



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**KİLLERİN ŞİŞME – BÜZÜLME DAVRANIŞI ve MİKRO YAPI ile
İLİŞKİLENDİRİLMESİ**

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK
II. DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Erdem DAMCI
Sinem TOSUN**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Ağustos, 2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Sinem TOSUN tarafından, **Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK** danışmanlığında hazırlanan "**KİLLERİN ŞİŞME – BÜZÜLME DAVRANIŞI ve MİKRO YAPI ile İLİŞKİLENDİRİLMESİ**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **28/08/2023** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK	☐
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. S. Feyza ÇİNİCİOĞLU	☐
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Suat AKBULUT	☐
	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. İlknur BOZBEY	☐
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Berrak TEYMUR	☐
	İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Kabul ☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Sinem TOSUN



Babam Merhum Mehmet ŞENOĞLU'na ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

KİLLERİN ŞİŞME – BÜZÜLME DAVRANIŞI ve MİKRO YAPI ile İLİŞKİLENDİRİLMESİ

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon
Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: FDK 2019-31477

TEŞEKKÜR

Tezi hazırlanmamdaki yardımlarından dolayı Danışman hocam Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK’a ve ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Erdem DAMCI hocama ve her türlü desteğini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Ağustos 2023

Sinem TOSUN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TEZ KABUL VE ONAYI	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ.....	xiv
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xvi
ÖZET	xviii
ABSTRACT	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	3
2.1. KİLLER HAKKINDA GENEL BİLGİ	3
2.1.1. Kil Mineralleri.....	4
2.2. ŞİŞME YÜZDESİ.....	10
2.3. ŞİŞME MEKANİZMASI VE SU MOLEKÜLLERİ	12
2.4. ŞİŞME DAVRANIŞINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER.....	14
2.4.1. Şişme Potansiyelini Etkileyen Zemin Özellikleri	15
2.4.2. Şişme Potansiyelini Etkileyen Çevresel Faktörler	16
2.4.3. Şişme Potansiyelini Etkileyen Stres Koşulları	17
2.5. ŞİŞEN ZEMİNLERİN TANIMLANMASI.....	18
2.5.1. Serbest Şişme Deneyi.....	20
2.5.2. Serbest Şişme İndeksi (FSR).....	21
3. YÖNTEM	23
3.1. GELİŞTİRİLEN ŞİŞME – BÜZÜLME CİHAZI.....	24
3.2. ARAŞTIRMADA KULLANILAN KİLLERLE İLGİLİ BİLGİLER	26
3.3. ŞİŞME – BÜZÜLME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.....	28
3.3.1. Serbest Şişme Oranı Belirleme Deneyleri.....	28
3.4. TEKRARLI ŞİŞME – BÜZÜLME DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ.....	28
3.4.1. Numunelerin Hazırlanması ve Tanımlanması.....	28

3.4.2. Tekrarlı Şişme – Büzülme Deneyi	31
4. BULGULAR	33
4.1. TEKRARLI ŞİŞME – BÜZÜLME DENEYLERİ	35
4.1.1. Ambarlı Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları	35
4.1.2. Hadımköy Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları.....	48
4.1.3. Çatalca Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları.....	56
4.1.4. Zeytinburnu Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları.....	57
4.1.5. Zeytinburnu Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları.....	59
4.1.6. Avcılar Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları.....	61
4.1.7. Zeytinburnu Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları.....	64
4.1.8. Silivri Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları.....	66
4.1.9. Silivri Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları.....	68
4.1.10. Fatih Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları	71
4.1.11. Bağcılar Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları	72
4.1.12. Bağcılar Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları	74
4.2. TEKRARLI ŞİŞME – BÜZÜLME DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	75
4.3. TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME İNDEKSİ	83
4.4. KİL YAPISININ TAHMİNİ	86
5. TARTIŞMA.....	97
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR.....	100
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	103
ETİK KURUL İZİN YAZISI	104
KURUM İZNİ YAZILARI.....	105
PATENT HAKKI İZNİ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZGEÇMİŞ	106

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2-1. Kil zemin yapısının şematik gösterimi (Mitchell, Fundamentals of Soil Behavior, 1993).....	3
Şekil 2-2. Tetrahedral ve Oktahedral Yapı (Prasad & Shih, 2016).	5
Şekil 2-3. Kaolinit yapısının şematik diyagramı (Lambe, 1953).	7
Şekil 2-4. Kaolinit kil mineral katman yapısı (Grim, 1974).....	7
Şekil 2-5. Mika benzeri kil minerallerinin yapısı (Mitchell, Fundamentals of Soil Behavior, 1976).....	9
Şekil 2-6. Kloritin şematik diyagramı (Mitchell & Soga, Fundamentals of Soil Behavior, 2005).....	10
Şekil 2-7. Kil- Su Sistemi (Sivakugan, 2001).	12
Şekil 2-8. Şişen zemin sınıflanması (Prakash and Sridharan, 2004).	22
Şekil 3-1. Şişme- büzülme kapsamında ele alınacak durumlar ve açıklamalar.....	23
Şekil 3-2. Tasarlanan Şişme-Büzülme Cihazı.	24
Şekil 3-3. Modifiye Edilmiş Ödometre Hücresi.	25
Şekil 3-4. Geliştirilen cihazın kontrol kutusunun önden görünüşü.	25
Şekil 3-5. Geliştirilen cihazın kontrol kutusunun arkadan görünüşü.	25
Şekil 3-6. Deneylerde kullanılan numunelerin alındığı yerler	26
Şekil 3-7. Tekrarlı şişme- büzülme deneyinin şematik gösterimi.	32
Şekil 4-1. Serbest şişme deneyine göre şişen montmorillonit ve şişmeyen kaolinit zemin sınıflaması (Prakash and Sridharan, 2004).	34
Şekil 4-2. C1a_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.	36
Şekil 4-3. C1a_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği.....	36
Şekil 4-4. C1b_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	37
Şekil 4-5. C1b_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği.....	37

Şekil 4-6. C1c_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	38
Şekil 4-7. C1c_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği.....	38
Şekil 4-8. C1d_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	39
Şekil 4-9. C1d_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği.....	39
Şekil 4-10. C1e_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	40
Şekil 4-11. C1e_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği.....	40
Şekil 4-12. C1f_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.....	41
Şekil 4-13. C1f_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	41
Şekil 4-14. C1g_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	42
Şekil 4-15. C1g_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	42
Şekil 4-16. C1h_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	43
Şekil 4-17. C1h_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	43
Şekil 4-18. C1i_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	44
Şekil 4-19. C1i_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	44
Şekil 4-20. C1j_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	45
Şekil 4-21. C1j_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	45
Şekil 4-22. C1k_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	46
Şekil 4-23. C1k_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	46
Şekil 4-24. C1l_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	47
Şekil 4-25. C1l_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	47
Şekil 4-26. C1m_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	48
Şekil 4-27. C1m_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	48
Şekil 4-28. C2a_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	49
Şekil 4-29. C2a_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği.....	49
Şekil 4-30. C2b_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	50
Şekil 4-31. C2b_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	50
Şekil 4-32. C2c_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	51

Şekil 4-33. C2c_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği.....	51
Şekil 4-34. C2d_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	52
Şekil 4-35. C2d_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	52
Şekil 4-36. C2e_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	53
Şekil 4-37. C2e_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği.....	53
Şekil 4-38. C2f_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.....	54
Şekil 4-39. C2f_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	54
Şekil 4-40. C2g_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	55
Şekil 4-41. C2g_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	55
Şekil 4-42. C3_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.....	56
Şekil 4-43. C3_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği.....	56
Şekil 4-44. C4a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.....	57
Şekil 4-45. C4a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	57
Şekil 4-46. C4b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	58
Şekil 4-47. C4b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği.....	58
Şekil 4-48. C5a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.....	59
Şekil 4-49. C5a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	59
Şekil 4-50. C5b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	60
Şekil 4-51. C5b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği.....	60
Şekil 4-52. C6a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.....	61
Şekil 4-53. C6a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	61
Şekil 4-54. C6b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	62
Şekil 4-55. C6b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği.....	62
Şekil 4-56. C6c_RC4 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.....	63
Şekil 4-57. C6c_RC4 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	63
Şekil 4-58. C7a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.....	64
Şekil 4-59. C7a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	64

Şekil 4-60. C7b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	65
Şekil 4-61. C7b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	65
Şekil 4-62. C8a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.....	66
Şekil 4-63. C8a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	66
Şekil 4-64. C8b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	67
Şekil 4-65. C8b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	67
Şekil 4-66. C9a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.....	68
Şekil 4-67. C9a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	68
Şekil 4-68. C9b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	69
Şekil 4-69. C9b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	69
Şekil 4-70. C9c_RC4 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.....	70
Şekil 4-71. C9c_RC4 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	70
Şekil 4-72. C10_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	71
Şekil 4-73. C10_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	71
Şekil 4-74. C11a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.....	72
Şekil 4-75. C11a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	72
Şekil 4-76. C11b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	73
Şekil 4-77. C11b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	73
Şekil 4-78. C12_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği	74
Şekil 4-79. C12_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği	74
Şekil 4-80. C1 Ambarlı numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması	75
Şekil 4-81. C2 Hadımköy numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması	76
Şekil 4-82. C4 Zeytinburnu numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması	77
Şekil 4-83. C5 Zeytinburnu numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması	77

Şekil 4-84. C6 Avcılar numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması	78
Şekil 4-85. C7 Zeytinburnu numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması	78
Şekil 4-86. C8 Silivri numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması	79
Şekil 4-87. C9 Silivri numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması	79
Şekil 4-88. C11 Bağcılar numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması	80
Şekil 4-89. Tüm doğal numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması	81
Şekil 4-90. Tüm kompakte numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması	82
Şekil 4-91. Tekrarlı şişme-büzülme deneylerinde görülen şişme yüzdesi eğri tipleri.....	84
Şekil 4-92. Tip-1 ile Tip-5 numunelerde şişme-büzülme indeksi (SSI) ile su muhtevası oranı (w_{s1}/w_o) ilişkisi	85
Şekil 4-93. Çeşitli araştırmacıların SSI – su muhtevası oranı (w_{s1}/w_o) verileri ile bu çalışmadaki verilerin uyumunu gösteren grafik	85
Şekil 4-94. SSI ile büzülen bölge sayısı (NR), büzülme oranı, çatlak uzunlu oranı ilişkisi.....	95

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2-1. Şişme potansiyelini belirlemek için bazı kriterlerin özeti (Yılmaz, 2006).	11
Tablo 2-2. Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri (Nelson & Miller, 1992).	14
Tablo 2-3. Şişme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler (Nelson & Miller, 1992).	14
Tablo 2-4. Şişme potansiyelini etkileyen gerilme koşulları (Nelson & Miller, 1992).	15
Tablo 2-5. Plastisite indeksi özelliklerine dayalı olarak önerilen geniş toprak sınıflandırması (O’neill & Poormoayed, 1980).....	18
Tablo 2-6. Likit limite dayalı olarak önerilen geniş toprak sınıflandırması (Chen F. , 1975) .	19
Tablo 2-7. Plastisite indeksine dayalı olarak önerilen geniş toprak sınıflandırması (Chen F. , 1975), (Holtz & Gibbs, 1956), (IS 1498 (1970)).....	19
Tablo 2-8. Diğer önlemlere dayalı olarak önerilen geniş toprak sınıflandırması (Holtz & Gibbs, 1956) (Seed, Woodward, & Lungren, 1962)	19
Tablo 2-9. Plastisite indeksi (PI) ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Peck, Hanson, & Thornburn, 1974).....	20
Tablo 2-10. Serbest şişme oranına dayalı sınıflama (Prakash & Sridharan, 2004).	22
Tablo 3-1. Kullanılan numune kodları ve hazırlanması	27
Tablo 3-2. Kullanılan zeminlerin bazı özellikleri.....	27
Tablo 3-3. Serbest şişme oranına (FSR) dayalı sınıflama (Prakash & Sridharan, 2004)	28
Tablo 3-4. Araştırmada kullanılan hazırlanması ve deney şartları.....	29
Tablo 4-1. İncelenen zeminlerin mineralojilerine göre sınıflandırılması.	33
Tablo 4-2. Bu çalışmanın numunelerinde büzülen bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlakların uzunluğu	87
Tablo 4-3. Bu çalışmanın numunelerinde büzülen bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlakların uzunluğu	88
Tablo 4-4. Bu çalışmanın numunelerinde büzülen bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlakların uzunluğu	89

Tablo 4-5. Bu çalışmanın numunelerinde büzülen bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlakların uzunluğu	90
Tablo 4-6. Bu çalışmanın numunelerinde büzülen bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlakların uzunluğu	91
Tablo 4-7. Özkan (2009) numunelerinde büzülen bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlakların uzunluğu	92
Tablo 4-8. Şişmesi artan numuneler ve büzülme şekilleri.....	93
Tablo 4-9. Şişmesi giderek azalan numuneler ve büzülme şekilleri.	94
Tablo 4-10. SSI, oluşan bölge sayısı, çatlak uzunluk oranına bağlı olarak oluşan eğri tipi, kilin egemen tane dizili, muhtemel bağ tipi ile FSR yardımıyla egemen kil mineraline karar verme kriterleri	95
Tablo 4-11. Tablo 10 ile numunelerin etkin mineral tipi, tane dizilimi ve bağ tipinin belirlenmesi	96

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
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
EI	: Genişleme indeksi
ESI	: Şişen zemin indeksi
F	: No 4 eleğinden geçen zemin yüzdesi
FS	: Serbest şişme
FSI	: Serbest şişme indeksi
FSR	: Serbest şişme oranı
G_s	: Özgül ağırlık
I_{ss}	: Şişme – büzülme indeksi
LEP_c	: Lineer genişleyebilirlik yüzdesi
LL	: Likit limit
MBV	: Kil için metilen mavisi indeksi
$MFSI$	: Modifiye serbest şişme indisi
P_1	: 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
S	: Şişme yüzdesi

ÖZET

[DOKTORA TEZİ]

[KİLLERİN ŞİŞME – BÜZÜLME DAVRANIŞI ve MİKRO YAPI ile İLİŞKİLENDİRİLMESİ]

[Sinem TOSUN]

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

[Danışman : Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

II. Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Erdem DAMCI]

Kışın yağmurların yağmaya başlamasıyla birlikte killi zeminlerin su içeriğinde artışlar görülür. Yaz aylarında ise sıcaklıkla birlikte su içeriğinde azalma meydana gelir. Bu su içeriğinin artması ile killi zeminlerde şişme görülür, su içeriğinin azalması ile birlikte büzülme görülür. Bu davranışa killerin şişme – büzülme davranışı denir. Bu davranış dikkate alınmazsa mühendislik yapılarında ciddi hasarlara neden olur. Bu hasarları önlemek için gerekli önlemleri almak ve killerin tekrarlı şişme – büzülme davranışını anlamak gerekir. Bu tezde, 12 farklı bölgeden kil numuneleri alınmıştır. Bu kil numuneleri üzerinde tekrarlı şişme – büzülme deneyleri yapılmıştır ve bu deneyler için cihaz tasarlanmıştır. Bu numuneler için serbest şişme oranı (FSR) belirlenmiştir. Serbest şişme oranı ile killerin şişip şişmeyeceği tahmin edilebilmektedir. Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre eğer kilin bağları zayıf ise şişmesi giderek artmaktadır ve büzülme çatlakları çok fazla oluşmaktadır. Eğer bu bağlar güçlü ise, şişmesi giderek azalmaktadır ve büzülme çatlakları az oluşmaktadır. |

Ağustos 2023 , [125] sayfa.

Anahtar kelimeler: Kil, şişme – büzülme davranışı, killerin mikro yapısı|

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

**SWELLING – SHRINKAGE BEHAVIOUR of CLAYS and ITS CORRELATION
WITH MICRO STRUCTURE**

Sinem TOSUN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Programme of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. Erdem DAMCI

With the beginning of rains in winter, increases are seen in the water content of clay soils. In summer, the water content decreases with temperature. With the increase in this water content, swelling occurs in clay soils and shrinkage is observed with the increase in water content. This behavior is called the repetitive swelling – shrinkage behavior of clays. If this behavior is not considered, it will cause serious damage to engineering structures. In order to prevent these damages and to take the necessary precautions to avoid the damage, it is necessary to understand the repetitive swelling – shrinkage behavior of clays. In this thesis, clay samples were taken from 12 different regions. Repeated swelling – shrinkage tests were carried out on these clays will swell or not. According to the data obtained from the test results, if the bonds of the clay are weak, its swelling gradually increases, and shrinkage cracks are formed too much. If these bonds are strong, swelling gradually decreases and shrinkage cracks occur less.

August 2023, 125 pages.

Keywords: Clays, Swelling – shrinkage Behavior, Clays microstructure

1. GİRİŞ

Kış aylarında yağışların artması ile özellikle killi zeminlerin su içeriğinde bir artış meydana getirerek bu zeminlerin hacimlerinde artışa yani şişmesine neden olur. Yaz aylarında ise sıcaklığın artması ile bu zeminlerin su içeriğinde bir azalma meydana getirerek bu zeminlerin hacimlerinde azalmaya yani büzülmesine neden olur. Bu özellik killi zeminlerin şişme – büzülme davranışı olarak tanımlanır. Bu killi zeminlerin şişmesi mühendislik problemi olarak ilk Amerika’da incelenmiştir. Şişen zemin problemleri bilinmeye başladığından beri, mühendisler tarafından temel yapılarından suyun izole edilmeye çalışılmıştır (Chen F. , 1988). Killi zeminlerin şişme – büzülme davranışı sonucu hacimlerindeki değişim bina, yollar, boru hatları gibi mühendislik yapılarına ciddi miktarda hasar verebilmektedir. Türkiye’de henüz hasarın boyutuyla ilgili bir çalışmanın yapılmamasıyla beraber şişen zeminlerin verdiği hasar genellikle yapılarla sınırlı olduğu, ancak büyük miktarlarda hasara neden olduğu söylenebilir.

Montmoril gibi mineraller içeren zeminler şişmeye ve büyük miktarda su tutmaya yeteneklidirler. Şişen zeminler aynı zamanda kuruduklarında büzülürler ve çatlaklar oluşur. Böylelikle büyük miktarda zemin hacminde değişikliğe neden olan şişme büzülme çevrimini oluşturarak yapılarda hasarlara neden olurlar.

Birbirini izleyen yağışlı ve kurak dönemler olarak tanımlanan iklimlere ve büyük yüzeysel kil minerallerine sahip bölgelerde görülen şişen zeminlerin hasarlara neden olan probleminin başlıca sebeplerinden biri de şişme-büzülme davranışdır. Bu tür zeminlerde meydana gelen yağmurlu mevsimlerde kabarmalar ve kurak mevsimlerde oturmalar yapıda yorgunluğa ve çatlamaya sebep olmaktadır. Büzülme neticesinde oluşan çatlaklar doygun killerin ilk kuruma aşamasında oluşur.

Su muhtevastaki ve gerilme koşullarındaki değişime bağılı olarak hacim değişikliğı gösteren kil zeminler, kurudukları zaman büzülme ve bünyelerine su aldıkları zaman şişme davranışı gösterirler. Özellikle birbirini izleyen yağışlı ve kurak mevsimlerde büyük hacim değişiklikleri meydana gelir (Oweiss & Bowman, 1981). Kil taneleri, genellikle zemin sınıflama sistemlerinde 2 mikron veya daha küçük tane çapına sahip olarak tanımlanır. Kil tanelerinin

davranışını belirlemede, tane boyutu yeterli olmayıp mineralojik oluşumları da önemlidir (Chen F. , 1988).

Doğal durumdaki bazı killi zeminler belli bir seviyede şişme – büzülme davranışı gösterirler. Sıkıştıklarında ya da bozunduklarında doğal yapıları bozulduğu için bağları kopar, su içeriği azalır, kuru yoğunlukları yükselir ve şişme – büzülme indeksleri yükselir. Böylece şişme derecesi yüksek zeminler hale gelebilirler. Bu nedenle mühendislik işlerinde bu zeminlere dikkat edilmesi gerektiği, kireç ile iyileştirme şişme hasarını iyileştirdiği belirtilmiştir. (Du, Li, & Hayashi, 1999).

Şişen zeminlerin kil mineralleri içeriğine bakıldığında, büyük bir çoğunlukla montmorillonit ve smektit grubu minerallerin var olduğu görülmektedir. Bu tür zeminler yüksek plastisiteye, yüksek kuru mukavemete, ıslaksa düşük kayma mukavemetine sahip olup, büzülme çatlakları derindir. Şişme basıncının yüksekliği, sahip olduğu kil mineraline, yapısına, katyon değişimi kapasitesi gibi bazı davranışlarına bağlı olduğu görülmektedir. Kil minerallerinin dokularına bakıldığında, rastgele dokulu killerin yönlendirilmiş dokulu killere göre şişme miktarının fazla olduğu söylenebilir. Aynı zamanda örselenmiş ve yeniden yapılandırılmış killerde şişme miktarları fazla olduğu söylenebilir (Holtz, Kovacs, & Sheahan, 2015).

Bu tez çalışmasında, farklı bölgelerden alınan killi zeminlerin şişme – büzülme davranışını anlamak için cihaz geliştirilmiş olup, bu şişme – büzülme davranışı ile killerin mikro yapısı arasında bağlantı kurabilmek için gerekli incelemeler yapılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler ile killerin tam şişme – kısmi büzülme davranışı ile mikro yapısı arasındaki bağ ortaya konmaya çalışılmıştır.

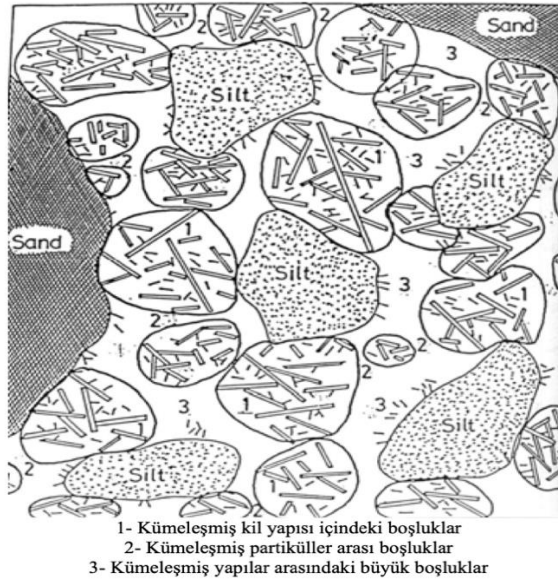
Bu çalışma, killerin mikro yapısı ile şişme – büzülme davranışı arasındaki bağlantıyı anlamak için yapılan çalışmaları içermektedir. Bu amaç doğrultusunda da kıvam limitleri şişme – büzülme deneyleri, FSR deneyleri ve çatlak analizleri yapılmıştır. Şişme – büzülme deneylerinde için konsolidasyon cihazı geliştirilerek tam otomatik bir hale getirilmiş olup numunelerin tam şişme – kısmi büzülme davranışları incelenmiştir. Bu deneyler sonucunda bazı killerin özellikle bağları zayıf olanların şişmesinin giderek arttığı, bağları güçlü olanların ise şişmesinin giderek azaldığı görülmüştür.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. KİLLER HAKKINDA GENEL BİLGİ

Kilin tanımını yapan ilk kişi jeolojinin kurucu olan Georgius Agricola (1494 – 1555) olarak belirtilmiştir. Bundan yaklaşık 500 yıl sonra kil, ince taneli minerallerden oluşan, genellikle belli bir su muhtevasında plastik olan, kurutulduğunda ya da pişirildiğinde sertleşen, doğal olarak oluşan bir malzeme olarak tanımlanmıştır. İnce taneli, plastisite ve kurutulduğunda ya da sertleştiğinde sertleşme özelliği gösteren sentetik killer ve kil benzeri malzemeler bu tanıma göre dikkate alınmazlar (Guggenheim & Martin, 1995).

Parçacık boyutu, kilin tüm tanımlarında anahtar kelime olmasına rağmen genel olarak kabul edilen bir üst sınır yoktur. Bununla birlikte bazı disiplinler ve meslekler maksimum bir kil partikülü boyutunu belirlemişlerdir. Örneğin, jeoloji de boyut sınırı genellikle $< 4 \mu\text{m}$ olarak belirtilmiştir. Zemin sınıflama sistemlerinde kil boyut sınırı genellikle $< 2 \mu\text{m}$ olarak belirtilmiştir. (Moore & Reynolds Jr., 1997) Şekil 2.1’de kil yapısının şematik görünümü verilmiştir (Mitchell, Fundamentals of Soil Behavior, 1993).



Şekil 2-1. Kil zemin yapısının şematik gösterimi (Mitchell, Fundamentals of Soil Behavior, 1993).

Killer, endüstriyel uygulamalarda,

- i. Ana kil mineral bileşeni olarak montmorillonite sahip bentonitler
- ii. Kaolinit içeren kaolinler
- iii. Poligorskit ve sepiolit
- iv. Genellikle illit – simektit karışık katmanlı minerallerini içeren ve büyük ölçüde seramik için kullanılan killer

Olmak üzere 4'e ayrılır (Bergaya & Lagaly, 2013)

2.1.1. Kil Mineralleri

Zeminlerin kil boyutu, eşdeğer çapta 2 μm 'den daha küçük olan mineral parçalarından oluşur. Kil mineralleri, zeminin en önemli ve karakteristik fiziksel ve kimyasal özelliklerinin çoğundan sorumludur. Kil mineralleri, farklı kristal yapılarına göre ayırt edilirler ve kristal yapı ile belirli bir kil tipinin karşılık gelen fiziksel ve kimyasal özellikleri arasında yakın bir ilişki vardır (Prasad & Shih, 2016).

2.1.1.1. Kil Minerallerinin Ana Element Bilişimi

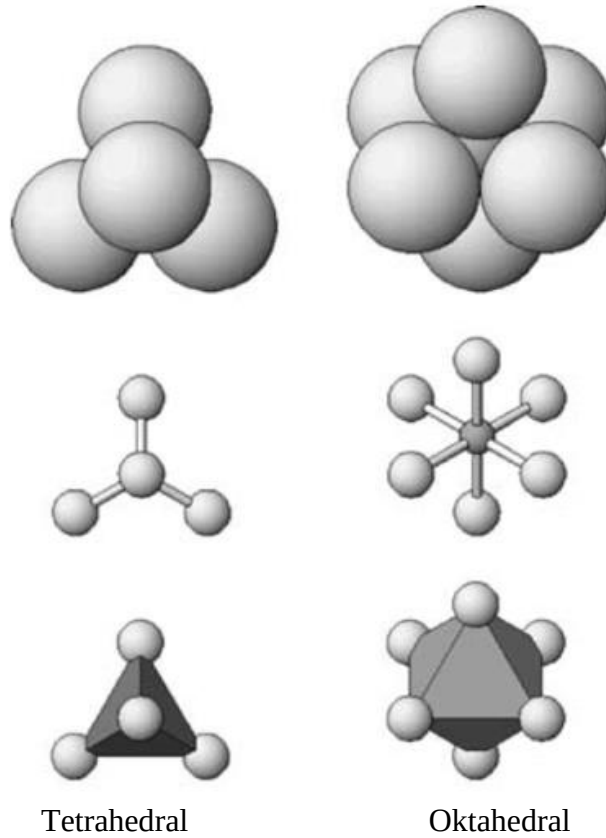
Yerkabuğunun kütesinin ve hacminin çoğu yalnızca birkaç kimyasaldan oluşur. O ve Si kütenin neredeyse %75'ini oluştururken, geri kalanı azalan sırayla Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, H, P ve Mn oluşturur. Hacim bazında bakıldığında, oksijen tek başına %90'ından fazlasını oluşturur. O ve O^{2-} bol miktarda bulunan tek anyondur, diğer bol miktarda bulunan elementlerin tümü katyonlardır. Bu katyonların çoğu, dünya yüzeyinde yalnızca bir kararlı oksidasyon durumuna sahiptirler. (Al^{3+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ti^{4+} , H^+ , P^{5+}); Fe (Fe^{2+} , Fe^{3+}) ve Mn (Mn^{2+} , Mn^{3+} , Mn^{4+}) istisnadır. O^{2-} anyonları, pozitif yüklü katyonların çoğundan çok daha büyüktür. Yukarıda sıralanan elementler, kil mineralleri de olmak üzere zemindeki minerallerin ana bileşenleridir (Prasad & Shih, 2016).

2.1.1.2. Temel Yapısal Kavramlar

i. Tetrahedral ve Oktahedral

Zemin kili minerallerinin kristal yapılarında, Büyük O iyonlarının boşlukta bir araya toplanması sonucunda iki farklı yapısal özellik ortaya çıkar. İlki birbirine yakın bir şekilde bir araya gelmiş dört O^{2-} iyonundan oluşur ve üç O^{2-} iyonu üçgen şeklinde dizilerek, dördüncü O^{2-} iyonunun ise bu üç iyonun ortasında dizilmesi olarak tanımlanabilir (Şekil 2.2.). Dört O^{2-} iyonunun merkezleri, düzenli bir dörtyüzlünün tepe noktalarını oluşturur ve merkezdeki küçük boşluğa 'dörtyüzlü bölge' denir ve dört O^{2-} iyonuna bağlanır (Prasad & Shih, 2016).

İkinci yapısal özellik, yakından dizilmiş altı O^{2-} iyonundan oluşur. Bunlardan üçü bir düzlemde üçgen şeklinde dizilmişlerdir ve diğer üçü yine bir üçgen içindedir ancak ilk üçe göre 60° döndürülmüştür ve iki üçgen grup birbirine geçecek şekilde ikinci bir düzlemde (Şekil 2.2.). Altı O^{2-} iyonunun merkezleri, düzenli bir oktahedronun tepe noktalarını oluşturur ve merkezdeki küçük boşluğa 'Oktahedral bölge' denir ve altı O^{2-} iyonuna bağlanır.



Şekil 2-2. Tetrahedral ve Oktahedral Yapı (Prasad & Shih, 2016).

Bir katyonun tetrahedral bölgede kaplayabileceği alan, oktahedral bölgede kaplayabileceği alandan daha küçüktür. Katyonların boyutları değiştiğinden, daha küçük katyonlar tetrahedral bölgelerde oluşma eğilimindedir, biraz daha büyük katyonlar oktahedral bölgelerde oluşma eğilimindedir ve en büyük katyonlar oktahedral bölgelerden bile daha büyük olan boşluklara sığmalıdır. İki bölge için optimum arasında orta büyüklükteki katyonlar her iki bölgede de oluşabilir. Örneğin Al^{3+} iyonu, oktahedral veya tetrahedral bölgelerde oluşabilir (Prasad & Shih, 2016).

2.1.1.3. Killerde Yaygın Fillosilikat Mineralleri

Fillosilikatlar, tabaka yapısındaki tetrahedral ve oktahedral yaprak sayısına göre 1:1- ve 2:1 tipi mineraller olmak üzere iki gruba ayrılır.

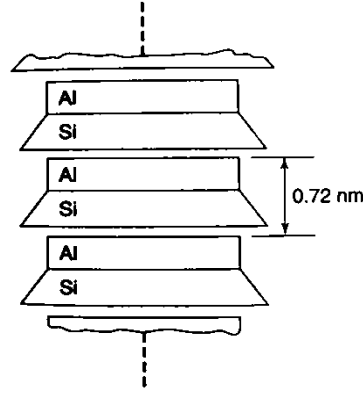
1:1-Tipi Mineraller

1:1 katman yapısı, bir oktahedral ve bir tetrahedral levhadan oluşur ve dört yüzlü yaprakların O^{2-} iyonları oktahedral levhasıyla paylaşılır. Üç anyon düzlemi vardır. Bir düzlem tetrahedral tabaka O^{2-} iyonlarından oluşur, ikincisi hem tetrahedral hem de oktahedral levhalarda ortak O^{2-} iyonlarından oluşur.

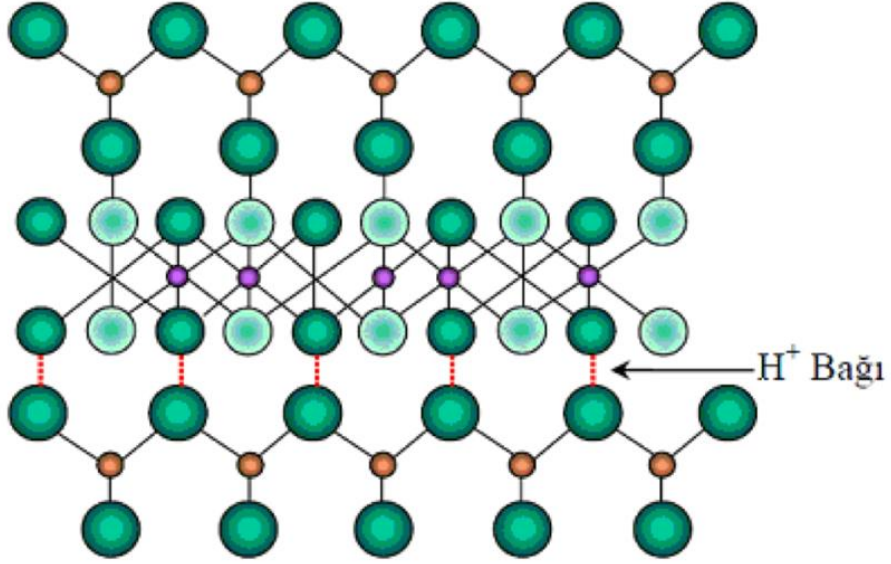
Kaolinit, yapısı birbiri üzerine yığılmış 1:1 tabakalardan oluşur. Kaolinit oktahedral bölgelerde Al^{3+} ve tetrahedral bölgelerde Si^{4+} içerir (Şekil 2.3.-2.4.). 1:1 tabaka elektriksel olarak nötrdür ve bitişik tabakalar, tetrahedral tabakanın bazal oksijenleri ile bitişik oktahedral tabakanın dış düzleminin hidroksilleri arasındaki hidrojen bağıyla bir arada tutulur.

Kaolinit zeminlerde yaygın olarak bulunan bir mineraldir. Kaolinitler, tetrahedral veya oktahedral levhalarda çok az izomorfa sahiptir ve kaolinitlerin çoğu ideal $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ formülüne yakındır. Sonuç olarak, katyon değişim kapasiteleri ve yüzey alanları tipik olarak düşüktür. Kaolinit içeriği yüksek topraklar genellikle 2:1 kil minerallerinin baskın olduğu topraklardan daha az verimlidir.

Kaolinit, birincil ve diğer ikincil minerallerin ayrışmasıyla salınan Al ve Si'den zeminlerde oluşabilir. Örneğin, magmatik kayalardan oluşan zeminlerde feldispatlar genellikle kaolinite dönüşür.



Şekil 2-3. Kaolinit yapısının şematik diyagramı (Lambe, 1953).



Şekil 2-4. Kaolinit kil mineral katman yapısı (Grim, 1974).

Halloysit, kaolinite benzer 1:1 katmanlı bir yapıya sahiptir, ancak 1:1 katmanları tamamen hidrate olduklarında H_2O moleküllerinden oluşan bir katmanla ayrılır. Bu su, muhtemelen az sayıda ara katman katyonunun (iki bitişik 1:1 veya 2:1 katman arasında bulunan katyonlar) etrafında hidrasyon kabukları olarak bulunur. Kil silikatların çoğu ince levhalar halinde oluşur, ancak halloysit genellikle boru şeklinde veya küresel parçacıklar halinde oluşur.

Halloysit genellikle volkanik birikintilerden, özellikle volkanik kül ve camdan oluşan zeminlerde bulunur. Halloysit ayrışma sürecinin başlarında oluşur, ancak genellikle kaolinite göre daha az karardır ve zamanla yerini kaolinite bırakır.

2:1-Tipi Mineraller

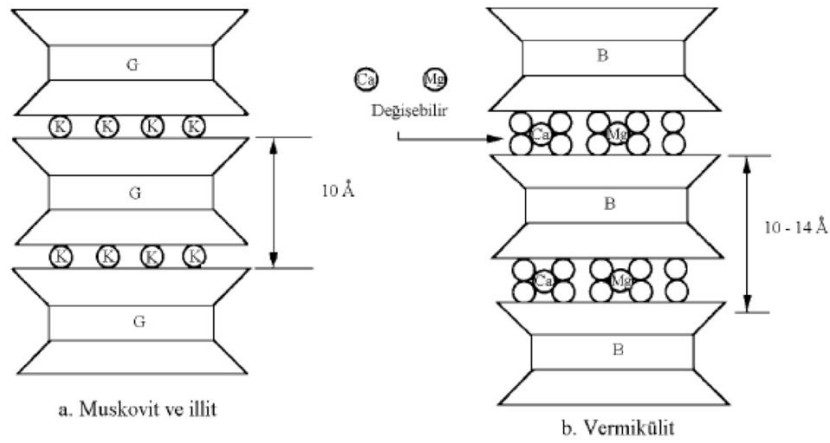
Zeminde sadece iki ana mineral tarafından temsil edilen 1:1 minerallerinin aksine, 2:1 mineralleri yapısal olarak daha çeşitlidir ve birkaç mineral türü tarafından temsil edilir.

2:1 katman yapısı, bir oktahedral yaprağın her iki yanına birer tane bağlı olan iki tetrahedral yapraktan oluşur. Anyonların dört düzlemi vardır. Dıştaki ikisi, iki tetrahedral tabakanın bazal oksijenlerinden oluşurken, iki iç düzlem oktahedral tabaka ve iki tetrahedral tabakada ortak olan oksijenler ile oktahedral tabakaya ait hidroksillerden oluşur.

Pirofilit üst üste istiflenmiş 2:1 katmanlardan oluşur. Dört yüzlü tabakalar sadece Si^{4+} içerir ve oktahedral tabaka sadece Al^{3+} içerir, bu da ideal formül $\text{Al}_2(\text{Si}_4)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ile sonuçlanır. Yük, 2:1 katmanı içinde tamamen dengelenir, bu da katmanı elektriksel olarak nötr hale getirir ve bitişik 2:1 katmanları yalnızca zayıf van der Waals kuvvetleri tarafından bir arada tutulur.

Mika mineralleri, Pirofilit için tanımlanan 2:1 tabaka yapısına sahiptir, ancak iki önemli fark vardır. Birincisi, tetrahedral bölgelerde sadece Si^{4+} 'ye sahip olmak yerine, tetrahedral bölgelerin dörtte biri Al^{3+} tarafından işgal edilmiştir. Bu ikame nedeniyle, 2:1 katmanında formül birimi başına bir negatif yük fazlası vardır. İkincisi, bu aşırı negatif yük, iki 2:1 katman arasındaki ara katman bölgelerini işgal eden tek değerlikli katyonlar, genellikle K^+ tarafından dengelenir (Şekil 2.5).

Zeminlerdeki mika genellikle ana kayadan miras alınır ve çeşitli magmatik ve metamorfik kayalardan ve ayrıca bunlardan türetilen tortulardan meydana gelen zeminlerde oluşması muhtemeldir. Muskovit, biyotit ve flogopit, kayalarda ve dolayısıyla zeminlerde en yaygın üç mika grubu mineralidir. Bu kil boyutundaki mika genellikle illit olarak adlandırılır. Glokonit, illite benzeyen başka bir mika mineralidir, ancak oktahedral tabakasında illite göre daha fazla Fe ve daha az Al içerir.



Şekil 2-5. Mika benzeri kil minerallerinin yapısı (Mitchell, Fundamentals of Soil Behavior, 1976).

Vermikülit, mika için tarif edildiği gibi 2:1 katman yapısına sahiptir. Zeminlerdeki vermikülitlerin neredeyse tamamen mika ve kloritlerin ayrışmasından oluştuğuna inanılmaktadır. Mikaların vermikülite (veya smektit) dönüşmesinin, ara katman bölgelerindeki K^+ 'nın hidratlı değişebilir katyonlarla yer değiştirmesiyle meydana geldiğine inanılmaktadır. 2:1 katmanın bütünlüğü korunur, ancak katman yükünde azalma olur. Vermikülit, smektit kadar yoğun bir şekilde şişmez.

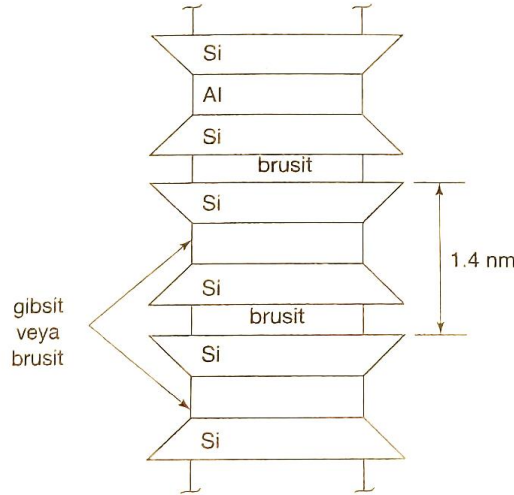
Smektit grubu, daha önce mika ve vermikülit için tartışılan 2:1 yapıya sahip, ancak formül ağırlığı başına daha da düşük, yani 0,6-0,2 olan minerallerden oluşur. Vermikülitte olduğu gibi, ara katman değişebilir katyonlar içerir.

En yaygın smektit mineralleri, bileşim olarak üçe ayrılır: montmorillonite, beidellite ve nontronite. Hepsi dioktahedraldir, ancak tetrahedral ve oktahedral tabakaların bileşiminde farklılık gösterirler. Smektitlerin katman yükü daha düşüktür, ancak smektit vermikülitten daha kapsamlı bir şekilde şişer.

Smektitler ılıman bölge zeminlerinde önemli minerallerdir. Smektit açısından zengin zeminler, smektitlerin yüksek yüzey alanı ve adsorptif özellikleri nedeniyle birçok organik ve inorganik kirleniciyi azaltmada çok etkili olma eğilimindedir. Smektitler kuruyunca büzülür ve ıslanınca şişer. Şişme – büzülme davranışı, smektit zeminler üzerine evler, yollar ve diğer yapılar inşa edildiğinde çatlama ve kayma sorunlarına yol açar.

Kloritler, Mika gibi 2:1'lik bir tabaka yapısına ve aşırı negatif yüke sahiptir. Bununla birlikte, mikanın aksine, fazla yük, K^+ yerine pozitif yüklü bir ara katman hidroksit tabakası (Şekil 2.6.) ile dengelenir.

Zeminlerdeki klorit mineralleri genellikle metamorfik veya magmatik kayalardan ayrılan birincil minerallerdir. Şeyller gibi tortul kayalardan kalıtsal olabilirler. Kloritler zeminlerde oldukça seyrek minerallerdir ve bulunduklarında genellikle küçük miktarlarda bulunurlar. Klorit ayrışarak vermikülit ve smektit oluşturur.



Şekil 2-6. Kloritin şematik diyagramı (Mitchell & Soga, Fundamentals of Soil Behavior, 2005).

2.2. ŞİŞME YÜZDESİ

Ön saha araştırmaları sırasında, zeminin geniş olduğundan şüpheleniliyorsa, şişme parametreleri literatürde bulunan önemli sayıda korelasyondan tahmin edilebilir. Bu ampirik ifadeler, şişme parametrelerini tanımlama testleri ile belirlenen jeoteknik parametrelerle ilişkilendirir (Yılmaz, 2006).

Şişme yüzdesi ile ilgili olarak, modeller genellikle serbest şişmeyi verir. Şişen zeminler için sınıflandırma sistemleri, temellerin yapımında yarattıkları sorunlara dayanmaktadır (potansiyel şişme) (Das, 1995). Şişen zeminlerin tatmin edici bir şekilde sınıflandırılmasını sağlamak, şişmeyi karakterize eden jeoteknik parametreler hakkında bilgi gerektirir. Sınıflandırmanın zorluğu bu parametreleri tanımlamaktır. Geleneksel olarak, şişme basıncı parametreleri ve şişme yüzdesi kullanılır. Literatür, zeminlerin şişme potansiyelini değerlendirmek için önemli sayıda ampirik teknik içermektedir. Literatürde bulunan önemli sınıflandırma şemaları Tablo 2.1.'de gösterilen şişme potansiyelinin sınıflandırılması, sıkıştırılmış numune, kil yüzdesi ve aktivite kullanılarak yapılan teste dayanmaktadır. Ancak yukarıda belirtilen bu sınıflandırmaların hiçbiri killi toprakların şişme potansiyelinde önemli bir faktör olan katyon

değişim kapasitesine dayanmamaktadır. Likit limiti ve kation değişim kapasitesi, toprağın şişme özelliklerini kontrol eden faktörlerdir. Genellikle kation değişim kapasitesi ile likit limit arasında bir ilişki olduğuna inanılır (Yılmaz, 2006).

Tablo 2-1. Şişme potansiyelini belirlemek için bazı kriterlerin özeti (Yılmaz, 2006).

Referans	Kriterler
(Holtz W. G., 1959)	CC>28, PI>35, SL<11 (çok yüksek) 20≤CC≤31, 25≤PI≤41, 7≤SL≤12 (yüksek) 13≤CC≤23, 15≤PI≤28, 10≤SL≤16 (orta)
(Altmeyer, 1955)	LS<5, SL>12, PS<0,5 (kritik olmayan) 5≤LS≤8, 10≤SL≤12, 0.5≤PS≤1.5 (marjinal), LS>8, SL<10, PS>1.5 (kritik)
(Raman, 1967)	PI>32 ve SI>40 (çok yüksek) 23≤PI≤32, 30≤SI≤40 (yüksek) 12≤PI≤23, 15≤SI≤30 (orta) PI<12 ve SI<15 (düşük)
(Sowers & Sowers, 1970)	SL<10 ve PI>30 (yüksek) 10≤SL≤12 ve 15≤PI≤30 (orta) SL>12 ve PI<15 (düşük)
(Snethen, 1984)	LL>60, SP>1.5 (yüksek) 30≤LL≤60, 25≤PI≤35 ve 0,5≤SP≤1,5 (orta) LL<30, SP<0,5 (düşük)
(Chen F. , 1988)	PI≥35 (çok yüksek) 20≤PI≤55 (yüksek) 10≤PI≤35 (orta) ve PI≤15 (düşük)
(Vijayvergiya & Ghazzaly, 1973)	$\log SP = (1/12)(0.44LL - w_o + 5.5)$
(Nayak & Christensen, 1974)	$SP = (0.00229PI)(1.45c) / w_o + 6.38$
(Weston, 1980)	$SP = 0.00411(LL)4.17q - 3.86w_o - 2.33$

*CC=kil içeriği, % (<0,002 mm). LI=likidite indeksi, % $([w_o - PL]/PI)$. LL=Likit limiti, %. PL=plastik limit, LS=doğrusal büzülme, %. PI=plastisite indeksi, EI=genişleme indeksi=yüzde100×şişme×fraksiyon 4 numaralı elekten geçiyor. PS=olası şişme, SI=büzülme indeksi=LL-SL, %. SL=büzülme sınırı, % (hacim değişikliğinin alt sınırı). SP=şişme potansiyeli. w_o =doğal nem içeriği.

2.3. ŞİŞME MEKANİZMASI VE SU MOLEKÜLLERİ

İyonlar ve su arasındaki etkileşim kuvvetlerinin dengelenmesi durumunda kil şişer (Mcbride, 1989). Kil taneleri, negatif yükü olan plakacıklardır (Şekil 2.7.). Negatif yükler, elektriksel kuvvetler ve plakaların yüzeyine bağlı olan zemin suyundaki katyonlar ile dengede iken bu içsel gerilmeyi bozan birtakım değişiklikler sonucu ortaya şişme olarak çıkar (Özkan, 2009).



Şekil 2-7. Kil- Su Sistemi (Sivakugan, 2001).

Temelde kilin şişmesi iki ana mekanizmadan oluşur. Birincisi, zemin parçacıkları arasında meydana gelen genişlemedir. Tüm kil minerallerinde görülen bu mekanizma sayesinde kil birikintilerindeki kil kristalleri arasındaki kılcık boşluk, su vakum kuvveti ile bu kil kristallerini bir arada tutar. Kil birimi neme maruz kaldığında şişer ve bu çekme kuvvetinin salınmasına neden olur. İkinci şişme mekanizması genellikle montmorillonit grubu killerde görülür. Kil suya maruz kaldığında, kil kristallerinin yanı sıra kristalleri oluşturan zayıf bağlı tekil yüzeylerden süzülür. Sonuç olarak, su adsorpsiyonu nedeniyle kil şişmesi olarak bilinen hacimsel artış meydana gelir (Popescu, 1986).

Kil tabakasının yüzeyine yakın bir su molekülünün fiziksel davranışı ve yapısı normal sudan farklıdır. Bu davranış, yüzeyden daha küçük mesafeler için sınırlıdır. Farklı kil mineralleri, yapısını sıradan sudan sıradan olmayan suya değiştirmek için su molekülleriyle farklı şekilde etkileşime girer (Grim, 1974). Bu su molekülleri kil yüzeyi üzerinde ince bir film oluşturur, filmin kalınlığı smektit kil minerallerinde maksimuma ulaşabilir. Hidratlı su moleküllerinin kil yüzeyine yakın davranışını açıklamak için çeşitli teoriler geliştirilmiştir. Su molekülleri dipolardır, su moleküllerinin pozitif yükleri kil tabakasının negatif yüklü yüzeyine doğru yönelir. Yüzeye yakın su molekülleri kendilerini katmanlar halinde düzenler, su molekülleri ile

kil yüzeyi arasındaki mesafe arttıkça bu kendi kendine düzenleme bozulur. Bazı teoriler, kil tabakasının yüzeyine yakın su moleküllerinin yapısının buza benzer olduğunu tahmin etmiştir; bunun nedeni kil tabakasının altıgen yüzeyi ve su molekülleri arasındaki hidrojen bağıdır (Grim, 1974).

Atmosferik sıcaklık ve basınçta, buzun su molekülleri birbirleriyle güçlü hidrojen bağları oluşturur ve güçlü bir hidrojen bağı ağı oluşturur. Su moleküllerinin düzenli dizilişinin aynı davranışı, ara katmanda da öngörülür. Silikat tabakası ve katyonlar ayrıca su molekülleri ile etkileşime girer (Brindley & Brown, 1980).

Kil tabakasının su molekülleri ve yüzey oksijen atomları arasında da gözlenen hidrojen bağı bağlantıları, bu hidrojen bağının gücü kil minerallerinin dört yüzlü yüküne bağlıdır. Genellikle kil yüzeyi ile kil yüzeyine yakın su molekülleri arasında zayıf hidrojen bağları oluşur. Ara katman su molekülleri, normal su moleküllerinden daha asidiktir (Dixon, 1989).

Ara katman katyonları kil tabakalarını tutar; bu katyonlar kil yüzeyinin yakınında bulunur. Yine bu katyonlar tarafından tutulan su molekülleri, katyonlar ve su molekülleri arasındaki etkileşim de kil yüzeyine yakın su moleküllerinin yapısını etkiler. Karşı iyonların yükü, elektronegatifliği, hidrasyon enerjisi ve boyutu da yüzeye yakın su moleküllerinin özelliklerini etkiler. Hidrasyon süresi boyunca karşıt iyonlar kuru kil tabakalarının yüzey oksijen atomlarına doğru çekilir (Grim, 1974).

Daha düşük bir katman yükünde ve suyun yüksek kimyasal potansiyelinde katyonlar, su moleküllerini çekerek hidrasyon sürecini tetikler ve ara katman içinde suyun ilk tek katmanını oluşturur. Su molekülleri bir, iki, üç ve dört katman oluşturur. Ara katmandaki su moleküllerinin veya su katmanlarının sayısı arttıkça taban aralığı artar (Brindley & Brown, 1980).

Ara katmandaki su içeriği üç farklı alandan uzaklaştırılabilir. Kil tabakalarının etrafındaki, gözeneklerdeki ve yüzeydeki su içeriği daha düşük sıcaklıklarda giderilebilir. Vermikülit ve smektit minerallerinde de bulunan ara katman su molekülleri (Grim, 1974; Dixon, 1989). Simektit mineralleri, 100 °C sıcaklıkta Ara katman su moleküllerini kaybeder. Daha yüksek sıcaklıkta kurutma, ara tabakayı kurutur. Kil minerallerinin 450 °C sıcaklıkta kurutulması, ara katmanı tamamen kurutur, bu da ara katmanı çökertir. Ara katmanın tamamen dehidrasyonundan veya çökmesinden sonra ara katmanın rehidrasyonu biraz zordur. Bu

muhtemelen tabakanın katyonları ve oktahedral yükü arasındaki çekimden kaynaklanmaktadır (Grim, 1968, Brindley, 1980). Ara katmanda bir miktar nem kalmışsa, atmosferik nemli koşullar altında rehidrasyon gerçekleşebilir (Newman, 1987).

2.4. ŞİŞME DAVRANIŞINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Zeminlerin şişme davranışını etkileyen faktörler üç gruba ayrılır (Nelson & Miller, 1992):

- Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri (Tablo 2.2.)
- Şişme potansiyelini etkileyen çevresel faktörler (Tablo 2.3.)
- Şişme potansiyelini etkileyen stres koşulları (Tablo 2.4.)

Tablo 2-2. Şişme potansiyelini etkileyen zemin özellikleri (Nelson & 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 katyon konsantrasyonu ve katyon değeri, şişmeyi engeller. Örneğin, zemin suyu içerisindeki Mg^{2+} katyonları, Na^+ katyonlarından 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. Doymunluk, 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 & 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. Şişme potansiyelini etkileyen gerilme koşulları (Nelson & 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. Şişme Potansiyelini Etkileyen Zemin Özellikleri

2.4.1.1. Kil Mineralojisi

Kaolinit, illit ve montmorillonit üç grup kildir. Montmorillonite minerali en yüksek şişme potansiyeline sahiptir. Ayrıca montmorillonite'in diğer topraklarla düşük oranda karışımı şişmeye neden olur. Kaolinit ve illit mineralleri genellikle şişmeyen zeminler olarak bilinmelerine rağmen, tane büyüklükleri çok küçük ise hacim değişikliğine neden olabilirler (Forouzan, 2016).

2.4.1.2. Zemin Su Kimyası

Kasyon konsantrasyonundaki artış ve kasyon değerliliği kil şişmesinde azalma sağlar. Örneğin, toprak suyundaki Mg^{2+} kasyonları (daha ince DDL ve topaklanma yapısına sahip olan) Na^+ (daha kalın DDL ve dağınık yapıya sahip olan) Na^+ 'dan daha az şişmeye neden olur (Forouzan, 2016).

2.4.1.3. Plastisite

Aslında, zeminin şişme potansiyeli plastisitesi ile gösterilebilir. Genel olarak, şişme ve büzülme potansiyeli daha yüksek olan zeminler daha yüksek plastisite indeksine ve daha yüksek likit limite sahiptir.

2.4.1.4. Zemin Strüktürü ve Fabrik

Floküle killerde dispers killere göre daha fazla genleşme meydana gelir. Çimentolu parçacıklar şişmeyi azaltabilir. Yüksek su içeriğinde sıkıştırma veya yeniden kalıplama nedeniyle kilin dokusu ve yapısı değişir. Kompaksiyonun, daha düşük su içeriği ile sıkıştırılan zeminlere göre daha düşük şişme potansiyeline sahip dağınık yapılara neden olduğu gösterilmiştir.

2.4.1.5. Kuru Birim Hacim Ağırlık

Kuru birim hacim ağırlığından daha yüksek birim hacim ağırlıklar parçacıklar arasında daha büyük itme kuvvetlerine neden olur ve bu da daha yüksek şişme eğilimi sağlar.

2.4.2. Şişme Potansiyelini Etkileyen Çevresel Faktörler

2.4.2.1. Başlangıç Nem Durumu

Düşük nem içeriğine sahip veya hiç nem içermeyen doğal olarak şişen zeminler, daha fazla su içeriğine sahip zemin profiline göre daha yüksek şişmeye sahiptir. Tersine, kurutma etkilerine maruz kaldığında daha yüksek su içeriğine sahip bir zemin profilinde su kaybı hızla gerçekleşir ve nispeten kuru bir profilden daha fazla büzülür.

2.4.2.2. Nem Değişimleri

Zemin profili, profilin üst kısmına yakın aktif bölgede su içeriğinde değişiklikler yaşadığında şişme meydana gelir. Nem içeriğindeki en büyük değişiklik ve şişen zeminlerin hacim değişimleri bu katmanlarda meydana gelir.

2.4.2.3. İklim

Zemin nemi mevcudiyeti ve mevsimsel nem değişiminin derinliği, yağış miktarı ve varyasyonundan önemli ölçüde etkilenir. Mevsimsel dalgalanma, kısa yağışlı dönemlere sahip yarı kurak ve kurak iklimlerde görülür.

2.4.2.4. Drenaj

Bir ev temelini etrafındaki zayıf yüzey drenajı, zayıf çatı drenajı ve sıg temelini yanındaki bahçe, temel altında daha derindeki suya erişimini sağlayan küçük su kütlesinin oluşmasına neden olur. Su içeriğindeki artış, şişen zeminlerin genişlemesine neden olur.

2.4.2.5. Hava sıcaklığı

Sıcaklık arttıkça nem, özellikle binaların ve kaldırımların altında olmak üzere daha soğuk alanlara doğru yayılır.

2.4.3. Şişme Potansiyelini Etkileyen Stres Koşulları

2.4.3.1. Gerilme Tarihçesi

Aşırı konsolide bir zemin, normalde aynı boşluk oranında konsolide olan aynı zeminden daha fazla şişmeye eğilimlidir. Zeminin şişmesinden kaynaklanan basınç, sıkıştırılmış killerin yaşlanmasında artar, ancak yaşlanmanın hafif yükleme altında şişme derecesini etkilenmez. Laboratuvar numunelerinde tekrarlanan ıslatma ve kurutma işlemi ile şişme azalır, ancak belirli sayıda ıslatma-kuruma döngüsünden sonra şişmede herhangi bir değişiklik görülmez.

2.4.3.2. Tekrarlı Şişme Büzülme Davranışı

Şişme potansiyeli yüksek zeminlerde inşa edilen temellerin şişme-büzülme döngüleri nedeniyle aşağı yukarı hareket etmesi, yapıda beklenmeyen yer değiştirmelere ve çatlaklara neden olabilir. Şişme-büzülme döngüleri üzerine yapılan çalışmalar, bu sürecin şişmiş yüzeylerin şişme potansiyeli üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Tripathy, Subba Rao, & Fredlund, 2002). Öte yandan araştırmacılar tarafından farklı sonuçlar bildirilmektedir (Türköz & Tosun, 2009) Bu konuyu araştıran araştırmacılar döngüsel şişme-büzülme davranışını farklı bir şekilde değerlendirmektedir. Bazı araştırmacılar, kil numunesi tekrarlı şişme ve büzülme yaşadığında, numunenin yorulma sergileyeceğini ve sonuç olarak daha az şişme meydana geleceğini belirtmektedir. Ancak diğer bilim adamları, numunenin büzülme sınırının altında su içeriğine maruz kalması durumunda, şişme potansiyelinin şişme ve büzülme döngüleri miktarı kadar arttığını ifade etmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar, belli bir şişme-büzülme döngüsünden sonra şişmenin dengeye geldiğini göstermektedir. Türköz (2009), yüzeylerin şişme potansiyeli üzerinde döngüsel etki değerlendirildiğinde artan parçacık boyutuna bağlı olarak, döngü sayısının artmasıyla şişme potansiyeli arttığını, yüzeyin şişme kabiliyetinin azaldığını bildirmiştir.

2.4.3.3. Arazi Şartları

Zemindeki nem miktarını değiştirmenin olası sonuçlarını değerlendirmek için, zemindeki ilk gerilme durumunu tahmin etmek gerekir. Başlangıç efektif gerilme/konsolidasyon oranını belirlemek için sahadan numune alınıp laboratuvar da testler yapılması gerekir. Ayrıca yerinde ölçümler yapmak, zemin davranışı hakkında bilgi verir.

2.4.3.4. Zemin Profili

Şişen zeminlerin potansiyel hacim değişiklikleri, profildeki potansiyel olarak şişen katmanların kalınlığından ve konumundan önemli ölçüde etkilenir. Profil yüzeyinden aktif bölgenin altındaki derinliklere kadar uzanan yüksek potansiyele sahip killerin bulunduğu koşullar altında en büyük hareket meydana gelir. Şişen zemin tabakasının üzerine şişmeyen malzeme geldiğinde veya sığ derinlikte ana kayanın üzerine geldiğinde, daha az hareket algılanacaktır.

2.5. ŞİŞEN ZEMİNLERİN TANIMLANMASI

Daha önce de belirtildiği gibi, plastik killerin şişme davranışını değerlendirmek için önemli çalışmalar yapılmıştır. Araştırmacılar, sıkıştırılmış ve doğal zeminlerin şişme davranışının ampirik araştırmalarına daha fazla önem vermişlerdir (Holtz & Gibbs, 1956). Genel olarak, şişen zeminlerin şişme özelliklerini belirlemek ve sınıflandırmak için çok sayıda deneysel teknik önerilmiştir. Şişen killeri nitelemek için kullanılan yorumlar sadece farklı değildir, aynı zamanda zemin indeks özelliklerine veya doğrudan şişme belirleme testlerinden verilen sonuçlara da dayanır.

Chen (1975), büzülme limiti ile şişme potansiyeli arasındaki ilişkiyi doğrulayacak herhangi bir çalışma olmadığını bildirmiştir. Sridharan ve Prakash (1998), kilin şişmesini ve büzülmesini yöneten mekanizmanın farklı olduğunu belirlenmişlerdir. Bu nedenle şişme potansiyelini tahmin etmek için büzülme limitini kullanmak doğru olmadığını belirtmişlerdir. Holtz ve Gibbs (1956), zeminlerin şişme potansiyelini değerlendirmek için serbest şişme yüzdesi deneyini önermiştir. Sridharan ve Prakash (2000) tarafından kil mineralojisinin etkisini alınmadığında likit limit, plastisite indeksi ve ilgili parametreler gibi indeks özellikleri üzerinden zeminlerin şişmesi hakkında tatmin edici bir tahmin yapmanın mümkün olmadığı belirtilmiştir. Serbest şişme oranı, zemin şişme özelliklerini daha gerçekçi ve tatmin edici bir şekilde tahmin eder. Ek olarak, bu deney zeminlerin kil mineralojisi hakkında bilgi sunmuştur (Tablo 2.8).

Tablo 2-5. Plastisite indeksi özelliklerine dayalı olarak önerilen geniş toprak sınıflandırması (O’neill & Poormoayed, 1980)

Likit limit	Plastisite İndisi	Şişme Potansiyeli (%)	Şişme Potansiyeli Sınıflandırılması
<50	<25	<0,5	Düşük
50-60	25-35	0,5-1,5	Orta
>60	>35	>1,5	Yüksek

Tablo 2-6. Likit limite dayalı olarak önerilen geniş toprak sınıflandırması (Chen F. , 1975)

Şişme Derecesi	W _L : %	
	Chen	ISI 498
Düşük	<30	20 – 35
Orta	30 – 40	35 – 50
Yüksek	40 – 60	50 – 70
Çok Yüksek	>60	70 – 90

Tablo 2-7. Plastisite indeksine dayalı olarak önerilen geniş toprak sınıflandırması (Chen F. , 1975), (Holtz & Gibbs, 1956), (IS 1498 (1970))

Şişme Derecesi	I _p : %		
	Holtz and Gibbs	Chen	IS 1498
Düşük	<20	0 – 15	<12
Orta	12 – 34	10 – 35	12 – 23
Yüksek	23 – 45	20 – 55	23 – 32
Çok Yüksek	>32	> 35	> 32

Tablo 2-8. Diğer önlemlere dayalı olarak önerilen geniş toprak sınıflandırması (Holtz & Gibbs, 1956) (Seed, Woodward, & Lungren, 1962)

Şişme Derecesi	Kolloid İçeriği % - 0.001 mm	Büzülme Limiti %	Büzülme İndeksi %	Serbest Şişme İndeksi %	Şişme Yüzdesi Odoometerda (Holtz and Gibbs) *	Şişme Yüzdesi Odoometerda (Seed et al.) *
Düşük	<17	>13	<15	<50	<10	0 – 1.5
Orta	12 – 27	8 – 18	50 – 100	10 – 20	10 – 20	1.5 – 5
Yüksek	18 – 37	6 – 12	100 – 200	20 – 30	20 – 30	5 – 25
Çok Yüksek	>27	<10	>200	>30	>30	>25

*7 kPa ek şarj altında kurudan doymuş duruma. Not: Büzülme indeksi = (plastik limit-büzülme limiti).

Şişen zeminler, dünya genelinde her yıl oldukça sık bir şekilde yapılara, özellikle hafif binalara ve kaldırımlara zarar verir. Örneğin, şişen zeminlerden kaynaklanan yıllık zararların, depremler ve seller dahil olmak üzere diğer tüm doğal afetlerden daha fazla olduğu bildirilmiştir (Jones & Holtz, 1973), (FEMA, 1982). Bu nedenle, bir mühendislik yapısının analiz ve tasarım aşamasında kapsamlı zemin sınıflandırması yapılması gerekmektedir.

Şişme potansiyelini belirlemenin en basit yolu (Peck, Hanson, & Thornburn, 1974) tarafından önerilmiştir. Plastisite indeksi (PI), önermelerindeki genleşme potansiyeli hakkında fikir sahibi olunmasını sağlayan tek belirleyici özelliktir (Tablo 2.9).

Tablo 2-9. Plastisite indeksi (PI) ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki (Peck, Hanson, & Thornburn, 1974)

Plastisite indeksi (PI, %)	Şişme Potansiyeli
0 – 15	Az
0 – 35	Orta
20 – 55	Yüksek
>35	Çok Yüksek

2.5.1. Serbest Şişme Deneyi

Plastik kilin şişme potansiyelini ve şişme basıncını belirlemenin en yaygın ve desteklenen yöntemleri doğrudan ölçüm yöntemleridir. Şişen zemin davranışını değerlendirmek için kullanılan doğrudan ölçümlerden biri, Serbest Şişme Deneyi veya Tek Boyutlu Şişme Deneyi (Chen 1975) olarak adlandırılan geleneksel tek boyutlu ödometrenin kullanılmasıdır.

Tek boyutlu şişme deneyi ve kohezyonlu zeminin oturma potansiyeli için yöntemler ASTM D 4546-08'de açıklanmaktadır. Doymamış zeminlerin tek boyutlu ıslanma kaynaklı şişmesinin veya büzülmesinin büyüklüğünü ölçmek için üç alternatif deneysel teknik ele alınmaktadır. Ek olarak, ıslanma kaynaklı deformasyonun ardından yük kaynaklı sıkıştırmayı ölçmek için bir yöntem sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, zemin döşemelerinin eğime göre tasarımında ve performanslarının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar. Bu deneyde yanıl şişme ve yanıl çevreleme basıncı simüle edilmediğinden, temel ve sıkıştırılmış zeminin yerinde kabarmasını tahmin etmek için bu deneysel yöntemlerden belirlenen şişme parametreleri saha koşullarını temsil etmeyebilir. İklim koşulları ile zeminin şişme özelliklerinin kombinasyonu, serbest

şişme yüzdesinin miktarında önemli bir rol oynar (Nelson & Miller, 1992). Örneğin, ticari bentonit test edilerek %1200 ile %2000 arasında serbest şişme değerleri rapor edilmiştir. Dawson (1953), Teksas'ta %50'lik kilsiz şişme değerinin gözlemlendiğini belirtmiş ve bu değer önemli bir şişme değeri olarak belirtilmiştir. Tablo 2.10., Sridharan ve K. Prakash (2004) tarafından ödometredeki şişme yüzdesine bağlı olarak şişen zeminleri sınıflandırmak için önerilmiştir. ASTM D 4829-11, şişme indeksine bağlı olarak şişen zeminleri belirlemek ve sınıflandırmak için başka kriterler önermiştir.

2.5.2. Serbest Şişme İndeksi (FSR)

Serbest şişme indeksi olarak da adlandırılan serbest şişme veya diferansiyel serbest şişme, jeoteknik mühendisleri tarafından zemin şişme potansiyelinin tahminlerini elde etmek için yapılan ve yaygın olarak kullanılan basit deneylerden biridir (Holtz & Gibbs, 1956).

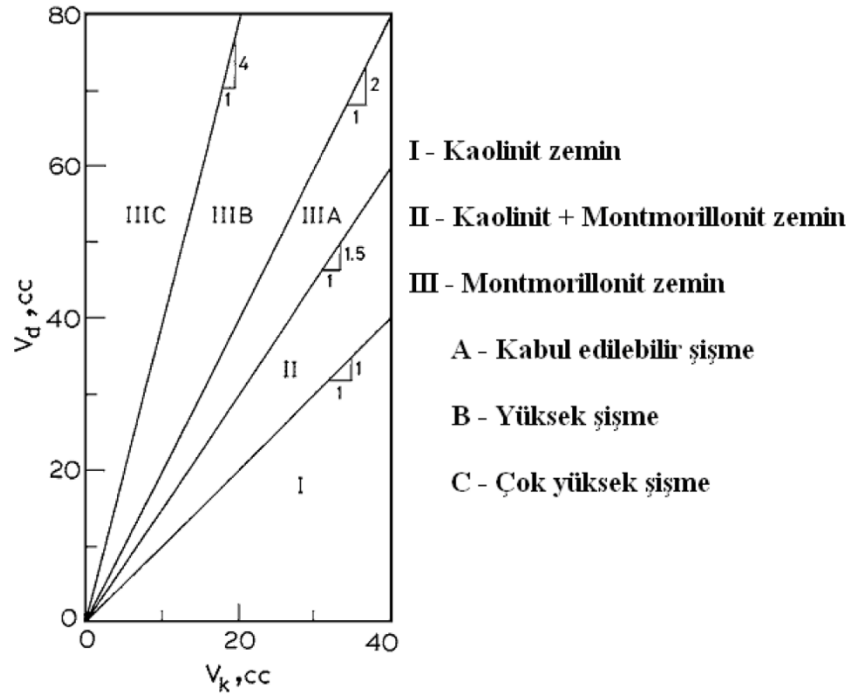
Serbest şişme indeksi deneyi, suya batırıldığında herhangi bir kısıtlama olmaksızın zeminin hacmindeki artıştan başka bir şey değildir. Bu yöntemin prosedürü, 10 cm³'lük etüvde kurutulmuş zeminin (40 no'lu elekten geçen) saf su ile doldurulmuş 100 cm³'lük ölçü kavanozuna dökülmesi ve bir gün numunenin şişmeye bırakılmasıdır. Serbest şişme, başlangıç hacminin yüzdesi olarak ifade edilen zemin hacmindeki artış olarak tanımlanır. Bu yöntemin dezavantajı, 10 cm³'ün ölçülmesinin kolay olmaması ve hataya eşlik edebilecek kişisel yargının etkili parametrelerden biri olmasıdır. 10 gr toprağın kapladığı hacim olarak 10 cm³ olarak ölçmek kabul edilebilir ve yoğunluk değişikliklerini hesaba katılmaz.

IS 1498, toprağın şişme potansiyelini tahmin etmek için bir kriter belirlemiştir. Bu yaklaşım, saf sudaki zemin hacminin kerosen veya karbon tetraklorürdekine oranı olarak tanımlanan serbest şişme oranına dayanmaktadır. Bazı durumlarda, kaolinitçe zengin zeminler için, bu yöntem negatif serbest şişme indeksleri verir. Eğer zeminler yüksek miktarda kaolinit içeriyorsa, Montmorillonitli zeminin şişme potansiyelini hafife alabilir.

Bu sorunu çözmek için değiştirilmiş serbest şişme indeksi (MFSI) Sridharan (1985) tarafından önerildi. Bu yöntem, zemin hacminin, zemin kuru ağırlığına oranına dayanmaktadır. Deney için, 10 gr zemin numunesi fırında kurutulmalı ve 100 ml'lik bir ölçüm kavanozunda saf su ile iyice karıştırılmalı ve ardından çökmeye bırakılmalıdır. Aynı numuneden 10 gr kurutulmuş halde 100 ml'lik ölçüm kabında gazyağı ile iyice karıştırılmalı ve ardından çökmeye bırakılmalıdır. Ertesi gün çökme miktarları ölçülerek FSR değerleri hesaplanır (Tablo 2.10).

Tablo 2-10. Serbest şişme oranına dayalı sınıflama (Prakash & Sridharan, 2004).

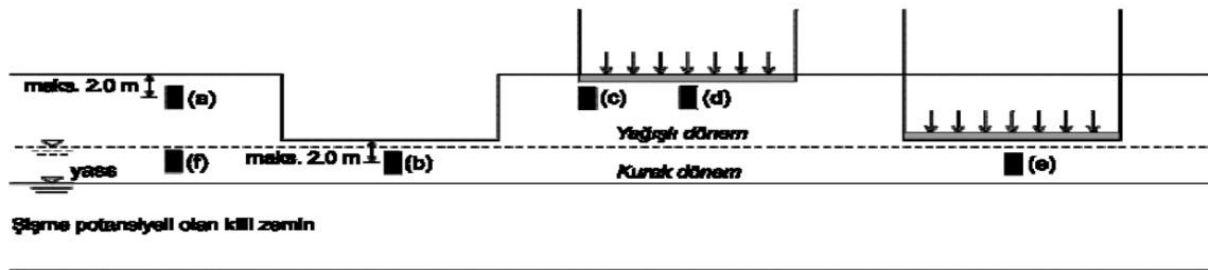
Serbest Şişme Oranı (FSR)	Şişme Derecesi	Kil Tipi	Baskın Kil Mineral Tipi
≤ 1	İhmal edilebilir	Şişmeyen	Kaolinit
1 – 1.5	Düşük	Karışık	Kaolinit ve Montmorillonit
1.5 – 2	Orta	Şişen	Montmorillonit
2 – 4	Yüksek	Şişen	Montmorillonit
> 4	Çok Yüksek	Şişen	Montmorillonit

**Şekil 2-8.** Şişme zemin sınıflandırması (Prakash and Sridharan, 2004).

3. YÖNTEM

Killerin şişme davranışı nedeniyle binaların duvarlarında çatlaklara, kiriş ve kolonlarda yapısal hasarlara neden olurlar. Bu zararın asıl sebebi tekrarlı şişme – büzülme davranışıdır. Yağışsız geçen kurak dönemlerde zeminler su kaybederek kurumakta ve çatlamaktadır. Bu dönemi takip eden yağışlı dönemde ise zemin doymunlaşmakta ve hacim genişlemesiyle birlikte şişmektedir. Killerin şişme – büzülme davranışına konu olabilecek değişik durumlar Şekil 3.1.’de idealize edilerek çizilmiştir. Şişme – büzülme deneyleri kuruma ıslanma durumlarına göre tam ıslanma – kuruma, kısmi kuruma – tam ıslanma gibi iki farklı biçimde yapılabilir. Daha önce yapılan çalışmalarda yüzeye yakın kilin ya da açık bırakılan kazıları niteleyen tam ıslanma – tam kuruma çevrimleri araştırılmıştır. Killerin bu davranışını anlamak için ödometre hücresi geliştirilerek bir cihaz tasarladık. İstanbul’un farklı bölgelerinden almış olduğumuz kil numunelerinin şişme – büzülme deneyleri bu cihaz ile yapıldı.

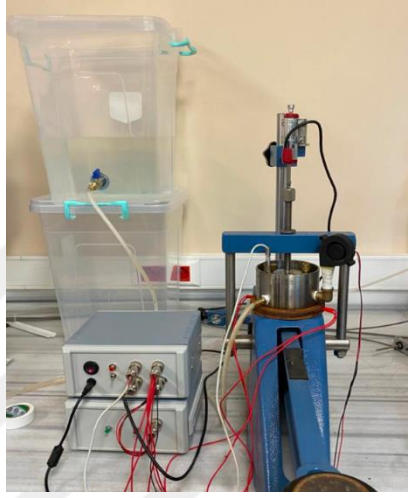
Açıklama	Kuruma-ıslanma durumu	Sürşarj yükü
(a) Yüzeye yakın kil (Sonradan bir yapı, kilit taşı, beton kanal inşa edilebilir)	Tam kuruma - tam ıslanma	0-25 kPa
(b) Açık bırakılan kazı (Sonradan yapı, garaj, menfez inşa edilebilir)	Tam kuruma - tam ıslanma	0-25 kPa
(c) Sığ temelin altında, kenar taraftaki 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 3-1. Şişme- büzülme kapsamında ele alınacak durumlar ve açıklamalar.

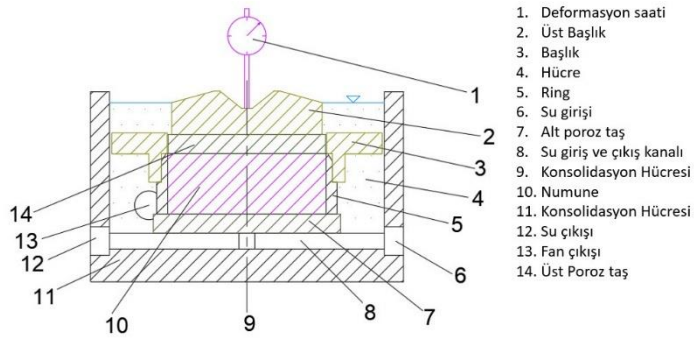
3.1. GELİŞTİRİLEN ŞİŞME – BÜZÜLME CİHAZI

Killerin şişme – büzülme davranışını anlamak için ilk olarak ödometre hücresini geliştirdik. Cihazımız 3 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümü deneyde gerekli olan suyun tutulduğu su tankının olduğu kısımdır. Deneyde kullanılacak su bu tanktan karşılanmaktadır. Üzerinde suyun cihaza verilmesini sağlamak için bir delik açılmıştır. Bir hortum yardımı ile cihaz ile bağlantısı sağlanmıştır ve suyun akmaması gerek durumlar için su akışını kapacak bir vana bulunmaktadır.



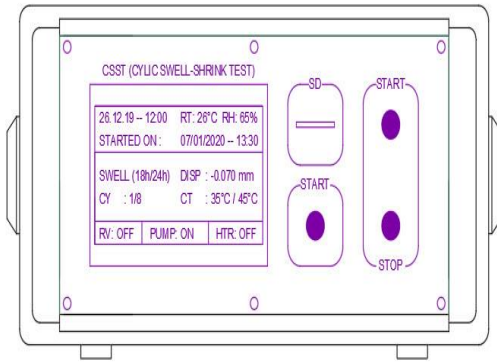
Şekil 3-2. Tasarlanan Şişme-Büzülme Cihazı.

Cihazın ikinci kısmı ise ödometre hücresinin geliştirilmiş halidir. Bu hücreye su girişi, su çıkışı ve fan için olmak üzere 3 adet delik oluşturulmuştur. Böylelikle deneyin şişme döngüsü başladığında su otomatik olarak hücreye verilmiş, büzülme döngüsü başladığında ise hücre içerisindeki su otomatik olarak boşaltılmıştır. Ayrıca hücre altında hücrenin oturduğu kısma 2 adet ısıtıcı yerleştirilmiştir. Büzülme döngüsü başladığında su boşaltılmaya başladığı anda ısıtıcılar çalıştırılarak hücre içerisindeki suyun boşaltılması ve numunenin büzülmesi sağlanmıştır.

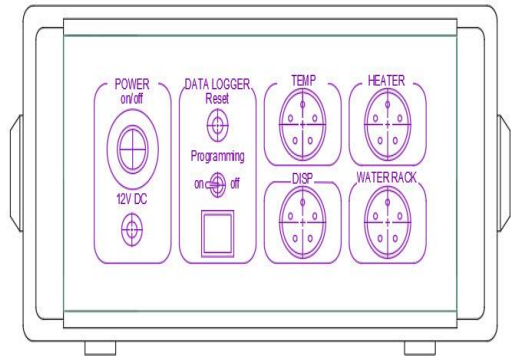


Şekil 3-3. Modifiye Edilmiş Ödometre Hücresi.

Cihazın üçüncü kısmı ise kontrol hücresidir. Kontrol hücresi 2 ayrı kutudan oluşmaktadır. İlk kutuda açma kapama düğmesi, manuel su ekleme ve boşaltma düğmesi, deneyin hangi döngüde yer aldığını, şişme ya da büzülme miktarını, hücre içindeki sıcaklığı gösteren ekran, ısıtıcılara çalıştırılıp kapatılmasını sağlayan bağlantı hattı ve diğer kontrol hücresi ile bağlantıyı sağlayan kısım yer almaktadır. İkinci kutuda ise hücreye suyun verilmesini ve hücreden suyun boşaltılmasını sağlayan valfler yer almaktadır.



Şekil 3-4. Geliştirilen cihazın kontrol kutusunun önden görünüşü.



Şekil 3-5. Geliştirilen cihazın kontrol kutusunun arkadan görünüşü.

3.2. ARAŞTIRMADA KULLANILAN KİLLERLE İLGİLİ BİLGİLER

Şişme – büzülme davranışının killerin şişme potansiyelini nasıl etkileyeceğini anlamak için literatürde yaklaşık 15-20 tane araştırma bulunmaktadır. Bununla birlikte İstanbul'un farklı yerlerinden alınan killer üzerinde böyle bir araştırma yapılmamıştır. Bu doğrultuda Şekil 3.1.'de görülen 12 değişik bölgeden örselenmemiş ve örselenmiş numune alınıp hem doğal olarak hem de yeniden yapılandırılarak toplam 39 adet değişik numune üzerinde tekrarlı şişme büzülme deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3-6. Deneylerde kullanılan numunelerin alındığı yerler

Öncelikle zemin numunelerinin bazı indeks ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla; kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır. Çalışılan zeminlerin numune kodları Tablo 3.1 görülmektedir.

Tablo 3-1. Kullanılan numune kodları ve hazırlanması

Numune Kodu	Numunenin Çıkarıldığı Bölge	Hazırlanma Şekli
C1	Ambarlı	Doğal numune
C2	Hadımköy	Doğal numune
C3	Çatalca	Doğal numune
C4	Zeytinburnu	Kompaksiyon
C5	Zeytinburnu	Kompaksiyon
C6	Avcılar	Kompaksiyon
C7	Zeytinburnu	Kompaksiyon
C8	Silivri	Kompaksiyon
C9	Silivri	Kompaksiyon
C10	Fatih	Kompaksiyon
C11	Bağcılar	Kompaksiyon
C12	Bağcılar	Kompaksiyon

Tablo 3-2. Kullanılan zeminlerin bazı özellikleri.

Zemin Özellikleri							
Kullanılan zeminler	Likit Limit,	Plastik Limit,	Plastisite İndisi,	Su içeriği	γ_n	γ_d	
	LL	PL	PI	(%)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	
	C1	65	29.1	35.9	31.4	16.2	12.5
	C2	72	31.5	40.5	51.1	14.5	9.6
	C3	58	31	27	24.5	16.8	13.5
	C4	89	25	64	24.7	12.8	20.7
	C5	61	29	32	39.7	15.3	11.2
	C6	62	30.9	31.1	39.2	17.1	36.9
	C7	72	33.3	38.7	43.9	14	19.5
	C8	91	34.8	56.2	38.6	14.8	10.8
	C9	69	37.5	31.5	34.7	13.7	10.2
	C10	74	26.3	47.7	44	15	10.4
	C11	62	26.1	35.9	33.3	15.3	11.3
C12	88	22	46	31.7	16.7	12.7	

3.3. ŞİŞME – BÜZÜLME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

3.3.1. Serbest Şişme Oranı Belirleme Deneyleri

Numunelerin serbest şişme indisi değerleri (Prakash & Sridharan, 2004) verilen yöntem ile yapılmıştır. 10 gr kurutulmuş numune (425 μm (40 nolu elek) elekten geçmiş), içi saf su ile dolu 100 ml'lik silindir mezürün içine konulup karıştırılarak zemin – saf su süspansiyonu oluşturulmuştur. 24 saat beklenmiş sonrasında zeminin denge çökelti hacmi ölçülmüştür (V_d). Aynı numuneden aynı anda 10 gr daha kurutulmuş numune (425 μm (40 nolu elek) elekten geçmiş) alarak, içi gaz yağı ile dolu 100 ml'lik silindir mezürün içine konulup karıştırılarak zemin – gaz yağı süspansiyonu oluşturulmuştur. 24 saat beklenmiş sonrasında zeminin denge çökelti hacmi ölçülmüştür (V_k). Serbest şişme oranı (FSR) V_d 'nin V_k 'ya oranı olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar bulgular kısmında yer almakta olup, Tablo 3.3.'de yer alan oranlara göre tanımlamaları yapılmıştır.

Tablo 3-3. Serbest şişme oranına (FSR) dayalı sınıflama (Prakash & 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

3.4. TEKRARLI ŞİŞME – BÜZÜLME DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

3.4.1. Numunelerin Hazırlanması ve Tanımlanması

Tekrar şişme – büzülmenin zeminin şişme potansiyeline etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan bu tez çalışmasında 12 farklı bölgeden alınan killerin doğal ve yeniden yapılanmış (kompaksiyonla) toplam 39 farklı numune kullanılmıştır. Ambarlı'dan alınan örselenmemiş numunelere C1 adı verilmiştir. Başlangıç su muhtevası %32, %35.5, %40.6 %22.8, %23.3, %27.3, % 22.4, % 44.9, %17.4, %28.2 ve %37.2 olan 11 ayrı örselenmemiş numune üzerinde de deney yapılmış olup, bu numunelere, C1b_UD, C1c_UD, C1d_UD, C1e_UD, C1f_UD, C1g_UD, C1h_UD, C1i_UD, C1k_UD, C1l_UD ve C1m_UD adı verilmiştir. Ayrıca uzun döngünün şişme potansiyeline etkisini görmek için 24 döngülü 2 adet deney yapılmış ve burada kullanılan numunelere de C1a_UD ve C1j_UD adı verilmiştir. Hadımköy'den alınan örselenmemiş numunelere C2 adı verilmiştir. Başlangıç su muhtevası %48.6, %45.1, %44,

%54.9, %58.3, %52.9 ve %54.2 olan 7 ayrı örselenmemiş numune üzerinde de deney yapılmış olup, bu numunelere, C2a_UD, C2b_UD, C2c_UD, C2d_UD, C2e_UD, C2f_UD ve C1g_UD adı verilmiştir. Çatalca'dan alınan örselenmemiş numunelere C3 adı verilmiştir. Başlangıç su muhtevası %24.5 olan örselenmemiş numune üzerinde de deney yapılmış olup, bu numunelere, C3_UD adı verilmiştir. Çatalca'dan alınan örselenmemiş numunelere C3 adı verilmiştir. Zeytinburnu'ndan alınan örselenmiş C4 numunesinden, %21.7 ve %27.8 su muhtevasında kompakte edilerek C4a_RC1 ve C4b_RC3 numuneleri hazırlanmıştır. Zeytinburnu'ndan alınan örselenmiş C5 numunesinden, %23.6 ve %55.8 su muhtevasında kompakte edilerek C5a_RC1 ve C5b_RC3 numuneleri hazırlanmıştır. Avcılar'dan alınan örselenmiş C6 numunesinden, %33.6, %40.1 ve %44 su muhtevasında kompakte edilerek C6a_RC1, C6b_RC3 ve C6c_RC4 numuneleri hazırlanmıştır. Zeytinburnu'ndan alınan örselenmiş C7 numunesinden, %40.5 ve %45.6 su muhtevasında kompakte edilerek C7a_RC1 ve C7b_RC3 numuneleri hazırlanmıştır. Silivri'den alınan örselenmiş C8 numunesinden, %23.1 ve %54 su muhtevasında kompakte edilerek C8a_RC1 ve C8b_RC3 numuneleri hazırlanmıştır. Silivri'den alınan örselenmiş C9 numunesinden, %32.1, %33.8 ve %38.1 su muhtevasında kompakte edilerek C9a_RC1, C9b_RC3 ve C9c_RC4 numuneleri hazırlanmıştır. Fatih'ten alınan örselenmiş C10 numunesinden %44 su muhtevasında kompakte edilerek C10_RC3 numuneleri hazırlanmıştır. Bağcılar'dan alınan örselenmiş C11 numunesinden, %29 ve %41.7 su muhtevasında kompakte edilerek C11a_RC1 ve C11b_RC3 numuneleri hazırlanmıştır. Bağcılar'dan alınan örselenmiş C12 numunesinden %31.7 su muhtevasında kompakte edilerek C12_RC3 numuneleri hazırlanmıştır.

Tablo 3-4.'te araştırmada kullanılan numunelerin hazırlanma şekli, deney şartları ve açıklamaları verilmiştir.

Tablo 3-4. Araştırmada kullanılan hazırlanması ve deney şartları.

Numunenin Geldiği Yer	Tanımlama	Hazırlama Şekli	Açıklama
Ambarlı	C1a_UD	Doğal numune	$w_o = \%41.5$
Ambarlı	C1b_UD	Doğal numune	$w_o = \%32.0$
Ambarlı	C1c_UD	Doğal numune	$w_o = \%35.2$
Ambarlı	C1d_UD	Doğal numune	$w_o = \%40.6$

Ambarlı	C1e_UD	Doğal numune	w _o = %22.8
Ambarlı	C1f_UD	Doğal numune	w _o = %23.2
Ambarlı	C1g_UD	Doğal numune	w _o = %27.3
Ambarlı	C1h_UD	Doğal numune	w _o = %22.4
Ambarlı	C1i_UD	Doğal numune	w _o = %44.9
Ambarlı	C1j_UD	Doğal numune	w _o = %35.4
Ambarlı	C1k_UD	Doğal numune	w _o = %17.4
Ambarlı	C1l_UD	Doğal numune	w _o = %28.2
Ambarlı	C1m_UD	Doğal numune	w _o = %37.2
Hadımköy	C2a_UD	Doğal numune	w _o = %48.6
Hadımköy	C2b_UD	Doğal numune	w _o = %45.1
Hadımköy	C2c_UD	Doğal numune	w _o = %44
Hadımköy	C2d_UD	Doğal numune	w _o = %54.9
Hadımköy	C2e_UD	Doğal numune	w _o = %58.3
Hadımköy	C2f_UD	Doğal numune	w _o = %52.9
Hadımköy	C2g_UD	Doğal numune	w _o = %54.2
Çatalca	C3_UD	Doğal numune	w _o = %24.5
Zeytinburnu	C4a_RC1	Kompaksiyon	Optimumdan Kuru w _o = %21.7
Zeytinburnu	C4b_RC3	Kompaksiyon	Optimumdan Islak w _o = %27.8
Zeytinburnu	C5a_RC1	Kompaksiyon	Optimumdan Kuru w _o = %23.6
Zeytinburnu	C5b_RC3	Kompaksiyon	Optimumdan Islak w _o = %55.8
Avcılar	C6a_RC1	Kompaksiyon	Optimumdan Kuru w _o = %33.6

Avcılar	C6b_RC3	Kompaksiyon	Optimumdan Islak $w_o = \%40.1$
Avcılar	C6c_RC4	Kompaksiyon	Optimumdan Islak $w_o = \%44$
Zeytinburnu	C7a_RC1	Kompaksiyon	Optimumdan Kuru $w_o = \%40.5$
Zeytinburnu	C7b_RC1	Kompaksiyon	Optimumdan Islak $w_o = \%45.6$
Silivri	C8a_RC1	Kompaksiyon	Optimumdan Kuru $w_o = \%23.1$
Silivri	C8b_RC3	Kompaksiyon	Optimumdan Islak $w_o = \%54$
Silivri	C9a_RC1	Kompaksiyon	Optimumdan Kuru $w_o = \%32.1$
Silivri	C9b_RC3	Kompaksiyon	Optimumdan Islak $w_o = \%33.8$
Silivri	C9c_RC4	Kompaksiyon	Optimumdan Islak $w_o = \%38.1$
Fatih	C10_RC3	Kompaksiyon	Optimumdan Islak $w_o = \%44$
Bağcılar	C11a_RC1	Kompaksiyon	Optimumdan Kuru $w_o = \%29$
Bağcılar	C11b_RC3	Kompaksiyon	Optimumdan Islak $w_o = \%41.7$
Bağcılar	C12_RC1	Kompaksiyon	Optimumdan Islak $w_o = \%31.7$

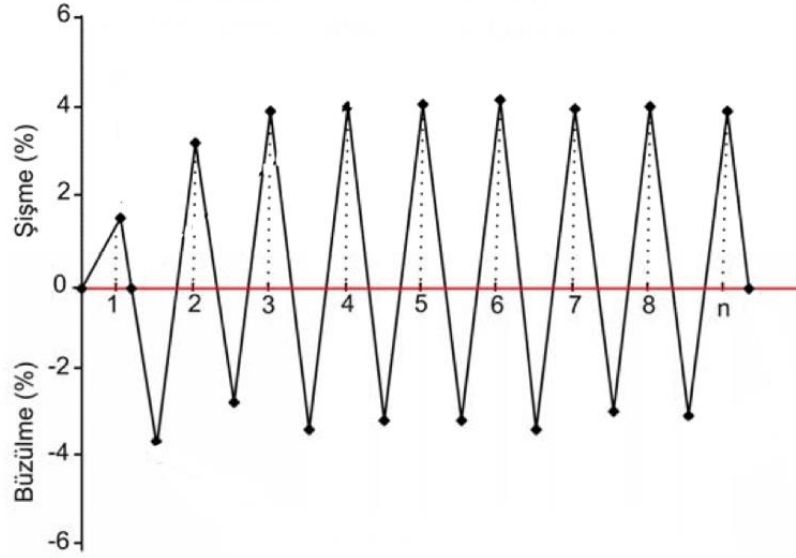
3.4.2. Tekrarlı Şişme – Büzülme Deneyi

İncelenen zemin numunelerinin şişme yüzdelerinin belirlenebilmesi için geliştirilen ödometre cihazı kullanılarak şişme – büzülme deneyleri yapılmıştır. Shelby tüpünden örselenmeden çıkarılan numuneler veya standart proktor kalıbında sıkıştırılan numuneler ödometre ringi içerisine alınmıştır. Numune yerleştirilmeden önce ring tartılmıştır. Boyu ölçülmüştür. Ayrıca üst ve alt poroz taşları ıslak ve kuru olacak tartılıp kalınlığı ölçülmüştür. Ring içindeki numunenin altı ve üstü filtre kâğıdı ile kaplanmıştır. Filtre kağıdının üstüne altı üstü olarak poroz taşlar konulup üst başlıkla birlikte tartılmıştır.

Hazırlanan numune geliştirilen ödometre aletine konulmuştur. Yükleme boyunduruğu yatay hale getirilmiştir. Çok düşük bir gerilme (100 g) deney başlangıcında uygulanmıştır. Numune 1 gün şişmeye bırakılıp, şişme bitene kadar sürekli okuma otomatik olarak alınmıştır. Şişme döngüsü bitince cihaz suyu boşaltıp ısıtıcıları açarak büzülme döngüsüne geçmiştir. 48 saat büzülme döngüsü olacak şekilde yapılmıştır. Bu süre zarfında cihaz numunenin boyundaki

değişimi sürekli olarak kaydetmiştir. En son şişme döngüsünden sonra cihaz kapatılmış, içindeki su boşaltılmıştır. Cihazdan çıkarılan numune poroz taşlar ve üst başlık ile tartılıp, boyu ölçülmüştür.

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



Şekil 3-7. Tekrarlı şişme- büzülme deneyinin şematik gösterimi.

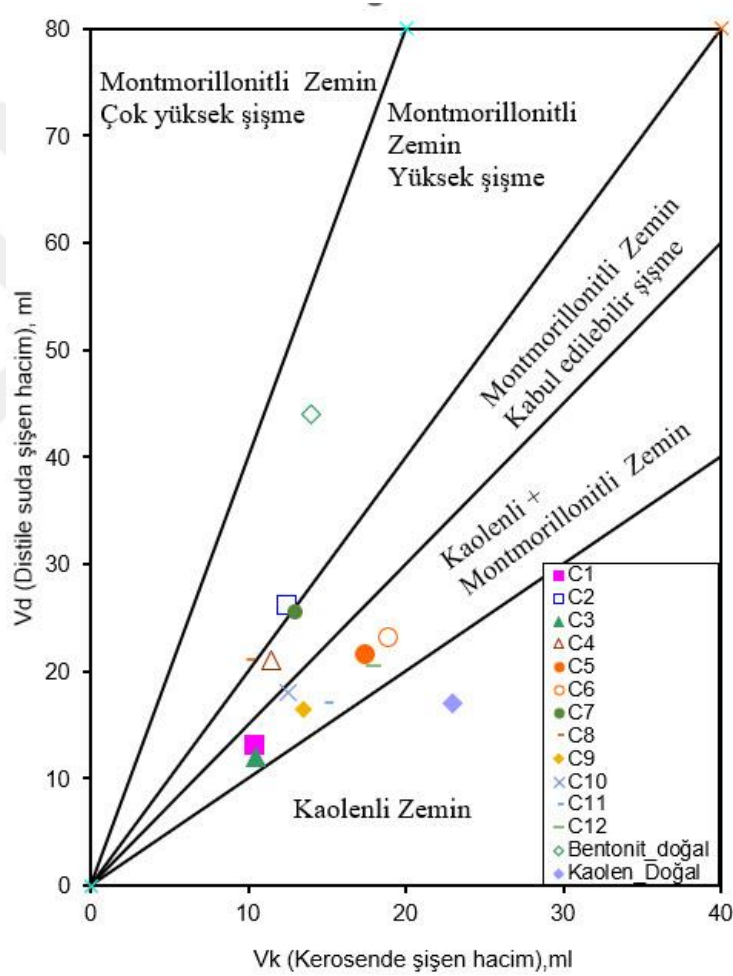
4. BULGULAR

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 aktarılmıştır. Şişme – büzülme deney sonuçları sunulurken, bu çalışma kapsamında getirilen yeni yaklaşımlar verilmiştir.

Tablo 4-1. İncelenen zeminlerin mineralojilerine göre sınıflandırılması.

Zemin	Kil Minerali Tipi		
	Prakash ve Sridharan (2004)	XRD Analizi	Değerlendirme
C1	Montmorillonitli + kaolenli zemin	-	İllit
C2	Montmorillonitli zemin	-	İllit
C3	Montmorillonitli + kaolenli zemin	-	İllit
C4	Montmorillonitli zemin	-	Simektit + illit karışımı
C5	Montmorillonitli + kaolenli zemin	-	İllit
C6	Montmorillonitli + kaolenli zemin	-	İllit
C7	Montmorillonitli zemin	-	İllit
C8	Montmorillonitli zemin	-	Simektit + illit karışımı
C9	Montmorillonitli + kaolenli zemin	-	İllit
C10	Montmorillonitli zemin	-	Simektit + illit karışımı
C11	Montmorillonitli + kaolenli zemin	-	Simektit + illit karışımı
C12	Montmorillonitli + kaolenli zemin	-	Simektit + illit karışımı
GK1	Montmorillonitli + kaolenli zemin	I/S karışık katman	Simektit + illit karışımı
GK2*	Montmorillonitli zemin	I/S karışık katman	Simektit + illit karışımı
GK3*	Montmorillonitli zemin	I/S karışık katman	Simektit + illit karışımı
GK4*	Montmorillonitli zemin	Simektit	Simektit
GK5*	Montmorillonitli + kaolenli zemin	I/S karışık katman	Simektit + illit karışımı
GnK*	Montmorillonitli + kaolenli zemin	I/S karışık katman	Simektit + illit karışımı
Kaolen	Kaolenli zemin	Kaolen + illit	Kaolen
Bentonit	Montmorillonitli zemin	Simektit	Simektit

Tablo 4-1.'de Prakash ve Sridharan (2004)'ın bu çalışma killeri için vermiş olduğu tahminleri görülmektedir. GK numuneleri Özkan (2009)'ın çalışmalarından alınmıştır. Şekil 4-1.'de serbest şişme oranı deneyinde distile su içindeki şişmenin kerosendeki şişmeye oranından şişme ve mineral cinsi verilmiştir. Buna göre C1, C3, C5, C6, C9, C11 ve C12'de kaolinit ile montmorillonit mineralleri karışık olarak, C10 montmorillonit ile karışık zemin sınır değerinde, C4 montmorillonit zemin kabul edilebilir şişme bölgesinde, C2, C7 ve C8 kabul edilebilir şişme ile yüksek şişme arasındaki sınırdadır, bentonit montmorillonit yüksek şişme, kaolen ise kaolinit zemin bölgesinde bulunmaktadır.



Şekil 4-1. Serbest şişme deneyine göre şişen montmorillonit ve şişmeyen kaolinit zemin sınıflaması (Prakash and Sridharan, 2004).

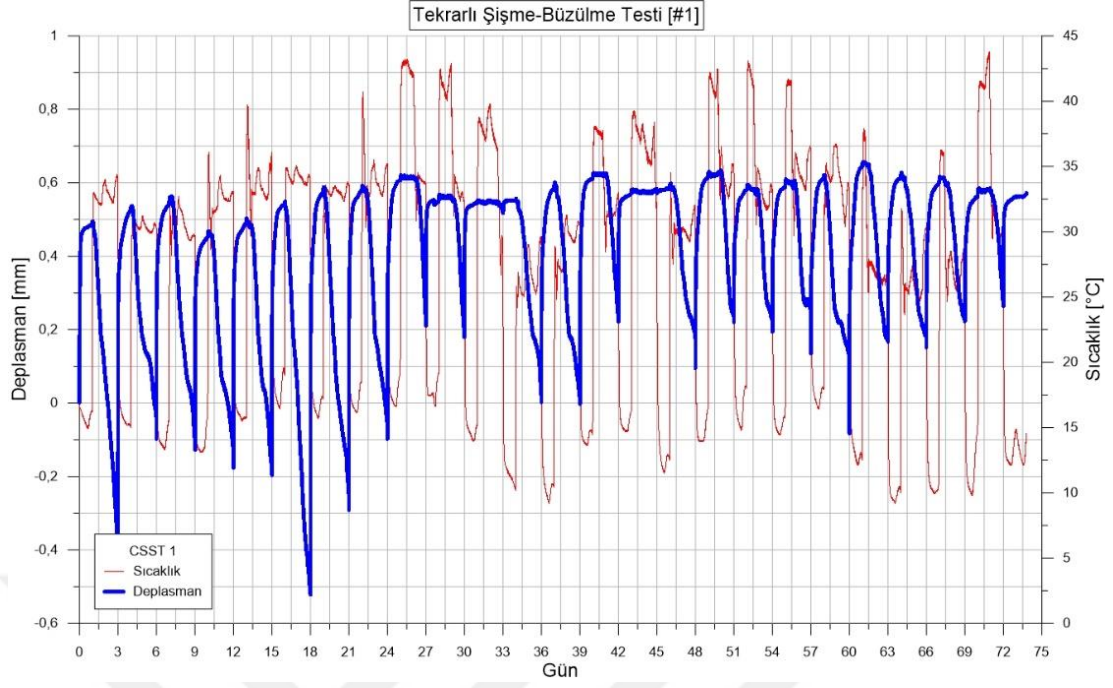
4.1. TEKRARLI ŞİŞME – BÜZÜLME DENEYLERİ

Bu tez çalışmasında, zemin numunelerinin farklı başlangıç koşullarındaki şişme yüzdeleri geliştirdiğimiz cihaz kullanılarak tekrarlı şişme – büzülme deneyleri ile belirlenmiştir. İncelenen zemin numunelerinin farklı başlangıç koşulları altındaki şişme yüzdesi değerleri, döngü başında ve büzülme sonunda çekilen fotoğrafları ile birlikte geçen zamana ve döngü sayısına bağlı olarak aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.

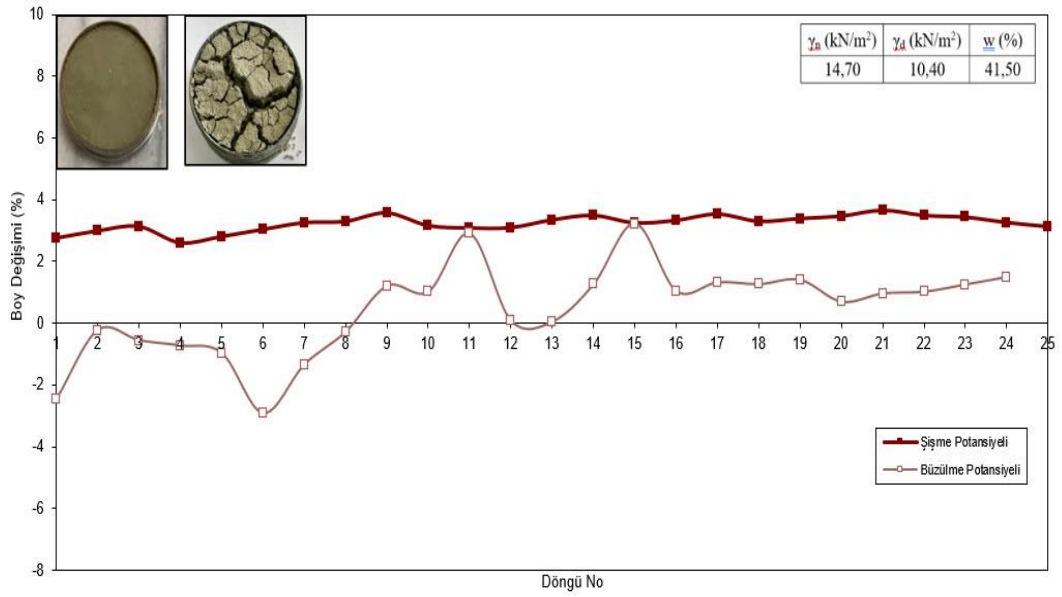
4.1.1. Ambarlı Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları

Şekil 4-2, Şekil 4-4, Şekil 4-6, Şekil 4-8, Şekil 4-10, Şekil 4-12, Şekil 4-14, Şekil 4-16, Şekil 4-18, Şekil 4-20, Şekil 4-22, Şekil 4-24 ve Şekil 4-26’da sırasıyla C1a_UD, C1b_UD, C1c_UD, C1d_UD, C1e_UD, C1f_UD, C1g_UD, C1h_UD, C1i_UD, C1j_UD, C1k_UD ve C1m_UD numunelerinin geliştirilen cihazdan elde edilen zamana bağlı deplasman ve sıcaklık grafiği, Şekil 4-3, Şekil 4-5, Şekil 4-7, Şekil 4-9, Şekil 4-11, Şekil 4-13, Şekil 4-15, Şekil 4-17, Şekil 4-19, Şekil 4-21, Şekil 4-23, Şekil 4-25 ve Şekil 4-27’de sırasıyla C1a_UD, C1b_UD, C1c_UD, C1d_UD, C1e_UD, C1f_UD, C1g_UD, C1h_UD, C1i_UD, C1j_UD, C1k_UD ve C1m_UD numunelerinin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) grafiği verilmiştir. Şekil 4-3, Şekil 4-5, Şekil 4-7, Şekil 4-11 ve Şekil 4-23’te şişme yüzdelerinin giderek arttığı görülmüştür. Şekil 4-9, Şekil 4-17 ve Şekil 4-35’te şişme yüzdelerinin artıp sabit kaldığı görülmüştür. Şekil 4-13, Şekil 4-15 ve Şekil 4-26’da şişme yüzdelerinin giderek azaldığı görülmüştür. Şekil 4-19’da şişme yüzdeleri azalıp arttığı görülmüştür. Şekil 4-21’de şişme yüzdelerinin sabit kaldığı görülmüştür.

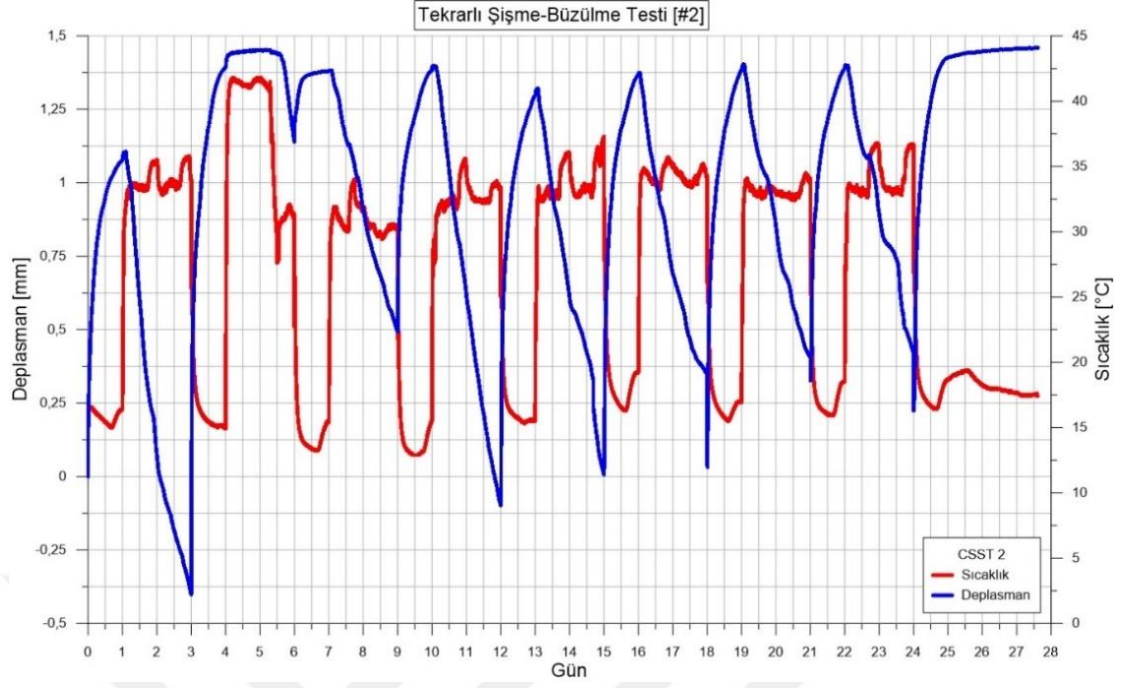
Bununla birlikte aynı kil olan C1a_UD numunesiyle yapılan 24 döngülü deneyde şişme yüzdelerinin giderek arttığı görülmüştür. C1j_UD numunesiyle yapılan 24 döngülü deneyde şişme yüzdelerinin azalıp arttığı görülmüştür.



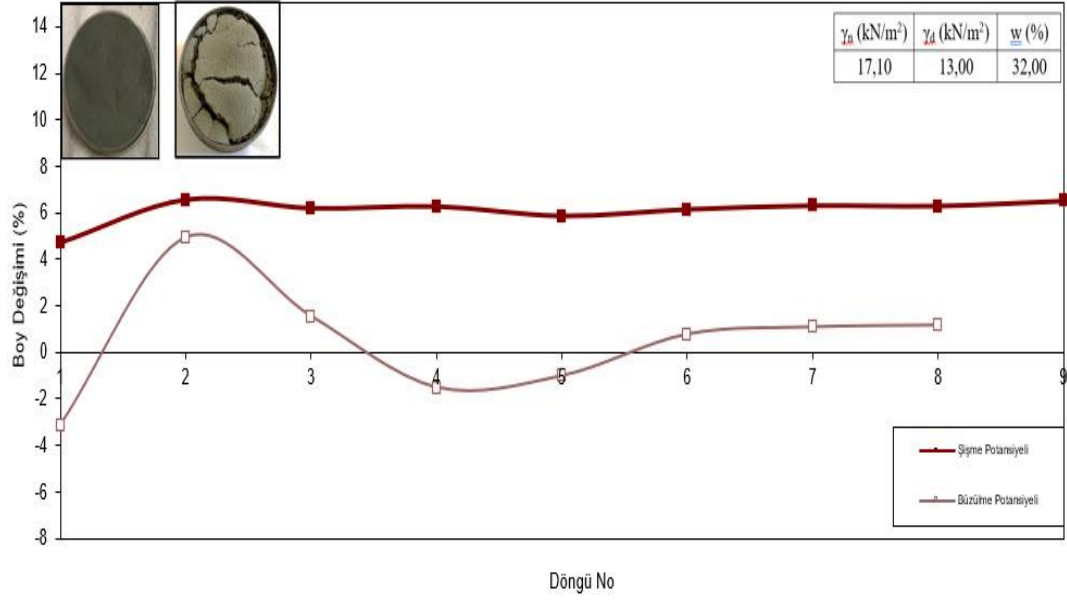
Şekil 4-2. C1a_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği.



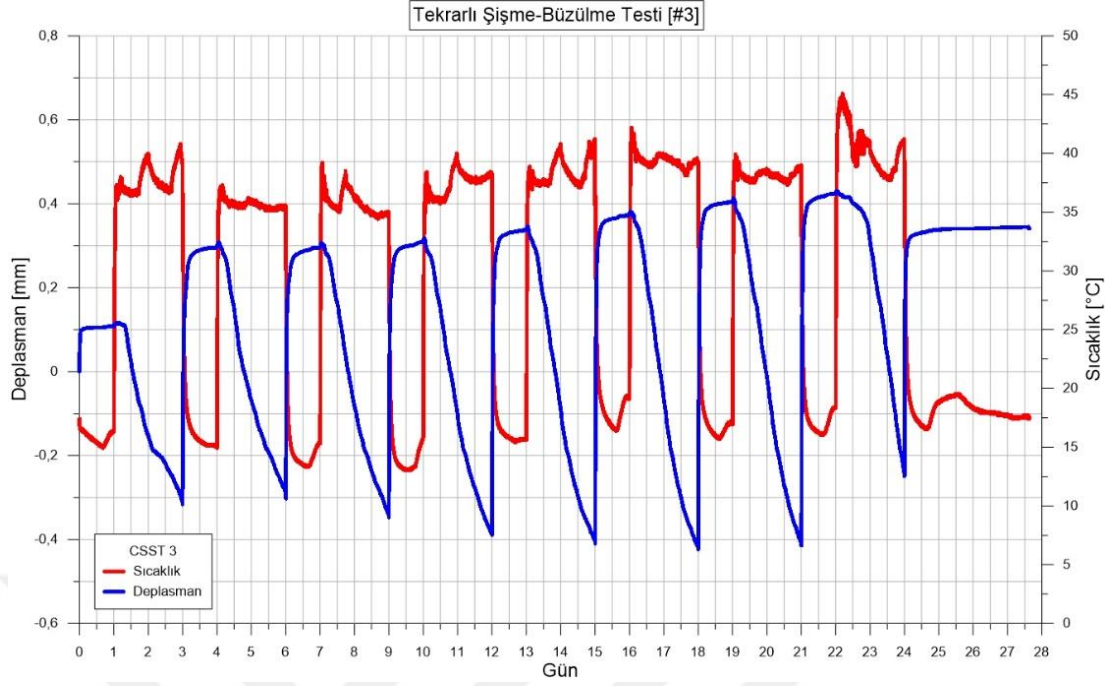
Şekil 4-3. C1a_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



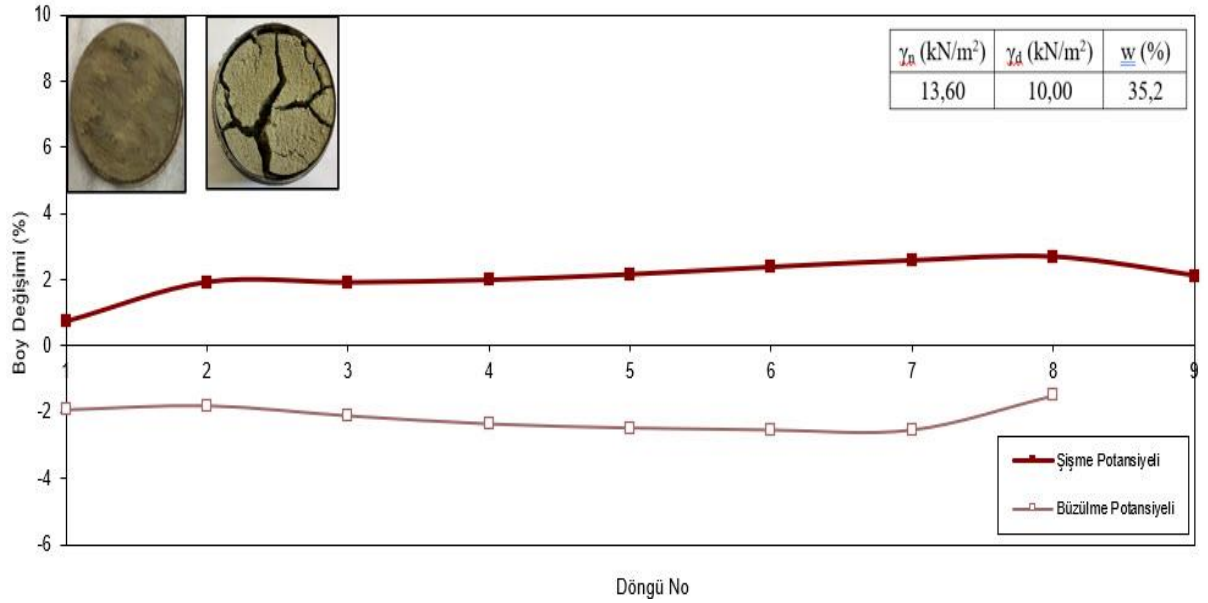
Şekil 4-4. C1b_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



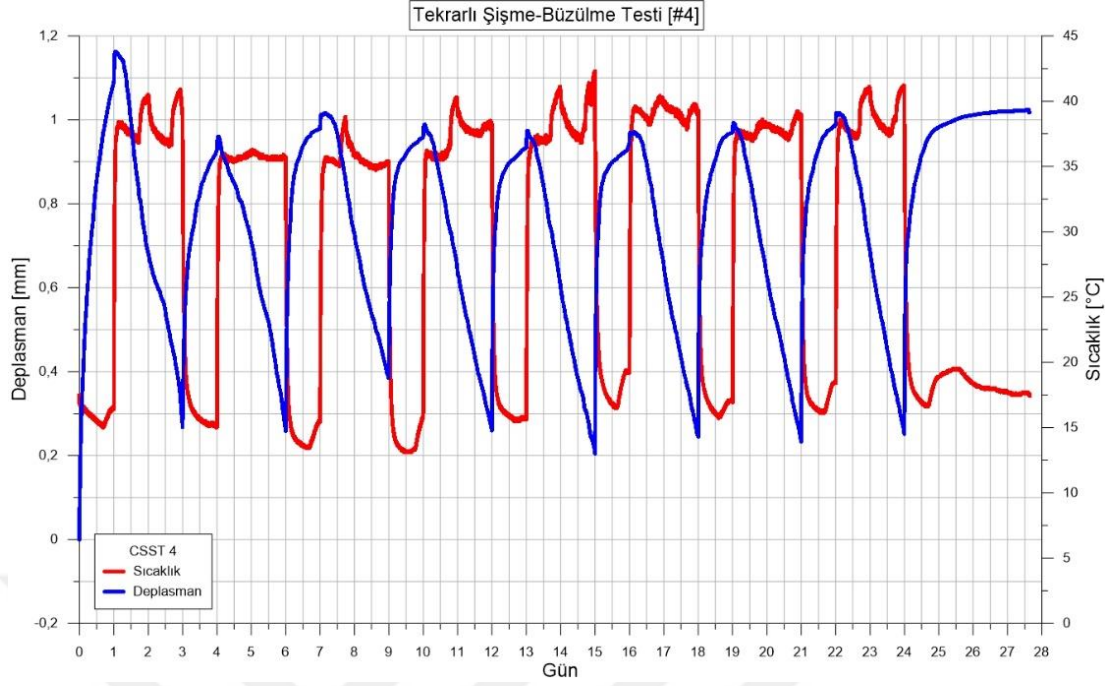
Şekil 4-5. C1b_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



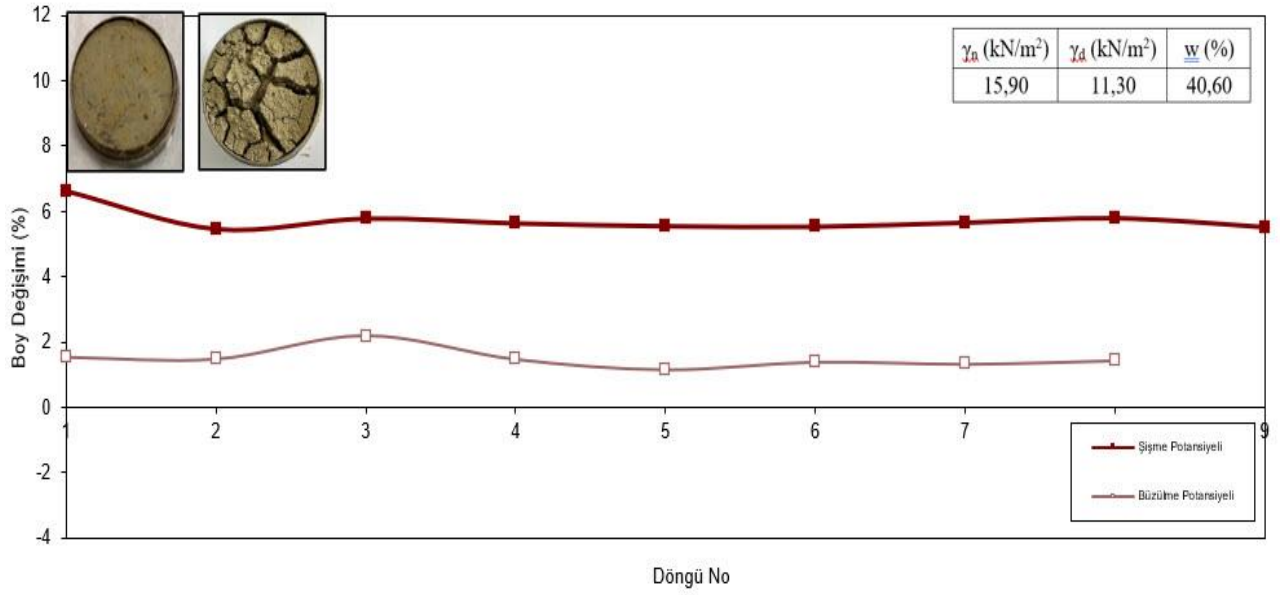
Şekil 4-6. C1c_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



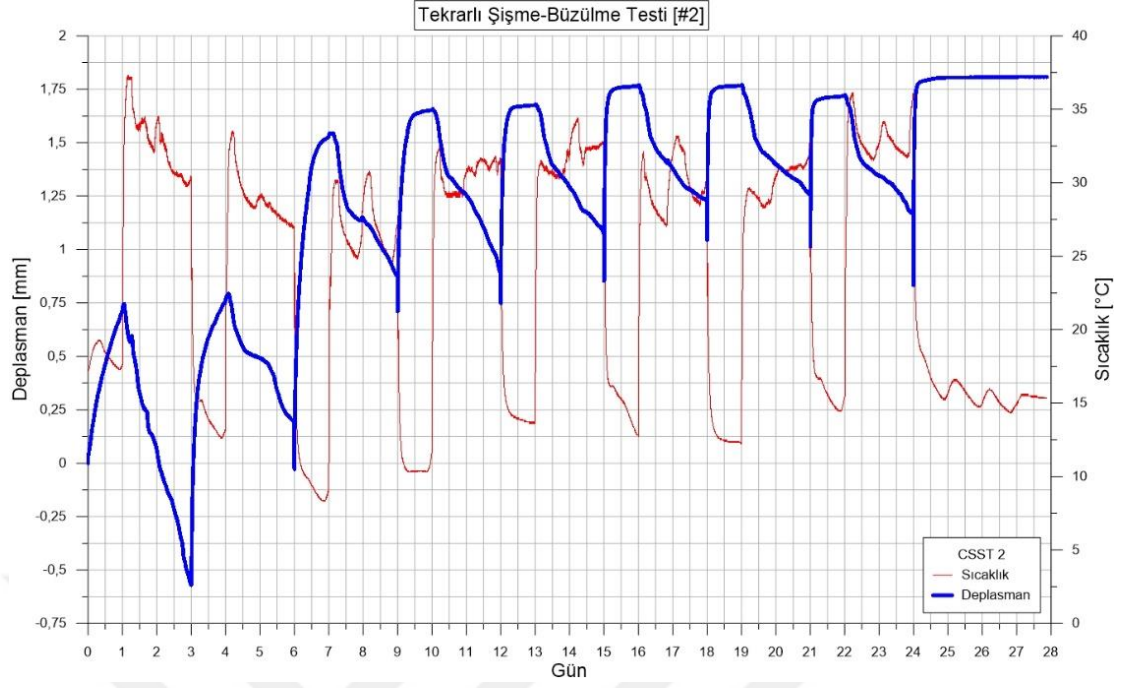
Şekil 4-7. C1c_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



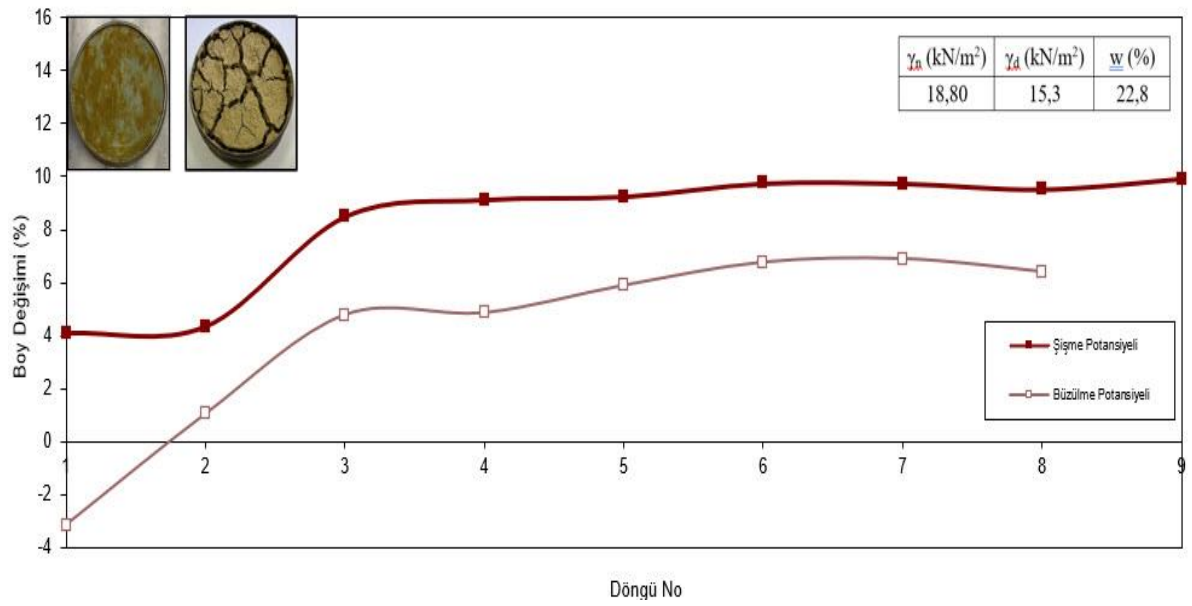
Şekil 4-8. C1d_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



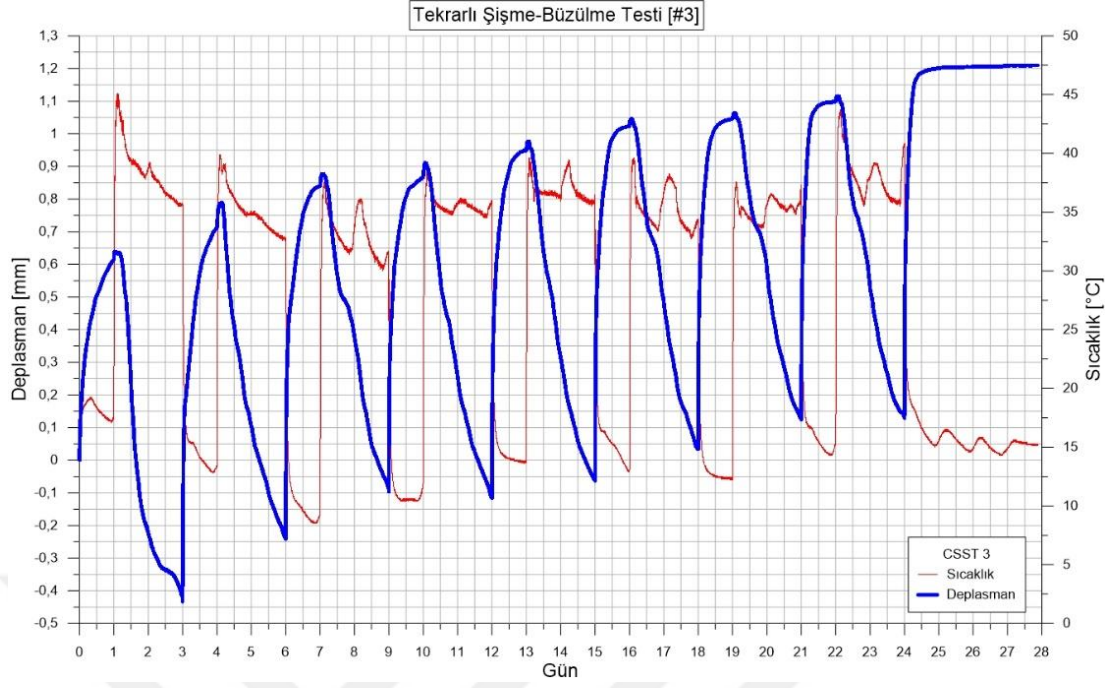
Şekil 4-9. C1d_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



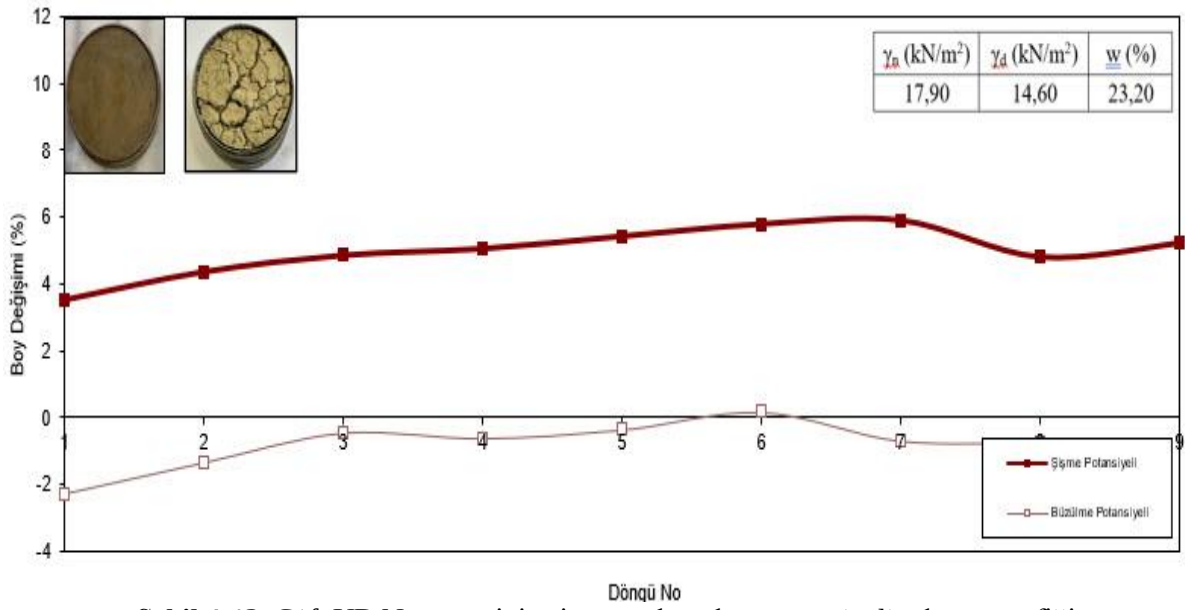
Şekil 4-10. C1e_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



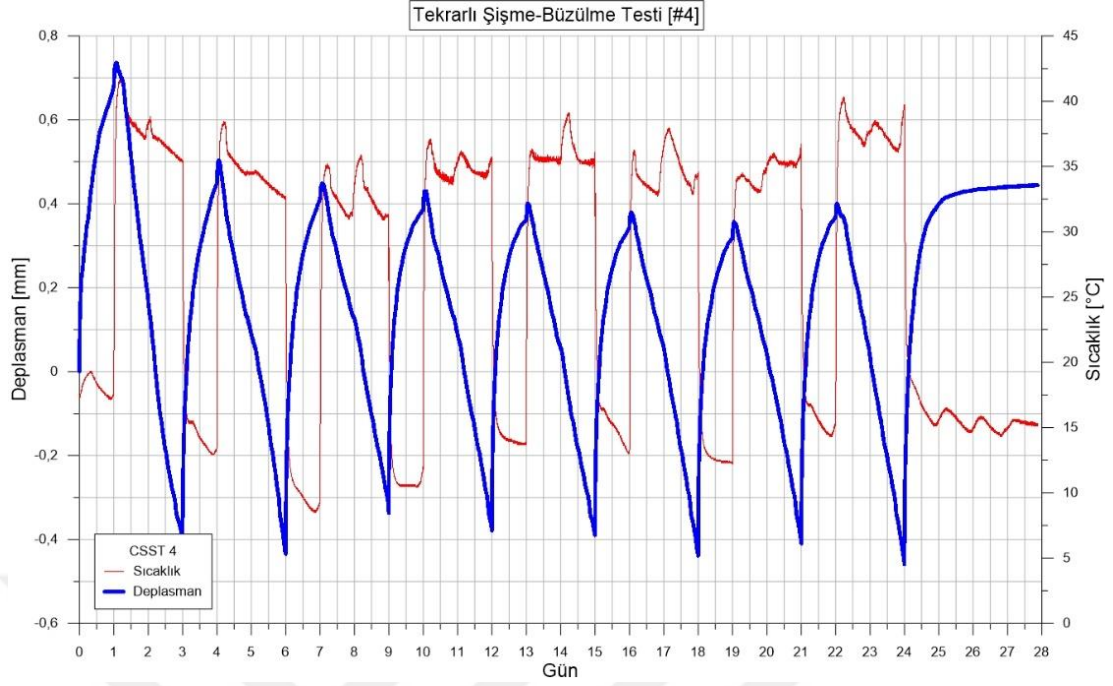
Şekil 4-11. C1e_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



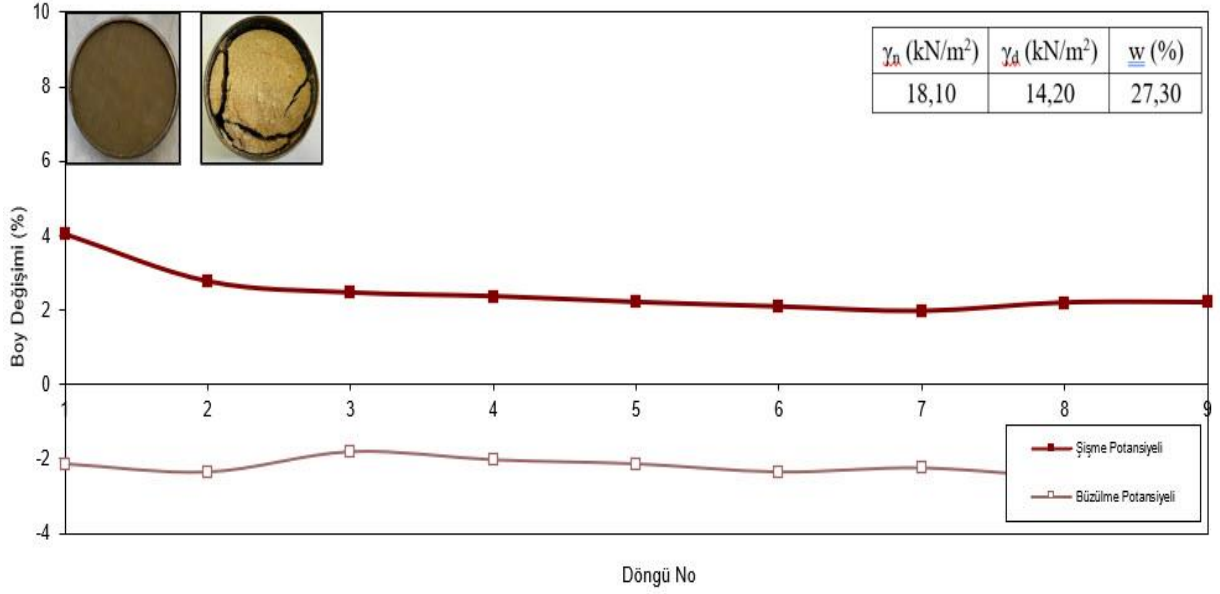
Şekil 4-12. C1f_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



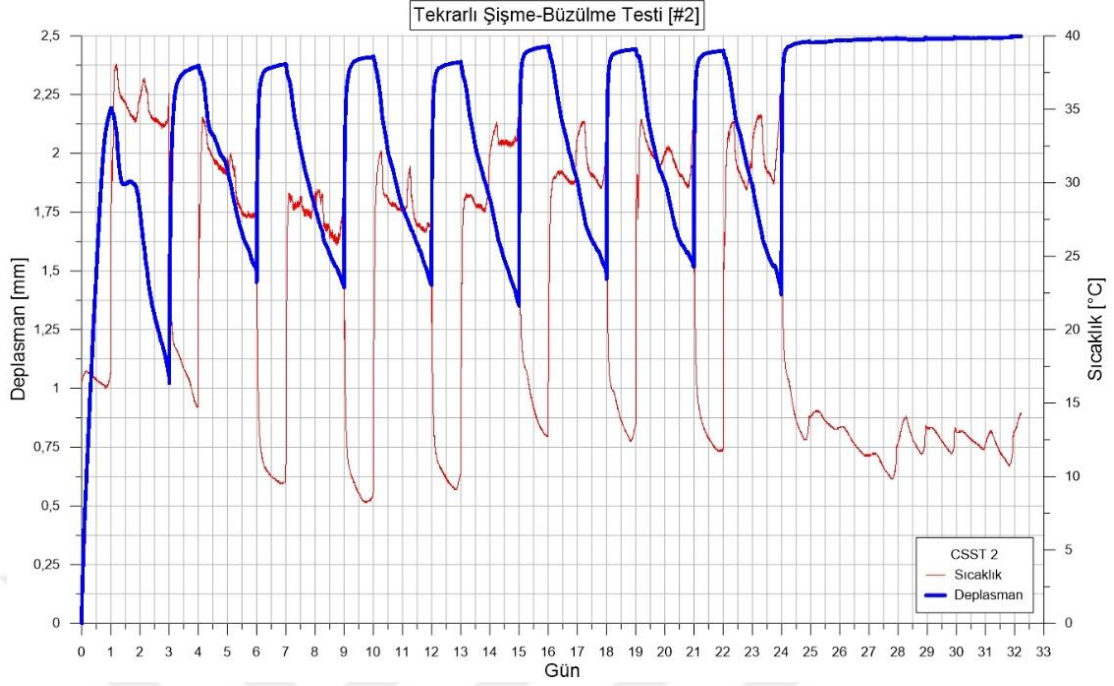
Şekil 4-13. C1f_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



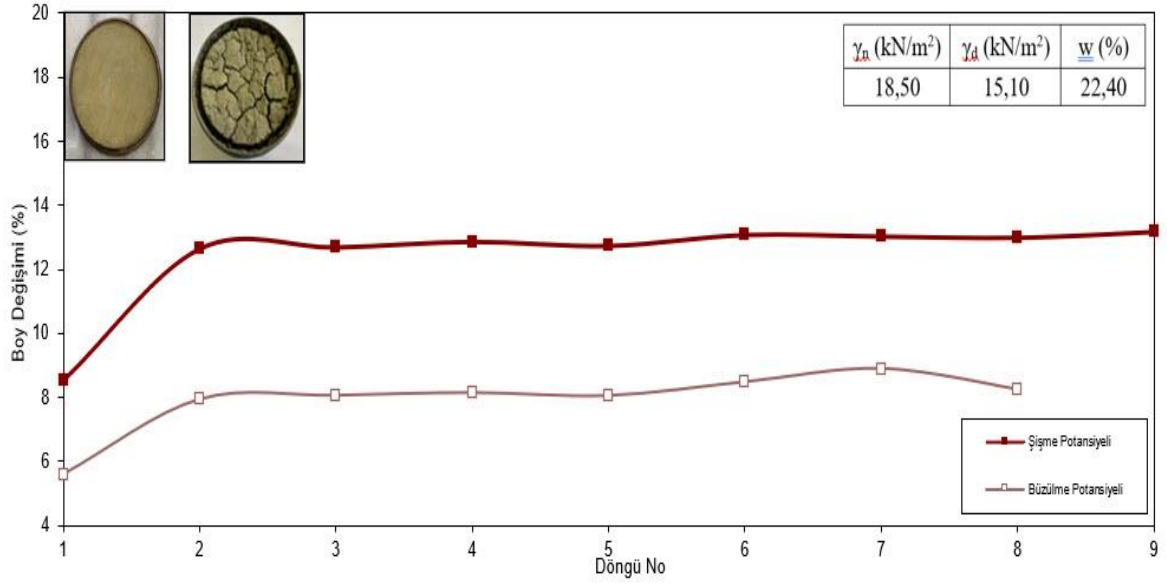
Şekil 4-14. C1g_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



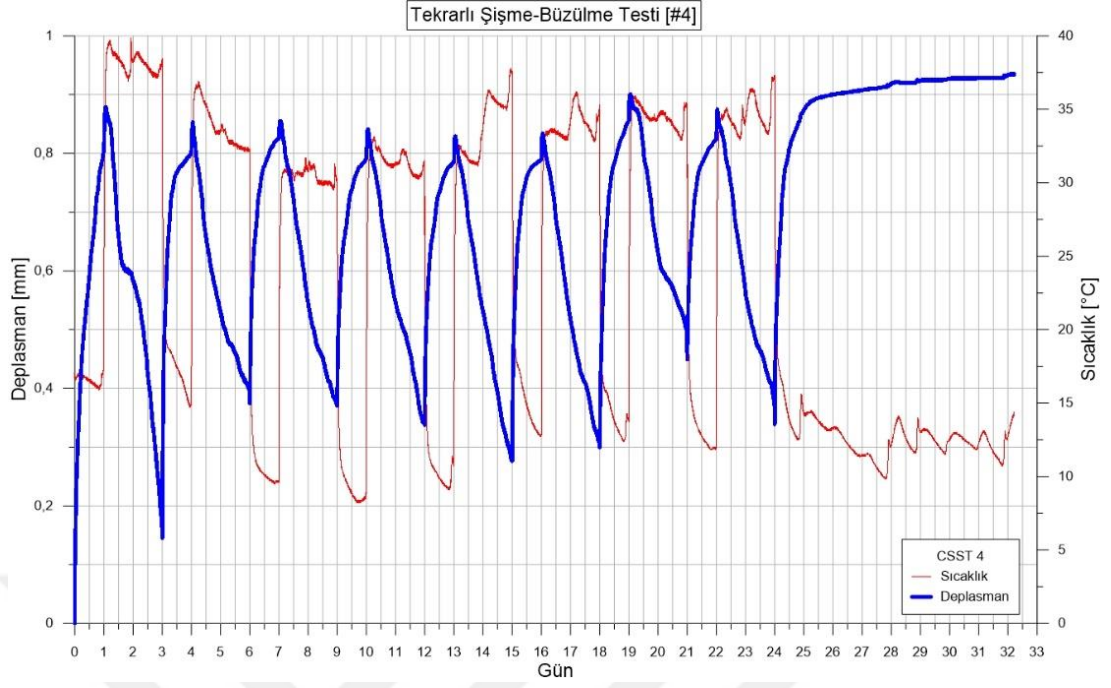
Şekil 4-15. C1g_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



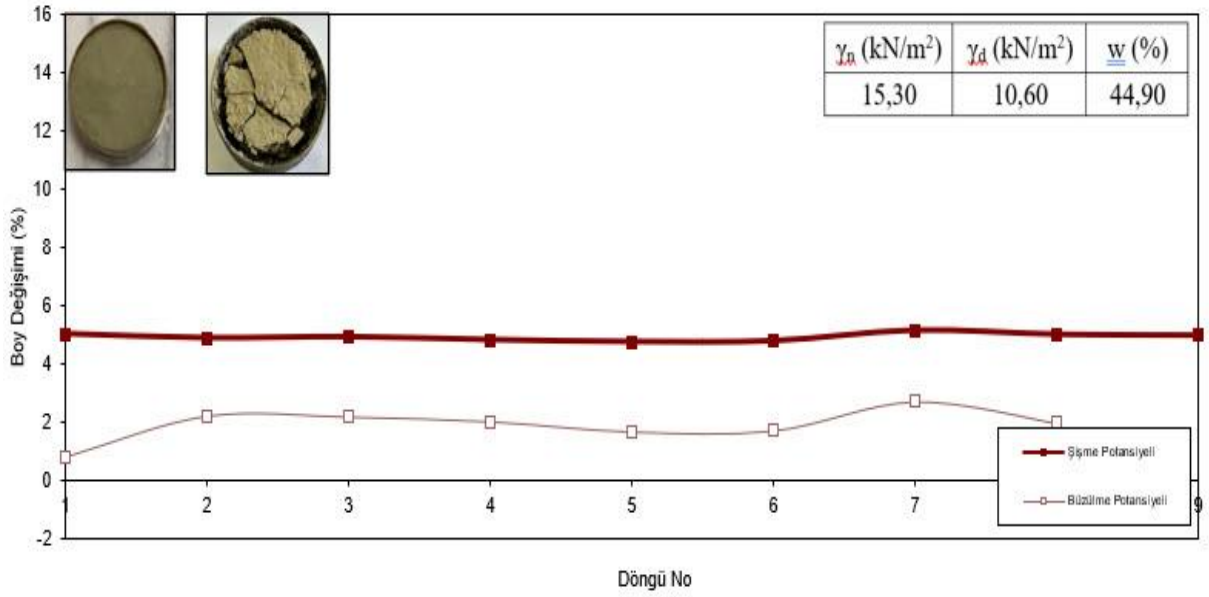
Şekil 4-16. C1h_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



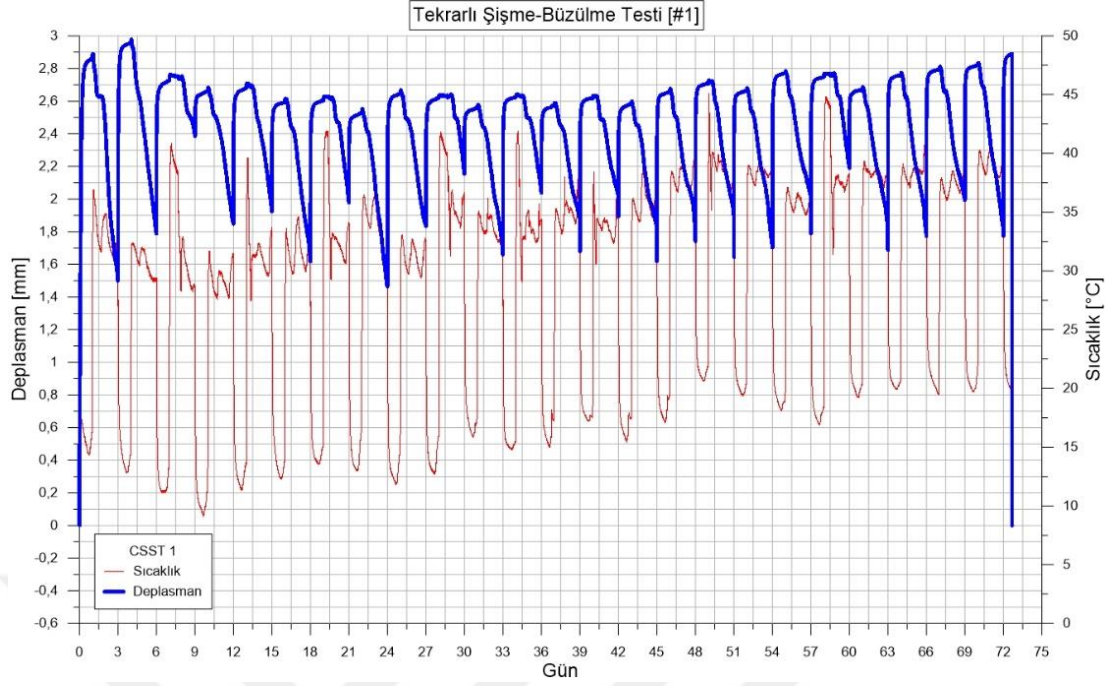
Şekil 4-17. C1h_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



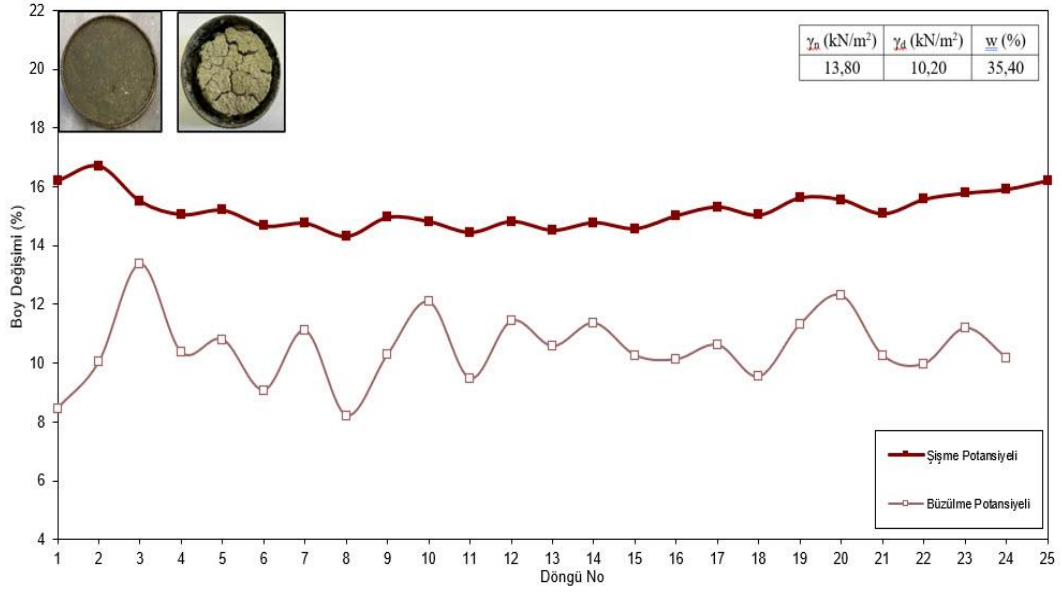
Şekil 4-18. C1i_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



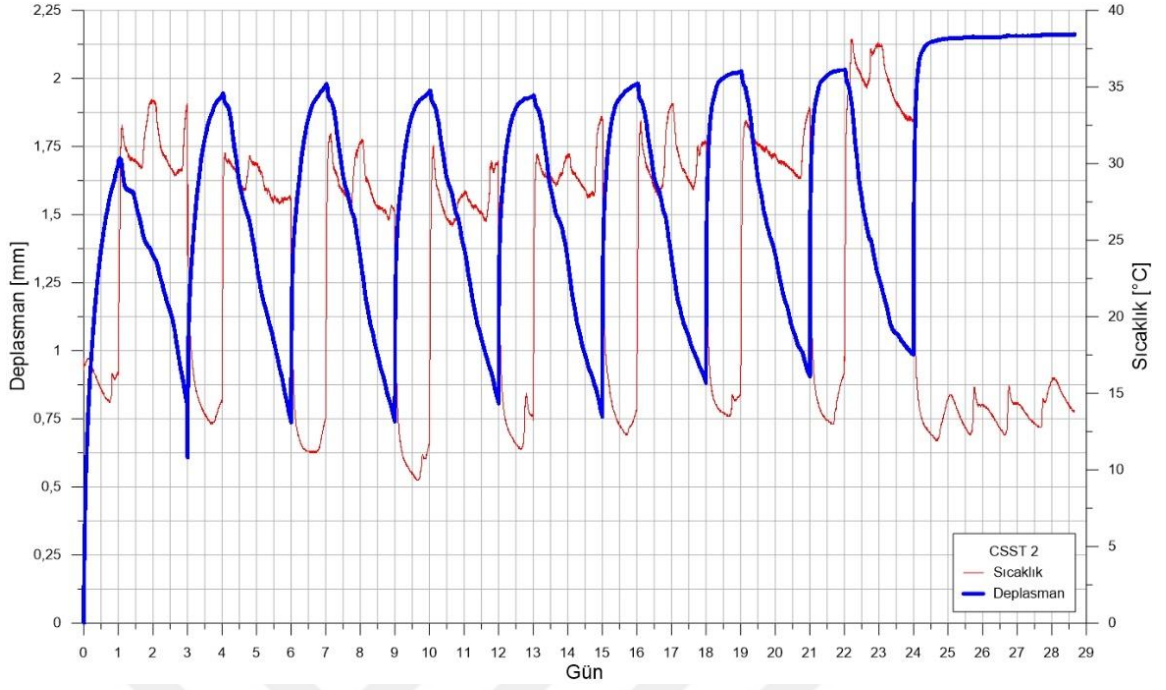
Şekil 4-19. C1i_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



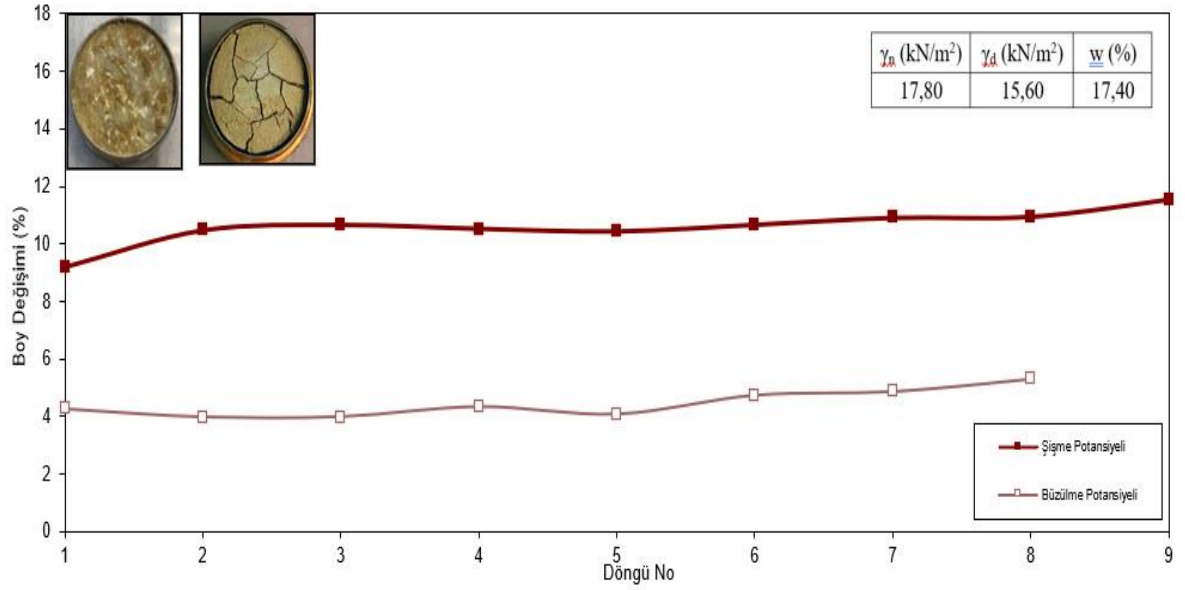
Şekil 4-20. C1j_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



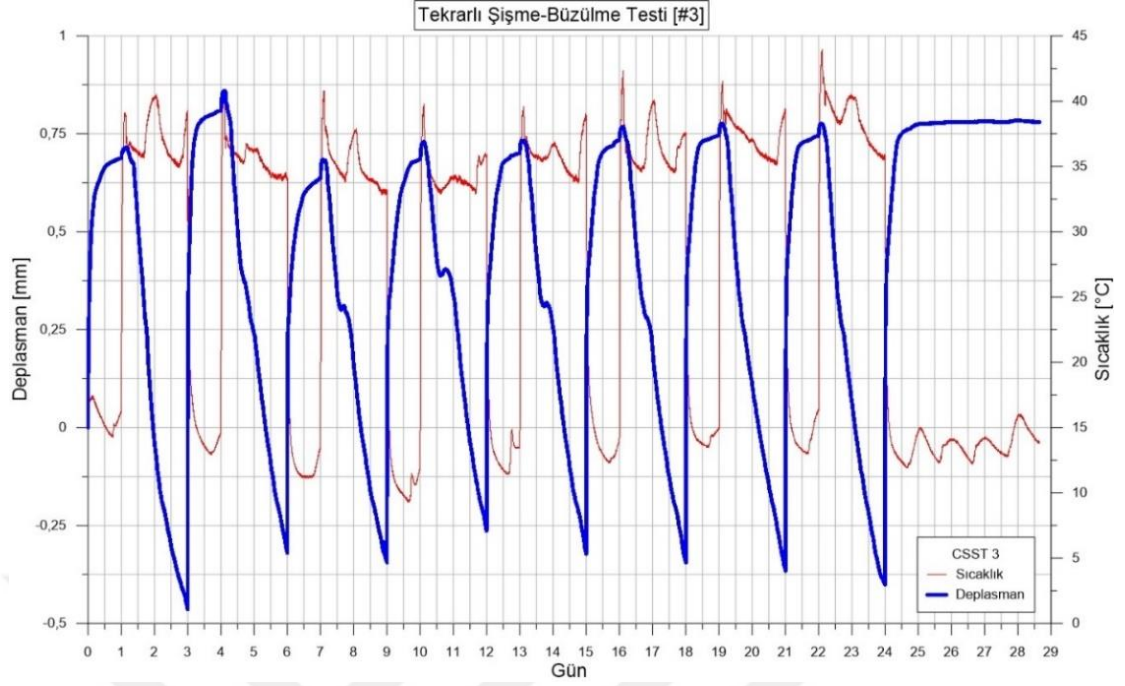
Şekil 4-21. C1j_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



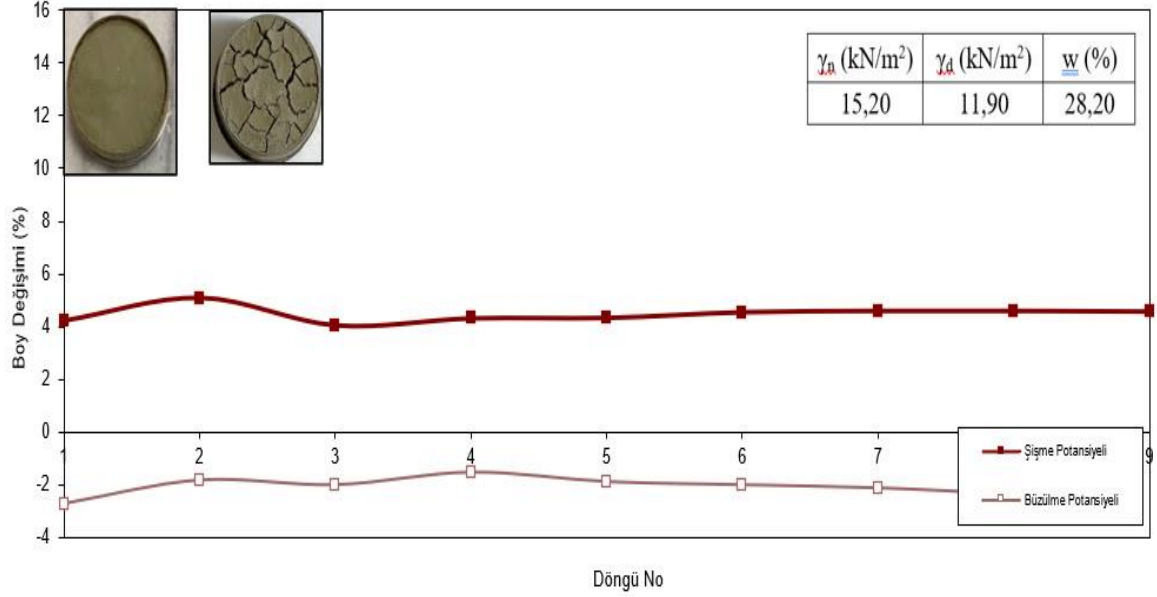
Şekil 4-22. C1k_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



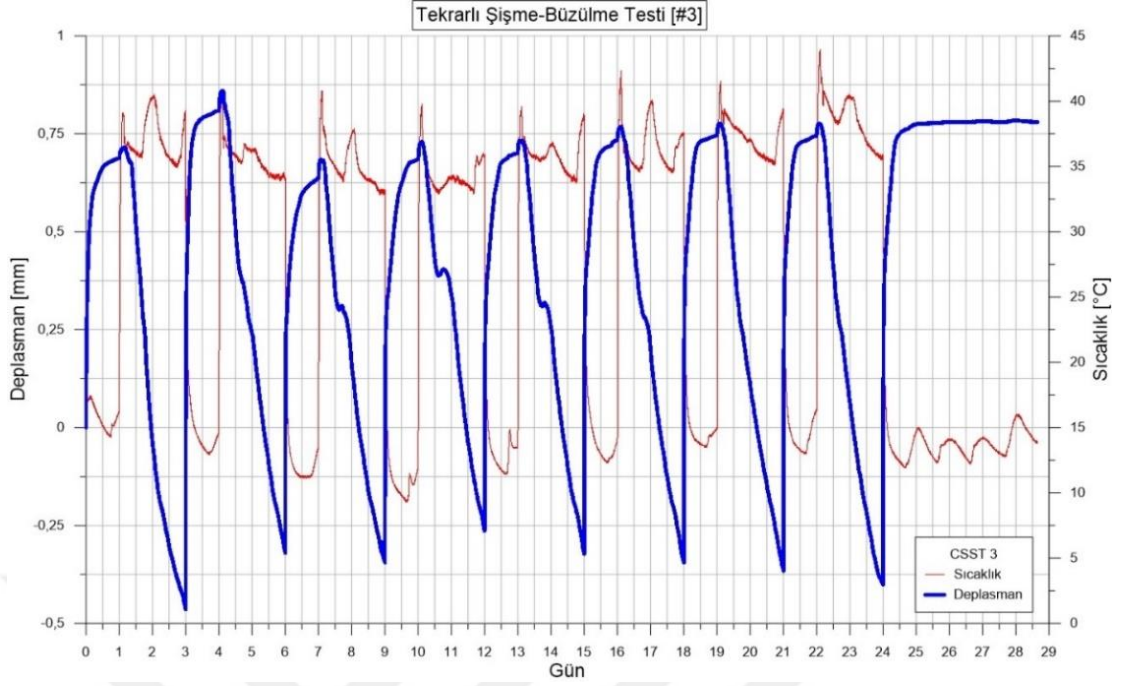
Şekil 4-23. C1k_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



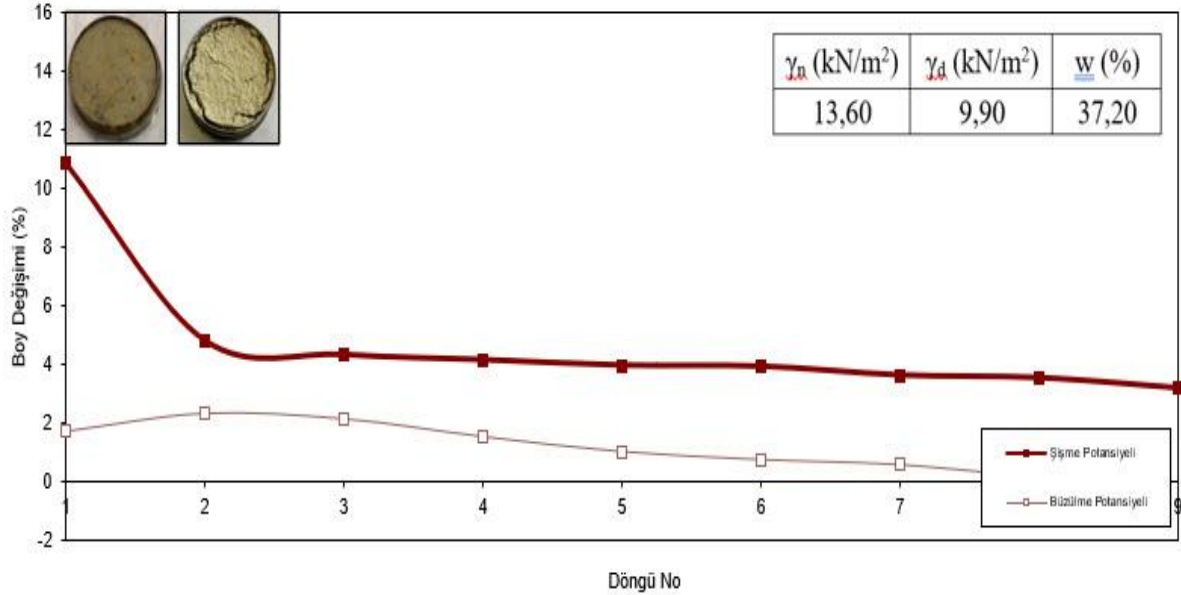
Şekil 4-24. C11_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



Şekil 4-25. C11_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



Şekil 4-26. C1m_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği

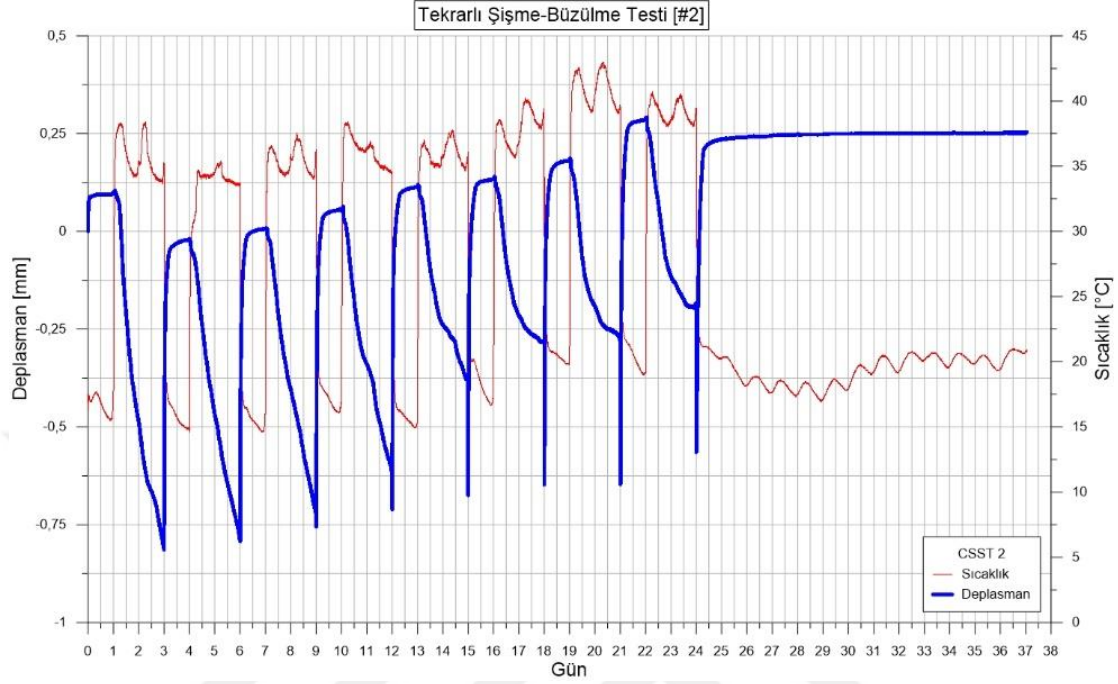


Şekil 4-27. C1m_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği

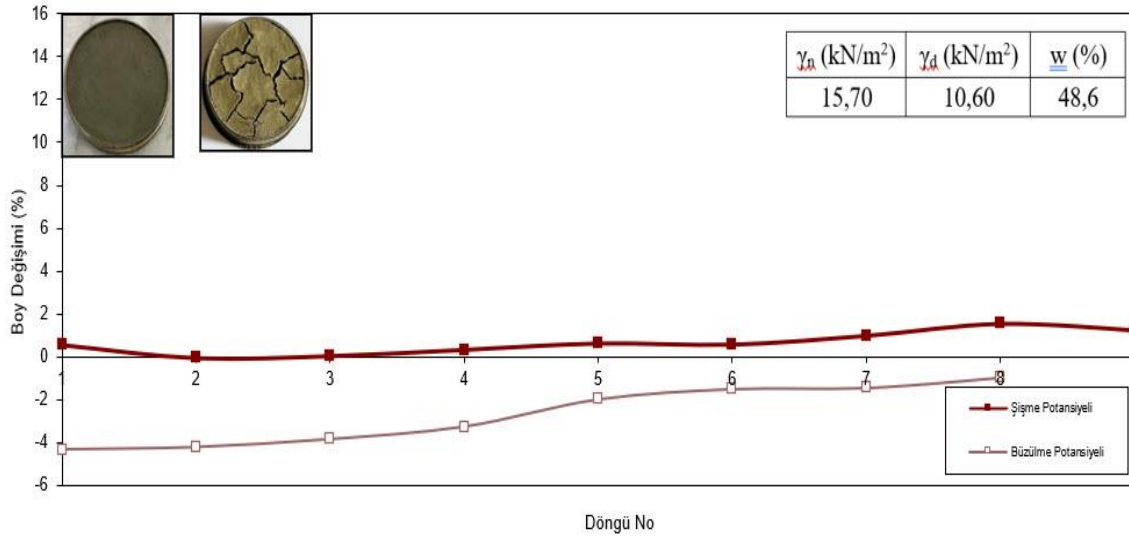
4.1.2. Hadımköy Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları

Şekil 4-28, Şekil 4-30, Şekil 4-32, Şekil 4-34, Şekil 4-36, Şekil 4-38 ve Şekil 4-40'da sırasıyla C2a_UD, C2b_UD, C2c_UD, C2d_UD, C2e_UD, C2f_UD ve C2g_UD numunelerinin geliştirilen cihazdan elde edilen zamana bağlı deplasman ve sıcaklık grafiği, Şekil 4-29, Şekil 4-31, Şekil 4-33, Şekil 4-35, Şekil 4-37, Şekil 4-39 ve Şekil 4-41'de sırasıyla C2a_UD, C2b_UD, C2c_UD, C2d_UD, C2e_UD, C2f_UD ve C2g_UD numunelerinin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) grafiği verilmiştir. Şekil 4-31 ve Şekil 4-37'de şişme yüzdelerinin

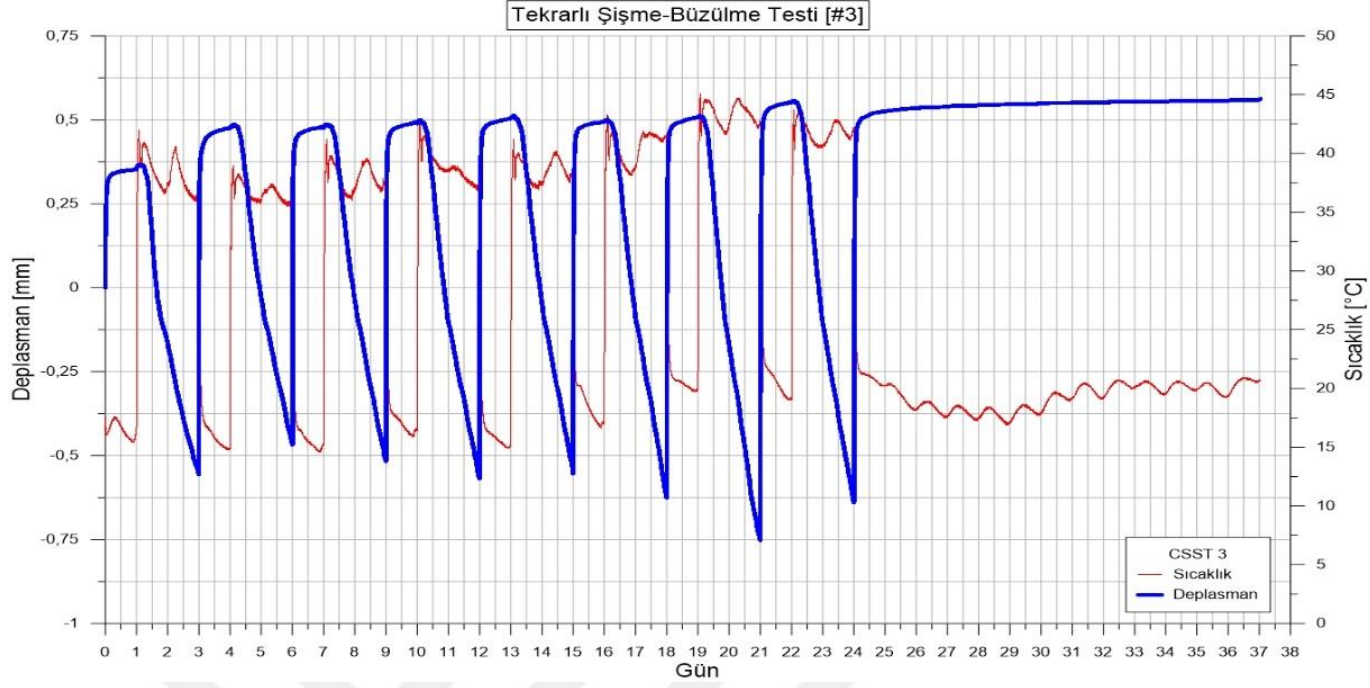
giderek arttığı görülmüştür. Şekil 4-29 ve Şekil 4-39’te şişme yüzdelерinin azalıp arttığı görülmüştür. Şekil 4-41’de şişme yüzdelерinin artıp azaldığı görülmüştür.



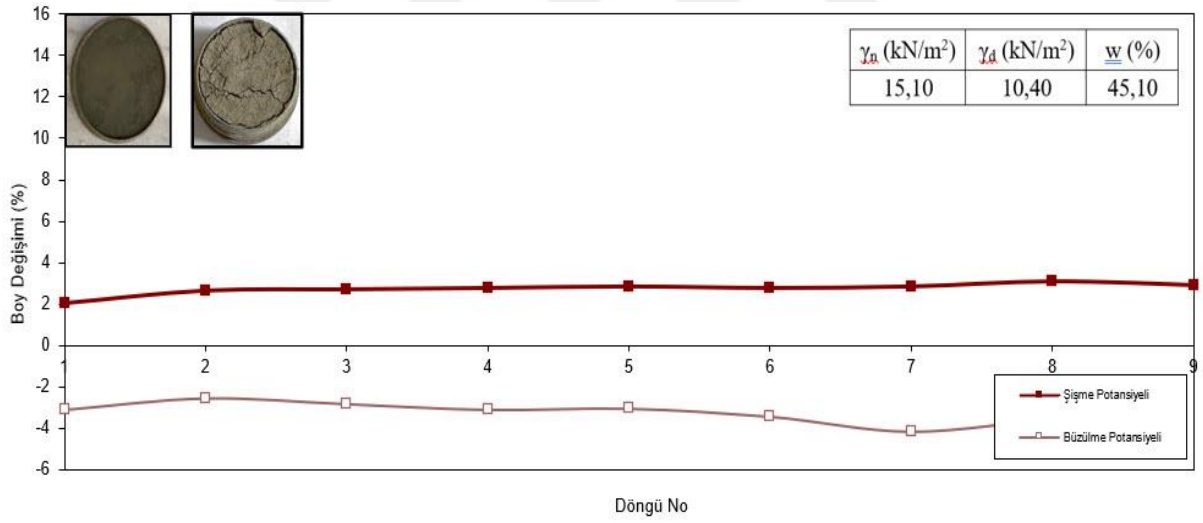
Şekil 4-28. C2a_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



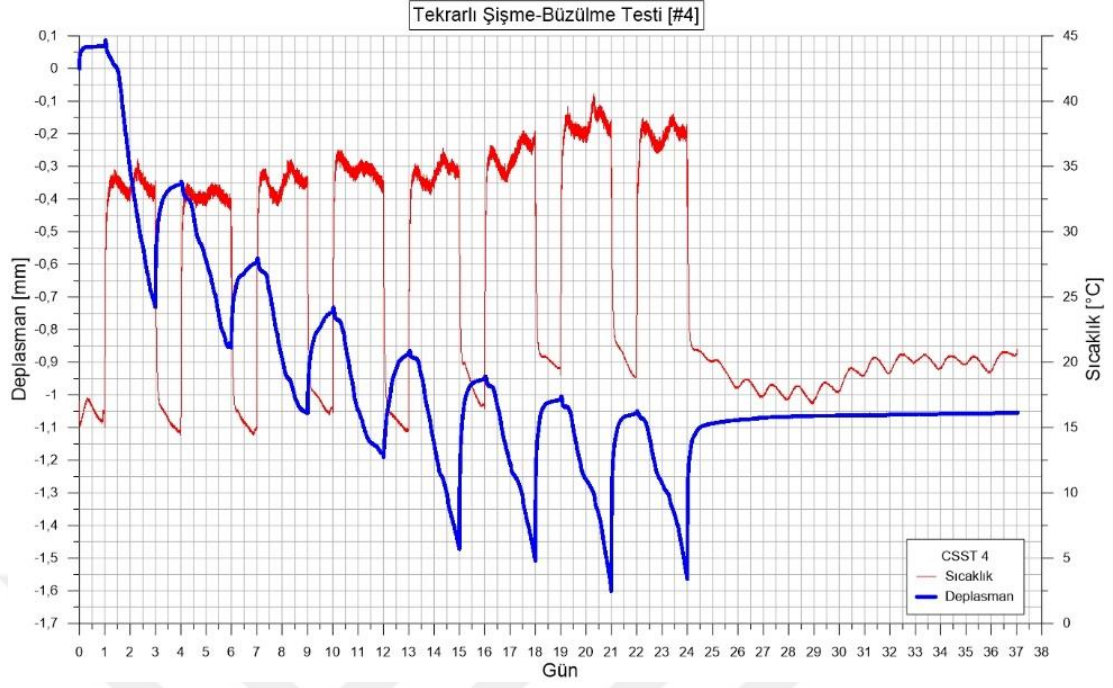
Şekil 4-29. C2a_UD Numunesinin şişme ve büzölme potansiyeli– döngü grafiği



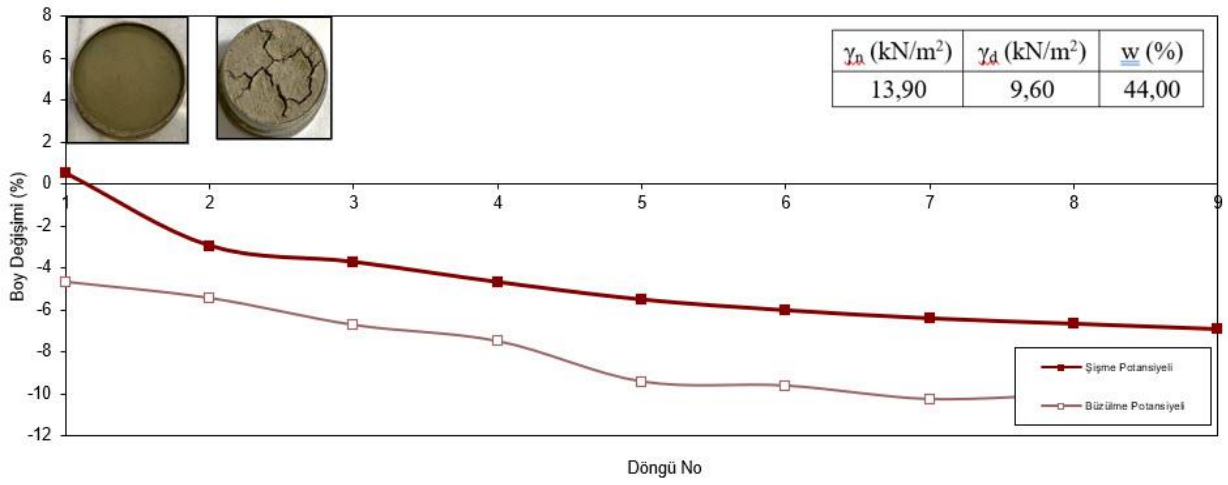
Şekil 4-30. C2b_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



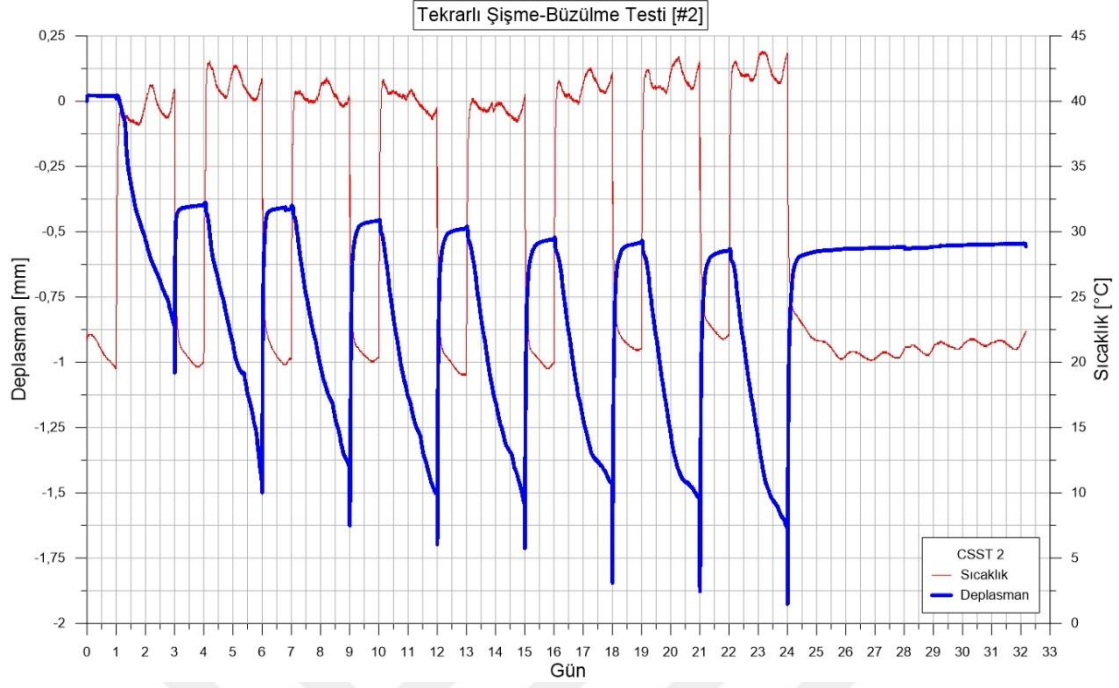
Şekil 4-31. C2b_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



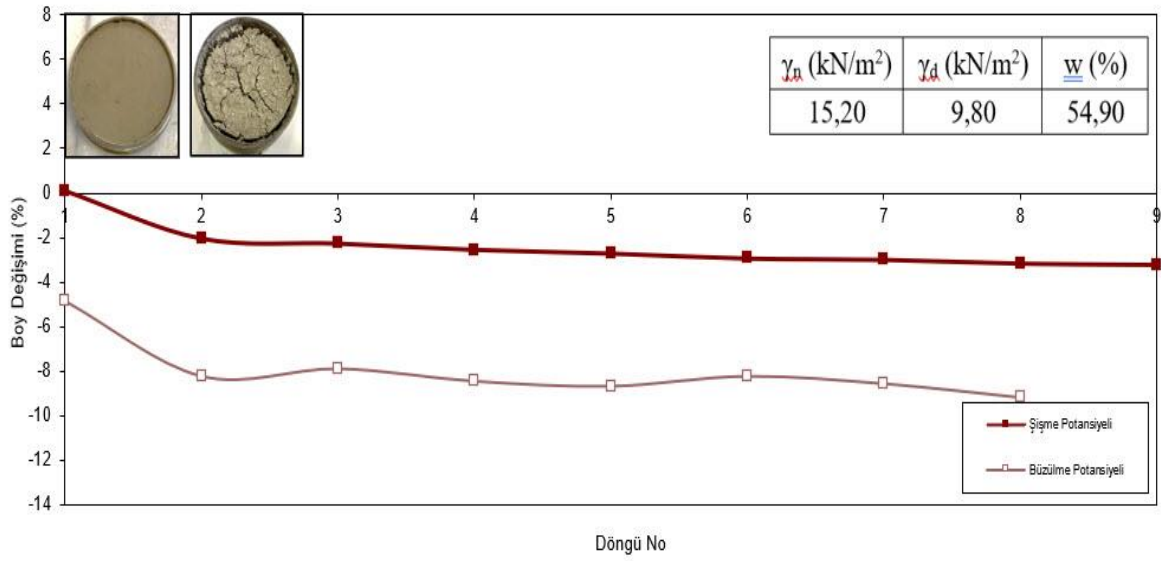
Şekil 4-32. C2c_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



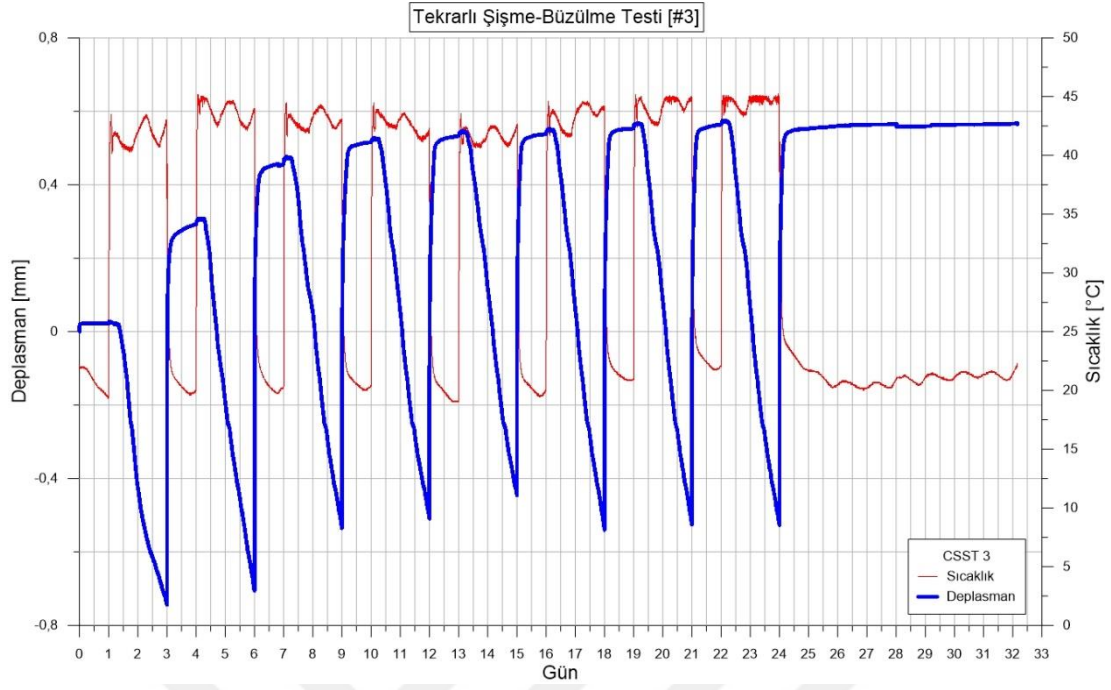
Şekil 4-33. C2c_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



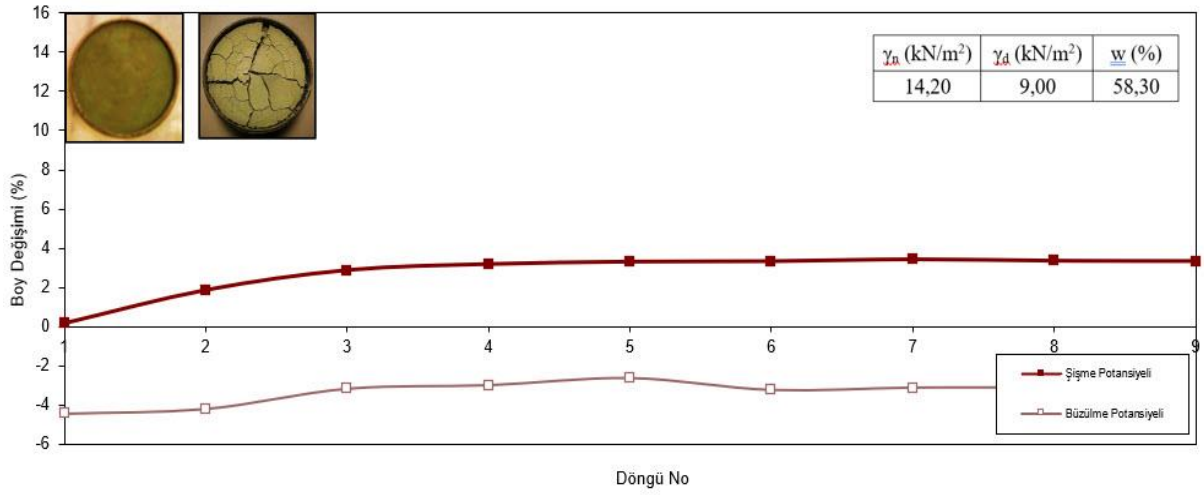
Şekil 4-34. C2d_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



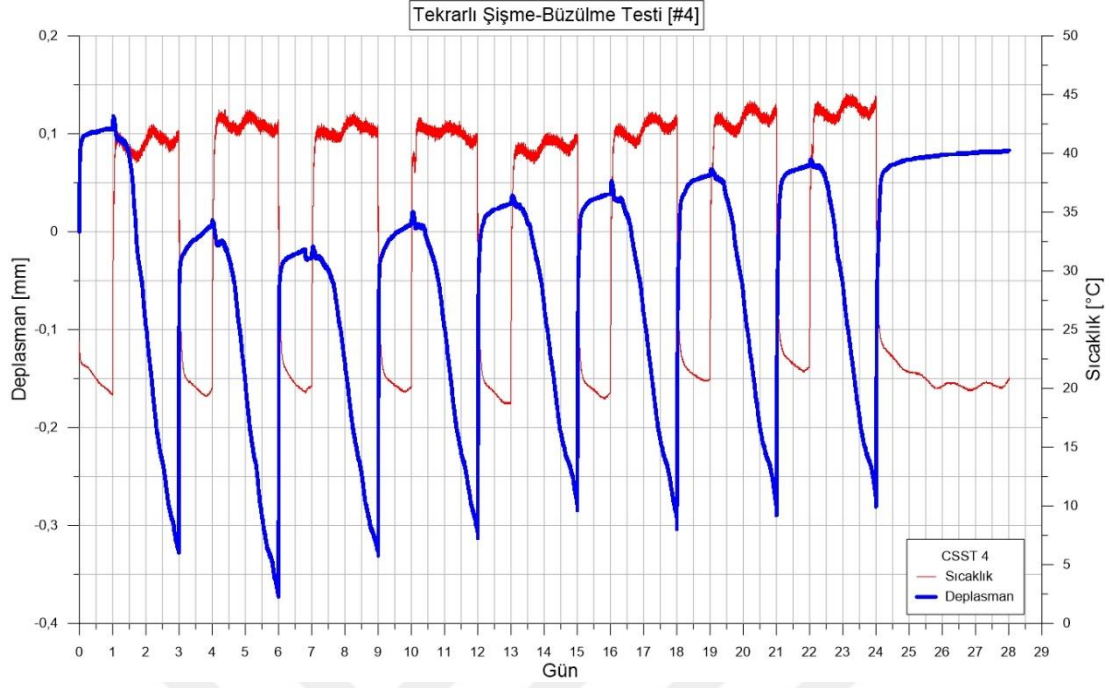
Şekil 4-35. C2d_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



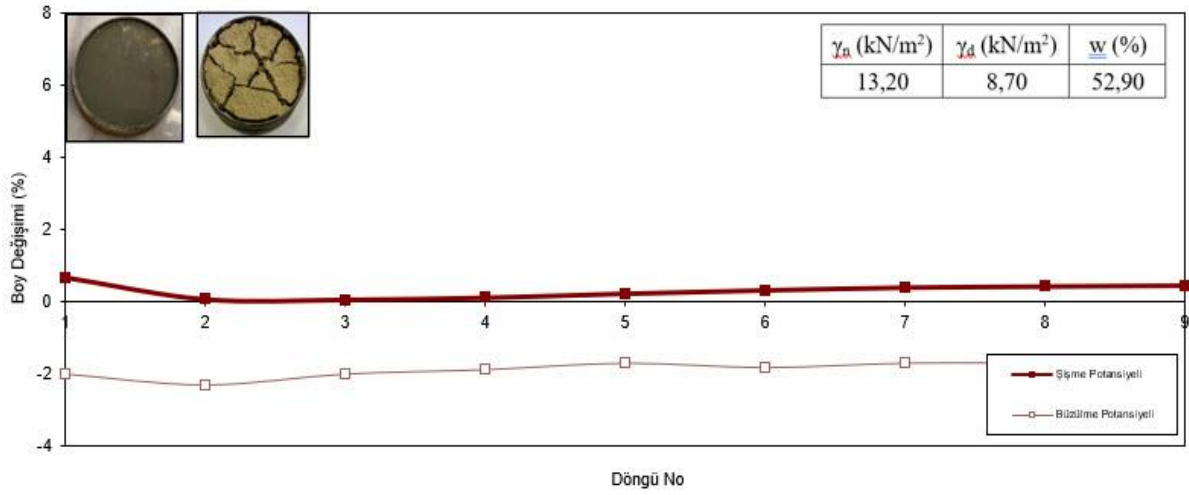
Şekil 4-36. C2e_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



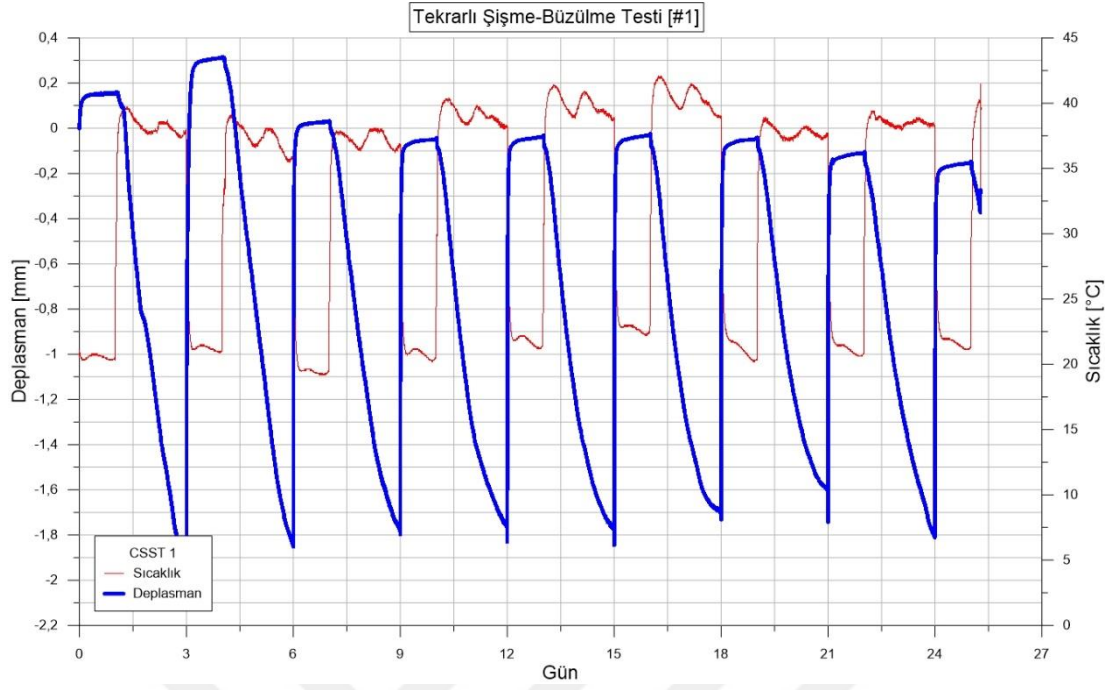
Şekil 4-37. C2e_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



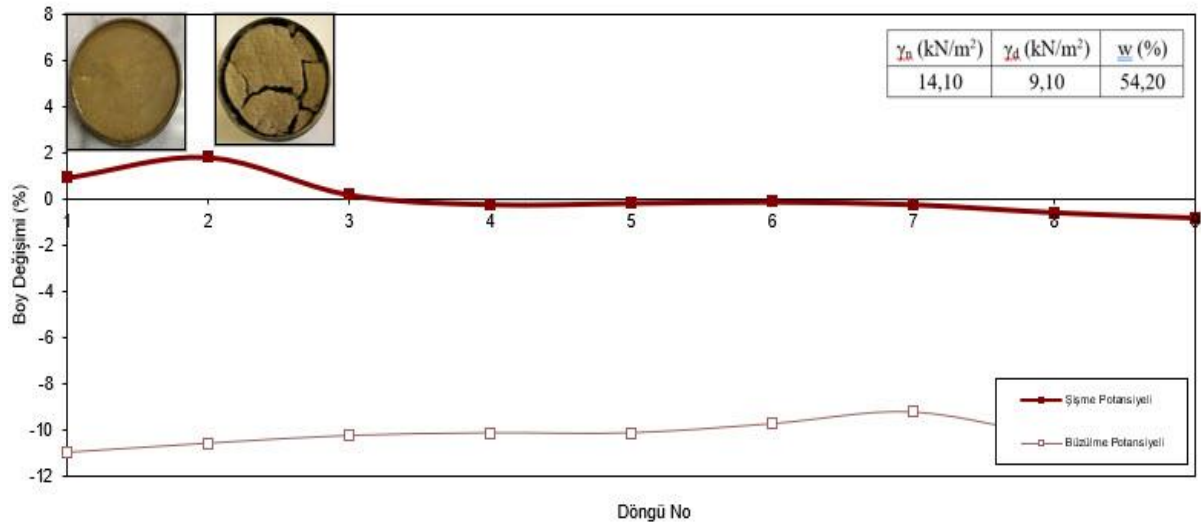
Şekil 4-38. C2f_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



Şekil 4-39. C2f_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



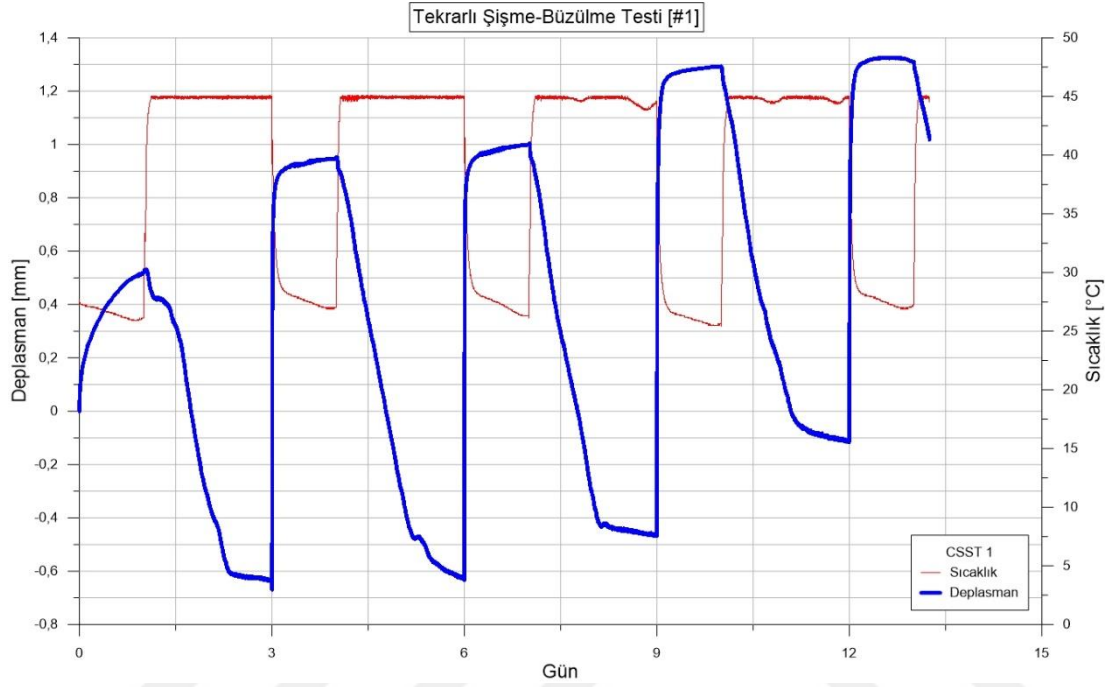
Şekil 4-40. C2g_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



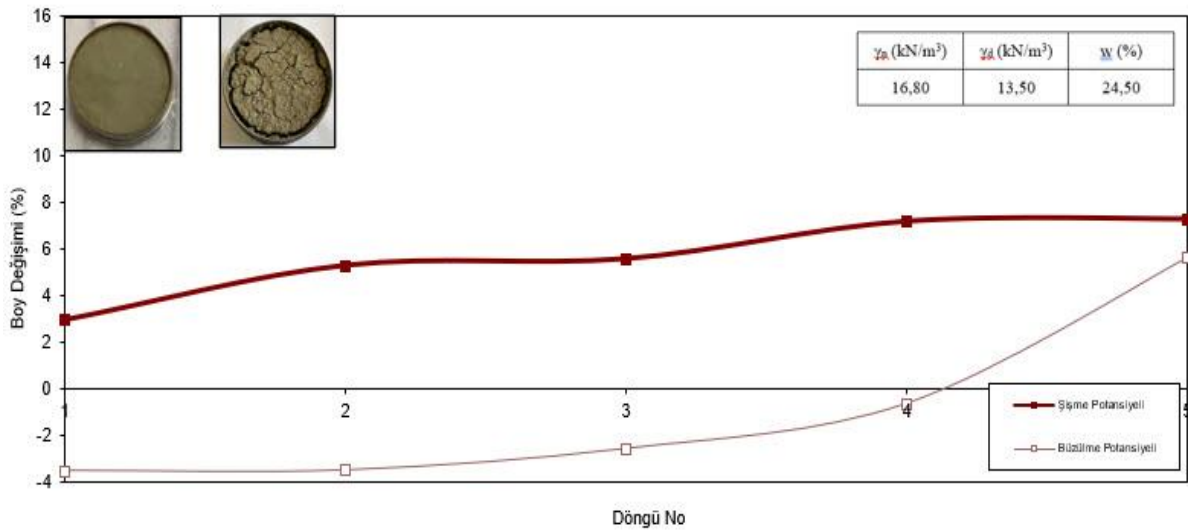
Şekil 4-41. C2g_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği

4.1.3. Çatalca Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları

Şekil 4-42’de C3_UD numunesinin geliştirilen cihazdan elde edilen zamana bağlı deplasman ve sıcaklık grafiği, Şekil 4-43’te C3_UD numunesinin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) grafiği verilmiştir. Şekil 4-42’de şişme yüzdelerinin giderek arttığı görülmüştür



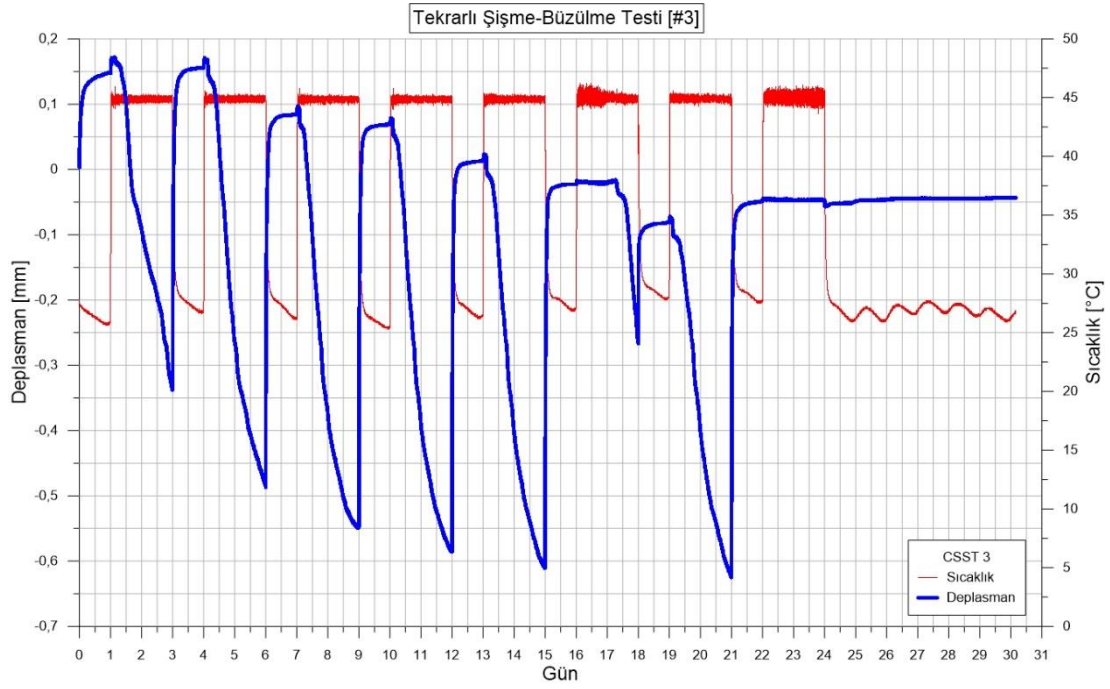
Şekil 4-42. C3_UD numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



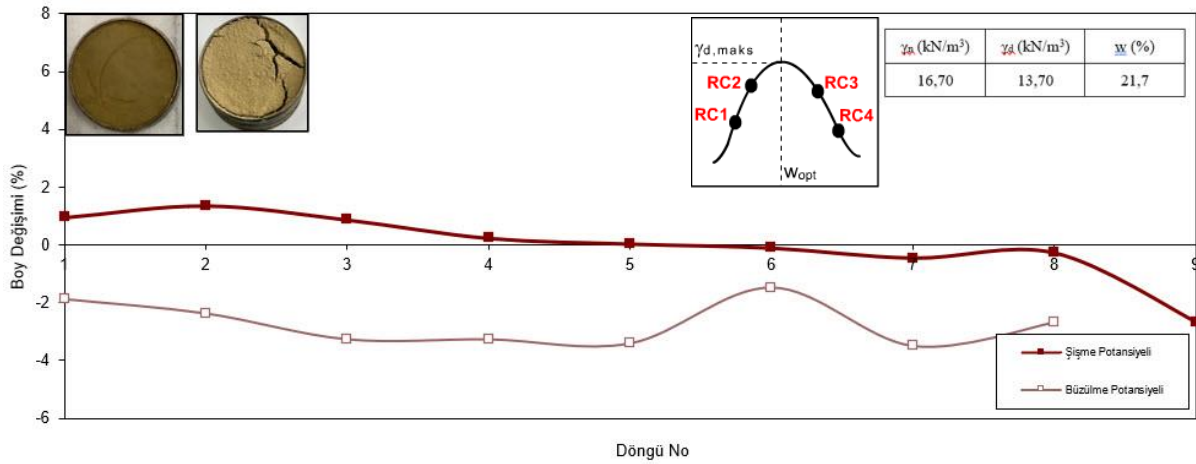
Şekil 4-43. C3_UD Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği

4.1.4. Zeytinburnu Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları

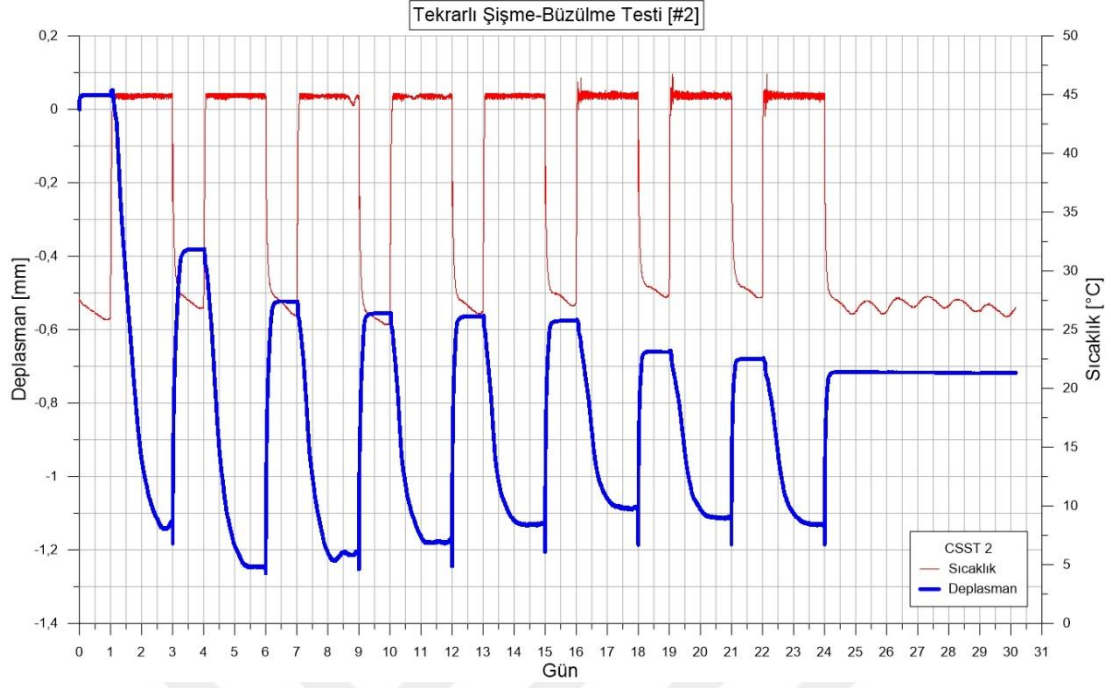
Şekil 4-44 ve Şekil 4-46’da sırasıyla C4a_RC1 ve C4b_RC3 numunesinin geliştirilen cihazdan elde edilen zamana bağlı deplasman ve sıcaklık grafiği, Şekil 4-45 ve Şekil 4-47’de sırasıyla C4a_RC1 ve C4b_RC3 numunesinin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) grafiği verilmiştir. Şekil 4-44 ve Şekil 4-46’da şişme yüzdelerinin giderek azaldığı görülmüştür



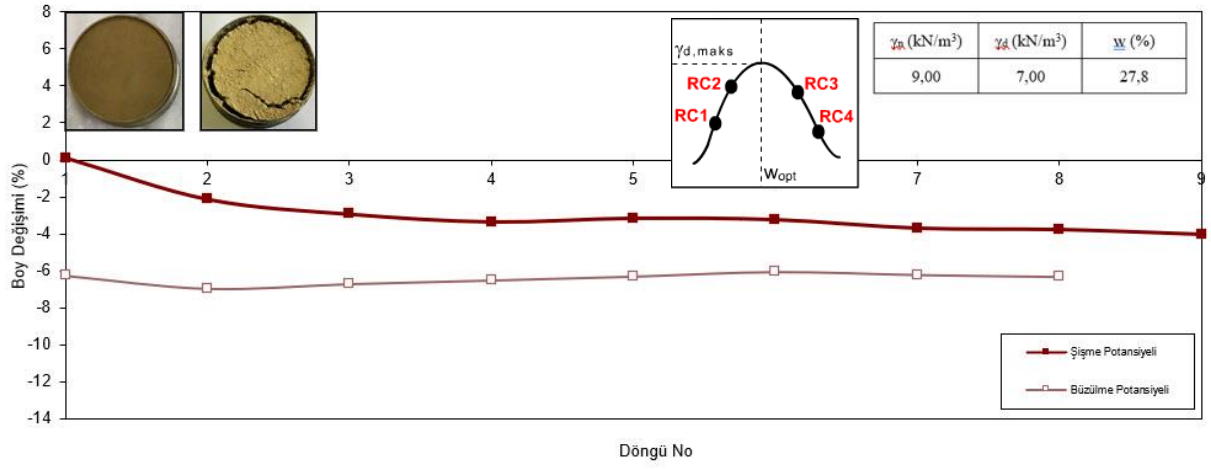
Şekil 4-44. C4a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



Şekil 4-45. C4a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



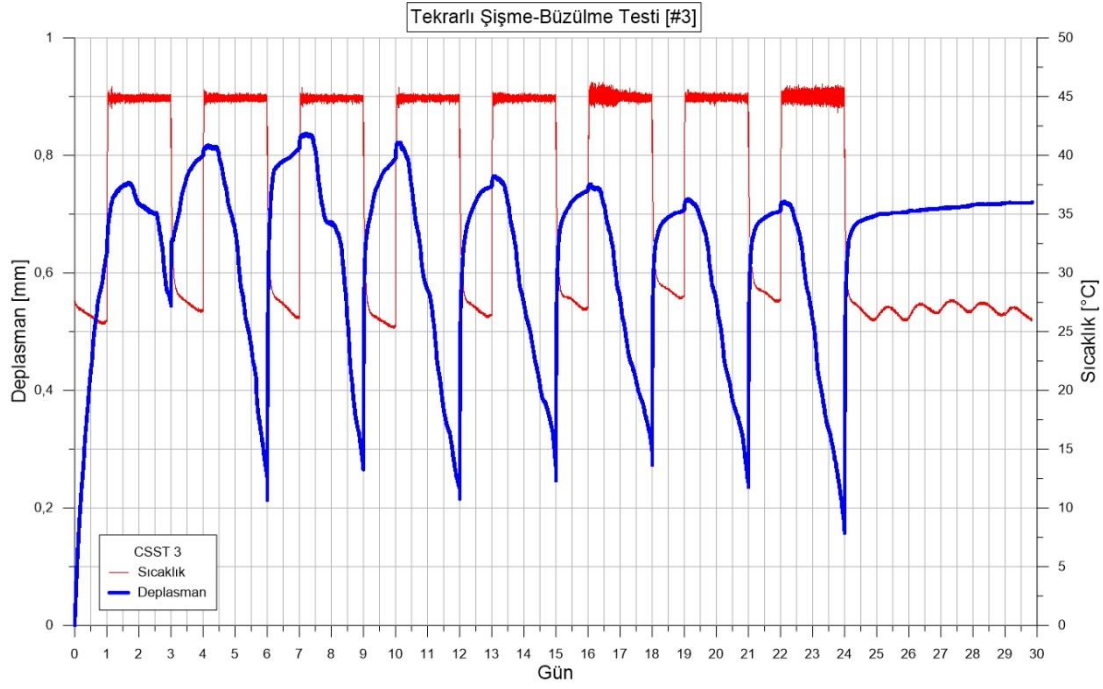
Şekil 4-46. C4b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



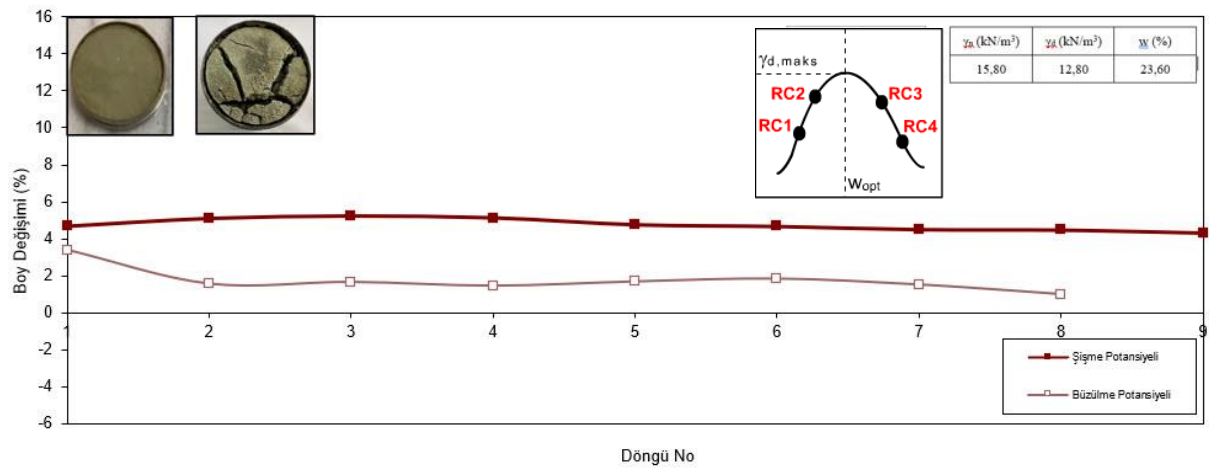
Şekil 4-47. C4b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği

4.1.5. Zeytinburnu Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları

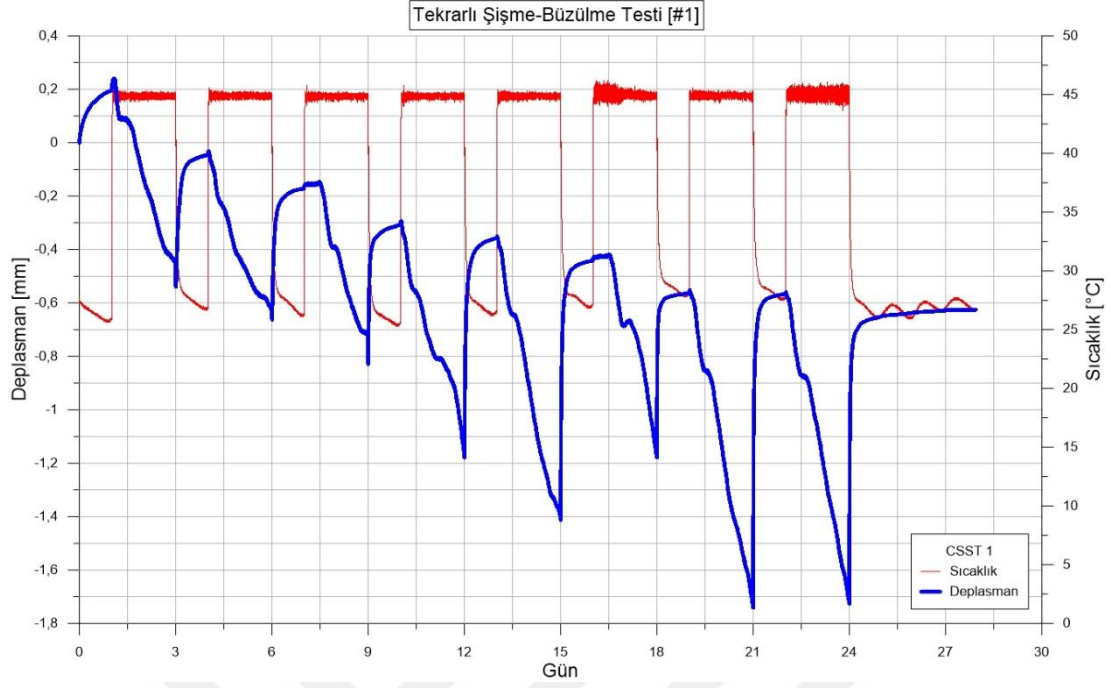
Şekil 4-48 ve Şekil 4-50’de sırasıyla C5a_RC1 ve C5b_RC3 numunesinin geliştirilen cihazdan elde edilen zamana bağlı deplasman ve sıcaklık grafiği, Şekil 4-49 ve Şekil 4-51’de sırasıyla C5a_RC1 ve C5b_RC3 numunesinin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) grafiği verilmiştir. Şekil 4-48’de şişme yüzdelерinin artıp azaldığı, Şekil 4-50’de şişme yüzdelерinin giderek azaldığı görülmüştür.



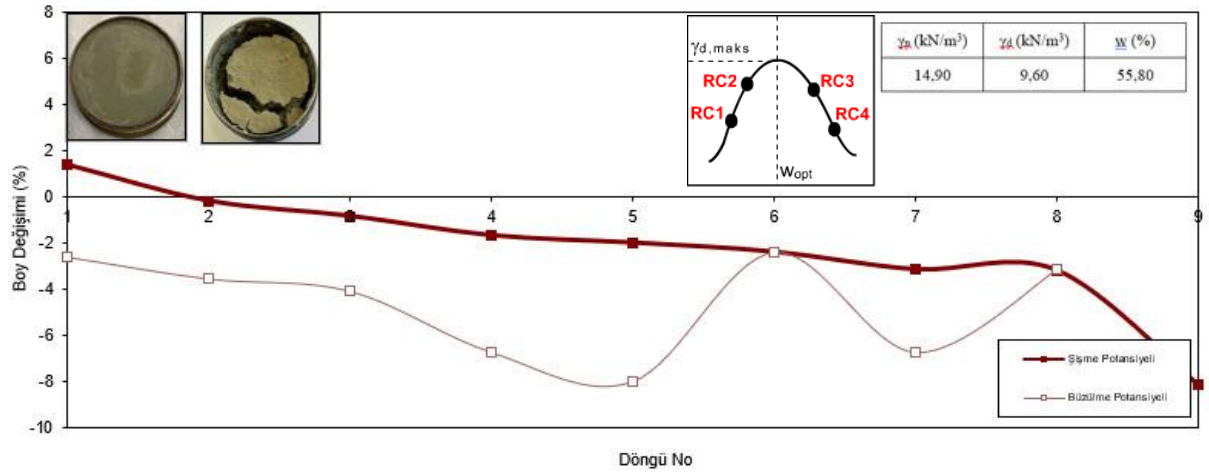
Şekil 4-48. C5a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



Şekil 4-49. C5a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



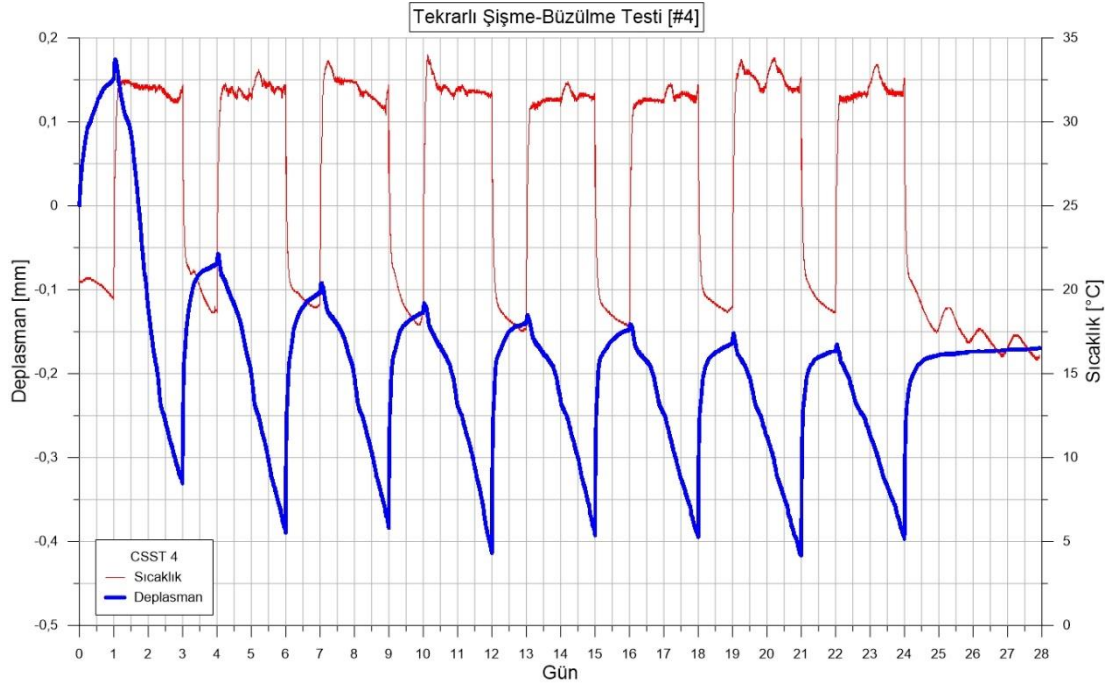
Şekil 4-50. C5b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



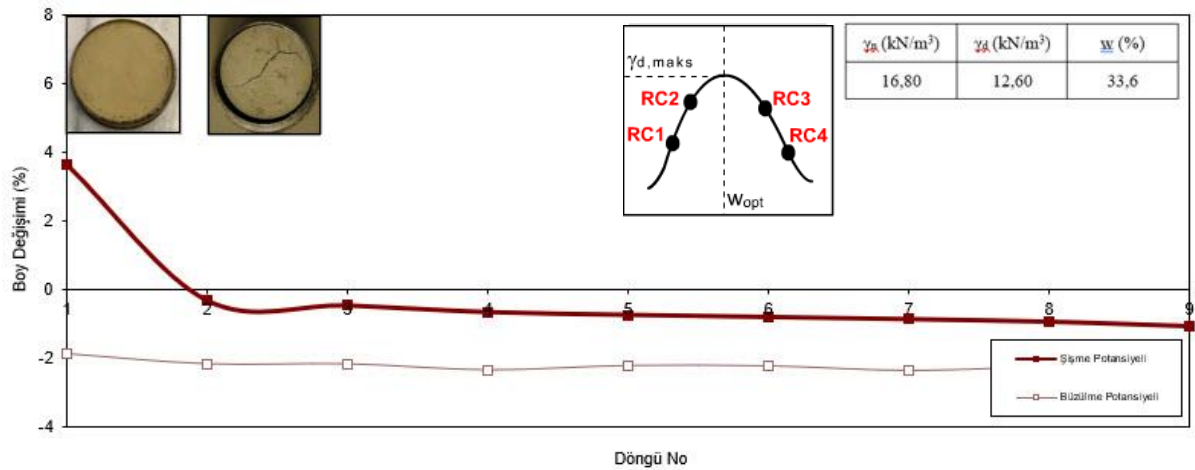
Şekil 4-51. C5b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği

4.1.6. Avcılar Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları

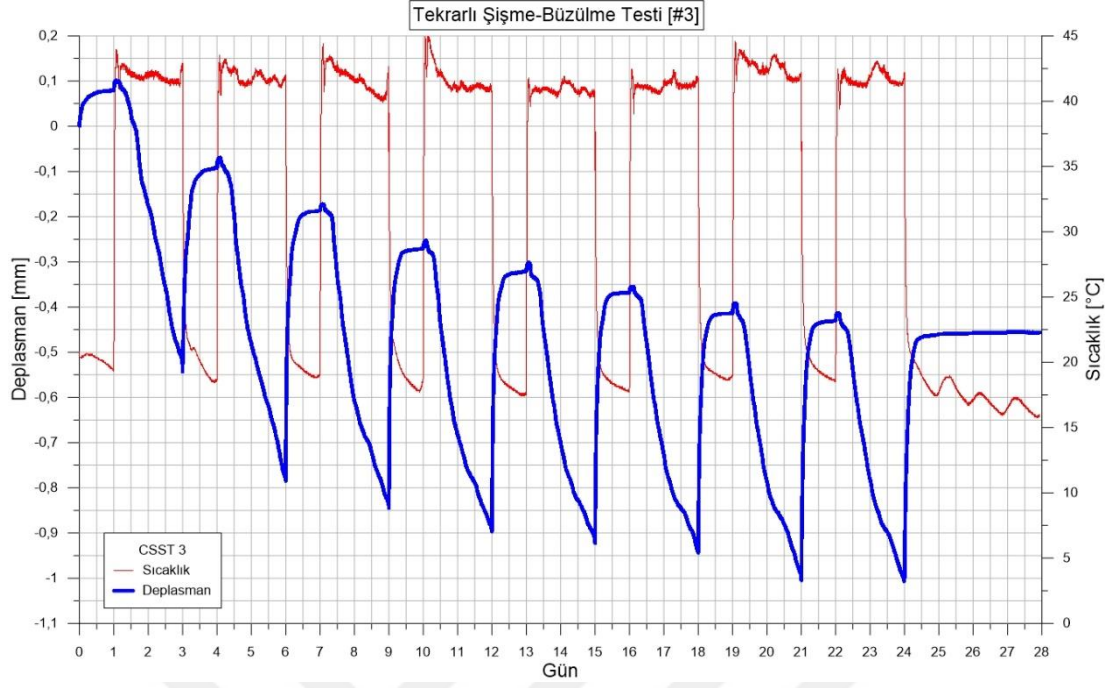
Şekil 4-52, Şekil 4-54 ve Şekil 4-56’da sırasıyla C6a_RC1, C6b_RC3 ve C6c_RC4 numunelerinin geliştirilen cihazdan elde edilen zamana bağlı deplasman ve sıcaklık grafiği, Şekil 4-53, Şekil 4-55 ve Şekil 4-57’de sırasıyla C6a_RC1, C6b_RC3 ve C6c_RC4 numunesinin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) grafiği verilmiştir. Şekil 4-52, Şekil 4-54 ve Şekil 4-56’da şişme yüzdelерinin giderek azaldığı görülmüştür.



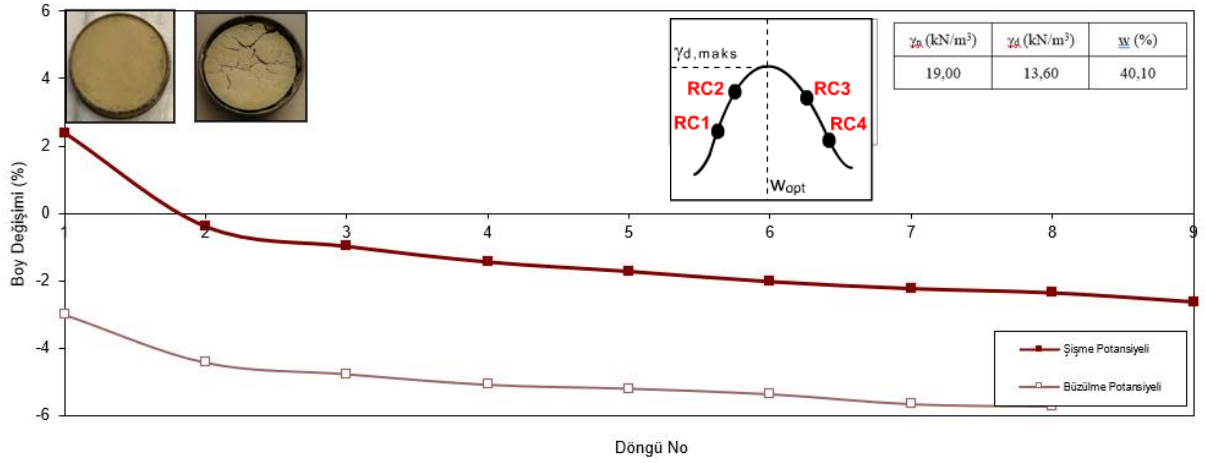
Şekil 4-52. C6a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



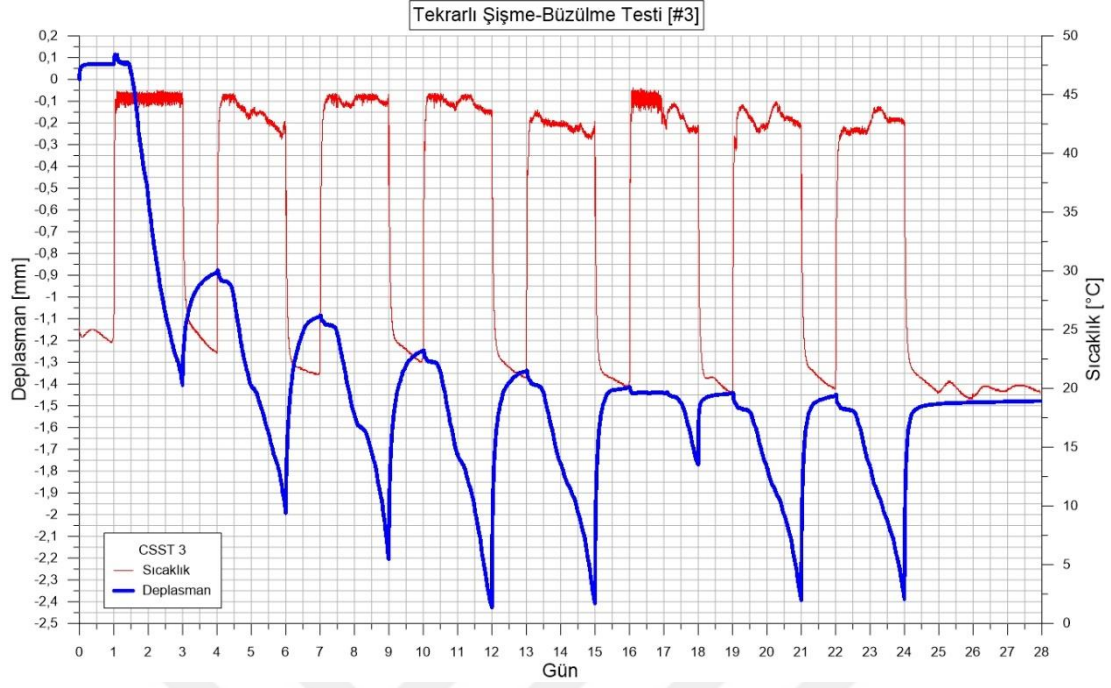
Şekil 4-53. C6a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



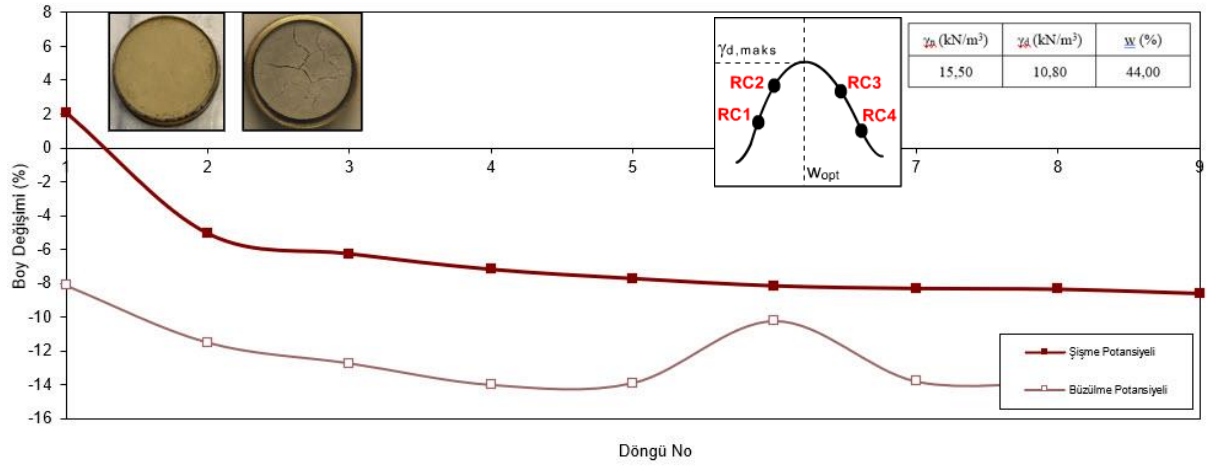
Şekil 4-54. C6b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



Şekil 4-55. C6b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



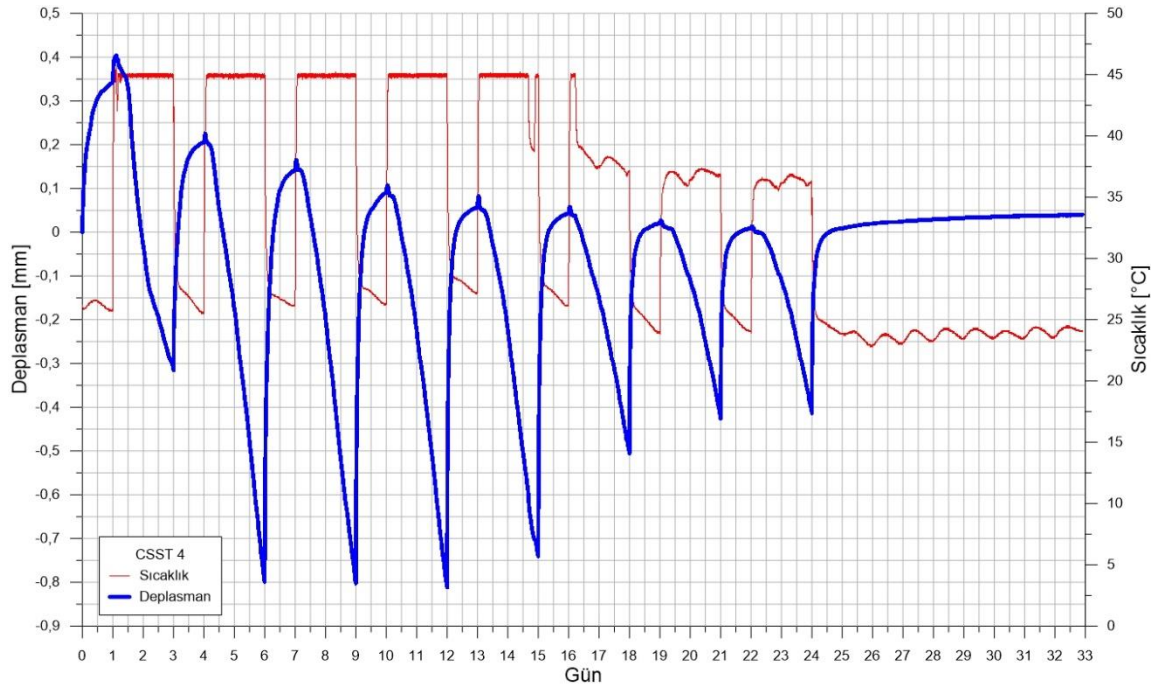
Şekil 4-56. C6c_RC4 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



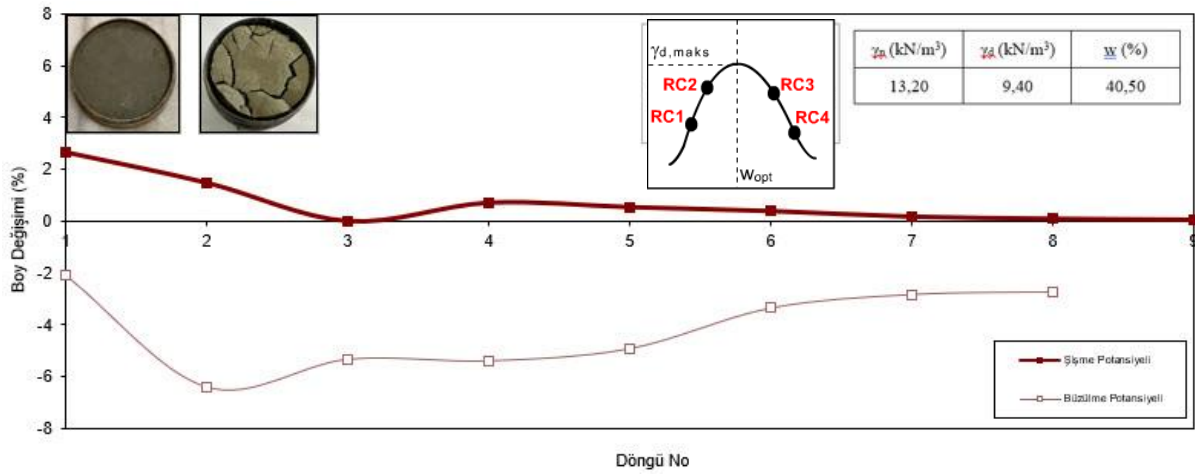
Şekil 4-57. C6c_RC4 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği

4.1.7. Zeytinburnu Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları

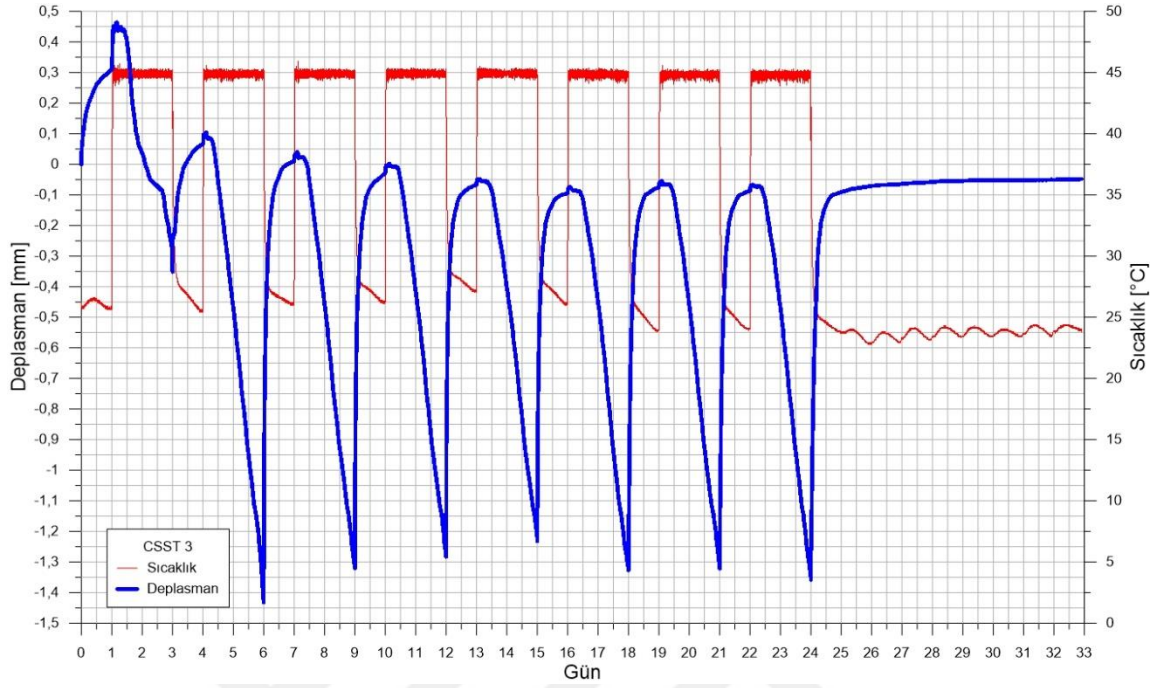
Şekil 4-58 ve Şekil 4-60'ta sırasıyla C5a_RC1 ve C5b_RC3 numunelerinin geliştirilen cihazdan elde edilen zamana bağlı deplasman ve sıcaklık grafiği, Şekil 4-59 ve Şekil 4-61'de sırasıyla C5a_RC1 ve C5b_RC3 numunelerinin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) grafiği verilmiştir. Şekil 4-59 ve Şekil 4-61'de şişme yüzdelерinin giderek azaldığı görülmüştür



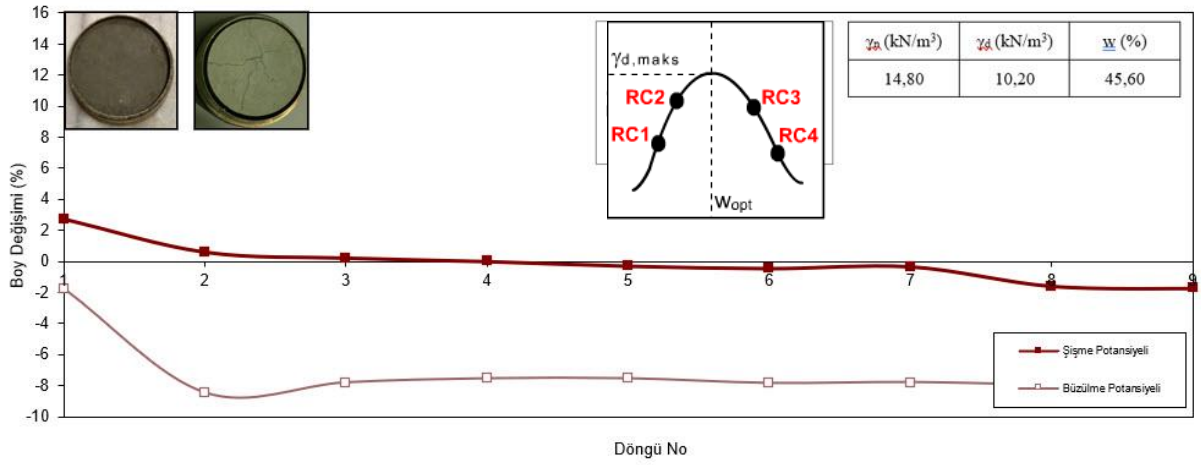
Şekil 4-58. C7a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



Şekil 4-59. C7a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



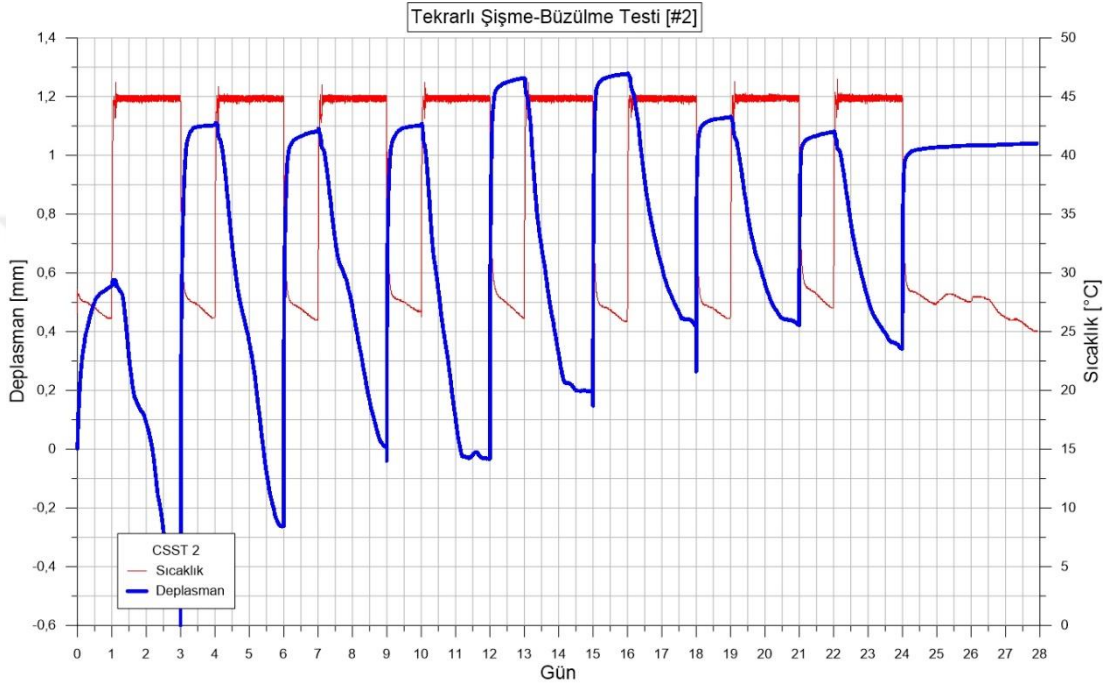
Şekil 4-60. C7b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



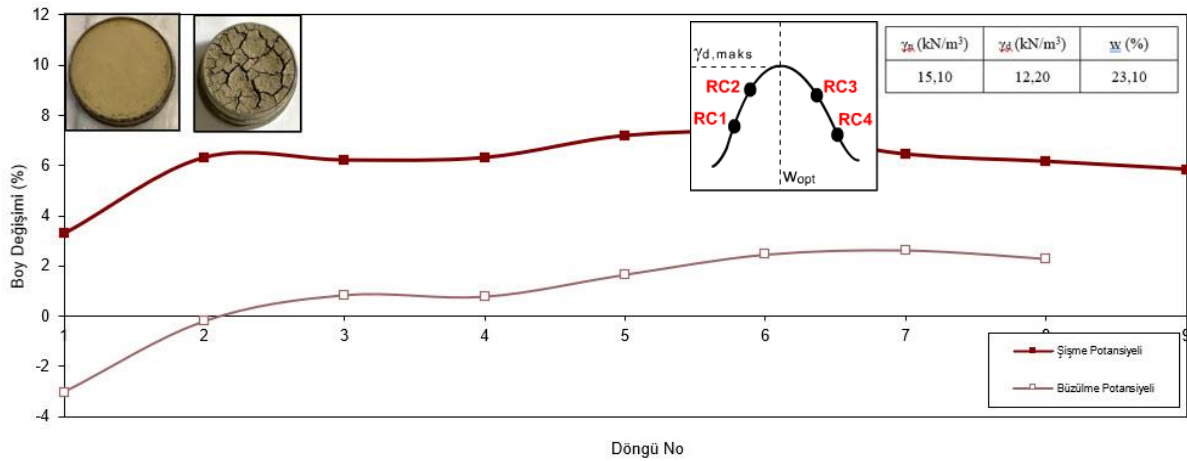
Şekil 4-61. C7b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği

4.1.8. Silivri Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları

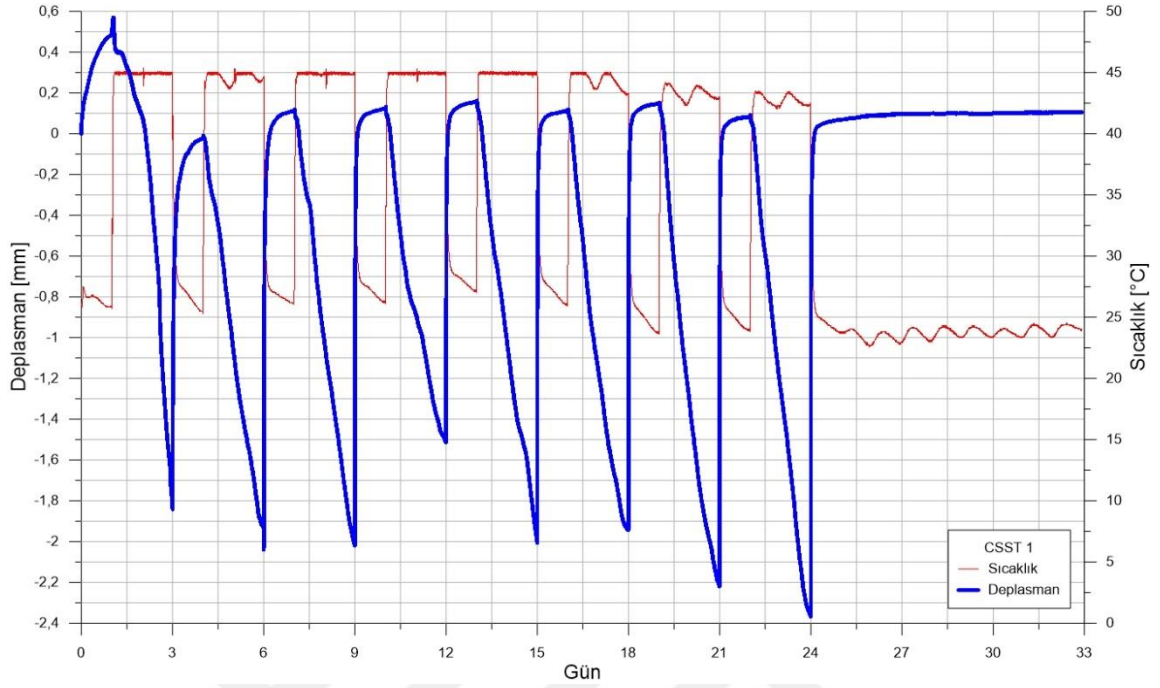
Şekil 4-62 ve Şekil 4-63'te sırasıyla C8a_RC1 ve C8b_RC3 numunelerinin geliştirilen cihazdan elde edilen zamana bağlı deplasman ve sıcaklık grafiği, Şekil 4-63 ve Şekil 4-65'te sırasıyla C8a_RC1 ve C8b_RC3 numunelerinin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) grafiği verilmiştir. Şekil 4-63'te şişme yüzdelerinin giderek arttığı ve Şekil 4-65'te şişme yüzdelerinin azalıp arttığı görülmüştür



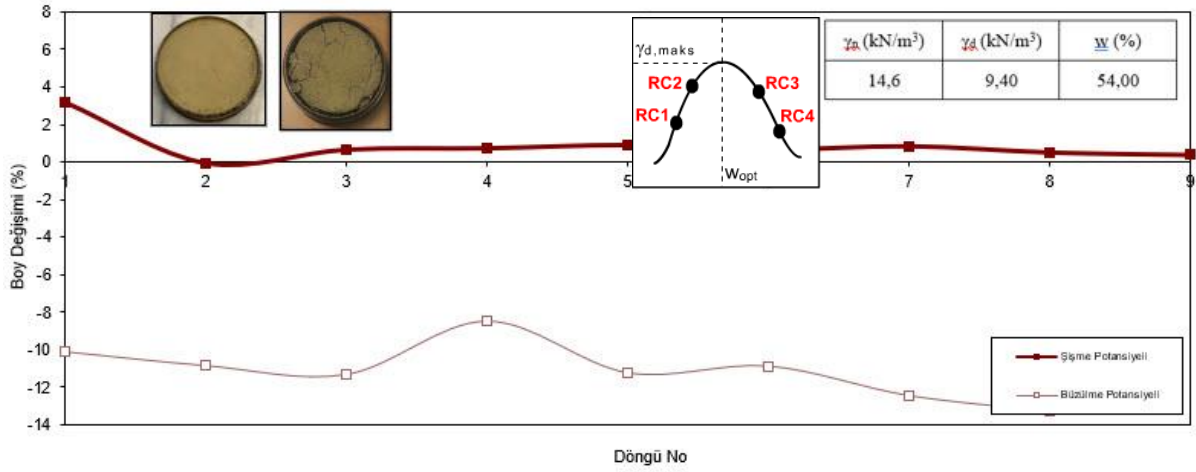
Şekil 4-62. C8a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



Şekil 4-63. C8a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



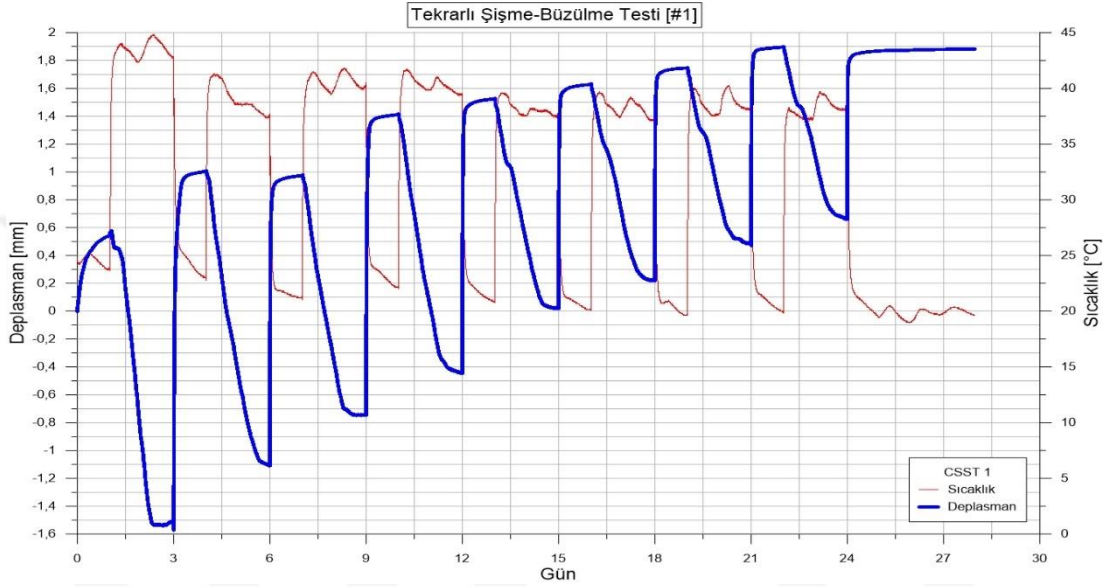
Şekil 4-64. C8b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



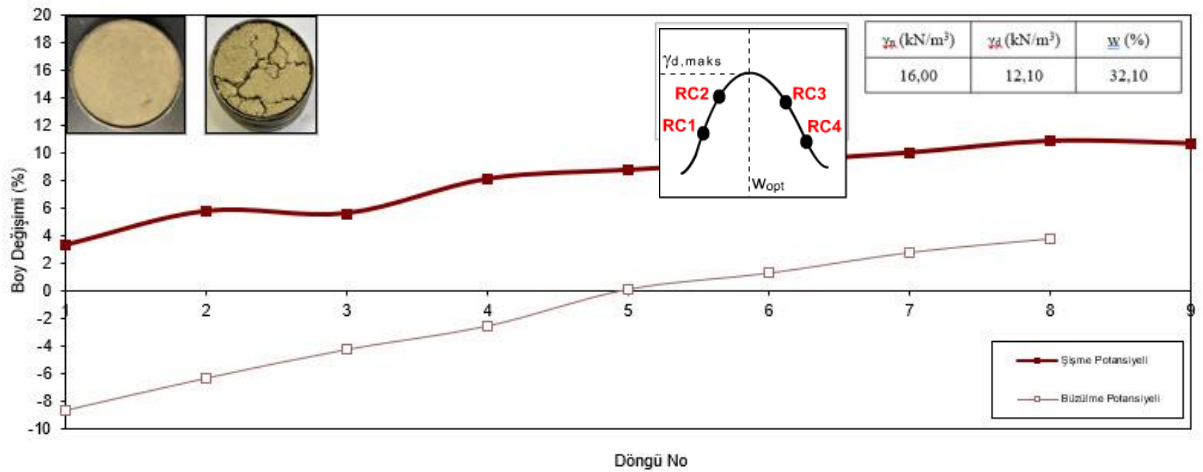
Şekil 4-65. C8b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği

4.1.9. Silivri Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları

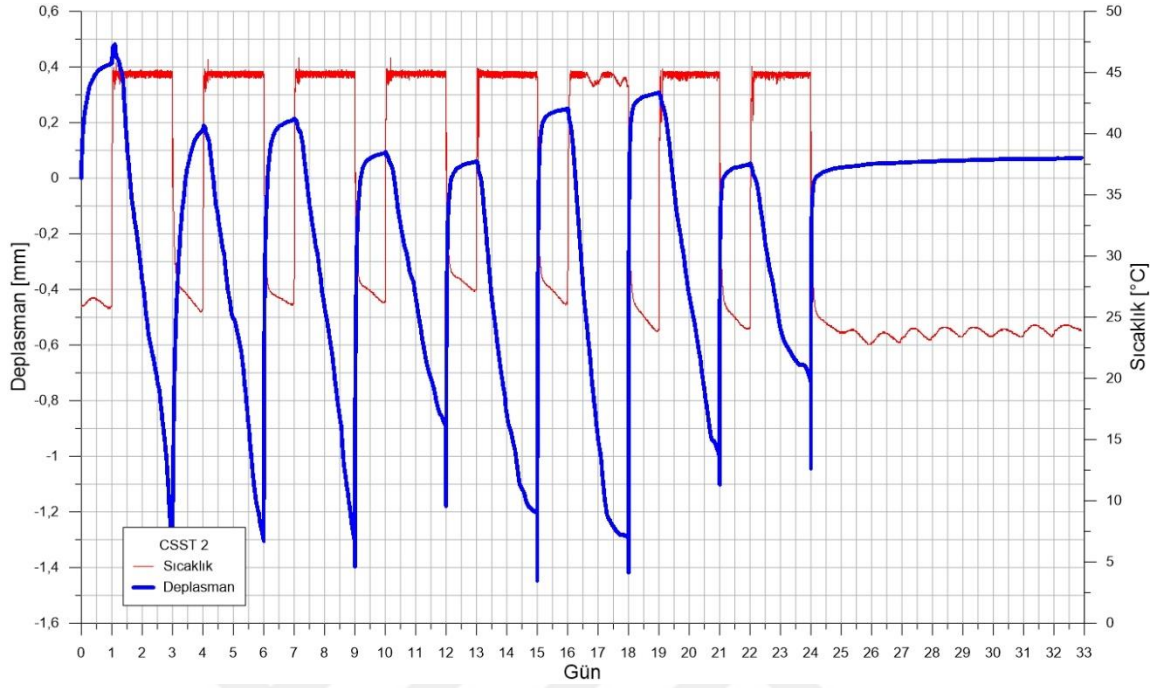
Şekil 4-66, Şekil 4-68 ve Şekil 4-70’de sırasıyla C9a_RC1, C9b_RC3 ve C9c_RC4 numunelerinin geliştirilen cihazdan elde edilen zamana bağlı deplasman ve sıcaklık grafiği, Şekil 4-67, Şekil 4-69 ve Şekil 4-71’de sırasıyla C9a_RC1, C9b_RC3 ve C9c_RC4 numunesinin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) grafiği verilmiştir. Şekil 4-52, Şekil 4-54 ve Şekil 4-56’da şişme yüzdelерinin giderek azaldığı görülmüştür.



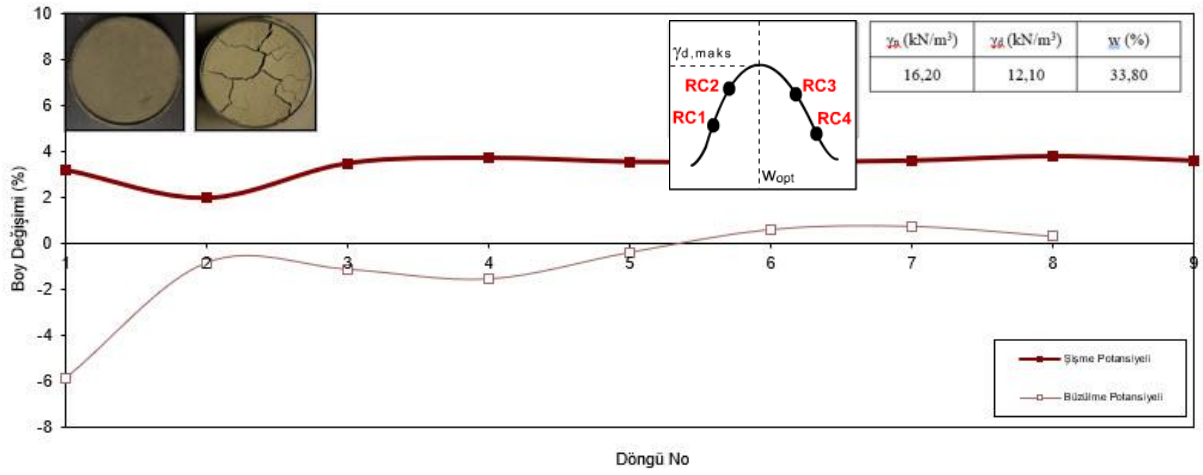
Şekil 4-66. C9a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



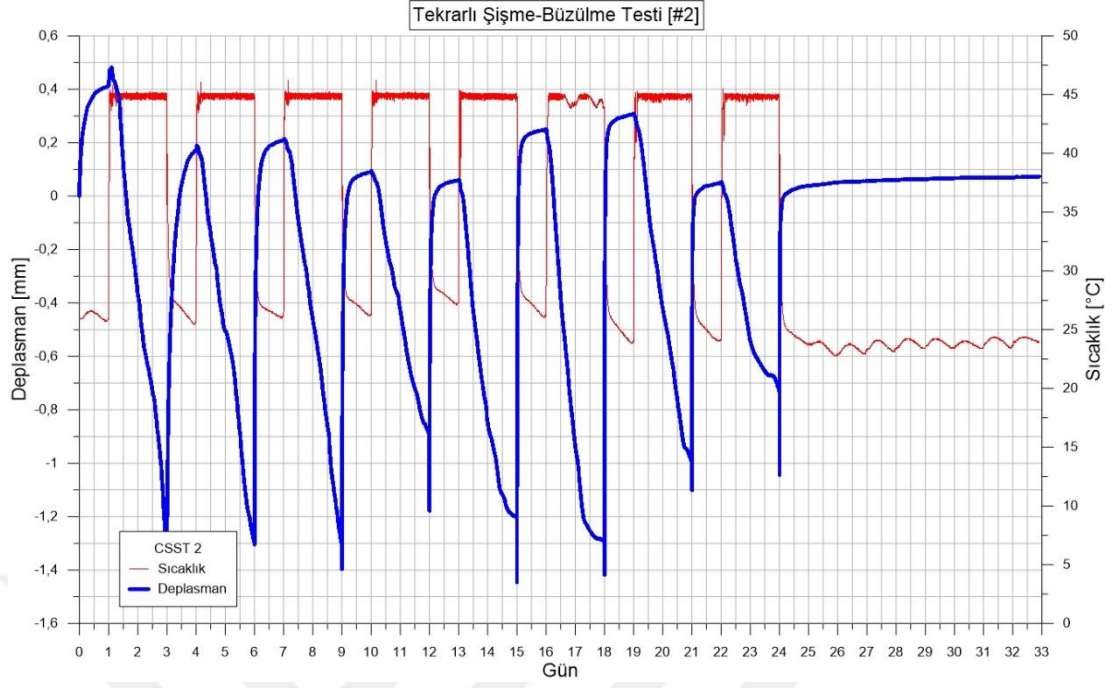
Şekil 4-67. C9a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



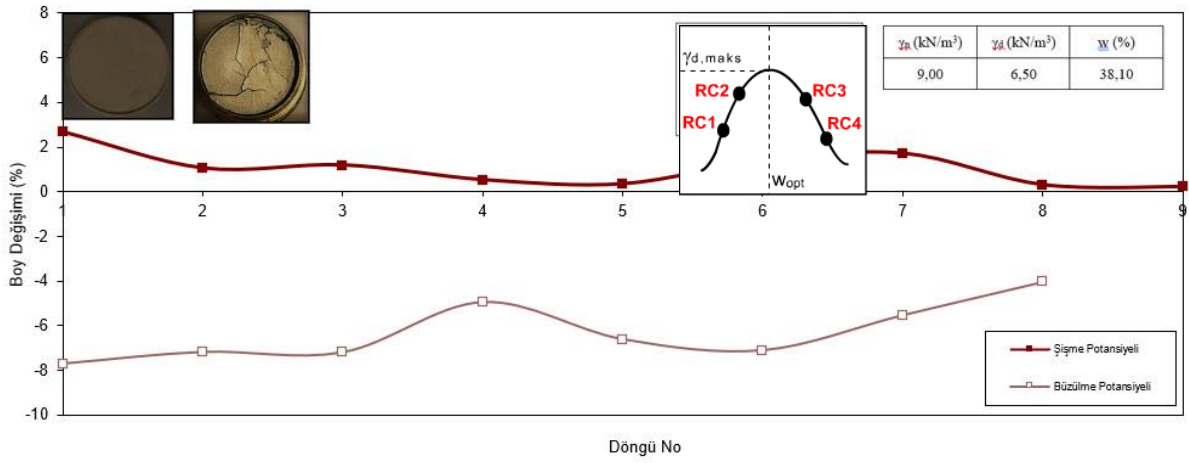
Şekil 4-68. C9b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



Şekil 4-69. C9b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



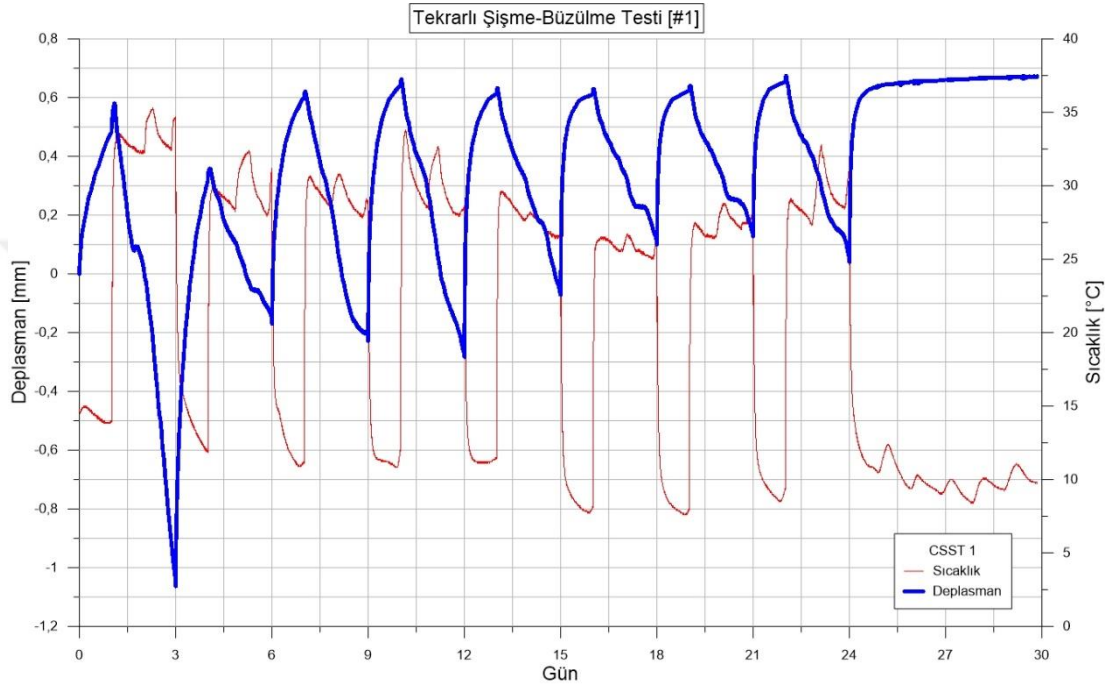
Şekil 4-70. C9c_RC4 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



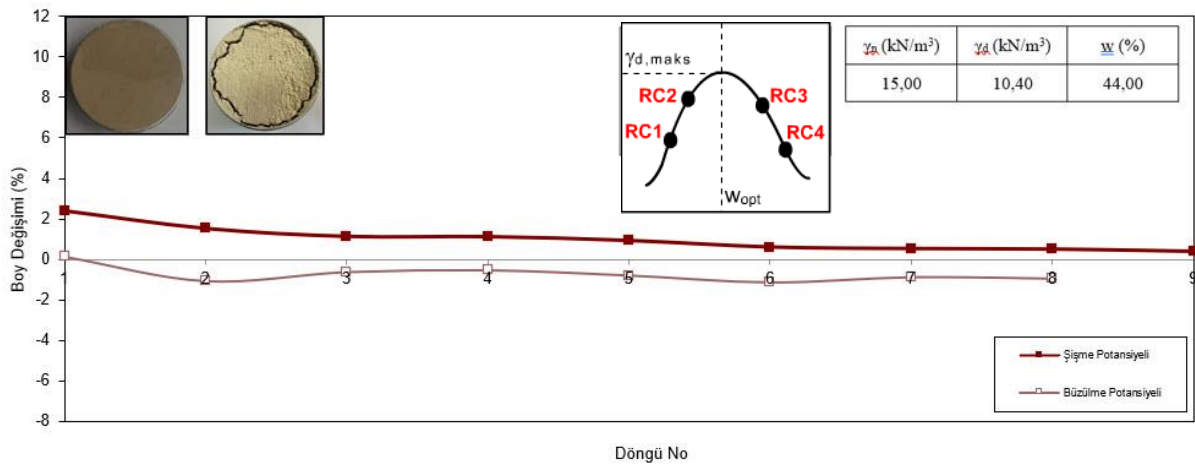
Şekil 4-71. C9c_RC4 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği

4.1.10. Fatih Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları

Şekil 4-72’de C10_RC3 numunesinin geliştirilen cihazdan elde edilen zamana bağlı deplasman ve sıcaklık grafiği, Şekil 4-73’te C10_RC3 numunesinin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) grafiği verilmiştir. Şekil 4-73’te şişme yüzdelерinin giderek azaldığı görülmüştür



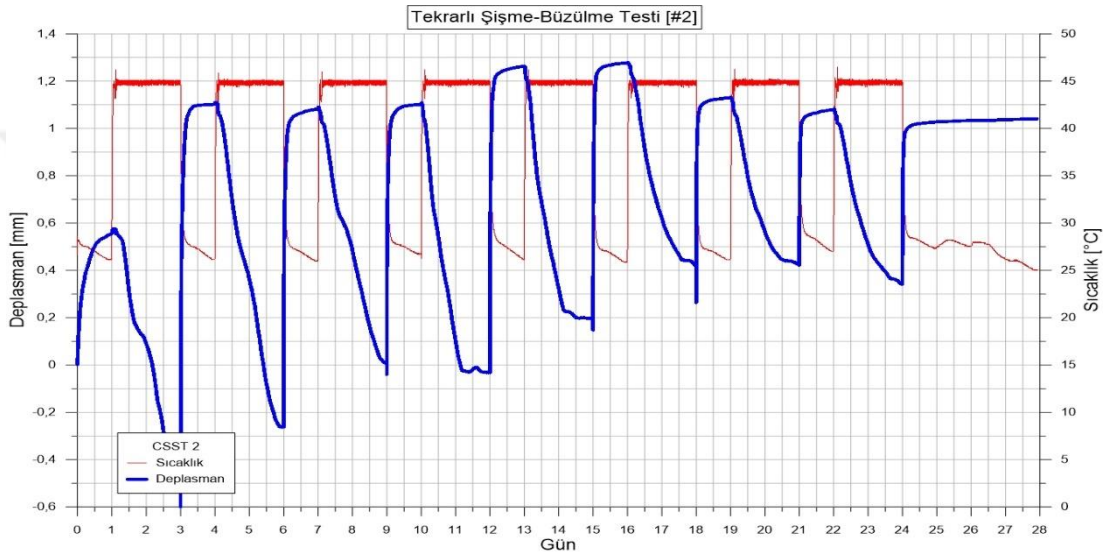
Şekil 4-72. C10_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



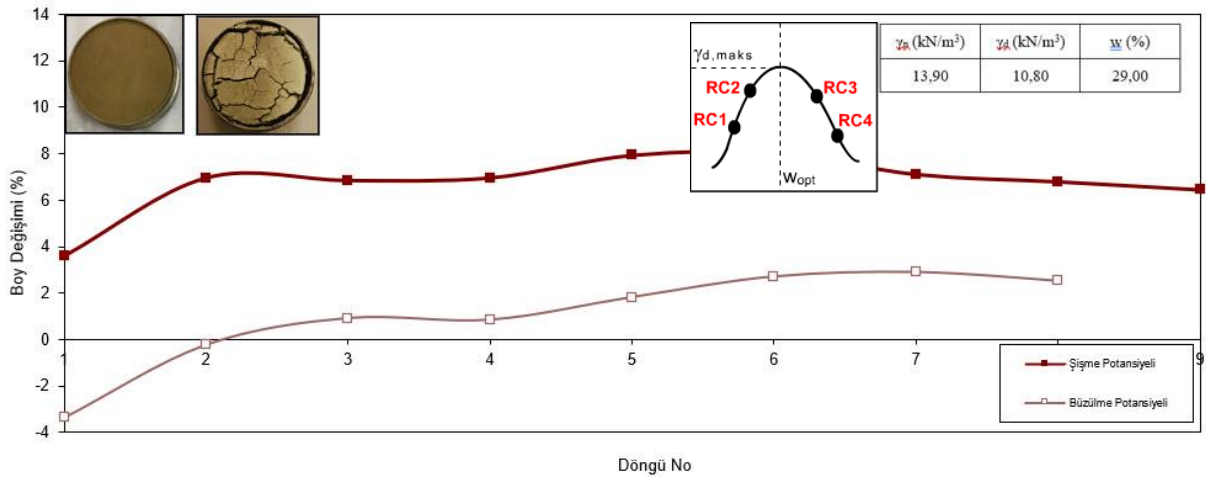
Şekil 4-73. C10_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği

4.1.11. Bağcılar Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları

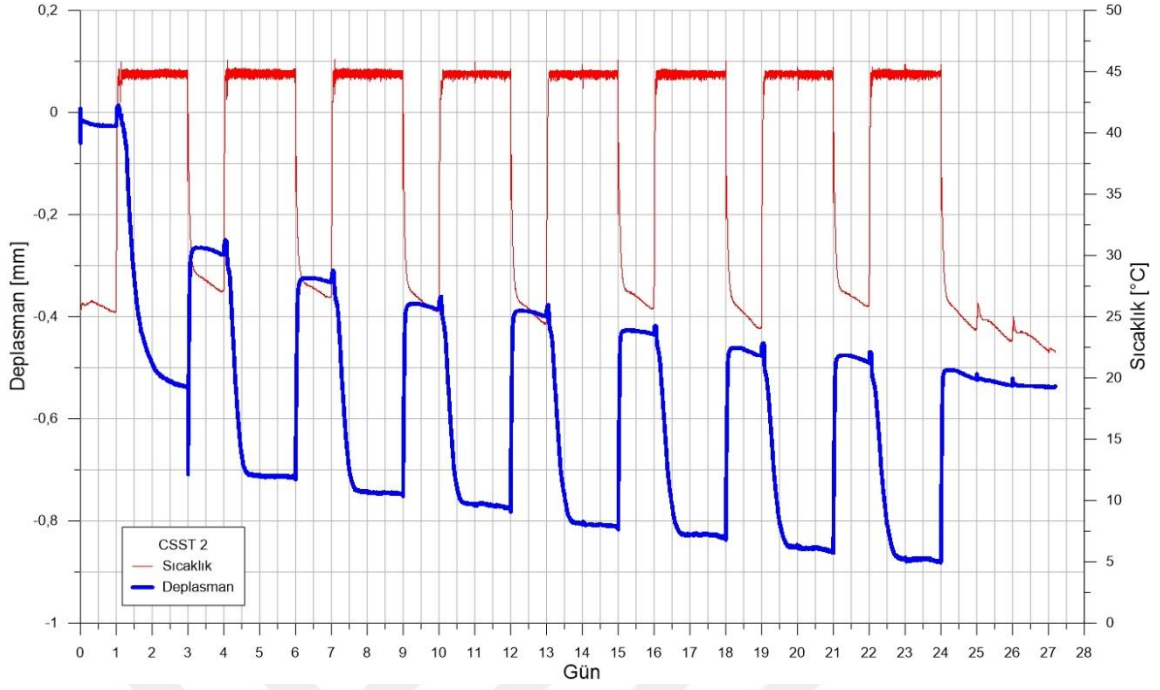
Şekil 4-74 ve Şekil 4-76’da sırasıyla C11a_RC1 ve C11b_RC3 numunelerinin geliştirilen cihazdan elde edilen zamana bağlı deplasman ve sıcaklık grafiği, Şekil 4-75 ve Şekil 4-77’de sırasıyla C11a_RC1 ve C11b_RC3 numunelerinin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) grafiği verilmiştir. Şekil 4-75’te şişme yüzdelерinin giderek arttığı ve Şekil 4-77’de şişme yüzdelерinin giderek azaldığı görülmüştür



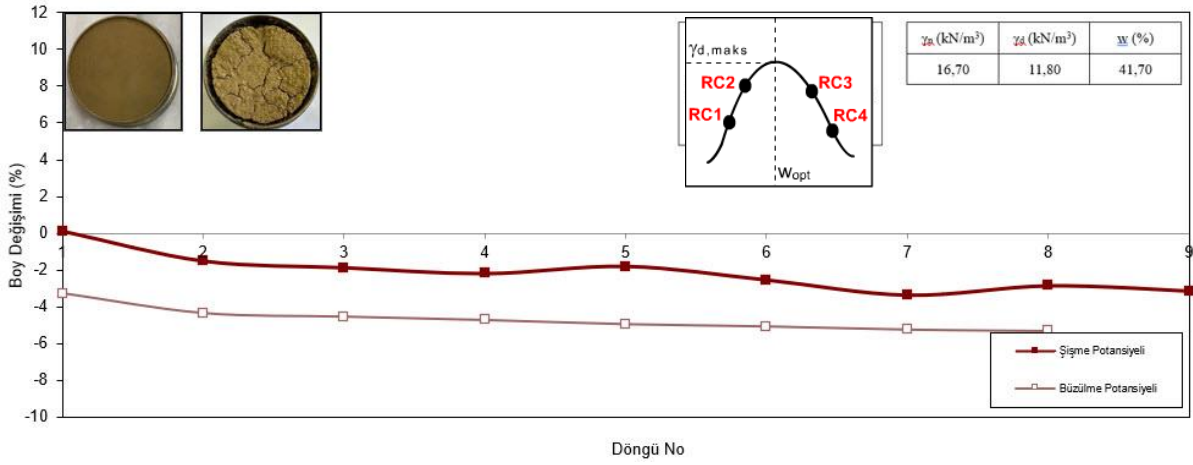
Şekil 4-74. C11a_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



Şekil 4-75. C11a_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği



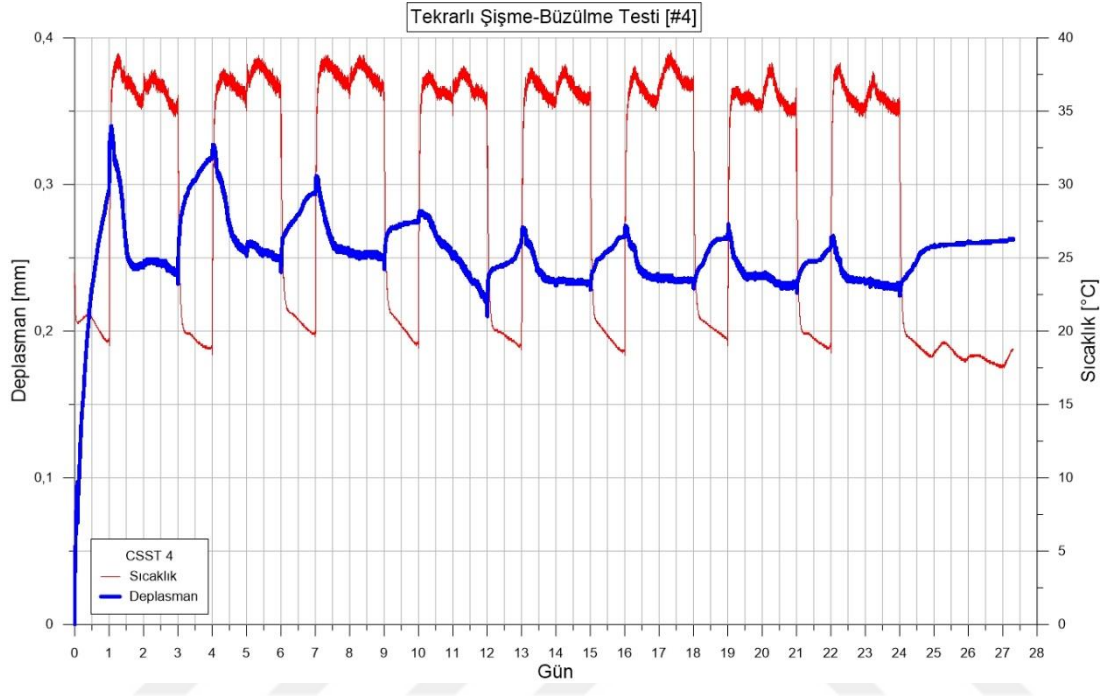
Şekil 4-76. C11b_RC3 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



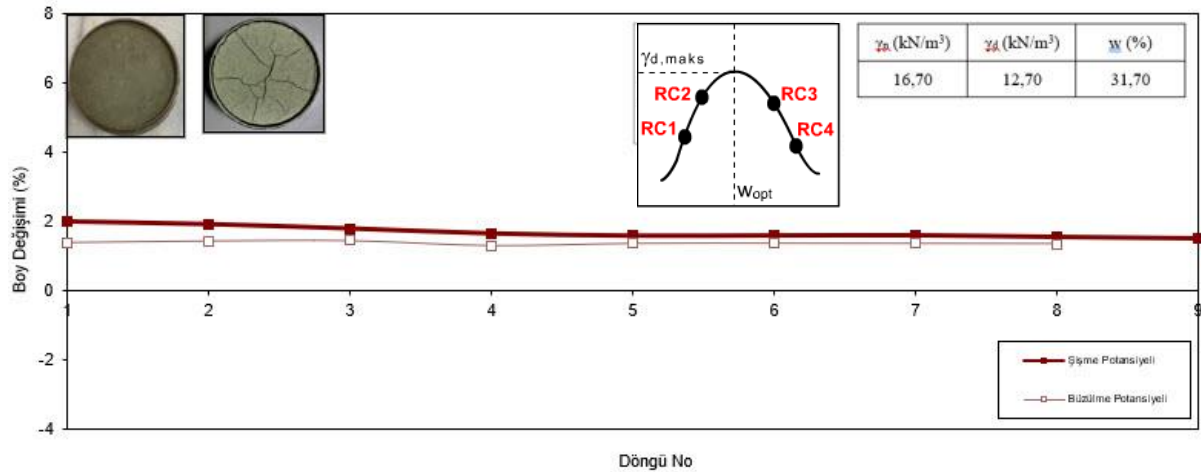
Şekil 4-77. C11b_RC3 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği

4.1.12. Bağcılar Numunesi Tekrarlı Şişme – Büzülme Deney Sonuçları

Şekil 4-78’de C12_RC1 numunesinin geliştirilen cihazdan elde edilen zamana bağlı deplasman ve sıcaklık grafiği, Şekil 4-79’da C12_RC1 numunesinin döngü sayısına bağlı boy değişimi (%) grafiği verilmiştir. Şekil 4-79’da şişme yüzdelерinin giderek azaldığı görülmüştür



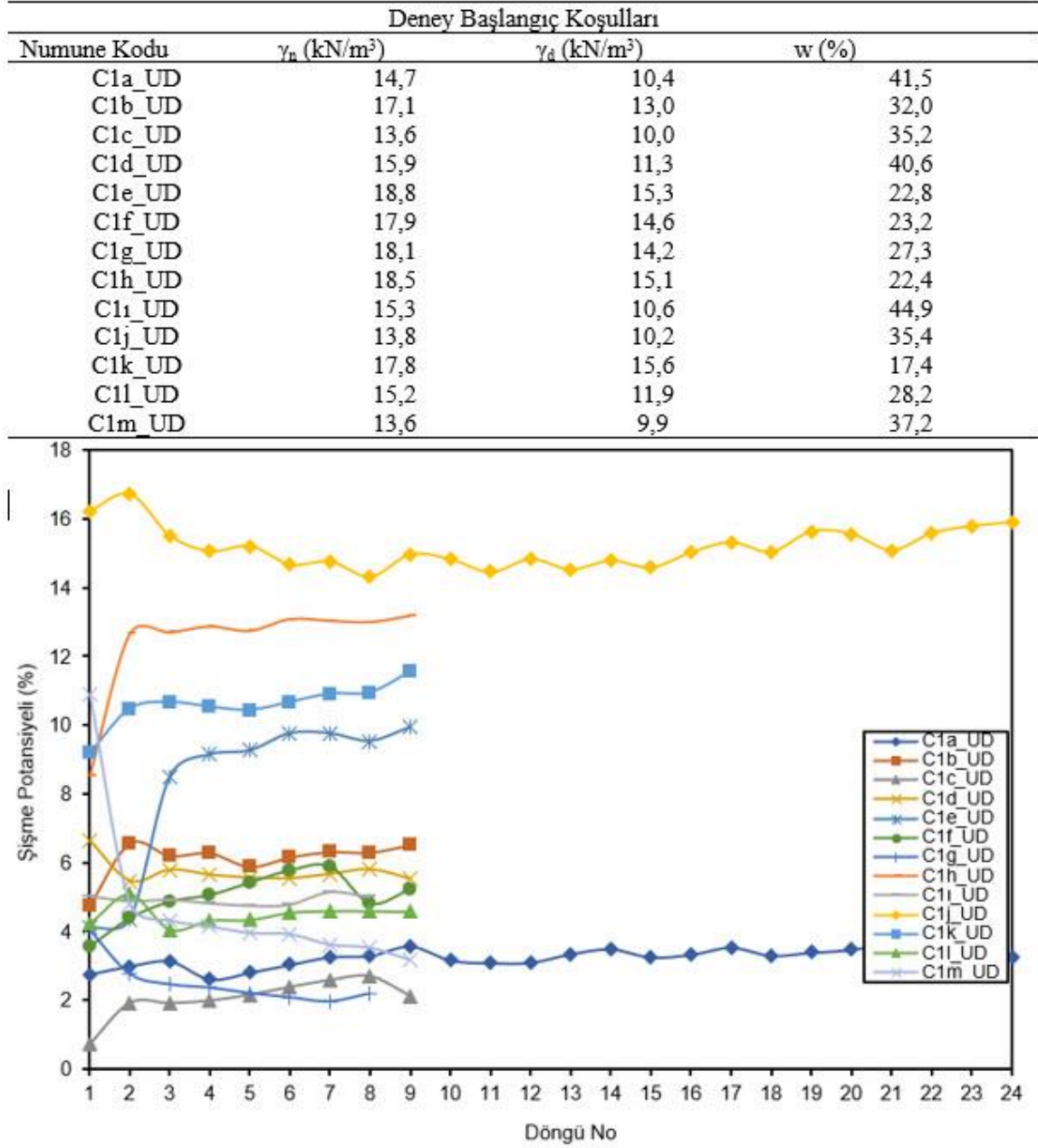
Şekil 4-78. C12_RC1 numunesinin cihazdan alınan deplasman – sıcaklık – gün grafiği



Şekil 4-79. C12_RC1 Numunesinin şişme ve büzülme potansiyeli– döngü grafiği

4.2. TEKRARLI ŞİŞME – BÜZÜLME DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

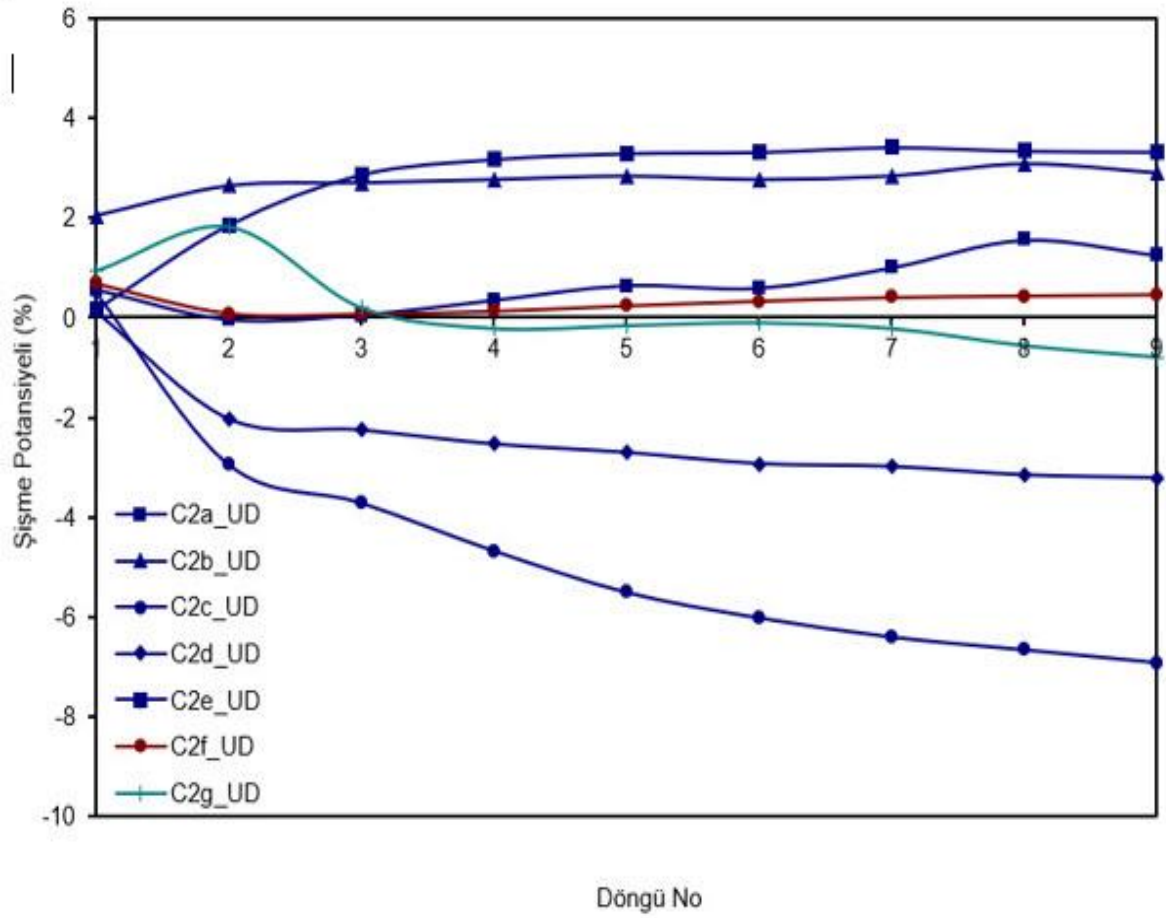
Şekil 4-80’de tüm C1 Ambarlı numunelerinin tekrarlı şişme – büzülme deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4-80. C1 Ambarlı numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması

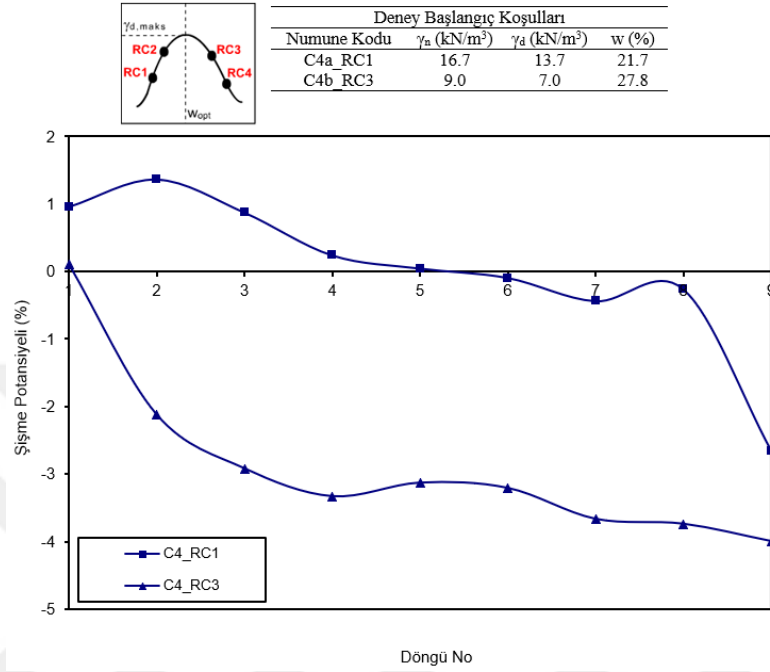
Şekil 4-81’de tüm C2 Hadımköy numunelerinin tekrarlı şişme – büzülme deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Deney Başlangıç Koşulları			
Numune Kodu	γ_p (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)
C2a_UD	15,7	10,6	48,6
C2b_UD	15,1	10,4	45,1
C2c_UD	13,9	9,6	44
C2d_UD	15,2	9,8	54,9
C2e_UD	14,2	9,0	58,3
C2f_UD	13,2	8,7	52,9
C2g_UD	14,1	9,1	54,2

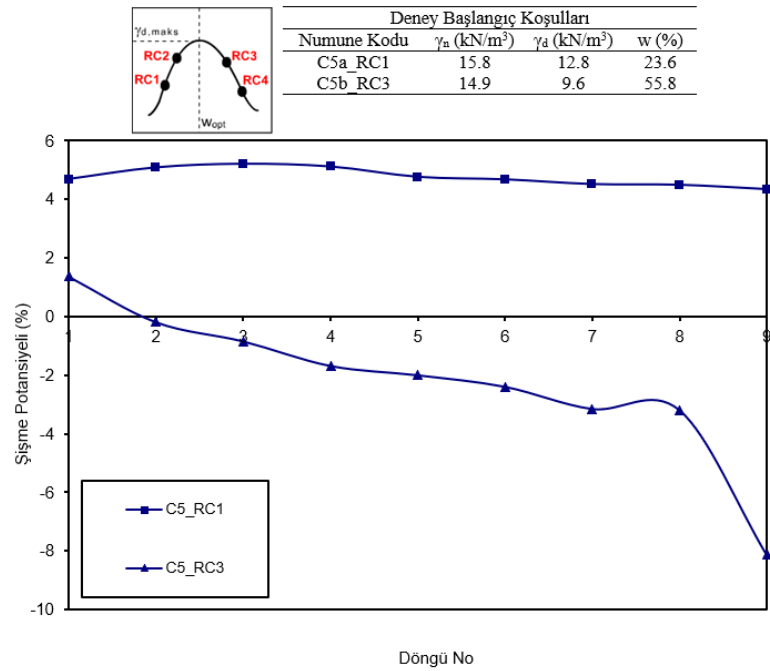


Şekil 4-81. C2 Hadımköy numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması

Şekil 4-82’de tüm C4 Zeytinburnu numunelerinin tekrarlı şişme – büzülme deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4-83’te tüm C5 Zeytinburnu numunelerinin tekrarlı şişme – büzülme deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

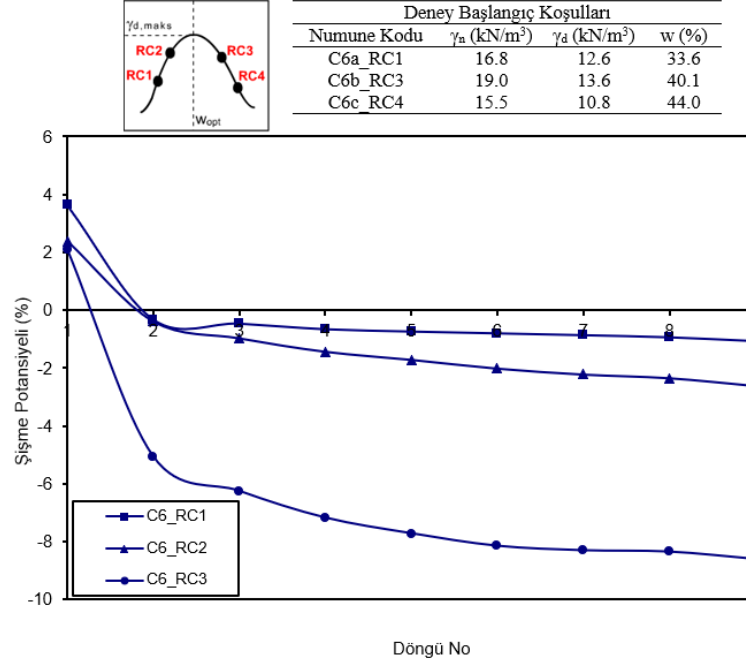


Şekil 4-82. C4 Zeytinburnu numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması

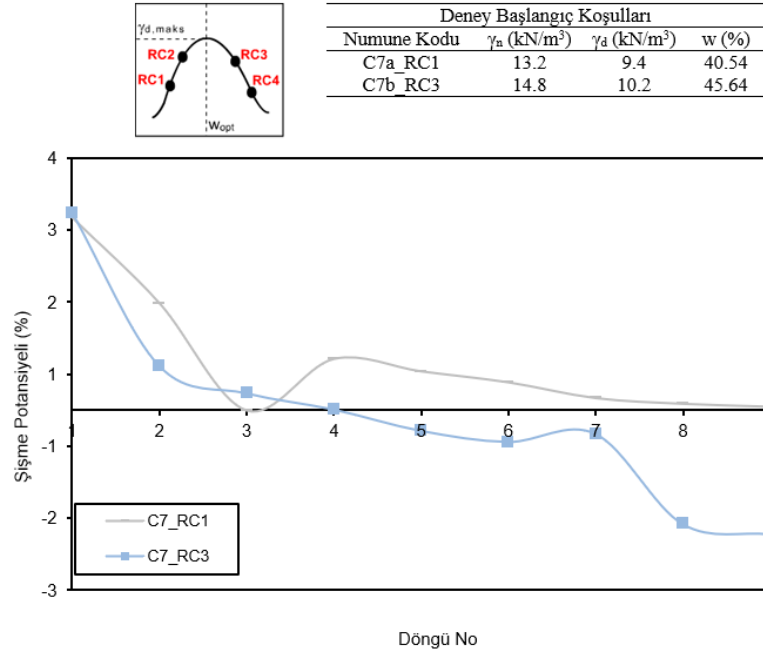


Şekil 4-83. C5 Zeytinburnu numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması

Şekil 4-84'te tüm C6 Avcılar numunelerinin tekrarlı şişme – büzülme deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4-85'te tüm C7 Zeytinburnu numunelerinin tekrarlı şişme – büzülme deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

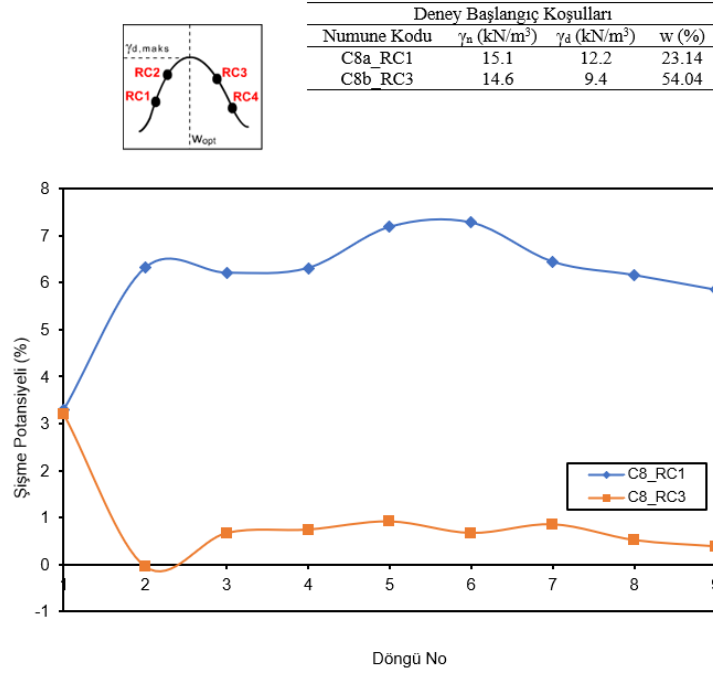


Şekil 4-84. C6 Avcılar numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması

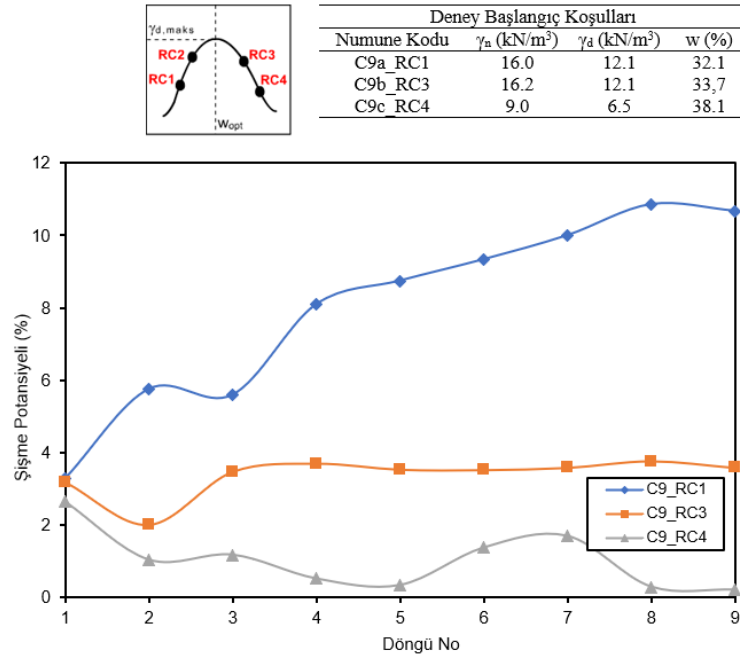


Şekil 4-85. C7 Zeytinburnu numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması

Şekil 4-86’da tüm C8 Silivri numunelerinin tekrarlı şişme – büzülme deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4-87’de tüm C9 Silivri numunelerinin tekrarlı şişme – büzülme deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

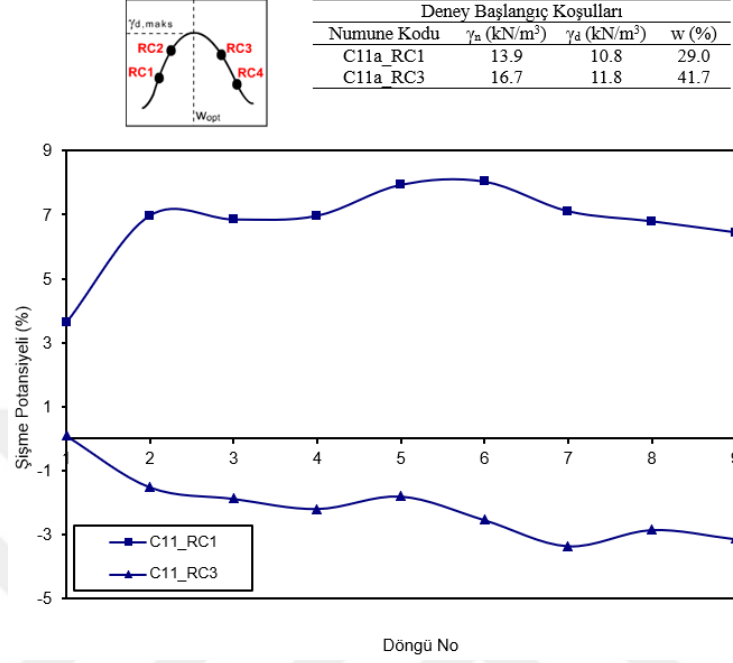


Şekil 4-86. C8 Silivri numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması



Şekil 4-87. C9 Silivri numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması

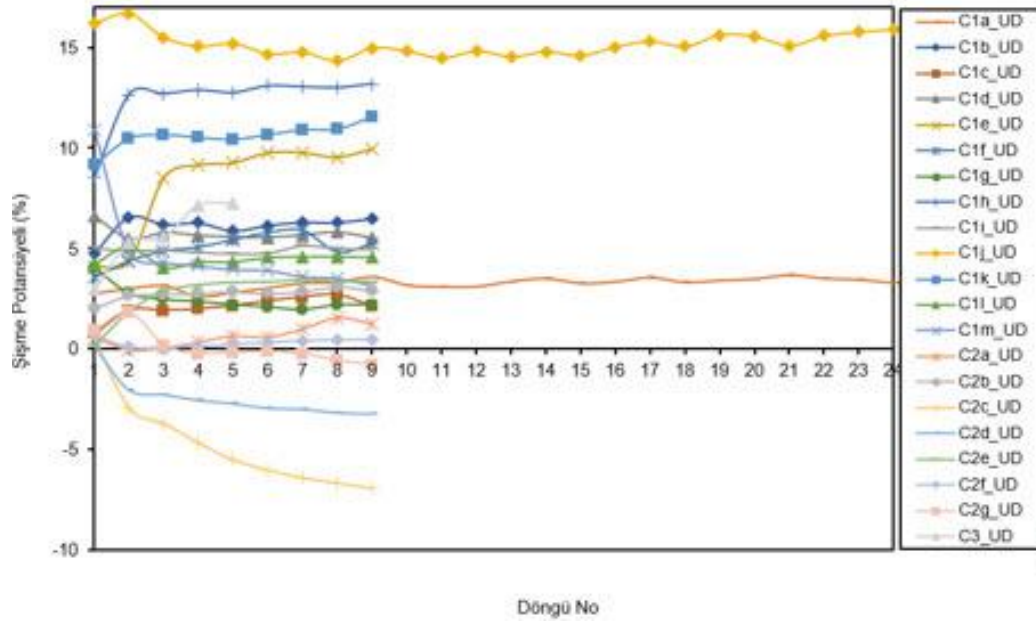
Şekil 4-88’de tüm C11 Bağcılar numunelerinin tekrarlı şişme – büzülme deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4-88. C11 Bağcılar numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması

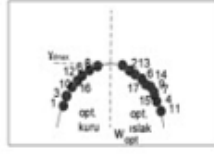
Şekil 4-89’da tüm doğal numunelerin tekrarlı şişme – büzülme deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Numune Kodu	γ_n (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)
C1a_UD	14,7	10,4	41,53
C1b_UD	17,1	13,0	31,95
C1c_UD	13,6	10,0	35,16
C1d_UD	15,9	11,3	40,57
C1e_UD	18,8	15,3	22,81
C1f_UD	17,9	14,6	23,19
C1g_UD	18,1	14,2	27,26
C1h_UD	18,53	15,1	22,35
C1i_UD	15,3	10,6	44,89
C1j_UD	13,8	10,2	35,37
C1k_UD	17,8	15,6	17,38
C1l_UD	15,2	11,9	28,18
C1m_UD	13,6	9,9	37,15
C2a_UD	15,7	10,6	48,58
C2b_UD	15,1	10,4	45,12
C2c_UD	13,9	9,6	44,02
C2d_UD	15,2	9,8	54,92
C2e_UD	14,2	9,0	58,32
C2f_UD	13,2	8,7	52,89
C2g_UD	14,1	9,1	54,19

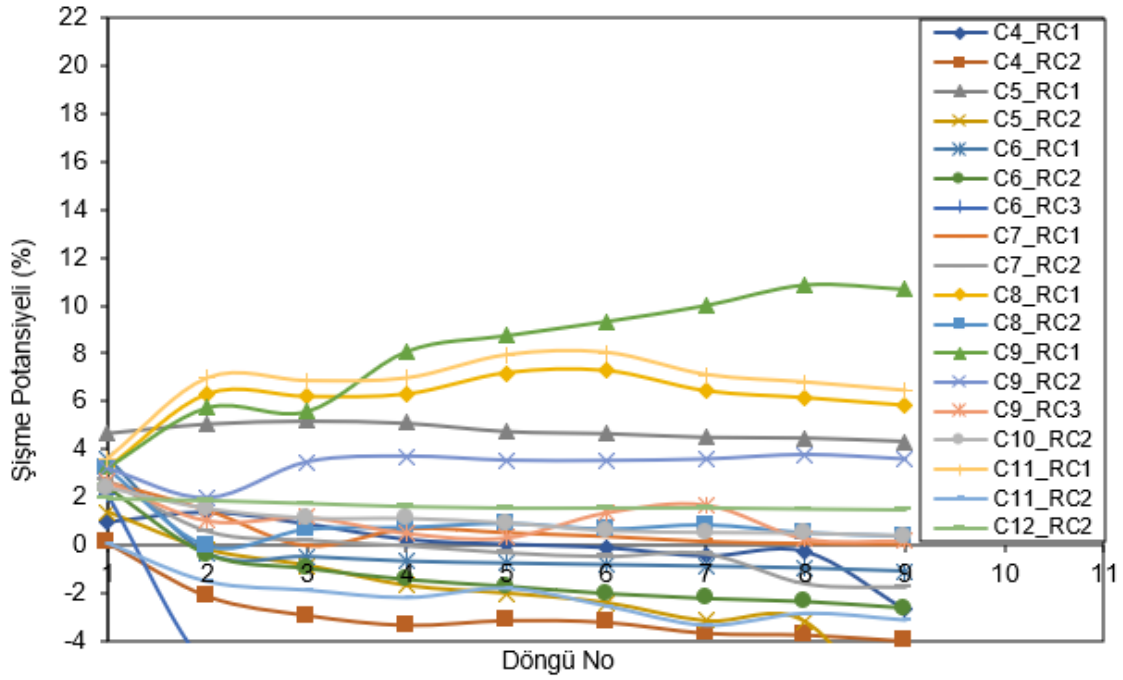


Şekil 4-89. Tüm doğal numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması

Şekil 4-90'da tüm kompakte numunelerin tekrarlı şişme – büzülme deney sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Deney Başlangıç Koşulları				
No	Numune Kodu	γ_n (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)
1	C4a_RC1	16.7	13.7	21.7
2	C4b_RC3	9.0	7.0	27.8
3	C5a_RC1	15.8	12.8	23.6
4	C5b_RC3	14.9	9.6	55.8
5	C6a_RC1	16.8	12.6	33.6
6	C6b_RC3	19.0	13.6	40.1
7	C6c_RC4	15.5	10.8	44.0
8	C7a_RC1	13.2	9.4	40.5
9	C7b_RC3	14.8	10.2	45.6
10	C8a_RC1	15.1	12.2	23.1
11	C8b_RC3	14.6	9.4	54.0
12	C9a_RC1	16.0	12.1	32.1
13	C9b_RC3	16.2	12.1	33.8
14	C9c_RC4	9.0	6.5	38.1
15	C10_RC3	15.0	10.4	44.0
16	C11a_RC1	13.9	10.8	29.0
17	C11b_RC3	16.7	11.8	41.7
18	C12_RC3	16.7	12.7	31.7



Şekil 4-90. Tüm kompakte numunelerinin tekrarlı şişme- büzülme deney sonuçları karşılaştırması

4.3. TEKRARLI ŞİŞME-BÜZÜLME İNDEKSİ

Literatürde yapılan tekrarlı şişme-büzülme çalışmalardan ve bu tezde bulunan tekrarlı şişme-büzülme sonuçlarından anlaşılabacağı 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 killere 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 yüzdelilerindeki bu değişimi killerin sahip olduğu hidrodinamik enerjiye bağlamıştır. Bu tezde Schmertmann (1969)'un öne sürdüğü fikir aynen korunup, tekrarlı şişme indeksi (Cyclic swelling index, CSI) olarak tanımlanmıştır. CSI tanım olarak tekrarlı şişme-büzülme deneylerinde son döngüdeki şişme yüzdesi (S_n) ilk şişme yüzdesine (S_1) oranıdır (Eşitlik 4.1). Şekil 4.52'de tekrarlı şişme-büzülme deneyinden bulunacak 5 farklı durum için bu kavramlar gösterilmiştir.

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

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

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

$$SSI = 50 \cdot e^{-2.6 \cdot \left(\frac{w_{S1}}{w_o}\right)} \quad (4.2)$$

$$S_n = S_1 \cdot 50 \cdot e^{-2.6 \cdot \left(\frac{w_{S1}}{w_o}\right)} \quad (4.3)$$

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

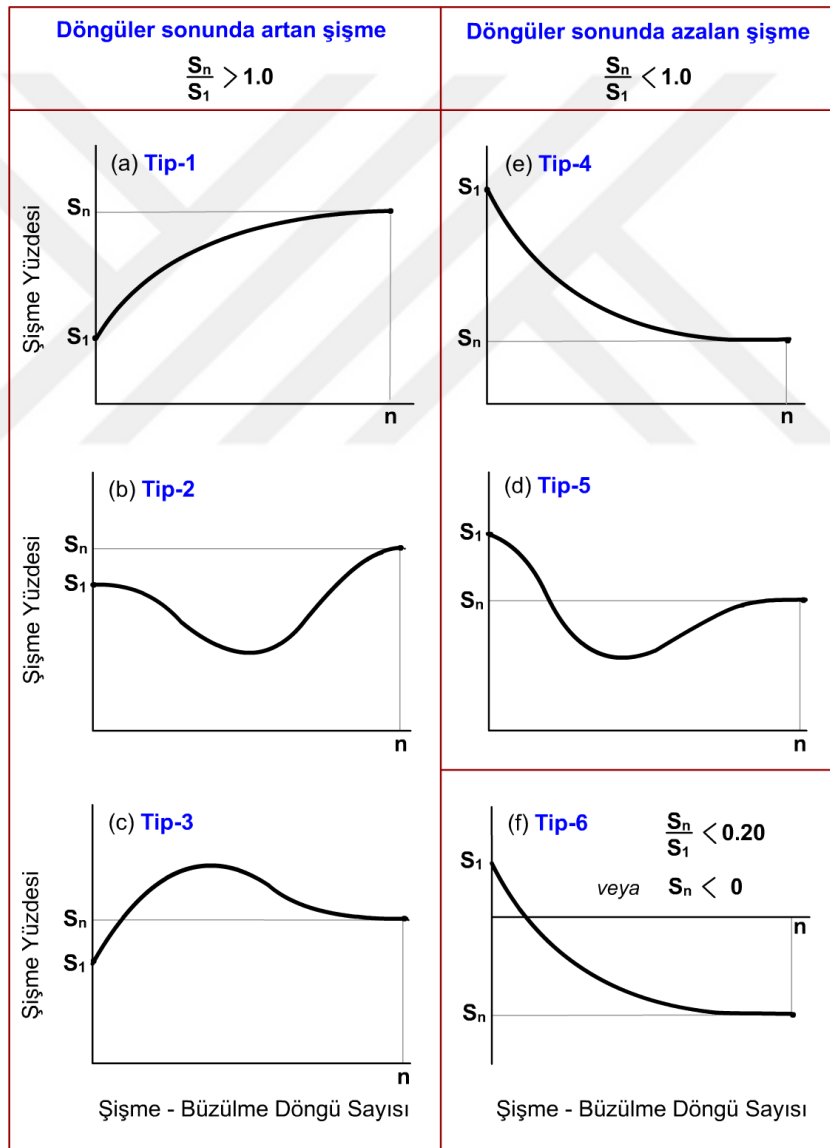
S_1 : Tekrarlı şişme-büzülme deneyinde ilk döngüdeki şişme yüzdesi (%)

w_{S1} / w_o : Su muhtevası oranı

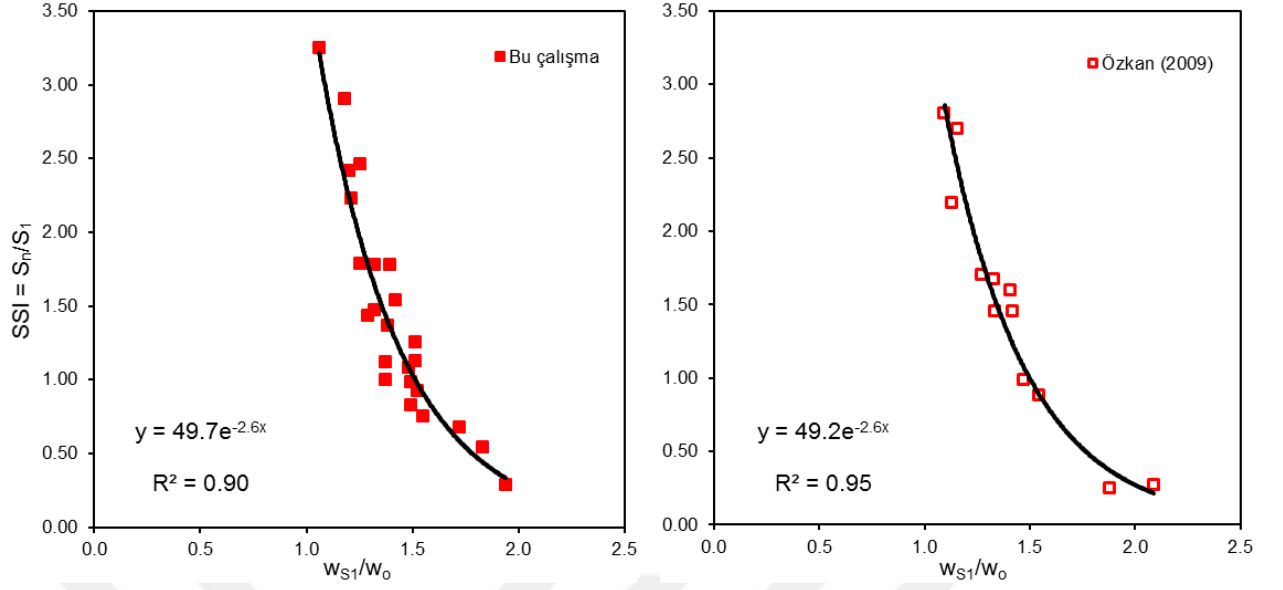
w_o : Başlangıç su muhtevası (%)

w_{S1} : Ödometrede şişme deneyi sonunda (1. döngüde) ulaşılan su muhtevası (%)

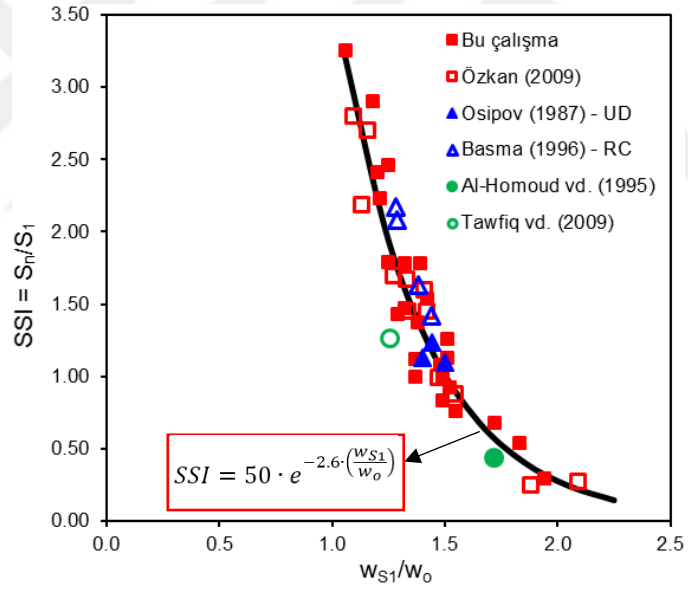
Bu araştırmada yapılan çalışma sonucunda SSI'den elde edilen değerler ile çok kolay ve kısa süreli bir deneyle elde edilen standart doygun su muhtevası (w_0) ve bu değer in doğal su muhtevasına (w_s) oranından elde edilen değerler arasında çok kuvvetli bir ilişki bulunmuştur. Böylece, karmaşık bir davranış olan tekrarlı şişme-büzülme davranışı sonucunda bir kilin ulaşacağı şişme potansiyeli ve şişme basıncı değerleri elde edilerek önemli bir bulguya ulaşılmıştır. Bu ilişkiler şekil 4.92 ve 4.93'te verilmiş olup, bu korelasyonun basitleştirilmiş formülü eşitlik 4.2 ve 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4-91. Tekrarlı şişme-büzülme deneylerinde görülen şişme yüzdesi eğri tipleri



Şekil 4-92. Tip-1 ile Tip-5 numunelerde şişme-büzülme indeksi (SSI) ile su muhtevası oranı (w_{S1}/w_0) ilişkisi



Şekil 4-93. Çeşitli araştırmacıların SSI – su muhtevası oranı (w_{S1}/w_0) verileri ile bu çalışmadaki verilerin uyumunu gösteren grafik

Bu araştırmadan bulunan SSI – w_{S1}/w_0 korelasyonu literatürde tekrarlı şişme-büzülme deneyi yapan araştırmacılardan maksimum su muhtevasını vermiş olanların verilerinde uyum sağlamaktadır. Şekil 4.93’de 4 ayrı araştırmacının toplam 12 verisinin bu araştırmada bulunan SSI- w_{S1}/w_0 korelasyonuna uyumu görülmektedir.

4.4. KİL YAPISININ TAHMİNİ

Killerin şişme – büzülme davranışını anlamak için kil numuneler üzerinde tekrarlı şişme – büzülme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin büzülme döngüsünde, kurumaya maruz kalan kil numunelerinde büzülme çatlakları gözlenmiştir. Bu çatlakların analizi de kil yapısı için önemli bilgiler verdiği fark edilmiştir. Bu sebeple numuneler ring içinde etüvde 40 ± 5 °C’de kurutulmuştur. Numunelerin kurutulmasıyla oluşan çatlakların analizi yapılmıştır. Buradan yola çıkarak bu çalışma kapsamında büzülme ile oluşan bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlak uzunluğu SSI ve FSR değeri ile kilin tane dizilimi, yapısı ve bağları ile ilgili tahmin metodolojisi geliştirilmiştir.

$$\text{Çatlak uzunluk oranı} = \frac{L_C}{L_R} \quad (4.3)$$

$$\text{Büzülme alanı oranı} = \frac{A_C}{A_R} \quad (4.4)$$

Burada;

L_C = Numune 40 ± 5 kurutulunca oluşan belirgin çatlakların uzunluğu

L_R = Numunenin içine yerleştirildiği ringin çevre uzunluğu (Bu tezde, $L_R=157.1$ mm)

A_C = Numune 40 ± 5 kurutulunca oluşan belirgin çatlakların uzunluğu

A_R = Numunenin içine yerleştirildiği ringin alanı (Bu tezde, $A_R = 1964$ mm²)

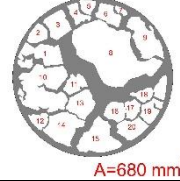
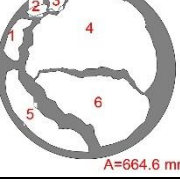
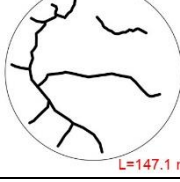
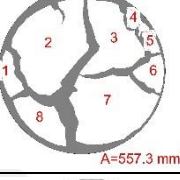
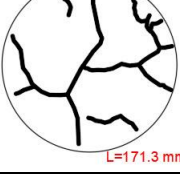
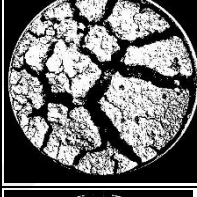
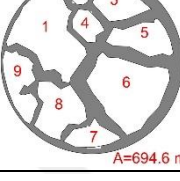
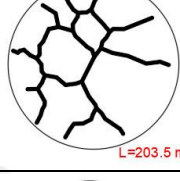
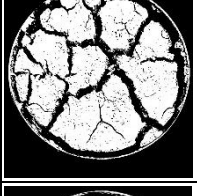
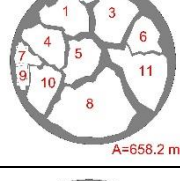
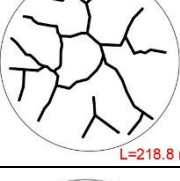
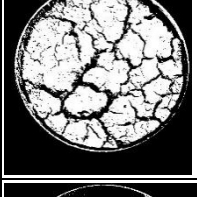
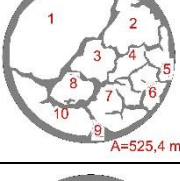
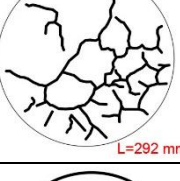
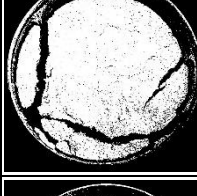
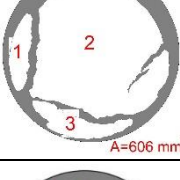
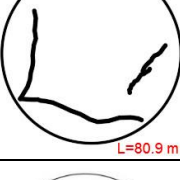
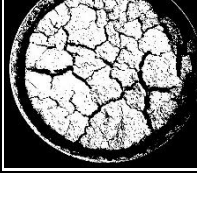
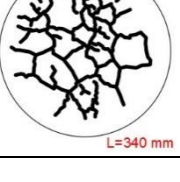
Bu çalışmanın numunelerinde çatlak analizi sonucunda elde edilen büzülen bölge sayısı, büzülme alanı oranı ve çatlak uzunluk oranları Tablo 4.2, Tablo 4.3., Tablo 4.4., Tablo 4.5. ve Tablo 4.6.’da verilmiştir. Özkan (2009) numunelerinde yapılan çatlak analizi sonucunda ise elde edilen büzülme alanı oranı ve çatlak uzunluk oranları Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.8’de şişmesi giderek artan numunelerin büzülme şekilleri verilmiştir. Tablo 4.9’da ise şişmesi giderek azalan numunelerin büzülme şekilleri verilmiştir.

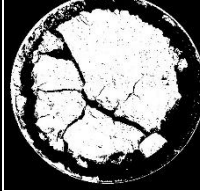
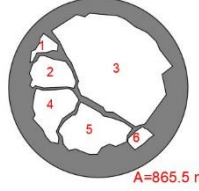
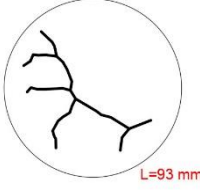
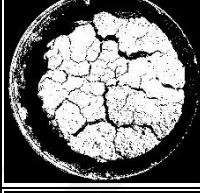
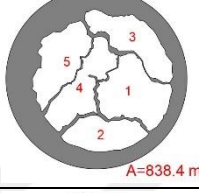
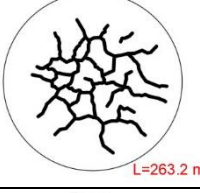
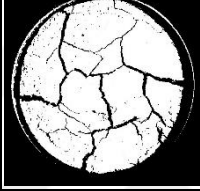
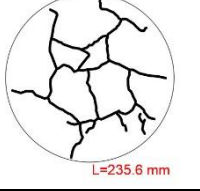
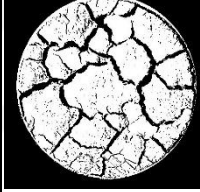
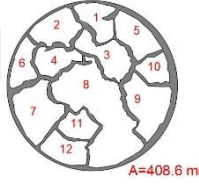
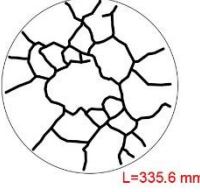
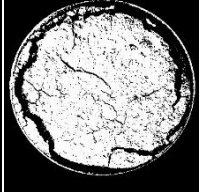
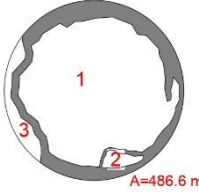
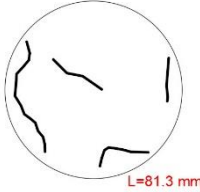
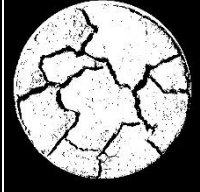
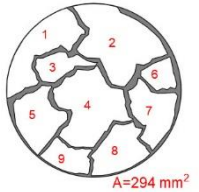
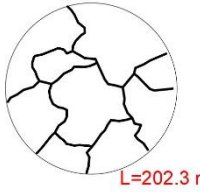
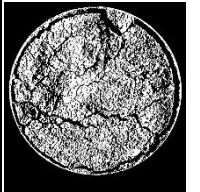
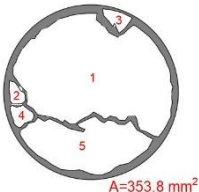
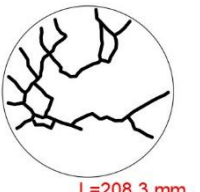
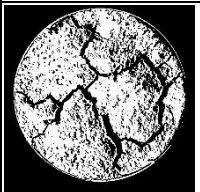
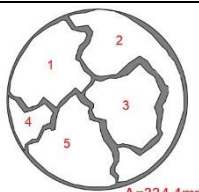
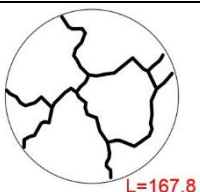
SSI ile büzülen bölge sayısı (NR), büzülme oranı, çatlak uzunlu oranı ilişkisi Şekil 4.94’te sunulmuştur. Buradan da görüldüğü üzere SSI ile en kuvvetli ilişki çatlak uzunluk oranı ile dir.

Tablo 10’da SSI, oluşan bölge sayısı, çatlak uzunluk oranına bağlı olarak oluşan eğri tipi, kilin egemen tane dizili, muhtemel bağ tipi ile FSR yardımıyla egemen kil mineraline karar verme kriterleri verilmektedir. Tablo 11’de ise Tablo 10 ile numunelerin etkin mineral tipi, tane dizilimi ve bağ tipinin belirlenmesi gösterilmiştir.

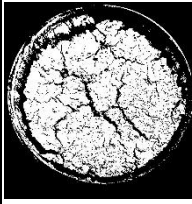
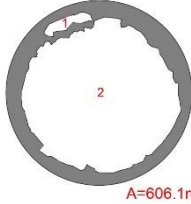
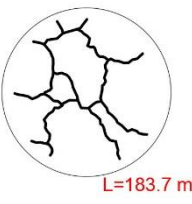
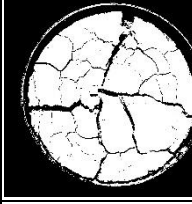
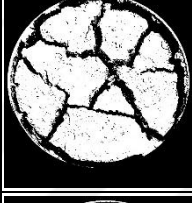
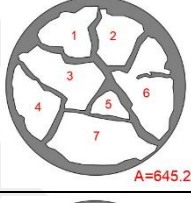
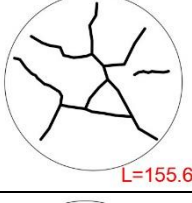
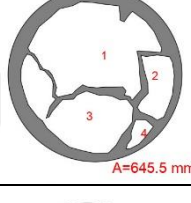
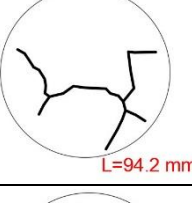
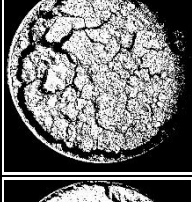
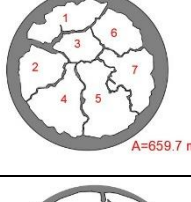
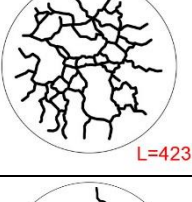
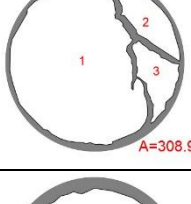
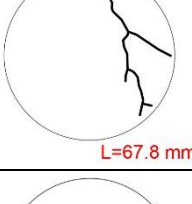
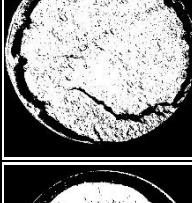
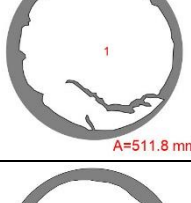
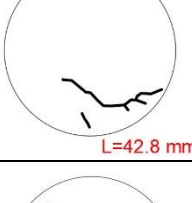
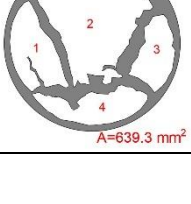
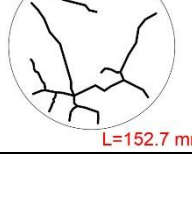
Tablo 4-2. Bu çalışmanın numunelerinde büzülen bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlakların uzunluğu

Numune Kodu	Şişme-büz. eğrisi tipi ve SSI değeri	Büzülme fotosu	Siyah-beyaz efektli büzülme fotosu	Çatlaklar arası bölge sayısı ve alanı	Yüzey çatlaklarının uzunluğu
C1a_UD	Tip-2 SSI = 1.13			 A=680 mm ²	 L=357 mm
C1b_UD	Tip-1 SSI = 1.37			 A=664.6 mm ²	 L=147.1 mm
C1c_UD	Tip-1 SSI = 2.90			 A=557.3 mm ²	 L=171.3 mm
C1d_UD	Tip-4 SSI = 0.83			 A=694.6 mm ²	 L=203.5 mm
C1e_UD	Tip-1 SSI = 2.42			 A=658.2 mm ²	 L=218.8 mm
C1f_UD	Tip-3 SSI = 1.43			 A=525.4 mm ²	 L=292 mm
C1g_UD	Tip-4 SSI = 0.54			 A=606 mm ²	 L=80.9 mm
C1h_UD	Tip-1 SSI = 1.54			 A=792 mm ²	 L=340 mm

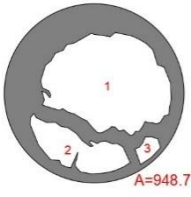
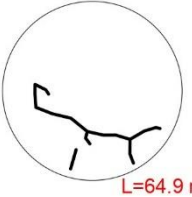
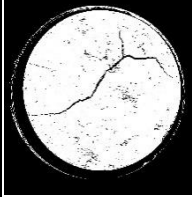
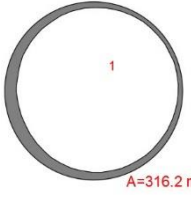
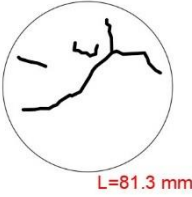
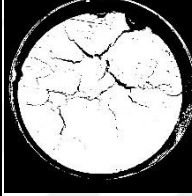
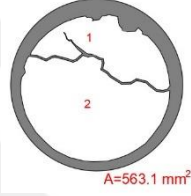
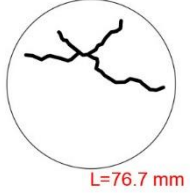
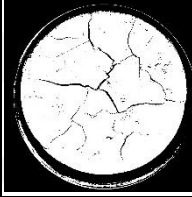
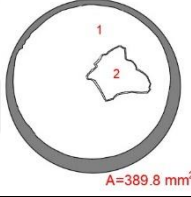
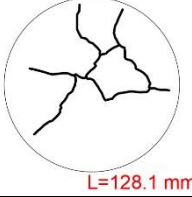
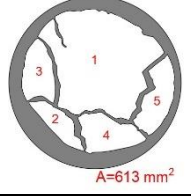
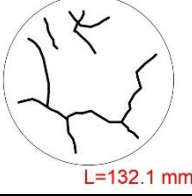
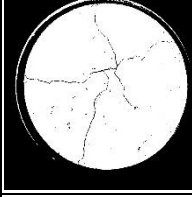
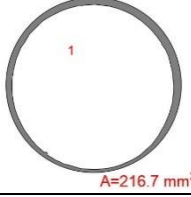
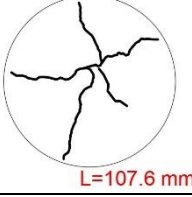
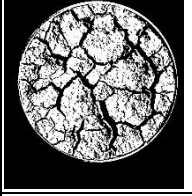
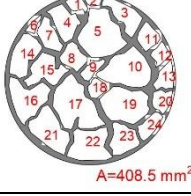
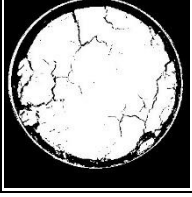
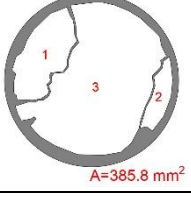
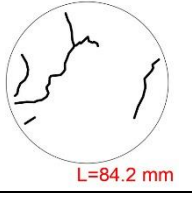
Tablo 4-3. Bu çalışmanın numunelerinde büzülen bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlakların uzunluğu

Numune Kodu	Şişme-büz. eğrisi tipi ve SSI değeri	Büzülme fotosu	Siyah-beyaz efektli büzülme fotosu	Çatlaklar arası bölge sayısı ve alanı	Yüzey çatlaklarının uzunluğu
C1i_UD	Tip-1 SSI = 1.5			 A=865.5 mm ²	 L=93 mm
C1j_UD	Tip-1 SSI = 1.0			 A=838.4 mm ²	 L=263.2 mm
C1k_UD	Tip-1 SSI = 1.26			 A=416 mm ²	 L=235.6 mm
C1l_UD	Tip-3 SSI = 1.08			 A=408.6 mm ²	 L=335.6 mm
C1m_UD	Tip-4 SSI = 0.29			 A=486.6 mm ²	 L=81.3 mm
C2a_UD	Tip-2 SSI = 2.23			 A=294 mm ²	 L=202.3 mm
C2b_UD	Tip-1 SSI = 1.43			 A=353.8 mm ²	 L=208.3 mm
C2c_UD	Tip-6 SSI < 0			 A=334.4 mm ²	 L=167.8 mm

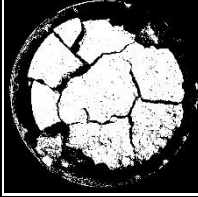
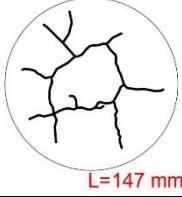
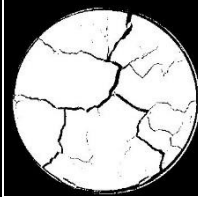
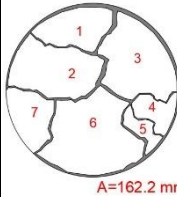
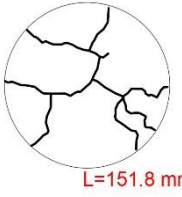
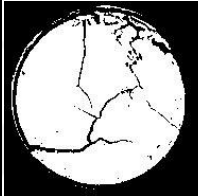
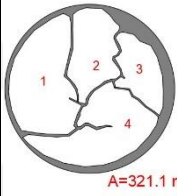
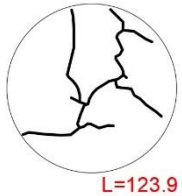
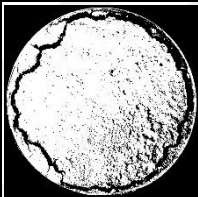
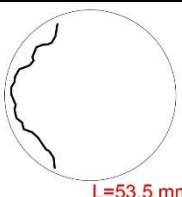
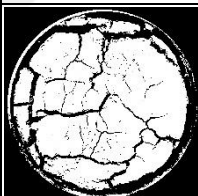
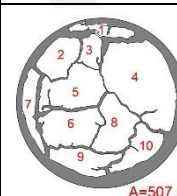
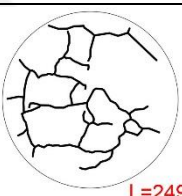
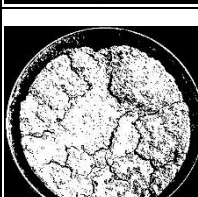
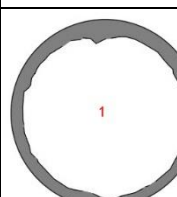
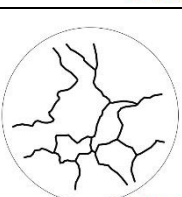
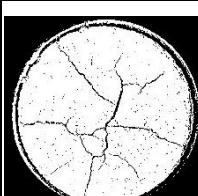
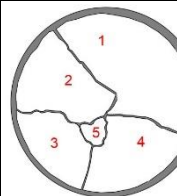
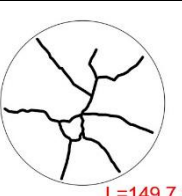
Tablo 4-4. Bu çalışmanın numunelerinde büzülen bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlakların uzunluğu

Numune Kodu	Şişme-büz. eğrisi tipi ve SSI değeri	Büzülme fotosu	Siyah-beyaz efektli büzülme fotosu	Çatlaklar arası bölge sayısı ve alanı	Yüzey çatlaklarının uzunluğu
C2d_UD	Tip-6 SSI < 0			 A=606.1mm ²	 L=183.7 mm
C2e_UD	Tip-1 SSI = 1.79			 A=464.7mm ²	 L=317.4 mm
C2f_UD	Tip-2 SSI = 0.68			 A=645.2mm ²	 L=155.6 mm
C2g_UD	Tip-6 SSI < 0			 A=645.5 mm ²	 L=94.2 mm
C3_UD	Tip-1 SSI = 2.46			 A=659.7 mm ²	 L=423.8 mm
C4_RC1	Tip-6 SSI < 0			 A=308.9 mm ²	 L=67.8 mm
C4_RC3	Tip-6 SSI < 0			 A=511.8 mm ²	 L=42.8 mm
C5_RC1	Tip-3 SSI = 0.93			 A=639.3 mm ²	 L=152.7 mm

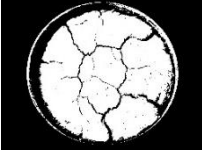
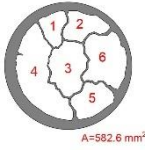
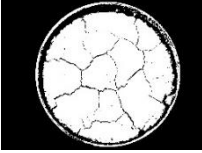
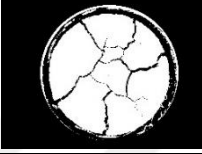
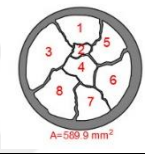
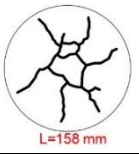
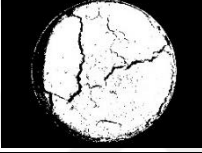
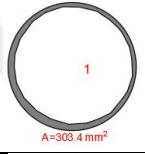
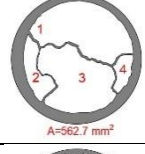
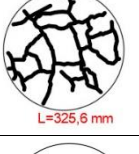
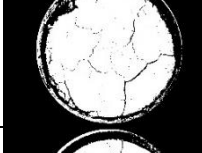
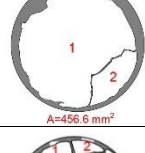
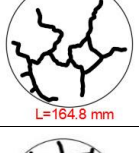
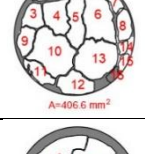
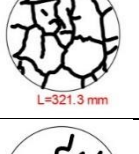
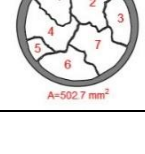
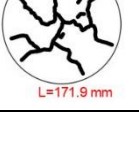
Tablo 4-5. Bu çalışmanın numunelerinde büzülen bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlakların uzunluğu

Numune Kodu	Şişme-büz. eğrisi tipi ve SSI değeri	Büzülme fotosu	Siyah-beyaz efektli büzülme fotosu	Çatlaklar arası bölge sayısı ve alanı	Yüzey çatlaklarının uzunluğu
C5_RC3	Tip-6 SSI < 0				
C6_RC1	Tip-6 SSI < 0				
C6_RC3	Tip-6 SSI < 0				
C6_RC4	Tip-6 SSI < 0				
C7_RC1	Tip-6 SSI = 0.02				
C7_RC3	Tip-6 SSI = SSI < 0				
C8_RC1	Tip-1 SSI = 1.78				
C8_RC3	Tip-6 SSI = 0.12				

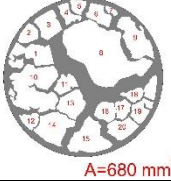
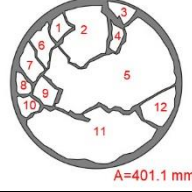
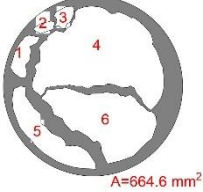
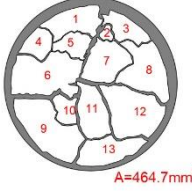
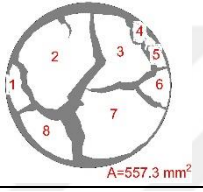
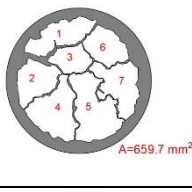
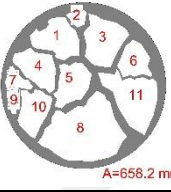
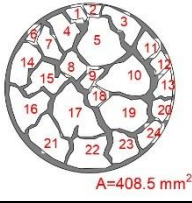
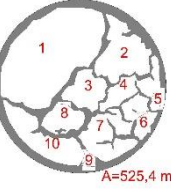
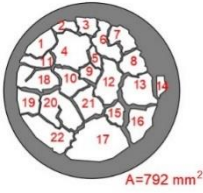
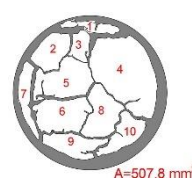
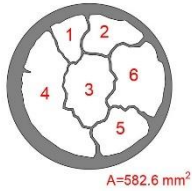
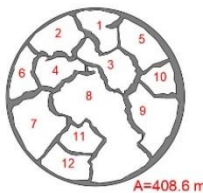
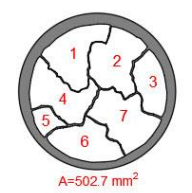
Tablo 4-6. Bu çalışmanın numunelerinde büzülen bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlakların uzunluğu

Numune Kodu	Şişme-büz. eğrisi tipi ve SSI değeri	Büzülme fotosu	Siyah-beyaz efektli büzülme fotosu	Çatlaklar arası bölge sayısı ve alanı	Yüzey çatlaklarının uzunluğu
C9_RC1	Tip-1 SSI = 3.25			 A=750.9 mm ²	 L=147 mm
C9_RC3	Tip-2 SSI = 1.12			 A=162.2 mm ²	 L=151.8 mm
C9_RC4	Tip-6 SSI = 0.09			 A=321.1 mm ²	 L=123.9 mm
C10_RC3	Tip-6 SSI = 0.17			 A=325.4 mm ²	 L=53.5 mm
C11_RC1	Tip-2 SSI = 1.78			 A=507.8 mm ²	 L=249.6 mm
C11_RC3	Tip-6 SSI < 0			 A=453.1 mm ²	 L=206.7 mm
C12_RC3	Tip-4 SSI = 0.76			 A=254.4 mm ²	 L=149.7 mm

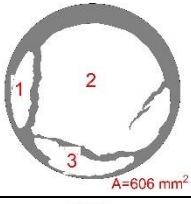
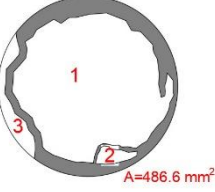
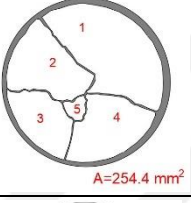
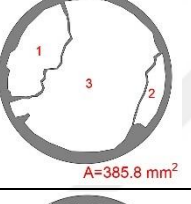
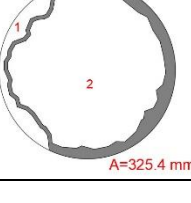
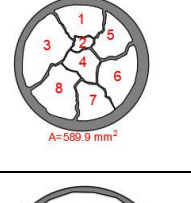
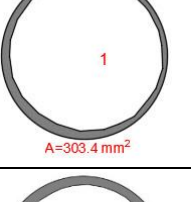
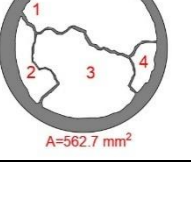
Tablo 4-7. Özkan (2009) numunelerinde büzülen bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlakların uzunluğu

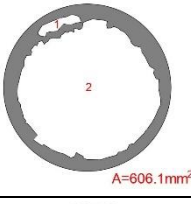
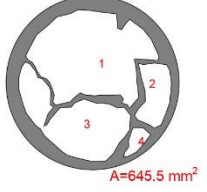
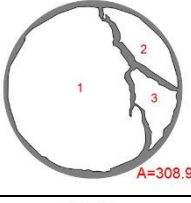
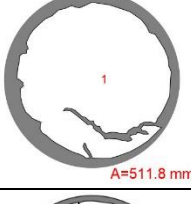
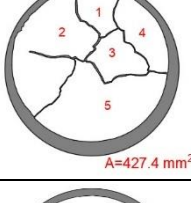
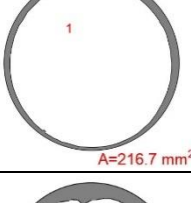
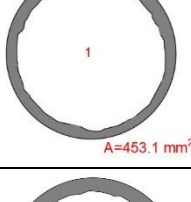
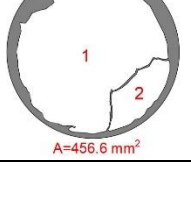
Numune Kodu	Şişme-büz. eğrisi tipi ve SSI değeri	Büzülme fotosu	Siyah-beyaz efektli büzülme fotosu	Çatlaklar arası bölge sayısı ve alanı	Yüzey çatlaklarının uzunluğu
G1_UD	Tip-1 SSI = 2.70			 A=582.6 mm ²	 L=177.5 mm
G1_RC1	Tip-1 SSI = 1.70			 A=431.8 mm ²	 L=233.7 mm
G2_RC1	Tip-5 SSI = 0.25			 A=509.9 mm ²	 L=158 mm
G3_UD	Tip-1 SSI = 1.45			 A=416.9 mm ²	 L=137.6 mm
G4_UD	Tip-4 SSI = 0.99			 A=303.4 mm ²	 L=103.2 mm
G4_RC2	Tip-5 SSI = 0.88			 A=562.7 mm ²	 L=131.3 mm
G5a_UD	Tip-1 SSI = 2.80			 A=389.4 mm ²	 L=325.6 mm
G5a_RC3	Tip-6 SSI < 0			 A=456.6 mm ²	 L=164.8 mm
G5b_UD	Tip-1 SSI = 1.45			 A=406.6 mm ²	 L=321.3 mm
G5b_RC2	Tip-2 SSI = 1.67			 A=502.7 mm ²	 L=171.9 mm

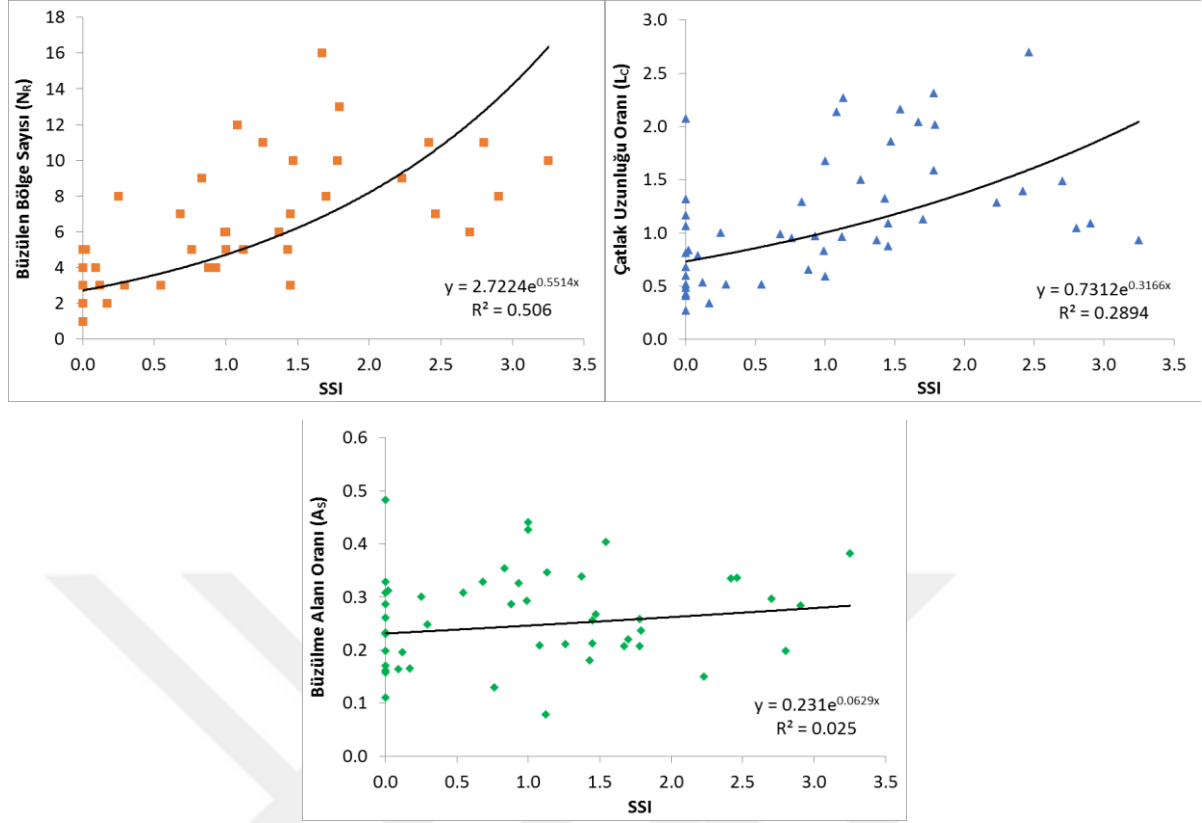
Tablo 4-8. Şişmesi artan numuneler ve büzülme şekilleri

Numune Kodu	Şişme-büz. eğrisi tipi ve SSI değeri	Çatlaklar arası bölge sayısı ve alanı	Numune Kodu	Şişme-büz. eğrisi tipi ve SSI değeri	Çatlaklar arası bölge sayısı ve alanı
C1a_UD	Tip-2 SSI = 1.13	 A=680 mm ²	C2a_UD	Tip-2 SSI = 2.23	 A=401.1 mm ²
C1b_UD	Tip-1 SSI = 1.37	 A=664.6 mm ²	C2e_UD	Tip-1 SSI = 1.79	 A=464.7 mm ²
C1c_UD	Tip-1 SSI = 2.90	 A=557.3 mm ²	C3_UD	Tip-1 SSI = 2.46	 A=659.7 mm ²
C1e_UD	Tip-1 SSI = 2.42	 A=658.2 mm ²	C8_RC1	Tip-1 SSI = 1.78	 A=408.5 mm ²
C1f_UD	Tip-3 SSI = 1.43	 A=525.4 mm ²	C9_RC1	Tip-1 SSI = 3.25	 A=750.9 mm ²
C1h_UD	Tip-1 SSI = 1.54	 A=792 mm ²	C11_RC1	Tip-2 SSI = 1.78	 A=507.8 mm ²
C1i_UD	Tip-1 SSI = 1.5	 A=865.5 mm ²	G1_UD	Tip-1 SSI = 2.70	 A=582.6 mm ²
C1l_UD	Tip-3 SSI = 1.08	 A=408.6 mm ²	G5b_RC2	Tip-2 SSI = 1.67	 A=502.7 mm ²

Tablo 4-9. Şişmesi giderek azalan numuneler ve büzülme şekilleri.

Numune Kodu	Şişme-büz. eğrisi tipi ve SSI değeri	Çatlaklar arası bölge sayısı ve alanı
C1g_UD	Tip-4 SSI = 0.54	
C1m_UD	Tip-4 SSI = 0.29	
C12_RC3	Tip-4 SSI = 0.76	
C8_RC3	Tip-6 SSI = 0.12	
C10_RC3	Tip-6 SSI = 0.17	
G2_RC1	Tip-5 SSI = 0.25	
G4_UD	Tip-4 SSI = 0.99	
G4_RC2	Tip-5 SSI = 0.88	

Numune Kodu	Şişme-büz. eğrisi tipi ve SSI değeri	Çatlaklar arası bölge sayısı ve alanı
C2d_UD	Tip-6 SSI < 0	
C2g_UD	Tip-6 SSI < 0	
C4_RC1	Tip-6 SSI < 0	
C4_RC3	Tip-6 SSI < 0	
C6_RC1	Tip-6 SSI < 0	
C7_RC3	Tip-6 SSI < 0	
C11_RC3	Tip-6 SSI < 0	
G5a_RC3	Tip-6 SSI < 0	



Şekil 4-94. SSI ile buzülen bölge sayısı (N_R), buzülme oranı, çatlak uzunlu oranı ilişkisi

Tablo 4-10. SSI, oluşan bölge sayısı, çatlak uzunluk oranına bağlı olarak oluşan eğri tipi, kilin egemen tane dizili, muhtemel bağ tipi ile FSR yardımıyla egemen kil mineraline karar verme kriterleri

Kriter-1	Kriter-2	Kriter-3	Etkin Mineral	Eğri Tipi	Tane Dizilimi	Bağ Tipi
$SSI \geq 1.0$ ve $N_R \geq 5$	-	$FSR \leq 1.0$ ise Kaolen, illit	Kriter-3	Tip-1	Köşe-Kenar (çok dağınık yapı)	Karışık (Zayıf bağ)
$SSI \geq 1.0$ ve $N_R < 5$	$L_c/L_r < 1.0$	$FSR \leq 1.5$ ise I/S Karışık Katman		Tip-2	Köşe-Kenar	Karışık - kısa (Zayıf bağ)
$SSI < 1.0$ ve $N_R \geq 5$	-	$FSR \leq 4$ ise Simektit yoğun		Tip-3		
$SSI < 1.0$ ve $N_R < 5$	$L_c/L_r < 1.0$	$FSR > 4$ ise Simektit		Tip-4	Karışık	Kısa-pıhtılaşmış (orta kuvvetli yapı)
$SSI < 0.2$ veya $S_n < 0$	-			Tip-5	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış (kuvvetli)
				Tip-6	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış

Tablo 4-11. Tablo 10 ile numunelerin etkin mineral tipi, tane dizilimi ve bağ tipinin belirlenmesi

Numune	Tekrarlı şışme- büzölme eğrisi tipi	SSI	FSR	LL	PI	Büzülen bölge sayısı (Adet)	Büzülen kısımların alanı (mm2)	As/Ar	Oluşan çatlakların uzunluğu (mm)	Lc/Lr	Etkin Mineral	Tane Dizilimi	Bağ tipi
C1a_UD	Tip-2	1.13	1.2	65.0	36.0	20	680	0.35	357	2.27	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C1b_UD	Tip-1	1.37	1.2	65.0	36.0	6	665	0.34	147	0.94	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C1c_UD	Tip-1	2.90	1.2	65.0	36.0	8	557	0.28	171	1.09	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C1d_UD	Tip-4	0.83	1.2	65.0	36.0	9	695	0.35	204	1.30	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Kısa-pıhtılaşmış
C1e_UD	Tip-1	2.42	1.2	65.0	36.0	11	658	0.34	219	1.39	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C1f_UD	Tip-3	1.47	1.2	65.0	36.0	10	525	0.27	292	1.86	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C1g_UD	Tip-4	0.54	1.2	65.0	36.0	3	606	0.31	81	0.52	Karışık Katman	Paralel	Kısa-pıhtılaşmış
C1h_UD	Tip-1	1.54	1.2	65.0	36.0	22	792	0.40	340	2.16	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C1i_UD	Tip-1	1.00	1.2	65.0	36.0	6	866	0.44	93	0.59	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C1j_UD	Tip-2	1.00	1.2	65.0	36.0	5	838	0.43	263	1.68	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C1k_UD	Tip-1	1.26	1.2	65.0	36.0	11	416	0.21	236	1.50	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C1l_UD	Tip-3	1.08	1.2	65.0	36.0	12	409	0.21	336	2.14	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C1m_UD	Tip-4	0.29	1.2	65.0	36.0	3	487	0.25	81	0.52	Karışık Katman	Paralel	Kısa-pıhtılaşmış
C2a_UD	Tip-2	2.23	2.1	72.0	40.5	9	294	0.15	202	1.29	Simektit yoğun	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C2b_UD	Tip-1	1.43	2.1	72.0	40.5	5	354	0.18	208	1.33	Simektit yoğun	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C2c_UD	Tip-6	<0	2.1	72.0	40.5	5	334	0.17	168	1.07	Simektit yoğun	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C2d_UD	Tip-6	<0	2.1	72.0	40.5	2	606	0.31	184	1.17	Simektit yoğun	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C2e_UD	Tip-1	1.79	2.1	72.0	40.5	13	465	0.24	317	2.02	Simektit yoğun	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C2f_UD	Tip-2	0.68	2.1	72.0	40.5	7	645	0.33	156	0.99	Simektit yoğun	Paralel	Kısa-pıhtılaşmış
C2g_UD	Tip-6	<0	2.1	72.0	40.5	4	646	0.33	94	0.60	Simektit yoğun	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C3_UD	Tip-1	2.46	1.1	58.0	27.0	7	660	0.34	424	2.70	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C4_RC1	Tip-6	<0	1.8	89.0	64.0	3	309	0.16	68	0.43	Simektit yoğun	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C4_RC3	Tip-6	<0	1.8	89.0	64.0	1	512	0.26	43	0.27	Simektit yoğun	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C5_RC1	Tip-3	0.93	1.8	61.0	32.0	4	639	0.33	153	0.97	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Kısa-pıhtılaşmış
C5_RC3	Tip-6	<0	1.8	61.0	32.0	3	949	0.48	65	0.41	Karışık Katman	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C6_RC1	Tip-6	<0	1.2	62.0	31.1	1	316	0.16	81	0.52	Karışık Katman	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C6_RC3	Tip-6	<0	1.2	62.0	31.1	2	563	0.29	77	0.49	Karışık Katman	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C6_RC4	Tip-6	<0	1.2	62.0	31.1	2	390	0.20	128	0.82	Karışık Katman	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C7_RC1	Tip-6	0.02	2.0	72.0	38.7	5	613	0.31	132	0.84	Simektit yoğun	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C7_RC3	Tip-6	<0	2.0	72.0	38.7	1	217	0.11	108	0.69	Simektit yoğun	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C8_RC1	Tip-1	1.78	2.1	91.0	56.2	24	409	0.21	363	2.31	Simektit yoğun	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C8_RC3	Tip-6	0.12	2.1	91.0	56.2	3	386	0.20	84	0.54	Simektit yoğun	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C9_RC1	Tip-1	3.25	1.2	69.0	31.5	10	751	0.38	147	0.94	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C9_RC3	Tip-2	1.12	1.2	69.0	31.5	5	154	0.08	152	0.97	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C9_RC4	Tip-6	0.09	1.2	69.0	31.5	4	321	0.16	124	0.79	Karışık Katman	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C10_RC3	Tip-6	0.17	1.4	74.0	47.7	2	325	0.17	54	0.34	Simektit yoğun	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C11_RC1	Tip-2	1.78	1.1	62.0	35.9	10	508	0.26	250	1.59	Simektit yoğun	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
C11_RC3	Tip-6	<0	1.1	62.0	35.9	1	453	0.23	207	1.32	Simektit yoğun	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
C12_RC3	Tip-4	0.76	1.1	68.0	46.0	5	254	0.13	150	0.95	Simektit yoğun	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
G1_UD	Tip-1	2.70	1.2	60.0	38.0	6	583	0.30	234	1.49	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
G1_RC1	Tip-1	1.70	1.2	60.0	38.0	8	432	0.22	178	1.13	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
G2_RC1	Tip-5	0.25	2.1	99.0	66.0	8	590	0.30	158	1.01	Simektit yoğun	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
G3_UD	Tip-1	1.45	1.9	74.0	50.0	3	417	0.21	138	0.88	Karışık Katman	Paralel	Kısa-pıhtılaşmış
G4_UD	Tip-4	0.99	1.9	82.0	60.0	6	575	0.29	131	0.84	Simektit yoğun	Paralel	Karışık ve Zayıf
G4_RC2	Tip-5	0.88	1.9	82.0	60.0	4	563	0.29	103	0.66	Simektit yoğun	Paralel	Karışık ve Zayıf
G5a_UD	Tip-1	2.80	1.5	61.0	36.0	11	389	0.20	165	1.05	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
G5a_RC3	Tip-6	<0	1.5	61.0	36.0	2	457	0.23	326	2.07	Karışık Katman	Paralel	Uzun-pıhtılaşmış
G5b_UD	Tip-1	1.45	1.5	61.0	36.0	7	503	0.26	172	1.09	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf
G5b_RC2	Tip-2	1.67	1.5	61.0	36.0	16	407	0.21	321	2.05	Karışık Katman	Köşe-Kenar	Karışık ve Zayıf

5. TARTIŞMA

Kış aylarında yağışların artması ile özellikle killi zeminlerin su içeriğinde bir artış meydana getirerek bu zeminlerin hacimlerinde artışa yani şişmesine neden olur. Yaz aylarında ise sıcaklığın artması ile bu zeminlerin su içeriğinde bir azalma meydana getirerek bu zeminlerin hacimlerinde azalmaya yani büzülmesine neden olur. Bu özellik killi zeminlerin şişme – büzülme davranışı olarak tanımlanır. Killi zeminlerin şişme – büzülme davranışı sonucu hacimlerindeki değişim bina, yollar, boru hatları gibi mühendislik yapılarına ciddi miktarda hasar verebilmektedir.

Tekrarlı şişme – büzülme etkisini en aza indirmek için literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunların sonucunda kireç stabilizasyonu yapılarak, killerin tekrarlı şişme – büzülme etkisi giderek azalmıştır. Aynı zamanda yapılan çalışmalar neticesinde sürşarj yükünün şişme potansiyelini düşürdüğü görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, başta İstanbul ve Kocaeli olmak üzere 12 farklı bölgelerden alınan örselenmiş ve örselenmemiş numunelerin şişme – büzülme davranışını anlamak için cihaz geliştirilmiş olup, bu şişme – büzülme davranışı ile killerin mikro yapısı arasında bağlantı kurabilmek için gerekli incelemeler yapılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler ile killerin tam şişme – kısmi büzülme davranışı ile mikro yapısı arasındaki bağ ortaya konmaya çalışılmıştır.

Araştırmada kullanılan örselenmemiş numuneler üzerinde tekrarlı şişme – büzülme deneyleri 8 çevrim olacak şekilde yapılmıştır. Bu numuneler üzerinde kompaksiyon deneyleri yapılarak optimum su muhtevası belirlenmiş olup optimum su muhtevasından daha yüksek bir su muhtevasına ve daha düşük bir su muhtevasına sahip olacak şekilde bazı numuneler yeniden yapılandırılmıştır. Bu yeniden yapılandırılan numuneler üzerinde de 8 çevrim olacak şekilde şişme – büzülme deneyi yapılmıştır. Aynı zaman da çevrimlerin şişme – büzülme davranışları üzerindeki etkisini anlamak için bazı numuneler üzerinde 24 çevrim olacak şekilde şişme – büzülme deneyi yapılmıştır.

Killerin tekrarlı şişme – büzülme davranışları killerin mineralojisine ve kil yapısına bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada, yapılan tekrarlı şişme – büzölme deneyleri sonucunda bazı numunelerin özellikle bağları zayıf olanların şişmesinin giderek arttığı, bağları güçlü olanların ise şişmesinin giderek azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda zayıf bağlı

numunelerin b z lmeye maruz kaldıklarında çok çatlaklı yapı gösterdiği, güçlü bağlı numunelerin ise b z lmeye maruz kaldıklarında az çatlaklı yapı gösterdiği görülmüştür.

Araştırmada,    me – büzülme deneyleri sonuçlarına bakıldığında her zaman    me giderek artma, azalma ya da dalgalanma göstermemiştir. Grafiklere bakıldığında ilk döngüdeki zeminlerin    me davranışına bakılarak, zeminlerin    me davranışının nasıl olacağını yani giderek artacağı mı, azalacağını mı ya da dalgalanacağının anlaşılması çok zordur. Bu sebeple tekrarlı    me indeksi (SSI) tanımlanmalıdır. Böylelikle killerin    me – büzülme davranışı sonucunda killerin ulaşacağı değer elde edilmektedir.

SSI, oluşan bölge sayısı, çatlak uzunluk oranına bağlı olarak oluşan eğri tipi, kilin egemen tane dizili, muhtemel bağ tipi ile FSR yardımıyla egemen kil mineraline karar verme kriterleri tanımlanmıştır. Böylece numunelerin etkin mineral tipi, tane dizilimi ve bağ tipinin basit deneylerle belirlenmesinin mümkün olabileceği gösterilmiştir

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırmada, farklı bölgelerden numune alınarak kil zeminlerin şişme – büzülme davranışları ortaya konmuştur. Bu veriler ile bazı fiziksel parametrelerde incelenmiştir. Bu araştırma kapsamında yapılan çalışma sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- i. Zeminlerin tam şişme – kısmi büzülme davranışını anlayabilmek için konsolidasyon cihazı geliştirilerek tam otomatik hale getirilmiştir.
- ii. Killerin şişme yüzdesi ve şişme basıncının tek döngü ile bulunması eksiklik olur.
- iii. Kilin şişme yüzdesi sadece mineral içeriği ve başlangıç su muhtevasına bağlı olmayıp, yapısına ve bağlarına da bağlıdır.
- iv. FSR deneyi kilin mineralojisi hakkında basit ve hızlı bir sonuç vermektedir.
- v. Bu doktora tekrarlı şişme – büzülme indisi (SSI) ilişkisi geliştirilmiştir. Bu indis ile bir kilin sadece nihai şişme potansiyeli belirlenmemekte aynı zamanda yapı hakkında önemli bir fikir elde edilmektedir.
- vi. SSI değeri önerilen eğride tek döngülü serbest şişme deneyi yapılarak belirlenen su muhtevası başlangıç su muhtevasına bölünerek elde edilen değerin karşılığıdır.
- vii. Aynı numunenin ring içinde etüvde 40 ± 5 °C’de kurutulmasıyla oluşan çatlakların analizi de kil yapısı için önemli bilgiler verdiği fark edilmiştir. Buradan yola çıkarak bu çalışma kapsamında büzülme ile oluşan bölge sayısı, büzülme alanı ve çatlak uzunluğu SSI ve FSR değeri ile kilin tane dizilimi, yapısı ve bağları ile ilgili tahmin metodolojisi geliştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Altmeyer, W. T. (1955). Discussion of engineering properties of expansive clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Testing and Materials*, 81(2), 17-19.
- ASTM, D. (tarih yok). Standard Test Method For Expansion Index Of Soils.
- ASTM, D.-0. (tarih yok). *Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils*. içinde
- Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). General Introduction: Clays, Clay Minerals and Clay Science. *Developments in Clay Science*. içinde Oxford: Elsevier.
- Brindley, G. W., & Brown, G. (1980). *Crystal structures of clay minerals and their x-ray identification*. London: Mineralogical Society.
- Chen, F. (1975). Foundation on swelling soils. *Development on Geotechnical Engineering 12. Elsevier Scientific Co*, (s. 150-158). Amsterdam.
- Chen, F. (1988). *Foundations on Expansive Soils*. New York: American Elsevier Science Publication.
- Das, B. M. (1995). Principles of Foundation Engineering. *PWS Publishing Co.*, 828.
- Dawson, R. (1953.). Movement of small houses erected on an expansive clay soil. *Proc. 3 rd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, 346-350.
- Dixon, J. B. (1989). *Minerals in soil environments*. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America.
- 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.
- FEMA. (1982). Minnesota – Severe Storms and Flooding.
- Forouzan, A. J. (2016). Prediction of swelling behavior of expansive soils using modified free swell index, methylene blue and swell oedometer tests. Ankara: ODTÜ Yüksek Lisans Tezi.
- Grim, R. E. (1974). *Clay mineralogy* (2. b.). New York: McGraw-Hill.
- Guggenheim, S., & Martin, R. T. (1995). Definition of Clay and Clay Mineral: Joint Report of the AIPEA Nomenclature and CMS Nomenclature Committees. *Clays Clay Miner*(43), 255-256.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2015). Şişen Zeminler ve Kayalar. Ç. E. Erken (Dü.) içinde, *Geoteknik Mühendisliğine Giriş* (s. 236-238). Nobel.
- Holtz, W. G. (1959). Expansive clays—properties and problems. *Journal of the Colorado School of Mines*, 54(4), 89-125.
- Holtz, W., & Gibbs, H. (1956). Engineering Properties of Expansive Clays, . *ASCE Transactions*, 121., 641-663.
- IS 1498 (1970). (tarih yok). Classification and identification of soils for general engineering purposes. *CED 43: Soil and Foundation Engineering*]. içinde
- Jones, D., & Holtz, W. (1973). Expansive Soils-The Hidden Disaster,. *Civil Engineering-ASCE*, 49-51.
- Lambe, T. W. (1953). The Structure of Inorganic Soil. *Proceedings of the ASCE*, 79(315), 49.
- Mcbride, M. B. (1989). Surface Chemistry of Soil Minerals. *Minerals in soil environments* (s. 35-88). içinde Madison: Soil Sci. Soc. Am. Proc.

- Mitchell, J. K. (1976). *Fundamentals of Soil Behavior*. New York: John Wiley & Sons, Inc.,
- Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior* (2. b.). New York: John Wiley.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (3 b.). Wiley.
- Moore, D. M., & Reynolds Jr., R. C. (1997). *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*, (2. b.). Oxford: Oxford University.
- Nayak, N. V., & Christensen, R. W. (1974). Swell characteristics of compacted expansive soils. *Clay and Clay Minerals*, 19, 251-261.
- Nelson, J. D., & Miller, D. J. (1992). *Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Newman, A. C. (1987). *Chemistry of clays and clay minerals*. London: Mineralogical Society.
- O'Neill, M., & Poormoayed, N. (1980). Methodology for Foundations on Expansive Clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, , 1345 –1367.
- Osipov , V., Bik, N., & Rumjantseva , N. (1987). Cyclic swelling of clays. *Applied Clay Science*, (s. 2(7), p.363-374). Amsterdam, The Netherlands.
- Oweiss, I., & Bowman, J. (1981). Geotechnical considerations for construction in Saudi Arabia. *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division* (107), 319-338.
- Özkan, T. (2009). İstanbul Gürpınar Kilinin Tekrarlı Şişme-Büzülme Davranışı. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi.
- Peck, R., Hanson, W., & Thornburn, T. (1974). *Foundation Engineering*. içinde New York, NY: John Wiley and Sons.
- Popescu, M. E. (1986). A Comparison between the Behavior of Swelling and of Collapsing Soils. *Engineering Geology*(23), 145-163.
- Prakash, K., & Sridharan, A. (2004). Free swell ratio and clay mineralogy of finegrained soils. *Geotechnical Testing Journal*, 27(2), 220-225.
- Prasad, M., & Shih, K. (2016). *Environmental Materials and Waste*. Oxford: Elsevier.
- Raman, V. (1967). Identifications of expansive soils from the plasticity index and the shrinkage index data. *The Indian Engineer*., 11(1), 17-22.
- Schmertmann, I. (1969). Swelling sensitivity. *Geotechnique*, 19, 530-534.
- Seed, H., Woodward, R., & Lungren, R. (1962). Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. Of the ASCE*, 53-87.
- Snethen, D. R. (1984). Evaluation of expedient methods for identification and classification of potentially expansive soils. Adelaide: Proceedings, 5th International Conference on Expansive Soils.
- Sowers, G. B., & Sowers, G. F. (1970). *Introductory Soil Mechanics and Foundations* (3 b.). New York: McMillan.
- Sridharan, A., & Prakash , K. (1998). Mechanism controlling the shrinkage limit of soils. *Geotechnical Testing Journal*.
- Sridharan, A., & Prakash, K. (2000). Classification procedures for expansive soils,. *P I Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 235-240.
- Sridharan, A., Rao, S., & Murthy, N. (1985). Free swell index of soils: A need for re-definition. *Indian Geotechnical Journal* , 15. 94-95.
- Tripathy, S., Subba Rao, K., & Fredlund, D. (2002). Water content- void ratio swell–shrink paths of compacted expansive soils. *Can Geotech J*, 938–959.
- Türköz, M., & Tosun, H. (2009). Sıkıştırılmış kil zeminlerin şişme yüzdesi ve basıncının tahmininde metilen mavisi kullanımı. *14. Ulusal Kil Sempozyumu*. Trabzon.
- Vijayvergiya, V. N., & Ghazzaly, O. I. (1973). Prediction of swelling potential of natural clays. Proceedings, 3rd Int. Research. and Engng. Conf. on Expansive Clays.

- Weston, D. J. (1980). Expansive Roadbed Treatment for Southern Africa. Proceedings, 4th International Conference on Expansive Soils.
- Yılmaz, I. (2006). Indirect Estimation of the Swelling Percent and A New Classification of Soils Depending on Liquid Limit and Cation Exchange Capacity. *Engineering Geology*, 85(3-4), 295-301.



İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

UYARI: Bu bölümde intihal programında çıkan benzerlik yüzdesinin bulunduğu detaylı raporun ilk sayfasının yer alması tüm öğrenciler için zorunludur! Bu uyarıyı okuduktan sonra siliniz!



ORJİNALLİK RAPORU

%19	%18	%2	%4
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%8
2	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%3
3	tez.sdu.edu.tr İnternet Kaynağı	%2
4	vdocument.in İnternet Kaynağı	%1
5	eng.harran.edu.tr İnternet Kaynağı	%1
6	etd.lib.metu.edu.tr İnternet Kaynağı	%1
7	avesis.iuc.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
8	Işık Yılmaz. "Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity", Engineering Geology, 2006 Yayın	<%1

9	www.scribd.com İnternet Kaynağı	<% 1
10	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<% 1
11	TÜRKÖZ, Murat. "Sıkıştırılmış şişen killerin mikroyapısal değişiminde şişme-büzülme çevrimin etkisi", Osmangazi Üniversitesi, 2009. Yayın	<% 1
12	"CLAY MINERALS", Encyclopedia of Soils in the Environment, 2004 Yayın	<% 1
13	123dok.org İnternet Kaynağı	<% 1
14	acikerisim.omu.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1
15	dspace.gazi.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1
16	Submitted to Ataturk Universitesi Öğrenci Ödevi	<% 1
17	acikerisim.sakarya.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1
18	acikerisim.uludag.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1
19	id.scribd.com İnternet Kaynağı	<% 1

20

toad.halileksi.net

İnternet Kaynağı

<% 1

21

www.coursehero.com

İnternet Kaynağı

<% 1

22

tr.wikipedia.org

İnternet Kaynağı

<% 1

23

www.researchsquare.com

İnternet Kaynağı

<% 1

24

edoc.pub

İnternet Kaynağı

<% 1

Alıntıları çıkart

Kapat

Eşleştirmeleri çıkar

Kapat

Bibliyografyayı Çıkart

üzerinde

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

- ☐ Etik Kurul izni gerekmektedir.
- ☒ Etik Kurul izni gerekmemektedir.

Sinem TOSUN
(İmza)



KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

- ☐ Kurum izni gerekmektedir.
- ☐ Kurum izni gerekmemektedir.

Sinem TOSUN
(İmza)

