

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ŞİŞEN ZEMİNLER VE BENTONİT – KAOLİN KARIŞIMLARININ ŞİŞME
ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Serpil GENÇ**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

**Programı : Zemin Mekaniği ve Geoteknik
Mühendisliği**

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ŞİŞEN ZEMİNLER VE BENTONİT – KAOLİN KARIŞIMLARININ ŞİŞME
ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Serpil GENÇ
501061319**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 02 Haziran 2009

**Tez Danışmanı : Doç Dr. İsmail Hakkı AKSOY (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Recep İYİSAN (İTÜ)
: Prof. Dr. Erol GÜLER (BÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın oluşumunda, konu seçimi, yönlendirme ve bilgilendirme açılarından her türlü desteği veren değerli hocam ve tez danışmanım sayın Doç. Dr. İsmail Hakkı Aksoy'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneylerde kullanılan kaolin ve bentonit killерinin teminindeki yardımlarından ötürü Sn. Prof. Dr. Mustafa Erdoğan'a teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen çok değerli aileme; tez çalışmamın her aşamasında bana güvenen, yapıcı eleştiri ve önerileri ile beni yönlendirip destekleyen Sn. Hasan Hüsnü Mollamahmutoğlu'na; sağlamış olduğu olanaklar ve hoşgörüsünden dolayı Sn. Kadri Yalçınkaya'ya; deneysel çalışmalarındaki ilgi ve sonsuz yardımlarından dolayı İ.T.Ü. Zemin Mekanik Laboratuvarı personeli Sn. Semih Viç'e teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2009

Serpil GENÇ

İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. ŞİŞEN ZEMİNLER	7
2.1 Şişen Zeminlerin Orijini ve Oluşumu	7
2.2 Şişen Kil Zeminlerin Genel Minerolojisi	8
2.3 Şişmeye Etki Eden Faktörler	9
2.3.1 Kilin minerolojik yapısı	9
2.3.2 Başlangıç su muhtevası etkisi	11
2.3.3 Kuru birim hacim ağırlığı etkisi.....	13
2.3.4 Sürşarj yük etkisi.....	14
2.3.5 Nem etkileşimi ve kristal yapı	15
2.3.6 Kompaksiyon etkisi.....	17
2.3.7 Şişmeye etki eden diğer faktörler.....	17
2.4 Şişme Parametreleri.....	19
2.4.1 Şişme potansiyeli (şişme yüzdesi)	19
2.4.2 Şişme basıncı.....	23
2.5 Şişen Zeminlerin Belirlenmesi	26
2.5.1 Jeolojik belirleme	26
2.5.2 Minerolojik belirleme	26
2.5.3 Gözlemsel belirleme	26
2.5.4 USBR sınıflandırma sistemi.....	27
2.5.5 Aktivite yöntemi	27
2.5.6 PVC yöntemi.....	29
2.5.7 Zemin su emmesi	30
2.5.8 Endeks özellikleri ile belirleme.....	31
2.5.9 Konsolidasyon (ödometre) deneyleri	32
2.5.9.1 A yöntemi: (serbest şişme deneyi).....	32
2.5.9.2 B yöntemi: (yük altında şişme deneyi).....	32
2.5.9.3 C yöntemi.....	33
2.5.9.4 Modifiye serbest şişme.....	33
2.6 Bentonit (Montmorillonit) Killeri ile İlgili Genel Bilgiler	35
2.6.1 Bentonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	36
2.6.2 Bentonit ile yapılmış bazı laboratuvar çalışmaları.....	37

2.6.3 Türkiye'de bilinen bentonit yatakları	37
3. ŞİŞEN ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU VE ŞİŞEN ZEMİNLER ÜZERİNDEKİ YAPILARIN PROJELENDİRİLMESİ	39
3.1 Şişen Zeminlerin Stabilizasyonu	39
3.1.1 Şişen zemini kaldırma ve yerdeğiştirme	39
3.1.2 Kompaksiyonun kontrol edilmesi	40
3.1.3 Ön ıslatma	40
3.1.4 Sabit su muhtevası.....	41
3.1.5 Kimyasal stabilizasyon.....	42
3.1.6 Organik bileşiklerle zemin ıslahı.....	43
3.1.7 Diğer yöntemler.....	43
3.2 Şişen temel zemini üzerindeki yapıların projelendirilmesi	44
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI	47
4.1 Deneysel Çalışmaların Konusu ve Amacı.....	47
4.2 Yapılan Deneyler.....	48
4.2.1 Likit limit deneyi.....	48
4.2.2 Plastik limit deneyi.....	49
4.2.3 Piknometre (özellik ağırlık) deneyi.....	49
4.2.4 Standart proktor deneyi	50
4.2.5 Serbest şişme (ödometre - konsolidasyon) deneyi	51
4.2.6 Modifiye serbest şişme deneyi	52
4.3 Deneysel Çalışma Sonuçları ve Sonuçların Değerlendirilmesi.....	53
5. SONUÇLAR	61
KAYNAKLAR.....	65
EKLER.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	95

KISALTMALAR

ASTM	: American Standard Test Method
PVC	: Potansiyel Hacim Değişimi
USAWES	: United States Army Waterways Experiment Satation
USBR	: United States Bureau of Reclamation
TPAO	: Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
MTA	: Maden Tetkik ve Arama
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Kil Minerallerinin İklim ve Ana Kaya Koşullarına Göre Oluşumu (Lambe, 1960)	8
Çizelge 2.2 : Değişebilir Katyon Cinsinin Şişmeye Olan Etkisi	9
Çizelge 2.3 : Çeşitli Kil Minerallerinin Katyon Değiştirebilme Kapasiteleri (Woodward-Clyde, 1967)	11
Çizelge 2.4 : Çeşitli Katyonlar İçin Kil Minerallerinin Atterberg Limitleri (W.A. White, 1958).....	11
Çizelge 2.5 : Şişmeye Etki Eden Faktörler (Dhowian ve diğ., 1984).....	18
Çizelge 2.6 : Plastisite İndisi – Yüzeysel Kabarma Arasındaki İlişki	22
Çizelge 2.7 : Plastisite İndisi ve Şişme Potansiyeli Arasındaki Bağlantı.....	23
Çizelge 2.8 : Hacim değişikliği, şişme basıncı ve muhtemel hasar arasındaki ilişki (Wayne vd., 1984).....	25
Çizelge 2.9 : Etkili Endeks Özellikleri ile Şişme Derecesinin Belirlenmesi	27
Çizelge 2.10 : PVC Oranlarına Göre Şişme Kriterleri	29
Çizelge 2.11 : Şişme Potansiyelinin Plastisite İndisine Göre Değişimi	32
Çizelge 2.12 : Modifiye Serbest Şişme İndeksine Bağlı Olarak Şişme Potansiyeli..	34
Çizelge 3.1 : Şişen Zeminler Üzerindeki Yapılar için Yapım Prosedürleri	45
Çizelge 4.1 : Serbest Şişme Deney Sonuçları.....	52
Çizelge 4.2 : Bentonit Oranlarına Göre Serbest Şişme Yüzdeleri.....	53
Çizelge 4.3 : Altı Farklı Karışım İçin Bentonit ve Kaolin Ağırlıkça Yüzdeleri.....	55
Çizelge 4.4 : Kil karışım oranları ve Atterberg (Kıvam) Limitleri.....	56
Çizelge 4.5 : Bentonit Yüzdelerine Göre Kompaksiyon Deney Sonuçları	56
Çizelge 4.6 : % 34 Su Muh. Değeri İçin Bentonit % desİ – Şişme % desİ İlişkisi....	59
Çizelge B.1 : Likit Limit Deney Çizelgesi (%5 Bentonit+%95 Kaolin).....	85
Çizelge B.2 : Likit Limit Deney Çizelgesi (%10 Bentonit+%90 Kaolin)	85
Çizelge B.3 : Likit Limit Deney Çizelgesi (%15 Bentonit+%85 Kaolin)	85
Çizelge B.4 : Likit Limit Deney Çizelgesi (%20 Bentonit+%80 Kaolin)	85
Çizelge B.5 : Likit Limit Deney Çizelgesi (%25 Bentonit+%75 Kaolin)	86
Çizelge B.6 : Likit Limit Deney Çizelgesi (%30 Bentonit+%70 Kaolin)	86
Çizelge B.7 : Plastik Limit Deney Sonuçları (%10 Bentonit+%90 Kaolin)	86
Çizelge B.8 : Plastik Limit Deney Sonuçları (%15 Bentonit+%85 Kaolin)	86
Çizelge B.9 : Plastik Limit Deney Sonuçları (%20 Bentonit+%80 Kaolin)	87
Çizelge B.10 : Plastik Limit Deney Sonuçları (%25 Bentonit+%75 Kaolin)	87
Çizelge B.11 : Plastik Limit Deney Sonuçları (%30 Bentonit+%70 Kaolin)	87
Çizelge B.12 : Piknometre Deney Sonuçları (%5 Bentonit+%95 Kaolin).....	87
Çizelge B.13 : Piknometre Deney Sonuçları (%10 Bentonit+%90 Kaolin).....	88
Çizelge B.14 : Piknometre Deney Sonuçları (%15 Bentonit+%85 Kaolin).....	88
Çizelge B.15 : Piknometre Deney Sonuçları (%20 Bentonit+%80 Kaolin).....	88
Çizelge B.16 : Piknometre Deney Sonuçları (%25 Bentonit+%75 Kaolin).....	88
Çizelge B.17 : Piknometre Deney Sonuçları (%30 Bentonit+%70 Kaolin).....	88
Çizelge B.18 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%5 Bentonit+%95 Kaolin).....	89
Çizelge B.19 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%10 Bentonit+%90 Kaolin).....	89

Çizelge B.20 :	Standart Proktor Deney Sonuçları (%15 Bentonit+%85 Kaolin)	90
Çizelge B.21 :	Standart Proktor Deney Sonuçları (%20 Bentonit+%80 Kaolin)	90
Çizelge B.22 :	Standart Proktor Deney Sonuçları (%25 Bentonit+%75 Kaolin)	91
Çizelge B.23 :	Standart Proktor Deney Sonuçları (%30 Bentonit+%70 Kaolin)	91
Çizelge B.24 :	Ödometre Sonuçları (%5 Bentonit+%95 Kaolin)	92
Çizelge B.25 :	Ödometre Sonuçları (%10 Bentonit+%90 Kaolin)	92
Çizelge B.26 :	Ödometre Sonuçları (%15 Bentonit+%85 Kaolin)	93
Çizelge B.27 :	Ödometre Sonuçları (%20 Bentonit+%80 Kaolin)	93
Çizelge B.28 :	Ödometre Sonuçları (%25 Bentonit+%75 Kaolin)	94
Çizelge B.29 :	Ödometre Sonuçları (%30 Bentonit+%70 Kaolin)	94

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Zemin Hareketlerinin Mevsimlere Bağlı Değişimine Bir Örnek	4
Şekil 2.1 : Sabit Birim Hacim Ağırlıkta Numuneler için Su Muhtevasının Hacim Değişimine Etkisi (Chen, 1975).....	12
Şekil 2.2 : Başlangıç Su Muhtevasının Şişme Yüzdesine Etkisi (Kassif, 1971).....	12
Şekil 2.3 : Başlangıç Su Muhtevasının Şişme Basıncına Etkisi (Kassif, 1971).....	12
Şekil 2.4 : Kuru Birim Hacim Ağırlığının Hacim Değişimine Etkisi (Chen, 1975).....	13
Şekil 2.5 : Kuru Birim Hacim Ağırlığının Şişme Yüzdesine Etkisi (Kassif, 1971).....	14
Şekil 2.6 : Kuru Birim Hacim Ağırlığının Şişme Basıncına Etkisi (Kassif, 1971).....	14
Şekil 2.7 : Şişme Yüzdesi - Sürşarj Yük İlişkisi (Brackley, 1975).....	15
Şekil 2.8 : Killerde Kristallerarası Şişme (Gillot, 1968; Kasapoğlu, 1989).....	16
Şekil 2.9 : Kompaksiyon Yönteminin Şişme Basıncına Etkisi (Seed, 1962).....	17
Şekil 2.10 : Şişme Potansiyeli Sınıflandırma Kartı.....	21
Şekil 2.11 : Şişen Zeminlerin Hacim Değişimi Yük ilişkisi (McDowell, 1956).....	22
Şekil 2.12 : Şişme - Konsolidasyon Eğrisi (Chen, 1975).....	24
Şekil 2.13 : Seed v.d. tarafından önerilen sınıflandırma sistemi.....	28
Şekil 2.14 : Van Der Merve Tarafından Önerilen Sınıflandırma Abağı.....	29
Şekil 2.15 : Şişme İndisi - Potansiyel Hacim Değişim İlişkisi (Lambe, 1960).....	30
Şekil 2.16 : Serbest Şişme, Likit Limit ve Su İçeriği Korelasyon Kartı (Vijayvergiya ve Ghazzaly, 1973).....	33
Şekil 3.1 : (a) Pabuçlu kuyu temel ve giriş inşaatı; (b) eşitlik 3.1'deki parametrelerin tanımları (Das, 1995).....	45
Şekil 4.1 : Ağırlıkça Bentonit Yüzdeleri ile Likit Limit Değerleri.....	55
Şekil 4.2 : Bentonit Yüzdelere Göre w_{opt} - γ_{kmaks} ilişkisi	56
Şekil 4.3 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%15 Bentonit+%85 Kaolin)	57
Şekil 4.4 : Su Muhtevası ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%15 Bentonit+%85 Kaolin)...	57
Şekil 4.5 : Farklı Oranlardaki Karışımların Aynı Su Muhtevalarındaki Şişme Yüzdeleri	58
Şekil 4.6 : Montmorillonit (bentonit) Yüzdesi – Plastisite İndisi Arasındaki İlişki ..	58
Şekil A.1 : Karışımın Likit Limit Değerleri (%5 Bentonit+%95 Kaolin)	71
Şekil A.2 : Karışımın Likit Limit Değerleri (%10 Bentonit+%90 Kaolin)	71
Şekil A.3 : Karışımın Likit Limit Değerleri (%15 Bentonit+%85 Kaolin)	71
Şekil A.4 : Karışımın Likit Limit Değerleri (%20 Bentonit+%80 Kaolin)	72
Şekil A.5 : Karışımın Likit Limit Değerleri (%25 Bentonit+%75 Kaolin)	72
Şekil A.6 : Karışımın Likit Limit Değerleri (%30 Bentonit+%70 Kaolin)	72
Şekil A.7 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%5 Bentonit+%95 Kaolin).....	73
Şekil A.8 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%10 Bentonit+%90 Kaolin).....	73
Şekil A.9 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%15 Bentonit+%85 Kaolin).....	73
Şekil A.10 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%20 Bentonit+%80 Kaolin).....	74
Şekil A.11 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%25 Bentonit+%75 Kaolin).....	74
Şekil A.12 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%30 Bentonit+%70 Kaolin).....	74
Şekil A.13 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%5 Bentonit+%95 Kaolin)	75
Şekil A.14 : Su Muhtevası ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%5 Bentonit+%95 Kaolin) ..	75

Şekil A.15 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%10 Bentonit+%90 Kaolin)	75
Şekil A.16 : Su Muh. ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%10 Bentonit+%90 Kaolin).....	76
Şekil A.17 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%15 Bentonit+%85 Kaolin)	76
Şekil A.18 : Su Muh.ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%15 Bentonit+%85 Kaolin).....	76
Şekil A.19 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%20 Bentonit+%80 Kaolin)	77
Şekil A.20 : Su Muh. ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%20 Bentonit+%80 Kaolin).....	77
Şekil A.21 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%25 Bentonit+%75 Kaolin)	77
Şekil A.22 : Su Muh.ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%25 Bentonit+%75 Kaolin).....	78
Şekil A.23 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%30 Bentonit+%70 Kaolin)	78
Şekil A.24 : Su Muh. ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%30 Bentonit+%70 Kaolin).....	78
Şekil A.25 : Likit Limit Deneyinde Kullanılan Aletler	79
Şekil A.26 : Likit Limit Deneyinde Numunenin Görünüşü.....	79
Şekil A.27 : Plastik Limit Deneyinin Yapılışı	79
Şekil A.28 : Piknometre'nin Hava Kompresörü İle Çalkalanması	80
Şekil A.29 : Proktor Deneyinde Kullanılan Aletler	80
Şekil A.30 : Standart Proktor Kalıbı	80
Şekil A.31 : Kompaksiyon İçin Hazırlanan Numune	81
Şekil A.32 : Konsolidasyon Deney Aletleri.....	81
Şekil A.33 : Konsolidasyon Okuma Saati	81
Şekil A.34 : %30 + %70 Karışım için 1. Noktadan Alınan Deney Numunesi	82
Şekil A.35 : %30 + %70 Karışım için 2. Noktadan Alınan Deney Numunesi	82
Şekil A.36 : %30 + %70 Karışım için 3. Noktadan Alınan Deney Numunesi	82
Şekil A.37 : %30 + %70 Karışım için 4. Noktadan Alınan Deney Numunesi	83
Şekil A.38 : %30 + %70 Karışım için 5. Noktadan Alınan Deney Numunesi	83
Şekil A.39 : Modifiye Serbest Şişme Deneyinin Yapılışı	84
Şekil A.40 : Modifiye Serbest Şişme Deney Tüpleri.....	84

SEMBOL LİSTESİ

W_{opt}	: Optimum su muhtevası
W_n	: Tabii su muhtevası
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
γ_{kmaks}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_w	: Suyun birim hacim ağırlığı
w_L	: Likit limit
w_P	: Plastik limit
I_p	: Plastisite indisi
G_s	: Zeminin dane özgül ağırlığı
W_s	: Etüvde kurutulan zemin ağırlığı
V_s	: Zemin dane hacmi
P_o	: Efektif basınç
e_o	: Başlangıç boşluk oranı
H_o	: Zemin başlangıç hacmi
ΔH	: Hacim artışı
S_w	: Şişme yüzdesi
S	: Şişme potansiyeli
C	: Kil yüzdesi
K	: Şişme katsayısı
X	: Kil tipine bağlı üssel bir sayı
A^o	: Angstrom
D_s	: Kuyu çapı
Z	: Aktif zon derinliği
Φ_{ps}	: Kuyu duvarı-zemin efektif sürtünme açısı
PT	: Sıfır yanal şişme için basınç

ŞİŞEN ZEMİNLER VE BENTONİT – KAOLİN KARIŞIMLARININ ŞİŞME ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Dünyanın birçok bölgesinde, özellikle de kurak ve yarı kurak alanlarda şişen zeminlere rastlanmaktadır. Genellikle kurak iklime sahip bölgelerde yer alan ve suya doymun olmayan bazı kil zeminlerde, su muhtevasının artması sonucunda “şişme” olarak tanımlanan önemli miktarlara varan hacim artışları meydana gelmektedir. Minerolojik ve çevresel faktörlerin birlikte etkisi gözönüne alınarak şişme potansiyelinin ve şişme basıncının önceden belirlenmesi, bu tür zeminler üzerine inşa edilecek özellikle hafif yapılarda oluşabilecek hasarların ortadan kaldırılması için gerekli mühendislik önlemlerinin alınabilmesi ve uygun temel sistemi seçimi imkanını sağlaması açısından önemlidir.

Bu çalışmada; kaolin kili ile yüksek plastisiteli ve şişme özelliği gösteren montmorillonit (bentonit) kili belirli oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25, %30) karıştırılarak altı farklı karışım hazırlanmıştır. Standart Proktor enerjisi ile çeşitli su muhtevalarında sıkıştırılan numuneler üzerinde, ASTM - D4546’da belirtilen A deney yöntemi kriterlerine göre ödometre aletinde şişme deneyleri yapılarak, karışımların şişme özellikleri incelenmiştir.

Bu amaçla öncelikli olarak numunelerin indeks ve mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Numuneler üzerinde dane birim hacim ağırlığı (γ_s) deneyleri yapılmış, kil numunelerinin kıvam özellikleri, likit limit ve plastik limit deneyleriyle bulunmuştur. Standart Proktor (kompaksiyon) deneyi yapılarak ödometrede şişme deneyine tabi tutulan karışımlara ait numuneler hazırlanmıştır.

Hazırlanan karışımlarda bentonit oranı arttıkça şişme yüzdesi de artmaktadır. Şişme yüzdesi su muhtevasının artması ile azalmaktadır. Bentonit yüzdesi arttıkça likit limit ve plastisite indisi lineer olarak artmaktadır. Modifiye Serbest Şişme deneyinde ise ağırlıkça bentonit oranı arttıkça şişme yüzdesinin arttığı gözlenmiştir.

EXPANSIVE SOILS AND THE SWELLING BEHAVIOUR OF BENTONITE – KAOLINITE MIXTURES

SUMMARY

The swelling soils are frequently met in many regions of the world and especially in dry and half-dry lands. In general some unsaturated clayey soils in arid climates may undergo large volume changes with increasing water content. This phenomena is known as “swelling”. It is primarily important to define swelling pressure and total percentage of swelling for the engineering applications built on these soils. Without conducting sufficient investigations at highways and airport pavements, tunnel linings, irrigation channels, retaining walls, excessive damages can take place. It is possible to minimize the effect of swelling by conducting appropriate tests to determine swelling potential and pressure and to take the necessary precautions and by designing a suitable foundation system.

In this study, kaolinite and montmorillonite (bentonite) clays with high plasticity and swelling characteristics were mixed at proportion of %5, %10, %15, %20, %25, %30. So, six different mixtures were prepared. The specimens were subjected to swelling tests performed by considering the criteria of A test method explained in ASTM-D4546, and swelling characteristics were investigated.

For this purpose, the index and engineering properties of the specimens were determined. The grain bulk specific weight (γ_s) test was conducted, the plasticity characteristics of the cohesive clay specimens were found by the liquid limit and plastic limit tests.

The results of the experimental work are demonstrated that swelling percent increases with the increase of bentonite proportion and that it decreases with the rise of water content. LL and PI are linearly increase as the rate of bentonite rises. It was also observed that in Modified Free Swell Test, swelling percentage increases with the increase in ratio of bentonite.

1. GİRİŞ

Yeryüzündeki zeminlerin bir bölümünü teşkil eden “şişen zeminler”, geoteknik mühendisliğinde önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yıllık yağışın yıllık buharlaşmadan daha az olduğu, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde bu tür zeminlere sıkça rastlanmaktadır. Suyu doymun olmayan bazı killi zeminlerin su emerek hacminin artması “şişme”, bu hacim artışını engellemek için uygulanan ek basınç ise “şişme basıncı” olarak tanımlanabilir.

Bu özelliğe sahip olan kil zeminlerin şişme davranışlarının incelenmesine yol açan önemli neden su ile temas etmeleri halinde meydana gelen hacim değişikliklerinin oldukça büyük olmasıdır. Ayrıca, bu hacim artışlarının engellenmesi durumunda aşırı basınç tatbik etmeleridir.

Ülkemizde ve dünyada çok geniş yer kaplayan ince daneli zeminlerin büyük çoğunluğu şişme potansiyeline sahiptirler. Suyu doymun olmayan ince daneli zeminlerin bünyelerine su aldıkları zaman meydana gelen hacimsel artış, beraberinde zemin problemlerini getirmektedir. Söz konusu zeminler üzerine inşa edilen, özellikle karayolu ve havaalanı kaplamaları, sulama kanalları, boru hatları gibi hafif yapılarda veya arkasında bu tür zeminleri tutan dayanma yapılarında, zemindeki hacim değişikliği nedeni ile çok önemli boyutlarda hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu bakımdan zemin davranışlarının açıklanabilmesi için şişme potansiyeli, şişme basıncı ve bunlara etkiyen faktörlerin önceden bilinmesi önem taşımaktadır.

Killi zeminlerin şişme mekanizmasını etkileyen bir çok faktör vardır. Bunlar zeminin ihtiva ettiği kil yüzdesi ve minerolojik yapısı, kuru birim hacim ağırlık, başlangıç su muhtevası, danelerin yerleşim biçimi, arazideki gerilme şartları, emme basıncı, permeabilite, şişen zemin tabakasının kalınlığı ve derinliği, dış yükler, iklim şartları ve sıkıştırılmış zeminler için kompaksiyon yöntemi olarak sayılabilir (Lambe, T.W., 1960).

Geoteknik mühendisliğinde şişen zeminlerin şişme karakteristiklerinin (şişme basıncı ve şişme yüzdesi) belirlenmesi, şişme probleminde çözümün ilk kısmını oluşturur. Şişme karakteristikleri belirlendikten sonra, uygun stabilizasyon metotlarının kullanılması ile bu problem mümkün olduğunca engellenebilmektedir.

Şişme karakteristiklerinin belirlenmesi için birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemler genel olarak üç grup halinde düşünülebilir.

1) Minerolojik Tanımlama: Şişen zeminlerin minerolojik yapısı şişme potansiyelini önemli ölçüde etkiler. Kil minerali üzerindeki negatif elektrik yükleri, tabakalar arası bağların mukavemeti ve katyon değişim kapasitesi kilin şişme potansiyeline etki eder. Bu yüzden kil minerolojistleri, herhangi bir kilin şişme potansiyelinin, bu kilin ana mineralinin belirlenmesiyle bulunabileceğini iddia etmişlerdir. Aşağıda en çok kullanılan beş yöntem görülmektedir.

- a) X - ray difraksiyonu
- b) Diferansiyel termal analiz
- c) Boya Adsorbsiyonu
- d) Kimyasal analiz
- e) Elektron mikroskop yöntemi

Minerolojik tanımlamanın çeşitli yöntemleri kilin ana özelliklerinin belirlenmesinde önemlidir fakat ekonomik ve pratik değildir.

2) Dolaylı Yöntemler: Şişme özelliğinin belirlenmesinde önemli araçlar olan indeks özellik, PVC yöntemi, aktivite yöntemi ve ampirik bağıntıları içermektedir.

3) Doğrudan Ölçüm: Şişen bir kilin şişme potansiyeli ve şişme basıncını en iyi belirleyen yöntem doğrudan ölçümdür. Doğrudan ölçüm yöntemleri şişen zeminler için en önemli ve güvenilir deneyleri kapsar. Deneylerin gerçekleştirilmesi kolay, ucuz ve az miktarda laboratuvar ekipmanı kullanılır. En yaygın kullanılan doğrudan ölçüm yöntemleri, ödometre ve emme basıncı yöntemleridir.

Ampirik yöntemler ödometre deney aletinde yapılan çok sayıda şişme ölçümlerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesi ve kabarmalara korele edilmesi esasına dayanmaktadır. Önerilen yöntemler veya tahmin yöntemleri belli coğrafik bölgelerin zemin karakterini yansıttığından değişik bölgelerde uygulanması sakıncalı görülmektedir. Örneğin Van der Merwe sadece Güney Afrika, Schneider Teksas killeri üzerinde yaptıkları çalışmalarda ampirik yöntemler önermişlerdir.

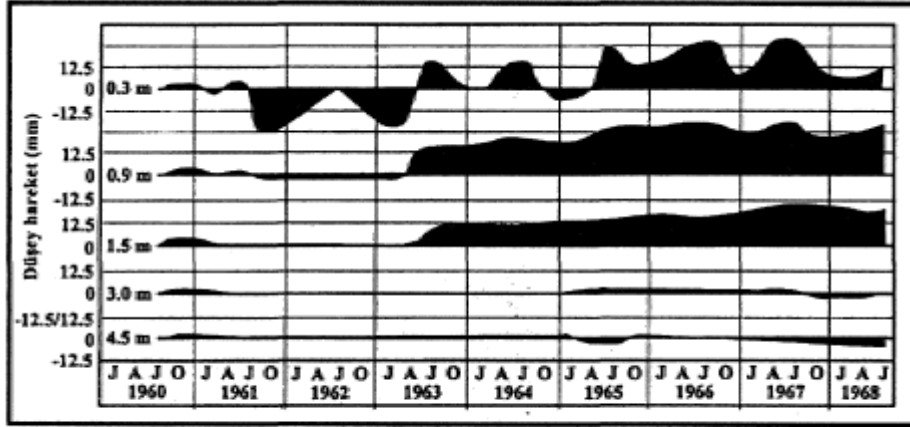
En yaygın olarak kullanılan doğrudan ölçüm tekniği ödometre yöntemidir. ASTM D4546'da ödometre aletiyle yapılan üç alternatif yöntem sunulmuştur. Bu çalışmada ASTM D4546 deney yöntemlerinden A metodu olarak belirtilen serbest şişme yöntemi kullanılmıştır.

Zeminin şişme potansiyeli, gerek uygulanacak yöntemin belirlenmesi, gerekse uygun temel sisteminin seçimi için etkili olan önemli parametrelerden biridir. Şişme mekanizmasına etkileyen parametrelerin çokluğu ve bu parametrelerin nicelik olarak tanımlanmasındaki zorluklar şişme miktarının gerçekçi olarak tahminini güçleştirmektedir.

Şişme potansiyelinin tahmini ile ilgili literatürde birçok araştırma mevcuttur. Bu çalışmaların bir kısmında başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık, diğer bir kısmında kıvam limitleri, bir diğer kısmında ise minerolojik özelliklerin şişmeye etkileri göz önüne alınmıştır. Sabit bir kuru birim hacim ağırlıkta su muhtevasının artmasıyla şişmenin azaldığı, sabit bir su muhtevasında kuru birim hacim ağırlığın artmasıyla şişmenin arttığı, plastisite indisinin artmasıyla şişmenin arttığı birçok çalışmada gösterilmiştir.

Su içeriğindeki artış killerde şişmeye neden olur. Derinliğe bağlı olarak zeminlerin su içeriğindeki periyodik değişimin gözlemlendiği zonlara, "aktif zon" denir. Aktif zonun derinliği bölgelere göre değişim gösterir. Şişen killi zeminlerde yüzeyden itibaren su muhtevası değişikliğinin etkin olduğu aktif zon sınırlıdır. Örnek vermek gerekirse Amerika'da aktif zon kalınlığı 1.5 m ile 5 m arasındadır. Ekstrem değer olarak 15 m belirlenmiştir.

Aktif zon derinliği, belli mevsimlerde zemin profillerinin derinliğine karşılık gelen likit indeksinin grafiğinin oluşturulması ile kolayca belirlenebilir. Aktif zondaki mevsimsel değişimlerin şişen zeminlerin şişme-büzölme özelliğine etkisi örnek olarak şekil 1.1’de verilmiştir. Bu, zemin yüzeyinin daha altındaki derinliklerde arazi deneyleri ile elde edilen karakteristik düşey zemin hareketlerinin kayıtlarıdır. Mevsimsel zemin hareketleri hemen hemen 3-4 m derinlikte sona ermektedir.



şekil 1.1 : Zemin Hareketlerinin Mevsimlere Bağlı Değişimine Bir Örnek.

şişen zeminler için sınıflama sistemleri, potansiyel şişmeler nedeni ile temel yapıda oluşacak sorunlara bağlı olarak geliştirilmiştir. U.S. Army Waterways Experiment Station tarafından geliştirilen sınıflama, Amerika Birleşik Devletlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu sınıflamadan başka araştırmacılar, zeminlerin bazı özelliklerine bağlı olarak zeminlerin şişme özelliklerine yaklaşım için sınıflamalar önermişlerdir. Holtz (1959), kolloid içeriği, plastisite indeksi ve büzölme sınırına; Seed ve diğ. (1962), kil içeriği ve aktiviteye; Altmeyer (1955), lineer büzölme, büzölme sınırı ve muhtemel şişme yüzdesine; Daksanamanthi ve Raman (1973), oluşturdukları plastisite kartına; Raman (1967), plastisite indeksi ve büzölme indeksine; Van Der Merwe (1964), kil içeriği, plastisite indeksi ve aktiviteye bağlı olarak geliştirdiği şişme potansiyeli abağına; Snethen (1984), likit limit, plastisite indeksi, şişme potansiyeli ve doğal zemin su emmesine; Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973), Nayak ve Christensen(1974), ise ortaya koydukları ampirik eşitliklere bağlı olarak sınıflamalar önermişlerdir.

Bu tez çalışmasında, Bursa Mustafakemalpaşa'dan çıkarılmış, şişme özelliği göstermeyen kaolin ile Tokat Reşadiye'den çıkarılmış, yüksek şişme özelliği gösteren sarı renkli, Na bentonit (montmorillonit) karıştırılarak 6 farklı numune hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde gerekli deneyler yapılarak ilave edilen bentonit oranlarına göre karışımın şişme özellikleri incelenmiştir.

Çalışmada numunelerin endeks ve mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Numuneler üzerinde dane birim hacim ağırlığı (γ_s) deneyleri yapılmış, kil numunelerinin kıvam özellikleri, likit limit ve plastik limit deneyleriyle bulunmuştur. Standart Proktor sıklığında hazırlanmış numuneler üzerinde ASTM - D4546'da belirtilen A deney yöntemi kriterlerine göre ödometre aletinde şişme deneyleri yapılarak, karışımların şişme özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, altı farklı karışım üzerinde modifiye serbest şişme deneyi yapılmıştır.

2. ŞİŞEN ZEMİNLER

2.1 Şişen Zeminlerin Orijini ve Oluşumu

Şişmeye yol açan kil minerallerinin ana kaynağı magmatik kayalar, özellikle de bazalttır. İçerisinde feldispat bulunan metamorfik ve püskürük kayaların kimyasal ayrışması sonucu ortaya çıkan montmorillonit, şişmeye neden olan en önemli kil mineralidir. Gillot, Lambe ve Whitman, Donaitson, Chen, Millot ve Schreiner gibi araştırmacılar, şişmenin ayrışma şartları ile de doğrudan ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Örneğin, hem montmorillonit hem de kaolin magmatik kayalardan ayrılmış kil mineralleri olduğu halde ayrışma şartlarındaki farklılıklar nedeni ile montmorillonit yüksek, kaolin ise düşük şişme potansiyeline sahiptir.

Bir kayanın kimyasal aşınması, bir veya daha fazla kimyasal işlemle parçalanması sonucudur. Millot (1970)' a göre tropikal iklimlerde bazaltın aşınma ile montmorillonite dönüşmesi iki aşamada olmaktadır. İlk olarak nemli mevsimler boyunca hidroliz sonucu bazalt; silikat, alüminyum ve magnezyuma ayrışır. Drenajın olmadığı alanlarda bu mineraller taşınamazlar. Kurak mevsimler boyunca su muhtevası azalırken, tuz ve mineral konsantrasyonu artar ve temel mineraller montmorillonit oluşturmak için birleşirler. Bazik magmatik kayalardan montmorillonit oluşması için, kimyasal reaksiyon alkali bir ortamda oluşması gerekmektedir (Gillot, 1963).

Bazı önemli kil minerallerinin iklim ve ana kaya koşullarına göre meydana gelişleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Kil Minerallerinin İklim ve Ana Kaya Koşullarına Göre Oluşumu
(Lambe, 1960)

Kil Minerali	Oluşumu
Kaolinit	İyi aşınması sonucu, genellikle tropik ve astropik alanlarda oluşur.
Klorit	Metamorfik ana kaya alanlarında, genellikle deniz tortularında ve çökelti kayalarda oluşur. Normal olarak yüksek oranlarda bulunmaz.
İllit	Sıcak ve kurak bölgelerde çökelti kayaların aşınması ile oluşur.
Montmorillonit	Zayıf drenaj şartlarında volkanik kül ve kayaların aşınması sonucu, genellikle kurak alanlarda illit ile beraber bulunur.

2.2 Şişen Kil Zeminlerin Genel Minerolojisi

Şişen zeminlerin minerolojik bileşimi, şişme potansiyeli üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kristal yapıya sahip kil minerallerinin, özgül spesifik yüzeyleri büyük, dolayısı ile su tutma kapasiteleri de fazladır. Mesela, illitten sekiz kat, kaolinitten de kırk kat daha büyük bir özgül spesifik yüzeye sahip olan montmorillonitin su tutma kapasitesi, dolayısı ile de şişme kapasitesi, diğer kil minerallerine oranla daha büyüktür.

Çoğu kil mineralleri, temel yapısal birimlerin tabaka değiştirmesinden oluşur. Montmorillonitte bir tek parçacık, iki silikat birimi arasında bir gibsit birimi içeren üç levhadan oluşabilir. Çoğu diğer kil mineralleri iki veya üç yapısal birimin tekrarlı dizilimini içerir. Bütün kil minerallerinin karakteristik yapısında, kristal yapının yüzeyinde bulunan oksijen atomu ile en azından bir silikat katmanı vardır.

2.3 Şişmeye Etki Eden Faktörler

2.3.1 Kilin minerolojik yapısı

Bir çok zemin sınıflandırma sistemi kil danelerinin efektif çapını $2\mu\text{m}$ (0.002 mm) ya da daha küçük olarak tanımlar. Fakat yalnızca dane çapı kil mineralini belirlemez. İnce daneli zeminlerin belki de en önemli dane özelliği minerolojik özelliğidir. Kilin su emmesiyle oluşan hacim büyümesinin minerolojik açıdan miktarı kil mineralinin türü ve miktarına, değişebilir iyonlarına ve kilin iç yapısına bağlıdır.

Kil minerali bazı anyon ve katyonları çekme ve onları değişebilir bir durumda tutma özelliğine sahiptir. Değişebilir iyonlar, birim silica-alumina kil mineralinin dış yüzeyinde tutulur ve değişme reaksiyonu (iyon değişimi) silica-alumina biriminin yapısını etkilemez. Kil mineralinde en çok değişebilme özelliğine sahip katyonlar Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ , K^+ , NH_4^+ , Na^+ 'dır. Bu tür yüklerin varlığı, kilin çözültiden iyonları çekebilme yeteneği olduğunu gösterir. Katyonlar (pozitif iyonlar) anyonlara (negatif iyonlar) oranla daha çok adsorbe edilir. Bu yüzden kil yüzeyinde negatif yükler baskın olmalıdır. Bir katyon, örneğin Na^+ , bir tuz çözeltisinden hemen çekilir ve kil yüzeyine yapışır. Bununla birlikte, çekilen Na^+ iyonu sürekli yapışmaz. Eğer kil potasyum klorit (KCL) çözeltisine konursa Na^+ , K^+ iyonu ile yer değiştirir. Fazla katyonların yol açtığı bu yerdeğiştirme işlemi katyon değişimi olarak adlandırılır. Kilin değişebilir katyon cinsi şişme potansiyeli ile doğrudan ilgilidir. Çizelge 2.2 bu ilişkiyi ifade etmektedir.

Çizelge 2.2 : Değişebilir Katyon Cinsinin Şişmeye Olan Etkisi

Katyon Cinsi	Na	Mg	Ca	K	Fe	H
Şişme (%)	29	26	23	21	18	15

Grim (1962), kil zeminlerde şişmeyi daneler arası ve daneler içi olmak üzere ikiye ayırmıştır. Daneler arası şişme, kilin minerolojik kompozisyonundan bağımsız olarak herhangi bir kil zeminde meydana gelebilir. Nispeten kuru olan killerde daneler, kapiler kuvvetlerden kaynaklanan çekimle birarada tutulurlar. İslanma meydana geldiğinde ise kapiler kuvvetlerin etkisi azalır ve kil zemin genişler. Başka bir deyişle, suyun dıştaki kristal yüzeylere çıkması engellenip, kristallerin arasını boşluk doldurduğunda şişme meydana gelir. Öte yandan daneler içi şişme, montmorillonit (bentonit) mineralinin karakteristik özelliğidir. Bir montmorillonit kristalini oluşturan ayrı ayrı molekül tabakaları zayıf bir şekilde birbirlerine bağlıdır. Dolayısıyla ıslanma meydana geldiğinde su sadece kristallerin arasına değil, kristalleri de kapsayan birim tabakaların arasına girer. Öyle ki, Na montmorillonit esas hacminin %2000 'ine kadar genişleyebilir ve kil jel kıvamına gelir.

Kaolinit, kil mineralleri arasında en düşük şişme kapasitesine sahip kildir. İllit % 15 , İllit–montmorillonit karışımı %60-%100 oranında şişme gösterebilmektedir. Ca montmorillonit Na'dan daha az şişme göstererek %50-%100 aralığında değişmektedir.

Şişme olayının kilin minerolojik özellikleriyle doğrudan ilgili olması sebebiyle, kil minerolojistleri kilin ana mineral öğelerinin belirlenmesiyle şişme potansiyelin değerlendirilebileceğini iddia etmişlerdir. En çok kullanılan beş yöntem şunlardır; X-ray difraksiyonu, diferansiyel termal analiz, boya adsorbsiyonu, kimyasal analiz ve elektron mikroskop yöntemidir.

Katyon değiştirebilme kapasitesi birim kütledeki katyon için elektriksel çekim olarak ifade edilir. Çeşitli kil minerallerinin katyon değiştirebilme kapasiteleri Çizelge 2.3'de görülmektedir.

Adsorbe edilen katyonlar ile zeminlerin özellikleri arasında belirli ilişkiler mevcuttur. Bazı kil mineral tipleri için bu katyonlar ile likit limit ve plastisite indisleri belirtilmiştir(Çizelge 2.4).

Killer deniz kenarında bir yere taşınır veya orada aşınmayla oluştuklarında kilin değişebilen katyonlarında yüksek oranda sodyum bulunur. Eğer killer nehir veya yer altı suyu olan yerlerde oluşursa değişebilen katyonlarında yüksek oranda kalsiyum bulunur.

Çizelge 2.3 : Çeşitli Kil Minerallerinin Katyon Değiştirebilme Kapasiteleri (Woodward-Clyde, 1967)

	Kaolinit	İllit	Montmorillonit
Parçacık kalınlığı (mikron)	0.5-2	0.003-0.1	<9.5A
Dane çapı (mikron)	0,5-4	0.5-10	0.05-10
Özgül Yüzey (m ² /gr)	10-20	65-180	50-840
Katyon Değiştirebilme Kapasitesi	3-15	10-40	70-80

Çizelge 2.4 : Çeşili Katyonlar İçin Kil Minerallerinin Atterberg Limitleri (W.A. White, 1958)

Katyon	Na		K		Ca	
	Likit Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	Likit Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	Likit Limit (%)	Plastisite İndisi (%)
Kaolinit	29	1	35	7	34	8
İllit	61	27	81	38	90	50
Montmorillonit	344	251	161	104	166	101

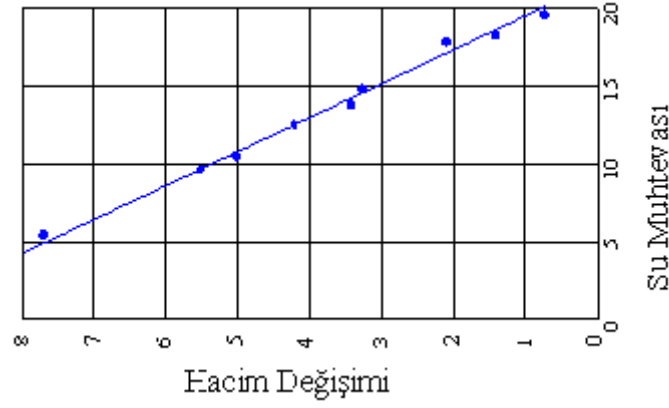
2.3.2 Başlangıç su muhtevası etkisi

Zeminlerin su muhtevasında bir artış olmadan zeminin şişmesi beklenmez. Kuru bir zeminin ıslak bir zemine oranla daha fazla şişme göstereceği bilinen bir gerçektir.

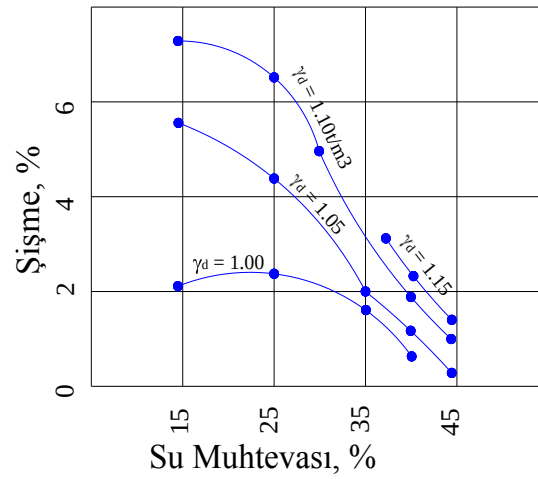
Chen(1975) yaptığı bir seri deneyler neticesinde sabit birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış zeminlerin hacimsel şişmelerinin su muhtevasının artması ile azaldığını belirtmiştir (Şekil 2.1). Bununla beraber şişme basıncının başlangıç su muhtevasına bağlı olmadığını belirtmiştir.

Kassiff (1971) başlangıç su muhtevasının şişme yüzdesi ve şişme basıncına etkisini araştırmıştır. Sonuçlar Şekil 2.2 ve Şekil 2.3’de görülmektedir. Burada görüldüğü üzere sabit birim hacim ağırlıkta su muhtevasındaki artış şişme yüzdesi ve şişme basıncını azaltmaktadır.

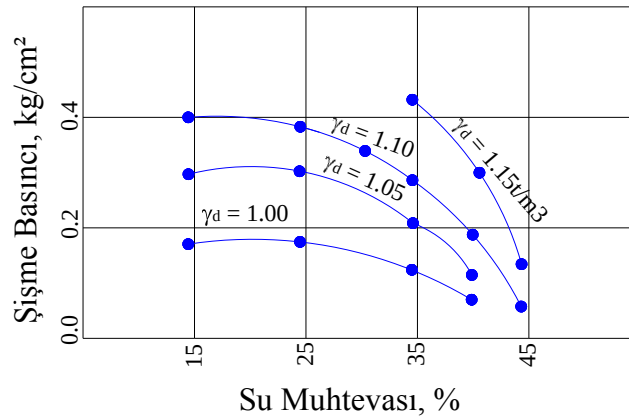
Komornik ve David (1969), şişme basıncının tahmini için yaptıkları araştırma deneyleri neticesinde su muhtevasının azalmasıyla şişme basıncının arttığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.1 : Sabit Birim Hacim Ağırlıkta Numuneler için Su Muhtevasının Hacim Değişimine Etkisi (Chen, 1975)



Şekil 2.2 : Başlangıç Su Muhtevasının Şişme Yüzdesine Etkisi (Kassif, 1971)



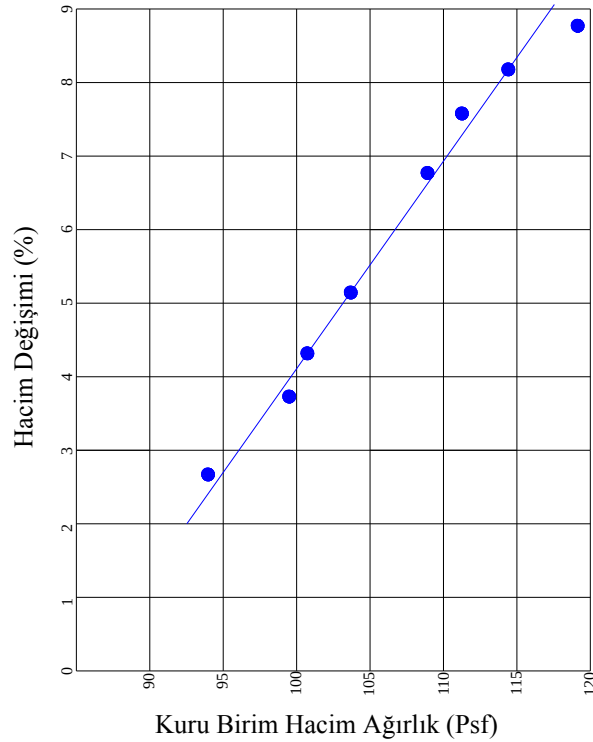
Şekil 2.3 : Başlangıç Su Muhtevasının Şişme Basıncına Etkisi (Kassif, 1971)

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

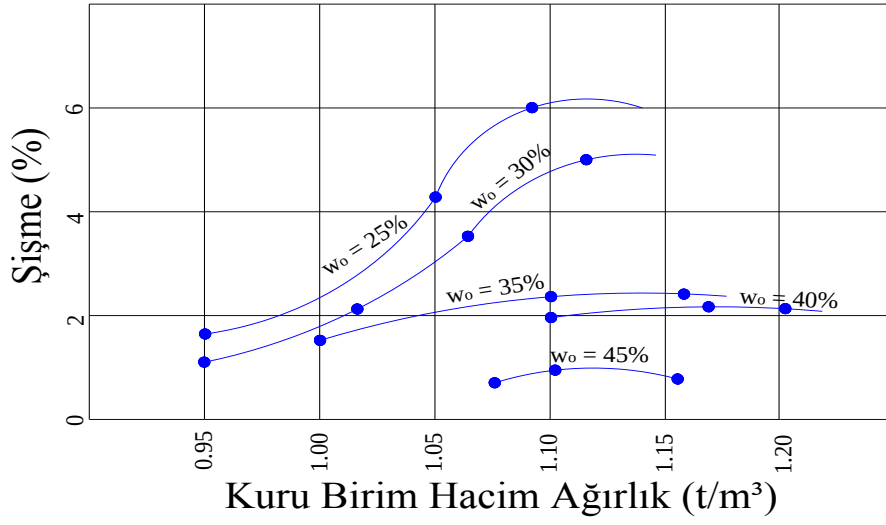
2.3.3 Kuru birim hacim ağırlığı etkisi

Başlangıç kuru birim hacim ağırlığı şişme potansiyeli ve şişme basıncı üzerinde etkili olan en önemli faktörlerden biridir. Sabit su muhtevasında kuru birim hacim ağırlığının artması ile şişme yüzdesi ve şişme basıncının arttığı bilinmektedir. Aynı su muhtevastaki numunelerin başlangıç kuru birim hacim ağırlığı arttıkça şişme basıncının arttığı birçok araştırmacı tarafından tespit edilmiştir. Kuru birim hacim ağırlık değerlerinin büyük olması, kil partikülleri arasındaki mesafenin azalmış olduğunu gösterir ve bu durumda, şişme değerleri büyük olur.

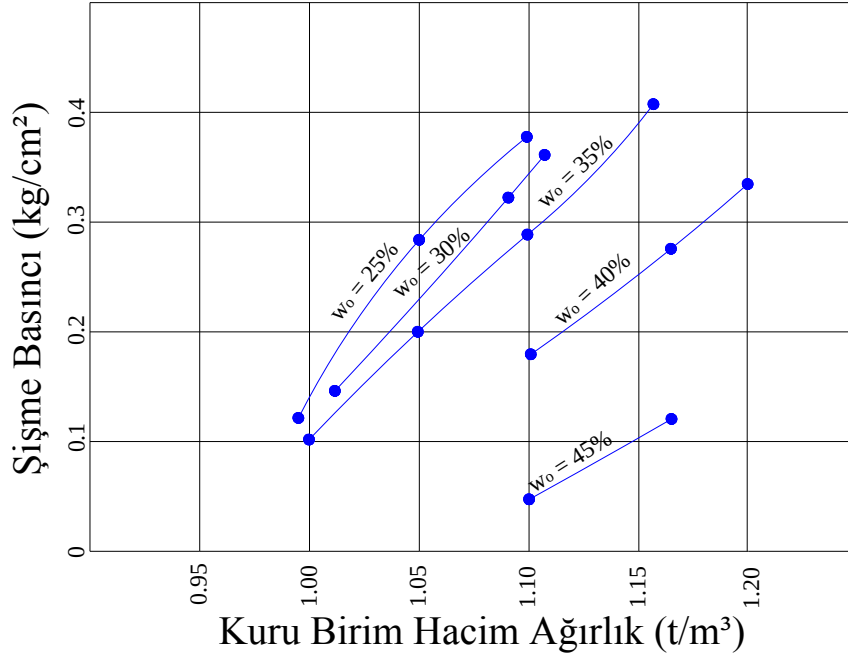
Chen (1975) kuru birim hacim ağırlığının, hacim değişimine ve şişme basıncına etkilerini belirlemiştir (Şekil 2.4). Kuru birim hacim ağırlığının artması ile şişme yüzdesi ve şişme basıncının arttığını ifade etmiştir. Aynı yaklaşım bir çok araştırmacı tarafından belirtilmiştir. Kassiff (1971) Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'daki ilişkiyi belirlemiştir.



Şekil 2.4 : Kuru Birim Hacim Ağırlığının Hacim Değişimine Etkisi (Chen, 1975)



Şekil 2.5 : Kuru Birim Hacim Ağırlığın Şişme Yüzdesine Etkisi (Kassif, 1971)



Şekil 2.6 : Kuru Birim Hacim Ağırlığının Şişme Basıncına Etkisi (Kassif, 1971)

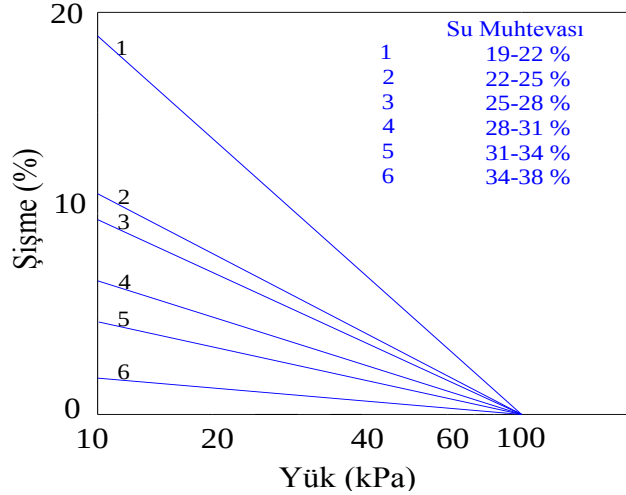
2.3.4 Sürşarj yük etkisi

Sürşarj basıncı arttıkça şişme miktarı azalır. Bundan dolayı ağır yapılardan ziyade yol, havaalanı kaplamaları, birkaç katlı binalar gibi hafif yapılar şişme deformasyonlarından daha fazla zarar görürler.

Çeşitli sürşarj yükler altında ölçülen şişme değerlerinde sıkıştırılmış numuneler için sürşarj yükü arttırıldığında numunelerin şişmesinin azaldığı ilk çalışmalarda belirtilmiştir (Rengmark ve Erikson, 1953).

Kassiff (1971), bir ozmotik ödometrede şişme deneyleri yaparak şişme-sürşarj yük ilişkisini belirlemiştir. Bu ilişki lineer olmayıp yukarı konkav bir eğridir.

Brackley (1975), sıkıştırılmış zeminler için şişme-sürşarj yükü arasında ters logaritmik bir fonksiyon olduğunu göstermiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 : Şişme Yüzdesi - Sürşarj Yük İlişkisi (Brackley,1975)

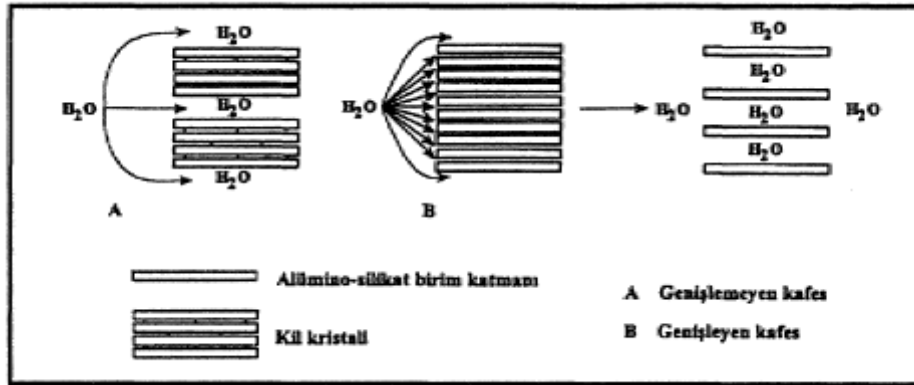
2.3.5 Nem etkileşimi ve kristal yapı

Toplam su içeriği ve su tutma enerjisi, killerin tüm özelliklerini etkileyen en önemli iki faktördür. Su içeriği; kıvamlılık, dayanım ve yoğunluğu, su tutma enerjisi ise; hacimsel değişim, konsolidasyon ve hidrolik iletkenlik gibi temel özellikleri etkilemektedir. Killer üzerindeki mühendislik uygulamalarının hemen hepsi kildeki doğal su içeriğini bozar. Killer üzerine uygulanan gerilimler, doğal ve yapay yükler kilin yapısında nem hareketine neden olur ve killerdeki hacimsel değişimler, hemen her zaman bu nem hareketi ile kontrol edilir. Eğim yenilmesi ve konsolidasyon gibi süreçler de yine bu ölçüde, bu nem hareketi ile ilgilidir.

Killerde nem hareketi, kil-su sistemi içerisinde içsel eğimden kaynaklanan kuvvetlerle oluşur; içsel eğim ise, sıcaklık değişmesi, doygunluğun artması ve kimyasal bileşimdeki değişimlerden kaynaklanır. Killerde, kuruma sonucu büzülme; su emme sonucu şişme gibi istenmeyen kötü sonuçlar, bu nem hareketlerinden kaynaklanmaktadır.

Buharlaşıma, bitki terlemesi ve ısınma, killerde kurumaya neden olduğu gibi; yeraltı su tablasındaki yükselmeler, yağışlar ve barajlar gibi mühendislik yapılarından sızan kaçak suları da kildeki nem miktarını arttırır. Killerin nem miktarındaki değişim,

hemen her zaman hacimsel değişimlere neden olur. Nem artışı hacimsel büyüme, nem kaybı ise hacimsel küçülmeyi oluşturur. Su ile temas halindeki ıslak bir kil örneği üzerindeki basıncın azaltılması, kilin su emmesine neden olur. Örneğin, aşırı konsolide bir kilin şişmesi gibi. Su emme ve hacimsel büyüme, kil denge gözeneklilik oranına erişinceye kadar devam eder. Killerdeki su emme sonucu oluşan hacimsel büyüme; kil üzerine etkiyen yük ve şişme basıncının bir fonksiyonudur (Kasapoğlu, 1989). Eğer bu şişme basıncı kil üzerine etkiyen inşaat yükünü aşarsa, zeminde oluşacak kabarma önemli temel sorunlarına neden olabilir. Kilin, minerolojisi, dokusu, kimyasal bileşimi ve konsolidasyon miktarı, bu tür zemin kabarmalarını etkileyen en önemli jeolojik faktörlerdir. Kil mineralleri arasında "montmorillonit (bentonit)" şişme potansiyeli en yüksek olanıdır. İnce tabaka yapısına sahip olan montmorillonit kristalleri içerisine giren su, bu tabakalar arasındaki yaklaşık $10\text{\AA}$ (10^{-7} cm) olan mesafeyi önemli ölçüde genişleterek büyük hacimsel büyümeye neden olur (Şekil 2.8).



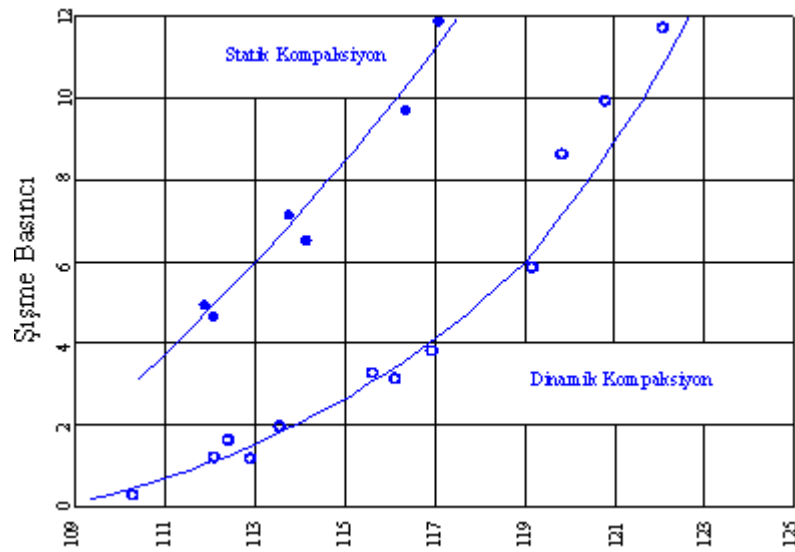
Şekil 2.8 : Killerde Kristallerarası Şişme (Gillot, 1968; Kasapoğlu, 1989)

Bu tür hacimsel büyüme “kristallerarası şişme” olarak tanımlanır. Simektitin yanısıra, bu tür genişleyebilen kil mineralleri arasında, vermikülit, halloysit ve bazı interstratifiye kil mineralleri sayılabilir. Killerdeki şişme olayında, kil minerallerinin kristal kimyasının, en önemli rolü oynadığı kuşkusuzdur. Örneğin, kristal yapısı bakımından, montmorillonit, şişmeyen kil minerali olarak bilinen illite yüzeysel olarak çok benzer. Ancak illitin, birim yüzey alanındaki elektron yükü montmorillonitinkinden daha fazladır. Bu nedenle illitteki katmanlararası bağ montmorillonitinkinden çok daha güçlüdür. Bundan dolayı su, bu güçlü bağları kopararak katmanlar arasına girememektedir (Kasapoğlu, 1989).

2.3.6 Kompaksiyon etkisi

Zemin sıkıştırılmış dolgu kil ise sıkıştırma su muhtevası, sıkıştırma enerjisi ve sıkıştırma metodu şişme miktarını kontrol eder. Optimum su muhtevasından daha düşük su muhtevalarında sıkıştırılan killeri daha fazla şişme eğilimindedir.

Aynı birim hacim ağırlıkta ve su muhtevasındaki zeminlerin örselenmesinin şişme potansiyelini ve şişme basıncını arttırdığı belirlenmiştir. Numune hazırlamak için uygulanan kompaksiyon metodunun şişme basıncına etkisi Şekil 2.9’da verilmiştir. Şekilden statik kompaksiyon sonucu elde edilen şişme basınçlarının dinamik kompaksiyon sonucu elde edilen basınçlardan büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 2.9 : Kompaksiyon Yönteminin Şişme Basıncına Etkisi (Seed, 1962)

Optimum su muhtevasının üzerindeki su muhtevalarında şişme miktarının, kompaksiyon derecelerinden bağımsız olarak, önemsiz derecede az olduğu belirtilmiştir. Öte yandan Seed (1962), aynı şişme potansiyeline sahip iki zeminin farklı yöntemlerle sıkıştırılmaları sonucu farklı miktarlarda şişme değerleri elde etmiştir.

2.3.7 Şişmeye etki eden diğer faktörler

Fiziksel şartlardaki diğer değişikliklerin etkisiyle nemlilik derecesi azalan killi zeminler tekrar kapiler su emdiklerinde, sahip oldukları şişme potansiyeline yeniden kavuşurlar. Ancak kuruma ve ıslanmanın her çevrimi için zeminin şişme davranışında bir yorulma gözlenir. Yapılan incelemeler, kurutma ve ıslatma işlemlerinin tekrarlanması halinde ilk çevrimde oluşan şişmenin, sonrakilerden fark

edilir derecede büyük olduğunu göstermiştir. Yıllar sonra mevsime bağlı bu hareketlerin bir stabilizasyona uğradığı gözlenmiştir. Şişen zeminlerin bu özelliği şişme yorulması olarak adlandırılmaktadır.

Dhowian ve diğerleri (1984), şişen zeminlerdeki hacim değişikliklerine yol açan doğal mikro mekanizmaları; ozmotik itme basıncı, kil partiküllerinin çekimi, katyon hidrasyonu, Van Der Waal kuvvetleri ve kapiler emme olarak açıklamışlardır. Şişmeye etki eden faktörleri ise Çizelge 2.5’de görüldüğü şekilde ifade etmişlerdir.

Çizelge 2.5 : Şişmeye Etki Eden Faktörler (Dhowian ve diğ., 1984)

Faktör	Tanım
Zeminlerin oluşturduğu mineraller	Aktif kil mineralleri – Montmorillonit ve diğer kil mineralleri Montmorillonit karışumlu tabakaların kombinasyonu
Boşluk suyu tuz konsantrasyonu	Boşluk suyundaki yoğun katyon konsantrasyonunun, zemin ve hacim değişimlerini azaltıcı etkisi vardır. Ozmotik şişmenin uzun süreli etkisi düşünülebilir.
Boşluk suyu bileşimi	Bir değerlikli katyonların baskın olduğu ortamda, şişme ve rötreği azaltmaktadır.
Yapı	Flokül partiküller, dispers partiküllere oranla daha fazla şişme gösterirler. Sementasyona sahip partiküller, şişmeyi azaltıcı etkiye sahiptir. Su emme eğilimine sahip killer, diğerlerine göre daha fazla şişme gösterirler.
İklim	Kuru iklimler, zemin profilinin kurumasına, nemli iklimler ise profilin ıslak olmasına neden olurlar.
Yer altı suyu	Yer altı su seviyesinin yüksek 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 birikimleri 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.

2.4 Şişme Parametreleri

Bir zeminin arazide şişme gösterip göstermeyeceği pek çok faktöre bağlıdır. Şişme özelliği olmayan bir zemin arazideki şartlar ne olursa olsun şişmeye maruz kalmaz. Öte yandan şişen zeminler, zeminin başlangıçtaki fiziksel durumuna, maruz kalacağı gerilme ve su muhtevası değişikliklerine bağlı olarak az veya çok şişebilirler. Zeminlerin şişme özellikleri genellikle şişme potansiyeli olarak tanımlanan şişme yüzdesi ve şişme basıncı olarak iki şekilde göz önüne alınabilir. Bu konu üzerinde yapılan bazı çalışmalar aşağıda açıklanmıştır.

2.4.1 Şişme potansiyeli (şişme yüzdesi)

Şişme potansiyeli, bir zemin numunesinin suya doymun hale gelinceye kadar oluşan hacim artışının, numunenin başlangıçtaki hacmine oranıdır. Kısaca, zemin numunesinde meydana gelen hacimsel artış yüzdesidir.

$$S_w = [\Delta H/H_0 \cdot 100] \quad (2.1)$$

Burada, S_w , şişme yüzdesi; ΔH , yükseklik artışı; H_0 , başlangıç numune yüksekliğidir.

Bu hacimsel artış yüzdesi iki şekilde tanımlanabilir. Birincisi sabit ve küçük bir sürşarj yükü altında numune doymun hale gelirken, sıfır yanal deformasyon durumunda oluşan düşey boy değişimidir. İkincisi ise eksenel deformasyonların engellenmesi durumunda, zeminin yanal şişme yüzdesinin, zeminin çapındaki değişime bağlı olarak ifade edilmesidir.

ASTM, şişme yüzdesini arazide zemin tabakasının düşey yüksekliğindeki değişim oranı olarak tanımlamıştır. Şişme potansiyeli hakkında açık bir tanımlama verilmemiştir.

Snethen (1984), şişme potansiyelini, ödometre deneyinde örselenmemiş numunenin başlangıç su muhtevası ve birim hacim ağırlıktaki yüksekliğinin, arazi gerilmesi altında suya doymun haldeki yüksekliğine oranı olarak tanımlamıştır.

Seed (1962) şişme potansiyelini, yanal hareketi engellenmiş ve AASHTO kompaksiyon deneyi ile optimum su muhtevasında, maksimum kuru birim hacim ağırlığına sıkıştırılmış bir zeminin, 6.9 kPa yük altında yüzde şişme değeri olarak tanımlamıştır. Bu çalışma sonucu aşağıdaki basitleştirilmiş eşitliği elde etmiştir.

$$S = 60K(PI)^{2.44} \quad (2.2)$$

Burada S, şişme potansiyeli; $K = 3.6 \cdot 10^5$ değerinde bir sabit; PI plastisite indisidir.

Komornik ve David (1969), killi zeminlerin serbest şişme değerleri ile plastisite indisleri arasındaki ilişkinin varlığını ortaya çıkarmayı amaçlamışlardır. Zeminler üzerinde serbest şişme deneyi yapılmış, deney esnasında zemin numunelerinin su muhtevası kuru halden doygun hale kadar getirilmiştir. Yapılan deney sonucunda, serbest şişme değerinin plastisite indisi ile doğru orantılı olarak arttığı gözlenmiştir.

Chen (1975), şişen zeminlerin başlangıç su muhtevasının ve kuru birim hacim ağırlığının şişme miktarını kontrol ettiğini belirtmiştir. Tabii su muhtevası %15'in altında olan killerin, şişme açısından tehlikeli olduğunu, böyle killerin %35 oranından daha fazla suyu kolaylıkla adsorbe edebildiklerini, su muhtevası %30'un üzerindeki killerde şişmenin daha önceden meydana geldiğinin anlaşıldığını ve daha düşük oranlarda bir şişme beklenildiğini belirtmiştir. Ayrıca, $1,76 \text{ t/m}^3$ 'den daha yüksek kuru birim hacim ağırlıklı zeminlerin yüksek şişme potansiyeli gösterebileceklerine dikkat çekmiştir.

Chen (1975), çok sayıda örselenmemiş numune üzerinde 6,9 kPa yük altında yaptığı şişme deneylerinden, plastisite indisi ve şişme potansiyeli arasındaki ilişkinin aşağıdaki gibi ifade edileceğini belirtmiştir:

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

Burada, $A = 0.838$, $B = 0.2558$ ve $e = 2.717$ tabii logaritma tabanı olarak verilmiştir.

Deneyler, kuru birim hacim ağırlığı $15.7 - 17.3 \text{ kN/m}^3$ arasında, tabii su muhtevası ise % 15 - % 20 arasında değişen numuneler üzerinde yapılmıştır.

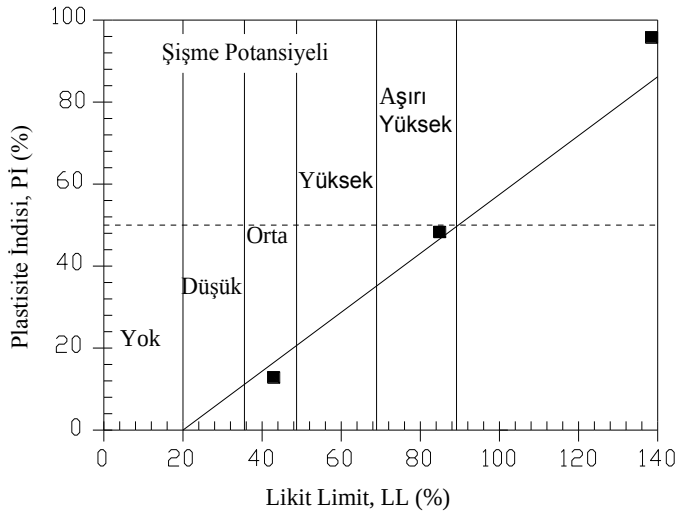
Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973), bir kilin şişme potansiyelini belirlemek için Atterberg limitlerini kullanarak lineer şişme yüzdesini tanımlamışlardır.

Çeşitli başlangıç su muhtevası ve birim hacim ağırlıklarında farklı numuneler üzerinde Komornik, David (1969) ve Ghazzaly (1973) tarafından yapılmış deneylerin istatistiksel analizleri yapılmıştır. Lineer çoklu regresyon analizleri yapılarak aşağıdaki eşitlik önerilmiştir.

$$S = 2.27 + 0.131w_L - 0.274w \quad (2.4)$$

Burada S=Lineer serbest şişme yüzdesi, w_L =likit limit, w =başlangıç su muhtevasıdır. Verilen eşitlikte iç korelasyon katsayısının 0.55 olduğu belirtilmiştir, zayıf bir korelasyon katsayısı olmaktadır.

Holtz ve Gibbs (1956), Seed vd.(1962), şişme potansiyelini belirlemek için Likit Limit ve Plastisite İndisine dayalı Şişme Potansiyeli Sınıflandırma Kartı geliştirmişlerdir. Bu karta göre, zeminleri düşük, orta, yüksek ve aşırı yüksek dereceli şişme potansiyeline sahip olarak sınıflandırmışlardır (Şekil 2.10).

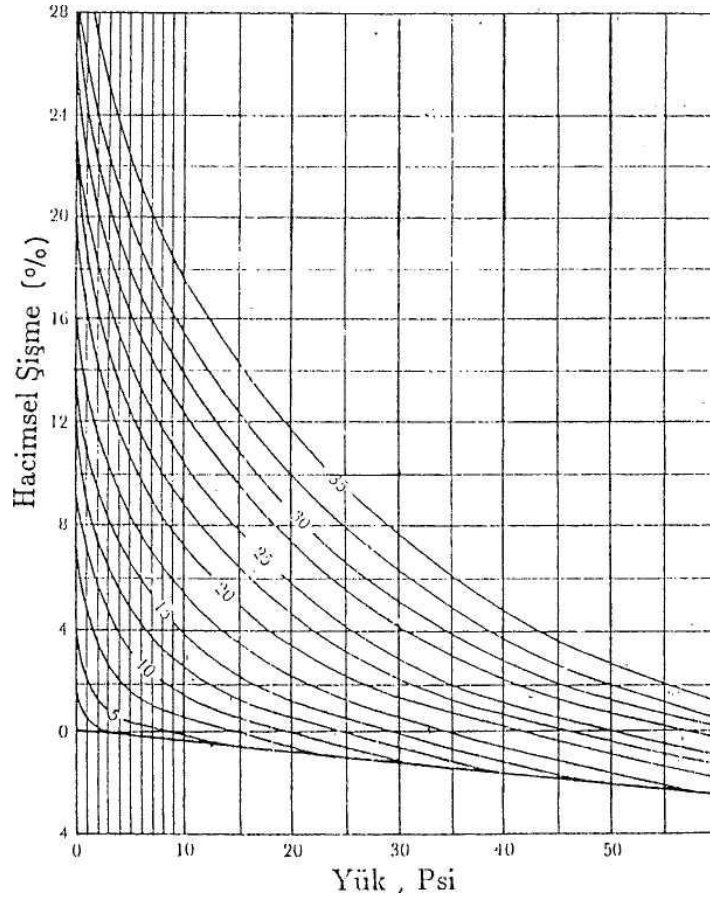


Şekil 2.10 : Şişme Potansiyeli Sınıflandırma Kartı

McDowell (1956), örselenmemiş numuneler üzerinde 1 Psi(6.9 kPa) yük altında deneyler yaparak potansiyel hacim değişiminin ölçülmesi ile arazideki yüzeysel şişmeyi tahmin etmenin mümkün olabileceğini belirtmiştir. Numunenin arazideki efektif basıncına uygun basınç ile şişme yüzdesi arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler grubu kullanarak hacimsel şişme yüzdesinin belirlenebileceğini göstermiştir (Şekil 2.11).

McDowell (1956), yaptığı incelemeler sonucu arazide olabilecek minimum su muhtevasını aşağıdaki formülle tanımlamıştır.

$$W_i = 0.2w_L + 9 \quad (2.5)$$



Şekil 2.11 : Şişen Zeminlerin Hacim Değişimi Yük ilişkisi (McDowell,1956)

Aynı başlangıç şartlarındaki killer laboratuvarında 1 Psi(6.9kPa) yük altında su verilerek şişmeye bırakılmıştır. Deney sonunda kilin son su muhtevasının aşağıda verilen formülle ifade edilebileceği gösterilmiştir.

$$W_f = 0.47w_L + 2 \quad (2.6)$$

Çizelge 2.6 : Plastisite İndisi – Yüzeysel Kabarma Arasındaki İlişki

Plastisite İndisi (%)	Yüzeysel Kabarma (cm)
10	0
20	1
30	4
40	7
50	13

Jennings (1958), şişmenin belirlenmesi için bir yöntem olarak çift ödometre metodunu kullanmıştır. Bu deneyde, arazide aynı katmandan alınan iki ayrı numune üzerinde deney yapılır. Numunelerden biri tabii su muhtevasında konsolidasyon deneyine tabi tutulurken, diğeri çok küçük bir yük altında şişmeye bırakılır. Şişmesine izin verilen numune denge haline geldikten (suya doymuş) sonra, bilinen anlamda, konsolidasyon deneyi uygulanır. Her iki deney için $e-\log P$ eğrileri aynı diyagram üzerinde çizilir. Bu eğrilerden bir tanesi doğal $e-\log P$ eğrisi elde etmek için düzeltme eğrisi olarak seçilir. Numunenin arazide maruz kaldığı efektif basınç P_0 için e_0 belirlendikten sonra, e_1 , e_2 , e_3 hesaplanır. Arazide kil tabakasının kalınlığı bilindiğinde şişme miktarı hesaplanabilir. Farklı kil tabakalarının olması halinde her tabaka için deneyler tekrarlanır. Her tabaka için bulunan şişme miktarları toplamı, toplam şişme miktarını verir.

Yapılan çalışmalardan anlaşıldığı gibi şişme potansiyelinin en iyi göstergesi plastisite indisi olarak kabul edilmektedir. Plastisite indisi ve şişme potansiyeli mertebesi tahmini için yaygın olarak kullanılan bağıntı Çizelge 2.7’de verilmiştir.(Peck ve diğerleri (1974), Chen (1975), Wayne ve diğerleri (1984)).

Çizelge 2.7 : Plastisite İndisi ve Şişme Potansiyeli Arasındaki Bağıntı

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

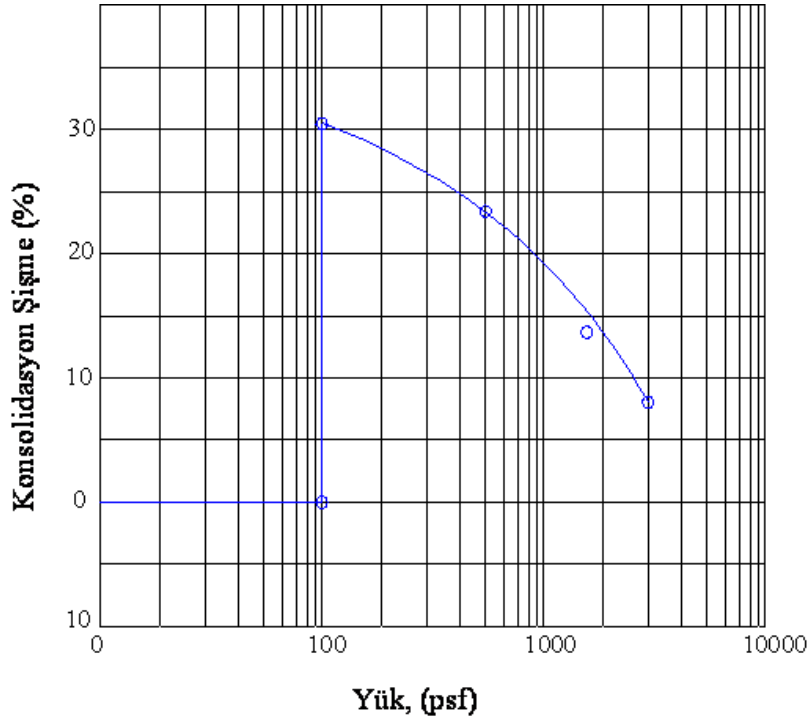
2.4.2 Şişme basıncı

Şişme potansiyeline sahip olan killi bir zeminin, su muhtevasının artması durumunda meydana gelecek hacim değişikliğine engel olabilecek basınç şişme basıncıdır. Buna zeminin başlangıç hacmini koruyabileceği basınç da denilebilir. Şişme basıncı, belli bir zemin için sabittir ve başlangıçtaki kuru birim hacim ağırlığına bağlıdır.

ASTM şişme basıncını, şişme olmasına izin vermeyecek şekilde yük arttırılarak şişmenin oluşmadığı durumda ulaşılan basınç veya şişmeye izin verildikten sonra numunenin başlangıç halindeki duruma (boşluk oranı, yükseklik) dönebilmesi için gerekli basınç olarak tanımlamaktadır.

Şişme basıncının belirlenmesi için bir çok araştırmacı farklı deney metodları kullanmıştır. Bunlardan en çok bilinen ikisi konsolidasyon deneyi ve sabit hacim metodudur. Birincisinde başlangıç koşulları (birim hacim ağırlık, su muhtevası, yükseklik) belli bir zemin, ödometre aletinde belirli bir sürşarj yük altında su verilerek şişmeye bırakılır. Şişme tamamlandıktan sonra konsolidasyon deneyi uygulanarak şişme-logP eğrisi elde edilir. Numunenin başlangıç koşullarındaki durumuna sıkışması için gerekli basınç bu eğriden belirlenir (Şekil 2.12).

Sabit hacim metodunda ise zemin ödometre aletine yerleştirildikten sonra numuneye su verilir. Küçük yük artımları ile numunenin şişmesine izin verilmez. Burada amaç ne şişmenin ne de sıkışmanın olmadığı, numuneyi başlangıç hacminde muhafaza edecek basınca ulaşmaktır.



Şekil 2.12 : Şişme - Konsolidasyon Eğrisi (Chen,1975)

Komornik ve David (1969), 125 adet örselenmemiş numune üzerinde yaptıkları deneyler neticesinde şişme basıncı ile zeminin temel özellikleri arasında istatistiksel bir ilişki belirlemişlerdir. Deneylerde kullanılan numunelerin başlangıç su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı ile likit limit değerleri için istatistiksel analiz sonucu şişme basıncının logaritmik değerini aşağıdaki eşitlikle hesaplamışlardır.

$$\text{LogP} = 2.132 + 0.0208w_L + 0.000665 \gamma_k - 0.0269w_n \quad (2.9)$$

Burada P =şişme basıncı (kg/cm^2), w_L =likit limit(%), γ_k =tabii zeminin kuru birim hacim ağırlığı (kg/m^3), w_n =tabii su muhtevası (%) olmaktadır. Korelasyon katsayısının 0.6 olduğu belirtilmiştir.

Lav ve Ansal, şişme potansiyeline etki eden değişik özellikleri yansıtan bütün faktörleri ele alarak çoklu regresyon modeli geliştirilmesinin daha uygun sonuçlar vereceğini belirtmişlerdir.

Aynı araştırmacılar tabii su muhtevası, plastik limit, plastisite indisi ve likidite indisine bağlı olarak şişme basıncı için çoklu regresyon analizleri yapmışlar ve aşağıdaki bağıntıyı elde etmişlerdir.

$$P_s = 0.622227LI - 0.083576w_n + 0.074579PL + 0.019524PI + 262916 \quad (2.10)$$

Şişme basıncını tayin edebilmek için, incelenen doğal zemin numunelerinin 50 kPa'lık sürşarj yükü altında su emerek tamamen şişmelerine izin verilmiş, nihai şişme değerleri elde edildikten sonra tekrar yüklenmişlerdir. Söz konusu numunelerin eski hacimlerine dönebilmeleri için gereken basınç değerleri bulunmuş ve o değerler şişme basıncı olarak alınmıştır. Bu yöntemle yapılan deneylerden, şişme basıncının başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ile orantılı olarak arttığı gözlenmiştir (Chen, 1975).

Wayne vd.(1984) temel tasarımlarında kullanılmak üzere, Çizelge 2.8'i önermişlerdir.

Çizelge 2.8 : Hacim değişikliği, şişme basıncı ve muhtemel hasar arasındaki ilişki (Wayne vd., 1984)

Hacim Değişikliği (%)	Şişme Basıncı (kPa)	Muhtemel Hasar
0 -1,5	0 – 50	Düşük
1,5 – 5	50 – 250	Orta
5 – 25	250 – 1000	Yüksek
>25	>1000	Çok yüksek

2.5 Şişen Zeminlerin Belirlenmesi

Arazi araştırma aşamasında şişen zeminlerin belirlenmesi mühendislik projelerinin başarılı olması için zorunludur. Hatalı belirlemeler projede yeni düzenlemelere ve ilave masraflara yol açar. Her durumda şişen zeminlerin özelliklerini etkileyen bir çok etken mevcuttur. Bu etkilerin belirlenmesi için gerekli bazı metotlar çok özel malzeme ve teknik bilgi gerektirir.

2.5.1 Jeolojik belirleme

Detaylı ve güvenilir jeolojik haritalar şişen zeminlerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu haritaların güvenilirliği ülkenin gelişme seviyesi düştükçe azalmaktadır. Bir arazinin jeolojisi iyi belirlenir ve şişen zeminler geniş ölçüde incelenirse şişen zeminlerin bilinen oluşumunun jeolojik formasyonla ilgili haritaları hazırlanabilir. Bu haritalar daha detaylı araştırmaların planlanmasında ve şişen zeminlerin bulunma olasılığını bilmemizde bir rehber olmaktadır. Genelde, özellikle az gelişmiş bölgelerde bu jeolojik çalışmalar yapılmamıştır.

2.5.2 Minerolojik belirleme

Bir zeminin şişebilirliği çeşitli kil minerallerinin mevcudiyeti ve miktarı ile ilgilidir. Kil mineralleri üzerindeki eksi elektrik yükleri, tabakalar arası bağların şiddeti ve katyon değiştirebilme kapasitesi bir zeminin şişme potansiyeli ile doğrudan ilgili özelliklerdir. Bu nedenle killi zeminin temel mineralinin belirlenmesi yoluyla o zeminin şişme özelliklerinin belirlenebileceği öne sürülmektedir. Mineral tipinin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan bir çok metot olmasına rağmen, en çok kullanılan metot X ışını yayınımlı metotodur. Diğer kullanılan metotlar ise farklı Isı Analizi, Boya Adsorpsiyonu, Kimyasal Analiz ve Elektron Mikroskop metotlarıdır.

2.5.3 Gözlemsel belirleme

Görsel kontrollerle zeminlerin şişmesinin arazide veya tabii profil kesitte incelenmesi mümkün değildir. Bununla beraber arazide belirleyebileceğimiz ve şişme sonucu oluşan bir çok özellik vardır.

Şişen zeminler kum ve silt içerdikleri gibi büyük oranda kil mineralleri içermektedir. Farklı kil minerallerinin değişen şişebilirliklerinden dolayı tabii şişme direkt olarak

kil muhtevası ile ilgili değildir. Aynı zeminde eşit oranda montmorillonit ve kaolin çok farklı şişme değerleri verecektir.

Bütün killi zeminlerin kuruma sonucu kayma mukavemetlerinde bir artış görülür. Şişen zeminler kuruma sonucu çok sert, katı – çok katı durumda bulunurlar. Islanma sonucu gerilmeye bir azalma ile beraber zemin daha az sert hale gelir. O halde, şişen bir zeminin tipik kıvam durumları kuru durumda katı – çok katı, ıslak halde yumuşak kıvamda olmaktadır.

Kuru haldeki bütün killi zeminler serbest suya karşı yüksek emme gösterirler. Düşük şişme gösteren zeminlerde su muhtevsındaki artış su emmeyi azaltırken, yüksek şişme gösteren zeminlerde su emmeyi azaltmak için oldukça yüksek su muhtevası artışı gerekmektedir.

Mevsimsel nem değişimi olan bölgelerdeki şişen zeminler çoğunlukla açık veya kapalı çatlaklar, kırılmalar, mikro çatlaklar gösterirler.

2.5.4 USBR sınıflandırma sistemi

Zeminin bir çok özelliğinin göz önüne alındığı ve yorumlandığı yöntem Holtz ve Gibbs (1956) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde bir zeminin şişme derecesi, 1 Psi (6.9 kPa) düşey yük altında ödometrede kuru zeminin şişme yüzdesine göre belirlenir. Şişme yüzdesine ilave olarak; rötre limiti, plastisite indisi, çapları 0.001 mm'den küçük danelerin yüzdesi ve serbest şişme değeri şişme derecesinin belirlenmesi için kullanılan diğer indeks özellikleridir. Araştırmalar sonucu şişen zeminlerin belirleme kriteri Çizelge 2.8'de olduğu gibi önerilmiştir.

Çizelge 2.9 : Etkili Endeks Özellikleri ile Şişme Derecesinin Belirlenmesi

Şişme Derecesi	Şişme Yüzdesi (%)	Rötre Limiti (%)	Plastisite İndisi (%)	0.001'den küçük dane yüzdesi (%)	Serbest Şişme (%)
Çok yüksek	> 30	< 10	> 32	> 27	> 100
Yüksek	20 -30	6 – 12	23 – 45	18 – 37	> 100
Orta	10 – 20	8 – 18	12 – 34	12 – 27	50 – 100
Düşük	< 10	> 13	< 20	< 17	< 50

2.5.5 Aktivite yöntemi

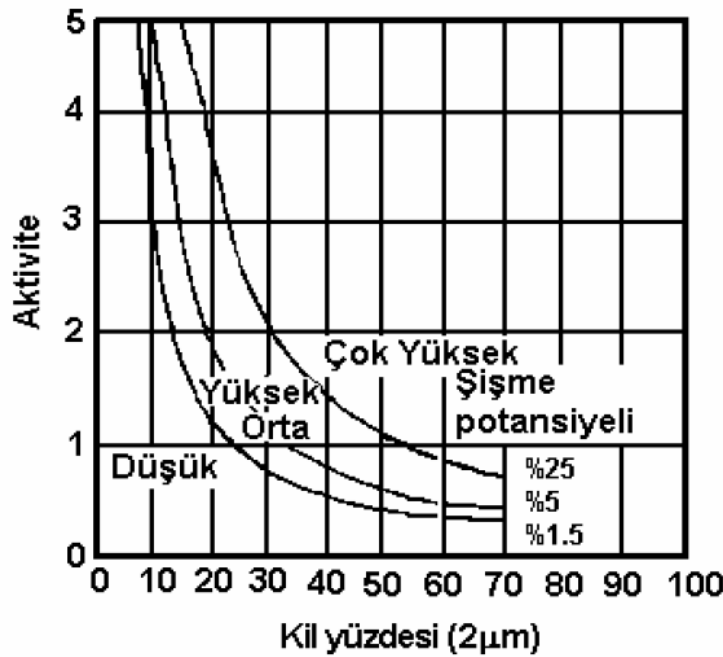
Şişme potansiyeli üzerinde kil minerali dane karakteristikleri, özellikle kolloid muhtevasının etkili olduğu gözlenmiştir. Seed, Woodward ve Lundgren (1962) şişme potansiyeli ile kil yüzdesi arasında bir korelasyon olmadığını belirtmişlerdir.

Bununla beraber şişme miktarı zeminde bulunan kil miktarı ile artmaktadır. Herhangi bir kil için şişme potansiyeli ve kil yüzdesi arasındaki ilişki şu denklemle verilebilir.

$$S = K \cdot C^x \quad (2.11)$$

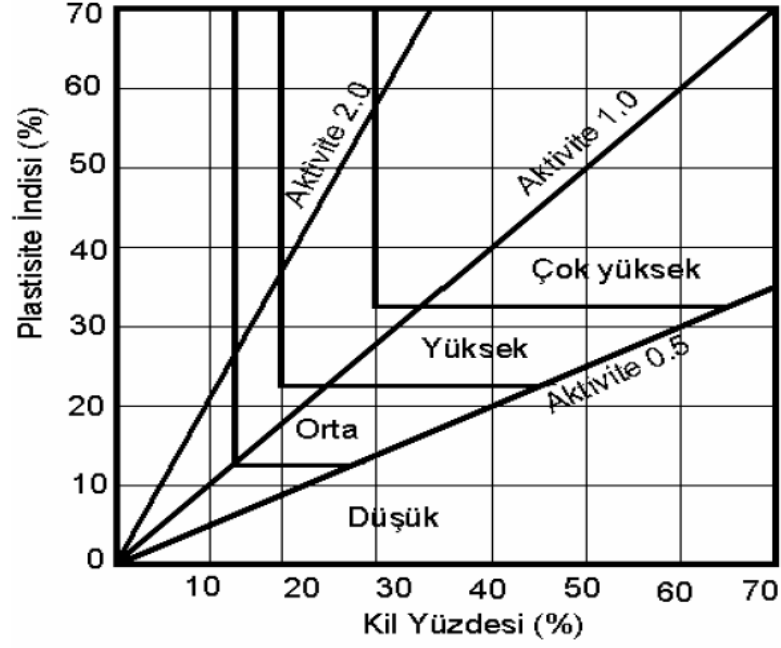
Denklemde K, şişme katsayısı olup değeri kil cinsine göre değişmektedir. x, kil tipine bağlı bir üssel sayıdır. C, kil yüzdesidir.

Çalışmalar sonucunda şişme katsayısı ile kil minerallerinin aktivitesi arasında doğrudan bir ilişki olduğu saptanmıştır. Zeminin aktivitesi şişme özelliklerinin belirlenmesi açısından oldukça güvenilir bir indeks özelliğidir. Şekil 2.13’de Seed v.d. tarafından önerilen ve kil yüzdesi (< 2 µm) ile aktiviteye bağlı olarak verilen sınıflandırma sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.13 : Seed v.d. tarafından önerilen sınıflandırma sistemi

Şekil 2.14’de kil yüzdesi ile plastisite indisine göre tanımlanmış Van Der Merve sınıflandırma abağı verilmektedir.



Şekil 2.14 : Van Der Merve Tarafından Önerilen Sınıflandırma Abağı

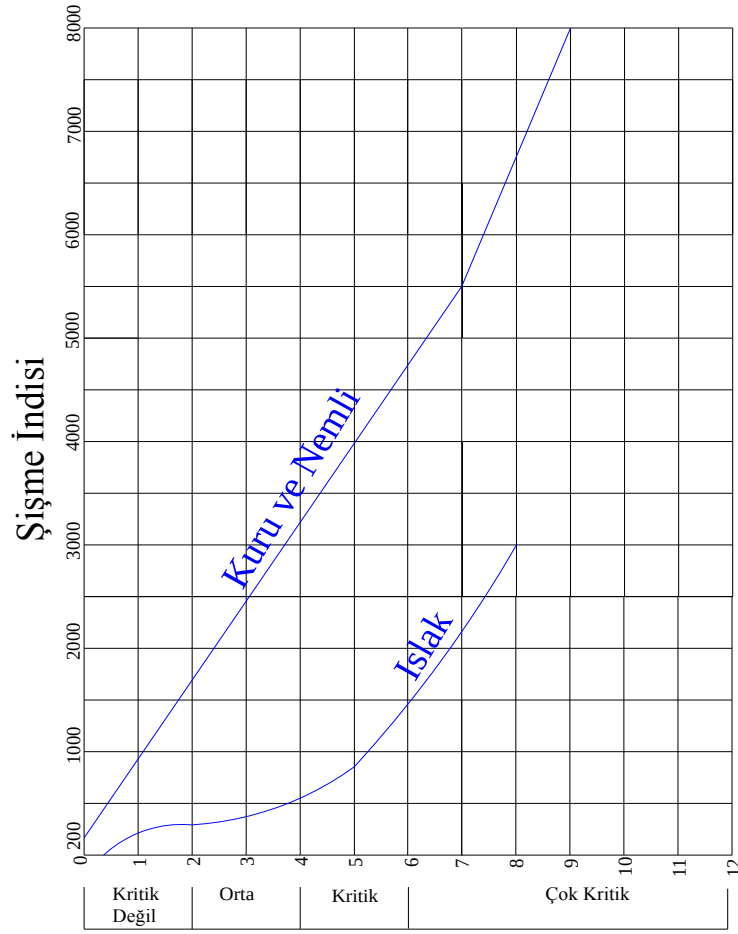
2.5.6 PVC yöntemi

Zeminin potansiyel hacim değiştirmesi (PVC) deneyi Lambe (1960) tarafından geliştirilmiştir. Deneyde kullanılan örselenmiş numuneler bir konsolidometre halkasında sıkıştırıldıktan sonra 140 t/cm² bir basınç uygulanmış ve numuneye su verilmiştir. İki saat sonra alınan kontrol halkası okumaları basınca çevrilmiş ve şişme indisi olarak tanımlanmıştır.

Ancak PVC metre deneyi ile şişme potansiyeli belirlenmemektedir. Deney sonuçları sadece şişme eğilimi gösteren zeminlerin karşılaştırılmasında kullanılabilir. Potansiyel hacim değişimi (PVC) ile şişme indisi arasındaki ilişki Şekil 2.15’de verilmiştir. PVC oranına göre zeminlerin şişme kriterleri Çizelge 2.10’da verilmiştir.

Çizelge 2.10 : PVC Oranlarına Göre Şişme Kriterleri

PVC Oranı	Kategori
<2	Kritik değil
2 – 4	Orta
4 – 6	Kritik
>6	Çok kritik



Potansiyel Hacim Değişimi (PVC)

Şekil 2.15 : Şişme İndisi - Potansiyel Hacim Değişim İlişkisi (Lambe, 1960)

2.5.7 Zemin su emmesi

Doğada kısmen doymuş bir zeminin su muhtevası zemine uygulanan yüklerle, yüzeyde buharlaşma ve terleme nedeniyle oluşan gerilmeler ve kapiler kuvvetlerle genel bir denge halindedir. Ancak zeminin yüzeyi herhangi bir nedenle kapandığı zaman buharlaşma ve terleme olmayacağı için sistem yeni bir denge oluşturma eğiliminde olacaktır. Yeni bir dengenin oluşturulması ise sistemdeki suyun hareketi ile mümkün olacaktır. Suyun hareketine neden olan kuvvet zemin su emmesi (soil suction) olarak tanımlanır. Teorik olarak toplam su emme potansiyeli osmotik potansiyel, yer çekimi potansiyeli ve kapiler potansiyelin toplamıdır. Ancak pratikte sadece kapiler kuvvetler göz önüne alınır.

Serbest su ile denge halinde olan bir zeminde su emme miktarı sıfırdır. Zeminin kuruması durumunda emilen su miktarı hızla yükselir. Zemin üzerine yapılacak herhangi bir yükleme boşluk suyu basıncını arttıracak için su emme miktarında

azalma olacaktır. Ancak suya doygun killi zeminlerde kazı sırasında serbest kalan gerilmeler nedeniyle su emilmesi söz konusu olacak ve zeminde kabarmalar oluşacaktır.

Zemin su emmesi ölçümlerinde asıl amaç şişme potansiyelinin doğrudan belirlenmesinden çok, suyun hareketinin ve dengesinin tespit edilmesidir. Farklı su emilmesi koşullarında zeminlerin şişme özelliklerinin belirlenmesi için osmotik konsolidometre aleti geliştirilmiştir. Ancak gerilme boşalmalarına maruz kalmış zeminlerde oluşacak şişme potansiyelinin ölçülmesi için daha iyi teknikler gerekmektedir.

2.5.8 Endeks özellikleri ile belirleme

Zeminlerin şişme potansiyellerinin belirlenmesinde zemin özellikleri deneylerinden yararlanılabilir. Deneylerin yapılması kolay ve inşaat alanlarında rutin olarak yapılabilir.

Holtz ve Gibbs (1956), plastisite indisi ve likit limit değerlerinin bir çok kilin şişme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir olduğunu belirtmiştir. Seed, Woodward ve Lundgren (1962) ise sadece plastisite indisinin killerin şişme özelliğinin ön belirlenmesinde yeterli olabileceğini göstermeye çalışmışlardır. Bu noktada Terzaghi'nin şu tespiti de değerlendirilmelidir. “Aynı jeolojik geçmişe sahip zeminlerin limit değerleri de aynı ya da çok benzer ise fiziksel özelliklerinin de benzer olacağı söylenebilir ve zeminlerden herhangi birinin incelenmesi yeterli olacaktır.” Bu nedenle limit değerleri zeminlerin ön sınıflandırılmasında önemli bir veridir. Eğer bir zeminin üç limit değerini de biliyorsak bu zemini diğer zeminlerle kıyaslayabiliriz ve en azından hangi özelliklere sahip olamayacağını bilebiliriz. Dahası, elimizdeki zeminin limit değerlerine yakın limitlere sahip başka bir zemin üzerinde yapılan fiziksel deneylerin sonuçları da varsa zemini tanıyoruz diyebiliriz.

Likit limit ve şişme potansiyeli zeminin emmeye çalıştığı su miktarı ile ilişkili olduğu için bu sonuçlar beklenmedik değildir. Şişme potansiyeli ile plastisite indisi arasında aşağıdaki Çizelge 2.11'deki gibi bir ilişki bulunmaktadır.

Chen (1975) yaptığı bir seri deneyler neticesinde şişme potansiyeli ve şişme indisi arasında aşağıdaki eşitliği vermiştir.

$$S = Be^{A(PI)} \quad (2.12)$$

Burada $A=0.0838$ ve $B=0.2558$ değerlerinde katsayılarıdır.

Çizelge 2.11 : Şişme Potansiyelinin Plastisite İndisine Göre Değişimi

Şişme Potansiyeli	Plastisite İndisi (%)
Düşük	0 – 15
Orta	10 – 15
Yüksek	20 – 55
Çok yüksek	35 ve üstü

2.5.9 Konsolidasyon (ödometre) deneyleri

Şişen zeminlerde oluşan şişme potansiyelinin ve şişme basıncının bulunmasında en çok kullanılan yöntem tek eksenli konsolidasyon deneyidir.

ASTM D4546’da şişme davranışı ve şişme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla üç değişik ödometre deneyi önerilmiştir.

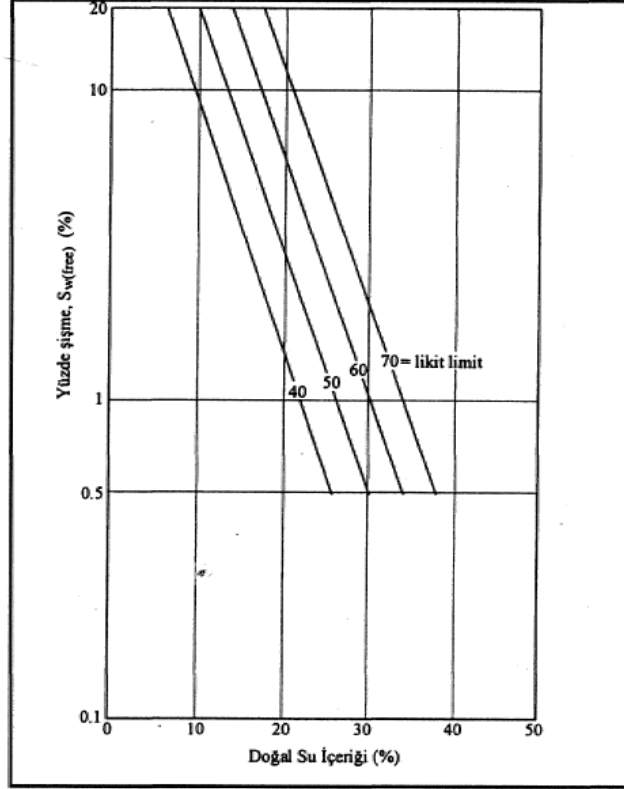
2.5.9.1 A yöntemi: (serbest şişme deneyi)

Bu yöntemde zemin numunesi 1 kPa sürşarj yükü altında suya doyurularak şişme tamamlanıncaya kadar beklenir. Sonra doğal boşluk oranı elde edilinceye kadar klasik ödometre deneyindeki yük kademeleri altında numune yüklenir.

Vijayvergiya ve Ghazzaly (1973), bahsedilen yöntemle, çeşitli zeminlerden elde ettikleri sonuçları kullanarak, Şekil 2.16’ da görüldüğü gibi serbest şişme, likit limit ve doğal su içeriğinin korelasyon kartını hazırlamışlardır.

2.5.9.2 B yöntemi: (yük altında şişme deneyi)

Zemin örneği ödometrede doğal su muhtevasında sürşarj gerilmesi + temel yükü etkisine eşdeğer bir P_0 düşey gerilme altında bekletilir. Daha sonra suya doyurularak P_0 gerilmesi altında şişmenin dengelenmesi sağlanır. Daha sonra klasik ödometre yükleme - boşaltma aşamalarına geçilebilir.



Şekil 2.16 : Serbest Şişme, Likit Limit ve Su İçeriği Korelasyon Kartı
(Vijayvergiya ve Ghazzaly, 1973)

2.5.9.3 C yöntemi

Şişme basıncını bulmak için numune suya daldırıldıktan sonra yüksekliğinin değişmemesi sağlanacak şekilde düşey basınç ayarlanır. Bundan sonra deney yöntemi D2435'e göre konsolidasyon deneyi yapılır. Boşaltma verileri şişme potansiyelini belirlemekte kullanılır.

2.5.9.4 Modifiye serbest şişme

Serbest şişme deneyinde hacmi bilinen kuru zemin su dolu silindirik bir kabın içine bırakılır ve numunenin herhangi bir yükleme olmaksızın dibe çökmesinden sonra hacim ölçmesi yapılır. İlk ve son hacimler arasındaki fark hacmin yüzdesi olarak serbest şişme değeri olarak tespit edilir.

Holtz ve Gibbs (1956), zeminlerin şişme potansiyelini belirlemek için serbest şişme adı verilen basit bir deney geliştirdiler. Bir miktar numune etüvde bir gün bekletildikten sonra 425 µm elekten geçirilir. İçerisinden 10 ml numune alınıp 50 ml saf su ile dolu dereceli bir kabın içerisine dökülür (Bu işlem yapılırken numunenin sıkışmamasına ve çalkalanmamasına özen gösterilir). Saf su içerisindeki numunenin

dengeye gelmesi beklenir. Çok ince daneli partiküllerin askıda kalma ihtimali ihmal edilir. Saf su içerisinde çökelen numunenin hacmi okunur (V). %100 veya daha fazla serbest şişmeye sahip olan zeminler ıslatıldıkları zaman önemli derecede şişerler ve üzerlerindeki hafif yapılara büyük ölçüde zarar verirler. %50'den daha az serbest şişmeye sahip olan zeminler şişme özelliği göstermez, dolayısıyla böyle zeminler yapılarda ciddi problemlere neden olmaz. Bentonit gibi yüksek şişme özelliği bulunan zeminler %2000 değerine kadar serbest şişme gösterebilirler.

$$S = (V-10)/10 * 100 [\%] \quad (2.13)$$

Burada; S= serbest şişme, V = numunenin son hacmidir.

Sivapulliah ve diğerleri (1987) killer için, killi zeminlerin şişme, potansiyelini daha iyi belirleyecek gibi gözüken, modifiye serbest şişme indeksinin elde edildiği yeni bir deney yöntemi önermişlerdir. Bu deney 10 g örneğin etüvde kurutulması ile başlar, zemin daha sonra iyice öğütülür ve içinde 100 ml damıtılmış su bulunan behere konur, 24 saat sonra şişen numunenin hacmi ölçülür. Daha sonra, aşağıdaki eşitlikten modifiye serbest şişme indeksi hesaplanır.

$$\text{Modifiye serbest şişme indeksi} = (V-V_s)/V_s \quad (2.14)$$

Burada V_s = zemin dane hacmi = $W_s/G_s \cdot \gamma_w$

V =şişmeden sonraki numunenin hacmi, W_s = etüvde kurutulmuş zemin ağırlığı,

G_s = zeminin dane özgül ağırlığı, γ_w = suyun birim hacim ağırlığıdır.

Modifiye serbest şişme indeksine bağlı olarak zeminlerin şişme potansiyeli, kalitatif olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Çizelge 2.12).

Çizelge 2.12 : Modifiye Serbest Şişme İndeksine Bağlı Olarak Şişme Potansiyeli

Modifiye Serbest Şişme İndeksi	Şişme Potansiyeli
< 2,5	İhmal edilebilir
2,5 – 10	Orta
10 – 20	Yüksek
> 20	Çok Yüksek

2.6 Bentonit (Montmorillonit) Killeri ile İlgili Genel Bilgiler

Diğer kil çeşitleri gibi bentonitin de oluşumu ile ilgili çeşitli görüşler ortaya atılmıştır. Kesinlikle bir tanım yapılmamasına karşılık çok kişinin benimsediği bir yol olarak feldspar, serpantin veya püskürük maddelerin su ve havanın etkisi ile değişimi sonucu bentonitin meydana geldiği ileri sürülmektedir.

Başlangıçta Wyoming'de (USA) Ford-Benton yakınlarında bulunmuştur. Bentonit ismini bulunduğu bölgeden almıştır. Plastisitesi yüksek, koloidal özelliğe sahip bir kil çeşitidir. Daha sonra aynı kil çeşiti Fransa'nın Montmorillon bölgesinde de bulunduğu için bu kil çeşidine Montmorillonit adı verilmiştir. Bentonitle birlikte kuvars, mika feldispat, pirit ve bazı minareller bulunabilir. Rengi beyaz, gri, yeşil, sarı, pembe, mor ve kırmızı olabilir. Yoğunluğu 2,6 gr/cm³ olup, iyonlaşma kapasitesi oldukça yüksektir. Kimyasal özelliklerine göre başlıca üç gruba ayrılır:

1. Sodyum bentonit:

Su ile temas halinde 5-10 kata kadar şişebilen, ağırlıklı olarak sondaj sanayi, döküm sanayi ve inşaat sanayinin kullandığı bentonit türüdür.

2. Kalsiyum bentonit:

Su ile teması halinde 2-3 katı kadar şişer ve kedi kumu ile gıda sektöründe berraklaştırma amacı ile kullanılır.

3. Sodyum - kalsiyum (ara tip) bentonit

Kimyasal aktifleştirmeler sonucu sodyum bentonit olarak kullanılır.

Büyük ölçüde montmorillonit veya montmorillonitten iyon değişimleri ile türemiş olan berdelit, saponit, hektorit ve nontronit gibi kil minerallerini içeren maddelere "bentonit" adı verilir. Jeolojik olarak, volkanik küllerin camsı yapışım kaybetmesi ile oluşan bentonitler içinde safsızlık olarak; kaolin ve illit gibi diğer kil mineralleri ile, jips, kuvars, rutil, kalsit, dolomit ve volkanik kül gibi kil minerali olmayan maddeler de bulunmaktadır.

Bentonitler, içerdikleri montmorillonit minerallerinin özelliğine göre su ile az veya çok şişerler. Ham bentonit kaolin kıvamında, yumuşak ve parçaları kırılmaya

elverişlidir. Ele sürülünce yağmsı bir görünüşle yayılır ve yüzeye yapışır. Beyaz, açık sarı, yeşilimtrak sarı, pembemsi bej veya açık pembe renklidir. Çok ince tanelidir. Su ile temasa geçince en az beş misli şişebiliyorsa, ticari bentonit sayılır. İyi bentonitler 10-20 kat şişer. Çok ender olarak 25-30 kat şişebilen bentonitler de vardır. Su ile şişme özelliği 600°Cden sonra kaybolan bentonitin kuru birim hacim ağırlığı 2,7-2,8 g/cm³tür.

Aynı bentonit toz haline getirilirse, birim hacim ağırlığı hissedilir şekilde düşerek 1,6-1,8 g.cm³ kadar olur. Bentonitlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri birbirinden çok farklıdır ve değişik türleri bulunmaktadır. Partikülleri tamamen veya kısmen kolloidal boyutlara sahip olduğundan su içinde uzun süre süspansiyon halinde kalabilirler. Çözelti iyonları adsorplayabilirler ve adsorplanan iyonlar çözelti derişiminde değişikliğe neden olurlar. Aynı zamanda küçük boyutların etkisi ile su ve organik maddeleri adsorplama yetenekleri sebebiyle plastisite özelliği gösterirler. Diğer bir deyişle ıslanığında biçimlendirilebilirler.

Bentonitlerin suya karşı duyarlı olmaları, kolay çözünüp dağılmaları ve hacimce genleşmeleri, sürekli bazik süspansiyon oluşturmaları, süspansiyonların genellikle bazik reaksiyon göstermesi, benzidin ile reaksiyon sonucu lacivert renk vermeleri gibi özellikleri, ayırt edici özellikleridir.

Bentonitler ve bentonitik killer montmorillonit mineralinden gelen değişken plastisite özelliğine sahiptir. Bu özelliği gösteren killer su içeriği sabit kaldığı halde, basınç ve sarsıntı gibi etkenlerle plastisitelerini değiştirirler ve hatta fazla basınç altında akıcı hale de gelebilirler. Taneciklerin çok ince olmasından dolayı, bentonit partikülleri ancak elektron mikroskobunda görülebilecek kadar küçüktür.

Holtz (1956) tarafından yapılan serbest şişme deneyleri sonuçlarına göre, yüksek şişme özelliğindeki bentonitin serbest şişme değeri yüzde 1200 ile 2000 arasında değişmektedir. Holtz, yüzde 100 bir serbest şişme değerine kadar zeminlerin hafif yapılar için tehlikeli olacağını belirtmiştir.

2.6.1 Bentonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Bentonitin şişme özelliği: Bentonitin kendi hacim ve ağırlığının bir çok katı kadar suyu emmesidir. Kendi hacimlerinin 10 veya 30 katı kadar şişen bentonitler plastik şekil kazanırlar. Suyun silikat düzlemleri arasındaki bentonit kütlesine nüfuz etmesi ile genişleyen hacim şişmeyi sağlar.

Çok yüksek sıcaklıklar bentonitin kolloidal özelliklerinin tamamen kaybolmasına sebep olmuştur.

Şişme Kapasitesi: En kolay ve çabuk bilgi, toz haline getirilmiş bentonitin su içinde çabucak şişip akışkanlığı az bir sıvının meydana gelmesi sonunda alınır. Diğer killer suyun dibine çöküp askıda kalmamakla ayırt edilirler. Enslin cihazı bu özelliği hassas bir şekilde değerlendirmekte kullanılır.

Benzidin: Eğer benzidin su eriyiğinden bir kaç damla $FeCl_3$ ile birlikte kil üzerine damlatılırsa bentonitin ana minerali montmorillonit koyu mavi bir renk verir.

2.6.2 Bentonit ile yapılmış bazı laboratuvar çalışmaları

Su içinde askıda kalabilmesi: Dört bentonit numunesi birer tüp içinde su ile karıştırılıp çalkalandığı zaman hepsinin su içinde askıda kaldığı görülmüştür. Bunlar dinlenmeye bırakıldıktan sonra Gürün kilinin yarım saat sonra çöktüğü, diğer üç kil numunesinin Elazığ Bentoniti, Reşadiye Bentoniti, Magcogel dört gün askıda kalma durumunu koruduğu izlenmiştir.

Kolloidal özelliklerinin sıcaklığa karşı dayanıklılığı: Üç bentonit numunesi Gürün kili, Reşadiye Bentoniti ve Magcogel porselen kaplar içinde fırına konulmuş ve sıcaklık $50^{\circ}C$ yükseltilerek her derecede 24 saat kalmaları sağlanmıştır. Her 24 saatin sonunda küçük bir miktar su ile karıştırılıp askıda kalma özelliklerini koruyup korumadıkları test edilmiş, bunun sonucunda $250^{\circ}C$ de Gürün kilinin artık süspansiyon meydana getirmediği fakat diğer iki numunenin $450^{\circ}C$ ye kadar bu özelliklerini korudukları görülmüştür.

2.6.3 Türkiye'de bilinen bentonit yatakları

REŞADİYE: Tokat ile Reşadiye kazası civarındaki bentonit yatakları en yeni ve en kullanışlı sondaj çamuru kaynağı durumuna gelmiştir. 60,000 m²'den daha fazla bir alan kaplayan yatakları Karakaya Bentonit ve Barit Şti., Ünlü Bentonit Şti., ve Öznur Taylan Bentonit Şirketleri işlemektedir.

ELAZIĞ: Reşadiye bentoniti bulununcaya kadar en önemli yerli bentonit kaynağı Elazığ, Altın Koy yatakları idi. Bazı yerlerde 10 metreden fazla kalınlığa ulaşan bu yataklar içinde ince (- 20 cm.) jips bantları göze çarpmaktadır. Açık bir şekilde işletilen Elazığ bentoniti günümüzde de önemini korumaktadır.

ÇANKIRI: Ticari öneme sahip diğer bentonit yataklarının Eldivan kazası civarında bulunduğu belirtilmektedir. Volkanik küllerin değişiminden oluştuğu kuvvetle inanılan ve 930,000 tonun üzerinde bir rezerve sahip olan bu yatakların işletilmesine Ünlü ve Taylan Bentonit Şirketleri başlamış fakat diğer yatakların özellikle Reşadiye bentonitinin oluşumundan sonra, üretimde bir yavaşlama olmuştur. Ayrıca Nevşehir, Çorum, Çanakkale, Eskişehir ve Bilecik yörelerinde de bentonit ve diğer kil çeşitlerinin bulundukları değişik raporlarla belirtilmiştir (Erdinç,1958).

Genel olarak TPAO, MTA ve Ersan Petrol Şirketleri yaptıkları petrol sondajlarında yerli bentonit kullanmaktadırlar. 1966' ya kadar TPAO ithal bentonit kullanmış, daha sonraki yıllarda bunu senede 500 tona düşürmüştür. Buna karşılık yeniden sondaja başlayan Mobil, Shell yerli bentonit şirketlerin ihtiyaçlarını karşılayamayacaklarını ileri sürerek bentonit ithal etmiş ve etmektedirler. Ülkemizin bentonit yönünden geniş yataklara sahip olduğu yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır. Bentonit endüstrisi teşvik edildiği sürece ülkemizin bütün ihtiyacı karşılanacağı gibi, coğrafi bakımdan bulunduğu yer dolayısıyla da bir ihraç memleketi olması ihtimal dahilindedir. Bentonit yatakları 19. yüzyıldan kalma taş ocakları kanunları ile işletilmektedir. Taş ocakları kanunları kısıtlı ve geçici üretimleri kapsadığından bu günün gelişmekte olan endüstrisini teşvik ve kontrolden uzaktır.

Bentonitin kullanım alanları

Bentonitler, çeşitli endüstri alanlarında kullanılan birçok ticari ürünün bileşiminde bulunurlar. Kil ve topraklarda, bentonit varlığı malzemenin özelliklerini önemli ölçüde etkilediğinden gıda, tarım, yapı mühendisliği, seramik, arıtma ve daha birçok alanda bentonit yaygın olarak kullanılmaktadır. Suyun sertliğinin giderilmesinde, su geçirmez malzeme üretiminde, boya, emaye, ilaç ve kimya endüstrisinin çeşitli kollarında, çimento ve sıvalarda, yol, kanal ve baraj yapımında çeşitli tür ve kalitelere bentonitler kullanılır. Bentonitlerin eğer plastisiteleri az ise sondaj çamurlarında, dökümcülükte ve seramikte kullanılamazlar. Fakat bunlar aktif hale getirildiklerinde, madeni, sıvı ve katı yağların arıtılmasında kullanılabilmektedir.

3. ŞİŞEN ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU VE ŞİŞEN ZEMİNLER ÜZERİNDEKİ YAPILARIN PROJELENDİRİLMESİ

3.1 Şişen Zeminlerin Stabilizasyonu

Killer üzerine inşa edilen mühendislik yapıları, zeminlerin şişme özelliğinden kaynaklanan yukarı doğru kaldırma kuvvetine maruz kalırlar. Bu kuvvetler, temel yapıları ve elemanlarını yukarı doğru kaldırır, çatlatır ve kırar. Şişebilen killer, dünya üzerinde Amerika Birleşik Devletleri, Güney Amerika, Afrika, Avustralya ve Hindistan'da geniş alanlar kaplarlar. Özellikle de Teksas ve Oklohama vadisinde yüzeyleşirler. Şişen killer genellikle %40'dan büyük likit limit ve %15'ten büyük plastisite indisine sahiptirler.

Şişen zeminlerin kabarmasını minumuma indirmek için kullanılabilen ekonomik ve pratik birçok yöntem mevcuttur. Bu metodlar; uygun kompaksiyon ön ıslatma, su seviyesini sabit tutmak ve kimyasal elektroozmos gibi stabilizasyon teknikleridir. Bu tekniklerden herbirinin uygulanabilirliği, zemin şartlarına, malzemeye, yapı tipine ve stabilizasyon aletlerinin inşaat sahasında temin edilebilirliğine bağlıdır. Stabilizasyon metodunun başarılı olması bütün şartların gözönüne alınmasına, uygulamadaki titizliğe ve söz konusu metodun etkinliğine bağlıdır (Gromko, 1974).

3.1.1 Şişen zemini kaldırma ve yerdeğiştirme

Temel altındaki şişen zemini şişme özelliğine sahip olmayan bir zeminle değiştirme stabil temel malzemesi sağlamak için kullanılan yöntemlerden biridir. Bazı durumlarda şişen tabaka tamamen kaldırılabilir. Genellikle, şişen tabakalar tamamen kaldırma ve yerdeğiştirme işlemlerini ekonomik olarak yapmak için müsaade edilir derinliklerde bulunmaktadır.

Bu iyileştirme yöntemi özel yapım ekipmanları gerektirmediğinden dolayı, diğer stabilizasyon yöntemlerine göre daha ekonomiktir. Bazı durumlarda, şişme özelliği olmayan dolgu tabakasının geçirimsiz olması tercih edilmek zorunda kalınıyor, bu da önemli bir maliyet artışına neden olmaktadır. Uygulanışı çok zaman almadığından, ön ıslatma gibi diğer bir çok yönteme göre daha kısa sürede gerçekleşmektedir.

3.1.2 Kompaksiyonun kontrol edilmesi

Şişen zeminleri kontrol etmede en ekonomik ve pratik metodlardan biri de sıkıştırma kontrolüdür. Genellikle, şişme gösteren zeminler düşük yoğunlukta ve yüksek su muhtevalarında sıkıştırıldıklarında çok az şişme gösterirler (Holtz ve Gibbs, 1956).

Su muhtevasını kontrol etmek, yoğunluğu kontrol etmekten daha önemlidir. Gizienski ve Lee (1965), tutulan zemin numunesini optimum su muhtevasının %4,5 kadar üzerinde sıkıştırdığında, herhangi bir sıkıştırma yüzdesinde şişmenin ihmal edilebilir olduğunu göstermişlerdir ($w_{opt} = \%10.5$). Ancak optimum su muhtevasının %3 altında yapılan kompaksiyon, düşük kompaksiyon derecelerinde bile aşırı şişmeye neden olmaktadır. Düşük yoğunluklarda sıkıştırılan temel zeminleri az şişme gösterir. Bununla beraber, bu uygulama şişme basıncını büyük ölçüde azalttığından istenilen bir durumdur.

Zemin, yük taşıma kapasitesini kaybetmeden mümkün olduğu kadar ıslatılmalıdır. Ortaya çıkabilecek farklı deplasmanları azaltmak için de olabildiğince üniform olarak sıkıştırılmalıdır. Şişen zeminin mevcudiyeti halinde, zemin üstüne oturan döşeme tercih edilmemelidir. Aksi takdirde, kuruma devresinde problemler çıkacaktır.

3.1.3 Ön ıslatma

Ön ıslatmanın amacı; yapının yerleştirilmesinden önce, kurutulan temel zemininin şişmesini sağlamaktır. En çok bilinen ıslatma metodu, havuzlama veya bölgenin su içerisinde bırakılmasıdır. Bu metod birkaç durumda başarılı olmuştur. Ancak, kil fisürlü yapıda değil ise istenilen derinliklere kadar zemine su emdirilmesi aylar, hatta yıllarca bile sürebilir. Hatta ıslatmadan bir süre sonra yapıda yükselme oluşabilir. Islatmanın kolaylaştırılması, su vermeden önce düşey drenaj kuyularının yerleştirilmesi ile mümkündür. Bu işlem su verildikten sonraki birkaç ay içinde en büyük kabarmanın ortaya çıkacağı su muhtevasına ulaşma zamanını kısaltabilir. Ön ıslatmadan sonra, kil tabakasının üst kısmına %4 veya daha büyük oranda sönmüş kireç karıştırılarak plastisite azaltılabilir ve zemin üzerinde daha rahat çalışılabilir. Kireç plastisiteyi ve şişme özelliklerini azaltırken, zeminin katılığını artırarak uygun bir çalışma platformu da sağlar.

Bir alternatif olarak; zemin yüzeyine 10 – 15 cm kalınlığında çakıl, kum veya daneli zemin serilmesi, gerek ön ıslatmasının yapıldığı sırada gerekse ön ıslatma sonrasında

uygun bir çalışma ortamı sağlanmasında yararlı olmaktadır. Bu tabakanın buharlaştırmayı azaltıcı, çok az sürşarj sağlayıcı özelliği olduğu kadar, muntazam bir temel altı zemini teşkil etme gibi yararları mevcuttur. Ön ıslatmanın uygulanma şekli, maliyeti önemli ölçüde etkileyebilir. Uygun bir yapı inşa programı, suyun zemine nüfuz etmesi için zorunludur ve iş programı da geciktirmeden uygulanabilir.

3.1.4 Sabit su muhtevası

Binaların çevresinde su muhtevasını kontrol etmek için kullanılan metodlar, su gelişini önlemek ve temeli kuru tutmak amacıyla uygulanırlar. Su muhtevasını sabit tutmanın en bilinen yolları geçirimsiz duvar teşkili, uygun drenaj sistemi ve bitki örtüsünü kontrol etmektir. Yatay ve düşey geçirimsiz duvarlar, binanın çevresi boyunca uygulanırlar ve bunlar esas olarak yapı altında üniform nem durumu sağlarlar. Bu geçirimsiz yapılar ya tretuvarlar, kaplamalar ya da zemin yüzeyine gömülü geçirimsiz membranlar şeklinde olabilir. Tretuvarlar, kirişlerle (ahşap, çelik) yapıya bağlanarak alttaki zeminde ortaya çıkabilecek su muhtevası değişikliklerinden ötürü bunların yapıdan uzaklaşması önlenir. Yapının çevresiyle tretuvar arasında geçirimsiz ve elastik bir mafsallık teşkil edilebilir. Geçirimsizlik membranın naylon, polietilen veya başka bir dayanıklı geçirimsiz malzemeyle teşkil edilmesiyle sağlanır. Bu engeller şevli olarak ve binanın uzağında teşkil edilirler. Drenaj sistemi bu engellerin altında veya yanında oluşturularak binaya yakın suyun havuzlanması (birikmesi) önlenir.

Karayollarında, döşemelerin kabarmasına karşı asfalt kullanarak başarı elde edildiği gözlenmiştir. Genellikle yüzey kaplama malzemesini takiben gelen membranın üstüne, şişme özelliği göstermeyen temel altı malzemesi serilmektedir.

Su muhtevasını sabit tutmak ve kontrol etmek için uygun drenaj sistemleri yapılabilir. Yoğun su akımı ve mafsallık sızıntıları yer altı suyunda önemli değişiklikler meydana getirir; temel altı zeminin su muhtevasını artırarak, temel altında problem yaratmak gibi. Yüzey suyu da temel duvarları boyunca sızarak çukurlar oluşturabilir, çevredeki zemine de yayılabilir. Düşük su muhtevalı zeminler üzerine veya yer altı su seviyesinin değişim derinliğinin altında döşenmiş, kullanılmış su mecraları, su geçirmez elastik mafsallık borulardan teşkil edilmelidir.

Son derece önemli olan bir şey ise yapının kısmen uzağındaki yüzey sularının da uygun koşullarda drenajının yapılmasıdır. Yeraltında aşırı su birikmesi, drenaj

hendekleriyle azaltılabilir veya altta bulunan siltli kum tabakasının içine uzatılan düşey kum drenleriyle de bu iş yapılabilir. Yapının yakınına veya bütün cephelerine yerleştirilecek yer altı drenleri de temel altı zemininin su almasını en aza indirmek için etkili olabilir. Bütün bunlarla birlikte, bu işlemlerin yapım kalitesi en önemli durumdur.

Doğal çimlen, ağaclar ve benzeri bitkiler kısmen geçirgen olmayan zeminlerde büyük su hacmi değışikliğı ortaya çıkarırlar. Ağaç ve bitki kökleri yaklaşık olarak 5m veya üzeri derinliklerdeki zeminin kurumasına neden olabilmektedir. Yapılarda ortaya çıkan büyük oturmalar, temellerin yakınında bulunan bitki örtüsünün zemin suyu talebine bağlanmaktadır. Bu tür bitkiler, zemindeki olası su değışmeleri ıslah edilmeksizin, yapıların yakınına ekilmemelidir. Örnek olarak ağacların boylarının 1-1,5 katı kadar uzunluğunda yarıçapa sahip bir alanı etkilemesi gösterilebilir. Genel kural olarak, yapı yakınlarında bulunan 2 m uzunluğundaki ağacların kaldırılması önerilmektedir.

3.1.5 Kimyasal stabilizasyon

Kireç ve çimento gibi kimyasal maddeler katarak şişen zeminlerin kimyasal stabilizasyonu uzun yıllardan beri çeşitli oranlarda sağlanan başarılarla devam etmektedir. Teksas eyaleti karayolları şubesi 1969 yılında yaklaşık olarak 500.000 ton kireci stabilizasyon işlemi için kullanmıştır.

Oganik maddeler, uçucu kül ve diğer bileşikler, genişlen zemindeki kabarmayı azaltıcı katkıları olarak görölmektedir. Kireçle stabilizasyon, kil daneleri ve kireç arasında sermantasyon ve yapı değışikliğıne yol açar. Az miktarda kireç katkısının (%2-%8) öncelikle etkisi; likit limit, plastisite indisi, optimum kuru yoğunluk ve şişmeyi önemli miktarda azaltmak; optimum su muhtevası ve şişen zemin mukavemetini artırmak şeklinde olmaktadır. Dikkat edilmesi gereken nokta, zemine suyun katılmasından hemen sonra, kirecin karıştırılması ve bunun kompaksiyonun izlemesidir. Woodward ve diğerleri (1965), tabii zeminde açılmış kuyularda su ile kireci çözme teşebbüslerinin başarılı olmadığını gördüler. Zemini önce kazıp sonra direkt olarak kireçle karıştırmak ve karışımı yerine yerleştirmek gerekiyordu. Bugün bu sabanlama işlemi derinlere kadar yapılabiliyor, maliyeti de düşük olmaktadır. Genellikle yüzeydeki ilk 30 cm'lik kısım ekonomik olarak stabilize edilebilmektedir. Bir diğer kireç uygulamasında kireç, büyük basınçlarda zemine yatay ve düşey

olarak enjekte edilmektedir. Kireç çamuru zemindeki eski kırılma düzlemlerini takip eder veya kireç tabakalarından oluşan düzlemler ortaya çıkarır. Kireç ve zeminin bu birleşme yerleri boyunca sabit bir kimyasal reaksiyon vardır, bu durum su muhtevasında değişiklik meydana gelmesini önler. Çimentonun stabilize olması, kalsiyum silikat, alüminyum hidrasyon ürünleri ve zemin daneleri ile çimentonun bağ oluşturması ile gelişmektedir. Sertleşme; kristalleşen yeni minerallerin ve pelte yapıların tedrici olarak kurumasından sonra ortaya çıkar. İyi bir stabilizasyon ve ekonomi elde etmek için uygun ve yeterli miktarda karıştırma zorunludur. Çimentonun, kil minerali üzerindeki etkisi, likit limit, plastisite indeksini ve hacim değiştirme potansiyelini azaltmak; bunun yanında rötre limitini yükseltmek ve kayma mukavemetini artırmak şeklinde olmaktadır.

Çimentonun karıştırılmasının ve yayılmasının maliyeti, kirecinkilere oranla bilinmektedir. Genellikle çimento ve kirecin uygulanmasında aynı maliyet etkenleri gözönüne alınmaktadır.

3.1.6 Organik bileşiklerle zemin ıslahı

Organik bileşikler, şişen zeminleri su geçirmezlik sağlayarak, su absorpsiyonunu geciktirerek veya reçine ile sertleştirerek ıslah etmektedir. Arguard 2HT veya 4-Tert-Butylpyrocate gibi organik bileşikler, sınırlı bir sayıda başarı elde ederek kullanılmışlardır. Ancak, bu yöntemin maliyeti kirecin benzer probleme uygulanmasıyla elde edilen maliyete oranla iki kat daha pahalı olmaktadır. Zemin-kireç karışımına uçucu kül karıştırılarak puzolanik reaksiyonu artırma yoluna gidildiği de olmaktadır.

Zeminlerin ıslahı için kullanılabilecek diğer bazı bileşikler şunlardır; sodyum silikat, kalsiyum hidroksit, sodyum klorit ve kalsiyum klorittir.

3.1.7 Diğer yöntemler

Temellerin mevsimlik değişimlerden etkilenecek derinliğin veya aktif zonun altına, yerleştirilmesi de bir yöntemdir. Kazık veya pabuç temel sistem seçilerek subasman hatılı, döşeme ve zemin seviyesi arasında muhtemel şişmeyi karşılamak üzere boşluk bırakılması. Tekil sömeller yapılacaksa, şişen zemini kaldırarak, sömel ve döşeme altlarına 1m kalınlıktan az olmamak ve bina çevresine en az 3 m kadar taşmak üzere sıkıştırılmış stabilize malzeme konulması. Şişme basıncını karşılamak üzere dar

sürekli sömeller yapılarak taban basıncının artırılması gibi yöntemler kullanılabilmektedir (Das, 1995).

3.2 Şişen temel zemini üzerindeki yapıların projelendirilmesi

Yapının projelendirilmesi, temel altı zemini ve arazi şartları, mevcut çevre koşullarını dikkate alarak belirlenebilecek düşey kabarma ve alternatif projelerin göreceli maliyeti esas alınarak yapılmalıdır.

Temel altı zemininin şişme özelliklerini belirleme çalışmalarında göz önünde alınması gereken önemli bir nokta da civarda bulunan ve yapılması düşünülen yapıya benzer yapıların geçmiş davranışı ve bugünkü durumlarının incelenmesidir. Tuğla ve taş yapıların içinde bulunduğu koşullar zeminin şişme potansiyelinin göstergesidir. Çizelge 3.1.'de şişen zeminler üzerine oturacak yapılar için bir prosedür kısaca özetlenmiştir. Bu metodlar esas olarak aşağıdaki amaçlara hizmet etmektedir:

- Oturmaya dayanıklı yapılar
- Elastik bir yapı oluşturarak göçmeden deplasmana izin veren yapılar
- Zemin kabarmasından etkilenmeyecek rijit yapılar

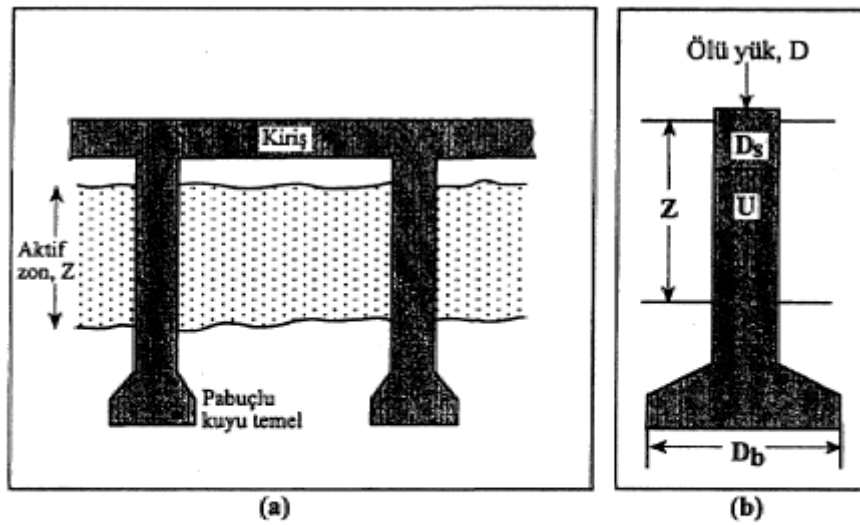
Şişen zeminler üzerinde yer alacak temel türü seçimine özen gösterilmelidir. Çizelge 3.1 beklenen toplam kabarma ve duvar panellerinin uzunluk-yükseklik oranlarına bağlı olarak önerilen inşaat yöntemini göstermektedir. Örneğin, Çizelge 3.1 bağımsız hareket eden yapılar için üzerinde asılı beton döşeme plakasının bulunduğu kuyu temel kullanımını önerir. Şekil 4.1'de bu tür bir temelin şematik şekli görülmektedir. Kuyu temellerin tabanları, şişen zeminlerin aktif zon derinliğinin altına yerleştirilmelidir. Kuyuların dizaynı için kaldırma kuvvetine (U) bir yaklaşım için aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır (Das, 1995).

$$U = \Pi D_s Z_{PT} \tan \Phi_{ps} \quad (3.1)$$

Burada; D_s = kuyu çapı, Z = aktif zon derinliği, $\tan \Phi_{ps}$ = kuyu duvarı-zemin efektif sürtünme açısı, PT = sıfır yanal şişme için basınç. Pabuçlu kuyu temeller kaldırma kuvvetlerine karşı koyan bir ankraj gibi görev yaparlar.

Çizelge 3.1 : Şişen Zeminler Üzerindeki Yapılar için Yapım Prosedürleri

No	Tahmin edilen şişme(mm)		Önerilen yapı tarzı	Yöntem	Dikkat edilecek noktalar
	L/H = 1.25	L/H = 2.5			
a.	0 – 6.35	12.7	Önleme gerek yok		
b.	6.35 - 12.7	12.7 - 50.8	Harekete izin veren rijit yapı (gerekli hallerde donatılı yapı)	<u>Temeller:</u> Sömel Mütemadi sömel Radye <u>Kat döşemesi:</u> Kaset Serbest oturan <u>Duvarlar:</u>	Sömeller, taşıma kapasitesi göz önüne alınarak küçük ve derin yapılmalıdır. Radye eğilme momentini karşılamalıdır. Döşemeler, eğilme momentini karşılamalı ve kirişlerden bağımsız olmalıdır. Radyeye oturan duvarlar radye kadar esnek olmalıdır. Düşey rijit bağlantı olmamalıdır.
c.	12.7 - 50.8	50.8 - 101.6	Deformasyon sönmümleyen yapılar	<u>Derzler:</u> Açık Esnek <u>Duvarlar:</u> Esnek Çelik çerçeve <u>Temeller:</u> Üç noktalı Hücreli Verenli	Yapı öğeleri arasında bağlantı olmamalıdır. Derzlerde su geçirmez malzeme kullanılabilir. Duvarlar ve döşemeler bağımsız olarak şişmelidir. Üç nokta yüklemesi zorlanmaksızın hareket sağlar. Hücreli temeller şişme basıncını azaltmak için az da olsa şişmeye izin verir. Verenler mal sahibine uygun gelmeyebilir.
d.	>50.8	>101.6	Deformasyondan bağımsız yapılar	<u>Ayak temeller:</u> Kolon şeklinde Tabanda genişleyen <u>Döşemeler:</u>	Aktarılacak yük dikkate alınarak küçük çaplı ayaklar yapılmalıdır. Kirişler direkt olarak zemine oturtulmayıp aralarında boşluk olmalıdır. Döşemeler, kirişler üzerine oturtulmalı ve zeminden 305 - 460 mm kadar Yukarda bulunmalıdır



Şekil 3.1 : (a) Pabuçlu kuyu temel ve kiriş inşaatı; (b) eşitlik 3.1'deki parametrelerin tanımları (Das, 1995)

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

Deneylerde kullanılan Na-bentonit kili (sarı renkli) Tokat Reşadiye'den çıkarılmış, Ankara'da faaliyet gösteren Karakaya Bentonit San. ve Tic. A.Ş. firması tarafından işlenerek laboratuvara getirilmiştir. Kaolin ise Bursa Mustafakemalpaşa'dan çıkarılmış, Eczacıbaşı firması tarafından öğütülerek TS 977 standartında 25 kg'lık torbada İTÜ Zemin Mekaniği laboratuvarına getirilmiştir.

4.1 Deneysel Çalışmaların Konusu ve Amacı

Bu çalışmada kaolin ile %5, %10, % 15, % 20, %25, % 30 oranlarında bentonit karıştırılarak şişme potansiyeline sahip numuneler hazırlanmıştır. Kıvam Limit (Likit Limit, Plastik Limit) deneyleri yapılmış, Piknometre deneyleri ile karışımların dane birim hacim ağırlıkları bulunmuştur Karışımlar Standart proktor (kompaksiyon) deneyine tabi tutulmuş, su muhtevası – kuru birim hacim ağırlığı eğrileri (kompaksiyon eğrileri) elde edilmiş, optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Kompaksiyonla elde edilen değişik su muhtevalarında sıkıştırılan numuneler ile konsolidasyon aletinde Serbest Şişme deneyleri yapılmış ve numunelerin şişme yüzdeleri hesaplanmıştır.

Şişme potansiyeline sahip altı farklı karışım hazırlanarak kompaksiyon deneyi uygulanmıştır. Kompaksiyon deneyinde beş farklı su muhtevasında sıkıştırılan numuneler üzerinde serbest şişme deneyleri yapılmıştır. Böylece, her karışım için beş adet olmak üzere toplam otuz adet serbest şişme deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneylere ait tüm sonuçlar, çizelge ve şekil olarak ekte verilmiştir. %5 + %95 oranlarındaki karışıma ait deney sonuçları ise örnek teşkil etmesi açısından bu bölümde yer almaktadır.

Ayrıca, farklı bir yöntem uygulanarak Modifiye Serbest Şişme yöntemi ile her bir numunenin serbest şişme yüzdesi belirlenmiş, elde edilen bulgular aşağıdaki alt bölümlerde verilmiştir.

Kaolin, laboratuvarında bulunan nemden ötürü topaklanmıştır. Bentonit ile karıştırılmadan önce, 40 nolu elekten geçirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneyler aşağıda açıklanmıştır.

Yapılan deneylerde ASTM standartlarında belirtilen yöntemlere aynen uyulmaya çalışılmasına rağmen bazı deney sonuçlarında az da olsa sapmalar gözlenmiştir. Bunun nedeni; bentonit kilinin deneysel olarak çalışılmasının zor ve kaolin ile bentonit killerinin kuru halde karıştırılarak amaçlanan %100 homojen bir karışım elde edilmesinin güç olduğu düşünülmektedir.

4.2 Yapılan Deneyler

4.2.1 Likit limit deneyi

Kaolin malzemesi içerisine %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında bentonit ilave edilerek toplam ağırlığı 200 gram olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışım üzerine damıtık su eklenerek derin bir kap içinde spatula ile karıştırıldı. Hazırlanan karışım Casagrande aletine yerleştirildi. Likit limit kaşığı ile ortadan yarıp açılarak iki adet simetrik şev oluşturuldu. Saniyede iki çevrim yapacak hızda yatay kol döndürülerek zeminin iki parçasının oluk tabanında 13 mm birleşmesini sağlayacak düşüş sayısı saptandı.

Su içeriği belirlenmesi için kapanan bölgeden numune alındı. Vuruş kabında kalan malzeme karıştırma kabına alındı ve su içeriği arttırıldı. Aynı işlemler yapılarak yeni vuruş sayısı belirlendi. Bu işlemlere, 10-100 arasında en az 3 darbe sayısı saptanıncaya kadar devam edildi. Saptanan her darbe sayısı için su muhtevası hesaplandı.

Bu elde edilen darbe sayısı ve buna karşılık gelen su muhtevası değerlerinden Likit Limit grafiği elde edildi (Şekil 4.1). Darbe sayısı logaritmik olarak apsiste, su muhtevası aritmetik olarak ordinatta gösterildi. 25 darbeye karşı gelen su muhtevası değeri o zeminin "likit limit" değeridir.

Likit limit deney çalışmasından elde edilen veriler sayesinde oluşturulan çizelge ve fotoğraflar ilgili eklerde bulunmaktadır.

4.2.2 Plastik limit deneyi

Likit limit için hazırlanan numuneden bir miktar alınarak laboratuvar ısısında numunenin plastik kıvama gelmesi beklendi. Plastik kıvama geldiği gözlemlendiğinde deneyin uygulamasına geçildi. Numune düz bir plaka üzerinde el ayası ile yuvarlanarak 3 mm çapında silindir çubuklar haline getirildi. Yoğurma işlemine 3 mm çapındaki çubuk çatlayıp birkaç parçaya bölününceye kadar devam edildi. Bu ufalanan çubuğun parçalarının su muhtevası belirlendi. Bulunan bu su muhtevası ortalamaları zeminin plastik limit değeridir. Aşağıdaki Çizelge 4.2.'de, plastik limit deney sonuçları belirtilmiştir.

Plastik limit deney çalışmasından elde edilen veriler sayesinde oluşturulan çizelge ve fotoğraflar ilgili eklerde bulunmaktadır.

4.2.3 Piknometre (özellik ağırlık) deneyi

Özellik Ağırlık; zeminin tane birim hacim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına oranıdır. Çeşitli büyüklüklerdeki piknometreler kullanılarak farklı boyutlardaki zemin danelerinin kuru birim hacim ağırlıkları belirlenebilir.

Piknometre deneyi için 6 farklı oranda bentonit ve kaolin karışımı hazırlandı. 105°C etüve alınan karışım 1 gün süre ile bekletildi. 0.01 gram hassasiyetindeki terazi yardımıyla, her karışımın ağırlığı 50 g olacak şekilde tartılarak (W1) ağırlığı, piknometre şişesinin ağzına kadar su doldurulup terazide tartılarak (W2) ağırlığı bulundu.

İçerisinde karışım bulunan piknometre, yarısına kadar saf su ile dolduruldu. Danelerin tümünün ıslanması ve taneler arası boşluk kalmaması için el yardımı ile gerektiği kadar çalkalandıktan sonra vakum uygulandı. Daha sonra piknometre kabına ağzına kadar olacak şekilde saf su ilave edildi. Numunenin çökmesi beklendi. Çökme tamamlanıp piknometre şişesinin üst kısmındaki suyun berrak olduğu gözlemlendikten sonra piknometre şişesinin üst başlığı takıldı ve numune+su+piknometre ağırlığı tartıldı (W3). (Numunenin çökmesi beklenmeden üst başlık takılırsa bir miktar numune dışarı taşabilir, dolayısıyla numunenin gerçek ağırlığını tespit edilemez).

Özellik ağırlık aşağıdaki Denklem 4.1 yardımıyla hesaplanır.

$$\gamma_s = (W1) / (W1 + W2 - W3) \quad (4.1)$$

Aşağıdaki Çizelge 4.3.'de, piknometre deney sonuçları verilmiştir.

Piknometre deney çalışmasından elde edilen veriler sayesinde oluşturulan çizelge ve fotoğraflar ilgili eklerde bulunmaktadır.

4.2.4 Standart proktor deneyi

Farklı oranlardaki bentonit - kaolin karışımı sprey aleti ile su eklenerek bir tepside yoğruldu. 942 cm³'lük proktor kalıbı içerisine konulan karışım, 30,5 cm yükseklikten düşen tokmakla, her tabakaya 25 darbe vurularak 3 tabaka olarak sıkıştırıldı. Her darbeden sonra kalıp ya da tokmak hafifçe döndürülerek veya kaydırılarak darbelerin düzgün dağılması sağlandı. Yeterli ölçüdeki malzeme kalıba konularak bir önceki işlem 3 tabaka için de tekrarlandı. Kalıbın dış kesimindeki malzemeler iyice temizlendikten sonra kalıp alt tabladan çıkarıldı. Sıkıştırılmış bu tabakanın üstü bıçak ile hafifçe traşlandı. Numune ve kalıp birlikte 0,1 gram duyarlılıktaki terazide tartılıp kalıp+yaş numune ağırlığı tespit edildi. Doğru su muhtevası tespit etmek için kalıbın alt ve üst kısımlarında çok fazla darbeye maruz kalmış olan numune spatula ile kazındı. Su muhtevalarının belirlenmesi için alt ve üst bölümlerden bir miktar malzeme alınarak metal bir kap içerisinde etüve konuldu. Çıkarılan bu sıkıştırılmış numune tekrar ufalanarak numunenin başlangıçtaki haline döndürülmeye çalışıldı ve tepside kalan malzeme ile karıştırıldı. Su spreyi ile su püskürtülerek, numunenin su içeriği %6 ~ %8 oranında arttırıldı. Suyun düzgün olarak dağıtılması için malzeme iyice karıştırıldı.

Yukarıda anlatılan sıkıştırma yöntemi aynen her defasında malzemenin su içeriği %6 ~ %8 oranında arttırılarak 5 kez uygulandı. (Numune+kalıp ağırlığı belirli bir noktadan sonra düşmeye başlar, bu nokta γ_{kmaks} ve w_{opt} değerlerine en yakın olan noktadır. Bu noktadan sonra su muhtevası arttırılarak bir nokta daha alınır ve deney sona erdirilir).

Standart Proktor deney çalışmasından elde edilen veriler sayesinde oluşturulan diğer çizelge, şekil ve fotoğraflar ilgili eklerde bulunmaktadır.

4.2.5 Serbest şişme (ödometre - konsolidasyon) deneyi

ASTM - D4546'da belirtilen A yöntemine göre şişme deneyleri yapılmıştır. Deneylerin yapılışı aşağıda açıklanmıştır.

Yapılan kompaksiyon deneylerinin her noktasında sıkıştırılarak elde edilen numunelerden ödometre deneyi için kalıbın orta kısımlarından ödometre ringi batırılarak numune alındı. Bu işlem sırasında mümkün mertebe malzemede yeni bir sıkışma meydana gelmemesine özen gösterildi. Kalıptan çıkarılan ringin altı ve üstü sıkıştırılmadan traşlanıp düzeltilerek su muhtevasının değişmemesi için sarılarak desikatöre konuldu. (Numune tıraşlama esnasında ring kenarlarında boşluk kalmamasına özen gösterilmiştir. Sebebi ise bu boşluklara suyun kolayca girmesi deney sonuçlarında tutarsızlık yaratabilmektedir).

Ringin yüksekliği aynı zamanda numune yüksekliği olan 20 mm'dir. Numune alınan ring standartlara özen gösterilerek ödometre aletine yerleştirildi ve 1 kPa sürşarj basıncı uygulandı. Ödometre aletinin moment kolunun denge kontrolü yapıldı. Düşey deformasyon saati sıfırlanarak kronometreye basıldı. Sırasıyla 0, 15", 30", 1', 2', 4', 8', 15', 30', 1 saat, 2 saat zamanlarındaki deformasyon okumaları alındı. (Burada unutulmaması gereken en önemli husus, 2.dakikadan sonra numune kutusuna su konulmasıdır). Deney yapılan günü takip eden birkaç gün içerisinde belirli aralıklarla şişme olayı tamamlanıncaya kadar şişme miktarı ölçüldü (Okuma alınan saatin hassaslığı 0.002mm). Düşey deformasyon saatinden okunan bu kabarma miktarları kaydedildi. Ayrıca bu deney ile numunede meydana gelen toplam şişme miktarından zeminin şişme yüzdesi de ölçüldü.

Çizelge 4.5.'de, farklı karışımlara ve su muhtevalarına göre şişme yüzdeleri gösterilmektedir. Çizelgeden her karışım oranı için su muhtevası arttıkça şişme yüzdesinin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.1 : Serbest Şişme Deney Sonuçları

Karışım Yüzdeleri	Su muhtevası (%)	Şişme Yüzdesi (%)	Karışım Yüzdeleri	Su muhtevası (%)	Şişme Yüzdesi (%)
% 5B+ % 95 K	28	3,34	% 20B + % 80K	30	26,77
	31	2,90		34	26,54
	32	0,26		37	25,60
	33	0,20		38	23,72
	34	0,21		40	15,67
% 10B+% 90K	19	22,98	% 25B + % 75K	31	31,57
	29	21,10		33	31,33
	31	20,72		37	31,04
	34	19,81		39	27,74
	35	19,48		40	20,96
% 15B+% 85K	28	24,20	% 30B+ % 70K	34	34,98
	31	21,18		35	35,97
	33	16,91		37	34,52
	35	14,87		38	31,63
	37	12,13		40	25,41

Ödometre deney çalışmasından elde edilen veriler sayesinde oluşturulan çizelge, şekil ve fotoğraflar ilgili eklerde bulunmaktadır.

4.2.6 Modifiye serbest şişme deneyi

Kaolin ile belirli oranlarda (%5, %10, %15, %20, %25, %30) bentonit karıştırılarak altı farklı karışım hazırlandı. Hazırlanan karışımlardan bir miktar alınan numune etüvde bir gün bekletildikten sonra 425 µm elekten geçirildi. İçerisinden 10 ml

numune alınıp 50 ml saf su ile dolu dereceli bir kabın içerisine döküldü (Bu işlem yapılırken numunenin sıkışmamasına ve çalkalanmamasına özen gösterildi). Saf su içerisindeki numunenin dengeye gelmesi beklendi. Çok ince daneli partiküllerin askıda kalması ihmal edildi. Saf su içerisinde çökelen numunenin hacmi okundu (V). Son hacim ile ilk hacim arasındaki farkın ilk hacme oranının yüzdesi alınarak serbest şişme değeri bulundu. Bu işlem 6 farklı numune için tekrar edildi.

$$\text{Serbest Şişme} = (V-10)/10 * 100 [\%] \quad (4.2)$$

Tüm karışım numunelerinin su ile temas etmesi sağlandı. %5, %10 ve %15 oranlarında bentonit içeren karışımların ilk 2 saat içerisinde hemen hemen tamamına yakınının çökelediği, %20, %25 ve % 30 bentonit içeren karışımların ise çok yavaş ve blok olarak kopmalar suretiyle çökelediği gözlemlendi.

Yaklaşık üç hafta beklendikten sonra okunan hacimler ve dereceli kabın içerisindeki su ile ilgili açıklama Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Bentonit Oranlarına Göre Serbest Şişme Yüzdeleri

Bentonit %	İlk Hacim (cm³)	Son Hacim (cm³)	Serbest Şişme (%)	Açıklama
5	10	10.0	0	Su berrak, net okuma
10	10	12.5	25	Su berrak, net okuma
15	10	15.0	50	Su berrak, net okuma
20	10	18	80	Su az bulanık
25	10	20	100	Su az bulanık
30	10	22.5	125	Su az bulanık

4.3 Deneysel Çalışma Sonuçları ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Deneysel çalışmalarla ilgili çizelgeler incelendiğinde aşağıda sıralanan sonuçlar ve değerlendirmeler çıkarılmıştır:

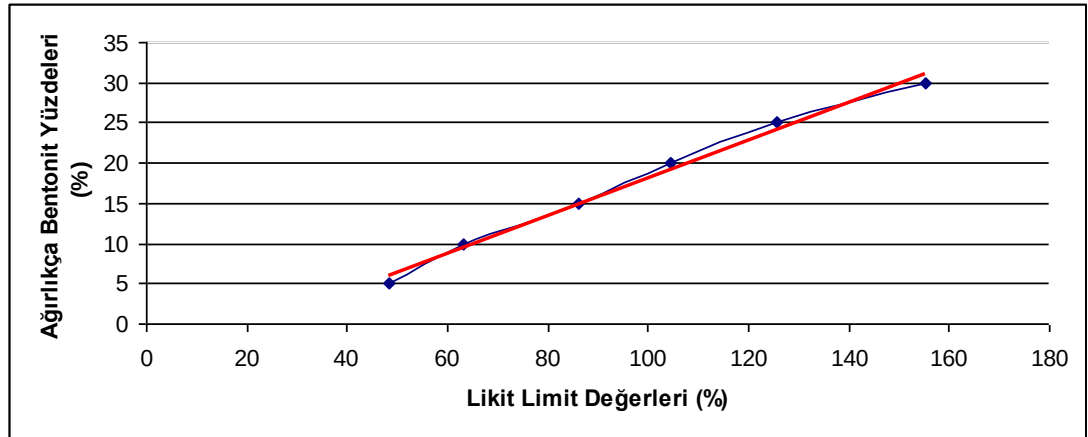
- 1) Mevcut araştırmada kil zemin numunesinin kıvam limitlerinin belirlenmesi amacıyla Casagrande yöntemi kullanılmıştır. Likit limit ve plastik limit deney sonuçları Ekler bölümünde gösterilmektedir.
- 2) İncelenen karışımlardaki Atterberg Limit değerleri (w_L , w_P , I_P) karışımdaki bentonit yüzdeleri ile artmaktadır (Çizelge 4.8). Karışımların likit limit ve plastisite indis değelerinin çok yüksek olması karışımların yüksek şişme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Literatürde yüksek şişme potansiyeline sahip killerin Likit Limitlerinin %40 dan, plastisite indislerinin ise %15'ten büyük olduğu verilmektedir.
- 3) Şekil 4.3.'ten görüldüğü gibi karışımların ağırlıkça bentonit yüzdeleri arttıkça likit limit değelerleri de artmaktadır.
- 4) Karışımların bentonit yüzdeleri arttıkça γ_s (dane birim hacim ağırlığı) değelerinin arttığı Ekler bölümünde detaylı olarak verilmiştir.
- 5) Çizelge 4.9 ve Şekil 4.4'te görüldüğü gibi karışım içerisindeki bentonit yüzdesi arttıkça optimum su muhtevası artarken maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalmaktadır.
- 6) Şekil 4.5'te %15 bentonit + %85 kaolin karışımı üzerinde yapılan konsolidasyon deney sonucunda elde edilen değeler görülmektedir. Başlangıçta zamanla az bir şişme gözlemlenirken, zamanla dik bir şekilde şişme artıyor ve asimptotik değere ulaşıyor. (Diğer karışımlar için yapılan deney sonuçlarına Ekler kısmında yer alan Çizelge ve Şekillerden ulaşılabilir).
- 7) Yine Şekil 4.5'e göre grafiğin asimptotik değere ulaşması için geçen gerekli zamanın bentonit ve kaolin yüzdelere bağılı olarak değiştiği söylenebilir.
- 8) Maksimum şişme miktarı bentonit miktarının artmasıyla artmaktadır.
- 9) Su muhtevası arttıkça şişme yüzdesinin azaldığı Şekil 4.6'dan görülmektedir.
- 10) Aynı su muhtevalarına sahip farklı oranlardaki karışımların içerisindeki bentonit oranları arttıkça şişme yüzdeleri artmaktadır (Şekil 4.7) Buradan, şişme yüzdesinin karışımdaki bentonit muhtevasıyla doğru orantılı olarak arttığı söylenebilir.

11) Yine karışım oranlarındaki bentonit (montmorillonit) yüzdesinin artmasıyla Plastisite İndisinin arttığı Şekil 4.8’den görülmektedir.

12) Çizelge 4.6’da Modifiye serbest şişme deneyindeki serbest şişme yüzdeleri verilmiştir. Çizelgeden görüleceği gibi bentonit oranı arttıkça şişme yüzdesi artmaktadır.

Çizelge 4.3 : Altı Farklı Karışım İçin Bentonit ve Kaolin Ağırlıkça Yüzdeleri

Karışım No	Kaolin % (Ağırlıkça)	Bentonit % (Ağırlıkça)
1	95	5
2	90	10
3	85	15
4	80	20
5	75	25
6	70	30



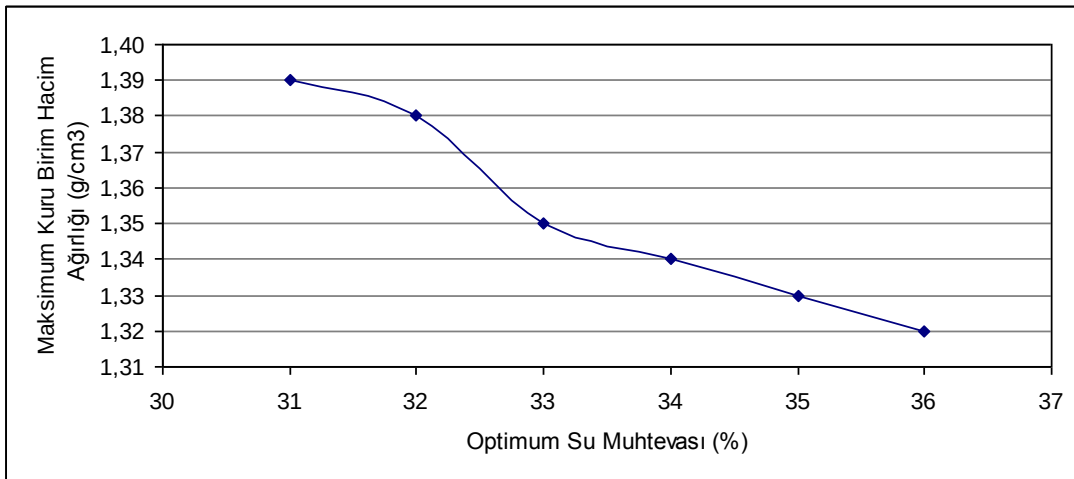
Şekil 4.1 : Ağırlıkça Bentonit Yüzdeleri ile Likit Limit Değerleri

Çizelge 4.4 : Kıl karışım oranları ve Atterberg (Kıvam) Limitleri

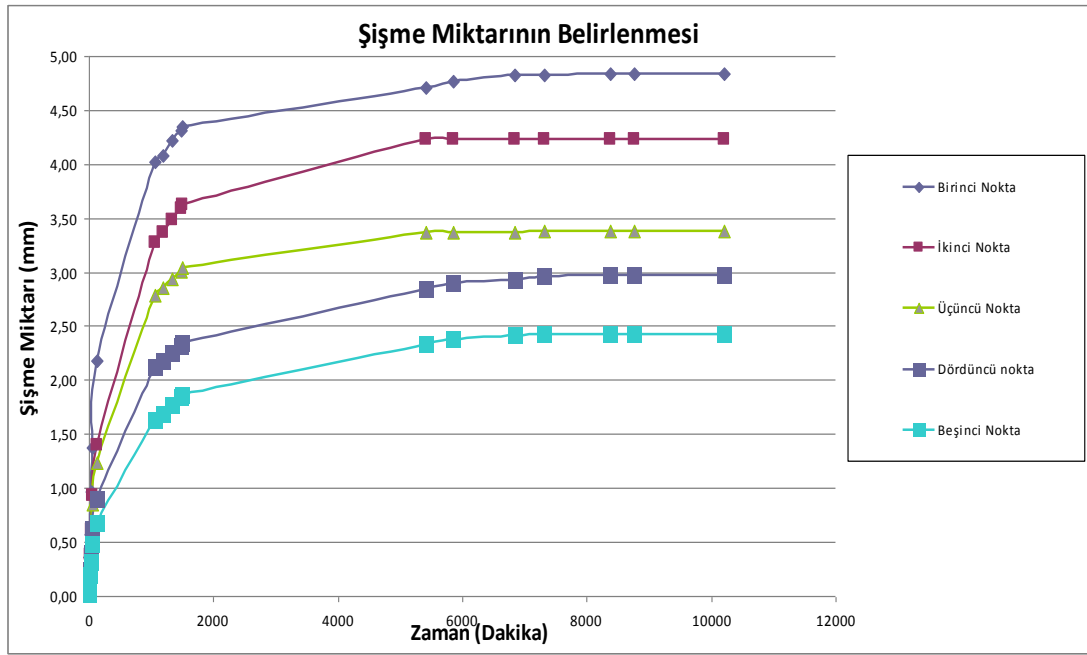
Karışım No	Kaolin % (Ağırlıkça)	Bentonit % (Ağırlıkça)	Likit Limit w_L %	Plastik Limit w_P %	Plastisite İndisi I_P %
1	95	5	48	28	20
2	90	10	63	28	35
3	85	15	86	29	57
4	80	20	104	29	75
5	75	25	126	31	95
6	70	30	155	31	124

Çizelge 4.5 : Bentonit Yüzdelere Göre Kompaksiyon Deney Sonuçları

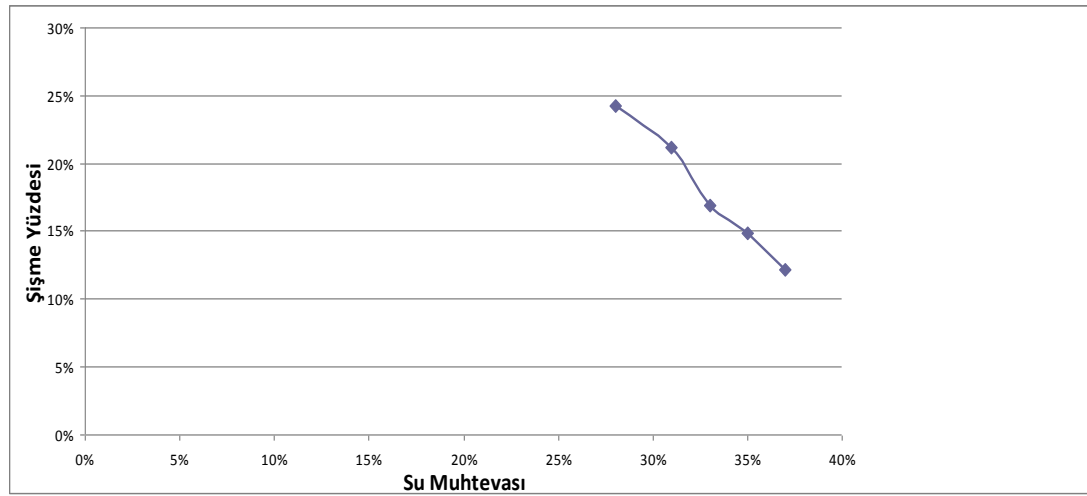
Bentonit (%) Ağırlıkça	w_{opt} (%)	γ_{kmaks} (g/cm ³)
5	31	1,39
10	32	1,38
15	33	1,35
20	34	1,34
25	35	1,33
30	36	1,32



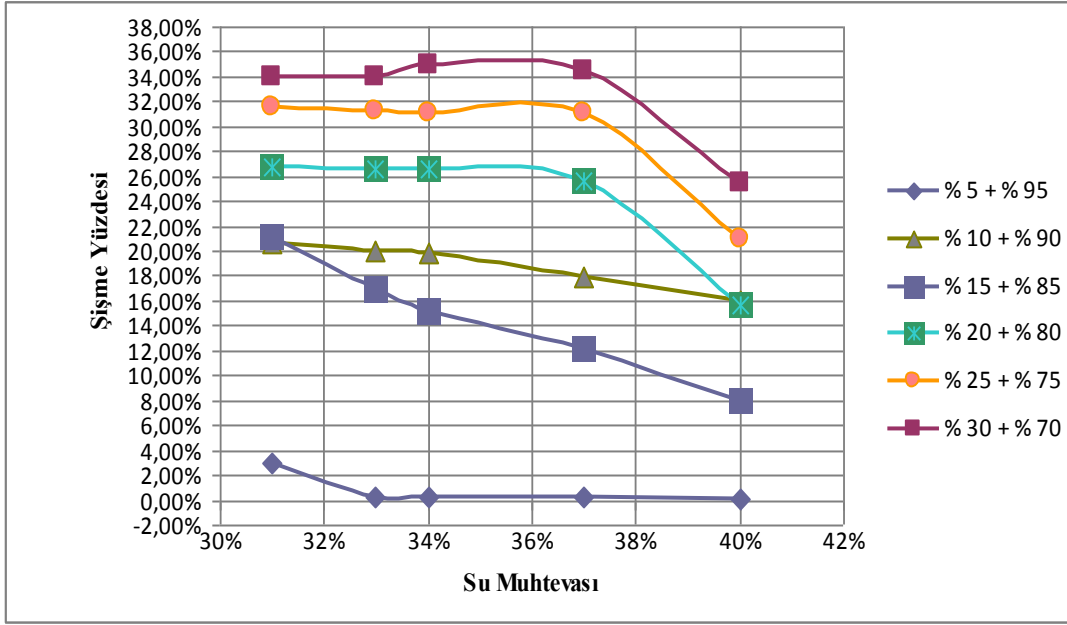
Şekil 4.2 : Bentonit Yüzdelere Göre w_{opt} - γ_{kmaks} ilişkisi



Şekil 4.3 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%15 Bentonit+%85 Kaolin)

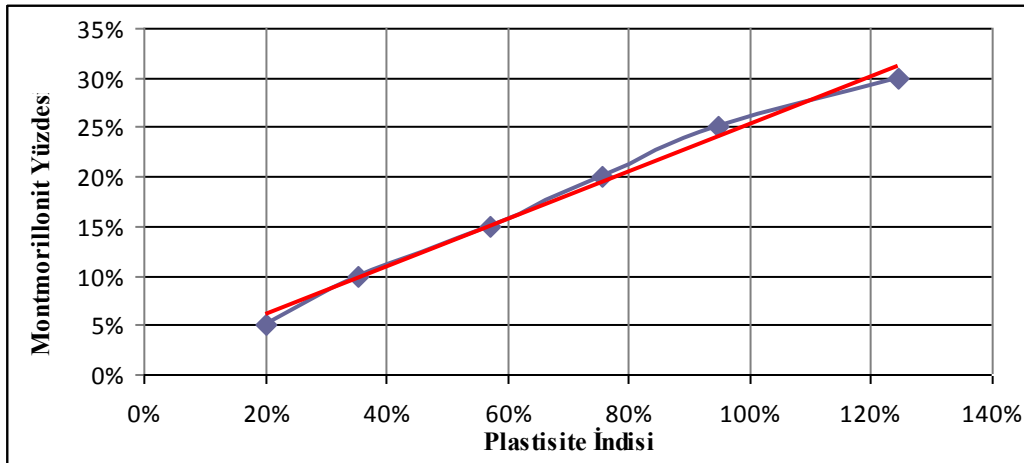


Şekil 4.4 : Su Muhtevası ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%15 Bentonit+%85 Kaolin).



Şekil 4.5 : Farklı Oranlardaki Karışımların Aynı Su Muhtevalarındaki Şişme Yüzdeleri

Atterberg Limit deneyleri sonucuna göre karışımdaki bentonit (montmorillonit) yüzdesi ile Plastisite İndisi arasında lineer bir ilişki olduğu Şekil 4.8'ten görülmektedir. Montmorillonit yüzdesi arttıkça Plastisite indisi artmaktadır. Plastisite indisi büyük olan zeminlerin şişme potansiyellerinin fazla olduğu daha önce açıklanmıştı.



Şekil 4.6 : Montmorillonit (bentonit) Yüzdesi – Plastisite İndisi Arasındaki İlişki

Hazırlanan karışımlarda bentonit oranı arttıkça beklendiği gibi şişme yüzdesi de artmaktadır. Şekil 4.7'den faydalanılırsa aşağıdaki Çizelge 4.10 düzenlenebilir.

Çizelge 4.6 : % 34 Su Muh. Değeri İçin Bentonit % desi – Şişme % desi İlişkisi

Karışım No	Bentonit % (Ağırlıkça)	Şişme % desi
1	5	-
2	10	15
3	15	20
4	20	27
5	25	31
6	30	35

5. SONUÇLAR

Suya doayun olmayan bazı kil zeminlerin su emerek hacminin artması veya oluşan hacim artmasının engellenmesi durumunda aşırı basınçlar oluşturması, zeminin şişme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bu tip şişmeye eğilimli zeminler, genellikle kurak veya yarı kurak mevsimlerde, su içerikleri azaldığında da hacim azalmasına (büzölmeye) maruz kalırlar.

Bina temelleri, yol, havaalanı, kanal yapıları, boru hatları altındaki şişme özelliğine sahip nispeten kuru zeminlerin çeşitli nedenlerle su içeriklerinin artarak şişmesi, üst yapıya zararlar verebilmektedir. Özellikle şişme özelliğine sahip zeminlerin üzerlerindeki hafif yapılarda büyük zararlar oluşabilmektedir Bu tür hafif yapı temellerinin, mevsimlik yağış ve sıcaklık değışiminden etkilenen sığ derinliklerde inşa edilmesi durumunda birbirini takip eden şişme ve büzüme devrelerine maruz kalması çatlak ve hasarlara neden olabilir.

Killi zeminlerin şişme özelliklerinin belirlenmesi, zemin davranışının açıklanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Laboratuvar deneyleri ile şişen zeminlerin, özellikle şişme yüzdesi ve şişme basıncı olmak üzere tüm karakteristikleri belirlendikten sonra, üzerindeki yapı yükleri de hesaba katılarak, uygun temel sistemi seçilmelidir. Eldeki veriler kullanılarak zemin yüzeyinde oluşacak kabarma miktarı da hesaplanabilmektedir. Killerde tespit edilen şişme basınçları kilin özelliklerine bağılı olarak değışmektedir. Eğer şişme basınçları üzerindeki inşaat yükünü aşarsa, zeminde meydana gelecek olan kabarma, önemli yapısal hasarlara neden olabilmektedir. Bu şişme özellikleri kilin minerolojisi, kimyasal bileşimi, su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı gibi özelliklerle de yakından ilişkilidir. Montmorillonit kili en yüksek şişme potansiyeline sahip olan kil mineralidir. Kaolin ise şişme özelliğı olmayan bir kil mineralidir. Şişen zeminler üzerinde temel tasarımı yapılırken, tüm bu özellikler iyice belirlenmeli ve temel tasarımı buna göre yapılmalıdır.

Şişebilen zeminlerde, şişen zeminlerin kaldırılması, stabilize edilmesi, yapı altındaki zeminin su içeriğinin kontrolü gibi bir çok iyileştirme yöntemi ve yapısal tedbirler Bölüm 3’de açıklanmıştır.

Bu tez çalışmasında, şişen zeminlerin orijini, minerolojisi, belirlenmesi, şişen zeminlerin hacim değişimine etki eden faktörler anlatılmış, kaolin kiline ağırlıkça belirli oranlarda bentonit (montmorillonit) ilave edilerek altı farklı karışım hazırlanmış ve bu karışımlar üzerinde şişme özellikleri incelenmiştir.

Deneyisel çalışmalarda, kaolin, ağırlıkça belirli oranlarda (Çizelge 5.1) montmorillonit (bentonit) ile karıştırılarak şişme özelliği gösteren numuneler hazırlanmıştır. Yapılan deneyisel çalışmaların değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçlar Bölüm 4’te geniş bir şekilde verilmiştir.

Bu numuneler üzerinde, karışımların endeks özelliklerini belirlemek için Kıvam Limitleri deneyleri yapılmış, Piknometre deneyleri ile karışımların dane birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. Karışımlar Standart proktor (kompaksiyon) deneyine tabi tutulmuş, su muhtevası – kuru birim hacim ağırlığı eğrileri (kompaksiyon eğrileri) elde edilmiş, optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Kompaksiyonla elde edilen değişik su muhtevalarında sıkıştırılan numuneler ile konsolidasyon aletinde Serbest Şişme deneyleri yapılmış ve numunelerin şişme yüzdeleri hesaplanmıştır. Ayrıca, hazırlanan numuneler üzerinde Modifiye Serbest Şişme deneyleri yapılmıştır.

Bu tez kapsamında, hazırlanan şişme özelliğine sahip, kompaksiyonla sıkıştırılmış bentonit – kaolin karışımlarının üzerinde yapılan deneyisel çalışmalar değerlendirildiğinde aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Bentonit yüzdesi arttıkça likit limit artmaktadır. Bentonit yüzdesi ile likit limit arasında lineer bir ilişki mevcuttur.
- Bentonit yüzdesi arttıkça plastik limitte anlamlı bir değişiklik olmamıştır.
- Bentonit yüzdesi arttıkça plastite indisi artmaktadır. Bentonit yüzdesi ile plastisite indisi arasında lineer bir ilişki mevcuttur.
- Bentonit yüzdesi arttıkça şişmenin zamanla arttığı, belirli bir süre sonunda asimptotik bir değere ulaşip durduğu tespit edilmiştir.

Asimptotik değere ulaşması için geçen sürenin, bentonit ve kaolin yüzdelereine bağılı olarak değıştiğı gözlenmiştir.

- Şişme yüzdesi su muhtevası değışiminden önemli derecede etkilenmektedir. Şişme yüzdesi su muhtevasının artması ile azalmaktadır.
- Optimum su muhtevasından daha düşük su muhtevalarında sıkıştırılan killeri daha fazla şişme yüzdesi göstermektedir.
- Optimum su muhtevasından daha yüksek su muhtevalarında sıkıştırılan killeri ise daha az şişme % desini göstermektedir.
- Hazırlanan karışımlarda bentonit oranı arttıkça beklendiğı gibi şişme yüzdesi de artmaktadır.
- Yapılan Modifiye Serbest Şişme deneyinde ağırlıkça bentonit oranı arttıkça şişme yüzdesinin arttığı gözlenmiştir. En yüksek değeri olarak; %30 bentonit oranı için % 120 civarında modifiye serbest şişme değeri elde edilmiştir.
- Şişme yüzdesi ile şişme basıncı arasında (aynı su muhtevasındaki numunelerde) ilişki kurulan çalışmalar vardır (Sikh, 1993). İlerde yapılacak çalışmalarda şişme yüzdesi – şişme basıncı ilişkisi saptanabilir. Şişme basıncının tahmini için kolaylıkla elde edilebilen şişme yüzdesinden yararlanılabilir.

KAYNAKLAR

- Abeyesekara, R.A., and Lovell, C.W.,** 1981. Volume in Compacted Clays and Shales on Saturation Transp. Res. Rec., No.79.
- Altmeyer, W. T.,** 1955. Discussion of Engineering Properties of Expansive Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers*. Vol.**81**, No.SM2, pp. 17-19.
- ASTM, D4546,** 1986. Standart Test Methods for one Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils. *Annual Book of ASTM Standards* 4(8), 992-1100.
- Brackley, I.J.A.,** 1975. Swell Underload 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Found.Eng.Vol.**2**, pp. 102-124.
- Chen, F.H.,** 1975. Foundation on Expansive Soils, New York: Elsevier Publications.
- Das, B. M.,**1995. Principles of Foundation Engineering. PWS Publishing Company, An International Thomson Publishing Inc. Boston, U.SA, 828 p.
- Daksanamanthy, V. and Raman,V.,** 1973. A Simple Method of Identifying an Expansive Soil. *Soils and Foundations*. Vol.13, No. 1, pp. 97-104.
- Dhowian, A.W., Ruwaih, I.E., Youssef A., and Erol, A.O.,** 1984. Evaluation of Expansive Soils and Foundation Methodology in Kingdom of Saudi Arabia. Research Report SANCST: AT-5-88.
- Donaldson, G.W.,** 1969. The Occurance of Problems of Heaving and The Factors Affecting its Nature. Second International research E.C. on Expansive Soils.
- Tara S. Sikh,** 1993. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Vol.**119**, No.4, Swelling Soils, pp.791-792.
- EL Sohby, M.A., and Rabbaa, S.A.,** 1984. Deformational Behaviour of Unsaturated Soils Upon Wetting. *Proceedings, 8th Reg. Conference for Africa on S.M.F.E.*
- Erdinç, Ş. Ş.,** 1958. Nevşehir Vilayeti Avanos Kazasına ait 12 adet Kil, Bentonit, Pertlt, Feldapat, Tüf Numunesinin Tetkiki Hakkında Rapor. M.T.A. Ene. Rapor No. 2571.
- Gillot, J.E.,** 1963. Clay in Engineering Geology, Elsevier, Amsterdam.
- Grim, R.E.,** 1953. Clay Minerology. McGraw – Hill Book Company.
- Holtz, W.G. and Gibbs, H.J.,**1956. Engineering Properties of Expansive Clays. ASCE Transaction, Vol.**121**, pp.213-240.
- Jennings, J.E., and Knight, K.,** 1958. The Prediction of Total Heave from the Double Oedometer Test. *Symposium on Expansive Clays*, Johannesburg.

- Kasapoğlu, K.E.**, 1989. Killerin Jeomühendislik Özellikleri. *IV. Ulusal Kil Sempozyumu Bildiriler Kitapçığı*, s.3-29.
- Kassif, G.**, 1971. Swelling Potential of Compacted Clay, ASCE, Vol.97.
- Keskin, S.N.**, 1993. İstanbul Neojen Kilinin Şişme Davranışlarına Ön Konsolidasyonun, Minerolojik Özelliklerin ve Çevresel Faktörlerin Etkisi, *Doktora Tezi*.
- Komornik, A. and David, D.**, 1969. Prediction of Swelling Potential of Clays, Proceedings, ASCE, Vol. **95**.
- Lambe, T.W., and Whitman, R.V.**, 1969. Soil mechanics. John Wiley and Sons, New York.
- Lambe, T.W.**, 1960. The Character and Identification of Expansive Soils.
- Lav M.A. ve Ansal, M.A.** Killi Zeminlerde Şişme Basıncının Ampirik Olarak Bulunması.
- McDowel, C.**, 1956. Interrelationships of Load, Volume Change and Layer Thickness of Soils to the Behaviour of Engineering Structures. Proceedings, Highway Research Board.
- Millot, G.**, 1970. Geology of Clays, Masson et Cie, Paris.
- Nayak, N. V. and Christensen, R. W.**, 1974. Swell Characteristics of Compacted Expansive Soils, Clay and Clay Minerals, Vol. **19**, pp. 251-261.
- Nelson, J.D., and Miller, D.J.**, 1992. Expansive Soils Problem and Practice in Foundation and Pavement Engineering. John Wiley & Sons, 253 p.
- Rengmark, F. and Erikson, R.**, 1953. Apparatus of Soil Suction in Expansive Soil Compression and Elastic Properties of Soils. *Proceedings, 3rd ICSMFE*. Vol.1.
- Schreiner, H.D.**, 1987. State of the Review on Expansive Soils. Transported and Road Research Laboratory Report, England.
- Seed, H.B., Woodward, R.J., and Lundgren, R.**, 1962. Prediction of Swelling Potential of Compacted Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers*. Vol. **88**, No. SM3, pp. 53-87.
- Sivapulliah, P. V., Sitharam, T. G. and Rao, K.S.S.**, 1987. Modified Free Swell Index for Clay. *Geotechnical Testing Journal, American Society for Testing and Materials*. Vol. **11**, No. 2, pp. 80-85.
- Snethen, D.R.**, 1984. Evaluation of Expedient Methods for Identification and Classification of Potentially Expansive Soils. *Proceedings, Fifth International Conference on Expansive Soils*, Adelaide, Australia, pp. 22-26.
- Van Der Merwe, D.H.**, 1964. The Prediction of Heave from The Plasticity Index and Percentage Clay Fraction of Soils. *Civil Engineer in South Africa*, Vol. **6**, No. 6, pp. 103-106.
- Vijayvergiya, V.N. and Ghazzaly, O.I.**, 1973. Prediction of Swelling Potential of Natural Clays. Proceedings, *Third International Research and Engineering Conference on Expansive Clays*, pp. 227-234.

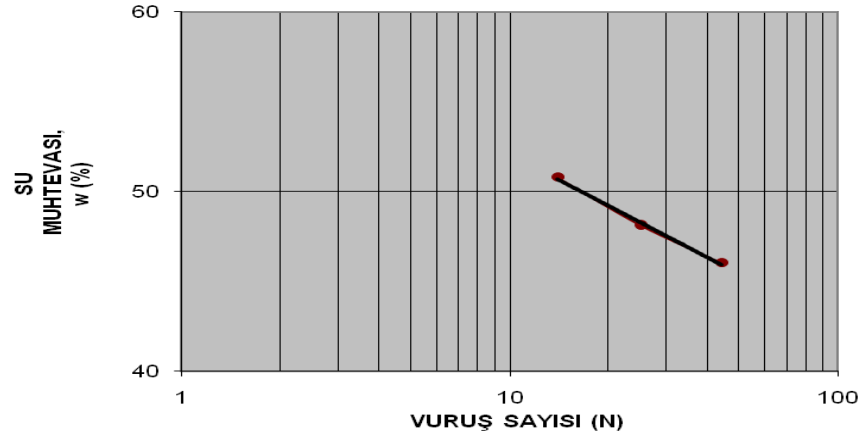
- Wayne, A.C., Osman, M.A., and Elfatih ,M.A.,** 1984. Construction on Expansive Soils in Sudan. *Journal of Construction Engineering and Management, ASCE*. Vol.**110**, pp.359-374.
- Wong, S.L.,** 1980. Properties of Expansive Soil and Foundation Design Chinese Academy of Building Research.

EKLER

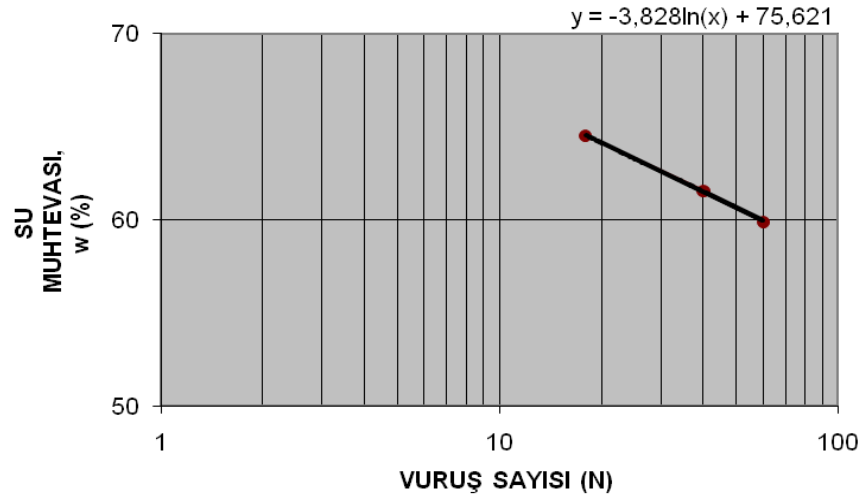
EK A: Şekiller

EK B: Çizelgeler

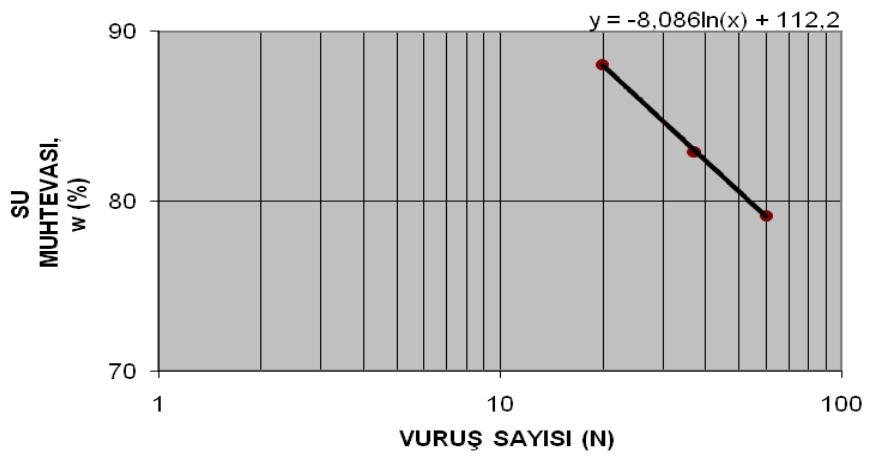
EK A



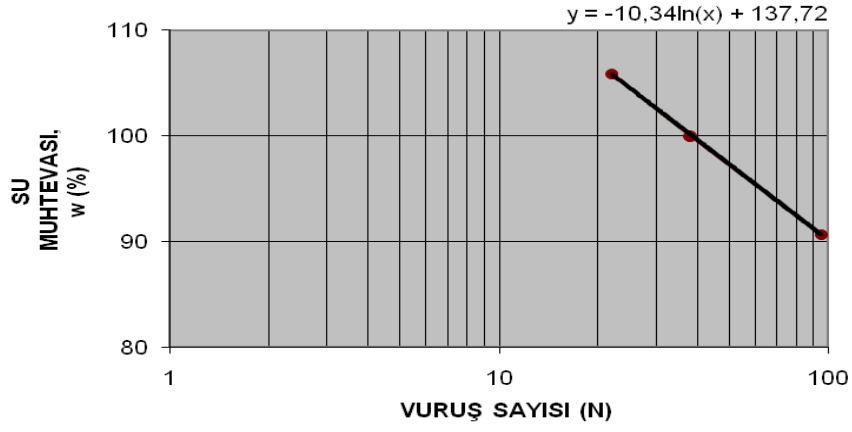
Şekil A.1 : Karışımın Likit Limit Değerleri (%5 Bentonit+%95 Kaolin)



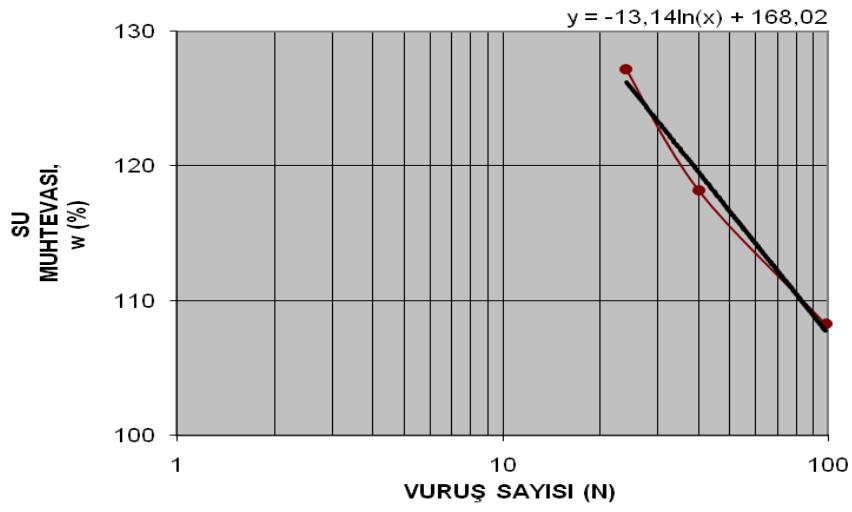
Şekil A.2 : Karışımın Likit Limit Değerleri (%10 Bentonit+%90 Kaolin)



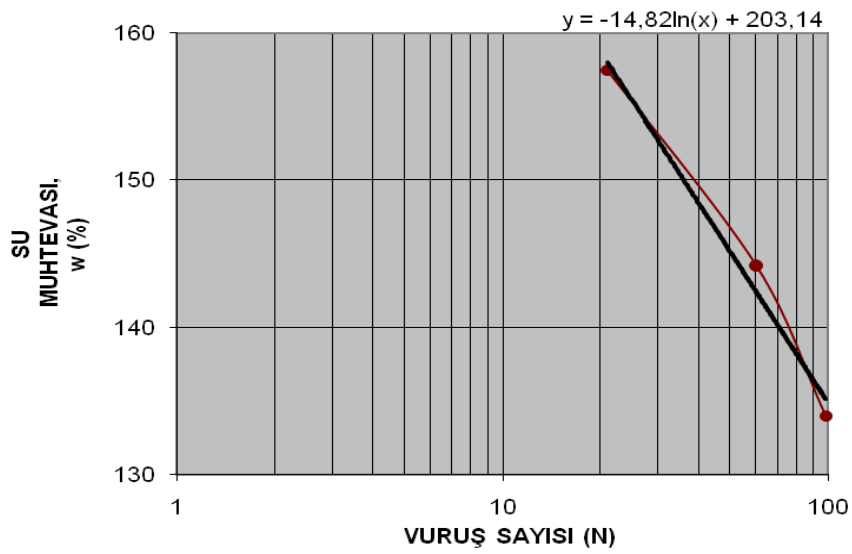
Şekil A.3 : Karışımın Likit Limit Değerleri (%15 Bentonit+%85 Kaolin)



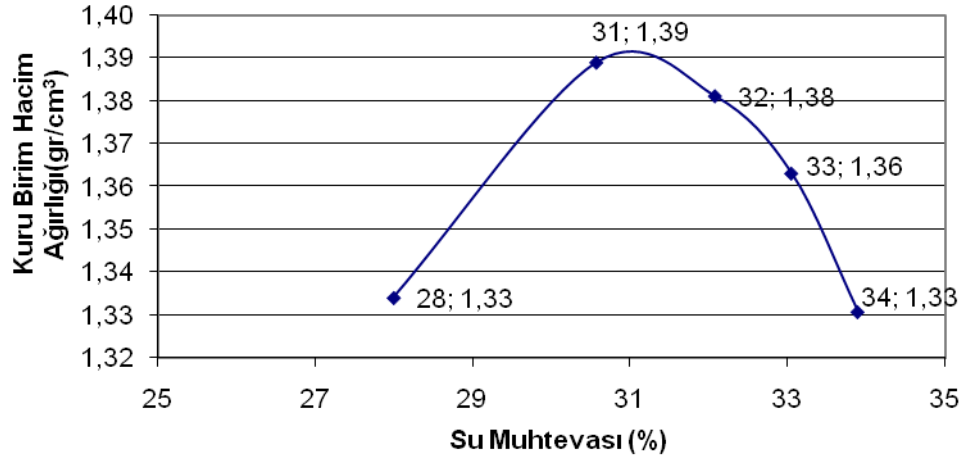
Şekil A.4 : Karışımın Likit Limit Değerleri (%20 Bentonit+%80 Kaolin)



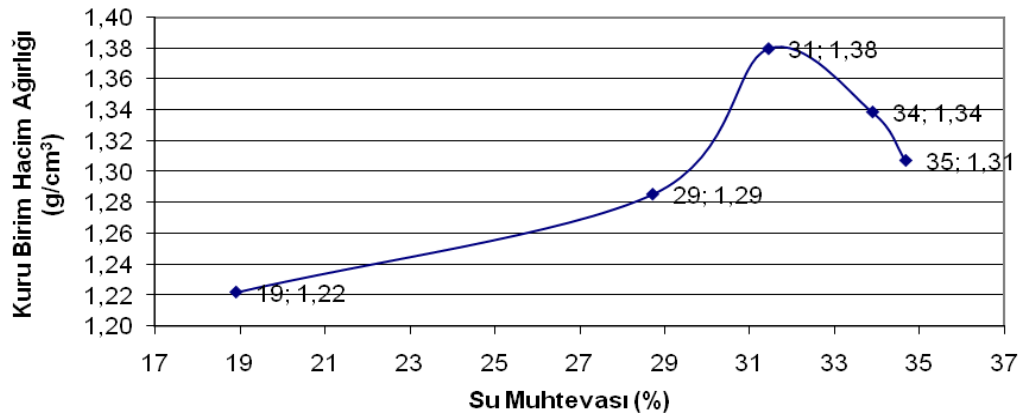
Şekil A.5 : Karışımın Likit Limit Değerleri (%25 Bentonit+%75 Kaolin)



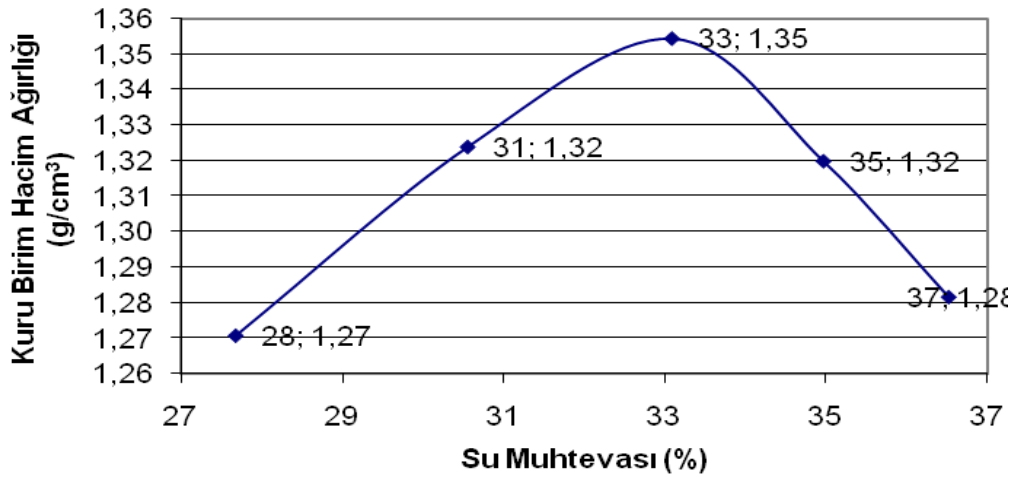
Şekil A.6 : Karışımın Likit Limit Değerleri (%30 Bentonit+%70 Kaolin)



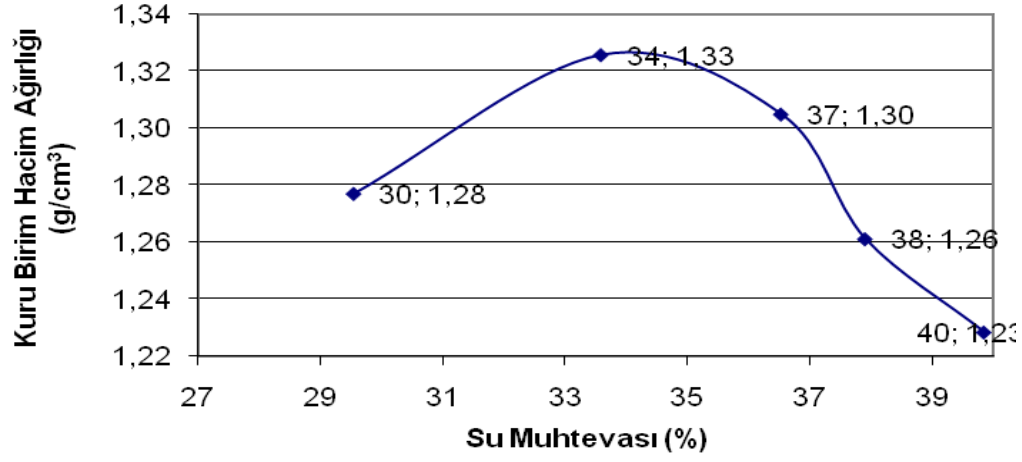
Şekil A.7 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%5 Bentonit+%95 Kaolin)



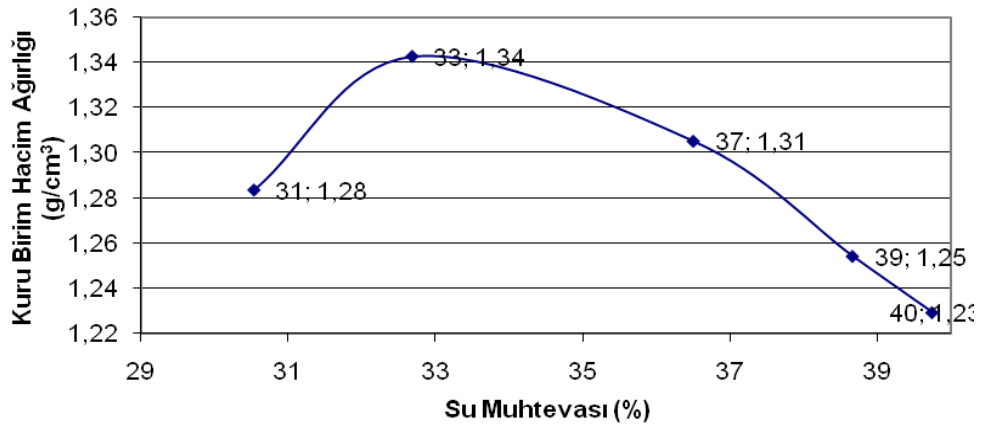
Şekil A.8 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%10 Bentonit+%90 Kaolin)



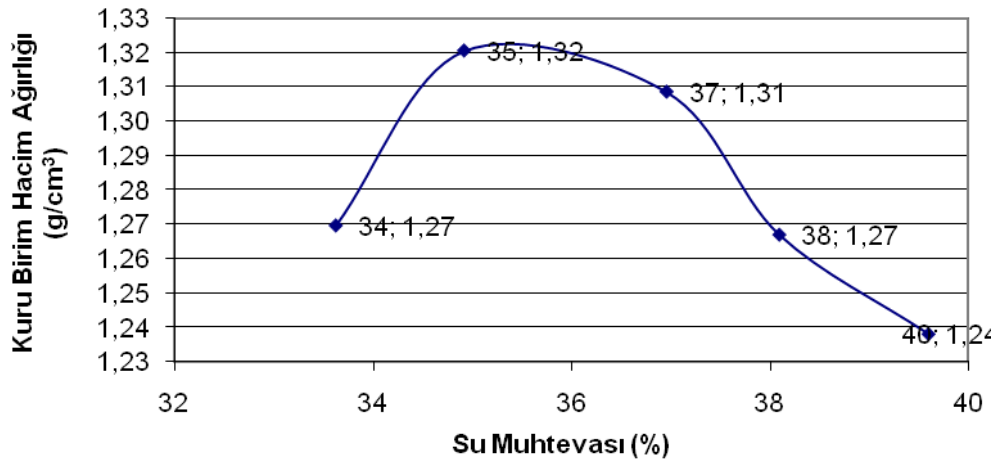
Şekil A.9 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%15 Bentonit+%85 Kaolin)



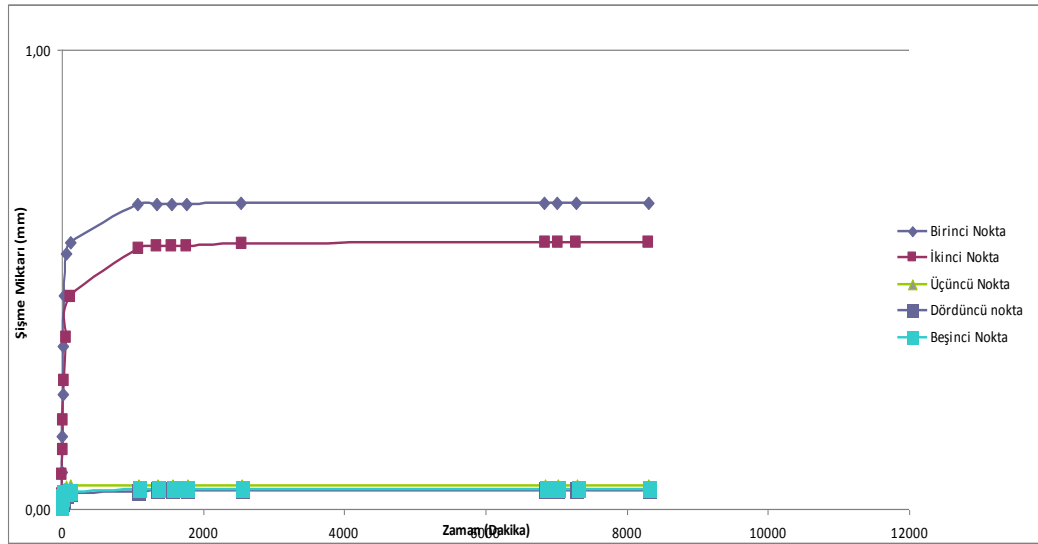
Şekil A.10 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%20 Bentonit+%80 Kaolin)



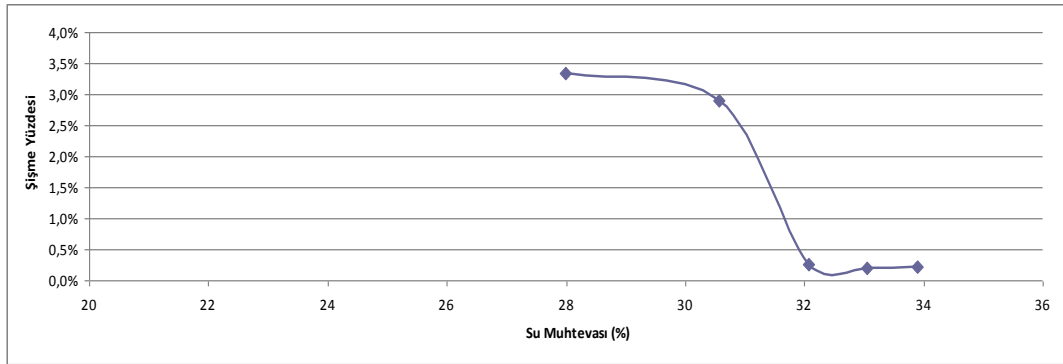
Şekil A.11 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%25 Bentonit+%75 Kaolin)



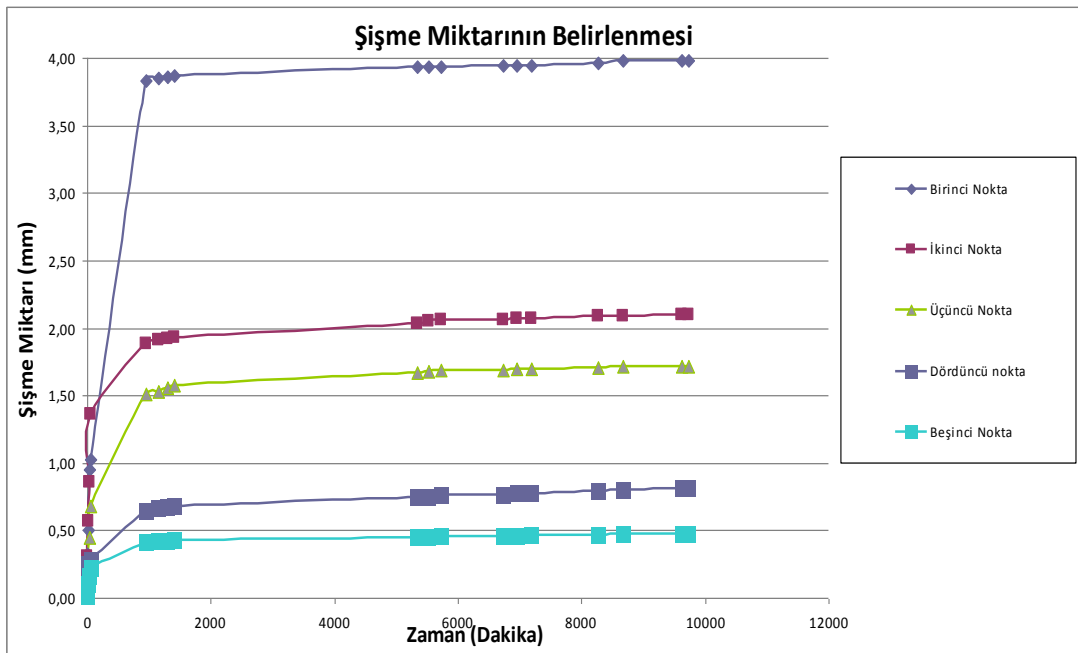
Şekil A.12 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%30 Bentonit+%70 Kaolin)



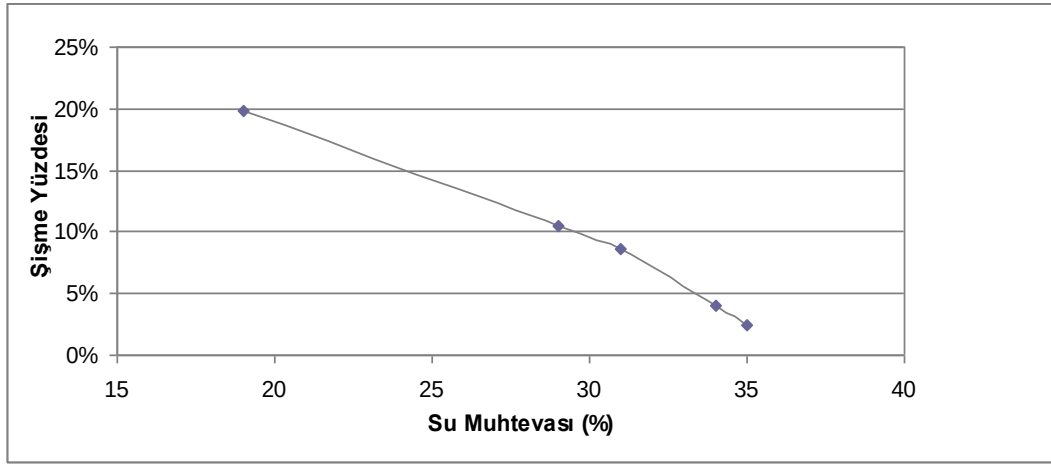
Şekil A.13 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%5 Bentonit+%95 Kaolin)



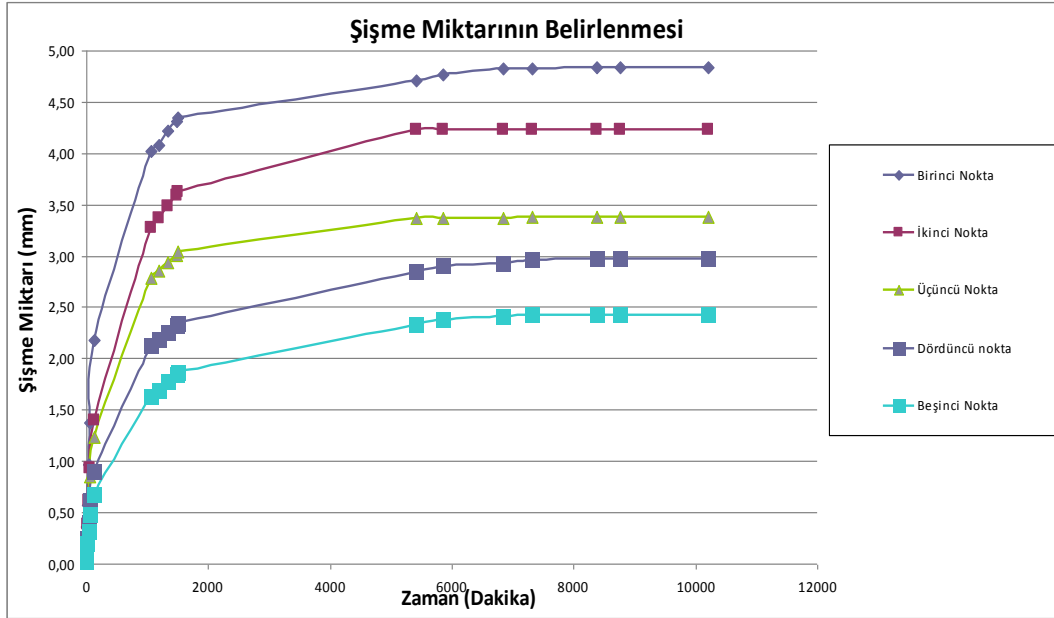
Şekil A.14 : Su Muhtevası ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%5 Bentonit+%95 Kaolin)



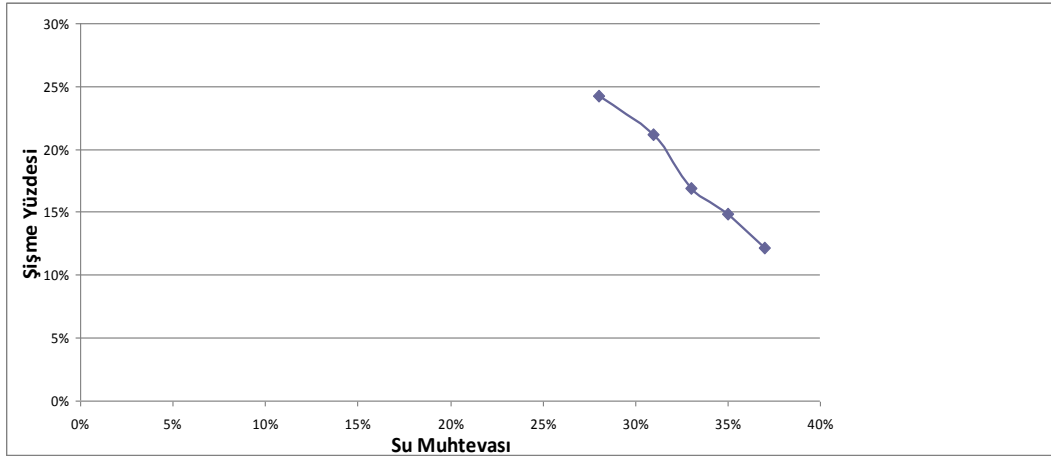
Şekil A.15 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%10 Bentonit+%90 Kaolin)



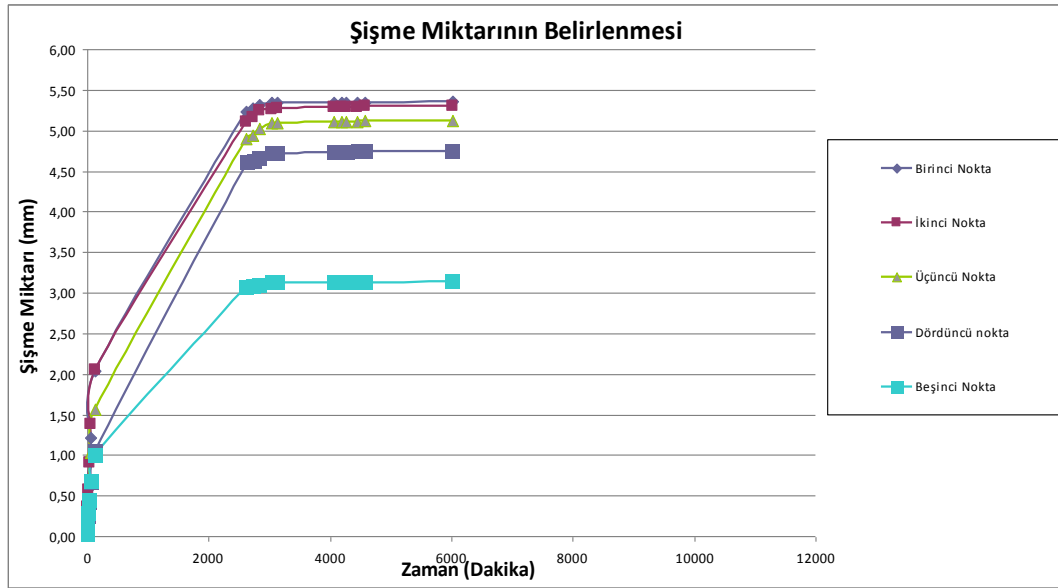
Şekil A.16 : Su Muh. ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%10 Bentonit+%90 Kaolin)



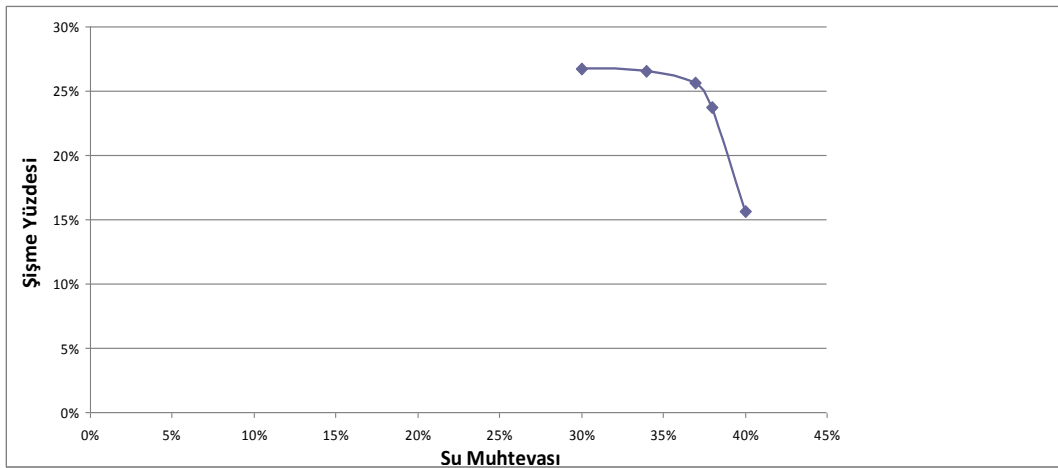
Şekil A.17 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%15 Bentonit+%85 Kaolin)



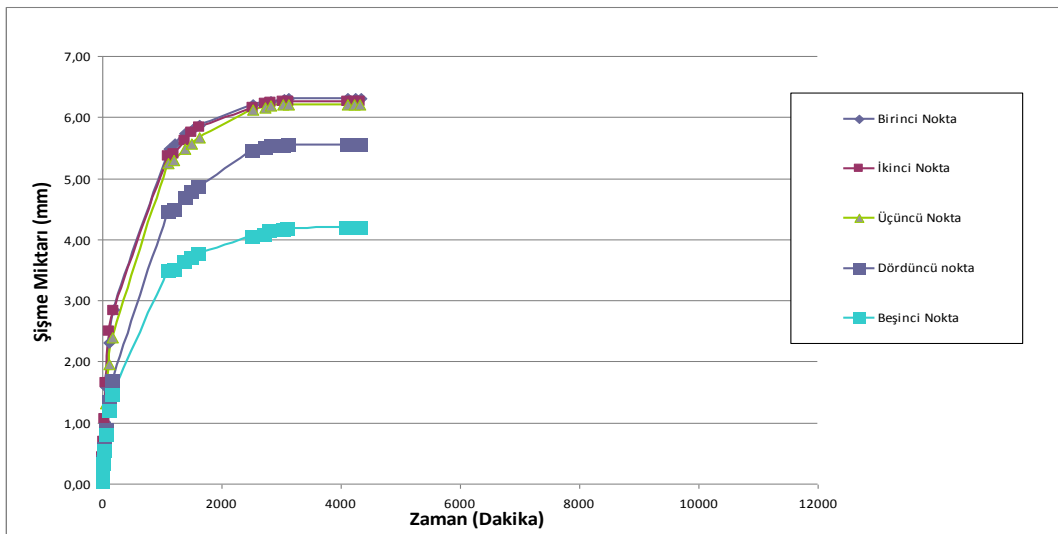
Şekil A.18 : Su Muh.ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%15 Bentonit+%85 Kaolin)



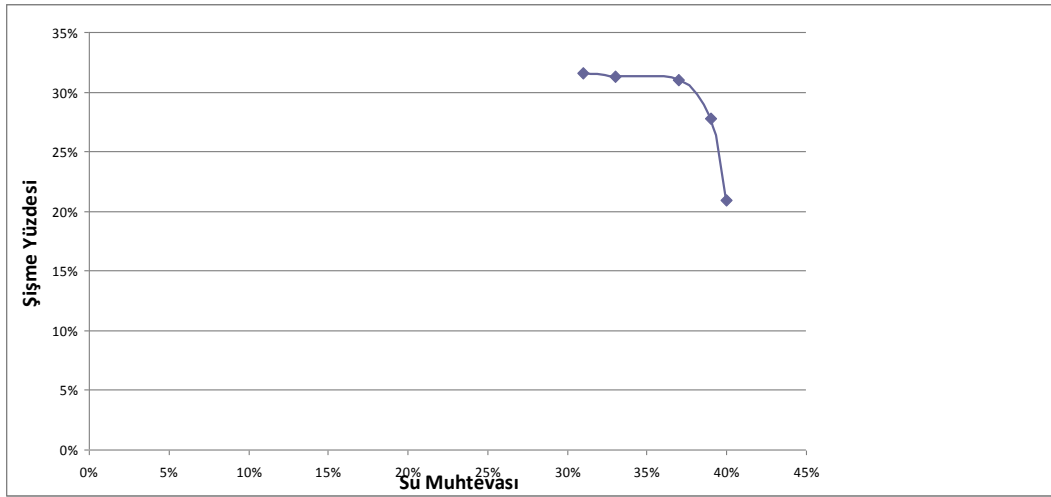
Şekil A.19 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%20 Bentonit+%80 Kaolin)



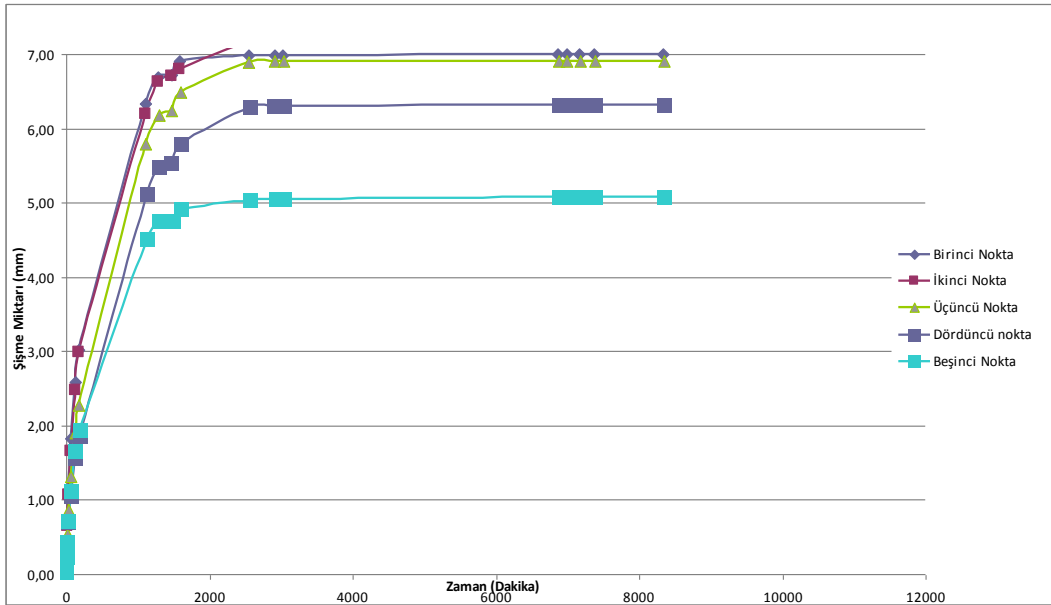
Şekil A.20 : Su Muh. ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%20 Bentonit+%80 Kaolin)



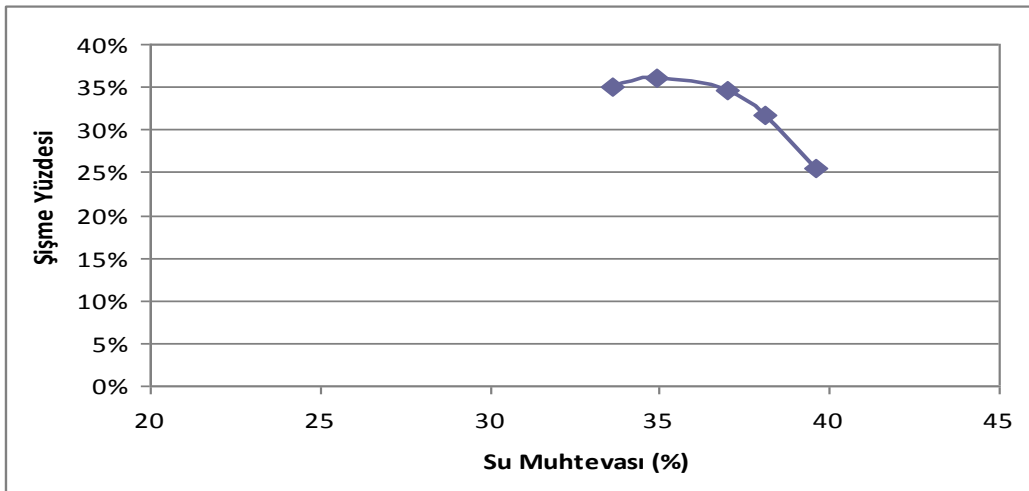
Şekil A.21 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%25 Bentonit+%75 Kaolin)



Şekil A.22 : Su Muh.ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%25 Bentonit+%75 Kaolin)



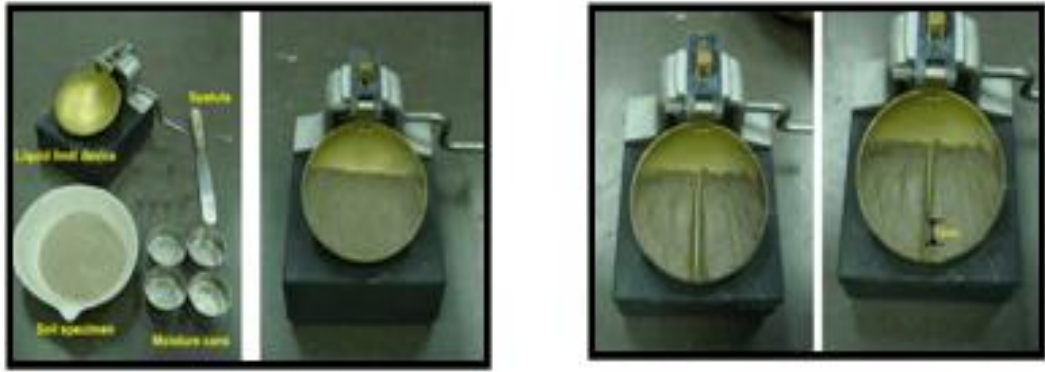
Şekil A.23 : Şişme Miktarının Zamanla Değişimi (%30 Bentonit+%70 Kaolin)



Şekil A.24 : Su Muh. ve Şişme Yüzdesi İlişkisi (%30 Bentonit+%70 Kaolin)



Şekil A.25 : Likit Limit Deneyinde Kullanılan Aletler



Şekil A.26 : Likit Limit Deneyinde Numunenin Görünüşü



Şekil A.27 : Plastik Limit Deneyinin Yapılışı



Şekil A.28 : Piknometre'nin Hava Kompresörü İle Çalkalanması



Şekil A.29 : Proktor Deneyinde Kullanılan Aletler



Şekil A.30 : Standart Proktor Kalıbı



Şekil A.31 : Kompaksiyon İçin Hazırlanan Numune



Şekil A.32 : Konsolidasyon Deney Aletleri



Şekil A.33 : Konsolidasyon Okuma Saati



Şekil A.34 : %30 + %70 Karışım için 1. Noktadan Alınan Deney Numunesi



Şekil A.35 : %30 + %70 Karışım için 2. Noktadan Alınan Deney Numunesi



Şekil A.36 : %30 + %70 Karışım için 3. Noktadan Alınan Deney Numunesi



Şekil A.37 : %30 + %70 Karışım için 4. Noktadan Alınan Deney Numunesi



Şekil A.38 : %30 + %70 Karışım için 5. Noktadan Alınan Deney Numunesi



Şekil A.39 : Modifiye Serbest Şişme Deneyinin Yapılışı



Şekil A.40 : Modifiye Serbest Şişme Deney Tüpleri

EK B

Çizelge B.1 : Likit Limit Deney Çizelgesi (%5 Bentonit+%95 Kaolin)

Kap No	27	52	55
Vuruş Sayısı	44	25	14
Islak Num.+Dara (gram)	61,6	57,1	57,8
Kuru Num.+Dara (gram)	50	45,6	44,9
Su Miktarı (gram)	11,6	11,5	12,9
Dara (gram)	24,8	21,7	19,5
Kuru Zemin (gram)	25,2	23,9	25,,4
Su Muhtevası (%)	56	48	51

Çizelge B.2 : Likit Limit Deney Çizelgesi (%10 Bentonit+%90 Kaolin)

Kap No	19	14	56
Vuruş Sayısı	60	40	18
Islak Num.+Dara (gram)	57,5	58,7	65,1
Kuru Num.+Dara (gram)	46	45,4	50
Su Miktarı (gram)	11,5	13,3	15,1
Dara (gram)	26,8	23,8	26,6
Kuru Zemin (gram)	19,2	21,6	23,4
Su Muhtevası (%)	60	62	65

Çizelge B.3 : Likit Limit Deney Çizelgesi (%15 Bentonit+%85 Kaolin)

Kap No	18	26	17
Vuruş Sayısı	60	37	20
Islak Num.+Dara (gram)	65	62,6	60,9
Kuru Num.+Dara (gram)	46,4	46,1	44
Su Miktarı (gram)	18,6	16,5	16,9
Dara (gram)	22,9	26,2	24,8
Kuru Zemin (gram)	23,5	19,9	19,2
Su Muhtevası (%)	79	83	88

Çizelge B.4 : Likit Limit Deney Çizelgesi (%20 Bentonit+%80 Kaolin)

Kap No	54	11	17
Vuruş Sayısı	95	38	22
Islak Num.+Dara (gram)	65,9	62,3	60
Kuru Num.+Dara (gram)	46,4	43,5	41,9
Su Miktarı (gram)	19,5	18,8	18,1
Dara (gram)	24,9	24,7	24,8
Kuru Zemin (gram)	21,5	18,8	17,1
Su Muhtevası (%)	91	100	106

Çizelge B.5 : Likit Limit Deney Çizelgesi (%25 Bentonit+%75 Kaolin)

Kap No	20	60	33
Vuruş Sayısı	98	40	24
Islak Num.+Dara (gram)	56,3	57,8	55,5
Kuru Num.+Dara (gram)	38	38,3	37,7
Su Miktarı (gram)	18,3	19,5	17,8
Dara (gram)	21,1	21,8	23,7
Kuru Zemin (gram)	16,9	16,5	14
Su Muhtevası (%)	108	118	127

Çizelge B.6 : Likit Limit Deney Çizelgesi (%30 Bentonit+%70 Kaolin)

Kap No	21	15	27
Vuruş Sayısı	98	60	21
Islak Num.+Dara (gram)	62,6	58,8	61,1
Kuru Num.+Dara (gram)	41,7	38,9	38,9
Su Miktarı (gram)	20,9	19,9	22,2
Dara (gram)	26,1	25,1	24,8
Kuru Zemin (gram)	15,6	13,8	14,1
Su Muhtevası (%)	134	144	157

Çizelge B.7 : Plastik Limit Deney Sonuçları (%10 Bentonit+%90 Kaolin)

Kap No	9	36
Islak Num.+Dara (gram)	34,5	33,8
Kuru Num.+Dara (gram)	32,2	31,1
Su Miktarı (gram)	2,3	2,7
Dara (gram)	24	21
Kuru Zemin (gram)	8,2	10,1
Su Muhtevası(%)	28	27
Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
63%	28%	35%

Çizelge B.8 : Plastik Limit Deney Sonuçları (%15 Bentonit+%85 Kaolin)

Kap No	11	21
Islak Num.+Dara (gram)	39,4	40,1
Kuru Num.+Dara (gram)	36,1	37
Su Miktarı (gram)	3,3	3,1
Dara (gram)	24,7	26,1
Kuru Zemin (gram)	11,4	10,9
Su Muhtevası(%)	29	28
Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
86%	29%	57%

Çizelge B.9 : Plastik Limit Deney Sonuçları (%20 Bentonit+%80 Kaolin)

Kap No	12	21
Islak Num.+Dara (gram)	35,4	40,6
Kuru Num.+Dara (gram)	32,3	37,4
Su Miktarı (gram)	3,1	3,2
Dara (gram)	21,9	26,1
Kuru Zemin (gram)	10,4	11,3
Su Muhtevası(%)	30	28
Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
104%	29%	75%

Çizelge B.10 : Plastik Limit Deney Sonuçları (%25 Bentonit+%75 Kaolin)

Kap No	49	56
Islak Num.+Dara (gram)	35,5	39,3
Kuru Num.+Dara (gram)	32,6	36,4
Su Miktarı (gram)	2,9	2,9
Dara (gram)	23,4	26,6
Kuru Zemin (gram)	9,2	9,8
Su Muhtevası(%)	32	30
Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
126%	31%	95%

Çizelge B.11 : Plastik Limit Deney Sonuçları (%30 Bentonit+%70 Kaolin)

Kap No	29	45
Islak Num.+Dara (gram)	35,6	34,7
Kuru Num.+Dara (gram)	32,1	31,8
Su Miktarı (gram)	3,5	2,9
Dara (gram)	20,7	22,3
Kuru Zemin (gram)	11,4	9,5
Su Muhtevası(%)	31	31
Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndisi
155%	31%	124%

Çizelge B.12 : Piknometre Deney Sonuçları (%5 Bentonit+%95 Kaolin)

Piknometre No.	1	Birim
Kuru Zemin Ağırlığı, (W₁)	50	gram
Su + Piknometre Ağırlığı, (W₂)	413	gram
(W₁) + (W₂)	463	gram
Su+Piknometre+Zemin Ağ.,(W₃)	444,3	gram
(W₁) + (W₂) - (W₃)	18,7	cm ³
$\gamma_s = (W_1) / (W_1 + W_2 - W_3)$	2,67	Gram / cm ³

Çizelge B.13 : Piknometre Deney Sonuçları (%10 Bentonit+%90 Kaolin)

Piknometre No.	2	Birim
Kuru Zemin Ağırlığı, (W ₁)	50	gram
Su + Piknometre Ağırlığı, (W ₂)	384,77	gram
(W ₁) + (W ₂)	434,77	gram
Su+Piknometre+Zemin Ağ.,(W ₃)	415,74	gram
(W ₁) + (W ₂) - (W ₃)	19,03	cm ³
$\gamma_s = (W_1) / (W_1 + W_2 - W_3)$	2,63	Gram / cm ³

Çizelge B.14 : Piknometre Deney Sonuçları (%15 Bentonit+%85 Kaolin)

Piknometre No.	3	Birim
Kuru Zemin Ağırlığı, (W ₁)	49,09	gram
Su + Piknometre Ağırlığı, (W ₂)	412,91	gram
(W ₁) + (W ₂)	462	gram
Su+Piknometre+Zemin Ağ.,(W ₃)	443,34	gram
(W ₁) + (W ₂) - (W ₃)	18,66	cm ³
$\gamma_s = (W_1) / (W_1 + W_2 - W_3)$	2,63	Gram / cm ³

Çizelge B.15 : Piknometre Deney Sonuçları (%20 Bentonit+%80 Kaolin)

Piknometre No.	4	Birim
Kuru Zemin Ağırlığı, (W ₁)	50	gram
Su + Piknometre Ağırlığı, (W ₂)	412,95	gram
(W ₁) + (W ₂)	462,95	gram
Su+Piknometre+Zemin Ağ.,(W ₃)	444,45	gram
(W ₁) + (W ₂) - (W ₃)	18,5	cm ³
$\gamma_s = (W_1) / (W_1 + W_2 - W_3)$	2,70	Gram / cm ³

Çizelge B.16 : Piknometre Deney Sonuçları (%25 Bentonit+%75 Kaolin)

Piknometre No.	5	Birim
Kuru Zemin Ağırlığı, (W ₁)	50	gram
Su + Piknometre Ağırlığı, (W ₂)	384,68	gram
(W ₁) + (W ₂)	434,68	gram
Su+Piknometre+Zemin Ağ.,(W ₃)	416,48	gram
(W ₁) + (W ₂) - (W ₃)	18,2	cm ³
$\gamma_s = (W_1) / (W_1 + W_2 - W_3)$	2,75	Gram / cm ³

Çizelge B.17 : Piknometre Deney Sonuçları (%30 Bentonit+%70 Kaolin)

Piknometre No.	6	Birim
Kuru Zemin Ağırlığı, (W ₁)	50	gram
Su + Piknometre Ağırlığı, (W ₂)	412,87	gram
(W ₁) + (W ₂)	462,87	gram
Su+Piknometre+Zemin Ağ.,(W ₃)	445,07	gram
(W ₁) + (W ₂) - (W ₃)	17,8	cm ³
$\gamma_s = (W_1) / (W_1 + W_2 - W_3)$	2,81	Gram / cm ³

Çizelge B.18 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%5 Bentonit+%95 Kaolin)

Deney No	1		2		3		4		5	
Yaş Numune +Kalıp (g)	3690		3790		3800		3790		3760	
Kalıp (g)	2080		2080		2080		2080		2080	
Yaş Numune (g)	1610		1710		1720		1710		1680	
Birim Hacim Ağırlığı (g / cm ³)	1,71		1,81		1,82		1,81		1,78	
Kapno	65	67	40	54	46	47	10	13	31	49
Yaş Numune +Dara (g)	137,4	134	146,3	147	160,6	145	151,1	146	150,1	166
Kuru Numune +Dara (g)	112,9	110	118	118	127,1	115	119,8	115	117,9	130
Su Miktarı (g)	24,5	24,1	28,3	28,5	33,5	29,5	31,3	30,9	32,2	36,1
Dara (g)	25,5	24	25,1	25,1	22,6	23,5	25,1	21,3	22,7	23,4
Kuru Numune (g)	87,4	86,2	92,9	92,9	104,5	91,9	94,7	93,5	95,2	106
Su Muh.%	28	28	30,5	30,7	32,1	32,1	33,1	33	33,8	34
Ort.Su Muh. (%)	28		31		32		33		34	
Kuru Birim Hacim Ağı. (g / cm ³)	1,33		1,39		1,38		1,36		1,33	

Çizelge B.19 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%10 Bentonit+%90 Kaolin)

Deney No	1		2		3		4		5	
Yaş Numune +Kalıp (g)	3450		3640		3790		3770		3740	
Kalıp (g)	2080		2080		2080		2080		2080	
Yaş Numune (g)	1370		1560		1710		1690		1660	
Birim Hacim Ağırlığı (g / cm ³)	1,45		1,65		1,81		1,79		1,76	
Kapno	13	53	58	55	31	49	65	7	16	22
Yaş Numune +Dara (g)	147,5	144	132,3	119	122,4	130	108,9	132	149,3	128
Kuru Numune +Dara (g)	127,5	124	107,6	96,9	98,6	105	87,7	105	116,6	101
Su Miktarı (g)	20	19,3	24,7	22,2	23,8	25,6	21,2	26,8	32,7	26,8
Dara (g)	21,4	22,6	21,8	19,4	22,8	23,4	25,4	25,5	22,9	23,6
Kuru Numune (g)	106,1	102	85,8	77,5	75,8	81,3	62,3	79,4	93,7	77,8
Su Muh.%	18,9	19,0	28,8	28,6	31,4	31,5	34,0	33,8	34,9	34,4
Ort.Su Muh. (%)	19		29		31		34		35	
Kuru Birim Hacim Ağı. (g / cm ³)	1,22		1,29		1,38		1,34		1,31	

Çizelge B.20 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%15 Bentonit+%85 Kaolin)

Deney No	1		2		3		4		5	
Yaş Numune +Kalıp (g)	3610		3710		3780		3760		3730	
Kalıp (g)	2080		2080		2080		2080		2080	
Yaş Numune (g)	1530		1630		1700		1680		1650	
Birim Hacim Ağırlığı (g / cm ³)	1,62		1,73		1,80		1,78		1,75	
Kapno	1	2	34	41	54	66	63	65	14	20
Yaş Numune +Dara (g)	153,7	152,4	128,7	112,2	134,8	113,7	158,6	153,1	145,1	142
Kuru Numune +Dara (g)	126,3	123,9	104,2	91,9	107,5	91,2	123,5	120	112,8	109,5
Su Miktarı (g)	27,4	28,5	24,5	20,3	27,3	22,5	35,1	33,1	32,3	32,5
Dara (g)	26,4	21,9	24,6	25	24,9	23,3	23,1	25,4	23,8	21,1
Kuru Numune (g)	99,9	102	79,6	66,9	82,6	67,9	100,4	94,6	89	88,4
Su Muh.%	27,4	27,9	30,8	30,3	33,1	33,1	35,0	35,0	36,3	36,8
Ort.Su Muh. (%)	28		31		33		35		37	
Kuru Birim Hacim Ağ. (g / cm ³)	1,27		1,32		1,35		1,32		1,28	

Çizelge B.21 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%20 Bentonit+%80 Kaolin)

Deney No	1		2		3		4		5	
Yaş Numune +Kalıp (g)	3640		3750		3760		3720		3700	
Kalıp (g)	2080		2080		2080		2080		2080	
Yaş Numune (g)	1560		1670		1680		1640		1620	
Birim Hacim Ağırlığı (g / cm ³)	1,65		1,77		1,78		1,74		1,72	
Kapno	1	2	37	47	5	66	7	18	41	65
Yaş Numune +Dara (g)	133,3	141	125	130	156,6	150	160,8	156	140,6	147
Kuru Numune +Dara (g)	109	114	99,3	103	120,7	116	123,2	119	107,3	112
Su Miktarı (g)	24,3	27,3	25,7	26,7	35,9	34,1	37,6	37,2	33,3	34,9
Dara (g)	26,4	21,9	22,7	23,6	21,2	23,6	21,2	23,3	25,5	22,9
Kuru Numune (g)	82,6	92	76,6	79,4	99,5	92,2	102	95,5	81,8	89,5
Su Muh.%	29,4	29,7	33,6	33,6	36,1	37,0	36,9	39,0	40,7	39,0
Ort.Su Muh. (%)	30		34		37		38		40	
Kuru Birim Hacim Ağ. (g / cm ³)	1,28		1,33		1,30		1,26		1,23	

Çizelge B.22 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%25 Bentonit+%75 Kaolin)

Deney No	1		2		3		4		5	
Yaş Numune +Kalıp (g)	3660		3760		3760		3720		3700	
Kalıp (g)	2080		2080		2080		2080		2080	
Yaş Numune (g)	1580		1680		1680		1640		1620	
Birim Hacim Ağırlığı (g / cm ³)	1,68		1,78		1,78		1,74		1,72	
Kapno	61	26	10	14	42	58	16	34	55	57
Yaş Numune +Dara (g)	168,6	161	145,4	137	124	116	128,6	123	153,4	153
Kuru Numune +Dara (g)	134,4	130	115,8	109	97,1	90,9	99,2	95,2	115,2	117
Su Miktarı (g)	34,2	31,3	29,6	27,8	26,9	25,2	29,4	27,4	38,2	36,3
Dara (g)	23,5	26,2	25,1	23,8	23,5	21,8	22,9	24,6	19,4	25,3
Kuru Numune (g)	110,9	104	90,7	84,9	73,6	69,1	76,3	70,6	95,8	91,6
Su Muh.%	30,8	30,2	32,6	32,7	36,5	36,5	38,5	38,8	39,9	39,6
Ort.Su Muh. (%)	31		33		37		39		40	
Kuru Birim Hacim Ağı. (g / cm ³)	1,28		1,34		1,31		1,25		1,23	

Çizelge B.23 : Standart Proktor Deney Sonuçları (%30 Bentonit+%70 Kaolin)

Deney No	1		2		3		4		5	
Yaş Numune +Kalıp (g)	3680		3760		3770		3730		3710	
Kalıp (g)	2080		2080		2080		2080		2080	
Yaş Numune (g)	1600		1680		1690		1650		1630	
Birim Hacim Ağırlığı (g / cm ³)	1,70		1,78		1,79		1,75		1,73	
Kapno	3	4	10	11	63	65	16	17	14	25
Yaş Numune +Dara (g)	141,1	135	131,4	142	129,4	129	152,4	137	149,2	145
Kuru Numune +Dara (g)	112,1	107	103,9	112	100,6	101	116,7	106	113,8	111
Su Miktarı (g)	29	28,5	27,5	30,4	28,8	27,9	35,7	31	35,4	34,4
Dara (g)	25,3	22,7	25,1	24,7	23,1	25,5	22,9	24,8	23,8	24,4
Kuru Numune (g)	86,8	84,2	78,8	87	77,5	75,9	93,8	81,3	90	86,3
Su Muh.%	33,4	33,8	34,9	34,9	37,2	36,8	38,1	38,1	39,3	39,9
Ort.Su Muh. (%)	34		35		37		38		40	
Kuru Birim Hacim Ağı. (g / cm ³)	1,27		1,32		1,31		1,27		1,24	

Çizelge B.24 : Ödometre Sonuçları (%5 Bentonit+%95 Kaolin)

1.Nokta		2.Nokta		3.Nokta		4.Nokta		5.Nokta	
Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
0,25	0,01	0,25	0,01	0,25	0,00	0,25	0,00	0,25	0,00
0,5	0,02	0,5	0,01	0,5	0,01	0,5	0,01	0,5	0,01
1	0,04	1	0,02	1	0,02	1	0,01	1	0,01
2	0,08	2	0,03	2	0,02	2	0,01	2	0,01
4	0,16	4	0,07	4	0,02	4	0,01	4	0,02
8	0,25	8	0,13	8	0,03	8	0,01	8	0,02
16	0,35	16	0,19	16	0,04	16	0,01	16	0,03
35	0,46	35	0,28	35	0,04	35	0,02	35	0,03
60	0,56	60	0,37	60	0,05	60	0,03	60	0,04
120	0,58	120	0,46	120	0,05	120	0,04	120	0,04
1070	0,66	1078	0,57	1083	0,05	1088	0,04	1096	0,04
1340	0,66	1348	0,57	1353	0,05	1358	0,04	1366	0,04
1550	0,67	1558	0,57	1563	0,05	1568	0,04	1576	0,04
1760	0,67	1768	0,57	1773	0,05	1778	0,04	1786	0,04
2540	0,67	2548	0,58	2553	0,05	2558	0,04	2566	0,04
6830	0,67	6838	0,58	6843	0,05	6848	0,04	6856	0,04
7010	0,67	7018	0,58	7023	0,05	7028	0,04	7036	0,04
7280	0,67	7288	0,58	7293	0,05	7298	0,04	7306	0,04
8300	0,67	8308	0,58	8313	0,05	8318	0,04	8326	0,04

Çizelge B.25 : Ödometre Sonuçları (%10 Bentonit+%90 Kaolin)

1.Nokta		2.Nokta		3.Nokta		4.Nokta		5.Nokta	
Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,01	0,25	0,01	0,25	0,01	0,25	0,01	0,25	0,00
0,50	0,03	0,50	0,01	0,50	0,02	0,50	0,09	0,50	0,01
1,00	0,04	1,00	0,02	1,00	0,04	1,00	0,11	1,00	0,01
2,00	0,08	2,00	0,03	2,00	0,06	2,00	0,11	2,00	0,02
4,00	0,18	4,00	0,14	4,00	0,11	4,00	0,14	4,00	0,04
8,00	0,32	8,00	0,31	8,00	0,19	8,00	0,23	8,00	0,07
15,00	0,50	15,00	0,57	15,00	0,29	15,00	0,25	15,00	0,10
30,00	0,95	30,00	0,86	30,00	0,45	30,00	0,21	30,00	0,16
60,00	1,03	60,00	1,36	60,00	0,68	60,00	0,28	60,00	0,22
955,00	3,83	955,00	1,89	955,00	1,51	955,00	0,65	955,00	0,41
1144,00	3,85	1144,00	1,91	1144,00	1,53	1144,00	0,66	1144,00	0,42
1414,00	3,87	1414,00	1,93	1414,00	1,57	1414,00	0,68	1414,00	0,43
5344,00	3,93	5344,00	2,04	5344,00	1,67	5344,00	0,74	5344,00	0,45
5524,00	3,93	5524,00	2,05	5524,00	1,68	5524,00	0,75	5524,00	0,45
6739,00	3,94	6739,00	2,07	6739,00	1,69	6739,00	0,77	6739,00	0,46
6954,00	3,94	6954,00	2,07	6954,00	1,69	6954,00	0,77	6954,00	0,46
8274,00	3,96	8274,00	2,09	8274,00	1,71	8274,00	0,79	8274,00	0,47
8664,00	3,98	8664,00	2,09	8664,00	1,71	8664,00	0,80	8664,00	0,47
9624,00	3,98	9624,00	2,10	9624,00	1,72	9624,00	0,81	9624,00	0,48
9729,00	3,98	9729	2,10	9729,00	1,72	9729,00	0,81	9729,00	0,48

Çizelge B.26 : Ödometre Sonuçları (%15 Bentonit+%85 Kaolin)

1.Nokta		2.Nokta		3.Nokta		4.Nokta		5.Nokta	
Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,01	0,25	0,02	0,25	0,01	0,25	0,01	0,25	0,01
0,50	0,02	0,50	0,03	0,50	0,01	0,50	0,01	0,50	0,01
1,00	0,04	1,00	0,05	1,00	0,02	1,00	0,02	1,00	0,02
2,00	0,08	2,00	0,08	2,00	0,04	2,00	0,04	2,00	0,03
4,00	0,18	4,00	0,14	4,00	0,11	4,00	0,09	4,00	0,07
8,00	0,36	8,00	0,22	8,00	0,23	8,00	0,16	8,00	0,13
15,00	0,57	15,00	0,38	15,00	0,37	15,00	0,25	15,00	0,20
35,00	0,96	35,00	0,62	35,00	0,56	35,00	0,39	35,00	0,31
60,00	1,37	60,00	0,93	60,00	0,86	60,00	0,61	60,00	0,48
128,00	2,18	128,00	1,40	128,00	1,24	128,00	0,90	128,00	0,68
1060,00	4,03	1060,00	3,28	1060,00	2,78	1060,00	2,12	1060,00	1,63
1335,00	4,22	1335,00	3,48	1335,00	2,94	1335,00	2,25	1335,00	1,77
1485,00	4,31	1485,00	3,59	1485,00	3,01	1485,00	2,32	1485,00	1,84
1500,00	4,35	1500,00	3,63	1500,00	3,05	1500,00	2,34	1500,00	1,87
5415,00	4,71	5415,00	4,23	5415,00	3,36	5415,00	2,85	5415,00	2,33
5850,00	4,77	5850,00	4,24	5850,00	3,37	5850,00	2,90	5850,00	2,38
6840,00	4,83	6840,00	4,24	6840,00	3,37	6840,00	2,92	6840,00	2,42
7320,00	4,83	7320,00	4,24	7320,00	3,38	7320,00	2,96	7320,00	2,42
8370,00	4,84	8370,00	4,24	8370,00	3,38	8370,00	2,97	8370,00	2,42
10200,00	4,84	10200,00	4,24	10200,00	3,38	10200,00	2,97	10200,00	2,43

Çizelge B.27 : Ödometre Sonuçları (%20 Bentonit+%80 Kaolin)

1.Nokta		2.Nokta		3.Nokta		4.Nokta		5.Nokta	
Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,02	0,25	0,01	0,25	0,01	0,25	0,00	0,25	0,00
0,50	0,03	0,50	0,01	0,50	0,01	0,50	0,01	0,50	0,01
1,00	0,05	1,00	0,03	1,00	0,02	1,00	0,01	1,00	0,01
2,00	0,09	2,00	0,04	2,00	0,04	2,00	0,02	2,00	0,01
4,00	0,19	4,00	0,18	4,00	0,12	4,00	0,06	4,00	0,09
8,00	0,33	8,00	0,36	8,00	0,24	8,00	0,13	8,00	0,18
15,00	0,58	15,00	0,57	15,00	0,39	15,00	0,25	15,00	0,29
35,00	0,93	35,00	0,91	35,00	0,66	35,00	0,42	35,00	0,45
60,00	1,22	60,00	1,39	60,00	1,03	60,00	0,67	60,00	0,69
120,00	2,03	120,00	2,05	120,00	1,56	120,00	1,05	120,00	1,01
2730,00	5,28	2730,00	5,16	2730,00	4,94	2735,00	4,61	2730,00	3,08
2830,00	5,32	2830,00	5,24	2830,00	5,02	2835,00	4,65	2830,00	3,10
3030,00	5,34	3030,00	5,26	3030,00	5,09	3035,00	4,72	3030,00	3,12
3130,00	5,34	3130,00	5,28	3130,00	5,09	3135,00	4,72	3130,00	3,12
4060,00	5,34	4060,00	5,29	4060,00	5,10	4065,00	4,73	4060,00	3,13
4270,00	5,35	4270,00	5,29	4270,00	5,11	4275,00	4,73	4270,00	3,13
4450,00	5,35	4450,00	5,30	4450,00	5,11	4455,00	4,74	4450,00	3,13
4570,00	5,35	4570,00	5,30	4570,00	5,11	4575,00	4,74	4570,00	3,13
6010,00	5,35	6010,00	5,31	6010,00	5,12	6015,00	4,74	6010,00	3,13

Çizelge B.28 : Ödometre Sonuçları (%25 Bentonit+%75 Kaolin)

1.Nokta		2.Nokta		3.Nokta		4.Nokta		5.Nokta	
Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,02	0,25	0,01	0,25	0,01	0,25	0,01	0,25	0,01
0,50	0,03	0,50	0,02	0,50	0,02	0,50	0,01	0,50	0,02
1,00	0,05	1,00	0,03	1,00	0,04	1,00	0,02	1,00	0,03
2,00	0,10	2,00	0,05	2,00	0,08	2,00	0,03	2,00	0,06
4,00	0,20	4,00	0,22	4,00	0,18	4,00	0,09	4,00	0,11
8,00	0,37	8,00	0,43	8,00	0,33	8,00	0,20	8,00	0,21
15,00	0,61	16,00	0,69	15,00	0,53	15,00	0,35	15,00	0,34
35,00	1,02	35,00	1,07	35,00	0,85	35,00	0,57	35,00	0,54
60,00	1,58	60,00	1,66	60,00	1,32	60,00	0,89	60,00	0,81
120,00	2,32	120,00	2,49	120,00	1,96	120,00	1,36	120,00	1,20
188,00	2,85	182,00	2,83	177,00	2,40	177,00	1,69	172,00	1,45
1388,00	5,73	1382,00	5,62	1377,00	5,49	1374,00	4,69	1369,00	3,64
1508,00	5,80	1502,00	5,75	1497,00	5,56	1494,00	4,77	1489,00	3,69
1628,00	5,87	1622,00	5,83	1617,00	5,66	1614,00	4,87	1609,00	3,76
2528,00	6,21	2522,00	6,16	2517,00	6,12	2514,00	5,45	2509,00	4,05
2738,00	6,24	2732,00	6,22	2727,00	6,16	2724,00	5,50	2719,00	4,08
2828,00	6,26	2822,00	6,25	2817,00	6,19	2814,00	5,54	2809,00	4,14
3038,00	6,29	3032,00	6,26	3027,00	6,20	3024,00	5,54	3019,00	4,16
4238,00	6,31	4232,00	6,27	4227,00	6,21	4224,00	5,55	4219,00	4,19
4328,00	6,31	4322,00	6,27	4317,00	6,21	4314,00	5,55	4309,00	4,19

Çizelge B.29 : Ödometre Sonuçları (%30 Bentonit+%70 Kaolin)

1.Nokta		2.Nokta		3.Nokta		4.Nokta		5.Nokta	
Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)	Süre (dakika)	Şişme Miktarı (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,02	0,25	0,02	0,25	0,01	0,25	0,01	0,25	0,00
0,50	0,04	0,50	0,02	0,50	0,01	0,50	0,02	0,50	0,01
1,00	0,07	1,00	0,03	1,00	0,02	1,00	0,03	1,00	0,01
2,00	0,12	2,00	0,03	2,00	0,03	2,00	0,06	2,00	0,02
4,00	0,24	4,00	0,18	4,00	0,15	4,00	0,15	4,00	0,09
8,00	0,44	8,00	0,40	8,00	0,32	8,00	0,27	8,00	0,24
16,00	0,69	16,00	0,66	16,00	0,55	16,00	0,44	16,00	0,43
35,00	1,11	35,00	1,07	35,00	0,87	35,00	0,70	35,00	0,71
60,00	1,83	60,00	1,66	60,00	1,32	60,00	1,06	60,00	1,11
120,00	2,59	120,00	2,48	120,00	1,91	120,00	1,57	120,00	1,66
173,00	3,02	177,00	2,99	181,00	2,28	186,00	1,86	191,00	1,94
1283,00	6,69	1287,00	6,64	1291,00	6,17	1296,00	5,48	1301,00	4,75
1463,00	6,73	1467,00	6,70	1471,00	6,24	1476,00	5,52	1481,00	4,76
1583,00	6,90	1587,00	6,80	1591,00	6,49	1596,00	5,79	1601,00	4,91
2543,00	6,98	2547,00	7,17	2551,00	6,89	2556,00	6,29	2561,00	5,03
2903,00	6,99	2907,00	7,18	2911,00	6,90	2916,00	6,30	2921,00	5,04
3023,00	6,99	3027,00	7,18	3031,00	6,90	3036,00	6,30	3041,00	5,05
7163,00	7,00	7167,00	7,19	7171,00	6,90	7176,00	6,33	7181,00	5,08
8333,00	7,00	8337,00	7,19	8341,00	6,90	8346,00	6,33	8351,00	5,08

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Serpil GENÇ
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul / 02.10.1982
Adres: Petrol iş mah. Levent sk. No: 16/17 Kartal / İstanbul
Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi