



T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE LABORATUVAR UYGULAMALARI DERS NOTLARI

Doç. Dr. ZÜLKÜF KAYA
ŞUBAT - 2019

1. LABORATUVAR DENEYİ VE RAPORUN HAZIRLANMASI

Yapı temellerinin inşası ve tasarımında, zemin özelliklerinin iyileştirilmesi veya ortamdan uzaklaştırılmasında, zemin kompaksiyon çalışmalarında şartname ve kalitenin kontrol edilmesi aşamasında fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılan uygun laboratuvar deneyleri çok önemlidir. Unutulmamalıdır ki, doğal zemin katmanı çoğu kez, yüksek derecede homojen olmayan bir yapı gösterir. Zemin katmanlarının fiziksel özellikleri büyük ölçüde, neredeyse birkaç yüz metre içinde değişebilir. Zemin Mekaniğinde geliştirilen temel teorik ve deneysel denklemlerde kullanılan fiziksel parametreler, ancak ve ancak laboratuvarında doğru şekilde değerlendirilirse, pratikte de uygun şekilde kullanılabilir. Bu yüzden, zemin laboratuvar deneylerinin uygulamalarının öğrenilmesi, Geoteknik Mühendisliği'nde önemli bir rol oynar.

EKİPMANLARIN KULLANIMI:

Laboratuvar ekipmanı ucuz değildir fakat fiyatları geniş ölçüde değişebilir. İyi deneysel sonuçlar alabilmek için, ekipman tam anlamıyla sağlanmalıdır. Yük halkaları ve terazi gibi bazı ekipmanların kalibrasyonu zaman zaman kontrol edilmelidir. Bütün ekipmanın hem kullanmadan önce, hem de kullandıktan sonra daima temiz olması gereklidir. Ekipman temiz kullanıldığı takdirde, iyi sonuçlar elde edilebilir. Bu nedenle teçhizat, daima bize aitmiş gibi korunmalıdır.

VERİLERİN KAYDEDİLMESİ:

Herhangi bir deneyde, bütün verileri, alındıktan hemen sonra, uygun tabloya kaydetmek iyi bir alışkanlıktır. Çoğu kez, öğrenciler, okunaksız veya kaybolabilen müsvedde kağıtlar üzerine karalama yaparlar. Bu, yanlış sonuçlar elde etmeye ve deneyin tekrarlanmasına yol açabilir.

RAPORUN HAZIRLANMASI:

Sınıf çalışmaları için, burada tanımlanan çoğu deneyin, küçük gruplar içinde yürütülmesine ihtiyaç olabilir. Ancak rapor, her bir öğrenci tarafından, bireysel olarak yazılmış olmalıdır. Bu, öğrenciler için, teknik yazımda becerilerini geliştirmenin bir yoludur. Her bir rapor aşağıdaki bilgileri içermelidir:

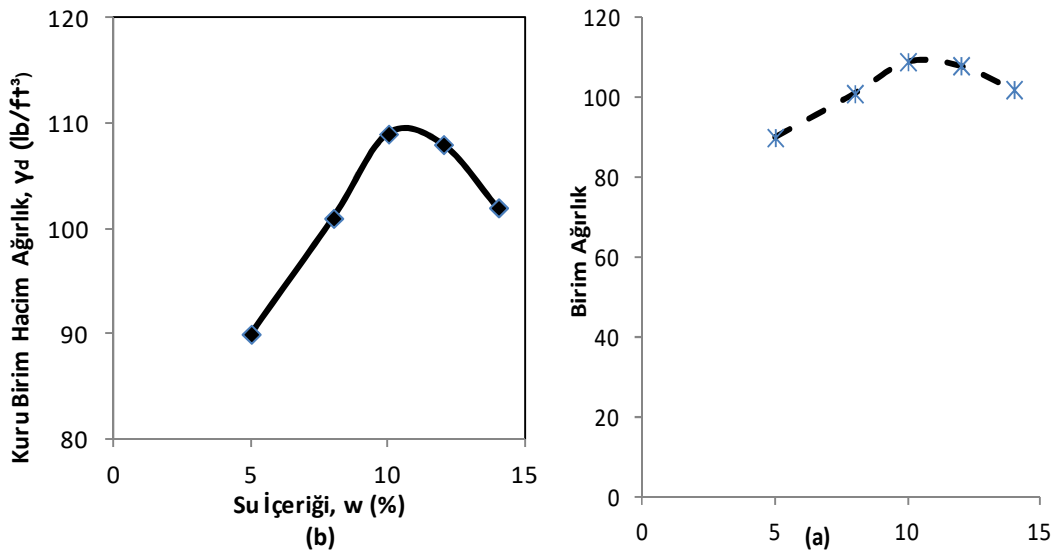
1. Kapak sayfası – Deneyin başlığını, adını ve deneyin yapıldığı tarihi içermelidir.
2. Kapak sayfasından sonra, aşağıda listelenen maddeler, raporun bütünü içinde sunulmalıdır.
 - (a) Deneyin amacı
 - (b) Kullanılan ekipman
 - (c) Kullanılan ana ekipmanın şematik diyagramı
 - (d) Deney işleminin özet olarak tanımı.
3. Sonuçlar – Bu rapor deney föylerini, örnek hesaplamaları ve istenilen grafikleri kapsamalıdır.
4. Karar – Deney yönteminin doğruluğu ile ilgili bir tartışma herhangi bir muhtemel hata kaynakları ile birlikte bu kısımda verilmelidir.

RAPOR İÇİN HAZIRLANAN ÇİZELGELER VE GRAFİKLER ÜZERİNDE YORUMLAR

Grafikler ve çizelgeler mümkün olduğu kadar temiz hazırlanmalıdır. Birimler daima verilmelidir. Grafikler mümkün olduğunca büyük yapılmalı ve uygun bir şekilde sınıflandırılmalıdır. İyi ve kötü çizilmiş grafik örnekleri Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Grafiklerin hazırlanmasında; gerektiğinde Fransız eğrileri ve düz çizgi kullanılmalıdır.

BİRİMLER

Laboratuvar deney sonuçlarının, verilen birim sistemi içinde ifade edilmesi istenmelidir. Amerika’da şu anda, hem İngiliz hem de SI birim sistemi kullanılmaktadır. Birimlerin dönüştürülmesi raporların hazırlanmasında gerekli olabilir.



Şekil 1.1. (a) Su Muhtevası-Kuru Birim hacim ağırlık için kötü çizilmiş grafik
(b) (a)'da verilen sonuçların uygun şekilde çizilmiş hali gösterilmiştir.

Bu ders kapsamında ihtiyaç duyulabilecek standartlar Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 1-1. Bazı Önemli AASHTO ve ASTM Zemin Deney Standartları

Deney İsmi	AASHTO Standardı	ASTM Standardı
Su İçeriği	T-265	D-2216
Elek Analizi	T-87,T-88	D-421
Hidrometre Analizi	T-87,T-88	D-422
Likit Limit	T-89	D-4318
Plastik Limit	T-90	D-4318
Standart Proktor Deneyi	T-99	D-698
Modifiye Proktor Deneyi	T-180	D-1557
Kum Konisiyle Yerinde Yoğunluk Tayini	T-191	D-1556
Konsolidasyon	T-216	D-2435
Serbest Basınç	T-208	D-2166

2. SU MUHTEVASININ BELİRLENMESİ (TS 1900-1/ Mart 2006)

Verilen bir zemin kütlesindeki su ağırlığının katı danelerin ağırlığına oranının yüzde olarak ifadesidir.

Numune : Su muhtevasının belirlenmesinde malzeme genellikle danelerin maksimum boyutuna, mevcut malzeme miktarına bağlıdır ve alınan numune malzemeyi temsil etmelidir. Daha iyi sonuçlar için, malzemeden alınacak olan numune miktarları Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Su Muhtevasını belirlemek için zemin numunelerinin minimum ağırlıkları (ASTM D-2216 ile uyumlu)

Zemindeki Maksimum Dane boyutu (mm)	U.S. Elek No	Zemin numunesinin minimum ağırlığı
0.425	40	20
2	10	50
4.75	4	100
9.5	3/8 in.	500
19.0	3/4 in.	2500

No 4 eleğinden geçen bir malzeme için 100-200 gr

Maksimum dane boyutu No.4-ile 3/4" aralığında değişen malzeme için min. 500 gr

Maksimum dane boyutu 3/4"-1-1/2" aralığında değişen malzeme için min. 1000 gr numune gereklidir.

Ekipmanlar:

➤ **Derece Kontrollü Etüv :** 105-110 °C arasında değişebilir.

Zemindeki organik maddelerin yanmasını önlemek için yüksek sıcaklıklardan kaçınılmalıdır.

➤ **Terazi :** 50 gramdan az ise 0.01 gr hassasiyet
50-500 gr ise 0.1 gr hassasiyet
500 gramdan fazla ise 1 gr hassasiyet

➤ **Numune Kapları :** Kapaklı, dikiş yerleri olmayan alüminyum, cam gibi (korozyona karşı dayanıklı) kaplar tercih edilmelidir. Bunların çeşitli büyüklükleri mevcuttur [örneğin, 2 inç çap ve 7/8 inç yükseklik (50.8 mm çap ve 22.2 mm yükseklik); 3.5-inç çap ve 2 inç yükseklik (88.9 mm çap ve 50.8 mm yükseklik)]

Yöntem :

1. Numune için bütün belirleyici bilgiler kayıt edilmelidir.(Proje, sondaj no, numune no, tarih ve diğer ilgili veriler yazılmalıdır)
2. Deneyde kullanılacak olan kap tartılarak darası belirlenir (W₁). Kap numarası kayıt edilir.

3. Hazırlanan numune kaba konur, yaş numune+kap ağırlığı bulunur (W_2).
4. Numune etüve konur ve tamamen kuruması için yeterli bir zaman beklenir. Temiz kum ve çakıldan oluşan numuneler için minimum 4 saat, diğer çoğu zeminler için minimum 16 saat beklenmelidir. Ancak emniyetli tarafta kalmak açısından bütün numuneler 24 saat etüvde bekletilir. Etüvün sıcaklığı;
Normal zeminler için 105-110 °C
Organik kökenli zeminler için 60 °C
Jipsler için 80 °C olmalıdır.
5. Daha sonra numune etüvden alınır, kuru numune+kap ağırlığı belirlenir (W_3).

Hesaplamalar :

Su Muhtevası, w

$$w(\%) = \frac{(\text{Islak zemin} + \text{Dara}) - (\text{Kuru Zemin} + \text{Dara})}{(\text{Kuru Zemin} + \text{Dara}) - \text{Dara}} * 100 \text{ veya}$$
$$w(\%) = \frac{W_{su}}{W_{Kuru Zemin}} * 100 = \frac{(W_2 - W_3)}{(W_3 - W_1)} * 100$$

şeklinde tanımlanmakta ve genellikle yüzde cinsinden ifade edilmektedir.

GENEL YORUMLAR

- Doğadaki kumlu ve çakıllı olan çoğu doğal zeminler %15-20'e kadar su muhtevasına sahip olabilirler. Doğal ince daneli zeminlerde (siltli veya killi), su muhtevası %50-80'e kadar elde edilebilir. Bununla birlikte %500'e kadar su muhtevasına sahip turba ve organik zeminler çok yaygın değildir.
- Bazı organik zeminler 110 °C de ayrışabilir. Bu nedenle bu sıcaklık, jips (yavaşça dehidrate olan) içeren zeminler için yüksek olabilir. ASTM standardına göre bu tür zeminleri kurutmak için 60 °C çok uygundur.
- Fırın kurusu numuneleri soğutmak için bir desikatörde bekletmek tavsiye edilmektedir. Bu işlem numunelerin havadan nem kapmasını engellemektedir.

Tablo 2.2 Su Muhtevasını belirlenmesi

Açıklama	Deney No		
	1	2	3
Kap No	42	31	54
Kap Darası, W1 (g)	17.31	18.92	16.07
Kap Darası+Islak Zemin, W2 (g)	43.52	52.19	39.43
Kap Darası+Kuru Zemin, W3 (g)	39.86	47.61	36.13
Su Miktarı, W2-W3 (g)	3.66	4.58	3.30
Kuru Zemin Miktarı, W3-W1 (g)	22.55	28.69	20.06
$Su\ Muhtevası, w(\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1}$	16.2	16.0	16.5

3. ELEK ANALİZİ (TS 1900-1/ Mart 2006)

Zeminlerin sınıflandırılmasını olanaklı kılan ve mühendislik özellikleri hakkında bazı önemli ipuçları veren zemin özelliklerine endeks özellikleri adı verilmektedir. Bir zemini oluşturan danelerin çapını ve değişik çaplara isabet eden dane toplam ağırlıklarının yüzdesini belirlemek amacıyla yapılır. Elek analizi No 200 eleğine kadar olan dane dağılımını belirlemek için kullanılır. ASTM, BS ve DIN standartları kullanılmaktadır. Elek analizi yapılırken kullanılan eleklerin boyutları Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

EKİPMAN

1. Elekler, bir alt tava ve kapak (Çoğu standart elek analizi çalışması için, genellikle, 4, 10, 20, 40, 50, 100 ve 200 elek numaraları kullanılırlar.)
2. 0.1g duyarlılıkta terazi
3. Havan ve lastik uçlu havan tokmak
4. Fırın
5. Mekanik elek sarsma cihazı

Tablo 3.1 Elek Numaraları ve Çapları

Elek No	Elek Çapı (mm)	Elek No	Elek Çapı (mm)
2 in	50.80	35	0.500
1 1/2 in	38.10	40	0.425
3/4 in	19.00	50	0.355
3/8 in	9.51	60	0.250
4	4.75	70	0.212
8	2.36	80	0.180
10	2.00	100	0.150
14	1.40	120	0.125
16	1.18	170	0.090
18	1.00	200	0.075
30	0.60	270	0.053

Tablo 3.1 (Devam) Elek Numaraları ve çapları

Elek No	Elek apı (mm)	Elek No	Elek apı (mm)
4	4.75	35	0.500
5	4.00	40	0.425
6	3.35	45	0.355
7	2.80	50	0.300
8	2.36	60	0.250
10	2.00	70	0.212
12	1.70	80	0.180
14	1.40	100	0.150
16	1.18	120	0.125
18	1.00	140	0.106
20	0.85	200	0.075
25	0.71	270	0.053
30	0.60	400	0.038

YÖNTEM

1. Fırında kurutulmuş temsili bir zemin örneği alınır. No.4 elek açıklık boyutunun (4.75mm) en büyük danelerine sahip olan örnek, yaklaşık 500 gr olmalıdır. Bu miktar toplam ağırlık (W) olarak not edilir 4.75mm'den daha büyük boyutta tanelere sahip olan zeminler için, daha büyük ağırlıklara ihtiyaç vardır. Maksimum dane boyutuna göre minimum numune ağırlığı Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 Elek Analizi için Numune Miktarları

Maksimum Dane apı	Minimum Numune Ağırlığı (gr)
3 in	6000
2 in	4000
1 in	2000
½ in	1000
No. 4	200
No. 10	100

2. Numunenin ince dane (0.074 mm den küçük çapa sahip) yüzdesini belirlemek amacı ile numune 200 Nolu elekten yıkanarak elenir (elenen malzemenin eleğin altına koyulacak bir kaptan toplanması gerekmektedir). Eleğin üstünde kalan malzeme darası belirlenmiş olan porselen bir kap içinde etüve konarak kurutulur ve daha sonra bu malzemenin kuru ağırlığı (W₁) bulunur. Bulunan değer toplam ağırlıktan çıkarıldığında 200 nolu eleğin altına geçen ince malzeme ağırlığı (W₂) ve dolayısıyla zemin belirlenmiş olacaktır. İnce daneli malzemenin dane dağılımını belirlemek üzere hidrometre analizi için numunenin 200 Nolu elekten geçen kısmı saklanır.
3. 200 Nolu elek üzerinde kalan kaba daneli malzemenin dane dağılımını belirlemek üzere, en küçük açıklıklı elek en altta olacak şekilde elekleri açıklık büyüklüklerine göre üst üste

konarak elek takımı hazırlanabilir (Olası bir sıralama ASTM elek numaralarına göre aşağıdan yukarıya doğru: 200,100,70,40,20,10,4,...şeklinde olabilir).

4. Hazırlanmış olan kaba daneli kuru numuneyi en üstteki eleğin üzerine dökerek elek takımı 5-10 dakika kadar sallanır.
5. Sallama işleminden sonra her bir eleğin üstünde kalmış olan malzeme ağırlıkları belirlenerek föye işlenir.
6. Deney föyü üzerinde ana numuneye göre geçen miktar hesaplanır (Tablo 3.3).
7. Geçen miktar/ana numune hesaplanarak malzeme yüzdeleri bulunur.
8. Bulunan sonuçlara göre granülometri eğrisi çizilir.

Granülometri Eğrisi

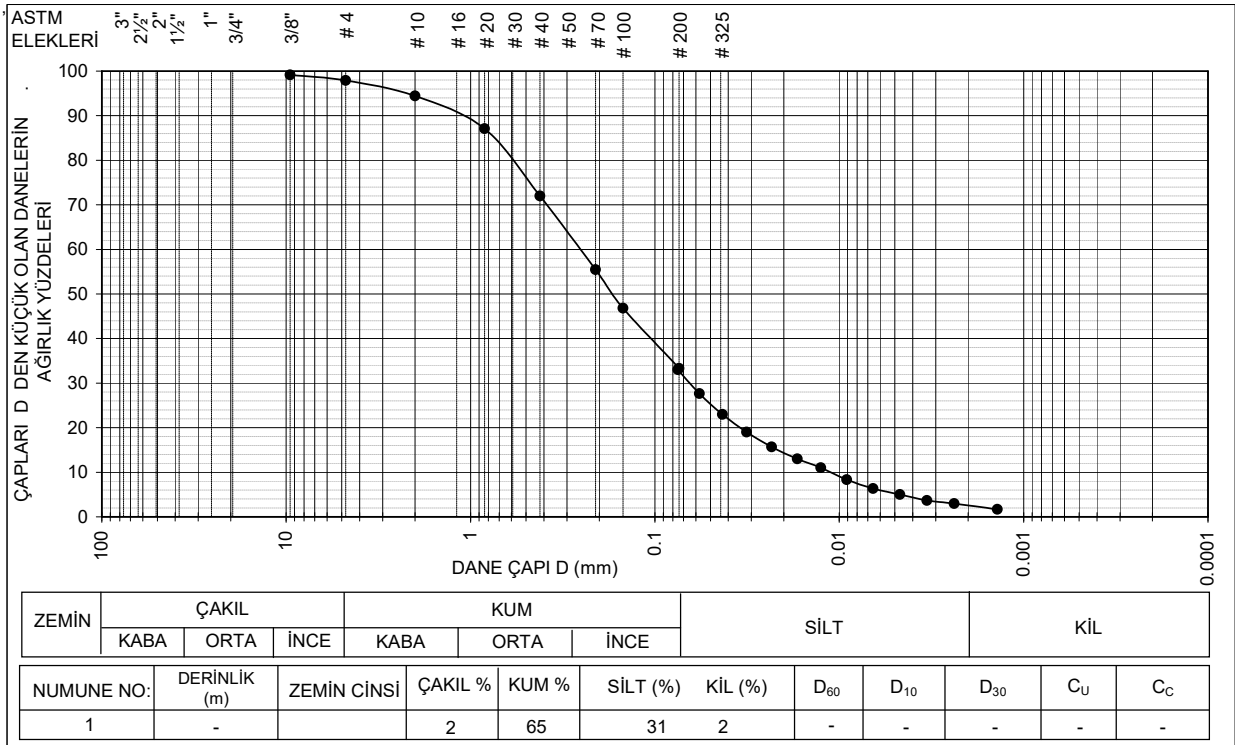
- Logaritmik yatay eksen de dane çapı (elek açıklığı), düşey eksen de ise bu çaptan daha küçük danelerin ağırlıkça yüzde değerlerinin bulunduğu granülometri föyleri üzerinde, elde edilen sonuçlar kullanılarak granülometri (dane dağılımı) eğrisi çizilir (Şekil 3.1).
- Granülometri eğrisi üzerinde malzemenin sırası ile %60, %30 ve %10'unun geçtiği elek çaplarına karşılık gelen D_{60} , D_{30} , D_{10} değerleri belirlenerek zeminin üniformluk ve derecelenme katsayıları bulunur.

$$\text{Üniformluk Katsayısı, } C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$\text{Derecelenme Katsayısı, } C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

Tablo 3.3 Elek Analizi (Numunenin ilk ağırlığı W=750.0 gramdır)

ELEK NO	DELİK ÇAPI (mm)	Eleğin Üstünde Kalan	Elekten Geçen	
			(g)	(%)
3/8"	9,53	6.4	743.6	99.15
4	4,76	9.3	734.3	97.91
10	2,00	26	708.3	94.44
20	0,84	55.3	653	87.07
40	0,42	113	540	72.00
70	0,21	124	416	55.47
100	0,149	65	351	46.80
200	0,074	101	250	33.33



Şekil 3.1 Granülometri Eğrisi

4. HİDROMETRE ANALİZİ (TS 1900-1/ Mart 2006)

Çapı 0.074 mm den küçük olan danelerin (silt ve kil oranı) dağılımlarının bulunması için hidrometre analizi yapılması gerekmektedir. Hidrometre analizi sonucunda zemin içindeki silt ve kil oranının belirlenmesi mümkün olmaktadır. Stokes kanuna dayalı olan bir deneydir. Hidrometre deneyinde yapılan düzeltmeler aşağıda verilen uygulama içerisinde verilmiştir.

1. Elek analizinde 200 Nolu elekten geçen kuru numuneden 50 gram alınır.
2. Yaklaşık 100-150 cl. kadar ayrıştırıcı madde (hekzametafosfat diğer adıyla calgon) hazırlanan numunenin üzerine dökülür. Zemin danelerinin ayrışması için numune yaklaşık 8-12 saat ayrıştırıcı içinde bekletilir.
3. Dereceli silindir kaba 850 cl. kadar damıtık su koyup üzerine 1000 cl. tamamlayacak kadar ayrıştırıcı madde eklenir. Hidrometre aleti içinde su ayrıştırıcı madde çözeltisi bulunan bu mezüre konur.
4. 2. adımda hazırlanan numune iyice karıştırıldıktan sonra hidrometre kabına katılır ve kabın 2/3 ü doluncaya kadar damıtık su ekledikten sonra karıştırıcı çalıştırılarak numune 10-15 dakika kadar karıştırılır.
5. Daha sonra zemin-su süspansiyonunun bulunduğu hidrometre kabına 1000 cl. tamamlayacak şekilde damıtık su eklenir ve ağzı bir tıkaç ile sıkıca kapatılarak kap iyice çalklanır.
6. Hidrometre kabına 3. adımda hazırlanmış olan hidrometre aletini daldırarak kronometre çalıştırılır (t=0).

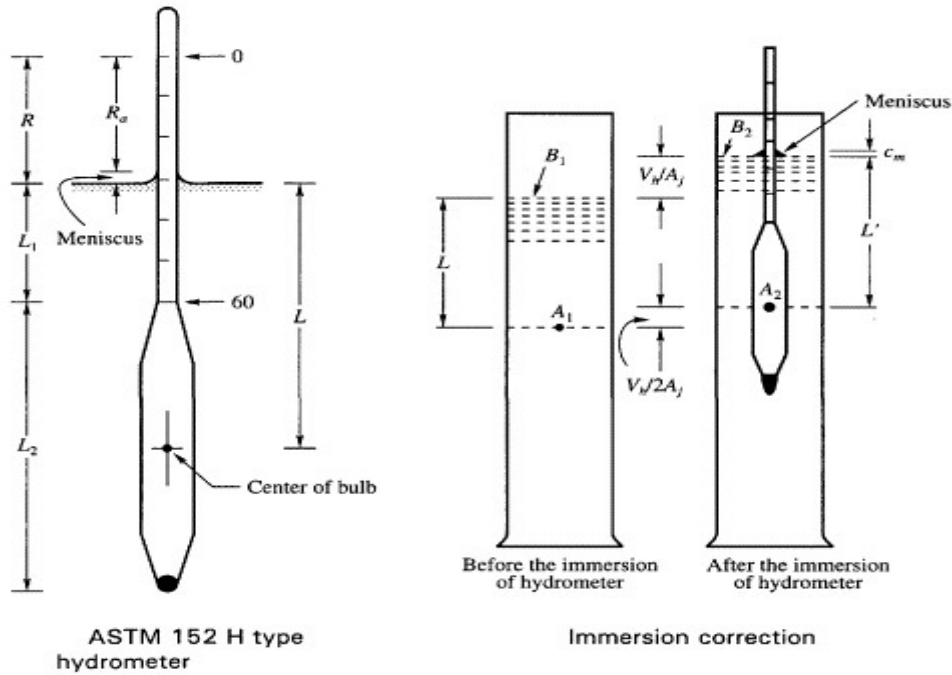
7. $t=0.25$ dk., 0.5 dk., 1 ve 2 dk. hidrometre okumalarını aldıktan sonra (her zaman menüsküsün üst seviyesi okunacaktır) hidrometre çıkarılıp diğer mezüre konur.
8. $t=4$ dk., 8 dk., 15 dk., 30 dk., 1 sa., 2 sa., 4 sa., 8 sa., 24 sa., hidrometre okumaları (R_{h1}) alınır ve bu değerler deney föyüne işlenir. Hidrometre her okumadan yaklaşık 30 sn. önce hidrometre kabına daldırılır ve okuma alındıktan sonra tekrar diğer mezüre bırakılır.

Hidrometre analizi ile ilgili hesaplarda kullanılacak olan K katsayısı Tablo 4.1'de, 152H tipi hidrometre ve menisküs düzeltmesi Şekil 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Sıcaklık ile Özgül Ağırlık Kombinasyonları için K Değerleri

Temp °C	G_s of Soil Solids							
	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
16	0.0151	0.0148	0.0146	0.0144	0.0141	0.0139	0.0139	0.0136
17	0.0149	0.0146	0.0144	0.0142	0.0140	0.0138	0.0138	0.0134
18	0.0148	0.0144	0.0142	0.0140	0.0138	0.0136	0.0136	0.0132
19	0.0145	0.0143	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134	0.0134	0.0131
20	0.0143	0.0141	0.0139	0.0137	0.0134	0.0133	0.0131	0.0129
21	0.0141	0.0139	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127
22	0.0140	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0128	0.0126
23	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124
24	0.0137	0.0134	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0125	0.0123
25	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0122
26	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0124	0.0122	0.0120
27	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.0120	0.0119
28	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124	0.0123	0.0121	0.0119	0.0117
29	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0121	0.0120	0.0118	0.0116
30	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.0120	0.0118	0.0117	0.0115

Table b Properties of distilled water (μ = absolute viscosity)



Şekil 4.1 152H Tipi Hidrometre ve Menisküs Düzeltmesi

Tablo 3.3'te verilen örneğe ait zemin numunesinin hidrometre deneyine ait hesaplamaları aşağıda verilmiştir. Elek analizi ve hidrometre deney sonucunda elde edilen dane çapı dağılımı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

HİDROMETRE ANALİZİ

$\gamma_s = 2.70 \text{ g/cm}^3$ $K=0.0134$ (Tablo 4.1'den alınır)

Alınan Kuru Numune Ağırlığı =750gr

$C_m=1$ (Menisküs düzeltmesi)

$C_a=2.5$ (Ayrıştırıcı Düzeltmesi)

Sıcaklık Düzeltmesi :

$C_t=-4.85+0.25*T$ (T=20°C $C_t=0.15$) Çok düşük olduğu için bu uygulamada sıcaklık düzeltmesi ihmal edilmiştir.

Geçen Zaman (dakika)	Hidrometre Okuması (Rh1)	Rh= Rh1+Cm	Rh'= Rh+Ct-Ca	He= 16,3- (0,1625*Rh)	D (mm) =K* $\sqrt{He/t}$	Alınan numuneye göre yüzde = Rh' / Wk*100	Ana numuneye göre yüzde = (No.200 altı=0.3333)*alınan numuneye göre yüzde
0.25	51	52	49.5	7.85	0.07509	99	33.00
0.5	43	44	41.5	9.15	0.05732	83	27.67
1	36	37	34.5	10.2875	0.04298	69	23.00
2	30	31	28.5	11.2625	0.03180	57	19.00
4	25	26	23.5	12.075	0.02328	47	15.67
8	21	22	19.5	12.725	0.01690	39	13.00
15	18	19	16.5	13.2125	0.01258	33	11.00
30	14	15	12.5	13.8625	0.00911	25	8.33
60	11	12	9.5	14.35	0.00655	19	6.33
120	9	10	7.5	14.675	0.00469	15	5.00
240	7	8	5.5	15	0.00335	11	3.67
480	6	7	4.5	15.1625	0.00238	9	3.00
1440	4	5	2.5	15.4875	0.00139	5	1.67

GENEL YORUMLAR

Hidrometre analizi sonucuna göre 0.002 mm'den daha küçük yüzdeler elde edilebilir. 0.002 mm'den geçen yüzdeler kil yüzdesini vermektedir. Yukarıdaki tabloya göre ince dane oranı %33.33 olan numunenin %3'ü kildir. Geriye kalan%30.33 ise silttir. Zeminde kilin olması plastisiteyi arttıracaktır.

5. KIVAM LİMİTLERİ

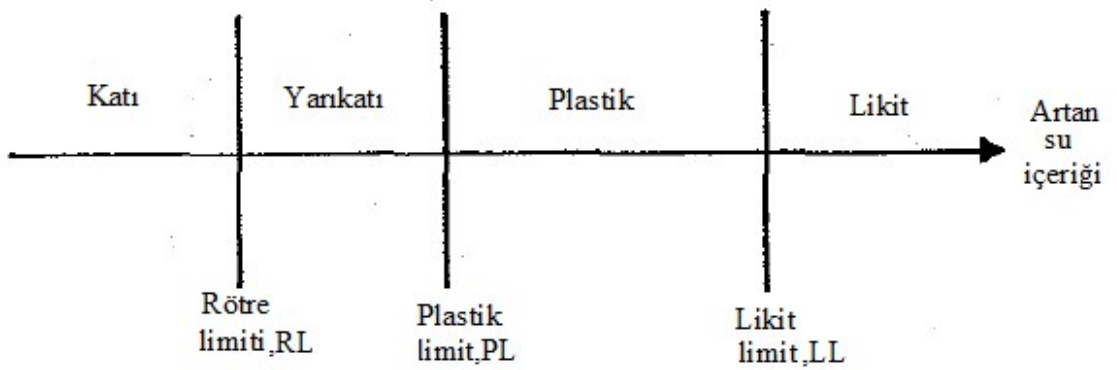
Kıvam, herhangi bir su muhtevastaki zeminin fiziksel davranışına veya zeminin akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Zeminlerin sınıflandırma deneylerinin önemli bir kısmını kıvam limitlerinin belirlenmesi oluşturmaktadır. Özellikle ince daneli zeminlerin likit ve plastik limitleri ile plastisite indisi zeminin genel özelliklerinin anlaşılmasında önemli rol oynamaktadır. Zeminin su

muhtevastaki değişim ile kıvamı arasında ilişkinin belirlenebilmesi için plastik ve likit limitlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Kohezif bir zemin aşırı miktarda su ile karıştırıldığı zaman, bir dereceye kadar likit durumda olacaktır ve bir viskoz sıvı gibi akacaktır. Ancak bu viskoz sıvı, kademeli olarak kurutulduğu zaman, nem kaybı ile plastik duruma geçecektir. Daha fazla su miktarının azalması ile zemin yarı-katı ve sonrasında katı duruma geçecektir. Bu, Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Likit durumdan, plastik duruma geçecek olan kohezif zeminlerdeki su muhtevası (yüzde), zeminin likit limiti olarak adlandırılır. Benzer şekilde, plastikten, yarı-katı duruma ve yarı-katı durumdan, katı duruma değişen zeminlerde su muhtevası sırasıyla, plastik limit ve rötre limit olarak adlandırılır. Bu limitler Atterberg limitleri olarak isimlendirilir. Bu bölümde, kohezif zeminlerin likit limitinin belirlenmesi ile ilgili yöntem anlatılacaktır.

EKİPMAN

1. Casagrande likit limit aleti
2. Oluk açma bıçağı
3. Numune kapları
4. Porselen kap
5. Spatula
6. Etüv
7. 0.01g hassasiyette terazi
8. Plastik şişe
9. Kağıt havlu veya filtre kağıdı



Şekil 5.1 Kıvam Limitleri

5a. LİKİT LİMİT DENEYİ (TS 1900-1/ Mart 2006)

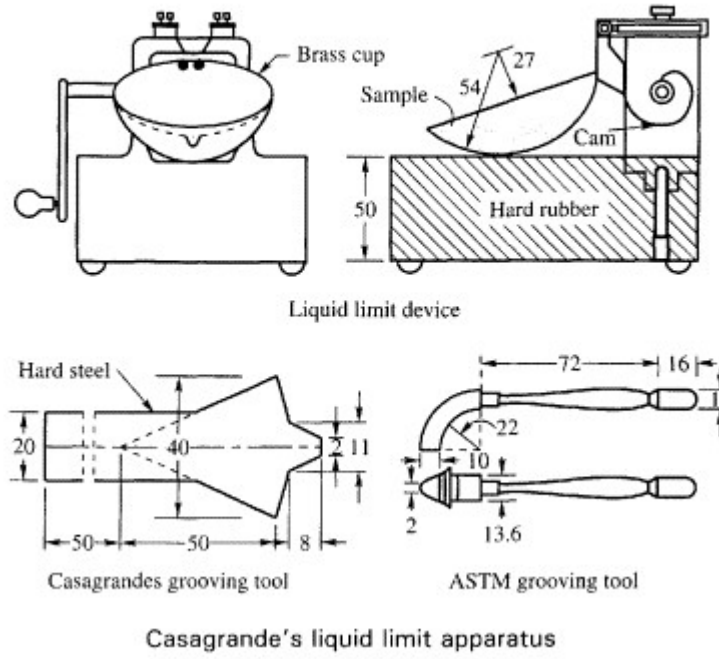
Zeminin kendi ağırlığı altında akmaya başladığı veya zeminin ölçülebilen kayam direncinin ilk görüldüğü andaki su muhtevasıdır. Casagrande likit limit aleti bir kol vasıtası ile 1 cm yüksekliğe kaldırılıp sert kauçuk bir blok üzerine serbestçe düşürülen pirinç bir tasan oluşmaktadır (Şekil 5.2).

1. Deneyde kullanılacak cam kapların darası belirlenir (W_1).
2. 40 numaralı elekten geçirilmiş yeteri kadar (yaklaşık 250 gr.) kuru numune porselen kaba konur ve numuneye yavaş yavaş su ilave edilerek iyice karıştırılır.
3. Daha sonra bir miktar numune Casagrande aletinin pirinç tasına yerleştirilip numune yüzeyi kalınlığı yaklaşık 1 cm olacak şekilde bir spatula ile düzeltilir.
4. Kaşık ile pirinç tasın merkezi boyunca bir oyuk açarak aletin kolunu saniyede 2 düşüş olacak şekilde çevrilerek düşüş sayısı sayılır. Bu şekilde pirinç tas her çevrimde 1 cm yükseklikten düşmektedir.

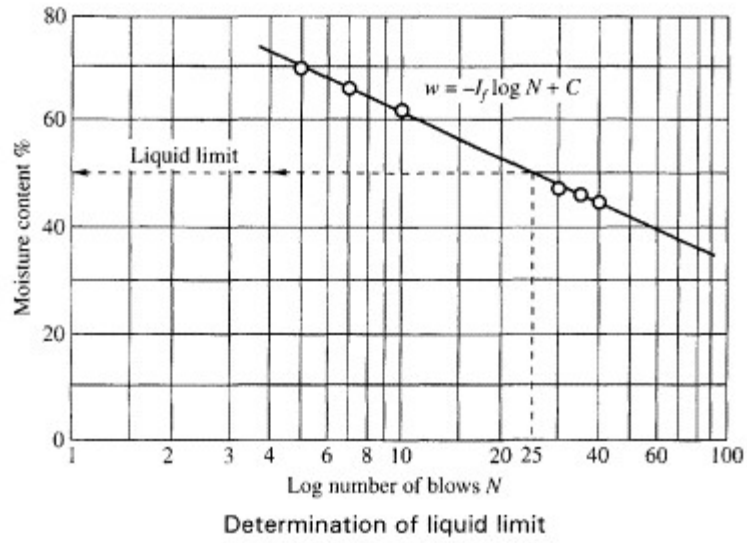
Not : Likit limit kaşığı iki türdür. Üçgen şeklinde olan kil zeminler için, diğeri ise siltli zeminler için uygundur.

5. Tas içindeki oyuk yaklaşık 12.7 ± 13 mm ($\frac{1}{2}$ ") kapanıncaya kadar kol çevrilir ve bu andaki düşüş sayısı (N) kaydedilir.
6. Su muhtevasını belirlemek için bir numune önceden hazırlanan cam kaplardan birine konur, cam kap+ yaş ağırlık (W_2) belirlenir. Daha sonra tas içindeki numuneyi bir spatula ile tekrar porselen kaba aktarılır ve bu arada pirinç bir tası bir bezle iyice temizlenir (numune çok sulu ise N sayısı 25 ten küçük olacaktır. Bu durumda numuneyi kuruması için 1-2 dakika kadar etüvde beklettikten sonra 7. adıma geçilir).
7. 3., 4., 5. ve 6. adımlarda yapılan işlemleri numuneye artan miktarda su katarak değişik su muhtevalarında en az iki kere daha tekrarlanır.
8. Böylece deney sonunda su muhtevalarını belirlemek üzere cam kaplarda etüve bırakılan en az 3 adet numune ve her bir su muhtevasına ait 3 adet düşme sayısı bulunmalıdır.
9. 24 saat sonra numuneleri etüvden alıp tartarak, cam kap+ kuru numune ağırlığı bulunur (W_3).
10. 13 mm'lik yarığın kapandığı duruma karşılık gelen düşüş sayılarının logaritması ile bu anda numuneye ait olan su muhtevalarına ait grafik çizilirse akış eğrisi olarak adlandırılan düz bir çizgi elde edilir. Akış eğrisinin 25 vuruşu kestiği yere karşılık gelen su içeriği likit limit değerini vermektedir (Şekil 5.3).

Likit limit deney aletindeki zeminin deney başlangıcı ve sonundaki şematik gösterimi Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Casagrande'nin Likit Limit Deney Aleti ve Kaşıkları

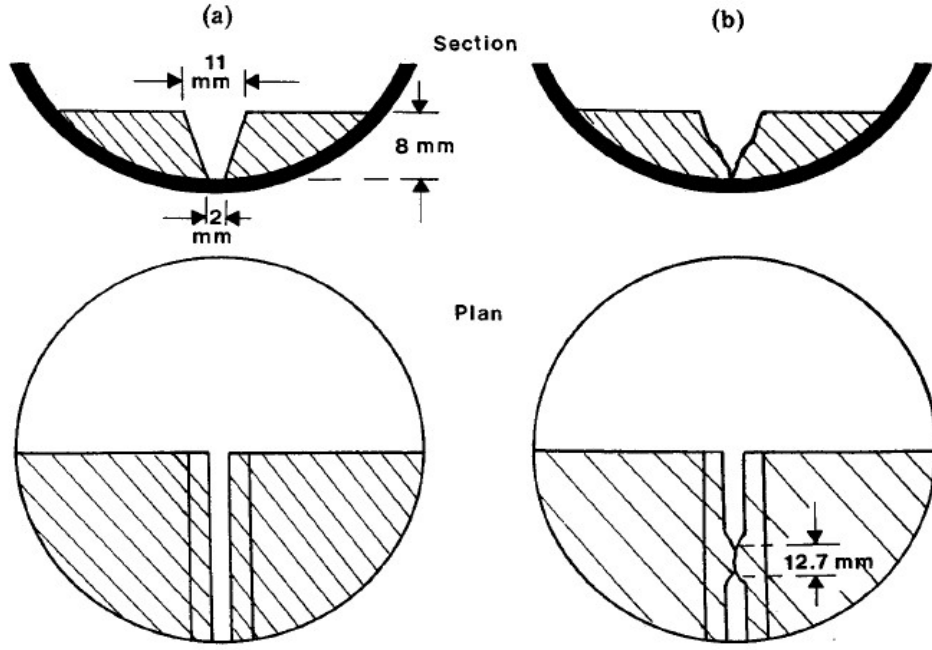


Şekil 5.3 Likit Limitin Belirlenmesi

HESAPLAMA

3 denemenin her biri için su muhtevası aşağıdaki şekilde

$$w(\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} (100) \text{ olarak belirlenir.}$$



Şekil 5.4 Likit deney aletindeki zeminin şematik diyagramı:
a) Deney başlangıcı, b) Deney sonu

GRAFİK

Vuruş sayısı, N (log. ölçekte) ve su muhtevası (aritmetik ölçekte) arasında yarı logaritmik grafik çizilir. Bu akış eğrisi olarak adlandırılan, yaklaşık düz bir doğru olacaktır. Doğru üzerinden; 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası(%) belirlenir. Bu zeminin likit limitidir. Akış eğrisinin eğimi, akış indisi, F_I olarak adlandırılır.

$$F_I = \frac{W_1(\%) - W_2(\%)}{\log N_2 - \log N_1}$$

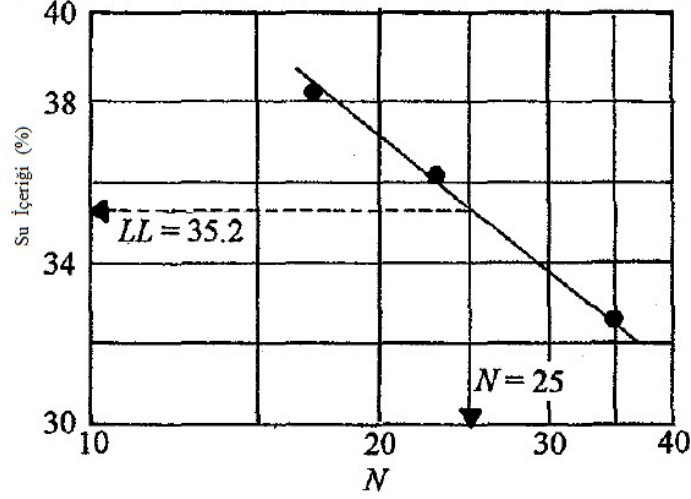
Likit limitin belirlenmesine yönelik örnek ve grafiği Tablo 5.1 ve Şekil 5.5’de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Likit Limit Deneyi

Deney No	1	2	3
Kap No	8	21	25
Dara, W_1 (g)	15.26	17.01	15.17
Dara+Islak Numune, W_2 (g)	29.30	31.58	31.45
Dara+Kuru Numune, W_3 (g)	25.84	27.72	26.96
Su içeriği , w (%) $W_2-W_3/W_3-W_1 \times 100$	32.7	36.04	38.1
Vuruş Sayısı , N	35	23	17

Likit Limit = 35.2

$$Akış İndeksi = \frac{37 - 33.7}{(\log 30 - \log 20)} = 18.74$$



Şekil 5.5 Tablo 5.1’de verilen likit limit deney sonuçları için vuruş sayısı (N)-Su Muhtevası (%) grafiği

GENEL YORUMLAR

Bazı zeminler üzerinde yapılan likit limit deneyine dayanarak, U.S. Army Waterways Experiment Station (1949) zeminlerin likit limitinin, LL, yaklaşık olarak;

$$LL = w_N(\%)\left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \text{ olabileceğini söylemişlerdir.}$$

$W_N(\%)$ = likit limit aletinde, ½ inç (12.7mm) yarık kapanması için gerekli N vuruş sayısındaki yüzde olarak su muhtevası.

Aynı zamanda ASTM, zeminlerin likit limitlerinin belirlenmesi için bu eşitliği tavsiye etmektedir (ASTM D-4318). Bununla beraber W_N ’nin değeri, 20 ile 30 arasındaki N değerine karşılık gelmelidir. Aşağıda farklı N değerleri için $(N/25)^{0.121}$ ’in değerleri verilmiştir.

N	$(N/25)^{0.121}$	N	$(N/25)^{0.121}$
20	0.973	26	1.005
21	0.979	27	1.009
22	0.985	28	1.014
23	0.990	29	1.018
24	0.995	30	1.022
25	1.000		

Kilin zeminde bulunması zeminin plastisitesini artırır. Zeminin likit limit değeri zeminde bulunan kilin miktarı ve cinsine göre değişecektir. Aşağıda bazı kil minerallerinin likit limit değeri için bir aralık verilmiştir.

Kil Minerali	LL
Kaolinit	35-100
İllit	55-120
Montmorillonit	100-800

5b. PLASTİK LİMİT DENEYİ (TS 1900-1/ Mart 2006)

Zemine şekil verebilmenin sona erdiği andaki su muhtevasıdır.

- 40 no'lu elekten geçirilmiş malzemeden yaklaşık olarak 40 gr kadar numune alınarak porselen kaba konur.
- Numuneye bir miktar su vererek iyice karıştırılır.
- Deneyde kullanılacak cam kabın ağırlığı belirlenir (W_1).
- 2.adımda hazırlanmış olan numuneden ufak parçalar alınır. Daha sonra bu parçalardan birini düz ve pürüzsüz (cam veya mermer) bir yüzey üzerinde avuç içi ile yuvarlamaya başlanır.
- Yuvarlama işlemine zemin çubuğunun çapı yaklaşık 3 mm oluncaya kadar devam edilir. Bu noktada çubukta kırılmalar oluşmamış ise numune tekrar elle yavaş yavaş yoğrulur. Daha sonra tekrar avuç içi ile yuvarlamaya başlanır. Bu işlemleri zemin çubuğunun çapı yaklaşık 3 mm olduğunda kırılmaların oluştuğu noktaya kadar tekrarlanır.
4. adımda hazırlanmış olan diğer parçaların üzerinde de aynı işlemler yapılır.
- 3 mm çapta ve 8 mm boyunda kırılmış ve plastik kıvama gelmiş olan bu numuneler iki ayrı cam kaba konarak su muhtevaları belirlenir.
- Elde edilen iki adet su muhtevasının ortalaması plastik limit değerini vermektedir.

Kap No	103
Kutu Ağırlığı, W_1 (g)	13.33
Kutu Ağırlığı+Islak zemin, W_2 (g)	23.86
Kutu Ağırlığı+Kuru zemin, W_3 (g)	22.27
$PL = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} * 100$	17.78

Plastisite İndisi, $I_p = PI = LL - PL = 34 - 17.78 = 16.22$ 'dir.

6. STANDART PROKTOR KOMPAKSİYON DENEYİ

GİRİŞ

Yol, havaalanı ve diğer yapıların inşasında zeminin dayanımı arttırmak için zemin kompaksiyonu gereklidir. Proktor (1933), arazideki sıkıştırmada kullanılan zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlığını belirlemek amacıyla kompaksiyon deney yöntemi geliştirmiştir. Bu deneyler standart proctor ve Modifiye Proktor kompaksiyon deneyi olarak bilinir. Bu ders kapsamında Standart Proktor Deneyi anlatılmıştır.

EKİPMAN

1. Kompaksiyon kalıbı
2. No. 4 eleği
3. Standart proktor tokmağı [5.5 lb (24.5N)]
4. 0.01lb hassasiyette terazi
5. 0.1g hassasiyette terazi
6. Büyük düz bir tepsi
7. Kriko
8. Çelik cetvel
9. Numune kapları
10. Etüv
11. Su dolu plastik şişe

Proktor Kompaksiyon Kalıp ve Tokmağı

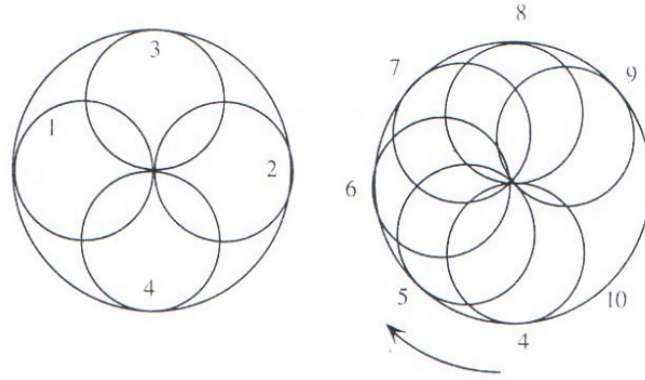
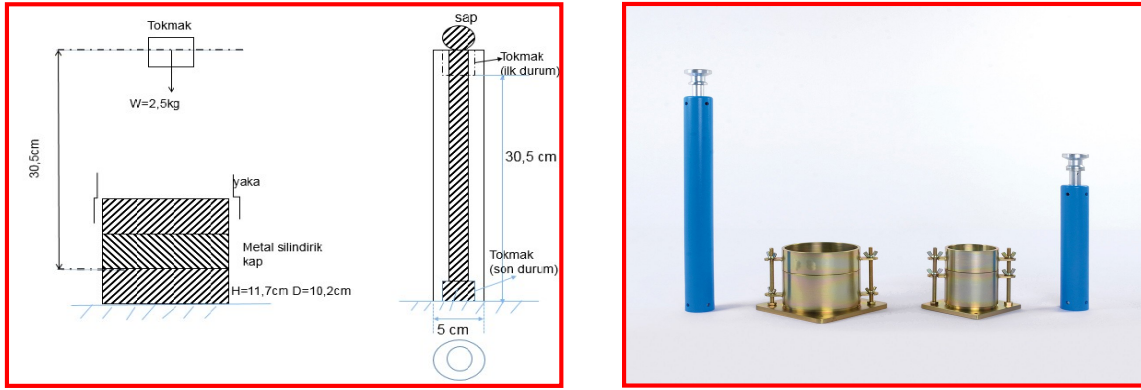
4 inç (101.6 mm) çapta ve 4.584 inç (116.4 mm) yükseklikte olan proktor kompaksiyon kalıbının şematik diyagramı, Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Kalıbın altına ve üstüne takılabilen yaka ve bir alt plaka vardır. Kalıbın iç hacmi, $1/30 \text{ ft}^3$ (943.9 cm^3)' dür.

Şekil 6.1b'de standart proktor tokmağının şematik bir diyagramı gösterilmiştir. Tokmak 12 inç (304.8 mm) düşey doğrultuda kaldırılarak düşürülür.

YÖNTEM

1. Kompaksiyon deneyinde kullanılmak üzere 10 lb (44.48 N) numune alınır. Zemin topraklarının tamamı ufalanır.
2. No.4 eleğinden zemin elenir. No. 4'den elenen malzemenin tamamı bir büyük tavada toplanır. Bu yaklaşık 6lb (2.7 kg) veya daha fazla olmalıdır.

3. No.4'den elenen malzemeye yeterince su eklenir ve su muhtevası %5 olana kadar tamamen karıştırılmalıdır.
 4. Proktor kalıbı+ alt plaka (yaka değil) ağırlığı, W_1 olarak belirlenir.
 5. Kalıbın başına yakası takılır.
 6. Yaş zemin 3 eşit tabaka halinde kalıba boşaltılır. Bir sonraki tabakanın gevşek zemini kalıba boşaltılmadan önce her bir tabaka standart proktor tokmağı ile 25 kez üniform olarak sıkıştırılmalıdır.
- Not:** 3 tabaka halinde yapılan kompaksiyonun sonunda sıkıştırılmış olan zemin, yaka içinde kalıbın normal yüksekliğinden fazla olmalıdır.
7. Kalıptan üst yaka çıkarılır. Kalıbın yakası çıkartılırken, kalıbın içindeki sıkıştırılmış zeminin kırılmamasına dikkat edilmelidir.



Şekil 6.1 Standart ve Modifiye Proktor Kalıp, Tokmak ve Vuruş Şekli

8. Çelik cetvel kullanarak kalıbın üzerindeki fazla zemin traşlanarak alınır. Bu durumda sıkıştırılmış zeminin üstü kalıbın üstü olacaktır.
9. Kalıp + alt plak + kalıbın içindeki sıkıştırılmış ıslak zeminin ağırlığı belirlenir (W_2).
10. Kalıptan alt plaka çıkarılır. Bir krika kullanarak sıkıştırılmış zemin silindiri kalıptan çıkarılır.
11. Su muhtevası için bir kap alınarak ağırlığı belirlenir (W_3).
12. 10 adımda çıkartılan numuneden bir miktar alınarak 11. Adımda darası alınan kaba konarak kap+yaş numune ağırlığı (W_4) belirlenir.
13. Kaba alınan numune fırına konur.

14. Sıkıştırılmış zeminin kalanı el ile ufalanır (No. 4 büyüklüğüne) ve tavada artakalan ıslak zemin ile karıştırılır. Su muhtevası yaklaşık %2 artacak şekilde biraz daha su eklenir ve karıştırılır.

15. Adımlar 6'dan 12'ye tekrar edilir. Bu işlemde kalıp + alt levha + ıslak zeminin ağırlığı (W_2), su muhtevasının artması ile ilk önce artacaktır ve sonrasında azalacaktır. Deneye en azından, peş peşe 2 alt okuma elde edene kadar devam edilir.

16. Ertesi gün, numune kaplarındaki zeminin kuru ağırlığı belirlenir (Adım 13).

HESAPLAMA

Standart proktor için hesaplamalar Tablo 6.1'de verilmiştir.

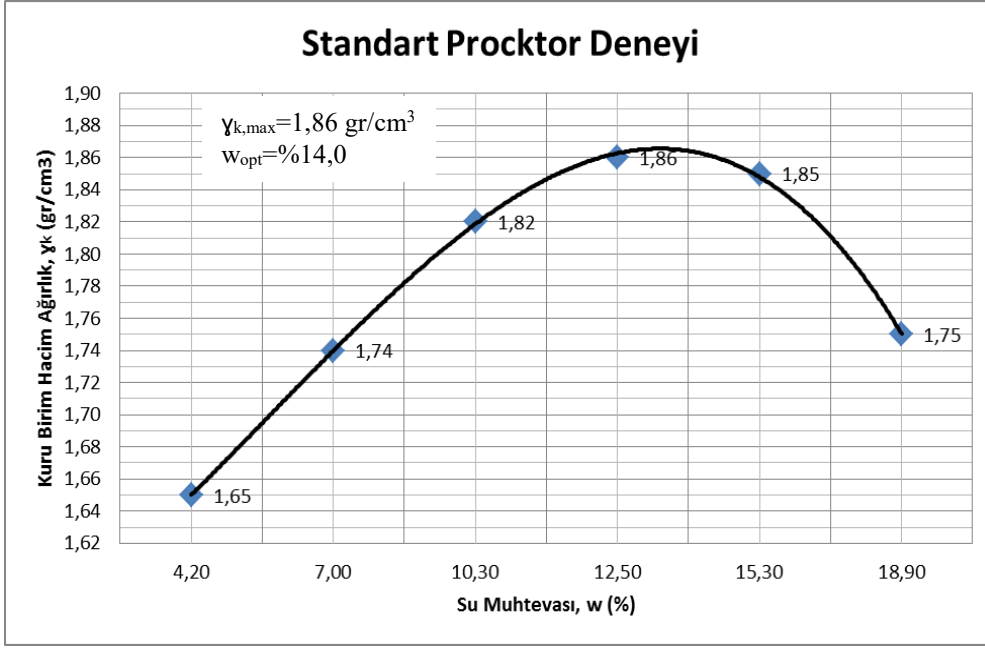
Yol dolgusunda kullanılması planlanan bir zemin numunesi üzerinde yapılan standart proctor deneyinin sonuçları aşağıda verilmiştir. Deneyde kullanılan kalıbın hacmi 945 cm^3 ve zeminin dane birim hacim ağırlığı 2.65 gr/cm^3 'tür. Buna göre;

- Bu zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerini belirleyiniz.
- Optimum noktada suya doygunluk derecesini belirleyiniz.
- $S = \% 100$ ve $S = \% 70$ doygunluk eğrilerini çiziniz.

Tablo 6.1 Kompaksiyon Deneyine Ait Hesaplamalar

Deney No	1		2		3		4		5		6	
Islak Num.+Kalıp (gr)	3820		3960		4100		4180		4220		4170	
Kalıp (gr)	2200											
Islak Numune (gr)	1620		1760		1900		1980		2020		1970	
Birim Hacim Ağ.	1,714		1,862		2,011		2,095		2,138		2,085	
Kap No	54	63	19	66	18	42	20	34	33	71	78	73
Islak Num.+Dara (gr)	132.50	132.30	139.00	155.00	140.80	148.80	146.70	145.70	160.20	168.30	159.7	180.5
Kuru Num.+Dara (gr)	129.30	128.50	135.40	151.00	131.60	139.70	133.90	134.40	144.40	151.00	140.9	157.8
Su Miktarı (gr)	3,20	3,80	5,60	6,50	9,20	9,10	12,80	11,30	15,80	17,30	18,80	22,70
Dara (gr)	51.80	39.40	40.90	40.30	43.40	50.90	35.70	39.40	41.30	38.00	51.9	39.3
Kuru Num. (gr)	77,5	89,1	82,9	88,8	88,2	88,8	98,2	95,0	103,1	113,0	99,5	120,4
Su Muhtevası (%)	4,13	4,26	6,76	7,32	10,43	10,25	13,03	11,89	15,32	15,31	18,89	18,85
Ort. Su Muhtevası (%)	4,2		7,0		10,3		12,5		15,3		18,9	
Kuru Birim Hacim Ağ.	1,65		1,74		1,82		1,86		1,85		1,75	

Çözüm: a) Deney sonuçlarının değerlendirilmesi; Her bir noktaya ait γ_k ve w değerleri belirlenir. Procktor eğrisi çizilir.



Şekil 6.1 Kompaksiyon Eğrisi

b) $\gamma_s \cdot w = S \cdot e \cdot \gamma_w$ ifadesini kullanabiliriz.

$$\gamma_s \cdot w_{opt} = S \cdot e_{min} \cdot \gamma_w$$

$$e_{min} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{k,max}} - 1 = \frac{2,65}{1,86} - 1 = 0,425$$

$$S = \frac{2,65 \cdot 0,14}{0,425 \cdot 1,00} = 0,87 \rightarrow \%87$$

c) Suyu doygunluk eğrileri, yine w- γ_k düzleminde elde edilir.

$$\gamma_k = \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{\gamma_s \cdot w}{S \cdot \gamma_w}}$$

$$S=\%100 \text{ için } \rightarrow w=\%14 \Rightarrow \gamma_k=1,93$$

$$\rightarrow w=\%18 \Rightarrow \gamma_k=1,79$$

$$\rightarrow w=\%20 \Rightarrow \gamma_k=1,73$$

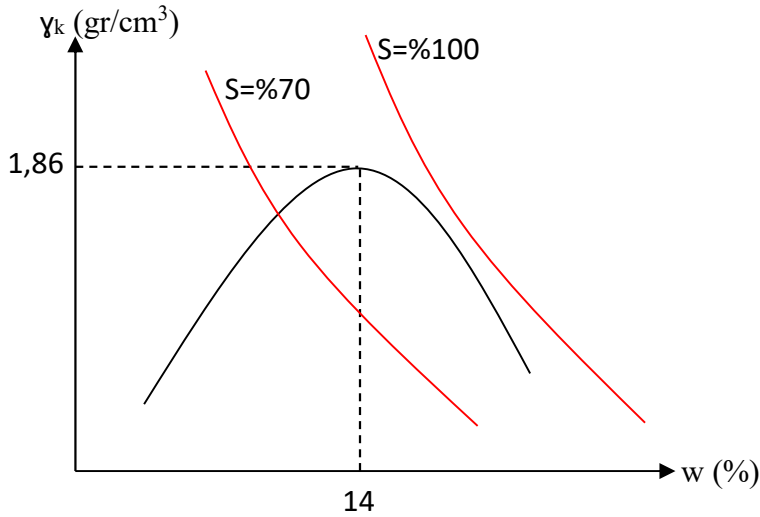
$$\rightarrow w=\%24 \Rightarrow \gamma_k=1,62$$

$$S=\%70 \text{ için } \rightarrow w=\%14 \Rightarrow \gamma_k=1,73$$

$$\rightarrow w=\%18 \Rightarrow \gamma_k=1,58$$

$$\rightarrow w=\%20 \Rightarrow \gamma_k=1,51$$

$$\rightarrow w=\%24 \Rightarrow \gamma_k=1,39$$



Not: Verilen zemin için, sıfır hava boşluğuna (S=%100) karşılık gelen eğri hiç bir zaman kompaksiyon eğrisini kesemez.

Genel Yorumlar

Zemin mekaniği ile standartlarda laboratuvarında elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin %90-95 kadar kuru birim hacim ağırlık değerinin arazide elde edilmesi gerekir. Bu bazen relatif kompaksiyon (R veya R_c) ile ifade edilir.

$$R(\%) = \frac{\gamma_{karazi}}{\gamma_{klab_max}} * 100$$

ASTM ve AASHTO standart proctor deneyi için 4 farklı yönteme sahiptir. Standart proctor deneyi için zeminin maksimum dane çapı, her tabaka için vuruş sayısı ve kalıbın boyutları standartlarda belirtilmiştir. Bu yöntemlerin özeti Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2 Standart Proktor Deneyinin Özeti

STANDART PROKTOR DENEYİ (ASTM D698-12)			
	Method A	Method B	Method C
Kalıp (Mold)	4" (101.6 mm)	4" (101.6 mm)	6" (152.4 mm)
Malzeme	No.4 (4.75 mm) elekten geçen	3/8" (9.5 mm) elekten geçen	3/4" (19.0 mm) elekten geçen
Tabaka	3	3	3
Vuruş Sayısı	25	25	56
Kullanılabilirliği	No.4 (4.75 mm) eleği üzerinde kalan malzemenin ağırlığı %25 veya daha az ise kullanılabilir.	3/8" (9.5 mm) eleği üzerinde kalan malzemenin ağırlığı %25 veya daha az ise kullanılabilir.	3/4" (9.5 mm) eleği üzerinde kalan malzemenin ağırlığı %30 veya daha az ise kullanılabilir.

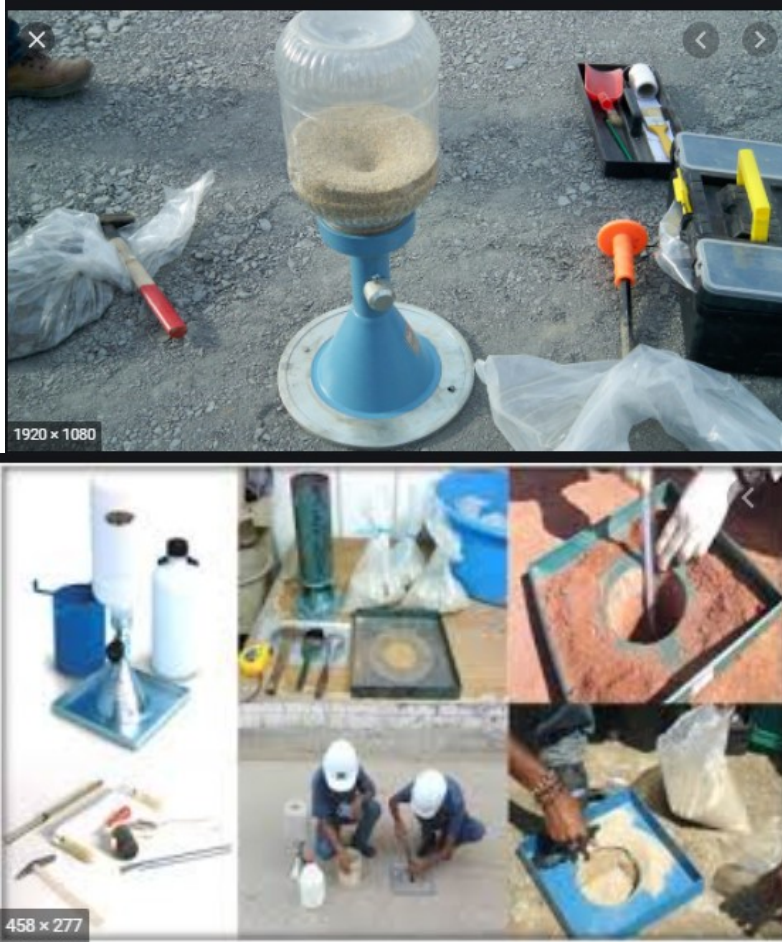
MODİFİYE PROKTOR DENEYİ (ASTM D1557-12)			
	Method A	Method B	Method C
Kalıp (Mold)	4" (101.6 mm)	4" (101.6 mm)	6" (152.4 mm)
Malzeme	No.4 (4.75 mm) elekten geçen	3/8" (9.5 mm) elekten geçen	3/4" (19.0 mm) elekten geçen
Tabaka	5	3	3
Vuruş Sayısı	25	25	56
Kullanılabilirliği	No.4 (4.75 mm) eleği üzerinde kalan malzemenin ağırlığı %5-25 arasında ise Method A kullanılabilir, fakat iri dane düzeltilmesi gerekecektir ve bu durumda Method A'yı kullanmanın avantajı olmayacaktır.	3/8" (9.5 mm) eleği üzerinde kalan malzemenin ağırlığı %25 veya daha az ise kullanılabilir. 3/8" (9.5 mm) eleği üzerinde kalan malzemenin ağırlığı %5-25 arasında ise Method B kullanılabilir, fakat iri dane düzeltilmesi gerekecektir. Bu durumda Method C'e göre Method B'yi kullanmanın sadece avantajı daha küçük miktarda numune kullanmadır ve daha küçük moldu kullanmak kolaydır.	3/4" (9.5 mm) eleği üzerinde kalan malzemenin ağırlığı %30 veya daha az ise kullanılabilir.

7. KUM KONİSİ YÖNTEMİ İLE KURU BİRİM HACİM AĞIRLIĞIN ARAZİDE TAYİNİ GİRİŞ

Arazide zeminin kompaksiyonu süresince, sıkıştırılan zeminin kuru birim ağırlığının zaman zaman kontrol edilmesi ve inşaat için hazırlanan şartname ile karşılaştırılması gerekmektedir. Sıkıştırma alanında birim hacim ağırlık tayininin en basit yöntemlerinden biri bu bölümde açıklanacak olan kum konisi yöntemidir.

EKİPMAN

1. Kum konisi aparatı. Bu, bir galon (3.78lt) cam veya plastik şişe ile buna bağlanabilen bir metal koniden oluşur.
2. Alt plaka
3. Başlıklı bir galon kap
4. Arazide küçük bir çukur açmak için keski
5. Minimum 0.01gr hassasiyette terazi
6. 20-30 Ottawa kumu (üniform kum)
7. Yakası olmayan bir proktor kompaksiyon kalıbı
8. Çelik cetvel



Kum Konisi

Kumun özellikleri şu şekilde olmalıdır (ASTM D 1556)

1. Temiz, kuru ve üniform olmalıdır.
2. Üniformluk katsayısı (cu) 2 den az olmalıdır.
3. Maksimum dane boyutu 2 mm (No 10 eleği) den küçük olmalıdır.
4. 250 µm (No 60 eleği) den ağırlıkça geçen %3'den az olmalıdır.

Bu kriterleri sağlayan herhangi bir gradasyona sahip kum olabilir.

YÖNTEM - LABORATUVAR ÇALIŞMASI

20-30 Ottawa kumunun kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesi

1. İlk olarak kompaksiyon kalıbının ağırlığı belirlenir (W_1).
2. Arazide kullanılacak olan, Bir kaşık yardımıyla Ottawa kumu proktor kalıbına doldurulur. Kalıp içine boşaltılan kumun kompaksiyonunda herhangi bir titreşim veya diğer araçlar kullanılmaz. Kalıp dolduğu zaman çelik cetvel ile kalıbın üstü düzleştirilir. Kalıp ve içindeki kumun ağırlığı (W_2) belirlenir.

Koninin Kalibrasyonu

3. Koniye doldurmak için gerekli Ottawa kumun ağırlığının belirlenmesi gereklidir. Ottawa kumu ile bir galon şişe doldurulur. Şişe + koni + kumun ağırlığı belirlenir (W_3). Şişeye bağlı olan koninin vanası kapatılır. Alt levha düz bir yüzey üzerine yerleştirilir. Şişe kendisine bağlı koni ile ters çevrilerek alt levhanın merkez deliği üzerine yerleştirilir. Koninin vanası açılır. Kum şişenin dışına akacak ve yavaş yavaş koniyi dolduracaktır. Koni, kum ile dolduğu zaman şişeden kum akışı durdurulacaktır. Vana kapatılacaktır. Koni-şişe birleşimi alt levhadan çıkarılır ve ağırlığı (W_4) belirlenir.
4. Başlıksız galon kabın ağırlığı belirlenir (W_5).
5. Bir galon şişe (kendisine bağlı kum konisi ile birlikte) kum ile doldurulur. Koninin vanası kapatılır. Şişe + koni + kum ağırlığı belirlenir (W_6).

Yöntem-Arazi Çalışması

6. Şimdi, kendisine bağlı koniyle birlikte şişe (Ottawa kumuyla doldurulmuş-4. Adım), alt levha, çukur açma aleti ve başlığıyla beraber bir-galon kap ile arazide devam edilir.
7. Arazide, alt levha düzgün bir zemin üzerine yerleştirilir. Alt levhanın merkez deliğinin altında, çukur açma aleti kullanarak, zeminde bir çukur kazılır (yaklaşık çap kadar). Çukurun hacmi, (şişedeki kumun hacmi-koni hacmi)'nden daha küçük olmalıdır.
8. Çukur içindeki gevşek zeminin tamamı alınır ve galon kap içine koyulur. Herhangi bir nem kaybı olmayacak şekilde başlık sıkıca kapatılır. Alt levhayı hareket ettirmemek için dikkatli olunmalıdır. Mümkünse alt levhanın dört tarafında yer alan deliklerden çivi çakılarak sabitlenebilir.

9. Kendisine koni bağı olan kum ile dolu galon şişe ters çevrilir ve alt levhanın merkezi üzerine yerleştirilir. Koninin vanası açılır. Kum, koniyi ve zemindeki çukuru doldurmak için şişeden akacaktır. Şişeden kum akışı durduğu zaman koninin vanası kapatılır ve kaldırılır.
10. Ekipmanın tamamı laboratuvara geri getirilir. Galon kap + araziden alınan ıslak zemin ağırlığı (başlıksız) belirlenir (W_7). Arıca, şişe + kap + kullandıktan sonra kalan kumun ağırlığı belirlenir (W_8).
11. Zeminin kuru ağırlığını belirlemek için zemin numunesi galon kapla birlikte etüve konur. Kuru zemin+başlıksız kap ağırlığı belirlenir (W_9).

HESAPLAMA

Kum konisi yöntemi ile arazideki sıkışmanın kuru birim hacim ağırlığını belirlemek için gerekli hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

1. Kumun kuru birim hacim ağırlığını hesaplanır.

$$\gamma_{k,kum} = \frac{W_2 - W_1}{V_1}$$

Burada V_1 =Proktor kalıbının hacmi

2. Koniye dolan kumun ağırlığını hesaplanır.

$$W_c = W_4 - W_3$$

3. Arazide açılan çukurun hacmini hesaplanır.

$$V_2 = \frac{W_6 - W_8 - W_c}{\gamma_{k,kum}}$$

4. Islak zeminin birim hacim ağırlığını hesaplanır.

$$\gamma = \frac{W_7 - W_5}{V_2}$$

5. Arazideki zeminin su muhtevasını hesaplanır.

$$w = \frac{W_7 - W_9}{W_9 - W_5} * 100$$

6. Arazideki zeminin kuru birim hacim ağırlığı hesaplanır.

$$\gamma_k = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}}$$

Genel Yorumlar

Sıkışmanın arazideki birim ağırlığını belirlemek için en az iki diğer yöntem vardır. Bunlar balon yöntemi (ASTM D 2167) ve nükleer yoğunluk ölçer yöntemidir. Balon yöntemi kum konisine benzerdir. Aynı şekilde çukur açılır, çukurdan alınan zeminin ağırlığı ve su muhtevası belirlenir. Bununla beraber, çukurun hacmi, ölçekli kaptan su ile doldurulmuş balona giren hacim direk olarak okunabilir.

Nükleer yoğunluk ölçer sıkışmış zeminin kuru birim hacim ağırlığını belirlemek için büyük projelerde kullanılmaktadır. Yoğunluk ölçer açılmış deliklerde ya da zemin yüzeyinde kullanılabilir. Bu alet birim hacimdeki ıslak zeminin ağırlığını ve ayrıca zeminin birim hacmindeki mevcut suyun ağırlığını ölçer. Sıkışmış zeminin kuru birim hacim ağırlığı zeminin ıslak ağırlığından suyun ağırlığının çıkarılması ile belirlenebilir.

8. SERBEST BASINÇ DENEYİ (TS 1900/ Nisan 1987)

Serbest basınç deneyinde silindirik bir zemin numunesi yalnızca eksenel doğrultuda yüklemeye tabi tutulmaktadır. Zeminlerin çekme dayanımı sıfır olduğundan çekme gerilmelerinin uygulaması söz konusu olmaz. Eksenel yük artışları altında meydana gelen numunenin boy kısılması (eksenel şekil değiştirmesi) ölçülmektedir. Eksenel gerilmenin en büyük değeri (veya göçme kabul edilebilecek şekil değiştirme seviyesine karşılık gelen değeri) zeminin serbest basınç mukavemeti (q_u) değerini vermektedir. Numunede oluşan kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıkları ile kesişmemesi için, boy uzunluğu/çap oranının $h/d \geq 2$ olarak seçilmesi uygun olmaktadır (genellikle 2-3 arasında olmalıdır).

Serbest basınç deneyi ancak herhangi bir yanal destek olmaksızın kendi kendini dik olarak ayakta tutabilecek özelliklere sahip zeminler üzerinde uygulanabilmektedir. Bu yönden kumlar üzerinde uygulanması mümkün değildir, yalnızca killi zeminler için kullanılan bir deney yöntemi olmaktadır. Deney sırasında numunenin drenaj koşulları kontrol edilmediği için, hızlı yükleme yapılarak zeminin drenajsız kayma mukavemetinin elde edildiği kabul edilmektedir. Eksenel yüklemeye önce zemini konsolide etmek ve eksenel yükleme sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarını ölçmek mümkün olmamaktadır. Bu kısıtlayıcı yönlerine karşın, serbest basınç deneyi killerin drenajsız kayma mukavemetini belirlemede yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemi olmaktadır. Drenajsız kayma mukavemeti

$$\tau_f = c_u = \frac{q_u}{2} = \frac{P_{\max}}{2A}$$

şeklindedir.

EKİPMAN

1. Serbest basınç deney aleti
2. Numune traşlama aleti ve aksesuarları (numune örselenmemiş numune kullanılırsa)
3. Kompaksiyon aleti ve aksesuarları

4. Cetvel
5. 0.01g hassasiyette terazi
6. Fırın
7. Porselen kap

1. Düşey birim deformasyon hesaplanır, ε .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Burada, ΔL = numunenin toplam düşey deformasyonu

L= numunenin orijinal yüksekliği

2. Numune üzerindeki düşey yük hesaplanır.

Yük= (yük halkası okuması).(kalibrasyon faktörü)

3. Numunenin düzeltilmiş alanı hesaplanır, A_f

$$A_f = \frac{A_0}{1 - \varepsilon}$$

Burada; A_0 = numunenin başlangıçtaki en kesit alanı

$$= \frac{\pi}{4} D^2$$

4. Numune üzerindeki gerilme, σ , hesaplanır (kolon 6).

$$\sigma = \frac{P_f}{A_f}$$

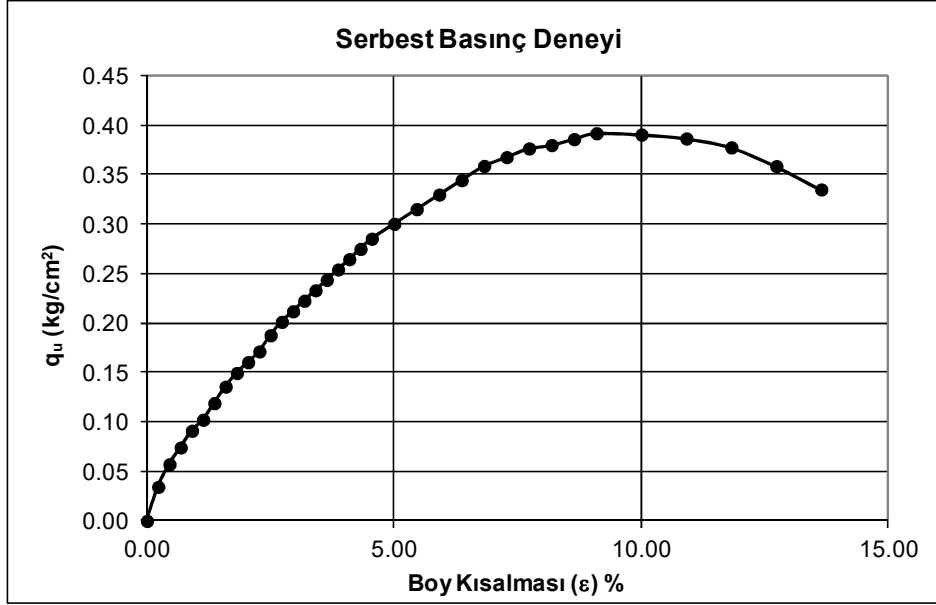
GRAFİK

Yüzde olarak gerilme - deformasyon grafiği çizilir. Bu grafikten gerilmenin pik noktası belirlenir. Bu, numunenin serbest basınç mukavemetini, q_u , verir. **Not:** Eğer %20 deformasyon, pik gerilmeden önce meydana gelirse, o zaman %20 deformasyona karşılık gelen gerilme, q_u olarak alınmalıdır.

Serbest basınç deneyine ait hesaplamalar Tablo 8.1'de, elde edilen grafik ise Şekil 8.1'de gösterilmiştir.

Tablo 8.1 Serbest Basınç Deney Hesaplamaları

SERBEST BASINÇ					
Hassaslık	0.01				
H₀ (mm)	110				
R (cm)	5.5				
w (gr)	433.5				
Ring Faktörü (kg/d)	0.1366				
Düşey Deplasman	Boy Kısalması (ϵ, %)	Alan (cm²)	Yük Halkası Okuması	Normal Gerilme (kg/cm²)	Kayma Gerilmesi (kg/cm²)
0	0.00	23.76	0.0	0.00	0.00
25	0.23	23.81	6.0	0.03	0.02
50	0.45	23.87	10.0	0.06	0.03
75	0.68	23.92	13.0	0.07	0.04
100	0.91	23.98	16.0	0.09	0.05
125	1.14	24.03	18.0	0.10	0.05
150	1.36	24.09	21.0	0.12	0.06
175	1.59	24.14	24.0	0.14	0.07
200	1.82	24.20	26.5	0.15	0.07
225	2.05	24.25	28.5	0.16	0.08
250	2.27	24.31	30.5	0.17	0.09
275	2.50	24.37	33.5	0.19	0.09
300	2.73	24.42	36.0	0.20	0.10
325	2.95	24.48	38.0	0.21	0.11
350	3.18	24.54	40.0	0.22	0.11
375	3.41	24.60	42.0	0.23	0.12
400	3.64	24.65	44.0	0.24	0.12
425	3.86	24.71	46.0	0.25	0.13
450	4.09	24.77	48.0	0.26	0.13
475	4.32	24.83	50.0	0.28	0.14
500	4.55	24.89	52.0	0.29	0.14
550	5.00	25.01	55.0	0.30	0.15
600	5.45	25.13	58.0	0.32	0.16
650	5.91	25.25	61.0	0.33	0.16
700	6.36	25.37	64.0	0.34	0.17
750	6.82	25.50	67.0	0.36	0.18
800	7.27	25.62	69.0	0.37	0.18
850	7.73	25.75	71.0	0.38	0.19
900	8.18	25.88	72.0	0.38	0.19
950	8.64	26.00	73.5	0.39	0.19
1000	9.09	26.13	75.0	0.39	0.20
1100	10.00	26.40	75.5	0.39	0.20
1200	10.91	26.67	75.5	0.39	0.19
1300	11.82	26.94	74.5	0.38	0.19
1400	12.73	27.22	71.5	0.36	0.18
1500	13.64	27.51	67.5	0.34	0.17



Şekil 8.1 Serbest Deneyine ait Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği

8. ÖDOMETRE (KONSOLİDASYON) DENEYİ (TS 1900/ Nisan 1987)

Arazideki zemin tabakalarının düşey yüklemeler altında sıkışması esas olarak tek boyutlu bir sıkışma (düşey doğrultuda) problemi oluşturduğu için, laboratuvar deney düzeninde zeminin yanıl genişlemesine izin verilmemekte ve belirli düşey yükler altında zeminin boy kısalması ölçülmektedir.

GİRİŞ

Konsolidasyon, doymun killi zeminlerin artan yükler altında zamana bağılı oturmasıdır. konuda, bir boyutlu konsolidasyon deneyi için işlem anlatılacaktır ve boşluk oranı-basınç eğrisini (e -log p) elde Bu etmek için hesap yöntemleri, önkonsolidasyon basıncı (p) ve konsolidasyon katsayısı (c_v) özetlenecektir.

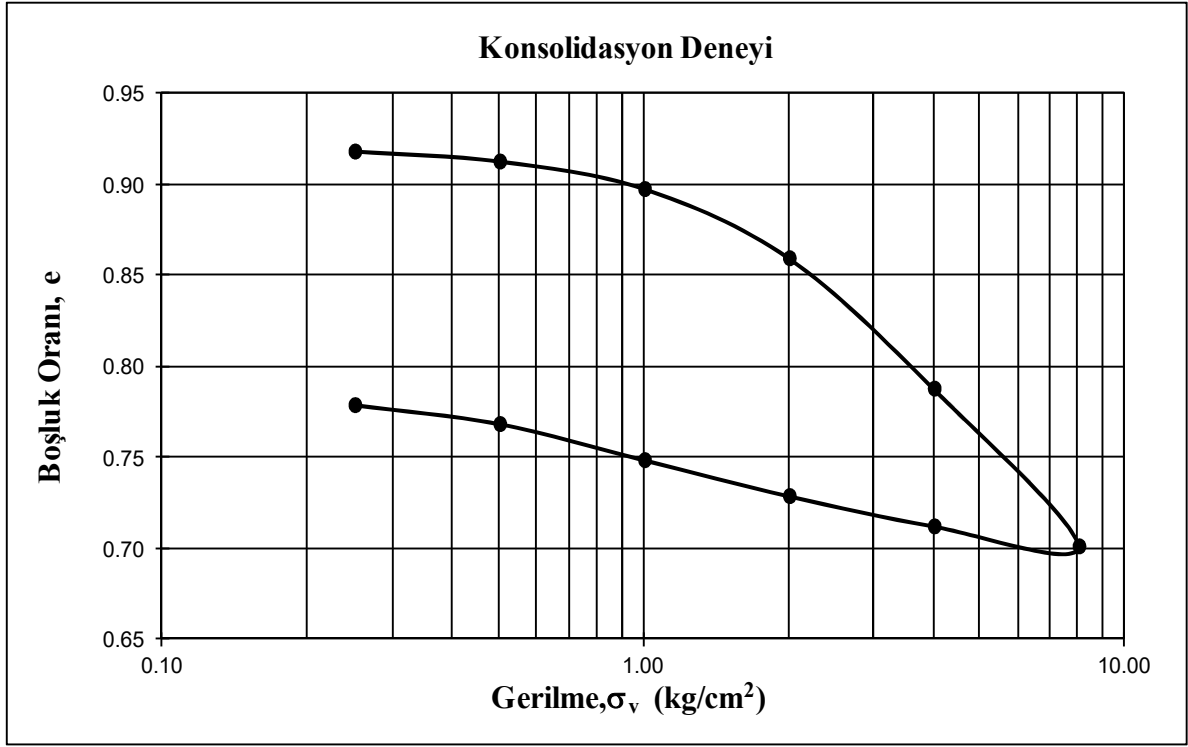
1. İnceleme altındaki sıkışabilir zemin tabakasına ait bir elemanı temsil eden örselenmemiş bir zemin numunesi dikkatlice traşlanarak rijit çelik deney halkası içine yerleştirilmektedir. Numunenin çapının yüksekliğine oranı genellikle 2 ile 5 arasındadır.
2. Ağırlığı, çapı ve yüksekliği belirli ringlere numune yerleştirilir. Alt ve üstüne filitre kağıdı ıslatılarak konur. Ring+ numune tartılır. Buradan γ_n değeri bulunur.
3. Başlangıç su muhtevası belirlenir
4. Boşlukların su ile dolması ve havanın çıkması için su içinde bulunan alt ve üst poroz (geçirimli) taşlar arasına numune yerleştirilir.
5. Yükü üniform olarak aktaracak üst başlık üst poroz taş üstüne konur.

6. Ödometre kolu bunun üzerine yerleştirilir. Düşey deformasyon saati ayarlanır. İlk okuma alınır. Bu işlem sırasında kaldıraca 50 gr. Gibi küçük bir ağırlık konarak rahat bir çalışma sağlanır.
 7. İlk yük kademesine karşılık gelen ağırlık yerine konur. Aynı anda kronometre çalıştırılır. (ilk ağırlık 25 kN/m² olmalıdır.).
 8. 15", 30", 60", 2' okumaları alınır.
 9. 2' dakika okumasından sonra numune kabı su ile doldurulur. Doldurulan su, su muhtevasının değişimini engeller.
 10. Bundan sonra sıkışma-zaman eğrisinin hassas bir şekilde çizilebilmesi için genel olarak aşağıdaki şekilde belirli aralıklarla okumalar alınır.
4', 8', 15', 30', 60', 2^h, 4^h, 8^h,24^h
 11. Okuma almaya mikrometrede sabitleşme olana kadar devam edilmelidir. Bu süre laboratuvar şartlarında 24 saattir. Kumlarda toplam süre olarak (her yük kademesi için) 30 dakika kadar bir zaman yeterli olmaktadır.
 12. Zemin numunesi üzerindeki yük artırılırsa zemin tekrar oturmaya başlayacaktır. Uygulanan gerilme ile meydana gelen nihai sıkışma arasındaki ilişkiyi saptamak için ödometre deneyi kademeli yükleme altında gerçekleştirilmektedir. Numune yeni denge durumuna eriştiğinde yeni yük kademesine geçilir.
Aynı işlemler 7.kademedan başlayarak tekrar edilir (50 kN/m² yapılır).
 13. Yük kademeleri 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 kN/m² olarak yüklenir.
 14. Son yük kademesine varıldığında veya herhangi bir ara yük kademesinde yükleme azaltılarak (aynı sıra ile yükler kaldırılarak) numunedeki kabarmalar gözlenir. Yükleme boşaltma işlemi yapılır. Böylece zeminin sıkışma ve şişmesi deneysel olarak belirlenebilmektedir. Zeminin sıkışması esas olarak boşluk hacminin azalması sonucu meydana geldiği ve numune alanı sabit kaldığı için boy kısılmasından kolaylıkla boşluk oranı değişimlerini hesaplamak mümkün olmaktadır.
- Zemin üzerindeki yük kaldırıldığı zaman, düşey şekil değiştirmelerin bir kısmı geri gelmektedir (zemin şişme göstermektedir). Ödometre deneyinde son yük kademesinden sonra yine kademeli olarak uygulanan düşey yük azaltılmakta ve zeminin şişmesi deneysel olarak belirlenebilmektedir
15. Deney sonunda numune aletten çıkarılır. Ağırlık belirlenmesi yapılır. Su muhtevası belirlenir.
 16. Deney sonuçları değerlendirilir.

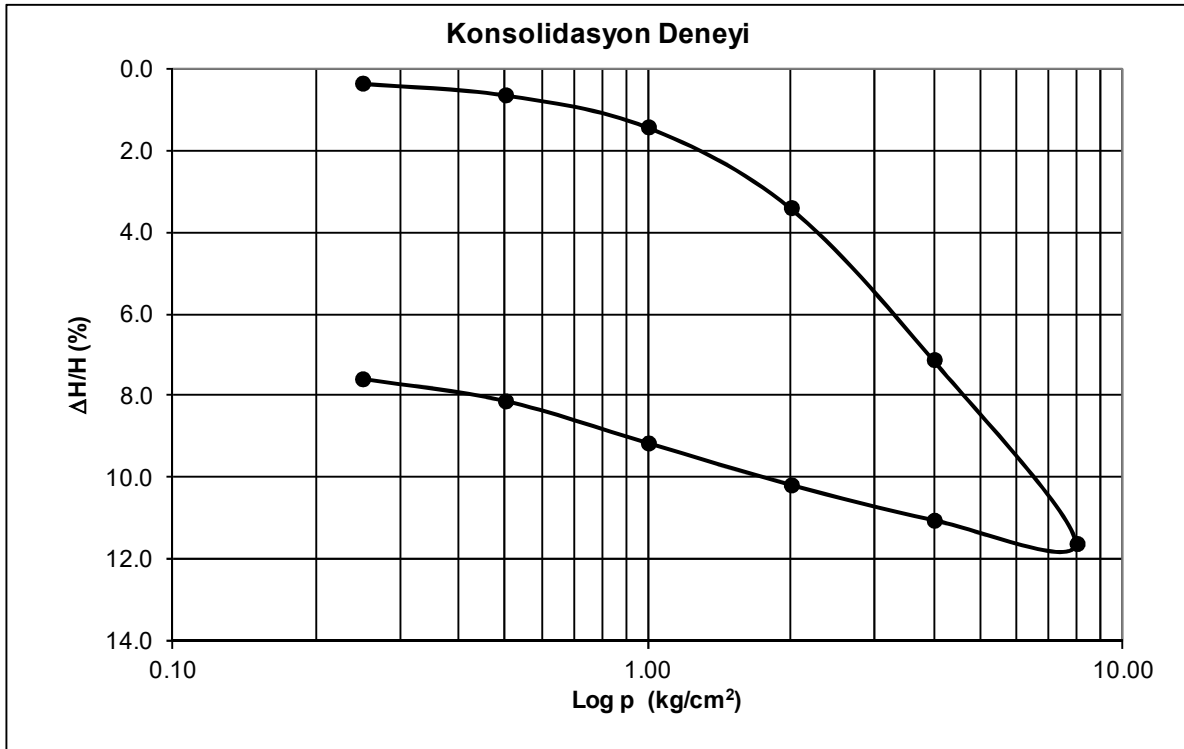
Konsolidasyon deneyine ait hesaplamaları içeren örnek Şekil 8.1'de verilmiştir.

KONSOLIDASYON																
Ölçek	500	$e_{son} = 0.779$	$e_{son} = w_{son} * \gamma_s$													
Numune boyu	20	$e_o = e_{son} + [(H/H) * (1 + e_o)]$		(formülden e_o bulunur aşağıdaki şekilde)												
$w_o =$	32	$e_o = 0.925$	$e_o = (e_{son} + \Delta H/H) / (1 - \Delta H/H)$													
$w_{son} =$	29	$\Delta e = (\Delta H/H)(1 + e_o) = ((1 + e_o)/H) * \Delta H$					$(\Delta e/\Delta H) = (1 + e_o)/H = 0.0963$	(sabit olup herkes kendi datası için hesaplayacak)								
γ_o (t/m ³) =	1.78															
γ_{son} (t/m ³) =	1.88															
Basınç	Basınç	Basınç	Okumalar	Sıkışma	Numune	Kademede kalınlık			Ortalama		I. YOL		II. YOL		III. YOL	
P (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)		ΔH (mm)	H- ΔH (mm)	$\Delta H = H_1 - H_2$ (mm)	$\Delta e = (\Delta H/H)(1 + e_o)$	$e = e_o - \Delta e$	kalınlık	$\Delta H/H$	$(\Delta H/H)/\Delta P$	$(\Delta e)/\Delta P$	$a_v/1 + e$	e_{ort}	$a_v/1 + e_{ort}$	$\Delta H/H_o$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
		1-1'		4/(20 mm)	6-5	5-5'	0.0963*7	9-8	(6+6)/2	7/10	11/3	8/3	13/(bir+9)	(9+9)/2	13/(bir+9)	5/(20 mm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	20.00	0.000	0.000	0.925	20.00	0	0	0	0	0	0	0.000
0.25	0,00-0,25	0.25	36.50	0.073	19.93	0.073	0.007	0.918	19.96	0.004	0.01463	0.02811	0.01465	0.92187	0.01463	0.365
0.50	0,25-0,50	0.25	65.00	0.130	19.87	0.057	0.005	0.913	19.90	0.003	0.01146	0.02195	0.01147	0.91561	0.01146	0.650
1.00	0,50-1,00	0.50	143.50	0.287	19.71	0.157	0.015	0.898	19.79	0.008	0.01587	0.03023	0.01593	0.90531	0.01587	1.435
2.00	1,00-2,00	1.00	341.00	0.682	19.32	0.395	0.038	0.860	19.52	0.020	0.02024	0.03803	0.02045	0.87874	0.02024	3.410
4.00	2,00-4,00	2.00	713.00	1.426	18.57	0.744	0.072	0.788	18.95	0.039	0.01963	0.03581	0.02003	0.82391	0.01963	7.130
8.00	4,00-8,00	4.00	1163.00	2.326	17.67	0.900	0.087	0.701	18.12	0.050	0.01241	0.02166	0.01273	0.74478	0.01241	11.630
4.00	8,00-4,00	-4.00	1106.00	2.212	17.79	-0.114	-0.011	0.712	17.73	-0.006				0.70695		11.060
2.00	4,00-2,00	-2.00	1019.50	2.039	17.96	-0.173	-0.017	0.729	17.87	-0.010				0.72076		10.195
1.00	2,00-1,00	-1.00	917.00	1.834	18.17	-0.205	-0.020	0.749	18.06	-0.011				0.73896		9.170
0.50	1,00-0,50	-0.50	814.00	1.628	18.37	-0.206	-0.020	0.769	18.27	-0.011				0.75874		8.140
0.25	0,50-0,25	-0.25	760.00	1.520	18.48	-0.108	-0.010	0.779	18.43	-0.006				0.77385		7.600

Şekil 8.1 Konsolidasyon Deneyine Ait Hesaplamalar



Şekil 8.2 e-logP eğrisi (c_c değerini hesaplamak için 1 ile 9. sütundan elde edilmiştir)



Şekil 8.3 ϵ ile logP eğrisi (m_v katsayısını elde etmek için 1 ile 17. sütundan elde edilir)

Konsolidasyon katsayısı c_v değerini hesaplamak için ise Casagrande (log t yöntemi) ve Taylor Yöntemi (karekök t yöntemi) mevcut olup Şekil 8.4'te sırası ile verilmiştir.

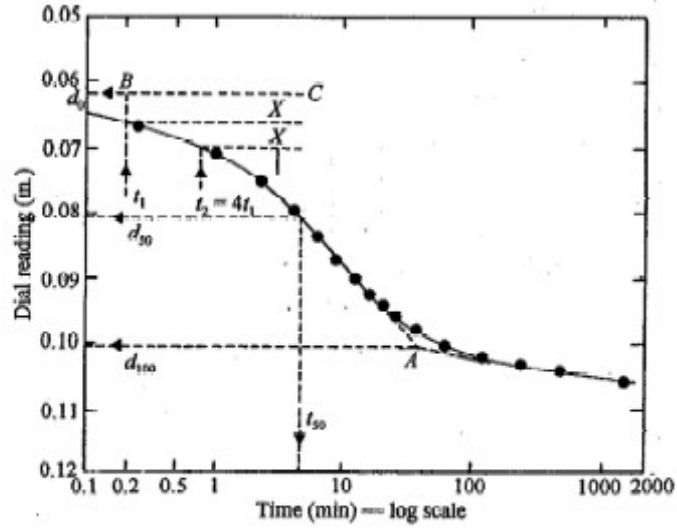


Figure 17-5. Logarithm of time curve fitting method for the laboratory results given in Table 17-1.

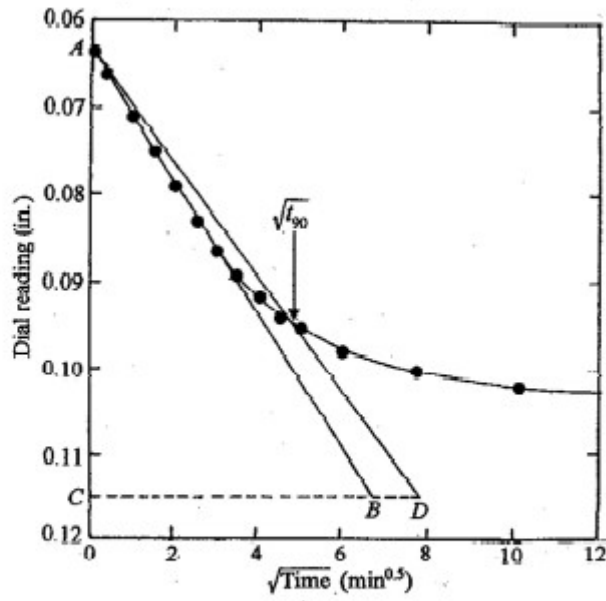
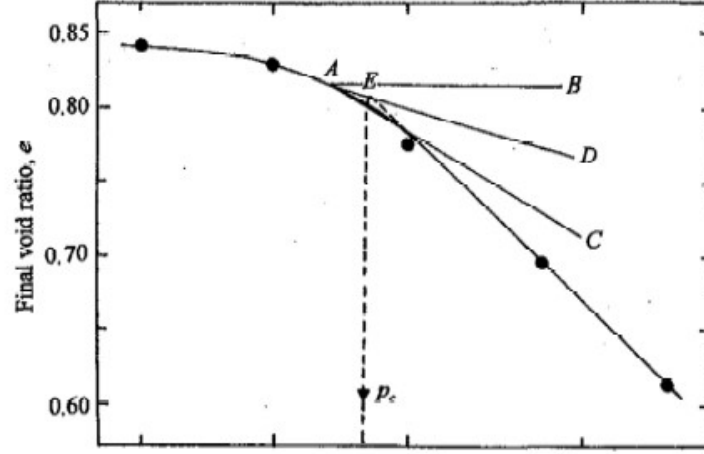


Figure 17-4. Plot of dial reading vs. $\sqrt{\text{time}}$ for the test results given in Table 17-1. Determination of t_{90} by square-root-of-time method.

Şekil 8.4 a. Casagrande (log t yöntemi) b. Taylor Yöntemi (karekök t yöntemi)

Ön konsolidasyon basıncı değeri Casagrande yöntemine göre Şekil 8.5'te verilen grafiğe göre elde edilebilir.



Şekil 8.5 Ön Konsolidasyon Basıncının Casagrande Yöntemine Göre Belirlenmesi