

## Kumlu Kil - Çimento Karışım Oranlarının Dayanım Özelliklerinin Araştırılması

Kaveh Dehghanian<sup>1\*</sup> , Hülya İnan<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Dr. Öğretim Üyesi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat mühendisliği bölümü İstanbul, Türkiye.

<sup>2</sup> Yüksek Mühendis, İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat mühendisliği bölümü İstanbul, Türkiye.

\*kavehdehghanian@aydin.edu.tr

### Özet

Zemin iyileştirme teknikleri arasında çimento en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bu çalışmada %30 kum ve %70 kil karışımına farklı yüzdelerde çimento eklenerek bu karışım oranlarının mekanik özellikleri araştırılmıştır. Deneylerde, kaolin kil, portland çimentosu CEM-I (42.5) ve kum kullanılmıştır. İlk aşamada %70 oranında kaolin kil ve %30 oranında kum kullanılarak özgül ağırlık deneyi, elek analizi deneyi, kıvam limitleri deneyi ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Elde edilen değerler üzerine konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyleri (UU) yapılmıştır. İkinci aşamada %70 kaolin kil ve %30 kum oranlarından eşit miktarda düşürülerek %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento eklenerek 1 günlük ve 7 günlük numunelere konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda içsel sürtünme açısının çimentoya bağlı olarak belirli bir yüzdeye kadar arttığı daha sonra düştüğü görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Kaolin kil, portland çimentosu, konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyi, kompaksiyon

## Investigation of Strength Properties of Sandy Clay-Cement Mixing Ratios

### Abstract

Among the soil improvement techniques, cement is one of the most prevalent methods. In this study, the mechanical properties of these mixture ratios are investigated by adding cement to 30% sand and 70% clay mixture. In the experiments, kaolin clay, portland cement and sand have been used. In the first stage, specifications of 70% kaolin clay and 30% sand are tested by using specific gravity test, sieve analysis test, Atterberg limit and compaction tests. Undrained Unconsolidated triaxial compression tests (UU) were performed in this study. In the second stage, 70% kaolin clay and 30% sand mixtures were added by 5%, 10%, 15% and 20% portland cements and the samples were tested in 1-day and 7-day curing period. As a result of the experiments, it has been observed that the internal angle of friction is increased up to a certain percentage depending on the cement content.

**Keywords:** Kaolin clay, Portland cement, unconsolidated-undrained triaxial pressure test, compaction

## 1. GİRİŞ

İnşaat projelerinde yapıların taşıyıcı tabakasının temeller altındaki zemin olduğu bilinmektedir. Yapı temelleri altındaki zeminin her zaman projeye uygun özelliklerde olmadığı görülmekte ve bu durumlarda zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmaktadır. Tarihte bilinen eski Venedik kentinde yapılan yapıların, Osmanlılar döneminde deniz kıyısında yapılan Yeni Cami ya da Haydarpaşa Tren İstasyonu gibi yapıların mevcut zemin şartlarının elverişsiz olmasından dolayı, ahşap kazıklar üzerine inşa edildiği bilinmektedir. Çin’de M.Ö. 600’lerde zemin içerisine açılan kuyuları sönmemiş kireçle doldurarak, eski Roma’da karayolları yapımında killi zeminleri puzolan ve kireçle stabilize ederek zemini iyileştirmişlerdir. Çimento katkısı ile zemin iyileştirme yöntemi Amerika’da eyalet karayollarının 1920 tarihinde yaptıkları çalışmalara kadar uzanmaktadır. Endüstrinin zamanla gelişmesi Türkiye koşullarında da uygun hale getirmiştir çimento ile stabilizasyon. İlk olarak 1920’li yıllarda Türkiye’de Karl Terzaghi tarafından geliştirilmeye başlanan ve günümüzde olabildiğince gelişmiş durumda olan zemin mekaniği bilim dalı inşaat mühendisliği bakımından oldukça büyük bir öneme sahiptir. Proje sahası zemin özellikleri mühendislik bakımından yapılacak uygulamaya elverişli olmayabilir. Bu tarz durumlarda karşılaşıldığında, proje sahası değiştirilme olanağı yoksa zemin mekaniği, zeminlerin mühendislik davranışını geliştirme ve iyileştirme ile ilgili birçok çözüm sunmaktadır [1].

Literatürde çimento ve kil karışımları üzerine yapılmış çalışmalar mevcuttur. Bunlardan Kılıç (2008) çalışmalarında, İngiltere’de üç farklı bölgede yer alan West Ashling, Hamble ve Emsworth killerinin geoteknik özelliklerini inceleyerek, bu killerin çimento ile stabilizasyonunu deneysel olarak araştırmıştır. Çimento ile iyileştirmenin incelenen killerin mukavemeti üzerindeki etkisini inceleyebilmek amacıyla laboratuvarda katkısız ve %6, %10 ve %15 çimento eklenerek hazırlanmış çimento katkılı numuneler üzerinde Veyn ve üç eksenli basınç deneyleri, %20 ve %25 çimento katkılı numunelerde ise 7, 14 ve 28 günlük bekleme süreleri sonunda serbest basınç deneyleri yapmıştır. Çimento katkılı kil numuneler üzerinde laboratuvarda üç farklı hücre basıncı altında gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin de artan çimento yüzdesi ile birlikte arttığı görülmüştür [1].

Zemin özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılacak yöntemler mekanik, hidrolik, fiziksel ve kimyasal ve ekleme- çıkarma yöntemlerine bölünebilir [2,3]. Mekanik yöntemlerinde, yüzeydeki zemin tabakalarının statik, titreşimli ya da titreşimli tabakalarla sıkıştırılması, zeminlerin derinde titreşimle sıkıştırılması yöntemleri mekanik iyileştirmeyi oluşturur. Drenler veya kuyular yardımı ile boşluk suyu basıncının düşürülerek kayma dayanımını arttırmayı amaçlayan iyileştirme yöntemleri hidrolik iyileştirmeye girmektedir. Fiziksel ve kimyasal iyileştirmede yüzeysel zemin tabakalarında katkıların fiziksel olarak karışımı, katkıların derinde kolonlar teşkil edecek şekilde karıştırmak yolu ile yapılabilir. Ekleme-sınırlama ile iyileştirmede fiberler, şeritler, donatılar ve hasırların zemine yerleştirilmesi ile zemin kütlesi dayanımı arttırılmaktadır. Zemin çivileri ve ankraj yerleştirilecek zeminin donatılandırılması ekleme ile yapılan iyileştirmedir [4].

### 1.1 Konsolidasyon

Zemin taşıma gücünün yerinde belirlenmesi için plaka yükleme deneyi yapılmaktadır. Ancak, aynı durumu laboratuvarda arazi koşullarına uygun şartlar altında incelemeye yarayan bir deney yöntemi bulunamamıştır. Zemindeki deformasyon davranışını (oturma ve şişme) belirlemek amacıyla zemin mekaniğinde yapılan laboratuvar deneylerinden ödometre deney ile belirli bir çapa sahip numunenin yanal hareketi engellenerek düşey doğrultuda yüklemek ve numunenin tek boyutlu konsolidasyon davranışını incelemek mümkündür. Terzaghi (1925), bir boyutlu konsolidasyon teorisi için varsayımlar yapmıştır [5].

Konsolidasyon teorisinde iki-yönlü drenaj söz konusudur. Kil tabakası homojen ve suya doygunudur. Gerilme aralığı boyunca hacimsel sıkışma katsayısı ve permeabilite katsayısı sabittir. Bu durumda, Darcy yasası geçerlidir. Boşluklardan suyun çıkması nedeniyle oluşan, hacimdeki değişiklikler zemin tabakasının sıkışmasına sebep olur. Yük uygulama yönünde küçük deformasyonlar ortaya çıkar. Diferansiyel zemin elemanından drene olan suyun hacmi ve elemandaki su akışının sürekliliği ile konsolidasyon denklemi elde edilebilir. Su sıkışmadığından dolayı, elemana giren ve çıkan su miktarı arasındaki fark hacim değişimini verir [5].

### 1.1.1 Oturma

Zemin özellikleri, yükleme şekli, zemin tipi gibi faktörler bir temelin ya da yapının oturmasına neden olmaktadır. Bir temel, rijit ya da esnek olabilir. Temel türüne bağlı olarak; gömülme derinliği, temel şekli ve temel aralığı değişebilir. Temel üzerinde olan yükler hareketli ya da sürekli olabilmektedir.

Yapı çeşidine bağlı olarak, yükleme şekli farklılık gösterir. Yapı inşasından kaynaklanıyorsa zemine gelecek yükleme, kalıcı yüklemidir. Şayet bir depolama tankında ya da su deposundaydı, yükleme, tanktaki sıvının veya suyun seviyesine bağlı değişebilmektedir. Zeminine geçiş yapan bu yük hareketlidir. Benzer olay, rezervuardaki su seviyesi değişimine göre baraj temel zemininde geçerlidir.

Zeminde kırılma oluşmamasına ve kırılmaya karşı emniyetli olması için temeller yeterli olmazlar. Ayrıca, oluşabilecek oturmaların, yapıya zarar vermemesi gerekir. Yani, oturma veya oturma farklarının, belli oturma değerlerini aşmaması gerekir. Kabul edilebilir oturma değerleri aşıldığı takdirde, yapılarda çatlaklar, ağır hasarlar, hatta yıkılmalar bile olabilir. Yapılarda bulunan hasar ya da göçme sebeplerinin başında, oturmalar, özellikle de farklı oturmalar gelmektedir

Oturmaya, çeşitli nedenler yol açar. Zeminin yüklenmesi, yer altı su seviyesinin düşmesi, daneli zeminlerde oluşan titreşimler, mevcut temelin altındaki zemin durumunun bozulması, yeraltındaki boşluğun oluşması, mağara, tünel, galeri vb. çökmesi, yeraltı su akımlarının sebep olduğu erozyon, toprak kayması, temel elemanlarının zarar görmesi, donma-çözülmeden kaynaklanan şişme potansiyelin artması, zeminde oluşabilecek kimyasal reaksiyonlar vb. Oturmaya neden olabilir, kohezyonsuz zeminlerde, oturma, kısa zamanda gerçekleşir. Yük temele uygulandığı gibi oturma kısa zamanda olur [6].

## 2. MALZEME VE METOD

Bu çalışmada kaolin kil, kum ve Portland çimentosu CEM-I (42.5) kullanılmıştır. Kullanılan bu malzemeler üzerine; tane yoğunluğu deneyi (özellik ağırlık deneyi), dane çapı dağılımı (granülometri) deneyi (elek analizi deneyi), atterberg deneyi (kıvam limitleri deneyi), standart proktor (kompaksiyon) deneyi ve tek boyutlu konsolidasyon deneyi yapılmıştır.

### 2.1 Tane Yoğunluğu Deneyi (Özellik Ağırlık Deneyi)

Özellik ağırlık deneyi TS 1900-1'e göre gerçekleştirilmiştir. Amaç, ince taneli olan kum+kil malzemesinin bağıl yoğunluğunun ölçülmesidir. İki numune üzerinde aynı deney yapılmıştır ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Deneyin yapım aşamaları şekil 1'de gösterilmiştir. Numune özellik ağırlık deneyi sonuçları numune 1 ve numune 2 için sırasıyla tablo 1 ve tablo 2'de gösterilmiştir. Daha sonra ortalama özellik ağırlık, formül (1) de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

1. numune = 109.74 gram (%30 kum + %70 kil)

2. numune = 109.90 gram (%30 kum + %70 kil)



Şekil 1. Özgül Ağırlık deney yapım aşaması

Tablo 1. Numune özgül ağırlık deneyinin sonuçları

1. NUMUNE	
Piknometrenin kütlesi , $m_0$ (gr)	363,500
Kontrol sıvısı ile dolu piknometrenin kütlesi , $m_1$ (gr)	1359,430
Kuru Numune ile Birlikte Piknometrenin Kütlesi , $m_2$ (gr)	467,540
Kuru Numune ve Kontrol Sıvısı ile Dolu Piknometrenin Kütlesi , $m_3$ (gr)	1423,62
Deney Numunesinin Kuru Kütlesi ( $m_4$ )= ( $m_2-m_0$ ) (gr)	104,04
Kontrol Sıvısının m1 kütlesinin belirlendiği sıcak. yoğunluğu ( $p_{L1}$ )	0,99802
Kontrol Sıvısının m3 kütlesinin belirlendiği sıcak. yoğunluğu ( $p_{L3}$ )	0,99802
Zemn Danelerin Yoğ. ( $Mg/m^3$ ) $P_s = ((m_4) / ((m_1 - m_0) / p_{L1} - (m_3 - m_2) / p_{L3})) * 10^9$	2,606

Tablo 2. Numune özgül ağırlık deneyinin sonuçları

2. NUMUNE	
Piknometrenin kütlesi , $m_0$ (gr)	363,430
Kontrol sıvısı ile dolu piknometrenin kütlesi , $m_1$ (gr)	1359,700
Kuru Numune ile Birlikte Piknometrenin Kütlesi , $m_2$ (gr)	467,330
Kuru Numune ve Kontrol Sıvısı ile Dolu Piknometrenin Kütlesi , $m_3$ (gr)	1422,91
Deney Numunesinin Kuru Kütlesi ( $m_4$ )= ( $m_2-m_0$ ) (gr)	103,90
Kontrol Sıvısının m1 kütlesinin belirlendiği sıcak. yoğunluğu ( $p_{L1}$ )	0,99802
Kontrol Sıvısının m3 kütlesinin belirlendiği sıcak. yoğunluğu ( $p_{L3}$ )	0,99802
Zemn Danelerin Yoğ. ( $Mg/m^3$ ) $P_s = ((m_4) / ((m_1 - m_0) / p_{L1} - (m_3 - m_2) / p_{L3})) * 10^9$	2,548

$$G_s = (G_{s1} + G_{s2}) / 2 = (2,606 + 2,548) / 2 = 2,577 \text{ (Mg/m}^3\text{)} \quad (1)$$

Kil + kum karışım oranının özgül ağırlığı 2,58 Mg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.

## 2.2 Dane Çapı Dağılımı (Granülometri) Deneyi (Elek Analizi Deneyi)

Bu metotla, bir zemindeki ince kum boyutunda ve daha iri danelerin dane çapı dağılımları belirlenip; zemindeki kil ve siltin toplam miktarı da bu deney sonuçlarından hesaplanmaktadır. Tablo 3`de TS 14688-1 göre dane boyut kriterleri verilmiştir. Deneyde, 500,72 g (%30 kum + %70 kil) kum + kil numunesi kullanılmıştır.

Tablo 3. TS 14688-1'e göre malzeme aralıkları

Malzeme	Aralık	TS 14688-1
çakıl	$2,0 < t_b \leq 63$	
kum	$0,063 < t_b \leq 2,0$	
silt	$0,002 < t_b \leq 0,063$	
kil	$t_b \leq 0,002$	



Şekil 2. Elek Analizi deneyinin yapım aşaması

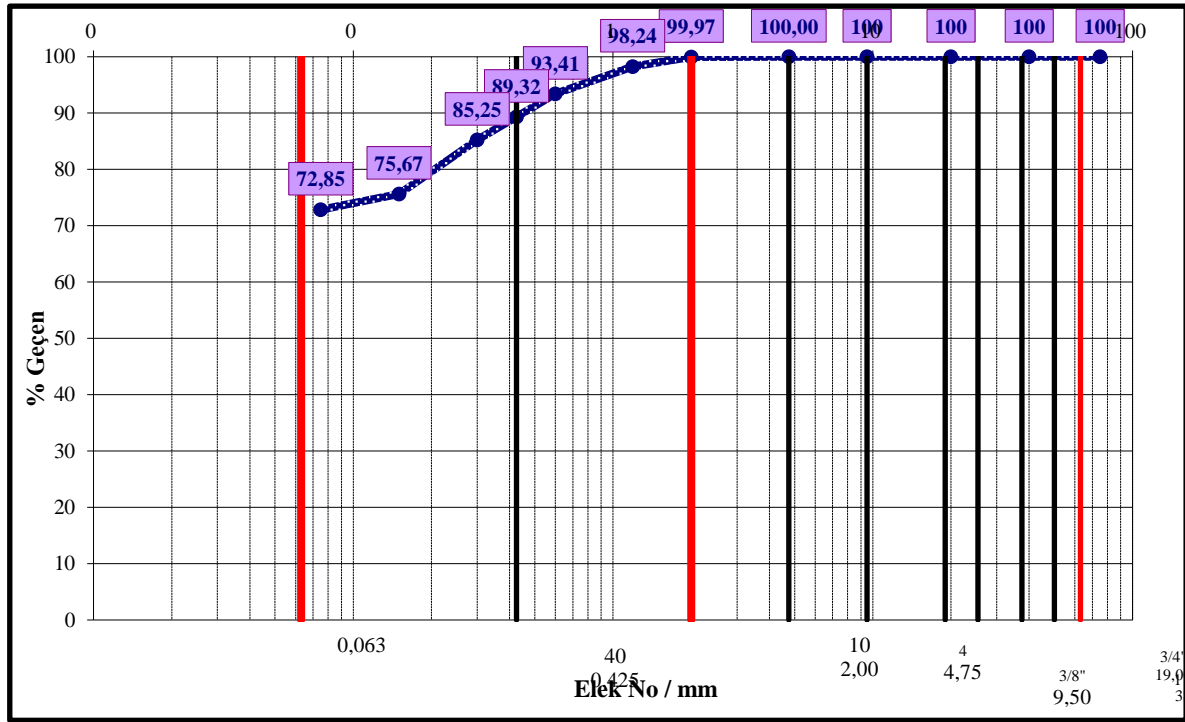
Elek analizi yıkamalı şekilde TS 1900-1'e göre yapılıp ve yıkamadan sonra mevcut malzemenin ağırlığı ve tane boyutları tablo 4 ve tablo 5 de gösterilmiştir. Şekil 3 araştırmada kullanılan kumlu malzemenin dane boyu dağılımını göstermektedir. Grafik sonucu kum miktarı 27,18 (%), kil miktarı 72,82 (%) olarak elde edilmiştir.

Tablo 4. Yıkamalı eleme sonucu kum miktarı

Kuru Numune Ağırlığı	500,72	Kum + Kil
Yıkamadan Sonraki Kuru Numune Ağırlığı	140,34	Kum

Tablo 5. Elek serisinden eleme sonucu elde edilen sonuçlar

ELEK NO	ELEKTE KALAN (gr)	TOPLAM KALAN (gr)	TOPLAM GEÇEN (gr)	TOPLAM GEÇEN (%)	ELEK AÇIKLIĞI (mm)
3"	0,00	0,00	500,7	100	75
1,5"	0,00	0,00	500,7	100	40
	0,00	0,00	500,7	100	20
	0,00	0,00	500,7	100	9,5
4	0,00	0,00	500,72	100,00	4,75
10	0,16	0,16	500,56	99,97	2
	8,65	8,81	491,91	98,24	1,19
	24,18	32,99	467,73	93,41	0,600
40	20,50	53,49	447,23	89,32	0,425
	20,38	73,87	426,85	85,25	0,300
	47,96	121,83	378,89	75,67	0,150
#200	14,10	135,93	364,79	72,85	0,075
PAN	2,57				



Şekil 3. Eleme sonucu elde edilen değerlerin grafikte gösterimi

### 2.3 Atterberg Deneyi (Kıvam Limitleri Deneyi)

Likit limit, zeminin, plastik durumdan akıcı duruma geçtiği andaki su muhtevasıdır. Bu deneyde Casagrande likit limit aletinde 25 vuruşa denk gelen 13 mm'lik kapanma likit limiti vermektedir [7]. Kurumakta olan bir zeminin plastik limit deneyiyle ölçülen, plastiklik özelliğini yitirdiği andaki su muhtevası plastik limiti verir. Bu deneylerden daha doğru ve kesin bir sonuç alabilmek için deney 3 defa tekrarlanıp çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır.



Şekil 4. Likit limit ve plastik limit deneyi

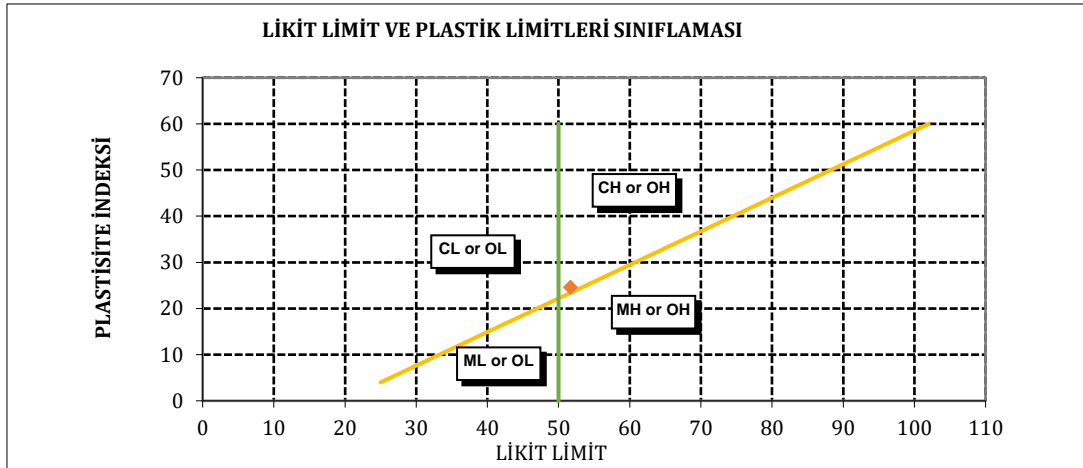
Aşağıdaki tablo ve grafiklerde yapılan üç deneyden 3.deneyin likit limit ve plastik limit deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 6. Likit limit 3.deney sonucu elde edilen veriler

LİKİT LİMİT					
Kap No	Kap Ağırlığı (gr)	K+ Islak Zemin (gr)	Kap+ Kuru Zemin (gr)	Su Muhtevası (%)	Vuruş Sayısı
L12	69,25	96,07	86,79	52,92	26
L11	56,25	83,66	74,21	52,62	35
L10	55,25	83,98	73,88	54,21	20
L9	56,63	84,40	74,88	52,16	33
L8	53,35	79,23	70,15	54,05	21

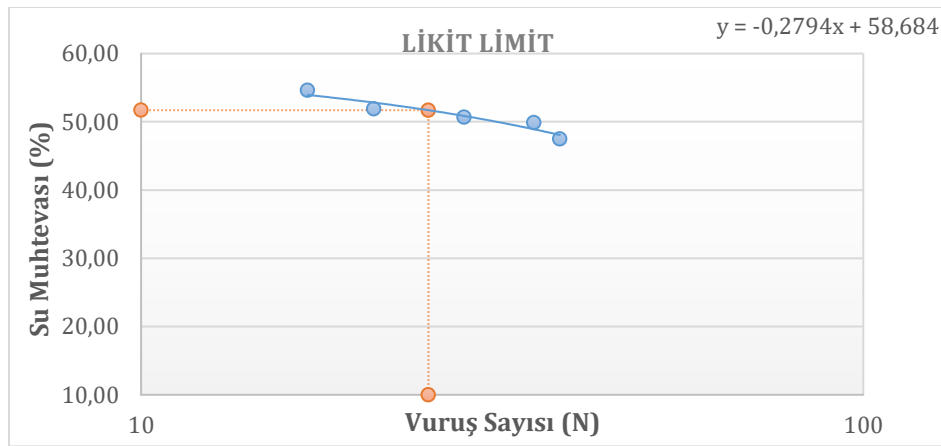
Tablo 7. Plastik limit 3.deney sonucu elde edilen veriler

PLASTİK LİMİT				
Kap No	Kap Ağırlığı (gr)	K+ Islak Zemin (gr)	Kap+ Kuru Zemin (gr)	Plastik Limit
L6	57,84	84,37	78,95	25,68
L5	54,01	85,25	79,12	24,41
L4	60,05	86,11	80,78	25,71



Şekil 5. Likit limit ve plastik limitleri 3. deney sonuçlarına göre sınıflandırma grafiği

Şekil 5 ve şekil 6 da görüldüğü likit limit ve plastik limit birleşim noktasının CH bölgesinde olduğu görülmüştür. Aşağıda son olarak 25 vuruşa denk gelen optimum su muhtevasının likit limit değerini veren grafik çizilmiştir. Plastisite indisi formül (2) de gösterildiği gibi, likit limit ve plastik limitin farkını göstermektedir.



Şekil 6. 3. deney sonucu likit limit değeri

Tablo ve grafiklerden alınan verilere göre plastisite indisi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

Plastisite indisi ( $I_p$ ) = Likit limit ( $w_L$ )- Plastik limit ( $w_p$ )

$$I_p = w_L - w_p$$

(2)



Likit limit ve plastik limit deneyleri 3'er defa tekrarlanmıştır. Yapılan üç deneyde de çıkan sonuçların birbirine çok yakın değerler olduğu görülmüştür. Aşağıdaki tablolarda yapılan üç deneyin likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve zemin grupları verilmiştir.

Tablo 8. 1,2 ve 3. deney sonuçlarına göre plastisite indisi ve zemin grubu

SONUÇLAR-1		SONUÇLAR-2		SONUÇLAR-3	
LİKİT LİMİT	51,70	LİKİT LİMİT	50,86	LİKİT LİMİT	53,44
PLAS. LİMİT	27,09	PLAS. LİMİT	24,21	PLAS. LİMİT	25,27
I <sub>p</sub> :	24,61	I <sub>p</sub> :	26,65	I <sub>p</sub> :	28,17
ZEM.GRUBU	CH	ZEM.GRUBU	CH	ZEM.GRUBU	CH

Tablo 9. 1,2 ve 3. deney sonuçlarına göre ortalama plastisite indisi ve zemin grubu

ORTALAMA SONUÇLAR	
LİKİT LİMİT	52,00
PLAS. LİMİT	25,52
I <sub>p</sub> :	26,47
ZEM.GRUBU	CH

Deney sonucunda alınan değerlerin ortalamasına göre zemin grubu yüksek plastisiteli kil (CH) olarak belirlenmiştir.

#### 2.4 Standart Proktor (Kompaksiyon) Deneyi

Bu deneyde, belirli bir metotla sıkıştırılmış zemindeki maksimum kuru birim hacim ağırlığı veren su muhtevası bulunmuştur. Belirli bir mekanik enerji uygulayarak sıkıştırılan zeminde, maksimum kuru birim hacim ağırlığı sağlayan su muhtevası, optimum su muhtevasıdır [6].

Deneyde %70 oranında kil + %30 oranında kum olmak üzere toplam 5000 kg numune hazırlanmıştır. 2,5 kg'lık tokmak kullanılıp 25 vuruşlu darbe uygulanmıştır. Deney 5 adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda numune miktarının %4' ü kadar su katılmıştır. Sırasıyla %8, %12, %16 ve %20 oranında su katılmıştır. %20 de optimum su muhtevasına ulaşılmıştır.





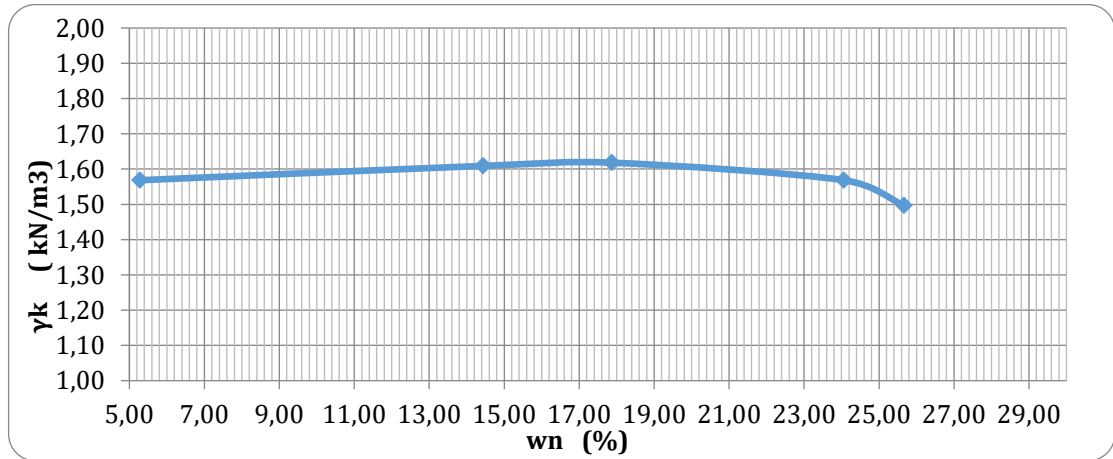
Şekil 7. Standart proktor deneyi fotoğrafları

Tablo 10. Kompaksiyon deneyi sonucu kuru birim hacim ağırlık değerleri

			Kuru Birim Hacim Ağırlık ( $\gamma_k$ ) (gr/cm <sup>3</sup> )				
			1	2	3	4	5
Kalıp	+	Numune	3396,3	3575,6	3638	3542	3516
Ağırlığı (g)							
Sıkıştırılmış		Numune	1558,8	1738,1	1800,5	1704,5	1678,5
Ağırlığı (g)							
Yaş Birim		Hacim	1,651	1,841	1,907	1,806	1,778
Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )							
$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )			1,568	1,609	1,618	1,569	1,497

Tablo 11. Kompaksiyon deneyi sonucu su muhtevası değerleri

Su Muhtevası (%) ( $w_n$ )					
Kap No	1	2	3	4	5
Yaş Numune + Kap (g)	166,18	190,62	138,4	173,56	156,64
Kuru Numune + Kap (g)	160,46	173,31	125,32	151,54	136,49
Su Ağırlığı (g)	5,72	17,31	13,08	22,02	20,15
Kap Ağırlığı (g)	52,11	53,33	52,11	60	57,96
Su Muhtevası (%)	5,28	14,43	17,87	24,06	25,66



Şekil 8. Standart proktor deney sonuçlarının grafikte gösterimi

Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık ( $\gamma_k$ ) 1,62 gr/cm<sup>3</sup> ve Optimum Su Muhtevası ( $w_n$ ) % 17,9 değerleri bulunmuştur. Laboratuvar ortam koşulları göz önünde bulundurularak deneylerde kullanılan su muhtevası değeri %20 olarak kabul edilmiştir.

## 2.5 Tek Boyutlu Konsolidasyon Deneyi

Bu deney, yanal deformasyonu önlenmiş olan suya doymuş zemin numunesinin alt ve üst yüzeyinden drenajı sağlanıp aksel ve düşey basınç altında sıkışma hızı ve miktarının ölçülmesini kapsar [7]. Yapılan çalışmada 5 set olmak üzere toplam 15 adet konsolidasyon deneyi yapılmıştır. 1. aşamada %70 kil ve %30 kum karıştırılarak 1 set toplamda 3 deney yapılmıştır. 2. aşamada %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento eklenerek 4 set toplamda 20 deney yapılmıştır. Eklenen çimento oranı kil ve kum oranından eşit miktarda malzeme düşürülerek eklenmiştir.



Şekil 9. Konsolidasyon deneyi

Konsolidasyon deneylerinde ilk basınç 1 kg ağırlıkla başlanmıştır. Sırasıyla 2, 4, 8, 16, 32 ve 64 kg' a kadar çıkartılmıştır. Yani bir önceki basıncın 2 katı olacak şekilde yapılmıştır. Yükler yükleme kademelerine uygun olarak 24 saatte bir yüklemeyle yapılmıştır. Uygulanmış en yüksek konsolidasyon basıncı (64 kg) altındaki gösterge okumaları tamamlandıktan sonra, yükler yükleme kademelerine uygun olarak 24 saat arayla boşaltılmıştır. Boşaltma işlemine 64 kg'la başlanıp 16, 4 ve 1 kg' a kadar devam edilmiştir. Yani boşaltma, bir önceki basıncın dörtte biri olmak üzere yapılmıştır. Her yük boşaltmalarında okumalar alınarak kaydedilmiştir. 5 set, 15 adet konsolidasyon deneylerinden her setten 1 numunenin hesap sonuçlarının verildiği tablolar aşağıda gösterilmiştir. Tablolarda boşluk oranı ( $e$ ), sıkışma katsayısı ( $m_v$ ), konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ), oturma zamanını veren  $t_{90}$  ve oturma miktarı ( $H$ ) değerleri verilmiştir. Farklı kil ve kum karışımından yapılan konsolidasyon deneylerinin sonuçları 12-16 tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 12. %70 kil + %30 kum karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları

%70 KİL + %30 KUM												
Yük	Basınç, $\sigma'$		H	H <sub>0</sub>	e	e ortalama	$\Delta e$	$\Delta \sigma$	$a=\Delta e/\Delta \sigma$	$m_v$	$t_{90} (dk)$	$C_v^{(*)}$
kg	kg/cm <sup>2</sup>	kPa	mm	mm	-	e ort	-	kpa	m <sup>2</sup> /kN	m <sup>2</sup> /kN	dk	(mm <sup>2</sup> /dk)
0	0	0	20,00	12,925	0,547	0,547	0	0	0	0		
1	0,52	51	20,60	12,925	0,594	0,571	-0,046	51	-0,000914	-0,000302	12,25	0,07444187
2	1,04	102	20,50	12,925	0,586	0,590	0,008	51	0,000152	0,000050	12,25	0,07358293
4	2,07	203	20,17	12,925	0,561	0,573	0,026	102	0,000251	0,000166	12,25	0,07198586
8	4,14	406	19,66	12,925	0,521	0,541	0,039	203	0,000194	0,000261	12,25	0,06941499
16	8,28	813	19,07	12,925	0,475	0,498	0,046	406	0,000112	0,000311	12,25	0,06613597
32	16,6	1625	18,45	12,925	0,427	0,451	0,048	813	0,000059	0,000337	12,25	0,06247099
64	33,1	3251	17,73	12,925	0,372	0,400	0,056	1625	0,000034	0,000406	12,25	0,05836693
16	8,28	813	18,65	12,925	0,443	0,407	0,071	2438	0,000029	0,000516	12,25	0,05836693
4	2,07	203	18,95	12,925	0,466	0,455	0,023	610	0,000038	0,000163	12,25	0,06070350
1	0,52	51	19,41	12,925	0,502	0,484	0,036	152	0,000234	0,000245	12,25	0,06293191

Tablo 13. %67,5 kil + %27,5 kum + %5 çimento karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları

%67,5 KİL + %27,5 KUM + %5 ÇİMENTO												
Yük	Basınç, $\sigma'$		H	H <sub>0</sub>	e	e ortalama	$\Delta e$	$\Delta \sigma$	$a=\Delta e/\Delta \sigma$	$m_v$	$t_{90} (dk)$	$C_v^{(*)}$
kg	kg/cm <sup>2</sup>	kPa	mm	mm	-	e ort	-	kpa	m <sup>2</sup> /kN	m <sup>2</sup> /kN	dk	(mm <sup>2</sup> /dk)
0	0	0	20,00	12,253	0,632	0,632	0	0	0	0		
1	0,52	51	20,53	12,253	0,676	0,654	-0,043	51	-0,000852	-0,000267	9,00	0,10054350
2	1,04	102	20,48	12,253	0,671	0,674	0,004	51	0,000080	0,000025	9,00	0,09966942
4	2,07	203	20,31	12,253	0,658	0,665	0,014	102	0,000137	0,000085	9,00	0,09841360
8	4,14	406	20,05	12,253	0,636	0,647	0,021	203	0,000104	0,000131	9,00	0,09654481
16	8,28	813	19,55	12,253	0,596	0,616	0,041	406	0,000100	0,000258	9,00	0,09325892
32	16,6	1625	18,87	12,253	0,540	0,568	0,055	813	0,000068	0,000361	9,00	0,08850523
64	33,1	3251	18,09	12,253	0,476	0,508	0,064	1625	0,000039	0,000431	9,00	0,08269660
16	8,28	813	18,18	12,253	0,484	0,480	0,007	2438	0,000003	0,000051	9,00	0,08269660
4	2,07	203	18,45	12,253	0,506	0,495	0,022	610	0,000036	0,000150	9,00	0,08022037
1	0,52	51	18,59	12,253	0,517	0,512	0,011	152	0,000075	0,000077	9,00	0,08081170

Tablo 14. %65 kil + %25 kum + %10 çimento karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları

%65 KİL + %25 KUM + %10 ÇİMENTO												
Yük	Basınç, $\sigma'$		H	H <sub>0</sub>	e	e ortalama	$\Delta e$	$\Delta \sigma$	$a=\Delta e/\Delta \sigma$	$m_v$	$t_{90} (dk)$	$C_v^{(*)}$
kg	kg/cm <sup>2</sup>	kPa	mm	mm	-	e ort	-	kpa	m <sup>2</sup> /kN	m <sup>2</sup> /kN	dk	(mm <sup>2</sup> /dk)
0	0	0	20,00	12,891	0,552	0,552	0	0	0	0		
1	0,52	51	20,50	12,891	0,590	0,571	-0,039	51	-0,000764	-0,000252	12,25	0,07301308
2	1,04	102	20,45	12,891	0,586	0,588	0,004	51	0,000076	0,000025	12,25	0,07269351
4	2,07	203	20,39	12,891	0,582	0,584	0,005	102	0,000046	0,000030	12,25	0,07232156
8	4,14	406	20,23	12,891	0,569	0,576	0,012	203	0,000061	0,000080	12,25	0,07157173
16	8,28	813	19,92	12,891	0,545	0,557	0,024	406	0,000059	0,000158	12,25	0,07011427
32	16,6	1625	19,13	12,891	0,484	0,515	0,061	813	0,000075	0,000413	12,25	0,06668051
64	33,1	3251	18,47	12,891	0,433	0,458	0,051	1625	0,000031	0,000358	12,25	0,06280126
16	8,28	813	18,53	12,891	0,437	0,435	0,005	2438	0,000002	0,000033	12,25	0,06280126
4	2,07	203	18,57	12,891	0,441	0,439	0,003	610	0,000005	0,000022	12,25	0,06038764
1	0,52	51	18,58	12,891	0,441	0,441	0,001	152	0,000005	0,000005	12,25	0,06006518

Tablo 15. %62,5 kil + %22,5 kum + %15 çimento karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları

%62,5 KİL + %22,5 KUM + %15 ÇİMENTO												
Yük	Basınç, $\sigma$		H	H <sub>0</sub>	e	e ortalama	$\Delta e$	$\Delta \sigma$	$a = \Delta e / \Delta \sigma$	$m_v$	$t_{90}$ (dk)	$C_v$ (*)
kg	kg/cm <sup>2</sup>	kPa	mm	mm	-	e ort	-	kpa	m <sup>2</sup> /kN	m <sup>2</sup> /kN	dk	(mm <sup>2</sup> /dk)
0	0	0	20,00	12,196	0,640	0,640	0	0	0	0		
1	0,52	51	20,25	12,196	0,660	0,650	-0,020	51	-0,000404	-0,000127	4,41	0,19819982
2	1,04	102	20,23	12,196	0,659	0,660	0,002	51	0,000032	0,000010	4,41	0,19746841
4	2,07	203	20,16	12,196	0,653	0,656	0,006	102	0,000056	0,000035	4,41	0,19642242
8	4,14	406	20,01	12,196	0,641	0,647	0,012	203	0,000061	0,000076	4,41	0,19444751
16	8,28	813	19,73	12,196	0,618	0,629	0,023	406	0,000056	0,000144	4,41	0,19077296
32	16,6	1625	19,39	12,196	0,590	0,604	0,028	813	0,000034	0,000177	4,41	0,18572231
64	33,1	3251	18,79	12,196	0,541	0,565	0,049	1625	0,000030	0,000321	4,41	0,17763462
16	8,28	813	18,80	12,196	0,542	0,541	0,001	2438	0,000000	0,000005	4,41	0,17763462
4	2,07	203	18,88	12,196	0,548	0,545	0,007	610	0,000011	0,000043	4,41	0,17255114
1	0,52	51	18,93	12,196	0,552	0,550	0,004	152	0,000027	0,000027	4,41	0,17240833

Tablo 16. %60 kil + %20 kum + %20 çimento karışımından yapılan konsolidasyon deneyinin sonuçları

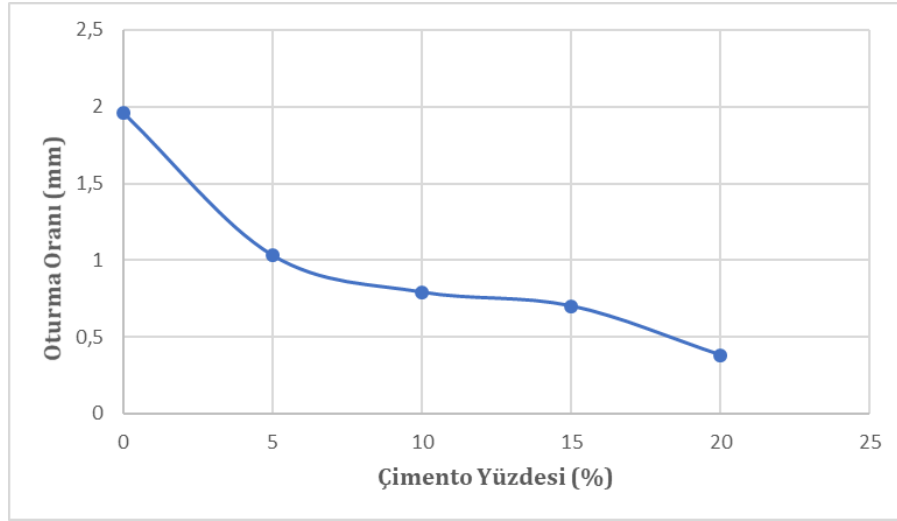
%60 KİL + %20 KUM + %20 ÇİMENTO												
Yük	Basınç, $\sigma$		H	H <sub>0</sub>	e	e ortalama	$\Delta e$	$\Delta \sigma$	$a = \Delta e / \Delta \sigma$	$m_v$	$t_{90}$ (dk)	$C_v$ (*)
kg	kg/cm <sup>2</sup>	kPa	mm	mm	-	e ort	-	kpa	m <sup>2</sup> /kN	m <sup>2</sup> /kN	dk	(mm <sup>2</sup> /dk)
0	0	0	20,00	12,422	0,610	0,610	0	0	0	0		
1	0,52	51	20,07	12,422	0,616	0,613	-0,006	51	-0,000111	-0,000036	1,69	0,50831942
2	1,04	102	20,01	12,422	0,611	0,613	0,005	51	0,000095	0,000031	1,69	0,50529372
4	2,07	203	19,87	12,422	0,599	0,605	0,012	102	0,000115	0,000074	1,69	0,50014570
8	4,14	406	19,80	12,422	0,594	0,597	0,005	203	0,000026	0,000033	1,69	0,49595896
16	8,28	813	19,72	12,422	0,587	0,591	0,007	406	0,000017	0,000044	1,69	0,49175878
32	16,6	1625	19,48	12,422	0,568	0,578	0,019	813	0,000023	0,000122	1,69	0,48385842
64	33,1	3251	19,16	12,422	0,542	0,555	0,026	1625	0,000016	0,000169	1,69	0,47211263
16	8,28	813	19,18	12,422	0,544	0,543	0,002	2438	0,000001	0,000011	1,69	0,47211263
4	2,07	203	19,24	12,422	0,549	0,546	0,005	610	0,000008	0,000032	1,69	0,46557047
1	0,52	51	19,31	12,422	0,555	0,552	0,006	152	0,000037	0,000037	1,69	0,46665955

Çimento yüzdelere göre hazırlanan numunelerin oturma miktarları tablo 17`de verilmiştir. H<sub>ort</sub> değerleri 64 kg yük için hesaplanmıştır. Çimento miktarının artmasına bağlı olarak numunelerdeki oturma değerleri giderek azalmıştır. Çimentosuz karışımda numune boyunun 20 mm`den, 18,04 mm`e düşmüş yaklaşık 2 mm`lik bir kısalma olduğu görülmüştür. %20 oranındaki çimentolu karışımda bu oranın 0,38 mm olduğu görülmüştür.

Tablo 17. Çimento yüzdesine bağlı numune oturma miktarı değerleri

Konsolidasyon Deneyi Oturma Değerleri		
Numune yüksekliği (h) = 20 mm		
Çimento Oranı (%)	1-2-3. Set Ortalama Değerleri	
	Hort (mm)	Oturma (mm)
%0 Çimento	18,04	1,96
%5 Çimento	18,97	1,07
%10 Çimento	19,21	0,79
%15 Çimento	19,30	0,70
%20 Çimento	19,62	0,38

Çimento yüzdesine bağlı numunenin oturma değişimi şekil 10`da gösterilmiştir. Çimento yüzdesi artışı ile beraber numunenin oturması 1,96 mm`den 0,38`e düşmektedir. En düşük oturma miktarı %60 kil ,%20 kum ve %20 çimento karışımında gözükmektedir.

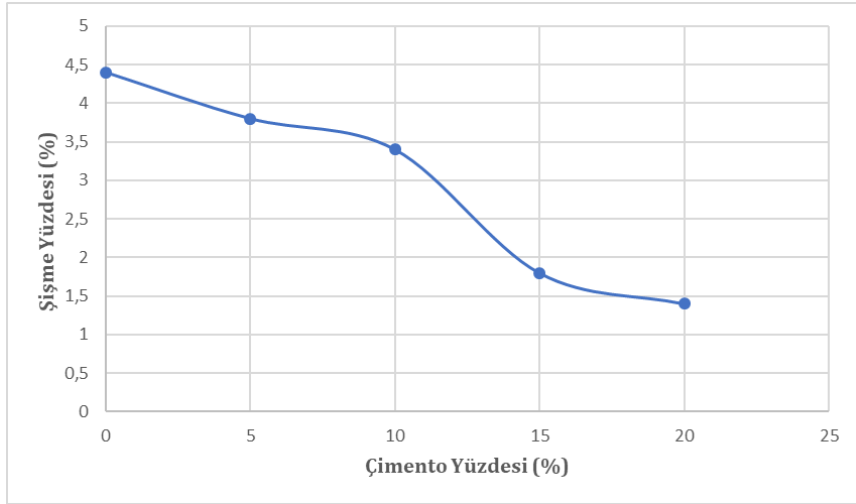


Şekil 10. Çimento yüzdesine bağlı numune oturma miktarı değerlerinin grafikte gösterimi

Killi zeminde şişme potansiyelinin azaltılması çok önem taşımaktadır. Tablo 18`de gösterildiği gibi, %20 çimento numuneye eklenerek, çimentosuz duruma göre, şişme potansiyelini %214 kadar düşürmektedir. Bu düşüş daha iyi bir şekilde, şekil 11`de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi numune çimento miktarı arttıkça şişme oranı giderek azalmıştır.

Tablo 18. Çimento yüzdesine bağlı numune şişme yüzdesi değerleri

Konsolidasyon Deneyi Şişme Değerleri	
Çimento Oranı (%)	1-2-3. Set Ortalama Değerleri
	Şişme (%)
%0 Çimento	4,4
%5 Çimento	3,8
%10 Çimento	3,4
%15 Çimento	1,8
%20 Çimento	1,4



Şekil 11. Çimento yüzdesine bağlı numune şişme yüzdesi değerlerinin grafikte gösterimi

### 3. SONUÇLAR

Bu çalışmada kil+ kum+ çimento karışım oranlarının mekanik özellikleri araştırılmıştır. Birinci aşamada %70 kil ve %30 kum malzemelerinin karışımından yapılan likit limit ve plastik limit deneyleri sonucunda kilin özelliğini koruyarak likit limit ve plastik limit sınıflandırmasında yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında olduğu görülmüştür. Tane yoğunluğu deneyiyle numunenin özgül ağırlığı  $2,58 \text{ Mg/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Standart proktor deneyi sonucu numunenin maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri  $1,62 \text{ gr/cm}^3$ , optimum su muhtevası değeri  $17,9 (\%)$  olarak bulunmuştur. Laboratuvar şartları göz önünde bulundurularak bu değer %20 olarak kabul edilmiştir.

İkinci aşamada optimum su muhtevasında hazırlanan çimentosuz ve çimentolu numunelere tek boyutlu konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Farklı çimento yüzdelere göre hazırlanan numunelerin çimento miktarının artmasına bağlı olarak oturma ve şişme miktarlarında giderek azalma olduğu görülmüştür. %20 oranında eklenen çimento miktarının zemindeki oturma miktarını %9,8'den %1,9'a düşürdüğü görülmüştür. Ayrıca, %20 çimento oranı, numunenin şişme potansiyelini %4,4'den %1,4' de düşürmektedir. Deformasyon davranışının azalmasından ve zemin dayanımının artmasından, çimentonun zeminde iyileştirme yaptığını göstermiştir.

### KAYNAKLAR

- [1] Kılıç, G. (2008). Çimento ile Zemin Stabilizasyonu, Yıldız Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [2] Önalp, A. (2007). Geoteknik Bilgisi 1, Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [3] Mitchell, J.K . Soil improvement, state of the art report. Proceedings of the 10<sup>th</sup> ICSMFE. Stockholm, Vol. 4, pp. 509-565.
- [4] Kumbasar, V., KİP, F. (1999), Zemin Mekaniği Problemleri, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- [5] Holtz, R., Ve Kovacs, W., 1981. Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 07632, U.S.A., 723p.
- [6] Adıyaman, İ., B. (2005), Üç Boyutlu Konsolidasyon Deney Sistemi, İTÜ yüksek lisans tezi, İstanbul.
- [7] TS 1900-1 (2006) İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- [8] Özaydın, K. (2010) Zemin Mekaniği. Birsen Yayınevi, İstanbul.