



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İSTANBUL GÜRPINAR KİLİNİN TEKRARLI
ŞİŞME-BÜZÜLME DAVRANIŞI**

**Jeofizik Müh. Mert ÖZKAN
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Programı**

**Danışman
Yrd.Doç.Dr. Sadık ÖZTOPRAK**

Aralık, 2009

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İSTANBUL GÜRPINAR KİLİNİN TEKRARLI
ŞİŞME-BÜZÜLME DAVRANIŞI**

**Jeofizik Müh. Mert ÖZKAN
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Programı**

**Danışman
Yrd.Doç.Dr. Sadık ÖZTOPRAK**

Aralık, 2009

İSTANBUL

Bu çalışma 18/12/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Yrd.Doç.Dr. Sadık ÖZTOPRAK (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Prof.Dr.S. Feyza ÇİNİCİOĞLU
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Doç.Dr. Mehmet BERİLGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat-Mimarlık Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yrd.Doç.Dr. Aykut ŞENOL
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yrd.Doç.Dr. Davut LAÇİN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Bu alışma, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü 2009/3589 no.lu tez projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Çalışmam boyunca benden yardımlarını ve desteğini esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK'a, yüksek lisans öğrenimimde emeği geçen tüm hocalarıma, laboratuvar teknisyeni Oğuz Firidin'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak tüm yaşamım boyunca yanımda olan sevgili, değerli aileme ve bu teze emeği geçen herkese yürekten teşekkür ediyorum.

Aralık, 2009

Mert ÖZKAN

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	VI
TABLO LİSTESİ	XIV
SEMBOL LİSTESİ	XVI
ÖZET	XVIII
SUMMARY	XVIII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	4
2.1. KİLLER HAKKINDA GENEL BİLGİ	4
2.1.1. Kil Minerallerinin Oluşumu.....	5
2.1.2. Kil Mineralinin Yapısı	6
2.2. TEMEL KAVRAMLAR	16
2.2.1. Şişme Potansiyeli	16
2.2.2. Şişme Yüzdesi	16
2.2.3. Şişme Basıncı	18

2.3. ŞİŞME MEKANİZMASI	19
2.4. ŞİŞME DAVRANIŞINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER	22
2.4.1. Kil Mineralojisi.....	23
2.4.2. Zemin Suyunun Kimyasal Bileşimi	25
2.4.3. Zemin Mikrostrüktürü ve Fabrik	28
2.4.4. Kıvam Limitleri.....	30
2.4.5. Aktivite	31
2.4.6. Kil Yüzdesi.....	33
2.4.7. Özgül Yüzey Alanı	35
2.4.9. Kuru Birim Hacim Ağırlık.....	36
2.4.10. Su Tutma Kapasitesi.....	38
2.4.11. Su Muhtevası	39
2.4.13. Sıcaklık	41
2.4.14. Kimyasal ve Organik Çevre	42
2.4.15. Gerilme Tarihçesi.....	42
2.4.16. Jeolojik Yük.....	43
2.5. TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DAVRANIŞI.....	45
2.6. ŞİŞEN ZEMİNLERİN TANIMLANMASI VE SINIFLANMASI	66
2.6.1. Şişme Potansiyelinin Ölçümünde Ödometre Deneyi	66
2.6.2. Serbest Şişme İndisi Deneyi	69
2.6.3. Genişleme İndisi Deneyi	72
2.6.4. Lineer Genişleyebilirlik Katsayısı (COLE)	73
2.6.5. Potansiyel Hacim Değiştirme (PVC) Deneyi.....	74
2.6.6. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR).....	75
2.6.7. Kil Mineralojisi.....	76
2.6.8. İndeks Özellikleri	77
2.6.9. Katyon değişim kapasitesi (CEC).....	82
2.6.10. Metilen Mavisi Emilim Deneyi.....	85
2.6.11. Şişme-Büzülme İndisi Deneyi (I_{ss})	90
2.6.12. Ampirik İlişkiler	91

2.6.13. Şişme-Büzülme Potansiyeli İçin Şişen Zemin İndeksi(ESI)	93
3. MALZEME VE YÖNTEM	95
3.1. ARAŞTIRMADA KULLANILAN KİLLERLE İLGİLİ BİLGİLER	97
3.1.1. X-Işını (X-Ray) Difraksiyon Analizleri	100
3.1.2. ESEM-Elektron Mikroskobu Görüntü Analizi.....	109
3.1.3. Katyon Değiştirme Kapasitesinin Belirlenmesi.....	109
3.2. ŞİŞME VE ŞİŞME-BÜZÜLME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ	112
3.2.1. Metilen Mavisi Emilim Deneyleri.....	112
3.2.2. Serbest Şişme Oranı Belirleme Deneyleri.....	114
3.2.3. Şişme-Büzülme İndeksi.....	116
3.3. TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ	117
3.3.1. Numunelerin Hazırlanması ve Tanımlanması	117
3.3.2. Tekrarlı Şişme-Büzülme Deneyi	118
3.3.3. Konsolidasyon Deneyleri	121
4. BULGULAR	123
4.1. TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DENEYLERİ.....	129
4.1.1. Büyükçekmece Numunesi Tekrarlı Şişme-Büzülme Deney Sonuçları.....	129
4.1.2. Esenyurt Numunesi Tekrarlı Şişme-Büzülme Deney Sonuçları.....	135
4.1.3. Ambarlı Numunesi Tekrarlı Şişme-Büzülme Deney Sonuçları.....	138
4.1.4. Kıraç Numunesi Tekrarlı Şişme-Büzülme Deney Sonuçları.....	143

4.2 TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLMENİN KİLİN MİKROYAPISINA ETKİSİ...	148
4.3. ELEKTRON MİKROSKOBU İLE YAPI VE DOKUNUN GÖRÜNTÜ ANALİZİ.....	151
4.4. NUMUNELERİN TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	155
4.5. NUMUNELERİN TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DAVRANIŞININ KARŞILAŞTIRILMASI	168
4.6. TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DAVRANIŞININ KONSOLİDASYON DAVRANIŞINA ETKİSİ	174
4.7. TEKRARLI ŞİŞME VE ŞİŞME BASINCI İNDEKSİ	176
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	182
KAYNAKLAR.....	186
ÖZGEÇMİŞ.....	201

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Kil zemin mikro yapısının şematik gösterimi (Mitchell, 1993)	4
Şekil 2.2. Değişik kil minerallerinin (a) temel yapısı, (b) temsili gösterimi (Grim, 1974)	8
Şekil 2.3. (a) Silis levhasının strüktürü, (b) Silis levhasının basitleştirilmiş çizimi (Sivakugan, 2001)	8
Şekil 2.4. (a) Oktahedral levhanın strüktürü, (b) Oktahedral levhanın basitleştirilmiş çizimi (Sivakugan, 2001)	9
Şekil 2.5. Kaolinit kil mineral katman yapısı (Grim, 1974)	10
Şekil 2.6. Kaolinit-Serpantin grubu minerallerin yapısı (Mitchell, 1976)	11
Şekil 2.7. Kaolinitin elektron fotomikrografı (17µm) (Mitchell, 1976)	11
Şekil 2.8. Mika benzeri kil minerallerinin yapısı (Mitchell, 1976)	13
Şekil 2.9. İllitin tipik elektron fotomikrografı (7.5 µm) (Mitchell, 1976)	13
Şekil 2.10. Smektit minerallerin yapısı (Mitchell, 1976)	14
Şekil 2.11. Montmorillonitin tipik elektron fotomikrografı (7.5 µm) (Mitchell, 1976) ..	14
Şekil 2.12. Kil – su sistemi (Sivakugan, 2001)	20
Şekil 2.13. Boşluk sıvısındaki tuz konsantrasyonunun şişme potansiyeli ve şişme basıncı üzerindeki etkisi (Basma ve Al-Sharif, 1994)	26
Şekil 2.14. Elektrolit konsantrasyonunun illit-bentonit karışımlarının serbest şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (Sivapullaiah ve Savitha, 1999)	27
Şekil 2.15. Killerin muhtemel tane dizilim Şekilleri: (a) Dispers ve defloküle olmuş, (b) Kümelenmiş ve defloküle olmuş, (c) Köşe- yüz floküle olmuş ve dispers, (d) Köşe-köşe floküle olmuş fakat ayrık, (e) Köşe-yüz floküle olmuş ve kümelenmiş, (f) Köşe-köşe floküle olmuş ve kümelenmiş, (g) Köşe-yüz ve köşe-köşe floküle olmuş ve kümelenmiş (Van Olphen, 1963)	29
Şekil 2.16. Kil yüzdesinin şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (a) Kum-kil karışımı (b) Silt -kil karışımı (El-Sohby ve Rabba, 1981)	34
Şekil 2.17. Kil yüzdesinin şişme basıncı üzerindeki etkisi (El-Sohby ve Rabba, 1981) ..	34

Şekil 2.18. Özgül yüzey alanı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişki (Grabowska-Olszewska, 1970)	36
Şekil 2.19. Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (Holtz ve Gibbs, 1956)	37
Şekil 2.20. Başlangıç su muhtevasının şişme üzerindeki etkisi (El-Sohby ve Rabba, 1981)	40
Şekil 2.21. Başlangıç su muhtevasının şişme basıncı üzerindeki etkisi (El-Sohby ve Rabba, 1981)	40
Şekil 2.22. Şişen killi zeminlerde su muhtevası – boşluk oranı ilişkisi (Hanafy, 1991)	41
Şekil 2.23. Sürşarj basıncının aynı başlangıç koşullarına sahip numunelerin şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (Holtz ve Gibbs, 1956)	44
Şekil 2.24. Farklı araştırmacılar tarafından açıklanan çeşitli döngü sayısı - şişme potansiyeli ilişkisi (Al-Homoud ve diğ., 1995)	46
Şekil 2.25. Zamana Bağlı Düşey Şişme ve Büzülme: (a) Zemin A; ve (b) Zemin F (Al-Homoud ve diğ., 1995)	47
Şekil 2.26. Maksimum şişme yüzdesi ve şişme basıncı ile ıslanma-kuruma döngü sayıları arasındaki ilişki (Al-Homoud ve diğ., 1995)	48
Şekil 2.27. F zemininin mikro yapısının mikroskobik görüntüsü: (a) İlk numune; (b) ilk döngü sonrası; (c) 5. döngü sonrası (Al-Homoud ve diğ., 1995)	49
Şekil 2.28. Şişmenin yorulması (Chen, 1965)	51
Şekil 2.29. Bir kuruma – ıslanma eğrisi (Dif ve Bluemel, 1991)	52
Şekil 2.30. Zamana karşı düşey şişme-büzülme	53
Şekil 2.31. Serbest şişme basıncı altındaki ıslak-kuru döngüler (Yalçın, 1997)	55
Şekil 2.32. Kompakte killerin çökme davranışına şişme/büzülmenin etkisi (Rao ve Revanasiddappa, 2006)	57
Şekil 2.33. Kurutulmuş numunenin ilk boşluk oranı ve şişme potansiyeli arasındaki korelasyon (Rao ve diğ., 2000)	57
Şekil 2.34. Düşey deformasyon değerine karşı tam şişme-tam büzülme ve tam şişme-kısmi büzülmeye ait döngüler (Tawfig ve Nalbantoğlu, 2009)	58
Şekil 2.35. Şişme potansiyeli değerine karşı tam şişme-tam büzülme ve tam şişme-kısmi büzülmeye ait döngüler (Tawfig ve Nalbantoğlu, 2009)	58
Şekil 2.36. Gerilme (τ) -deplasman (δ_0) eğrileri (Gulla ve diğ., 2006)	59

Şekil 2.37. Kurutmanın AMS numunesinin ıslanma-çekme hacim değişimine etkisi (Rao ve diğ., 2001).....	60
Şekil 2.38. Kireç katkısının BCS-1 numunesinin şişme davranışı üzerindeki etkisi (Rao ve diğ., 2001).....	61
Şekil 2.39. Kurutmanın %4 ve %7 kireç katkılı BCS-1 numunesinin ıslanma-çekme hacim değişimine etkisi (Rao ve diğ., 2001).....	62
Şekil 2.40. B zeminine ait şişme potansiyeli ve şişme basıncı değişimi (Güney ve diğ., 2005)	63
Şekil 2.41. Birçok araştırmacı tarafından verilmiş çeşitli şişme potansiyelleri (Güney ve diğ., 2005)	63
Şekil 2.42. A3 numunesinin farklı sürşarj yükleri altındaki tek boyutlu şişme testi sonuçları (Rao ve Tripathy, 2003)	65
Şekil 2.43. A3 numunesinin denge bandına yaşlanmanın etkisi (Rao ve Tripathy, 2003)	65
Şekil 2.44. Ödometre serbest şişme deney sonucu	67
Şekil 2.45. Şişen montmorillonit ve şişmeyen kaolinit olarak zemin sınıflaması (Prakash and Sridharan, 2004)	72
Şekil 2.46. Şişme indisine bağlı potansiyel hacim değişikliği (Lambe, 1960).	75
Şekil 2.47. Katyon aktivitesi ve asimetreye bağlı olarak mineraloji ve şişme potansiyelinin tahmini (Kariuki ve diğ., 2003)	77
Şekil 2.48. Kil yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli kartı (Van der Merwe, 1964)	78
Şekil 2.49. Plastisite indisi ve likit limite bağlı şişme potansiyeli kartı (Dakshanamurthy ve Raman, 1973).....	79
Şekil 2.50. Şişme potansiyeli kartı (Hanafy, 1991)	80
Şekil 2.51. Kil yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli tanımlama kartı (Basma, 1993)	80
Şekil 2.52. Plastisite indisi ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Chen, 1988).....	81
Şekil 2.53. Katyon değiştirme reaksiyonu (Abdullah ve diğ., 1997).....	82
Şekil 2.54. Katyon değiştirme ortamı (Vogt, 2002).....	83
Şekil 2.55. Aktiviteye bağlı sınıflama kartı (Seed ve diğ., 1962).....	87
Şekil 2.56. Kil muhtevası-MBV ilişkisi (Çokça, 1991).....	88
Şekil 2.57. Metilen mavisi değeriyle şişme yüzdesi arasındaki ilişki (Çokça, 2001).....	89

Şekil 2.58. Şişme yüzdesi metilen mavisi değeri ilişkisi (Yükselen ve Kaya, 2008).....	90
Şekil 2.59. İki farklı kil için büzülme deneyi sonucu (Biraud vd., 2003).....	91
Şekil 3.1. Deneyde kullanılan numunelerin sağlandığı yerler	96
Şekil 3.2. Şişme-büzülme kapsamında ele alınacak durumlar ve açıklamaları	96
Şekil 3.3. Killerin plastisite kartındaki yeri (Lancellotta, 2009’dan yararlanılarak çizilmiştir)	99
Şekil 3.4. Kullanılan killerin tane dağılımları.....	99
Şekil 3.5. GnK doğal numunesinin XRD analiz sonuçları a)Tüm numune, b) Kil kısmı	102
Şekil 3.6. GK1 doğal numunesinin XRD analiz sonuçları a)Tüm numune, b) Kil kısmı	103
Şekil 3.7. GK2 doğal numunesinin XRD analiz sonuçları a)Tüm numune, b) Kil kısmı	104
Şekil 3.8. GK3 doğal numunesinin XRD analiz sonuçları a)Tüm numune, b) Kil kısmı	105
Şekil 3.9. GK4 doğal numunesinin XRD analiz sonuçları a)Tüm numune, b) Kil kısmı	106
Şekil 3.10. GK5 doğal numunesinin XRD analiz sonuçları a)Tüm numune, b) Kil kısmı	107
Şekil 3.11 Bentonit doğal numunesinin XRD analizi tüm numune sonuçları	108
Şekil 3.12. Kaolinit doğal numunesinin XRD analizi tüm numune sonuçları.....	108
Şekil 3.13. Araştırmada kullanılan killerin örselenmemiş durumlarına ait tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri.....	110
Şekil 3.14. Metilen mavisi deney aşaması şematik gösterimi	114
Şekil 3.15. GK3 numunesine ait metilen mavisi deney sonucu.....	114
Şekil 3.16. GK3 numunesinin serbest şişme oranı deney düzeneği	116
Şekil 3.17. GK4_YY-kürsüz Ambarlı numunesine ait I_{ss} deney grafiği	117
Şekil 3.18. Deney numunesinin hazırlanması.....	120
Şekil 3.19. Deneyde kullanılan referans numunelere tekrarlı şişme-büzülme uygulanması	120
Şekil 3.20. Etüvden çıkan numunenin boyunun ölçülmesi.....	120
Şekil 3.21. Tekrarlı şişme-büzülme deneyinin şematik gösterimi	121
Şekil 4.1. Kil yüzdesi ve aktiviteye bağlı şişme potansiyeli kartı (Seed ve diğ., 1962).....	125

Şekil 4.2. Kil yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli kartı (Van der Merwe, 1964)	126
Şekil 4.3. Kil muhtevası-MBV ilişkisi (Çokça, 1991).....	126
Şekil 4.4. Serbest şişme deneyine göre şişen montmorillonit ve şişmeyen kaolinit olarak zemin sınıflaması (Prakash and Sridharan, 2004).....	127
Şekil 4.5. B.çekmece mezarlık GK1a_UD ve GK1b_UD numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı; a) GK1a_UD b) GK1b_UD	130
Şekil 4.6. B.çekmece mezarlık GK1c_UD numunesinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı	130
Şekil 4.7. B.çekmece mezarlık GK1_YY-Kürlü ve GK1_YY-Kürsüz numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı; a) GK1_YY-Kürlü b) GK1_YY-Kürsüz	131
Şekil 4.8. B.çekmece mezarlık GK1a_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışına bağlı boy değişimi (%).	131
Şekil 4.9. B.çekmece mezarlık GK1b_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışına bağlı boy değişimi (%)	132
Şekil 4.10. B.çekmece mezarlık GK1c_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışına bağlı boy değişimi (%)	132
Şekil 4.11. B.çekmece mezarlık GK1_YY-Kürlü numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışına bağlı boy değişimi(%).	134
Şekil 4.12. B.çekmece mezarlık GK1_YY-Kürsüz numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışına bağlı boy değişimi(%).	135
Şekil 4.13. Esenyurt GK2_YY-Kürlü ve GK2_YY-Kürsüz numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı; a) GK2_YY-Kürlü b) GK2_YY-Kürsüz	137
Şekil 4.14. Esenyurt GK2_YY-kürlü numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması.....	137
Şekil 4.15. Esenyurt GK2_YY-kürsüz numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması.....	138
Şekil 4.16. Ambarlı GK3_UD numunesinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı.	139
Şekil 4.17. Ambarlı GK3_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması.....	140

Şekil 4.18. Ambarlı GK4_UD ve GK4_YY-Kürsüz numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı; a) GK4_UD b) GK4_YY-Kürsüz.....	140
Şekil 4.19. Ambarlı GK4_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması.....	141
Şekil 4.20. Ambarlı GK4_YY-kürsüz numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması.....	142
Şekil 4.21. Kırac GK5a_UD ve GK5b_UD numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı ; a) GK5a_UD b) GK5b_UD	143
Şekil 4.22. Kırac GK5a_YY-Kürsüz ve GK5b_YY-Kürsüz numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı; a) GK5a_YY-Kürsüz b) GK5b_YY-Kürsüz .	144
Şekil 4.23. Kırac GK5a_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması.....	144
Şekil 4.24. Kırac GK5b_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması.....	145
Şekil 4.25. Kırac GK5a_YY-kürsüz numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması.....	146
Şekil 4.26. Kırac GK5b_YY-kürsüz numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması.....	147
Şekil 4.27. GK1 doğal ve tekrarlı şişme-büzülmeye maruz kalmış numunelerinin XRD analizi tüm numune sonuçlarının karşılaştırması	149
Şekil 4.28. GK1 doğal ve tekrarlı şişme-büzülmeye maruz kalmış numunelerinin XRD analizi kil kısmının etilen glikolle şişirilmiş deney sonuçlarının karşılaştırması	150
Şekil 4.29. GK1_UD kilinin doğal , tekrarlı şişme büzülme sonrası, konsolidasyon sonrası ve tekrarlı şişme-büzülmeden sonra konsolidasyon sonrası durumlarına ait ESEM görüntü analizleri.....	151
Şekil 4.30. GK1_YY- kürlü kilinin su ile kompakte edilmiş (YY) ve tekrarlı şişme büzülme sonrası durumlarına ait ESEM görüntü analizleri	152
Şekil 4.31. GK2_YY-kürlü kilinin su ile kompakte edilmiş (YY) ve tekrarlı şişme büzülme sonrası durumlarına ait ESEM görüntü analizleri	153
Şekil 4.32. GK3_UD kilinin doğal ve tekrarlı şişme büzülme sonrası durumlarına ait ESEM görüntü analizleri.....	153

Şekil 4.33. GK4_UD kilinin doğal ve tekrarlı şişme-büzülme sonrası durumlarına ait ESEM görüntü analizi.....	153
Şekil 4.34. GK5_UD kilinin doğal ve tekrarlı şişme büzülme sonrası durumlarına ait ESEM görüntü analizleri.....	154
Şekil 4.35. GK1 Büyükçekmece numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması.....	156
Şekil 4.36. GK2 Esenyurt numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması	157
Şekil 4.37. Ambarlı GK3 (Kara) ve GK4 (Deniz) numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması	158
Şekil 4.38. GK5 Kıraç numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması	159
Şekil 4.39. Tüm doğal numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması	160
Şekil 4.40. Tüm kompakte (Yeniden yapılandırılmış) numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması	161
Şekil 4.41. GK1b_UD ile GK5a_UD numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması.....	162
Şekil 4.42. GK1 yeniden yapılandırılmış numuneler ile GK2 yeniden yapılandırılmış numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması	163
Şekil 4.43. GK2, GK4 ve GK5 yeniden yapılandırılmış kürsüz numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması	164
Şekil 4.44. Kil yapısına kompaksiyonun etkisi (Lambe, 1958).....	165
Şekil 4.45. Simektit diyagramında quasikristallerin kırılma ve oluşumu;1.durum; Tabakaların tek bir kuasikrsital olarak gruplaştığı durum,2. durum; aynı tabakalın 4 quasikristale ayrılması, 3.durumu; aynı tabakaların ayrı ayrı tabakalar halinde dizilmesi (Laird, 2006).....	167
Şekil 4.46. Literatürde sürşarj yükü altında tam şişme-kısmi büzülme uygulanan numunelerinin deney sonuçları karşılaştırması	169
Şekil 4.47. Literatürde sürşarj yükü olmadan tekrarlı şişme-büzülme deneyi yapılan numunelerin deney sonuçları karşılaştırması	170
Şekil 4.48. Literatürle bu araştırmadaki kompakte numunelerin (YY) deney sonuçları karşılaştırması.....	173

Şekil 4.49. GK1, GK2, GK4 ve GK5 numuneleri konsolidasyon deneyi karşılaştırması; a) GK1 numunesi konsolidasyon karşılaştırması b) GK3 numunesi konsolidasyon karşılaştırması c) GK4 numunesi konsolidasyon karşılaştırması d) GK5 numunesi konsolidasyon karşılaştırması	174
Şekil 4.50. GK1, GK2, GK4 ve GK5 numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme geçirdikten sonraki konsolidasyon deneyi karşılaştırması	175
Şekil 4.51. Tüm konsolidasyon deneyi yapılmış numunelerin Yük-Cv konsolidasyon katsayısı ilişkileri (Lejanttaki ŞB tekrarlı şişme-büzülme geçirmiş numuneyi göstermektedir)	176
Şekil 4.52. Tekrarlı şişme-büzülme deneyinde görülen şişme yüzdesi ve şişme basıncı eğrileri	177
Şekil 4.53. CSI – w_s/w_0 arasındaki ilişkiyi ifade eden grafik	178
Şekil 4.54. CSPI – w_s/w_0 arasındaki ilişki	179
Şekil 4.55. Ölçülen ve hesaplanan CSI (1.25 güvenlik aralığı)	180
Şekil 4.56. Ölçülen ve hesaplanan CSPI (1.15 güvenlik aralığı)	180
Şekil 4.57. CSI -ISS ilişkisi	181
Şekil 4.58. Çeşitli araştırmacıların CSI – w_s/w_0 verileri ile bu çalışmadaki verilerin uyumunu ifade eden grafik	181
Şekil 4.59. Çeşitli araştırmacıların CSPI – w_s/w_0 verileri ile bu çalışmadaki verilerin uyumunu ifade eden grafik	181

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Kil minerallerinin karşılaştırmalı özellikleri (Mitchell, 1993).....	15
Tablo 2.2. Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri (Nelson ve Miller, 1992)...	23
Tablo 2.3. Şişme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler (Nelson ve Miller, 1992) ..	23
Tablo 2.4. Gerilme koşullarının şişme potansiyeli üzerindeki etkisi (Nelson ve Miller, 1992)	23
Tablo 2.5. Bazı kil mineralleri için tipik aktivite değerleri	32
Tablo 2.6. Özgül yüzey alanının kil mineralinin cinsi ve boyutuna bağlı olarak değişimi (Holtz and Kovacs, 1981).....	35
Tablo 2.7. Değiştirilmiş serbest şişme indisine bağlı şişme potansiyeli (Sivapullaiah ve diğ., 1987)	70
Tablo 2.8. Serbest şişme oranına dayalı sınıflama (Prakash and Sridharan, 2004).....	71
Tablo 2.9. Genişleme indisine bağlı olarak zeminin genişleme potansiyelinin sınıflandırılması (ASTM D 4829-88)	73
Tablo 2.10. Şişme – büzülme potansiyelinin lineer genişleyebilirlik katsayısı ve lineer genişleyebilirlik yüzdesine bağlı olarak sınıflandırılması (USDA, 2005).....	74
Tablo 2.11. Kil mineralleri ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Mitchell, 1976).....	76
Tablo 2.12. Şişen zeminlerin, rötre limiti ve lineer rötreye bağlı olarak sınıflandırılması (Altmeyer,1955).....	77
Tablo 2.13. Şişen zeminlerin, kolloid içeriği, plastisite indisi ve rötre limitine bağlı olarak sınıflandırılması (Holtz ve Gibbs,1956).....	77
Tablo 2.14. İki farklı bentonit için katyon değiştirme kapasitesi ve değişebilir katyonların zeminin şişmesi üzerindeki etkisi (Churchman ve diğ., 2002)	85
Tablo 2.15 Metilen mavisi değerlerini kullanılarak elde edilen şişme potansiyeli sınıflaması (Yükselen ve Kaya, 2008)	90
Tablo 2.16. Şişme büzülme indisine bağlı olarak şişme potansiyelinin sınıflandırılması (Briaud, 2003).....	91
Tablo 2.17. ESI'ya göre puanlama sınıflaması (Kariuki ve Van der Meer, 2004).....	94
Tablo 3.1. Kullanılan zeminlerin numune kodları.....	97

Tablo 3.2. Kullanılan zeminlerin bazı özellikleri	98
Tablo 3.3. Karışık katmanlı kil minerallerinin piklerinin tabakalar arası mesefelerine bağlı sınıflandırması (Meunier, 2005)	101
Tablo 3.4. Çeşitli kil mineralleri için katyon değiştirme kapasitesi değerleri (Grim,1962).....	111
Tablo 3.5 Araştırmada kullanılan numunelerin hazırlanması ve deney şartları.....	118
Tablo 4.1. İncelenen zeminlerin minerolojilerine göre sınıflandırılması	123
Tablo 4.2. İncelenen zeminlerin şişme potansiyellerine göre sınıflandırılması	124
Tablo 4.4. Deney başı ve sonu zemin özelliklerindeki değişim	148
Tablo 4.5. Literatürde tekrarlı şişme-büzülmeyle ilgili deney yapan araştırmacılara ait zemin özellikleri Tablosu	171
Tablo 4.5. (Devamı...) Literatürde tekrarlı şişme-büzülmeyle ilgili deney yapan araştırmacılara ait zemin özellikleri Tablosu	172

SEMBOL LİSTESİ

A_c	: Aktivite
C_v	: Konsolidasyon katsayısı
C	: Kil yüzdesi
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
CC	: Kil içeriği
CEA_c	: Katyon değiştirme aktivitesi
CEC	: Katyon değiştirme kapasitesi
CSI	: Tekrarlı şişme indeksi
CSPI	: Tekrarlı şişme basıncı indeksi
COLE	: Lineer genişleyebilirlik katsayısı
e	: Boşluk oranı
e₀	: Başlangıç boşluk oranı
e_{maks}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
EI	: Genişleme indisi
ESI	: Şişen zemin indisi
F	: No 4 eleğinden geçen zemin yüzdesi
FS	: Serbest şişme
FSI	: Serbest şişme indisi
FSR	: Serbest şişme oranı
G_s	: Özgül ağırlık
I_{ss}	: Şişme-büzülme indisi
LEP_c	: Lineer genişleyebilirlik yüzdesi
LL	: Likit limit
MBV	: Kil için metilen mavisi indeksi
MFSI	: Modifiye serbest şişme indisi
P₁	: Tekrarlı şişme-büzülme deneyinde ilk döngüdeki şişme basıncı
P_n	: Tekrarlı şişme-büzülme deneyinde n. döngüdeki şişme basıncı
P_c	: Ön konsolidasyon basıncı
P_s	: Şişme basıncı
PL	: Plastik limit
PI	: Plastisite indisi
PVC	: Potansiyel hacim değişimi
S	: Şişme yüzdesi
S₁	: Tekrarlı şişme-büzülme deneyinde ilk döngüdeki şişme yüzdesi
S_n	: Tekrarlı şişme-büzülme deneyinde n. döngüdeki şişme yüzdesi
SEM	: Tarayıcı Elektron mikroskobu
SI	: Şişme indisi
S_L	: Rötire limiti
SSP	: Doygunluk su muhtevası
V	: Şişme sonrası zemin hacmi
V₀	: Kuru zemin hacmi

V_d	: Saf suda çökelen zemin hacmi
V_k	: Kerosen veya CCl_4 içerisinde çökelen zemin hacmi
V_s	: Zemin tanelerinin hacmi
w	: Su muhtevası
w_o	: Başlangıç su muhtevası
w_{sh}	: Büzülme testi sonucunda elde edilen büzülme limiti
w_{sw}	: Serbest şişme ödometre deneyinde elde edilen şişme limiti
w_s	: Ödometrede şişirilmiş numunenin maksimum doygun su muhtevası
τ	: Gerilme
σ	: Sürşarj gerilmesi
Δ_o	: Deplasman
$\Delta L/ \Delta L_D$	: Kuru boyutlara bağlı lineer deformasyon
γ_{dM}	: 33 kPa emmede numunenin kuru birim hacim ağırlığı
γ_{kD}	: Fırında kurutulmuş numunenin kuru birim hacim ağırlığı
γ_n	: Tane birim hacim ağırlığı
γ_d	: Kuru birim hacim ağırlık
v	: Aktivitenin belirlenmesinde kullanılan katsayı

ÖZET

İSTANBUL GÜRPINAR KİLİNİN TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DAVRANIŞI

İstanbul'un önemli yerleşim bölgelerinden biri olan Avrupa yakasında Küçükçekmece ve Büyükçekmece gölleri çevresinde yer alan Gürpınar formasyonunun killi seviyeleri Gürpınar kili olarak adlandırılır. Şişme ve heyelan problemleri ile tanınan bu kilin gerek şişme, gerekse de şişme-büzülme davranışı pek araştırılmamıştır. Bu özelliklerini ortaya koymak ve tanımlamak için Gürpınar kilinin yüzeylendiği 4 değişik bölgeden 5 değişik kil alınmış ve toplam 14 adet örselenmemiş ve kompaksiyon ile yeniden yapılandırılmış numune üzerinde tam kuruma-tam ıslanma olacak şekilde tekrarlı şişme-büzülme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Buna ilaveten, şişme-büzülme potansiyelini belirlemede kullanılan diğer deneyler de yapılmıştır. Tekrarlı şişme-büzülmenin kilin yapısı üzerindeki etkisini anlamak için numuneler şişme-büzülmeye uğramadan önce ve sonra elektron mikroskop ile görüntü analizleri, XRD analizleri, tanımlama deneyleri ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Tekrarlı şişme-büzülmeye uğrayan Gürpınar killeri için elde edilen şişme potansiyeli (yüzdesi) ve şişme basınçlarının değişimi (yönü ve miktarı) literatürdeki diğer killere benzemektedir; hem azalan hem de artan sonuçlar göstermektedir. Bu araştırmada, farklı sonuçlar bulunmasının nedeni olarak kil mineralojisi, yapısı ve orijini (killerin doğrultusu ve bağların stabilitesi) olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, tekrarlı şişme indeksi (CSI) ve tekrarlı şişme basıncı indeksi (CSPI) yaklaşımı tanımlanmıştır. Bu iki kavram ile çok kolay ve kısa süreli bir deneyle elde edilen maksimum doygun su muhtevasının (w_s) doğal su muhtevasına (w_o) oranı arasında çok kuvvetli bir ilişki bulunmuştur. Geliştirilen denklemlerle, tekrarlı ıslanma ve kurumalara maruz kalacak bir Gürpınar kilinin sonuçta ulaşacağı şişme potansiyeli ve şişme basıncı değerlerini elde etmek mümkün olmaktadır.

SUMMARY

CYCLIC SWELL – SHRINK BEHAVIOUR OF ISTANBUL GURPINAR CLAY

Clayey levels of Gulpinar formation which exists under one of the major residential areas of İstanbul around the Küçükçekmece and Büyükçekmece Lakes, is named as Gulpinar clay. Despite of its swelling and landslide problems, there is not a comprehensive research on the swelling potential and cyclic swell-shrink behaviour. To reveal these properties and behaviour, 5 different samples of Gulpinar clay were taken from 4 different regions. The cyclic swell –shrink experiments with full drying - full wetting were carried out for totally 14 undisturbed and reconstituted specimens. Additionally, in order to define the swell-shrink potential, some other tests were done. To recognize the effect of cyclic swell-shrink on the structure of clay, the electron microscope analysis, XRD analysis, index tests and consolidation tests are carried out on the natural and cyclic swelled-shrunk samples. The swelling potential and the swelling pressure changes of Gulpinar clays exposed to cyclic swell – shrink, show similarities with other clays in the literature. In this research, the reasons of different results for the cyclic swelling-shrinkage behaviour are explained by mineralogy, structure and origin (orientation and bond stability) of the clay. Additionally, cyclic swelling index (CSI) and cyclic swelling pressure index (CSPI) parameters are defined. Very high correlation is found for these two parameters with the ratio of maximum saturated water content (w_s) to natural water content (w_o) which can be readily found. With these developed relations, it is possible to obtain the final swelling potential and swelling pressure of Gulpinar clay when expose to cyclic swell-shrink.

1. GİRİŞ

Özellikle düşük su muhtevalı ve aşırı konsolide olan killerin, su emerek hacimlerinin artması olayı zeminlerin şişme özelliği olarak tanımlanır. Bu özelliğe sahip olan killi zeminlerin şişme davranışını incelenmesine yol açan önemli neden; su ile temas etmeleri halinde meydana gelen hacim değişikliklerinin oldukça büyük olması ve bu hacim artışlarının engellenmemesi durumunda büyük miktarda basınç uygulanmaktadır. Bina temelleri, yol, havaalanı ve kanal kaplamaları, boru hatları altındaki veya istinat yapıları arkasındaki şişmeye müsait nispeten kuru zeminlerin, yüzey suyu pis ve temiz su kaçaklarından su sızması, kapilarite ile su yükselmesi, su tablası yükselmesi, zeminde buhar halinde mevcut rutubetin termal akımla hareketi ve daha serin bölgede yoğunlaşması gibi nedenlerle su muhtevalarının artarak şişmesi üst yapıya büyük çapta zarar verebilir.

A.B.D ‘de şişen zeminlerin yol açtığı hasar nedeniyle yapılan harcamanın, tüm doğal felaketlerin yol açtığı hasar nedeniyle yapılan harcamanın iki katı olduğu tespit edilmiştir. (Jones and Jones, 1987) Şişme bir mühendislik problemi olarak ilk defa 1940’ lı yıllarda anlaşılabilmektedir. Hava meydanları, karayolları ve su kanalları gibi hafif beton yapıların artması ile, hasarların oturma haricinde başka sebeplerden de olabileceği anlaşılmış ve şişen zemin problemi olarak belirlemiştir.

Şişme probleminin coğrafi dağılımına baktığımızda, potansiyel kabaran zeminlerin tropikal ve ılık iklime sahip kurak ve yarı kurak bölgelerde yoğunlaştığı görülür. Başta A.B.D olmak üzere, Arjantin, Hindistan, İsrail, Kanada, Avustralya ve Suudi Arabistan şişme probleminin sıkça görüldüğü ülkelerdir.

Şişme; litolojiye, kil kısmın yüzdesine, kil kısmın mineralojik bileşimine ve bu minerallerin kil zemin içerisindeki dizilim veya yönelimine bağlı olarak değişebilir. Ayrıca, değişebilir katyonların bileşimi, karbonatların oranı, su muhtevası, strüktür ve mikrostrüktür, suyun kimyasal bileşimi ve kil taneleri arasındaki çimentolanma bağları

gibi pek çok faktörden de etkilenmektedir. Bu nedenle, hiçbir özellik tek başına tüm zeminlerin şişme-büzülme davranışlarını tam olarak tahmin edebilmek için yeterli değildir. Şişme-büzülme davranışının en iyi biçimde belirlenebilmesi için, fiziksel kimyasal ve mineralojik zemin özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Thomas, 1998).

Zeminlerin şişme özellikleri genellikle şişme potansiyeli olarak tanımlanan şişme yüzdesi ve şişme basıncı olarak iki şekilde göz önüne alınır. Şişme potansiyeli, laboratuvarda belli şartlarda sıkıştırılmış veya tabii(örselenmemiş) bir zemin numunesinin belirli yük altında sıfır yanıl deformasyon durumunda suya doygun hale gelinceye kadar maruz kaldığı düşey şişme miktarının numunenin ilk kalınlığına yüzdesi olarak ifadesidir. Bu değır sıfır yanıl deformasyon şartlarında aynı zamanda hacimsel artış yüzdesidir. Şişme potansiyeline sahip olan killi bir zeminin bir Şekilde su muhtevasının artması durumunda, meydana gelebilecek hacim değışikliğine engel olabilecek basınç, şişme basıncı olarak ifade edilir.

İstanbul'un önemli yerleşim bölgelerinden biri olan Avrupa yakası Göller Bölgesi çevresinde yer alan Gürpınar formasyonun killi seviyeleri Gürpınar kili olarak bilinir. Bu killeri aşırı konsolide killeri olup, fisürlüdür, yüksek plastisitelidir ve genellikle simektit tipi kil minerali içermektedir. Bu özellikleri nedeniyle Gürpınar killerinde önemli boyutta şişme davranışı ortaya çıkmakta ve dolayısıyla bina duvarlarında çatlaklara, kiriş ve kolonlarda yapısal hasarlara, bahçe duvarlarında önemli tahribatlara neden olmaktadır. Gürpınar kilinde şişme potansiyelinin belirlenmesine yönelik olarak fiziksel, kimyasal ve mineralojik çalışmalar ve bu kilin şişme potansiyeli (şişme basıncı ve şişme yüzdesi), bu potansiyeli etkileyen faktörler ve bunların etki dereceleri, tekrarlı şişme-büzülme davranışı ve bunun zemin yapısı ile ilişkilendirilmesi bu tezin ana hatlarını oluşturmuştur. Gürpınar kilinin üzerindeki yapılarda büyük hasarların olmasının en büyük nedeninin killerin tekrarlı şişme-büzülme davranışı olduğu düşünülmektedir. Bu özelliklerini ortaya koymak ve tanımlamak için Gürpınar kilinin yüzeylendiği 4 değışik bölgeden 5 değışik kil alınmış ve toplam 14 adet örselenmemiş ve kompaksiyon ile yeniden yapılandırılmış numune üzerinde tam kuruma-tam ıslanma olacak şekilde tekrarlı şişme-büzülme deneyleri gerçekleştirilmiş, bununla birlikte şişme-büzülme potansiyelini belirleyici deneyler de yapılmıştır. Tekrarlı şişme-

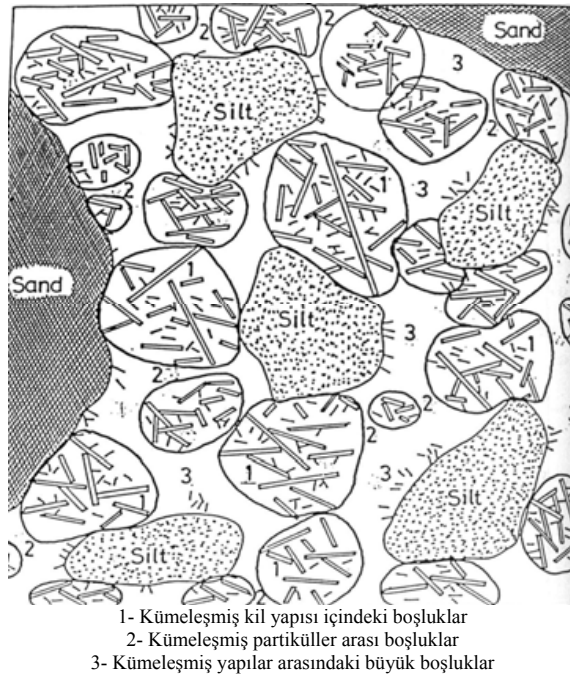
büzülmenin kilin yapısı üzerindeki etkisini anlamak için numuneler şişme-büzülmeye uğramadan önce ve sonra elektron mikroskop ile görüntü analizleri, XRD analizleri, tanımlama deneyleri ve konsolidasyon deneyleri yapılarak killerde meydana gelen yapı değişikliği ortaya konmuştur.

Tekrarlı şişme-büzülmeye uğrayan Gürpınar killeri için elde edilen şişme potansiyeli (yüzdesi) ve şişme basınçlarının değişimi (yönü ve miktarı) literatürdeki diğer killere benzemekte; azalan da artan da sonuçlar göstermektedir. Bu araştırmada, farklı sonuçlar bulunmasının nedeni olarak kil mineralojisi, yapısı ve orijini (killerin doğrultusu ve bağların stabilitesi) olduğu gösterilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte, tekrarlı şişme indeksi (CSI) ve tekrarlı şişme basıncı indeksi (CSPI) yaklaşımı tanımlanmıştır. Bu iki yaklaşımdan elde edilen değerler ile çok kolay ve kısa süreli bir deneyle elde edilen maksimum doymuş su muhtevası (w_s) ve bu değer in doğal su muhtevasına (w_o) oranından elde edilen değerler arasında çok kuvvetli bir ilişki bulunmuştur. Islanma ve kurumalara maruz kalacak bir kil için elde edilen ilk şişme yüzdesi ve/veya basıncı sabit kalmayarak sürekli değişecektir. Böylece, karmaşık bir davranış olan tekrarlı şişme-büzülme davranışı sonucunda bir kilin ulaşacağı şişme potansiyeli ve şişme basıncı değerleri elde edilerek önemli bir bulguya ulaşılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. KİLLER HAKKINDA GENEL BİLGİ

Kil zeminler, genel olarak su muhtevsındaki değişime bağlı olarak hacim değişimine uğrarlar. Hacim değişimi, kurumada büzülme ve ıslanmada şişme olarak kendini gösterir. Eğer zemin kurumayı takiben ıslatılırsa, şişme oluşur. Büyük hacim değişiklikleri biri birini izleyen kurak ve yağmurlu mevsimlere sahip iklim koşullarında gözlenir. Kurak mevsime sahip iklim koşulları ayrıışmış ve kurumuş üst zemin oluşumunu hızlandırır (Oweiss and Bowman, 1981). Mineralojik oluşum ve kil muhtevası, şişen zeminlerin şişme karakteristiklerini kontrol eden ana faktörlerdir. Şişme potansiyeli ve kil yapısı yakın bir şekilde ilişkilidir (Şekil 2.1). Genel olarak zemin sınıflama sistemlerinde kil taneleri, 2 mikron (0.002 mm) veya daha küçük tane çapına sahip partiküller veya kolloidal boyutta taneler olarak tanımlanır.



Şekil 2.1. Kil zemin mikro yapısının şematik gösterimi (Mitchell, 1993)

Tek başına tane boyutu, kil partiküllerinin davranışını belirlemede yeterli bilgiyi sağlamaz. İnce taneli zeminlerin tane boyutuna ilaveten belki de en önemli özelliği mineralojik oluşumlarıdır (Chen, 1988). Başlıca volkanik veya tortul kayaçların ayrışmasından türemiş olan kil mineralleri veya kolloidal boyuttaki taneler, elektrostatik açıdan değerlendirildiğinde tanelerin yüzeyine etkiyen elektriksel kuvvetler, yerçekimi kuvvetlerinden çok daha büyüktür. Bu durumdaki partiküllerin “kolloidal safha”da olduğu söylenir. Kolloidal partikül, ana kayadan ayrışma ile oluşan kil minerallerini ihtiva eder. Kil mineralleri, ana kayadan ayrılarak bir dizi karmaşık işlemler dizisi sonucunda oluşur.

2.1.1. Kil Minerallerinin Oluşumu

Değişik tipteki kil mineralleri, her mineralin elektriksel alanındaki çeşitlilikten dolayı değişik şişme potansiyeli gösterir. Zemin kütlelerinin şişme kapasitesi; zemin içindeki kil minarelerinin miktarı ve tipine, kil partiküllerinin yüzey alanlarına ve bu partikülleri çevreleyen zemin suyunun kimyasına bağlıdır. Kil minerallerinin suyla etkileşimde bulunması sonucunda, kimyasal yapıda farklılıklar oluşur. Kil minerallerinin oluşmasında ana kayacın bileşimi ve maruz kaldığı fiziksel ve kimyasal etkileşimler sonucunda ayrışma derecesi, kil mineralinin belirlenmesinde birincil derecede önem taşır (Grim, 1974). Kayaç oluşturan minerallerin kil mineraline dönüşümünde, fiziksel ve kimyasal etki olmak üzere iki ana süreç egemendir.

Bunlardan fiziksel süreç; ana malzemenin mekanik olarak kırılıp ufalanmasına neden olur. Oluşan kırıklar, suyun ve aktif çözeltilerin ana malzeme içerisine girmesini kolaylaştırırken, ufalanma da özgül yüzeyi artırdığından kimyasal reaksiyonların hızlanmasına sebep olur. Kimyasal süreç; karbonatlaşma ve hidroksilleşme (asit ve bazlar arasındaki etkileşim), oksidasyon ve reaksiyon (elektron değişimi) işlemlerini ihtiva eder. Bu işlemler serisi, sonuçta serbest radikal etkileşime neden olan süreç olarak bilinir.

Yüksek oranda konsolide olmuş killer, Tersiyer ve Kuvaterner dönemi alüvyon depozitler, ayrılmış şeyller ve bazaltlar şişen zemin oluşumuyla ilgili jeolojik birimler olarak tanımlanır (Krumbein and Sloss, 1963). Genellikle şişen zeminlerin kaynak

malzemeleri; bol miktarda silikat mineralleri içeren ve oksidasyon, hidrasyon, dehidrasyon ve iyon değişimiyle kolayca montmorillonit, illit ve kolonit gibi kil minerallerine dönüşen kumtaşı, kireçtaşı, metamorfik ve volkanik kayalar gibi farklılık tiplerinin ayrışmasıyla oluşur (Shi ve diğ., 2002).

Kil mineral tipi, ana kayacın ayrışma aşamasındaki farklılıklar neticesinde oluşmakta ve ayrışmadaki bu farklılıklar, zeminin şişme özelliği ile doğrudan ilişkili olmaktadır. Lambe and Whitman (1969), şişme davranışı üzerinde ana kayacın ayrışma koşulunun doğrudan ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Montmorillonit ve kaolinitin her ikisi de magmatik kayaların ayrışması sonucunda oluşmasına karşın, ayrışma şartlarındaki farklılıklar nedeniyle montmorillonit, kaolinit mineraline oranla çok yüksek şişme potansiyeline sahiptir. Magmatik kayaların ayrışması aşamasında aşırı dağılma, güçlü hidrasyon ve sınırlı yıkanmaya maruz kalması sonucunda montmorillonit tipi kil mineralleri oluşur. Çünkü montmorillonit; magnezyum, kalsiyum ve demir katyonlarının sistem içinde toplanmasıyla oluşabilmektedir.

Ortamda magnezyum iyonu bulunmalıdır ve yıkanma olmalıdır. Bu şartlar, nispi olarak düşük yağışın veya mevsimsel yağışların etkili olduğu yarı kurak bölgelerde görülür. Bu bağlamda kimyasal ayrışmanın ana kaynağının su olması, zemin suyu kimyasının, çevre şartlarının ve iklim koşullarının ayrışma üzerindeki önemini göstermektedir (Krumbein and Sloss, 1963).

Elektro-kimyasal anlamda çok aktif olan kil mineralleri, çok küçük partikül boyutlarına sahip olmalarından dolayı, zemin kütlesi içindeki muhtevalarına bağlı olarak, bulundukları zemin kütlesinin mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Holtz and Kovacs 1981). Chen (1988), şişme olayının kilin mineralojik özellikleriyle doğrudan ilişkili olması nedeniyle kilin ana mineral öğelerinin belirlenmesinin, şişme potansiyelinin değerlendirilmesinde önem arz ettiğini belirtmiştir

2.1.2. Kil Mineralinin Yapısı

Kil mineralinin içyapısı, atomlar arası bağ kuvvetleri etkisinde atomların diziliş biçimine bağlıdır. Atomların dizilişi düzenli ise “kristal yapı”, düzensiz ve rasgele ise

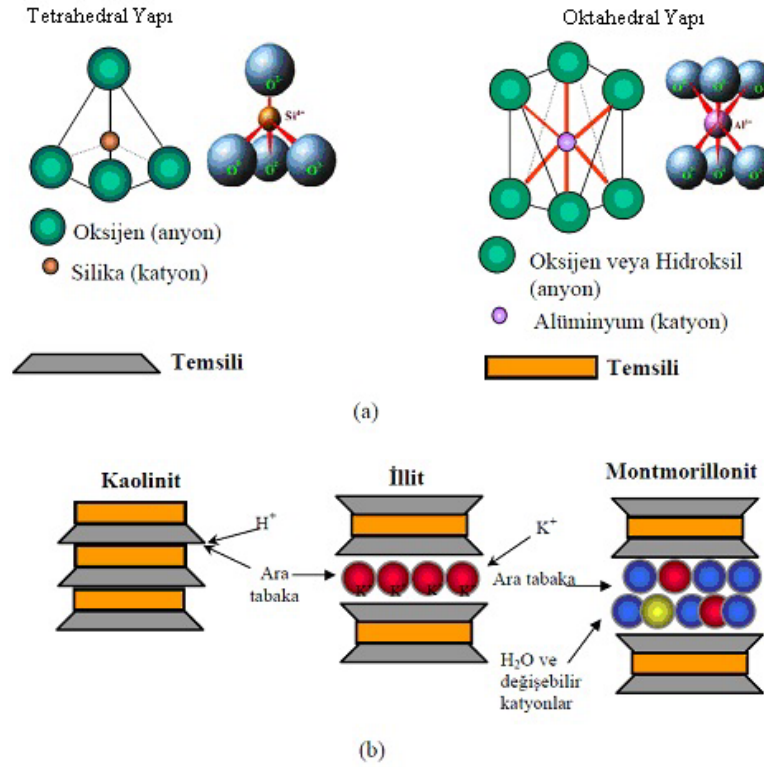
“amorf” yapı oluşur. Düzenli dizilişin temel niteliği tekrarlılıktır. Düzenli bir yapıda herhangi bir doğrultu boyunca atomlar arası uzaklık eşit ve çevreleri özdeştir. Birçok kil minerali, kafes kristal yapı oluşturan atom birleşimine sahiptir. Kristal kafes, kristaldeki atomların veya iyonların üç boyutlu olarak düzgün bir Şekilde tekrarlanmasından oluşmaktadır. Kil minerallerinin önemli bir özelliği, kristal boyutlarının ufak olmasıdır. X-ışını kırınım yöntemi ve elektron mikroskobu, bu kristal yapıların tanımlanmasında kullanılır. X-ışını kırınımı; kil minerallerinin atomik yapısının tekrarlanan çok sayıda kristal levhadan meydana geldiğini göstermiştir. Kil mineralleri, karışık yapıli kristaller şeklinde olup, kristallerin düzenlenmesine göre gruplandırılır. Kristal düzenine göre oluşturulan gruplar, hemen hemen benzer özellikler gösterir ve genel olarak bu grup isimleriyle tanımlanır.

Değişik kil mineralleri kimyasal analiz yapılarak da tanımlanabilmektedir. Ancak kimyasal analiz sonuçlarına bağıli olarak yapılan kil minerallerinin tanımlanması, X-Ray difraktometre veya diferansiyel termal analizlere oranla daha zordur. Killerin çok nadir olarak saf halde bulunmaları, bir başka ifadeyle farklı minerallerle karışık halde olmaları, tanımlama aşamasını daha da karmaşıklaştırır. Kil mineralleri yapısal oluşum açısından değerlendirildiğinde, her grup benzer mühendislik özelliği gösterdiğinden dolayı yapısal gruplamalar daha uyumlu olmaktadır (Nelson and Miller, 1992). Mühendislik amaçlı sınıflamalarda, kil mineralleri genellikle üç grup içinde değerlendirilir:

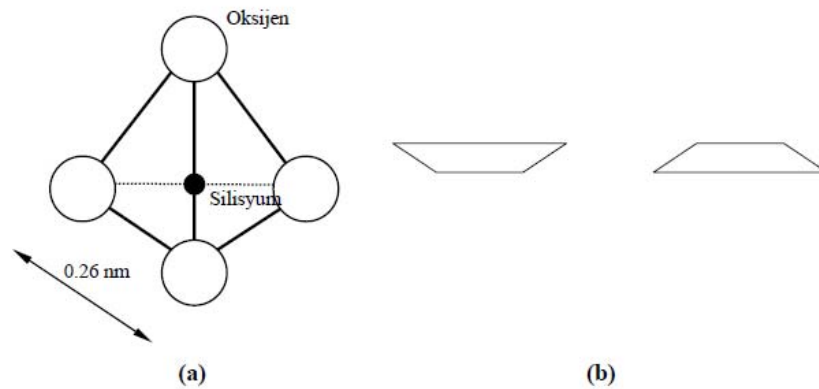
- Kaolinit grubu; genellikle genleşmez.
- Mika grubu; illit ve vermikulit tipi killeri içerir, fakat genleşmeleri önemli problemlere neden olmaz.
- Smektit grubu; montmorillonitleri kapsar. Yüksek şişme potansiyeline sahiptir ve en problemli kil mineral tipidir.

Esas itibariyle kil mineralleri iki temel kristal yapıdan oluşur. Bunlar, silika tetrahedral ve alümina veya magnezyum oktahedral kristal yapılarıdır (Şekil 2.2a). Şekil 2.3.’ de, tetrahedral silis levhasının strüktürü ve basitleştirilmiş çizimi, Şekil 2.4.’ de ise oktahedral tabakanın strüktürü ve basitleştirilmiş çizimi verilmiştir.

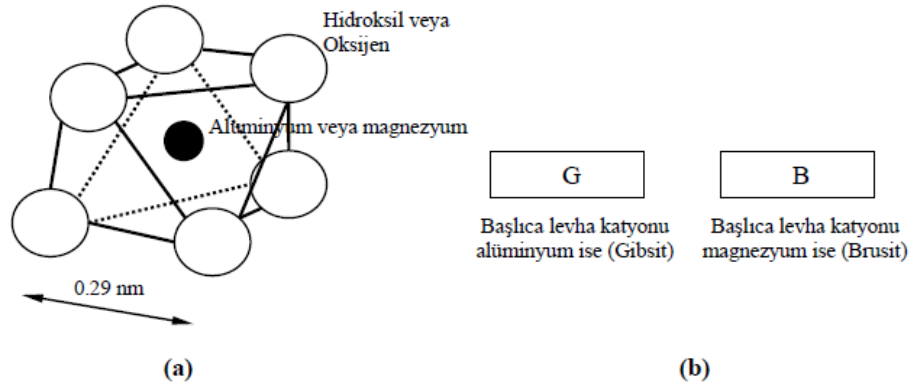
Silika tetrahedral yapı; bir silika atomu etrafındaki dört oksijen atomundan oluşmaktadır. Diğer bir ifade ile, tek silika tetrahedrali; tek bir silis atomunu çevreleyen ve tabanda aynı düzlem üzerinde bulunan dört oksijen atomunda ibarettir. Her bir tetrahedralin tabanında ve aynı düzlemde bulunan bu oksijen atomlarının birleşimi ile tetrahedral yapı oluşur. Eğer oksijen atomu iki tetrahedral yapı tarafından paylaşılsa levha şeklindeki yapı oluşur.



Şekil 2.2. Değişik kil minerallerinin (a) temel yapısı, (b) temsili gösterimi (Grim, 1974)



Şekil 2.3. (a) Silis levhasının strüktürü, (b) Silis levhasının basitleştirilmiş çizimi (Sivakugan, 2001)



Şekil 2.4. (a) Oktahedral levhanın strüktürü, (b) Oktahedral levhanın basitleştirilmiş çizimi (Sivakugan, 2001)

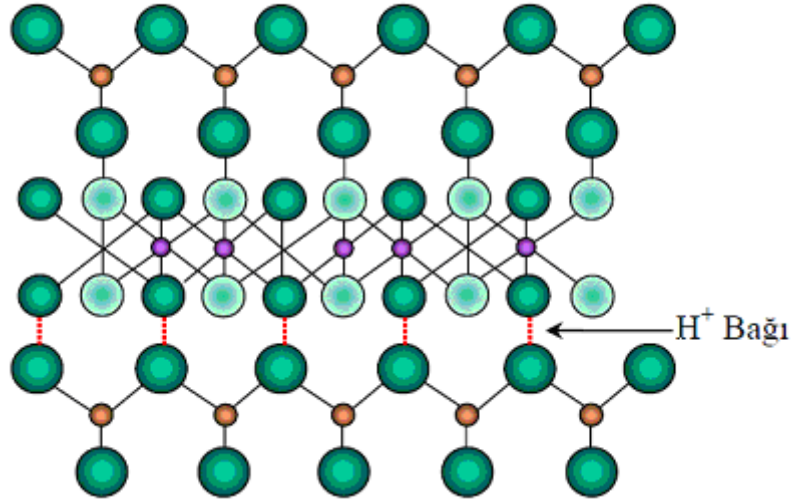
Alümina veya magnezyum oktahedral yapı; alüminyum, magnezyum, demir kationlarını veya diğer atomları çevreleyen altı oksijen veya hidroksillerin birleşiminden oluşmaktadır. Oktahedral levhadaki kationların yer değiştirmesi ile farklı mineraller ortaya çıkmaktadır. Bu durum; kristal yapının değişmeden, ortamdaki kationların yer değiştirmesi olup “izomorf yer değiştirme” olarak tanımlanır. İzomorf yer değiştirme özelliğinden dolayı, mineraller farklı yapıya sahip olur ve farklı isimlerle tanımlanır (Holtz ve Kovacs, 1981).

Oktahedral ve tetrahedral yapılar, oktahedral ve tetrahedral levha Şekillerini alarak birlikte polimer yapı oluşturur. Oluşan levhaların birleşimi ve düzenlenmesi, farklı yapıların oluşmasına sebep olur. Temel yapıdaki değişimler neticesinde bilinen kil mineralleri oluşur. Sonuç olarak tüm kil mineralleri, iki temel levha yapısının değişik Şekillerde (1:1, 2:1) bir araya gelmesi ile oluşur.

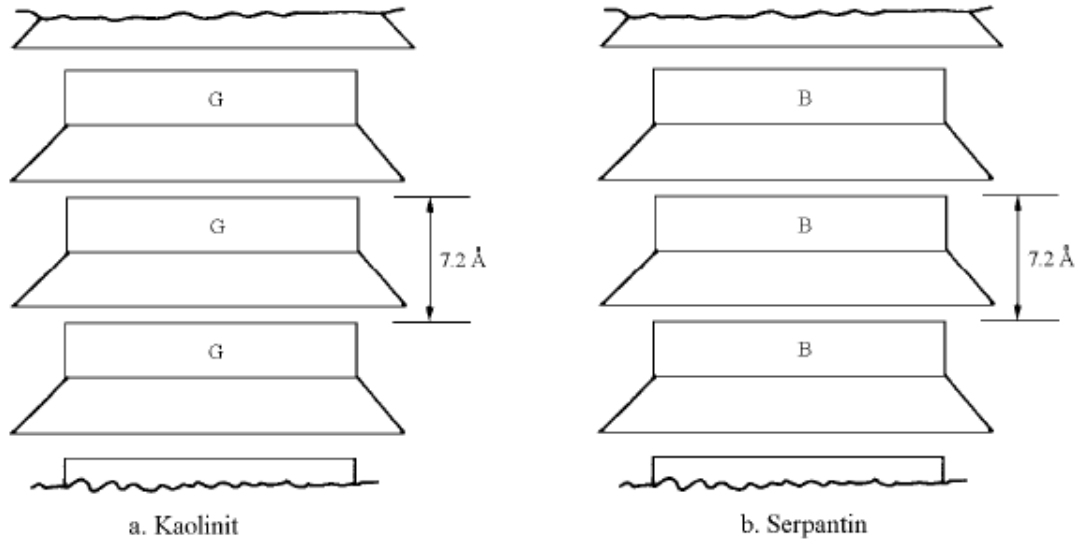
Kaolinit başlıca bir oktahedral ve bir tetrahedral levhanın tekrarlanan katmanlarından oluşur. Bu katman, iki levhanın birer tanesinden meydana gelmiş olmasından dolayı 1:1 kil minerali olarak sembolize edilir (Şekil 2.2b). Kaolinit kristali, birkaç katmanın bir araya gelerek oluşturduğu 0.72 nm kalınlığındaki temel bir katmandan oluşmaktadır. Birbirini izleyen bu katmanlar oktahedral levhanın hidroksili ile tetrahedral levhanın oksijeni arasında oluşan hidrojen bağı ile bir arada tutulur (Şekil 2.5). Çok güçlü bir bağ

olan hidrojen bağı, hidratasyonu önleyerek, katmanların bir araya gelerek büyük bir kristal yapı oluşturmasını sağlar.

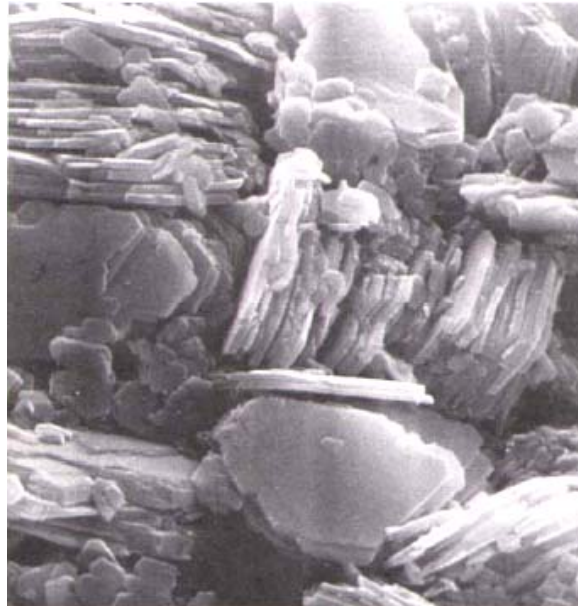
Ortamdaki yük dağılımı ve katyon türleri, kil zeminin şişme potansiyelini belirler. Kil mineralleri tetrahedral ve oktahedral tabakalardaki katyonların yer değiştirmesinden kaynaklanan kalıcı negatif yüke sahiptir. 1:1 kil minerali olarak sembolize edilen kaolinitin düşük seviyedeki yer değiştirme yeteneği, oktahedral ve tetrahedral levhaları arasındaki hidrojen bağının oluşumuyla sağlanır. Oluşan hidrojen bağı tabakalar arasına su ve katyonların emilimini engelleyerek, tabakaları sıkı bir şekilde bir arada tutar. Bu esasla kaolinit şişmeyen mineral olarak tanımlanır. Şekil 2.6'da kaolinit ve serpantin grubu minerallerin yapısı ve Şekil 2.7'de de tipik bir kaolinitin tarayıcı elektron mikroskopuyla (SEM) elde edilmiş görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.5. Kaolinit kil mineral katman yapısı (Grim, 1974)



Şekil 2.6. Kaolinit-Serpantin grubu minerallerin yapısı (Mitchell,1976)



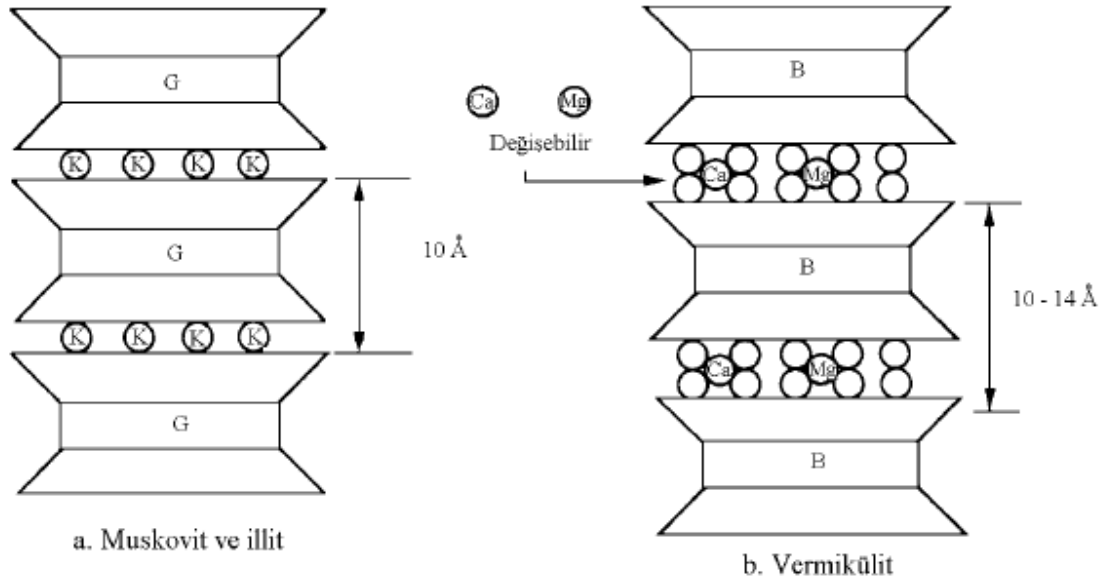
Şekil 2.7. Kaolinitin elektron fotomikrografı (17µm) (Mitchell, 1976)

Mika ve simektit yapı grupları, 2:1 katman yapısında olup Şekil 2.8 ve 2.10'daki gibi sembolize edilir. Mika grubu kil mineralleri kaolinit mineraline benzer davranış göstermekte olup, tabakalar potasyum bağıyla bir arada tutulur. Şekil 2.9'da mika grubu kil minerallerinden olan illitin tarayıcı elektron mikroskopuyla (SEM) elde edilmiş görüntüsü verilmiştir.

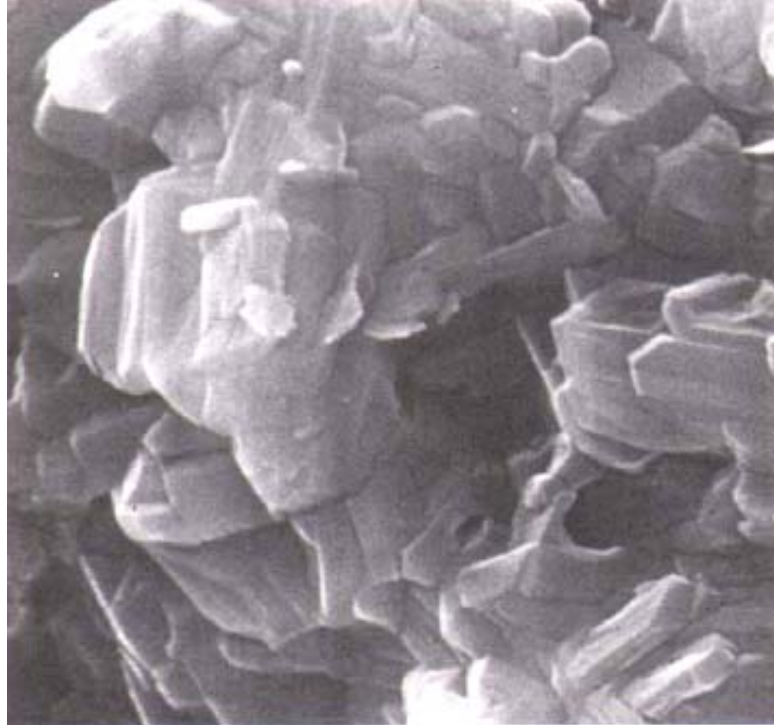
Simektit olarak adlandırılan montmorillonit tipi killeri çok küçük kristal yapıda olup yüksek su çekme gücüne sahiptir. Bu yapıda; oktahedral levhası iki tetrahedral levha arasına girerek bir katmanı oluşturur (Şekil 2.10). Tetrahedral levhaları bağlayan Van der Waals kuvvetlerinden dolayı su ve değişebilir katyonlar, katmanlar arasına girerek katmanları ayırabilir. Bu nedenle bu tip kil mineralleri şişmeye karşı aşırı duyarlıdır. Simektit grubunda katyon değişimi, oktahedral ve tetrahedral levha yapılarının her ikisinde de oluşur. Bu katyon değişimi, smektit grubu kil minerallerinin kimyasal bileşimini ve özelliklerini belirler.

Taneler arası şişme, kilin mineralojik kompozisyonundan bağımsız olarak herhangi bir kil zeminde de ortaya çıkabilir. Nispeten kuru olan killerde taneler, kapiler kuvvetlerden kaynaklanan çekimle bir arada tutulur. Islanma meydana geldiğinde ise, kapiler kuvvetlerin etkisi azalır ve kil zemin şişer. Diğer bir deyişle, suyun dıştaki kristal yüzeylere ulaşması engellenip, kristaller arası boşluğu doldurmasıyla şişme meydana gelir. Bu, montmorillonit mineralinin karakteristik özeliğidir. Montmorillonit kristalini oluşturan ayrı ayrı molokül tabakaları zayıf bir şekilde birbirlerine bağlıdır. Dolayısıyla ıslanma meydana geldiğinde su sadece kristallerin arasına değil, kristalleri de kapsayan birim tabakaların arasına girer. Bu durum sonucunda montmorillonit, esas hacminin 20 katına kadar genişleyerek jel kıvamına gelir (Grim, 1974).

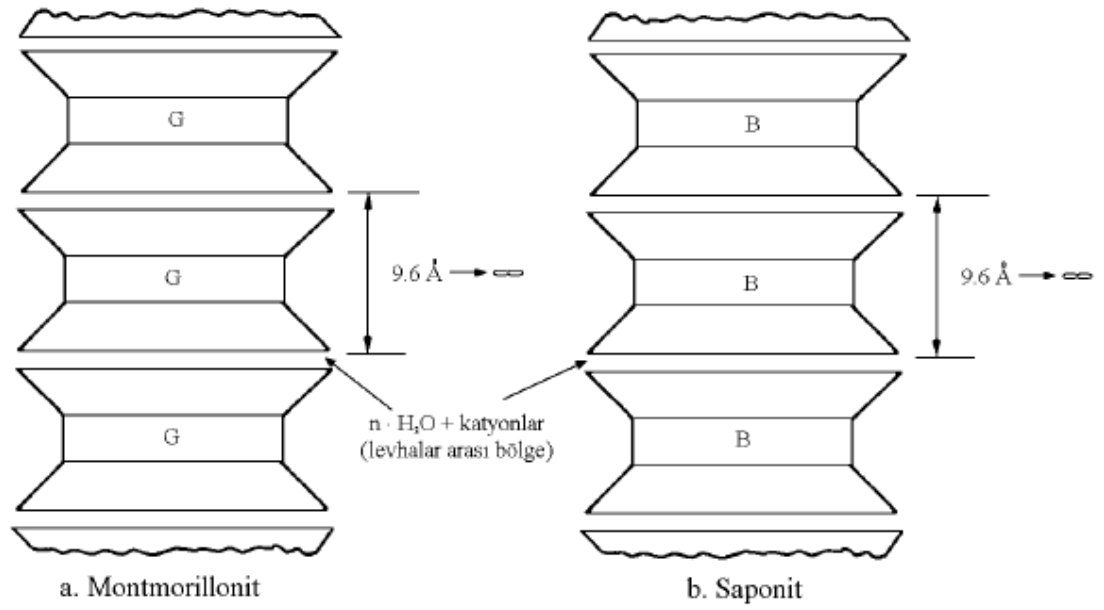
Montmorillonit, üç tabakalı tane yapısına sahip olmasından dolayı adsorbe su tabakası kalınlığı ve özgül tane yüzey alanının diğer kil minerallerine göre büyük olması nedeniyle, su tutma yetenekleri oldukça büyüktür. Bu nedenlerden dolayı bir zemin içinde % 10 seviyesinde montmorillonit bulunması bile, zeminde şişme işleminin oluşmasına neden olmaktadır (Lambe and Whitman, 1959). Şekil 2.11’de tipik bir montmorillonitin tarayıcı elektron mikroskopuyla (SEM) elde edilmiş görüntüsü verilmiştir.



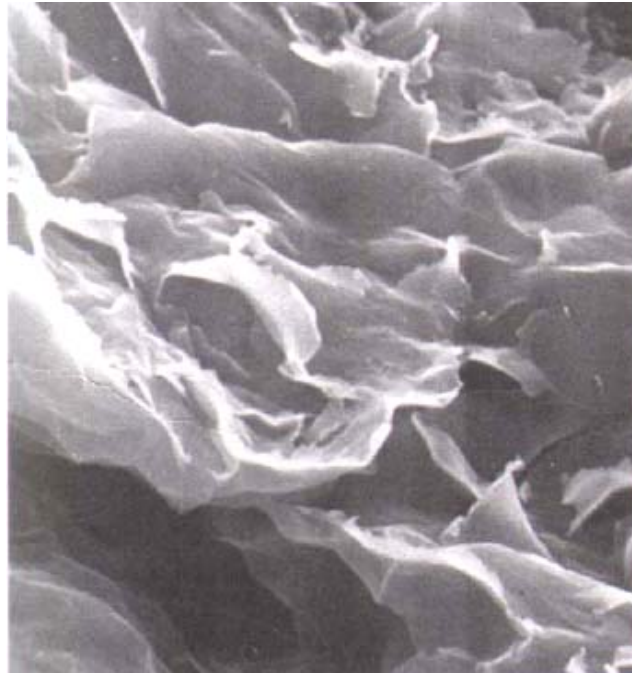
Şekil 2.8. Mika benzeri kil minerallerinin yapısı (Mitchell, 1976)



Şekil 2.9. İllitin tipik elektron fotomikrografı (7.5 μm) (Mitchell, 1976)



Şekil 2.10. Smektit minerallerin yapısı (Mitchell,1976)



Şekil 2.11. Montmorillonitin tipik elektron fotomikrografı (7.5 μm)(Mitchell, 1976)

Kaolinit, kil mineralleri arasında en düşük şişme kapasitesine sahip kildir. İllit %15. illit-montmorillonit karışımı %60-100 arasında şişme gösterebilmektedir. Ca-montmorillonit, Na-montmorillonitten daha az şişme gösterir ve şişme ancak % 50- 100 aralığında değişmektedir (Lambe and Whitman, 1959).

Mühendislik amaçları açısından kil minerallerinin tanımlanması ve değerlendirilmesine yönelik olarak literatürde değişik çalışmalar yapılmıştır. Tablo 2.1’de mühendislik amaçları için yapısal grupları temsil eden üç ana kil mineral tipinin tipik özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo 2.1. Kil minerallerinin karşılaştırmalı özellikleri (Mitchell, 1993)

Özellik	Montmorillonit	İllit	Kaolinit
Tane Boyutu (μm)	0.01-1.0	0.02-2.0	0.5-5.0
Tane Şekli	Eş boyutlu yaprak	Pul	6 köşeli pul
Dış Yüzey Alanı (m^2/g)	70-120	70-100	10-30
İç Yüzey Alanı (m^2/g)	550-650	-	-
Plastisite	Yüksek	Orta	Düşük
Likit Limit	110-710	60-120	29-70
Plastisite İndisi	51-100	34-60	26-38
Kohezyon	Yüksek	Orta	Düşük
Şişme Kapasitesi	Yüksek	Orta	Düşük
Elektrik Yüğü	0.5-0.9	1.0-1.5	0
KDK ($\text{meq}/100\text{g}$)	80-150	10-40	3-15
Özgöl Gravite	2.35-2.7	2.6-3.0	2.6-2.8
Tabakalar arası mesafe (nm)	1.0-2.0	1.0	0.7
Tabakalar arası bağ	Van der Waal's bağları (zayıf çekim kuvveti)	Potasyum iyonları	Hidrojen
Net negatif yük ($\text{cmol}_\text{c}/\text{kg}$)	80-120	15-40	2-5

2.2. TEMEL KAVRAMLAR

2.2.1. Şişme Potansiyeli

Zemin ortamında, su muhtevası ve gerilme koşullarındaki değişikliklerin bir sonucu olarak ortaya çıkan hacim artışı, şişme olarak tanımlanmaktadır. Şişme potansiyeli, genel olarak, zeminlerin şişme yeteneğini ifade eden bir kavram olarak kullanılmaktadır. Literatürde, şişme potansiyelinin belirlenmesi ve tanımlanması açısından tam bir fikir birliği bulunmamaktadır. Bununla birlikte, şişme potansiyeli; genellikle, zeminlerin hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını kapsayan bir terim olarak kabul edilmektedir (Sridharan ve diğ., 1986; Shuai, 1996).

2.2.2. Şişme Yüzdesi

Şişme yüzdesi, örselenmemiş veya istenilen herhangi bir başlangıç koşulunda sıkıştırılarak hazırlanan zemin numunesinin su altında bırakılması sonucu hacminde meydana gelen artışın, başlangıç hacmine göre yüzdesini ifade etmektedir. Zemin numunesinin ıslanması (su altında bırakılması) sonrasında, yanıl deformasyonların engellenmesi durumunda (bir boyutlu ödometre koşullarında) meydana gelen düşey boy değişimi veya eksenel deformasyonların engellenmesi durumunda (üç eksenli koşullarında) meydana gelen yanıl çap değişimi şeklinde belirlenebilmektedir (Keskin ve diğ., 1992).

Bir boyutlu ödometre koşullarında, numunenin kesit alanı sabit tutulduğu için, şişme yüzdesinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır;

$$S = \frac{H_1 - H_2}{H_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.1)$$

Burada,

S - Şişme yüzdesi,

H₀ - Numunenin başlangıç yüksekliği,

H₁ - Şişme sonrasındaki numune yüksekliğidir.

Üç eksenli koşullarında numunenin yüksekliğinin sabit tutulması durumunda, yanal çap değişimi cinsinden şişme yüzdesi ise Eşitlik 2.2 kullanılarak hesaplanabilir.

$$S = \frac{D_1^2 - D_0^2}{D_0^2} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.2)$$

Burada,

S - Şişme yüzdesi,

D_0 - Numunenin başlangıç çapı,

D_1 - Şişme sonrasındaki numune çapıdır.

Literatürde, farklı araştırmacıların çalışmalarında, şişme yüzdesinin belirlenmesinde; kullanılan deney sistemi ve izlenen prosedür açısından önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda; örselenmemiş zemin numuneleri, örselenmemiş ancak havada kurutularak su muhtevası düşürülmüş zemin numuneleri yada istenilen su muhtevası ve birim hacim ağırlık koşullarında sıkıştırılarak hazırlanan zemin numuneleri kullanılmaktadır. Numuneleri istenilen başlangıç koşullarında hazırlamak için statik yada dinamik sıkıştırma yöntemleri uygulanmaktadır. Yükleme koşulları açısından; 1 kPa, 7 kPa, 10 kPa vb. sürşarj yükleri altında veya zeminin arazide maruz kalacağı yüke eşdeğer sürşarj altında deneyler yapılmaktadır. Ayrıca, deneylerin uygulanması sırasında numuneler, tamamen su altında bırakılmakta veya kapiler yolla su emmeleri sağlanarak şişmelerine izin verilen teknikler uygulanmaktadır.

Örneğin, Holtz ve Gibbs (1956) zeminin şişme potansiyelini, bir zeminin kuru halden, 7kPa sürşarj yükü altında doymuş hale gelmesi sırasında meydana gelen toplam hacim değişikliği olarak tanımlamışlardır.

Parashar ve diğerleri (1969), Singapur bölgesindeki montmorillonit ve kaolinit içerikli sıkıştırılmış zeminlerin şişme potansiyelinin belirlenmesi amacıyla şişme deneyleri yaparak zamanla düşey şişmede meydana gelen yıpranma etkilerini araştırmışlardır. Serbest şişme deneyi, ödometre sisteminde optimum su muhtevasında ve 1.5 kPa'lık basınç altında yapılmıştır. Kür süresinin şişme potansiyeli üzerindeki etkisini araştırmak

için standart kompaksiyon deneyi ile sıkıştırılan numuneler 0.1.3.7.25 ve 255 günlük zaman aralıklarında alüminyumlu levha ile kaplanmış, parafinlenmiş ve nemli bir odada bekletilmiştir. Bu bekleme sürelerindeb sonra numuneler 24 saat şişmeye bırakılmıştır. 21 günlük kür süresinden sonraki sürelerde başlangıç şişme şişme miktarında azalmalar görülmüştür.

Seed ve diğ., (1962) şişme yüzdesini, standart AASHTO su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış zemin numunesinin, ödometre koşullarında 7 kPa sürşarj basıncı altında, su altında bırakılması sonucu meydana gelen düşey boy değiştirmesinin başlangıç numune yüksekliğine oranı olarak tanımlamışlardır. Snethen (1984) ise şişme yüzdesini, örselenmemiş zemin numunesinin ödometre koşullarında, arazide maruz kalacağı yüke eşdeğer sürşarj yükü altında ıslatılması sonucunda nihai denge doygunluk durumuna kadar meydana gelen hacim değişiminin, başlangıç numune yüksekliğine oranı olarak tanımlamıştır.

2.2.3. Şişme Basıncı

Şişen zeminlerin, suyla temasa geçmeleri sonucunda, matris emmedeki azalma nedeniyle ortaya çıkan hacim artışları engellenmeye çalışıldığında, bir basınç meydana gelmekte ve bu basınç şişme basıncı olarak isimlendirilmektedir. Sridharan ve Choudhury (2002) şişme basıncını, kilin su veya elektrolit absorbe etmesine izin verilmesi halinde, kil – su sistemini istenen boşluk oranında tutmak için gerekli basınç olarak tanımlamışlardır. Zeminin şişme basıncının, üzerindeki yapının ağırlığından daha büyük olduğu ve yapının farklı zemin tabakaları üzerine oturduğu durumlarda, mühendislik yapılarında önemli hasarlar meydana gelmektedir. Şişen zeminler üzerinde yapılmış olan, karayolu ve havaalanı kaplamaları, hafif binalar, istinat yapıları, bahçe duvarları, boru hatları vb. yapılarda, yüksek şişme basınçları nedeniyle önemli zorlanmalar, çatlaklar, kırılmalar meydana gelebilmektedir. Wooltorton (1954) çalışmasında, Nijerya’da 1100 kPa (110 t/m²) büyüklüğünde şişme basınçları ölçtüğünü belirtmiştir (Shuai, 1996).

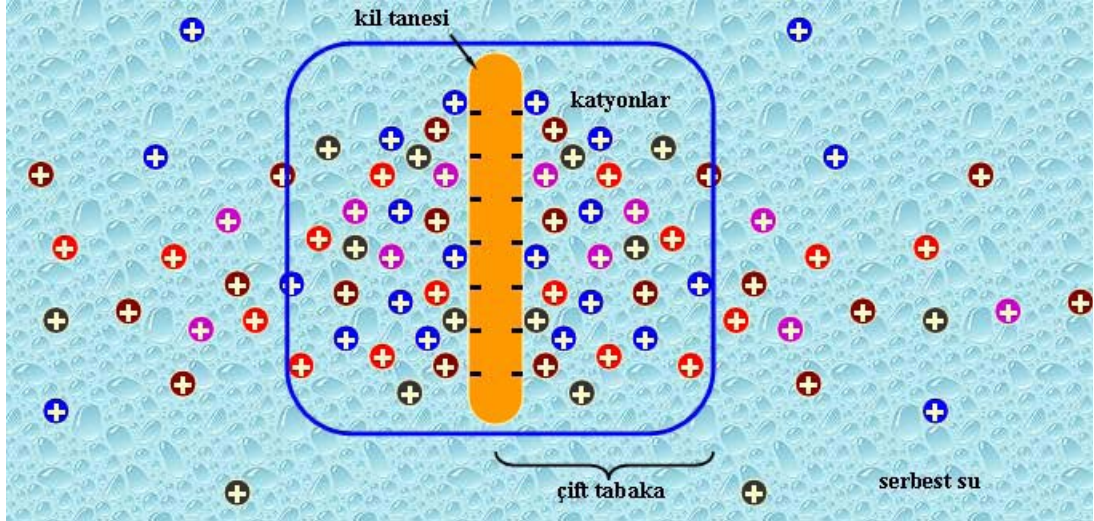
Lav ve Ansal (1991), şişen kil özelliği gösteren 63 adet örselenmemiş zemin numunesi üzerinde ödometre deney sisteminde, şişme basıncı ile zemin indeks özellikleri arasında

matematiksel ilişkiler çıkarmak amacıyla istatistiksel analizler yapmışlardır. Analizler sonucunda şişme basıncı ile zemin özellikleri arasında yok denecek kadar az korelasyonlar bulmuşlardır. Sonuç olarak, kilerin şişme özelliğine doğrudan etki eden kil mineral yapısını ve su emme kapasitesini temsil edebilecek parametrelerin arazi ve laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi ve bunları kullanarak korelasyonlar geliştirmenin en doğru yol olacağı belirtilmiştir.

Ölçülen şişme basınçları ve tahmin edilen kabarma miktarı, zeminlerin şişme özelliklerini ölçmek için kullanılan yöntemden önemli ölçüde etkilenmektedir. Sridharan ve diğ. (1986), esas kil mineral tipi montmorillonit olan black cotton zeminlerinde, şişme basınçları üzerine etki eden faktörleri incelemişlerdir. Araştırmacılar, şişme basınçlarını üç farklı yöntemle (I – Serbest şişme ödometre deneyi, II – yüklü şişme deneyi, III – sabit hacim deneyi) belirlemişler ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Buna göre, I. metot şişme basıncı için en büyük değeri II. Metot ise en düşük değeri vermektedir. III. metodun ise iki metottan elde edilenler arasında bir değer verdiği gözlenmiştir.

2.3. ŞİŞME MEKANİZMASI

Kilin şişmesi esas olarak; kil yüzeyi, iyonlar ve su arasındaki etkileşim kuvvetlerinin dengelenmesi olayıdır (Mc Bride, 1989). Kil taneleri, yüzeylerinde negatif elektrik yükü olan, pozitif yüklü köşelere sahip plakacıklardır. Negatif yükler, elektriksel kuvvetler ve plakaların yüzeyine bağlı olan zemin suyundaki katyonlar ile dengededir. Şişme, zemin-su sisteminde (Şekil 2.12.) içsel gerilme dengesini bozan bir takım değişikliklerin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Sıvı miktarının veya kimyasal bileşimin değişmesi sonucunda, zemin su kimyası değişmekte ve bu durum iç kuvvetleri etkilemektedir. İç elektro-kimyasal kuvvet sistemi, zemin suyundaki kapiler gerilme (matris emme) ve dışarıdan uygulanan gerilmeler arasındaki denge bozulduğunda; denge yeniden sağlanıncaya kadar, zeminde hacim değişikliği (şişme– büzülme) meydana gelmektedir (Nelson ve Miller, 1992).



Şekil 2.12. Kil – su sistemi (Sivakugan, 2001)

İç kuvvetler, kil – su sisteminde ortaya çıkan itme ve çekim kuvvetleridir. Çekim kuvvetleri; London – van der Waals kuvvetleri, negatif ve pozitif yüklü yüzeyler arasındaki Coulomb kuvvetleri, tane – katyon – tane bağları, hidrojen bağları ve çimentolanma bağlarından ileri gelmektedir. Coulomb kuvvetleri, levhalar arasındaki mesafenin karesiyle; van der Waals kuvvetleri ise mesafenin küpüyle ters orantılı olarak değişmektedir. Çekim kuvvetleri, zemin boşluklarındaki ortamdan da (dielektrik sabiti) etkilenmektedir. İtme kuvvetleri ise, adsorbe su iyonları ve su molekülleri arasındaki çift tabaka etkileşimleri ile tane yüzeyleri ve tabakalar arasındaki katyonların hidrasyonu sırasında meydana gelen hidrasyon enerjilerinden kaynaklanmaktadır. Hidrasyon kuvvetleri, moleküler düzeydeki mesafelerde etkili olmaktadır. İtme kuvvetleri, kil mineralinin yüzeyindeki değişebilir katyonların boyutundan, değerliğinden ve zemin boşluklarındaki ortamdan (dielektrik sabiti ve boşluk suyunun elektrolit konsantrasyonu) etkilenmektedir. (Van Olphen, 1963; Mesri ve Olson, 1971; Sridharan ve diğ., 1986).

Kil mineralinin levhaları arasında bulunan adsorbe su ile kil mineralleri arasındaki etkileşim, aşağıda belirtilen birkaç farklı mekanizmayla gerçekleşmektedir (Keren ve Shainberg, 1975; Dakshanamurthy, 1978; Sposito ve Prost, 1982; Low, 1992; Komine ve Ogata, 1994.1996).

Su, kil minerallerinin negatif yüklü silikat yüzeyleriyle etkileşir ve silikat oksijenleri ile oksijen bağları meydana gelir. Su, negatif yüklü kil yüzeylerine çekilen katyonlarla etkileşir. Silikat yüzeylerindeki katyonların hidrasyonu sonucunda suyun serbest enerjisi azalır. Bu suyun aktivitesi veya kimyasal potansiyeli, serbest suyunkine eşit olana kadar, su adsorbsiyonuna ve şişmeye neden olan bir itme kuvveti oluşur.

Negatif yüklü kil yüzeylerine yaklaşıldıkça, katyon konsantrasyonu artmaktadır. Elektrostatik çekimin bir sonucu olarak, iyonların difüzyonundaki sınırlanma ve artan konsantrasyon nedeniyle, su molekülleri konsantrasyonu dengelemek için yüzeye yayılır. Suyun bu şekildeki ozmotik hareketi, bazen çift tabaka şişmesi olarak ta isimlendirilmektedir.

Şişme özelliği olmayan bir zemin veya kayaç ortamdaki şartlar ne olursa olsun şişmeye maruz kalmaz. Öte yandan şişme potansiyeli olan bir ortamın suyla temas etmesi sonucunda da ortamdaki gerilmelerin yüksek olması sebebiyle şişme olmayabilir. Bu faktörler gözönüne alınarak Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM) Şişen Kayaçlar Komisyonu, şişme mekanizmasını su içeren fiziko-kimyasal reaksiyonlar ile gerilme rahatlamasının bir kombinasyonu olarak tanımlamıştır (ISRM, 1983).

Parker ve diğerleri (1980), şişme ve su adsorbsiyon mekanizmalarını açıklamak amacıyla Ca-Montmorillonitin şişme ve toplam su adsorbsiyonuna kompaksiyon etkilerini araştırmışlardır. Ca-Montmorillonit farklı yoğunluklarda sıkıştırıldıktan sonra ıslatılmadan önce ve sonra N_2 desorpsiyonu ile kompaksiyon etkisi bulunmuştur. Toplam su adsorbsiyonu, osmotik adsorbsiyon ve toplam şişme, 0.01 N $CaCl_2$ ve 0.001 N $CaCl_2$ ile doyurulmak suretiyle bulunmuştur. Sonuç olarak, kuru statik kompaksiyonun kristal arası ve osmotik su adsorbsiyonu üzerinde az bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Kompaksiyon etkisi gözenek boyutunu azalttığı gibi sıkıştırılmış hava basınçları nedeniyle şişmede artış görülmüştür.

Sposito (1973), şişme basıncının katyonlar tarafından ortaya çıkarılan ozmotik basınçlarla ve bu nedenle çift tabaka teorisi ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte Low ve Marqheim (1979), şişme basıncının esasen tabakalar arası suyun, komşu kil tabakasının yüzeyleriyle etkileşiminin bir sonucu olarak potansiyel enerjisindeki

azalmadan ileri geldiğini ve ozmotik basınçların etkisinin düşük olduğunu öne sürmüşlerdir.

Borchardt (1989), yüksek su muhtevasına ve büyük tabakalar arası mesafeye sahip ortamlarda, çift tabaka teorisinin zemin şişmesini en iyi açıklayan teori olduğunu ileri sürmüştür. Bununla birlikte, düşük – orta tabakalar arası mesafelerde, büyük ölçüde değişen yük yoğunluklarına sahip birkaç montmorillonit, potansiyel enerji azalma teorisini destekleyen Şekilde hemen hemen aynı şişme basınçları üretmişlerdir (Viani ve diğ. 1983; Oloo ve Fredlund, 1995).

Tabakalar arası katyonların rehidrasyonu sırasında binlerce bar ($1 \text{ bar} = 1.0194 \text{ kg/cm}^2$) mertebesinde basınç meydana gelebilmektedir. Tabakalar arasına üç-dört su tabakası girdikten sonra, yani tabakalar arası mesafe 1 nm (10^{-9} m - 10 Å)'yi aştığında yüzey hidrasyonunun önemi azalmakta ve elektriksel çift tabaka etkisi en önemli şişme mekanizması haline gelmektedir (Van Olphen, 1963; Bradbury ve Baeyens, 2003).

Literatürde, zeminlerin hacim artışı ile ilgili olarak verilen diğer mekanizmalar ise; yük boşalması sonucunda kristallerin elastik esnemesi nedeniyle meydana gelen genişleme ve zeminde ıslanmanın ilerlemesi sırasında sıkışan havadaki basınçtan ileri gelen şişme olarak sıralanabilir (Terzaghi, 1927; Emerson, 1964; Parker ve diğ., 1980; 1982).

2.4. ŞİŞME DAVRANIŞINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Bir zeminin arazide şişme gösterip göstermeyeceği pek çok faktöre bağlıdır. Şişme özelliği olmayan bir zemin arazideki şartlar ne olursa olsun şişmeye uğramaz. Öte yandan şişen zeminler, zeminin başlangıçtaki fiziksel durumuna, daha sonra uğrayacağı gerilme ve su içeriği değişikliklerine bağlı olarak az veya çok ve hatta çökme gösterebilir. Bir zeminin şişme davranışını etkileyen faktörler, esasen üç farklı grupta ele alınmaktadır. Bunlar, içsel kuvvet alanının esas doğasına etki eden zemin özellikleri, içsel kuvvet sisteminde meydana gelen değişimlere etki eden çevresel faktörler ve gerilme durumu olarak sıralanabilir. Nelson ve Miller (1992) zeminlerin şişme potansiyeli üzerinde etkili olan bu faktörleri, Tablo 2.2., 2.3. ve 2.4.'te görüldüğü Şekilde özetlemişlerdir.

Tablo 2.2. Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri (Nelson ve Miller, 1992)

Faktör	Tanım
Kil mineralojisi	Zemin hacim değişikliklerine neden olan mineraller, genellikle, montmorillonitler, vermikülitler vb. minerallerdir. İllit ve kaolinitler genellikle, tane boyutlarının çok küçük olduğu durumlarda şişebilirler.
Zemin su kimyası	Artan kation konsantrasyonu ve kation değeri, şişmeyi engeller. Örneğin, zemin suyu içerisindeki Mg^{2+} kationları, Na^+ kationlarından daha az şişmeye neden olur.
Zemin strüktürü ve fabrik	Floküle olmuş killer ayrık killerden daha fazla şişme eğilimindedir. Çimentolanma şişmeyi azaltır. Yüksek su muhtevalarında sıkıştırma veya yoğurma sonucunda fabrik ve strüktür değişir. Yoğurarak sıkıştırma, düşük su muhtevalarında statik olarak sıkıştırmadan daha düşük şişme potansiyeli ile ayrık strüktürler oluşturduğu göstermiştir.
Zemin emmesi	Zemin emmesi, doymamış zeminlerde negatif boşluk basıncıyla ifade edilen, bağımsız efektif gerilme değişkenidir. Doygunluk, yer çekimi, boşluk boyutu ve şekli, yüzey gerilmesi, zemin tanelerinin elektriksel ve kimyasal karakteristikleri ve suya bağlıdır.
Plastisite	Genel olarak, geniş bir su muhtevası aralığında plastik davranış gösteren ve yüksek likit limite sahip zeminler daha yüksek şişme ve büzülme potansiyeline sahiptir.
Kuru birim hacim ağırlık	Yüksek birim hacim ağırlıklar, tanelerin birbirine yaklaştığını gösterir ki bu da taneler arasında daha büyük itki kuvvetleri ve daha yüksek şişme potansiyeli anlamına gelir.

Tablo 2.3. Şişme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler (Nelson ve Miller, 1992)

Faktör	Tanım
Başlangıç nem durumu	Kurumuş şişebilen bir zeminin suya eğilimi veya emmesi, yüksek su muhtevastaki aynı zeminden daha fazladır.
Nem değişimleri	Nemdeki değişiklikler, esas olarak iklim, yeraltı su seviyesi, drenaj ve yapay su kaynakları, bitkiler, permeabilite ve sıcaklıktan etkilenir.

Tablo 2.4. Gerilme koşullarının şişme potansiyeli üzerindeki etkisi (Nelson ve Miller, 1992)

Faktör	Tanım
Gerilme tarihçesi	Aşırı konsolidasyon oranı, tekrarlı ıslanma-kuruma ve yaşlanmanın, şişme üzerinde önemli etkileri vardır.
Arazi şartları ve zemin profili	Bir zemindeki başlangıç gerilme durumunun, şişme potansiyeline sahip tabakaların yeri ve kalınlığının, zeminin şişmesi üzerinde önemli etkileri vardır.
Yükleme	Sürşarj yükü, taneler arası itki kuvvetlerini dengelemeye çalışır ve şişmeyi azaltır.

2.4.1. Kil Mineralojisi

Killer, tane boyutları 2 mikron veya daha küçük olan, hidratlı alüminyum veya magnezyum silikatlardan oluşan ikincil minerallerdir. Şişen killer, bol miktarda silikat

mineralleri içeren, bazik – ultra bazik volkanik kayaçların, metamorfik kayaçların, kumtaşı ve şeyllerin atmosfer etkilerine maruz kalması, oksidasyonredüksiyon, hidrasyon-dehidrasyon, iyon değişimi, taşınma vb. jeolojik süreçler sonucunda meydana gelmektedir (Keller, 1964; Van Der Merwe 1964; Shi ve diğ. 2002).

Yüzey aktivitelerinin ve moleküler yapılarının bir sonucu olarak; kil mineralleri, yüzeylerine dipolar su moleküllerini ve çeşitli katyonları çekme kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle, şişme yeteneği, kil mineral tipine ve mevcut değişebilir katyona önemli ölçüde bağlıdır. Farklı kil mineralleri, strüktürlerindeki ve tabakalar arası bağlanmalarındaki değişiklikler nedeniyle farklı şişme potansiyelleri gösterirler. Smektit ve vermikülitler, ıslanma ve kuruma sonucunda büyük hacim değişimlerine neden olurlar. Bu hacim değişimleri, illitlerde orta, kaolinitlerde ise daha düşük seviyededir (Head, 1992; Ohri, 2003).

Verwey ve Overbeek (1948), çalışmalarında, elektriksel çift tabaka içindeki ve dışındaki iyonların konsantrasyonundaki farklılıklardan dolayı artan ozmotik basıncın; montmorillonitlerin şişme miktarının, diğer kil minerallerine oranla çok daha fazla olmasına neden olduğunu belirtmişlerdir (Sridharan ve Choudhury, 2002). El-Sohby ve Mazen (1983) zeminlerin şişme davranışı üzerinde, mineralojik özelliklerin etkisini vurgulamışlardır. Araştırmada, kilin mineralojik özelliklerinin belirlenmesinde; serbest şişme indisi ve aktivitenin dolaylı yöntemler olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Schafer ve Singer (1976) şişme potansiyeli açısından kil tipinin, kil yüzdesine göre daha önemli bir parametre olduğunu belirtmiştir. Karathanasis ve Hajek (1985), smektit miktarının, laboratuarda ölçülen şişme potansiyeli üzerinde etkin bir zemin parametresi olduğunu vurgulamışlardır. Chen (1988) şişme miktarının, şişmeye izin verilen süre ve kilin orijinine bağlı olduğunu ifade etmiştir.

Kaczynski ve Grabowska-Olszewska (1997), Polonya’da bulunan kil gruplarının şişme davranışını değerlendirerek; killerin orijinlerinin, stratigrafik pozisyonlarının, litolojilerinin ve mineral bileşimlerinin şişme davranışı üzerindeki önemini vurgulamışlardır.

Azam (1998; 2003), doğal kalkerli şişen zeminlerin içerdikleri kalsiyum sülfat formlarının (jips, basanit ve anhidrit) ve miktarlarının, şişme davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kilin bileşimindeki kalsiyum sülfat miktarının artmasıyla, şişme potansiyelinin azaldığını ve bu etkinin jips içeren zeminlerde daha belirgin olduğunu ifade etmiştir.

2.4.2. Zemin Suyunun Kimyasal Bileşimi

Zemin suyu kimyası, şişme potansiyeli miktarı açısından önemlidir. Sodyum, kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi tuz katyonları, zemin suyu içerisinde çözünür. Bu katyonlar, negatif elektriksel yüzey yüklerini dengelemek için kil yüzeyleri tarafından adsorbe edilebilen yer değiştirebilir katyonlardır. Bu katyonların hidratasyonu sonucunda, emici kuvvetler kil kristalleri tarafından kullanılır ve kil partikülleri arasında büyük miktarda su toplanmasına sebep olur. Killer için adsorbe su tabakasının kalınlığı; yapısal gelişim, permeabilite ve kıvam limitlerine ilaveten, şişme basıncı ve dayanım gibi fiziksel ve mekanik özellikleri kontrol eden en önemli faktörlerden biridir. Killerin fiziksel özellikleri taneler ve su ile su ve hava arasında gelişen aktiviteye bağlıdır. Su, adsorbe moloküller ve serbest su molokülleri olarak sınıflandırılabilir. Tane yüzeylerine su moloküllerinin adsorpsiyonu, direkt olarak killerin şişme ve emme özelliklerini etkiler (Nelson ve Miller, 1992).

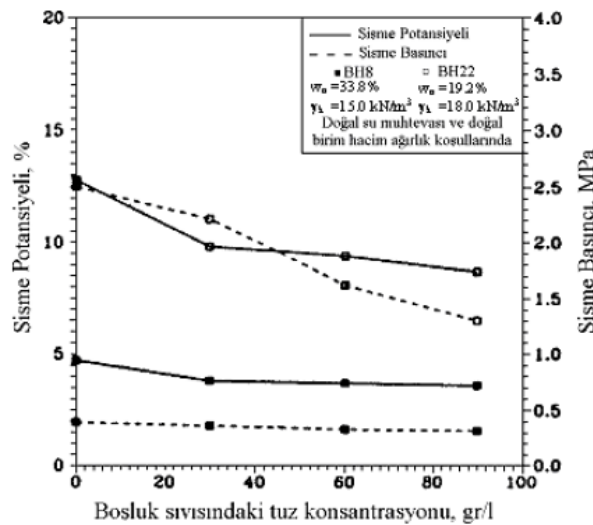
Boşluk suyunda elektrolit bulunması, kil tanelerinin yüzeylerinde değişimlere neden olmaktadır. Boşluk suyunda tuz konsantrasyonunun artması sonucunda, taneler hızla topaklanmakta ve dolayısıyla tane boyutu artmaktadır. Topaklanan tane boyutunun artmasıyla toplam yüzey alanı ve bunun sonucunda absorbe edilen su miktarı azalmaktadır. Dolayısıyla şişme potansiyeli azalmaktadır. Ayrıca, kil yüzeylerindeki katyonlar ile boşluk suyunda bulunan katyonlar arasında katyon değişimi meydana gelmektedir. Bu durum levhalar arasına su girişini engelleyerek, şişme yeteneğinin azalmasına neden olmaktadır (Mowafy ve diğ., 1985).

Boşluk sıvısının iyonik konsantrasyonu ve boşluk sıvısındaki iyonların değeri, bir kilin hacimsel davranışını önemli ölçüde etkileyen iki önemli kimyasal değişimdir. İyonik konsantrasyonun artması sonucunda, ozmotik basınç farkında bir azalma meydana gelir. Böylelikle, çift tabaka bölgesindeki su dışarı çıkmaya başlar. Çift

tabakadan suyun akışı, birim tabakalar arasındaki mesafenin azalmasına ve kilin sıkışmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, boşluk sıvısındaki iyonik konsantrasyonun azalması sonucunda kil sistemi şişmektedir. Boşluk sıvısındaki iyonların değeri ile çift tabaka kalınlığı ters orantılıdır. Boşluk sıvısında daha düşük değeri katyonların olması durumunda çift tabaka kalınlığı artmakta ve bu durum da zeminin şişmesine neden olmaktadır (Di Maio, 1996).

Yong ve Warkentin (1975) özellikle, tek değeri katyonlara sahip yüksek şişme potansiyeli bulunan killerde, boşluk sıvısındaki tuz konsantrasyonundaki artışın şişme potansiyelini önemli ölçüde azalttığını vurgulamışlardır. Bununla birlikte, Basma ve Al-Sharif (1994) çalışmalarında, boşluk sıvısındaki tuz konsantrasyonu belli bir değeri aştıktan sonra, şişme potansiyeli üzerindeki etkisinin azalma eğiliminde olduğunu vurgulamışlardır. Bu durum Şekil 2.13.' de grafik olarak gösterilmiştir.

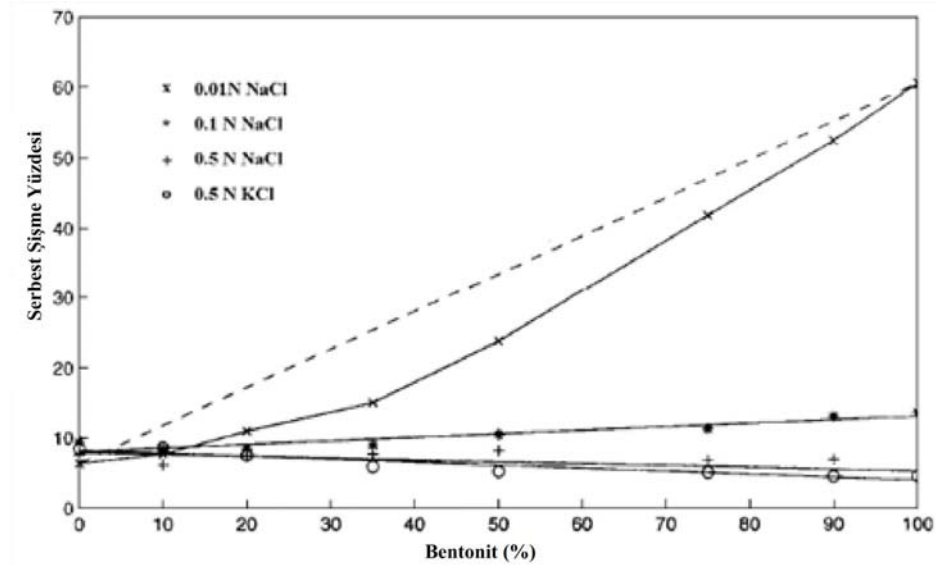
Sridharan ve diğ., (1990), serbest şişme indisi deneyleri sırasında, boşluk sıvı elektrolit konsantrasyonundaki artışın; kaolinit zeminlerde çökelti hacminde artışa, montmorillonit zeminlerde ise tam tersi bir etkiye neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Kaolinit zeminlerde boşluk sıvı elektrolit konsantrasyonundaki artış daha topraklanmış yapıya ve bu nedenle yüksek çökelti hacmine neden olurken; montmorillonit zemin durumunda elektriksel çift tabaka kalınlığının azalmasına ve bu nedenle daha küçük çökelti hacmine neden olmaktadır.



Şekil 2.13. Boşluk sıvısındaki tuz konsantrasyonunun şişme potansiyeli ve şişmebasıncı üzerindeki etkisi (Basma ve Al-Sharif, 1994)

Sivapullaiah ve Savitha (1999), illit – bentonit karışımlarının likit limit, plastisite indisi ve serbest şişme indisi değerlerinin, farklı elektrolit çözeltilerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Araştırmada boşluk sıvısı olarak, 0.1 N NaCl, 0.5 N NaCl ve 0.5 N KCl elektrolit çözeltileri kullanılmıştır. Saf suda bentonit tanelerinin çökmesi uzun zaman aldığından, denge çökelti hacminin elde edilmesinde, su yerine 0.01 N NaCl kullanıldığı belirtilmiştir. Karışımındaki bentonit oranı ile farklı elektrolit çözeltilerinde elde edilen serbest şişme boşluk oranı ilişkisi, Şekil 2.14.'de görülmektedir.

Araştırmanın sonucunda, suda illit – bentonit tanelerinin etkileşmesi nedeniyle, beklenen modifiye serbest şişme indisinden daha küçük değerler ortaya çıkabileceği vurgulanmıştır. Sudaki elektrolit konsantrasyonunun artmasıyla illit – bentonit taneleri arasındaki etkileşim azalmaktadır. Elektriksel çift tabaka kalınlığının azalması nedeniyle bentonitin aktivitesi düşerken, illitin aktivitesi elektrolit konsantrasyonundan etkilenmemektedir. 0.5 N NaCl çözeltisinde illitin serbest şişme indisi bentonitinkinden daha büyüktür. Aynı konsantrasyondaki KCl çözeltisinde ise elektrolit konsantrasyonunun artmasının yanında, birim tabakalar arasındaki K bağlanmaları nedeniyle modifiye serbest şişme indisi değeri daha fazla azalmaktadır (Sivapullaiah ve Savitha, 1999).



Şekil 2.14. Elektrolit konsantrasyonunun illit-bentonit karışımlarının serbest şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (Sivapullaiah ve Savitha, 1999)

Jullien ve diğ. (2002), Fo-Ca kili üzerinde yürüttükleri şişme basıncı deneyleri sırasında, saf su yerine $\text{Cu}(\text{NO}_3)$ çözeltisi kullanılmasının deney sonuçları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak çözeltideki Cu iyonlarının artmasıyla kilin şişme kabiliyetinin azaldığını ifade etmişlerdir.

2.4.3. Zemin Mikrostrüktürü ve Fabrik

Brewer (1964) kil strüktürünü, zemin tanelerinin ve boşluklarının boyutu, şekli ve dizilimi olarak tanımlamıştır. Fabrik terimi ise genellikle zemin tanelerinin dizilimini ifade etmek için kullanılmaktadır.

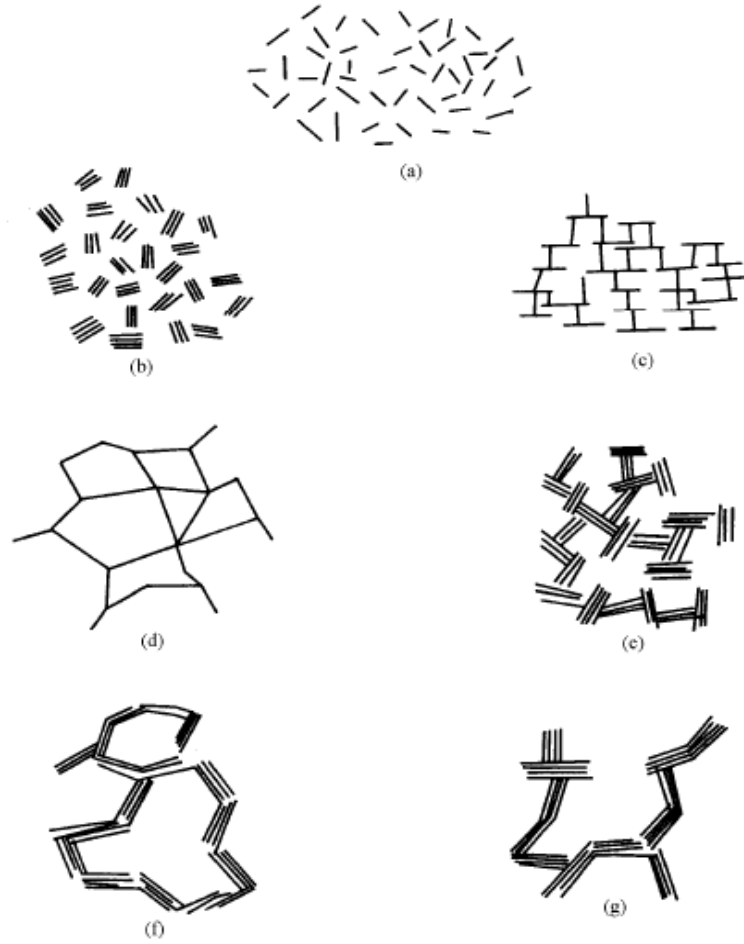
Zeminlerin mühendislik davranışı mikrofabrik, mineralojik bileşim ve taneler arasındaki kuvvetleri kapsayan mikrostrüktürden etkilenir. Zeminlerin mühendislik davranışı üzerinde mikrofabriğin etkisi, ilk olarak; aynı kilden hazırlanan eşit başlangıç koşullarına sahip iki zemin numunesinin, tane düzenlerindeki farklılıklar nedeniyle farklı şişme basınçları gösterebileceğini vurgulayan Terzaghi (1931) tarafından ortaya konmuştur (Al-Rawas, 1999; Al-Rawas ve McGown, 1999). Van Olphen (1963), killerde tane birleşmelerini; dispers (kil taneleri yüz – yüze dizilim göstermezler), kümelenmiş (birkaç kil tanesi yüz – yüze dizilir ve kümelenir), flokülleşmiş (taneler köşe – köşeye veya köşe – yüze dizilir), deflokülleşmiş (taneler arasında bir bağlılık yoktur) olmak üzere kategorize etmiştir (Şekil 2.15.).

Zemin tanelerinin oryantasyonu ve bu nedenle zemin strüktürü, zeminlerin şişme potansiyeli üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Zemin numunesinin hazırlanmasında kullanılan kompaksiyon yöntemi, zemin strüktürünü direkt olarak etkilemektedir. Statik kompaksiyon durumunda zemin strüktürü daha topaklanmış (flokülleşmiş) bir yapıya sahip iken, dinamik kompaksiyon sonucunda zemin yapısı paralel (dispers) olabilir. Floküllü strüktüre sahip bir zeminde, ayrıık strüktüre sahip zemine oranla daha fazla şişme gözlenmektedir (Gromko, 1974).

Yük boşalması veya boşluk suyu basıncındaki artış sonucunda, efektif gerilmede meydana gelen azalmaya bağlı olarak ince taneli zeminlerin şişmesi strüktür ile doğrudan ilgilidir. Örneğin, optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılan şişme

potansiyeline sahip bir zemin, aynı birim hacim ağırlıkta optimum su muhtevasının ıslak tarafında sıkıştırılan zeminden daha fazla şişebilir (Seed ve Chan, 1959).

Tane diziliminin şişme üzerindeki etkisi, kil tipine bağlıdır. Sodyum montmorilloniti gibi yüksek şişme potansiyeline sahip killer için paralel tane oryantasyonu durumunda en büyük şişme gözlenir. Bununla birlikte, Seed ve Chan (1959) en büyük şişme basıncı ve hacim artışının rasgele ve flokülleşmiş tane dizilimi durumunda meydana geldiğini belirtmişlerdir (Yong ve Warkentin, 1975).



Şekil 2.15. Killerin muhtemel tane dizilim Şekilleri: (a) Dispers ve defloküleşmiş, (b) Kümelenmiş ve defloküleşmiş, (c) Köşe- yüz flokülleşmiş ve dispers, (d) Köşe-köşe flokülleşmiş fakat ayrık, (e) Köşe-yüz flokülleşmiş ve kümelenmiş, (f) Köşe-köşe flokülleşmiş ve kümelenmiş, (g) Köşe-yüz ve köşe-köşe flokülleşmiş ve kümelenmiş (Van Olphen, 1963)

Şişme esasen kil tanelerinin yassı yüzeylerine dik doğrultuda meydana gelmektedir. Bu nedenle, şişme ve büzülme davranışı tanelerin tam yönelmiş olduğu killer için anizotropiktir. Düşey doğrultuda meydana gelen şişme ve şişme basınçları yatayda meydana gelenden daha küçüktür (Yong ve Warkentin, 1975).

Du ve diğ. (1999) sıkıştırılmış zeminlerin şişme davranışları üzerinde su muhtevası, kuru birim hacim ağırlık, mineralojik yapı ve fabrikteki değişimlerin etkisini incelemişlerdir. Örselenmemiş ve yoğrulmuş zeminlerin şişme davranışlarındaki farklılıkların, esasen sıkıştırma (yoğurma) sırasında doğal çimentolanma bağlarının kırılması ve fabriğin değişmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca sadece smektit ve illit gibi hidrofilik kil minerallerine sahip olan zeminlerin, sıkıştırma sonucunda şişebilir hale getirilebileceğini vurgulamışlardır.

2.4.4. Kıvam Limitleri

Kıvam limitleri, pek çok araştırmacı tarafından şişen zeminlerin tanımlanmasında kullanılmıştır (Seed ve diğ., 1962; Chen, 1988). Sridharan ve Rao (1988), doğal kaolinit ve montmorillonit zeminlerin şişme potansiyellerinin tahmin edilmesinde kıvam limitleri ve aktivite gibi indeks özelliklerinin kullanılmasındaki bilimsel temeli incelemişlerdir. Yazarlar, 18 farklı zemin numunesi üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda; montmorillonit içeren zeminlerde indeks özellikleri ile şişme arasında bir bağlantı olduğunu ve bu nedenle bu tür zeminlerin şişme potansiyellerinin tahmininde indeks özelliklerinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Kaolin zeminlerde ise indeks özelliklerinin elektriksel çift tabaka etkisinin bir fonksiyonu olmadığını ifade etmişlerdir. Bu nedenle de kaolin içeren zeminlerde şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde, indeks özelliklerinin kullanılmasının bilimsel olmayacağına dikkat çekmişlerdir.

Büzülme ve şişme arasında nitel bir ilişkinin var olduğu inancı, çeşitli araştırmacılar (Holtz ve Gibbs, 1956; Altmeyer, 1955) tarafından rötire limitinin zeminin şişme potansiyelini gösteren bir parametre olarak kullanılmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, literatürde şişme potansiyeli ile rötire limiti arasında güçlü ve tutarlı bir ilişkinin

bulunmadığını gösteren bir çok çalışma mevcuttur (Seed ve diğ., 1962; Snethen, 1984; Chen ve Ma, 1987; Sridharan ve Prakash, 1998).

Sridharan ve Prakash (1998) zeminlerin büzülme limitini kontrol eden mekanizmaları incelemişler ve şişme potansiyelinin esasen zemin plastisitesi ve kil mineral tipinden etkilendiğini, rötre limitinin ise farklı boyuttaki zemin tanelerinin birbirlerine göre oranları tarafından kontrol edildiğini ifade etmişlerdir. Araştırmacılar, çalışmanın sonucunda, şişmeyi ve büzülmeyi kontrol eden faktörlerin birbirinden tamamen farklı olması nedeniyle, bir zeminin şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde büzülme limitinin kullanılmasının uygun sonuçlar vermeyeceğini belirtmişlerdir.

2.4.5. Aktivite

Zemin aktivitesi genellikle, değişen nem koşulları altında zeminin su alma ve verme kabiliyeti için kullanılan bir terimdir. Kıvam limitleri, metilen mavisi absorpsiyonu ve katyon değiştirme kapasitesi gibi zeminin fiziksel özelliklerinden belirlenebilmektedir.

Skempton (1953) plastisite indisi ile kil yüzdesini, aktivite (A_c) olarak isimlendirilen tek bir parametrede birleştirmiş (eşitlik 2.3) ve killeri aktivitelere bağlı olarak üç gruba ayırmıştır: $A_c < 0.75$ ise aktif olmayan, $0.75 < A_c < 1.25$ ise normal, $A_c > 1.25$ ise aktif.

$$A_c = \frac{PI}{\text{Kil yüzdesi}} \quad (2.3)$$

Burada,

A_c - Aktivite,
 PI - Plastisite indisi,
 Kil yüzdesi - 0.002mm'den küçük tanelerin yüzdesi

El-Sohby (1981) aktivite üzerinde zeminin iri taneli kısmının dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır (eşitlik 2.4).

$$A_c = \frac{PI.(100 \pm v)}{100.(c \pm v)} \quad (2.4)$$

Burada,

A_c - Aktivite,

PI - Plastisite indisi,

C - Kil yüzdesi,

v - Doğal zeminlerde 5, yoğrulmuş zeminlerde 10 olan bir katsayıdır.

Aktif killer, genellikle yüksek şişme potansiyeline sahiptirler. Çeşitli kil mineralleri için tipik aktivite değerleri Tablo 2.5.' te verilmiştir.

Tablo 2.5. Bazı kil mineralleri için tipik aktivite değerleri

Mineral	Aktivite
Kaolinit	0.33-0.46
İllit	0.9
Montmorillonit (Ca)	1.5
Montmorillonit (Na)	7.2

El-Sohby ve Rabba (1981), içerisinde farklı oranlarda iri tanelere sahip iki kil zemin için, Eşitlik 2.3 ile hesaplanan aktivite değerleri birbirlerine yakın olmasına rağmen (0.89 ve 0.98) şişme yüzdelerinin büyük ölçüde farklı olduğunu (%100 ve %150) vurgulamışlardır. Bununla birlikte, eşitlik 2.4 ile belirlenen aktivitenin (0.73 ve 1.52) kil mineralini ve şişme potansiyelini daha iyi yansıttığı belirtilmiştir.

Aktivite bir çok araştırmacı tarafından zeminlerin şişme potansiyelini tahmin etmek için kullanılmıştır. Parker ve diğ. (1977) hem montmorillonitlerde hem de karışık mineralojiye sahip killerde aktivitenin çok muğlak bir değer olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, Schreiner (1988) aktivite ile şişme – büzülme potansiyeli arasında kararlı bir ilişki olduğunu gözlemiştir.

2.4.6. Kil Yüzdesi

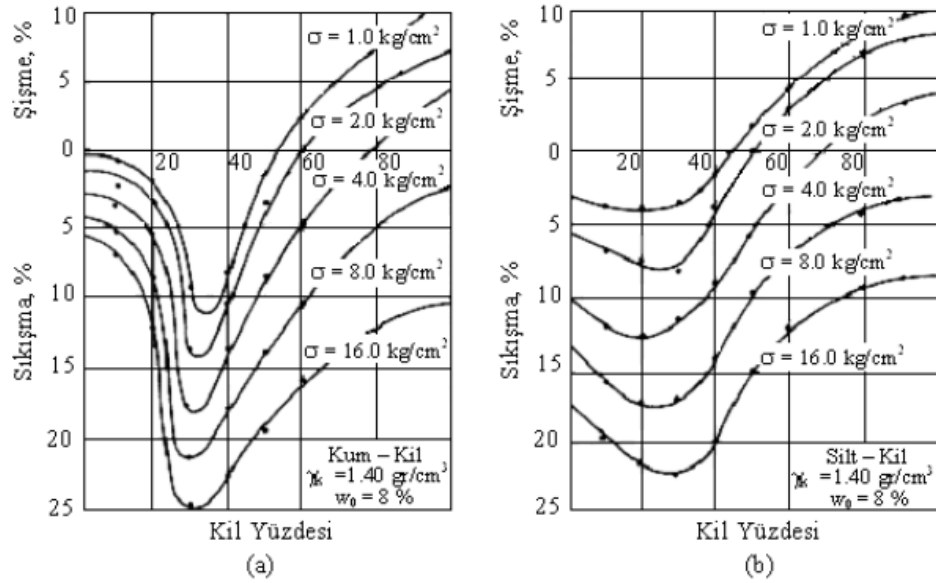
Kil yüzdesindeki artış veya iri tanelerin yüzdesindeki azalma, zemin içerisinde bulunan kapiler kanalların küçülmesine ve bunun sonucunda zemin emmesinin artmasına neden olmakta ve böylece zeminin şişme potansiyeli artmaktadır (Basma ve Al-Sharif, 1994).

Holtz ve Gibbs (1956) zeminlerin şişme potansiyelleri ile kil yüzdesi ve plastisite indisini ilişkilendirmişlerdir. Anderson ve diğ. (1973) kurak bölgelerdeki zeminlerde, lineer genişleyebilirlik katsayısı (COLE) ile ölçülen şişme potansiyelinin, kil yüzdesi ve değişebilir sodyum oranına bağlı olarak değişimini incelemişlerdir. Mc Cormack ve Wilding (1975) tüm diğer parametreleri sabit tutarak zemin şişmesi ile kil içeriği arasındaki ilişkiyi incelemişler; illitin baskın olduğu zeminlerde, kil yüzdesinin şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde güvenilir bir parametre olduğunu vurgulamışlardır. Schafer ve Singer (1976) şişen kil yüzdesinin, zeminin şişme potansiyelindeki değişimin büyük kısmını açıkladığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, Yule ve Ritchie (1980) ve Gray ve Allbrook (2002) ise kil yüzdesi ve zemin şişmesi arasında bir ilişki olmadığını belirtmişlerdir.

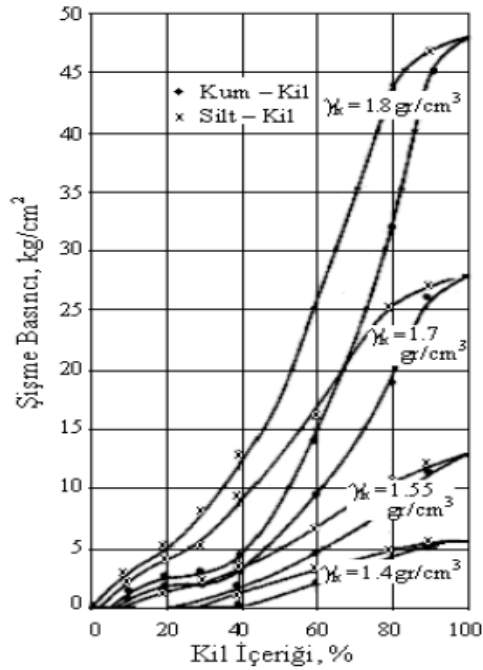
Sivapullaiah ve diğ. (1996) mineralojik bileşim ve kil yüzdesinin yanında, şişmeyen kısmın boyutunun zeminlerin şişme davranışı üzerinde önemli rol oynadığını vurgulamışlardır. Aynı miktarda şişen kil içeren karışımlar için, toplam şişmenin şişmeyen kısmın boyutundaki artış sonucunda önemli ölçüde azalacağını ileri sürmüşlerdir. Alawaji (1999) sıkıştırılmış bentonit-kum karışımlarının şişme ve sıkışabilirlik karakteristiklerini incelediği araştırmada, şişme potansiyelinin; bentonit yüzdesi ile arttığını ve tabakalar arası katyonların değeriyle azaldığını belirtmiştir. Kil tipi, yüzdesi ve kullanılan sıkıştırma yönteminin, dolayısıyla da zemin fabriğinin önemini vurgulamıştır.

El-Sohby ve Rabba (1981) kil yüzdesinin ve iri taneli kısmın tipinin şişme potansiyeli üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, farklı oranlarda kum ve silt ile karıştırdıkları kil numunesi üzerinde ödometrede şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri yapmışlardır. Zeminlerin şişmesini etkileyen temel faktörlerin; başlangıç su muhtevası, kil minerali tipi ve miktarı, başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve iri taneli kısmın yüzdesi olduğunu vurgulamışlardır. Şekil 2.16.' da, iki farklı zemin için kil yüzdesinin, hacim değiştirme

davranışı üzerinde etkisi, Şekil 2.17.' de ise kil yüzdesinin, şişme basıncı üzerindeki etkisi görülmektedir. El-Sohby ve Mazen (1983) mineralojik kompozisyonun (kil mineral tipi ve miktarı , değişebilir iyonlar) zeminlerin şişme davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir.



Şekil 2.16. Kil yüzdesinin şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (a) Kum-kil karışımı (b) Silt-kil karışımı (El-Sohby ve Rabba, 1981)



Şekil 2.17. Kil yüzdesinin şişme basıncı üzerindeki etkisi (El-Sohby ve Rabba, 1981)

2.4.7. Özgül Yüzey Alanı

Kil Tanelerinin spesifik yüzey alanı Tane davranışına etki eden en önemli özelliklerden birisidir. Bunun nedeni,

1. Flokulasyon, dispersiyon ve iyon değişimi spesifik yüzey olayına bağlıdır.
2. Spesifik yüzey alanı, kil mineralinin Tane çapına ve şekline bağlıdır.
3. Çift tabaka kalınlığı kil Tanesinin yüzey alanına direk olarak bağlıdır. Çift tabaka kalınlığı yüzey alanı arttıkça artmaktadır (Braja, 1990).

Kil mineralinin boyutu küçüldükçe, özgül yüzey alanı ve bunun sonucunda şişme potansiyeli artmaktadır. Tablo 2.6.' da bazı kil minerallerinin çap, kalınlık ve özgül yüzey alanı değerleri verilmiştir.

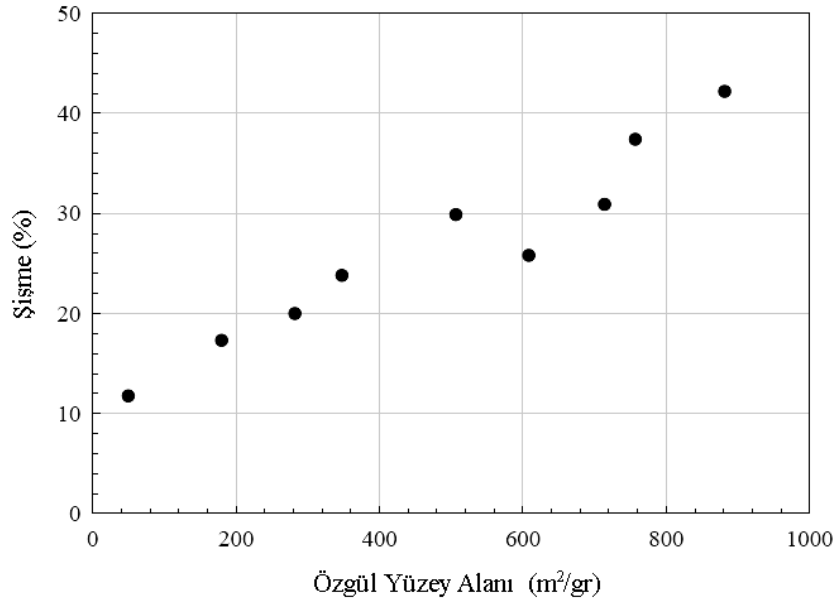
Tablo 2.6. Özgül yüzey alanının kil mineralinin cinsi ve boyutuna bağlı olarak değişimi (Holtz and Kovacs, 1981)

Mineral	Kalınlık (nm)	Çap (nm)	Özgül Yüzey Alanı (m ² /gr)
Montmorillonit	3	10-1000	800
İllit	30	10000	80
Klorit	30	10000	80
Kaolinit	50-2000	30-4000	10-30

1nm=10⁻⁹ m= 10 Å

Özgül yüzey alanındaki değişim; su tutma, plastisite ve şişme potansiyeli gibi özellikler açısından kil mineralleri arasındaki farklılıkların büyük bir kısmını açıklayabilir. Smektit kil mineralleri yüksek plastisiteye, yüksek aktiviteye ve yüksek şişme-büzülme potansiyeline sahiptir. İllit ve kaolinit gibi diğer kil mineralleri daha düşük plastisite ve şişme potansiyeline sahiptir (Yong ve Warkentin, 1975; Entwisle ve Kemp, 2003).

Killerin şişme potansiyeli ile özgül yüzey alanı arasındaki ilişkiyi niceleyen bir çok çalışma yapılmıştır (Dos Santos ve De Castro, 1965; Ross, 1978; Low, 1980; Morgenstern ve Balasubramanian, 1980; Çokca, 2002). Grabowska-Olszewska (1970) kaolinit ve bentonit karışımlarında, şişme yüzdesi ile özgül yüzey alanı arasında Şekil 2.18.' de görülen ilişkiyi vermişlerdir.



Şekil 2.18. Özgöl yüzey alanı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişki (Grabowska-Olszewska, 1970)

Ross (1978) montmorillonitli zeminlerin şişme potansiyeli ile kil yüzdesi ve özgül yüzey alanı arasındaki ilişkileri incelemiştir. Şişme potansiyelindeki değişimin, kil yüzdesinden çok özgül yüzey alanı ile ifade edildiğini belirtmiştir.

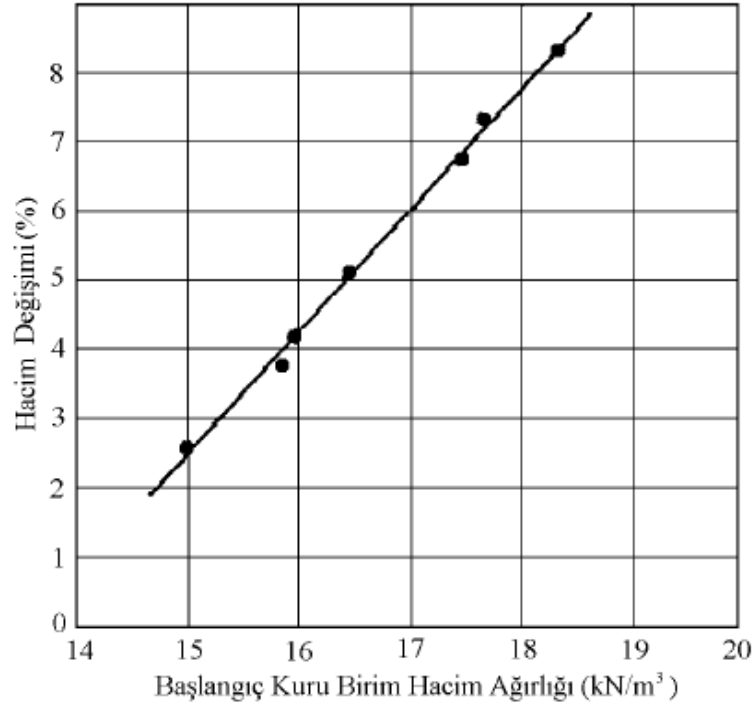
Hang ve Brindley (1970) saf smektit killerinin katyon değiştirme kapasiteleri ve metilen mavisi adsorbsiyonu ile belirlenen yüzey alanları arasında lineer bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Çokça ve Birand (1993) metilen mavisi deneyinin, bir kilin katyon değiştirme kapasitesinin bağıl bir ölçümünü verdiğini ifade etmişlerdir.

Petersen vd. (1996) özgül yüzey alanı ile zemin strüktürü, katyon değiştirme kapasitesi, su tutma ve doymun hidrolik iletkenlik arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Hem katyon değiştirme kapasitesi (CEC) hem de zemin emmesinin -15 bar olduğu durumdaki su muhtevasının, özgül yüzey alanı ile iyi bir ilişkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır.

2.4.9. Kuru Birim Hacim Ağırlık

Sabit su muhtevası koşulları altında, zemin numunesinin kuru birim hacim ağırlığı arttıkça şişme yüzdesi ve şişme basıncı artmaktadır (Basma ve Al-Sharif, 1994). Kuru birim hacim ağırlık ile şişme davranışı arasındaki bu ilişki, çift tabaka teorisi yardımıyla açıklanabilir. Buna göre; zeminin birim hacim ağırlığı arttıkça, paralel plakalar

arasındaki mesafe azalmakta ve bunun sonucunda ozmotik itki ve şişme basıncı artmaktadır (Ohri, 2003). Şekil 2.19.' de başlangıç kuru birim hacim ağırlığı ile şişme yüzdesi arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2.19. Başlangıç kuru birim hacim ağırlığının şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (Holtz ve Gibbs, 1956)

Sridharan ve diğ. (1986) şişme basıncının temel olarak başlangıç kuru birim hacim ağırlığına bağlı olduğunu, başlangıç su muhtevasının etkisinin ise çok az olduğunu, belirtmişlerdir. Ayrıca şişme basıncının belirlenmesinde gerilme izinin etkisinin önemini vurgulamışlar, uygulanan farklı gerilme izleri için elde edilen sonuçların çok farklı olabileceğini ifade etmişlerdir.

Komine ve Ogata (1994) yaklaşık %48 oranında montmorillonit içeren ticari sodyum bentonit kullanarak, şişme yüzdesi ve şişme basıncı üzerinde başlangıç koşullarının etkisini incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Şişme deformasyonu – zaman eğrisinin; başlangıç kuru birim hacim ağırlığına, su muhtevasına ve uygulanan düşey basınca güçlü bir şekilde bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Şişme basıncının, kuru birim hacim ağırlık ile üstel olarak arttığını; şişme deformasyonunun ise sabit düşey basınç altında, kuru birim hacim ağırlıkla doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir.

Rahimi ve Barootkoob, (2002) çalışmalarında, İran'ın Khoozestan bölgesindeki bir sulama kanalı projesinde, zemin şişmesinden kaynaklanan hasarları incelemişlerdir. Bölgedeki zeminlerin likit limitlerinin 30 – 38%, plastik limitlerinin 8 – 16% ve aktivitelerinin 0.21 – 0.36 arasında değerler aldığı belirtilmiştir. Dolgularda yapılan incelemeler sonucunda, dolgunun uygun biçimde sıkıştırıldığı ve bazı dolgularda relatif kompaksiyon değerlerinin 1'den büyük olduğu ifade edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, düşük ve orta plastisiteye sahip zeminlerde dahi, sıkıştırma birim hacim ağırlığının yüksek ve su muhtevasının düşük olması durumunda; önemli ölçüde şişme meydana gelebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca, sıkıştırma kuru birim hacim ağırlığının %5-8 oranında azaltılıp, su muhtevasının %2-3 arttırılmasıyla, şişme potansiyelinin önemli ölçüde azaltılabileceği ifade edilmiştir.

2.4.10. Su Tutma Kapasitesi

Zeminlerin su tutma kapasitesi; belirli su muhtevasına sahip bir zeminin, boşluk suyunu adsorbe etme potansiyelini tanımlayan fiziksel bir özelliktir ve bu nedenle zeminlerin hacim değiştirme davranışıyla ilişkilidir.

Richards ve diğ. (1984) ve Justo ve diğ. (1984) başlangıç su tutma değerinin artmasıyla, toplam şişme miktarının arttığını göstermişlerdir. Brackley (1973), Gens ve Alonso (1992) başlangıç su tutma değerindeki artışın, maksimum şişme basıncında çok küçük bir artışa neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Erol ve Dhowian (1990) yüksek şişme potansiyeline sahip killi şeyl numuneleri üzerinde saykrometre tekniği ile su tutma basınçlarını ölçmüştür. Bu su tutma değerlerini kullanarak kabarma miktarını belirlemiş ve ödometre tekniğinin sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Ölçülen su tutma basınçlarından, şişme miktarının basit bir şekilde belirlenebildiğini ve değişik su muhtevalarında ortaya çıkabilecek kabarma miktarlarının hesaplanabileceğini vurgulamış; ancak su tutma basıncı yönteminin rötrelimi ile plastik limit arasındaki su muhtevalarında geçerli olduğunu ifade etmiştir.

Zeminlerin su muhtevası ile zemin su tutması arasındaki ilişki, zemin – su karakteristik eğrisi olarak isimlendirilmekte ve matris su tutma veya toplam su tutma cinsinden tanımlanabilmektedir. Zemin – su karakteristik eğrisi; doymun olmayan zeminlerde sıvı akışı, hidrolik iletkenlik, kayma mukavemeti, hacimsel deformasyon, boşluk boyutu dağılımı gibi birçok parametrenin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Krahn ve Fredlund, 1972; Fredlund ve Xing, 1994; Huang, 1994; Barbour, 1998; Likos ve Lu, 2003).

2.4.11. Su Muhtevası

Zemin numunesinin başlangıç su muhtevasının artması, hem şişme yüzdesinde hem de şişme basıncında azalmaya neden olmaktadır (Basma ve Al-Sharif, 1994).

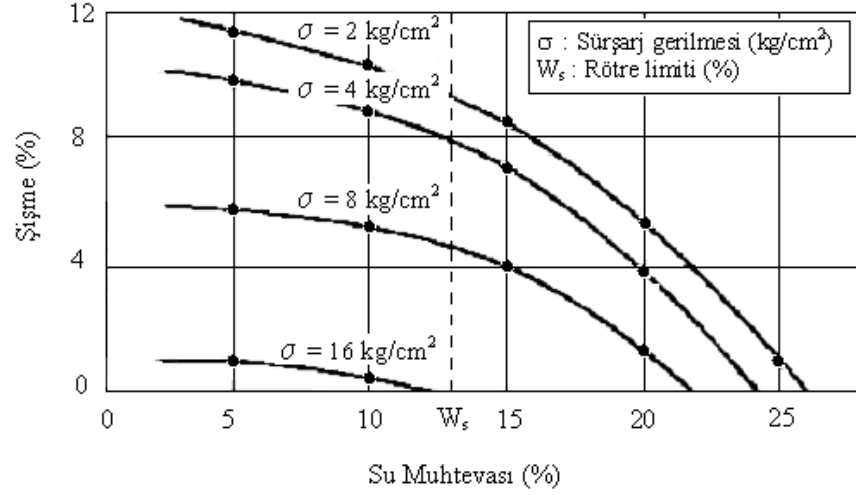
Aynı kuru birim hacim ağırlığına sahip numuneler için; başlangıç su muhtevasının artması sonucunda, başlangıç doymunluk derecesi de artacak ve zeminin su emme eğilimi azalacaktır. Bu nedenle başlangıç su muhtevası arttıkça, şişme yüzdesi azalmaktadır. Rötire limitinden düşük su muhtevaları için bu etki düşüktür. Rötire limitini aşan su muhtevalarında ise, su muhtevalarındaki artış sonucunda, şişme basıncı ve yüzdesindeki azalma daha diktir. Ayrıca, sıkıştırma su muhtevasının, fabrik üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır ve fabrikteki değişimler sonucunda şişme davranışı da değişmektedir (El-Sohby ve Rabba, 1981; Ohri, 2003).

Chen (1988), başlangıç su muhtevadaki artışla şişmenin azaldığını ancak şişme basıncının su muhtevasından bağımsız olduğunu belirtmiştir.

Day (1992) çalışmasında nihai doymunluk derecesi ve şişme arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Şişme yüzdesinin deney sonucundaki doymunluk derecesi ile doğru orantılı olarak arttığı belirtilmiştir.

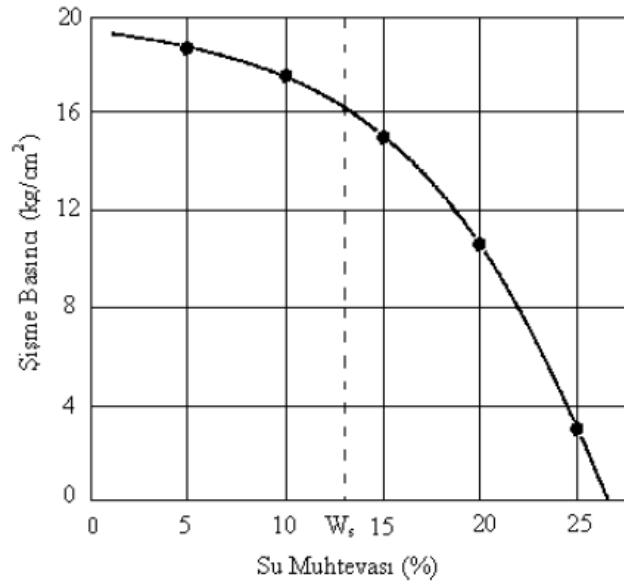
Komine ve Ogata (1994) ise, %48 oranında montmorillonit içeren sıkıştırılmış bentonitler üzerinde yaptıkları şişme deneylerinin sonucunda, maksimum şişme miktarının ve şişme basıncının, başlangıç su muhtevasından hemen hemen bağımsız olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Şekil 2.20.'de, farklı sürşarj gerilmeleri (σ) altında başlangıç su muhtevasının şişme yüzdesi üzerindeki etkisi, Şekil 2.21.'de ise başlangıç su muhtevasının şişme basıncı üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 2.20. Başlangıç su muhtevasının şişme üzerindeki etkisi (El-Sohby ve Rabba, 1981)

Şekil 2.20'da görüldüğü gibi başlangıç su muhtevası, yoğrulmuş zeminlerin şişme yüzdesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Başlangıç su muhtevasındaki artışla şişme yüzdesi azalmaktadır. Rötire limitinden (w_s) yüksek su muhtevalarında, şişme yüzdesindeki azalma eğilimi artmaktadır. Benzer davranış, şişme basıncı – başlangıç su muhtevası ilişkisinde de görülmektedir (Şekil 2.21).



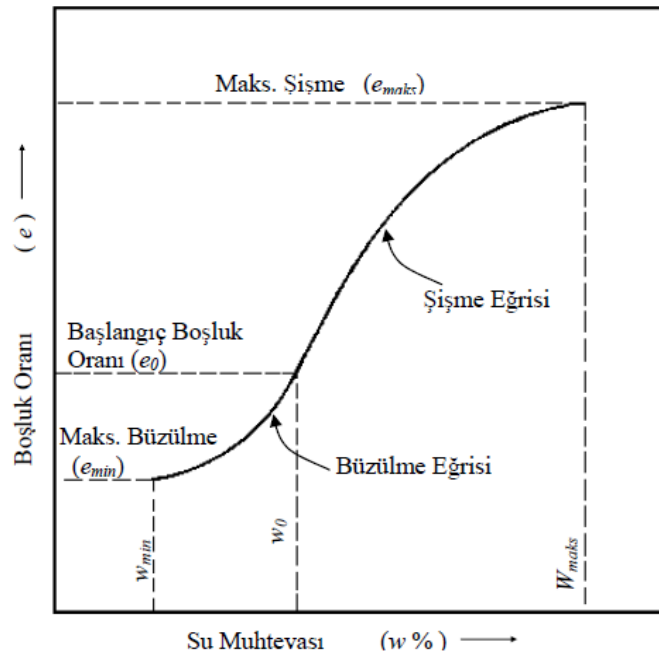
Şekil 2.21. Başlangıç su muhtevasının şişme basıncı üzerindeki etkisi (El-Sohby ve Rabba, 1981)

Hanafy (1991), kuru zeminlerinin su adsorbsiyonu nedeniyle şişmesi sırasında su muhtevası ve boşluk oranı arasındaki ilişkiyi, şekli nedeniyle, S eğrisi olarak tanımlamıştır (Şekil 2.22.). S eğrisinin genel karakteristiklerini ve belirlenmesini detaylı biçimde açıklamış ve kurumuş killerin şişme potansiyelinin değerlendirilmesi için kullanılabilecek bir şişme potansiyeli kartı vermiştir.

Jones ve Holtz (1973), su muhtevası değişimleri nedeniyle kilin hacim değiştirmesinin, zemin yüzeyinden itibaren yaklaşık 10m derinlik içinde meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Gromko (1974) ise mühendislik problemlerine neden olan çoğu değişimlerin 3m'den daha az olan derinliklerde meydana geldiğini vurgulamıştır.

2.4.13. Sıcaklık

Soemitro ve Indarto (2000) iki kil zeminin şişme karakteristikleri üzerinde sıcaklığın etkisini incelemişlerdir. Statik olarak sıkıştırılarak hazırlanan numuneler üzerinde, modifiye edilmiş bir ödometre kullanılarak 30, 50 ve 70 °C sıcaklıklarda deneyler yapılmıştır. Sıcaklığın, sıkıştırılmış kilin şişme karakteristiklerini etkilediği gözlenmiştir.



Şekil 2.22. Şişen killi zeminlerde su muhtevası – boşluk oranı ilişkisi (Hanafy, 1991)

Cho ve diğ., (2000) yüksek seviyeli radyoaktif atık depolarında tampon malzemesi olarak kullanılan bentonitlerin şişme davranışı üzerinde sıcaklığın etkisini incelemişlerdir. Farklı birim hacim ağırlıklarda sıkıştırılarak hazırlanan bentonit numunelerinin şişme basınçlarını 20-80 °C aralığında ölçmüşler ve sıcaklığın artmasıyla şişme basıncının arttığını gözlemlemişlerdir. Ancak, araştırmacılar sıcaklıktaki değişim nedeniyle şişme basınçlarında gözlenen bu artışın çok büyük olmadığını ifade etmişlerdir.

2.4.14. Kimyasal ve Organik Çevre

Kimyasal tortular taneler arasında bağlayıcı olarak görev yapabilirler. Organik malzemeler, yüzey kuvvetlerini ve su adsorbsiyon özelliklerini etkiler. Stalin ve diğ. (2003) iki farklı bentonit ve bir doğal zemin kullanarak indeks ve mukavemet özellikleri üzerinde yapay olarak hazırlanan asit yağmurlarının etkisini incelemişlerdir. Zemin numuneleri 10, 20 ve 30 günlük kür süreleri için 3:1 oranında sülfürik asit (H_2SO_4) ve nitrik asit (HNO_3) bileşimine sahip asit yağmuruna maruz bırakılmıştır. Araştırmacılar, asit çözelti kirlenmesinin süresinin artmasıyla tüm zeminlerde serbest şişme indisinin değerini arttığını ifade etmişlerdir.

2.4.15. Gerilme Tarihçesi

Şişme basıncı uygulanan gerilme izine kuvvetli şekilde bağlıdır ve elde edilen sonuçlar farklı gerilme izleri için oldukça farklı olabilir. Aşırı konsolide bir zemin, aynı boşluk oranında fakat normal konsolide zeminden daha çok şişme özelliğine sahiptir. Eğer zemine, geçmişte, anizotropik gerilme sistemleri etki etmişse, genellikle anizotropik şişme karakteristikleri gelişmektedir. Doygun olmayan bir kilin ıslanması sonucunda; uygulanan gerilme değerine, gerilme tarihçesine ve emme değişimine bağlı olarak, şişme veya göçme meydana gelebilmektedir. Bu durum aktif kil mineralleri içeren yüksek oranda şişebilen killer için bile geçerlidir (Sharma ve Wheeler, 2000; Jullien ve diğ., 2002; Ohri, 2003).

El Sayed ve Rabbaa (1986) çalışmalarında, laboratuarda ölçülen ve arazide gözlenen şişme karakteristikleri arasında bazı uyumsuzluklar olabileceğini belirtmişler ve bu farklılıkların nedenlerini incelemişlerdir. Şişme karakteristikleri üzerinde önemli

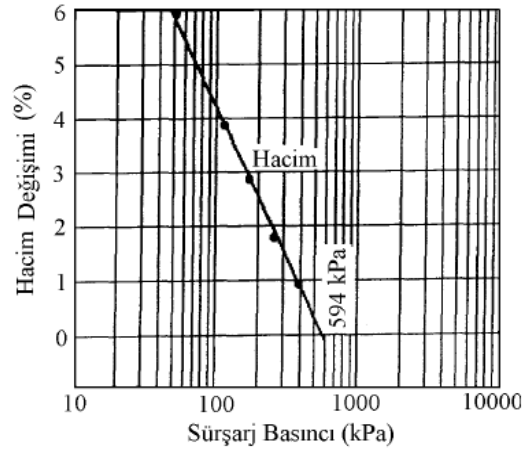
etkileri olan kil mineral tipi, katyon değiştirme kapasitesi ve kil içeriği gibi zeminin kendi karakteristiklerinin arazi ve laboratuvar da aynı etkiye sahip olduğuna dikkat çekmişlerdir. Ancak, laboratuvar da benzetimi zor olan gerilme izi, gerilme dağılımı, ölçek etkisi, yanal sınırlama vb. Çevresel faktörlerin de arazideki zeminin şişme davranışı üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır.

Keskin (1993) İstanbul Neojen kilinin şişme davranışı üzerinde, zeminin mineralojik özelliklerinin, çevresel faktörlerin ve n konsolidasyonun etkilerini incelemiştir. Ayrıca, laboratuvar da hazırlanan kil numunelerinin izotropik ve anizotropik gerilme koşulları altındaki şişme davranışını araştırmıştır. Yanal şişme davranışı modifiye edilmiş üç eksenli deney sistemi yardımıyla belirlenmiş ve yanal yönde meydana gelen şişme miktarının ihmal edilemeyecek boyutlarda olduğu ifade edilmiştir. Wong (1998), La Biche şeylleri üzerinde farklı tuz konsantrasyonlarında serbest şişme, ödometre şişme ve yüklü şişme deneyleri yapmıştır. şişme davranışının elektrolit konsantrasyonu, gerilme ve şişme tarihçesine bağlı olarak anizotropik olduğu belirtilmiştir. Farklı şişme yüzdelerine sahip şeyl numuneleri üzerinde drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmış ve şişme arttıa Young modülünün azaldığı gözlenmiştir.

2.4.16. Jeolojik Yük

Zemine uygulanan sürşarj yükünün artmasıyla şişme miktarı azalmaktadır. şişme basıncının ise uygulanan sürşarj yükünden bağımsız olduğu düşünülmektedir. Zeminin küçük bir miktar şişmesine izin verilmesi halinde ise şişme basıncı önemli ölçüde azalmaktadır (Gromko, 1974).

Holtz ve Gibbs (1956) aynı başlangıç koşullarına sahip numuneler üzerinde yaptıkları deneylerin sonucunda sürşarj yükünün artmasıyla şişmede meydana gelen azalmayı şekil 2.23.' de görüldüğü gibi vermişlerdir.



Şekil 2.23. Sürşarj basıncının aynı başlangıç koşullarına sahip numunelerin şişme yüzdesi üzerindeki etkisi (Holtz ve Gibbs, 1956)

Gilchrist (1963) ve Noble (1966) tarafından Regina kili üzerinde uygulanan yüklü şişme deneyleri sonucunda, sabit başlangıç su muhtevası ve boşluk oranı koşullarında; şişme ve uygulanan basıncın logaritması arasında lineer bir ilişki olduğu gözlenmiştir. Pidgeon (1987), bu lineer ilişkinin genel bir zemin özelliği olarak kabul edilebileceğini belirtmiştir (Shuai, 1996).

Shanker ve diğ. (1982) çalışmalarında, yoğrulmuş black cotton killeri üzerinde, çeşitli sürşarj yükleri altında serbest şişme ödometre yöntemini kullanarak şişme basıncı ölçümleri yapmışlardır. Araştırmacılar, uygulanan sürşarj yükünün büyüklüğünün, ölçülen şişme basıncının büyüklüğü üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığını ifade etmişlerdir. Justo vd. (1984) ise 5 kPa' dan daha küçük sürşarj yüklerinde, belirlenen şişme basınçlarının arttığını belirlemişlerdir.

Chen (1988) sabit su muhtevasında ve kuru birim hacim ağırlıkta hazırladığı numuneler üzerinde farklı sürşarj basınçları uygulayarak şişme deneyleri yapmıştır. Sürşarj yükünün artması sonucunda, şişme yüzdesinin azaldığını, ancak şişme basıncının sürşarjdan fazla etkilenmediğini belirtmiştir.

2.5. TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DAVRANIŞI

Şişen zeminler, inşaat mühendisliği yapıları için büyük hasara sebep olan çok önemli bir problemdir. Özellikle, birbirini izleyen yağışlı ve kurak periyotlara ve büyük yüzeysel kil depozitlerine sahip bölgelerde görülür. Önemli hasara neden olan şişen zemin probleminin başlıca sebeplerinden biri de zeminin şişme-büzülme davranışdır. Bu tür zeminler üzerine inşa edilen sığ temellerde mevsimsel değişimler neticesinde yağmurlu mevsimlerde kabarma, kurak mevsimlerde oturma olabilir. Bu zeminler üzerinde inşa edilen temellerin zeminin şişme-büzülme davranışıyla ilişkili olarak yukarı ve aşağı hareketi, yapıda yorgunluğa ve çatlamaya sebep olur. Zeminlerin şişme büzülme davranışı, özellikle şişen zeminlerde belirgin kuruma çatlaklarının oluşmasına yol açar. Aynı zamanda çatlak oluşumu, kurumaya bağlı gelişen büzülmeye ilaveten boşluk suyu kimyasının değişiminin neticesi olarak da görülebilir (Young ve Warkentin, 1996).

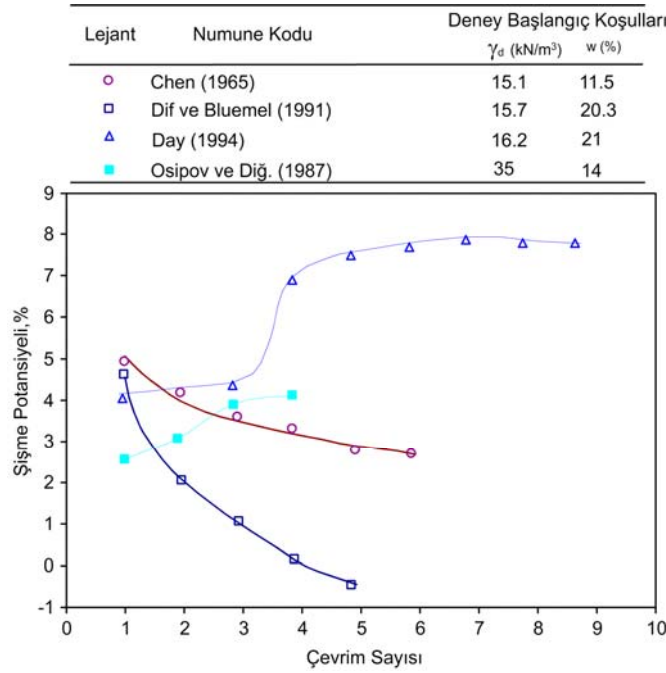
Büzülme neticesinde oluşan çatlaklar, özellikle dolgu ve toprak baraj stabilitesi için önemlidir. Sayısız küçük çatlaklar zemin agregalarının oluşmasına veya ufalanmasına neden olur. Oldukça büyük miktarda gelişen büzülme çatlakları doymuş killerin ilk kuruma aşamasında oluşur. Suyun varlığıyla oluşacak şişme miktarı, öncelikle zemin içinde bulunan kil mineral tipine bağlıdır. Montmorillonit içeren kil zeminler, tekrar ıslanma ve kuruma aşamasında neredeyse aynı ve geri alınabilir (tersinir) hacim değişimi gösterirken, kaolinit ve illit içeren kil zeminlerde ilk kurumada oldukça büyük büzülme ve takip eden ıslanma aşamalarında daha küçük ve her ıslanmada sabit değerlere ulaşan hacim değişimi görülür (Young ve Warkentin, 1996).

Killerin şişme-büzülme davranışı üzerine çalışan birçok araştırmacı, davranışın neden olduğu sorunu farklı şekilde değerlendirmiştir. Bazı araştırmacılar (Chu ve Mou 1973; Chen ve diğ., 1985; Chen ve Ma 1987; Subba Rao ve Satydas 1987; Dif ve Bluemel 1991; Al-Homoud ve diğ.,1995) kil numunelerinin tekrarlı olarak şişmesi ve başlangıç su muhtevasına gelecek şekilde büzülmeye maruz bırakılmaları durumunda her bir döngüden sonra numunenin yorgunluk işareti gösterdiğini ve bunun sonucunda da daha az şişmeye neden olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca şişme potansiyeli düşüşüne en fazla ilk döngü neden olmaktadır. Döngü sayısı arttıkça ilave düşüş, denge durumuna

varana kadar gözlemlenmiştir. Elektron mikroskopuyla taramada tekrarlı ıslanma ve kuruma sırasında devamlı olarak partiküllerin yeniden dizildikleri görülmüştür.

Chen (1965) ve Dif ve Bluemel (1991), devamlı olarak kil numunesini şişmeye tabi tutup sonrada başlangıçtaki su içeriğine kadar kurutursak her döngüden sonra genişlemenin daha az olacağını belirtmişlerdir.

Diğer taraftan Popesco (1980), Osipov ve diğ., (1987) ve Day (1994), şişme potansiyelinin ıslanma ve kuruma döngü sayısı ile artığına işaret etmişlerdir (Şekil 2.24). Konu üzerinde çalışmış olan araştırmacıların hem fikir olduğu durum ise, belirli bir şişme-büzülme döngüsünden sonra şişmenin bir denge durumuna ulaştığıdır.

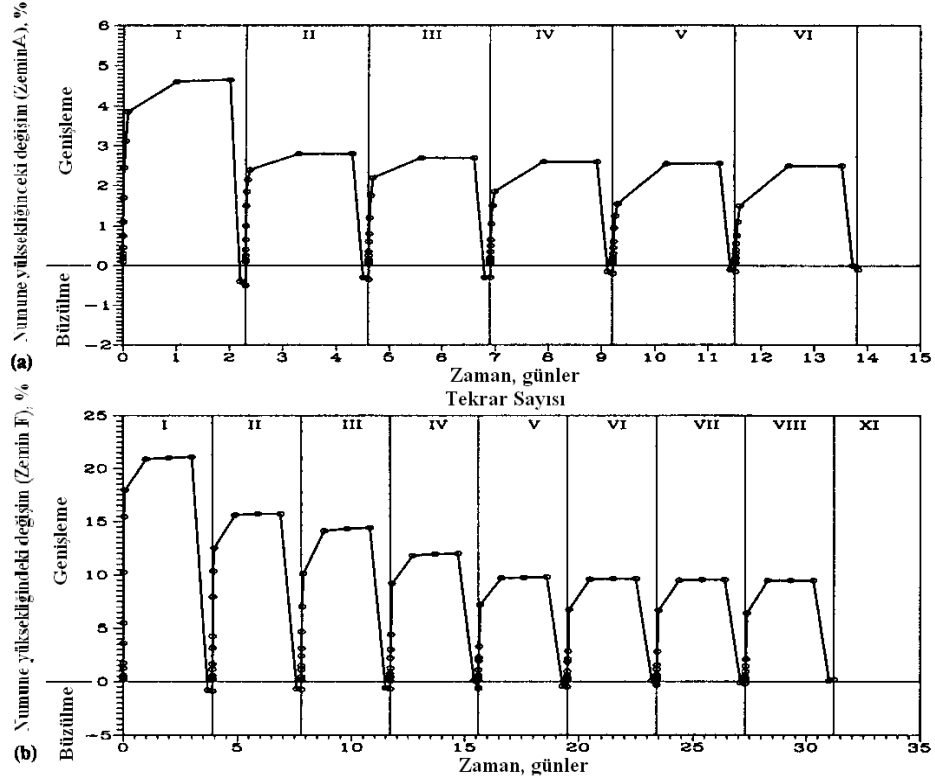


Şekil 2.24. Farklı araştırmacılar tarafından açıklanan çeşitli döngü sayısı - şişme potansiyeli ilişkisi (Al-Homoud ve diğ., 1995)

Al-Homoud ve diğ., (1995) tarafından yapılan araştırmada, killerin şişme davranışı üzerinde şişme döngüsünün etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, daha önce bölge üzerinde yapılan çalışmalardan hareketle İrbid bölgesinin muhtelif yerlerinden 6 adet şişen zemin örneği alınmıştır. Kil mineral analizinde zemin numunesinin mineral muhtevasının; %80 smektit-illit ve %20 kaolinitten oluştuğu belirlenmiştir. Laboratuvar ortamında doğal su muhtevasında sıkıştırılarak hazırlanan örnekler üzerinde şişme-büzülme döngüsü öncesinde ve sonrasında şişme potansiyeli, şişme basıncı deneyleri yapılmıştır.

Numunelerin şişme yüzdelерinin tespitinin ardından numuneler, daha sonraki şişme döngüi için başlangıç su muhtevasına gelene kadar havada kurutulmuştur.

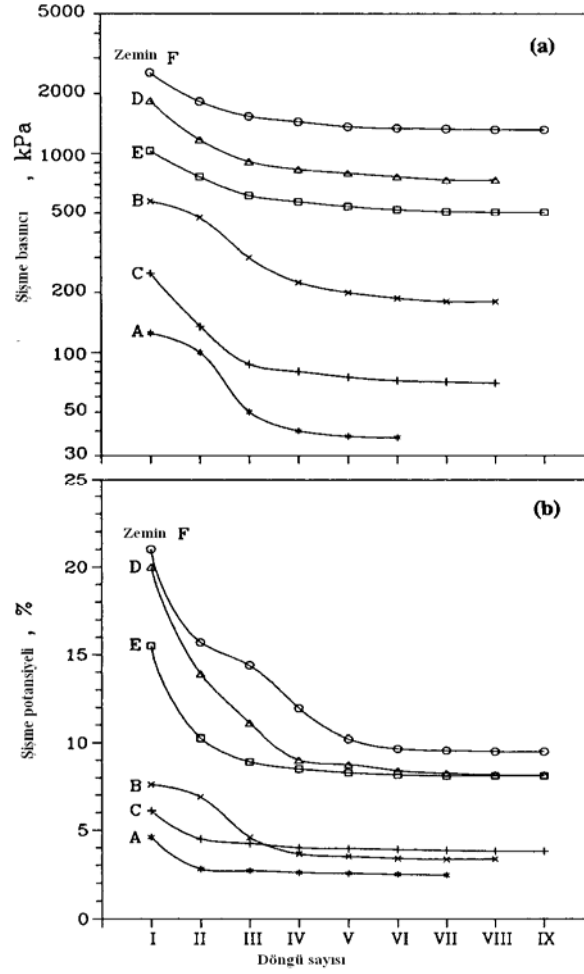
Şekil 2.25’de Al-Homoud ve diğ., (1995)’nin yaptığı araştırmada kullanılan A ve F zeminlerinin şişme ve büzülme miktarları zamanın fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Çalışma neticesinde, ilk döngüde şişme yüzdesinin maksimum olduğu, şişme yüzdesi ve şişme basıncının, döngü sayısının artmasına bağlı olarak azaldığı ve A zemini için 4. döngüden sonra, F zemini için 5. döngüden sonra sabit bir değere ulaştığı görülmektedir. Aynı eğilim diğer zeminler içinde tespit edilmiştir. Ayrıca ıslanma ve kuruma döngününün tekrarlanması ile zeminlerin her bir döngü sonrasında yorgunluk gösterdiği görülmüştür.



Şekil 2.25. Zamana Bağlı Düşey Şişme ve Büzülme: (a) Zemin A; ve (b) Zemin F (Al-Homoud ve diğ., 1995)

Şekil 2.26’da ise maksimum şişme yüzdesi ve şişme basıncı ile ıslanma-kuruma tekrar sayıları arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu şekilden de bütün çalışılan zeminler için bazı ana sonuçlar çıkarılmıştır: 1) Şişme ve şişme basıncı tekrar sayısının artmasıyla düşmektedir. 2) Şişme şişme potansiyelindeki maksimum azalma 1. döngüden sonra

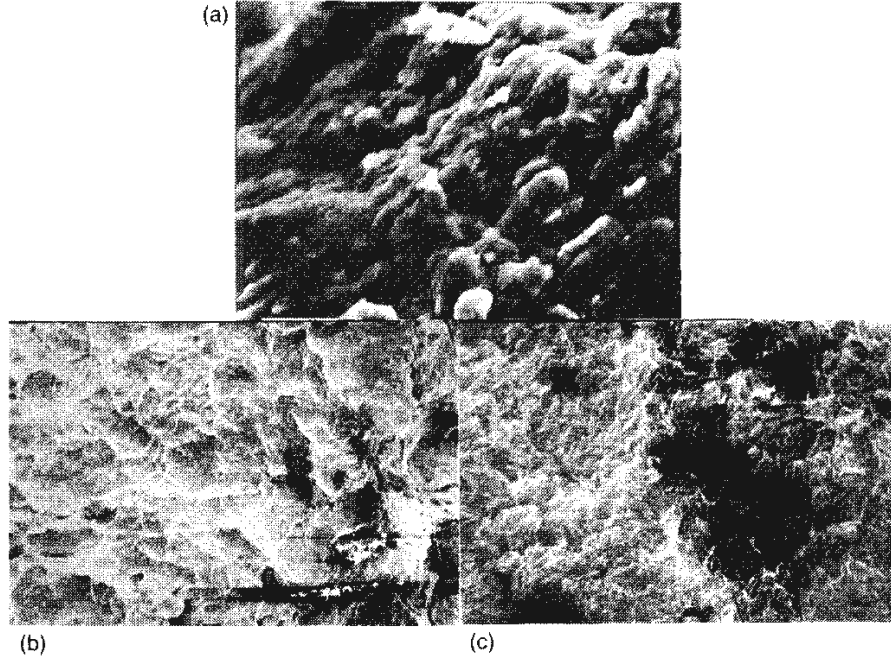
kayıt edilmiştir. 3) Değerlerdeki azalışın yatay hale gelmesi yaklaşık olarak 4 ve 5. tekrarlardan sonradır.



Şekil 2.26. Maksimum şişme yüzdesi ve şişme basıncı ile ıslanma-kuruma döngü sayıları arasındaki ilişki (Al-Homoud ve diğ., 1995)

Kilin mikro yapısının görüntü analizi çalışması elektron mikroskobu (SEM) ile yapıp, şişme özelliğinin tekrarlı ıslanma-kurumadan sonra azaldığı ve de killerin mikro yapılarının yeniden yapılandığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.27 'de F zeminini örnek olarak verilmiştir. Şekil 2.27(a)'da F zeminin düzensiz yapı karakterinin yüzeyde düşük açılı mikro kümelenme yönelimi gösterdiği görülmektedir. İlk döngüden sonra Şekil 2.27(b)'de yapısal element yöneliminin ve su emiliminin düşüklüğü sonuç olarak düşük şişme kabiliyetine neden olmaktadır. Şekil 2.27(c)'de 5. döngüde mikroyapının daha üniform olduğu sonucu olarak daha düşük su emilimi ve de daha az şişmeye neden olmaktadır.

SEM analizleri sonucunda, ıslanma ve kuruma döngü sırasında tanelerin yeniden düzenlenerek yapı bütünlüğünü artırdığı ve oluşan aglomeralaşma neticesinde su ile etkileşimde bulunacak mevcut yüzey alanlarının düşüşüne bağlı olarak da plastisite ve kil muhtevasında azalmanın olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.27).



Şekil 2.27. F zemininin mikro yapısının mikroskobik görüntüsü: (a) İlk numune; (b) ilk döngü sonrası; (c) 5. döngü sonrası (Al-Homoud ve diğ., 1995)

AL-Homoud ve diğerleri (1995) araştırması sonucunun Chen (1965) ve Dif ve Bluemel (1991)'nin sonuçlarıyla uyum gösterdiği ama Osipov ve diğ., (1987) ve Day (1994)'in sonuçları ile tutarsızlık içinde olduğu görülmüştür.

Allam ve Sridharan (1981) kuruma ve ıslanmanın killerin kesme kuvveti üzerine etkisini çalışmışlardır. Tekrarlı ıslanma-kurumadan dolayı meydana gelen birleştirici kuvvetlerin sıkı kilin kesme kuvvetini arttırdığı sonucuna varmışlardır. Efektif kohezyonun tekrarlı ıslanma-kuruma sayısının artmasıyla arttığı bulunmuştur.

Gizienski ve Lee (1965) önceden tahmin edilen şişme miktarına karşın laboratuvar testleri şişme yüzdesinin fazla tahmin edildiğini söylemişlerdir. Day (1992) bunun nedeninin geçen süre zarfında kür (yaş) etkisi olabileceğini öne sürmüştür.

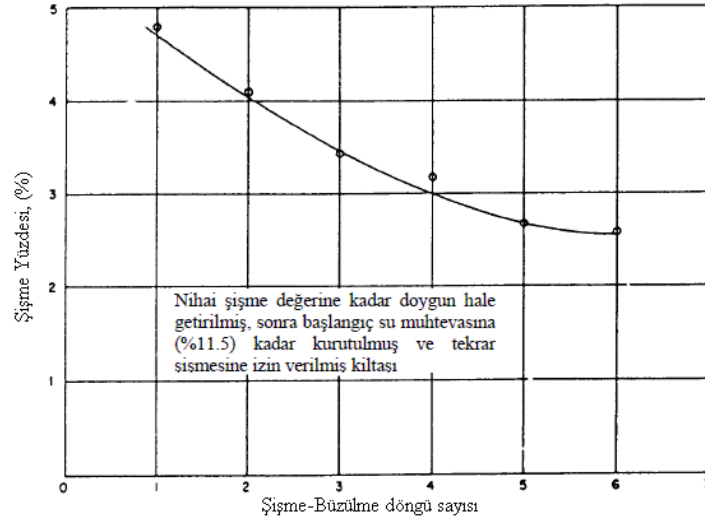
Gromka (1974) genişleyen zeminin kabarmasını kontrol etmenin en pratik ve en ekonomik yollarından birinin kompaksiyon kontrolü olduğunu önesürmüştür. Bu çalışmanın sonucu göstermiştir ki 21% su içerisinde siltli kil sıkıştırılmış, ilk genişleme değeri düşük çıkmıştır.

Holtz ve Gibbs (1956) eğer bir kil optimum ıslak su içeriğinde kompakte edilirse aynı zeminin kuru optimumda kompakte edilmesine nazaran ilk şişme yüzdesinin daha az olacağını göstermiştir. Bu davranış genişleyen zeminin etkilerini azaltmak için kullanılan kompaksiyon kontrolü yöntemi olarak sonuçlandırılmıştır.

Popescu (1980), şişme-büzülme döngüsü altındaki hafif yapılar altında şişen zeminlerde şişme yorulması ile ilgili araştırmalar yapmıştır. Sonuçlar, şişme-büzülme döngüsü devam ederken şişme eğiliminde hızla azalma olduğunu göstermiştir. Göreceli dengeye 5. döngüden sonra ulaşıldığını bulmuştur. Bununla beraber büzülme davranışının tekrarlı şişme-büzülmeyle değişmediğini belirtmiştir. Şişme-büzülmeyle, kuru birim hacim ağırlığın kritik değere varma eğilimine sahip olduğu, şişmenin yorulması olayınında kuru birim hacim ağırlığın kademeli azalmasından dolayı gerçekleştiğini belirtmiştir. Kuru birim hacim ağırlık kritik değere ulaştığında, denge durumuna varıldığında ve bu noktada şişme, büzülme ve kuru birim hacim ağırlığın sabit olduğu ve ilave değişimin olmayacağı belirtilmiştir.

Chen (1965), şişmenin yorulması olayını anlamak için laboratuvarında bir kil numunesini konsolidasyon aletinde şişmeye maruz bırakmış, daha sonra numunenin başlangıç su muhtevasına dönmesine izin verilmiş ve tekrar doygunluğa ulaştırmıştır. Bu birkaç döngü sayısı kadar tekrarlanmıştır. Her bir şişme-büzülme döngüsünden sonra zeminin yorulma belirtisi gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 2.28).

Abouleid (1985) yoğrulmuş kil numuneleri için üç yada dört ıslanma kuruma tekrarından sonra şişme özelliklerinde herhangi bir hacim değişikliği olmadığını belirtmiştir. Diğer taraftan Nordquist ve Bauman (1967), Obermeier (1973) ve Popescu (1980) kuruma ve ıslanma tekrarlarının sayısıyla şişme yeteneğinin arttığını vurgulamışlardır (Dif ve Bluemel, 1991).



Şekil 2.28. Şişmenin yorulması (Chen, 1965)

Şişen zeminlerin yorulması temel olarak üç faktörden etkilenir;

1. Zemin tanelerinin sürekli olarak yeniden yerleşmesi nedeniyle içsel kil yapısının giderek yıkımı,
2. Kırıkların çatlakların gelişmesiyle yanıl sınırlamanın kaybı,
3. Zeminde mevcut kil mineral tipi (Dif ve Bluemel, 1991).

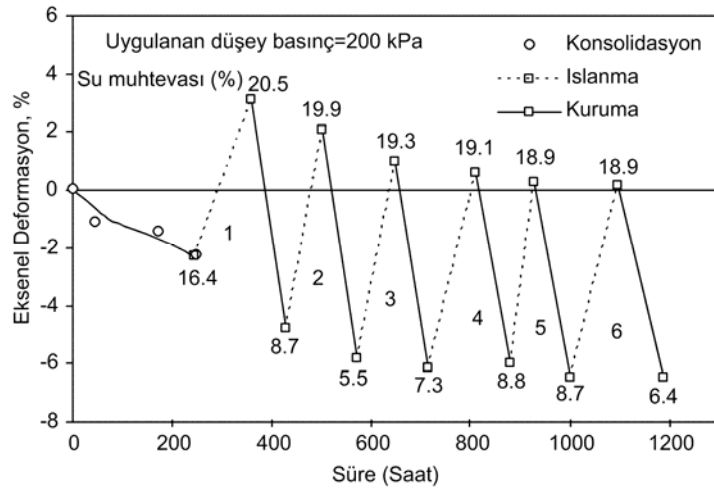
Dif ve Bluemel (1991) ıslanma kuruma döngülerinin şişme davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, iki farklı örselenmemiş aşırı konsolide kil numunesi üzerinde, modifiye edilmiş bir ödometre hücresi kullanarak deneyler yapmışlardır. Kurutma işlemi, zemin numunesinin altına ve üstüne çok düşük basınçlar altında kuru hava uygulanarak sağlanmıştır. Çalışma sonucunda, şişme ve büzülmenin, su muhtevasının bir alt ve üst limiti arasında meydana geldiği, alt limitin büzülme limitinden küçük, üst limitin ise tam doymun durumdan düşük olduğu vurgulanmıştır. İncelenen zeminler için; her bir kuruma ve ıslanma tekrarından sonra hacimdeki net azalmanın, şişme ve büzülmenin sabit limitler arasında meydana geldiği denge durumuna ulaşınca kadar azaldığı belirtilmiştir (Şekil 2.29).

Rao ve diğ. (2001) külle ve kireçle karıştırılmış zemin numunelerinin şişme davranışları üzerinde ıslanma ve kuruma tekrarlarının etkisini incelemişlerdir. Külle karıştırılmış numunelerde dört ıslanma ve kuruma tekrarından sonra, düşük şişme potansiyeline sahip zeminin, oldukça göçebilir bir zemine dönüştüğü belirtilmiştir. Kireçle

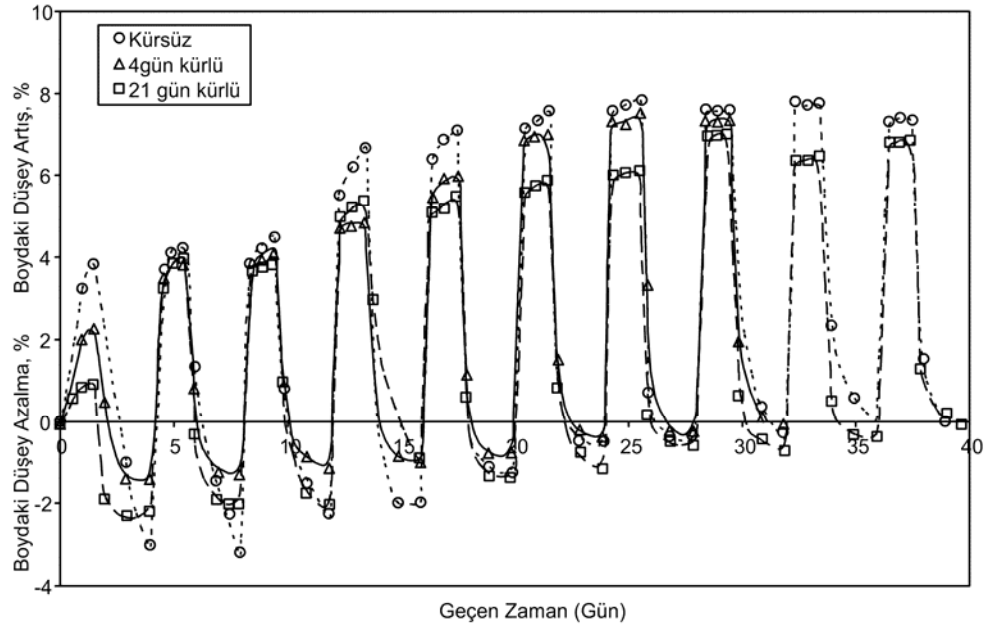
kariştirilmiş numunelerde ise dört ıslanma ve kuruma tekrarından sonra, stabilizasyonun yararlı etkisinin kısmen kaybolduğu vurgulanmıştır.

Rahimi ve Barootkoob (2002) çalışmalarında, ıslanma kuruma devirlerinin şişme potansiyeli üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Düşük – orta plastisiteli kil zeminleri sabit su muhtevası ve sabit birim hacim ağırlık değerinde statik basınçla sıkıştırıp, ödometre şişme deneyleri yapmışlardır. Numuneler 60°C kurutulmuş ardından ıslatılarak tekrar şişmelerine izin verilmiştir. Çalışma sonucunda, üç ıslanma kuruma tekrarından sonra şişme yüzdesinin %9'dan %3'e düştüğünü belirtmişlerdir.

Day (1994), sıkıştırılmış kilin şişme büzülme davranışı üzerine yaptığı araştırmada; ıslanma ve kuruma döngü sayısındaki artışla birlikte, kür zamanının numunenin şişme potansiyeli üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırmada kullanılan zemin numunesi düşük plastisiteli kil (CL) olup ağırlıklı olarak kaolinit tipi kil mineralinden oluşmaktadır. Bu amaçla modifiye Proctor enerji seviyesinde ve optimum su muhtevasının %6 ıslak tarafında sıkıştırılarak hazırlanan 3 numuneden 2'si 4 ve 21 günlük nem bariyeri içinde kür koşullarına bırakılmıştır. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen şişme deneyinin ardından numuneler kurumaya bırakılmış ve kurumaya bırakılan numunelerin büzülme limitine yakın ve altında bir su muhtevasında kuruduğu gözlenmiştir. 21 günlük kür koşulunda bırakılan numunenin başlangıç şişme ve büzülme miktarlarında, kür uygulanmayan numunelere oranla, şişme yüzdesinde üçte bir, büzülme yüzdesinde neredeyse yarı oranında azalma gözlenmiştir. Şişme büzülme döngüsünün tekrarlanması ile başlangıç kür durumunun etkisini kaybettiği görülmüştür (Şekil 2.30).



Şekil 2.29. Bir kuruma – ıslanma eğrisi (Dif ve Bluemel, 1991)



Şekil 2.30. Zamana karşı düşey şişme-büzülme (Day, 1994)

İlk ıslanma ve kuruma döngüsü, şişme ve büzülmede düşük değerler oluştururken, takip eden döngülerde düşey şişme ve büzülme büyük oranda artmıştır. Birkaç şişme büzülme döngüsünden sonra her numune için şişme ve büzülme yüzdesindeki artış belirli bir değere ulaşmıştır. Bu durum, modifiye Proctor enerji seviyesinde kompakte edilen kilin sahip olduğu etkinin ıslanma ve kuruma döngüsü ile yok edilmesi olarak açıklanmaktadır. Diğer bir ifade ile bu durum, başlangıçta kümelenmiş kil yapısının, ıslanma ve kuruma döngüsü tarafından yok edildiğini ve nihai olarak oldukça büyük floküle zemin yapısına sahip daha geçirgen bir kil yapısına dönüşmesi olarak değerlendirilmiştir (Lambe, 1958).

Ring (1966), Day (1994) ve Tripaty (2002)'ye göre ilk numune durumları (kuru yoğunluk, su içeriği) birkaç ıslanma-kuruma döngüsünden sonra şişme-büzülme potansiyelini etkilememektedir.

Parashar ve diğ. (1994), kür zamanının düşey şişme potansiyeli üzerindeki etkisini, numuneleri ıslanma ve kuruma döngüsüne maruz bırakmadan yalnızca başlangıç şişmesini dikkate alarak değerlendirmişlerdir. Deneyde kullanılan zemin numunesinin mineralojik muhtevası X-Ray analizi sonucunda %20 montmorillonit, %10 klorit, %30 kuartz ve %20 diğer mineraller olarak belirlenmiştir. Standart Proctor enerji seviyesinde halka içinde hazırlanan numuneler ayrı ayrı 0, 1, 3, 7, 28 ve 255 gün kür koşullarında

nem bariyerinde bekletilerek, düşey şişme yüzdeleri belirlenmiştir. Araştırma sonucunda pratik amaçlar için sıkıştırılmış numunelerdeki kür zamanının, düşey şişme potansiyeli üzerinde etkiye sahip olmadığı gösterilmiştir. Bu bakımdan çalışma, Gabriel ve Raphael (1971) tarafından yapılan ve muhtevasında % 60-70 seviyesinde montmorillonit ihtiva eden sıkıştırılarak hazırlanmış numunenin, 21 gün küre maruz bırakılması durumunda başlangıç şişmesinin yarısı oranında düşürüldüğünü ifade eden çalışmasıyla farklılık göstermektedir. Bu farklılık, kür zamanı yanında numunelerin ihtiva ettiği farklı yüzdelerdeki montmorillonit minerali etkisinden kaynaklanmış olabilir. Nihai olarak sıkıştırılmış kilin düşey şişmesi üzerinde kür zamanının etkisi, numunenin başlangıç sıkıştırma durumu ve ihtiva ettiği montmorillonit minerali ana faktörler olarak değerlendirilebilir.

Subba Rao ve Satydas (1987), benzer duruma işaret etmişler ve doygun zeminlerin kurumasının, artan kapiler etkiler nedeniyle tane bütünlüğünü artırması dolayısıyla zemin kütlelerinin büzülmesine sebep olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumu, numunelerin hava kurutmasına bırakılmaları sırasında kapiler menisküsün neden olduğu yüzeysel çekme kuvvetlerinden dolayı kolayca geri alınamayan Van der Waals bağlarının oluşması olarak açıklamışlardır.

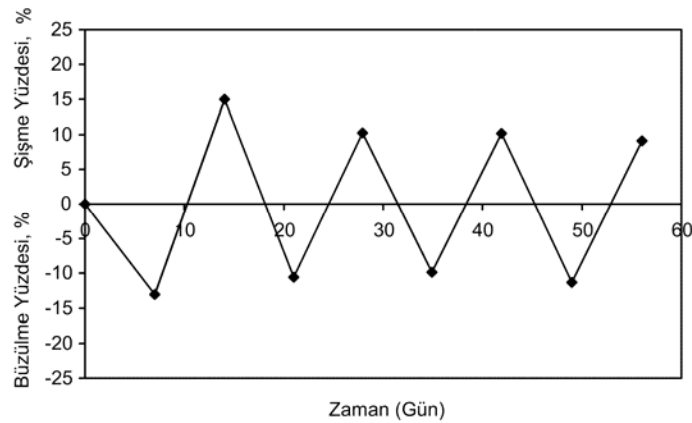
Siyahi ve diğerleri (1996), dolgu olarak kullanılması planlanan bir zemini farklı başlangıç su muhtevalarında (optimum su muhtevasının kurusunda ve ıslağında) ıslak-kuru döngülere maruz bırakarak, döngülerin zeminin şişme-büzülme özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla deneyler yapmışlardır. Deneyler, sıkıştırılmış numunelere üzerinde odömetre deney düzeneğinde serbest şişme (7kpa'lık düşey gerilme altında) ve şişme basıncı deneyleri olarak yapılmıştır. Islak-kuru döngüleri, 4 gün şişmede ve 4 gün büzülmede bırakılmak suretiyle 7 döngü olarak uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, tekrarlı ıslak-kuru döngüleri sonucunda sıkıştırılmış kil zeminin şişme deformasyonlarında ve şişme basınçlarında azalma görülmüştür. Bu azalma ilk döngülerde daha fazla olmakta, 4. döngü sonucunda dengelenmektedir. Optimumun kur tarafında sıkıştırılan numunelerde ıslak tarafında sıkıştırılan numuneler göre daha fazla şişme deformasyonları ve şişme basınçları bulunmuştur.

Osipov (1979), şişen zeminler üzerinde sıkıştırma etkisini, mikro yapıdaki değişim açısından değerlendirmiştir. Sıkıştırma etkisindeki şişen zeminlerin mikro yapılarının,

sıkıştırma sonucunda daha büyük tane oluşturmaya yönelimi ile düzensiz olduğunu ve boşlukların sıralı kanallar oluşturarak homojen dağıldığını ifade etmiştir. Zemin su içine daldırıldığında su, oluşan kanallar boyunca kolayca nüfus edebilmekte ve agregasyona uğramış taneler yeterince su ile reaksiyona girebilmektedir. Örselenmemiş zeminlerin mikro yapısında ise, sıkıştırılmış zeminlerin aksine agregasyona uğramış tane yönelimi görülmemiş, boşlukların çoğu mikro ve heterojen şekilde dağılmıştır. Böylece, zemin içine suyun nüfusu zorlaşmaktadır

Osipov ve diğerleri (1987), farklı tip killerin (deniz kili karışımı) ıslak-kuru döngüler altında şişme özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi amacıyla Rusya'dan çeşitli bölgelerden farklı özelliklerde elde edilen numuneler üzerinde serbest şişme ve şişme basıncı deneyleri yapmışlardır. Deneyleri örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde ödometre düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Serbest şişme deneylerine ve döngülere maksimum şişme miktarı sabit hale gelene gelene kadar devam edilmiştir. Kuru döngüler, numunelerin başlangıç su muhtevasına geri dönmeye kadar açık havada kurutulmasından sonra uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, herbir döngüdeki maksimum şişme yüzdesi döngü sayısı arttıkça artmıştır. Bu da döngü sayısı arttıkça kil yapısındaki sağlam bağların bozulmasına bağlanmıştır. Herbir döngüdeki şişme basıncı değeri, döngü sayısı arttıkça artmıştır.

Yalçın (1997), sıkıştırılmış bentonit kilinin distile su, tuzlu su, çöp suyu ve gazyağı gibi çevresel kirlilik şartları altında ıslanma-kuruma döngüleri uygulayarak şişme-büzülme davranışını araştırmıştır. Çevresel kirlilik şartlarında yapılan ıslak-kuru döngüler sonucunda döngü sayısı arttıkça şişme-büzülme özelliklerinde azalmalar gözlenmiştir (Şekil 2.31).



Şekil 2.31. Serbest şişme basıncı altındaki ıslak-kuru döngüler (Yalçın, 1997)

Yine aynı araştırmada bentonit kiline belirli oranlarda kireç ilavesi yaparak kilin şişme-büzülme davranışındaki değişimi incelemiştir. Optimum su muhtevasında hazırlanan bentonit kilinin şişme potansiyelinin iyileştirmesi amacıyla ilave edilen kireç yüzde miktarının artması ile serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinde önemli azalmalar olduğu belirtilmiştir.

%15 kireç ilaveli bentonit kilinde distile su şartlarındaki serbest şişme yüzdesi, kireç ilavesiz bentonit kilinin distile su şartlarındaki serbest şişme yüzdesine göre yaklaşık % 75 azaldığı söylenmiştir.

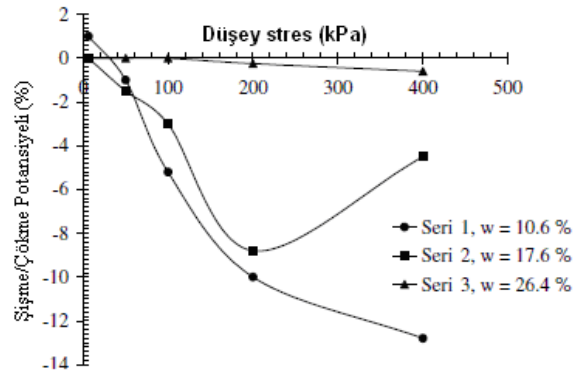
Al-Rawas ve diğ. (1998), kuzey Oman'da 5 ayrı zemin üzerinde tekrarlı şişme-büzülme deneyleri yapmışlardır. Numunelere farklı sürşarj yükleri uygulayıp zamana karşı toplam şişme basıncı değerleri bulmuşlardır. Sonuçlardaki farklılıkların kil mineral tipi, kation tip ve miktarı, ilk su içeriği, kuru yoğunluk ve zemin yapısından kaynaklandığı sonucuna varmışlardır.

Rao ve Revanasiddappa (2006), yaptıkları araştırmada kompakte edilmiş tortul zeminlerin çökme davranışına tekrarlı şişme-büzülmenin etkilerini araştırmışlardır. 3 seri zemin 6, 25, 50, 100, 200 ve 400 kpa düşey yük altında modifiye odömetre aletinde tekrarlı şişme-büzülmeye ($40 \pm 3^\circ\text{C}$) bırakılmıştır. Şekil 2.32'de farklı su muhtevalarındaki 3 farklı serinin farklı yükler altında şişme-çökme potansiyelleri gösterilmiştir. Sonuç olarak genişleyen zeminlerin şişme potansiyelinin boşluk oranı ve su içeriğinin düşmesiyle artış gösterdiği sonucuna varmışlardır.

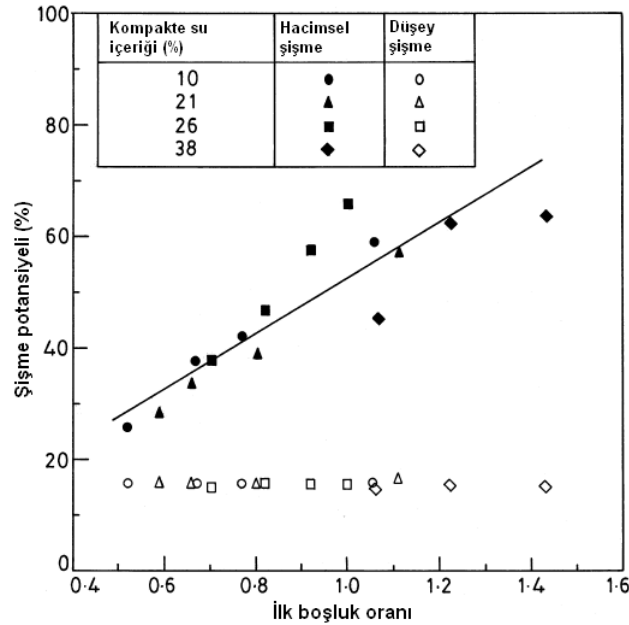
Nispeten doymamış zeminin büzülme potansiyeli boşluk oranındaki düşüş ve su içeriğindeki artışla birlikte azalmaktadır (Dudley, 1970; Barden ve diğ., 1973; Foss, 1973;Cox, 1978; Popescu, 1986; Houston ve Houston, 1988; Tadeballi ve Fredlund, 1991; Nelson ve Miller, 1991; Lawton ve diğ., 1989; Rao ve Revanasiddappa, 2000).

Rao ve diğ. (2000), kurutulmuş kil üzerinde yaptıkları araştırmada ilk boşluk oranı ve şişme potansiyeli arasında korelasyon yapmışlardır (Şekil 2.33). Bu araştırmadan bazı sonuçlara varılmıştır;

- Kurutulmuş zemin örneklerinin hacimsel şişme potansiyelleri kompakte su içeriklerinden bağımsız ama ilk boşluk oranından fazlaca etkilenmektedir.
- Kurutulmuş zemin örneklerinin düşey şişme potansiyelleri kompakte su içeriklerinden ve ilk boluk oranlarından bağımsızdır.
- Gevşek kompakte örneklerde dördüncü ıslanma-kuruma döngüsünden sonra boşluk oranında fazlaca azalma ve kuruma aşamasında yüksek hacimsel şişme potansiyeli görülmektedir.



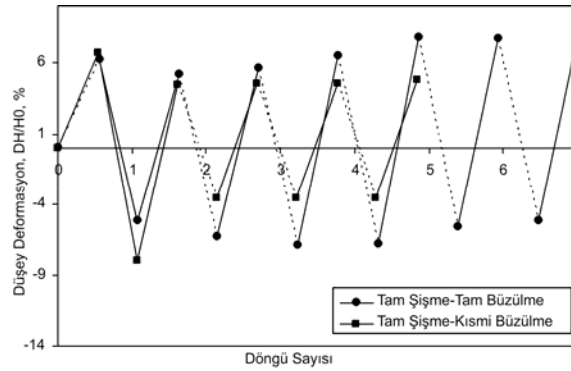
Şekil 2.32. Kompakte killerin çökme davranışına şişme/büzülmenin etkisi (Rao ve Revanasiddappa, 2006)



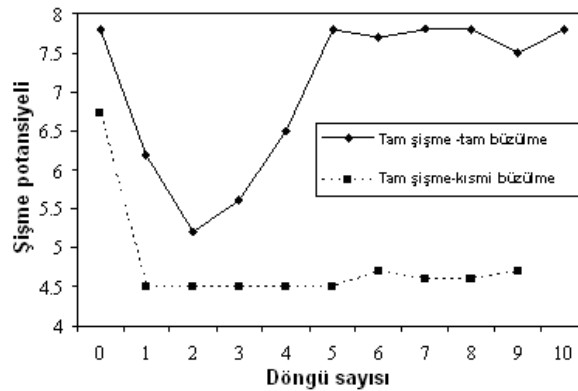
Şekil 2.33. Kurutulmuş numunenin ilk boşluk oranı ve şişme potansiyeli arasındaki korelasyon (Rao ve diğ., 2000)

Tawfig ve Nalbantoğlu (2009), Kıbrıs Doğu Akdeniz Üniversitesi kampüsü yakınlarındaki yapısal hasara sebep olan zeminden aldıkları numuneler üzerinde tekrarlı şişme-büzülme testleri yapmışlardır. Deneyler modifiye ödometre aletinde tam şişme-tam büzülme ve tam şişme-kısmi büzülme olarak yapılmıştır. Deneylere ait sonuçlar Şekil 2.34 ve Şekil 2.35’de verilmiştir.

Şekil 2.34’de zemin örneğinin düşey deformasyonuna karşılık tam şişme-tam büzülme ve tam şişme-kısmi büzülme döngüsel olarak verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tam şişme-tam büzülmede döngü sayısı arttıkça şişme de artmakta, tam şişme-kısmi büzülmede ise döngü sayısı arttıkça şişme azalmaktadır. Ayrıca beşinci döngüden sonra tam şişme-tam büzülmede şişme değeri dengeye ulaşmaktadır. Şekil 2.35’de ise tam şişme-tam büzülme döngülerinden ilk iki döngüde şişme potansiyeli düşmekte ve ikinci döngüden sonra şişme potansiyeli yükselmeye başlayıp beşinci döngüde sabitlenmektedir. İkinci döngüden sonra oluşan bu artışı makro çatlakların oluşup,



Şekil 2.34. Düşey deformasyon değerine karşı tam şişme-tam büzülme ve tam şişme-kısmi büzülme döngüleri (Tawfig ve Nalbantoğlu, 2009)



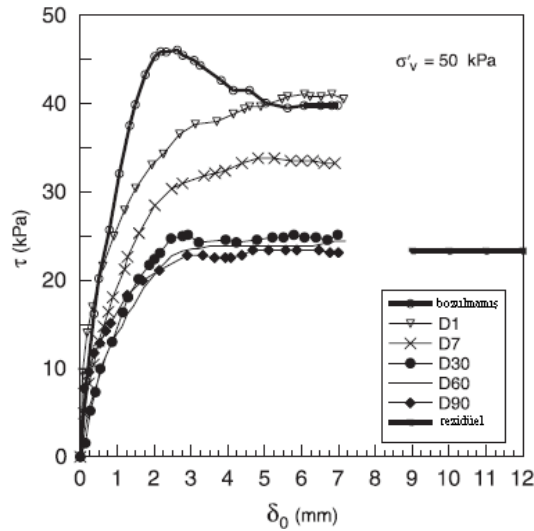
Şekil 2.35. Şişme potansiyeli değerine karşı tam şişme-tam büzülme ve tam şişme-kısmi büzülme döngüleri (Tawfig ve Nalbantoğlu, 2009)

suyun bu boşluklardan içeri girmesiyle açıklanmaktadır. Ayrıca tam şişme-kısmi büzülmede şişme potansiyelinin düştüğü görülmektedir.

Gulla ve diğ. (2006), ıslanma-kuruma-donma-çözünme döngülerinin doğal kilin kompresibilitesi ve kesme kuvveti üzerine etkilerini incelemek üzere deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu araştırmada kil 1 günlük (D1), 7 günlük (D7), 30 günlük (D30), 60 günlük (D60) ve 90 günlük (D90) bölünmüş, her döngünün 24 saatte tamamlandığı deneyler yapmışlardır (Şekil 2.36).

Bu deneyler sonucunda bir takım çıkarımlarda bulunmuşlardır;

1. Tekrarlı ıslanma-kuruma-donma-çözünme doğal zeminin yapısını bozmakta, bağlarda ve dokuda değişiklikler meydana getirmektedir.
2. Islanma-kuruma-donma-çözünme döngülerine girmeyen bozulmamış numunede yapılan ödometre deney sonuçlarına göre kilin mikro yapısının kararsız ve bağlarının zayıf olduğu görülmektedir.
3. Bozulmamış kil örneğinin direk kesme testinden elde edilen gerilme-deplasman eğrisindeki maksimum kuvvet değeri ıslanma-kuruma-donma-çözünme döngülerine giren numuneye göre farklılık göstermektedir. Maksimum kesme kuvveti ilk döngüden sonra düşüş göstermiş ve döngülerin birinci ayından sonra düşüş daha da belirginleşmiştir (Şekil 2.36).
4. Bölünmüş döngüler test edilen kilde minerolojik değişikliklere neden olmamıştır.

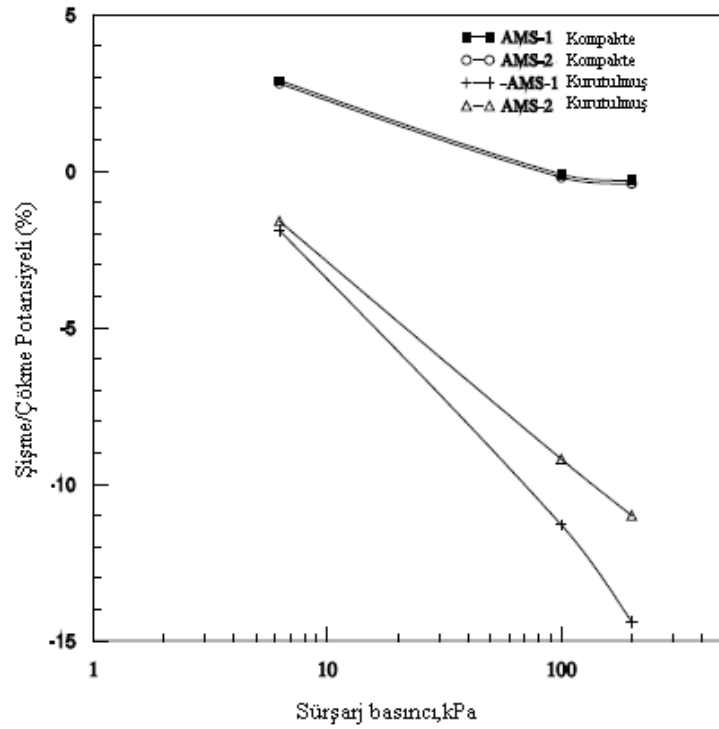


Şekil 2.36. Gerilme (τ) -deplasman (δ_0) eğrileri (Gulla ve diğ., 2006)

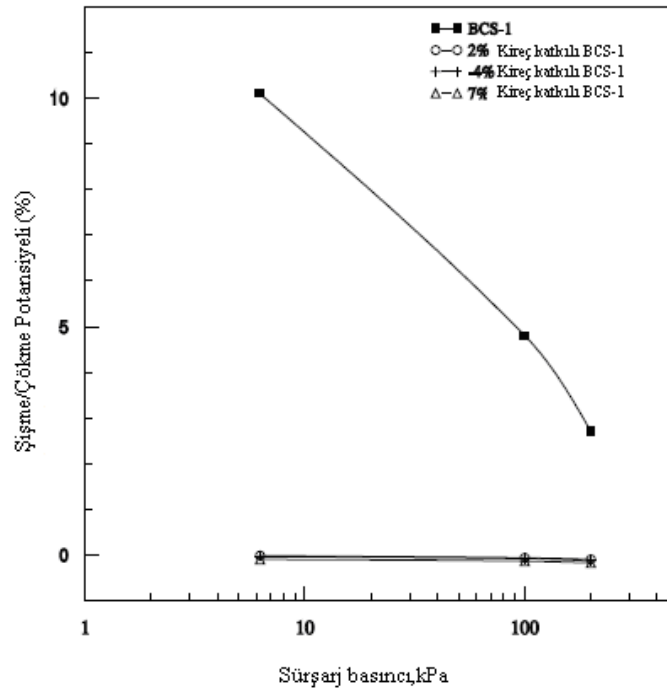
Rao ve diğ. (2001), Hindistan'da Karnataka'nın kuzeyinde bulunan kireçle stabilize ettikleri organik zemin (BCS) ve külle ıslah ettikleri zemin (AMS)'lerin şişme davranışına ıslanma-kuruma döngüsünün etkisini araştırmışlardır.

Şekil 2.37'da AMS zemininin dört şişme-büzülme döngüsü incelenmiştir. Dört şişme-büzülme döngüsünden sonra büzülme eğiliminin azaldığı ve büzülme potansiyelinin 200kPa sürşarj yükü altında en çok -11% ile -14% arasında olduğu gözlenmiştir.

Şekil 2.38'de ise kireç stabilizesinin BCS numunesinin şişme davranışına etkisi gösterilmiştir. Ek kireç, (Herrin ve Mitchell, 1961; Bell, 1993) ile uyumlu bir şekilde genişleyen BCS-1 numunesinin şişme potansiyelini azaltmıştır.



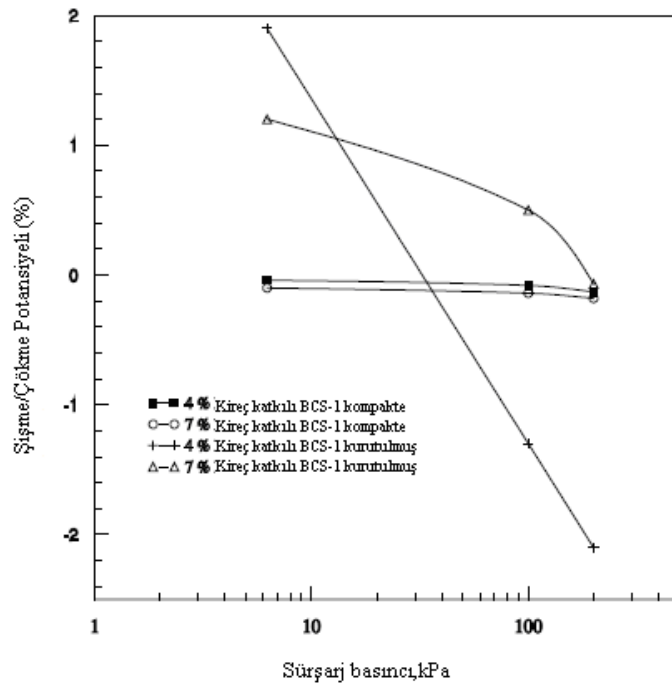
Şekil 2.37. Kurutmanın AMS numunesinin ıslanma-çekme hacim değişimine etkisi (Rao ve diğ., 2001)



Şekil 2.38. Kireç katkısının BCS-1 numunesinin şişme davranışı üzerindeki etkisi (Rao ve diğ., 2001)

Şekil 2.39'da %4 ve %7 kireç stabilizeli BCS numunesinin ıslanma-çekme hacim değişim davranışı üzerinde kurutma işleminin etkisi gösterilmiştir. %4 ve %7 kireç stabilizeli kompakte numune aynı şişme/büzülme davranışını gösterirken aynı zeminin kurutulmuş örneklerinden %4 kireç katkılı olanı 6kPa sürşarj altında %7 kireç katkılı olana göre nerdeyse 2 kat şişme göstermesine karşın, 200kPa sürşarj altında %7 kireç katkılı olan çok az bir büzülme gösterirken %4 kireç katkılı örnek %2'lik bir büzülme gösterdiği görülmektedir.

Güney ve diğ. (2005), ıslanma-kurumanın stabilize kilin şişme davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Daha önceki çalışmalar (Al-Rawas ve diğ., 2005-2002; Little ve diğ., 2000; Prusinski ve diğ., 1999; Bell, 1996) su varlığında kile kireç ilave edilirse, katyon değişimi, çökme ve puzoloik reaksiyonlar meydana geleceğini söylemektedir. Bir miktar kireç eklendiğinde çökme kilin mühendislik özelliklerinin modifiye olmasında birincil etmendir. Litaratürdeki çalışmalar kireç eklemenin kilin optimum su içeriği, büzülme limiti ve kuvvetinde artış ve şişme potansiyeli, likit limit, plastisite indeksi ve maksimum kuru yoğunluğunda azalmaya neden olduğu ifade edilmiştir.

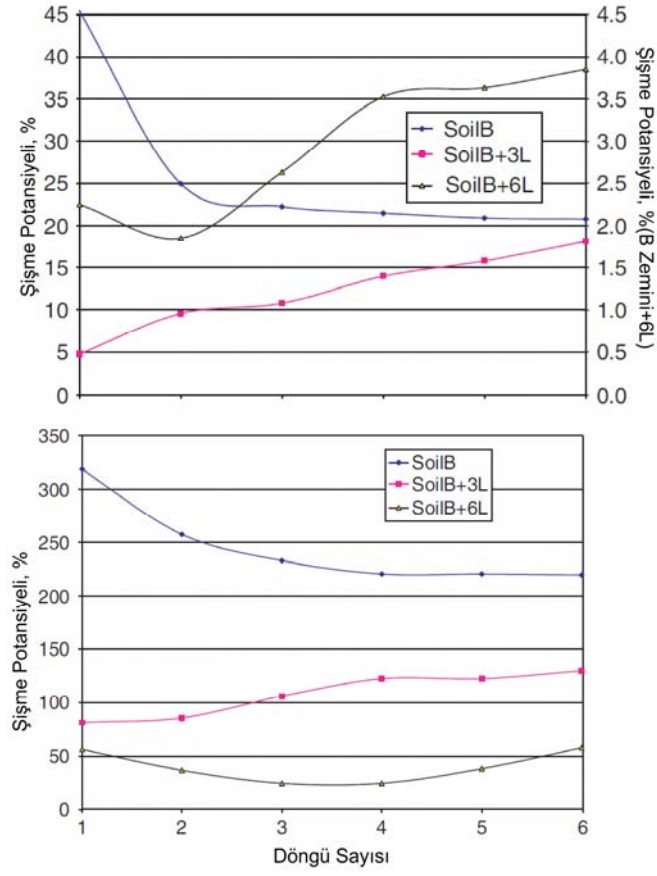


Şekil 2.39. Kurutmanın %4 ve %7 kireç katkılı BCS-1 numunesinin ıslanma-çekme hacim değişimine etkisi (Rao ve diğ., 2001)

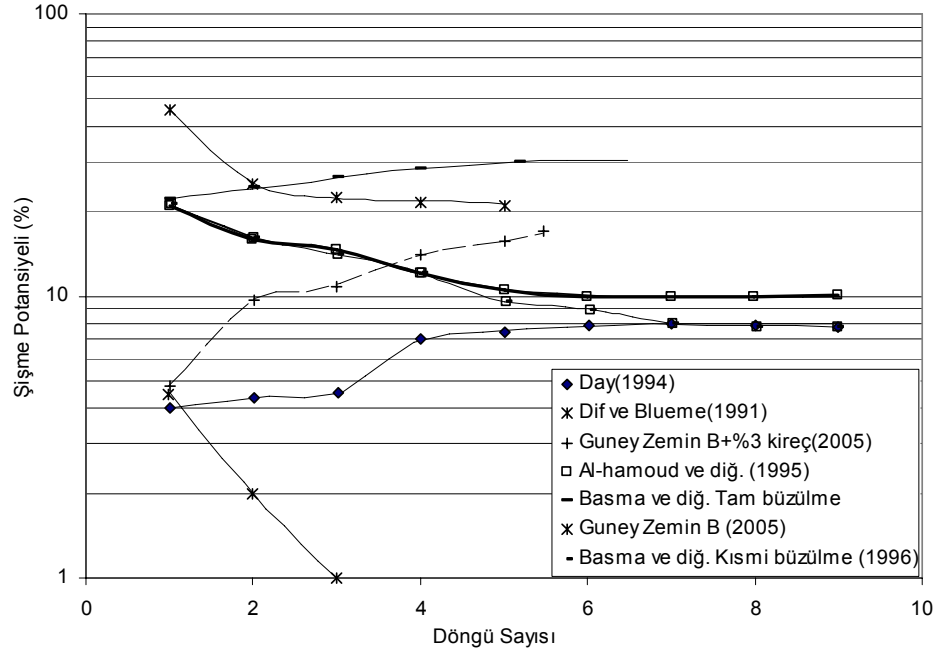
Güney ve diğ. (2005), kireç stabilizasyonunun başlangıçtaki yararlı etkisinin ilk döngüden sonra kaybolduğunu ve daha sonraki döngülerde şişme potansiyelinin arttığını göstermiştir. Öte yandan hem zemin örneğinin şişme potansiyeli hemde şişme basıncı ilk döngüden sonra artmaya başlamakta ve dördüncü döngüden sonra dengeye ulaşılmaktadır.

B zeminine ait şişme potansiyeli ve şişme basıncı sonuçları Şekil 2.40'da verilmiştir. Kireçle iyileştirilmemiş zemin için artan şişme-büzülme döngüleriyle birlikte şişmede düşüş yaşanırken kireç stabilizeli B zemini için şişme yüzdesinde artış olmaktadır. Ayrıca doğal B zemini için ilk döngüden sonra şişme yüzdesi ve şişme basıncında daha sonraki döngülerden daha büyük bir düşüş gözlenmektedir.

Sonuç olarak kireç stabilizeli zemin ıslanma-kuruma döngülerinden olumsuz etkilenmekte ve kireç stabilizesinin yararlı etkileri tekrarlı ıslanma-kurumayla birlikte kaybolduğu ifade edilmiştir. Bu çalışma dahil birçok araştırmacının sonuçları Şekil 2.41'te verilmiştir.



Şekil 2.40. B zeminine ait şişme potansiyeli ve şişme basıncı değişimi (Güney ve diğ., 2005)

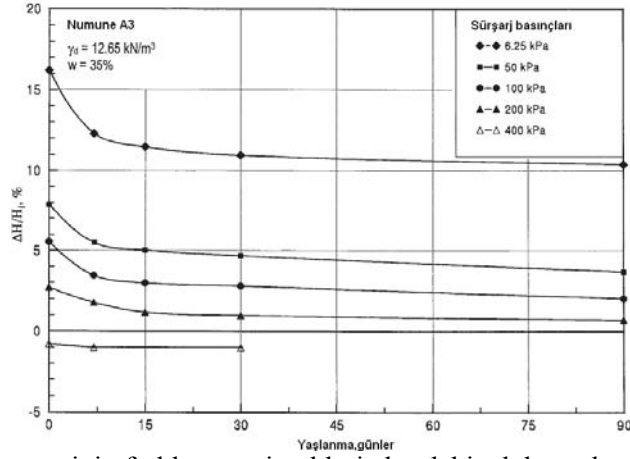


Şekil 2.41. Birçok araştırmacı tarafından verilmiş çeşitli şişme potansiyelleri (Güney ve diğ., 2005)

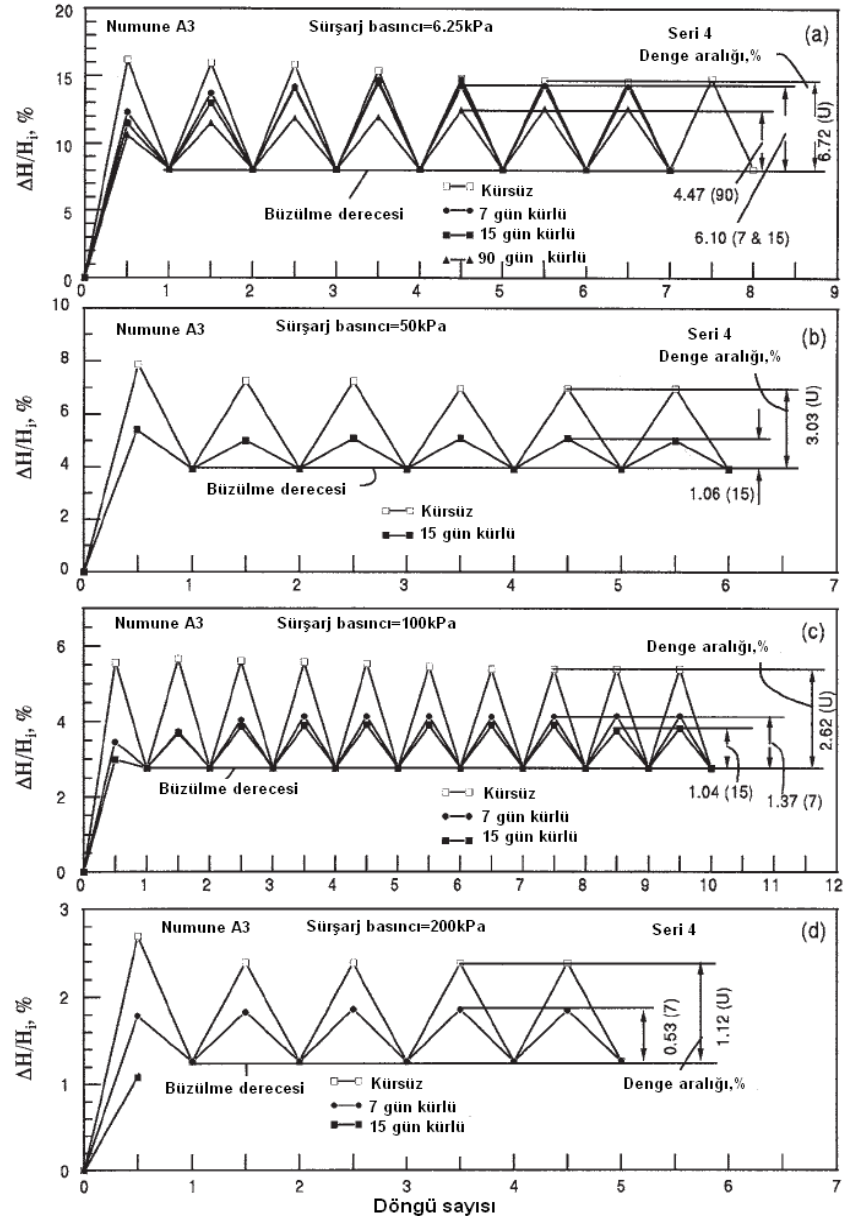
Rao ve Tripathy (2003), kompakte killerde şişme-büzülme davranışına yaşlandırmanın (kür) etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla likit limiti %100 olan kompakte killerin 7. 15. 30 ve 90 gün bekleterek yaşlandırmışlardır. Litaratürde yaşlandırmanın kompakte killerin basınç dayanımı arttırdığını söylemektedir. Ayrıca şişme potansiyeli yaşlandırma süresinin artmasıyla düşmektedir. Yaşlandırılan örneklerin değişen davranışı partiküllerin yeniden düzenlenmesi ve bağlarının biçimlenmesine sebep olmakta, yüzey alanı şişme süresince su emmesine etki etmektedir. Zamanlar partüküller yeniden sıraya girerler ve bağlar yeniden biçimlenir (Mitchell ,1960).

Kompakte edilen kürlü ve kürsüz numunelere önceden belirlenmiş birçok sürşarj basınçları yüklenmiş ve şişmeye bırakılmışlardır. Kürlü ve kürsüz A3 numunesinin farklı sürşarj yükleri altındaki tek boyutlu şişme testi sonuçları Şekil 2.42’de verilmiştir. Tüm sürşarj yüklerinde yaşlanmayla birlikte düşey deplasman azalmaktadır. Zeminin şişme basıncından fazla olan 400kpa sürşarj yükünde, şişme olmamakla birlikte az bir sıkışma ve sürşarj basıncı sayesinde kür etkisi azalmaktadır. Uzun kür süresinde daha katı numune oluşmakta ve toplam sürşarj basınçlarında çok daha az düşey deplasman göstermektedir. Kürsüz numunede olduğu gibi kürlü numunede de sürşarj basıncının artmasıyla düşey deplasmanda düşüş gözlemlenmektedir. Bununla beraber kürlü numune daha az düşüş göstermektedir.

Tekrarlı şişme-büzülme testleri modifiye odömetre aletinde sabit sürşarj basıncında büzülme sırasında $40 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ısıya maruz kalarak yapıldığı ifade edilmiştir. Numuneler her döngüde farklı boylarda şişme-büzülmeye bırakılmıştır;a) tam şişme-tam büzülme b) tam şişme-ilk boya göre kısmi büzülme c) tam şişme-ilk şişme boyunun %75’ine kadar kısmi büzülme d) tam şişme-ilk şişme boyunun %50’sine kadar kısmi büzülme. Sonuçlar Şekil 2.43’de verilmiştir. Numunelerin şişme potansiyelleri kürlü beraber düşmektedir. Kür işlemi ilk birkaç gün süresince daha çok etki etmektedir. Aynı kuru yoğunlukta kür etkisi su içeriği artışıyla beraber artmaktadır. Sabit su içeriğinde doygunluk derecesindeki artış, yaş etkisini daha belirgin kılmaktadır. Başlangıç doygunluk derecesi ve su içeriği kür işlemini etkileyen iki ana etmendir. Zeminin optimum su içeriğinde ve maksimum kuru yoğunluğunda etki daha belirgindir.



Şekil 2.42. A3 numunesinin farklı sürşarj yükleri altındaki tek boyutlu şişme testi sonuçları (Rao ve Tripathy, 2003)



Şekil 2.43. A3 numunesinin denge bandına yaşlanmanın etkisi (Rao ve Tripathy, 2003)

2.6. ŞİŞEN ZEMİNLERİN TANIMLANMASI VE SINIFLANMASI

Şişen zeminlerin özellikle; Arabistan, Güney Afrika, Avustralya, Hindistan ve Amerika gibi ülkeler yanında dünyanın birçok yerinde geniş alanları kaplayacak şekilde varolduğuna ve ciddi problemlere yol açtığına çoğu araştırmada değinilmiş ve konuyla ilgili çok ciddi araştırmalar yapılmıştır. Buna karşın konuyla ilgili yapılan araştırmalar neticesinde şişen zeminlerin neden olduğu hacim değişiminin belirlenmesine yönelik standart bir ölçüm ve tanımlama yöntemi belirlenememiştir (Snethen, 1984; Nelson ve Miller, 1992). Şişen zeminlerle ilgili olarak, geliştirilen tanımlama ve sınıflama teknikleri, problemli olduğundan şüphelenilen zeminlerin olası hacim değiştirme davranışlarının nitel olarak belirlenmesinde kullanılır. Potansiyel hacim değişikliğinin nitel olarak tanımlanması; şişen zeminlerin neden olacağı olası problemlerin planlama aşamasında önceden belirlenmesini ve mühendislik yapıları altında varolan şişen zeminle ilgili olarak yapının tasarımında gerekli ön bilgiyi sağlar.

2.6.1. Şişme Potansiyelinin Ölçümünde Ödometre Deneyi

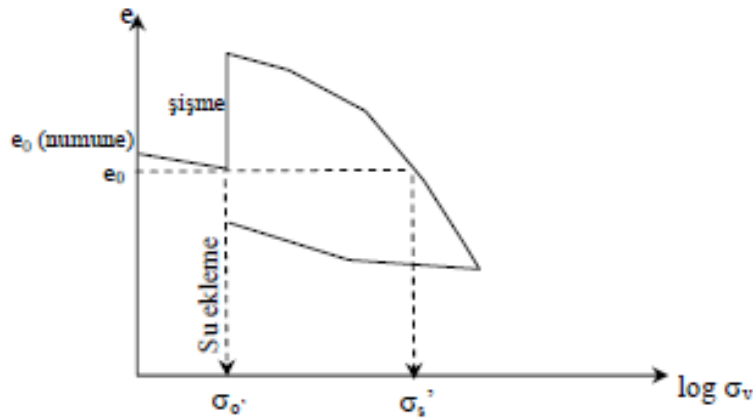
Şişme potansiyeli; şişme basıncı ve şişme yüzdesi anlamında kullanılan bir tanımlamadır. Şişme yüzdesi deneyi, zemin ıslandığı zaman oluşacak düşey kabarma veya şişmenin değerini belirler. Bu deney, istenilen yoğunluk ve su muhtevasında sıkıştırılarak hazırlanmış örselenmiş numuneler üzerinde yapılır. Numune küçük bir basınç (7 kN/m^2) ile yüklenir ve sonra suya boğulur. Numunenin bu basınç altında şişmesi, 48 saat sonra veya şişme tamamlanıncaya kadar kaydedilir. Deney sonunda oluşacak şişmenin, numunenin ilk yüksekliğine oranı yüzde olarak şişme yüzdesini verir (Sivapullaiah ve diğ., 1987). Şişme basıncı deneyi ise, serbest şişme deneyinde olduğu gibi hazırlanmış numuneler üzerinde yapılır. Numune üzerine küçük bir basınç (7 kN/m^2) uygulanır, ilk ölçüm alınır ve numune suya boğulur. Bu deneyde numunenin şişmesine müsaade edilmez. Deney, numunenin şişmesini önleyecek basıncın bulunması esasına dayanır. Deney sonunda bulunan değer, şişmeyi önleyen basınç değeridir ve şişme basıncı olarak tanımlanır (Sridharan ve diğ., 1986).

Killerin şişme yüzdesi ve şişme basıncının belirlenmesinde kullanılan en uygun ve en başarılı yöntem, direkt ölçümlerdir. Genel olarak yukarıda ifade edilen ölçüm ve değerlendirme yöntemleri yanında, şişen killerin direkt ölçümleri, klasik bir boyutlu konsolidasyon cihazı ile de yapılır. En yaygın şekliyle şişme miktarının tahmininde bir

boyutlu konsolidasyon ekipmanı veya ödometre deney ekipmanları kullanılır. Birçok uygulamada deney aşamasında kullanılan numune ve yükleme durumu, araziye temsil açısından farklılık gösterir. Değişik yükleme sırası ve uygulanan sürsarj basınçları arazi durumunu temsil etmeye araştırmada kullanılır. Klasik bir boyutlu konsolidasyon cihazı kullanarak yapılan deneyler farklı tiptedir. ASTM D 4546 (1990), standardında tanımlanan şekliyle tek eksenli şişme deneylerinin klasik konsolidasyon cihazı kullanılarak zeminlerde uygulanması tanımlanmaktadır. İlgili standart yöntem, killi zeminlerin şişme ve oturma potansiyelinin belirlenmesine yönelik olarak üç tipte deney yöntemini kapsar: (i) serbest şişme deneyi, (ii) sabit hacimde şişme deneyi ve (iii) mevcut örtü yükü altında şişme deneyi (Nelson ve Miller, 1992).

Serbest Şişme Deneyi :

Örselenmemiş zemin numunesi ödometre halkasına yerleştirilir ve 7 kPa'lık ön yüklemeye maruz bırakılır. Bu yük altında numunedeki oturma sabit bir değere ulaştıktan sonra suya boğularak birincil şişme deformasyonunun tamamlaması beklenir. Deney, şişme tamamlandıktan sonra klasik ödometre esasına bağlı olarak ilave yükleme ve boşaltma kademeleriyle sonlandırılır. Numunenin başlangıç hacmine dönmesi için gereken basınç şişme basıncı olarak tanımlanır (Şekil 2.44).



Şekil 2.44. Ödometre serbest şişme deney sonucu

Şekilde σ_0' : Numunenin ıslatıldığı andaki gerilme

σ_s' : Tanımlandığı şekliyle şişme basıncı

e_0 : Başlangıç boşluk oranı

Mevcut Örtü Yüğü Altında Şişme Deneyi:

Deney numunesi mevcut arazi şartlarındaki düşey örtü yüğü altında yüklenir. Ödometre halkasına yerleştirilen numune suya boğularak birincil şişmenin tamamlanması için beklenir. En az üç değişik düşey basınç altında deney tekrarlanır. Şişme gerilmesine karşılık çizilen birim deformasyon eğrisinde şişme deformasyonun sıfır olmasına karşılık gelen nokta şişme basıncı olarak tanımlanır.

Şişen zeminlerin şişme potansiyelinin tahmininde laboratuvar şartlarında yapılan deneysel çalışmalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Nihai olarak en gerçekçi ve doğru şişme potansiyeli, arazi ortamında yapılan çalışmalardan elde edilmektedir ki, bu da oldukça fazla maliyet ve iş gücü gerektiren bir yaklaşımdır. Bu nedenle birçok bilimsel çalışma, şişme potansiyelinin laboratuvar ortamında arazi şartlarını yansıtacak şekilde belirlenmesine yönelik kullanılan ekipmanlarla elde edilen sonuçların karşılaştırılmasını içerir.

Abduljawad and Al-Suleimani (1993), şişen zemin davranışının belirlenmesine yönelik olarak kullanılan farklı deney yöntemlerinin direkt arazi ortamında yapılan deney yöntemi ile karşılaştırmasını yapmışlardır. Üç eksenli, filtre kağıdı ve ödometre deney yöntemlerini kapsayan bir dizi laboratuvar deney sonuçlarını, arazi ortamını yansıtmak amacıyla yapılan deney cihazından elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Arazi ortamında yapılan deney sonuçları, ödometre deney yöntemlerine dayalı yapılan şişme deney sonuçları ile karşılaştırıldığında serbest şişme, sabit hacim ve örtü yüğü şişme deneyleri sırasıyla % 66. 24 ve 53 oranında aşırı değerler vermişlerdir. Sonuç olarak tüm deney yöntemleri arasında üç eksenli deney sonuçlarının arazi ortamını daha iyi yansıttığı, ödometre deney yöntemleri arasında sabit hacim deney yöntemi verilerinin daha uyumlu sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Benzer çalışmayı Al-Shamrani and Dhowian (2003), şişen zeminlerin şişme potansiyelini doğru bir şekilde tahmin etmek için üç eksenli ve ödometre yükleme koşulları altında elde edilen şişme parametrelerinin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Ödometre ve üç eksenli şişme verilerinin uygulanabilirliği arazi ortamında elde edilen sonuçlar kullanılarak incelenmiştir. Araştırmacılar, arazi ölçümleriyle karşılaştırıldığında üç eksenli deneyinden elde edilen verilerin daha tutarlı ancak, yanal

sınırlama faktörü nedeniyle ödometre deney sonuçlarının aşırı tahmine neden olduğu, ödometre yöntemleri arasında sabit hacim yönteminin daha tutarlı sonuçlar verdiğini ve özellikle 0.3 gibi bir sayıyla çarpılması durumunda çok daha kullanılabilir olacağı sonucuna varmışlardır.

2.6.2. Serbest Şişme İndisi Deneyi

Serbest şişme deneyleri yaygın olarak şişen killerin tanımlaması ve şişme otansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılır. Holtz ve Gibbs (1956), tarafından elirlenen serbest şişme deneyi geoteknik mühendislerinin arazide şişme potansiyeli tahmininde en yaygın kullandıkları basit deneylerden biridir.

Serbest şişme deneyinde; 40 no'lu elek altında kalan 10 cm³ kuru zemin, 100 cm³'lük derecelendirilmiş bir silindirik mezür içine boşaltılır ve silindirik mezür tamamen su ile doldurulur. Bu şekilde hazırlanan deney düzeneğinde şişen hacim gözlenmediği anda deney sonlandırılır. Serbest şişme, zemin hacimdeki değişimin başlangıçtaki zemin hacmine oranı olarak yüzde cinsinden ifade edilir.

$$FS = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100 \quad (2.5)$$

FS : Serbest şişme, [%]
V : Şişmeden sonraki zemin hacmi, [cm³]
V₀ : Kuru zemin hacmi, [10 cm³].

Sodyum montmorillonitlerde bu oran % 1200-2000'dir. Bu oran, iklime ve şişme karakteristiklerine bağlı olarak değişir. Serbest şişme deneyi zeminin şişme özelliğinin bir göstergesi olmasına rağmen, şişme karakteristiklerinin göstergesi olan kıvam limitleri kadar güvenilir değildir (Chen, 1988). Bu güvensizliğin nedeni olarak; 10 cm³ hacminde zemin numunesi hazırlamanın zorluğu ve bazı kil tiplerinin su içindeki hacminin havadaki hacminden daha düşük olması nedeniyle negatif şişme yüzdesi değerleri vermesi gösterilmiştir (Sridharan ve diğ., 1985). 10 cm³ zemin hacminin ölçülmesindeki belirsizliğin giderilmesine yönelik olarak Hindistan Standartında (IS 2720), Serbest Şişme İndisi (FSI) tanımlanmıştır. Bu yöntemde, 40 no'lu elek altı kuru numuneden 10g alınması önerilmiştir (Eşitlik 2.6). Kaolinit tipi killer bu tanımlama

sonucunda da negatif değerler vermiştir (Sridharan ve diğ.,1985; Sivapullaiah ve diğ.,1987).

$$FSI = \frac{V_d - V_k}{V_k} \times 100 \quad (2.6)$$

V_d : Zemin numunesinin distile su içindeki hacmi,

V_k : Kerosen veya karbon tetra klorür (CCl₄) çözeltisi içindeki nihai hacmi.

Şişme potansiyelini, herhangi bir çözelti içindeki zeminin bir gram başına şişen hacmi olarak tanımlayan Değiştirilmiş Serbest Şişme İndisi (MFSI), bu belirsizliği ortadan kaldırmıştır (Eşitlik 2.7) (Sivapullaiah ve diğ.,1987). Saf su için aynı ilişki Eşitlik 2.8’de daha basitleştirilmiş haliyle sunulmaktadır. (Prakash ve Sridharan, 2004).

$$MFSI = \frac{V - V_s}{V_s} \quad (2.7)$$

$$MFSI = \frac{V_d}{10} \quad (2.8)$$

V : Şişmeden sonraki zemin hacmi,

V_d : Zeminin distile su içindeki nihai hacmi,

V_s : Zemin katı hacmi : $\left[V_s = \frac{M_s}{G_s \cdot \rho_w} \right]$

Sivapullaiah ve diğ. (1987), değiştirilmiş serbest şişme indisi (MFSI)’ne dayalı zeminlerin şişme potansiyelinin değerlendirilmesinde yeni bir sınıflama önermişlerdir (Tablo 2.7). Bu sınıflamada sıkıştırılmış numunelerin ödometre deneyinden elde edilen şişme yüzdeleri, LL değerleri ile çok iyi korelasyon sağlamıştır.

Tablo 2.7. Değiştirilmiş serbest şişme indisine bağlı şişme potansiyeli (Sivapullaiah ve diğ., 1987)

MFSI	Şişme Potansiyeli
<2.5	İhmal edilebilir
2.5-10	Orta
10-20	Yüksek
>20	Çok Yüksek

Prakash and Sridharan (2004), kil mineral tipinin belirlenmesinde kullanılan Xray difraktometre, diferansiyel termal analiz ve elektron mikroskobuna ilaveten çok daha kolay bir yöntem olarak Serbest Şişme Oranı (FSR) değişkeninin kullanılabilirliğini tanımlamışlardır (Eşitlik 2.9). Çalışma kapsamında tüm ince taneli zeminler, yapısal oluşum açısından değerlendirildiğinde ya kaolinit ya da montmorillonit esaslı zeminler olarak sınıflandırılmıştır (Tablo 2.8.). Ayrıca bu sınıflandırma Şekil 2.45’de abak olarak görülmektedir. Zeminin şişme yeteneği, FSR ve kil tipine dayalı bir sınıflandırma yöntemiyle değerlendirilmiştir. FSR oranı; 40 nolu elekten elenen 10 g etüvde kurutulmuş zeminin distile su içindeki nihai hacminin (V_d), karbon tetra klorür (CCl_4) çözeltisi içindeki nihai hacmine (V_k) oranı olarak tanımlanır.

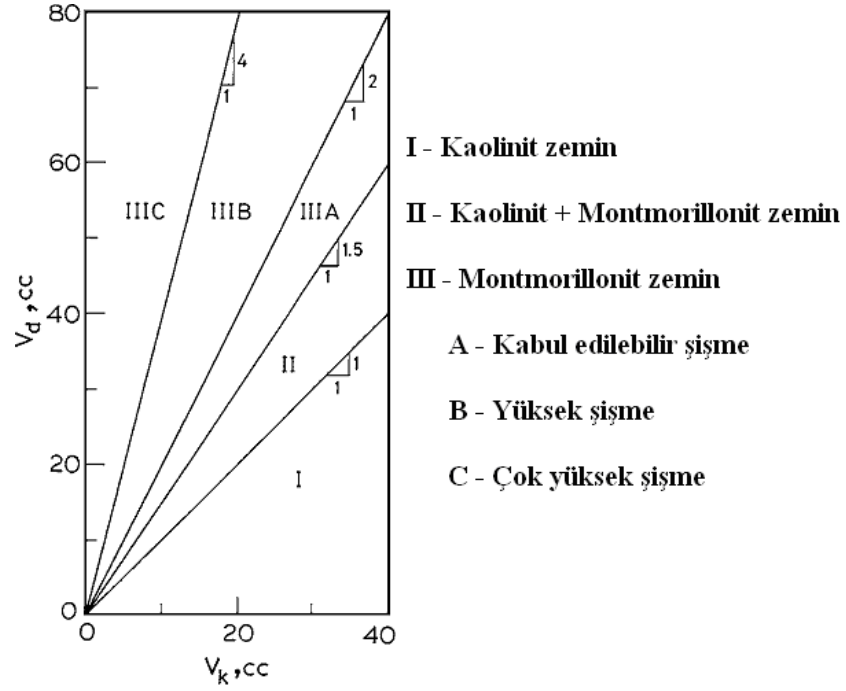
$$FSR = \frac{V_d}{V_k} \quad (2.9)$$

FSR değerinin 1-1.5 arasında olması durumunda hangi kil mineral tipinin baskın olduğu, CCl_4 ve distile su çözeltileri içindeki numunelerin konik uçla belirlenen LL değerlerinin karşılaştırılması ile belirlenmektedir. CCl_4 çözeltisindeki LL değeri distile su çözeltisindeki LL’den büyükse, baskın kil mineral tipi kaolinittir. Bu çözeltiler içinde bulunan LL değerleri saf su içindeki LL’e eşitse zemin de eşit oranda kaolinit ve montmorillonit bulunmaktadır.

FSR’nin zeminin şişme derecesinin tahmininin yanında zemin numunesi içinde baskın kil mineral tipinin belirlenmesinde güvenilir şekilde kullanılabileceği önerilmiştir.

Tablo 2.8. Serbest şişme oranına dayalı sınıflama (Prakash and Sridharan, 2004)

Serbest Şişme Oranı (FSR)	Şişme Derecesi	Kil Tipi	Baskın Kil Mineral Tipi
≤ 1	İhmal edilebilir	Şişmeyen	Kaolinit
1-1.5	Düşük	Karışık	Kaolinit ve Montmorillonit
1.5-2	Orta	Şişen	Montmorillonit
2-4	Yüksek	Şişen	Montmorillonit
> 4	Çok Yüksek	Şişen	Montmorillonit



Şekil 2.45. Şişen montmorillonit ve şişmeyen kaolinit olarak zemin sınıflaması (Prakash and Sridharan, 2004)

2.6.3. Genişleme İndisi Deneyi

Genişleme indisi deneyi, 1960'lı yılların sonlarında Amerika'da geliştirilmiştir. ASTM (ASTM D4829-88) ve Üniform Yapı Şartnamesi (UBC) tarafından standart (Standart No 29-2 UBC, 1991) olarak kabul edilmiştir. Deney, zeminin No 4. eleğinden geçen kısmı üzerinde yapılmaktadır. Zemin, yaklaşık olarak optimum su muhtevasına sahip olana kadar, saf su ile karıştırılır ve hava geçirmeyen bir kaptan en az 16 saat bekletilir. Daha sonra, 10.19 cm çapındaki ve 5.1 cm yüksekliğindeki standart kalıp içine iki tabaka halinde sıkıştırılır. Kalıp alt ve üst olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır ve alt kısmında çıkarılabilen çelik bir ring bulunmaktadır. Her bir zemin tabakası, 2.5 kg ağırlığındaki tokmağın 30.5 cm'den 15 defa düşürülmesi ile sıkıştırılır. Kalıp söküldükten sonra, ringin alt ve üstünde kalan zemin traşlanır. Ring, ödometre veya benzer bir yükleme aletine yerleştirilir. 6.9 kPa lık sürşarj yükü uygulanır, numune su altında bırakılarak, hacim değişimi 24 saate kadar gözlenir. Genişleme indisi Eşitlik 2.10 yardımıyla hesaplanarak en yakın tam sayı olarak kaydedilir (Nelson ve Miller,

1992; Sikh, 1993). Zeminin genişleme potansiyeli, genişleme indisine göre Tablo 2.9’da görüldüğü şekilde sınıflandırılmaktadır.

$$EI = 100.S.F \quad (2.10)$$

EI : Genişleme indisi,

S : Şişme yüzdesi,

F : No 4 eleğinden geçen zemin yüzdesidir.

Tablo 2.9. Genişleme indisine bağlı olarak zeminin genişleme potansiyelinin sınıflandırılması (ASTM D 4829-88)

Genişleme İndisi (EI)	Genişleme Potansiyeli
0-20	Çok Düşük
21-50	Düşük
51-90	Orta
91-130	Yüksek
>130	Çok Yüksek

2.6.4. Lineer Genişleyebilirlik Katsayısı (COLE)

Lineer genişleyebilirlik katsayısı (COLE) deneyi, şişen zeminlerin karakterize edilmesi için kullanılan bir büzülme deneyidir. Deney örselenmemiş bir numunenin 33 kPa emme durumu ile fırında kurutulmuş emme (1000 kPa) durumu arasındaki lineer deformasyonunun belirlenmesinden oluşur. Metoda göre, örselenmemiş zemin numunesi, su için geçirimsiz ancak su buharı için geçirimli olan esnek plastik reçine ile kaplanır. Daha sonra bu doğal zemin toprakları, basınçlı bir kap içinde 33 kPa zemin emmesine getirilir. Zeminlerin hacimleri Arşimet prensibi yardımıyla belirlenir. Daha sonra numuneler fırında kurutulur ve benzer şekilde diğer hacim ölçümleri yapılır. COLE, nemli durumdan kuru duruma geçirildiğinde numune boyutundaki değişimin ölçümüdür ve 33 kPa emme ile fırında kurutulmuş topağın hacim ağırlıklarından belirlenir. COLE değeri Eşitlik 2.11 kullanılarak belirlenir.

$$COLE = \Delta L / \Delta L_D = (\gamma_{kD} / \gamma_{kM})^{0.33} - 1 \quad (2.11)$$

COLE : Lineer genişleyebilirlik katsayısı,

- $\Delta L/\Delta L_D$: Kuru boyutlara bağılı lineer deformasyon,
 γ_{kD} : Fırında kurutulmuş numunenin kuru birim hacim ağırlığı,
 γ_{dM} : 33 kPa emmede numunenin kuru birim hacim ağırlığıdır.

COLE yüzde olarakta hesaplanabilmekte ve bu durumda lineer genişleyebilirlik yüzdesi (LEP) olarak isimlendirilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Ziraat Departmanı Doğal Kaynakları Koruma Servisi tarafından verilen şişme – büzülme potansiyeli sınıflandırması Tablo 2.10’te görülmektedir (USDA, 2005).

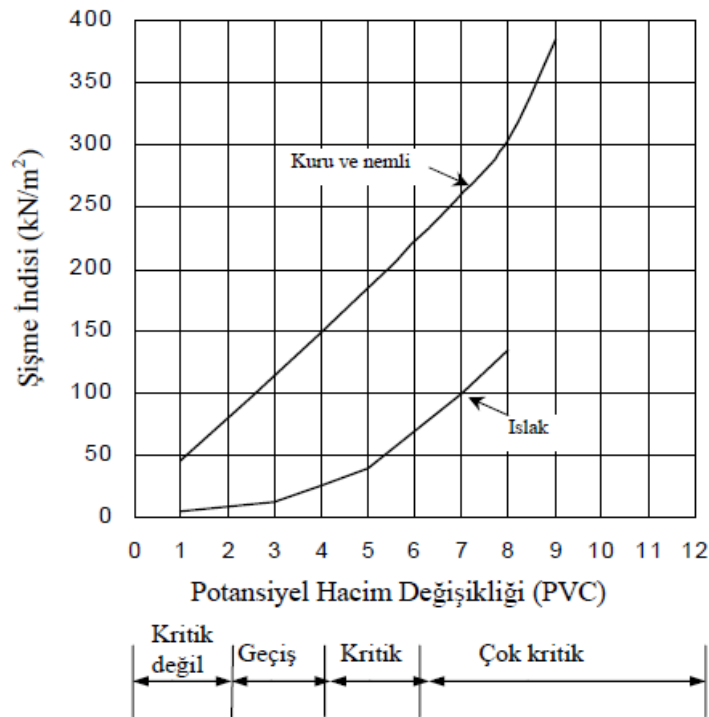
Tablo 2.10. Şişme – büzülme potansiyelinin lineer genişleyebilirlik katsayısı ve lineer genişleyebilirlik yüzdesine bağılı olarak sınıflandırılması (USDA, 2005)

COLE	LEP	Şişme-Büzülme Potansiyeli
<0.03	<3	Düşük
0.03-0.06	3-6	Orta
0.06-0.09	6-9	Yüksek
≥ 0.09	≥ 9	Çok Yüksek

2.6.5. Potansiyel Hacim Değiştirme (PVC) Deneyi

PVC metre, ABD Federal Konut Yönetiminin katkıları ile Lambe (1960), tarafından zeminin potansiyel hacim değişikliğini tespit etmek amacı ile geliştirilmiştir. Zeminlerin hacim değiştirme potansiyeli; “zeminin PVC metresi” olarak ifade edilen standart ekipmanlar kullanılarak ölçülür. Deneylerde sıkıştırılmış numuneler kullanılır ve numunenin şişme basıncı ölçülür. PVC metre; arazi veya laboratuvar da kullanılabilir.

Numuneler, Modifiye Proctor enerjisi (2700 kJ/m³) ile doğal su muhtevasında bir ödometre kabı içine sıkıştırılır ve numune ekipmana yerleştirildikten sonra suya boğulur. Bu işlemten sonra oluşacak şişmenin ölçme halkasında oluşturduğu basınç, zamana bağılı olarak ölçülür ve Şekil 2.46’da verilen ilişki kullanılarak kuru ve ıslak olma durumu dikkate alınarak zeminin nitel hacim değişikliği hakkında bilgi sunan PVC aralığı bulunur (Lambe, 1960 ve 1962).



Şekil 2.46. Şişme indisine bağlı potansiyel hacim değişikliği (Lambe, 1960)

Uygulamada sık kullanılan bir kriter olan PVC değeri; basit ve standart olması gibi üstünlüklere sahiptir. PVC kriteri, sıkıştırılmış numunelerin tanımlanmasında çok faydalı bilgiler sunmaktadır. Ancak bu kriterin, yerindeki zeminler için bir tasarım kriteri olarak kullanılmaması önerilmektedir (Nelson ve Miller, 1992).

2.6.6. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR)

CBR deneyi, yaygın olarak otoyol tasarımında kullanılan bir penetrasyon deney yöntemidir. Deney aşaması, penetrasyon direnci ölçümü öncesinde ince taneli zeminlerin düşey şişme potansiyelinin belirlenmesini kapsar. Bu esasla zemin örnekleri 15.2 cm çapındaki CBR deney silindirlerine farklı su muhtevası ve yoğunluklarda sıkıştırılarak hazırlanır. Belirlenen sıkıştırma özelliklerinde hazırlanan numuneler arazi ortamında maruz kalacağı statik sürsarj yükü altında suya boğularak 4 gün boyunca şişme okumaları yapılır. Şişme okumalarının ardından penetrasyon aşamasına geçilir.

CBR, otoyol ve havaalanı kaplamalarında kullanılan standart ve popüler bir tasarım parametresidir. Bununla birlikte şişme potansiyelinin tanımlanmasına yönelik tanımlayıcı değildir. Fakat Kassiff ve diğ. (1969), CBR kalıbı içinde değişik su

muhtevası ve yoğunluk değerlerinde hazırlanan numunelerin PI ve kil yüzdesine bağlı şişme yüzdesi değerlendirmesinin yapılabileceğini önermişlerdir.

2.6.7. Kil Mineralojisi

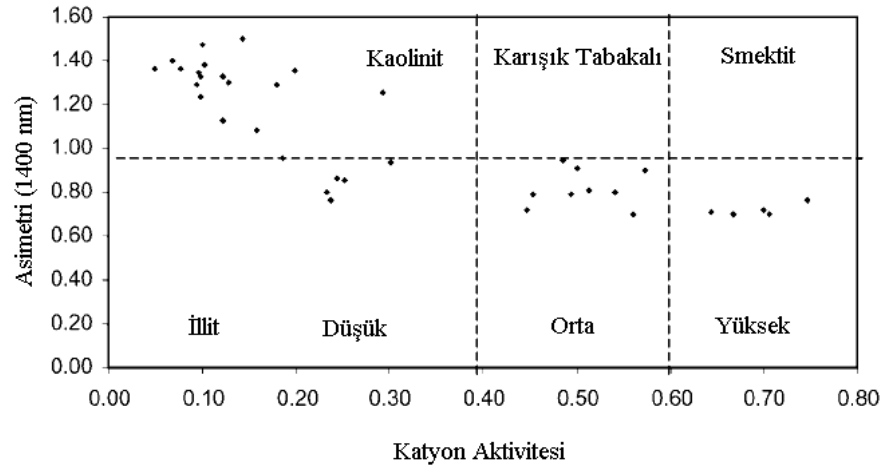
Kil mineralojisi, şişen zemin davranışını kontrol eden temel faktörlerden biridir. Bu nedenle şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde, zemin mineralojisinin bilinmesi önemli yararlar sağlamaktadır. Tablo 2.11’de çeşitli kil mineralleri ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki görülmektedir.

Tablo 2.11. Kil mineralleri ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Mitchell, 1976)

Kil Minerali	Şişme Potansiyeli
Kaolinit	Çok Düşük
İllit	Orta
Montmorillonit	Yüksek
Vermikülit	Yüksek
Klorit	Yok

Olsen ve diğ., (2000), zeminlerin toplam smektit mineral muhtevasının şişme potansiyelinin güvenilir bir göstergesi olduğunu ifade etmişlerdir. Bir zemin içindeki şişen kil minerallerinin varlığının belirlenmesi, zeminin şişebileceğinin bir göstergesidir. Şişen kil zeminin davranışını kontrol eden temel faktör; kil mineralojisidir. Kil mineralleri değişik teknikler kullanılarak tanımlanır. Bunlar arasında en yaygın kullanımı olan X-Ray difraksiyon yöntemidir. Xray analizinin; dalga uzunluğunun bu tip minerallerin atom düzlem aralığı ile uyumlu olması nedeniyle, en uygun değerlendirme yöntemi olduğu belirtilmektedir. Killerin şişme potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan diğer mineralojik yöntemler ise; diferansiyel termal analiz, boya adsorbsiyonu (MBV), kimyasal analiz ve elektron mikroskop yöntemleridir (Chen, 1988).

Kariuki ve diğ. (2003), katyon aktivitesi ve bir spektral karakteristik olan 1400 nm deki asimetriye bağlı olarak mineraloji ve şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde kullanılabilecek bir grafik vermişlerdir (Şekil 2.47).



Şekil 2.47. Kasyon aktivitesi ve asimetreye bağlı olarak mineraloji ve şişme potansiyelinin tahmini (Kariuki ve diğ., 2003)

2.6.8. İndeks Özellikleri

Şişme potansiyelinin, kıvam limitleri kullanılarak tahmin edilmesi en yaygın yaklaşımlardan biridir. Altmeyer (1955) şişme potansiyelinin tahmin edilmesi için rötre limiti veya lineer rötrenin kullanımını önermiştir (Tablo 2.12.). Holtz ve Gibbs (1956) tarafından verilen ve örselenmemiş zemin numunelerindeki şişme davranışına dayanan kriterlerler ise Tablo 2.13. 'de görülmektedir.

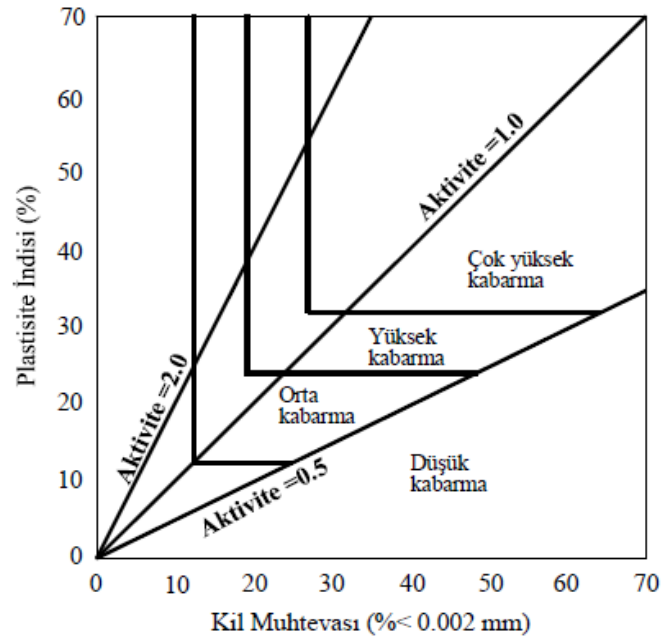
Tablo 2.12. Şişen zeminlerin, rötre limiti ve lineer rötreye bağlı olarak sınıflandırılması (Altmeyer,1955)

Lineer Rötre	Rötre Limiti (%)	Muhtemel Şişme	Şişme Derecesi
<5	>12	<0.5	Kritik değil
5-8	10-12	0.5-1.5	Sınır
>8	<10	>1.5	Kritik

Tablo 2.13. Şişen zeminlerin, kolloid içeriği, plastisite indisi ve rötre limitine bağlı olarak sınıflandırılması (Holtz ve Gibbs,1956)

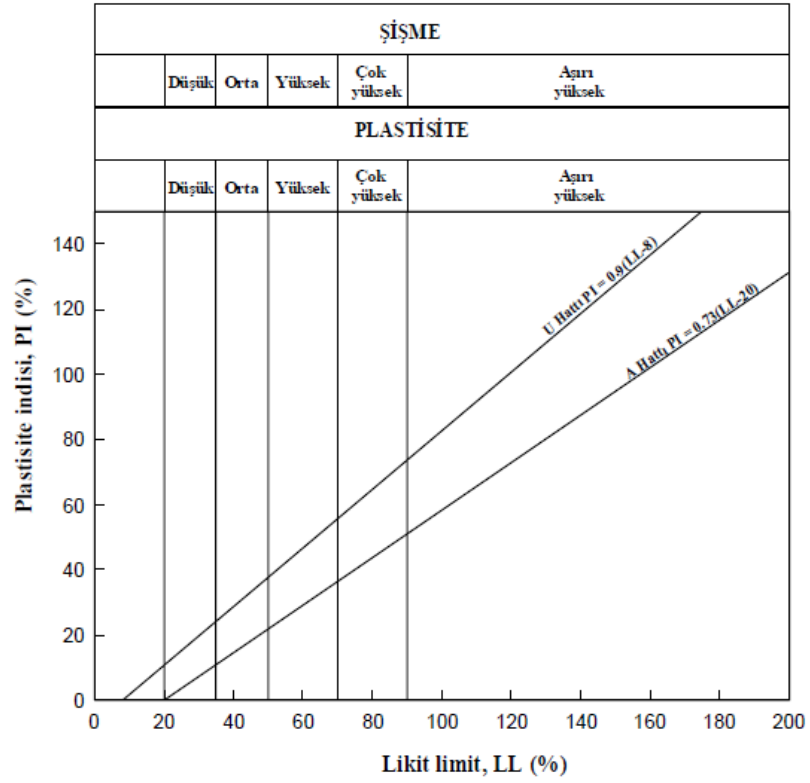
Kolloid İçeriği (<0.0001mm)	Plastisite İndisi (%)	Rötre Limiti (%)	Muhtemel Şişme (%)	Şişme Derecesi
>28	>35	<11	>30	Çok Yüksek
20-31	25-41	7-12	20-30	Yüksek
13-23	15-28	10-16	10-20	Orta
<15	<18	>15	<10	Düşük

Seed ve diğ. (1962) sıkıştırılmış killerin şişme karakteristikleri üzerine yaptıkları araştırmada, aktivite ve kil boyutlu tanelerin yüzdesine dayanan bir kart geliştirmişlerdir. Van der Merwe (1964) ise plastisite indisi ve kil yüzdesine bağlı olarak, şişme potansiyelinin tahmin edilmesi için Şekil 2.48’de görülen kartı vermişlerdir. Chen (1965) şişme potansiyelini tahmin etmek için kil yüzdesi, likit limit ve standart penetrasyon darbe sayıları arasında bir ilişki geliştirmiştir. Raman (1967), şişme derecesini; plastisite indisi ve rötre indisinin bir fonksiyonu olarak ifade etmiştir.



Şekil 2.48. Kil yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli kartı (Van der Merwe, 1964)

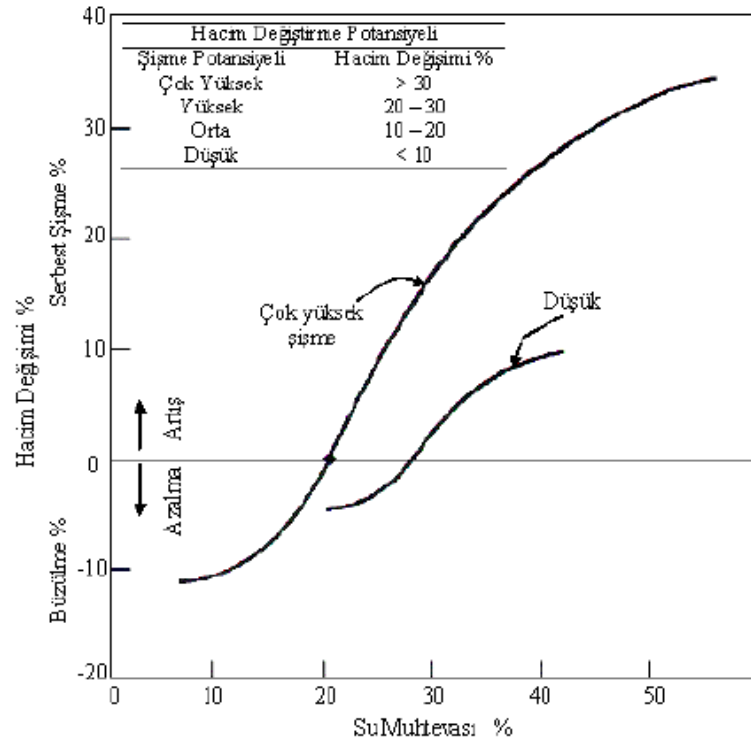
Dakshanamurty ve Raman (1973) zeminlerin şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde plastisite kartından yararlanmışlardır. Şekil 2.49’da Raman ve Dakshanamurty (1973) tarafından önerilen sınıflandırma kartı görülmektedir. Snethen ve diğ., (1977) potansiyel şişmenin tahmini için çeşitli araştırmacılar tarafından verilen 17 kriteri değerlendirmişler, likit limit ve plastisite indisinin, doğal koşullar ve çevre ile birlikte potansiyel şişmenin en iyi göstergeleri olduğunu belirtmişlerdir.



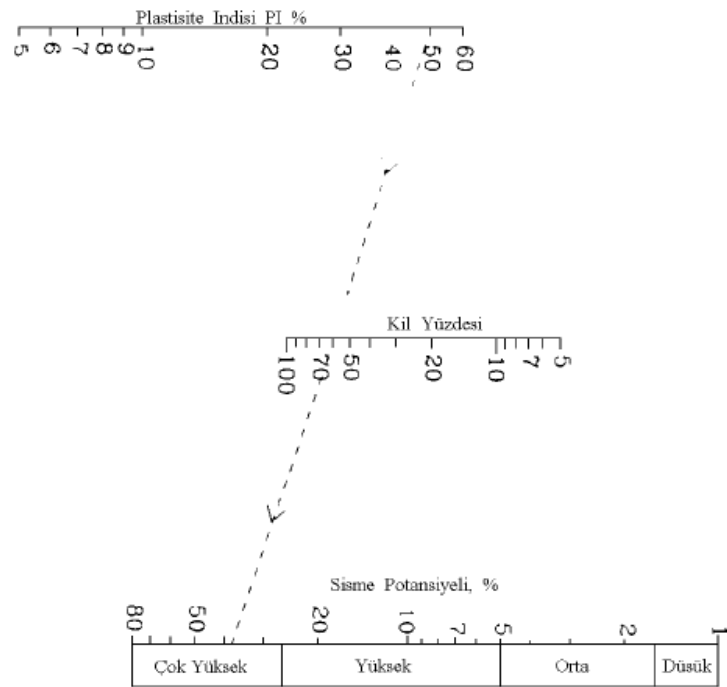
Şekil 2.49. Plastisite indisi ve likit limite bağlı şişme potansiyeli kartı (Dakshanamurthy ve Raman, 1973)

Hanafy (1991) kuru zeminlerin su adsorbe ederek şişmesi sırasında su muhtevası ile hacim değişimi arasındaki ilişkiyi S eğrisi olarak tanımlamış ve kurumuş killerin şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde yararlanılabilecek bir şişme potansiyeli kartı vermiştir (Şekil 2.50.).

Basma (1993) 128 doğal zemin numunesi üzerinde yaptığı deney sonuçlarına bağlı olarak, standart AASHTO maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasında sıkıştırılan bir numunenin 6.9 kPa basınç altındaki şişme yüzdelerinin tahmin edilebilmesi için; likit limit, plastisite indisi, kil yüzdesi, kolloid yüzdesi ve aktivite parametrelerini kullanarak çoklu regresyon analizleri yapmıştır. Analizlerin sonuçlarına bağlı olarak şişme potansiyelinin tahmin edilmesi için Şekil 2.51’de görülen sınıflandırma kartını vermiştir.



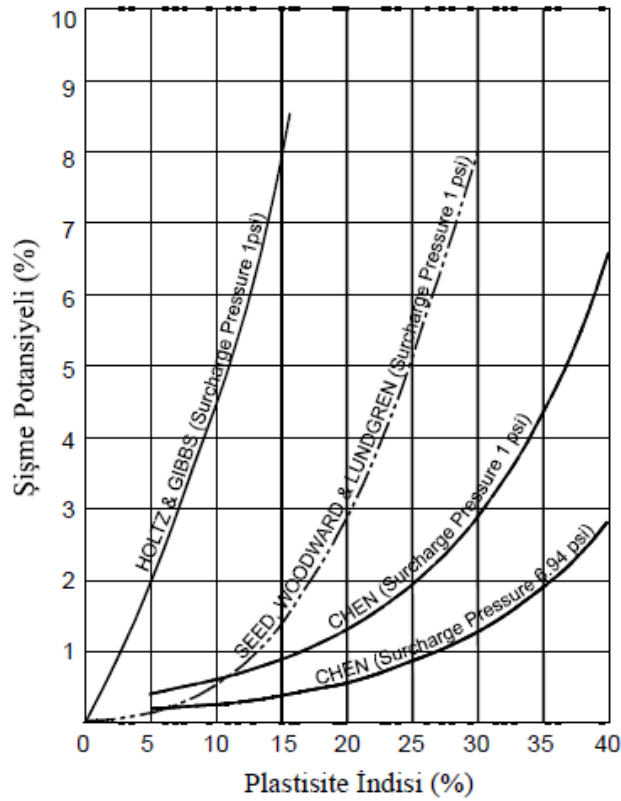
Şekil 2.50. Şişme potansiyeli kartı (Hanafy, 1991)



Şekil 2.51. Kıl yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli tanımlama kartı (Basma, 1993)

Karuiki ve Van Der Meer (2003) zeminlerin şişme potansiyelinin esasen kil tipine bağlı olduğunu, bu nedenle zeminin şişme potansiyelinin karakterize edilmesinde kil tipini ifade eden parametrelerinin daha anlamlı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Araştırmada kil yüzdesi ile şişme potansiyeli arasında zayıf bir ilişki olduğu gözlenmiştir. Ancak, şişme potansiyeli ile; CEC, PI, LL, doygunluk su muhtevası ve kil mineralojisi arasında kuvvetli ilişkiler elde edildiği belirtilmiştir.

Chen (1988), Plastisite indisi ile şişme potansiyeli arasındaki ilişkiyi doğal su muhtevasında şişmeye bırakılan örselenmemiş numuneler için dört farklı tanımlama yöntemini bir arada karşılaştırarak değerlendirmiştir (Şekil 2.52). Bir başka ifade ile aynı plastisite indisi değeri için farklı şişme potansiyeli değerleri elde edilmektedir. Bunun nedeni; araştırmaların farklı zemin tiplerinde yapılması, başlangıç zemin koşullarının ve su muhtevası değerlerinin farklı olması olarak değerlendirilmektedir (Nelson ve Miller, 1992).



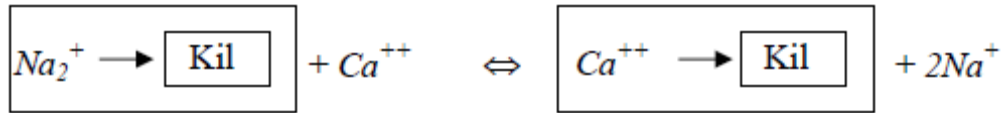
Şekil 2.52. Plastisite indisi ve şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Chen, 1988)

2.6.9. Katyon değişim kapasitesi (CEC)

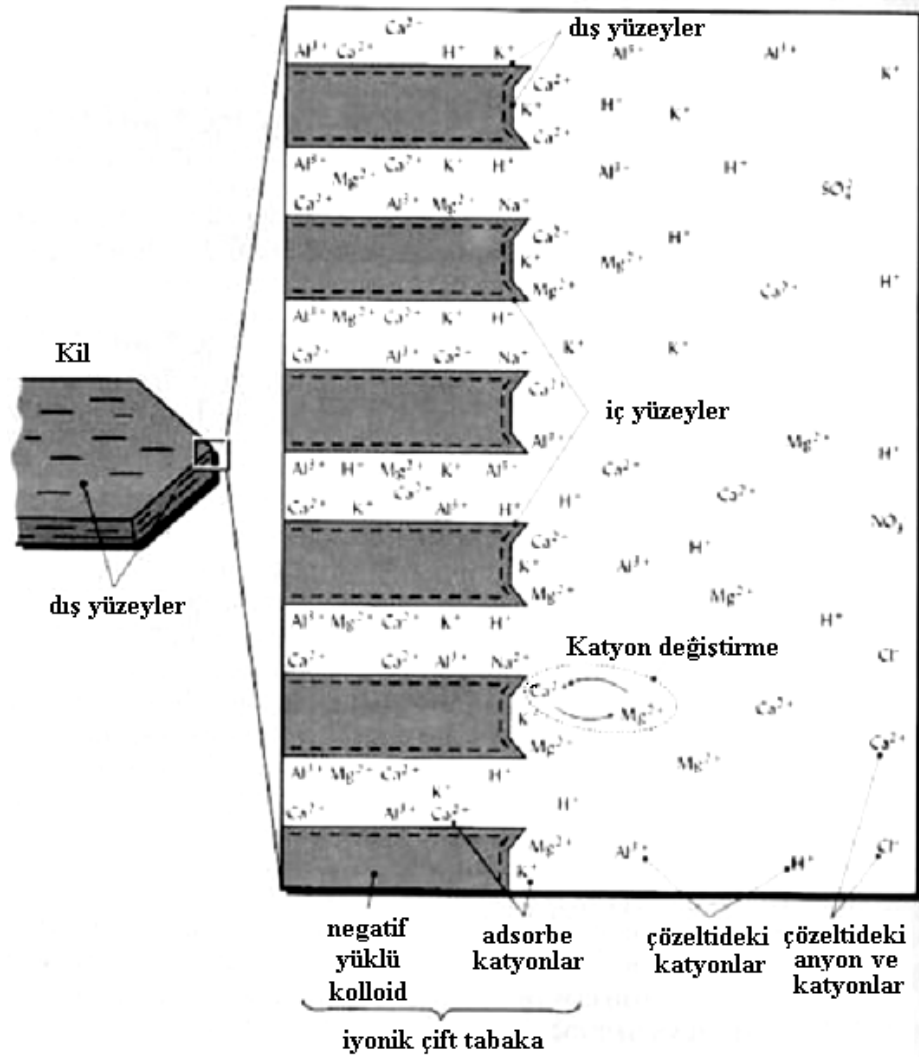
Katyon değişimi, zeminlerin temel elektro-kimyasal özelliklerinden biridir ve özellikle killerin davranışı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Temel nedenleri; izomorf değişim ve kil mineralinin köşelerindeki alümin gruplarının çözölmesidir (Ammann, 2003; Dontsova ve diğ., 2004).

Mineralin kristal strüktürü değişmeksizin, tetrahedral veya oktahedral levhadaki katyonların, ortamda bulunan aynı veya farklı değerliğe sahip başka katyonlarla yer değiştirmesine izomorf değişim adı verilmektedir. İzomorf değişim (örneğin, magnezyum ile alüminyumun veya alüminyum ile silikonun yerdeğişmesi) sonucunda, kil kristallerinde bir yük eksikliği veya diğer bir deyişle net negatif yük durumu ortaya çıkar. Negatif yükün dengelenerek, elektriksel nötürlüğün sağlanabilmesi için, ortamda bulunan katyonlar kil tanesine çekilir. Kil tanesinin köşe ve yüzeylerine bağlanan bu katyonlar, değişebilir katyonlar olarak isimlendirilirler. Killerde yaygın değişebilir katyon türleri; H, K, NH₄, Na, Ca ve Mg olarak sıralanabilir. Bir kilin yük eksikliğini dengelemek için gereken değişebilir katyonların toplam miktarına ise, katyon değiştirme kapasitesi (CEC) adı verilir. Diğer bir deyişle, katyon değiştirme kapasitesi zeminlerin katyon tutma yeteneğini gösteren bir değerdir (Ingles, 1968; Sharma, 1998; Ammann, 2003).

şekil 2.53.' da tipik bir katyon değiştirme reaksiyonu ve şekil 2.54.' de bir katyon değiştirme ortamı görölmektedir.



şekil 2.53. Katyon değiştirme reaksiyonu (Abdullah ve diğ., 1997)



Şekil 2.54. Kation değişirme ortamı (Vogt, 2002)

Kation değişirme kapasitesinin belirlenmesi için birkaç yöntem geliştirilmiştir. İlk geliştirilen yöntemlerden biri; kilin bir katyona doyurulması ve artık tuzların yıkanması; ardından başka katyonlarla doyurularak, yıkama işlemlerinin tekrarlanması şeklinde uygulanmaktadır. Toplam çözeltiler ise değişen kation miktarının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Diğer bir yöntem kilin amonyum (NH_4) iyonlarıyla doyurulmasıdır. Önerilen diğer yöntemler ise setilpiridinyum iyonlarının, kobalt hekzamin, bakır dietilendiamin ve bakır trietilentetramin gibi metal-organik karışımlarının kullanılmasıdır. CEC' in metal organik karışımlarla belirlenmesi hızlı ve kesin sonuç vermektedir. Bununla birlikte, amonyum asetat yöntemi önemini korumakta ve uzun zaman almasına rağmen diğer yöntemlerin doğrulanmasında kullanılmaktadır (Ammann, 2003).

Çokça (1993) altı farklı kil numunesi üzerinde yapılan metilen mavisi deneylerinden tespit edilen katyon değiştirme kapasitesi ile standart amonyum asetat deneyinden belirlenen katyon değiştirme kapasitesi değerlerini karşılaştırmıştır. Sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu vurgulamıştır.

Bir katyonun diğer katyonlarla değişebilirliği; iyon boyutu ve değeri içeren bir çok faktöre bağlıdır. Bir kilin katyon değiştirme kapasitesi, tane boyutu, sıcaklık ve değişme reaksiyon ortamıyla ilişkilidir. CEC değerleri, kil mineralojisinin bir göstergesidir ve genellikle CEC değerinin büyük olması, şişme potansiyelinin de yüksek olduğunu göstermektedir (Mitchell, 1976; Sharma, 1998).

Kaolinit minerali, çok küçük izomorf değişime sahiptir. Bu nedenle meydana gelen düşük negatif yük, tetrahedral ve oktahedral tabakalar arasındaki hidrojen bağları ile karşılanır. Bu bağlar, tabakalar arasında katyonların veya suyun adsorbsiyonu için gerekli olan boşlukları bırakmaksızın, tabakaları sıkıca birlikte tutar. Bu nedenle, kaolinit şişmeyen bir kil mineralidir (Wiseysekera, 2003).

Low(1981) değişebilir katyonun değeri, boyutu ve hidrasyon enerjisinin tabakaların şişmesi üzerinde etkili olduğunu ileri sürmüştür. Tabakalar birbirinden yeterince uzaklaştığında, kısa mesafeli kuvvetlerin etkisi azalmakta ve şişme katyon etkisinden bağımsız hale gelmektedir.

Genellikle iki değerlikli katyonla (Ca^{2+}) doymun bir montmorillonit, 1nm'den 2 nm'ye kadar %100 şişebilmektedir (Azam vd. 2000). Ancak tek değerlikli katyona (Na^{+}) doymun bir montmorillonit sınırsız şişebilir. Bununla birlikte, doğal zeminler sodyuma doymun montmorillonitler kadar şişmezler. Bunun iki temel nedeni vardır:

- Genellikle doğal kil mineralleri şişmeyen kil mineralleriyle karışık halde bulunurlar
- Zemin sistemleri nadiren mono iyoniktir ve genellikle ya Ca^{2+} yada Mg^{2+} ile doymundur (Borchardt, 1989).

Sodyum gibi tek değerlikli değişebilir katyonlar, kalsiyum gibi iki değerlikli katyonlardan daha büyük şişmeye neden olur. Alüminyum gibi çok değerlikli değişebilir katyonlara sahip yüksek asitlikteki killerde düşük şişme gözlenmektedir (Yong ve Warkentin, 1975; Luckham ve Rossi, 1999; Montes-H ve diğ., 2003).

Abdullah ve diğ. (1997) illit ve smektit içeren killerin potasyum katyonu ile reaksiyona girmesi sonucunda şişme potansiyelinin önemli ölçüde azaldığını vurgulamışlardır. Churchman ve diğ. (2002) iki farklı bentonit numunesi üzerinde katyon değiştirme kapasitesinin (CEC) ve değişebilir katyonların, şişme davranışı (serbest şişme indisi, FSI) üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Numunelerden birinin Avustralya'nın Arumpo bölgesinden alındığı, Wyoming bentonitinin ise ticari olarak elde edildiği ifade edilmiştir. Tablo 2.14'de araştırmacılar tarafından yapılan deneylerin sonuçları görülmektedir. Tablodan görüleceği üzere her iki numune de önemli smektit içermektedir. Bununla birlikte şişme davranışları arasındaki önemli farklılık, değişebilir katyonlardan kaynaklanmaktadır.

Tablo 2.14. İki farklı bentonit için katyon değiştirme kapasitesi ve değişebilir katyonların zeminin şişmesi üzerindeki etkisi (Churchman ve diğ., 2002)

Numune	Bileşim (%)		Değişebilir Katyonlar				FSI (2gr için)
	Smektit	Kuvars	K ₂ O	Mg	Na	CEC	
Arumpo	>99	0	0.71	55.5	37	100	9 ± 0.5
Wyoming	90	<5	0.50	3.3	52.5	75	34 ± 1

2.6.10. Metilen Mavisi Emilim Deneyi

Metilen mavisi deneyi, granüle malzeme içindeki kil muhtevasının tayinine bağlı olarak malzemenin kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla Fransa'da geliştirilmiştir. Metilen mavisi tozu, su ile karıştırıldığında katyonik bir boya davranışı göstermekte ve $C_{16}H_{18}CIN_3S^+$ kimyasal formülü ile tanımlanmaktadır. Zemin çözeltisi ile karışıma girdiğinde metilen çözeltisindeki klorit iyonları zemin çözeltisi içindeki kil mineralindeki katyonlarla yer değiştirerek kil mineral yüzeyinde tutulur. Adsorbe edilen metilen solisyonu miktarı; kil minerallerinin miktarı ve tipine, katyon değiştirme kapasitesine ve özgül yüzey alanına bağlı olarak değişir.

Metilen mavisi nokta deneyi, zemin içindeki kil tanelerin tüm yüzey alanını kaplamak için gerekli metilen mavisi miktarının tayiniyle, zeminin iyon adsorbsiyon kapasitesinin belirlenmesine olanak sağlar. Bu deney yöntemi, metilen mavisinin su içinde çözünmesi sırasında serbest kalan metilen mavisi katyonları ile yer değiştirebilir. Bir başka ifade ile, kil katyonları arasındaki kimyasal reaksiyon ile gelişen titrasyon esaslı bir deney yöntemidir.

En büyük özgül yüzeye ve en büyük negatif elektrik yüküne sahip kil taneleri, en kolay katyon değiştirme kapasitesine sahip olundırı. Buna ilaveten bir zeminin adsorbsiyon kapasitesi, muhtevastındaki kil mineral tipiyle de ilişkilidir. Adsorbsiyon kapasitesi, kil tanesinin özgül yüzey alanı ve yükün bir fonksiyonu olarak artar.

Chiappone ve diğ. (2004), Fransa ve ABD'deki standart yöntemlerde belirtildiğı gibi, kil minerallerinin tanımlanmasında kullanılan metilen mavisi deneyinin uygulanabilirliğı ve değeriendirilmesi yönünde bir dizi karşılaştırmalı çalışma yapmışlardır. Fransız standardında deneye tabi olacak zemin numunesi miktarı için kil muhtevasına bağılı olarak killi veya aşırı killi zeminlerde 30-60 g, orta veya biraz killi zeminlerde 60-120 g alınmasının uygun olduğı tavsiye edilmiştir. Bu oranda alınan zemin numunesi 500 mL distile su içinde çözünerek 10g/L konsantrasyonunda hazırlanan metilen mavisi çözeltisinden her seferinde 5 mL ilave edilmesini takiben bir dakika sonra alınan damlanın filtre kâğıdı üzerine damlatılan, koyu renkli damla etrafında açık renkli halkanın beş dakika boyunca sabit kalmasıyla sonlandırılır. Fransız standardında belirlenen deney aşamasıyla aynı esasta olan ABD standardında ise 2 g zemin numunesi kullanılmakta ve deney asidik bir ortamda (pH 2.5-3.8) yapılmaktadır.

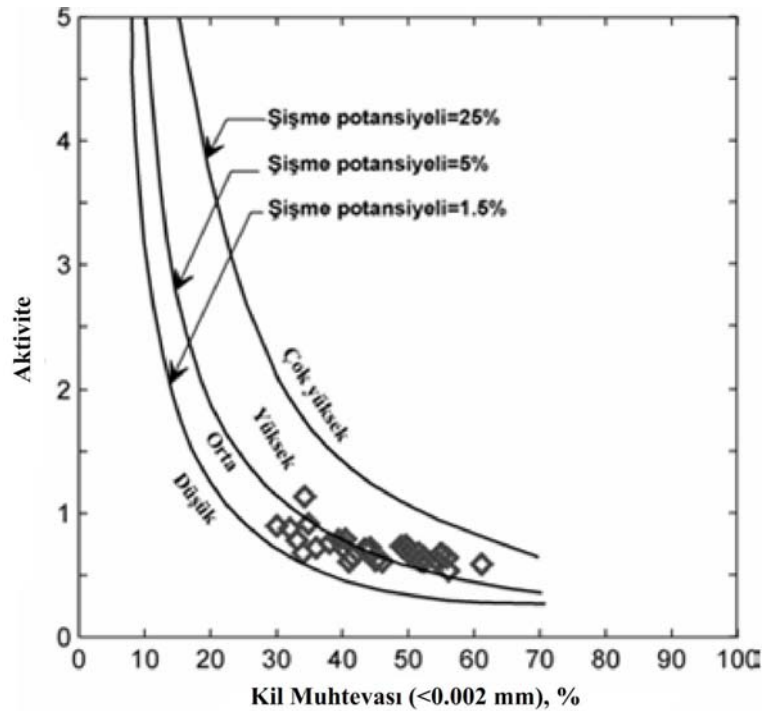
Sonuçta, ABD standardıyla tanımlanan deney yönteminin ince taneli homojen malzemeler için uygun olduğunu diğeri bir ifade ile yalnızca kil muhtevastının belirlenmesine yönelik bilgi sağladığını, Fransız standardı ile tanımlanan deney yönteminin ise tüm malzemeyi temsil edecek şekilde bilgi sağlamak için heterojen malzemeler üzerinde kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Türköz ve Tosun (2009), yaptıkları araştırmada 33 farklı lokasyondan alınan Harran kilinin geoteknik özelliklerini tanımlamış ve üç farklı başlangıç su muhtevastında

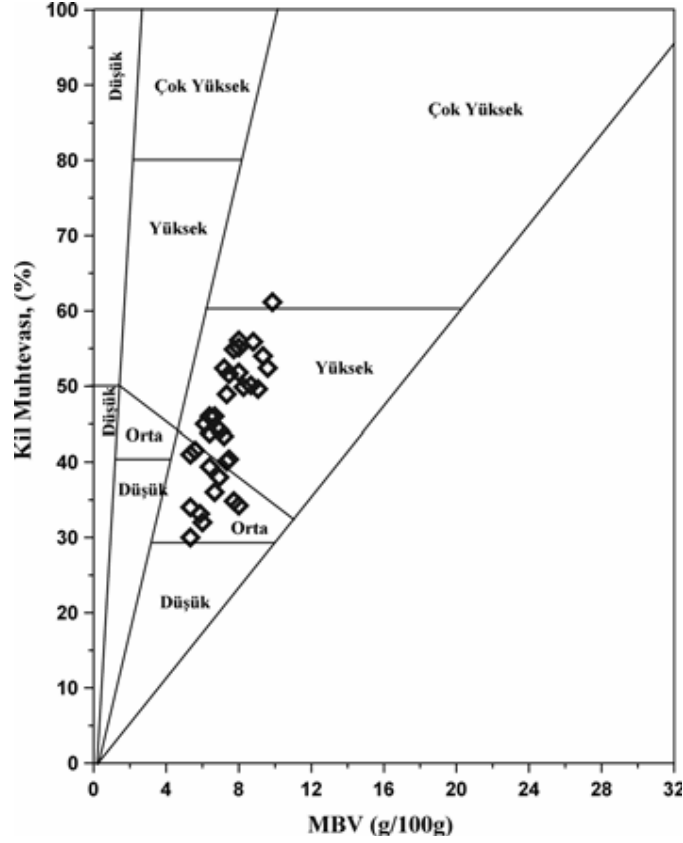
sıkıştırılarak hazırlanan numunelerin şişme yüzdesi ve basıncı direkt deneylerle belirlenmiştir. İlgili fiziki değişkenlere bağlı olarak pratik kullanım amacıyla eşitlikler oluşturup, çoklu regresyon analizi esasında değerlendirmeler gerçekleştirilmişlerdir.

Şişme potansiyelinin değerlendirildiği kartlardan da bu zeminlerin yüksek şişme potansiyeline sahip olduğu görülmüştür (Şekil 2.55). Sıkıştırılmış numunelerin şişme karakteristikleri üzerinde yapılan yoğun çalışmalar sonucunda, aktivite değeri ile kil boyutundaki tanelerin yüzdesi arasındaki ilişkiye bağlı olarak bir sınıflama, 1960'lı yılların başında San Francisco Körfez alanın da çalışan birkaç mühendis tarafından önerilmiştir. Sıkıştırılmış killer üzerine yaptıkları çalışmalar sonucunda, kilin 2 mikrondan küçük yüzdeleri ile aktivite değerine bağlı olarak Şekil 2.55'da sunulan bu çalışmanın doğal killer için geçerli olduğu belirtilmelidir (Seed vd., 1962).

Şekil 2.56'dan zemin numunelerinin orta ve yüksek şişme potansiyeline sahip olduğu ve zeminin adsorbsiyon kapasitesinin muhtevastaki kil mineral tipiyle ilişkilendirilmesi, nihayetinde artan kil yüzdesiyle orantılı olarak metilen mavisi değerlerinde bir artış olarak gözlenmektedir. Bu durum, Seed ve diğ., (1962) tarafından önerilen sınıflama kartı ile de uyum içindedir.



Şekil 2.55. Aktiviteye bağlı sınıflama kartı (Seed ve diğ., 1962)



Şekil 2.56. Kil muhtevası-MBV ilişkisi (Çokça, 1991)

Kuru yoğunluk, MBV ve doygunluk değişkenlerinin birlikte değerlendirildiği eşitlikler Eşitlik 2.12 ve 2.13’de verilmiştir

$$SY = 67.193 + 7.811\rho_d + 41.017 \log(1/S) + 0.339MBV \quad r=0.911 \quad (2.12)$$

$$SB = 701.151 + 104.756\rho_d + 443.895 \log(1/S) + 3.708MBV \quad r=0.888 \quad (2.13)$$

Burada;

SY: şişme yüzdesi (%),

SB: şişme basıncı (kPa), S: doygunluk (%),

MBV: metilen mavisi değeri (g/100g)’dir.

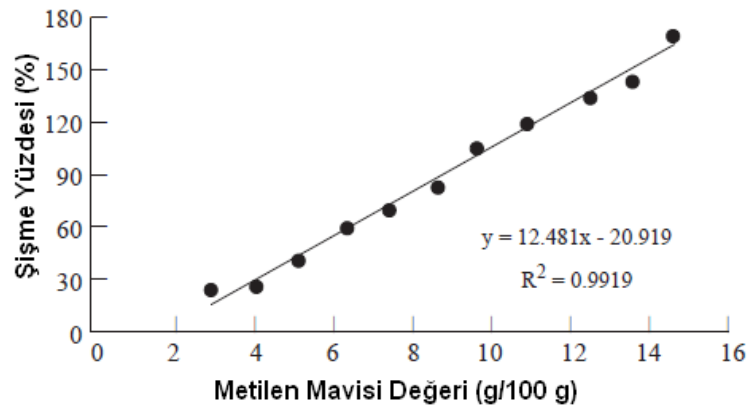
Çokça (2001), yaptığı araştırmada korelasyonlar yardımıyla metilen mavisi değeri ile şişme yüzdesi arasında ayrıca şişme yüzdesi ile ilk zemin emilimi arasında doğrusal bir ilişki saptamıştır (Eşitlik 2.14). Şekil 2.57’de metilen mavisi değeri artışıyla doğru orantılı olarak şişme yüzdesinin arttığı görülmektedir.

$$\text{Şişme (\%)} = -121.807 + (12.1696 * \text{Metilen Mavisi Degeri}) + [27.6579 * \text{Log}_{10}(\text{İlk zemin emilimi})] \quad (2.14)$$

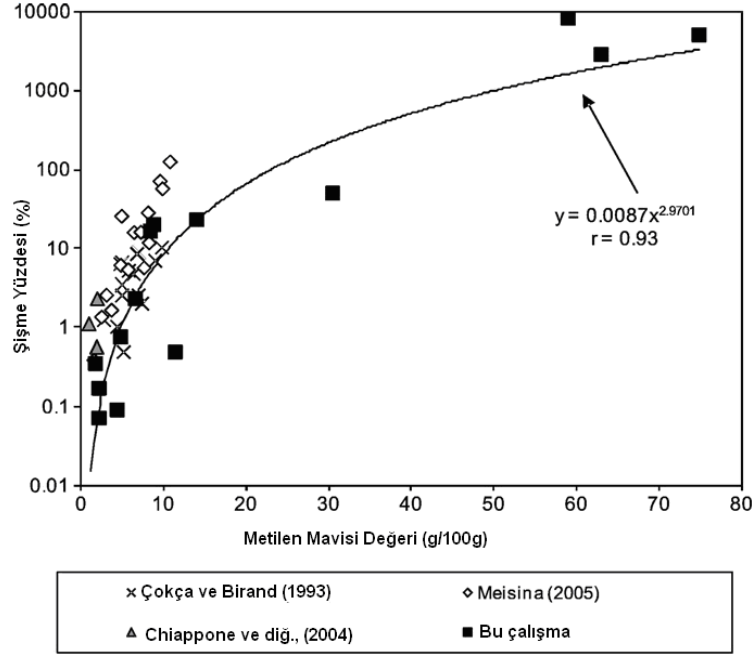
Yükselen ve Kaya (2008) kil zeminin şişme potansiyeli belirlemek için metilen mavisi testini kullanmışlardır. Türkiye'nin 16 ayrı noktasından ve Amerika'dan alınan zemin numuneleri üzerinde yaptıkları metilen mavisi değeri testi sonucunda şişme potansiyeliyle metilen mavisi değeri arasında kurdukları ilişki Şekil 2.58'de verilmiştir. Ayrıca Şekil 2.58'de daha önceki araştırmacıların kurdukları ilişkilere ait veriler de bulunmaktadır. Araştırmada kullandıkları numunelerin şişme potansiyelleri eşitlik 2.15'den elde edilmiştir. Şekil 2.58'den görüldüğü gibi metilen mavisi değeri ve zeminlerin şişme potansiyelleri arasında iyi bir korelasyon vardır. Ayrıca araştırmadaki sonuçlar geçmiş çalışmalardaki sonuçlarla uyum göstermektedir. Böylece kil içeriği ve aktivite belirlemeye gerek kalınmadan metilen mavisi testinden şişme potansiyelinin bulunabileceği ifade edilmiştir. Tablo 2.15'de Yükselen ve Kaya (2008) tarafından metilen mavisi değerleri kullanılarak elde edilen şişme potansiyeli sınıflaması verilmiştir.

$$\text{Şişme Potansiyeli (\%)} = S = (3.6 * 10^{-5}) * (A_c^{2.44}) * (CC^{3.44}) \quad (2.15)$$

A_c = Aktivite
CC = Kil içeriği



Şekil 2.57. Metilen mavisi değeriyle şişme yüzdesi arasındaki ilişki (Çokça, 2001)



Şekil 2.58. Şişme yüzdesi metilen mavisi değeri ilişkisi (Yükselen ve Kaya, 2008)

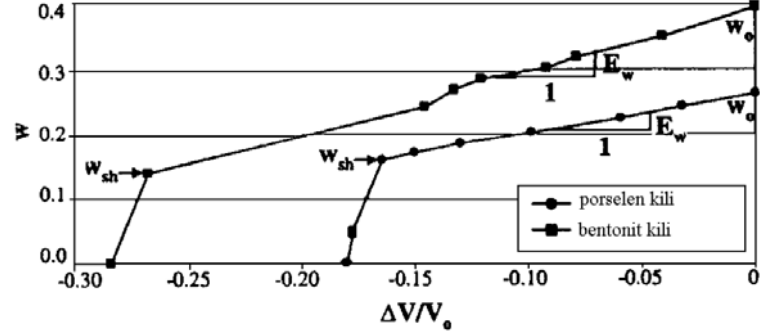
Tablo 2.15 Metilen mavisi değerlerini kullanılarak elde edilen şişme potansiyeli sınıflaması (Yükselen ve Kaya, 2008)

Metilen Mavisi Değeri (g/100 g)	Şişme Derecesi
0-4	Düşük
4-8	Orta
8-15	Yüksek
>15	Çok Yüksek

2.6.11. Şişme-Büzülme İndisi Deneyi (I_{ss})

Briaud ve diğ. (2003) şişme - büzülme potansiyelinin sınıflandırılması için farklı bir büzülme deneyi geliştirmişlerdir. Deney silindir şeklinde zemin numunesinin belirli sıcaklık altında serbestçe büzülmesine izin verilmesi ve bu sırada belirli aralıklarla hacim değişiminin ve su muhtevasının belirlenmesi şeklinde uygulanmaktadır. Deney sonrasında ölçülen su muhtevası - hacim değişimi değerleri Şekil 2.59.' da görüldüğü gibi bir grafik olarak çizilmekte ve büzülme limiti belirlenmektedir. Araştırmacılar serbest şişme ödometre deneyinin sonuçlarına bağlı olarak, şişme - büzülme indisi

(Eşitlik 2.16) adını verdikleri bir parametre geliştirmişlerdir. Bu parametrenin, şişme potansiyelinin tahmin edilmesinde kullanılabileceğini (Tablo 2.16.) vurgulamışlardır.



Şekil 2.59. İki farklı kil için büzülme deneyi sonucu (Briaud vd., 2003)

$$I_{ss} = w_{sw} - w_{sh} \quad (2.16)$$

I_{ss} - Şişme-büzülme indisi,

w_{sh} - Büzülme testi sonucunda elde edilen büzülme limiti,

w_{sw} - Serbest şişme ödometre deneyinde elde edilen şişme limitidir.

Tablo 2.16. Şişme büzülme indisine bağlı olarak şişme potansiyelinin sınıflandırılması (Briaud, 2003)

Şişme – Büzülme İndisi (%)	Şişme Potansiyel
<20	Düşük
20-40	Orta
40-60	Yüksek
> 60	Çok yüksek

2.6.12. Ampirik İlişkiler

Tsiambaos ve diğerleri (1988 - 1990) tarafından kildeki şişmeyi hesaplamak için bir formül geliştirilmiştir;

$$SPR = -24.05 - 31.1 \text{LOG}(S/SP) \quad (2.17)$$

Seed ve diğ. (1962) doğal zeminlerin, havada kurutulduktan sonra 7kPa sürşarj yükü uygulanarak su altında bırakılması sonucunda meydana gelen şişme yüzdeleri için aşağıdaki ifadeyi vermişlerdir.

$$S = 2.16.10^{-3}.PI^{2.44} \quad (2.18)$$

S : Şişme yüzdesi (%),
 PI : Plastisite indisidir.

Chen (1988), kuru birim hacim ağırlıkları 15.7-17.3 kN/m³ ve su muhtevaları 15- 20% aralığında değişen, örselenmemiş zemin numunelerinin 7kPa sürşarj altındaki şişme yüzdeleri için aşağıdaki eşitliği vermiştir.

$$S = 0.2558.e^{0.0838PI} \quad (2.19)$$

S : Şişme yüzdesi (%),
 PI : Plastisite indisidir.

Sabtan (2005) şişme yüzdesinin; kil yüzdesi, plastisite indisi ve su muhtevasına bağlı olarak tahmin edilmesi için Eşitlik 2.20'yi önermiştir.

$$S = 1.0 + 0.6 \cdot (C + PI - w) \quad (2.20)$$

S : Şişme yüzdesi (%),
 C : Kil yüzdesi,
 PI : Plastisite indisi,
 w : Su muhtevasıdır.

Basma (1993) 128 doğal zemin numunesi üzerinde yaptığı deneyler sonucunda, şişme yüzdesinin belirlenmesi için Eşitlik 2.21' i önermiştir. Eşitlik 2.21 için regresyon katsayısının 0.93. toplam karesel hatanın 0.28 olduğunu vurgulamıştır.

$$S = (6.4 \cdot 10^{-4})(PI)^{1.37}(C)^{1.37} \quad (2.21)$$

S : Şişme yüzdesi (%),
 PI : Plastisite indisi,
 C : Kil yüzdesidir.

2.6.13. Şişme-Büzülme Potansiyeli İçin Şişen Zemin İndeksi(ESI)

Thomas ve diğerleri (2000) şişme potansiyelini etkileyen faktörlerden etkin olanlarının dikkate alındığı şişen zemin indeksi (ESI, Expansive Soil Index) ile sınıflandırmaları kullanmışlardır. Bu sınıflandırma sistemlerinde ESI-1, ESI-2 ve ESI-3 olarak tanımlanan değişik indeksler bulunmaktadır.

Birleştirilmiş şişme potansiyeli puanlaması getiren ESI değerlendirmesi Thomas ve diğ. (2000) tarafından geliştirilmiştir.

$$ESI - 1 = 2 : 1 \text{ Mineraller} + SI + LL + CEC \quad (2.22)$$

$$ESI - 2 = SI + LL + CEC \quad (2.23)$$

$$ESI - 3 = LL + CEC \quad (2.24)$$

Burada; SI : Şişme indeksi (PCV deneyinden bulunan şişme basıncı)
 2:1Mineraller : Smektit+Vermikulit/2 (gr/kg)
 LL : Likit limit
 CEC : Katyon değişim kapasitesi (cmol/kg)

Thomas ve diğ. (2000) ESI tanımlamasını bir tablolamaya dönüştürmemiştir. Bununla birlikte, ESI-1>500 ise çok yüksek şişme riski, ESI-1<500 ise orta-yüksek arası şişme riski ve ESI-2 $\approx$ 250 ise yüksek şişme riski gibi değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Araştırmadaki örnekler incelendiğinde ESI-3'ün 90 civarında çok yüksek risk, 65 civarında ise orta-yüksek arası şişme riski verdiği görülmektedir.

Şişen 2:1 mineral, şişme indeksi, likit limit ve CEC her zemin serisi için ESI puanlaması vermiştir. ESI ne kadar yüksekse şişme-büzülme potansiyeli de okadar yüksektir. Yüksek ve çok yüksek şişme-büzülme gösteren zeminler genelde daha yüksek CEC'lere sahip olanlardır.

Yine aynı çalışmayla ilgili olarak Thomas ve diğerleri (2000) likit limit, kil içeriği ve CEC(Katyon değiştirme kapasitesi'nin çalışılan 5 numune için en iyi şişme indeksi tahminini verdiğini söylemiştir. Bununla birlikte Kelly ve Haymarket birimlerinde CEC ve şişme indeksi arasındaki uyum Jackland, Waxpool ve Davidson birimlerinde gözlemlenmektedir.

Kariuki ve Van der Meer (2004) yaptıkları araştırmada çeşitli şişme potansiyeli indisleri (Atterberg, COLE(Doğrusal uzayabilirlik katsayısı), CEC (Kasyon değişirme kapasitesi) testi ve SSP (Doygun nem içeriği) testi ile ESI arasında ilişkilendirme yapmıştır. Kariuki ve Van der Meer (2004) Thomas ve diğ. (2000)'in yaptıklarını özetleyip, Hamber (1985) 'i normalize edip daha farklı şişme potansiyeli puanlaması (ESI) elde etmiştir (Tablo 2.17).

$$ESI - 1 = A_c + CEA_c + SSP + LEP_c \quad (2.25)$$

$$ESI - 2 = A_c + CEA_c + SSP \quad (2.26)$$

$$ESI - 3 = SSP \quad (2.27)$$

A_c = Aktivite

CEA_c = Kasyon değişim aktivitesi (CEC / %Kil)

SSP = Doygun standart nem yüzdesi (maksimum su muhtevası)

LEP_c = Doğrusal genişleyebilme yüzdesi (% COLE)

Tablo 2.17. ESI'ya göre puanlama sınıflaması (Kariuki ve Van der Meer, 2004)

ESI-1	ESI-2	ESI-3	Sınıf	Mineroloji
<1.15	<1.10	<0.5	Düşük	Kaolinit
1.15-2.15	1.1-2.0	0.5-1.0	Kabul edilebilir	İllit/karışık tabakalı mineral
>2.15	>2.0	>1.0	Yüksek	Smektit

Sonuçlar birden çok metodun kilin şişme potansiyeli seviyesini bulmak için kullanılması gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Ancak, en çok CEC, PI, SP ve likit limit indikatörleri kil örnekleri ile uyum göstermektedir.

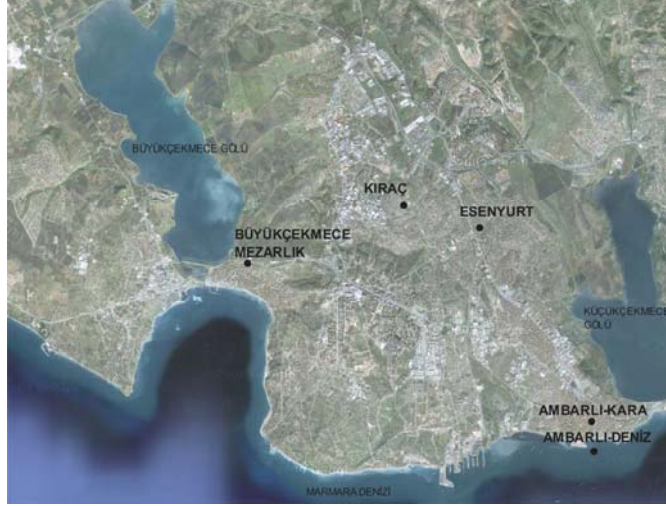
3. MALZEME VE YÖNTEM

İstanbul'un önemli yerleşim bölgelerinden biri olan Avrupa yakası Göller Bölgesi (Şekil 3.1) çevresinde yer alan Gürpınar formasyonun killi seviyeleri Gürpınar kili olarak bilinir. Bu killer oligosen yaşlı, aşırı konsolide killer olup, fisürlü, çatlaklı, yüksek plastisitelidir ve genellikle simektit (montmorillonit) tipi kil minerali içermektedir. Gürpınar kili gevşek tutturulmuş kumtaşı ve miltaşı arakatkılı kil taşı şeyil türü ince kırıntılardan oluşur; ince linyit ve tuf-tüffit ara düzeylerini kapsar. Güngören Üyesi bol mikalı, çapraz katmanlı kum-kil ardışığıyla başlar, daha üstte istifin egemen kaya türünü oluşturan bitki kırıntılı yeşil killer bulunur. Killer seyrek olarak, orta boylanmış, çapraz katmanlı gevşek ince kum aradüzey ve merceklerini içerirler. Miyosen yaşlı Güngören üyesi killer özellikle üst kesimlerinde, makrofosil kavkılı Bakırköy Üyesi'nin kireç taşlarına benzer özellikte, 5-30 cm kalınlıkta kireç taşı, killi kireçtaşı, kireçli kiltası arakatkılıdır. İki kil grubu da metamorfiktir ve ayrışmayla oluşmuştur. Killeşme sürecinde simektiti fazla olan bu killer uzun yıllar sürecinde illit/simektit karışık katmanlı bir yapıya sahip olmuşlardır.

Gürpınar killerinde önemli boyutta şişme davranışı ortaya çıkmakta ve dolayısıyla bina duvarlarında çatlaklara, giriş ve kolonlarda yapısal hasarlara, bahçe duvarlarında önemli tahribatlara neden olmaktadır. Tahribatın ana nedeni olarak bu killerin yüksek şişme potansiyeli, dolayısıyla basınçları olsa da, bunun arkasında tekrarlı şişme-büzülme davranışı yatmaktadır. Yüksek sıcaklığın olduğu yağışsız dönemlerde yüzeye yakın kil zeminler kurumakta, büzülme ve bu etkilerle çatlamaktadır. Bu dönemi takip eden yağışlı dönemde ise zemin doyunlaşmakta, ve hacim genişlemesiyle birlikte şişmektedir. Tekrarlanan bu davranış tekrarlı-şişme büzülme davranışı olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.2.'de bu davranışa konu olabilecek değişik durumlar idealize edilerek çizilmiştir. Şekil 3.2'deki yük olmayan ve yüzeye yakın olan (a) ve (b) durumlarındaki kil zeminler tekrarlı şişme-büzülme davranışına tabi kalabilirler.

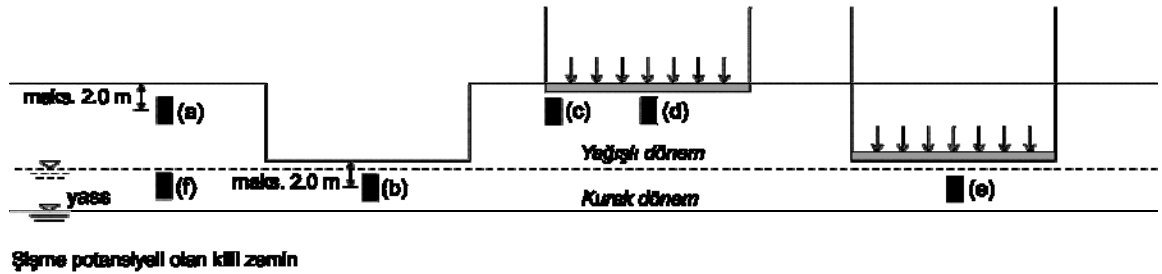
Bu davranışın killerin şişme potansiyelini nasıl etkileyeceğini anlamak için literatürde 10-15 araştırma bulunmaktadır. Bununla birlikte Gürpınar kili üzerinde böyle bir araştırma hiç yapılmamıştır. Bu doğrultuda Şekil 3.1'de görülen 4 değişik bölgeden İstanbul Gürpınar Formasyonu'na ait 5 değişik örselenmemiş (tüp numunede) Gürpınar

kili alınmış, hem doğal olarak hem de yeniden yapılandırılarak (kompaksiyon ile) toplam 14 adet değişik numune üzerinde tekrarlı şişme-büzülme deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1 Deneyde kullanılan numunelerin sağlandığı yerler

Açıklama	Kuruma-ıslanma durumu	Sürşarj yükü
(a) Yüzeye yakın kil (Sonradan bir yapı, kilit taşı, beton kanal inşa edilebilir)	Tam kuruma - tam ıslanma	0-25 kPa
(b) Açık bırakılan kazı (Sonradan yapı, garaj, menfez inşa edilebilir)	Tam kuruma - tam ıslanma	0-25 kPa
(c) Sığ temelin altında, kenar taraftaki kil (az katlı veya çok katlı yapı mevcut)	Kısmi/tam kuruma - tam ıslanma	5-200 kPa
(d) Sığ temelin altında, merkezdeki kil (az katlı veya çok katlı yapı mevcut)	Kısmi kuruma - tam ıslanma	5-200 kPa
(e) Bodrum katlı bina temeli altındaki kil (az katlı veya çok katlı yapı mevcut)	Kısmi kuruma - tam ıslanma	50-200 kPa
(f) Yüzeye uzak kil	Kısmi kuruma - tam ıslanma	50-100 kPa



Şekil 3.2. Şişme-büzülme kapsamında ele alınacak durumlar ve açıklamaları

Bu araştırmada Şekil 3.2’de gösterilmiş olan (a) durumunda veya (b) durumunda tam kuruma-tam ıslanma geçiren zeminlerin üzerlerinde sürşarj yükü olmadan tekrarlı şişme büzülmeden nasıl etkilendikleri araştırılmıştır. Eğer çok düşük yükü olan yapı söz konusu ise kısmi/tam kuruma-tam ıslanma durumları için incelemeye (c) durumunu da katabiliriz.

3.1. ARAŞTIRMADA KULLANILAN KİLLERLE İLGİLİ BİLGİLER

İstanbul Gürpınar kilinin Şişme-Büzülme davranışının araştırıldığı bu tez çalışmasında; Gürpınar kiline sahip Büyükçekmece, Ambarlı, Esenyurt ve Kırac bölgelerinden örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmıştır. Ayrıca, Avcılar Kampüsünden alınan numuneler, ticari bir bentonit ve ticari bir kaolen üzerinde de deneyler yapılmıştır.

Öncelikle zemin numunelerinin bazı indeks ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla; tane boyutu dağılımı analizleri, kıvam limitleri ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Çalışılan zeminlerin numune kodları Tablo 3.1 ve tanımlama özelliklerine ait bilgiler Tablo 3.2.’de görülmektedir. Killerin plastisite kartındaki yeri de Şekil 3.3’de verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi kaolen hariç tüm çalışılan killer CH grubu yüksek plastisiteli inorganik kil grubuna girmektedir. Kaolen ise orta sıkışabilirlikli inorganik silt (MI) grubuna girmektedir. Tüm numunelere ait tane boyutu dağılımı analizleri sonuçları ise Şekil 3.4’de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan zeminlerin numune kodları

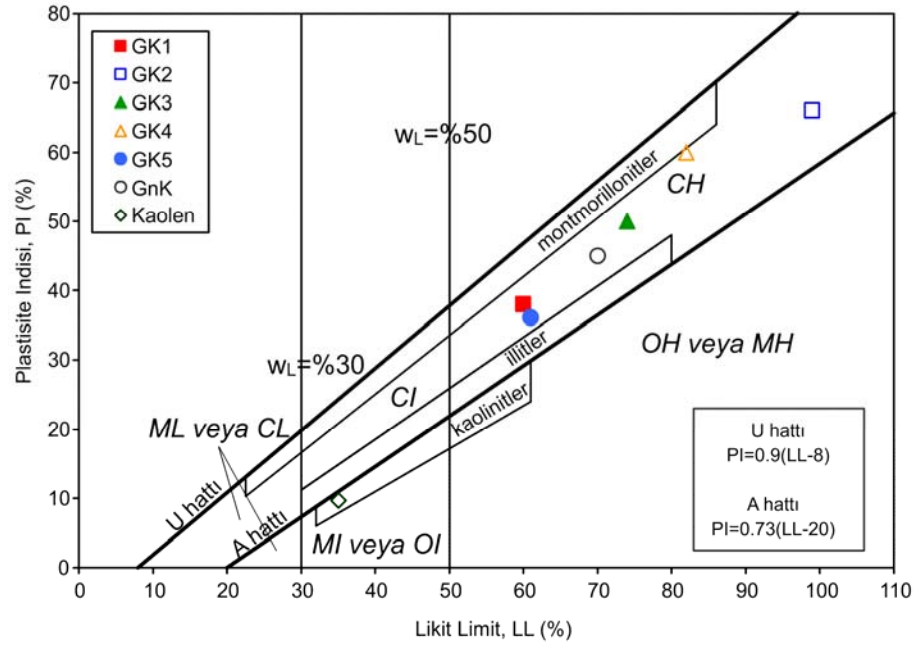
Numune kodu	Numunenin çıkarıldığı bölge
GK1	Büyükçekmece
GK2	Esenyurt
GK3	Ambarlı-Kara
GK4	Ambarlı-Deniz
GK5	Kırac
GnK	Kampüs
Bt	Bentonit
K	Kaolen

Tablo 3.2. Kullanılan zeminlerin bazı özellikleri

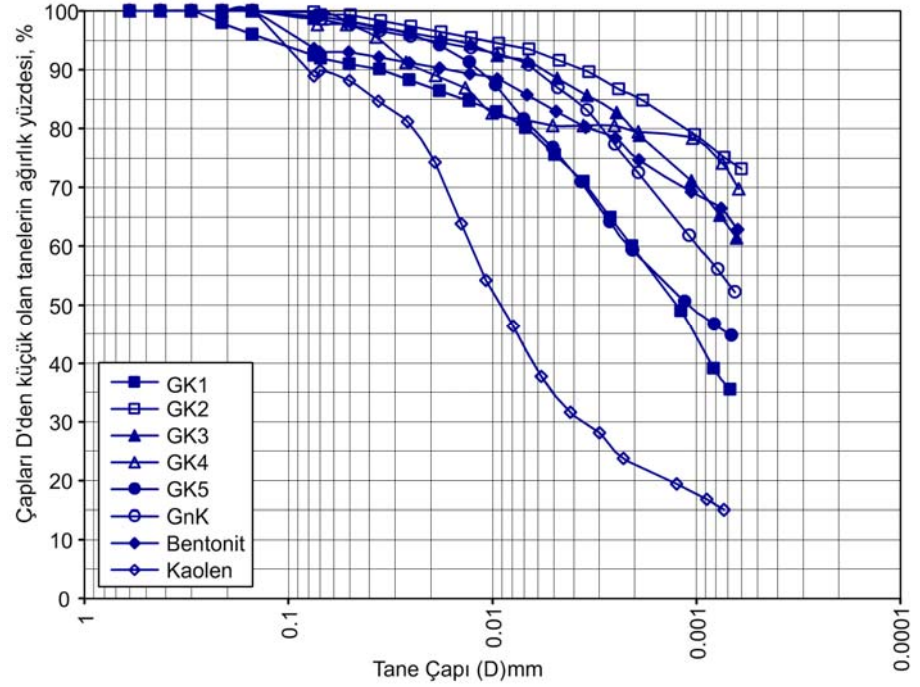
Zemin Özellikleri	Kullanılan Zeminler							
	GK1	GK2	GK3	GK4	GK5	GnK	Kaolen	Bentonit
Tane Dağılımı (%)								
Kum	5.2	0.2	0.1	0	3	1.3	11	6.4
Silt	34.8	14.8	19.9	20	37	27.7	65	18.9
Kil (<0.002 mm)	60	85	80	80	60	71	24	74.7
Kil Mineral İçerikleri (%)								
Simektit (Sodyum)							-	85
*I/S karışık katman	94.5	80	80	72.5	81	82	-	
İllit	1.7	12	11	8.5	9	10	20	15
Kaolinit	3.8	8	9	19	-	8	80	-
Kalsit	-	-	-	-	10	-	-	-
Kıvam Limitler (%)								
Likit Limit, LL	60	99	74	82	61	70	35.5	200
Plastik Limit, PL	22	33	24	22	25	25	25	29
Plastisite İndisi, PI	38	66	50	60	36	45	10	171
Rötre Limiti S_L	14	18	15	16	16	12	23	7
Lineer Rötre, L_S (%)	15	24	14	16	16	20	4	22
Aktivite, A_e	0.63	0.78	0.63	0.75	0.6	0.63	0.42	2.29
Su içeriği (%)	24.8	22.3	25	25.2	27.2	-	-	-
γ_n (kN/m ³)	19	16.8	18	19.6	18.6	-	-	-
γ_d (kN/m ³)	15.2	13.7	14.4	15.6	14.6	-	-	-
Spesifik Gravite, G_s	2.72	2.78	2.77	2.77	2.72	2.75	2.70	2.78
Katyon (g/100g)								
Ca	52.69	51.97	49.26	64.02	71.74	55.81	-	-
Na	0.05	1.88	4.31	20.82	2.73	0.89	-	-
K	3.96	5.42	2.2	4.7	5.32	3.72	-	-
Mg	7.73	3.25	9.84	14.66	13.17	1.48	-	-
Al	0.03	0.07	0.14	0.024	0.21	0.05	-	-
Fe	0.05	0.048	0.127	Yok	Yok	0.059	-	-
* ² KDK(AA), g/100g	64.5	62.6	65.9	104.2	93.2	62.0	-	-
* ³ KDK(Na), g/100g	54.4	69.8	66.2	88.7	64.7	51.0	-	-
Kimyasal İçerik (%)								
SiO ₂	48.18	54.25	58.45	50.15	44.90	44.46	-	-
Al ₂ O ₃	14.7	16.78	13.88	11.16	13.48	14.32	-	-
CaO	7.87	2.86	3.84	10.46	11.10	12.59	-	-
Fe ₂ O ₃	7.59	6.38	6.49	5.131	7.16	4.9	-	-
K ₂ O	1.76	2.45	1.00	0.611	1.67	2.15	-	-
MgO	3.44	2.21	1.26	0.99	2.36	1.68	-	-
Na ₂ O	0.86	0.57	0.609	0.56	0.33	0.53	-	-
TiO ₂	0.78	0.71	0.769	0.67	0.70	0.57	-	-
MnO	0.14	0.03	0.069	0.12	0.16	0.07	-	-
Kızdırma Kaybı (%)	14.68	13.76	10.22	17.77	15.44	18.73	-	-
Zemin Sınıfı	CH	CH	CH	CH	CH	CH	MI	CH

*¹ I/S= İllit/Simektit karışık katman ; *²KDK(AA)= Katyon değişim kapasitesi (Amonyum asetat yöntemiyle)

*³ KDK(Na)= Katyon değişim kapasitesi (Sodyum iyonları)



Şekil 3.3. Killerin plastisite kartındaki yeri (Lancellotta, 2009'dan yararlanılarak çizilmiştir)



Şekil 3.4. Kullanılan killerin tane dağılımları

3.1.1. X-Işını (X-Ray) Difraksiyon Analizleri

Zeminlerin mineralojik karakteristiklerinin belirlenmesinde en sık kullanılan yöntemlerden biri X-ray difraksiyon analizleridir. X-ray difraksiyon analizleri, her kristal fazının kendine özgü bir X-ray difraksiyon modeli (paterni) olduğu prensibine dayanmaktadır. Karışık durumda bulunan fazlarda, fazlardan her biri diğerlerinden bağımsız olarak kendi modelini vermektedir. X-ray difraksiyon grafikleri, farklı şiddet ve θ açısı değerlerindeki yansımalarından oluşmaktadır. Bu şekilde zemin içerisinde bulunan çeşitli mineral fazları, X-ray difraksiyon grafiklerinde, kendilerine özgü yansıma değerlerinden belirlenebilmektedir.

Havada kurutulmuş zemin numuneleri, ezilerek toz haline getirilmiş ve özel cam lamalar içerisinde XRD cihazına yerleştirilmektedir. XRD cihazının jeneratör ayarları 45 kV ve 40mA dır. $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu (λ) 1.54 Å' a eşittir. 2 °/dk lık hız ile 3-90° 2 θ değerleri arasında tarama yapılmış ve elde edilen grafikler ASTM indeks kartlarına göre değerlendirilmiştir.

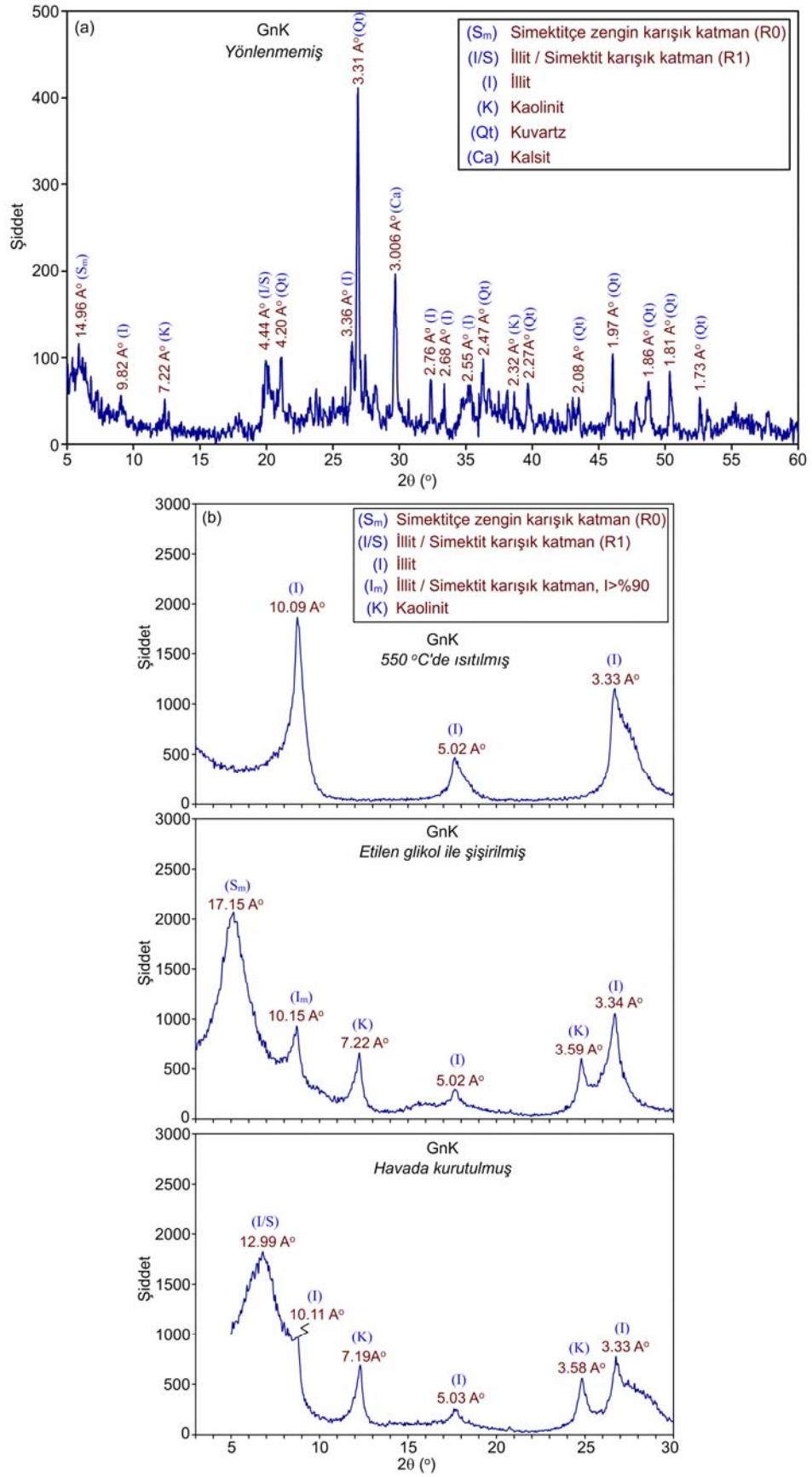
Kullanılan numunelerin kil kısmı ve tüm numune üzerinde yapılan XRD analizleri Şekil 3.5 ile 3.12 arasında verilmiştir. XRD analizleri killerin havada kurutulduğu, etilen glikol ile şişirildiği ve 550 °C'de ısıtıldığı yönlenmiş örnekler ve yönlenmemiş numune üzerinde ayrı ayrı yapılmıştır. Havada kurutulmuş numunelerde 1. pik için tabakalar arası uzaklığın 13Å°, etilen glikol ile şişirilmiş örneklerde 17Å° tabakalar arası uzaklık killerin illit/simektit karışık katmanlı mineraller olduğunu göstermektedir. 550 °C'de ısıtılan numunelerdeki 10Å°luk tabakalar arası uzaklık simektitin illite dönüştüğünü göstermektedir. 10Å°luk 1.pik illite işaret etmektedir. Analizlerde tüm çalışılan numuneler için de, illitin 5 Å°luk 2. piki ve 3.33Å°luk 3. piki bulunmaktadır. İllit/simektit karışık katmanla birlikte tüm çalışılan numuneler illit ve kaolinit minerali de içermektedirler.

XRD analizlerinden elde edilen şiddet-2 θ eğrilerinde 1.piklerde alan yöntemi kullanılarak yapılan yaklaşık kil yüzdesi hesaplamaları sonuçları genel zemin özellikleri Tablosu Tablo 3.2'de verilmiştir. Buna göre, 6 numunenin %70-95'i illit/simektit karışık katman, %2-12'si illit ve %4-19 arasında ise kaolen bulunmaktadır. Ayrıca GK4

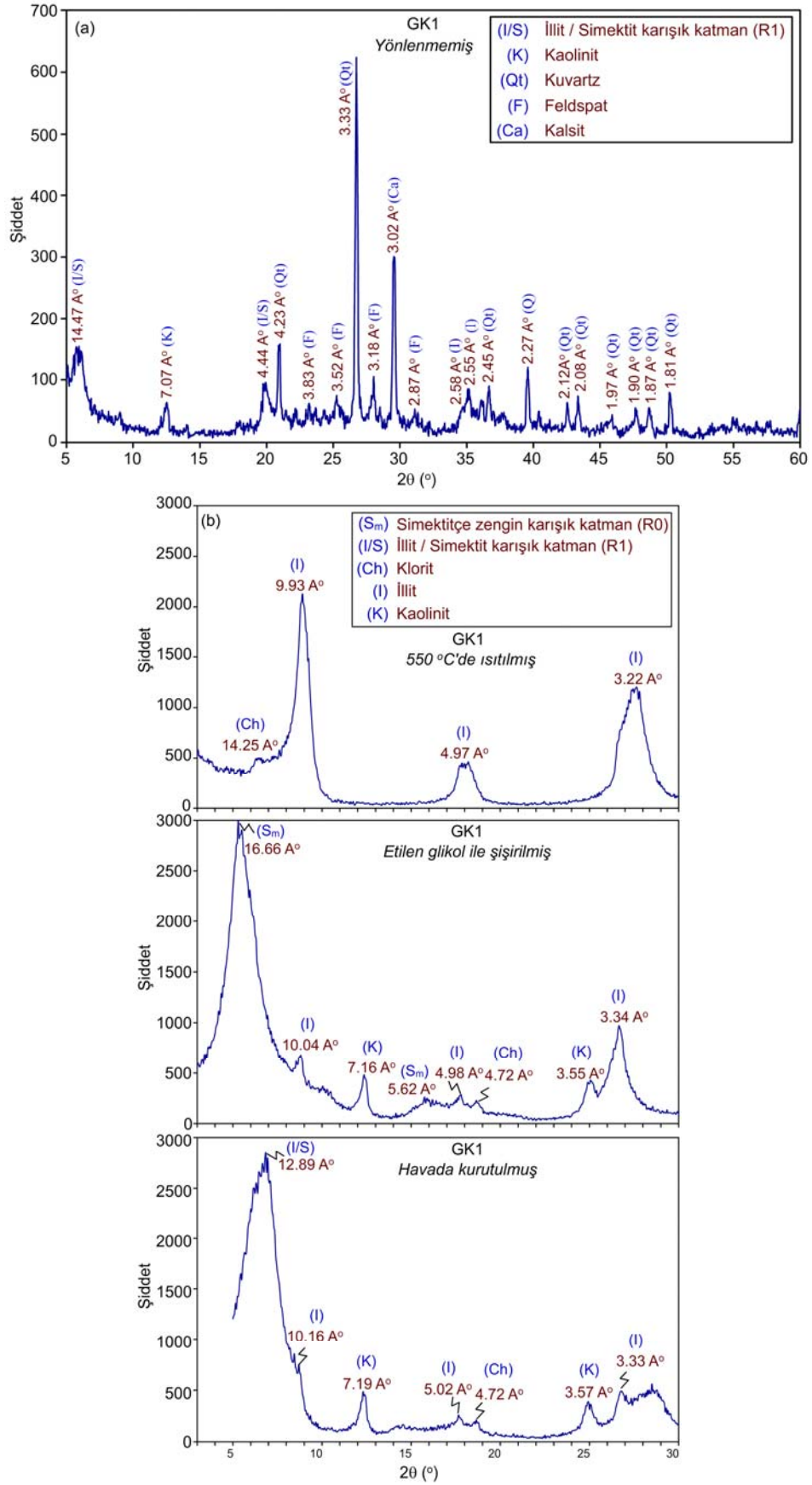
numunesi %10 klorit minerali içermektedir. Bentonit ise sodyum simektit olarak gözükmemiştir. Yönlenmemiş deney sonuçlarına baktığımızda simektitçe zengin karışık katman veya illit/simektit karışık katman, kuvarz, illit, kaolinit, kalsit, feldspat, klorit, kristobilit ve tirdimit gibi minerallere rastlanmıştır. Tablo 3.3’de XRD analizinde minerallerin tabakalar arası mesafelerine bakarak mineral türünü bulmamıza yardımcı olan sınıflandırma bilgileri verilmiştir.

Tablo 3.3. Karışık katmanlı kil minerallerinin piklerinin tabakalar arası mesafelerine bağlı sınıflandırması (Meunier, 2005)

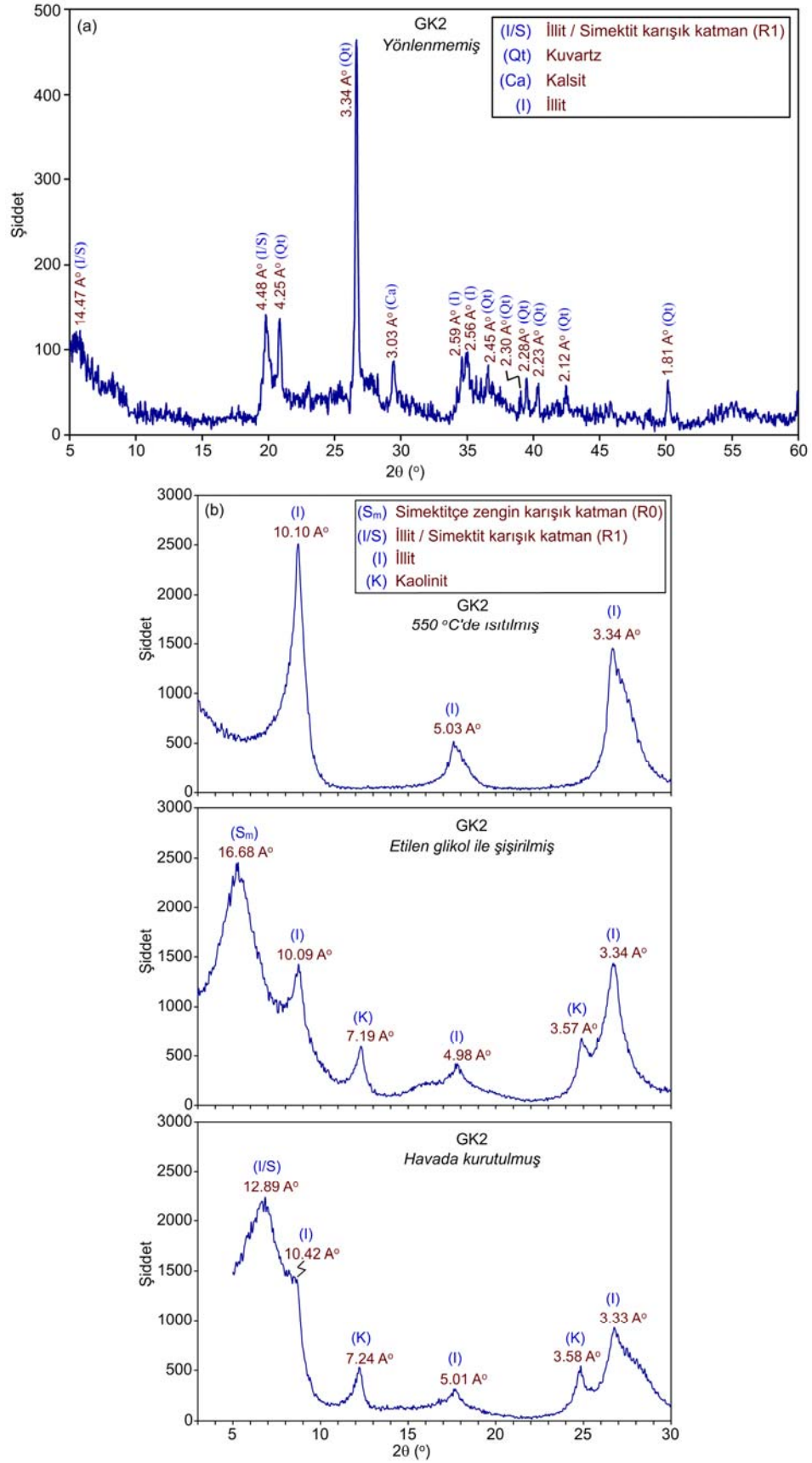
Tabakalar arası mesafe (Å)	Mineral
16 – 18.5	Smektitçe zengin karışık katman R0 (E.G.)
16.5 – 17.5	Smektit (E.G.)
14.5 – 16	C/S R1 (E.G.)
13.7 – 15	C/S R1 (Nat.)
14 – 15	Simektit yada Simektitçe zengin R0 karışık katman mineral (Nat.)
14 – 14.35	Klorit
12.9 – 13	1 su katmanıyla simektit
12 – 12.45	1 su katmanıyla simektit (Nat.)
10.2 – 14.35	I/S R1 (E.G.)
10.2 – 14.35	I/S R1 (Nat.)
10 – 10.1	İllit
9.9 – 10.7	I/S R _{≥1} >90% illit (Nat.)
9.9 – 10.3	I/S R _{≥1} >90% illit (E.G.)
7.20 – 8.50	K/S R0 (E.G.)
7.10 – 8.50	C/S R0 (E.G.)
7.5 – 8.2	C/S R1 (E.G.)
7.00 – 9.00	M/C (>30% klorit)
7.20 – 7.36	Serpantin
7.13 – 7.20	Kaolinit
7.00 – 7.14	Klorit
Nat., “Doğal” numune	I/S, İllit/Simektit karışık katman
E .Getilen glikole doyurulmuş numune	C/S, Klorit/Smektit karışık katman
R0. Düzensiz sıralı karışık katman mineral	M/C, Mika/Klorit karışık katman
R1. Sıralı karışık katman mineral	K/S, Kaolinit/Simektit karışık katman



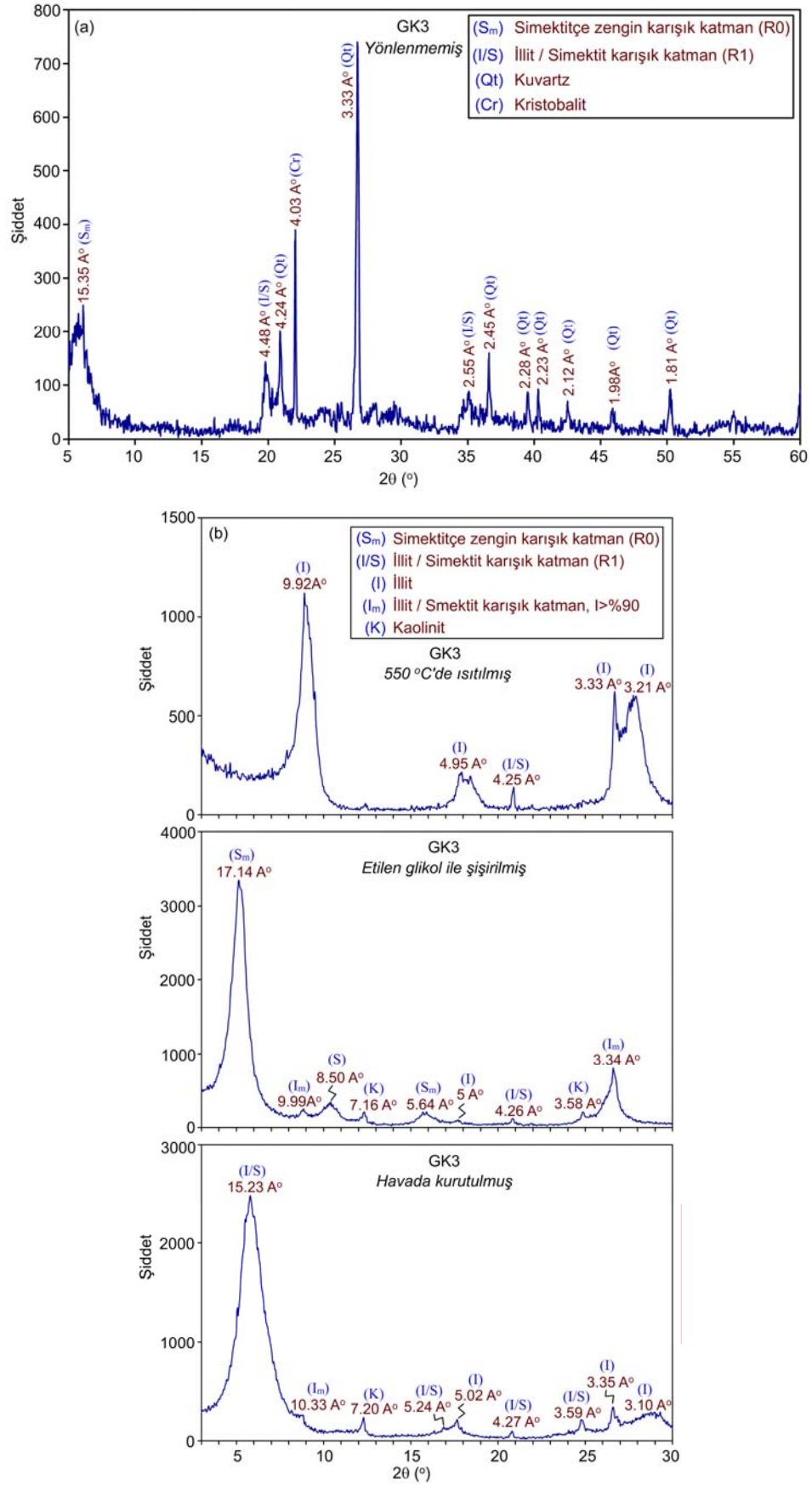
Şekil 3.5. GnK doğal numunesinin XRD analiz sonuçları a)Tüm numune, b) Kil kısmı



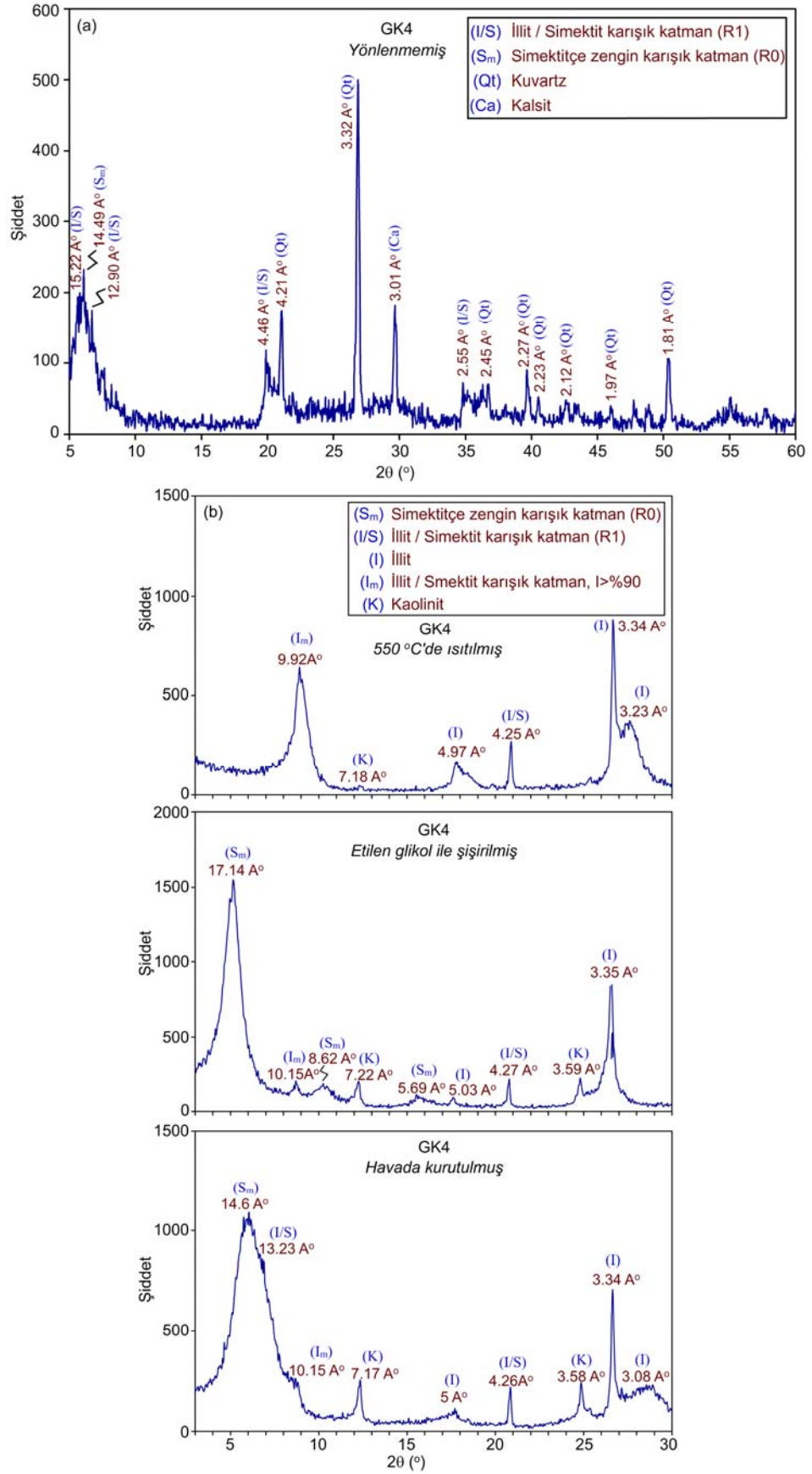
Şekil 3.6. GK1 doğal numunesinin XRD analiz sonuçları a)Tüm numune, b) Kil kısmı



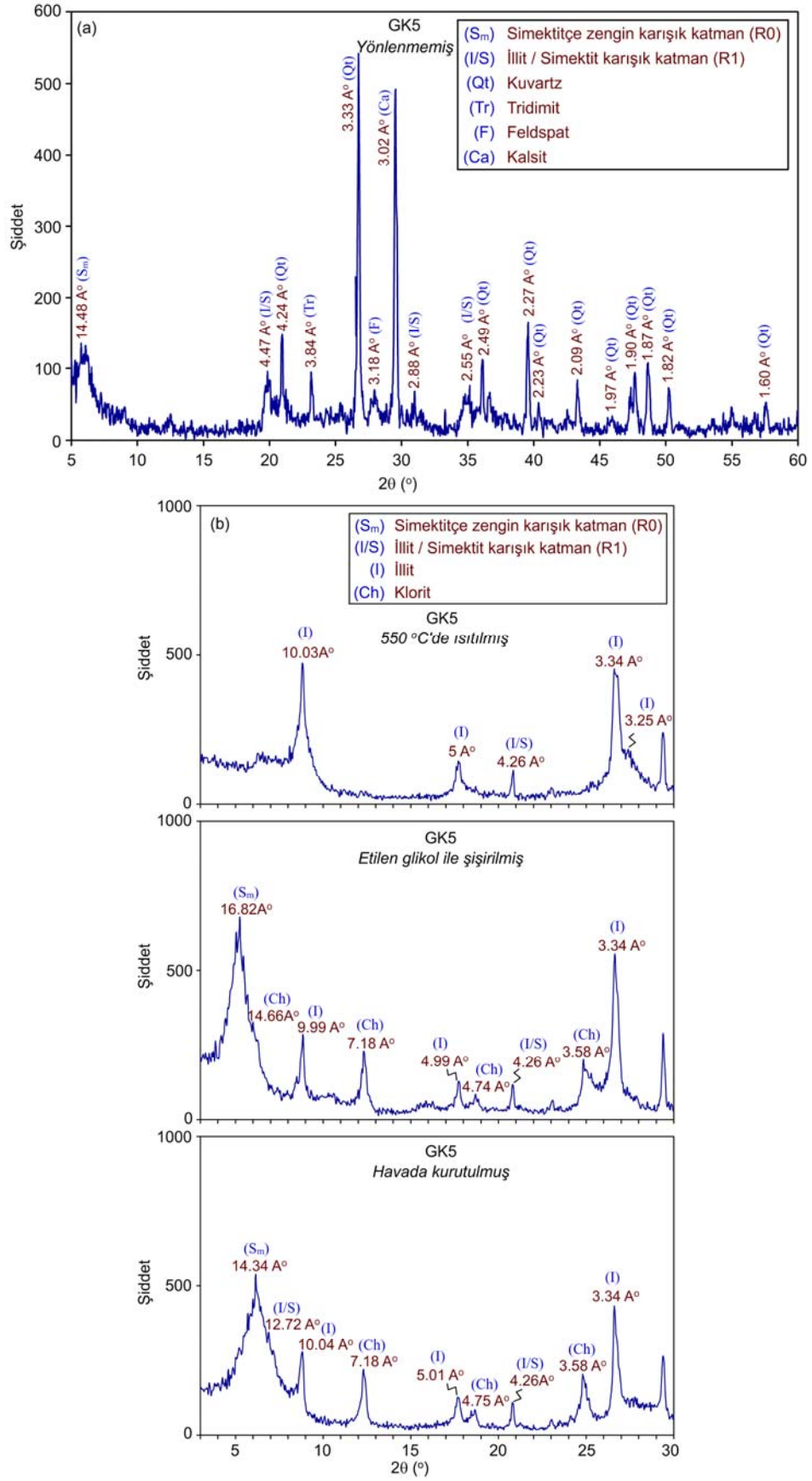
Şekil 3.7. GK2 doğal numunesinin XRD analiz sonuçları a)Tüm numune, b) Kil kısmı



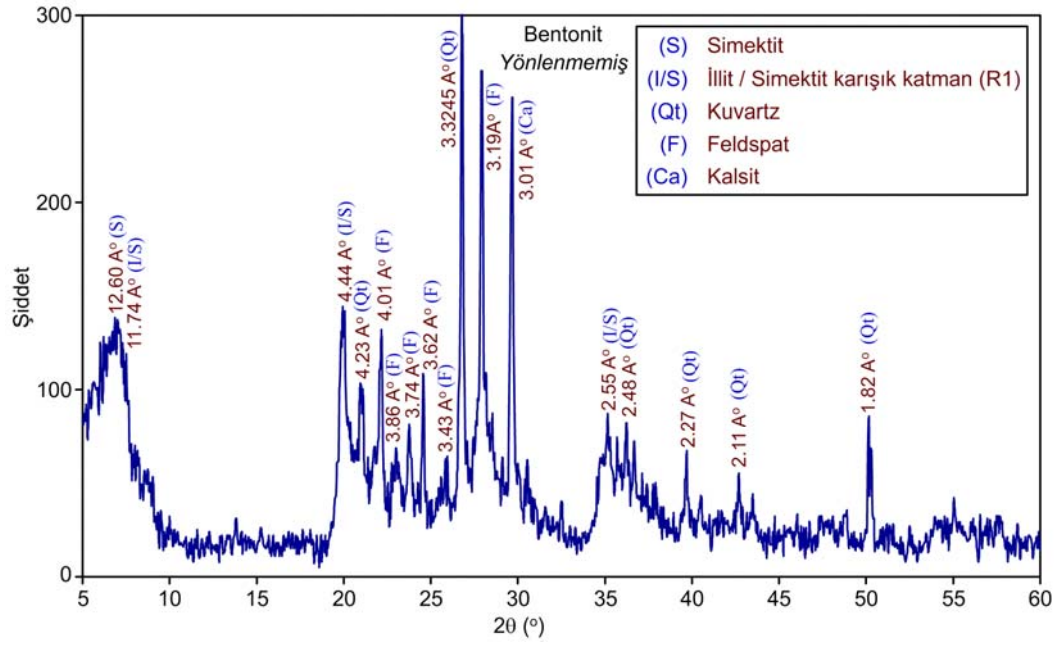
Şekil 3.8. GK3 doğal numunesinin XRD analiz sonuçları a)Tüm numune, b) Kil kısmı



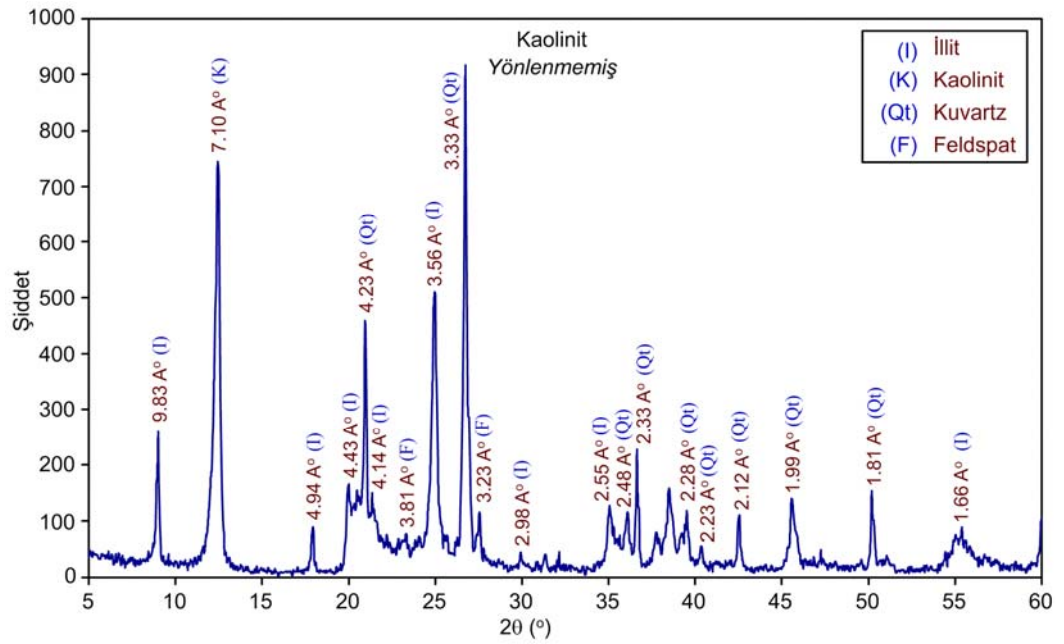
Şekil 3.9. GK4 doğal numunesinin XRD analiz sonuçları a)Tüm numune, b) Kil kısmı



Şekil 3.10. GK5 doğal numunesinin XRD analiz sonuçları a)Tüm numune, b) Kil kısmı



Şekil 3.11 Bentonit doğal numunesinin XRD analizi tüm numune sonuçları



Şekil 3.12. Kaolinit doğal numunesinin XRD analizi tüm numune sonuçları

3.1.2. ESEM-Elektron Mikroskobu Görüntü Analizi

Tarayıcı elektron mikroskobu bir yüzeyin büyütülmüş şeklini elde edebilmek için tasarlanan bir alettir. Tarayıcı elektron mikroskobu ile kil minerolojisi, kil plakalarının yerleşim biçimleri veya kil dokusunun incelenmesi mümkün olmaktadır. Tarayıcı elektron mikroskobu ile numune yüzeyi üzerine elektron bombardımanı yapılmaktadır. Elektronlar kil taneleri gibi katı objeler tarafından dağıtılması ile tane yüzeyinin fotoğrafı çekilir.

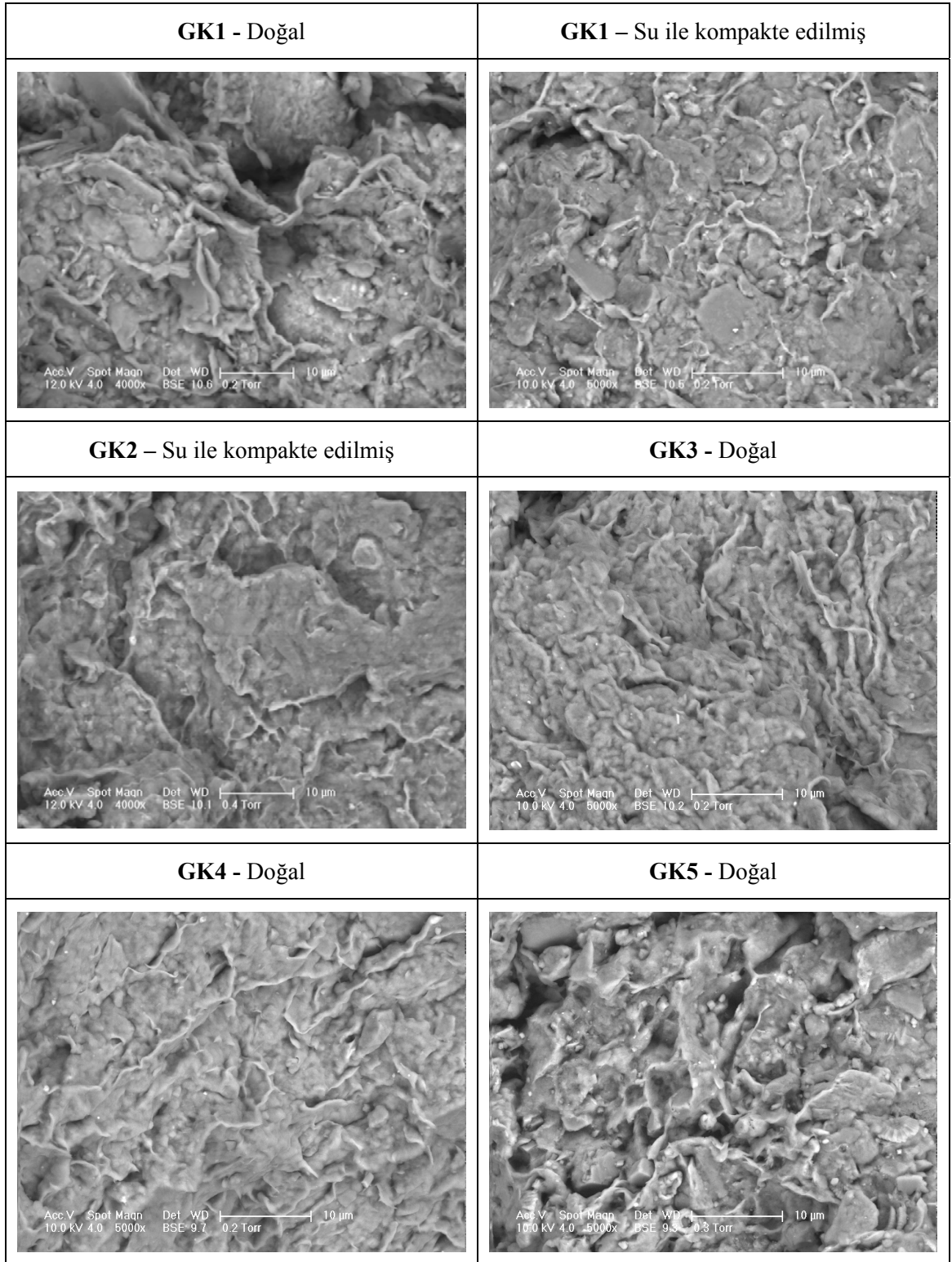
Bu araştırmada, doğal numuneler ve şişme-büzülme geçirmiş numunelerden bozulmamış temsili bir parça bir süre oda sıcaklığında kurutularak (fazla suyunun gitmesi için) saklanmış ve toplu olarak Boğaziçi Üniversitesi, ARGE Araştırma Merkezi ESEM ile görüntü analizi gerçekleştirilmiştir. İncelenen numunelerin örselenmemiş durumlarına ait tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 3.13.'te verilmiştir. ESEM görüntü analizleri GK1, GK3, GK4 ve GK5 numunelerinin örselenmemiş (UD) örnekleri üzerinde, ayrıca GK1 ve GK2 numunelerinin kompakte edilmiş (yeniden yapılandırmış) durumlarında gerçekleştirilmiştir.

3.1.3. Katyon Değişirme Kapasitesinin Belirlenmesi

Katyon değişirme kapasitesi, killerin temel fiziko-kimyasal özelliklerinden biridir ve şişme davranışı üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur (Churchman ve diğ., 2002).

Kil mineralleri bazı katyon ve anyonları adsorbe ederek onları değişebilen durumda tutarlar, bunlar değişebilen iyonlardır. Kilin değişebilir iyonları silika-alümina tabaka yapısının aralarında ve uçlarında yer alırlar, iyon değişimleri silika-alümina yapışma etki etmez. Değişebilen katyonlar genellikle Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H^+ , Al^{4+} , NH_4^+ ve Li^+ dur.

Grim (1962) çeşitli kil minerallerini katyon değişim kapasitesini Tablo 3.4'te görüldüğü gibi vermiştir. Buradan simektit ve vermikülit kil grubu minerallerinin en yüksek KDK'ne sahip oldukları anlaşılmaktadır. Kaolinit grubu killeri ise en düşük KDK'ya sahip killerdir.



Şekil 3.13. Araştırmada kullanılan killerin örselenmemiş durumlarına ait tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri

Tablo 3.4. Çeşitli kil mineralleri için katyon değiştirme kapasitesi değerleri (Grim,1962)

Kil Minerali	KDK (meq/100gr)
Simektit	80-150
Vermikülit	100-150
Halloysit 4 H ₂ O (10 A°)	10-40
İllit	10-40
Klorit	10-40
Sepiyolit – Atapulgit	20-30
Halloysit 2 H ₂ O (7 A°)	5-10
Kaolinit	3-15

meq: sıvı içerisindeki elektrolit miktarını ifade eden bir birimdir.

Bu tez çalışmasında kullanılan zeminlerin katyon değiştirme kapasiteleri 2 ayrı yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Bunların birincisi olan Chapman (1965) yöntemi kullanılarak katyon değişim kapasitesinin tayininde, adsorbe edilen katyonların, tek katyonlu çözelti ile kilin muamelesi sonucunda yer değiştirmesinden faydalanılır. Bu işlem için en çok kullanılan çözelti amonyum asetatıdır. 70 ml amonyum hidroksit ve 50 ml asetik asit litreye tamamlanıp, pH 7 olacak şekilde ayarlanmıştır. 200mg kil numunesi 250 ml'lik erlene koyulup, üzerine 0.1N'lık 10ml amonyum asetat çözeltisi ilave edilmiştir. Vorteks yardımıyla homojen bir karışım elde edilene kadar titre edilerek 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda santrifüj yardımıyla sıvı kısım katı kısımdan ayrılmıştır. Çözeltideki katyonların ağırlığının tayini için İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarı Birimi'nde ICP/MS cihazı ile yapılmıştır.

Katyon değiştirme kapasitesi taniyini için kullanılan 2. yöntem Bache (1976) metodudur. Bu metotta, 105⁰C'de kurutulan numunelerden 200mg alınarak pH'ı 8.2 olan 1N'lık 10mlt sodyum asetat (CH₃COONa.3H₂O) çözeltisi kullanılarak Na⁺ iyonları ile doyurulmuştur. Yine vorteksle homojen karışım elde edilene kadar titre edilen karışım 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda santrifüjle katı-sıvı kısımlar ayrılıp katı kısmın üzerine etil alkol (95%) dökülerek yıkanmış ve pH'ı 7.0 olan 1N'lık 10ml amonyum asetat (CH₃COONH₄) çözeltisi kullanılarak Na⁺ iyonları ile NH₄⁺ iyonlarının yer değiştirmesi sağlanmıştır. 24 saat bekletildikten sonra elde edilen

çözeltideki sodyum iyonları İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarı Birimi'nde ICP/MS cihazı ile bulunmuştur. Bununla birlikte, Na iyonları Alev Fotometresi ile ölçüldükten sonra, eşitlik 3.1 kullanılarak numunelerin katyon değişim kapasitesinin hesabı yapılabilir.

$$\text{KDK}(\text{meq}/100\text{g}) = 10^4 \times N_f \times D/W \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte; N_f son çözeltideki sodyum iyonunun konsantrasyonu, D amonyum asetat çözeltisi için yoğunluk katsayısı ve W (gr) numunenin kuru ağırlığıdır.

İncelenen numuneler için katyon değiştirme kapasitesi analizlerinin sonuçları Chapman (1965) yöntemiyle $\text{KDK}(\text{AA})$ tüm katyonların verildiği sonuçlar ve Bache (1976) yöntemiyle $\text{KDK}(\text{Na})$ sodyum iyonlarını tutma kapasitesinin verildiği sonuçlar kullanılan zeminlerin genel özelliklerinin verildiği Tablo 3.2'de gösterilmiştir. Tablo 3.4'de ise üç ana kil minerali için katyon değiştirme kapasitesi değerleri verilmiştir. Bu değerlerin montmorillonit ve illitin KDK değerlerinin arasında değerler verdiği ve burdan illit/simektit karışık katmana sahip mineralli killer olduğu söylenebilir. GK4 numunesinde yüksek KDK değeri ve sodyum değeri sodyum simektit mineralinin miktarının fazla olduğunu işaret etmektedir.

3.2. ŞİŞME VE SİŞME-BÜZÜLME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

3.2.1. Metilen Mavisi Emilim Deneyleri

Kilin metilen mavisi indeksi için hesaplanan test yöntemi metilen mavisi boyasının kil tarafından ne kadar emildiğinin ölçülmesini kapsamaktadır. Bu test birçok kilin özelliklerinin metilen mavisi değeri (MBV) ile ilişki halinde olduğunu işaret eder ki bunlara katyon değiştirme kapasitesi, kuru kuvvet bağı ve oranı gibi temel kil özellikleri örnek verilebilir. Ayrıca, kilin koloidal kısmı kaolinit olduğu zaman özgül yüzey ile direk bir uyum içindedir. Koloidal kısım ciddi miktarda illit veya montmorillonit içerdiği zaman, aynı yakın uyum kurulamamaktadır. Kilin içinde bu miktar koloidal aralık (genelde 0.5-0.001 μm aralığı olarak tanımlanır), kilin ve organik maddenin miktarı ve çeşidiyle ilgili ve 2-0.2 μm 'lik parçayı tanımlamaktadır. Kilin özgül yüzeyi tane çapı ve morfolojinin bir fonksiyonuyken ve boya emilimi ve özgül yüzey arasında

bir ilişki varken, tane çapı analizi için çok ince taneler tane çapı dağılımının sonunda hakim olmadığı sürece MBV dikkate alınmamalıdır. Bu yöntem kilin boya emilimini (burada metilen mavisi) tanımlamaktadır (ASTM C 837. 2003).

Bu tez kapsamında yapılan metilen mavisi emilim deneyi ASTM D 4546 (1990) esas alınarak yapılmıştır. 2 gr kil kurutulup tartılmış ve 600mL'lik behere dökülmüştür. 300 mL distile su behere eklenip, kil eşit dağılım gösterene kadar mikser ile karıştırılmıştır. Bulamacın pH'ı belirlenmiş ve yeterli sülfürik asit ilave edilerek pH'ı 2.5-3.8 arasına getirilmiştir. PH ayarlanana kadar karıştırmaya devam edilmiş ve son asit ilavesinden sonra 10-15 dakika karıştırmaya devam edilmiştir. Bulamaç mikserin altındayken, büret metilen mavisi çözeltisiyle doldurmuş, 5 mL çözelti karışıma eklenmiş ve 1-2 dakika karıştırmaya devam edilmiştir. Karıştırıcı çubukla 1 damla bulamaç alınmış ve filtre kağıdının kenarına koyulmuştur. Filtre kağıdındaki damlanın görünümü gözlenmiş. Son noktada bir açık mavi halka formasyonu damlanın etrafında belirmiş. Artış 1 mL olacak şekilde ilave metilen mavisi çözeltisi karışıma eklenmiş ve her eklemekten sonra 1-2 dakika karıştırılıp, sonra test edilmiş, son noktaya ulaşana kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Son noktaya ulaşıldıktan sonra, 2 dakika karıştırmaya devam edilip test tekrarlanmıştır.

Metilen mavisi değeri (MBV), Eşitlik 3.2 ile hesaplanmış, sonuçları Bulgular bölümünde verilmiştir.

$$MBV = V \times 0.01 \times 100 / W \quad 3.2$$

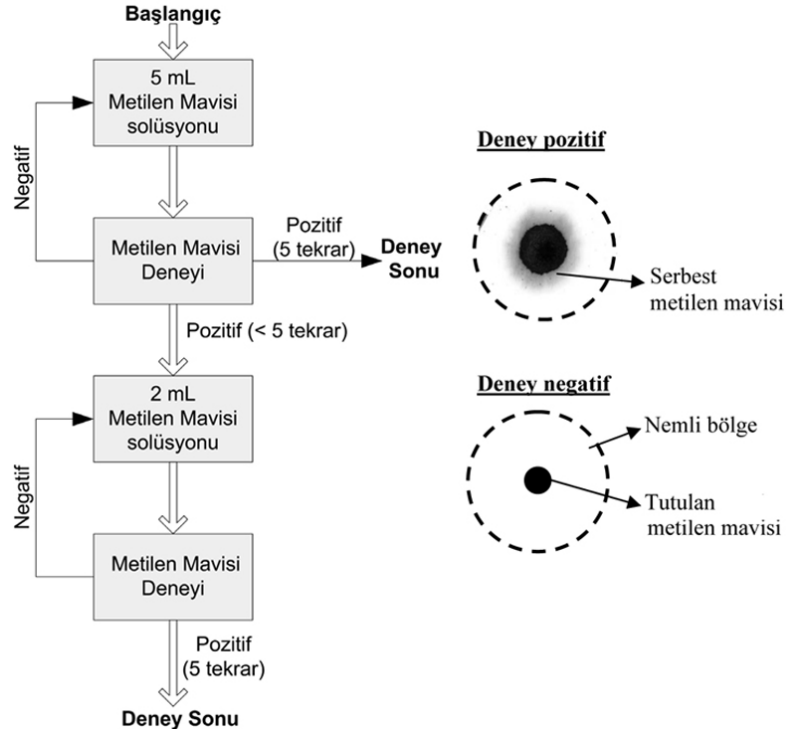
MBV = Kil için metilen mavisi indeksi meq/100gr kil,

V : Karışıma eklenen metilen mavisi solüsyonu hacmi (cm³),

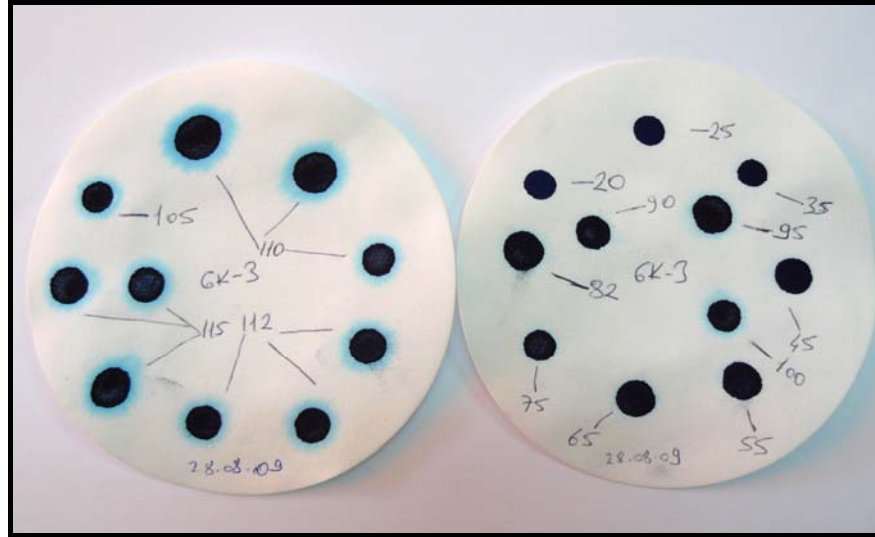
0.01 : Kullanılan metilen mavisi solüsyonun konsantrasyonu (g/cm³),

W : Numunenin kuru ağırlığı (g)

Şekil 3.14'de metilen mavisi deney aşamaları şematik olarak gösterilmiş, Şekil 3.15'de ise GK3 Ambarlı-Kara numunesinin metilen mavisi deneyi sonucunda filtre kağıdının görünümü gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Metilen mavisi deney aşaması şematik gösterimi



Şekil 3.15. GK3 numunesine ait metilen mavisi deney sonucu

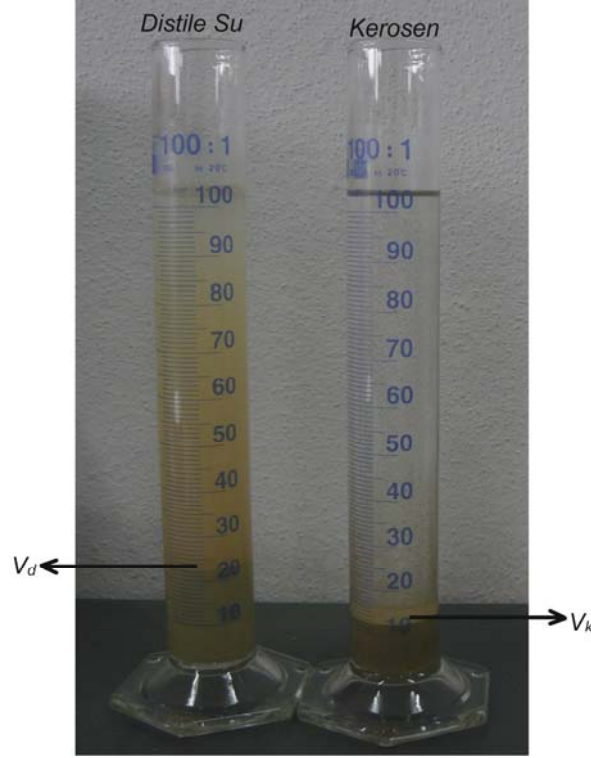
3.2.2. Serbest Şişme Oranı Belirleme Deneyleri

İncelenen numunelerin serbest şişme indisi değerleri Prakash ve Sridharan (1999) tarafından verilen yöntem izlenerek belirlenmiştir. 10 gr fırınlanmış zemin 425 μ m (40

nolu elek) elekten içi tamamen damıtılmış su ile dolu 100ml derecelendirilmiş bir silindirik mezür içine yavaşça boşaltılıp karıştırılarak 100ml'lik zemin-su süspansiyonu elde edilmiştir. Zemin-su süspansiyonun dengeye gelmesine izin verilip, normal zemin için normal denge periyodu olan 24 saat beklenmiştir. Zeminin denge çökelti hacmi kayıt edilmiştir (V_d). 10gr fırınlanmış zemin 425 μm (40 nolu elek) elekten içi tamamen kerosen ile dolu 100ml derecelendirilmiş bir silindirik mezür içine yavaşça boşaltılıp karıştırılarak 100ml'lik zemin-sıvı süspansiyonu elde edilmiştir. Zemin-sıvı süspansiyonun dengeye gelmesine izin verilip, zeminin denge çökelti hacmi 24 saat sonunda kayıt edilmiştir (V_k). Serbest şişme oranı V_d 'nin V_k 'ya oranının olarak hesaplanmıştır.

Eğer FSR 1.5'ten küçükse zemin kaolinit olarak belirlenir yada FSR 1.5'ten fazla ise montmorillonit olarak belirlenir. Eğer FSR 1 ile 1.5 arasında ise zemin karışık kil mineral çeşitleri karışımı olarak belirlenir. Eğer kaolinit yada montmorillonit kil mineral tipinin hangisinin baskın olduğunu öğrenmek istenirse likit limit testleri bize yol göstermektedir. Eğer kerosendeki likit limit değeri sudakinden büyükse bu kaolinit miktarının fazla olduğunu gösterir. Eğer kerosendeki likit limit değeri sudakinden küçükse bu montmorillonit miktarının fazla olduğunu gösterir. Eğer karbon tetra klorürdeki likit limit sudakine eşitse aynı miktarda kaolinit ve montmorillonit kil mineral tipine sahip bir zemin olduğunu gösterir. Şekil 3.16'da GK3 numunesine ait serbest şişme oranı deney düzeneği görülmektedir.

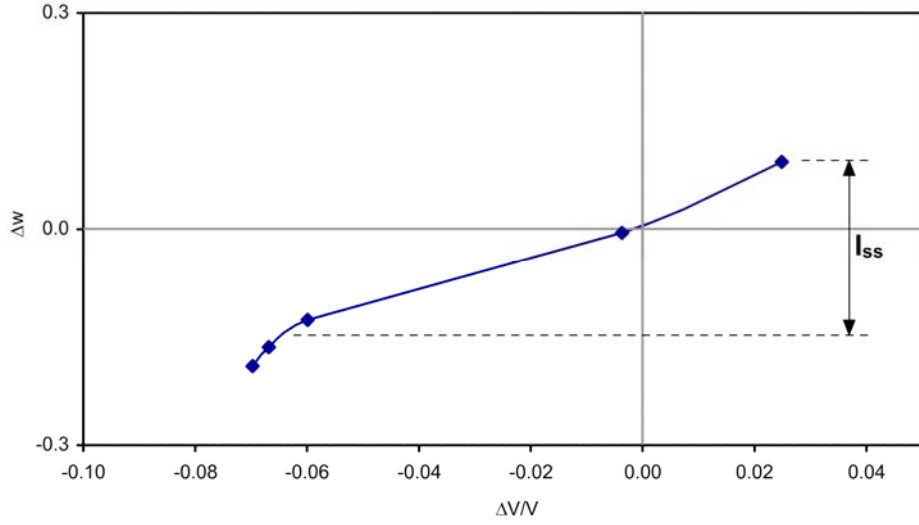
İncelenen numuneler için serbest şişme oranı belirleme deneylerinden elde edilen sonuçlar Bulgular bölümünde verilmiştir.



Şekil 3.16. GK3 numunesinin serbest şişme oranı deney düzeneği

3.2.3. Şişme-Büzülme İndeksi

Briaud ve diğ. (2003), şişme - büzülme potansiyelinin sınıflandırılması için farklı bir şişme-büzülme deneyi geliştirmişlerdir. Deneyde ilk olarak ödometre aletinde zeminin serbest şişmesine izin verilmiş ve maksimum şişmesi bulunmuştur. Ödometreden çıkartılan numunenin boyu, ağırlığı ölçülüp hacmi ve su muhtevası hesaplanmıştır. Böylece zeminin şişme indisi bulunmuş olmaktadır. Silindir şeklinde zemin numunesinin önce derin çatlaklar oluşmaması için 3-4 saat açık havada, daha sonra 105° sıcaklık altında etüvde serbestçe büzülmesine izin verilmiş ve belirli aralıklarla hacim değişiminin ve su muhtevasının belirlenmesi şeklinde uygulanmıştır. Hacimde artık değişikliğin meydana gelmediği noktaya ulaşıldığında deney bitirmiş ve büzülme indisi bulunmuştur. Deney sonrasında şişme-büzülme indeksinin bulunduğu grafiklerden biri örnek olarak Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. GK4_YY-kürsüz Ambarlı numunesine ait I_{ss} deney grafiği

3.3. TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

3.3.1. Numunelerin Hazırlanması ve Tanımlanması

Tekrarlı şişme-büzülmenin zeminin şişme potansiyeli ve şişme basıncına etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan bu tez çalışmasında 4 değişik bölgeden alınan İstanbul Gürpınar killlerinden doğal ve yeniden yapılanmış (kompaksiyonla) toplam 14 farklı numune kullanılmıştır. Büyükçekmece'den alınan örselenmemiş numunelere GK1_UD adı verilmiştir. Aynı numune, %21 su muhtevasında kompakte edilerek yeniden yapılandırılmış ve beklememiş GK1_YY-kürsüz ve 3 ay beklemiş GK1_YY-kürlü numuneleri oluşturulmuştur. Başlangıç su muhtevası %20.14 ve %24.75 olan 2 ayrı örselenmemiş numune üzerinde de deney yapılmış olup, bu numunelere GK1a_UD ve GK1b_UD adı verilmiştir. Ayrıca, uzun döngünün şişme potansiyeline etkisini görmek için 34 döngülü bir deney yapılmış ve burada kullanılan numuneye de GK1c_UD adı verilmiştir. Esenyurt bölgesinden alınan örselenmiş GK2 numunesinden %24 su muhtevasında kompakte edilerek ve bekletilmeyerek GK2_YY-kürsüz numunesi ve 8 ay bekletilerek GK2_YY-kürlü numuneleri hazırlanmıştır. Ambarlı'nın kara tarafından alınan GK3_UD numunesi, deniz tarafından alınan GK4_UD ve onun %19.5 su muhtevasında kompakte edilmiş GK4_YY-kürsüz numunesi hazırlanmıştır. Kıracaoğlu'tan alınan GK5a_UD ve GK5b_UD numuneleri ve %28.8 ile %22 su muhtevası ile kompakte edilmiş GK5a_YY-kürsüz ve GK5b_YY-kürsüz numuneleri hazırlanmıştır.

Tablo 3.5'te araştırmada kullanılan numunelerin hazırlanma şekli, deney şartları ve açıklamaları verilmiştir.

Tablo 3.5 Araştırmada kullanılan numunelerin hazırlanması ve deney şartları

Numunenin Geldiği Yer	Tanımlama	Hazırlama Şekli	Açıklama	Konsolidasyon
Büyükçekmece	GK1a-UD	Doğal numune	$W_0 = 20.14\%$	Yapıldı
Büyükçekmece	GK1b-UD	Doğal numune	$W_0 = 24.75\%$	Yapıldı
Büyükçekmece	GK1c-UD	Doğal numune	$W_0 = 26.59\%$	Yapıldı
Büyükçekmece	GK1_YY-kürsüz	Kompaksiyon	Optimum kuru $W_0 = 18.81\%$	Deney yapılmadı
Büyükçekmece	GK1_YY-kürlü	Kompaksiyon	Optimum kuru 3 ay kürlü $W_0 = 20.62\%$	Deney yapılmadı
Esenyurt	GK2_YY-kürsüz	Kompaksiyon	Optimum kuru $W_0 = 22.30\%$	Deney yapılmadı
Esenyurt	GK2_YY-kürlü	Kompaksiyon	Optimum kuru 8 ay kürlü $W_0 = 24.07\%$	Deney yapılmadı
Ambarlı-Kara	GK3_UD	Doğal numune	$W_0 = 25.01\%$	Yapıldı
Ambarlı-Deniz	GK4_UD	Doğal numune	$W_0 = 25.25\%$	Yapıldı
Ambarlı-Deniz	GK4_YY-kürsüz	Kompaksiyon	Optimum kuru $W_0 = 19.5\%$	Deney yapılmadı
Kıraç	GK5a_UD	Doğal numune	$W_0 = 27.22\%$	Yapıldı
Kıraç	GK5b_UD	Doğal numune	$W_0 = 24.88\%$	Yapıldı
Kıraç	GK5a_YY-kürsüz	Kompaksiyon	Optimum ıslak $W_0 = 28.8\%$	Deney yapılmadı
Kıraç	GK5b_YY-kürsüz	Kompaksiyon	Optimum kuru $W_0 = 22\%$	Deney yapılmadı

3.3.2. Tekrarlı Şişme-Büzülme Deneyi

İncelenen zemin numunelerinin şişme yüzdelerinin belirlenmesi amacıyla bir boyutlu ödometre deney aletinde ASTM D 4546 (1990) standardına uygun şekilde serbest şişme ödometre deneyleri yapılmıştır. Shelby tüpünden örselenmeden çıkarılan numuneler veya standart proktor kabında sıkıştırılan numuneler ödometre ringi içerisine alınmıştır (Şekil 3.18). Numunenin yerleştirilmesinden önce ring tartılmıştır. Ayrıca üst ve alt poroz taşlar ıslak ve kuru olarak tartılıp kalınlıkları ölçülmüştür. Ringin içindeki numunenin üstü ve altı filtre kâğıdıyla kaplanmıştır. Filtre kâğıtlarının üstüne yine altlı üstlü poroz taşlar konulup üst başlıkla birlikte tartma işlemi yapılmıştır.

Hazırlanan düzeneek ödometre aletine konulmuştur. Yükleme boyunduruğu yatay hale getirilip, deformasyon saati sıfırlanmıştır. Çok düşük bir düşey gerilme (100gr) deney başlangıcında uygulanmıştır. İç saat deney föyüne not edilip ve hazneye su ilave edilerek okuma alınmaya başlanmıştır. Numune 1.5 gün serbest şişmeye bırakılıp ve şişme bitene kadar ara ara okuma alınmıştır. Şişme sonunda yükleme yapıp şişme basınçları bulunmuştur. Excel programı yardımıyla numunenin ilk ve son boyu belirlenip deformasyon saatinin programın verdiği değerlere gelmesi için yük miktarı ayarlanmıştır. Yarım gün süren yüklemenin ardından numune ödometre aletinden çıkarılıp boyu ve ağırlığı deney föyüne yazılıp etüve konulmuştur. Numune etüvde 24 saat süreyle $36^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}$ ’de kalmıştır. Ara ara etüvden çıkarılıp boyu ölçülüp ağırlığı tartılmıştır (Şekil 3.20). 24 saatin ardından numune etüvden çıkarılarak kumpas yardımı ile boyu, hassas terazi ile de ağırlığı ölçülerek kaydedilmiştir. Sonra yine numune su haznesine konulup ödometre aletine yerleştirilmiş ve serbest şişmeye bırakılmıştır. Bu şişme-büzülme döngüleri, şişme basıncının sabitlenmesi ile son bulmuştur. Tekrarlı şişme-büzülme deneyini anlatan şematik gösterim Şekil 3.21’de verilmiştir.

Ödometrelerde yapılan tekrarlı şişme-büzülme deneyleriyle birlikte deney yapılan numunelere ait referans numuneler hazırlanmış, odömetredeki deney şartlarının aynısı sağlanmaya çalışılmıştır. Kolloidal malzemede kayıp olmaması için tülbente sarılan numuneler Şekil 3.19’da görüldüğü gibi üzerlerine yük koyularak şişirilmeye bırakılmışlardır. 2 gün süreyle şişmede kalan numuneler ödometredeki numunelerle birlikte 24 saat süreyle etüvde bekletilmiştir. Deneydeki numune kaç döngü geçirmişse referans numune de aynı sayıda döngüye tabii tutulmuştur. Referans numunelerin amacı tekrarlı şişme-büzülme geçirmiş numunelerde kıvam, tane dağılımı, serbest şişme oranı, metilen mavisi gibi deneyleri yapabilmemiz için gerekli miktadaki numuneyi sağlamak içindir.

İncelenen numuneler için tekrarlı şişme-büzülme deneylerinden elde edilen sonuçlar Bulgular bölümünde verilmiştir.



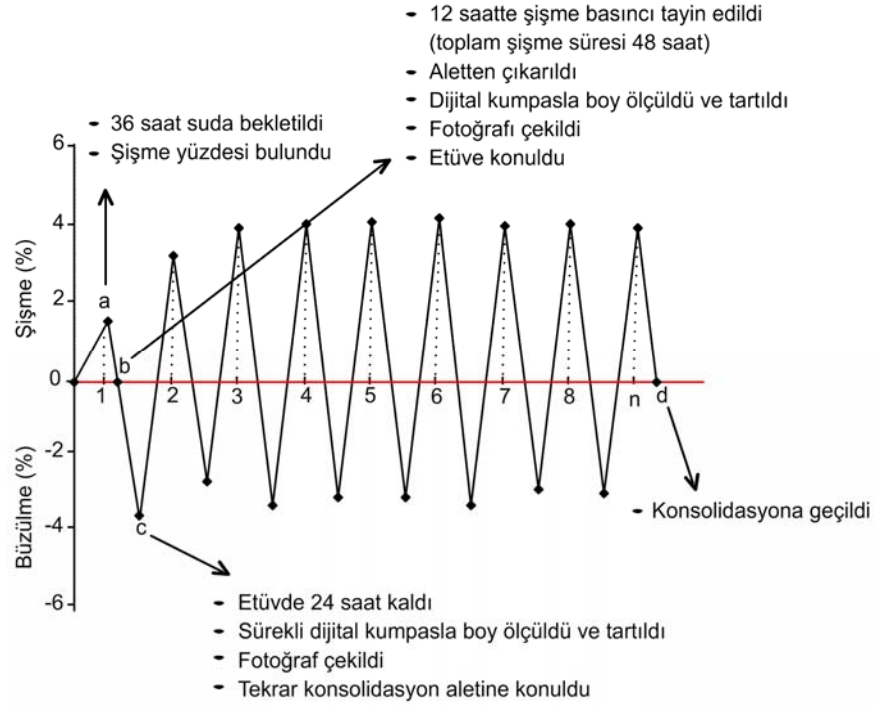
Şekil 3.18. Deney numunesinin hazırlanması



Şekil 3.19. Deneyde kullanılan referans numunelere tekrarlı şişme-büzülme uygulanması



Şekil 3.20. Etüvden çıkan numunenin boyunun ölçülmesi



Şekil 3.21. Tekrarlı şişme-büzülme deneyinin şematik gösterimi

3.3.3. Konsolidasyon Deneyleri

Killerin şişme yüzdesi ve şişme basıncının belirlenmesinde kullanılan en uygun ve en başarılı yöntem, direkt ölçümlerdir. Genel olarak şişen killerin direkt ölçümleri, klasik bir boyutlu konsolidasyon cihazı ile de yapılır. En yaygın şekliyle şişme miktarının tahmininde bir boyutlu konsolidasyon ekipmanı veya ödometre deney ekipmanları kullanılır. Birçok uygulamada deney aşamasında kullanılan numune ve yükleme durumu, araziye temsil açısından farklılık gösterir. Değişik yükleme sırası ve uygulanan sürsarj basınçları arazi durumunu temsil etmeye araştırmada kullanılır. Klasik bir boyutlu konsolidasyon cihazı kullanarak yapılan deneyler farklı tiptedir. ASTM D 4546 (1990), standardında tanımlanan şekliyle tek eksenli şişme deneylerinin klasik konsolidasyon cihazı kullanılarak zeminlerde uygulanması tanımlanmaktadır.

İlgili standart yönteme göre, ring zemine çakılarak numune yerleştirilmiştir. Numunenin tam olarak ringin içine girmesi için örselenmeden traşlanmıştır. Traşlanan numuneler su muhtevasını bulmak için ayrılmıştır. Hazır hale getirilen ring su haznesine konmuştur. Yükleme halkası poroz taşın üzerine yerleştirilmiştir. Yükleme yapıldıktan sonra poroz

taşın konsolidasyon halkası ile arasında sıkışma olmamasına dikkat edilmelidir. Okuma saati düşey oturmaları ölçebilecek Şekilde yükleme halkasının üzerine yerleştirilip su haznesi damıtık su ile doldurulmuştur. Zemin numunesinin çok yumuşak olmaması halinde çok düşük bir düşey gerilme (100gr) deney başlangıcında uygulanmıştır. Deformasyon saatinden 100–200–400–800–1600–800–400–200–100 Kpa gerilme kademelerinin her biri için deformasyon saatinden.15sn-30sn-1dk-2dk-4dk-8dk-15dk-30dk-1sa-2sa-4sa-8sa-16sa-24sa-ye karşılık gelen okumalar alınmıştır.

Konsolidasyon deneyleri doğal zemin numunesinde ve tekrarlı şişme-büzülme geçirmiş numunelerde yapıpıp tekrarlı şişme-büzülmenin konsolidasyona etkisi araştırılmıştır. Konsolidasyon katsayısı (c_v) Taylor ($\sqrt{t}$) metoduyla hesaplanmıştır.

İncelenen numuneler için konsolidasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar Bulgular bölümünde verilmiştir.

4. BULGULAR

Bu bölümde, kullanılan zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinin sonuçları değerlendirilmiş ve çalışılan numunelerin şişme karakteristikleri tartışılmıştır. Öncelikle, literatür araştırmasında aktarılan sınıflandırma sistemleri, kartlar ve diğer yöntemlerin sonuçları numunelerin şişme-büzülme döngülerine uğramadan önceki ve/veya sonraki durumları için aktarılmıştır. Numunelerin şişme-büzülme döngülerine uğramadan önceki tanımlama özellikleri, XRD analizleri ve diğer özellikleri, tekrarlı şişme-büzülmeden sonra da elde edilmiş ve oluşan değişiklikler yorumlanmıştır. Son olarak şişme-büzülme deney sonuçları sunulurken, bu çalışma kapsamında getirilen yeni yaklaşımlar verilmiştir.

Tablo 4.1’de çeşitli araştırmacıların bu çalışmanın killeri için verdikleri mineralojik tahminleri görülmektedir. Bu tablodaki araştırmacıların yaklaşımları FRS (serbest şişme

Tablo 4.1. İncelenen zeminlerin mineralojilerine göre sınıflandırılması

Zemin	Kil Minerali Tipi					
	Holt (1969)	Nelson ve Miller (1992)	Kariuki ve van der Meer (2004)	Prakash ve Sridharan (2004)	*Değerlendirme	XRD Analizi
GK1	Karışık katman	İllit	İllit/karışık tabaka	Montmorillonitli + kaolenli zemin	Simektit + illit karışımı	I/S karışık katman
GK2	Karışık katman	İllit	Simektit	Montmorillonitli zemin	Simektit + illit karışımı	I/S karışık katman
GK3	Karışık katman	İllit	İllit/karışık tabaka	Montmorillonitli zemin	Simektit + illit karışımı	I/S karışık katman
GK4	Montmorillonit	İllit	Simektit	Montmorillonitli zemin	Simektit	Simektit
GK5	Montmorillonit	İllit	İllit/karışık tabaka	Montmorillonitli zemin	Simektit + illit karışımı	I/S karışık katman
GnK	Karışık katman	İllit	İllit/karışık tabaka	Montmorillonitli + kaolenli zemin	Simektit + illit karışımı	I/S karışık katman
Kaolen	İllit + klorit + kaolen	Kaolen	Kaolen	Kaolenli zemin	Kaolen	Kaolen + illit
Bentonit	Montmorillonit	Montmorillonit (Sodyum)	Simektit	Montmorillonitli zemin	Simektit	Simektit

* Buradaki değerlendirme Grim (1962)’nin sayfa 111, tablo 3.4’deki değerleri yorumlanarak yapılmıştır.

oranı), aktivite, katyon değişim kapasitesi gibi parametrelere bağlamışlardır. Sonuçların Holt (1969) ve Grim (1963)'ten uyarlanan değerlendirmenin en iyi sonucu verdiği, Prakash ve Sridharan (2004)'in basit yaklaşımının da oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Tablo 4.2'de ise incelenen zeminlerin farklı araştırmacılar tarafından önerilen ve kıvam limitleri, aktiviteleri ve kil yüzdeleri gibi kriterlere bağlı şişme potansiyeli değerlendirmesi sunulmuştur. Buradan görüldüğü üzere, GK1, GK5 ve GnK'nın yüksek şişme potansiyeline, GK2, GK3, GK4 ve bentonitin çok yüksek şişme potansiyeline, kaolenin ise düşük şişme potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmiştir.

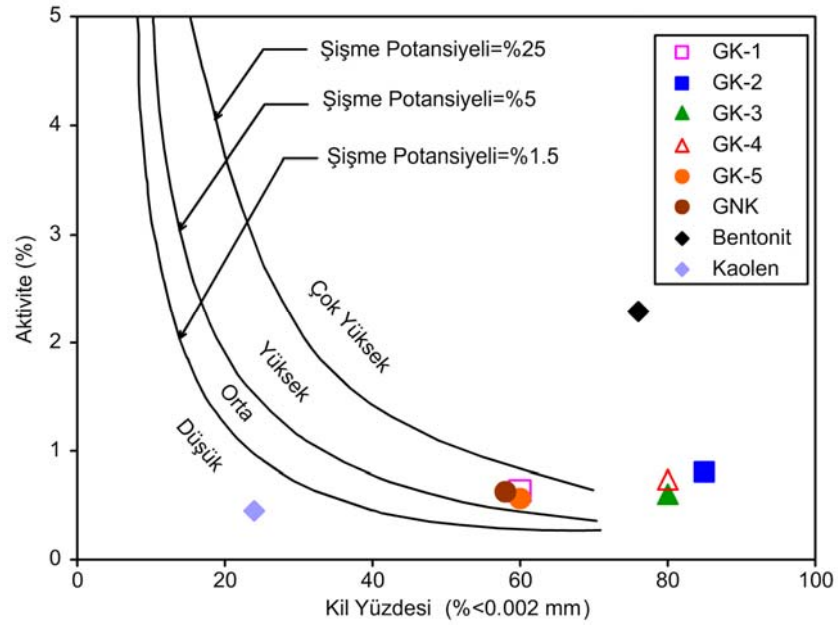
Tablo 4.2. İncelenen zeminlerin şişme potansiyellerine göre sınıflandırılması

	Şişme Potansiyeli							
	GK1	GK2	GK3	GK4	GK5	GnK	Kaolen	Bentonit
Altmeyer (1955)	Sınır	Sınır	Sınır	Sınır	Sınır	Sınır	Kritik değil	Kritik
Holtz ve Gibbs (1956)	Yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Çok yüksek	Düşük	Çok yüksek
Seed vd. (1962)	Yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük	Çok yüksek
Van der Merwe (1964)	Çok yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Düşük	Çok yüksek
Dakshanamurthy ve Raman (1973)	Yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük	Çok yüksek
Sivapullaiah vd. (1987)	Orta	Yüksek	Orta	Orta	Orta	Orta	Düşük	Yüksek
Chen (1988)	Yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük	Çok yüksek
Çokça (1991)	Yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük	Çok yüksek
Hanafy (1991)	Yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük	Çok yüksek
Basma (1993)	Yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Çok yüksek	Düşük	Çok yüksek
Thomas ve diğ., 2000	Yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Düşük	Çok yüksek
Briaud (2003)	Orta	Yüksek	Orta	Orta	Orta	Orta	Düşük	Çok yüksek
Kariuki ve van der Meer (2004)	Orta	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta	Orta	Düşük	Yüksek
Yükselen ve Kaya (2008)	Orta	Yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Düşük	Çok yüksek
Değerlendirme	Yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük	Çok yüksek

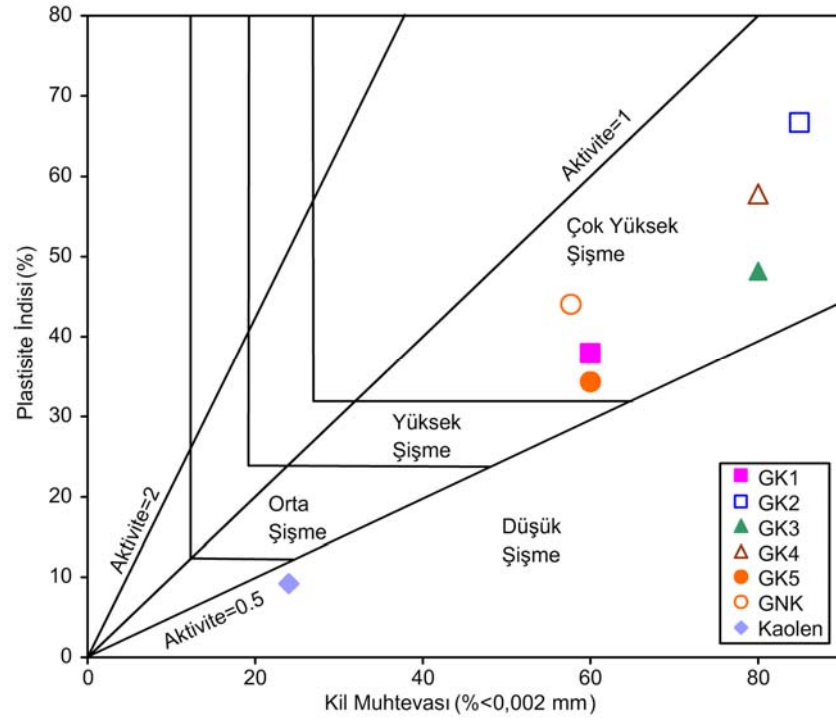
Şekil 4.1’de kil yüzdesi ve aktiviteye bağlı şişme potansiyeli kartındaki yerleri verilmiştir. Bu karta göre GK1, GK5 ve GnK numuneleri yüksek şişme, GK2, GK3 ve GK4 çok yüksek-yüksek sınırının hemen üzerinde, bentonit çok yüksek ve kaolen düşük şişme potansiyeli olarak görülmektedir.

Şekil 4.2’deki kil yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli abağında ise kaolen hariç tüm numuneler çok yüksek şişme bölgesinde bulunmaktadır. Kaolen ise düşük şişmede bulunmaktadır.

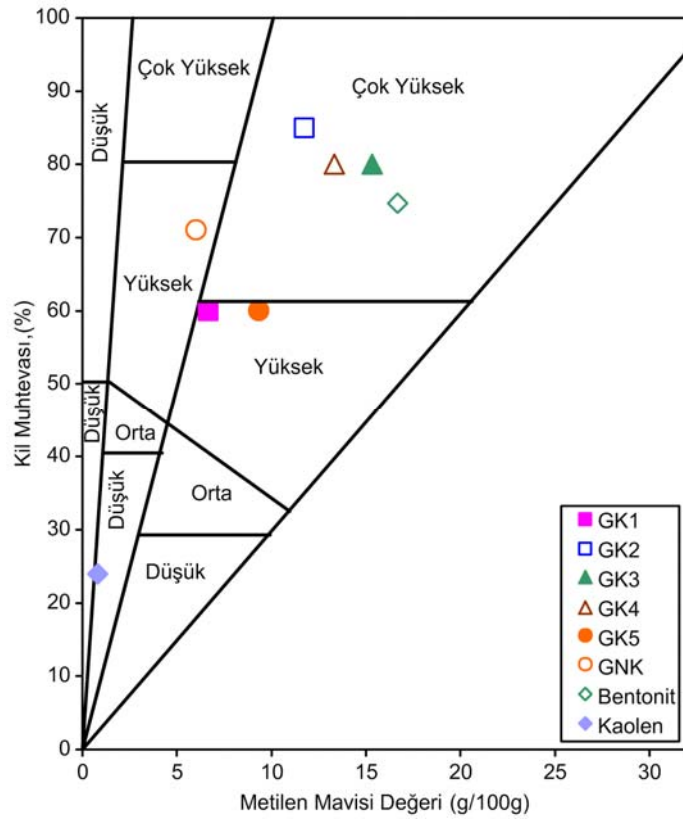
Şekil 4.3’te kil muhtevası-metilen mavisi değerine bağlı şişme potansiyeli ilişkisi verilmiştir. Yine GK1, GK5 ve GnK yüksek şişme, kaolen hariç diğer numuneler çok yüksek şişme, kaolen ise düşük şişme bölgesinde yer almaktadır.



Şekil 4.1. Kil yüzdesi ve aktiviteye bağlı şişme potansiyeli kartı (Seed ve diğ., 1962)

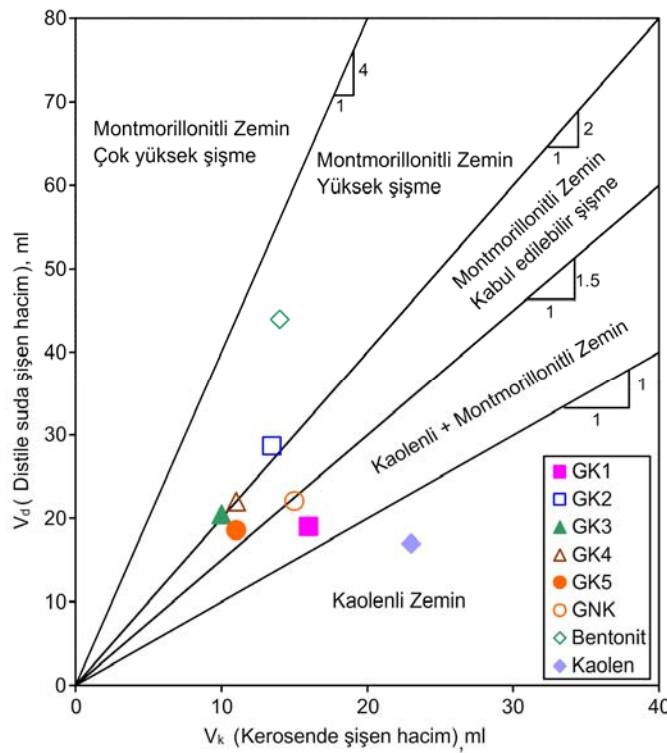


Şekil 4.2. Kıl yüzdesi ve plastisite indisine bağlı şişme potansiyeli kartı (Van der Merwe, 1964)



Şekil 4.3. Kıl muhtevası-MBV ilişkisi (Çokça, 1991)

Şekil 4.4'te serbest şişme oranı deneyinde distile su içindeki şişmenin kerosendeki şişmeye oranından şişme ve mineral cinsi verilmiştir. Buna göre GK1'de kaolinit ile montmorillonit mineralleri karışık olarak bulunmakta, GnK montmorillonit zemin ile karışık zeminin sınır değerinde bulunmakta, GK5 montmorillonit zemin kabul edilebilir şişme bölgesinde, GK3 ve GK4 kabul edilebilir şişmeyle yüksek şişme arasında sınırdadır, GK2 ve bentonit montmorillonit zemin yüksek şişme, kaolen ise kaolinit zemin bölgesinde bulunmaktadır.



Şekil 4.4. Serbest şişme deneyine göre şişen montmorillonit ve şişmeyen kaolinit olarak zemin sınıflaması (Prakash and Sridharan, 2004)

Tablo 4.3'de Thomas ve diğ (2000) ve Kariuki ve Van der Meer (2004)'ün geliştirmiş oldukları ESI (şişen zemin indeksi) puanlama sistemine göre deneylerde kullanılan İstanbul Gürpınar killерinin şişme potansiyelleri ve minerolojik sonuçları verilmiştir. 2 yöntem uygulanarak yapılan puanlamaların sonuçlarında farklılıklar vardır. Thomas ve diğ. (2000) sonuçlarına göre tüm killeri yüksek/çok yüksek şişme olarak göstermektedir. Kariuki ve Van der Meer (2004)'in ESI'larından çıkan sonuçlar ise deneylerde kullanılan killерin yüksek ve orta şişme potansiyeline sahip olduğunu söylemektedir.

Tablo 4.3. ESI sınıflandırma sistemine göre İstanbul Gürpınar killерinin değеrlendirme sonuçları

Numune	Thomas ve diğ., 2000								Kariuki ve Van der Meer, 2004								
	*1 2:1 gr/kg	LL	*2 SI (kPa)	CEC Cmol/kg	# ESI-1	# ESI-2	# ESI-3	Sonuç	Ac	CEC	*3CEA _c	*4SSP	*5LEP	ESI-1	ESI-2	ESI-3	Sonuç
Gk1a_UD	567	60	86	54	767	200	114	Yüksek Şişme	0.63	54	0.9	0.23	0.16	1.88	1.76	0.23	İllit/karışık tabaka orta
GK1b_UD	567	60	85	54	766	199	114	Yüksek Şişme	0.63	54	0.9	0.28	0.16	1.93	1.81	0.28	İllit/karışık tabaka orta
GK1c_UD	567	60	80	54	761	194	114	Yüksek Şişme	0.63	54	0.9	0.28	0.16	1.93	1.81	0.28	İllit/karışık tabaka orta
GK1_YY-kürlü	567	60	265	54	946	379	114	Yüksek Şişme	0.63	54	0.9	0.27	0.16	1.92	1.8	0.27	İllit/karışık tabaka orta
GK1_YY-kürsüz	567	60	295	54	976	409	114	Yüksek Şişme	0.63	54	0.9	0.27	0.16	1.92	1.8	0.27	İllit/karışık tabaka orta
GK2_YY-kürlü	680	99	750	69.8	1599	919	169	Çok yüksek Şişme	0.78	69.8	0.82	0.47	0.17	2.76	2.6	0.47	Simektit Yüksek
GK2_YY-kürsüz	680	99	795	69.8	1644	964	169	Çok yüksek Şişme	0.78	69.8	0.82	0.48	0.17	2.78	2.61	0.48	Simektit Yüksek
Gk3_UD	640	74	85	66.2	865	225	140	Yüksek Şişme	0.63	66.2	0.83	0.27	0.16	2.19	2.03	0.27	İllit/karışık tabaka orta
Gk4_UD	580	82	350	88.7	1101	521	171	Çok yüksek Şişme	0.75	88.7	1.11	0.38	0.16	2.52	2.36	0.38	Simektit Yüksek
GK4_YY-kürsüz	825	82	105	88.7	1101	276	171	Çok yüksek Şişme	0.75	88.7	1.11	0.3	0.16	2.44	2.28	0.3	Simektit Yüksek
Gk5a_UD	486	61	125	64.7	737	251	126	Çok yüksek Şişme	0.6	64.7	1.08	0.3	0.11	2.08	1.97	0.3	İllit/karışık tabaka orta
Gk5b_UD	486	61	250	64.7	862	376	126	Çok yüksek Şişme	0.6	64.7	1.08	0.3	0.11	2.08	1.97	0.3	İllit/karışık tabaka orta
GK5a_YY-kürsüz	486	61	35	64.7	647	161	126	Çok yüksek Şişme	0.6	64.7	1.08	0.33	0.11	2.11	2	0.33	İllit/karışık tabaka orta
GK5b_YY-kürsüz	486	61	185	64.7	797	311	126	Çok yüksek Şişme	0.6	64.7	1.08	0.32	0.11	2.1	1.99	0.32	İllit/karışık tabaka orta

*1 Smektit + Vermikülit/2 yüzdesi *2 Şişme basıncı *3 CEC/Kil yüzdesi *4 Doygun standart nem *5 Doğrusal genişleyebilme yüzdesi

ESI - 1 = 2 : 1 Şişme + SI + LL + CEC # ESI - 2 = SI + LL + CEC # ESI - 3 = LL + CEC ESI - 1 = A_c + CEA_c + SSP + LEP_c ESI - 2 = A_c + CEA_c + SSP ESI - 3 = SSP

4.1. TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DENEYLERİ

Bu tez çalışmasında, zemin numunelerinin farklı başlangıç koşullarındaki şişme yüzdeleri ve şişme basınçları ödometre serbest şişme deney yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. İncelenen zemin numunelerinin farklı başlangıç koşulları altındaki şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerleri, döngü sonlarında çekilen fotoğraflarla birlikte geçen zamana ve döngü sayısına bağlı olarak aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.

4.1.1. Büyükçekmece Numunesi Tekrarlı Şişme-Büzülme Deney Sonuçları

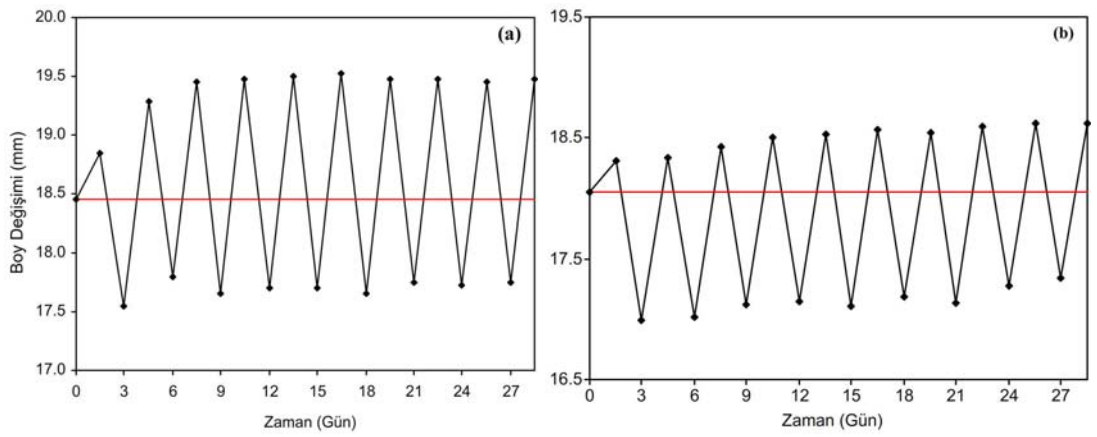
Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de sırasıyla B.çekmece mezarlık GK1a_UD, GK1b_UD, GK1c_UD, GK1_YY-kürlü ve GK1_YY-kürsüz numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deneylerindeki zamana bağlı boy değişimi (mm), Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de ise bu numunelerin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) şişme basınçlarıyla birlikte verilmiştir. Ayrıca bu şekillerde tekrarlı şişme-büzülmenin etkilerini daha iyi gözlemlemek için şekiller fotoğraflarla desteklenmiştir.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da görüldüğü gibi şişme yüzdeleri sürekli artarak belirli bir noktadan sonra sabitlenmiştir. Biraz daha sıkı olan GK1a_UD numunesinde ilk şişme potansiyelin yaklaşık 3 katı bir değerle son döngüye ulaşırken, GK1b_UD numunesi ilk değerinin yaklaşık 1.5 katı bir şişme potansiyeliyle son döngüye ulaşmıştır. Şişme basınçları ise şişme yüzdelerinin aksine ilk 2 döngüde azalmakta, daha sonraki döngülerde şişme yüzdesiyle aynı trendi izlemektedir. İlk 2 döngüde şişme basıncındaki azalma genelde tüm numunelerde gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak şişme-büzülme döngüsünün kilin kristal yapısını bozması ve kilin yüke direnç gösterememesi olarak açıklanabilir.

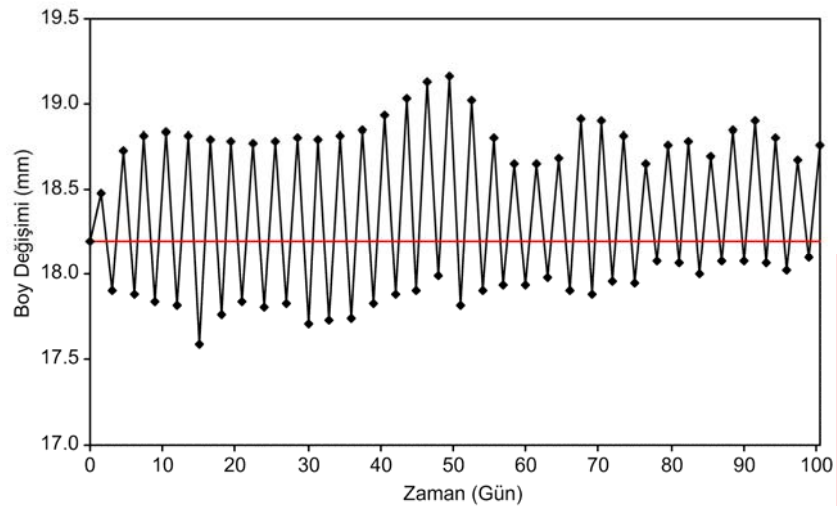
Bununla birlikte aynı kil olan GK1c_UD numunesiyle yapılan 34 döngülü deneyde 12 döngüde sabitlenen şişme potansiyeli ve şişme basıncı bu noktadan itibaren dalgalı bir şekilde azalıp artmıştır (Şekil 4.6 ve 4.10). Geçmiş araştırmalarda ilk 4 döngü sonunda şişme potansiyelinin sabitlendiği söylenip deneyler en fazla 10-15 döngü sonunda sonlandırılmıştır. Bu araştırmada 34 döngülü deney sonunda 13. döngüde sabitlendiği

görülen şişme potansiyelinin 17. döngüde maksimum değere ulaştığı ve deney sonuna kadar azalıp-artarak dalgalı bir davranış göstermiştir. Büzülme yüzdesi de diğer numulere olduğu gibi deney sonuna kadar azalma eğiliminde ilerlemektedir.

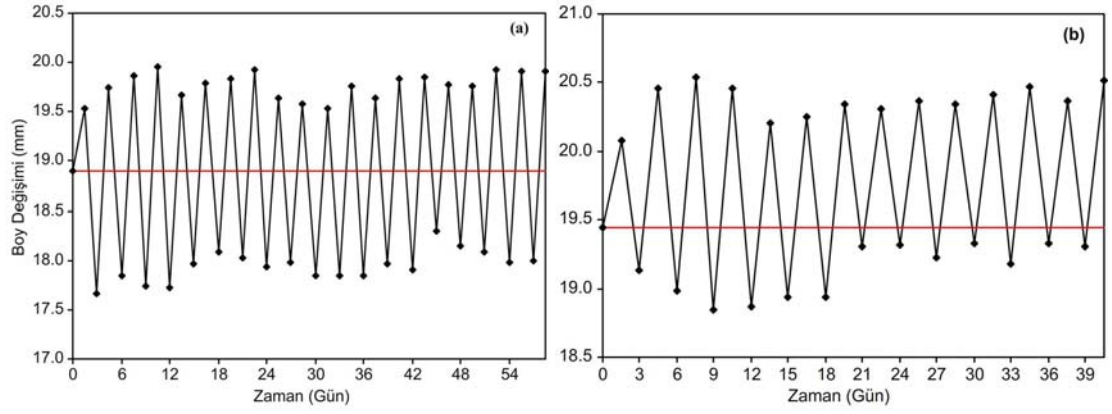
Fotoğraflar incelendiği zaman tüm GK1 numunelerinde çatlak sayısı artmış, yoğun bir çatlak mekanizması gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.9'deki fotoğraflardan B.çekmece mezarlık GK1b_UD numunesinde CaCO_3 (Kalsiyum karbonat) olduğu gözlemlenmiştir.



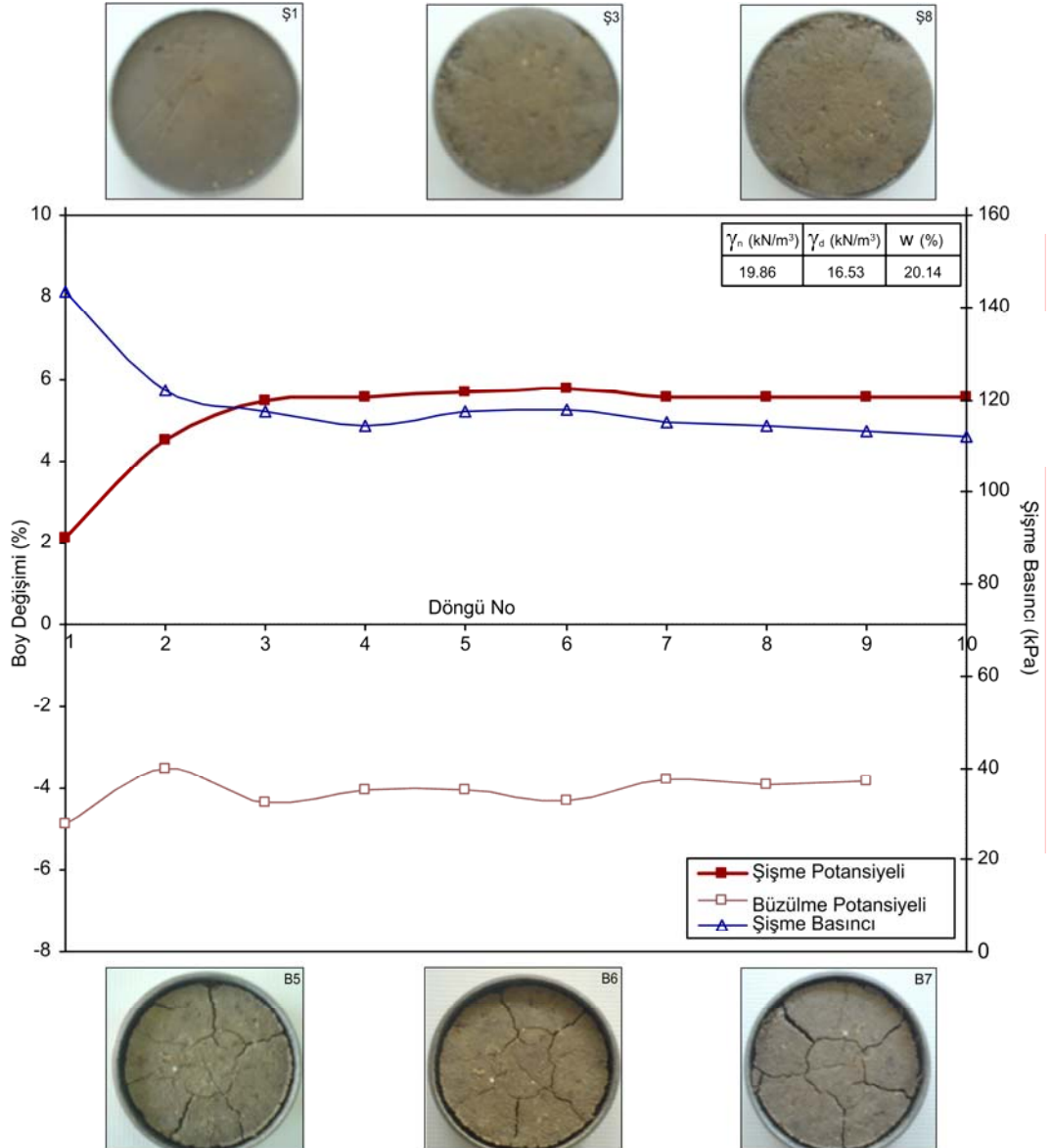
Şekil 4.5. B.çekmece mezarlık GK1a_UD ve GK1b_UD numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı; a) GK1a_UD b) GK1b_UD



Şekil 4.6. B.çekmece mezarlık GK1c_UD numunesinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı

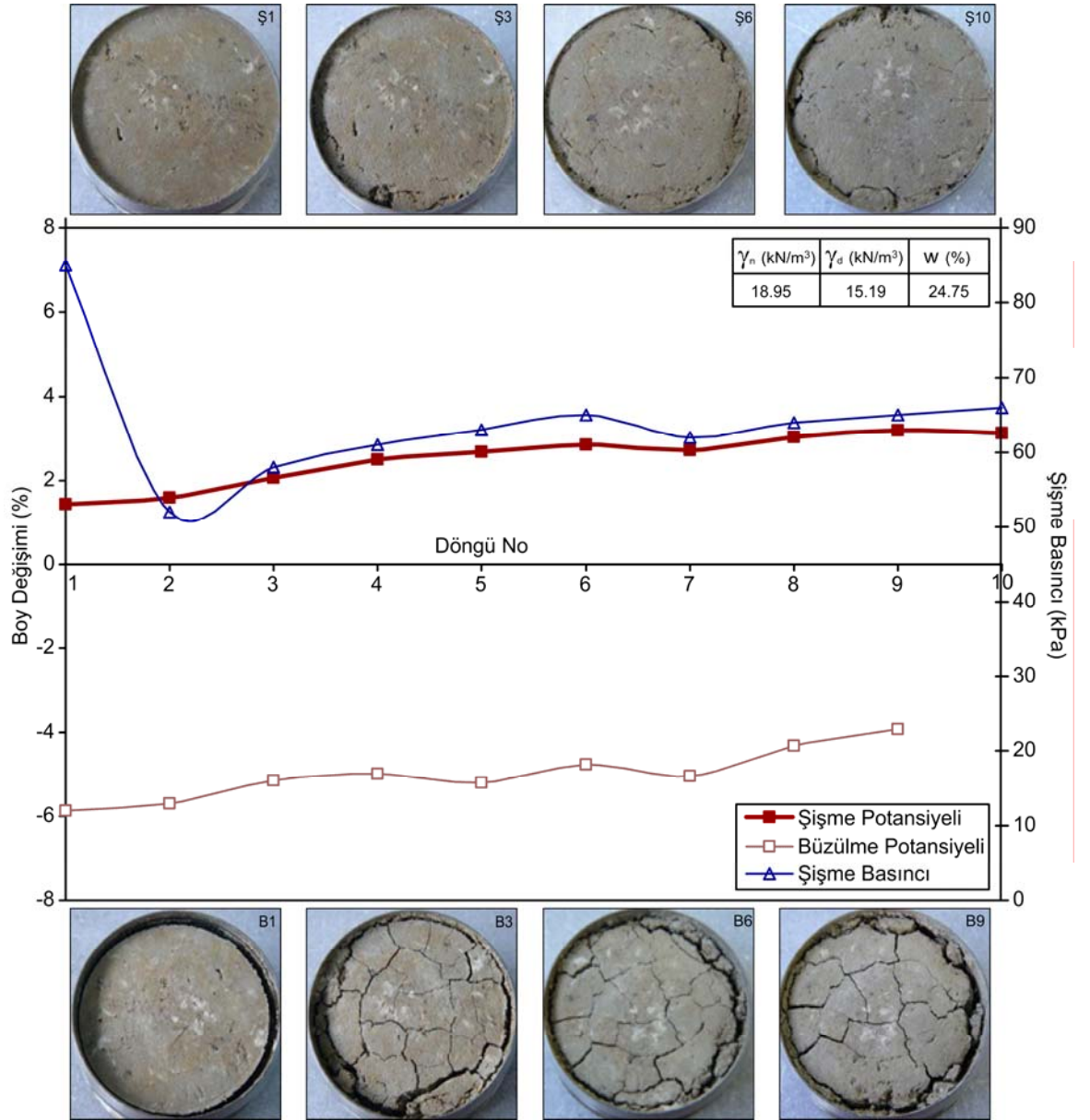


Şekil 4.7. B.çekmece mezarlık GK1_YY-Kürlü ve GK1_YY-Kürsüz numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı; a) GK1_YY-Kürlü b) GK1_YY-Kürsüz

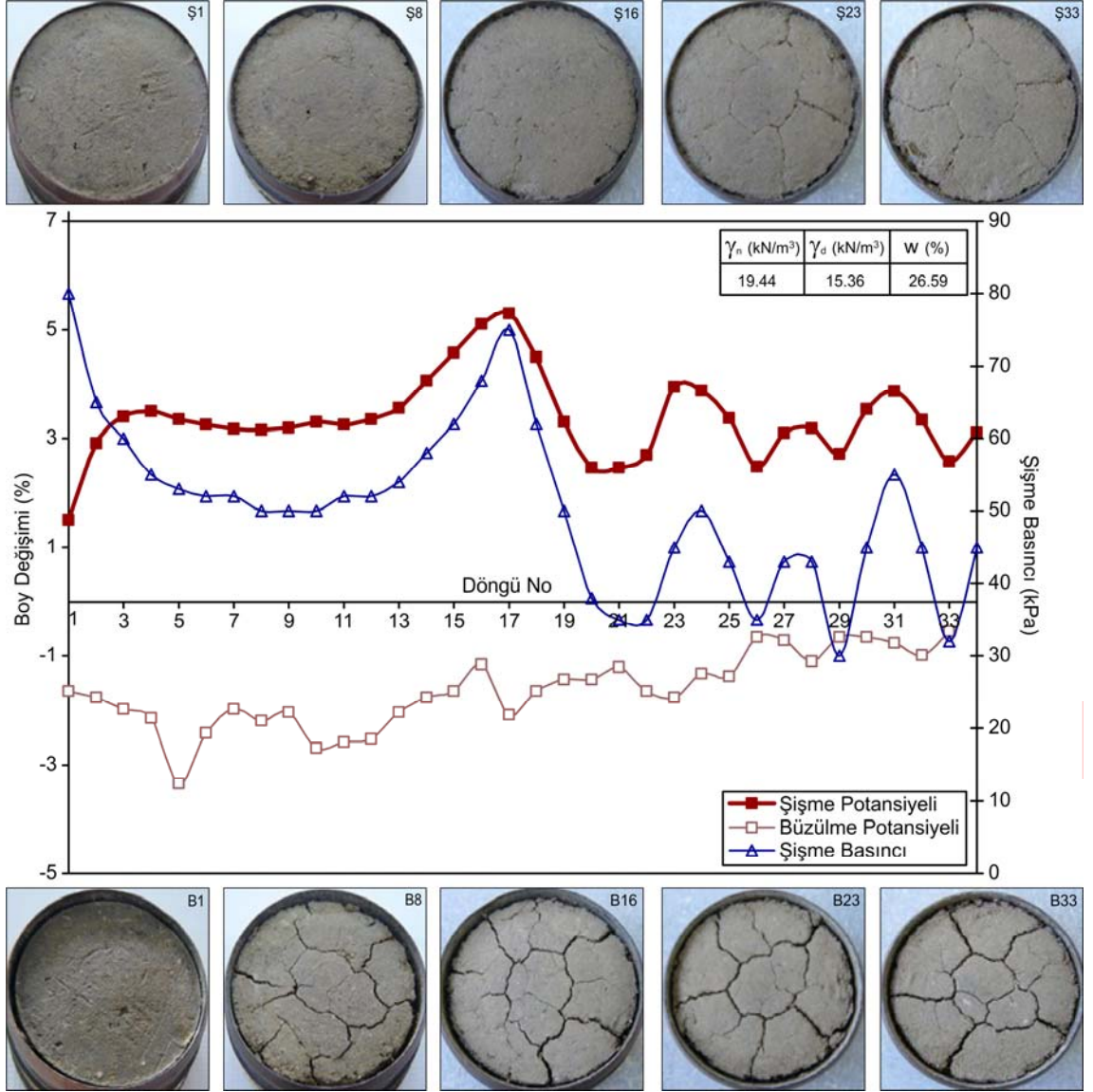


Şekil 4.8. B.çekmece mezarlık GK1a_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışına bağlı boy değişimi (%)

Ayrıca her büzülme döngüsünden sonra oluşan çatlaklar şişme sonucunda kapanmamaya başladığı, zemin yüzüyle topaklanma başladığı gözlemlenmiştir. Büzülme yüzdelere bakıldığı zaman tüm numunelerde büzülme yüzdesinin döngü sayısı ilerledikçe azaldığı, şişme davranışının büzülmeden bağımsız olarak davrandığı görülmüştür.

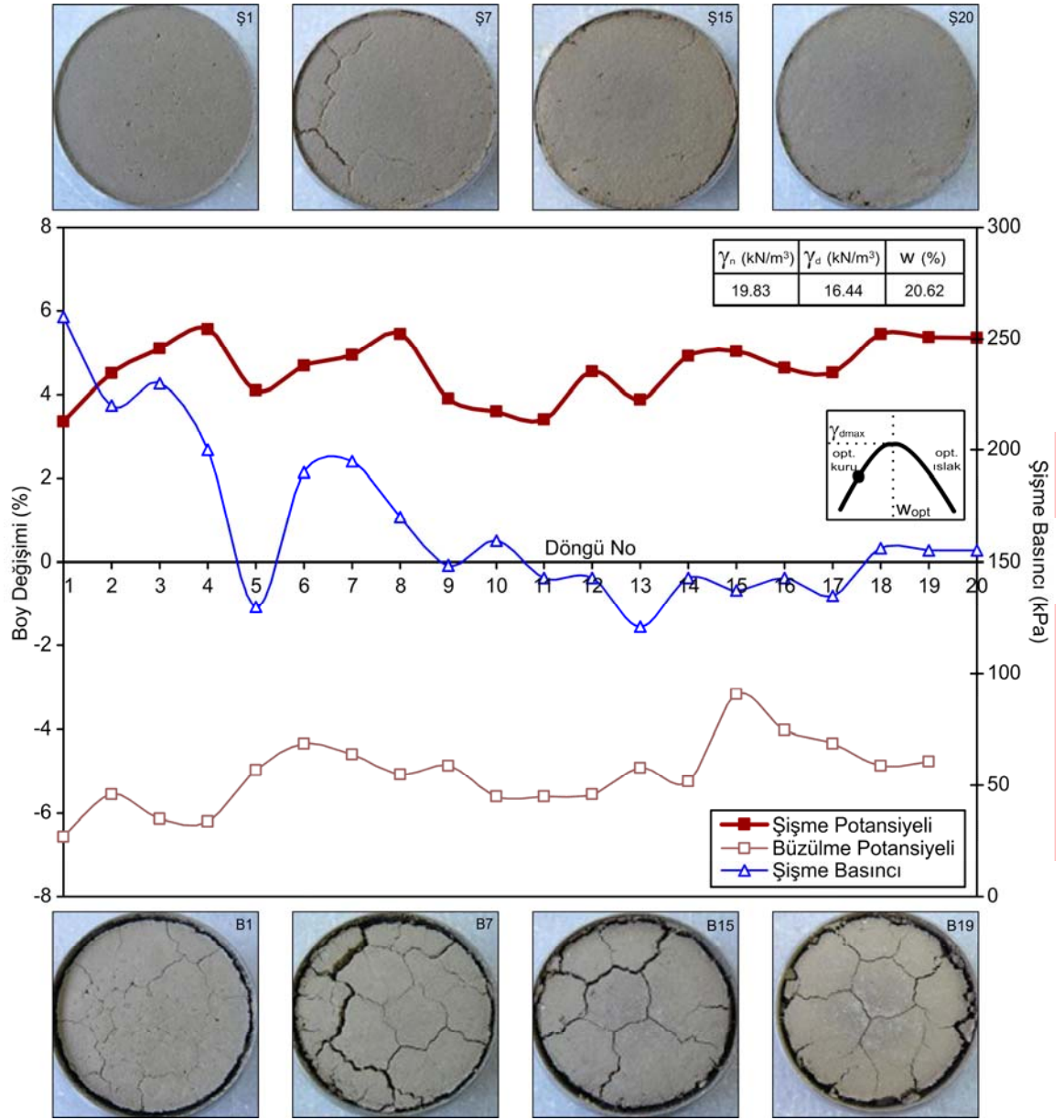


Şekil 4.9. B.çekmece mezarlık GK1b_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışına bağlı boy değişimi (%)



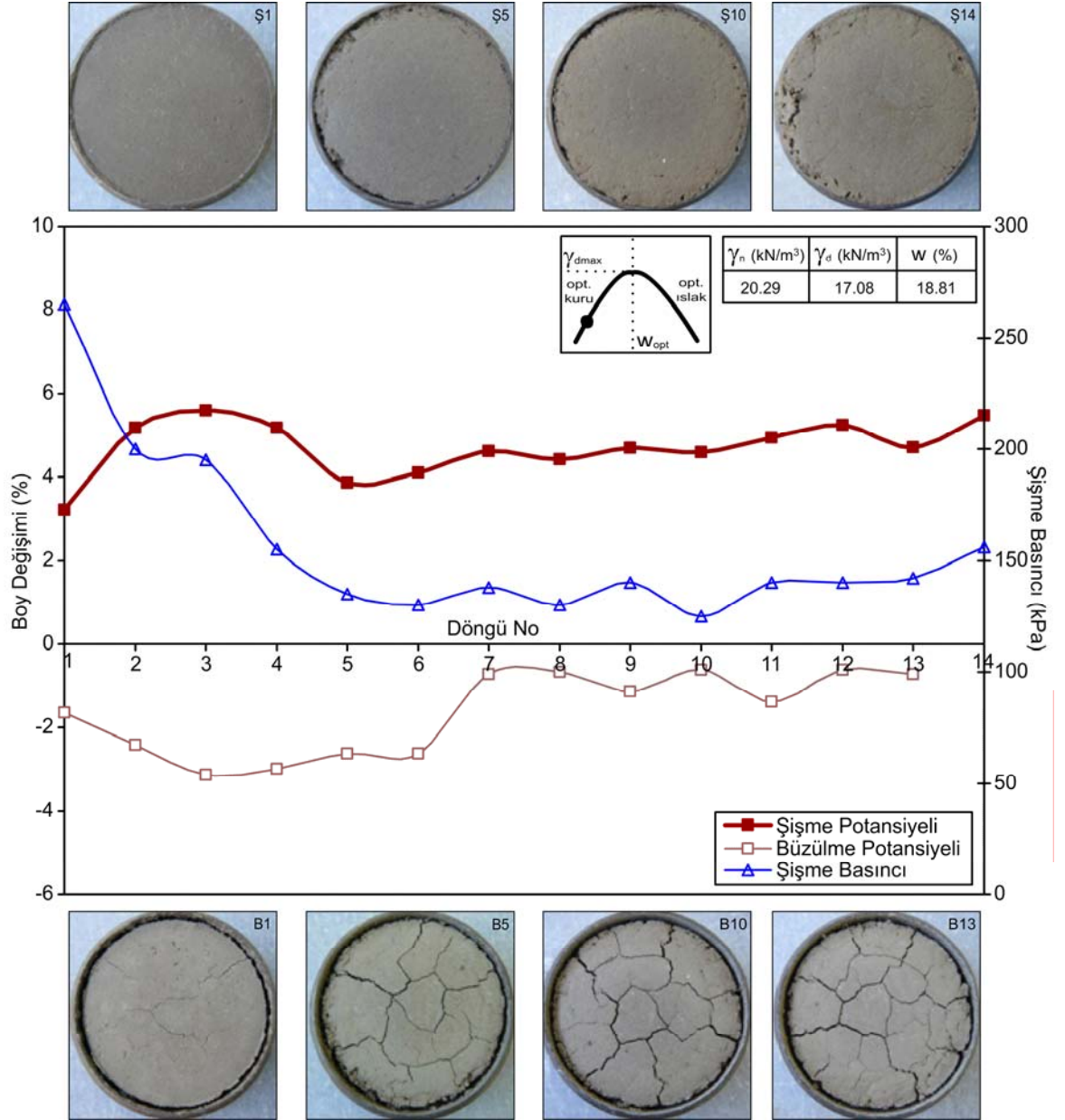
Şekil 4.10. B.çekmece mezarlık GK1c_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışına bağlı boy değişimi (%)

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de GK1_YY-Kürlü (3 ay) ve GK1_YY-Kürsüz numunelerine ait grafikler verilmiştir. Geçmiş araştırmalarda üzerinde tekrarlı şişme-büzülme deneyi yapılan aynı kilin kürlü numunesin kürsüz numunesine göre daha az şişme potansiyeli gösterdiği söylenmektedir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’ye bakıldığında Büyükçekmece mezarlık numunelerinde bu davranış görülmemekte kürlü ve kürsüz numuneler arasında şişme potansiyeli açısından bir fark görülmemektedir. İki numune de optimumum kuru tarafında kompakte edilmiştir.



Şekil 4.11. B.çekmece mezarlık GK1_YY-Kürlü numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışına bağlı boy değişimi(%)

Şekil 4.11'e bakıldığında şişme potansiyeli ilk döngüden itibaren artmakta buna karşın büzülme yüzdesi giderek azalmaktadır. Geçmiş araştırmalar da şişme potansiyeliyle büzülme potansiyeli arasında doğrusal bir ilişki olduğu söylenmektedir. İstanbul Gürpınar killerinde ise böyle bir ilişki görülmemektedir.



Şekil 4.12. B.çekmece mezarlık GK1_YY-Kürsüz numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışına bağlı boy değişimi(%)

4.1.2. Esenyurt Numunesi Tekrarlı Şişme-Büzülme Deney Sonuçları

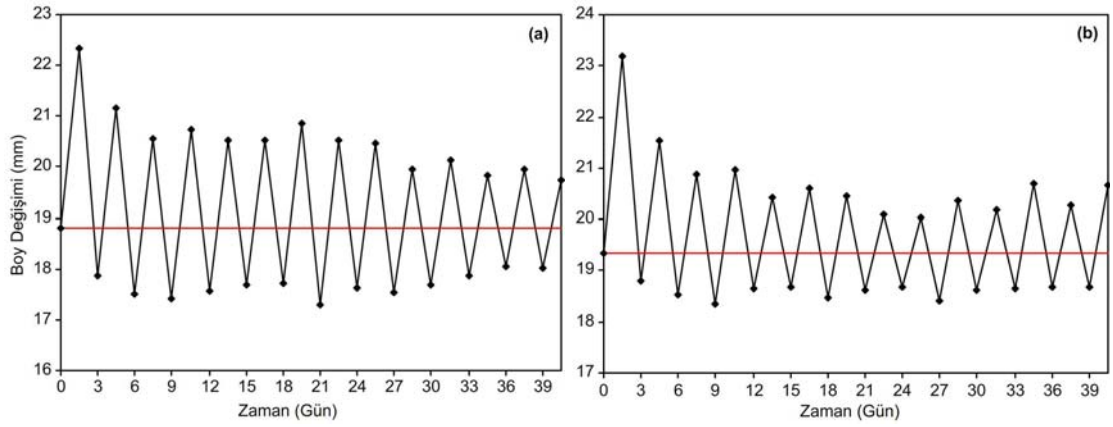
Şekil 4.13’de Esenyurt GK2_YY-Kürlü (8 ay) ve GK2_YY-Kürsüz numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı grafikleri verilmiştir. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te ise Esenyurt GK2_YY-kürlü ve Esenyurt GK2_YY-kürsüz numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklandığı grafikler verilmiştir. Bu grafiklerden Esenyurt GK2 kürlü ve kürsüz numunelerinin her ikisinde de şişme

potansiyeli ile şişme basınçlarının sürekli azaldığı görülmüştür. Şişme basıncı ve şişme potansiyelindeki en büyük düşük ilk 2 döngüde gözlemlenmiştir. Şekil 4.14 'de Esenyurt GK2_YY-kürlü grafiğinde şişme potansiyelinin %20'lerden %6'lara kadar düştüğü, şişme basıncının ise 750 kPa'dan 140 kPa'ya kadar düştüğü görülmektedir. Şekil 4.15 'de Esenyurt GK2_YY-kürsüz grafiğinde ise şişme potansiyelinin %20'lerden %5'lere kadar düştüğü, şişme basıncının ise 800 kPa'dan 200 kPa'ya kadar düştüğü görülmektedir.

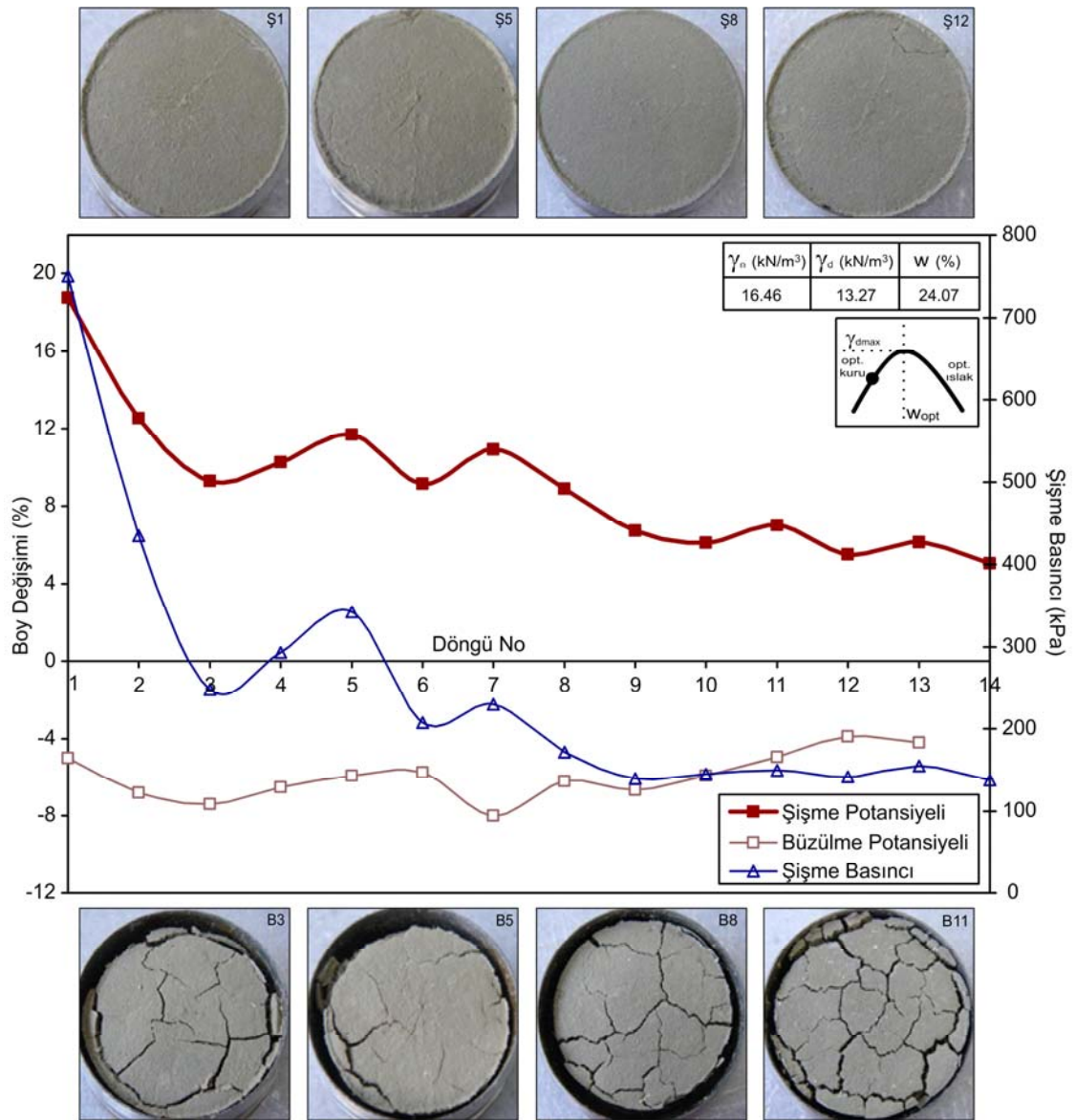
Şekil 4.14 'de Esenyurt GK2_YY-kürlü grafiğinde şişme basıncı ve potansiyelinde dalgalanmalar görülmüştür, bunun nedeni olarak 8 ay kür süresi içinde paralel yapıdaki tabakaların köşe-kenar yapı kazanma çabasından kaynaklandığı bununla birlikte döngüler ilerledikçe kürsüz Esenyurt numunesiyle paralellik gösterdiği görülmüştür.

Grafiklerdeki fotoğraflara bakıldığı zaman tekrarlı şişme-büzülmenin kilin yapısını bozmadığı görülmüştür. İlk şişmedeki fotoğraf ile son şişmedeki fotoğraf arasında farklılık yoktur. Büzülme fotoğraflarında ise Esenyurt kilinin Büyükçekmece kili gibi çok çatlaklı yapıya ulaşmadığı, daha az sayıda ve daha derin çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. 2 kilinde optimumun kuru tarafında kompakte edilmelerine rağmen farklı davranış göstermeleri bu killer orijinleri ve aşırı konsolide olup olmamalarıyla alakalı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca büzülme yüzdelerinin giderek azaldığı da deneylerde gözlemlenmiştir.

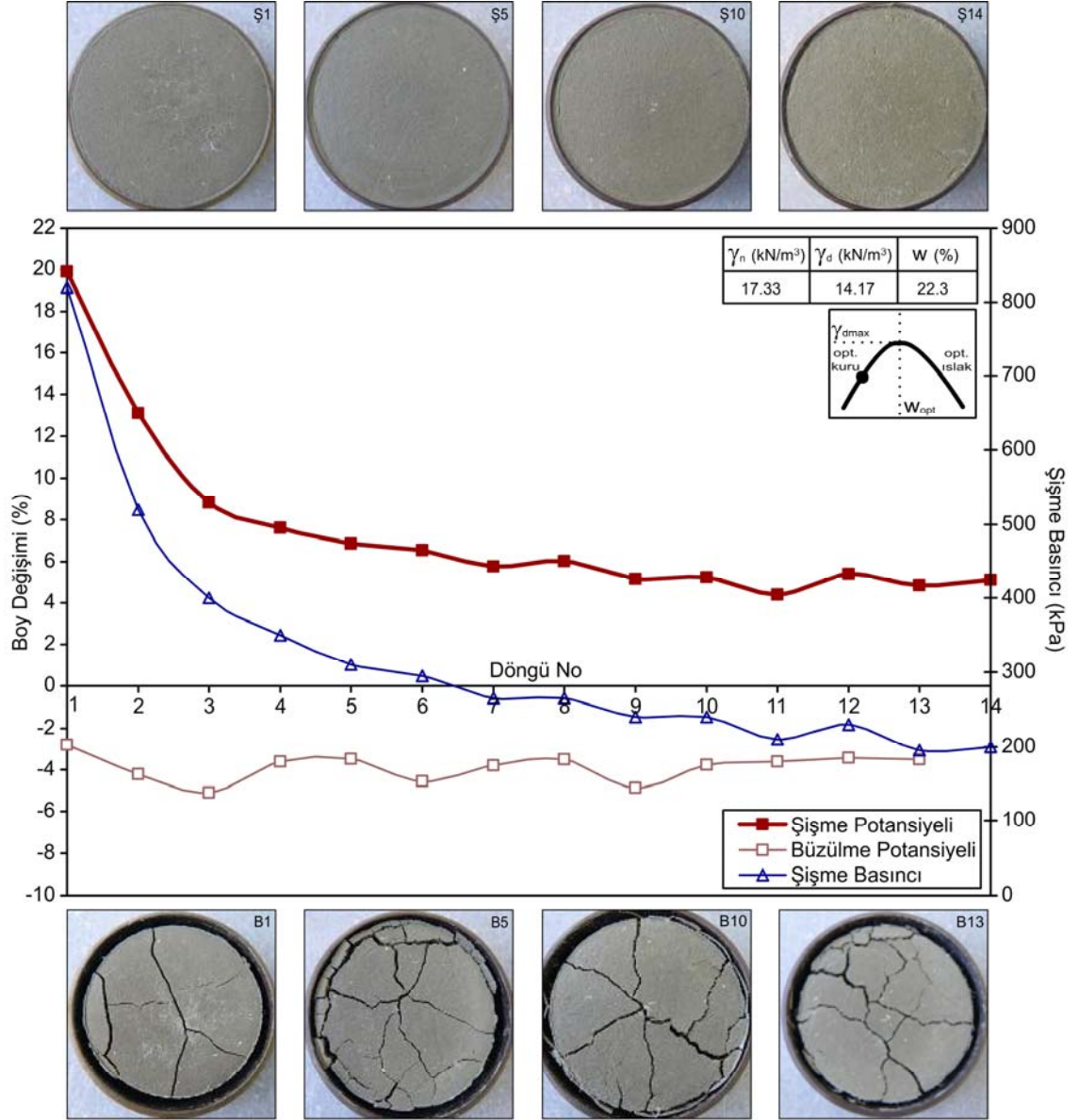
Bölüm 4.3'deki ESEM analizleri sonucuna bakılarak, ıslanma ve kuruma döngü sırasında tanelerin yeniden düzenlenerek yapı bütünlüğünü arttırdığı ve oluşan aglomeralaşma neticesinde su ile etkileşimde bulunacak mevcut yüzey alanlarının düşüşüne bağlı olarak şişme potansiyelinin düştüğünü söyleyebiliriz. Yine mikroskop görüntülerine baktığımızda deney başında yatay tabakalanmış kil kristallerinin deney sonunda da bu yapısını koruduğu bu yüzden de şişme potansiyeli ve şişme basıncı değerlerinin kompakte Büyükçekmece numunelerinin aksine azaldığı söylenebilir.



Şekil 4.13. Esenyurt GK2_YY-Kürlü ve GK2_YY-Kürsüz numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı; a) GK2_YY-Kürlü b) GK2_YY-Kürsüz



Şekil 4.14. Esenyurt GK2_YY-kürlü numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması



Şekil 4.15. Esenyurt GK2_YY-kürsüz numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması

4.1.3. Ambarlı Numunesi Tekrarlı Şişme-Büzülme Deney Sonuçları

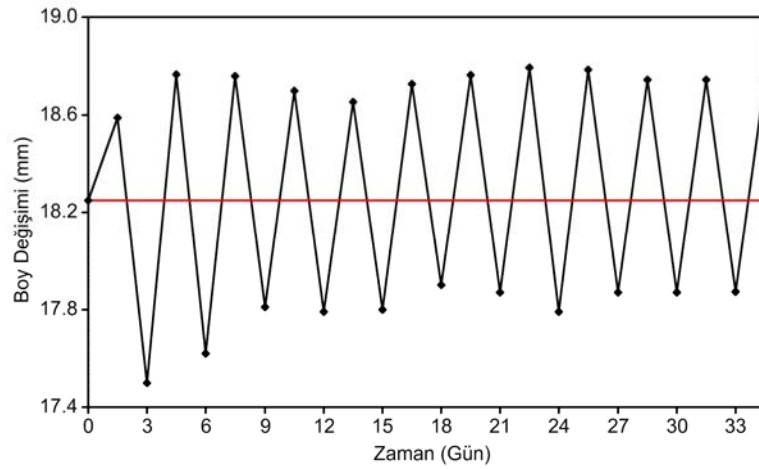
Şekil 4.16 ve 4.18’de Ambarlı GK3_UD, Ambarlı GK4_UD ve GK4_YY-kürsüz numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı grafikleri verilmiştir. Şekil 4.17 , 4.19 ve 4.20’de ise Ambarlı GK3_UD, Ambarlı GK4_UD ve GK4_YY-kürsüz numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması

gösterilmiştir. Ambarlı GK3_UD numunesi Ambarlı'nın kara, GK4_UD numunesi ise deniz tarafından çıkarılmış numunelerdir.

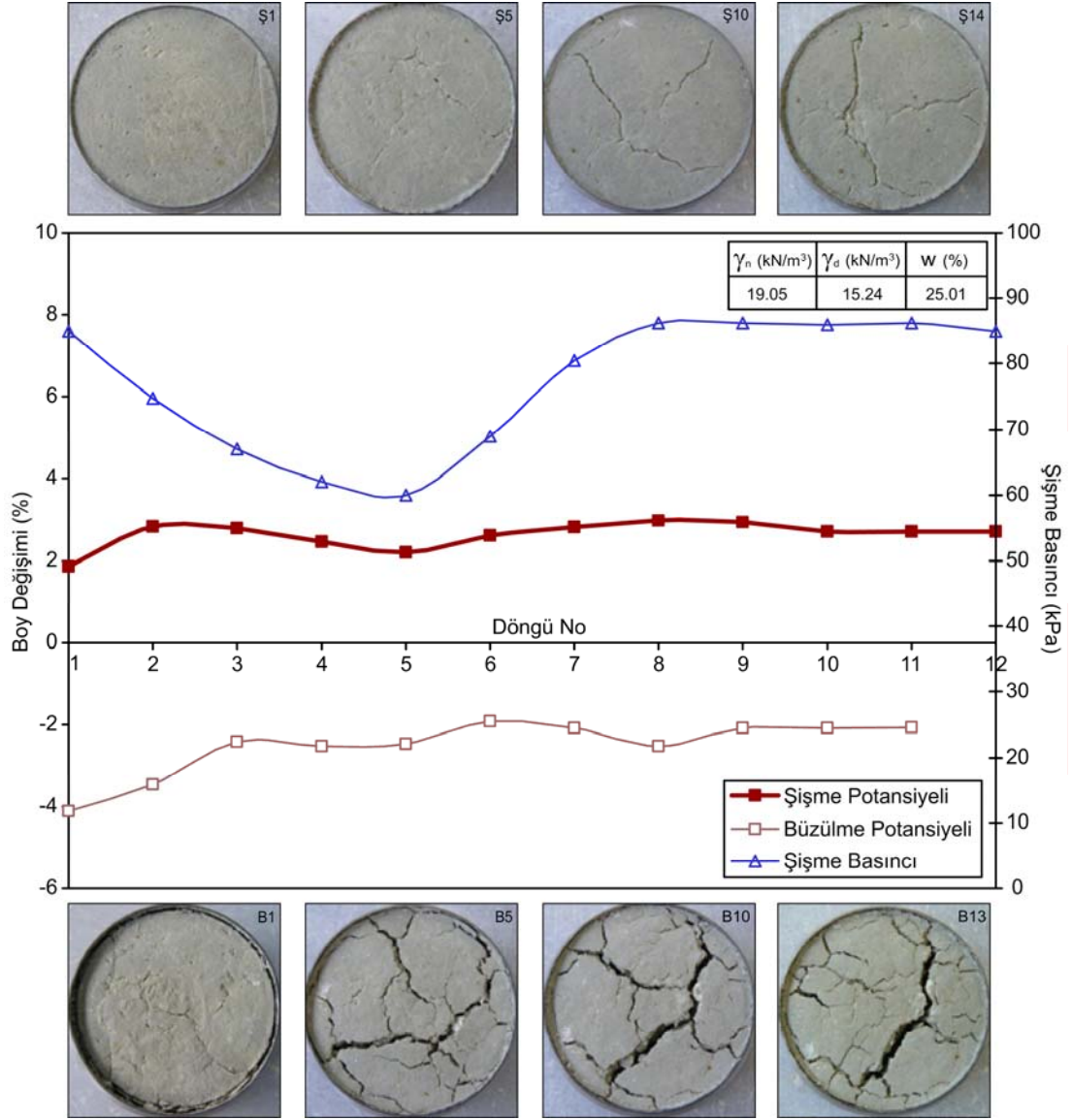
GK3_UD numunesi deney sonucunda şişme potansiyeli azda olsa artış göstermiştir. Şişme basıncı ilk 5 döngüde sürekli düşüş eğilimi gösterip sonrasında artmaya başlamış ilk değerini biraz geçerek şişme potansiyeliyle aynı trendde döngüleri tamamlamıştır. Çatlak yapısına bakarsak ince mikro çatlakların yanı sıra derin çatlakları olduğu da söylenebilir (Şekil 4.17).

GK4_UD numunesi ise ilk değerine göre hem şişme potansiyeli hemde şişme basıncı daha düşük bir değerde döngülerini tamamlamıştır. Yine GK3_UD numunesi gibi 5. döngüye kadarki düşüş dikkat çekmektedir (Şekil 4.19). GK4_YY-kürsüz numunesi ilk değerine yakın bir şişme potansiyeli değeri verirken, şişme basıncı değeri deney sonunda nerdeyse yarıya düşmüştür. Ayrıca fotoğraflara bakılarak daha az çatlaklı olduğu söylenebilir (Şekil 4.20).

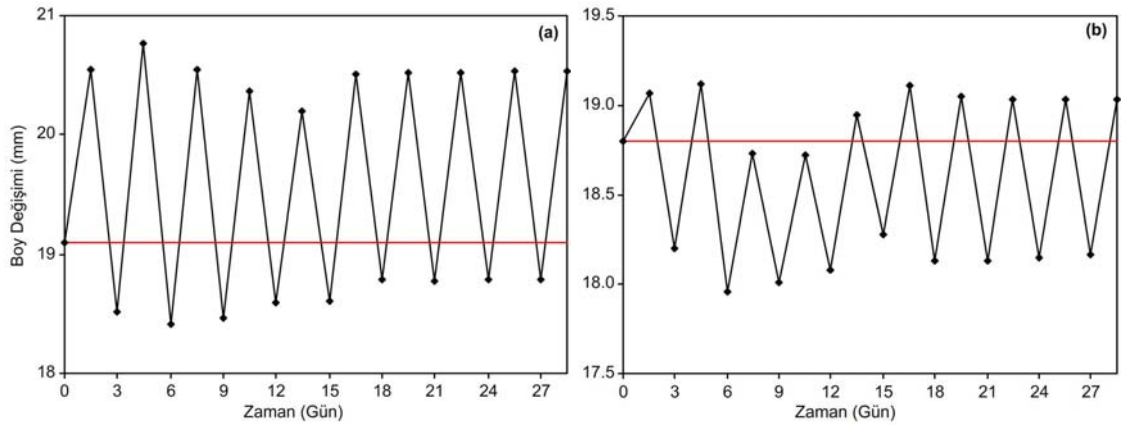
Tüm Ambarlı numunelerine ait tekrarlı şişme-büzülme deney grafiklerine baktığımız zaman şişme potansiyellerinin 5. döngüde düştüğü, burada numunenin kristallerinin tekrar dizilerek daha stabil bir yapı kazandığı, bu kazanılan yapının tekrarlı şişme-büzülme döngüleriyle kısa sürede tekrar bozulduğu söylenebilir.



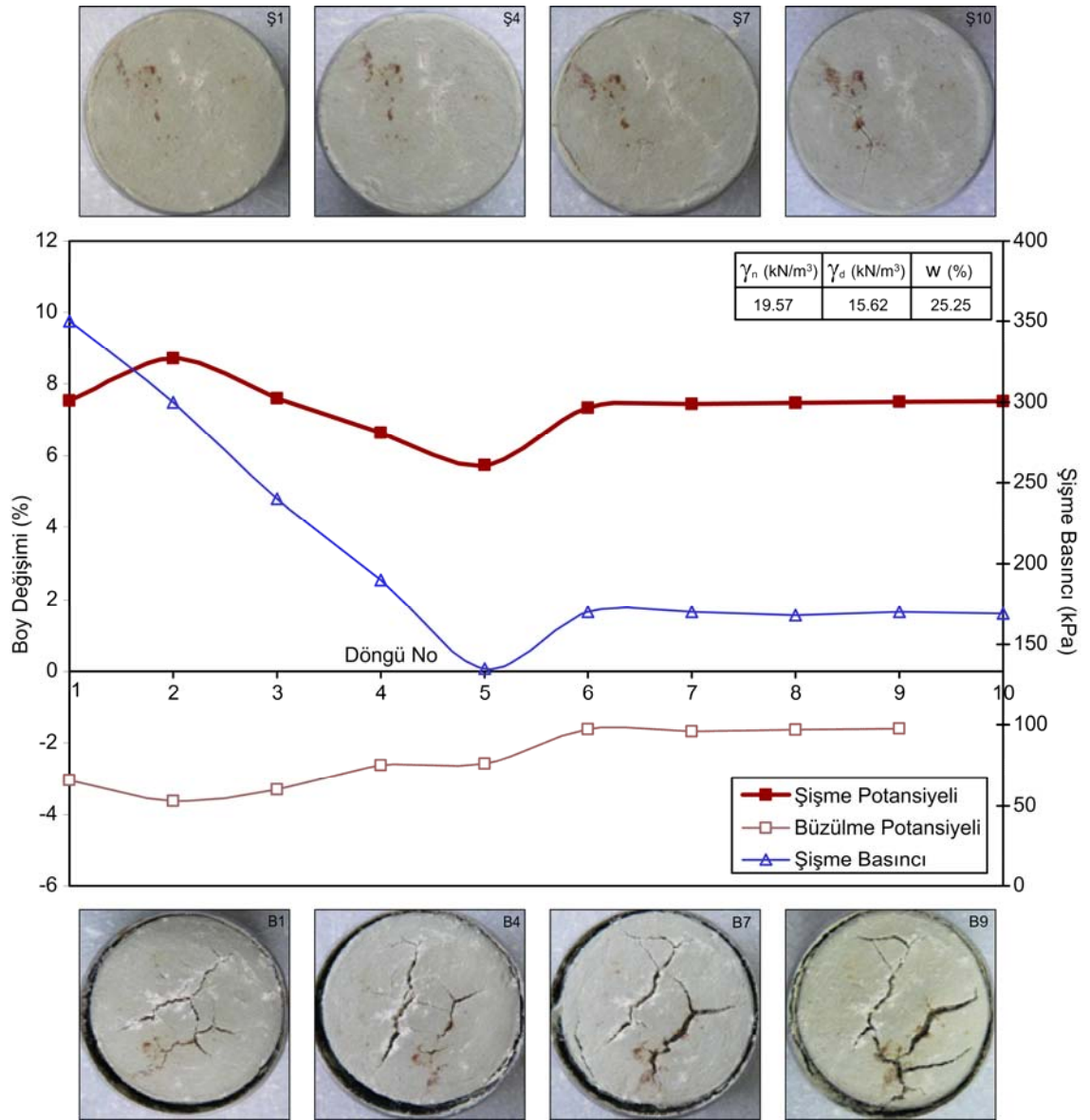
Şekil 4.16. Ambarlı GK3_UD numunesinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı



Şekil 4.17. Ambarlı GK3_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması

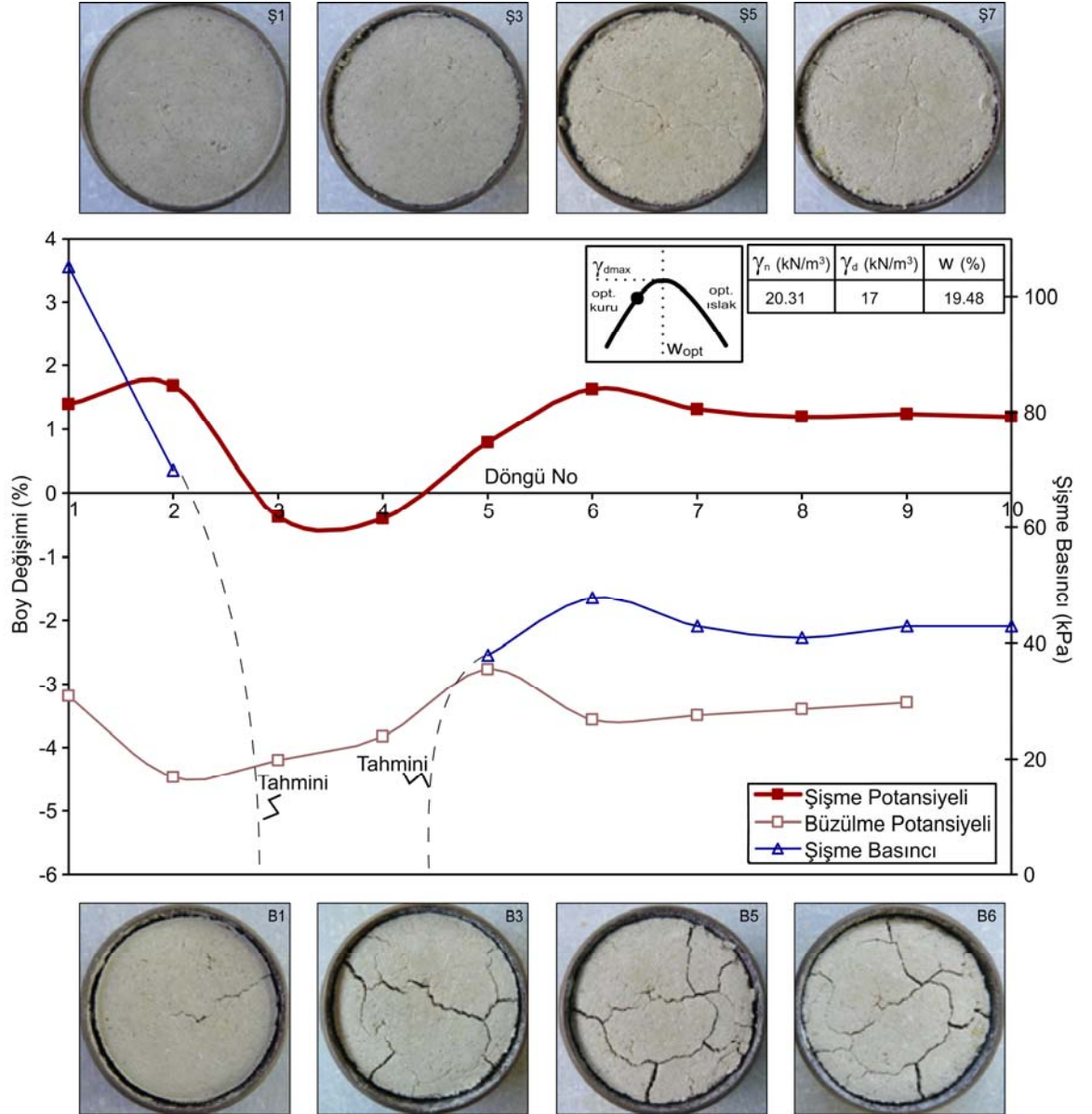


Şekil 4.18. Ambarlı GK4_UD ve GK4_YY-Kürsüz numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı; a) GK4_UD b) GK4_YY-Kürsüz



Şekil 4.19. Ambarlı GK4_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması

Tüm Ambarlı numunelerine ait tekrarlı şişme-büzülme deney grafiklerine baktığımız büzülme yüzdelerinin şişme yüzdelerinden bağımsız olarak davrandığı ve sürekli olarak azaldığı, bu azalmanın 5-6. döngüler civarında daha hızlandığı söylenebilir.

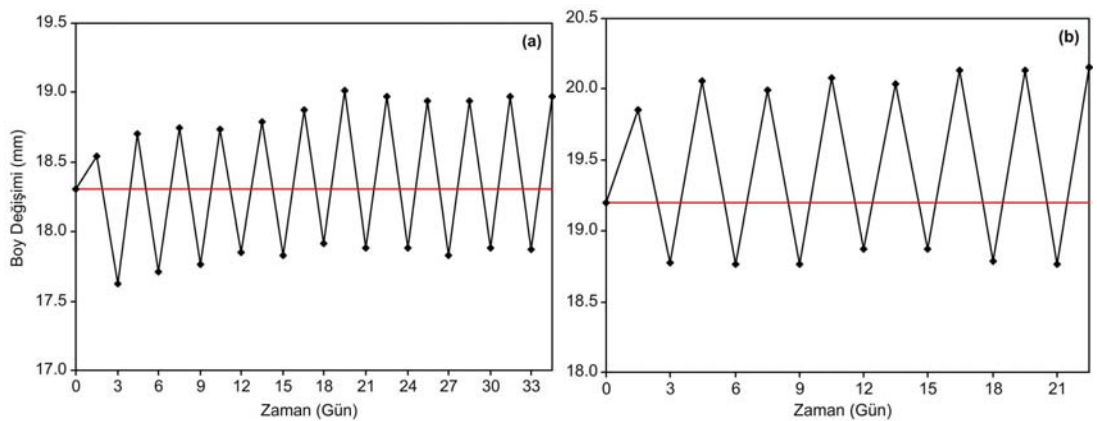


Şekil 4.20. Ambarlı GK4_YY-kürsüz numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması

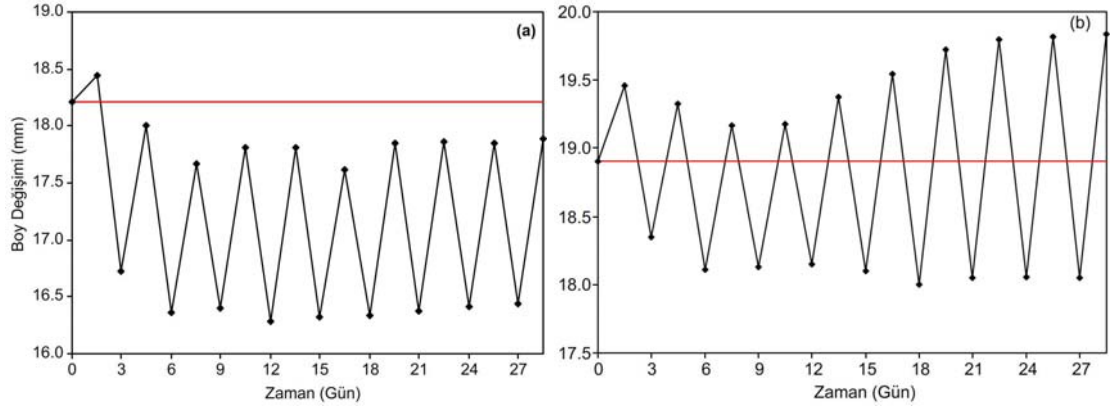
4.1.4. Kır Numunesi Tekrarlı Şişme-Büzölme Deney Sonuçları

Şekil 4.21’de Kır GK5a_UD ve GK5b_UD numunelerinin zamana bağlı tekrarlı Şişme-büzölme davranışı, Şekil 4.22’de Kır GK5a_YY-kürsüz ve GK5b_YY-kürsüz numunelerinin zamana bağlı tekrarlı Şişme-büzölme davranışı, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de Kır GK5a_UD ve Kır GK5b_UD numunelerinin tekrarlı Şişme-büzölme davranışının fotoğraflarla açıklanması verilmiştir. İki numunede de Şişme potansiyelleri artıp, belirli bir döngüden sonra sabitlenmiştir. Şişme basınçları ise Kır GK5a_UD numunesinde ilk 2 döngüde düşüp, sonrasında artarak ilk değeri geçmiŐtir. Kır GK5b_UD’de ise Şişme basıncı sürekli azalarak sabitlenmiştir.

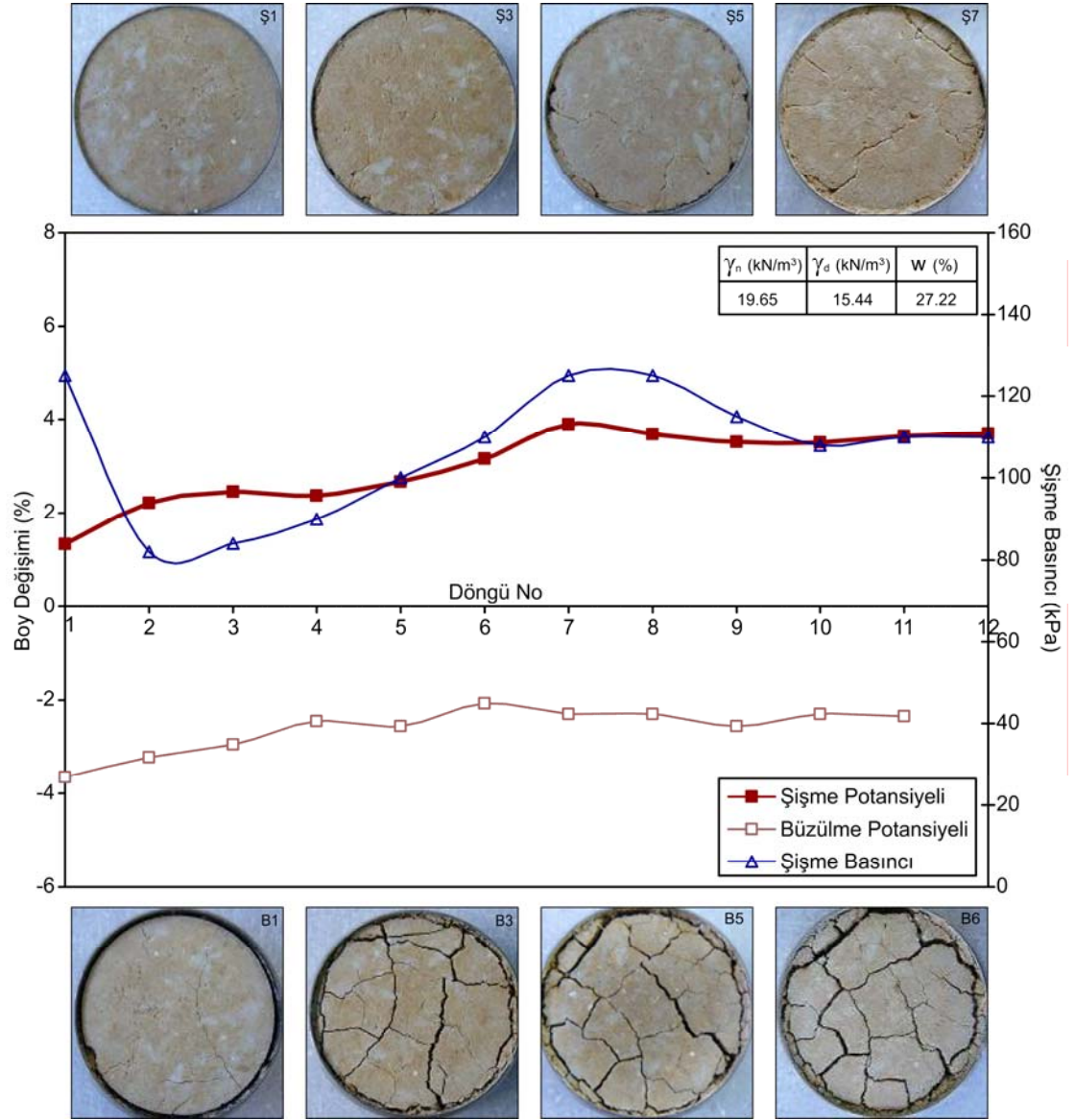
Şekil 4.23’de Kır GK5a_UD numunesinin Şişme potansiyeli son döngüde ilk döngüdeki değerinin yaklaşık 2 katına kadar çıkarken, Şişme basıncı ilk değerinin çok az altında bir değerle deneyi bitirmiŐtir. Şekil 4.24’de ise Kır GK5b_UD numunesinin Şişme potansiyeli son döngüde ilk döngüdeki değerinin yaklaşık 1.5 katına kadar çıkarken, Şişme basıncı ilk değerinin 1.5 kat altında bir değerle deneyi bitirmiŐtir. İki numunenin de tekrarlı Şişme-büzölme deney grafiklerine bakıldığında büzölme fotoğraflarında çatlak sayısını döngüler ilerledikçe arttığı, bu da yapının ve bağların daha çok bozulduğuna işarettir. Çatlak mekanizmasının Büyükçekmece numunelerinininkine benzerlik gösterdiği dikkat çekmektedir. Çok sayıda atlağa sahip numunelerde genellikle Şişme potansiyelleri artmaktadır.



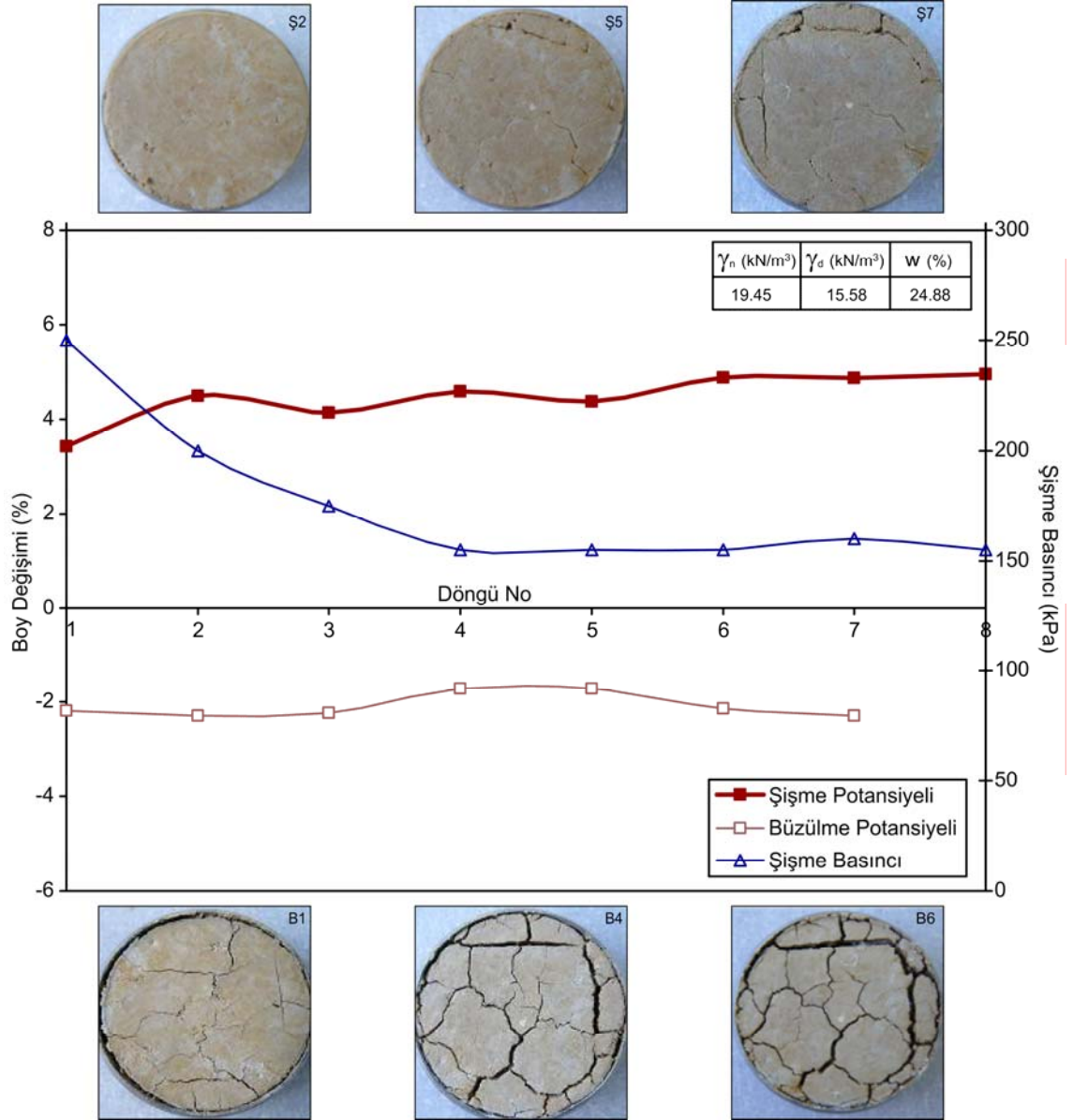
Şekil 4.21. Kır GK5a_UD ve GK5b_UD numunelerinin zamana bağlı tekrarlı Şişme-büzölme davranışı ; a) GK5a_UD b) GK5b_UD



Şekil 4.22. Kırac GK5a_YY-Kürsüz ve GK5b_YY-Kürsüz numunelerinin zamana bağlı tekrarlı şişme-büzülme davranışı; a) GK5a_YY-Kürsüz b) GK5b_YY-Kürsüz

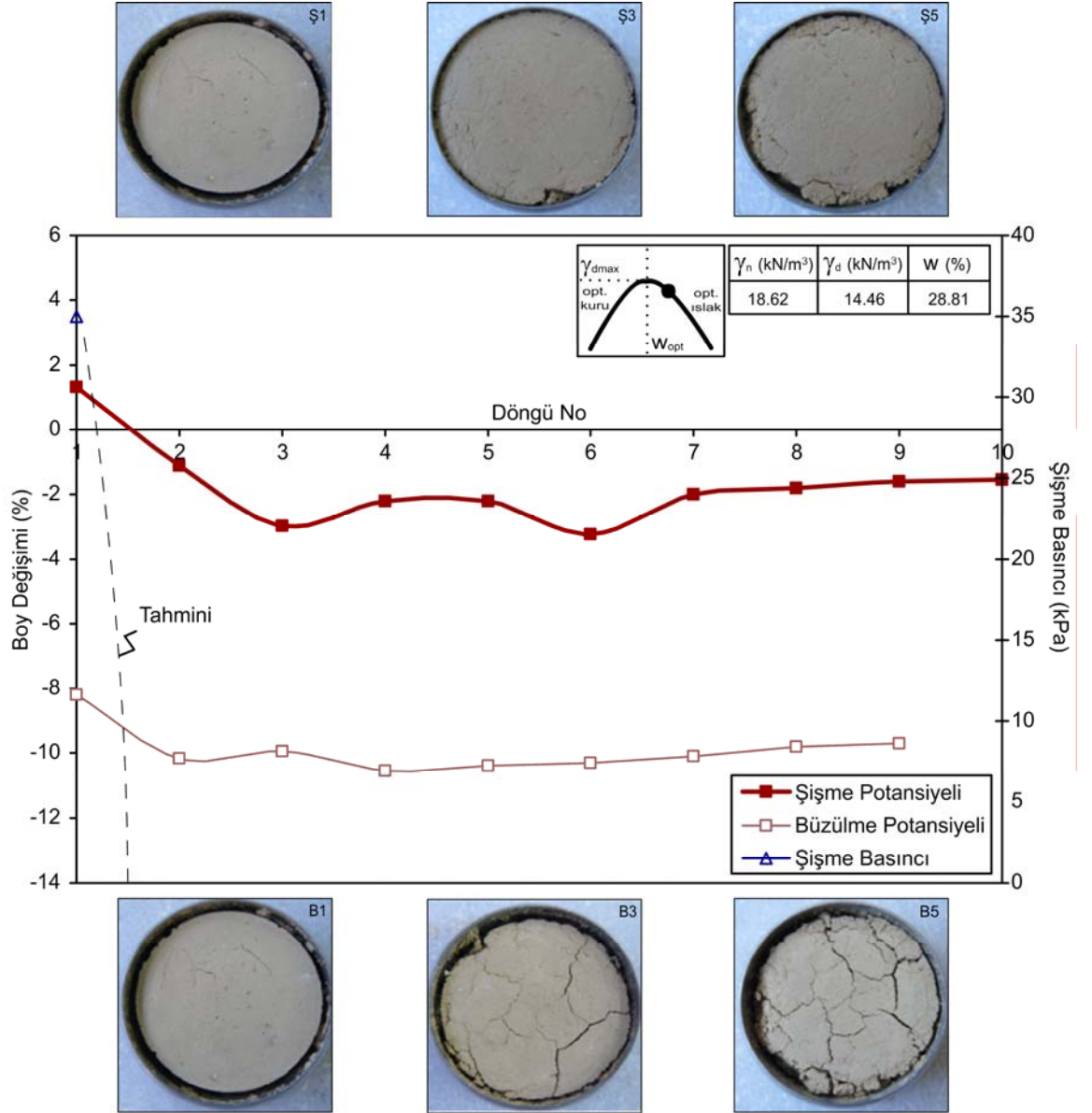


Şekil 4.23. Kırac GK5a_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması



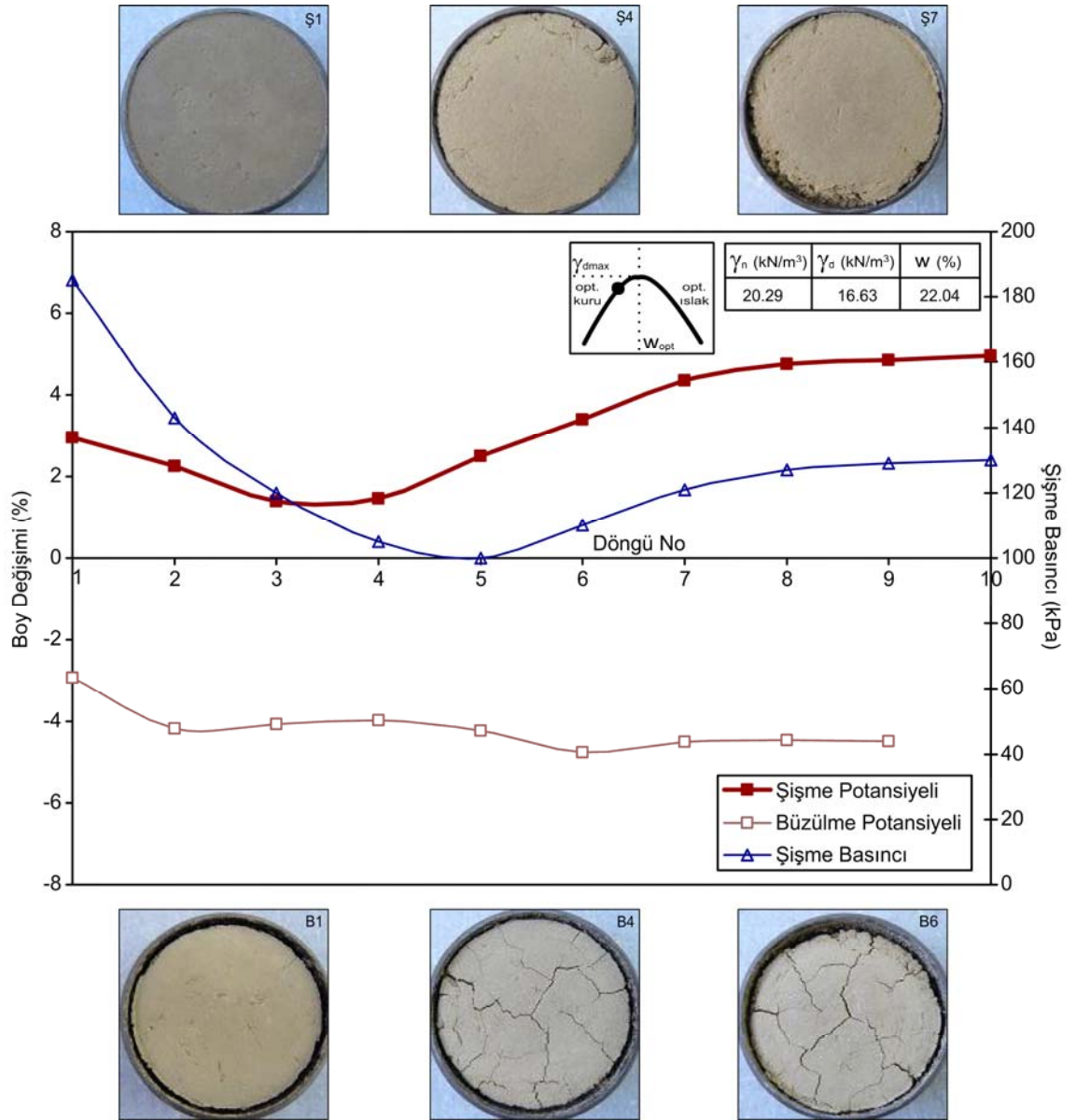
Şekil 4.24. Kırac GK5b_UD numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da Kırac GK5a_ YY-kürsüz ve Kırac GK5b_ YY-kürsüz numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması verilmiştir. GK5a_YY-kürsüz numunesinin şişme potansiyeli 1.döngüden itibaren negatif yönde azalıp 8. döngüde sabitlenmiştir. 1. döngüden sonra şişme potansiyeli negatif olduğu için şişme basıncı bulunamamıştır. GK5a_ YY-kürsüz numunesi kompakte numuneler içinde optimumdan ıslak tarafta kompakte edilen tek numunedir. Şişme potansiyelinin negatif olmasını, optimumdan ıslak tarafta kompakte edildiği için kil bağlarının daha iyi ve bağlar arasındaki mesafenin daha kısa olduğuyla açıklanabilir (Şekil 4.25)



Şekil 4.25. Kırac GK5a_YY-kürsüz numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması

Kırac GK5b_YY-kürsüz numunesinin şişme potansiyeli ilk 3 döngüde, şişme basıncı ise ilk 5 döngüde sürekli azalmaktadır (Şekil 4.26). Daha sonar şişme potansiyeliyle şişme basıncı aynı trended artış eğilimi göstermekle birlikte şişme potansiyeli ilk değerini geçmekte, şişme basıncı ise ilk değerine ulaşamamıştır.



Şekil 4.26. Kırac GK5b_YY-kürsüz numunesinin tekrarlı şişme-büzülme davranışının fotoğraflarla açıklanması

4.2 TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLMENİN KİLİN MİKROYAPISINA ETKİSİ

Tekrarlı şişme-büzülmenin kilin minerolojisine etkisini anlamak için deney başında yapılan kıvam deneyleri, tane dağılımı, serbest şişme oranı deneyi ve metilen mavisi deneyleri tekrarlı şişme- büzülme geçirmiş numunelere de uygulanmıştır. Tablo 4.4’de tüm sonuçlar verilmiştir. Tane dağılımı, kil yüzdesi, kıvam limitlerinde değişimin görülmemiştir. Serbets şişme oranı deneyinde GK1_UD, GK2_YY ve GK3_UD’de artış, GK5_UD’de ise çok az azalma görülmüştür. Metilen değerlerinde ise GK1_UD ve GK5_UD’de çok az artış görülmüştür. Kolloidal malzemede ise GK1_UD ve GK3_UD’de artış görülmüştür. Askıdaki madde artışı şişme potansiyelini etkilemektedir.

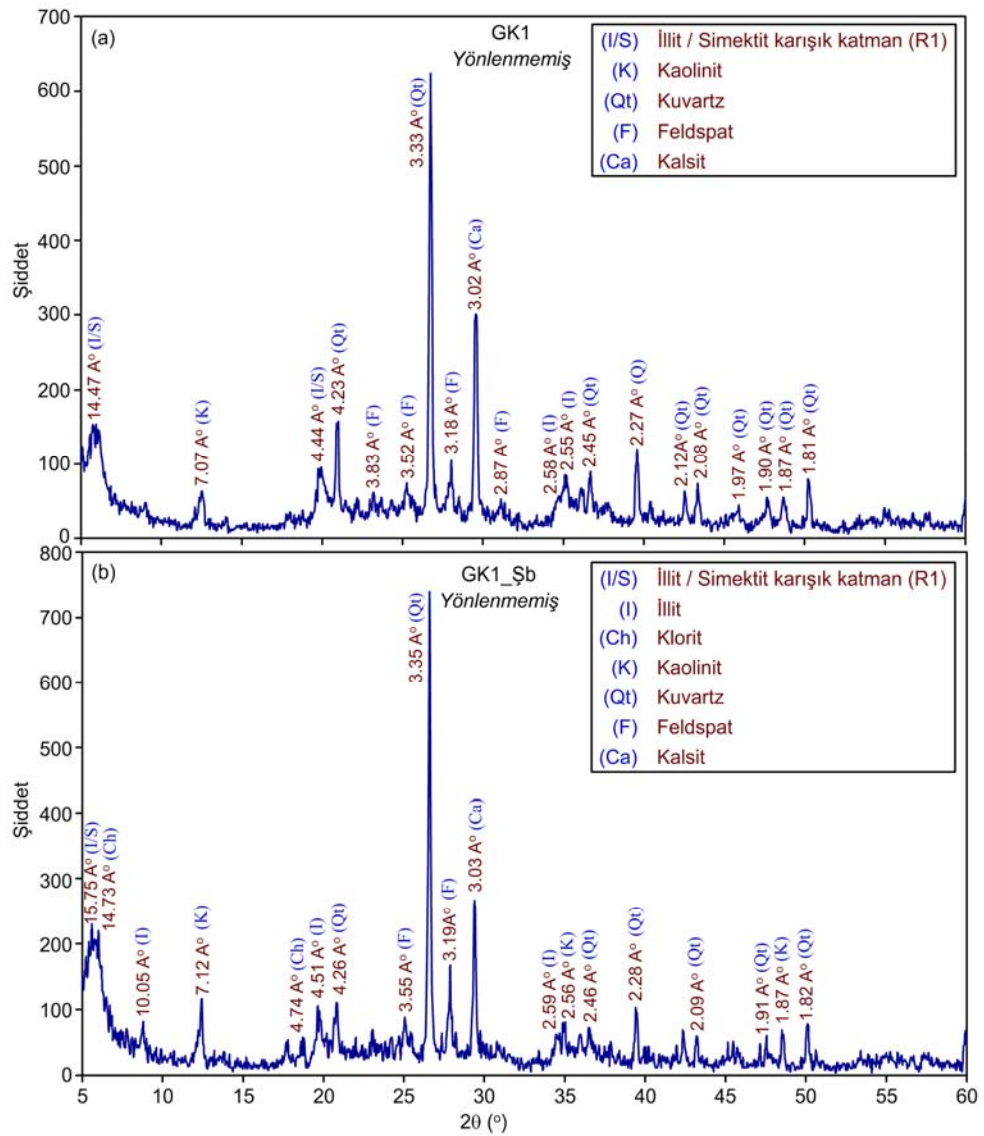
Tablo 4.4. Deney başı ve sonu zemin özelliklerindeki değişim

Zemin Özellikleri	Deney başı zemin özellikleri					Tekrarlı Şişme-Büzülme Geçirmiş Zemin Özellikleri				
	GK1	GK2	GK3	GK4	GK5	GK1_ŞB	GK2_ŞB	GK3_ŞB	GK4_ŞB	GK5_ŞB
Tane Dağılımı (%)										
Kum	5.2	0.2	0.1	0	3	8	0.2	0.1	-	1
Silt	34.8	14.8	19.9	20	37	33	15.3	19.9	-	37
Kil (<0.002 mm)	60	85	80	80	60	59	84.5	80	-	62
Kıvam Limitler (%)										
Likit Limit, LL	60	99	74	82	61	66	108	75	80	70
Plastik Limit, PL	22	33	24	22	25	22	34	23	22	25
Plastisite İndisi, PI	38	66	50	60	36	44	74	52	58	45
FSR	1.19	2.07	1.88	2	1.68	1.5	2.25	1.96	-	1.57
MBV (g/100g)	8	11.73	15.33	13.33	9.33	8.65	11.73	15.33	-	9.73
Kolloid malzeme (<0.001 mm)	44	79	71	77	50	53	79	76	-	52

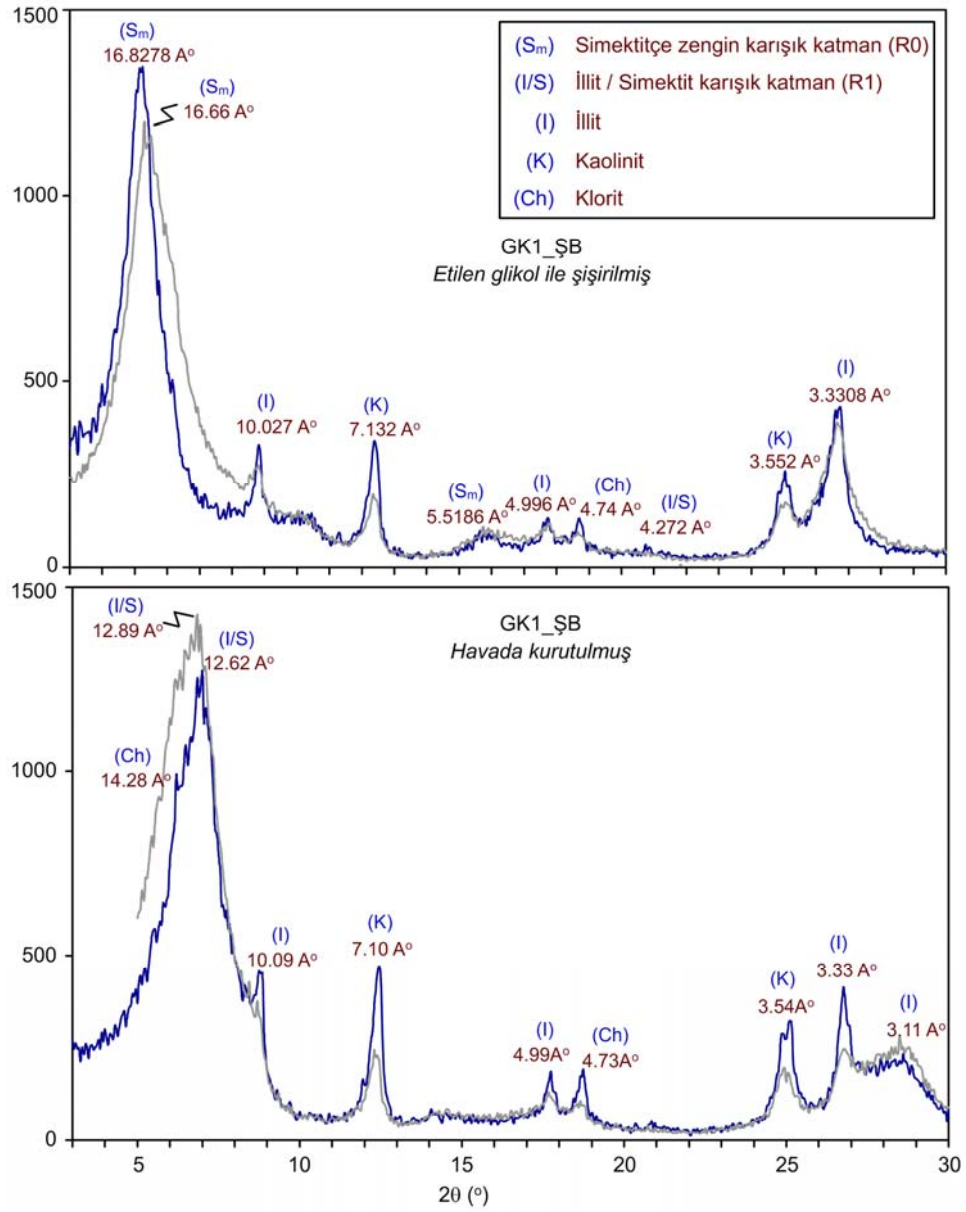
Şekil 4.27’de GK1_UD numunesinin doğal ve tekrarlı şişme-büzülme geçirmiş durumu arasındaki karşılaştırma verilmiştir. GK1_UD tekrarlı şişme-büzülmüş numunede I/S karışık katmandan illitlerin ayrıldığı ayrıca klorit oluştuğu görülmektedir.

Şekil 4.28’de GK1_UD numunesinin doğal ve tekrarlı şişme-büzülme geçirmiş durumu arasında kil kısımlarının karşılaştırması verilmiştir. Burada dikkat çeken nokta, havada kurutulmuş numunede tekrarlı şişme-büzülme geçirmiş GK1 numunesinin İllit/simektit karışık katman tabaka kalınlığının azalmasıdır. Doğal GK1_UD

numunesinde İllit/Simektit %94.5, kaolinit %3.79 ve illit %1.68 oranında bulunurken tekrarlı şişme-büzülme geçirmiş numunede illitler illit/simektit karışık katmandan ayrılmış simektitçe zengin katman oluşmuştur. Simektitçe zengin katman %87.5, illit %4 ve kaolinit %8.5 oranında bulunmaktadır. Ayrıca Şekil 4.28’de etilen glikolle şişirilmiş numunede S_m pikinin sola kaydığı bu da karışık katmandaki simektit miktarının arttığına işaretler. Kristal yapıdan illitler ayrıldığı için simektitin kristal yapısı daha küçük parçalara ayrılarak elektrik yükünün arttığı bu yüzden şişme potansiyelinin arttığı tahmin edilmektedir.



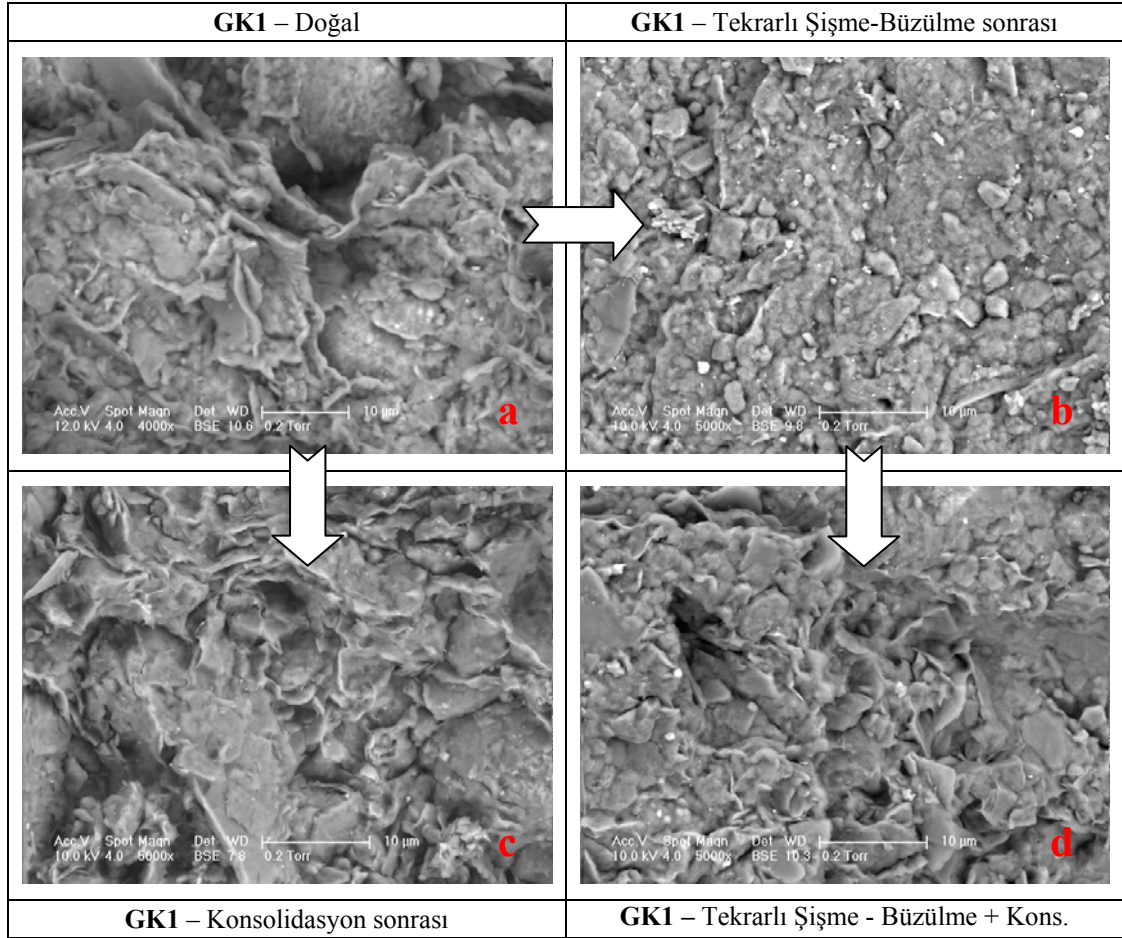
Şekil 4.27. GK1 doğal ve tekrarlı şişme-büzülmeye maruz kalmış numunelerinin XRD analizi tüm numune sonuçlarının karşılaştırması



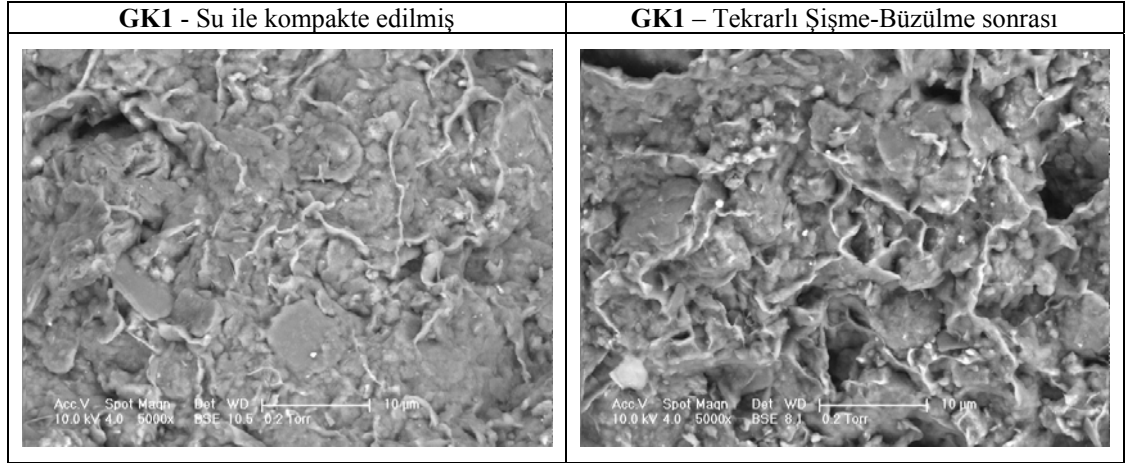
Şekil 4.28. GK1 doğal ve tekrarlı şişme-büzülmeye maruz kalmış numunelerinin XRD analizi kil kısmının etilen glikolle şişirilmiş deney sonuçlarının karşılaştırması

4.3. ELEKTRON MİKROSKOBU İLE YAPI VE DOKUNUN GÖRÜNTÜ ANALİZİ

Doğal numunelerin ve tekrarlı şişme-büzülme geçirmiş numunelerin yapı ve dokularındaki değişim Boğaziçi Üniversitesi, İleri Teknolojiler ARGE Merkez laboratuvarlarında bulunan yüksek çözünürlüğe (2 nm resolution) sahip Tarama Elektron Mikroskop Görüntü Analiz Sistemi ile gerçekleştirilmiştir (ESEM). ESEM görüntü analizleri GK1, GK3, GK4 ve GK5 numunelerinin örselenmemiş (UD) örnekleri üzerinde, ayrıca GK1 numunesinin konsolidasyona uğratılmış durumunda, GK1 ve GK2 numunelerinin yeniden yapılandırılmış durumlarında ve bu örneklerin tekrarlı şişme - büzülme deneyi geçirmiş örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.29 GK1 doğal, Şekil 4.30 kompakte GK1, Şekil 4.31 kompakte GK2, Şekil 4.32 GK3 doğal, Şekil 4.33 GK4 doğal ve Şekil 4.34’de GK5 doğal numunelerinin ESEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.29. GK1_UD kilinin doğal , tekrarlı şişme büzülme sonrası, konsolidasyon sonrası ve tekrarlı şişme-büzülmeden sonra konsolidasyon sonrası durumlarına ait ESEM görüntü analizleri

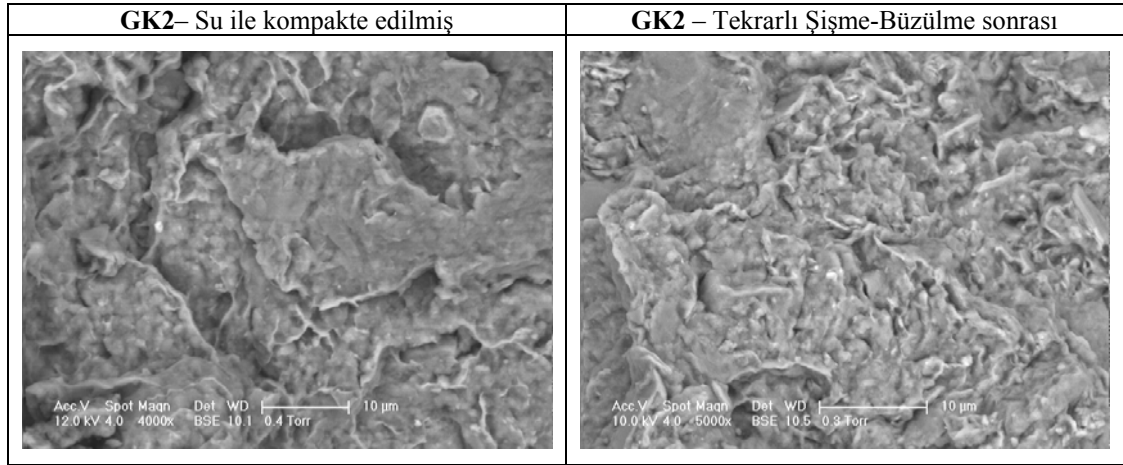


Şekil 4.30. GK1_YY- kürlü kilinin su ile kompakte edilmiş (YY) ve tekrarlı şişme büzülme sonrası durumlarına ait ESEM görüntü analizleri

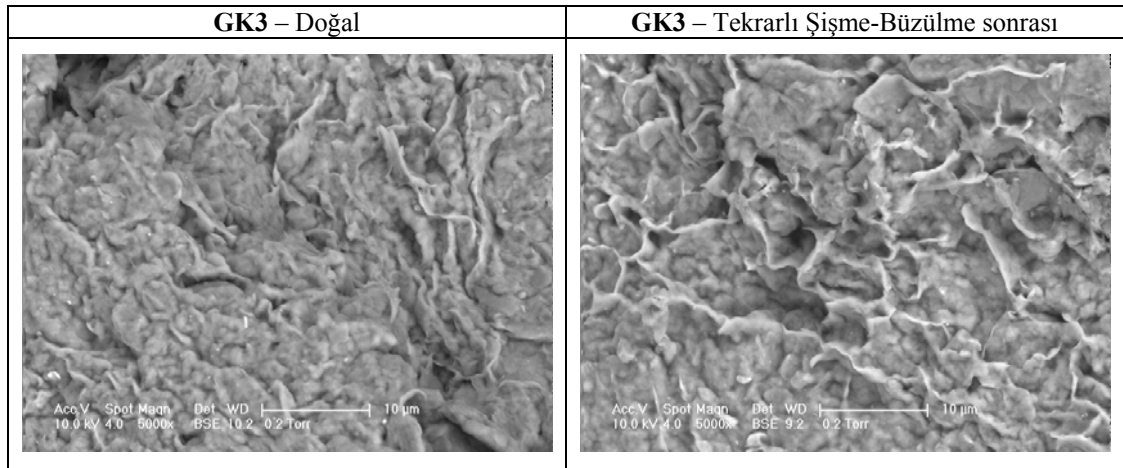
GK1_UD Büyükçekmece numunesinin ESEM fotoğrafları (Şekil 4.29) incelendiğinde doğal numunenin killeri yaprak yaprak tabakalı yapıdayken, tekrarlı şişme-büzülmenin killerin yapısını bozduğu, kırılmalar olduğu, killerin kristal yapılarında kopmaların meydana geldiği görülmektedir. Bu kopan kil kristalleri çok küçük olduğunda kolloidal malzeme ($<0.001\text{mm}$ 'den küçük çaplı, askıda mazleme) olarak adlandırılmaktadır. Askıdaki malzemeler elektriksel yüklü olduğundan, bunların artışından dolayı yüzünden kilin şişme miktarı yükselmektedir. Tekrarlı şişme-büzülmeden sonra konsolidasyona tabii tutulunca, bazı bölgelerde kil kristallerinin birleşmelerine sahip olunmaktadır (Şekil 4.29d). Oysa, doğal kilin konsolidasyona uğramasıyla yaprak yaprak olan kil yapısının etkilenmediği, kopmaların oluşmadığı, sadece yatay tabakalanmanın (paralleleşmenin) arttığı görülmektedir (Şekil 4.29c).

Şekil 4.30'da ise kompaksiyonla yeniden yapılandırılan GK1_YY-kürlü numunesinin ESEM fotoğrafı görülmektedir. Deney öncesi numunede killerin kompaksiyon etkisiyle az da olsa yatay tabakalandığı görülmüştür. Tekrarlı şişme- büzülme geçirdikten sonra ise killerdeki yataylığın tamamen ortadan kalktığı, floküle bir yapının olduğu ve boşlukların olduğu görülmektedir. Bu yüzden de şişme potansiyeli arttığı söylenebilir.

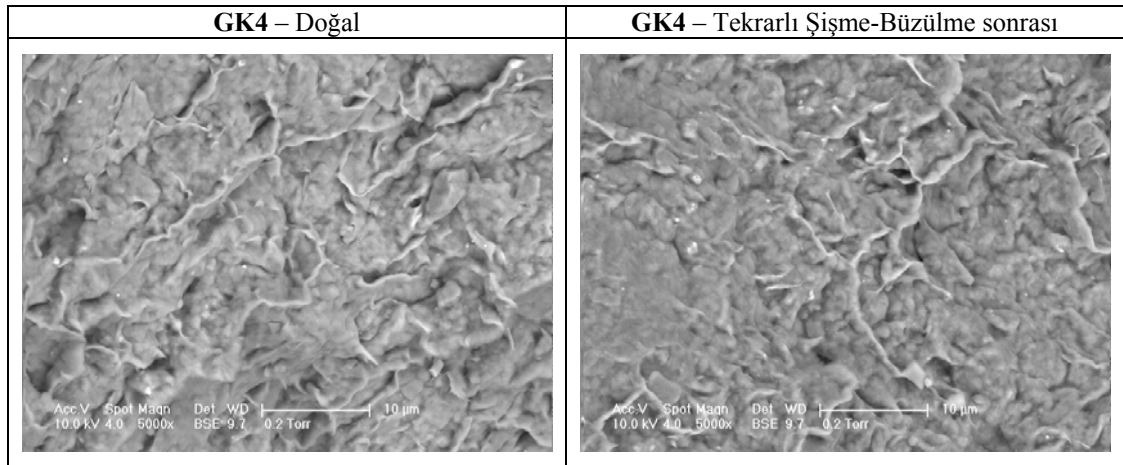
GK2_YY-kürlü Esenyurt yeniden yapılandırılmış numunenin ESEM fotoğraflarına (Şekil 4.31) bakıldığında ise deney başı ile tekrarlı şişme-büzülme geçirmiş numunenin görüntüleri arasında pek fark olmadığı, tekrarlı şişme-büzülmenin kilin stabil yapısını bozmadığı gözlenmektedir.



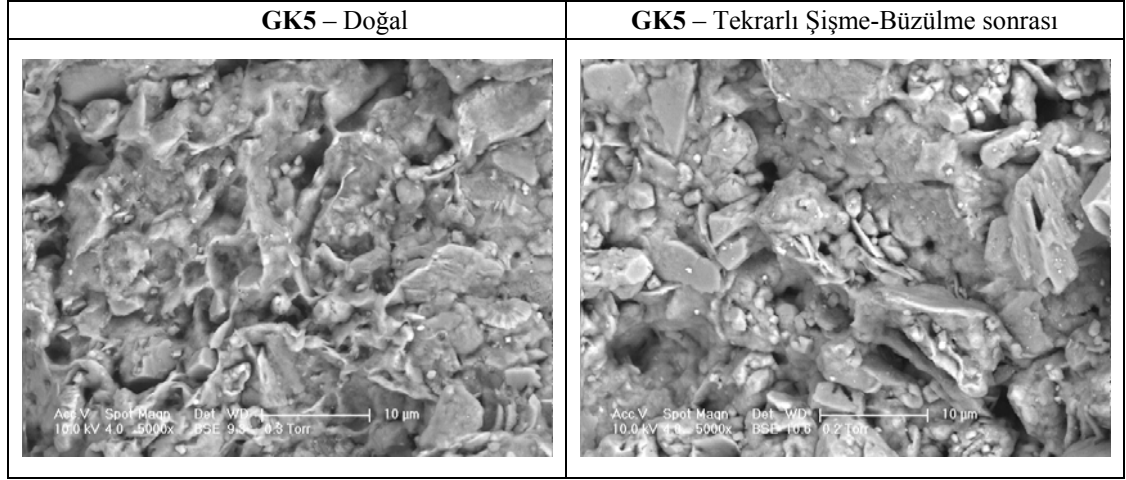
Şekil 4.31. GK2_YY-kürlü kilinin su ile kompakte edilmiş (YY) ve tekrarlı şişme büzülme sonrası durumlarına ait ESEM görüntü analizleri



Şekil 4.32. GK3_UD kilinin doğal ve tekrarlı şişme büzülme sonrası durumlarına ait ESEM görüntü analizleri



Şekil 4.33. GK4_UD kilinin doğal ve tekrarlı şişme-büzülme sonrası durumlarına ait ESEM görüntü analizi



Şekil 4.34. GK5_UD kilinin doğal ve tekrarlı şişme büzülme sonrası durumlarına ait ESEM görüntü analizleri

GK3_UD Ambarlı-Kara ve GK4_UD Ambarlı-Deniz numunelerinin ESEM fotoğraflarına (Şekil 4.32 ve 4.33) bakıldığında ise deney başına göre tekrarlı şişme-büzülme geçirmiş numunedeki killerin daha floküle ve daha kısa parçalı bir yapıya geldiği gözlenmektedir.

GK5_UD Kırış numunesinin ESEM fotoğrafları (Şekil 4.34) incelendiğinde killerin çok fazla kopuk parçaya bölündüğü ve tekrarlı şişme-büzülmenin kilin yapısını bozduğu açık bir şekilde görülmektedir.

4.4. NUMUNELERİN TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

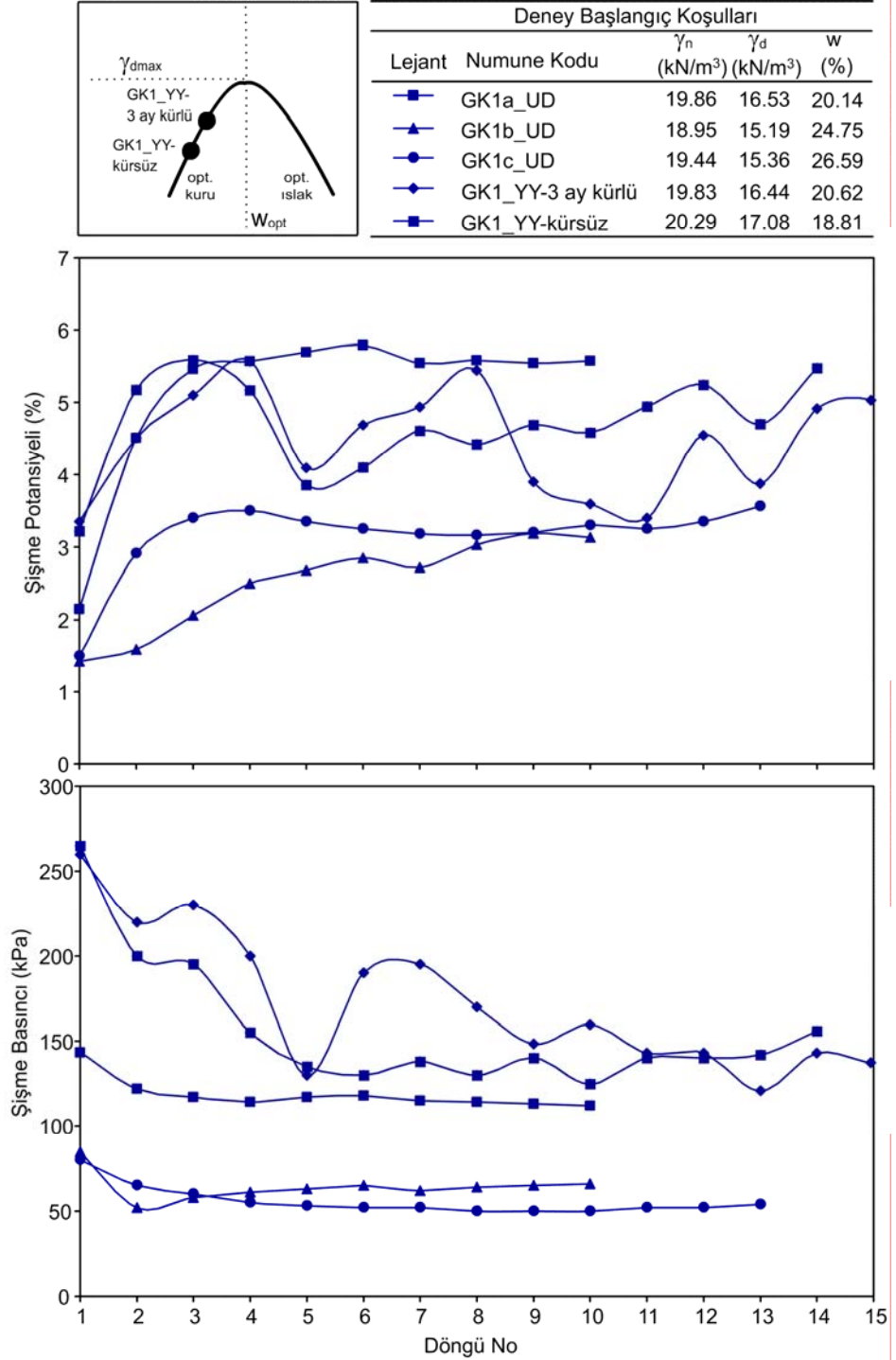
Şekil 4.35’de tüm Büyükçekmece numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme karşılaştırılması verilmiştir. Tüm numelerin şişme potansiyelleri artıp, şişme basınçları düşmektedir. İlk 4 döngüde maksimum şişme potansiyeli artışı görülürken, bu döngüden itibaren artış miktarı azalmaktadır. Literatürün aksine kompakte numunelerde doğal numune gibi davranmıştır. Bölüm 4.3’deki ESEM görüntülerine bakılırsa kompakte edilen Büyükçekmece numunesi paralel tabakalı bir yapı kazanmayıp köşe-kenar yapıda bağlara sahiptir. Bu bağlar zayıf bağlar olup tekrarlı şişme-büzülme etkisiyle kolayca kopup küçük parçalı kil kristallerini oluşturmaktadır. Bu küçük parçaların taşıdığı elektrik yükleri fazla olduğu için su tutma kapasitelesi fazladır dolayısıyla şişme potansiyelleri artmaktadır.

Şekil 4.36 ‘da Esenyurt GK2_YY-kürlü ve GK2_YY-kürsüz numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme karşılaştırılması verilmiştir. 2 numune de aynı oranda şişme potansiyeli düşüşü göstermektedir. En büyük düşüş ilk 2 döngüde yaşanmaktadır. Kuru birim hacim ağırlıkları düşük olduğu ve de optimumdan kuru tarafta kompakte edilmelerine rağmen şişme potansiyeli ve şişme basınçları kompakte Büyükçekmecelerin tersine düşmektedir. Bunun nedeni killerin orijiniyle açıklanmaktadır.

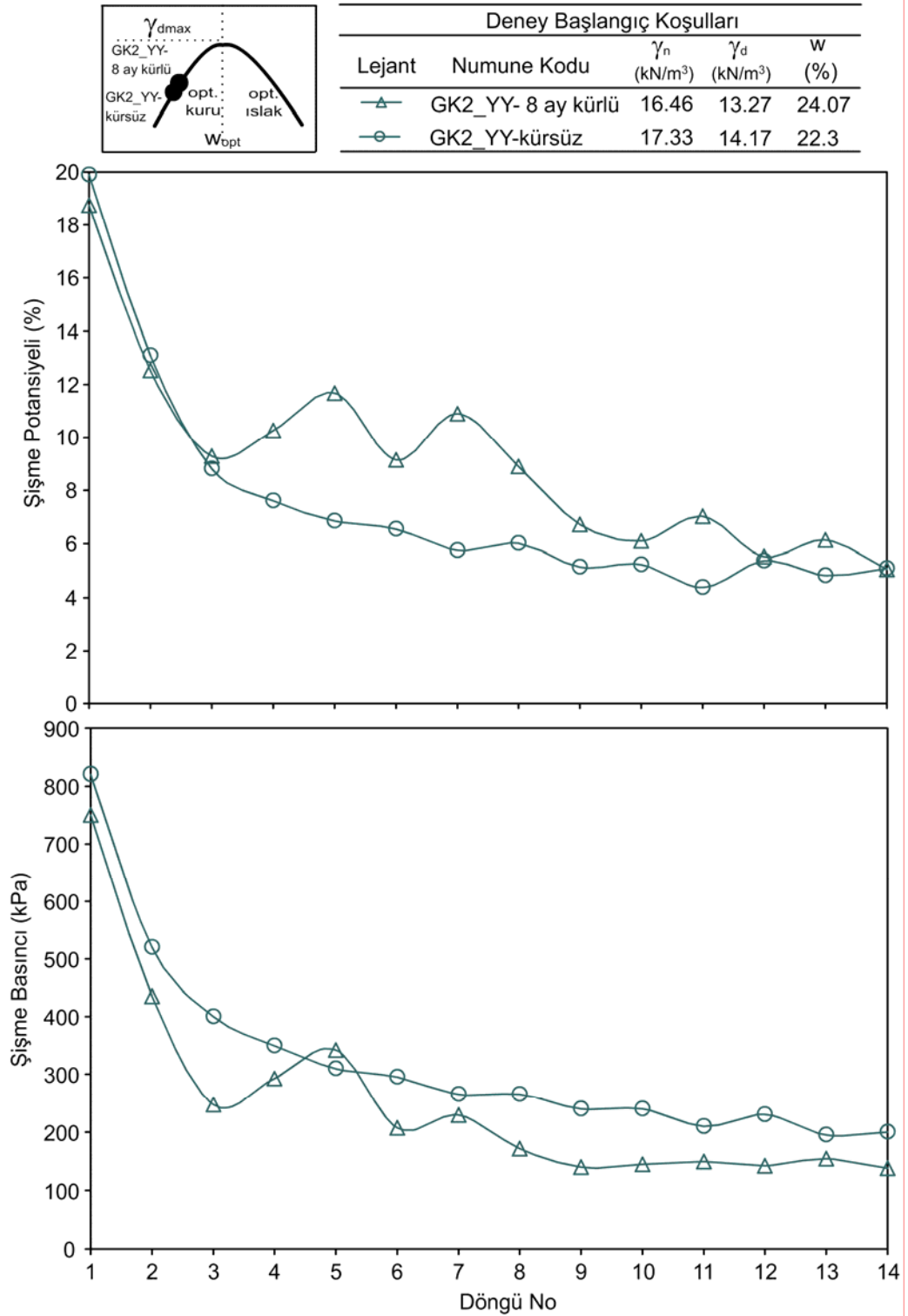
Esenyurt GK2_YY-kürlü grafiğinde şişme basıncı ve potansiyelinde dalgalanmalar görülmüştür, bunun nedeni olarak 8 ay kür süresi içinde paralel yapıdaki tabakaların köşe-kenar yapı kazanma çabasıyla kaynaklandığı bununla birlikte döngüler ilerledikçe kürsüz Esenyurt numunesiyle paralellik gösterdiği görülmüştür.

Şekil 4.37 Ambarlı’dan alınan GK3_UD, GK4_UD ve GK4_YY-kürsüz numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme karşılaştırılması verilmiştir. Şişme potansiyeli GK3_UD’de çok az artış göstermekle birlikte, GK4_UD ve GK4_YY-kürsüz numunelerinde Esenyurt GK2 gibi tabakalar arası bağlarının kuvvetli olduğu ve şişme potansiyelin artmadığı görülmektedir.

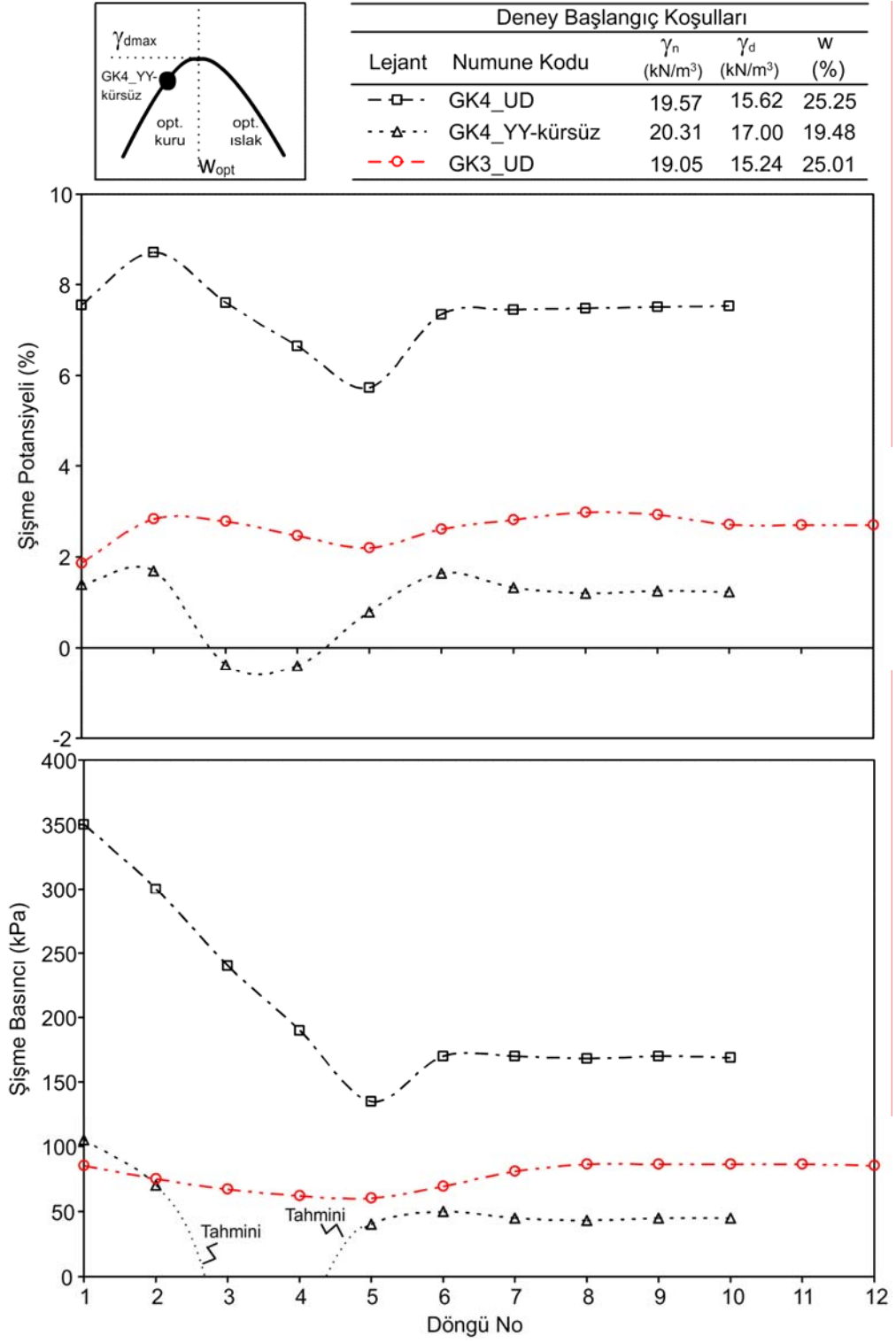
Şekil 4.38’de Kırış GK5 killerinin tekrarlı şişme-büzülme karşılaştırması verilmiştir. Bu killeri de Büyükçekmece GK1 killeri gibi zayıf bağıllı killeri olup, optimumdan ıslak kompakte edilen GK5a_YY-kürsüz numunesi hariç şişme potansiyelinde artış görülmektedir.



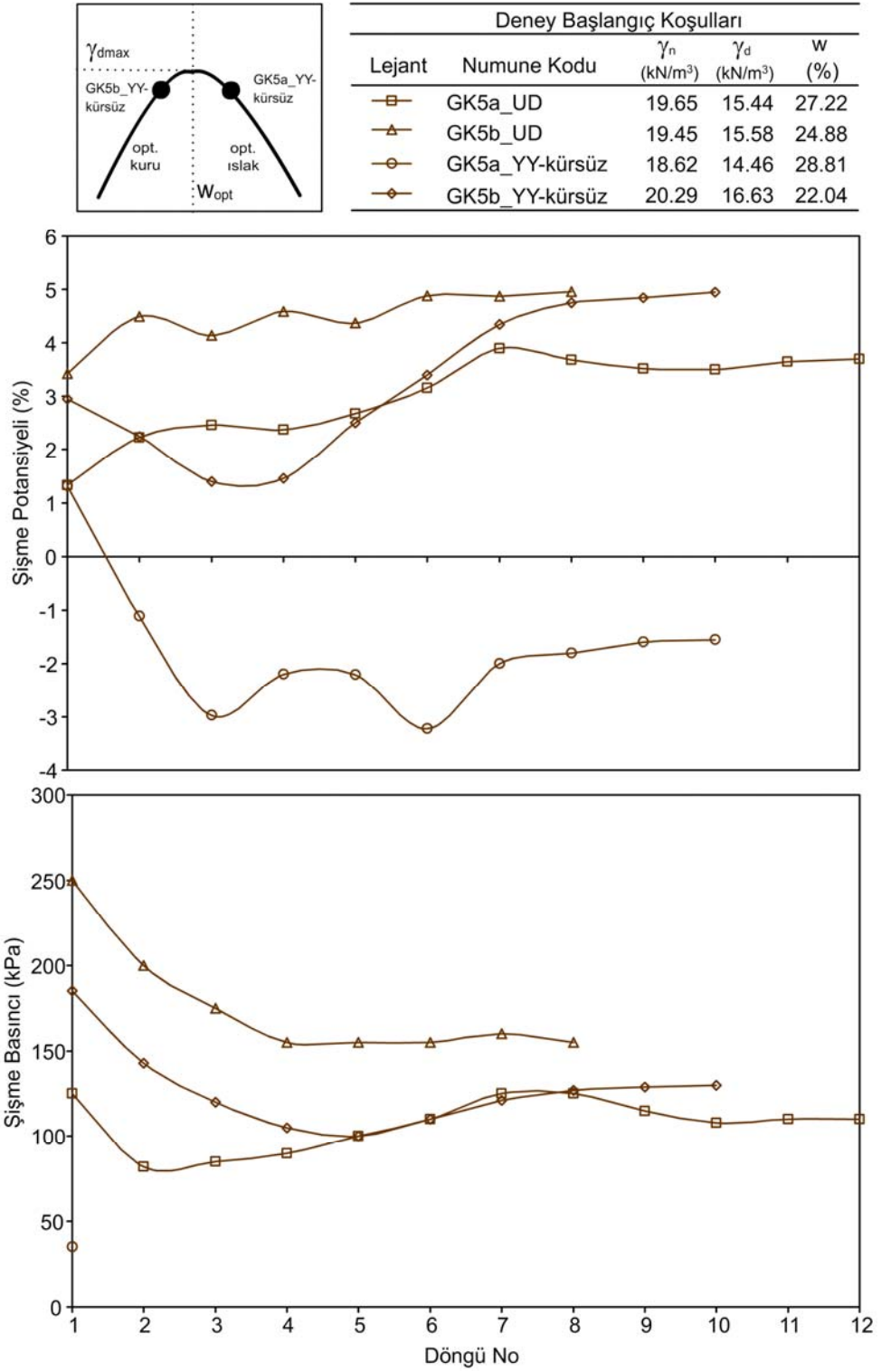
Şekil 4.35. GK1 Büyükçekmece numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması



Şekil 4.36. GK2 Esenyurt numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması

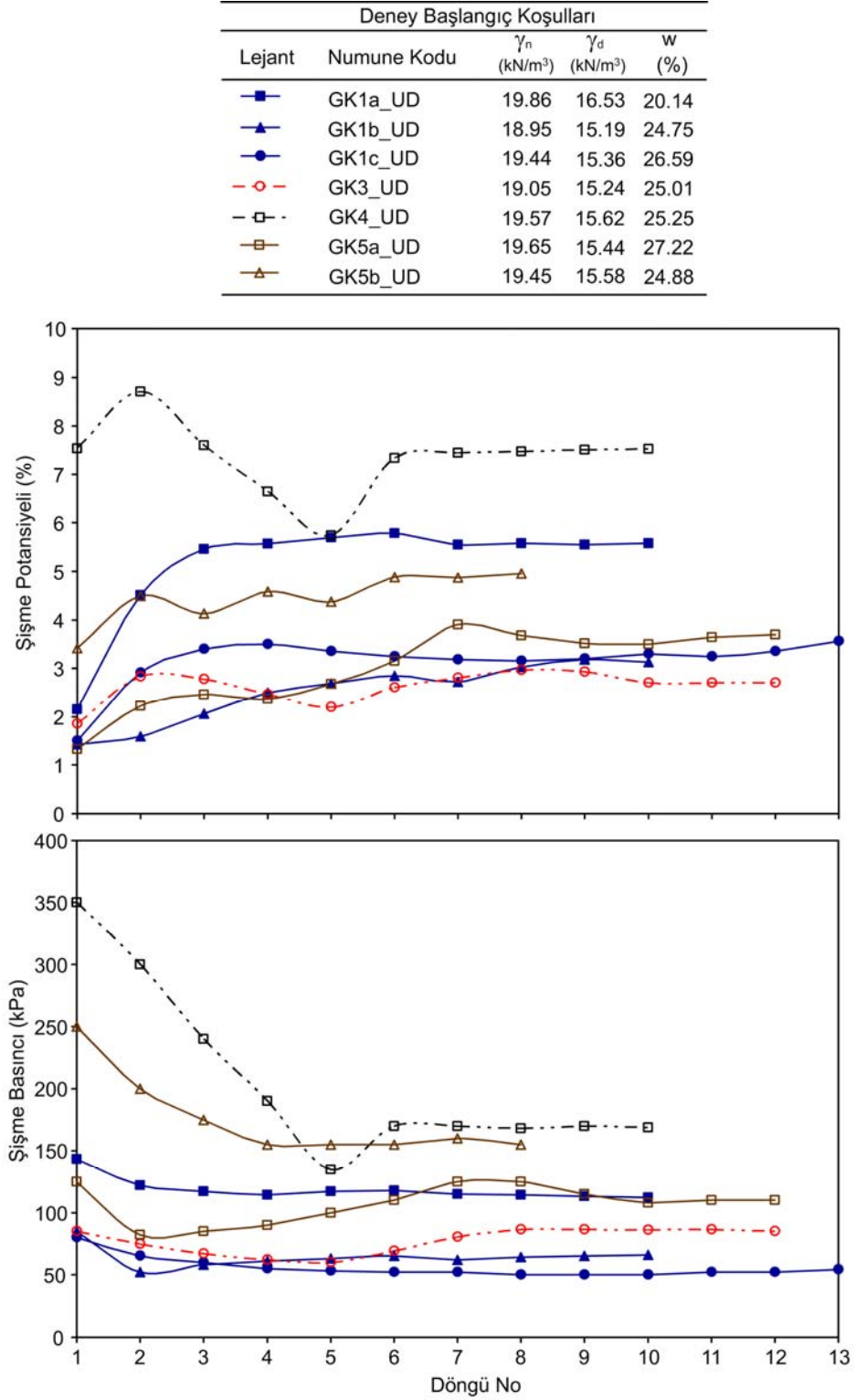


Şekil 4.37. Ambarlı GK3 (Kara) ve GK4 (Deniz) numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması

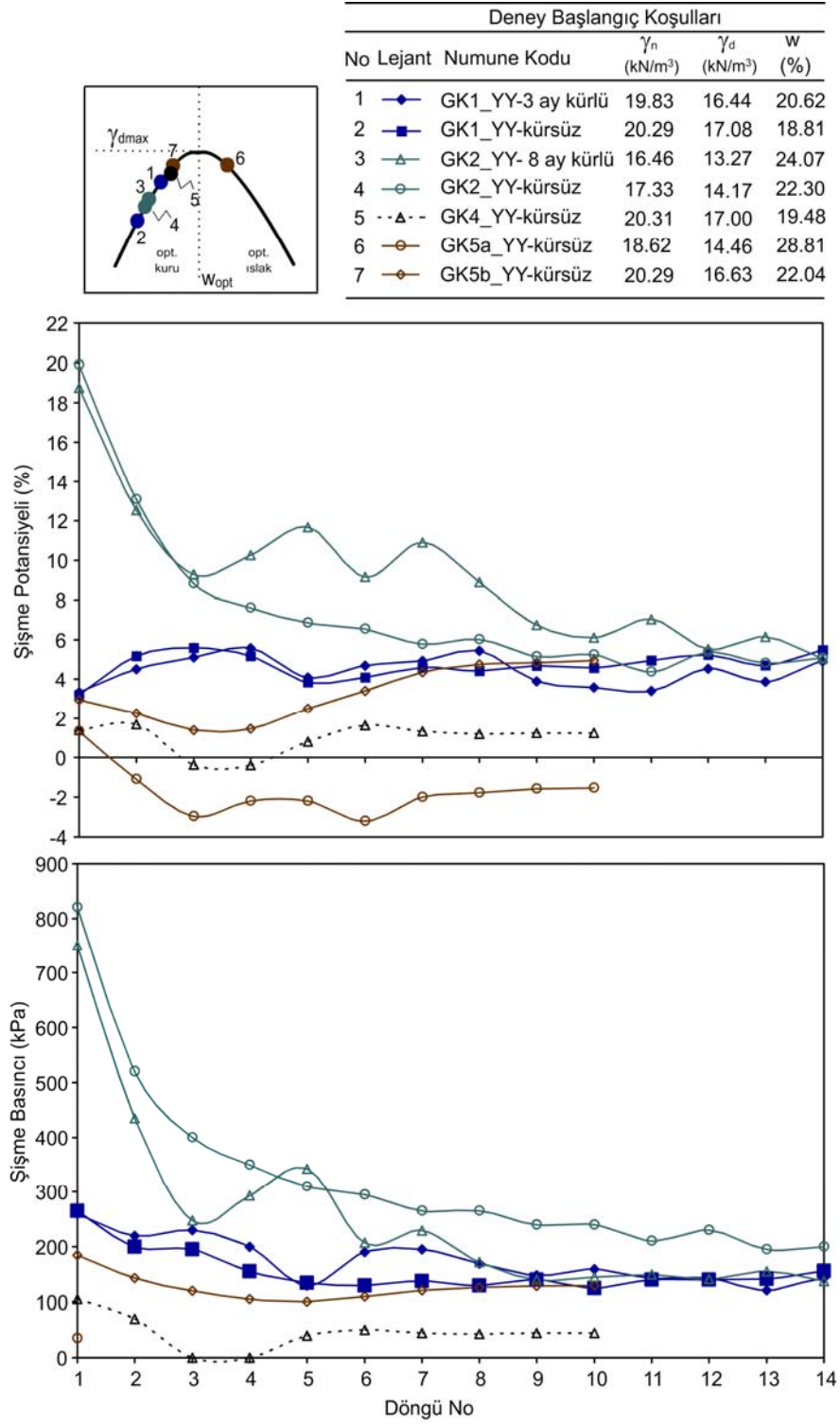


Şekil 4.38. GK5 Kırtaç numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması

Şekil 4.39’da tüm çalışılan doğal killerin, Şekil 4.40’da ise tüm kompakte numunelerin tekrarlı şişme-büzülme karşılaştırması verilmiştir. Literatürdeki gibi her yönde değişen şişme potansiyeli sonuçları mevcuttur.



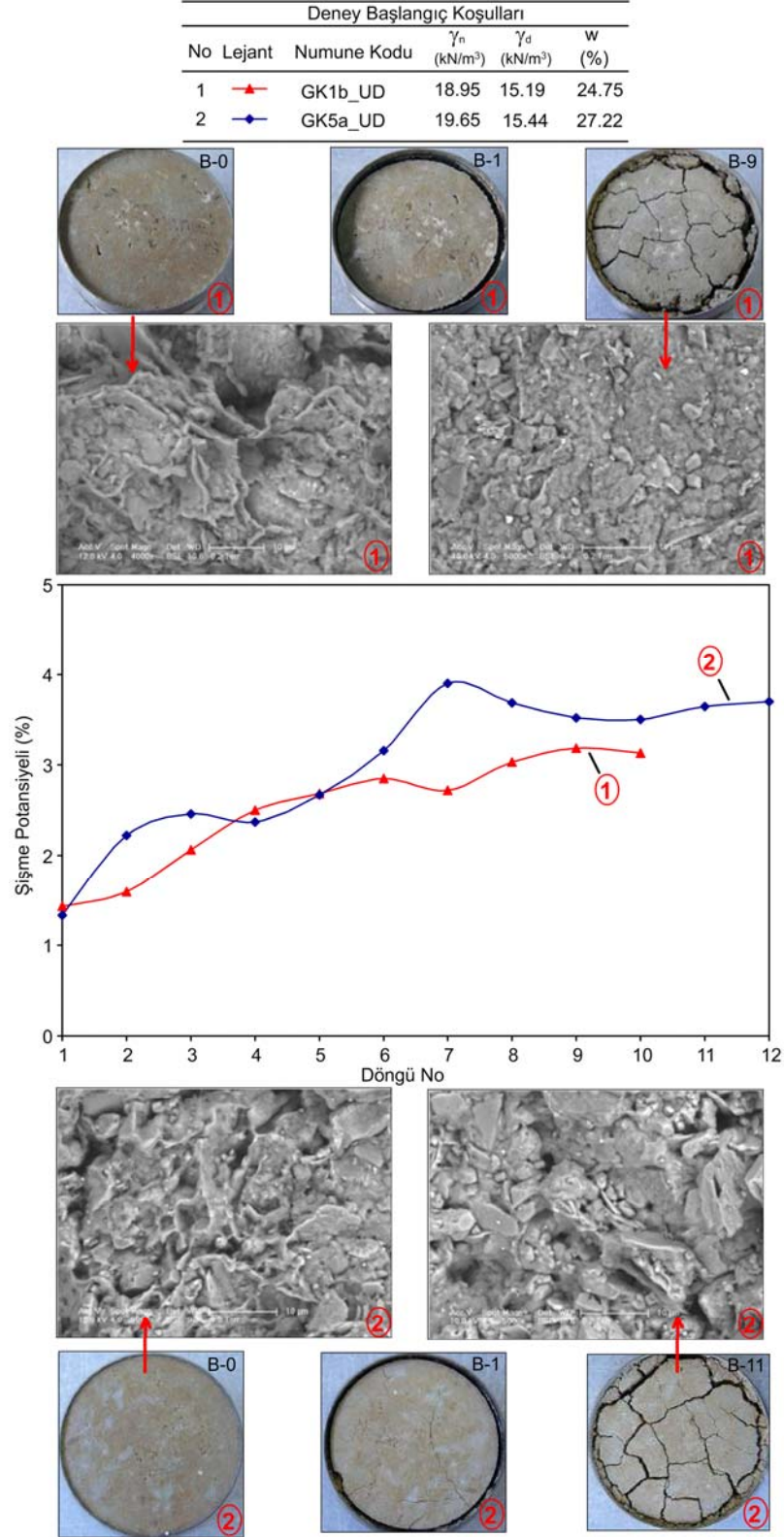
Şekil 4.39. Tüm doğal numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması



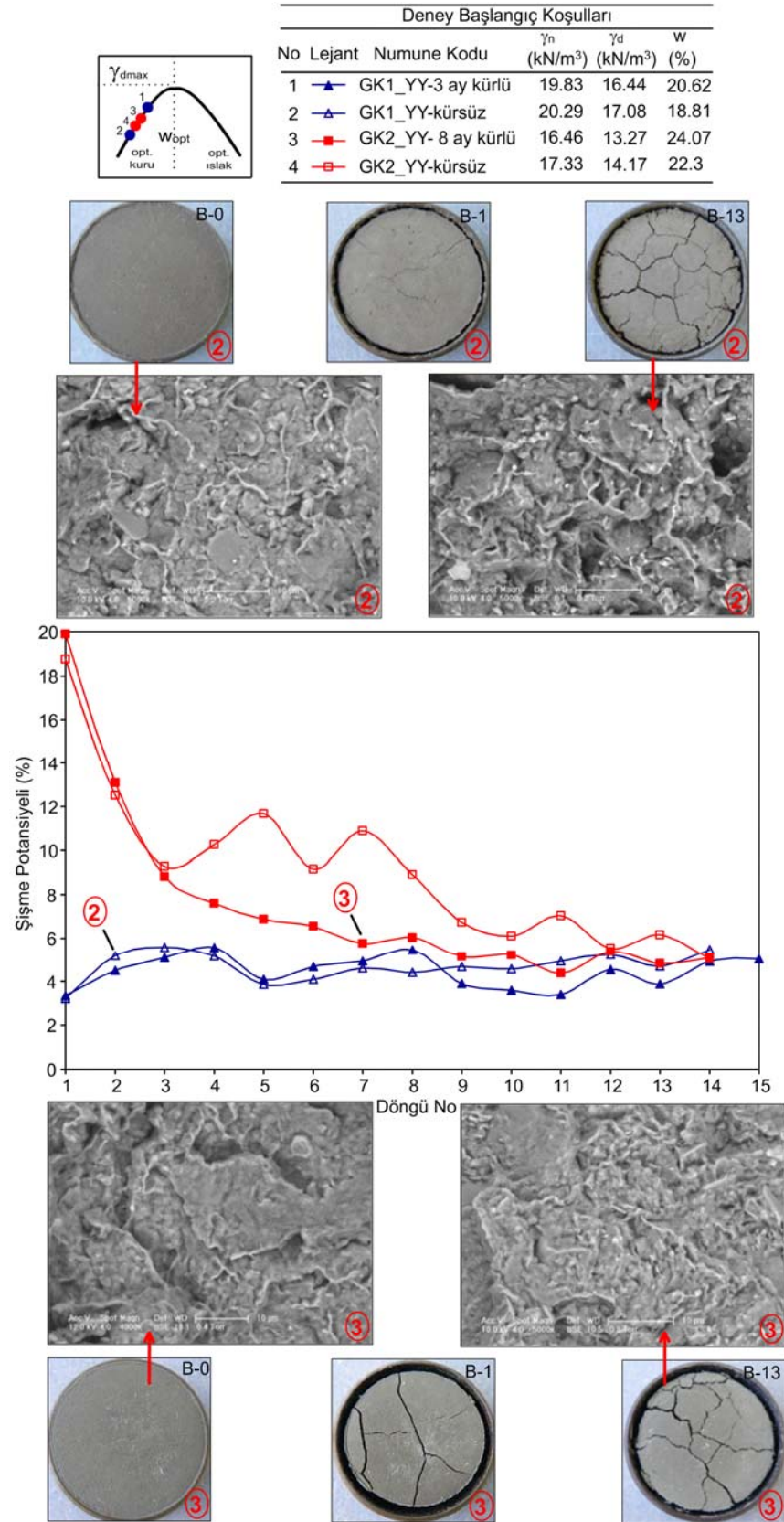
Şekil 4.40. Tüm kompakte (Yeniden yapılandırılmış) numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması

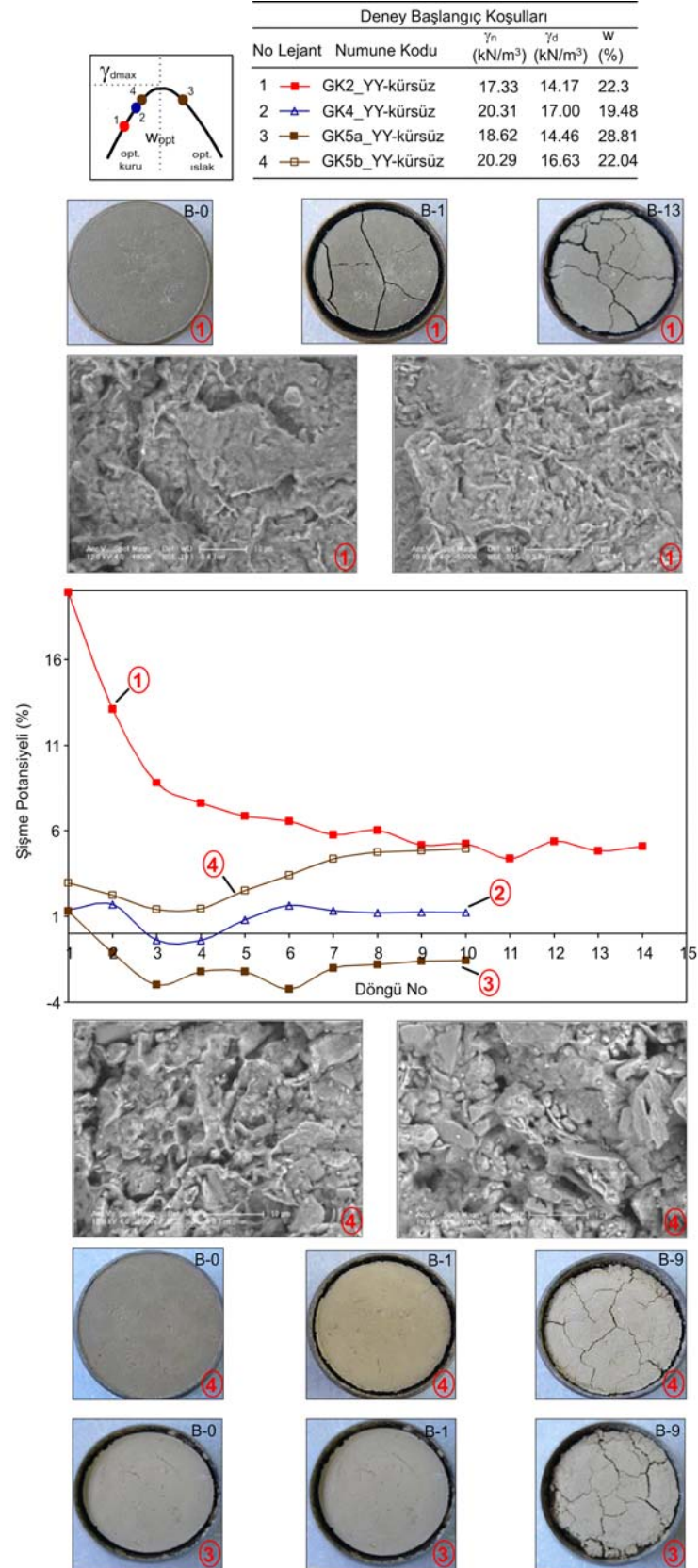
Şekil 4.41’de GK1b_UD ile GK5a_UD numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması, Şekil 4.42’de GK1 yeniden yapılandırılmış numuneler ile GK2 yeniden yapılandırılmış numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları

karşılaştırması ve Şekil 4.43'de GK2, GK4 ve GK5 yeniden yapılandırılmış kürsüz numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 4.41. GK1b_UD ile GK5a_UD numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması

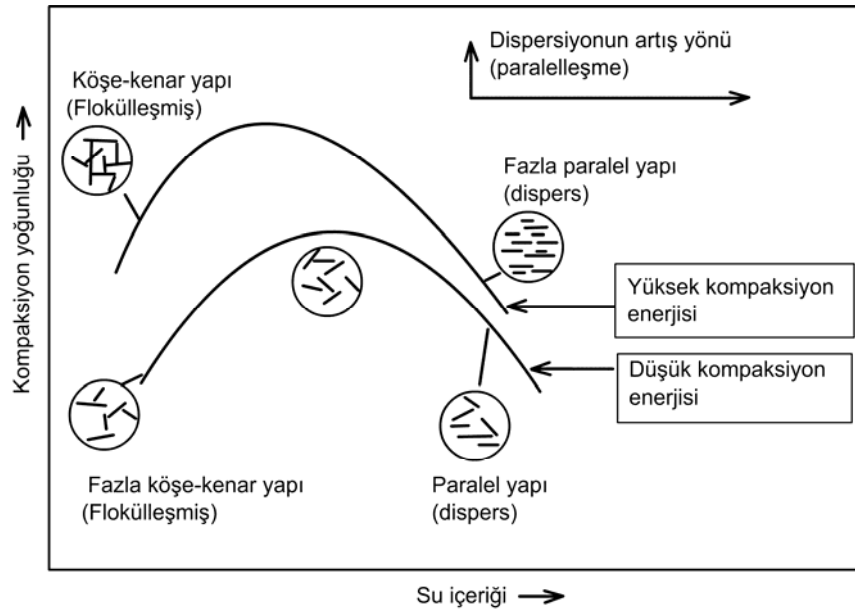




Şekil 4.43. GK2, GK4 ve GK5 yeniden yapılandırılmış kürsüz numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme deney sonuçları karşılaştırması

Optimumdan kuru tarafta olan numunelerle ıslak tarafta olan numuneler genelde farklı davrandığı görülmektedir. Şekil 4.43'te GK2, GK4 ve GK5 kompakte numunelerin karşılaştırılması verilmiştir. Optimumdan kuru tarafta Esenyurt GK2 numunesi hariç şişme potansiyeli artmaktadır. Şekil 4.43'te GK5a_YY-kürsüz numunesinden görüldüğü gibi optimumdan ıslak tarafta olan numunenin şişme potansiyeli azalmaktadır. Bunun nedeninin yapı farklılığından olduğu düşünülebilir.

Lambe (1958)' de kil yapısını ve kil yapısına kompaksiyonun etkisini açıkladığı Şekil 4.44'da görülmektedir. Optimumdan ıslak tarafta olan zeminlerin daha paralel yapıda (dispers), optimumdan daha kuru olan killerin köşe-kenar yapıda (floküle) olduğu Şekilden görülmektedir. Genelde floküle yapıdaki killerin bağ yapıları tekrarlı-şişmeden daha çok etkilenmekte ve yapıları bozulmaktadır. Bu yüzden de şişme potansiyelleri artmaktadır. Bu davranış GK1_YY-kürlü, GK1_YY-kürsüz Büyükçekmece mezarlık ve Kıraç GK5b_YY-kürsüz numunelerinde açıkça gözükmemektedir. Bu durumun aksine Esenyurt GK2_YY-kürsüz ve Esenyurt GK2_YY-kürlü optimumdan kuru tarafta sıkıştırıldığı halde şişme potansiyeli sürekli düşmektedir. Kilin daha paralel yapıda kümelerden oluştuğu sebebiyle bu durumu açıklayabiliriz. Bu davranışı bölüm 4.3'de ESEM görüntülerinde de açıkça gözükmemektedir.



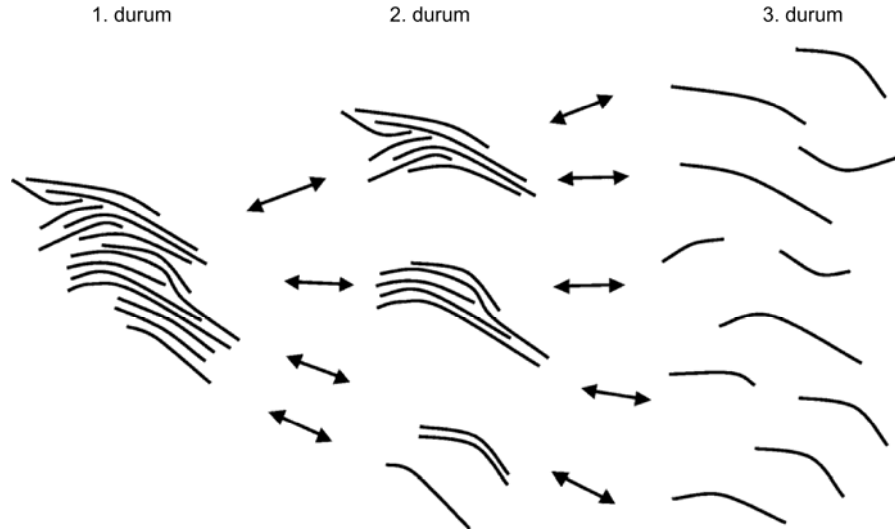
Şekil 4.44. Kil yapısına kompaksiyonun etkisi (Lambe, 1958)

Laird (2006) çalışması şişme potansiyelinin neden artıp azaldığını tam olarak anlamamız için çok yol gösterici olmuştur. Simektitin şişmesi çok karışık bir konu olduğunu söylemekle birlikte Laird (2006) bu şişme mekanizmasını alkali ve alkalın katyonları yüklü sulu sistemlerde 6 değişik mekanizmaya bağlamıştır. Laird'ın bahsettiği şişme mekanizmaları; kristalize şişme, çift tabaka şişme, quasikristal kırılma ve biçimlenmesi, katyon değişimi, eş hacim şişmesi ve brownian şişmesi olarak adlandırmıştır. Bunu açıklamadan önce simektitlerin quasikristal yapıda olduğunu söylemek gerekir. Ca gibi iki yüklü katyonlarla doygun simektitler quasikristaller olarak organize edilirler. Quasikristal 2:1 filisilikat kristal yapısındaki silikat minerallerin kristal yapıya paralel doğrultuda olmaları olarak açıklanabilir. Quasikristaller tabakaların birleşmesiyle oluşan alt yığınların birleşimi olarakta açıklanabilir. Su, tabakalar arasında, yığınlar arasında ve quasikristaller arasında oluşur. Smektit sistemlerde sodyum gibi tek değerli katyonların olduğu yerlerde smektit tabakalarının ortaklığı taktoidler olarak isimlendirilir. Quasikristaller arasındaki por boşluklarına su girdiğinde veya ayrıldığında Ca ile doygun smektitik killi zeminlerde şişme meydana gelir.

Genel olarak Laird (2006), kristalize şişmedeki azalma (daha küçük tabakalar arası boşluk) tabaka yükünde artış olarak sonuçlandığını ve quasikristal simektitin stabilite ve boyutunun arttığını söylemiştir. Tabaka yükü çift tabaka şişmesine, eş hacim şişmesine yada Brownian şişmesine direkt olarak etki etmez yada çok az eder. Bununla beraber tabaka yükü quasikristalin stabilite ve boyutunu etkiler, tabaka yükü dolaylı olarak çift tabaka ve eş hacim şişmesine etki eder. Karışık katyon - simektit sistemlerinde tabaka yükü katyon değişim seçiminde, göreceli oran, katyonların ara tabakadaki dağılımı ve dış yüzey değişimi üzerinde oldukça büyük bir etkiye sahiptir. Katyon değişimi, örnek olarak ara katmanda yoğun olarak bulunan sodyum verilirse quasikristalin kırılma ve biçimlenmesinde büyük bir etkisi olduğunu ve böylece şişmeyi etkilediğini söylemiştir. Bahsettiği şişme türlerinde herhangi biri şişmeye etki ettiği gibi birkaçı veya hepsi de aynı anda etki edebilmektedir.

Olayı basitleştirmek gerekirse Laird (2006)'ın Şekil 4.45'da verdiği kristal bağların kopması durumu bizim çalışmamızda şişme-büzülmenin artması veya azalmasını çok basit Şekilde anlatmaktadır. 1. durumu daha yoğun kümelenmiş stabil bağları, 3 durumu

daha ayrık tabakalanmayı gösterir. 3 durumundaki yapıda elektrik yükü fazladır dolayısıyla su tutma kapasiteleri fazladır ve flokülleşmeye çok müsaittir. Bu yüzden de şişme artmaktadır. Bu 2 durumda yani kuruduğu zama parçalanma, yapabiliyorsa tekrar birleşme durumları ortaya çıkabilmektedir. Bu durumu Şekil 4.43’de 1 ve 3 eğrilerinde ve ESEM’den daha kümelenmiş bir yapı görülmekte ve böylece bu yapıda görülen kilin fazla şişmediği anlaşılmaktadır. Şişse bile 2.duruma girip tekrar 1.duruma geri dönmektedir. Ancak Şekil 4.41 görülen Büyükçekmece ve Kırac numunelerinde ESEM görüntülerinden deney başında numunelerin Şekil 4.45 verilen 2 veya 3 durumunda bulunduğu dolayısıyla şişme-büzülmenin bu zayıf yapıyı daha da bozarak 3 durumuna getirdiği söylenebilmektedir. Bu yüzden de elektriksel yükü fazla olan ve fazla su tutabilen küçük kil parçacıkları şişmeyi arttırmaktadır.



Şekil 4.45. Simektit diyagramında quasikristallerin kırılma ve oluşumu; 1. durum; Tabakaların tek bir kuasikrsital olarak gruplaştığı durum, 2. durum; aynı tabakalın 4 quasikristale ayrılması, 3. durumu; aynı tabakaların ayrı ayrı tabakalar halinde dizilmesi (Laird, 2006)

4.5. NUMUNELERİN TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DAVRANIŞININ KARŞILAŞTIRILMASI

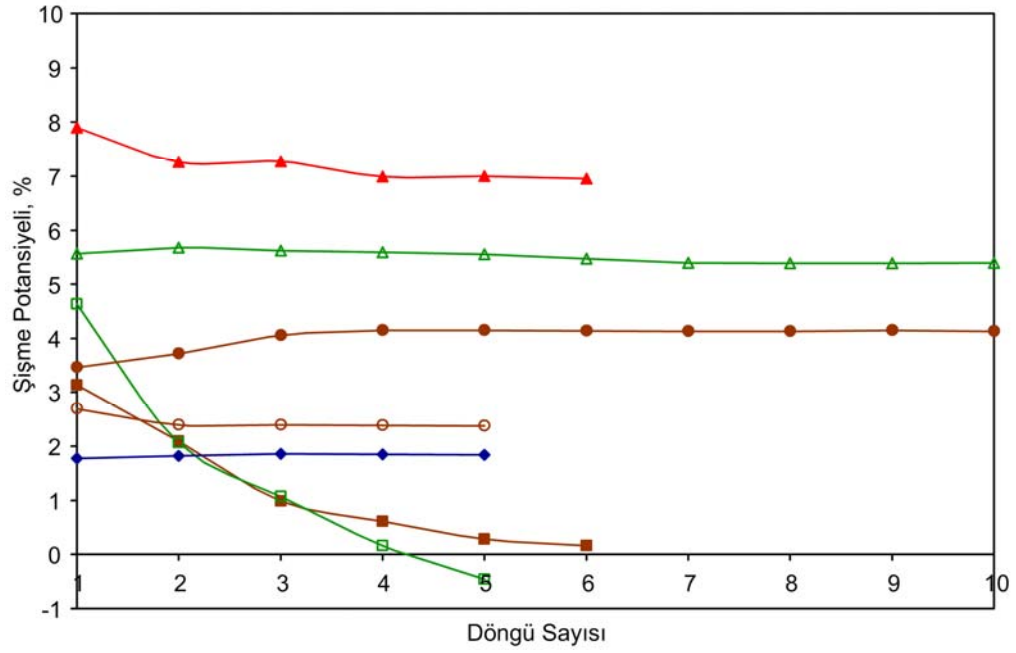
Yukarıda anlatılan şişme-büzülme mekanizmasının açıklanmasına yönelik bilgiler doğrultusunda kilin yapısı, kil mineralinin cinsi, orijininin çok önemli olduğu söylenebilmektedir. Bu nedenden ötürü her araştırmacı kilin şişme-büzülmesinin artmasını farklı bir nedene bağlamıştır. Fakat yapılan çalışmalarda minerolojik çalışmalara yeterince değinilmemiştir. Ayrıca ESEM görüntüleri çoğunda yoktur. Bu yüzden de mekanizmayı tam olarak bir yere bağlayamamışlardır. Örneğin AL-Homoud ve diğerleri (1995) kompakte killeri üzerinde yaptığı araştırmada tüm killerin şişme potansiyellerinin düştüğünü, buna sebep olarakta kil içeriğinin azaldığını ifade etmiştir. Bu konuda bu tezde yapılan çalışmalara göre tekrarlı şişme-büzülme sonunda yapılacak olan deneyler için hazırlanan referans numuneleri dikkatli bir şekilde tülbente yada başka birşeye sarılmazsa, kolloidal malzeme suyun içinde kalmakta ve bunun sonucu yapılan hidrometreye göre kil içeriğinin azaldığı söylenebilmektedir.

Bu yüzden de literatür karşılaştırması hakkında yorum yazmak çok kolay değildir. Şekil 4.46'da sürşarj yükü altında yapılan deney sonuçları verilmiştir. Çoğu numunede şişme potansiyeli azalmakta yada değişmemektedir. Sürşarj yükü olmadan yapılan deneylerde ise azalan, artan, azalıp artan, artıp azalan ve bunun gibi her yönde sonuçlar vardır (Şekil 4.47)

Şekil 4.48'de ise bu tezde tekrarlı şişme-büzülme yapılmış tüm numuneler ile literatürde tekrarlı şişme-büzülme yapılmış numunelerin karşılaştırılması verilmiştir. Bu tezdeki çalışmalar literatürdekiler gibi numunenin orijinine, sahip olduğu kil mineral tipine ve kristallerin birbiriyle kurdukları zayıf-kuvvetli, köşe-kenar/paralel bağ şekillerine göre farklılıklar göstermektedir.

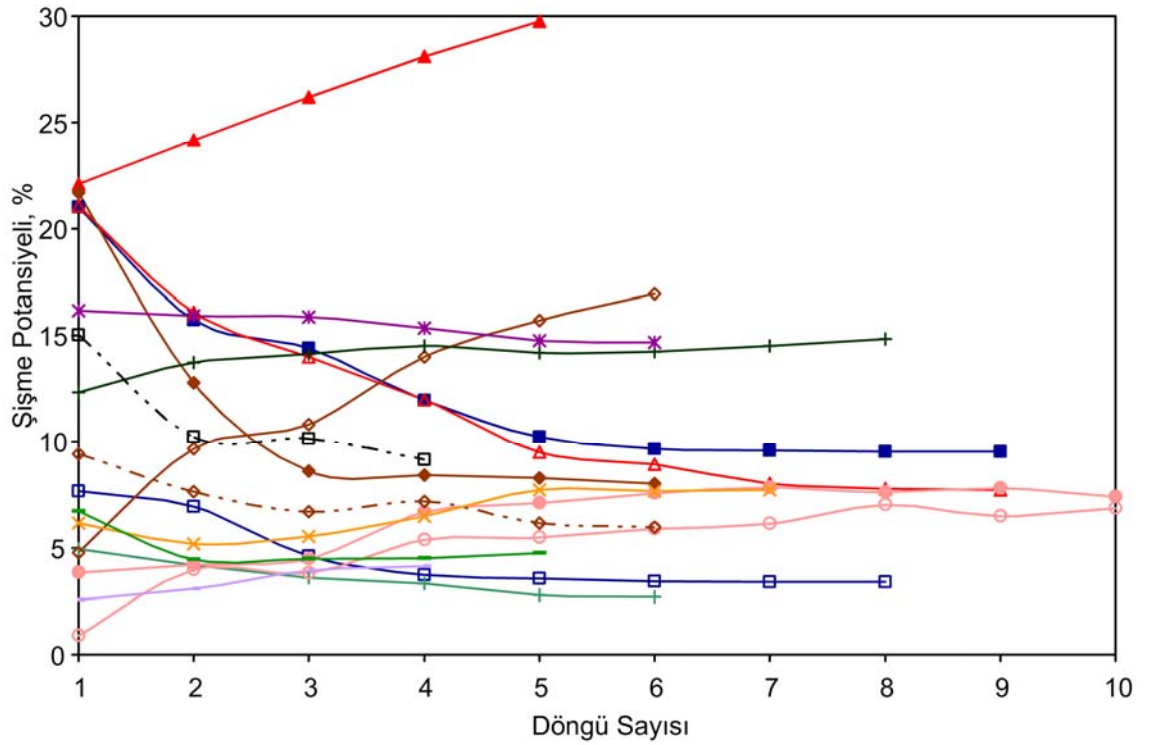
Tablo 4.5'te literatürde tekrarlı şişme-büzülmeyle ilgili deney yapan araştırmacılara ait zemin özellikleri tablosu verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi çoğu araştırmacının mineroloji ve zemin özellikleri bilgileri eksiktir. Bu yüzden de bu deneylerle ilgili bulunan sonuçların neye dayandırıldığıyla ilgili verilen bilgiler kesin kanıtlara dayanmamaktadır.

Lejant	Numune Kodu	Deney Başlangıç Koşulları	
		γ_d (kN/m ³)	w (%)
■	Dif ve Bluemel (1991) Sürşarj=200 kPa (UD)	15.6	25.9
□	Dif ve Bluemel (1991) Sürşarj=100 kPa (UD)	15.7	20.3
▲	Rao ve Tripaty (2003) Sürşarj=50 kPa Kürsüz (YY)	12.65	35.0
△	Rao ve Tripaty (2003) Sürşarj=100 kPa Kürsüz (YY)	12.65	35.0
●	Rao ve Tripaty (2003) Sürşarj=100 kPa 7 gün kürlü (YY)	12.65	35.0
○	Rao ve Tripaty (2003) Sürşarj=200 kPa Kürsüz (YY)	12.65	35.0
◆	Rao ve Tripaty (2003) Sürşarj=200 kPa 7 gün kürlü (YY)	12.65	35.0



Şekil 4.46. Literatürde sürşarj yükü altında tam şişme-kısmi büzülme uygulanan numunelerinin deney sonuçları karşılaştırması

Lejant	Numune Kodu	Deney Başlangıç Koşulları	
		γ_d (kN/m ³)	w (%)
—□—	Al-hamoud ve diğ. (1995) B zemini (YY)	17.0	21.0
—■—	Al-hamoud ve diğ. (1995) F Zemini (YY)	17.2	20.0
—△—	Basma ve diğ. Kısmi büzülme (1996) (YY)	15.69	20.3
—▲—	Basma ve diğ. Tam büzülme (1996) (YY)	15.69	20.3
—+—	Chen (1965) (YY)	15.1	11.5
—●—	Day (1994) Kürsüz (YY)	21.0	16.5
—○—	Day (1994) 21 gün kürlü (YY)	21.0	16.5
—◇—	Guney ve diğ. (2005) Zemin B+ %3 kireç (YY)	14.0	30.0
—◆—	Güney ve diğ. (2005) C Zemini (YY)	11.6	40.0
—◇—	Guney ve diğ. (2005) Zemin C + %3 kireç (YY)	11.6	40.0
—◇—	Osipov ve Diğ. (1987) (UD)	14.3	35.0
—+—	Rao ve Tripaty (2003) 7 gün kürlü (YY)	12.65	35.0
—*—	Rao ve Tripaty (2003) Kürsüz (YY)	12.65	35.0
—x—	Tawfig ve Nalbantoğlu (2009) Tam Büzülme (YY)	15.6	24.0
—+—	Tawfig ve Nalbantoğlu (2009) Kısmi büzülme (YY)	15.6	24.0
—□—	Yalçın (1997) Kürsüz (YY)	11.9	40.0



Şekil 4.47. Literatürde sürşarj yükü olmadan tekrarlı şişme-büzülme deneyi yapılan numunelerin deney sonuçları karşılaştırması

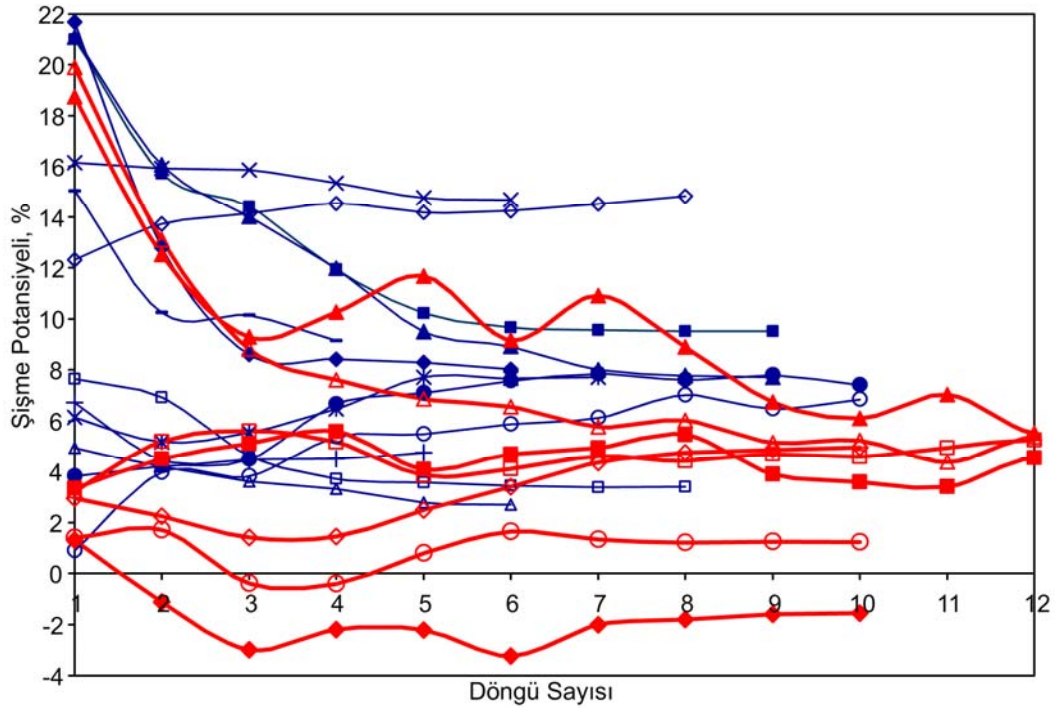
Tablo 4.5. Literatürde tekrarlı şişme-büzülmeyle ilgili deney yapan araştırmacılara ait zemin özellikleri Tablosu

Referans	Kilin Adı	Numune tipi	W ₀ (%)	Y _d (kN/m ³)	LL (%)	PI (%)	Baskın Mineraller	Sürşarj Yüğü (kPa)	Deney şekli	Kurutma şekli ve ısısı	Şişme Yüzdesi	Şişme Basıncı
Dif ve Bluemel (1991)	Hoheneggelsen kili	Örselenmemiş	16.6	16.7	48-55	33-38	-	200	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede	Azalıyor	-
	Hoheneggelsen kili	Örselenmemiş	20.3	15.7	48-55	33-38	-	100	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede	Azalıyor	-
	Hoheneggelsen kili	Örselenmemiş	28.2	14.4	48-55	33-38	-	200	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede	Azalıyor	-
	Hoheneggelsen kili	Örselenmemiş	28.8	13.8	48-55	33-38	-	100	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede	Azalıyor	-
	Hoheneggelsen kili	Örselenmemiş	28.5	13.9	48-55	33-38	-	100	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede	Azalıyor	-
	Hoheneggelsen kili	Örselenmemiş	29.6	14	48-55	33-38	-	100	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede	Azalıyor	-
	Poznan kili	Örselenmemiş	36.6	13	62	44-49	-	100	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede	Azalıyor	-
	Poznan kili	Örselenmemiş	30.8	14.5	62	44-49	-	100	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede	Azalıyor	-
	Poznan kili	Örselenmemiş	25.9	15.6	62	44-49	-	100	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede	Azalıyor	-
Al-Homoud ve diğ. (1995)	Irbid A	Kompakte	12	16	35	22	Smektit, illit, kaolinit	-	Tam şişme, tam büzülme	Fırında, 36°C±2	Azalıyor	Azalıyor
	Irbid B	Kompakte	21	17	79	27	Smektit, illit, kaolinit		Tam şişme, tam büzülme	Fırında, 36°C±2		
	Irbid C	Kompakte	20.3	16	57	15	Smektit, illit, kaolinit		Tam şişme, tam büzülme	Fırında, 36°C±2		
	Irbid D	Kompakte	20	17	75	37	Smektit, illit, kaolinit		Tam şişme, tam büzülme	Fırında, 36°C±2		
	Irbid E	Kompakte	15	16.8	62	34	Smektit, illit, kaolinit		Tam şişme, tam büzülme	Fırında, 36°C±2		
	Irbid F	Kompakte	20	17.2	81	38	Smektit, illit, kaolinit		Tam şişme, tam büzülme	Fırında, 36°C±2		
Day (1994)	-	Kompakte	21	16.5	46	24	Çoğunluk kaolinit ama montmorillonitte içeriyor.	-	Tam şişme, tam büzülme	Güneşte	Artıyor	-
Güney ve diğ. (2007)	Zemin A	Kompakte	37	12.9	385	350	%70 Bentonit	-	Tam şişme, kısmi büzülme	Açık havada	Azalıyor	Azalıyor
	Zemin B	Kompakte	30	14	168	315	%30 Bentonit	-	Tam şişme, kısmi büzülme	Açık havada	Azalıyor	Azalıyor
	Zemin C	Kompakte	40	11.6	115	208	-	-	Tam şişme, kısmi büzülme	Açık havada	Azalıyor	Azalıyor
Tawfiq ve Nalbantoğlu (2009)	-	Kompakte	24	15.6	64	28	-	-	Tam şişme, tam büzülme	50°C'de fırında	Azalıp artıyor	-
									Tam şişme, kısmi büzülme	50°C'de fırında	Azalıp sabitleniyor	

Tablo 4.5. (Devamı...) Literatürde tekrarlı şişme-büzülmeyle ilgili deney yapan araştırmacılara ait zemin özellikleri Tablosu

Referans	Kilin Adı	Numune tipi	W ₀ (%)	Y _d (kN/ m ³)	LL (%)	PI (%)	Baskın Mineraller	Sürşarj Yükü (kPa)	Deney şekli	Kurutma şekli ve ısısı	Şişme Yüzdesi	Şişme Basıncı
Osipov (1987)	Denizsel Siltli kil (Dnestrovsko bölgesi)	Örselenmemiş	111	6.8	69	22	Hidromika %50 Karışık katman %35 Kaolinit %10 Klorit %5	-	Tam şişme, kısmi büzülme	Açık havada	Artıyor	Artıyor
Osipov (1987)	Lakustrine kili (Novgorod bölgesi)	Örselenmemiş	35	14.3	49	23	Hidromika %60-70 Karışık katman %15 Kaolinit %14 Klorit %8	-	Tam şişme, kısmi büzülme	Açık havada	Artıyor	Artıyor
Osipov (1987)	Denizsel kil (Kuzey Caucasus)	Örselenmemiş	21	17	74	47	Montmorillonit %50 Karışık katman %50	-	Tam şişme, kısmi büzülme	Açık havada	Artıyor	Artıyor
Osipov (1987)	Denizsel kil (Volga'dan)	Örselenmemiş	32	14.7	63	36	Hidromika %50 Karışık katman %15 Montmorillonit %10 Kaolinit %15 Klorit	-	Tam şişme, kısmi büzülme	Açık havada	Artıyor	Artıyor
Osipov (1987)	Denizsel kil (Moskova bölgesinden)	Örselenmemiş	20	17.2	49	25	Hidromika %60 Karışık katman %30 Kaolinit %5 Klorit %5	-	Tam şişme, kısmi büzülme	Açık havada	Artıyor	Artıyor
Basma (1996)	S1	Kompakte	12.1	14.2	53	22	Quartz %38 Kalsit %62	-	Tam şişme, tam büzülme	Güneşte	Artıyor	Artıyor
									Tam şişme, kısmi büzülme	Açık havada	Azalıyor	Azalıyor
Basma (1996)	S2	Kompakte	20.3	16.08	57	15	Quartz %57 Kalsit %24 Dolamit % 19	-	Tam şişme, tam büzülme	Güneşte	Artıyor	Artıyor
									Tam şişme, kısmi büzülme	Açık havada	Azalıyor	Azalıyor
Basma (1996)	S3	Kompakte	14.9	14.6	62	29	Quartz %89 Kalsit %11	-	Tam şişme, tam büzülme	Güneşte	Artıyor	Artıyor
									Tam şişme, kısmi büzülme	Açık havada	Azalıyor	Azalıyor
Basma (1996)	S4	Kompakte	20	14.3	81	38	Quartz %15 Kalsit %74 Dolamit % 11	-	Tam şişme, tam büzülme	Güneşte	Artıyor	Artıyor
									Tam şişme, kısmi büzülme	Açık havada	Azalıyor	Azalıyor
Tripathy ve Rao (2008)	A1	Kompakte	23	12.15	100	58	-	100	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede 40±5°C	Azalıyor	-
Tripathy ve Rao (2008)	A2	Kompakte	30	12.35	100	58	-	100	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede 40±5°C	Azalıyor	-
Tripathy ve Rao (2008)	A3	Kompakte	35	12.65	100	58	-	6.25	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede 40±5°C	Artıyor	-
Tripathy ve Rao (2008)	A3	Kompakte	35	12.65	100	58	-	50	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede 40±5°C	Azalıyor	-
Tripathy ve Rao (2008)	A3	Kompakte	35	12.65	100	58	-	100	Tam şişme, kısmi büzülme	Odömetrede 40±5°C	Azalıyor	-

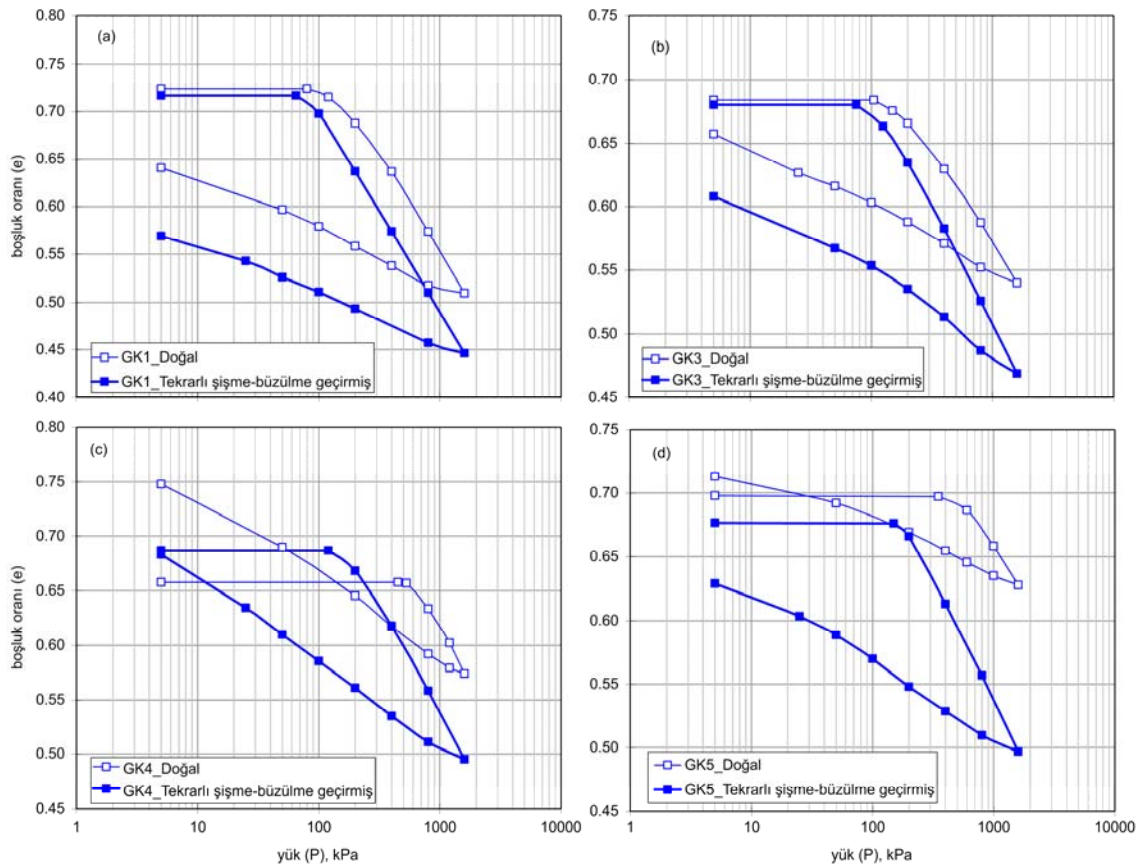
Lejant	Numune Kodu	Deney Başlangıç Koşulları	
		γ_d (kN/m ³)	w (%)
■	Al-hamoud ve diğ. (1995) B zemini (YY)	17.0	21.0
□	Al-hamoud ve diğ. (1995) F Zemini (YY)	17.2	20.0
▲	Basma ve diğ. Kısmi büzülme (1996) (YY)	15.69	20.30
△	Chen (1965) (YY)	15.1	11.5
●	Day (1994) Kürsüz (YY)	21.00	16.50
○	Day (1994) 21 gün kürlü (YY)	21.00	16.50
◆	Güney ve diğ. (2005) C Zemini (YY)	11.60	40.00
◇	Rao ve Tripaty (2003) 7 gün kürlü (YY)	12.65	35.00
×	Rao ve Tripaty (2003) Kürsüz (YY)	12.65	35.00
*	Tawfig ve Nalbantoğlu (2009) Tam Büzülme (YY)	15.60	24.00
+	Tawfig ve Nalbantoğlu (2009) Kısmi büzülme (YY)	15.60	24.00
—	Yalçın (1997) Kürsüz (YY)	11.90	40.00
■	GK1_YY-kürsüz (Bu çalışmada)	17.08	18.81
■	GK1_YY-3 ay kürlü (Bu çalışmada)	16.44	20.62
▲	GK2_YY-kürsüz (Bu çalışmada)	14.17	22.30
▲	GK2_YY- 8 ay kürlü (Bu çalışmada)	13.27	24.07
○	GK4_YY-kürsüz (Bu çalışmada)	17.00	19.48
◆	GK5a_YY-kürsüz (Bu çalışmada)	14.46	28.81
◇	GK5b_YY-kürsüz (Bu çalışmada)	16.63	22.04



Şekil 4.48. Literatürle bu araştırmadaki kompakte numunelerin (YY) deney sonuçları karşılaştırması

4.6. TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME DAVRANIŞININ KONSOLİDASYON DAVRANIŞINA ETKİSİ

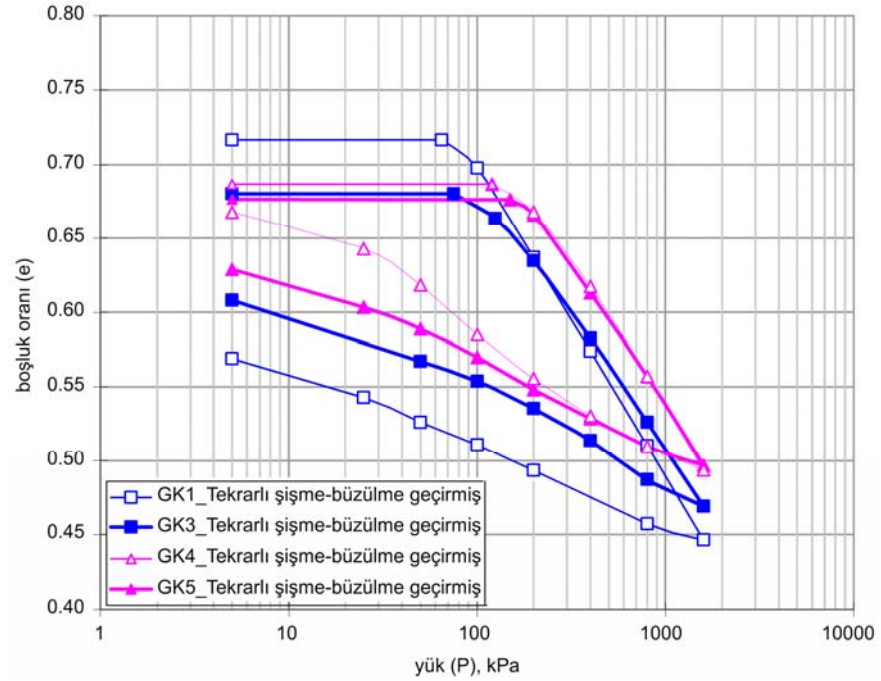
Araştırmada kullanılan 4 tane numune üzerinde hem tekrarlı şişme-büzülme döngü geçirilmeden hem de geçirdikten sonra konsolidasyon deneyi yapılmış ve tekrarlı şişme geçiren numunelerin aşırı konsolide durumdan normal duruma geçtiği görülmüş ve sıkışma miktarı artmıştır. Bu da yapının bozulduğuna dair önemli bir işarettir. Şekil 4.49'de konsolidasyon eğrilerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 3.2'de verilen şişme-büzülme kapsamında ele alınacak durumlarda a ve b durumları için yüzeye yakın, üzerinde yük olmayan durumlar için deneyler yapılmıştır. Eğer üzerinde yük olan c durumu için de bu deneyler yapılmış olsaydı bu durum için de zeminlerin nasıl sıkışacağını bilmek gerekmektedir. Genel anlamda şişme basıncı düştüğü için yük daha fazla hissedilmiş ve numuneler daha fazla sıkışmıştır.



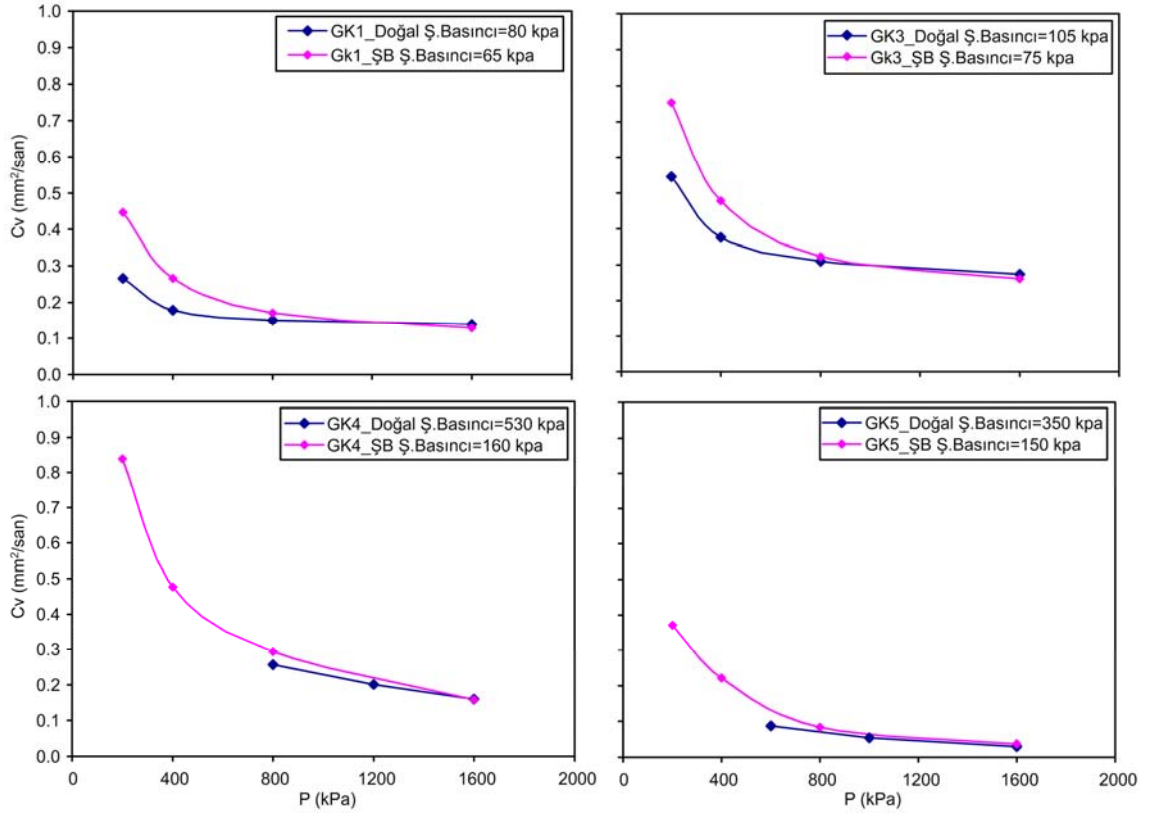
Şekil 4.49. GK1. GK2. GK4 ve GK5 numuneleri konsolidasyon deneyi karşılaştırması; a) GK1 numunesi konsolidasyon karşılaştırması b) GK3 numunesi konsolidasyon karşılaştırması c) GK4 numunesi konsolidasyon karşılaştırması d) GK5 numunesi konsolidasyon karşılaştırması

Ayrıca bir miktar boşlukların arttığı, dokunun bozulduğu ve yüke karşı direncinde azaldığı Şekil 4.49'daki tüm numunelerde görülmektedir. Özellikle yüksek şişme basıncı veren c ve d'deki numunelerin şişme basınçları çok düştüğü için eğriler çok fazla değişmiştir. Sonuçta ulaşılan nokta 4 zemin için de birbirine yakındır (Şekil 4.50) Bir diğer hususta kabarma eğrisinde eğimin sürekli azaldığıdır.

Yapının değiştiğini gösteren diğer önemli bir parameter de konsolidasyon katyası c_v 'dir (Şekil 4.51). Zamana bağlı sıkışmayı gösterir, düşük gerilmelerde şişme-büzülme geçirmiş numunelerin özellikle 400 kPa'ya kadar çok hızla sıkıştığı, bununda yapının açıkça bozulduğunun kanıtıdır. Ancak yüksek yüklerde killerin bağları yaklaşmakta killeri eski durumlarını hatırlayıp şişme-büzülme geçirmeyenle aynı noktaya ulaşmaktadır.



Şekil 4.50. GK1, GK2, GK4 ve GK5 numunelerinin tekrarlı şişme-büzülme geçirdikten sonraki konsolidasyon deneyi karşılaştırması



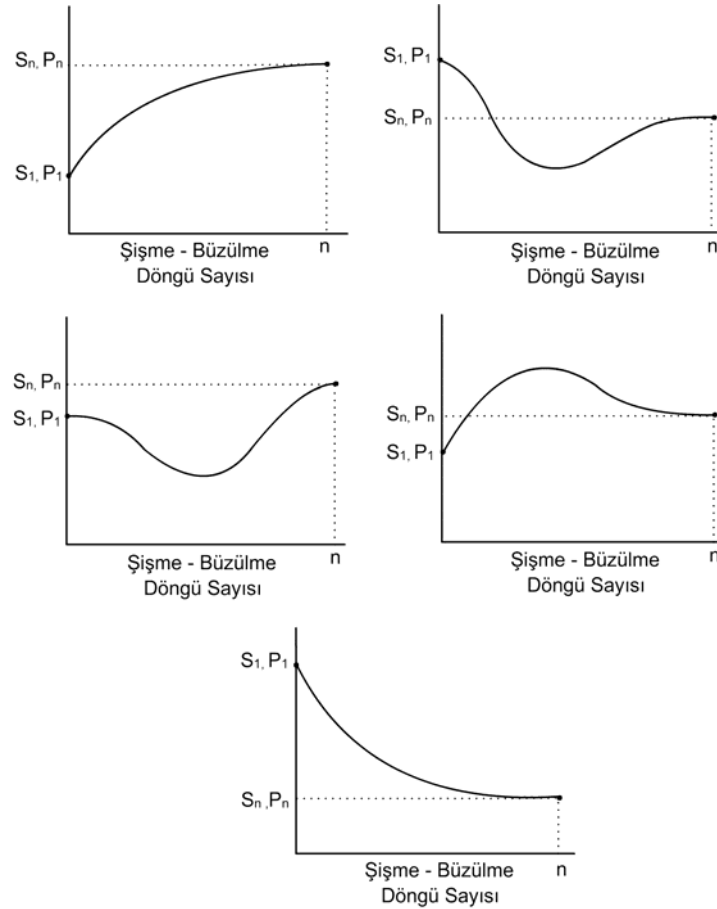
Şekil 4.51. Tüm konsolidasyon deneyi yapılmış numunelerin Yük- C_v konsolidasyon katsayısı ilişkileri (Lejanttaki ŞB tekrarlı şişme-büzülme geçirmiş numuneyi göstermektedir)

4.7. TEKRARLI ŞİŞME VE ŞİŞME BASINCI İNDEKSİ

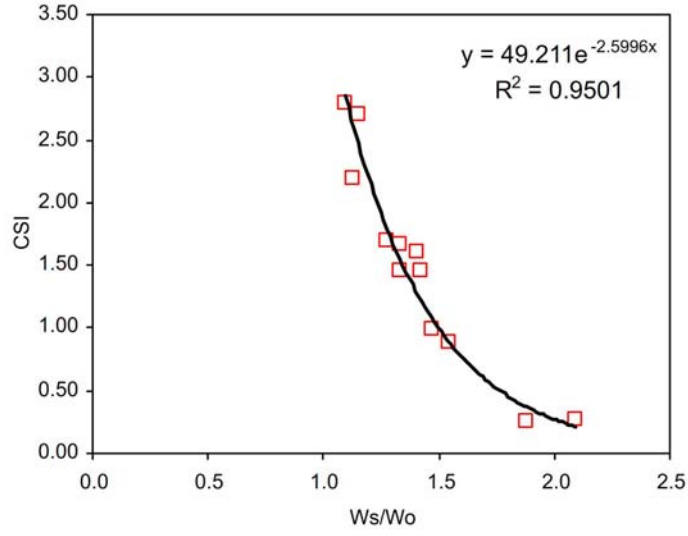
Literatürde yapılan tekrarlı şişme-büzülme çalışmalardan ve bu tezde bulunan tekrarlı şişme-büzülme sonuçlarından anlaşılacağı üzere şişme potansiyeli tekrarlı şişme büzülme sırasında azalabilmekte, artabilmekte ve de dalgalanmalar yapabilmektedir. Yani zeminin ilk şişme yüzdesi ve şişme basıncı değeri o zeminin hiçbir zaman nihai şişme yüzdesi ve şişme basıncı olmayıp azalıp artabilmektedir. Schmertmann (1969) bu olayı sadece şişme potansiyeli artan killer için şişme indeksi ya da şişme hassaslığı yaklaşımıyla açıklamaktadır. Osipov (1987), Schmertmann (1969)'un öne sürdüğü şişme indeksi tanımını K_s olarak adlandırmış ve killerin şişme yüzdelelerindeki bu değişimi killerin sahip olduğu hidrokinamik enerjiye bağlamıştır. Bu tezde Schmertmann (1969)'un öne sürdüğü fikir aynen korunup, tekrarlı şişme indeksi (Cyclic swellin index, CSI) olarak tanımlanmıştır. Ayrıca şişme potansiyeli değişimin şişme basıncı değişimiyle ilişkisi gözönüne alınıp tekrarlı şişme basıncı indeksi (Cyclic

swellin pressure index, CSPI) tanımlanmıştır. CSI tanım olarak tekrarlı şişme-büzülme deneylerinde son döngüdeki şişme yüzdesin (S_n) ilk şişme yüzdesine (S_1) oranıdır (Eşitlik 4.1). SPSI ise tekrarlı şişme-büzülme deneylerinde son döngüdeki şişme basıncının (P_n) ilk şişme basıncına (P_1) oranıdır (Eşitlik 4.3). Şekil 4.52’de tekrarlı şişme-büzülme deneyinden bulunacak 5 farklı durum için bu kavramlar gösterilmiştir.

Bu araştırmada yapılan çalışma sonucunda CSI ve CSPI’den elde edilen değerler ile çok kolay ve kısa süreli bir deneyle elde edilen standart doymun su muhtevası (w_s) ve bu değer in doğal su muhtevasına (w_o) oranından elde edilen değerler arasında çok kuvvetli bir ilişki bulunmuştur. Böylece, karmaşık bir davranış olan tekrarlı şişme-büzülme davranışı sonucunda bir kilin ulaşacağı şişme potansiyeli ve şişme basıncı değerleri elde edilerek önemli bir bulguya ulaşılmıştır. Bu ilişkiler şekil 4.53 ve 4.54’te verilmiş olup, bu korelasyonun basitleştirilmiş formülü eşitlik 4.2 ve 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.52. Tekrarlı şişme-büzülme deneyinde görülen şişme yüzdesi ve şişme basıncı eğrileri



Şekil 4.53. CSI – w_s/w_o arasındaki ilişkiyi ifade eden grafik

$$CSI = \frac{S_n}{S_1} \quad (4.1)$$

$$S_n = S_1 \left(50 \cdot e^{-2.6 \frac{w_s}{w_o}} \right) \quad (4.2)$$

S_n : Tekrarlı şişme-büzülme deneyinde n. döngüdeki şişme yüzdesi (muhtemelen nihai) (%)

S_1 : Tekrarlı şişme-büzülme deneyinde ilk döngüdeki şişme yüzdesi (%)

w_o : Başlangıç su muhtevası (%)

w_s : Ödometrede şişirilmiş numunenin maksimum doygun su muhtevası (%)

$$CSPI = \frac{P_n}{P_1} \quad (4.3)$$

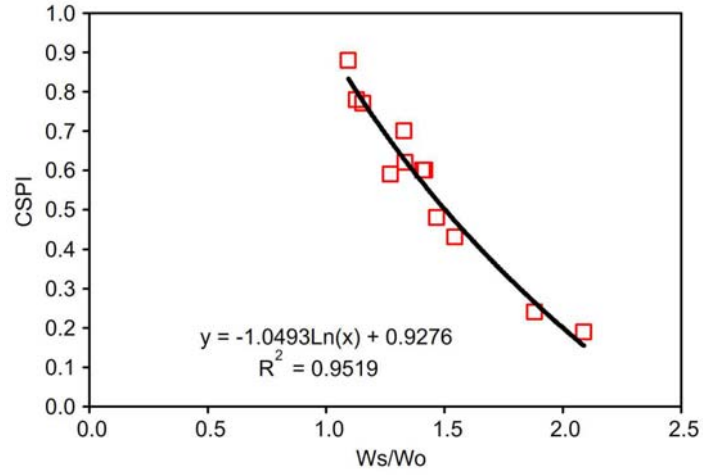
$$P_n = P_1 \left(0.93 - 1.05 \ln \frac{w_s}{w_o} \right) \quad (4.4)$$

P_n : Tekrarlı şişme-büzülme deneyinde n. döngüdeki şişme basıncı (kPa)

P_1 : Tekrarlı şişme-büzülme deneyindeki ilk şişme basıncı (kPa)

w_o : Başlangıç su muhtevası (%)

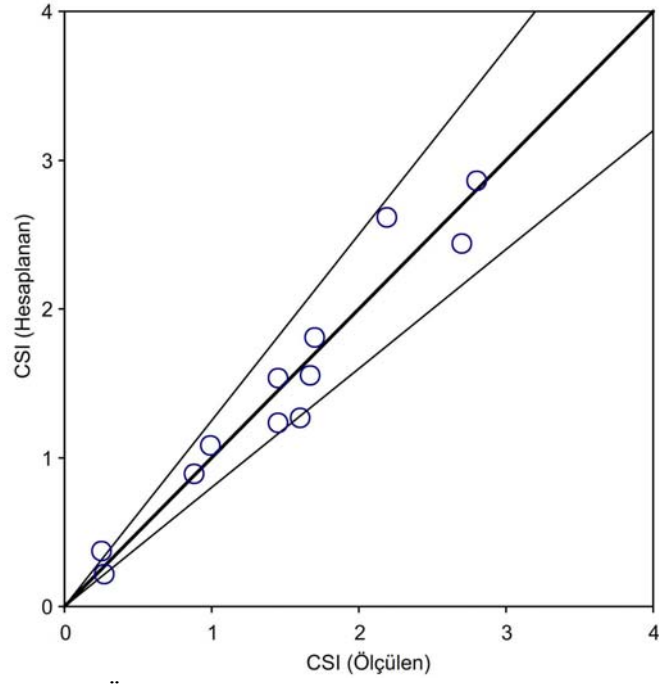
w_s : Ödometrede şişirilmiş numunenin maksimum doygun su muhtevası (%)



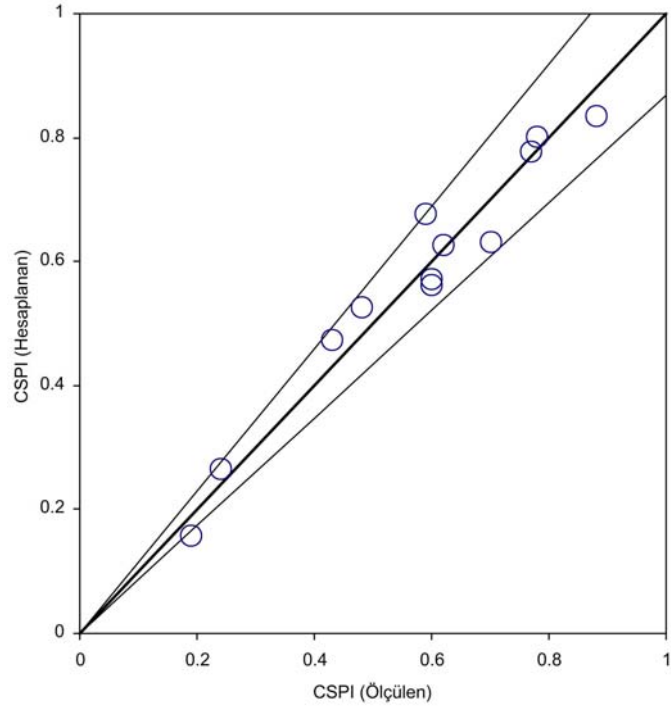
Şekil 4.54. CSPI – w_s/w_0 arasındaki ilişki

Şekil 4.55'te 1.25 güvenlik aralığı içinde şişme hassaslık indeksi CSI'nin ve Şekil 4.56'da 1.15 güvenlik aralığı içinde şişme basıncı hassaslık indeksi CSPI'nin bulunduğunu göstermektedir. Burdan da anlaşıldığı üzere eşitliklerin başarı oranı çok yüksektir. Bununla birlikte şişme- büzülme indeksi deneyinden bulunan Iss değerleriyle CSI arasında %97'lik bir korelasyon olduğu görülmektedir. Bu ilişkiye ait grafik Şekil 4.57'de verilmiştir.

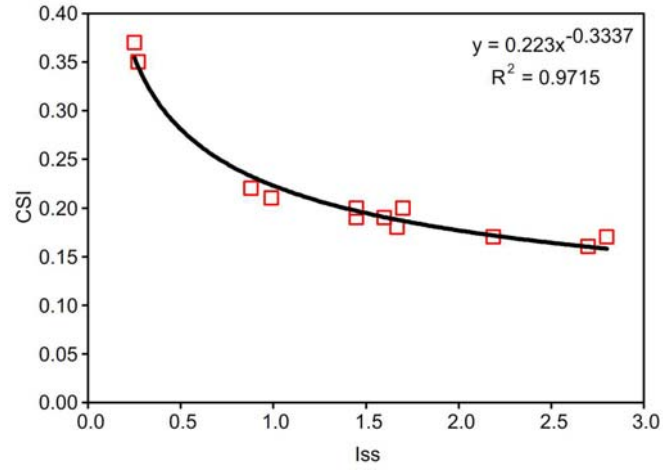
Bu araştırmadan bulunan CSI - w_s/w_0 korelasyonu literatürde tekrarlı şişme-büzülme deneyi yapan araştırmacılardan maksimum su muhtevasını vermiş olanların verilerinde uyum sağlamaktadır. Şekil 4.58'de 4 ayrı araştırmacının toplam 12 verisinin bu araştırmada bulunan CSI- w_s/w_0 korelasyonuna uyumu görülmektedir. Şekil 4.59'da ise Al-Homoud ve diğ. (1995)'in verdiği 4 ayrı numunesine ait CSPI- w_s/w_0 sonuçlarının bu araştırmada bulunan korelasyona uyumu görülmektedir.



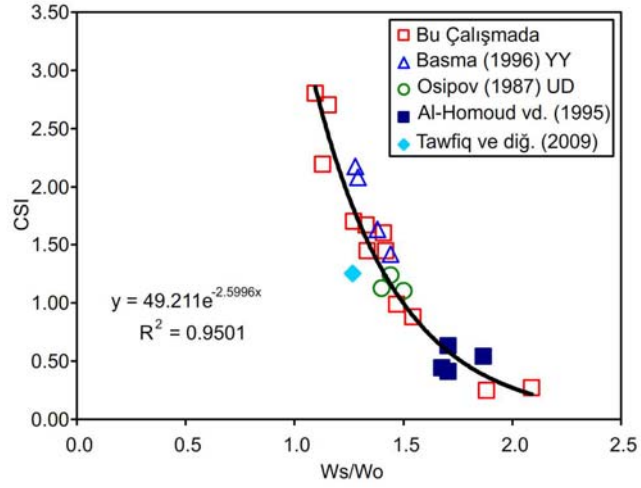
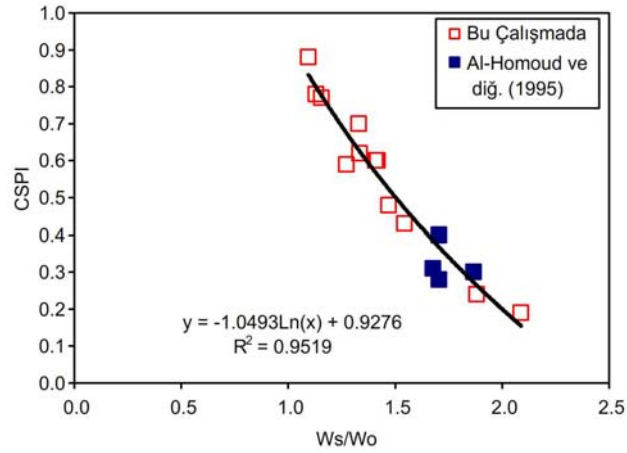
Şekil 4.55. Ölçülen ve hesaplanan CSI (1.25 güvenlik aralığı)



Şekil 4.56. Ölçülen ve hesaplanan CSPI (1.15 güvenlik aralığı)



Şekil 4.57. CSI -ISS ilişkisi

Şekil 4.58. Çeşitli araştırmacıların CSI – w_s/w_o verileri ile bu çalışmadaki verilerin uyumunu ifade eden grafikŞekil 4.59. Çeşitli araştırmacıların CSPI – w_s/w_o verileri ile bu çalışmadaki verilerin uyumunu ifade eden grafik

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Şişen zeminlerin tekrarlı ıslanma-kuruma etkilerine maruz kalması durumunda, üniform olmayan şişme-büzülme deformasyonları meydana gelmektedir. Bu deformasyonlar, bu tür zeminler üzerine oturan çeşitli mühendislik yapılarında önemli hasarlara neden olmaktadır. Özellikle az katlı yapılarda, istinat duvarlarında, bahçe duvarlarında yollardaki kilit taşlarında ve kanallarda şişmenin ve tekrarlı şişme-büzülmenin önemi büyüktür. Ülkemizde de bu tür zeminler nedeniyle çeşitli yapılarda hasarlar meydana geldiği bilinmektedir. Bununla birlikte, şişen zemin davranışı ve zemin-yapı etkileşimi, projelendirme ve uygulama aşamasında genellikle gözardı edilmektedir.

İstanbul'un batı yakasının bir bölümünde yüzeyleyen Gürpınar formasyonunun killi seviyeleri Gürpınar kili olarak adlandırılır. Gürpınar killerinde önemli boyutta şişme davranışı ortaya çıkmakta ve dolayısıyla bina duvarlarında çatlaklara, giriş ve kolonlarda yapısal hasarlara, bahçe duvarlarında önemli tahribatlara neden olmaktadır. Tahribatın ana nedeni olarak bu killerin yüksek şişme potansiyeli, dolayısıyla basınçları olsa da, bunun arkasında tekrarlı şişme-büzülme davranışı yatmaktadır. Yüksek sıcaklığın olduğu yağışsız dönemlerde yüzeye yakın kil zeminler kurumakta, büzülme ve bu etkilerle çatlamaktadır. Bu dönemi takip eden yağışlı dönemde ise zemin doygunlaşmakta ve hacim genişlemesiyle birlikte şişmektedir.

Bu özelliklerini ortaya koymak ve tanımlamak için Gürpınar kilinin yüzeylendiği 4 değişik bölgeden 5 değişik kil alınmış ve toplam 14 adet örselenmemiş ve kompaksiyon ile yeniden yapılandırılmış numune üzerinde tam kuruma-tam ıslanma olacak şekilde tekrarlı şişme-büzülme deneyleri gerçekleştirilmiş, bununla birlikte şişme-büzülme potansiyelini belirleyici deneyler de yapılmıştır. Tekrarlı şişme-büzülmenin kilin yapısı üzerindeki etkisini anlamak için numuneler şişme-büzülmeye uğramadan önce ve sonra elektron mikroskop ile görüntü analizleri, XRD analizleri, tanımlama deneyleri ve konsolidasyon deneyleri yapılarak killerde meydana gelen yapı değişikliği ortaya konmuştur.

Araştırmada kullanılan zemin numuneleri, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre sınıflandırılmıştır. Buna göre, üzerinde tekrarlı şişme-büzülme deneyi yapılan tüm numuneler yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına girmektedir. Kullanılan tüm sınıflama kartlarındaki yerleri yüksek/çok yüksek şişme bölgesinde çıkmıştır. Literatürde verilen tüm şişme potansiyeline göre sınıflandırma sistemleriyle değerlendirmeler yapılmış, çıkan değerler yüksek/çok yüksek şişme potansiyelidir. Minerolojiye göre sınıflamada en iyi sonuçları Holt (1969)'un sınıflandırma yöntemiyle Grim (1962)'den esinlenerek bulunan değerlendirme sistemleri vermiştir.

Araştırmada kullanılan GK1, GK3, GK4 ve GK5 doğal numuneleri üzerinde hem şişme-büzülme döngüi geçirmeden hem de geçirdikten sonra konsolidasyon deneyi yapılmış ve tekrarlı şişme geçiren numune aşırı konsolide durumdan normal duruma geçtiği görülmüş ve sıkışma miktarı artmıştır. Ayrıca dokunun bozulduğu ve yüke karşı direncinde azaldığı görülmüştür. Özellikle yüksek şişme basıncı veren numunelerin şişme basınçları çok düştüğü için eğriler çok fazla değişmiştir. Sonuçta ulaşılan nokta 4 zemin için de birbirine yakındır. Bir diğer husus ise kabarma eğrisinde deney sonuna doğru (eğimin azaldığı) şişmenin azaldığıdır. Yapının değiştiğini gösteren diğer önemli bir parameter de konsolidasyon katyası c_v 'dir. Düşük gerilmelerde şişme-büzülme geçirmiş numunelerin özellikle 400 kPa'ya kadar çok hızla sıkıştığı, bunda yapının açıkça bozulduğunun kanıtıdır. Ancak yüksek yüklerde killerin bağları yaklaşmakta killeri eski durumlarını hatırlayıp şişme-büzülme geçirmeyenle aynı noktada bitmektedir.

Tekrarlı şişme-büzülme sonuçlarına göre 8 ay kürlü Esenyurt GK2_YY-kürlü numunesi, kürsüz GK2_YY-kürsüz numunesi ve Kırşehir GK5a_YY-kürsüz numunelerinin şişme potansiyelleri düşerken Ambarlı GK3_UD numunesinde önemli bir artış görülmemiş, Ambarlı GK4_UD ve GK4_YY-kürsüz numunelerinde de ilk değere yakın bir sonuç çıkmıştır. Büyükçekmece'den çıkarılan GK1 numunesinde 3 doğal ve 2 tane yeniden yapılandırılan numuneyle yapılan deneylerin hepsinde şişme potansiyeli önemli miktarda artmaktadır ayrıca Kırşehir GK5a_UD, GK5b_UD ve GK5b_YY-kürsüz numunelerinde şişme potansiyelleri artmaktadır. Şişme basınçları ise genelde şişme potansiyelleriyle aynı trendi izlemektedir. Şişme potansiyeli artan killerin heyelan bölgesinde oldukları ve aşırı konsolide killeri oldukları dikkati çekmektedir. ESEM

görüntülerine bakıldığı zaman da bu killerin bağlarının zayıf olduğu, köşe-kenar kristal bağlarına sahip olduğu, bu bağların tekrarlı şişme-büzülmeden etkilendiği ve koptuğu yorumu yapılabilmektedir. Özellikle kompakte edilen Büyükçekmece numunelerinin doğal numuneleri gibi şişme potansiyellerinin giderek artması bu killerin en başta floküle yapıda olduklarını, kompaksiyonun tabakaları yataylaştırmadığı ya da kompaksiyon etkisini tekrarlı şişme-büzülmenin yok ettiği söylenebilir. Esenyurt GK2 kilinde ise şişmenin ve şişme basıncının sürekli azalmasını ESEM'lerle desteklendiği gibi kilin bağlarının paralel olarak kümелendiği, bu yüzden de stabil olduğu ve tekrarlı şişme-büzülmenin bu bağları kopartmadığı sonucuna varılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken bir konu da optimumdan kuru tarafta kompakte edilip yeniden yapılandırılan GK5a_YY-kürsüz numunesinin doğal zemininin aksine şişme potansiyelinin düştüğü görülmüştür. Optimumdan ıslak tarafta kompakte edilen zeminlerde kompaksiyonun yatay tabakalanmayı (dispers yapı) sağladığı gözlenmiştir.

Literatürde, kilin şişme-büzülmesinin artması çok değişik nedenlere bağlanmıştır. Bununla birlikte, minerolojik çalışmalara yeterince yer ayrılmamış, elektron mikroskobu görüntüleri çok kullanılmamıştır. Bu yüzden de çoğu tahmini olarak yapının değiştiğini söylemişlerdir. Örneğin, AL-Homoud ve diğ. (1995) kompakte killerin üzerinde yaptığı araştırmada tüm killerin şişme potansiyellerinin düştüğünü, buna sebep olarakta kil içeriğinin azaldığını ifade etmiştir. Bu yorum çok akla yatkın gelmemektedir. Zira, bu tez çalışmasında tekrarlı şişme-büzülme geçiren referans numuneleri dikkatli bir şekilde tülbent gibi ince taneleri tutacak bir malzeme ile sarılmazsa, kolloidal malzeme suyun içinde kalmakta ve bunun sonucu yapılan hidrometreye göre kil içeriğinin azaldığı söylenebilmektedir.

Tekrarlı şişme büzülme davranışı kilin mineralojisine, kil bağ tipine (orijinine) ve kil yapısına (köşe-kenar, paralel) bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu özellikleri kilin su tutma kapasitesini belirlemektedir. Araştırmada, bütün Gürpınar killerin illit/simektit karışık katman olduğu tespit edilmiştir. Simektit içeriğikleri zengindir. Bununla birlikte orijin ve yapıları farklılık göstermektedir. Zayıf bağlı killerin büzülme sırasında çok çatlaklı yapı gösterdiği, kil kristallerinin köşe-kenar yapıda ve çok kırıklı (küçük) olduğu görülmüştür. Bu killer tekrarlı şişme-büzülmenin etkisiyle giderek daha fazla şişme potansiyeline sahip olmaktadır. Bununla birlikte, kil bağları güçlü, daha uzun kil

kristallerine sahip killer, büzülme sırasında da daha az çatlayarak bu yapılarını dışa vurmaktadırlar. Tekrarlı şişme-büzülme sırasında da bu killer yapılarını genelde korumakta, yeni bağlar oluşturmakta, dolayısıyla şişme potansiyeli giderek azalmaktadır.

Literatürde yapılan tekrarlı şişme-büzülme çalışmalardan ve bu araştırmada bulunan tekrarlı şişme-büzülme sonuçlarından anlaşılabileceği üzere şişme potansiyeli tekrarlı şişme büzülme sırasında azalabilmekte, artabilmekte ve de dalgalanmalar yapabilmektedir. Zeminin ilk şişme yüzdesi değeri ve şişme basıncı değeri o zeminin hiçbir zaman nihai şişme yüzdesi ve/veya şişme basıncı olmayıp azalıp artabilmektedir. Schmertmann (1969)'dan yararlanılan tekrarlı şişme indeksi (CSI) ve ayrıca şişme potansiyeli değişimin şişme basıncı değişimiyle ilişkisi gözönüne alınıp tekrarlı şişme basıncı indeksi (CSPI) tanımlanmıştır.

Bu tezde yapılan çalışma sonucunda CSI ve CSPI'dan elde edilen değerler ile çok kolay ve kısa süreli bir deneyle elde edilen standart doymuş su muhtevası (w_s) ve bu değer in doğal su muhtevasına (w_o) oranından elde edilen değerler arasında çok kuvvetli bir ilişki bulunmuştur. Böylece, karmaşık bir davranış olan tekrarlı şişme-büzülme davranışı sonucunda bir kilin ulaşacağı şişme potansiyeli ve şişme basıncı değerleri elde edilerek önemli bir bulguya ulaşılmıştır.

Tekrarlı şişme-büzülmenin etkisini yok etmek için çeşitli uygulamalar yapılabilir. Kireçle stabilizasyon bunlardan biridir. Bu yöntemle tekrarlı şişme-büzülmedeki şişme potansiyeli giderek azalmaktadır. Literatürde sürşarj yüküyle deney yapan araştırmacıların sonuçlarından sürşarj yükünün şişme potansiyelini düşürdüğü görülmüştür. İstanbul Gürpınar kili gibi şişme potansiyeli yüksek zeminlerde bina yapılacaksa sürşarj yükü uygulamak, hacim değişimlerine izin vermemek adına yüksek katlı bina yapmak ya da dolgu yapmak gerekmektedir.

KAYNAKLAR

ABDULLAH, W. S., AL-ZOU'BI, M.S., ALSHIBLI, K. A., 1997. On the Physicochemical Aspects of Compacted Clay Compressibility, *Canadian Geotechnical Journal*, 34. 551-559.

ABOULEID, A.F., 1985. Foundation on swelling soils. *Proceedings, seminar on Foundation Problems in Egypt and Northern Germany*, Cairo, 4-43.

ABDULJAUWAD, S.N., AND AL-SULEIMANI, G.J., 1993. Determination of swell potential of Al-Qalif clay, *Geotechnical Testing Journal of ASTM* 16(4), p.469-484.

ALAWAJI, H. A., 1999. Swelling and compressibility characteristics of compacted sand-bentonite mixtures, *Geotechnical Engineering Journal*, 30 (1), 1-12.

AL-HOMOUD, A.S., BASMA, A.A., HUSEIN MALKAWI, A. I. AND AL BASHABSHEH, M. A. 1995. Cyclic swelling behavior of clays, *J. Geotech. Eng. Div.*, ASCE, 121(7), p.562-565.

AL-RAWAS, A. A., GUBA, I., MCGOWN, A., 1998. Geological and engineering characteristic of expansive soils and rocks in Northern Oman, *Engineering Geology*, 50. 267-281.

AL-RAWAS, A. A., MCGOWN, A., 1999. Microstructure of Omani expansive soils, *Canadian Geotechnical Engineering*, 36. 272-290.

AL-RAWAS, A. A., 1999. The factors controlling the expansive nature of the soils and rocks of Northern Oman, *Engineering Geology*, 53. 327-350.

AL-RAWAS, A.A., TAHA, R., NELSON, J.D., AL-SHAP, T.B., AND AL-SIYABI, H., 2002. A comparative evaluation of various additives used in the stabilization of expansive soils, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 25. No.2. p. 199-209.

ALLAM, M.M. AND SRIDHARAN, S., 1981. Effect of wetting and drying on shear strength, *J. Geotech. Eng. Div.*, ASCE, 107(4), p.421-438.

AL-SHAMRANI, M. A., DHOWIAN, A.W., 2003. Experimental study of lateral restraint effects on the potential heave of expansive soils, *Engineering Geology*, 69. 63-81.

ALTMAYER, W.T., 1955. Discussion of engineering properties of expansive clays, *Journal of the Soil Mech. and Found. Div.*, ASTM 81(SM2), p.17-19.

AMMANN L., 2003. *Cation exchange and adsorption on clays and clay minerals*. Submitted for the degree Dr. rer. nat. of the faculty of mathematics and natural sciences Christian-Albrechts-Universität Kiel, Germany.

ASTM C 837-99. 2003. Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay, *Annual Book of ASTM Standards*, 15.02.

ASTM D 4829-88. 1993. Standard Test Method for Expansion Index of Soils, *Annual Book of ASTM Standards*, 04.08. 1082-1085.

ASTM D 4546. (1990), Standard Test Method For One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils, *Annual Book of ASTM Standards*, 04.08.

AZAM, S., ABDULJAUWAD, S. N., AL-SHAYEA, N. A., AL-AMOUDI, O. S. B., 1998. Expansive characteristics of gypsiferous / anhydritic soil formations, *Engineering Geology*, 51. 89-107.

AZAM, S., 2003. Influence of mineralogy on swelling and consolidation of soils in eastern Saudi Arabia, *Canadian Geotechnical Journal*, 40. 964-975.

B.W. BACHE, The measurement of cation exchange capacity of soils, *Journal of the Science of Food and Agriculture* 27 (1976) (3), pp. 273–280.

BARBOUR, S.L. 1998. The soil-water characteristic curve: a historical perspective Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium, *Canadian Geotechnical Journal*, 35 (5), 873-894.

BASMA, A. A., 1993. Prediction of expansion degree for natural compacted clays, *Geotechnical Testing Journal*, 16 (4), 542-549.

BASMA, A. A., AL-SHARIF, M., 1994. Treatment of expansive soils to control swelling, *Geotechnical Engineering*, 25 (1), 3-18.

BARDEN, L., MCGOWN, A. AND COLLINS, K. 1973. The collapse mechanism in partly saturated soil, *Engineering Geology* 7. 49–60.

BELL, F.G., 1993. *Engineering Treatment of Soils*, E and FN Spon, London.

BELL FG., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology* 42:223–37.

BORCHARDT, G. 1989. Smectites, Minerals in soil environments, 2nd ed., *Soil Sci. Soc. Am. Book Ser.*, No 1. Madison, 675-727.

BRACKLEY, I.J.A., 1973. Swell pressure and free swell in a compacted clay, *Proceedings of 3rd International Conference on Expansive Clay*, Haifa, Israel, Vol. 1. 169-176.

- BRADBURY, M. H., BAEYENS, B., 2003. Porewater chemistry in compacted re-saturated MX80 Bentonite, *Journal of Contaminant Hydrology*, 61. 329-338.
- BRAJA, D., 1990. *Principle of Geotechnical Engineering*, Second Edition, pp. 10-16.
- BREWER, R., 1964. *Fabric and Mineral Analysis of Soils*, New York, John Wiley & Sons.
- CHAPMAN, H.D., 1965. Methods of soil analysis Part 2. Chemical microbiological properties, *Amer. Soc. of Agron. Inc. Publ. Agron. Series*, No. 9. Medison, Wis, USA
- CHEN, F. H., 1965. Engineering Effects of Moisture Change in Soils, *Concluding Proceedings International Research and engineering Conference on Expansive Clay Soils*. Texas A & M Press.
- CHEN, X.Q., LU, Z.W., AND HE, X.F., 1985. Moisture movement and deformation of expansive soils, *11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Vol.4. San Francisco, Calif., p. 2389-2392
- CHEN, F. H., 1988. Foundation Expansive Soils, 2nd ed. New York, *Elsevier Scientific Pub. Co.*, 280p.
- CHEN, F. H., MA, G.S., 1987. Swelling and Shrinking Behaviour of Expansive Clays, *6th International Conference on Expansive Soils*, New Delhi, India, 127-129.
- CHIAPPONE, A., MARELLO, S., SCAVIA, C., AND MASSIMO, S., 2004. Clay mineral characterization through the methylene blue test: comparison with other experimental techniques and applications of the method, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41. Issue 6. p.1168-1178.
- CHO, W. J., LEE, J. O., KONG, C. H., 2000. Influence of Temperature Elevation on the Sealing Performance of a Potential Buffer Material for a High – Level Radioactive Waste Repository, *Annals of Nuclear Energy*, 27. 1271-1284.
- CHU, T.Y., MOU, C.H., 1973. Volume change characteristics of expansive soils determined by controlled suction tests, *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, Haifa, Israel, 177-185.
- CHURCHMAN, G. J., Askary, M., Peter, P., Wright, M., Raven, M. D., Self, P. G., 2002. Geotechnical properties indicating environmental uses for an unusual Australian bentonite, *Applied Clay Science*, 20. 199-209.
- COKCA, E., 1991. *Swelling potential of expansive soils with a critical appraisal of the identification of swelling of Ankara soils by methylene blue tests*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 325 s., Ankara
- COKCA, E., 1993. Metilen Mavisi Deneyi ile Killerin Katyon Değişim Kapasitelerinin Tespiti, *VI. Ulusal Kil Sempozyumu*, 335- 344.

- COKCA, E., (2001). Use of clay C fly ashes for the stabilization of an expansive soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127. No.7. p.568-573.
- ÇOKÇA, E., 2002. Relationship between Methylene Blue Value, Initial Soil Suction and Swell Percent of Expansive Soils, *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 26. 521- 529.
- COKCA, E., BIRAND, A., 1993. Determination of Cation Exchange Capacity of Clayey Soils by the Methylene Blue Test, *Geotechnical Testing Journal*, 16 (4), 518-524.
- COX, D. W. (1978) Volume change of compacted clay fill, In: *Proceedings of Institution of Civil Engineers Conference on Clay Fills*, London, 79–86.
- DAKSHANAMURTY, V., 1978. A new method to predict swelling using a hyperbolic equation, *Geotechnical Engineering*, 9 (1), 29-38.
- DAY, R. W., 1992. Swell versus Saturation for Compacted Clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, 118 (8), 1272-1278.
- DAY RW., 1994. Shrink-swell behavior of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (3) 618–623.
- DAKSHANAMURTHY, V., RAMAN, V., 1973. A simple method of identifying expansive soil, *Soils and Foundations*, 13 (1), 97-104.
- DI MAIO, C., 1996. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects, *Geotechnique*, 46 (4), 695–707.
- DIF, A. E., BLUEMEL, W. F., 1991. Expansive soils under cyclic drying and wetting, *Geotechnical Testing Journal*, 14 (1), 96-102.
- DONTSOVA K.M., NORTON, L.D., JOHNSTON, C.T., BIGHAM, J.M., 2004. Influence of Exchangeable Cations on Water Adsorption by Soil Clays, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68. 1218-1227.
- DOS SANTOS, M.P.P. AND DE CASTRO, E., 1965. Soil Erosion in Roads, *Proceedings of the 6 International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol 1. 116-118.
- DU, Y., LI, S., HAYASHI, S., 1999. Swelling- shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China, *Engineering Geology*, 53. 351-358.
- DUDLEY, J. H. (1970) Review of collapsing soils, *Journal of Soil, Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, 96. 925–947.
- EL-SAYED, S. T., RABBAA, S. A., 1986. Factors affecting behaviour of expansive soils in the laboratory and field – a review, *Geotechnical Engineering*, 17 (1), 89-107.

EL-SOHBAY, M. A., RABBA, E. A., 1981. Some factors affecting of clayey soils, *Geotechnical Engineering*, 12 (1), 19-39.

EL-SOHBAY, M. A., MAZEN, O., 1983. Mineralogy and swelling of expansive clayey soils, *Geotechnical Engineering*, 14 (1), 79-87.

EMERSON, W.W., 1964. The slaking of soil crumbs as influenced by clay mineral composition, *Australian Journal of Soil Research*, 2. 211-217.

ENTWISLE, D., KEMP, S., 2003. Specific Surface Area: An Aid to Identify Some Problem Soils, *International Conference on Poblematic Soils*, Nottingham, United Kingdom. 235-242.

EROL, O., DHOWIAN, A., 1990. Swell behavior of arid climate shales from Saudi Arabia, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 23. 243-254.

FREDLUND, D.G., XING, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 31. 521-532.

FOSS, I. (1973) Red soil from Kenya as a foundation material, *Proceedings 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, Vol. 2. 73–80.

GABRIEL, K., AND RAPHAEL, B., 1971. Aging effects on swell potential of compacted clay, *J. Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, 97(3), p.529-540.

GENS, A. AND ALONSO, E.E., 1992. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 29. 1013-1032.

GILCHRIST, H.G., 1963. *A study of volume change of a highly plastic clay*, M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 215 p.

GRABOWSKA-OLSZEWSKA, B. 1970. Physical Properties of Clay Soils as a Function of Their Specific Surface, *Proceedings of the 1st International Congress of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 1. 405-410.

GRAY, C.W., ALLBROOK, R., 2002. Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils, *Geoderma*, 108. 287-299.

GRIM, R.E., 1962. *Applied Clay Mineralogy*. McGraw Hill Book Co. NewYork, 422p.

GRIM, R.E., 1974. *Clay mineralogy*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.

GROMKO, G.J., 1974. Review of expansive soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 100 (6), 667–687.

- GIZIENSKI, S. F., AND LEE, L. J. (1965). "Comparison of Laboratory Swell Tests to Small Scale Field Tests. " Engineering Effects of Moisture Changes in Soils; *Concluding Proc., Int. Res. And Engrg. Conf. On Expansive Clay Soils*, Texas A&M Press, College Station, Tex., 108-119.
- GULLA, G., MANDAGLIO., M.C., MORACI, N., 2006. Effect of Weathering on the Compressibility and Shear Strenght of a Natural Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 43.618-625.
- GUNEY, Y., SARI, D., CETIN, M., TUNCAN, M., 2007. Impact of Cyclic Wetting-Drying on Swelling Behavior of Lime-Stabilized Soil, *Science Direct*, 42. 681-688.
- HAMBERG, D.J. AND NELSON, J.D., 1985. Prediction of flor slab heave, *Proceedings of the 5th Int. Conf. on Expansive Soils*, 1. p.137-140.
- HANAFY, E.A.D.E., 1991. Swelling / Shrinkage Characteristics Curve of Desiccated Expansive Clays, *Geotechnical Testing Journal*, 14 (2), 206-211.
- HANG, P.T. AND BRINDLEY, G.W., 1970. Methylene Blue Absorption by Clay Minerals. Determination of Surface Areas and Cation Exchange Capacities. *Clays and Clay Minerals*, 18. 203-212.
- HEAD, K H., 1992. Manual of Soil Laboratory Testing, I, *Soil Classification and Compaction Tests*, Pentech Press London.
- HERRIN, M., MITCHELL, H., 1961. Lime-soil Mixtures. *Highway Research Board Bulletin-* 304. pp. 99-138
- HOLTZ, W. G., GIBBS, H. J., 1956. Engineering Properties of Expansive Clays, *ASCE Transactions*, 121. 641-663.
- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D., 1981. *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 733 p.
- HOUSTON, S. L. AND HOUSTON, W. N. (1988) Prediction of field collapse of soils due to wetting, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 114. 40–58.
- HUANG, S., 1994. Evaluation and Laboratory Measurement of the Coefficient of Permeability in Deformable Unsaturated Soils, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 317 p.
- INDIAN STANDARDS, IS 2720. 1977. Determination of free swell index of soils, *Methods of test for soils*, Part 40.
- ISRM, 1983. Characterization Of swelling rock.
- INGLES, O.G., 1968. Soil Chemistry Relevant to the Engineering Behaviour of Soils. *Soil Mechanics Selected Topics*, Elsevier, NewYork , 1-57.

JONES, D.A. AND JONES, K.A., 1987. Treating expansive soils, Civil Engineering, V. 57. N. 8. ASCE.

JONES, D. E., HOLTZ, W. G., 1973. Expansive Soils-The Hidden Disaster, Civil Engineering-ASCE, 49-51.

JULLIEN, A., PROUST, CH., LE FORESTIER, L., BAILLIF, P., 2002. Hydro-chemio-mechanical coupling effects on permeability and swelling behaviour of a Ca smectite soaked by Cu solutions, Applied Clay Science, 21 (3-4), 143-153.

JUSTO, J.L., DELAGADO, A., RUIZ, J., 1984. The influence of stress-path in the collapse swelling of soils at the laboratory, Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils. Adelaide, South Australia, 67-71.

KACZYŃSKI, R., GRABOWSKA-OLSZEWSKA, B., 1997. Soil mechanics of potentially expansive clays in Poland, Applied Clay Science, 11. 337-355.

KARATHANASIS, A.D., HAJEK, B.F., 1985. Shrink– swell potential of montmorillonitic soils in udic moisture regimes, Soil Sci. Soc. Am. J., 49. 159 – 166.

KARIUKI, P. C., VAN DER MEER, F., 2003. Issues of effectiveness in empirical methods for describing swelling soils, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 4. 231-241.

KARIUKI P.C., VAN DER MEER F., SIDERIUS, W., 2003. Classification Of Soils Based On Engineering Indices And Spectral Data, Int. J. Remote Sensing, 24 (12), 2567–2574.

KARIUKI, P. C., VAN DER MEER, F., 2004. A unified swelling potential index for expansive soils, Engineering Geology, Vol 72 (1-2), 1-8.

KASSIFF, G., LIVNEH, M., AND WISEMAN, G., 1969. Pavements on expansive clays, Jerusalem Academic Press, Jerusalem, Israel.

KELLER, W. D., 1964. The origin of high-alumina clay minerals, Proceedings of the 12th National Conference on Clays and Clay Minerals, Macmillan Company, New York, 129-151.

KEREN, R. AND I. SHAINBERG. 1975. Water vapor isotherms and heat of immersion of Na-Ca montmorillonite systems, I. Homoionic clay, Clays and Clay Minerals, 23. 193-200.

KESKIN, S.N., YILDIRIM, H., ANSAL, M.A., 1992. Killi zeminlerde yanal şişme davranışları, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi, İstanbul, 14-30.

KESKIN, S.N., 1993. İstanbul neojen kilininin şişme davranışına, ön konsolidasyonun, mineralojik özelliklerin ve çevresel faktörlerin etkisi, Doktora Tezi, İTÜ, Fen bilimleri Enstitüsü, 152 p.

KOMINE, H., OGATA, N., 1994. Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, *Canadian Geotechnical Journal*, 31. 478-490. Komine, H., Ogata, N., 1996. Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite, *Canadian Geotechnical Journal*, 33. 11-22.

KRAHN, J., FREDLUND, D.G., 1972. On Total Matric and Osmotic Suction, *Journal of Soil Science*, 114 (5), 339-348.

KRUMBEIN, W.C., AND SLOSS, L.L., 1963. *Stratigraphy and sedimentation*, 2nd ed., Department of Geology, Northwestern University.

Laird, D.A., 2006. Influence of layer charge on swelling of smectites. *Applied Clay Science*. 34. 74-87.

LAMBE, T.W., 1958. The engineering behavior of compacted clay, *ASCE J. Soil Mech., Found. Div.*, Vol.84. SM2. No.1655. p.1-35

LAMBE, T.W., 1960. The Character and Identification of Expansive Soils, *Soil PVC Meter*, Federal Housing Administration, Technical Studies Program, FHA 701.

LAMBE, T.W., 1962. Soil stabilization chapter four of foundation engineering, G.A. Leonards (ed), McGraw-Hill, New York.

LAMBE, T. W. AND WHITMAN, R. V., 1959. The role of effective stress in the behaviour of expansive soils, *Quarterly of Colorado School of Mines*, Vol.54. No.4. p.33-61.

LAMBE, T.W., AND WHITMAN, R.V., 1969. *Soil mechanics*, New York (Wiley).

LANCELLOTTA, R., 2009, *Geotechnical Engineering*, Taylor & Francis, 2nd edition.

LAW, M. A., VE ANSAL, A. M., 1991. Killi Zeminlerde Şişme Basıncının Ampirik Olarak Bulunması, 5. Ulusal Kil Sempozyumu, shf. 318-329.

LAWTON, E. C., FRAGASZY, R. J. AND HARDCASTLE, J. H. (1989) Collapse of compacted clayey soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 115. 1252–1267.

LIKOS, W. J., LU, N., 2003. Filter Paper Column for Measuring Transient Suction Profiles in Expansive Clay, *TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM*.
http://www.ltrc.lsu.edu/TRB_82/TRB2003-000509.pdf

LITTLE DN, MALES EH, PRUSINSKI JR, STEWART B., 2000. Cementitious stabilization, *Transportation in the New Millennium: Perspectives from TRB Standing Committees*. Committee A2J01. Committee on Cementitious Stabilization. TRB. National Research Council. Washington, DC, CDROM, 2000.

LOW, P.F. AND J.F. MARGHEIM. 1979. The swelling of clay: I. Basic concepts and empirical equations, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43. 473-481.

LOW, P.F., 1980. The Swelling of Clay: II. Montmorillonite, *Soil Science Society of America Journal*, 44 (4), 667-676.

LOW, P.F. 1981. The swelling of clay: III. Dissociation of exchangeable cations, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45. 1074-1078.

LOW, P.F., 1992. Interparticle forces in clay suspensions: flocculation, viscous flow and swelling, *Proceedings of the 1989 Clay Minerals Society Workshop on the Rheology of Clay/Water Systems*.

LUCKHAM, P.F. AND S. ROSSI., 1999. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions, *Adv. Coll. Int. Sci.* 82. 43 - 92.

MCBRIDE, M.B. 1989. Surface chemistry of soil minerals, *Minerals in soil environments*, 2nd ed, *Soil Sci. Soc. Am. Book Ser*, No. 1. Madison, WI. 35-88.

MCCORMACK, D.E., WILDING, L.P., 1975. Soil properties influencing swelling in Canfield and Geeburg soils, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39. 496-502.

MEUNIER, A., 2005. *Clays*, Springer Berlin Heidelberg, Germany, 3-504-21667-7.

MESRI, G., AND OLSON, R.E., 1971. Mechanisms controlling the permeability of clays, *Clays and Clay Minerals*, 19. 151 - 158.

MITCHELL, J. K., 1960. "Fundamental Aspects of Thixotropy of Soils," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divison., ASCE*, Vol. 86. No. SM 3. pp. 19-52.

MITCHELL, J.K., 1993. *Fundamentals of Soil Behavior*, 2nd ed., John Wiley, New York.

MITCHELL, J.K., 1976. *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 422p.

MONTES-H, G., DUPLAY, J., MARTINEZ, L., GERAUD, Y., ROUSSET-TOURNIER, B., 2003. Influence of interlayer cations on the water sorption and swelling-shrinkage of MX80 bentonite, *Applied Clay Science*, 23. 309-321.

MORGENSTERN, N.R. AND BALASUBRAMANIAN, B.I., 1980. Effects of Pore Fluid on the Swelling of Clay-Shale, *Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils*, Vol.1. 190-205.

MOWAFY, Y.M., BAUER, G.E., SAKAB, F.H., 1985. Treatment of expansive soils: a laboratory study, *Transportation Research Record*, 1032. 34-39.

NELSON J.D, MILLER, D.J., 1992. *Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering*, John Wiley & Sons, Inc. New York.

NELSON, J. D. AND MILLER, D. J. (1991) *Expansive Soils – Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*, John Wiley & Sons, New York.

NOBLE, C.A., 1966. Swelling measurements and prediction of heave for lacustrine clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 3 (1), 32-41.

NORDQUIST, E.C., BAUMAN, R.D., 1967. Stabilization of expansive Mancos shale, *Proceedings of 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, Vol. 1. 43-49.

OBERMEIER, S.F., 1973. Evaluation of laboratory techniques for measurement of swell potential of clays, *Proceedings of Workshop on Expansive Clays and Shales*, Denver, 1. 214-247.

OHRI, M.L., 2003. Swelling Pressure of Clays and Its Control, *International Conference on Problematic Soils*, Nottingham, United Kingdom, Vol. 2. 427- 433.

OLOO, S.Y., FREDLUND, D.G., 1995. Matric Suction Monitoring in an Expansive Soil Subgrade in Kenya, *1st Int. Conf. on Unsaturated Soils UNSAT 95*. Paris, France, Vol. 2. 631-636.

OLSEN, H.W., KROSLEY, L., NELSON, K., CHABRILLAT, S., GOETZ, A., AND NOE, D. C., 2000. Mineralogy-swelling potential relationship for expansive soils, *Advances in unsaturated geotechnics*, C. Shackelford et al., eds., ASCE, *Geotechnical Special Publication*, No. 99. ASCE, New York, p.361-378.

OSIPOV, V.I., 1979. Nature of strength and deformation properties of clayey soils and rocks, Moscow University Publishing House, p.58-102.

OSIPOV, V.I., BIK, N.N., AND RUMJANTSEVA, N.A., 1987. Cyclic swelling of clays, *Applied Clay Science*, Amsterdam, The Netherlands, 2(7), p.363-374.

OWEISS, I. AND BOWMAN, J., 1981. Geotechnical considerations for construction in Saudi Arabia, ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 107. p.319- 338.

PARKER, J.C., AMOS, D.F., KASTER, D.L., 1977. An evaluation of several methods of estimating soil volume change, *Soil Soc. Am. J.*, 41. 1059– 1064.

PARKER, J.C., L.W. ZELAZNY, AND D.F. AMOS. 1980. Swelling components of compacted Ca-montmorillonite, *Clays and Clay Minerals*, 28. 135-141.

PARKER, J.C., D.F. AMOS, AND L.W. ZELAZNY. 1982. Water adsorption and swelling of clay minerals in soil systems, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46. 450-456.

PARASHAR, S. P., WONG, K. S., AND CHOA, V., 1969. Swell-Shrink Behaviour of Compacted Clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 385-386.

- PARASHAR, S.P., WONG, K.S., AND CHOA, V., 1994. Swell-shrink behavior of compacted clay, Discussion, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, pp.385-387.
- PETERSEN, L.W., MOLDRUP, P., JACOBSEN, O.H. AND ROLSTON, D.E., 1996. Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties, *Soil Science*, 161 (1), 9 - 21.
- PIDGEON, J.T., 1987. The prediction of differential heave for design of foundations in expansive soil areas, *Proceedings of 9th African Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Lagos, 117-128.
- POPESCU, M. E., 1980. Behavior of expansive soils with crumb structures, *Proceedings of 4th International Conference on Expansive Soils*, Denver, Vol. 1. 158-171.
- POPESCU, M. E. 1986 A comparison between the behaviour of swelling and collapsing soils, *Engineering Geology*, 23. 145–163.
- PRAKASH, K., AND SRIDHARAN, A., 2004. Free swell ratio and clay mineralogy of finegrained soils, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.27. No.2. p.220-225.
- PRUSINSKI JR, BHATTACHARJA S., 1999. *Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils*. In: Transportation Research Record 1652. TRB. Washington, DC, National Research Council;. p. 215–22.
- RAHIMI, H., BAROOTKOOB, S. H., 2002. Concrete canal lining cracking in low to medium plastic soils, *Irrigation and Drainage*, 51. 141-153.
- RAMAN, V., 1967. Identification of expansive soils from the Plasticity and the Shrinkage Index Data, *Indian Engineering*, 11. 17–22.
- RAO, K.S.S., TRIPATHY, S., 2003. Effect of Aging on Swelling and Swell – Shrink Behaviour of a Compacted Expansive Soil, *Geotechnical Testing Journal*, 26 (1), 1-11.
- RAO, S. K., RAO, S. M., AND GANGADHARA, S., 2000. Swelling Behavior of a Desiccated Clay
- RAO, S. M., REDDY, B. V. V., MUTTHARAM, M., 2001. The impact of cyclic wetting and drying on swelling behaviour of stabilized expansive soils, *Engineering Geology*, 60. 223-233.
- RAO, S. M. AND REVANASIDDAPPA, K. (2000) Role of matric suction in collapse of compacted clay soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 126. 85–90.
- RAO, S. M. AND REVANASIDDAPPA, K. 2006. Influence of cyclic wetting drying on collapse behaviour of compacted residual soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 24: 725–734

- RICHARDS, B.G., PETER, P., MARTIN, R., 1984. The determination of volume change properties in expansive soils, *Proceedings 5th I.C.E.S. Adelaide*, 179-186.
- RING, W. G., 1966. "Shrink-Swell Potential of Soils," Highway Research Record No. 119. *National Academy of Sciences– National Research Council Publication*, No. 1360. Washington, DC, pp. 17–21.
- ROSS, G.J., 1978. Relationships of Specific Surface Area and Clay Content to Shrink-Swell Potential of Soils Having Different Clay Mineralogic Compositions, *Canadian Journal of Soil Science*, 58. 159-166.
- SABTAN A.A. 2005. Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25. 747–757.
- SCHAFER, W.M. AND M.J. SINGER. 1976. Influence of physical and mineralogical properties on swelling of soils in Yolo County, California. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40. 557-562.
- SCHMERTMANN, I.H., 1969. Swelling sensitivity. *Geotechnique*, 19, 530-534.
- SCHREINER, H.D. 1988. Identification and classification of expansive soils, *Proc. 6th Intl. Conf. on Expansive Soils*. New Dehli, p. 23-29.
- SEED, H.B., CHAN, C.K., 1959. Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE*, 85 (5), 87- 128.
- SEED H. B., WOODWARD R. J., LUNGREEN R., 1962. Predicting of swelling potential of compacted clay, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE*, 88 (3), 53-87.
- SHANKER, N.N., RAO, A.S, SWAMY, A.S.R., 1982. Swelling behaviors of undisturbed and remolded samples of black cotton clay, *Indian Geotechnical Journal*, 12 (2), 152-159.
- SHARMA, R.S., 1998. *Mechanical behaviour of unsaturated highly expansive clays*, PhD Disertation, University of Oxford, UK.
- SHARMA, R.S., WHEELER, S.J., 2000. Behaviour of an Unsaturated Highly Expansive Clay During Cycles of Wetting and Drying, *UNSAT-ASIA*, 721-726.
- SHI, B., JIANG, H., LIU, Z., FANG, H. Y., 2002. Engineering geological characteristic of expansive soils in China, *Engineering Geology*, 67. 63-71.
- SHUAI, F. 1996. *Simulation of swelling pressure. measurements on expansive soils*, Ph.D. Disertation, University of Saskatchewan, Canada.
- SIKH, T. S., 1993. Swell potential versus overburden pressure, *Geotechnical Testing Journal*, 16 (3), 393-396.

SIVAPULLAIAH, P. V., SITHARAN, T. G., SUBBA RAO, K. S., 1987. Modified free swell index for clays, *Geotechnical Testing Journal*, 10 (2), 80-85.

SIVAPULLAIAH, P. V., SRIDHARAN, A., STALIN, V. K., 1996. Swelling behaviour of soil bentonite mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, 33. 808-814.

SIVAPULLAIAH, P.V., SAVITHA, S., 1999. Index properties of illite- bentonite mixtures in electrolyte solutions, *Geotechnical Testing Journal*, 22 (3), 257-265.

SIYAHİ, B. G., HEKİMOĞLU, S., VE ANSAL, A. M., 1996. Sıkıştırılmış Kil Zeminin Tekrarlı Şişme Davranışı, 6. *Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi*, shf. 179 188

SKEMPTON, A. W., 1953. The Colloidal Activity of Clay, *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, Vol. 1. 57-61.

SNETHEN, D.R., 1984. Evaluation of expedient methods, for identification and classification of potentially expansive soils, *Proceedings, 5th International Conference on. Expansive Soils*, Adelaide, Australia, 22-26.

SOEMITRO, R.A.A., INDARTO. 2000. Swelling Characteristics of Compacted Clayey Soils Related to Their Wetting Curves, *UNSAT-ASIA*, 727-730.

SPOSITO, G. 1973. Volume changes in swelling soils, *Soil Science*, 115. 315-320.

SPOSITO, G., PROST, R., 1982. Structure of water adsorbed on smectites, *Chem. Rev.* 82. 553–573.

SRIDHARAN, A., RAO, S. M., 1988. A Scientific basis for the use of index tests in identification of expansive soils, *Geotechnical Testing Journal*, 11 (3), 208- 212.

SRIDHARAN, A., Y. GÜRTÜĞ., 2003. Swelling behaviour of compacted fine-grained soils, *Elsevier Engineering Geology*, 72. 9 – 18 .

SRIDHARAN, A., RAO, S.M., MURTHY, N. S., 1985. Free swell index of soils: A need for re-definition, *Indian Geotechnical Journal*, 15. 94-95.

SRIDHARAN, A., RAO, A. S., SIVAPULLAIAH, P. V., 1986. Swelling pressure of clays, *Geotechnical Testing Journal*, 9 (1), 24-33.

SRIDHARAN, A., RAO, S. M., SASHI, S., 1990. Classification of expansive soils by sediment volume method, *Geotechnical Testing Journal*, 13 (4), 375-380.

SRIDHARAN, A., PRAKASH, K., 1998. Mechanism controlling the shrinkage limit of soils, *Geotechnical Testing Journal*, 21 (3), 240-250.

SRIDHARAN, A., PRAKASH, K., 2000. Classification procedures for expansive soils, *P I Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 143. 235-240.

SRIDHARAN, A., CHOUDHURY, D., 2002. Swelling pressure of sodium montmorillonites, *Geotechnique*, 52 (6), 459-462.

STALIN, V.K., LAKSHMI, G.A., PACHAIYAPPAN, K., 2003. Effect of Acid Rain on the Index and Strength Properties of Swelling Soils. *International Conference on Problematic Soils*, United Kingdom, Vol. 2. 503-506.

SUBBA RAO, K.S., AND SATYDAS, G.G., 1987. Swelling potential with cycled of swelling and partial shrinkage, *6th Int. Conf. On Expansive Soils*, Vol. 1. New Delhi, India, p.137-142.

TADEPALLI, R. AND D.G. FREDLUND, 1991. The collapse behavior of a compacted soil during inundation. *Can. Geotech. J.*, 28: 447-488.

TAWFIQ, S. VE NALBANTOGLU, Z., 2009. Swell-Shrink Behavior of Expansive Clays, *2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 28-30 May 2009. Near East University, Nicosia, North Cyprus

TERZAGHI, K. 1927. Soil classification for foundation purposes, *Trans. 1 Intl. Cong. Soil Science*, 4. 127-157.

TERZAGHI, K., 1931. The influence of elasticity and permeability on the swelling of two-phase systems, *Colloidal Chemistry*, 3. 65-88.

THOMAS, P.J., 1998. *Quantifying Properties and Variability of Expansive Soils in Selected Map Units*, PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.

THOMAS, P. J., BAKER, J. C., ZELAZNY, HATCH D. R. , 2000. Relationship of map unit variability to shrink–swell indicators, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol 64. 262-268.

THOMAS, P. J., BAKER, J. C., ZELAZNY, L. W., 2000. An expansive soil index for predicting shrink-swell potential, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64. 268-274.

TRIPATHY S, SUBBA RAO KS, FREDLUND DG., 2002. Water content- void ratio swell–shrink paths of compacted expansive soils. *Can Geotech J* 39:938–959

TRIPATHY, S ., RAO, K.S.S., 2008. Cyclic Swell – Shrink Behaviour of a Compacted Expansive Soil, *Geotechnical and Geological Engineering*, 27. 89-103.

TSIAMBAOS G., 1988. *Engineering geological characteristics of Iraklion marls*. Ph. D. Thesis (in Greek), University of Patras, Greece: 358p.

TSIAMBAOS G., 1990. Correlation of mineralogy and index properties with residual strength of Iraklion marls. *Engineering Geology*, Vol. 30: 357-369.

TÜRKÖZ, M., VE TOSUN, H., 2009. Sıkıştırılmış kil zeminlerin şişme yüzdesi ve basıncının tahmininde metilen mavisi kullanımı, *14. Ulusal Kil Sempozyumu*, 1-3 Ekim 2009. KTÜ, Trabzon-Türkiye

U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, Natural Resources Conservation Service, 2005. National Soil Survey Handbook, title 430-VI. [Online] Available: <http://soils.usda.gov/technical/handbook/>

VAN DER MERWE, D.H., 1964. The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils, *Civil Engineers in South Africa*, 6. 103– 107.

VAN OLPHEN, H., 1963; “An Introduction to Clay Colloid Chemistry”, Interscience Publ., New York.

VERWEY, E. J. W., OVERBEEK, J.T.G., 1948. Theory of the Stability of Lyophobic Colloids, Elsevier Scientific , New York.

VIANI, B.E., LOW, P.F., ROTH, C.B. 1983. Direct measurement of relation between interlayer force and interlayer distance in the swelling of montmorillonite, *J. Colloid. Interface Sci.*, 96. 229- 244.

VOGT, D., 2002. Lecture Notes, Introduction to Soils, University of Washington. www.cfr.washington.edu/classes/esc.210

WISEYESEKERA, D.C., 2003. Cation Exchange Capacity and Swelling Characteristics of Geosynthetic Clay Liners, *International Conference on Problematic Soils*, Nottingham, United Kingdom, Vol. 2. 553-560.

WOOLTORTON, F.L.D., 1954. The scientific basis of road design. Edward Arnold Publishers Ltd. London.

YALÇIN, M., 1997. *Kirlilik şartlarının bentonit kilinin şişme/büzülme özelliklerine etkisi*, Yüksek Lisans, Anadolu Üniversitesi

YONG, R. N., WARKENTIN, B. P., 1975. Soil properties and behaviour, *Elsevier Scientific*, Amsterdam, 449 p.

YOUNG AND WARKENTIN, B.P., 1996. *Introduction to soil behavior*, Chapter 7. Macmillan, New York, p.151-175.

YULE, D.F., RITCHIE, J.T., 1980. Soil shrinkage relationships of Texas vertisols: 1 small cores, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44. 1285– 1291.

YUKSELEN, Y., KAYA, A., 2008. Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. *Engineering Geology Elsevier*, 102. 38–45

ÖZGEÇMİŞ

Mert ÖZKAN, 1982’de İstanbul’da doğdu. Büyükçekmece Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi’nden mezun olduktan sonra, 2000 yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü’ne girdi. Buradan 2004 yılında mezun oldu. 2003 yılında girdiği Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi İşletme bölümüne halen devam etmektedir. Halen 2005’te girdiği İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans programını sürdürmektedir.