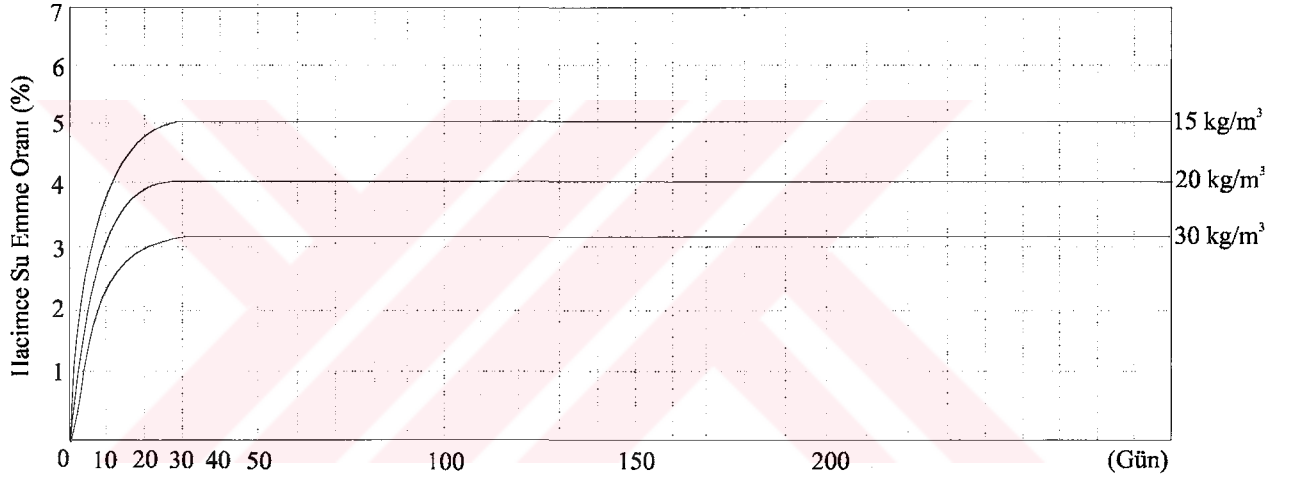
Malzemelerin su emme oranını etkileyen en önemli özelliği, gözeneklerin açık veya kapalı oluşudur. Malzeme direkt su ile temas ettirildiğinde gözenekler kapalı ise su emme oranı düşük olur. EPS'de kapalı gözenekli bir malzeme olduğundan su emme oranı düşüktür. Ayrıca bu malzemeyi oluşturan styrene, suda erime ve çözülme özelliğine sahip olmadığından kapalı gözeneklerinin duvarları suyu geçirmemektedir. Bu nedenle su ile temas etse bile özellikleri değişmez. Kapalı gözenekler içeren daneler, birbirine iyi kaynayıp yapışmamışsa, aradaki boşluklar bir miktar suyu sızdırabilir. Daneler birbirine iyi bir şekilde kaydığı zaman, yüzeyde bal peteği yapı, sürekli bir şekilde görülür ve malzemenin hacimce su emme oranı %1'in altına düşer. Ayrıca su emme oranı yoğunluğun artması ile azalmaktadır.

Farklı yoğunluklardaki EPS levhalarının tamamen suya batırılması ile yapılan su emme deneyi sonuçları Şekil 97'de verilmektedir (PÜD, 2002). Bu çalışmada kullanılan 12 kg/m³ yoğunlukta EPS'in tamamen suya batırılması yapılan, 7 günlük su emme deneyi sonucunda, malzememizin hacimce su emme oranı % 4.9 olarak tespit edilmiştir.

Binalarda kullanılan EPS'ler uzun süre suya batık bir şekilde kullanılmadığından, pratik olarak su almaz diye nitelendirilebilir.

2.1.5.11. Enerji Absorpsiyonu

EPS, enerji absorpsiyonu özelliği sayesinde paketlemede kullanılmaktadır. EPS'in Şekil 95'de gösterilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinden, malzeme tarafından absorbe edilen şekil değiştirme enerjisini gösteren eğri altındaki alanın, yoğunluğun artmasıyla arttığı görülmektedir.



Şekil 97. Farklı yoğunluklardaki EPS levhaların tamamen suya batırılmış durumda su emme oranlarının zamanla değişimi (PÜD, 2002).

2.1.5.12. Akustik Özellikler

EPS, diğer inşaat malzemeleri ile birlikte kullanıldığında, bölünmüş duvarlar, tavanlar ve döşemeler vasıtasıyla havadan gelen seslerin iletilmesini azaltmaktadır (Huntsman, 1999).

2.1.5.13. Dayanıklılık

EPS'in, doğru yerde, doğru kalınlık ve yoğunlukta, yapı fiziği ve inşaat kurallarına göre uygulandığı takdirde hem zeminde hem de inşaat sırasında dayanıklı olduğu kanıtlanmıştır (Elragi, 2000).

2.1.5.14. Çevresel Etki

EPS, polistiren danecikleri ve polistirenden yapıldığı için biyolojik bozunma özelliğine sahip değildir ve kimyasal olarak hem suda hem de zeminde hareketsizdir. Bu nedenle EPS, zemini veya zemin suyunu kirletmez. Buna ek olarak EPS, yiyecek kaplarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. EPS yandığında esas olarak karbon dioksit ve su açığa çıkar. Bu şekilde atmosfere karışan karbon dioksit miktarı, EPS levhalarının sağladığı ısı yalıtımı sonucu daha az yakıt tüketimi ile bir haftadan daha kısa bir sürede dengelenmektedir. EPS geri kazanılabilir bir malzemedir ve üretilen hacminin %5'i geri kazanılabilir. Sonuç olarak EPS geri kazanımı kolay, üretiminde yoğun enerji tüketmeyen ve sağladığı ekonomik ısı yalıtımı ile enerji kaynaklarının çok verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayan çevre dostu bir üründür.

2.2. Yanal Şişme Basınçlarının Ölçülmesi

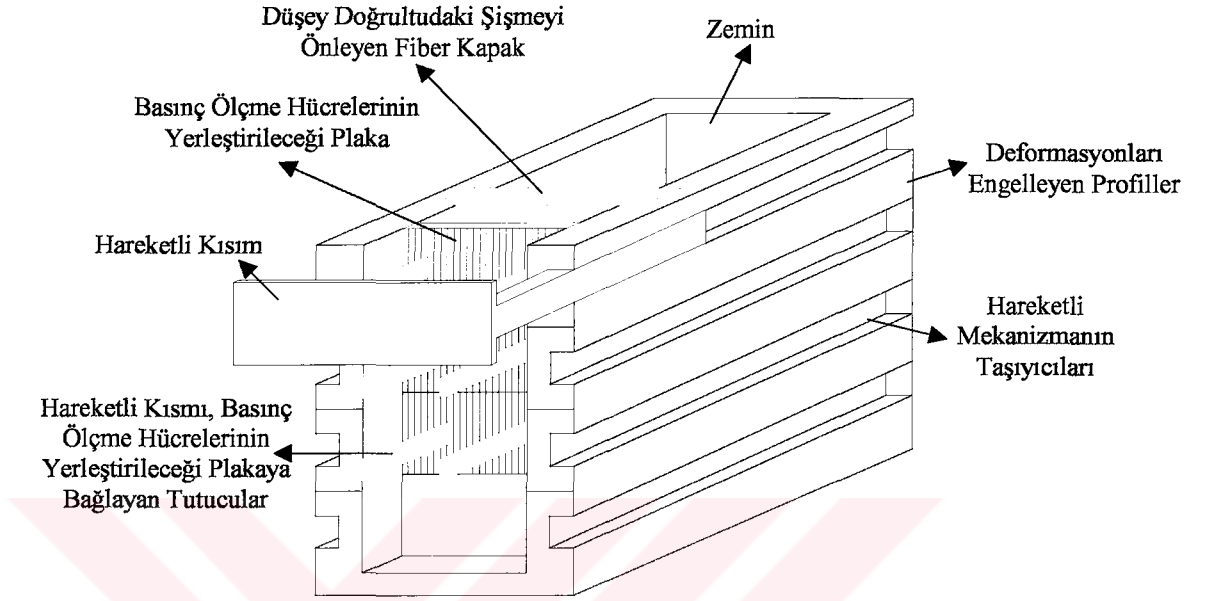
Bu çalışmada öncelikle problemlerin daha iyi anlaşılabilmesi ve çözümlenmesi için laboratuvar ortamında kontrol edilebilen ve arazideki şartları en iyi şekilde yansıtan bir deneysel model kurulmuştur. Modelin şematik gösterimi Şekil 98'de gösterilmektedir. Model yaklaşık olarak 150-105-20 cm. boyutlarında, dış cidarları 27 mm'lik fiber levhadan yapılmış bir kutu şeklinde olup, bu kutunun yan yüzleri deneyler esnasındaki deformasyonları önlemek amacı ile 40x60 profil ve 50x50 köşebentleri ile desteklenmiştir. Fiber levhanın birleşimi, kaynak silikon ve cıvatarlarla sağlanmıştır. Bu kutunun yan yüzünde 15 cm. yüksekliğinde ve 20 cm. eninde 7 adet fiber levha sıralanmaktadır. Plakaların ortasına 5 cm. çapında olan ve zemin basınçlarını ölçebilen basınç ölçme hücreleri (soil pressure transducer'ler) (KDE-PA modeli) yerleştirilmiştir. Bu levhalar zeminin şişmesiyle gerektiğinde birbirlerinden bağımsız, gerektiğinde de bir bütün olarak

hareket edebilecek şekilde dizayn edilmiştir. Hareketli mekanizmanın taşıyıcıları 40x30 profillerden, bilye tutucuları 60x20 ST'li çelik lamalardan, yürütme bilyeleri makaralı rulmanlardan, hareketi sağlayan tekerlekleri de ST 60 çelikten yapılmıştır. Düzeneğin hareket etmesi için ikisi sabit (tek yönde), ikisi de döner (her yöne) olmak üzere 4 adet tekerlek kullanılmıştır. Ayrıca terazileme de 4 adet ayar civatası ile yapılmıştır (Şekil 99).

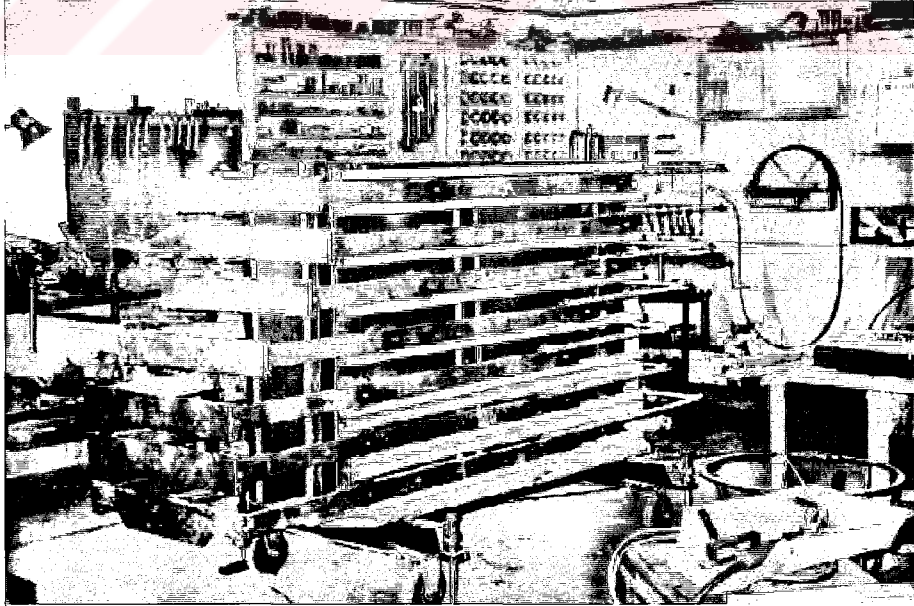
İstinat duvarının yan yüzünde yer alan ve her biri 15 cm. yüksekliğindeki 7 adet fiber levha, gerektiğinde birbirinden bağımsız hareket edebilmeleri için aralarında 0.5 cm. boşluk kalacak şekilde dizayn edilmiştir. Şişme probleminin önemli boyutlara ulaştığı yol, havaalanı kaplamaları ve istinat duvarı arkasında genellikle sıkıştırılmış zeminler kullanıldığından, Gümüşhane'nin Şiran yöresinden alınan Şiran-2 kili istinat duvarı modelinin içine tabaka tabaka serilip sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Zeminin su muhtevasını artırmak için, zemine yan cidarları delikli olan çok ince çelik borular yerleştirilmiş ve bu borular deney süresince sabit su düzeyli bir su tankı ile beslenmek üzere tanka bağlanmıştır. Modele su verildiğinde, yan yüzde basınç hücrelerinin bulunduğu fiber levhalar arasındaki 0.5 cm. civarındaki boşluktan su çıkışının olduğu gözlenmiştir. Su çıkışının önlenememesi zeminin ıslanmasına engel olmasından dolayı, hareketli sistem iptal edilerek, yan yüze bütün bir kapak yaptırılmış ve basınç ölçme hücreleri bu kapağa yerleştirilmiştir. Su sızıntısını önlemek için de yandaki kapağın dört tarafı lastik conta ile geçilmiştir. Bu son durumda modelimizin iç boyutları 80*105*20 cm. olmuştur (Şekil 100, Şekil 101).

Su sızıntısı önlenen düzeneğin içine Şiran-2 kili, sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Zemine su verilmesi ile şişme başladığında, ölçülen şişme basınçlarının çok küçük olduğu görülmüştür. Basınç ölçme hücrelerimizin kapasitesi 500 kPa olduğundan, ölçülen bu basınçların çok sağlıklı olmayacağı düşünülerek, şişme basıncı ve serbest şişmesi daha yüksek olan bir zemin araştırılmış ve Karakaya Bentonit firmasında, şişme kapasitesi yüksek olan bir zemin (bentonit) bulunmuştur. Şiran'dan alınan zemin ile bentonitten şişme basıncı 500 kPa'ı geçmeyen belli bir yüzdeye sahip karışım elde edebilmek için, ödometre aletinde ASTM 4546'ya göre 10 adet şişme deneyi yapılmış ve bu deneyler sonucunda Şiran'dan alınan zeminin içine % 48 oranında bentonit eklenmesine karar verilmiştir. Bu orana göre hazırlanan % 9.38 başlangıç su muhtevastaki, 156 kg. karışık zemin istinat duvarı modelinin içine tabaka tabaka serilip sıkıştırılmıştır. Daha sonra zemine düzenli olarak su verilerek, basınç ölçme hücrelerinden belli aralıklarla okumalar alınmaya başlanmıştır (zeminin geçirimsizliği çok az olduğundan su alışı da çok yavaş

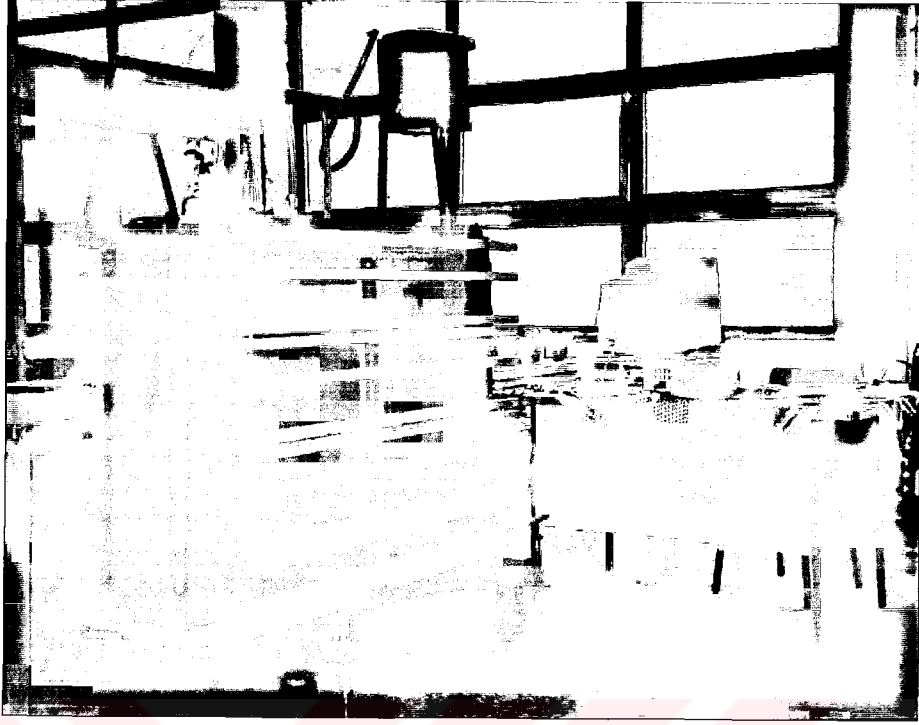
olmaktadır). 100 günlük okuma sonunda her bir basınç ölçme hücresinden (sensör) alınan okumaların zamana bağlı olarak değişimi Şekil 102’de verilmiştir



Şekil 98. İstinat duvarı modelinin şematik gösterimi



Şekil 99. İstinat duvarı modeli

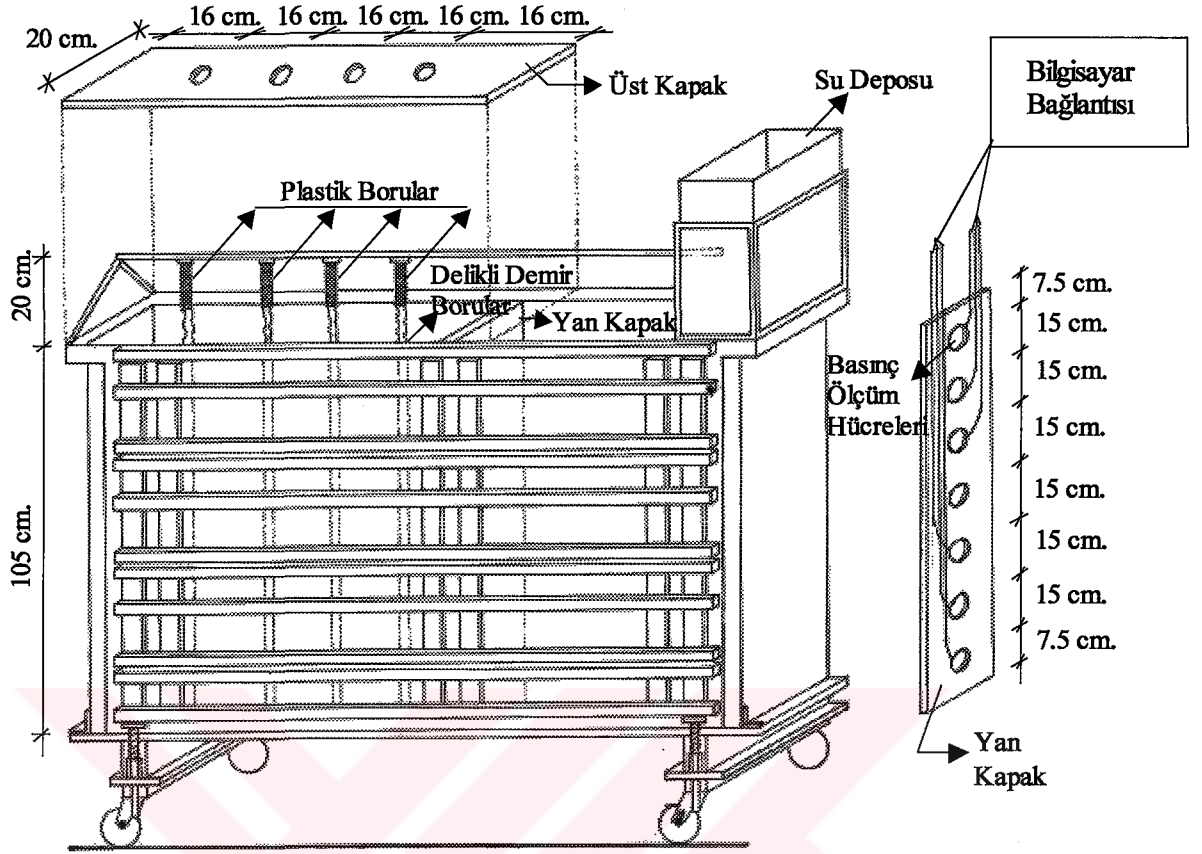


(a)



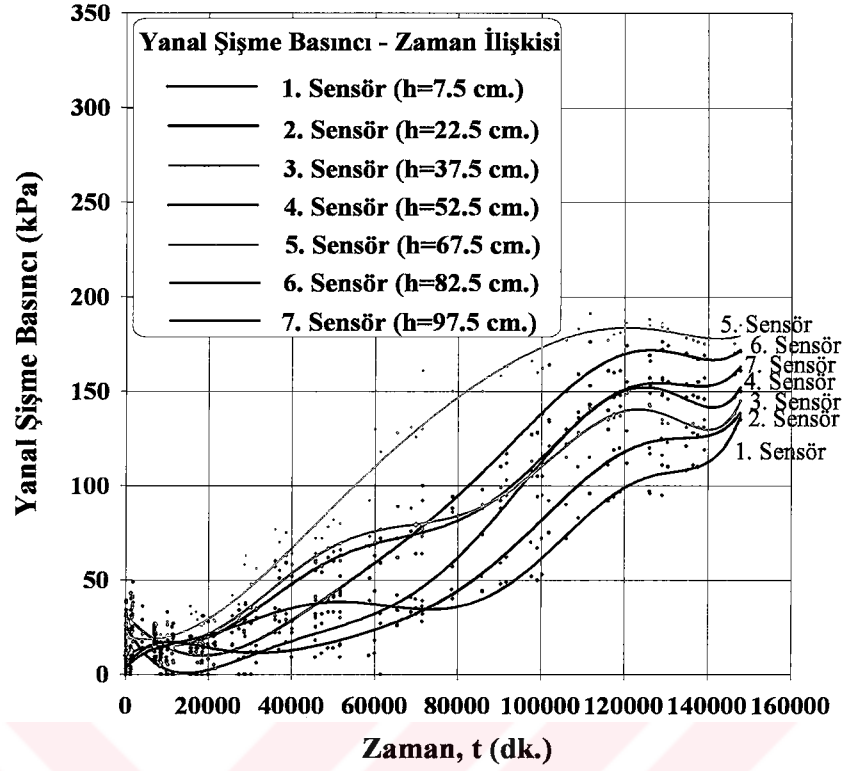
(b)

Şekil 100. İstinat duvarı modelinin son hali; (a) genel görünümü, (b) yandan görünümü

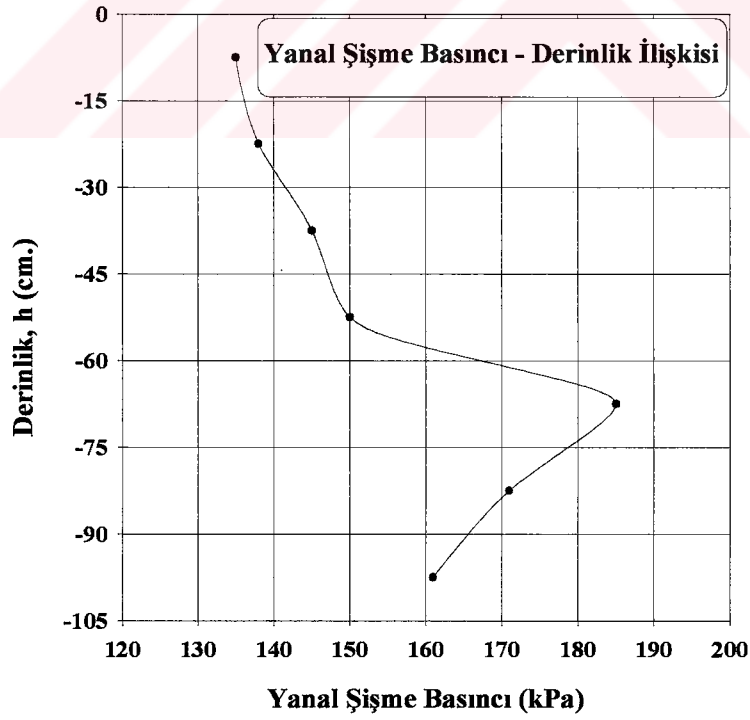


Şekil 101. İstinat duvarı modelinin yapım çizimi

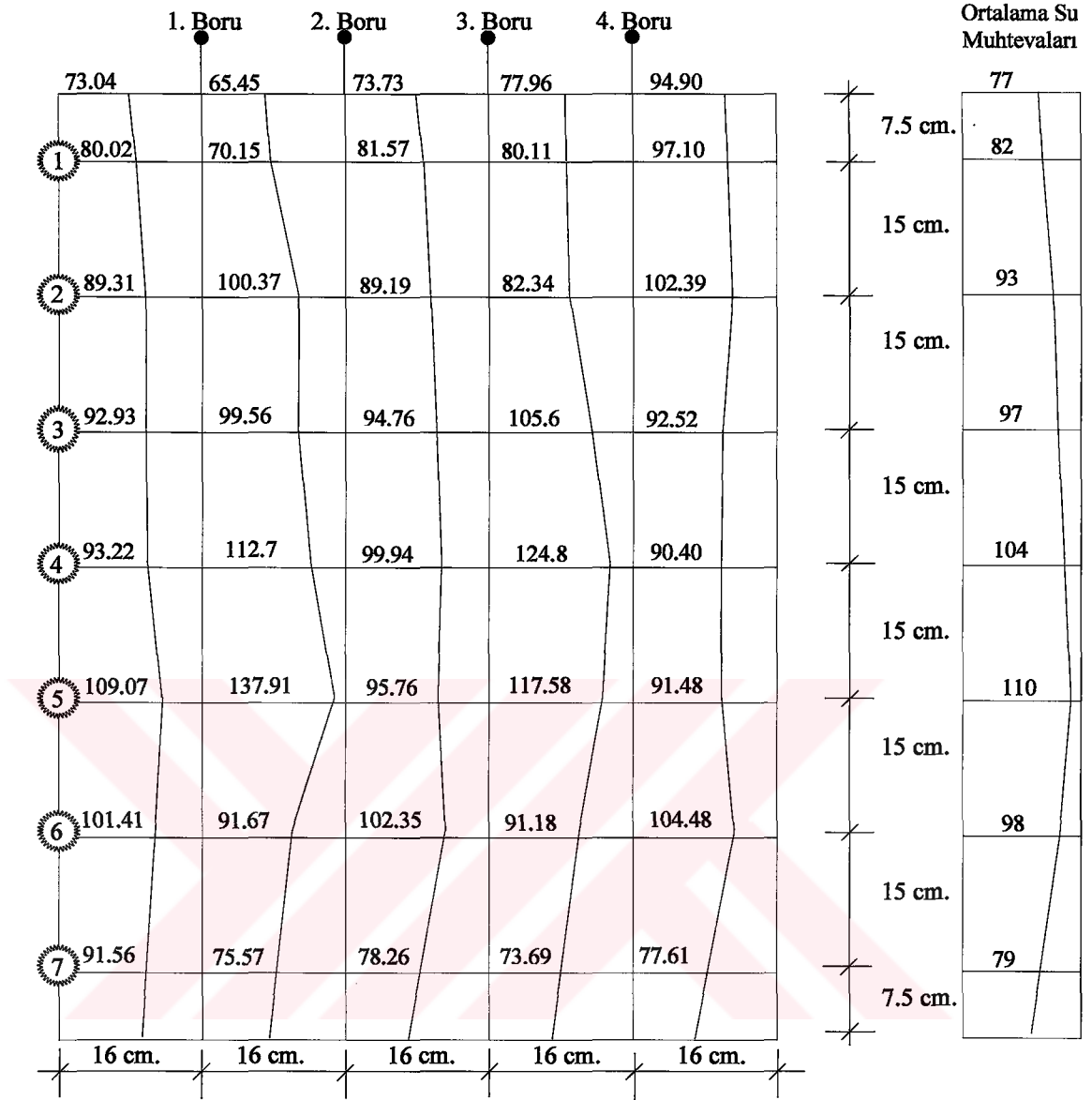
100 gün sonunda basınç ölçme hücrelerinden alınan okumalara göre çizilen yanal şişme basıncı-derinlik ilişkisi Şekil 103'de verildiği gibidir. Buradan da görüldüğü gibi $h=67.5$ cm.'ye kadar yanal şişme basınçları artmakta bu derinlikten sonra azalarak belli bir değere ulaşmaktadır. İstinat duvarı düzeneği, 100 gün sonunda boşaltılarak belli derinliklerden su muhtevasının tespit edilebilmesi için numuneler alınmıştır. Tespit edilen bu su muhtevası değerleri istinat duvarı modelinin kesiti üzerinde gösterilmiştir (Şekil 104). Belli bir derinlikten sonra yanal şişme basıncının azalması, bu derinlikten sonra su muhtevasının azalmasından kaynaklanmaktadır (zeminimizin geçirimsizliğinin düşük olmasından).



Şekil 102. Şişme basıncı- zaman ilişkisi



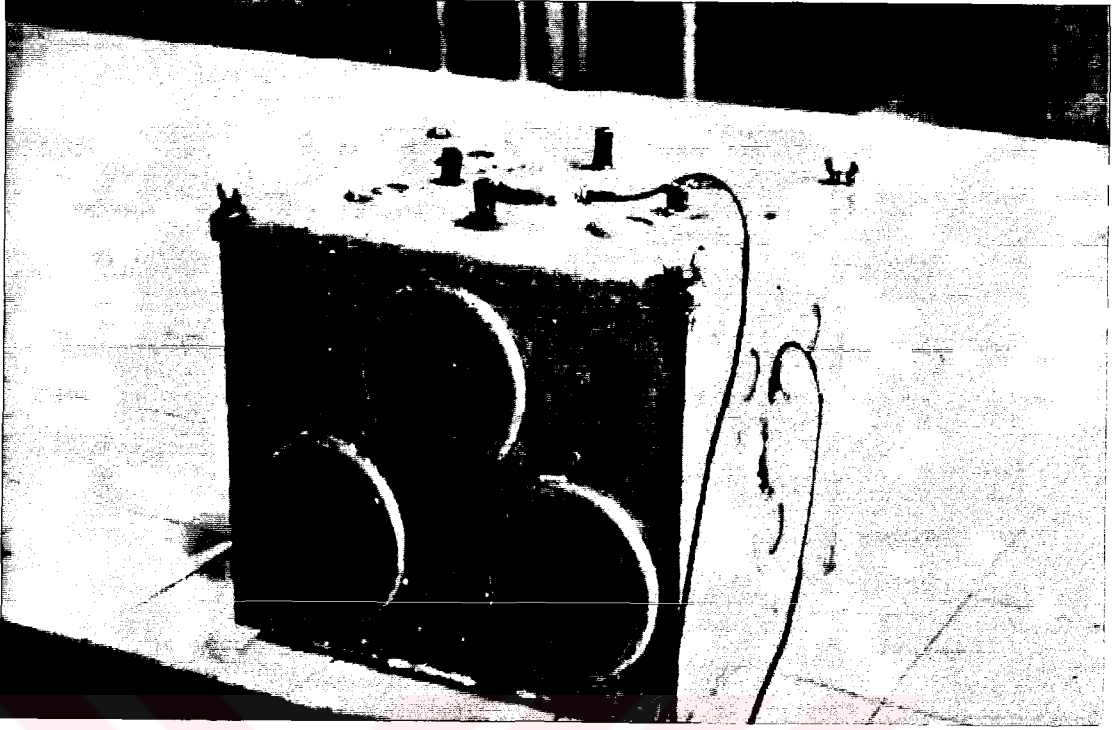
Şekil 103. Yanal şişme basıncı-derinlik ilişkisi



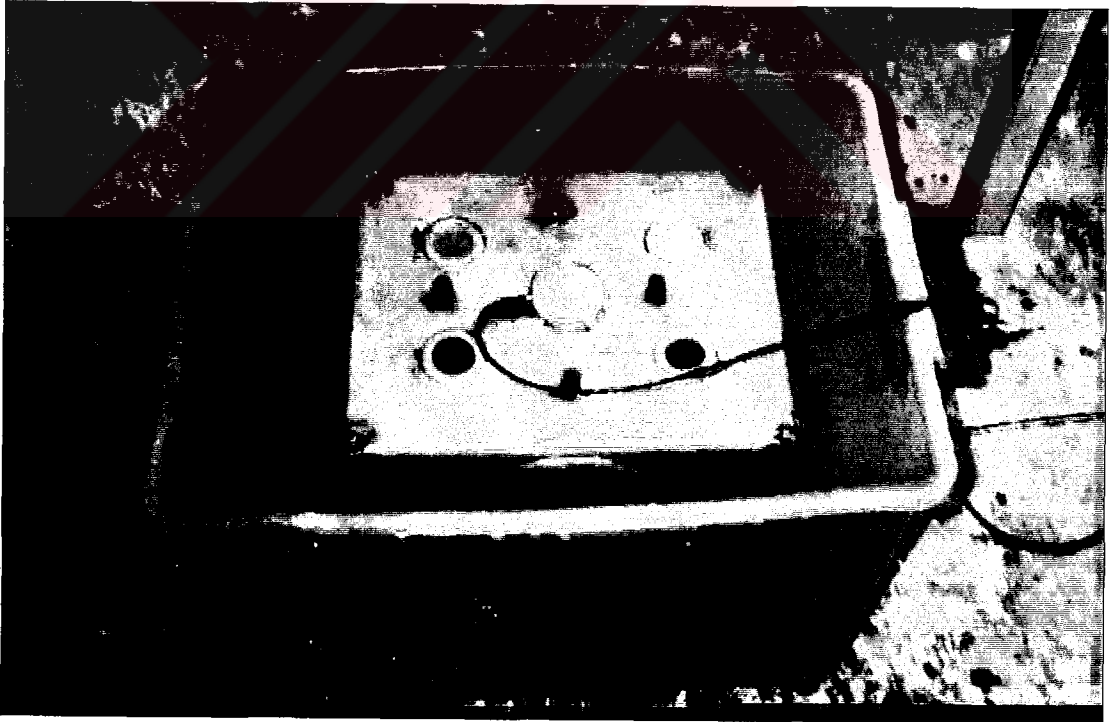
Şekil 104. İstinat duvarı düzeneğinin derinlik-su muhtevası ilişkisi

2.3. Yanal ve Düşey Şişme Basınçlarının Ölçülmesi

Büyük ölçekli olan istinat duvarı modelinin içerisine koyulan zeminin geçirimsizliği çok düşük olduğundan su alışı da yavaş olmakta, dolayısıyla deney süresi uzamaktadır. Bu amaçla 25*25*30 cm. boyutlarında daha küçük bir model yaptırılarak, bu modelin su alma hızı tespit edilmiş ve EPS ile yapılan deneyler bu modelde gerçekleştirilmiştir (Şekil 105, Şekil 106). Bu düzeneğin yan ve üst kısmına yanal ve düşey şişme basınçlarını ölçmek amacı ile birer adet basınç ölçme hücresi yerleştirilmiştir.



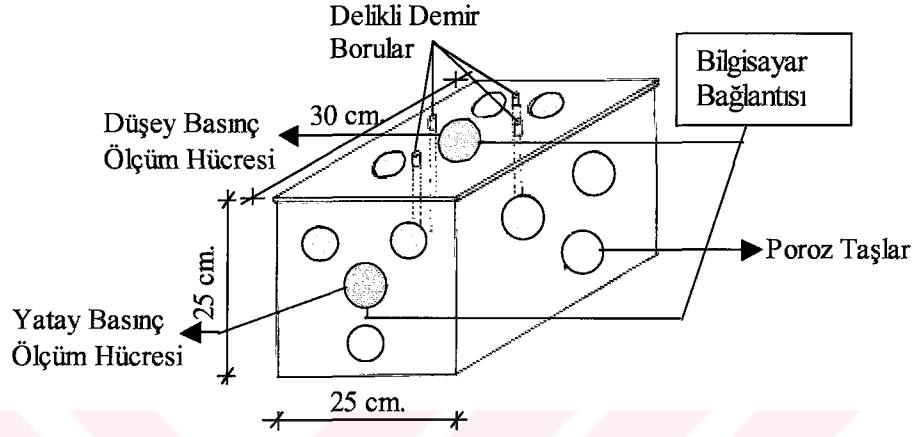
(a)



(b)

Şekil 105. Küçük deney düzeneği; (a) genel görünümü, (b) su içerisinde yerleştirilmiş düzeneğin üstten görünümü

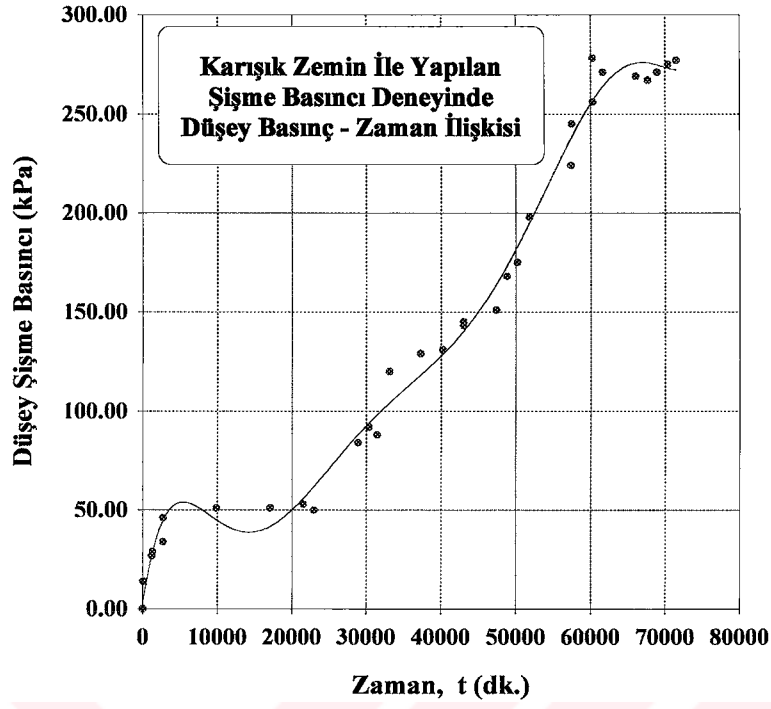
Karışık zemin numunesinin kısa bir süre içinde su alabilmesi için düzeneğin bütün yüzeylerine poroz taşlar yerleştirilmiş ayrıca zemine 4 adet yan cidarları delikli olan borular batırılmıştır. Düzeneğin içerisine tabaka tabaka serilip sıkıştırılan karışık zemin su dolu bir tankın içine yerleştirilerek daha çabuk su alması sağlanmıştır.



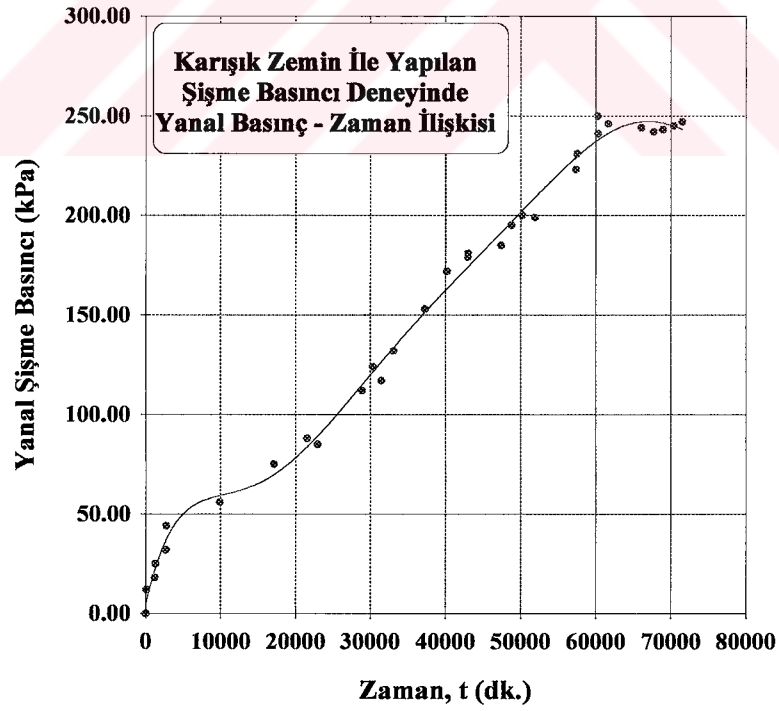
Şekil 106. Küçük deney düzeneğinin şematik çizimi

Bu düzenekte yapılan ilk deneyde karışık zemin kullanılmıştır. 43 gün sonunda yan ve üst kısımlardaki basınç ölçme hücrelerinden alınan okumalara göre çizilen grafikler Şekil 107, Şekil 108 ve Şekil 109'da görülmektedir.

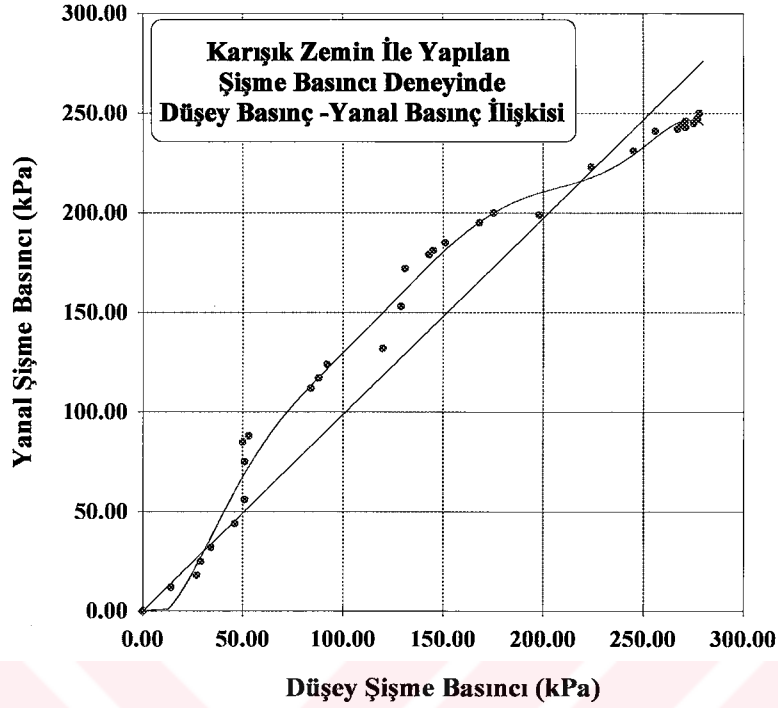
Şekil 107 ve Şekil 108'den de görüldüğü gibi karışık zeminle EPS kullanılmadan yapılan deneyde, şişme basıncı değerleri belli bir değere kadar yükselmekte, daha sonra da azalarak sabit bir değer almaktadır. Ayrıca yan ve düşey basınçlar arasında Şekil 109'daki gibi giderek artan eğrisel bir ilişki mevcuttur. Bu deney sonucunda, maksimum düşey basınç 277 kPa., maksimum yan basınç da 247 kPa olarak tespit edilmiştir. Yanal şişme basıncının düşey şişme basıncına oranından bulunan, yanal şişme basıncı katsayısı K_s , Şekil 109'da çizilen doğrunun eğiminden 0.98 olarak tespit edilmiştir. Burada düşey şişme basıncı yanal şişme basıncından daha büyük çıkmaktadır. Bu durumun, kilin şişme sırasında anizotropik bir davranış göstermesinden ve düzenek içerisine sıkıştırılarak yerleştirilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 107. Düsey şişme basıncı-zaman ilişkisi



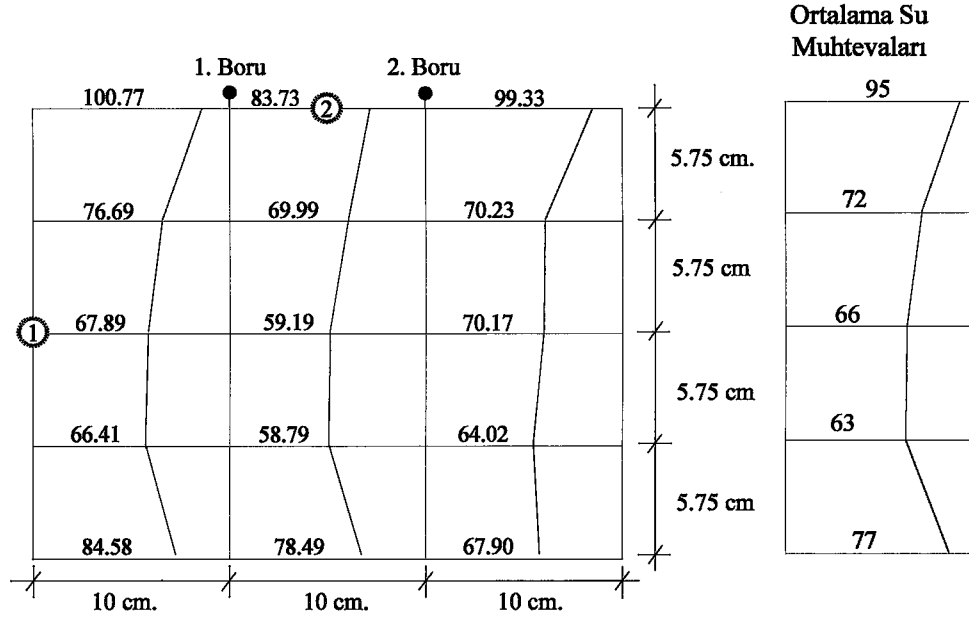
Şekil 108. Yanal şişme basıncı-zaman ilişkisi



Şekil 109. Düsey şişme basıncı-yanal şişme basıncı ilişkisi

Küçük deney düzeneği 43 gün sonunda boşaltılarak belli derinliklerden su muhtevasının tespit edilebilmesi için numuneler alınmıştır. Tespit edilen bu su muhtevası değerleri deney düzeneği kesiti üzerinde gösterilmiştir (Şekil 110).

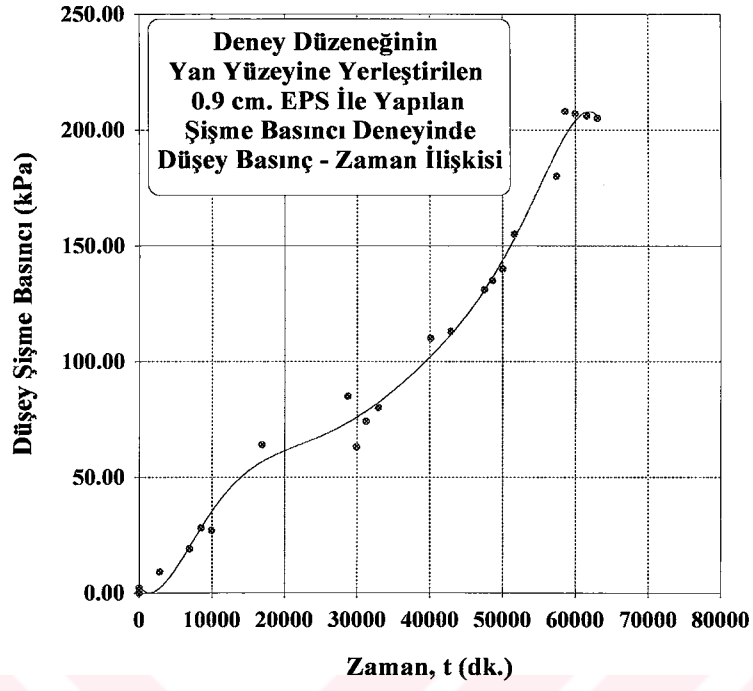
Bilindiği gibi hacim değişimine uğrayacak bir malzemenin serbestçe davranması engellendiğinde çok büyük gerilmeler ortaya çıkmaktadır. Fakat hacim değişimine kısmen müsaade edildiğinde bu gerilmelerin değeri hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu nedenle yer altı yapılarına ya da istinat duvarlarına gelen şişme basınçlarını azaltmak amacıyla, yapı ile zemin arasında değişik kalınlıklarda sıkışma kapasitesi yüksek bir malzeme olan EPS ve KŞZ koyularak, yapılara gelen şişme basınçlarındaki azalmalar tespit edilmiştir.



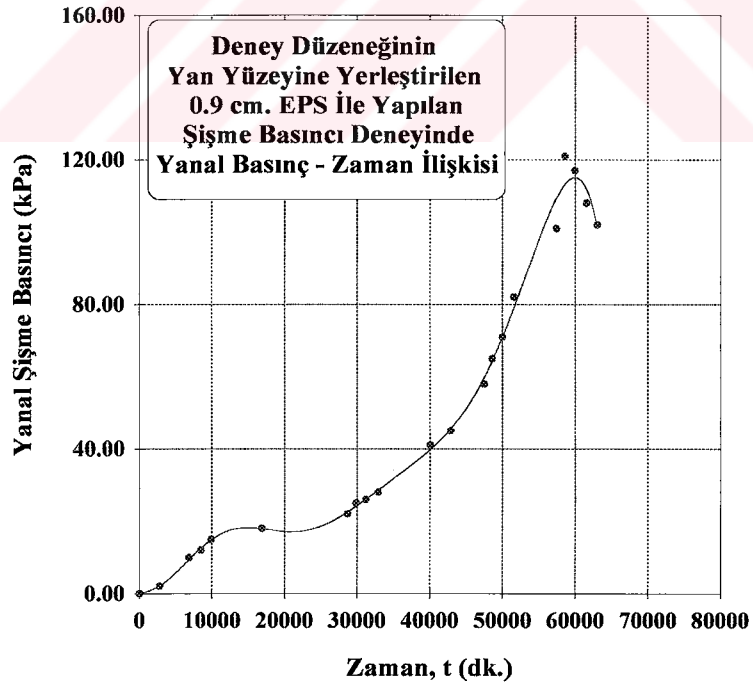
Şekil 110. Küçük deney düzeneğinin derinlik-su muhtevası ilişkisi

Yanal zemin basıncını azaltmak amacı ile öncelikle bu deney düzeneğinin yan yüzeyine 0.9 cm. kalınlığında ve 12 kg/m^3 yoğunluğunda EPS yerleştirilmiştir. 43 gün sonunda EPS'in kalınlığının ortalama olarak 0.65 cm.'ye indiği gözlenmiştir. Yan ve üst kısımlardaki basınç ölçme hücrelerinden alınan okumalara göre çizilen grafikler Şekil 111, Şekil 112 ve Şekil 113'de görülmektedir.

Şekil 111 ve Şekil 112'den de görüldüğü gibi karışık zeminle doldurulan küçük deney düzeneğinin yan yüzeyine yerleştirilen 0.9 cm.'lik EPS ile yapılan deneyde, şişme basıncı değerleri belli bir değere kadar yükselmekte, daha sonra da azalarak sabit bir değer almaktadır. Ayrıca yanal ve düşey basınç arasında Şekil 113'deki gibi giderek artan eğrisel bir ilişki mevcuttur. Bu deney sonucunda, düşey basınç 205 kPa., yanal basınç da 102 kPa olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü gibi deney düzeneğinin yan yüzüne yerleştirilen 0.9 cm.'lik EPS, düşey basıncı % 26, yanal basıncı da % 59 oranında azaltmaktadır. Yanal şişme basıncı katsayısı K_s , Şekil 113'de çizilen doğrunun eğiminden 0.50 olarak tespit edilmiştir. Bu deneyde de düşey şişme basıncı, yanal şişme basıncından daha büyük çıkmaktadır.

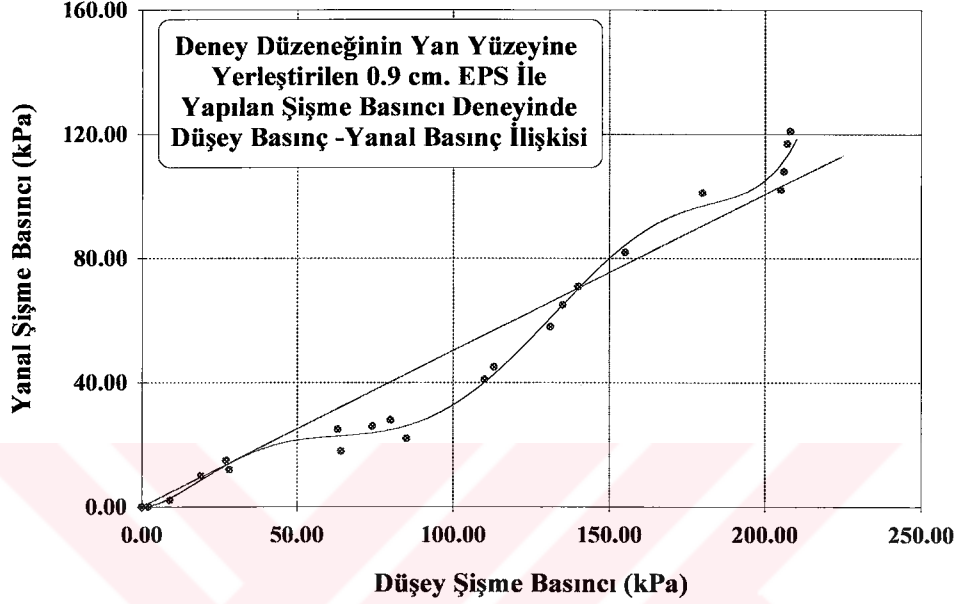


Şekil 111. Düşey şişme basıncı-zaman ilişkisi

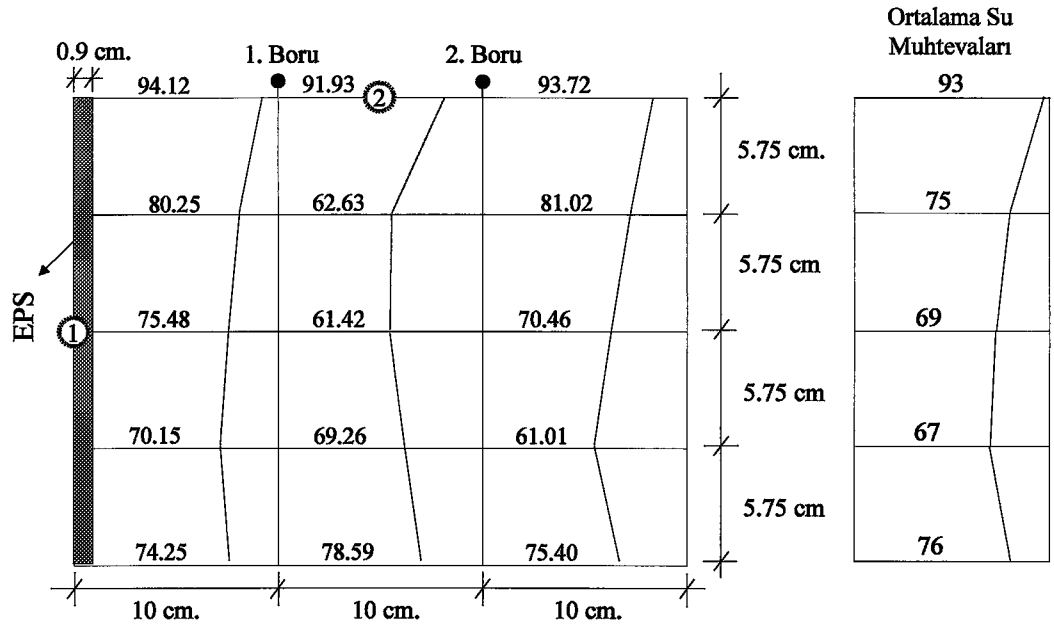


Şekil 112. Yanal şişme basıncı-zaman ilişkisi

Deney düzeneği 43 gün sonunda boşaltılarak belli derinliklerden su muhtevasının tespit edilebilmesi için numuneler alınmıştır. Tespit edilen bu su muhtevası değerleri deney düzeneği kesiti üzerinde gösterilmiştir (Şekil 114).



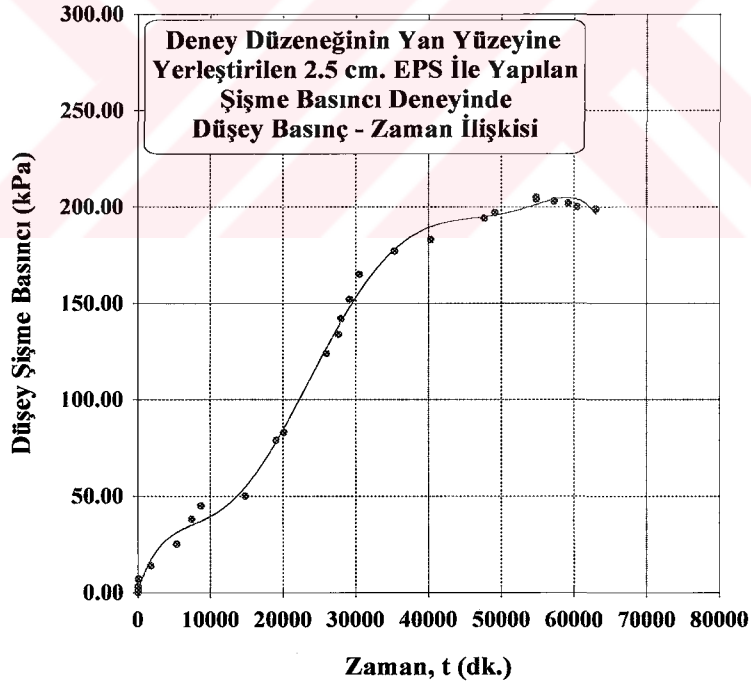
Şekil 113. Düşey şişme basıncı-yanal şişme basıncı ilişkisi



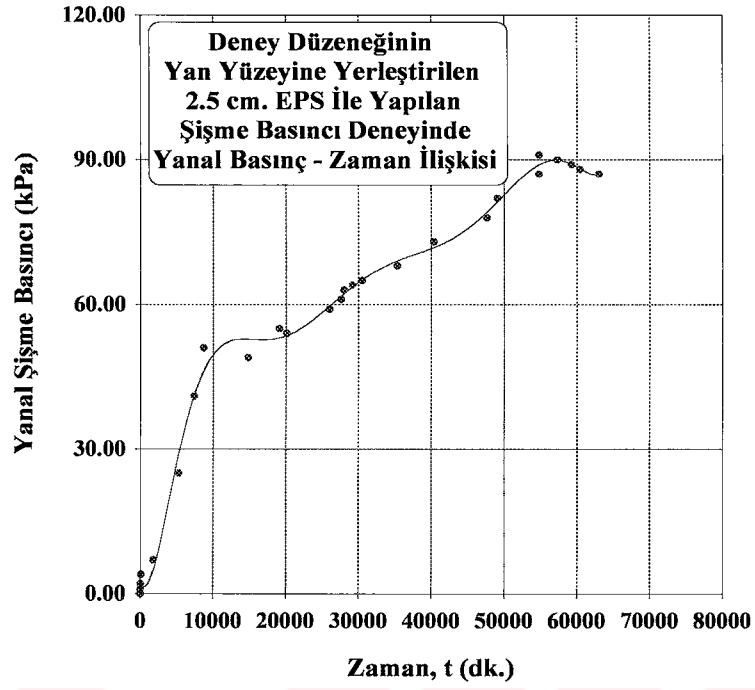
Şekil 114. Küçük deney düzeneğinin derinlik-su muhtevası ilişkisi (0.9 cm. EPS)

Daha sonraki deneyde, EPS kalınlığını artırarak, deney düzeneğinin yan tarafına 2.5 cm.'lik EPS yerleştirilmiş ve 43 gün sonunda EPS'in kalınlığının ortalama olarak 1.89 cm.'ye indiği gözlenmiştir. Yan ve üst kısımlardaki basınç ölçme hücrelerinden alınan okumalara göre çizilen grafikler Şekil 115, Şekil 116 ve Şekil 117'de görülmektedir.

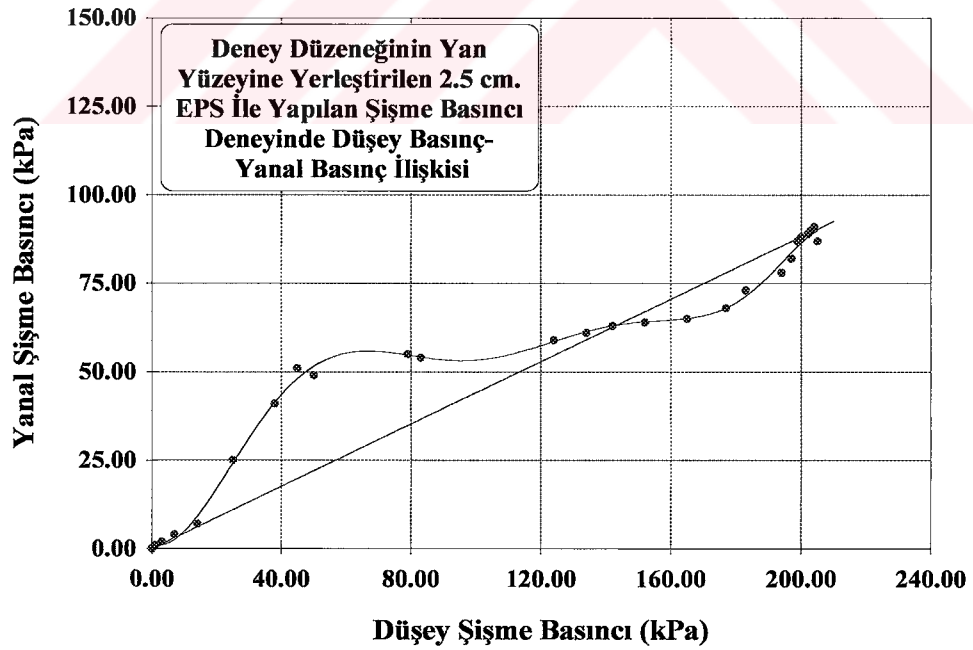
Şekil 115 ve Şekil 116'dan da görüldüğü gibi karışık zeminle doldurulan küçük deney düzeneğinin yan yüzeyine yerleştirilen 2.5 cm.'lik EPS ile yapılan deneyde, şişme basıncı değerleri belli bir değere kadar yükselmekte, daha sonra da azalarak sabit bir değer almaktadır. Ayrıca yanal ve düşey basınç arasında Şekil 117'deki gibi giderek artan eğrisel bir ilişki mevcuttur. Bu deney sonucunda, düşey basınç 199 kPa., yanal basınç da 87 kPa olarak tespit edilmiştir. Yanal şişme basıncı katsayısı K_s , Şekil 117'de çizilen doğrunun eğiminden 0.44 olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü gibi deney düzeneğinin yan yüzüne yerleştirilen 2.5 cm.'lik EPS, düşey basıncı % 28, yanal basıncı da % 65 oranında azaltmaktadır.



Şekil 115. Düşey şişme basıncı-zaman ilişkisi

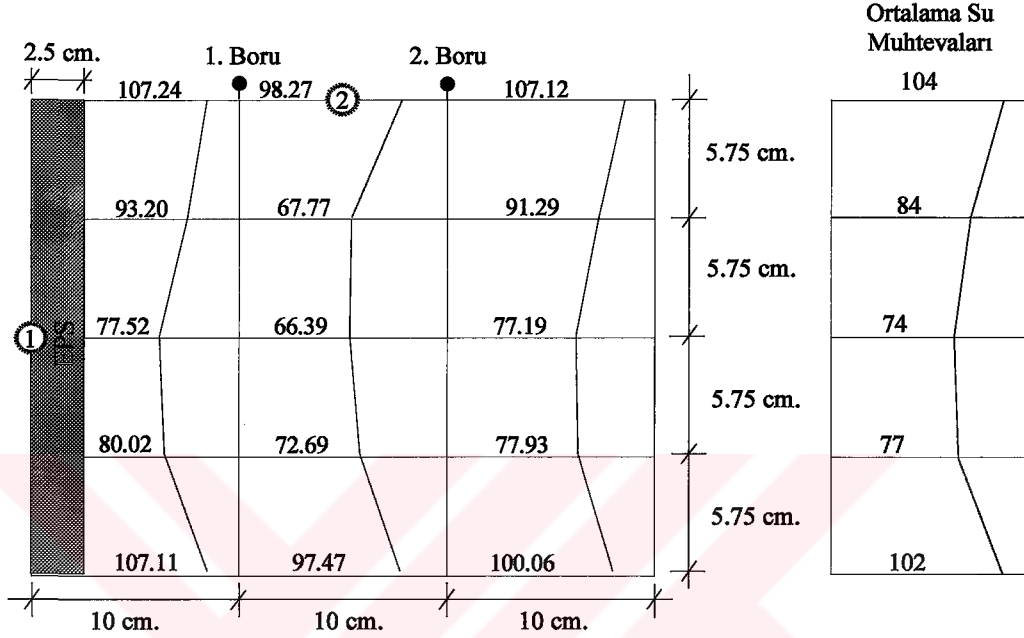


Şekil 116. Yanal şişme basıncı-zaman ilişkisi



Şekil 117. Düşey şişme basıncı-yanal şişme basıncı ilişkisi

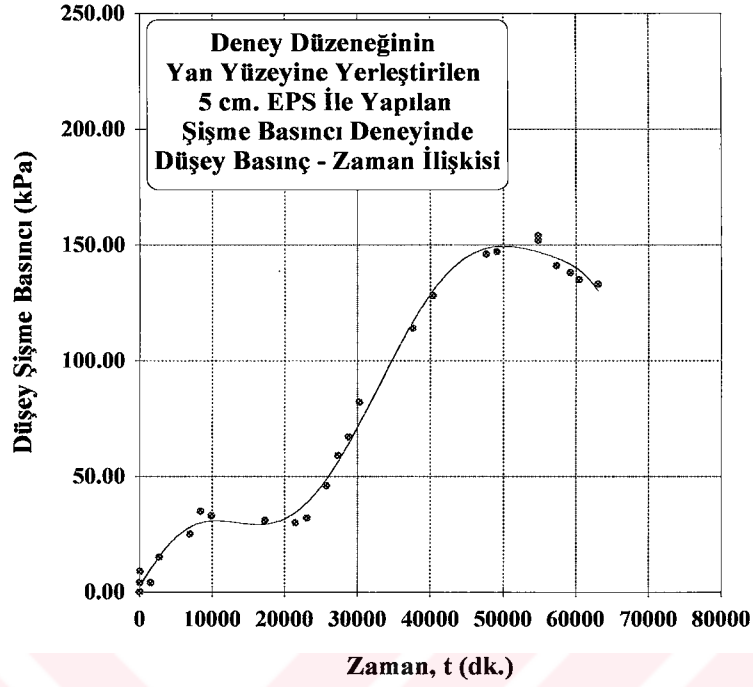
Deney düzeneği 43 gün sonunda boşaltılarak belli derinliklerden su muhtevasının tespit edilebilmesi için numuneler alınmıştır. Tespit edilen bu su muhtevası değerleri deney düzeneği kesiti üzerinde gösterilmiştir (Şekil 118).



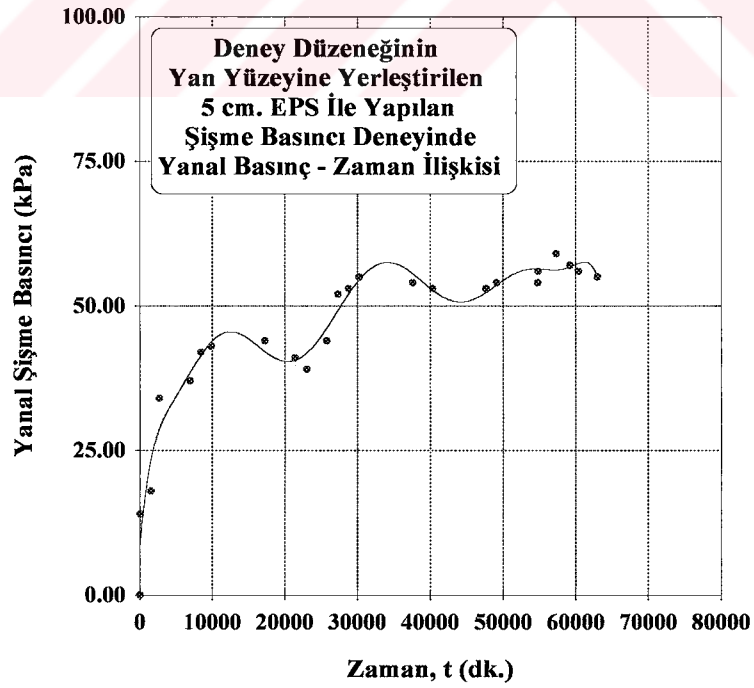
Şekil 118. Küçük deney düzeneğinin derinlik-su muhtevası ilişkisi (2.5 cm. EPS)

Dördüncü deneyde EPS kalınlığı biraz daha artırılarak, düzeneğin yan tarafına 5 cm.'lik EPS yerleştirilmiş ve 43 gün sonunda EPS'in kalınlığının ortalama olarak 3.75 cm.'ye indiği gözlenmiştir. Yan ve üst kısımlardaki basınç ölçme hücrelerinden alınan okumalara göre çizilen grafikler Şekil 119, Şekil 120 ve Şekil 121'de görülmektedir.

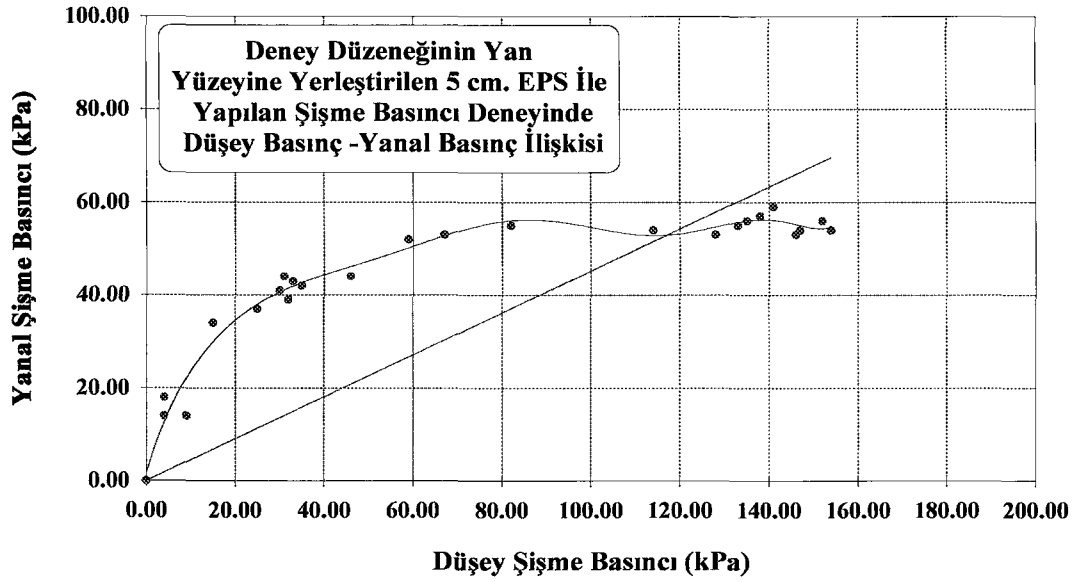
Şekil 119 ve Şekil 120'den de görüldüğü gibi karışık zeminle doldurulan küçük deney düzeneğinin yan yüzeyine yerleştirilen 5 cm.'lik EPS ile yapılan deneyde, şişme basıncı değerleri belli bir değere kadar yükselmekte, daha sonra da azalarak sabit bir değer almaktadır. Ayrıca yanal ve düşey basınç arasında Şekil 121'deki gibi giderek artan eğrisel bir ilişki mevcuttur. Bu deney sonucunda, düşey basınç 133 kPa., yanal basınç da 55 kPa olarak tespit edilmiştir. Yanal şişme basıncı katsayısı K_s , Şekil 121'de çizilen doğrunun eğiminden 0.45 olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü gibi deney düzeneğinin yan yüzüne yerleştirilen 5 cm.'lik EPS, düşey basıncı % 52, yanal basıncı da % 78 oranında azaltmaktadır.



Şekil 119. Düşey şişme basıncı-zaman ilişkisi

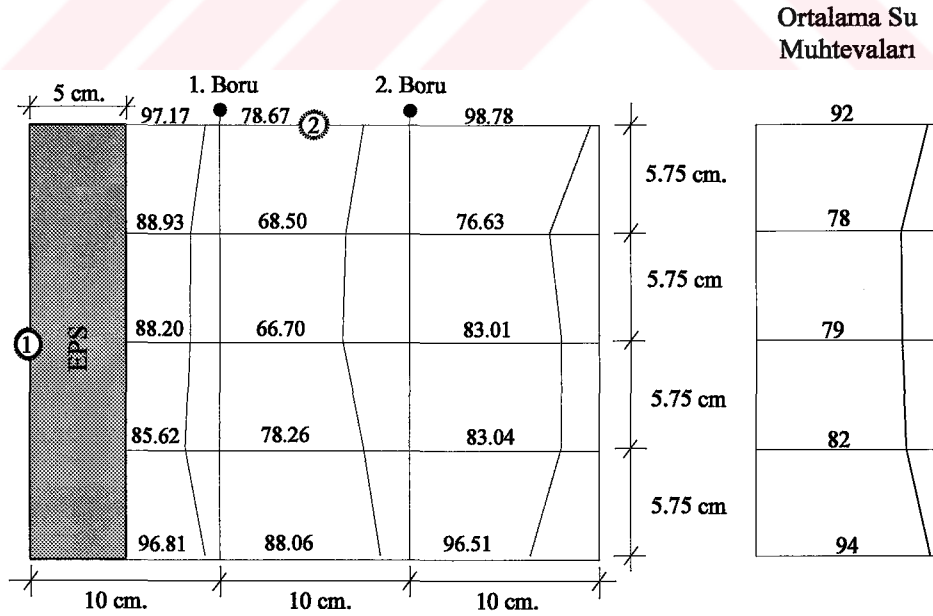


Şekil 120. Yanal şişme basıncı-zaman ilişkisi



Şekil 121. Düşey şişme basıncı-yanal şişme basıncı ilişkisi

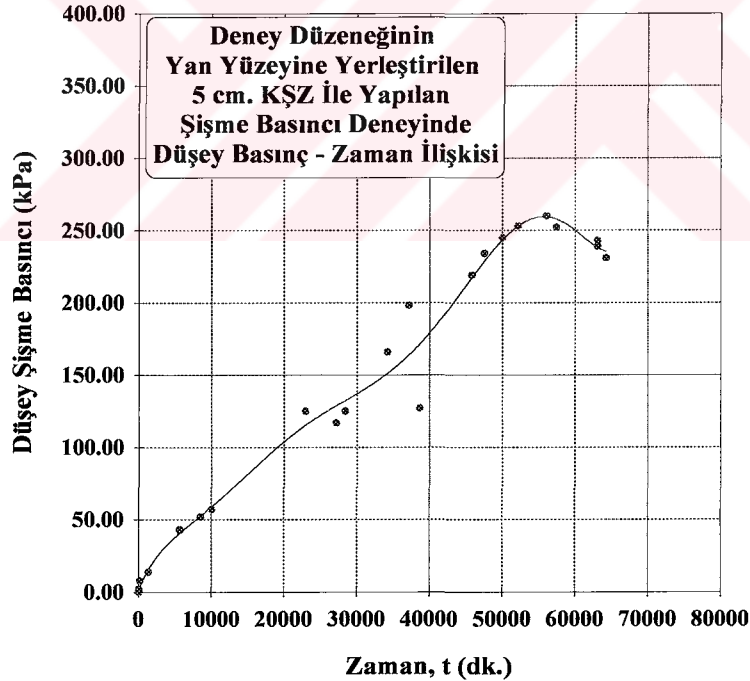
Deney düzeneği 43 gün sonunda boşaltılarak belli derinliklerden su muhtevasının tespit edilebilmesi için numuneler alınmıştır. Tespit edilen bu su muhtevası değerleri deney düzeneği kesiti üzerinde gösterilmiştir (Şekil 122).



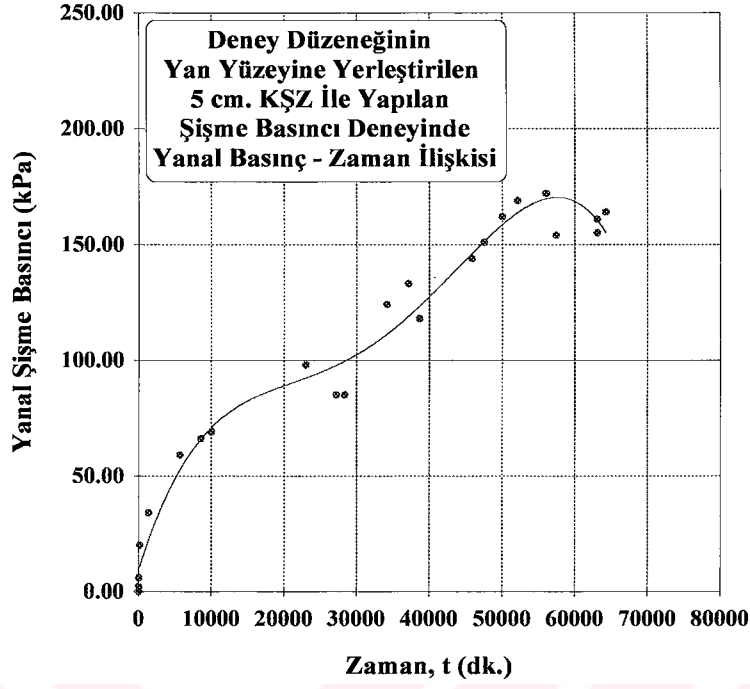
Şekil 122. Küçük deney düzeneğinin derinlik-su muhtevası ilişkisi (5 cm. EPS)

Son olarak yanal şişme basıncını azaltmak amacıyla, deney düzeneğinin yan yüzeyine 5 cm. kohezyonlu şişmeyen zemin yerleştirilmiş, yan ve üst kısımlardaki basınç ölçme hücrelerinden alınan okumalara göre çizilen grafikler de Şekil 123, Şekil 124 ve Şekil 125’de verilmiştir.

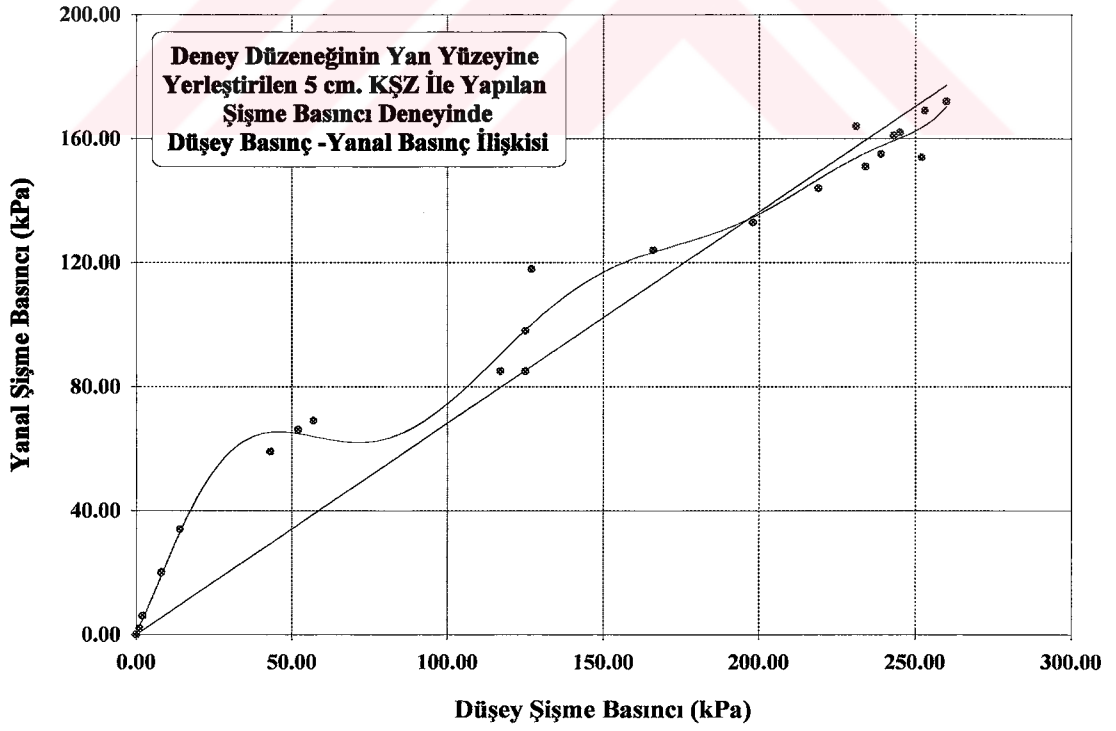
Şekil 123 ve Şekil 124’den de görüldüğü gibi karışık zeminle doldurulan küçük deney düzeneğinin yan yüzeyine yerleştirilen 5 cm.’lik KŞZ ile yapılan deneyde, şişme basıncı değerleri belli bir değere kadar yükselmekte, daha sonra da azalarak sabit bir değer almaktadır. Ayrıca yanal ve düşey basınç arasında Şekil 125’deki gibi giderek artan eğrisel bir ilişki mevcuttur. Bu deney sonucunda, düşey basınç 231 kPa., yanal basınç da 164 kPa olarak tespit edilmiştir. Yanal şişme basıncı katsayısı K_s , Şekil 125’de çizilen doğrunun eğiminden 0.68 olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü gibi deney düzeneğinin yan yüzüne yerleştirilen 5 cm.’lik KŞZ, düşey basıncı % 17, yanal basıncı da % 34 oranında azaltmaktadır.



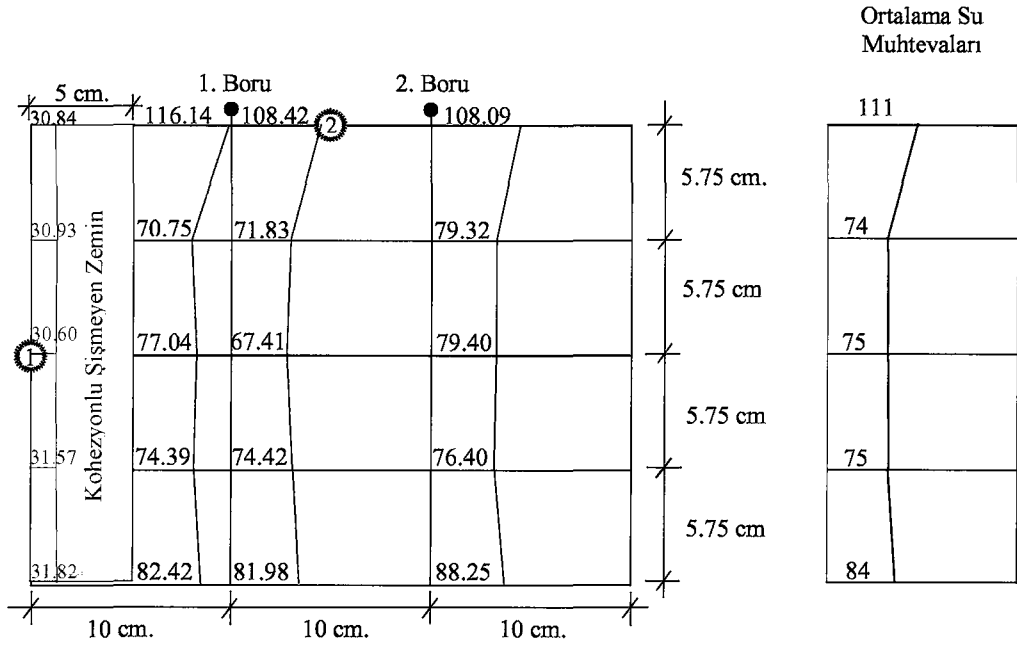
Şekil 123. Düşey şişme basıncı-zaman ilişkisi



Şekil 124. Yanal şişme basıncı-zaman ilişkisi



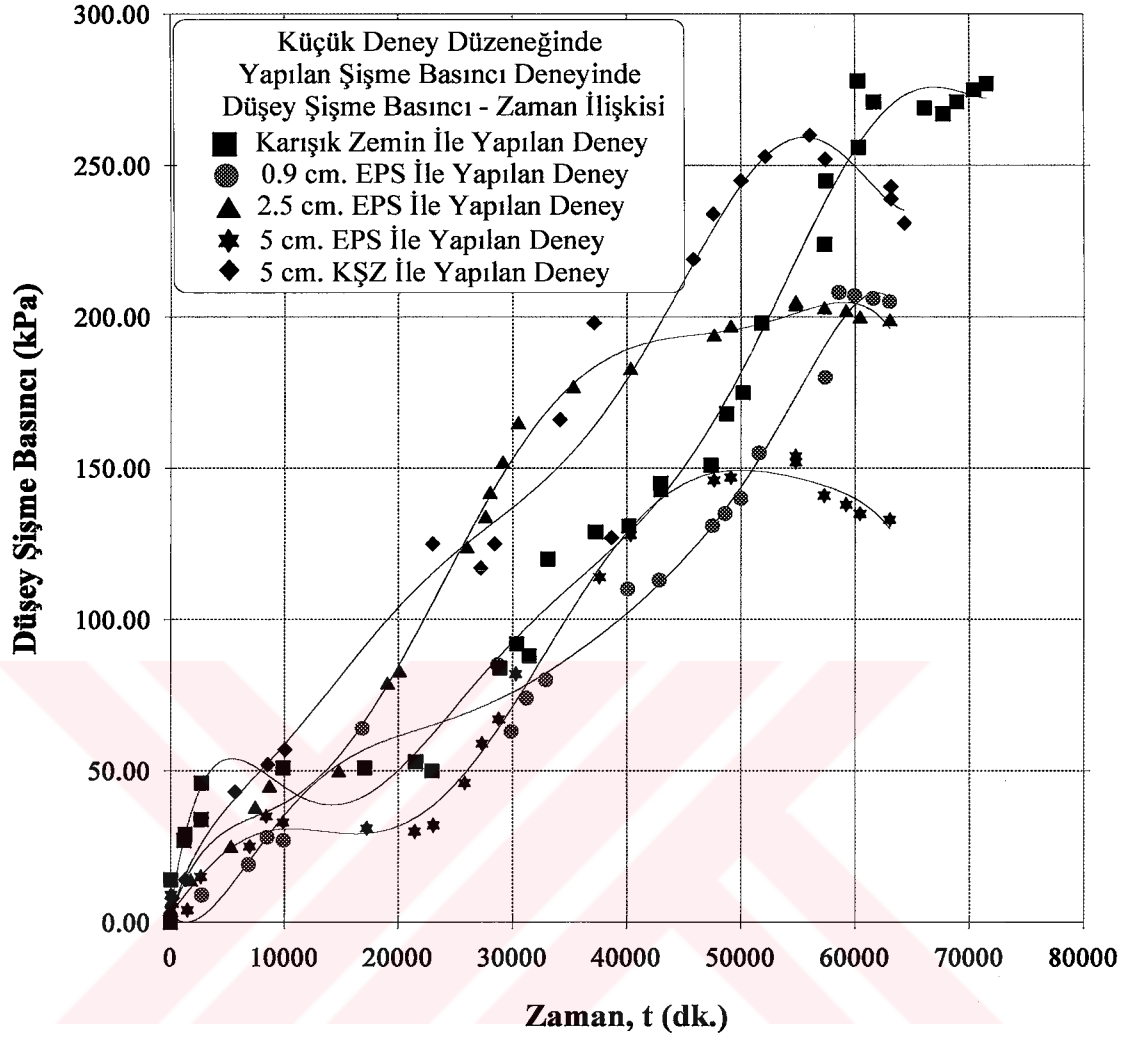
Şekil 125. Düşey şişme basıncı-yanal şişme basıncı ilişkisi



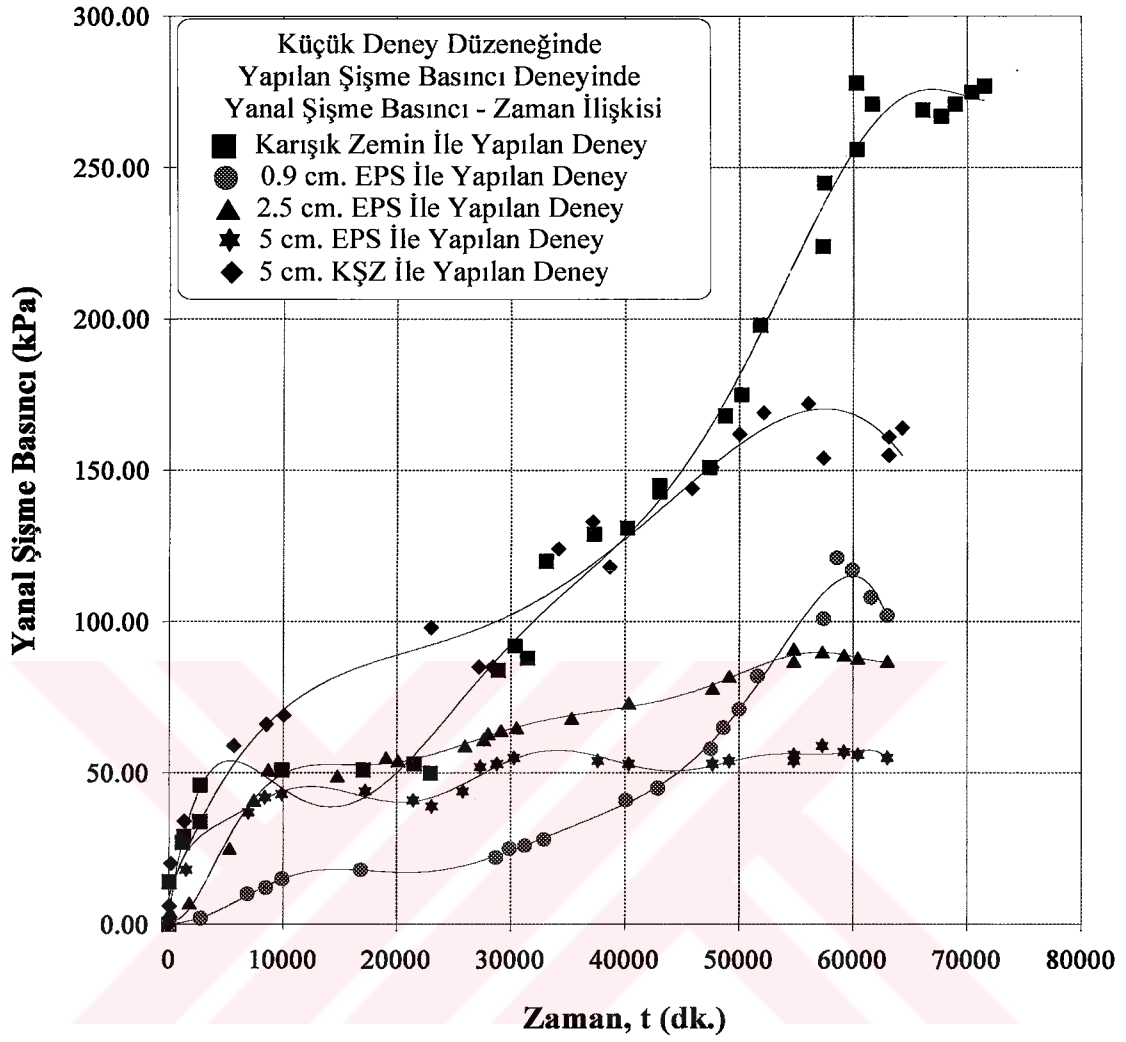
Şekil 126. Küçük deney düzeneğinin derinlik-su muhtevası ilişkisi (5 cm. KŞZ)

Küçük deney düzeneğinde EPS kullanılmadan, 0.9 cm., 2.5 cm. ve 5 cm. EPS ve 5cm. KŞZ ile yapılan deneylerde, düşey şişme basınçlarındaki zamanla değişim Şekil 127’de, yanal şişme basınçlarındaki zamanla değişim Şekil 128’de verilmektedir.

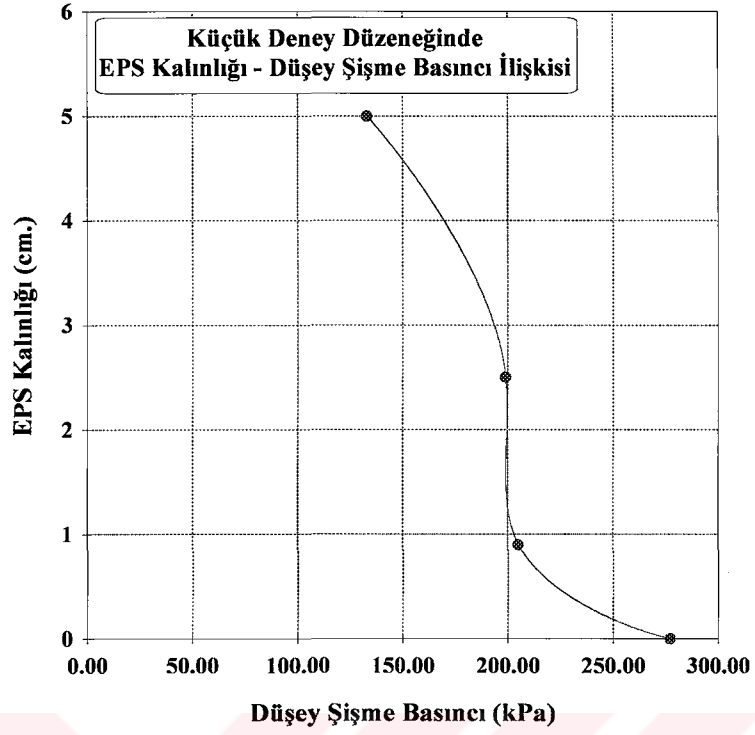
Küçük deney düzeneğinde EPS ile yapılan deneylerde EPS kalınlığı ile düşey şişme basıncı arasındaki ilişkisi Şekil 129’da, yanal şişme basıncı arasındaki ilişkisi de Şekil 130’da verilmiştir. Bu şekillerden, EPS kalınlığının artmasıyla, düşey ve yanal basınçlarının azaldığı gözlenmektedir. Ayrıca EPS kalınlığının, küçük deney düzeneğinin yüksekliğine oranı ile düşey şişme basıncı arasındaki ilişki Şekil 131’de, yanal şişme basıncı arasındaki ilişki de Şekil 132’de verilmiştir. d_{EPS}/H_T oranının artması ile yanal ve düşey şişme basınçları azalmaktadır.



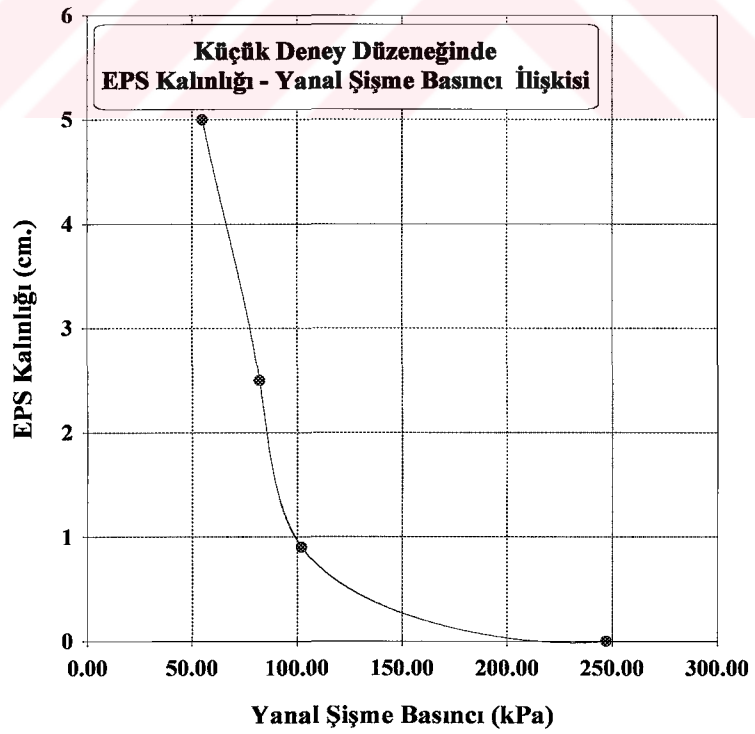
Şekil 127. Küçük deneysel düzeneğinde düşey şişme basınçlarının zamanla değişimi



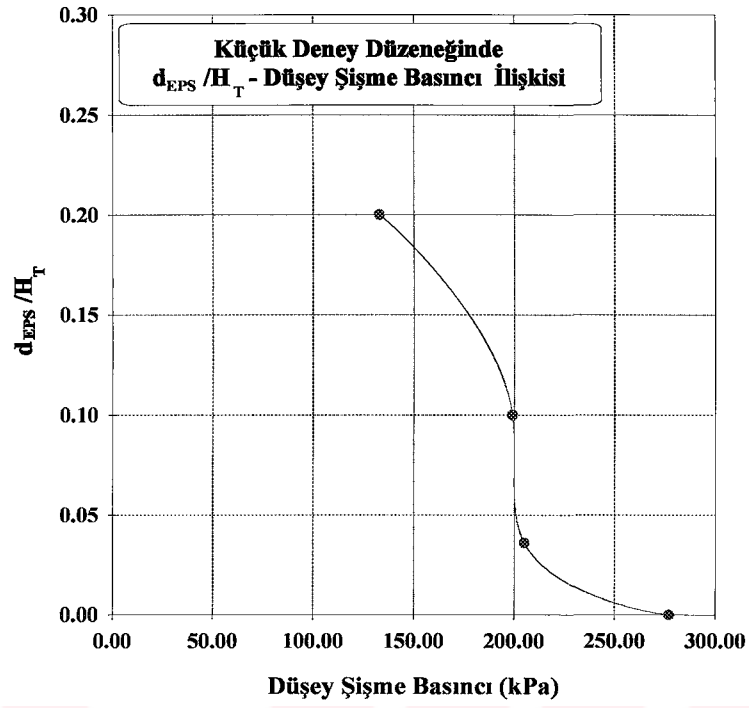
Şekil 128. Küçük deneş düzeneğinde yanal şişme basınçlarının zamanla değışimi



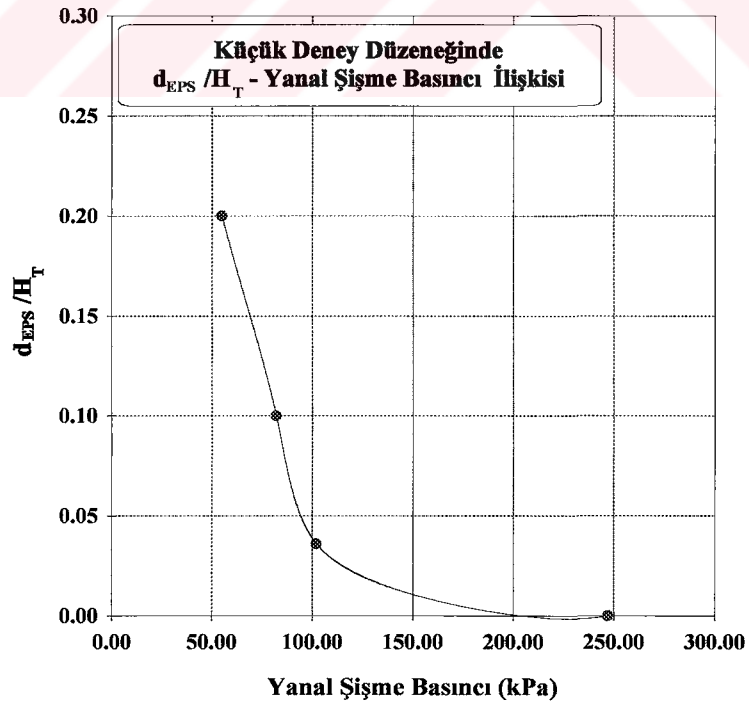
Şekil 129. Küçük deneý düzeneginde EPS kalınlığı ile düşey şişme basıncı ilişkisi



Şekil 130. Küçük deneý düzeneginde EPS kalınlığı ile yanıl şişme basıncı ilişkisi



Şekil 131. EPS kalınlığının, küçük deneş düzeneğinin yüksekliğine oranı ile düşey şişme basıncı arasındaki ilişki

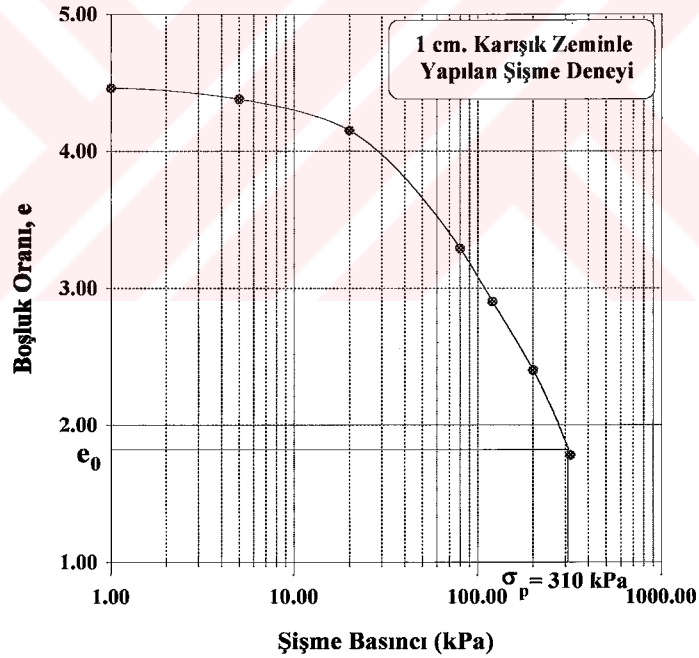


Şekil 132. EPS kalınlığının, küçük deneş düzeneğinin yüksekliğine oranı ile yanal şişme basıncı arasındaki ilişki

2.4. Düşey Şişme Basınçlarının Ölçülmesi

Çalışmanın bu aşamasında ödometre aletinde tespit edilen düşey şişme basınçlarını azaltmak amacı ile, küçük deney düzeneğinde olduğu gibi farklı kalınlıklarda ki EPS ve kohezyonlu şişmeyen zemin ile serbest şişme deneyleri ASTM 4546'daki gibi yapılarak, şişme basıncındaki azalmalar tespit edilmiştir.

Öncelikle ödometre aletinin içine optimum su muhtevasında sıkıştırılan 1 cm. karışık zemin yerleştirilerek 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılmış ve serbest şişmesi % 84.9 olarak tespit edilmiştir. Şişme potansiyelini belirlemek için de şişme tamamlandıktan sonra her basıncın sabit tutulduğu 5, 10, 20, 40, 80... kPa'lık düşey basınçlar numunenin başlangıç yükseklik değerine ulaşmaya kadar uygulanmıştır. Elde edilen bu verilerle e-log p eğrisi çizilerek şişme basıncı 310 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 133).

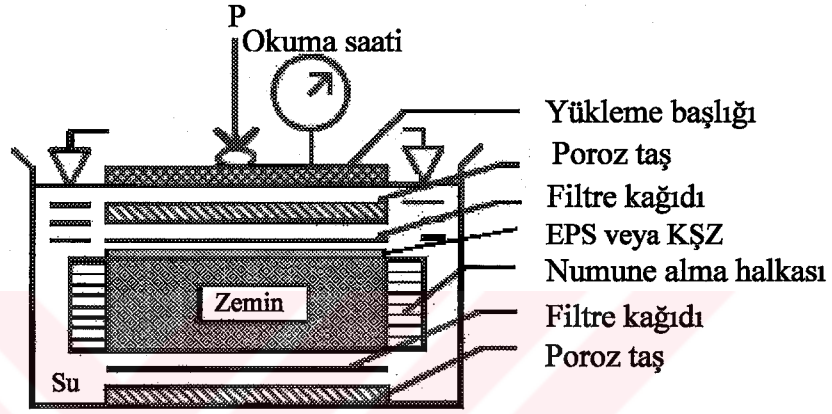


Şekil 133. 1 cm. karışık zeminin şişme basıncı grafiği

Çalışmada yapılan ikinci deneyde ödometre aleti içine serilen 1 cm. zeminin üzerine 0.43 cm. kalınlığında ve 12 kg/m^3 yoğunluğunda EPS yerleştirilerek 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılmış ve serbest şişmesi % 63.25 olarak tespit edilmiştir (Şekil 134).

Şişme potansiyelini belirlemek için de numune başlangıç yükseklik değerine ulaşıncaya kadar düşey basınç uygulanmıştır. Elde edilen bu verilerle e-log p eğrisi çizilerek şişme basıncı 267 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 135).

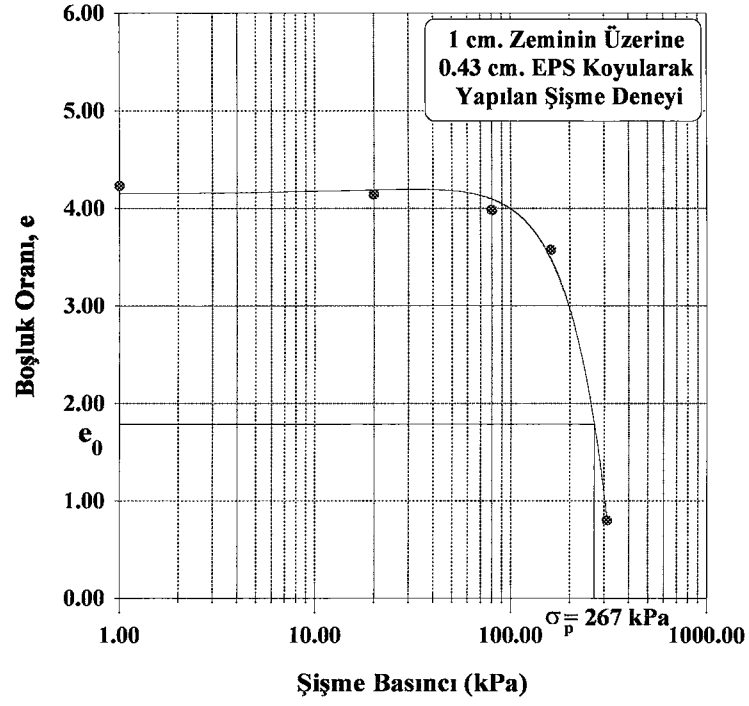
1 cm.'lik karışık zeminin üzerine 0.43 cm. EPS koyularak yapılan serbest şişme deneyinde EPS'in, serbest şişme değerini % 26, düşey şişme basıncını da % 13 oranında azalttığı tespit edilmiştir.



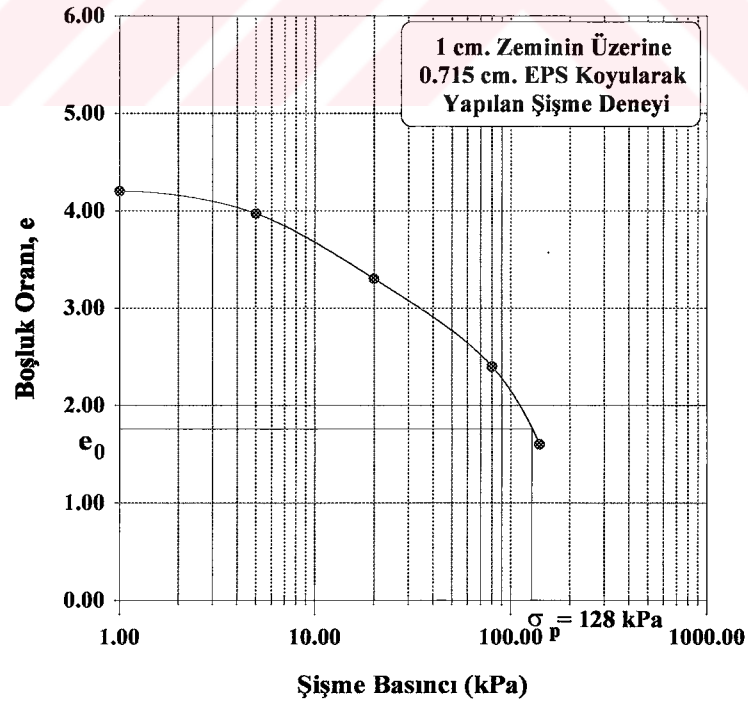
Şekil 134. EPS ile yapılan şişme deneyinde ki ödometre aletinin şematik gösterimi

Üçüncü deneyde ödometre aleti içine serilen 1 cm. zeminin üzerine 0.715 cm. kalınlığında ve 12 kg/m^3 yoğunluğunda EPS yerleştirilerek, 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılmış ve serbest şişmesi % 59.88 olarak tespit edilmiştir. Şişme potansiyelini belirlemek için de numuneye başlangıç yükseklik değerine ulaşıncaya kadar düşey basınç uygulanmıştır. Elde edilen bu verilerle e-log p eğrisi çizilerek, şişme basıncı 128 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 136).

1 cm.'lik karışık zeminin üzerine 0.715 cm. EPS koyularak yapılan serbest şişme deneyinde EPS'in, serbest şişme değerini % 29, düşey şişme basıncını da % 59 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

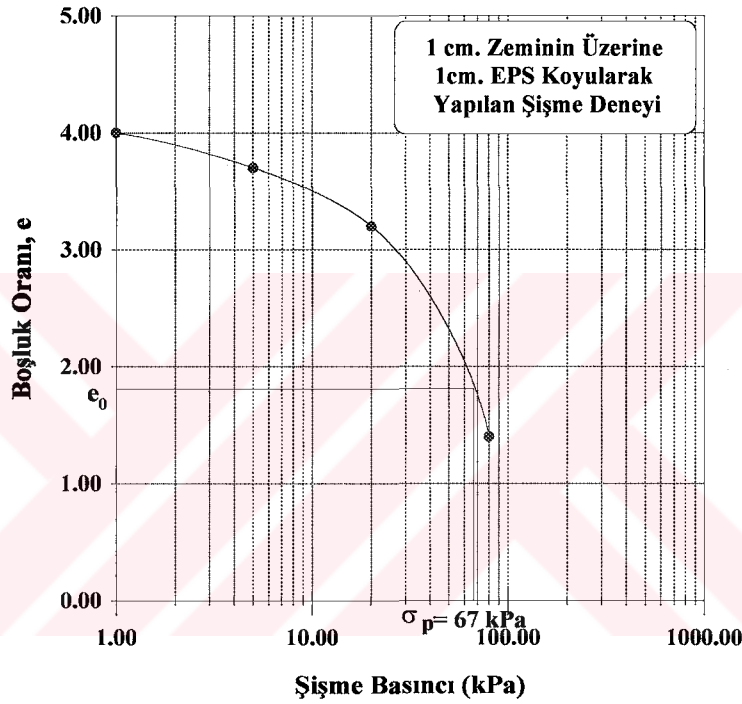


Şekil 135. 1 cm. karışık zeminin üzerine 0.43 cm. EPS koyularak yapılan şişme deneyinin şişme basıncı grafiği



Şekil 136. 1 cm. karışık zeminin üzerine 0.715 cm. EPS koyularak yapılan şişme deneyinin şişme basıncı grafiği

Dördüncü deneyde ödometre aleti içine serilen 1 cm. zeminin üzerine 1 cm. kalınlığında ve 12 kg/m^3 yoğunluğunda EPS yerleştirilerek, 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılmış ve serbest şişmesi % 46.65 olarak tespit edilmiştir. Şişme potansiyelini belirlemek için de numuneye başlangıç yükseklik değerine ulaşıncaya kadar düşey basınç uygulanmıştır. Elde edilen bu verilerle e-log p eğrisi çizilerek, şişme basıncı 67 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 137).



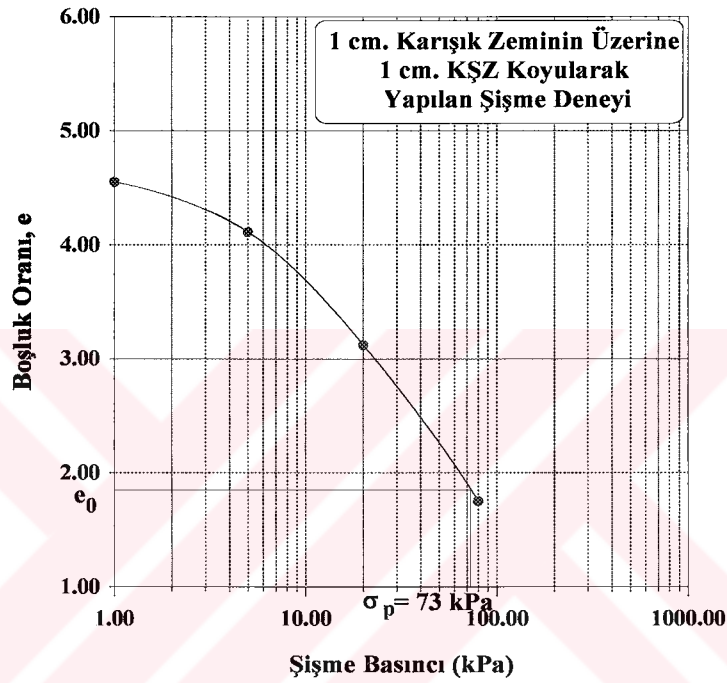
Şekil 137. 1 cm. karışık zeminin üzerine 1 cm. EPS koyularak yapılan şişme deneyinin şişme basıncı grafiği

1 cm.'lik karışık zeminin üzerine 1 cm. EPS koyularak yapılan serbest şişme deneyinde EPS'in, serbest şişme değerini % 45, düşey şişme basıncını da % 79 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Beşinci deneyde ödometre aleti içine serilen 1 cm. zeminin üzerine 1 cm. kalınlığında kohezyonlu şişmeyen zemin yerleştirilerek, 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılmış ve serbest şişmesi % 47.15 olarak tespit edilmiştir. Şişme potansiyelini belirlemek için de numuneye başlangıç yükseklik değerine ulaşıncaya kadar düşey basınç uygulanmıştır. Elde

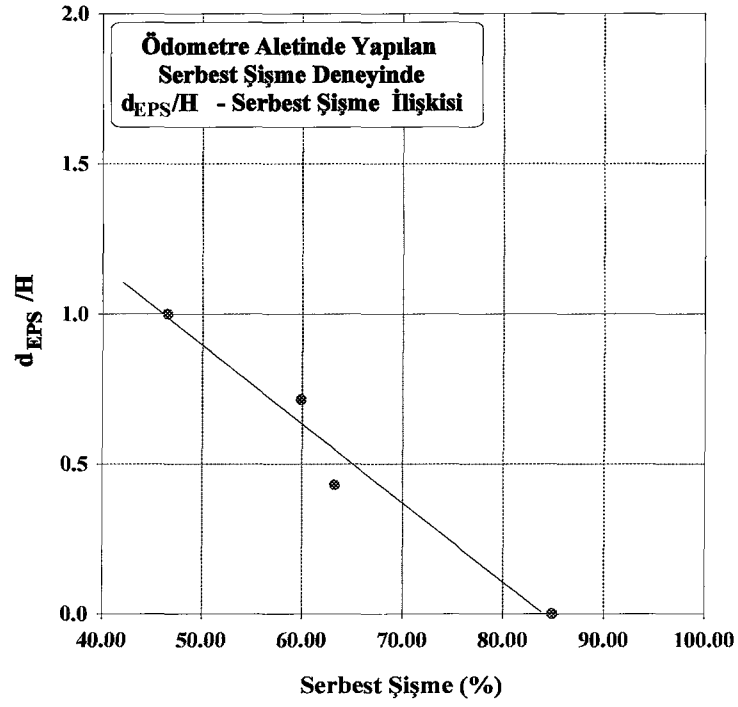
edilen bu verilerle e-log p eğrisi çizilerek, şişme basıncı 73 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 138).

1 cm.'lik karışık zeminin üzerine 1 cm. KŞZ koyularak yapılan serbest şişme deneyinde KŞZ'nin, serbest şişme değerini % 44, düşey şişme basıncını da % 76 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

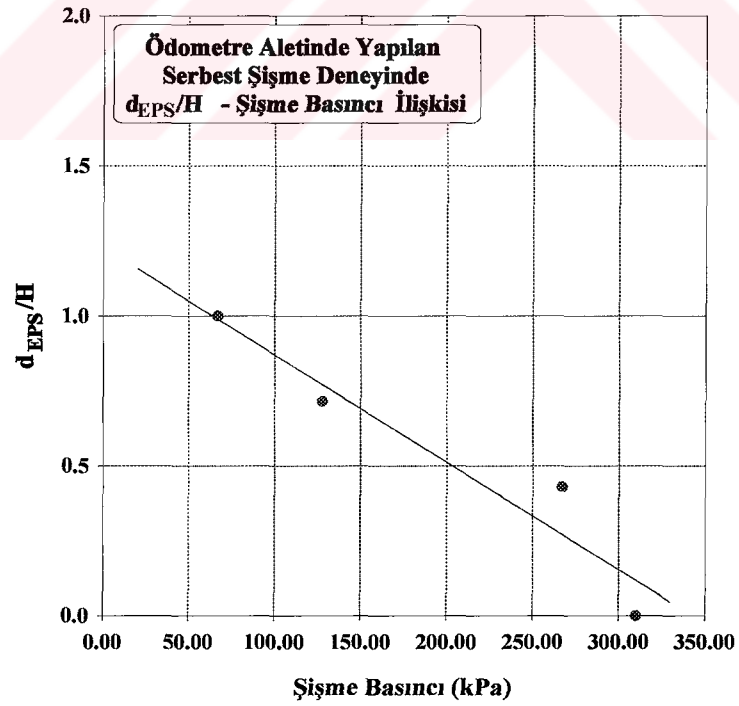


Şekil 138. 1 cm. karışık zeminin üzerine 1 cm. KŞZ koyularak yapılan şişme deneyinin şişme basıncı grafiği

Ödometre aletinde değişik kalınlıkta EPS ile yapılan serbest şişme deneyleri sonucundaki d_{EPS}/H oranı ile serbest şişme arasındaki ilişki Şekil 139'da ve d_{EPS}/H oranı ile şişme basıncı arasındaki ilişki de Şekil 140'da verilmektedir. Bu şekillerden, bu oranın artması ile serbest şişme ve şişme basıncı değerlerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 139. Ödometre aletinde yapılan serbest şişme deneyinde, d_{EPS}/H oranı ile serbest şişme arasındaki ilişki



Şekil 140. Ödometre aletinde yapılan serbest şişme deneyinde, d_{EPS}/H oranı ile şişme basıncı arasındaki ilişki

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yapılara aktarılan yanal ve düşey basınçların azaltılması amacıyla, laboratuvar ortamında hazırlanan deney düzenekleri içerisinde sıkıştırılarak yerleştirilen Şiran-2 kilinin şişme basıncını azaltmak amacı ile, EPS ve KŞZ kullanılmış ve aşağıda yorumlanan sonuçlar elde edilmiştir.

1. Şiran-2 kilinin doğal birim hacim ağırlığının 19.2 kN/m^3 , dane birim hacim ağırlığının 24.5 kN/m^3 , doğal su muhtevasının % 43.05, doyumluk derecesinin % 1.278 (doyumluk derecesi değerinin birden büyük çıkmasının nedeni, normal zeminlerde boşluk hacminin sabit olması, buna karşın şişen zeminlerde zeminin doyum duruma gelişiyile boşluk hacminin artmasıdır. Eğer bu artış dikkate alınıp boşluk hacmine eklenirse, S_r bire eşitlenecektir), likit limitinin % 106.5, plastik limitinin % 57, plastisite indisinin % 49.5, lineer büzülmesinin % 22.03, maksimum kuru birim hacim ağırlığının 12.2 kN/m^3 , optimum su muhtevasının % 8.52, geçirimsizlik katsayısının $1.3 \times 10^{-7} \text{ cm/sn}$, direkt kesme deneyleri ile drenajlı koşullarda yapılan doyum haldeki numunenin kayma direnci parametrelerinin $c=30.53 \text{ kPa.}$, $\phi = 2.34^\circ$, kuru haldeki numunenin kayma direnci parametrelerinin $c= 0$, $\phi = 34.32^\circ$, serbest şişmesinin % 18.7, şişme basıncının 64 kPa , mineralojik incelemeler sonucunda da mineralin Ca-Smektit olduğu tespit edilmiştir.
2. Karakaya Bentonit firmasından temin edilen bentonitin, dane birim hacim ağırlığının 22.69 kN/m^3 , likit limitinin % 461.5, plastik limitinin % 28.5, plastisite indisinin % 433, lineer büzülmesinin % 44.95, maksimum kuru birim hacim ağırlığının 12.4 kN/m^3 , optimum su muhtevasının % 8.35, direkt kesme deneyleri ile drenajlı koşullarda yapılan doyum haldeki numunenin kayma direnci parametrelerinin $c = 49.77 \text{ kPa.}$, $\phi = 18.2^\circ$, serbest şişmesinin % 220.45, şişme basıncının 565 kPa , mineralojik incelemeler sonucunda da mineralin Na-Smektit olduğu tespit edilmiştir.
3. Karışık zeminin dane birim hacim ağırlığının 23.2 kN/m^3 , likit limitinin % 284.5, plastik limitinin % 55.6, plastisite indisinin % 228.9, lineer büzülmesinin % 36.55, maksimum kuru birim hacim ağırlığının 11.6 kN/m^3 , optimum su muhtevasının % 8.63, geçirimsizlik katsayısının $1.78 \times 10^{-7} \text{ cm/sn}$, direkt kesme deneyleri ile drenajlı koşullarda yapılan doyum haldeki numunenin kayma direnci parametrelerinin $c=$

37.83 kPa., $\phi=8.96^{\circ}$, serbest şişmesinin % 133.25, şişme basıncının 465 kPa olduğu tespit edilmiştir.

4. Yanal ve düşey şişme basınçlarını azaltmak amacı ile kullanılan KŞZ'nin dane birim hacim ağırlığının 25.7 kN/m^3 , doğal su muhtevasının % 28.58, likit limitinin % 37.2, plastik limitinin % 27.95, plastisite indisinin % 9.25, maksimum kuru birim hacim ağırlığının 16.25 kN/m^3 , optimum su muhtevasının % 24, geçirimsizlik katsayısının $2.04 \times 10^{-5} \text{ cm/sn}$, direkt kesme deneyleri ile drenajlı koşullarda yapılan doygun haldeki numunenin kayma direnci parametrelerinin $c=9.63 \text{ kPa}$, $\phi=3.3^{\circ}$, mineralojik incelemeler sonucunda da mineralin kumlu killi (Kaolinit, İllit) bir malzeme olduğu tespit edilmiştir.
5. Yanal ve düşey şişme basınçlarını azaltmak amacı ile kullanılan diğer bir malzeme olan EPS'in yoğunluğunun 12 kg/m^3 , %10 şekil değiştirmede ki basınç dayanımının 35 kPa, başlangıç elastisite modülünün 2 Mpa (Miki, 1996), minimum eğilme dayanımının 70 kPa (ASTM C578), hacimsel su emme oranının % 4.9 olduğu tespit edilmiştir.
6. Yanal şişme basınçlarını ölçmek amacı ile kurulan deney düzeneğinin içerisine 156 kg. karışık zemin, tabaka tabaka serilip sıkıştırılmak sureti ile yerleştirilmiştir. 100 günlük okuma sonunda her bir basınç ölçme hücresinden (sensör) alınan okumaların zamana bağlı olarak değişimi Şekil 102'de, yanal şişme basıncı-derinlik ilişkisi de Şekil 103'de verilmiştir. Deney sonunda ölçülen, en üstteki sensörden itibaren sırasıyla yanal şişme basıncı değerleri 135 kPa, 138 kPa, 145 kPa, 150 kPa, 185 kPa, 171 kPa, 161 kPa olarak sıralanmaktadır. Buradan da anlaşılacağı gibi $h=67.5 \text{ cm}$.den sonra yanal şişme basıncının azalması, bu derinlikten sonra su muhtevasının azalmasından kaynaklanmaktadır (zeminimizin geçirimsizliğinin düşük olmasından).
7. Büyük ölçekli olan istinat duvarı modelinin içerisine koyulan zeminin geçirimsizliği çok düşük olduğundan su alışı da yavaş olmakta, dolayısıyla da deney süresi uzamaktaydı. Bu amaçla daha küçük bir model yaptırılarak, bu modelin su alma hızı tespit edilmiş ve hem EPS ile yapılan deneyler bu modelde yapılmış hem de yanal ve düşey basınçlar aynı anda tespit edilmiştir. Şekil 107 ve Şekil 108'den de görüldüğü gibi bu düzende karışık zeminle EPS kullanılmadan yapılan ilk deneyde, şişme basıncı değerleri belli bir değere kadar yükselmekte, daha sonra da azalarak sabit bir değer almaktadır. Ayrıca yanal ve düşey basınç arasında Şekil

109'daki gibi giderek artan eğrisel bir ilişki mevcuttur. Bu deney sonucunda, maksimum düşey basınç 277 kPa., maksimum yanal basınç da 247 kPa olarak tespit edilmiştir. Yanal şişme basıncının düşey şişme basıncına oranından bulunan, yanal şişme basıncı katsayısı K_s , Şekil 109'da çizilen doğrunun eğiminden 0.98 olarak tespit edilmiştir. Yanal basıncı azaltmak amacı ile EPS ve KŞZ kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır.

- Yanal şişme basıncını azaltmak amacı ile yapılan ilk deneyde, düzeneğin yan yüzüne 0.9 cm. kalınlığında ve 12 kg/m^3 yoğunluğunda EPS yerleştirilmiştir. 43 gün sonunda EPS'in kalınlığının ortalama olarak 0.65 cm.'ye indiği gözlenmiştir. Şekil 111 ve Şekil 112'den de görüldüğü gibi bu deneyde şişme basıncı değerleri belli bir değere kadar yükselmekte, daha sonra da azalarak sabit bir değer almaktadır. Ayrıca yanal ve düşey basınç arasında Şekil 113'deki gibi giderek artan eğrisel bir ilişki mevcuttur. Bu deney sonucunda, düşey basınç 205 kPa., yanal basınç da 102 kPa olarak tespit edilmiştir. Yanal şişme basıncı katsayısı K_s , Şekil 113'de çizilen doğrunun eğiminden 0.50 olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü gibi deney düzeneğinin yan yüzüne yerleştirilen 0.9 cm.'lik EPS, düşey basıncı % 26, yanal basıncı da % 59 oranında azaltmaktadır.
- İkinci deneyde deney düzeneğinin yan tarafına 2.5 cm.'lik EPS yerleştirilmiş ve 43 gün sonunda EPS'in kalınlığının ortalama olarak 1.89 cm.'ye indiği gözlenmiştir. Şekil 115 ve Şekil 116'dan da görüldüğü gibi bu deneyde, şişme basıncı değerleri belli bir değere kadar yükselmekte, daha sonra da azalarak sabit bir değer almaktadır. Ayrıca yanal ve düşey basınç arasında Şekil 117'deki gibi giderek artan eğrisel bir ilişki mevcuttur. Bu deney sonucunda, düşey basınç 199 kPa., yanal basınç da 87 kPa olarak tespit edilmiştir. Yanal şişme basıncı katsayısı K_s , Şekil 117'de çizilen doğrunun eğiminden 0.44 olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü gibi deney düzeneğinin yan yüzüne yerleştirilen 2.5 cm.'lik EPS, düşey basıncı % 28, yanal basıncı da % 65 oranında azaltmaktadır.
- Üçüncü deneyde EPS kalınlığı biraz daha artırılarak, düzeneğin yan tarafına 5 cm.'lik EPS yerleştirilmiş ve 43 gün sonunda EPS'in kalınlığının ortalama olarak 3.75 cm.'ye indiği gözlenmiştir. Şekil 119 ve Şekil 120'den de görüldüğü gibi deney süresince şişme basıncı değerleri belli bir değere kadar

yükselmekte, daha sonra da azalarak sabit bir değer almaktadır. Ayrıca yanal ve dūşey basınç arasında Şekil 121'deki gibi giderek artan eğrisel bir ilişki mevcuttur. Bu deney sonucunda, dūşey basınç 133 kPa., yanal basınç da 55 kPa olarak tespit edilmiştir. Yanal şişme basıncı katsayısı K_s , Şekil 121'de çizilen doğrunun eğiminden 0.45 olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü gibi deney düzeneğinin yan yüzüne yerleştirilen 5 cm.'lik EPS, dūşey basıncı % 52, yanal basıncı da % 78 oranında azaltmaktadır.

- Dördüncü deneyde de deney düzeneğinin yan yüzeyine 5 cm. kohezyonlu şişmeyen zemin yerleştirilmiştir. Şekil 123 ve Şekil 124'den de görüldüğü gibi bu deneyde, şişme basıncı değerleri belli bir değere kadar yükselmekte, daha sonra da azalarak sabit bir değer almaktadır. Ayrıca yanal ve dūşey basınç arasında Şekil 125'deki gibi giderek artan eğrisel bir ilişki mevcuttur. Bu deney sonucunda, dūşey basınç 231 kPa., yanal basınç da 164 kPa olarak tespit edilmiştir. Yanal şişme basıncı katsayısı K_s , Şekil 125'de çizilen doğrunun eğiminden 0.68 olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü gibi deney düzeneğinin yan yüzüne yerleştirilen 5 cm.'lik KŞZ, dūşey basıncı % 17, yanal basıncı da % 34 oranında azaltmaktadır.

Küçük deney düzeneği ile yapılan bütün deneylerde, dūşey şişme basıncı yanal şişme basıncından daha büyük çıkmaktadır. Bu durum, kilin şişme sırasında anizotropik bir davranış göstermesinden ve düzenek içerisine dūşey doğrultuda sıkıştırılarak yerleştirilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Küçük deney düzeneğinde EPS ile yapılan deneylerde, EPS kalınlığının artmasıyla, dūşey ve yanal basınçların bu kalınlığa bağlı olarak azaldığı (Şekil 129 ve Şekil 130) ayrıca d_{EPS}/H_T oranının artması ile de yanal ve dūşey şişme basınçlarının da azaldığı (Şekil 131 ve Şekil 132) gözlenmektedir.

8. Çalışmanın son aşamasında dūşey şişme basıncı, 1 cm. karışık zemin için ödometre aletinde tespit edilmiş ve daha sonrada zemin üzerinde EPS ve KŞZ kullanılarak şişme basıncındaki azalmalar tespit edilmiştir. Öncelikle ödometre aletinin içine optimum su muhtevasında sıkıştırılan 1 cm. karışık zemin yerleştirilerek 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılmış ve serbest şişmesi % 84.9, şişme basıncı da 310 kPa olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen bu dūşey şişme basıncını azaltmak amacı ile EPS ve KŞZ ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- İlk deneyde ödometre aleti içine serilen 1 cm. zeminin üzerine 0.43 cm. kalınlığında ve 12 kg/m^3 yoğunluğunda EPS yerleştirilerek 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılmış ve serbest şişmesi % 63.25, şişme basıncı da 267 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonunda 0.43 cm. kalınlığındaki EPS'in, serbest şişme değerini % 26, düşey şişme basıncını da % 13 oranında azalttığı tespit edilmiştir.
- İkinci deneyde ödometre aleti içine serilen 1 cm. zeminin üzerine 0.715 cm. kalınlığında ve 12 kg/m^3 yoğunluğunda EPS yerleştirilerek, 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılmış ve serbest şişmesi % 59.88, şişme basıncı da 128 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonunda 0.715 cm. kalınlığındaki EPS'in, serbest şişme değerini % 29, düşey şişme basıncını da % 59 oranında azalttığı tespit edilmiştir.
- Üçüncü deneyde ödometre aleti içine serilen 1 cm. zeminin üzerine 1 cm. kalınlığında ve 12 kg/m^3 yoğunluğunda EPS yerleştirilerek, 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılmış ve serbest şişmesi % 46.65, şişme basıncı da 67 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonunda 1cm. kalınlığındaki EPS'in, serbest şişme değerini % 45, düşey şişme basıncını da % 79 oranında azalttığı tespit edilmiştir.
- Dördüncü deneyde ödometre aleti içine serilen 1 cm. zeminin üzerine 1 cm. kalınlığında kohezyonlu şişmeyen zemin yerleştirilerek, 1 kPa yük altında serbest şişmeye bırakılmış ve serbest şişmesi % 47.15, şişme basıncı da 73 kPa olarak belirlenmiştir. Deney sonunda 1cm. kalınlığındaki KŞZ'nin, serbest şişme değerini % 44, düşey şişme basıncını da % 76 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Ödometre aletinde değişik kalınlıkta EPS ile yapılan serbest şişme deneyleri sonucunda, d_{EPS}/H oranının artması ile serbest şişme ve şişme basıncı bu orana bağlı olarak azaldığı görülmektedir (Şekil 139 ve Şekil 140).

Yapılan bu deneysel çalışmalar, yanal şişme basınçlarını azaltmak amacıyla, yapı ile şişen zemin arasına sıkışma kapasitesi yüksek KŞZ yerine, EPS yerleştirilmesinin daha etkili olacağını göstermiştir. Kullanılacak EPS kalınlığının da, Aytekin (1997) tarafından bulunan sonuçlara benzer olarak, yapı yüksekliğinin 1/5'i oranında olması durumunda, yanal ve düşey şişme basınçlarının daha hızlı bir şekilde azaldığı görülmüştür.

4. ÖNERİLER

Bu çalışmada laboratuvar ortamında kurulan deney düzeneklerinin yanı sıra, arazide aynı çalışmalar, yapıların yan yüzeyine yerleştirilen basınç ölçme hücreleri ile tekrarlanarak, doğru arazi verileri elde edilebilir. Arazide ölçülen şişme basınçları, deneysel olarak elde edilen basınçlarla karşılaştırılarak, arazideki şişme basınçlarına geçiş katsayısı hesaplanabilir.

Şişme basıncını azaltmak amacı ile farklı özelliklere sahip KŞZ'ler kullanılarak, şişme basıncını etkileyen özellikler tespit edilebilir. Ayrıca deneyler farklı kalınlıklarda ve biçimlerde KŞZ'lerle tekrarlanarak optimum kalınlığın ve biçiminin (üçgen, dikdörtgen, yamuk gibi) ne olabileceği belirlenerek, uygulamada hangi malzeme yada yöntemin kullanılması gerektiğini belirlemek mümkündür.

Deneyler farklı kalınlardaki EPS'lerle yapıldığı gibi, farklı yoğunluğa sahip olan EPS'lerle de tekrarlanarak, malzemenin pratikte çabuk bir şekilde kullanılmasını sağlamak mümkündür.

Elde edilen deneysel sonuçlara bakılarak, yapılar ile şişen zemin arasına konulabilecek sıkışma kapasitesi yüksek başka bir malzeme araştırılabilir.

Farklı şişme kapasitelerine sahip şişen zeminler yanal ve düşey şişme basınçları bulunarak, yanal şişme basıncının, düşey şişme basıncına oranından tespit edilen yanal şişme basıncı katsayısı araştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Abeyesekara, R. A. ve Lovell, C. W., 1981. The Volume Change in Compacted Clays and Shales on Saturation, Transp. Res. Rec., 79.
- Acar, C., 1994. Killi Zeminlerin Şişme Davranışına Ön Yüklemenin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ahmed, H. I., 1967. Theoretical and Experimental Analysis of the Bin Effect on Lateral Earth Pressure Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering, University of Washington, Seattle, WA.
- Ali, E. F. M. ve Elturabi, M. A. D., 1984. Comparison of Two Methods for the Measurement of Swelling Pressure, Proc. 5th Int. Conf. Expansive Soils, Adelaide, Australia, 72-74.
- Alpan, I., 1957. An Apparatus for Measuring the Swelling Pressure in Expansive Soils, Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engrg., 1, 3-5.
- Altmeyer, W. T., 1955. Discussion of Engineering Properties of Expansive Clays, Proceedings ASCE, 81, Separate, 658.
- Aoboe, R., 2000. Evidence of EPS Long Term Performance and Durability as a Light Weight Fill, Transportation Research Board 79th Annual Meeting, Washington, D. C., USA.
- ASTM, 1986. Standart Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils, Annual Book of ASTM Standarts D4546, 04,08, 9.
- ASTM, 1992. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, Annual Book of ASTM Standarts D5298-92, 15, 09, 1312-1316.
- ASTM, 2003. Standard Specification for Rigid, Cellular Polystyrene Thermal Insulation, Annual Book of ASTM Standarts C578, 04.06, 6.
- Atterberg, A., 1911. Leornas Förhallande Till Vatten, Deras Plasticitetsgranser Och Plasticitetsgrader (The Behaviour of Clays With Water, Their Limits of Plasticity and Their Degrees of Plasticity), Kungliga Lantbruksakademiens Handlingar och Tidskrift, 50, 2, 132-158.
- Aytekin, M., 1992. Finite Element Modeling of Lateral Swelling Pressure Distribution Behind Earth Retaining Structures, Ph. Thesis, Department of Civil Engineering, Texas Tech University, 242.
- Aytekin, M., 1997. Numerical Modeling of EPS Geofom Used With Swelling Soil, Geotextiles and Geomembranes, 15, 133-146.

- Bandyopadhyay, S. S., 1981. Prediction of Swelling Potential for Natural Soils, Proc. ASCE. Journal of Geotechnical Engineering, Div., 107, 5, 658-661.
- Basf Corp., 1968. Physical Properties of Expanded Styropor, Technical Exchange Meeting, Sinclair-Koppers-BASF.
- Basf Corp., 1997. Styropor Technical Information, Technical Information, BASF Corp., Germany.
- Bektaş, O., Yılmaz, C. ve Taşlı, K., 1995. Doğu Pontid Yay Gerisi Havzasında Derin Yayılma Çukurlarının Oluşumu (KD Türkiye): Neotetisin Pasif Kıta Kenarı Evrimi, KTÜ Jeoloji Müh. Böl. 30. Yıl Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 1, 263-274.
- Bektaş, O., Sen, C., Atıcı, Y. ve Köprübaşı, N., 1999. Migration of the Upper Cretaceous Subduction-related Volcanism Towards the Back-arc Basin of the Eastern Pontide Magmatic Arc (NE Turkey), Geological Journal, 34, 95-106.
- Bell, F. G., 1992. Engineering Properties of Soils and Rocks, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford.
- Bishop, A. W. ve Wesley, L. D., 1975. A Hydraulic Triaxial Apparatus for Controlled Stress Path Testing, Geotechnique, 25, 4, 657-670.
- Blight, G. E., 1967. Horizontal Stresses in Stiff and Fissured Lacustrine Clays, Proceedings, 4th Regional Conference for Africa of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cape Town, South Africa, December, 95-99.
- Brackley, I. J. A., 1973. Swell Pressure and Free Swelling a Compacted Clay, Proceedings, 3rd International Conference on Expansive Soils, Haifa, Israel, 1, 169-176.
- Brackley, I. J. A., 1975. A Model of Unsaturated Clay Structure and Its Application to Swell Behavior, Proc. 6th African Reg. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 1, 65-70.
- Brindley, G. W., 1951. Identification of Clay Minerals by X-Ray Diffraction Analysis, Clays and Clay Technology, Div. of Mines Bulletin 169.
- Carrol, D., 1970. Clay Minerals: A Guide to Their X-Ray Identification, Spec. Paper 126, The Geol. Soc. America, Boulder, Colorado.
- Casagrande, A., 1938. Notes on Soil Mechanics-First Semester, Harvard University.
- Chen, F. H. ve Huang, D., 1987. Lateral Expansion Pressure on Basement Walls, 6th Int. Conf. on Expansive Soils, New Delhi, 55-59.
- Chen, F. H., 1975. Foundations on Expansive Soils, Elsevier Scientific Publishing Co., New York, 280.
- Chen, F. H., 1988. Foundations on Expansive Soils, Elsevier Scientific Publishing Co., New York, 463.

- Clayton, C. R. I., Symons, I. F. ve Hiedra-Cobo, J. C., 1991. The Pressure of Clay Backfill Against Retaining Structures, Canadian Geotechnical Journal, 28, 282-297.
- Coduto, D.P., 1998. Geotechnical Engineering Principles and Practices, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 759.
- Das, B. M., 1985. Principles of Geotechnical Engineering, PWS Kent Publishing Company, USA.
- Day, R. W., 1991. Expansion of Compacted Gravelly Clay, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117, 6, June, 968-972.
- Dhawan, P. K., Mathur, R. ve Lal, N. B., 1982. Effects of Lateral Confinement on Swell Pressure in Expansive Soils, Highway Bulletin, 17, 49-60.
- Dhowian, A. W., Ruwaih, I. E., Youssef, A. ve Erol, A. O., 1984. Evaluation of Expansive Soils and Foundation Methodology in Kingdom of Saudi Arabia, Research Report SANCST: AT-5-88.
- Dif, A. E. ve Blumen, W. F., 1991. Expansive Soils Under Cyclis Drying and Wetting, Geotechnical Testing Journal, Technical Note, 14, 1, 96-102.
- Dodd, C. G., 1955. Dye Adsorption as Method of Identification of Clays, Clays and Clay Technology, Div. of Mines, Bulletin 169.
- Edil, T. B. ve Alanazy, A. S., 1992. Lateral Swelling Pressures, 7th Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, 227-232.
- Elragi, A. F., 2000. Selected Engineering Properties and Applications of EPS Geofoam, Phd. Thesis, State University of New York College of Environmental Science and Forestry Syracuse, New York, 296.
- Elragi, A. F., Negusse, D. ve Kyanka, G., 2000. Sample Size Effect on the Behavior of EPS geofoam, Proc. Of the Soft Ground Technology Conference, The Netherlands.
- El Sayed, S. T. ve Rabbaa, S. A., 1986. Factors Affecting Behavior of Expansive Soils in the Laboratory and Field - a Review, Geotechnical Engineering, 17, 1, 89-107.
- El-Sohby, M. A. ve Rabbaa, S. A., 1984. Deformational Behaviour of Unsaturated Soils Upon Wetting, Proc. Reg. Conf. For Africa on SMFE.
- El-Sohby, M. A. ve Rabba, E. A., 1981. Some Factors Affecting Swelling of Clayey Soils, Geotechnical Engineering, 12, 19-39.
- Erol, A. O., Dhowian, A. ve Youssef, A., 1987. Assessment of Oedometer Methods for Heave Prediction, Proc. 6th Int. Conf. Expansive Soils, New Delhi, India, 99-103.
- Erol, O. ve Ergun, U., 1994. Lateral Swell Pressures in Expansive Soils, XIII ICSMFE, New Delhi, India.

- Ertekin, Y., 1991. Measurement of Lateral Swell Pressure With Thin Wall Oedometer Technique, Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, 114.
- Feng, M., 1995. A study of Swelling Pressure Using Various Laboratory Testing Methods, Research Report (unpublished), Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Fenner, J. L., Hamberg, D. J. ve Nelson, J. D., 1983. Building on Expansive Soils, Fort Collins, CO: Civil Engineering Department, Colorado State University.
- Finn, D. W. ve Strom, B., 1958. Nature and Magnitude of Swelling Pressure, Proc. HRB, 37, 493-498.
- Fourie, A. B., 1988. Laboratory Evaluating of Lateral Swelling Pressure, Journal of Geot. Engrg., 115, 10, 1481-1485.
- Fourie, A. B., 1989. Laboratory Evaluation of Lateral Swelling Pressure, Journal of Geotechnical Engineering, 115, 10, 1481-1487.
- Fredlund, D. G., 1969. Consolidometer Test Procedural Factors Affecting Swell Properties, Proc. 2nd Int. Conf. Expansive Clay Soils, Texas A&M Univ., College Station, 435-456.
- Fredlund, D. G., 1995. The prediction of Heave in Expansive Soils, Presented at: Canada-Kenya Symposium on Unsaturated Soils.
- Fredlund, D. G., Hasan, J.U. ve Filson, H., 1980. The Prediction of Total Heave, Proc. 4th Int. Conf. Expansive Soils, Denver, Colorado, ASCE, 1, 1-17.
- Fredlund, D.G. ve Rahardjo, H., 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John-Wiley and Sons, New York, 486.
- Frydenlund, T. E., 1991. Expanded Polystyrene: A lighter Way Across Soft Ground, Norwegian Road Research Laboratory, Internal Report, 1502, Oslo, Norway.
- Frydman, S. ve Calabresi, G., 1987. Suggested Standard for one Dimensional Testing, Proc. 6th Int. Conf. Expansive Soils, New Delhi, India, 91-98.
- Gibbs, H. J., 1969. Discussion of Holtz, W. G. , The Engineering Problems of Expansive Clay Subsoils, Proceedings of the Second International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas A&M Press, 478-479.
- Gilchrist, H. G., 1963. A Study of Volume Change of a Highly Plastic Clay, M. Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Gizienski, S. F. ve Lee, L. J., 1965. Comparison of Laboratory Swell Tests to Small Scale Field Tests, Proc. Ist Int. Conf. Expansive Clay Soils, Texas A&M Press, 108-119.

- Goldschmidt, V. M., 1926. Undersokeiser Over Lersedimenter, Nord. Jordbrugsforsk. Nos. 4-7, 434-445.
- Grim, R.E., 1953. Clay Minerology, Mc Graw-Hill Book Company, Inc., New York, 384.
- Grim, R.E., 1959. Physico-Chemical Properties of Soils, Clay Minerals, Journals of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE 85, SM2.
- Grim, R.E., 1962. Applied Clay Minerology, Mc Graw-Hill book Company, Inc., NewYork, 422.
- Grim, R.E., 1968. Clay Mineralogy, Second Edition, Mc Graw Hill, New York.
- Gromko, G. J., 1974. Review of Expansive Soils, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 100, GT6, 667-687.
- Gürsoy, H., 1989. Kelkit ve Yakın Dolayının Stratigrafisi ve Tektoniği, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sivas, 140.
- Hardy, R. M., 1965. Identification and Performance of Swelling Soil Types, Can. Geotech. Journal, 2, 2, 141-153.
- Hatipoğlu, Ü., 1993. Lateral Pressures in Expansive Soils, A Master's Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.
- Hekimoğlu S., 1996. Sıkıştırılmış Kil Zeminin Şişme ve Bütülme Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osman Gazi Üniversitesi.
- Hendricks, S. B. ve Jefferson, M.E., 1938. Crystal Structure of Vermiculites and Mixed Vermiculite – Chlorites, Am. Mineralogist, 23, 851-863.
- Hendricks, S. B., 1942. Lattice Structure of Clay Minerals and Some Properties of Clays, Journal of Geol., 50, 276-290.
- Hillmann, R. 1996. Research Projects on EPS in Germany: Material Behavior and Full Scale Model Studies, Proc. Of International Symposium on EPS Construction Method, Tokyo, Japan, 105-115.
- Hofmann, U., Endell, K. ve Wilm, D., 1933. Kristalstruktur und Quellung von Montmorillonit, Z. Krist., 86, 340-348.
- Holtz, R. D. ve Kovacs, W. D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Holtz, W. G ve Hart, S. S., 1978. Home Construction on Shrinking and Swelling Soils, Colorado Geological Survey Publication SP-11, Denver.

- Holtz, W. G. ve Gibbs, H. J., 1956. Engineering Properties of Expansive Clays, Transactions Paper 2814, 121, 641-677.
- Holtz, W. G., 1959. Expansive Clay-Properties and Problems, Colorado School of Mines Quarterly, 54, 4.
- Holtz, W. G., 1969. Volume Changes in Expansive Clay Soils and Control by Lime Treatment, Proceedings of the Second International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas A&M Press, 157-173.
- Holtz, W. G., 1984. The Influence of Vegetation on the Swelling and Shrinking of Clays in the United States of America, The Influence of Vegetation on Clays, Thomas Telford Ltd. London, 69-73.
- Horvath, J. S., 1995. Geofam Geosynthetic, Horvath Engineering, P. C., Scarsdale, New York, USA, 222 .
- Horvath, J. S., 1996. The Compressible Inclusion Function of EPS Geofam: an Overview, Proc. Of International Symposium on EPS Construction Method, Tokyo, 71-81.
- Huntsman, 1999. Performance Characteristics Huntsman Corporation, Texas, USA, Technical Bulletin, 7-7.5.
- Institute of Construction Sciences, 1982. The Problem on the Calculation of Expansive Soil Deformation, Research Report, Beijing, P. R., China.
- Institute of Yangzi River Hydroelectric Power Research, 1986. The Measurement of Swelling Pressure, Research Report, Wuhan, P. R., China.
- Iyer, B., 1972. Swelling of Compaction Shale, Ph. D. Thesis, University of Alberta, Edmonton, Canada.
- Jasmund, K., 1955. Die Silicatischen Tonminerale, Angewandte Chemie, Monograph 60.
- Jennings, J. E., 1969. The Prediction of Amount and Rate of Heave Likely to be Experienced in Engineering Construction on Expansive Soils, Proc. 2nd Int. Conf. Expansive Clay Soils, Texas A&M Univ., College Station, 99-109.
- Jennings, J. E. ve Knight, K., 1957. The Prediction of Total Heave From the Double Oedometer Test, Proc. Symp. Expansive Clays, South African Inst. of Civil Engineers, Johannesburg, 7, 9, 13-19.
- Jennings, J. E. ve Knight, K., 1958. The Prediction of Total Heave From the Double Oedometer Test, Symposium on Expansive Clays, Johannesburg.
- Jennings, J. E., Firth, R. A., Ralph, T. K. ve Nagar, N., 1973. An Improved Method for Predicting Heave Using the Oedometer Test, Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils, Haifa, Israel, 2, 149-154.

- Jones, D. E. ve Jones K. A., 1987. Treating Expansive Soils, Civ. Eng., ASCE, 57, 8, 62-65.
- Joshi, R. P. ve Katti, R. K., 1980. Lateral Pressure Development Under Surcharges, Proceedings, 4th International Conference on Expansive Soils, Denver, USA, 227-241.
- Justo, J. L., Delgado, A. ve Ruiz, J., 1984. The Influence of Stress Path in the Collapse Swelling of Soils in the Laboratory, Proc. 5th Int. Conf. Expansive Soils, Adelaide, Australia, 67-71.
- Karahan, F., 1999. Relationship Between the Methylene Blue Test Result and Swelling Percentage, Swell Pressure and Suction of an Expansive Soil, Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, 103.
- Kassif, G. ve Zeitlen, J. G., 1962. Behaviour of Pipes Buried in Expansive Clays, Journal of Soil Mech. and Found Eng., Div., ASCE, 88 (2), 133-148.
- Kassiff, G., Baker, R. ve Ovadia, Y., 1973. Swell-pressure Relationships at Constant Suction Changes, Proceedings, 3rd International Conference on Expansive Soils, 1, 201-208.
- Kassiff, G., Komornik, A., Wiseman, G. ve Zeitlen, J. G., 1965. Studies and Design Criteria for Structures on Expansive Clays, International Research and Engineering Conference on Expansive Clays, College Station, TX.
- Kassiff, G., 1971. Swelling Potential of Compacted Clay, ASCE, 2, 8, 97.
- Kate, J. M. ve Katti, R. K., 1975. Role of Microparticles in Interaction Between Cohesive Nonswelling Soil Layer and Underlying Expansive Soil Media, Proc. Of the fifth Asian Regional conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1, Bangalore, 15-18.
- Katti, R. K., Kulkarni, S. K. ve Fotedar, S. K., 1969. Shear Strength and Swelling Pressure Characteristics of Expansive Soils, Proc. Of the second, Int. Conf. On Expansive soils.
- Katti, R. K., Bhangle, E. S. ve Moza, K. K., 1983. Lateral Pressure of Expansive Soil with and without a Cohesive Non-swelling Soil Layer-Applications to Earth Pressures of Cross Drainage Structures of Canals and Key Walls of Dams (Studies of K_0 Condition), Central Board of Irrigation and Power, Technical Report 32, New Delhi, India.
- Katti, R. K., Moza, K. K. ve Kulkarni, U. V., 1984. Shear Strength Development in Expansive Soils with and without CNS Surcharge, Proc. Of 5nd. Int. Conf. On Expansive Soils, Adelaide, South Australia.

- Katti, R. D. ve Katti, R. K., 1987. Studies on Passive Resistance Development in Saturated Expansive Soil, Proceedins, 6th International Conference on Expansive Soils, New Delhi, India, 1, 61-66.
- Kaya Z., 1992. Kil Zeminlerin Şişme Karakteristiklerinin ASTM Yöntemleriyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kelley, W. P., 1955. Interpretation of Chemical Analysis of Clays, Clays and Clay Technology, Div. of Mines, Bulletin 169.
- Keskin S. N., 1993. İstanbul Neojen Kilinin Şişme Davranışlarına Ön Konsolidasyonun, Mineralojik Özelliklerin ve Çevresel Faktörlerin Etkisi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Keskin, N., Yıldırım, H. ve Ansal, A., 1992. Lateral Swelling Behavior of Clayey Soils, Proc. of 4th Turkish National Conf. on SMFE, İstanbul, 1, 14-30.
- Ketin, İ., 1966. Türkiye'nin Tektonik Birlikleri, MTA yayımları, Ankara, 66, 20-34.
- Khaddaj, S., Lancelot, L. ve Shahrour, I., 1992. Experimental Study of the Swelling Behavior of Heavily Overconsolidated Flandres Clays, Proc. 7th Int. Conf. Expansive Soils, Dallas, Texas, 239-244.
- Komornik, A. ve Zeitlen, J. G., 1965. An Apparatus for Measuring Lateral Soil Swelling Pressure in the Labratory, Proc. of 6th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 1, Canada, 278-281.
- Komornik, A. ve David, D., 1969. Prediction of Swelling Potential of Clays, Proc. ASCE, JSMTD, 95, SM 1, 209-225.
- Komornik, A. ve Livneh, M., 1968. The Effect of Anisotropy on Swelling of a Compacted Clay, Proceedings, 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2, 181-185.
- Komornik, A. ve Zeitlen, J. G., 1970. Laboratory Determination of Lateral and Vertical Stresses of Compacted Swelling Clay, Journal of Materials, 5, 1, March, 108-128.
- Komornik, A., Livneh, M. ve Smucha, S., 1980. Shear Strength and Swelling of Clays Under Suction, Proceedings, 4th International Conference on Expansive Soils, Denver, USA, 1, 206-226.
- Kumar, N., 1984. Review of Common Design and Construction Practices on Expansive Soils in Colorado, Proc. 5th Int. Conf. Expansive Soils, Adelaide, Australia, 165-169.
- Ladd, C. C. ve Lambe, T. W., 1961. The Identification and Behavior of Expansive Clays, Proceedings, 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 1.

- Ladd, C. C., 1960. Mechanisms of Swelling by Sompacted clay, Bulletin of the Highway Research Board, 245.
- Lambe, T. V. ve Whitman, R. V., 1969. Soil Mechanics, John Wiley & Sons. Co. Inc., New York, USA, 395.
- Langmuir, I., 1917. The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids, J. Am. Chem. Soc., 39, 1848-1906.
- Lambe, T. W. ve Whitman, R. V., 1959. The Role of Effective Stress in the Behavior of Expansive Soils, Quarterly, Colorado School of Mines, 54, 4, 33-60.
- Livneh, M., 1970. Discussion of Paper the Prediction of Swelling Pressure of Clays, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 323-324.
- Maegdefrau, E. ve Hofmann, U., 1937. Die Kristalstruktur des Montmorillonit, Z. Krist., 98, 299-323.
- Mandal, J., 1995. Gefoam in Civil Engineering, The Indian Textile Journal, November Issue, Bombay India, 76-77.
- Marshall, C. E., 1935. Layer Lattices and Base-exchange Clays, Z. Krist., 91, 433-449.
- Marshall, C.E., 1949. The Colloid Chemistry of the Silicate Minerals; Academic Press, Inc., New York.
- Massarsch, K. R., 1975. New Method for Measurement of Lateral Earth Pressure in Cohesive Soils, Canadian Geotechnical Journal, 12, 2, 142-146.
- Matyas, E. L., 1969. Some Properties of Two Expansive Clays from Western Canada, Proc. 2nd Int. Conf. Expansive Clay Soils, Texas A&M Univ., College Station, 263-278.
- Mc Carthy, D.F., 1998. Essentials of Soil Mechanics and Foundations Basic Geotechnics, Prentice Hall, 5. Edition, New Jersey.
- Mesri, G., Pakbaz, M. C. ve Cepeda-Diaz, A. F., 1994. Meaning, Measurement and Field Application of Swelling Pressure of Clay Shales, Geotechnique, 44, 1, 129-145.
- Miki, G., 1996. Ten year History of EPS Method in Japan and its Future Challenges, Proc. Of International Symposium on EPS Construction Method, Tokyo, Japan, 394-411.
- Mitchell, J. K., 1976. Fundamentals of Soil Behaviour, University of California, Berkeley.
- Mohamad, E., 1996. History of EPS as Embankment Fill in Malaysia under PIC and Its Future, Proc. Of International Symposium on EPS Construction Method, Tokyo, Japan, 257-264.
- Morgenstern, N. R. ve Balasubramonian, B., 1980. Effects of Pore Fluid on the Swelling of Clay Shale, Proc. 4th Int. Conf. Expansive Soils, Denver, Colorado, 1, 195-205.

- Nayak, N. V. ve Christensen, R. W., 1971. Swelling Charecteristics of Compacted Expansive Soils, Clays and Clay Minerals, 19, 4, 251-261.
- Negusse, D., 1997. Properties&Applications of Geofoam, Society of the Plastic Industry Inc., Washington, D. C., USA.
- Negusse, D. ve Elragi, A., 2000. Strain Rate Effect on the Unaxial Compression Behavior of Eps Geofoam, Internal Report AE2-00, Geofoam Research Center, Syracuse University, Syracuse, New York.
- Nelson, J. D. ve Miller, D. J., 1992. Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Wiley and Sons Publishing Company, New York.
- Noble, C. A., 1966. Swelling Measurements and Prediction of Heave for Lacustrine Clay, Can. Geotech. Journal, 3, 1, 32-41.
- Ofer, Z., 1980. Instruments for Laboratory and In-Situ Measurements of Lateral Swelling Pressure of Expansive Clays, Proc. of 4th Int. Conf. on Expansive Soils, USA, 45-53.
- Ofer, Z., 1981. Laboratory Instrument for Measuring Lateral Soil Pressure and Swelling Pressure, Geotechnical Testing Journal, 4, 4.
- Ofer, Z. ve Blight, G. E., 1985. Measurment of Swelling Pressure in the Laboratory and In-Situ, Trans. Res. Rec., 1032, T.R.B., National Res. Council, Washington, D.C., 15-22.
- Okay, A. I. ve Şahintürk, Ö., 1997. Geology of the Eastern Pontides, in A.G. Robinson, ed., Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region, A.A.P.G. Mem. 68, 291-311.
- Osman, M. A. ve El Sharief, A. M., 1987. Field and Laboratory Observations of Expansive Soil Heave, Proc. 6th Int. Conf. Expansive Soils, New Delhi, India, 105-110.
- Önalp A., 1982. Geoteknik Bilgisi 1, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayın no:187, Trabzon.
- Önalp A., 1997. Geoteknik Bilgisi 1, Sakarya Üniversitesi Yayın No:27, Sakarya.
- Palit, R. M., 1953. Determination of Swelling Pressure of Clay soils, Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., 1, 170-172.
- Parcher, J. V. ve Liu, P. C., 1965. Some Swelling Charecteristics of Compacted Clays, Proc., ASCE, 91, SM3, May, 1-17.
- Peck, R. B., Hanson, W. E. ve Thornburn, T. H., 1974. Foundation Engineering, John Wiley and Sons, Inc.

- Porter, A. A. ve Nelson, J. D., 1980. Strain Controlled Testing of Expansive Soils, Proc. 4th Int. Conf. Expansive Soils, Denver, Colorado, 1, 34-44.
- P. Ü. D., 2002. Polistren Üreticileri Derneği, EPS, 24s.
- Rao, R. R., Rahardjo, H. ve Fredlund, D. G., 1988. Closed Form Heave Solutions for Expansive Soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 114, 5, May, 573-588.
- Ravina, I., 1973. Swelling of Clays, Mineralogical Composition and Microstructure, Proceedings of the Third International Conference on Expansive Soils, Haifa, Israel.
- Rengmark, F. ve Erikson, R., 1953. Apparatus of Soil Suction in Expansive Soil Compression and Elastic Properties of Soils, Proc. 3rd ICSMFE, 1.
- Richards, B. G. ve Kurzeme, B. E., 1973. Observations of Earth Pressure of a Retaining Wall at Gouger Street Mail exchange, Adeliade, Australian Geomechanics Journal, 21-27.
- Saito, T. ve Yanai, K., 1969. Some Swelling Characteristics of Compacted Soils, Transactions, Japanese Society of Civil Engineers, 1, 2, 397-404.
- Salas, J. A. J. ve Serratos, J. M., 1957. Foundations on Swelling Clays, Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engrg., 1, 424-428.
- Satyanarayana, B., 1969. Behavior of Expansive Soil Treated or Cushioned with Sand, Proceedings, 2nd International Conference on Expansive Clay Soils, Texas A&M University, College Station, TX, 308-316.
- Seed, H. B., Mitchel, J. K. ve Chan, C. K., 1962. Studies of Swell and Swelling Pressure Characteristics of Compacted Clays, HRB Bull., 313, 12-39.
- Seed, H. B., Woodward, R. J. ve Lundgren, R., 1962. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays, ASCE, Soil Mechanics and Foundations Div., 88, 53-87.
- Shanker, N. B., Rao, A. S. ve Swarny, A. S. R., 1982. Swelling Behaviour of Undisturbed and Remoulded Samples of Black Cotton Clay, Indian Geotech. Journal, 12, 2, 152-159.
- Sheeley, M., 2000. Slope Stabilization Utilizing Geofom, Master's Thesis, Syracuse University, Syracuse, New York, USA.
- Shuai, F., 1996. Simulation of Swelling Pressure Measurements on Expansive Soils, Ph. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 315.
- Skempton, A. W., 1961. Horizontal Stresses in an Overconsolidated Eocene Clay, Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engrg., 1, 351-357.

- Smith, A. W., 1973. Method for Determining the Potential Vertical Rise, PVR (Texas Test Method Tex-126-e), Proc. Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction, University of Wyoming, Laramie, 1, 189-205.
- Snethen, D. R. ve Haliburton, T. A., 1973. Lateral Swelling Pressure in Compacted Oklahoma Cohesive Soils, Highway Research Board Bulletin 429, Washington D. C., 26-28.
- Snethen, D. R., 1984. Evaluation of Expedient Methods for Identification and Classification of Potentially Expansive Soils, Proceedings of the Fifth International Conference on Expansive Soils, National Conference Publication 84/3, Institution of Engineers, Australia, 2226.
- Sorochan, E. A., 1991. Construction of Buildings on Expansive Soils, Brookfield: A. A. Balkema Publishers, 298.
- Sridharan, A., Rao, A. S. ve Sivapullalah, P. V., 1986. Swelling Pressure of Clays, Geotechnical Testing Journal, 9, 1, 24-33.
- Sudo, T., 1959. Mineralogical Study on Clays of Japan, Maruzen Co., Ltd., Tokyo.
- Sullivan, R. A. ve Mc Cleland, B., 1969. Predicting Heave of Buildings on Unsaturated Clay, Proc. 2nd Int. Res. Eng. Conf. Expansive Clay Soils, Collage Station, Texas, 404-420.
- Sun, M., 1997. Engineering Behavior of Geofoam and Lateral Pressure Reduction in Substructures, Master's Thesis, Syracuse University, Syracuse, New York, USA.
- Symons, I. F., Clayton, C. R. I. ve Darley, P., 1989. Earth Pressures Against an Experimental Retaining Wall Backfilled with Heavy Clays, Transport and Road Research Lab., Research Report 192, Crowthorne, Berkshire.
- Terzaghi, K. ve Peck, R. B., 1967. Soil Mechanics in Engineering Practise, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Tüdeş, E., 1996. Zeminlerin Kireç ve Çimento Katkısı İle Stabilizasyonu, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Van Dorp, T., 1988. Expanded Polystyrene Foam as Light Fill and Foundation Material in Road Structures, International Congress on Expanded Polystyrene, Milani Italy.
- Vijayvergiya, V. N. ve Ghazzaly, O. I., 1973. Prediction of Swelling Potential for Natural Clays, Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Clay Soils, 1, 227-236.
- Way, J. F., 1850. On The Power of Soils to Adsorb Manure, J. Roy. Agr. Soc. Engl., 11, 313-379.

- Wayne, A. C., Osman, M. A. ve Elfatih, M. A., 1984. Construction on Expansive Soils in Sudan, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 110, 3, 359-379.
- White, R. E., 1979. Introduction to the Principles and Practice of Soil Science, John Wiley & Sons, New York.
- Wray, W. K., 1995. So Your Home Is Built on Expansive Soils: A Discussion of How Expansive Soils Affect Buildings, New York, NY: American Society of Civil Engineers.
- Yamanaka, H., Onuki, T., Katsurada, H., Kitada, I., Kashima, K., Takamoto, A. ve Maruoka, M., 1996. Use of Vertical Wall-Type EPS Elevated Filling (H=15 m.) for Bridge Abutment Backfill, Proc. Of International Symposium on EPS Construction Method, Tokyo, Japan, 223-233.
- Yevnin, A. ve Zaslavsky, 1970. Some Factors Affecting Compacted Clay Swelling, Canadian Geotechnical Journal, 7, 1, 79-89.



ÖZGEÇMİŞ

03.06.1973 tarihinde Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 1994 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden İnşaat Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. 1994 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandı ve 2002 yılına kadar bu görevini sürdürdü. 1997 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden İnşaat Yüksek Mühendisi ünvanını alarak mezun oldu. 2002 yılında Trabzon DSİ 22.Bölge Müdürlüğüne İnşaat Yüksek Mühendisi olarak atandı. İngilizce bilmektedir. Evli ve bir çocuk annesidir.

