



## Investigation of volume change behavior on a clay with high plasticity for different initial conditions

Hazal Berrak Gençdal<sup>1</sup>, Saadet Arzu Berilgen\*<sup>2</sup>, Havvanur Kılıç<sup>3</sup>

Civil Engineering, Yıldız Technical University, University, İstanbul, 34230, Turkey

### Highlights:

- With increase water content and vertical stress, swelling tendency decreases, sitting increases, secondary consolidation index increases
- With compaction energy increases, soil compacted increase.
- Secondary consolidation behavior wasn't appeared

### Keywords:

- Consolidation
- Swelling
- Creep
- Water Content
- Relative Compaction

### Article Info:

Research Article  
Received: 18.02.2019  
Accepted: 15.02.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.528354

### Acknowledgement:

This work was made at Yıldız Technical University Geotechnical Laboratory

### Correspondence:

Author: Saadet Arzu Berilgen  
e-mail: sberilgen@gmail.com  
phone: +90 212 383 5224

### Graphical/Tabular Abstract

When high plasticity clays are used in high fill construction, they can be subjected to high stresses. In this study, a high plasticity clay soil was used as fill material. When this soil is exposed to water under different stresses during its service life, volume changes are expected to occur. This volume change behaviour was investigated using a series of consolidation tests.

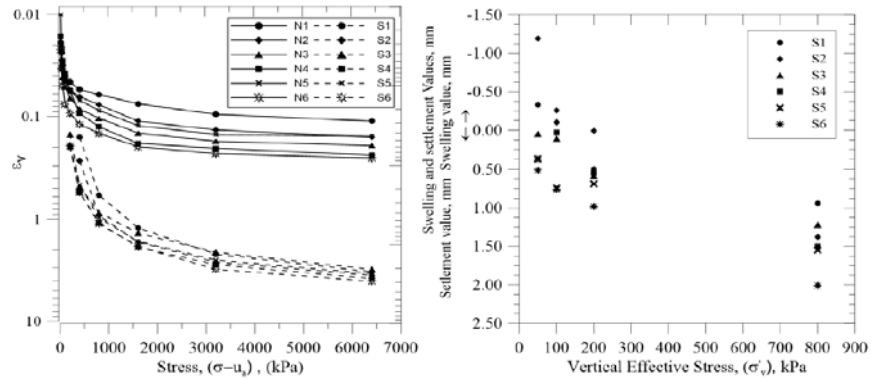


Figure A. Variation of vertical effective stress with  $\epsilon_v$  (a) and swelling –compression values (b)

**Purpose:** This study focuses volume change of the high plasticity clay is used as filling material.

### Theory and Methods:

In this study, three serial consolidation tests were made for volume change behaviour. For this, laboratory devices (modified proctor and consolidation) were utilized. The samples were prepared on the optimum water content determined with the modified compaction method and on the wet side of this value at the relative compaction (R.K.) rates of 90% and 95% for one dimensional consolidation tests. In first serial consolidation tests, soil, were loaded under high stresses at the compressed water content value with water (S) and without water (N). In second serial consolidation tests (S50, S100, S200 ve S800), the water were added to soil at 50, 100, 200 and 800 kPa, respectively. In third serial consolidation tests (K), creep behaviour were investigated.

### Results:

With tests performed, compressibility index, unloading index and secondary consolidation index were calculated.

### Conclusion:

At the end of the tests conducted was appeared that with increase water content and vertical stress, swelling tendency decreases, sitting increases. Creep behaviour was not appeared any samples.



## Sıkıştırılmış yüksek plastisiteli kil bir zeminde hacim değişimi davranışının farklı başlangıç koşulları için incelenmesi

Hazal Berrak Gençdal<sup>ID</sup>, Saadet Arzu Berilgen\*<sup>ID</sup>, Havvanur Kılıç<sup>ID</sup>

Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34230, İstanbul, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Sıkıştırılan killi zeminlerde hacim değişimi davranışı
- Hacim değişimine farklı başlangıç koşullarının etkisi
- Sıkıştırılmış yüksek plastisiteli kil davranışı

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 18.02.2019

Kabul: 15.02.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.528354

### Anahtar Kelimeler:

Tek boyutlu sıkışma,  
şişme,  
uzun süreli oturma,  
su içeriği,  
rölatif kompaksiyon

### ÖZET

Yüksek plastisiteli killer yüksek dolgu inşasında kullanıldıklarında, yüksek gerilmelere maruz kalabilmektedir. Bu çalışmada, yüksek plastisiteli bir kil zeminin dolgu inşasında kullanılması durumunda yapının hizmet ömrü boyunca farklı başlangıç gerilme koşulları altında su ile karşılaşması sonucu hacim değişimlerinin oluşması beklenmektedir. Bu hacim değişimi davranışı üç seri tek boyutlu sıkışma deneyleri ile incelenmiştir. Bu kapsamda deneylerde kullanılan numuneler modifiye kompaksiyon yöntemi ile belirlenen optimum su muhtevası ( $w_{opt}=18,7$ ) ve bu değer için ıslak tarafında iki su muhtevası ( $w_{opt+5}=23,7$  ve  $w_{opt+7}=25,7$ ) ve %90, %95 rölatif kompaksiyon (RK 90 ve RK 95) oranlarında sıkıştırılarak hazırlanmıştır. 1. Seri deneylerde, zeminin sıkıştırıldığı su muhtevası değerlerinde su ilaveli (S tipi) ve susuz (N tipi) olarak yüksek gerilme değerlerinde göstereceği sıkışma ve şişme davranışı incelenmiştir. 2. Seri deneylerde ise belirli gerilme adımlarında su ile karşılaşması durumunda göstereceği şişme davranışı incelenmiştir. 3. Seri deneylerde (K) ise, her bir yükleme kademesinde deformasyonların tamamen sönmülmesinden sonra zemin içyapısında meydana gelen değişimlerden kaynaklı uzun süreli oturma (krip) davranışı araştırılmıştır. Yapılan 1. ve 2. seri sıkışma deneylerinde, su muhtevasının artması ile şişmeye olan eğilimin azaldığı ve özellikle suyla temas halindeki numunelerde yüksek gerilme durumlarında da hacim değişimi değerlerinde 16 kata varan artışlar olduğu görülmüştür. 3. seri sıkışma deneylerinde şekil değiştirme hızlarının değerlendirilmesi sonucunda, yüksek plastisiteli kilde, zemin içyapısından kaynaklı ilave oturmaların meydana gelmediği görülmüştür.

## Investigation of volume change behavior on a clay with high plasticity for different initial conditions

### H I G H L I G H T S

- Volume change behavior of compacted clays
- The effect of different initial conditions on the volume change
- Compacted high plasticity clay behavior

### Article Info

Research Article

Received: 18.02.2019

Accepted: 15.02.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.528354

### Keywords:

Consolidation,  
swelling,  
long term settlement,  
water content,  
relative compaction

### ABSTRACT

When high plasticity clays are used in high fill construction, they can be subjected to high stresses. In this study, a high plasticity clay soil was used as fill material. When this soil is exposed to water under different stresses during its service life, volume changes are expected to occur. This volume change behaviour was investigated using a series of consolidation tests. The samples were prepared on the wet side of the optimum water content ( $w_{opt}=18,7$ , determined by the modified compaction method, ( $w_{opt+5}=23,7$  and  $w_{opt+7}=25,7$ ) at relative compaction (R.K.) of 90% and 95% (RK 90 and RK 95). In the first set of tests, one dimensional compression and swelling behaviour of the soil was investigated on the prepared samples were loaded under high stresses under conditions corresponding to the wetted state (S series tests) and the dry state (N series tests). The second set of tests investigated the swelling behavior when water is introduced to the samples under different vertical stresses. In the third series of consolidation tests (K), after the deformations were completed the long settlement (creep) behavior due to changes in the internal structure of the soil was investigated. In the 1st and 2nd set of compaction tests, it was observed that the tendency to swelling decreased with increasing water content and the volume change values increased up to 16 times especially in the samples in contact with water in case of high stress. According to the deformation rates obtained from the third set of tests, it was observed that no additional volume changes due to the internal structure of the soil were formed in the high plasticity clay.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: berraktaslak@hotmail.com, sberilgen@gmail.com, kilichavvanur@gmail.com /  
Tel: +90 212 383 5224

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toprak dolgu yapılar inşa edildikten sonra, kullanım süresi boyunca su içeriğinin değişimi oturma ve şişme gibi hacim değişimi sorunlarına neden olabilmektedir. Özellikle yüksek plastisiteli killer, suya maruz kaldıklarında şişmeleri, kuruduklarında ise büzülmeleri nedeniyle yüksek hacim değiştirme davranışı gösterebilmektedir. Bu tip zeminlerin toprak dolgu inşasında kullanılması durumunda göstereceği hacim değişimi (şişme veya oturma) davranışlarının ayrıntılı olarak incelenmesi ve dolgu tasarımının elde edilen bu bilgilerden yararlanılarak yapılması gerekmektedir.

Karayolu ve havaalanı kaplamaları altında genellikle doğal zemin yerine sıkıştırılmış zeminler yer almakta ve bu sıkıştırılmış zeminlerin kalınlıkları topoğrafyaya bağlı olarak 10-70 metre arasında değişim gösterebilmektedir. Dolgular, katmanlar halinde sıkıştırıldığı için, her katman, birbirini takip eden üst üste gelen sıkıştırılmış zemin tabakalarının düşey basıncına ve bazı alanlarda dolgunun üzerine inşa edilen yapılar veya yüklemeler nedeniyle ilave gerilmelere maruz kalabilmektedirler. Yapının hizmet ömrü süresinde, farklı derinlikteki zemin tabakaları peyzaj sulama, yağışlar, sızdıran yeraltı tesisat hatları vb. gibi nedenlerle farklı düşey gerilmeler altında ıslanmaya maruz kalabilmektedir [1]. Islanma meydana geldiğinde ise genellikle üst dolgu tabakaları düşük gerilmeye maruz kalarak şişme davranışı gösterirken, daha yüksek gerilmeye maruz kalan daha derindeki zemin tabakaları ise ıslanma ile çökme davranışı (hidro-sıkışma) gösterebilmektedirler. Sıkıştırılmış kil zemin paketlerinin ıslanması emme basıncındaki azalma nedeniyle artabilir, yüksek toplam gerilmeler altında ıslanma olursa kayma meydana gelebilir ve deforme olabilir [2, 3].

Geniş alan yapıları olarak değerlendirilen havalimanları ve karayolları gibi yapıların inşaatında, dolgu malzemesi olarak kullanılan ince daneli zeminlerin hacim değişim davranışı üzerinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Miller [4] ve Jennings [5], dolgularda meydana gelebilecek ana problemler arasında yer alan hacim değişimi (oturma ve şişme) kontrolünün, laboratuvarında yapılan deneylerden kolayca tanımlanabileceğini vurgulamıştır. Büyük hacimli dolguların en önemli özelliklerinden biri kuru birim hacim ağırlık, su muhtevası ve zemin cinsi bakımından önemli değişkenlikler göstermeleridir. Bu parametrelerin dolguların yük altındaki deformasyon davranışı üzerindeki etkileri uzun yıllardır yapılan araştırmalar ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, zeminlerin deformasyon davranışı üzerinde zeminin mikro yapısının da temel rolü olduğu kanıtlanmıştır [6, 7]. Bununla birlikte, doymun olmayan zeminlerin hacim değiştirme davranışı üzerinde emme basınçları da çok önemli bir role sahiptir. Mikroskopik bir bakış açısına göre, bir zemin numunesinde emme basıncındaki artışlar, büzülmenin neden olduğu dane içi ve/veya daneler arası boşluk hacmindeki azalma [8, 9], veya partikül oryantasyonundaki değişimlere bağlanabilir [10, 11]. Gündüz ve Arman [12], 9 farklı aşırı konsolidasyon oranında (AKO) hazırladığı plastisitesi düşük

olan bir kil zemin (likit limit,  $w_L=35$ ) üzerinde yaptıkları tek boyutlu konsolidasyon deneylerinde, numunelere maksimum 3200 kPa olmak üzere 10-25-50-100-200-400-100-200-400-800-200-400-800-1600-3200-100 kPa gerilme değerlerinde yükleme ve boşaltma yapmışlardır. Deneyler sonunda, hesaplanan sıkışma indeksi ( $C_c$ ) ve tekrar sıkışma indeksi ( $C_r$ ) değerlerinin birbirine çok yakın olduğunu, numunelerin başlangıç aşırı konsolidasyon oranı (AKO) ve başlangıç boşluk oranı ( $e_0$ ) değerleri farklı olsa bile, konsolidasyon eğrilerinin birbirine paralel olduğunu, zeminin sıkışabilirliğinin AKO'dan çok fazla etkilenmediğini, su muhtevası ve boşluk oranı değişiminden daha çok etkilendiğini belirtmişlerdir.

VandenBerge vd. [13], baraj dolgu tasarımında su seviyesinin ani düşmesi durumunda, dolgu zeminin sıkışabilirlik davranışını belirleyebilmek için, plastisitesi düşük olan bir kil zemini ( $w_L=47$ ), optimum su muhtevasının  $+1,4$  ve  $+1,8$  fazla bölgesindeki su muhtevalarında, standart kompaksiyon enerjisinde hazırlanan numuneleri tek boyutlu konsolidasyon deneyine tabi tutmuştur. Yapılan deneyler sonunda, optimum su muhtevasının ıslak tarafında çalışılan numunelerin daha az şişme davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

Boone ve Gerken [14], yüksek plastisiteli iki kil (CH) zemin üzerinde yaptıkları çalışmalarda; optimum su muhtevasının  $-2$  ve  $+3$  değer aralığında, modifiye kompaksiyon ile  $90$  RK,  $95$  RK ve  $100$  RK değerlerinde hazırlanan zemin örnekleri üzerinde yaptıkları Kalifornia Taşıma Oranı (CBR) deneyi ile şişme davranışını incelemişlerdir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda sürşarj etkisi dikkate alınarak ve alınmadan su altında bekletilerek ayrı ayrı CBR deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, su muhtevası ve sürşarj yükünün artmasıyla şişme yüzdesinin azaldığı, RK değerinin artmasıyla şişme yüzdesinin arttığı tespit edilmiştir. Miller [4], düşük plastisiteli bir kil (CL, plastisite indeksi,  $I_p=13$ ) zemin üzerinde yaptığı çalışmada; optimum su muhtevasının  $-4$  değerinde, standart kompaksiyon ile  $95$  RK ve  $100$  RK değerlerinde hazırlanan zemin örnekleri üzerinde konsolidasyon deneyleri yapmış ve dolguların hacim değişimlerini incelemiştir. Bu kapsamda yaptığı çalışmalarda  $w_{opt}=4$  ve  $95$  RK değerinde hazırlanan numunelerin 1600 kPa gerilme altında doymunluğa erişemediği,  $w_{opt}$ 'da RK 100 değerinde hazırlanan numunelerin ise 800 kPa da doymunluğa ulaştığını gözlemlemiştir. Bu çalışmalar doğrultusunda,  $w_{opt}$ 'nın ıslak tarafında sıkıştırılacak zeminlerin daha düşük gerilmelerde doymunluğa ulaşabileceğini ve bu zeminlerde önemli emme basınçlarının doğabileceğini belirtmiştir.

Miller [4],  $w_{opt}=5$ 'te, standart kompaksiyon  $95$  RK değerinde kompakte ettiği (CL,  $I_p=8$ ) zeminin dolguda kullanılması ile göstereceği oturma davranışının beklenenden çok daha uzun (250 gün) sürdüğünü ve bu su muhtevası civarında sıkıştırılacak yüksek plastisiteli zeminde, bu sürenin daha da fazla olacağını belirtmiştir. Miller [4], yüksek plastisiteli bir kil (CH,  $I_p=43$ ) zeminin

200 kPa düşey gerilme altında su ile karşılaşmadan önceki sıkışma davranışını tek boyutlu konsolidasyon deneyleri ile incelemiştir. Bu çalışmaların sonuçlarına göre  $w_{opt}$  ve bunun kuru tarafında sıkışma davranışının benzer olduğu, ancak  $w_{opt}$ 'un ıslak tarafında daha çok sıkışma meydana geldiğini belirtmiştir.

Miller [4], otoyol dolguları üzerinde yaptığı ölçüme dayalı araştırmalara göre, dolguların kullanım ömrü boyunca su içeriğinin arttığını tespit etmiş ve dolgunun alt tarafında meydana gelen ıslanmanın, zemin tabakalarında farklı oturmalara neden olabildiğini gözlemlemiştir. Bu amaçla, dolgunun üstten ıslanması konusunda, üç farklı zemin üzerine (siltli kum, düşük plastisiteli kil ve yüksek plastisiteli kil), 200 kPa düşey gerilme uygulayarak tek boyutlu konsolidasyon deneyleri yapmış ve  $w_{opt}$ 'nin kuru tarafında kompakte edilen killerin belli bir zaman geçtikten sonra ani bir değişim gösterdiğini, bu zaman aralığının yüksek plastisiteli killer için 100 dk, düşük plastisiteli killer için 10 dk olduğunu ve genel itibarıyla 100-1000 dk arasında beklenilmesi gerektiğini savunmuştur. Islanma etkisinin dolgu zemin için yüksek tehdit oluşturduğunu ve dolguların tasarımında oturmalar tahmin edilirken, su içeriği ve rölatif kompaksiyon (RK) etkisinin göz ardı edilmemesi gerektiğini belirtmiştir. Genel olarak kompakte edilerek inşa edilen dolguların şişme ve oturmasına etki eden faktörleri incelemek için yapılan araştırmalar, düşük plastisiteli zeminler (CL) üzerinde ve standart kompaksiyon enerjisi ile optimum su muhtevasının kuru tarafında ve optimumun az ıslak tarafında (+%2) hazırlanan numuneler üzerinde yapılmıştır [4]. Oturma davranışını incelemek için başlangıç koşulları farklı zemin örnekleri üzerine maksimum 3200 kPa gerilme uygulanmıştır. Şişme davranışının tahmini için, zemin düşük gerilme değerlerinde su ile buluşturulmuştur. Yapılan çalışmalar ile zeminin türü, içerdiği ince malzeme oranı, su muhtevası, kompaksiyon yöntemi, sıkışma derecesi gibi değişen parametreler ile zeminin su altında ve düşük efektif gerilmeler altında göstereceği oturma, şişme, doyunluk, emme basıncı, tahmini oturma süresi gibi dolgular için önemli olan konular hakkında bilgiler verilmiştir [4].

Bu çalışmada, yüksek plastisiteli bir kil zeminden modifiye kompaksiyon enerjisi kullanılarak farklı su muhtevaları ve RK değerlerinde numuneler hazırlanarak üç seri tek boyutlu sıkışma deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler ile farklı düşey gerilme adımlarında numunelerin sıkışma su muhtevasında ve su ile karşılaşması durumlarında hacimsel şekil değiştirme davranışı incelenmiştir. Sıkışma davranışını incelemek için klasik tek boyutlu konsolidasyon deney adımları izlenerek maksimum 6400 kPa gerilme değerine kadar yüklenmiştir. Bu kapsamda, zemin numuneleri önce su altında, daha sonra tamamen kuru bir şekilde ayrı ayrı deneye tabii tutulmuştur. Daha sonra klasik tek boyutlu yükleme durumunda belirli bir gerilme adımına kadar yüklenmiş olan (50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 800 kPa) numuneler, su ile buluşturularak şişme davranışı tahmin edilmiş ve belirlenen şişme basınçları dikkate alınarak belirli bir gerilme altında zemin numunelerinin göstereceği uzun süreli hacim değişimi

davranışı incelenmiştir. Böylece yüksek plastisiteli bir zemin numunesinin arazide dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda, dolgunun hizmet ömrü boyunca farklı derinliklerdeki zemin tabakalarının karşılaşabileceği bütün durumlar öngörülmeye çalışılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL METHOD)

Dolgu malzemesi olarak kullanılacak yüksek plastisiteli kil zeminin, su ilaveli (S tipi) ve susuz (N tipi) olarak yüksek basınçlara kadar göstereceği sıkışma ve şişme davranışı ile farklı gerilme kademelerinde su ile karşılaşması durumunda göstereceği şişme davranışının incelenmesi için, laboratuvarında üç seri tek boyutlu sıkışma deneyleri yapılmıştır. Deneylerin ilk aşamasında zemin modifiye kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırılmış, optimum su muhtevası ve kuru yoğunluk ilişkisi bulunmuştur. Bu ilişki dikkate alınarak zeminin, optimum su muhtevası ve bu değer için ıslak tarafında %90 RK ve %95 RK enerjilerinde sıkıştırılması için yapılacak vuruş sayıları belirlenmiştir.

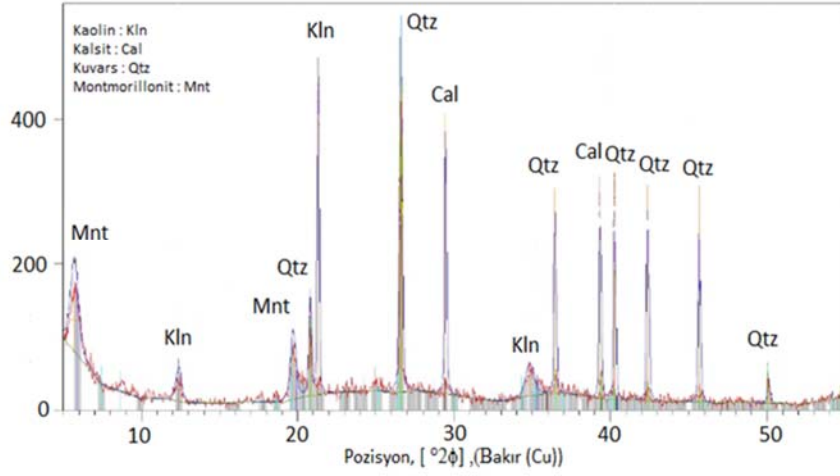
Deneylerin ikinci aşamasında, farklı su muhtevası ( $w_{opt}$ ,  $w_{opt}+5\%$  ve  $w_{opt}+7\%$ ) ve %90 RK ve %95 RK enerjisi değerlerinde sıkıştırılan zeminlerin hacim değiştirme davranışını inceleyebilmek için tek boyutlu sıkışma deneyleri yapılmıştır. Böylece, su muhtevası, kompaksiyon enerjisi ve düşey gerilme etkileri değerlendirilmiştir.

### 2.1. Zemin Özellikleri ve Numune Hazırlama (Properties of soil and preparation samples)

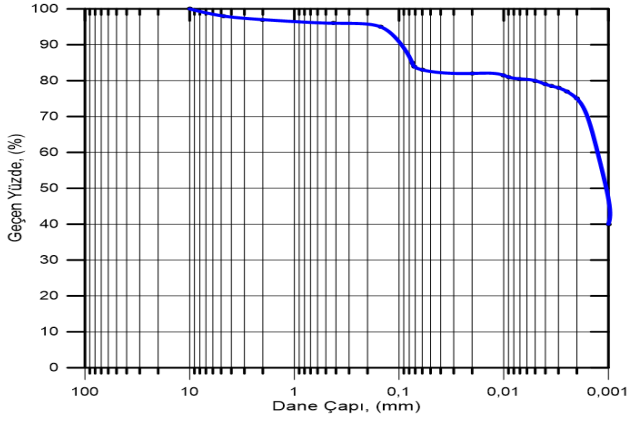
Deneysel çalışmada kullanılan kil zemin üzerinde elek analizi, hidrometre, modifiye kompaksiyon (ASTM 1557) ve Atterberg limitleri (ASTM 4318) deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 1'de özetlenmiştir. Zemin sınıfı, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)'ne göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak belirlenmiştir (Tablo 1). Zeminin özgül ağırlık (ASTM 2487) değeri belirlenmiştir. CH zemin üzerinde yapılan XRD analizinin sonucunda zemin içerisinde kaolin, kalsit, kuvars ve montmorillonit mineralleri görülmüştür (Şekil 1). Zemine ait dane çapı dağılımı eğrisi Şekil 2'de verilmiştir. Optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık ilişkisi modifiye kompaksiyon deneyi ile incelenmiş, kompaksiyon eğrisi Şekil 3'de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Yüksek plastisiteli kilin özellikleri  
(Properties of the high plasticity clay)

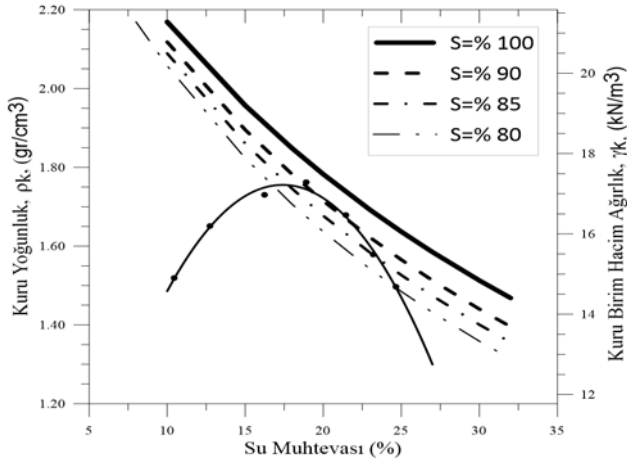
Özellik	Değer
Likit Limit, $w_L$ , (%)	65
Plastik Limit, $w_p$ , (%)	25
Çakıl (%)	2
Kum (%)	13
Silt, (%)	5
Kil, (%)	76
Özgül Ağırlık, $G_s$	2,77
Optimum su muhtevası, $w_{opt}$ , (%)	18,70
Maksimum kuru birim ağırlık, $\gamma_{kmax}$ , (kN/m <sup>3</sup> )	17,50



Şekil 1. XRD analizi (XRD Analysis)



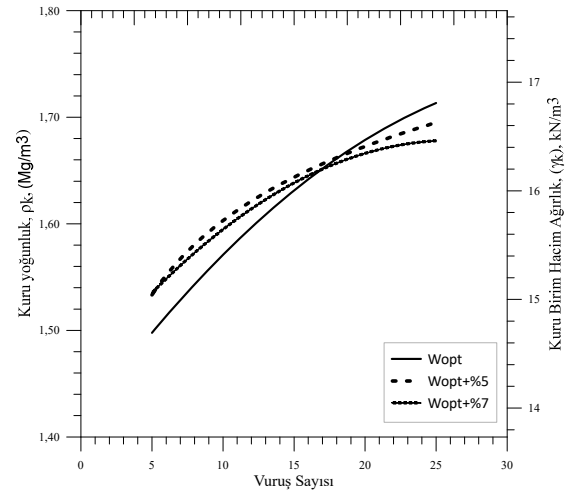
Şekil 2. Dane çapı dağılımı eğrisi (Grain size distribution curve)



Şekil 3. Modifiye kompaksiyon deney eğrisi (Modified compaction test curve)

Optimum su muhtevası ( $w_{opt}=\%18,7$ ) ve bu değer için ıslak tarafındaki ( $w_{opt+\%5}=\%23,7$  ve  $w_{opt+\%7}=\%25,7$ ) değerler için zemin örnekleri hazırlanmış ve bu üç su muhtevası değeri için ayrı ayrı, vuruş sayısı ile kuru yoğunluk arasındaki ilişki incelenmiştir (Şekil 4). Bu deneylerde her bir su muhtevası

değerinde, modifiye kompaksiyon kalıbında toplam 5 tabaka olmak üzere her tabakaya 5, 10, 15, 20, 25 vuruş yapılarak kuru yoğunluk ve vuruş sayısı grafiği çizilmiştir. Deney sonuçları Şekil 4'te bir arada sunulmuştur.

Şekil 4.  $W_{opt}=\%18,7$ ,  $\%23,7$  ve  $\%25,7$  için vuruş sayısı-  $\rho_k$  ilişkisi ( $\gamma_k$ -number of blows relations for  $W_{opt}=\%18,7$ ,  $\%23,7$  ve  $\%25,7$ )

Modifiye kompaksiyon deneyi ile belirlenen kuru yoğunluk değeri ( $1,75 \text{ Mg/m}^3$ ) ve bu üç eğri yardımıyla, her bir su muhtevasında  $\%90$  RK ve  $\%95$  değerlerinde hazırlanacak numuneler için vuruş sayısı değerleri belirlenmiştir. Eğrilerden okunacak değerler aşağıda Eş. 1 ve Eş. 2'deki gibi elde edilmiştir.

$$\%90 \text{ RK değeri} = 1,75 \times 0,90 = 1,58 \text{ gr/cm}^3 \quad (1)$$

$$\%95 \text{ RK değeri} = 1,75 \times 0,95 = 1,66 \text{ gr/cm}^3 \quad (2)$$

Her bir su muhtevası için bu değerlerin eğrileri kestiği nokta o su muhtevası için uygulanacak olan vuruş sayısını vermiştir. RK 90 ve RK 95 değerleri için belirlenen vuruş sayıları Tablo 2'de sunulmuştur.

**Tablo 2.** Numune hazırlanırken kullanılacak vuruş sayısı  
(Number of blows to use when preparing a sample)

Su Muhtevası, (%)	RK 90	RK 95
$W_{opt}$ , (%18,7)	11	18
$W_{opt}+5$ , (%23,7)	9	17
$W_{opt}+7$ , (%25,7)	10	16

Tek boyutlu sıkışma deneylerinde kullanılan numunelerin hepsi aynı yöntem ile hazırlanmıştır. Numune hazırlama aşamasında No.4 elekten geçen numune etüvde 24 saat bekletilmiş ve etüvden alındıktan sonra sıcaklığını kaybetmesi beklenmiş ve farklı su muhtevası değerleri için küre tabii tutulmuştur. Bu zemin, belirlenen su muhtevası ve kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılarak her bir deney için kompaksiyon kabının en alt tabakasından (en sıkışmış tabaka) alınan deney numuneleri kullanılmıştır.

Şekil 2’de verilen kompaksiyon eğrisinde optimum su muhtevası ( $w_{opt}=\%18,7$ ) değerinin yaklaşık olarak %90 ile %85 eğrileri arasında,  $w_{opt}+5=\%23,7$  değerinin yaklaşık %90 eğrisi üzerinde ve  $w_{opt}+7=\%25,7$  değerinin ise %80 suya doyunluk eğrisi üzerinde yer aldığı belirlenmiştir.

Görüldüğü gibi sıkıştırılmış zeminlerde sıkıştırma su muhtevası değeri  $w_{opt}+5$  değerine ulaştığında, suya doyunluk eğrisinden uzaklaşmaktadır. Böylece kuru birim hacim ağırlık değerlerinde meydana gelen azalmayla birlikte, zemin mukavemetinde de azalma meydana geldiği ve literatüre uygun bir davranış izlendiği gösterilmiştir [15]. Ayrıca aynı enerji seviyelerinde ve su muhtevası değerlerinde yapılan serbest basınç, kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneyleri (UU) sonucunda drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin yaklaşık %50 civarında azaldığı tespit edilmiştir [15].

## 2.2. Tek Boyutlu Sıkışma Deneyleri (One dimensional compression tests)

Numuneler üzerinde yapılan tek boyutlu sıkışma deneyleri, su muhtevası ve RK değerine göre isimlendirilmiş ve Tablo 3’te verilmiştir. Deneyler N, S, S50, S100, S200, S800 ve K olarak belirtilmiştir. 1. Seri tek boyutlu sıkışma deneylerinde, zeminin sıkıştırıldığı su muhtevası değerlerinde sulu (S tipi) ve susuz (N tipi) olarak yüksek basınçlara kadar göstereceği davranış, 2. Seri deneylerde sırasıyla 50, 100, 200 ve 800 kPa değerlerinde su ilave edilip

**Tablo 3.** Numuneler üzerinde yapılan tek boyutlu sıkışma deneylerinin isimlendirilmesi  
(Naming of consolidation tests on samples)

	Deney Yöntemi	Su Muhtevası, (%)	RK 95	RK 90
1.SERİ DENEYLER	(N TİPİ- 12.5 kPa-6400 kPa) SU İLAVESİZ	$W_{opt}$	N1	N2
		$W_{opt}+5$	N3	N4
		$W_{opt}+7$	N5	N6
	(S TİPİ- 12.5 kPa-6400 kPa) SU İLAVELİ	$W_{opt}$	S1	S2
		$W_{opt}+5$	S3	S4
		$W_{opt}+7$	S5	S6
	(S TİPİ- 12.5 kPa-50 kPa)	$W_{opt}$	S50-1	S50-2
		$W_{opt}+5$	S50-3	S50-4
		$W_{opt}+7$	S50-5	S50-6
	(S TİPİ- 12.5 kPa-100 kPa)	$W_{opt}$	S100-1	S100-2
		$W_{opt}+5$	S100-3	S100-4
		$W_{opt}+7$	S100-5	S100-6
2.SERİ DENEYLER	(S TİPİ- 12.5 kPa-200 kPa)	$W_{opt}$	S200-1	S200-2
		$W_{opt}+5$	S200-3	S200-4
		$W_{opt}+7$	S200-5	S200-6
	(S TİPİ- 12.5 kPa-800 kPa)	$W_{opt}$	S800-1	S800-2
		$W_{opt}+5$	S800-3	S800-4
		$W_{opt}+7$	S800-5	S800-6
3.SERİ DENEYLER	Uzun süreli hacim değişimi (krip)	$W_{opt}$	K1	K2
		$W_{opt}+5$	K3	K4
		$W_{opt}+7$	K5	K6

72 saat beklenilmesi ile göstereceği şişme davranışı, 3. Seri tek boyutlu sıkıştırma deneylerinde ise her bir yüklemeye kademesinde deformasyonların tamamen sönümlenmesi beklenerek uzun süreli hacim değişimi davranışı incelenmiştir.

### 2.2.1. Birinci seri tek boyutlu sıkıştırma deneyleri (First series of one dimensional compression tests)

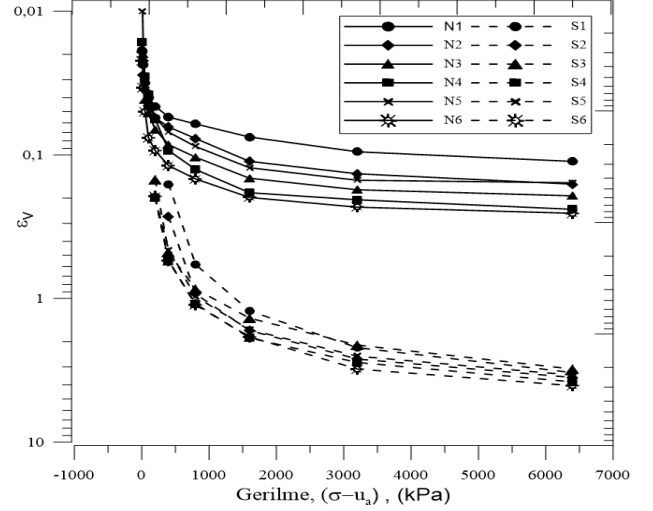
S tipi deneylerde numunenin su ile buluşması sonrasında, N tipi deneylerde ise numunenin sıkıştırma su muhtevasında farklı yüklemeye ve boşaltma kademelerindeki sıkıştırma ve şişme davranışları araştırılmıştır. Bu deneylerde uygulanan yüklemeye ve yük boşaltma adımları Tablo 4'te sunulmuştur.

N ve S tipi deneylerde yüklemeye ve boşaltma adımları 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 200,100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400, 400 kPa olarak uygulanmıştır. Deneylerde önce 800 kPa gerilme adımına kadar adım adım yüklemeye yapılmış, daha sonra 100 kPa değerine kadar boşaltılmış, devamında 6400 kPa'a kadar tekrar adım adım yüklemeye yapılmıştır. N tipi deneyde, boşaltma-2 adımı 25 kPa değerine kadar, S tipi deneyde boşaltma-2 adımı 400 kPa değerine kadar yapılmıştır. Deneylerde her bir yük adımında 24 saat beklenerek, diğer yük adımına geçilmiştir. Yük boşaltılması sırasında da 24 saat sonundaki değer okunarak deneye devam edilmiştir. S tipi deneylerde, zemin şişme gösterirken, N tipi deneylerde hiçbir numunede şişme görülmemiştir. Bu nedenle, boşaltma-2 adımı S ve N tipi deneylerde farklı gerilme adımlarında sonlandırılmıştır. N ve S tipi tek boyutlu sıkıştırma deneyi sonuçlarına göre belirlenen hacimsel şekil değiştirme ( $\varepsilon_v$ ) ve düşey gerilme ( $\sigma_v-u_a$ ) ilişkisi Şekil 5'te gösterilmiştir. Optimumun ıslak tarafında sıkıştırılmış killerin, düşük gerilme seviyelerinde sıkışması daha yüksek iken, daha yüksek gerilme seviyelerinde ise bunun tam tersi olduğu belirlenmiştir.

S tipi deneylerde numuneler su ile buluştuğu anda şişme davranışı göstermiştir. S1 ve S2 deney numunelerinde şişmenin engellendiği yaklaşık gerilme değeri 400 kPa, S3, S4, S5 ve S6 numunelerinde ise bu gerilme değeri 200 kPa olarak ölçülmüştür.

S ve N tipi deneylerinden belirlenen sıkıştırma indeksi ( $C_c$ ) ve tekrar sıkıştırma indeksi ( $C_r$ ) değerleri sırasıyla Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir. Tekrar sıkıştırma indeksi değerleri ( $C_r$ ) boşaltma eğrileri kullanılarak hesaplanmış ve yüklemeye

boşaltma eğrisinin eğimine eşit olarak kabul edilmiştir. Tabloda  $C_{r1}$ , 6400 kPa basınçtan 400 kPa basınca yapılan boşaltma adımını,  $C_{r2}$ , 800 kPa basınçtan 200 kPa basınca yapılan boşaltma adımını ifade etmektedir.



Şekil 5. S ve N tipi tek boyutlu sıkıştırma deneylerinden belirlenen  $\varepsilon_v$  ve  $(\sigma_v-u_a)$  ilişkisi

( $\varepsilon_v$  ve  $\sigma_v-u_a$  relation determined from S and N type compression tests)

Tablo 5. S tipi tek boyutlu sıkıştırma deneylerinde belirlenen sıkıştırma ( $C_c$ ) ve tekrar sıkıştırma indeksi ( $C_r$ ) değerleri (Compression and recompression index values determined from S and N type tests)

Açıklama	Deney	$e_0$	$C_c$	$C_{r1}$	$C_{r2}$	
$W_{opt+95}$	S1	0,60	0,2800	0,1400	-	
$W_{opt+90}$	S2	0,62	0,2900	0,1250	-	
$W_{opt+95+95}$	S3	0,78	0,3200	0,0880	0,0480	
$W_{opt+95+90}$	S4	0,69	0,3400	0,0990	0,0761	
$W_{opt+97+95}$	S5	0,76	0,3200	0,1318	0,1173	
$W_{opt+97+90}$	S6	0,79	0,3900	0,0711	0,0658	

Tablo 5 ve Tablo 6'daki verilere göre, N tipi deneylerde en az oturma N1 ve N2, en çok oturmaya N4 numunesinde, S tipi deneylerde en az oturma S1, en çok oturma ise S6 numunesinde belirlenmiştir. Her iki deney tipi için de literatürde elde edilen sonuçlara paralel olarak, aynı su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde, uygulanan sıkıştırma enerjisinin artması ile oturmanın azaldığı, aynı enerjide sıkıştırılan numunelerde su muhtevasının

Tablo 4. S ve N tipi tek boyutlu sıkıştırma deneylerinde yüklemeye ve yük boşaltma adımları (Loading and unloading steps in S and N type consolidation tests)

Deney Yöntemi	Yüklemeye ve Boşaltma Adımları	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S tipi ve N tipi	Yüklemeye-1	12,5▲	25	50	100	200	400	800			
	Boşaltma-1				100	200					
	Yüklemeye-2					200	400	800	1600	3200	6400
	Boşaltma-2		25*				400♣				

▲ : Yük kademesinin 1. dakikasında su ilavesi, sadece S deney tipi için yapılmıştır.

♣ : S deneyi için yapılan son boşaltma adımı , \* : N deneyi için yapılan son boşaltma adımı

artmasının ise oturmayı arttırdığı belirlenmiştir. S tipi tek boyutlu sıkışma deneyindeki numunelerin, N tipi deneylerdeki numunelere göre daha fazla sıkıştığı görülmüştür. Aynı su muhtevasında ve RK değerine göre karşılaştırıldığında, S tipi deneylerden daha büyük sıkışma indeksi değeri elde edilmiş ve her iki deney tipinde de düşey efektif gerilme arttıkça sıkışma miktarında artış meydana gelmiştir.

**Tablo 6.** N tipi tek boyutlu sıkışma deneylerinde belirlenen sıkışma ( $C_c$ ) ve tekrar sıkışma ( $C_r$ ) indeksi değerleri (Compression and recompression index values determined from S and N type tests)

Açıklama	Deney	$e_0$	$C_c$	$C_{r1}$	$C_{r2}$
$W_{opt}+\%95$	N1	0,67	0,1060	0,0190	$1,66 \times 10^{-4}$
$W_{opt}+\%90$	N2	0,78	0,1060	0,0135	$4,33 \times 10^{-3}$
$W_{opt}+\%5+\%95$	N3	0,72	0,1530	0,0160	$4,33 \times 10^{-3}$
$W_{opt}+\%5+\%90$	N4	0,96	0,1760	0,0170	$5,70 \times 10^{-3}$
$W_{opt}+\%7+\%95$	N5	0,79	0,1246	0,0120	$4,33 \times 10^{-3}$
$W_{opt}+\%7+\%90$	N6	0,93	0,1300	0,0150	$7,77 \times 10^{-3}$

### 2.2.2. İkinci Seri tek boyutlu sıkışma deneyleri (Second series one dimensional compression tests)

Kompakte edilerek hazırlanan yüksek plastisiteli zemin numunesinin herhangi bir yükleme adımında su ile karşılaşması durumunda göstereceği şişme davranışının incelenmesi için tek boyutlu sıkışma deneyleri, S50, S100, S200 ve S800 olmak üzere 4 farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Deney isimlendirilmesindeki 50, 100, 200, 800 değerleri, zemine o gerilme kademesinde su ilave edildiğini göstermektedir. Belirtilen gerilme kademelerinde su ile buluşturulan numunelerin şişmesi ölçülmüştür. Bu deneylerde, numunelere uygulanan yükleme ve yük boşaltma adımları Tablo 7’de verilmiştir.

**Tablo 7.** S50, S100, S200 ve S800 tipindeki tek boyutlu sıkışma deneylerinin yükleme ve boşaltma adımları (Loading and unloading steps in S50, S100, S200 and S800 type consolidation tests)

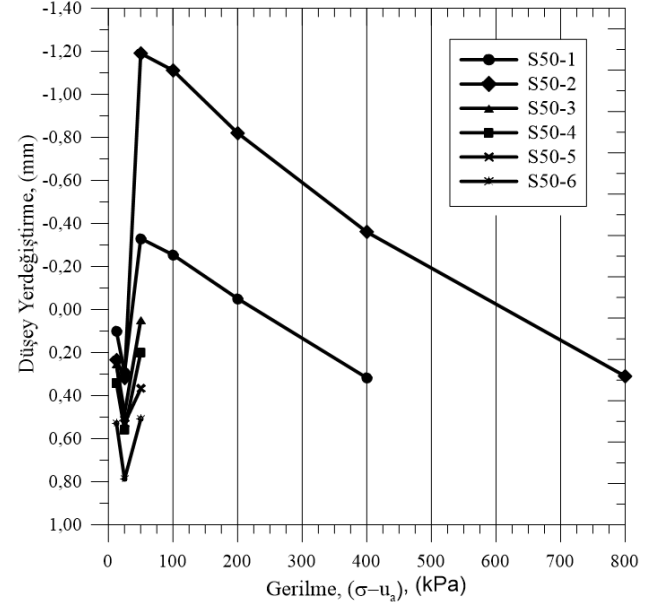
Deney İsmi	Yükleme Adımları						
S50	12,5	25	50,				
			*	♣			
S100	12,5	25	50	100,			
				*	♣		
S200	12,5	25	50	100	200,		
					*	♣	
S800	12,5	25	50	100	200	400	800,
							*

\* : Yüklemenin 1. dakikasında su ilave edilmiştir

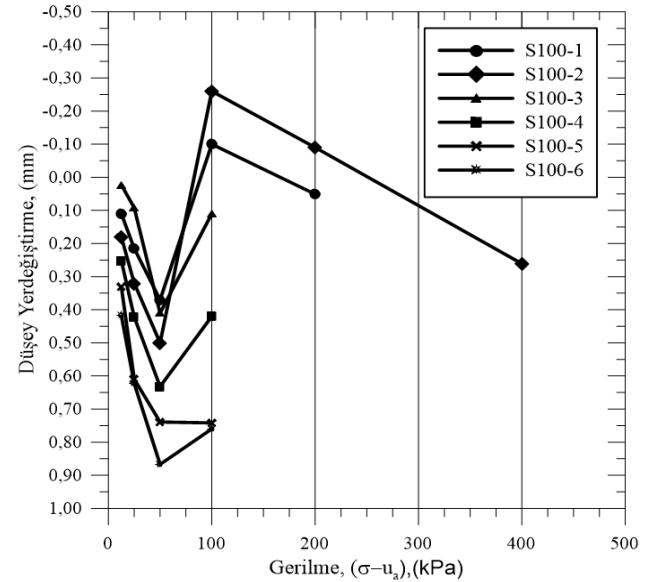
♣ : Yüklemeden sonra 72 saat beklenilmiştir.

Deneylerde, belirtilen gerilme değerinin 1. dakikasında numuneye su ilavesi yapılmış ve 72 saat boyunca şişme durumu gözlemlenmiştir. Başlangıç boyu 20mm olan numunenin 72 saat sonundaki şişme değerinin, numunenin ilk boyunu geçmediği durumlarda deney bitirilmiştir. 72 saat sonundaki şişme değerinin numunenin ilk boyunu geçtiği durumlarda, şişme sönümlenene kadar yükleme yapılmış ve

deney bitirilmiştir. RK 90 ve RK 95 ve üç su muhtevası için yapılan S50, S100, S200 ve S800 deneylerinin sonuçları Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’da bir arada sunulmuştur. Noktalar, her bir yükleme adımının 24 saat sonundaki okumasını temsil etmektedir. Şekillerdeki negatif (-) değerler şişmeyi, pozitif değerler (+) sıkışmayı göstermektedir.



**Şekil 6.** S50 tipi tek boyutlu sıkışma deneyi sonuçları (S50 type one dimensional compression test results)

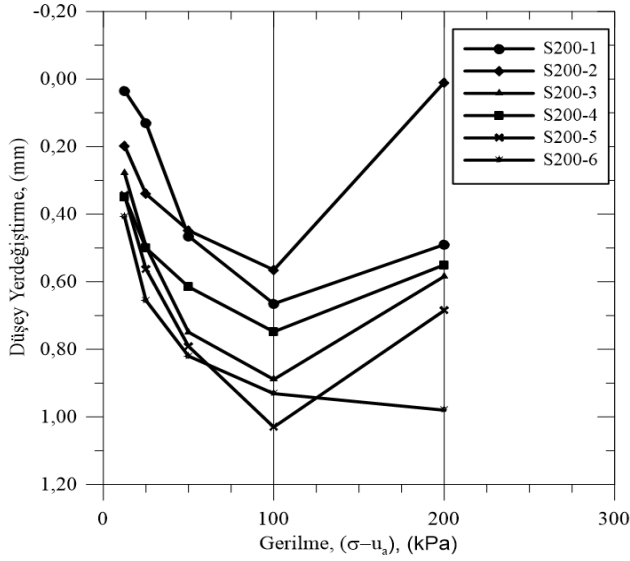


**Şekil 7.** S100 tipi tek boyutlu sıkışma deneyi sonuçları (S100 type one dimensional compression test results)

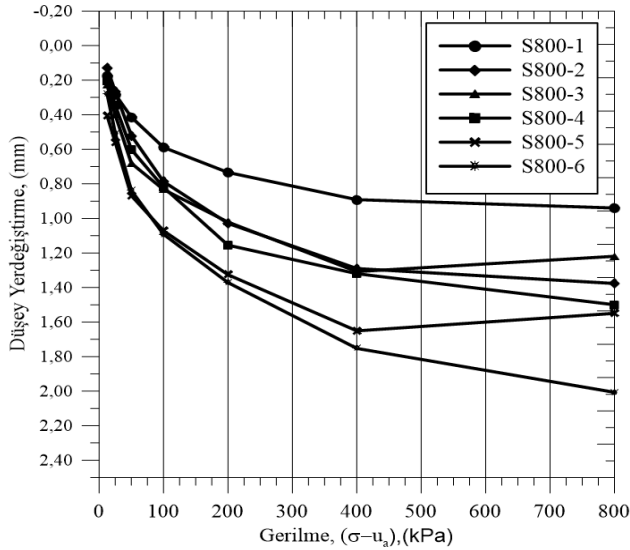
$W_{opt}$ ’da hazırlanan ve 50 kPa gerilmede su ile buluşan S50-1 ve S50-2 numunelerinde görülen şişme (ilk boyun geçilmesi)’nin sönümlenmesi için sırasıyla, 400 kPa ve 800 kPa gerilme uygulanmıştır.  $W_{opt}+\%5$  ve  $W_{opt}+\%7$ ’de hazırlanan ve 50 kPa gerilmede su ile buluşan S50-3, S50-4, S50-5,



S50-6, numunelerinde görülen şişmenin sönümlenmesi için herhangi bir gerilme değeri uygulanmamıştır. Meydana gelen şişme, numunenin ilk boyunu ( $h=20\text{mm}$ ) aşmamıştır.



Şekil 8. S200 tipi tek boyutlu sıkıştırma deneyi sonuçları (S200 type one dimensional compression test results)



Şekil 9. S800 tipi tek boyutlu sıkıştırma deneyi sonuçları (S800 type one dimensional compression test results)

$W_{opt}$ 'da hazırlanan ve 100 kPa gerilmeye su ile buluşan S100-1 ve S100-2 numunelerinde görülen şişme (ilk boyun geçilmesi)'nin sönümlenmesi için sırasıyla, 200 kPa ve 400 kPa gerilme uygulanmıştır.  $W_{opt+\%5}$  ve  $W_{opt+\%7}$ 'de hazırlanan ve 100 kPa gerilmeye su ile buluşan S100-3, S100-4, S100-5 ve S100-6 numunelerinde görülen şişmenin sönümlenmesi için herhangi bir gerilme uygulanmamıştır. Meydana gelen şişme, numunenin ilk boyunu ( $h=20\text{mm}$ ) aşmamıştır.

200 kPa ve 800 kPa gerilmeye su ile buluşan tüm numuneler için 72 saatin sonunda görülen şişme değeri, numunenin ilk boyunu aşmadığı için deneyler sonlandırılmıştır.

### 2.2.3. Uzun süreli hacim değişimi davranışının değerlendirilmesine yönelik yapılan deneyler (Tests for evaluation of long term volume change behavior)

Kompakte edilerek hazırlanan zemin numunelerinin, su altında göstereceği uzun süreli oturma davranışının belirlenebilmesi için yapılan deneylerde numunelere uygulanan yükleme adımları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Uzun süreli hacim değişimi davranışının değerlendirilmesine yönelik yapılan yükleme adımları (Loading steps at tests for evaluation of long term volume change behavior)

Deney İsmi	Deney No	Yükleme Adımları (kPa)
$W_{opt+\%95}$	K1	400, ● 800, * 1600 3200
$W_{opt+\%90}$	K2	400, ● 800, * 1600 3200
$W_{opt+\%5+\%95}$	K3	400, * 800 1600 3200
$W_{opt+\%5+\%90}$	K4	400, * 800 1600 3200
$W_{opt+\%7+\%95}$	K5	400, * 800 1600 3200
$W_{opt+\%7+\%90}$	K6	400, * 800 1600 3200

● : Şişme meydana gelmiştir.  
\* : 1. dakikada su ilavesi yapılmıştır.

Deneylerde sabit bir gerilme altında uzun süre beklenilmesi durumunda yükleme adımları 400, 800, 1600, 3200 kPa olarak uygulanmıştır. S tipi deneylerde belirlenen şişme basınçları (K1 ve K2 için 400 kPa, K3, K4, K5 ve K6 için 200 kPa) yardımı ile ilk yükleme adımları, K1 ve K2 isimli deneylerde 800 kPa, K3, K4, K5 ve K6 isimli deneylerde 400 kPa olarak seçilmiştir. Deneylerde başlangıç yük uygulamasında su ilave edilmiş ve her bir yük adımında oturmaların tamamlanması beklenilmiştir. Bu amaçla hacimsel şekil değiştirme hızının  $10^{-7}$ - $10^{-9}$  mertebesine ulaşması (yaklaşık 15 gün) beklenerek bir sonraki yük adımına geçilmiştir.

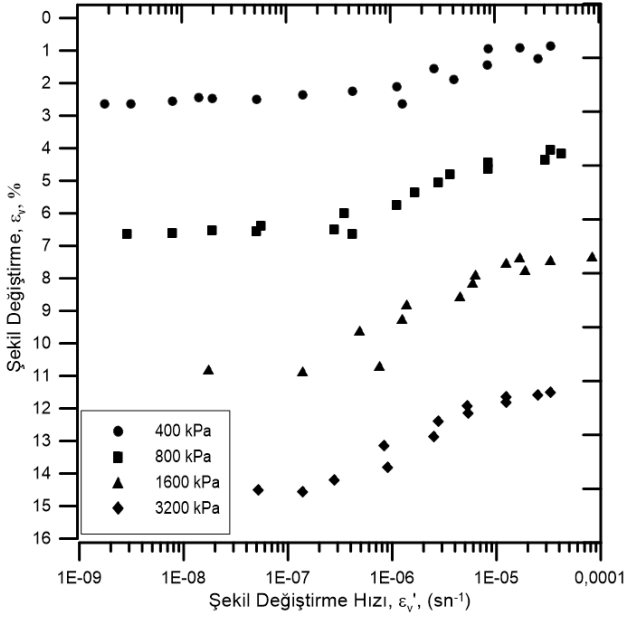
Bu deneylerde her bir yükleme kademesinde hacimsel şekil değiştirme hızına ( $\epsilon_v$ ) bağlı olarak meydana gelen hacimsel şekil değiştirme ( $\epsilon_v$ ) davranışı incelenmiştir. K4 numunesi için elde edilen deney sonuçları Şekil 10'da örnek olarak sunulmuştur. Benzer deneyler ve değerlendirmeler tüm zemin numuneleri (Tablo 8) için gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen tüm deney sonuçları ışığında, sabit bir gerilme altında uzun süre beklenilmesi durumunda, boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi sonrasında hacimsel şekil değiştirmelerde artış meydana gelmediği tespit edilmiştir. Şekil 10'dan hacimsel şekil değiştirme hızı ( $\epsilon_v$ ) değerlerinin  $10^{-7}$  mertebesine ulaştıktan sonra değişim göstermediği görülmüştür. Böylece sabit bir gerilme altında, numunelerde zemin iç yapısında meydana gelebilecek değişimlerden kaynaklı şekil değiştirmeler (krip) meydana gelmeyeceği sonucuna ulaşılmıştır [15].

### 3. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF THE TEST RESULTS)

Yüksek plastisiteli ve şişme özelliği gösteren kil bir zemin numunesi ile yapılacak dolgunun farklı derinliklerde su ile karşılaşması durumlarında göstereceği hacim değişimi

(şişme ve oturma) davranışlarının öngörülebilmesi için yapılan tek boyutlu sıkışma deneylerinde, su muhtevası ve kompaksiyon enerjisinin etkileri incelenmiştir.

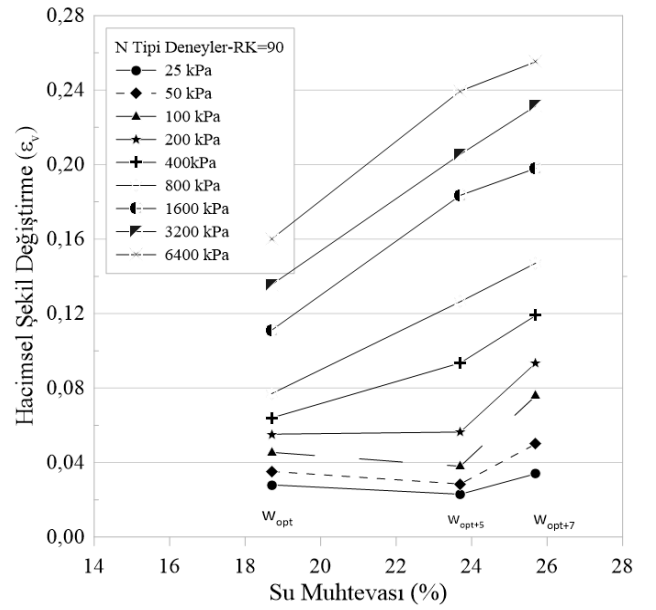


**Şekil 10.** K4 numunesinde gerçekleştirilen deney sonuçlarından belirlenen  $\varepsilon_v$  ve  $\varepsilon_v'$  ilişkisi  
(The relationship between  $\varepsilon_v$  and  $\varepsilon_v'$  determined from the results of the experiments carried out in the K4 sample)

Yüksek dolgu zeminler, içerisine su aldıklarında dolgu üst kısımları nispeten daha düşük gerilmeler altında şişme davranışı gösterirken, daha alt tabakalarda yüksek gerilmelere maruz kalan bölgelerde suyla temas halinde azalan emme basıncıyla birlikte sıkışma (çökme) davranışı izlenmektedir. N tipi deneylerde su ile temas olmaması nedeniyle herhangi bir yükleme kademesinde şişme davranışı izlenmemiş, tüm numunelerde yük altında sıkışma davranışı görülmüştür (Şekil 4. N tipi deneyler). Bunun aksine S tipi deneylerde ilk yükleme adımından itibaren su ilavesi olması nedeniyle başlangıçta 100 kPa-200 kPa basınç aralığında şişme davranışı gözlenmiş bu nedenle bir sonraki yükleme kademesine geçilmiştir. Elde edilen sonuçlar yüksek plastisiteli killere inşa edilen dolguların suyla temas etmemeleri durumunda şişme davranışı göstermeyeceğini, ancak suyla temas halinde ise özellikle düşük gerilmeler altında şişme, yüksek gerilmeler altında ise emme basınçlarındaki azalmaya bağlı olarak sıkışma davranışı izleneceğini göstermiştir [15]. S tipi deneylerde optimum su muhtevasında ve düşük enerji seviyesinde (RK 90) en yüksek şişme değerlerine ulaşılmıştır. Böylece uygulanan sıkıştırma enerjisindeki artışla birlikte literatüre uygun olarak, şişmelerin azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca S ve N tipi deneylerde, başlangıç suya doygunluk yüzdelerinin literatürde sunulan mevcut örneklerle uygun olarak %75 ile %95 aralığında değiştiği görülmüştür [15].

Optimum su muhtevası ( $w_{opt}=\%18,7$ ) ve bu değer için ıslak taraftaki ( $w_{opt+\%5}=\%23,7$  ve  $w_{opt+\%7}=\%25,7$ ) su muhtevalarında ve RK 90 ve RK 95 enerji seviyelerinde 1430

hazırlanan numunelerin kuru (N tipi) ve su altında (S tipi) deneyler ile farklı düzey gerilmeler altındaki hacim değişimi davranışları incelenmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12'de N tipi deneylere Şekil 12 ve Şekil 13'de ise S tipi deneylere ait sonuçlar gösterilmiştir. N tipi deneylerde RK 90'da düşük gerilme seviyelerinde (25 kPa ile 200 kPa) ve  $w_{opt}=\%18,7$  ve  $w_{opt+\%5}=\%23,7$  su muhtevalarında çok fazla hacim değişimi olmamış, ancak  $w_{opt+\%7}=\%25,7$  su muhtevasında hacim değişiminde ani bir artış meydana gelmiştir. 400 kPa – 6400 kPa gerilme seviyelerinde ise her üç su muhtevası değerinde de yaklaşık lineer olarak artan bir hacim değişimi izlenmiştir (Şekil 11). Şekil 12'de ise  $w_{opt}=\%18,7$  ve  $w_{opt+\%5}=\%23,7$  değerlerinde RK 90 ile aynı davranış izlenmiş (100 kPa yükü hariç),  $w_{opt+\%7}=\%25,7$  değerinde ise hacim değişimlerinde azalma olduğu görülmüştür.

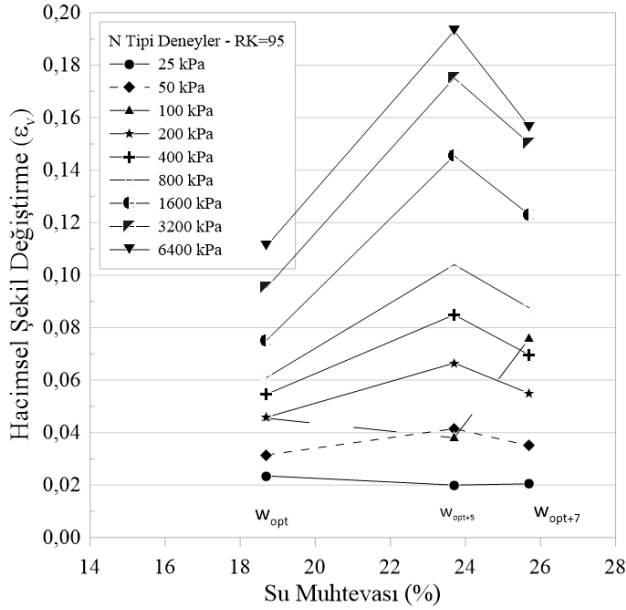


**Şekil 11.** N tipi deneylerde RK 90 için hacim değişimi davranışı (Volume change behavior for RK 90 in N-type tests)

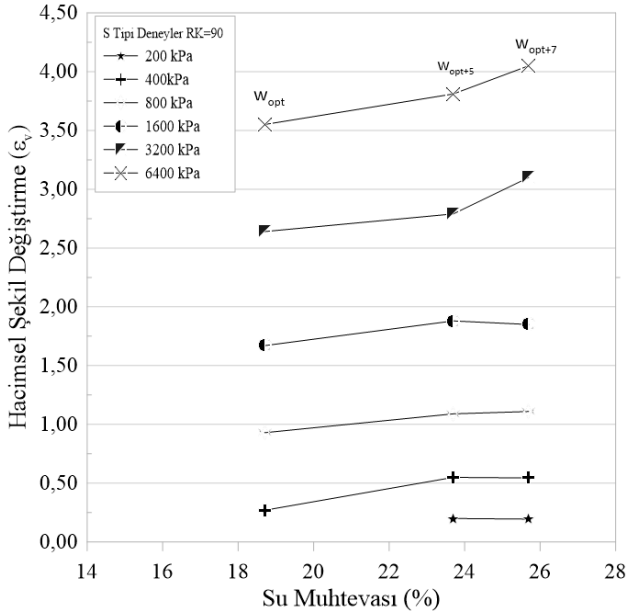
S tipi deneylerde 200 kPa'dan daha küçük yükleme kademesinde şişme meydana gelmiştir. 200 kPa yüklemesinde de  $w_{opt}=\%18,7$  değerinde şişme meydana geldiğinden iki su muhtevası için sonuçlar gösterilmiştir. RK 90'da 400 kPa ile 6400 kPa gerilme aralığında  $w_{opt}=\%18,7$  ve  $w_{opt+\%5}=\%23,7$  su muhtevalarında hacim değişimlerinin eğilimi benzer, ancak  $w_{opt+\%7}=\%25,7$  su muhtevası değerinde daha büyük hacim değişimi meydana gelmiştir (Şekil 13). RK 95'de 200 kPa ile 1600 kPa gerilme aralığında diğer deney sonuçları ile uyumlu iken 3200 kPa ve 6400 kPa gerilmelerinde  $w_{opt+\%5}=\%23,7$  su muhtevalarında hacim değişimlerinde azalma,  $w_{opt+\%7}=\%25,7$  su muhtevasında ise tekrar artış eğilimi görülmüştür (Şekil 14).

Şekil 11 - Şekil 14'den görüldüğü gibi N ve S tipi deneylerin RK 90'da daha fazla hacimsel şekil değiştirme meydana geldiği belirlenmiştir. N tipi deneyde RK 95'de  $w_{opt+\%7}=\%25,7$  su muhtevası değerinde hacimsel şekil değiştirme azalması ile diğerlerinden farklı bir davranış sergilediği görülmüştür. Bu farklılığın numunelerin

kompaksiyonla hazırlanması sırasında, su muhtevasının fazla olması sonucu (zemin daneleri arasında oluşan bir film suyu tabakası nedeniyle) yüksek enerji uygulanması ile danelerin birbirine yaklaştırılmaması (zemin içinde artan boşluk suyu basınçları nedeniyle sıkışma miktarının azalması) ve uygulanan düşey gerilme altında çok fazla hacim değişimi göstermemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



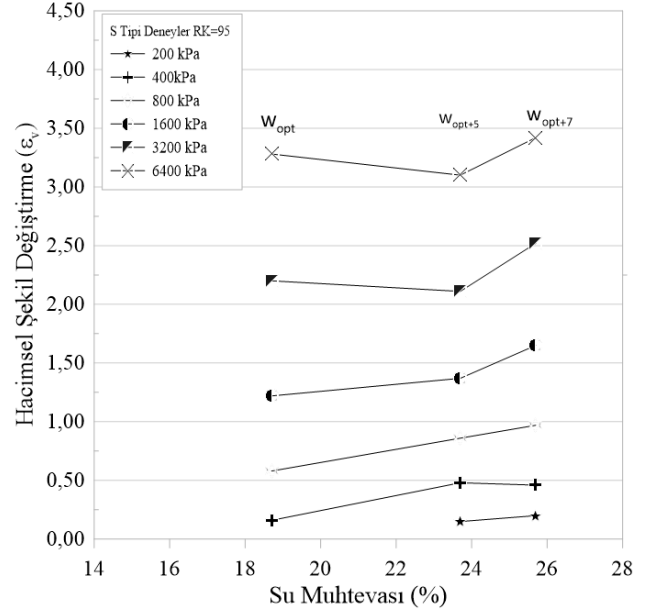
Şekil 12. N tipi deneylerde RK 95 için hacim değişimi davranışı (Volume change behavior for RK 95 in N-type tests)



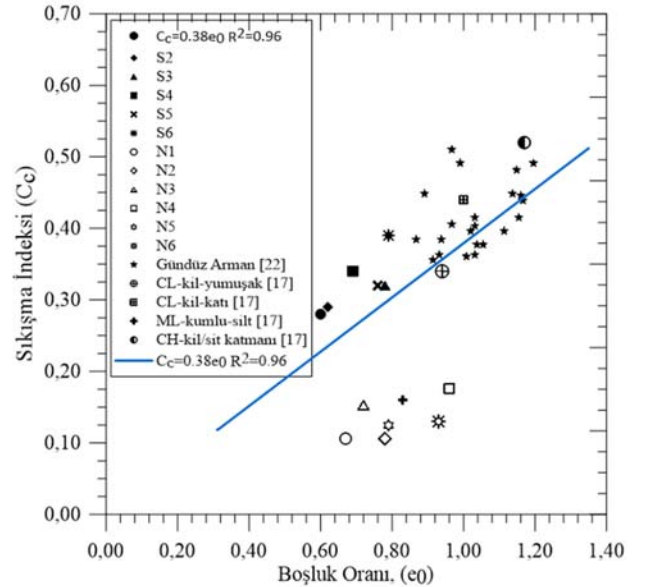
Şekil 13. S tipi deneylerde RK 90 için hacim değişimi davranışı (Volume change behavior for RK 90 in S-type tests)

S ve N tipi deney sonuçlarından elde edilen sıkışma indeksinin ( $C_c$ ) boşluk oranına ( $e_0$ ) bağlı değişimleri Şekil 15’de, tekrar sıkışma indeksinin ( $C_{r1}$  ve  $C_{r2}$ ) başlangıç boşluk

oranına ( $e_0$ ) bağlı değişimleri Şekil 16 ve Şekil 17’de, sıkışma indeksinin tekrar sıkışma indeksine bağlı değişimleri Şekil 18 ve Şekil 19’da sunulmuştur.



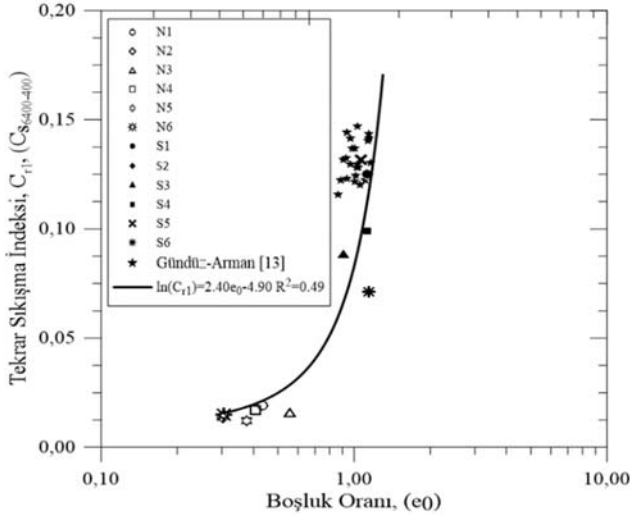
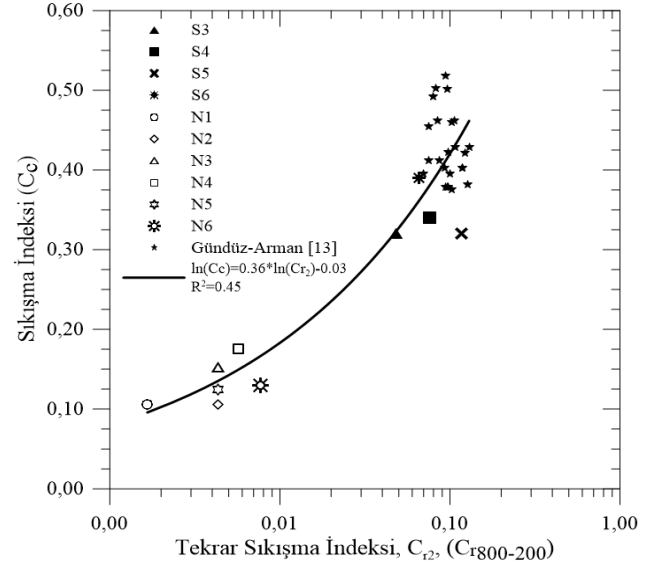
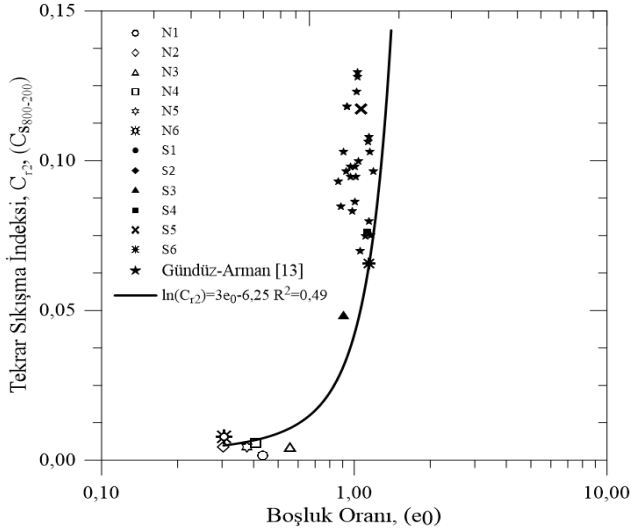
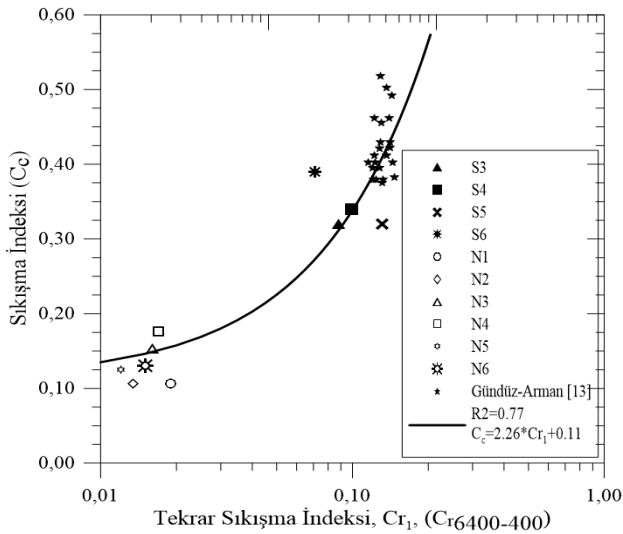
Şekil 14. S tipi deneylerde RK 95 için hacim değişimi davranışı (Volume change behavior for RK 95 in S-type tests)



Şekil 15.  $e_0$ - $C_c$  ilişkisi ( $e_0$ - $C_c$  relation)

Azzouz [26], farklı zemin tipleri için yaptığı tek boyutlu konsolidasyon deneylerinde elde ettiği  $C_c$  parametresi ile zeminin likit limit, doğal su muhtevası ve başlangıç boşluk oranı arasındaki ilişkileri ampirik denklemler halinde sunmuştur. Azzouz [26], kullandığı tüm killer için sıkışma indeksi ( $C_c$ ) ve başlangıç boşluk oranı ( $e_0$ ) arasında Eş.3 tanımlamıştır.

$$C_c = 1.15 (e_0 - 0,35) \quad (3)$$

Şekil 16.  $e_0-C_{r1}$  ilişkisi ( $e_0-C_{r1}$  relation)Şekil 19.  $C_c-C_{r1}$  ilişkisi ( $C_c-C_{r1}$  relation)Şekil 17.  $e_0-C_{r2}$  ilişkisi ( $e_0-C_{r2}$  relation)Şekil 18.  $C_c-C_{r1}$  ilişkisi ( $C_c-C_{r1}$  relation)

Bu çalışmada da, kullanılan yüksek plastisiteli kil zemin (CH) için yapılan deneyler sonucunda sıkışma indeksi ( $C_c$ ), tekrar sıkışma indeksi ( $C_{r6400-400}$  ( $C_{r1}$ ) ve  $C_{r800-200}$  ( $C_{r2}$ )) ile başlangıç boşluk oranı ( $e_0$ ) arasındaki ilişkiler de Eş. 4, Eş. 5, Eş. 6, Eş. 7 ve Eş.8'de verilmiştir.

$$C_c=0,38*e_0 \quad R^2=0,96 \quad (4)$$

$$\ln(C_{r1})=2,40*e_0-4,90 \quad R^2=0,49 \quad (5)$$

$$\ln(C_{r2})=3*e_0-6,25 \quad R^2=0,49 \quad (6)$$

$$C_c=2,26*C_{r1}+0,11 \quad R^2=0,77 \quad (7)$$

$$\ln(C_c)=0,36*\ln(C_{r2})-0,03 \quad R^2=0,45 \quad (8)$$

S ve N tipi deneylerde belirlenen en büyük sıkışma indeksi ( $C_c$ ) değeri S6 numunesinde 0,39, en düşük sıkışma indeksi değeri N1 numunesinde 0,10 olarak elde edilmiştir. Ayrıca S tipi deneylerden elde edilen sıkışma indeksinin daha yüksek değerler aldığı bununla birlikte artan boşluk oranı ( $e$ ) değerlerine bağlı olarak da arttığı belirlenmiştir.

Holtz [27] tarafından, normal konsolide orta hassaslıkta killer için yapılan tek boyutlu sıkışma deneyleri ile belirlenen  $C_c$  parametresinin 0,2-0,5 arasında bir değer olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan CH kil zemin üzerinde yapılan tek boyutlu sıkışma deneylerinden elde edilen  $C_c$  değerlerinin de bu aralıkta değerler aldığı belirlenmiştir. Das [28] tarafından yapılan tek boyutlu sıkışma deneylerinde,  $C_r$  değerinin,  $0,05C_c-0,10C_c$  değerleri arasında olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan CH kil zemin üzerinde yapılan tek boyutlu sıkışma deneyleri ile belirlenen  $C_r$  ile  $C_c$  arasındaki ilişkiyi oluşturan verilerin yaklaşık %70'inin, bu aralık içinde kaldığı görülmektedir. Yurtcu ve Özocak [19] tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise son yıllarda hızlı bir şekilde gelişen ve birçok bilim dalında kullanım alanı bulan Bulanık Mantık (BM) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemleri ince

daneli zeminlerin sıkışma indisinin indeks özellikleri vasıtası ile tahmin edilmesinde kullanılmıştır. 2.seri tek boyutlu sıkışma deneylerinde numunelerin farklı yüklemelerinde su ile buluşması durumunda sergileyeceği şişme davranışları gözlemlenmiş; numunelerde görülen şişmenin, su muhtevasının ve suya maruz kaldığı gerilme değerinin artması ile azaldığı görülmüştür. Numunelerin 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 800 kPa gerilme altında su ile karşılaştığında ve su ile karşılaşmasından 72 saat sonra ölçülen yer değiştirme (oturma/şişme) değerleri Tablo 9'da ve Şekil 20'de verilmiştir.

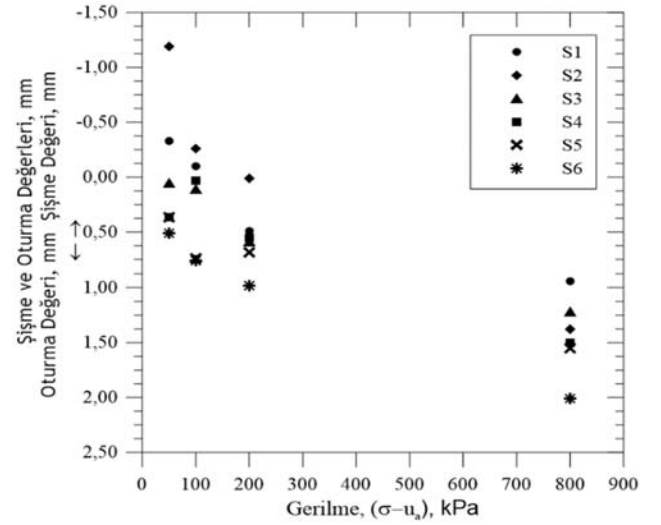
Numuneler su ile buluştuğunda meydana gelen şişme miktarının görülebilmesi için Tablo 9'da, su ile buluşulan gerilme adımından bir önceki gerilme adımında okunan oturma değerleri verilmiştir. 50 kPa gerilme değerinde su ile buluşan numuneler için bu değer 25 kPa, 100, 200 ve 800 kPa gerilme değerlerinde su ile buluşan numuneler için bu değerler sırasıyla 50, 100 ve 400 kPa'dır.

50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 800 kPa gerilme değerlerinde su altında 72 saat bekletildikten sonra alınan ölçümler ile tüm numunelerde şişme gözlemlenmiştir. S50 deneylerinde en çok şişme (%7,5) S2 numunesinde görülmüştür. S1 (%7,5) ve S2 (%3,1) numunelerinde görülen şişmenin sönümlenmesi için sırasıyla 400 kPa ve 800 kPa gerilme değerine kadar yüklemeler yapılmıştır. S50 deneylerindeki diğer numunelerde de (S4, S5, S6, S7) şişme görülmüştür, fakat görülen bu şişmeler numunenin ilk boyunu (h=20 mm) aşmadığından herhangi bir yüklemeler yapılmadan deney bitirilmiştir.

S100 deneylerinde en çok şişme (%3,8) S2 numunesinde görülmüştür. S1 (%2,35) ve S2 (%3,8) numunelerinde görülen şişmenin sönümlenmesi için sırasıyla 200 kPa ve

400 kPa gerilme değerine kadar yüklemeler yapılmıştır. S100 deneylerindeki diğer numunelerde de şişme görülmüş fakat bu şişmeler numunenin ilk boyunu (h=20 mm) aşmadığından herhangi bir yüklemeler yapılmadan deney bitirilmiştir.

Daha yüksek gerilme değerlerinde (200 kPa ve 800 kPa), numunelerde görülen şişme, hiçbir numune için deney başındaki boyu aşmadığından deneyler bitirilmiştir. Şişme eğiliminde en etkili parametre olan su muhtevasının artması, 800 kPa değerlerinde görülen şişme değerini azaltıcı rol oynamaktadır. Çalışma kapsamında yapılan araştırmalarda yüksek plastisiteye sahip bu zeminde, yüksek gerilmeler altında bile, numunelerin su ile karşılaşması durumunda şişmenin meydana geldiği belirlenmiştir.



Şekil 20. Düşey gerilme ( $\sigma_v-u_a$ )- şişme ilişkisi (Vertical stress-swelling relation)

Tablo 9. Tek boyutlu sıkışma deneylerinde belirlenen oturma ve şişme değerleri, (mm) (Settlement and swelling values determined in compression tests)

Deney Tipi	Gerilme (kPa)	Oturma/Şişme Değerleri (mm)					
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
S50	25, ( $\Delta$ )	0,2921	0,3180	0,4826	0,5588	0,5283	0,7880
	50, (*, $\clubsuit$ )	-0,3302	-1,1900	0,0508	0,3683	0,3683	0,5100
	400, ( $\spadesuit$ )	0,3175	-0,3600	-	-	-	-
	800, ( $\spadesuit$ )	-	0,3100	-	-	-	-
S100	50, ( $\Delta$ )	0,3700	0,5000	0,4100	0,6320	0,7391	0,8670
	100, (*, $\clubsuit$ )	-0,1000	-0,2600	0,1100	0,0300	0,7417	0,7600
	200, ( $\spadesuit$ )	0,0510	-0,0900	-	-	-	-
	400, ( $\spadesuit$ )	-	0,2610	-	-	-	-
S200	100, ( $\Delta$ )	0,6650	0,5650	0,8890	0,7480	1,0300	0,9310
	200, (*, $\clubsuit$ )	0,4900	0,0100	0,5842	0,5500	0,6850	0,9800
S800	400, ( $\Delta$ )	0,8915	1,2903	1,3081	1,3200	1,6510	1,7526
	800, (*, $\clubsuit$ )	0,9398	1,3767	1,2192	1,5000	1,5494	2,0066

\* : Yüklemenin 1. dakikasında su ilave edilen gerilme adımı, kPa

$\clubsuit$  : Su ilavesinden sonraki 3. gün sonunda okunan şişme değeri, mm

$\spadesuit$  : Şişme sebebiyle yüklemeler yapılan gerilme adımı ve okunan oturma değeri, mm

$\Delta$  : Su ile karşılaşmadan önceki gerilme adımında ölçülen oturma değeri, mm

- : İlk boyu (h=20 mm) aşan bir şişme olmadığından, yüklemeler yapılmamıştır

Dolgu zeminin sabit bir yük altında uzun süreli hacimsel şekil değiştirme davranışını incelemek üzere yapılan 3. seri deneylerde, her bir yükleme kademesinde zeminin hacimsel şekil değiştirme hızına ( $\epsilon_v$ ) bağlı olarak gösterdiği hacimsel şekil değiştirme ( $\epsilon_v$ ) davranışı incelenmiştir. Hacimsel şekil değiştirme hızı ( $\epsilon_v$ ) değerlerinin  $10^{-7}$  mertebesine ulaşmasından sonra, numunelerde hacim değişimi meydana gelmediği görülmüştür (Şekil 10). Diğer zemin numuneleri üzerinde yapılan deneylerde de benzer davranış gözlemlenmiştir. Böylece deneysel çalışmada kullanılan kil zeminin sabit bir yük altında uzun süre kalması durumunda zemin iç yapısında meydana gelen değişimlerden dolayı ilave bir şekil değiştirme göstermeyeceği sonucuna ulaşılmıştır.

#### 4. SİMGELER (SYMBOLS)

AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
$C_{\square}$	: İkincil Konsolidasyon Katsayısı
$C_c$	: Sıkışma İndeksi
$C_r$	: Tekrar Sıkışma İndeksi
$C_{r800-200}$	: 800 kPa Basınçtan 200 kPa Basınca Yapılan Boşaltma İndeksi
$C_{r6400-400}$	: 6400 kPa Basınçtan 400 kPa Basınca Yapılan Boşaltma İndeksi
$e_0$	: Başlangıç Boşluk Oranı
Gs	: Özgül Ağırlık
N	: Su İlavesi Olmadan Yapılan Tek Boyutlu Sıkışma Deneyi
$I_p$	: Plastisite İndeksi
RK	: Rölatif Kompaksiyon
S	: Su İlaveli Yapılan Tek Boyutlu Sıkışma Deneyi
S50	: 50 kPa Gerilme Kademesinde Su İlaveli Yapılan Tek Boyutlu Sıkışma Deneyi
S100	: 100 kPa Gerilme Kademesinde Su İlaveli Yapılan Tek Boyutlu Sıkışma Deneyi
S200	: 200 kPa Gerilme Kademesinde Su İlaveli Yapılan Tek Boyutlu Sıkışma Deneyi
S800	: 800 kPa Gerilme Kademesinde Su İlaveli Yapılan Tek Boyutlu Sıkışma Deneyi
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
XRD	: X Işımları Difraktometresi
w	: Su Muhtevası
$w_{opt}$	: Optimum Su Muhtevası
$w_{opt-\%4}$	: Optimum Su Muhtevasının %4 kuru tarafı
$w_{opt+\%5}$	: Optimum Su Muhtevasının %5 ıslak tarafı
$w_{opt+\%7}$	: Optimum Su Muhtevasının %7 ıslak tarafı
$w_L$	: Likit Limit
$w_p$	: Plastik Limit
$\rho_k$	: Kuru Yoğunluk
$\gamma_k$	: Kuru Birim Hacim Ağırlık
$\gamma_{kmax}$	: Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık
$\sigma'_v$	: Düşey Efektif Gerilme
$\epsilon_v$	: Şekil Değiştirme
$\epsilon_v'$	: Şekil Değiştirme Hızı

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yol ve havaalanı gibi büyük hacimli dolgular hizmet ömrü süresi içinde peyzaj sulama, yağışlar, sızdıran yeraltı tesisat hatları vb. gibi nedenlerle farklı düşey gerilmeler altında ıslanmaya maruz kalabilmektedir. İslanma meydana geldiğinde genellikle üst dolgu tabakaları düşük gerilmeye maruz kalarak şişme davranışı gösterirken, daha yüksek gerilmeye maruz kalan daha derindeki zemin tabakalarında ise ıslanma ile birlikte çökme davranışı (hidro-sıkışma) meydana gelebilmektedir. Bu amaca yönelik olarak çalışma kapsamında yüksek plastisiteli bir kil zeminin dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda artan düşey gerilme, kompaksiyon enerjisi ve farklı su muhtevallerindeki hacimsel şekil değiştirme davranışı incelenmiştir. Böylece hizmet ömrü boyunca farklı düşey gerilmeler altında su ile karşılaşılması ve karşılaşılmasında durumlarındaki hacim değişimini (sıkışma/şişme) davranışı tahmin edilmeye çalışılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

N ve S tipi deneylerin düşük rölatif kompaksiyon enerjisi altında hazırlanan numunelerinde (RK 90) daha fazla hacimsel şekil değiştirme meydana geldiği görülmüştür. N tipi deneyde RK 95'de  $w_{opt+\%7}=\%25,7$  su muhtevası değerinde hacimsel şekil değiştirme azalımı ile diğerlerinden farklı bir davranış sergilenmiştir. Dolgu zeminlerin sıkıştırma su muhtevasında değişim meydana gelmesi durumunda, üzerinde etkilenen gerilme seviyesine bağlı olarak şişme davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Yüksek gerilmeler altında bile, numunelerin su ile karşılaşması durumunda şişme meydana gelebildiği görülmüştür. S tipi deneylerden elde edilen hacimsel şekil değiştirme değerlerinin N tipi deneylerde elde edilenlere göre yaklaşık 16 kat daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Belirli bir su muhtevası ve kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılan dolgu üzerindeki düşey gerilme ve su muhtevasının artması, zeminin herhangi bir zaman aralığı ve gerilme adımında su ile karşılaşması durumunda göstereceği şişme eğilimini azaltmıştır. Daha küçük gerilme seviyelerinde daha yüksek şişme, daha büyük gerilme seviyelerinde ise daha düşük şişme eğilimi belirlenmiştir.

Dolgu zeminin sabit bir yük altında uzun süreli bekletilmesi durumunda hacimsel şekil değiştirme hızı ( $\epsilon_v$ ) ile hacimsel şekil değiştirme değerleri ( $\epsilon_v$ ) incelenmiştir. Hacimsel şekil değiştirme hızının ( $\epsilon_v$ )  $10^{-7}$  mertebesine ulaştıktan sonra değişim göstermeyerek sabit kaldığı görülmüştür. Böylece yüksek plastisiteli zemin numunesinde uygulanan gerilme altında mevcut boşluk suyu basınçları sönmüldükten sonra, hacimsel şekil değiştirmelerde artış meydana gelmediği saptanmıştır.

İnce daneli zeminlerin dolgu malzemesi olarak kullanılması durumunda, optimumun ıslak tarafında sıkıştırılan zeminlerin hemen hemen birbirine paralel uzanan danelerden oluştuğu literatürde yer alan çalışmalarda belirlenmiştir. Ayrıca su muhtevastaki bu artış ile zemin daneleri arasında oluşan bir film suyu tabakası nedeniyle, daneler yağlanmakta ve bu durum danelerin birbirine göre

hareketini kolaylaştırarak daha sıkı bir durumda yerleşmelerine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte ulaşılan sınır değerlerden sonra (optimumun ıslak tarafında) zemin içinde artan boşluk suyu basınçları nedeniyle sıkışma miktarı azalmakta ve kuru birim hacim ağırlıklarında dolayısıyla kayma mukavemetinde beklenen artış meydana gelmemektedir. Dolgu yapılan sahaya yakın alanda dolguya uygun malzeme olmaması nedeniyle, bu tip zeminlerin kullanılması gerektiği dolgu tasarımlarında, zeminin yük altında göstereceği hacim değişimi davranışlarının hizmet ömrü boyunca karşılaşılabileceği bütün olasılıklar dikkate alınarak incelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar yüksek plastisiteli kil bir zemin üzerinde yapılan tek boyutlu sıkışma deneylerinden elde edilmiştir. Çok sayıda yüksek plastisiteli zemin üzerinde yapılacak deneysel çalışmalar ile daha genel sonuçlara ulaşılması mümkün olacaktır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Noorany I., Soil Tests for Prediction of One-Dimensional Heave and Settlement of Compacted Fills PanAm Unsaturated Soils GSP 303, 90-99, 2017.
- Mitchell J.K., Fundamentals of Soil Behavior, Second Edition., John Wiley & Sons, New York, New York, 1993.
- Burland J.B., Some Aspects of the Mechanical Behavior of Partly Saturated Soils, Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Butterworth, Sydney, Australia, 1965.
- Miller G.A., Compaction and Volume Change Behavior of Embankment Soil, M.ASCE1, 2017.
- Jennings J.E., The Prediction of Total Heave From The Double Oedometer Test, In Proc. Symposium on Expansive Clays, 7(9), 13-19, 1957.
- Gens A., Alonso E.E., Surlol J., Effect of structure on the volumetric behaviour of a compacted soil. In Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT'95, Paris, 6-8 September 1995. Edited by E.E. Alonso and P. Delage. A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, 83-88, 1995.
- Alonso E.E., Vaunat J., Gens A., Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. Engineering Geology, 54: 173-183. doi:10.1016/S0013-7952(99)00079-4, 1999.
- Xue Q., Wan Y., Chen Y. J., Zhao Y., Experimental research on the evolution laws of soil fabric of compacted clay liner in a landfill final cover under the dry-wet cycle. Bull. Eng. Geol. Environ., 73(2), 517-529, 2014.
- Nowamooz H., Jahangir E., Masrouri F., Tisot J. P., Effective stress in swelling soils during wetting drying cycles." Engineering Geology, 210, 33-44, 2016.
- Alonso E. E., Pinyol N. M., Gens A., Compacted soil behaviour: Initial state, structure and constitutive modelling. Géotechnique, 63(6), 463-478, 2013.
- Cui Y. J., Yahia-Aissa M., Delage P., A model for the volume change behavior of heavily compacted swelling clays. Engineering Geology, 64(2), 233-250, 2002.
- Gunduz Z., Arman H., Compression and Recompression Indices of a High Plasticity Clay Consolidated Under Isotropic Stresses, Kuwait J. Sci. Eng.34 (1B)19-34, 2007.
- VandenBerge D. R., Brandon T. L., Duncan J. M., Triaxial Tests on Compacted Clays for Consolidated Undrained Conditions, Geotechnical Testing Journal, 37, No.4/JULY 2014, DOI: 10.1520/GTJ20130202, 2014.
- Boone M., M. ASCE, P.E., P.G., Donald Gerken, M. ASCE, P.E., G.E., Moisture Content and Relative Compaction Influences on Swell Potential and Strength of a Compacted Residual Soil, IFCEE 2015, GSP 256, 2015.
- Taslak H.B., Sıkıştırılmış Kil Dolguların Kayma Mukavemeti ve Sıkışabilirlik Parametrelerinin Belirlenmesi, Master Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
- Azzouz A.S., Krizek R.J, Corotis R.B., Regression Analysis of Soil Compressibility, Soils and Foundations, 16 (2), 19-29, 1976.
- Holtz D.R, Kovacs W.D. ve Sheahan T.C., An Introduction Geotechnical Engineering, Second Edition.
- Das M. Braja. Principles of Geotechnical Engineering, Seventh Edition, Oxford University Press, New York, 2015.
- Yurtcu Ş., Özocak A., Prediction of compression index of fine-grained soils using statistical and artificial intelligence methods, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 597-608, 2016.

