

iki

Zeminlerin İndeks ve Sınıflamaya Esas Özellikleri

2.1 GİRİŞ

Bu bölümde, geoteknik mühendisleri tarafından zeminleri sınıflamada ve indeks özelliklerini belirlemede kullanılan temel terimler ile tanımlamaları takdim edeceğiz. Bu kapsamda aşağıda verilen notasyonlar kullanılacaktır.

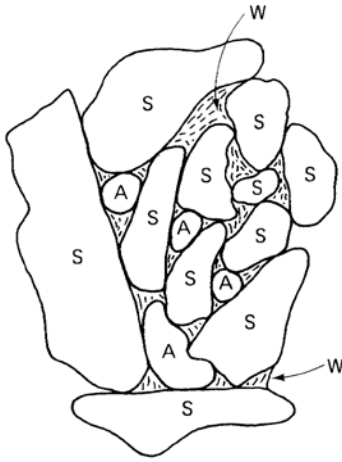
Simge	Boyut	Birim	Tanım
A	–	–	Aktivite (2-24 eşitliği)
C_c	–	–	Eğrilik katsayısı (2-20 eşitliği)
C_u	–	–	Üniformluk katsayısı (2-19 eşitliği)
D_{10}	L	mm	Ağırlıkça %10'dan daha ince için çap
D_{30}	L	mm	Ağırlıkça %30'dan daha ince için çap
D_{60}	L	mm	Ağırlıkça %60'dan daha ince için çap
e	–	(ondalık)	Boşluk oranı (2-1 eşitliği)
LI veya I_L	–	–	Likitlik indeksi (2-23 eşitliği)
LL veya w_L	–	–	Likit limit
M_t	M	kg	Toplam kütle
M_s	M	kg	Katı partikül kütlesi
M_w	M	kg	Suyun kütlesi
n	–	(%)	Porozite (2-2 eşitliği)
PI veya I_p	–	–	Plastisite indeksi (2-22 eşitliği)
PL veya w_p	–	–	Plastik limit
S	–	(%)	Doğgunluk derecesi (2-4 eşitliği)
SL veya w_s	–	–	Büzülme limiti
V_a	L^3	m^3	Havanın hacmi
V_s	L^3	m^3	Katı partikül hacmi
V_t	L^3	m^3	Toplam hacim
V_v	L^3	m^3	Boşluk hacmi
w	–	(%)	Su içeriği (2-5 eşitliği)
ρ	M/L^3	kg/m^3	Toplam veya ıslak yoğunluk (2-6 eşitliği)
ρ'	M/L^3	kg/m^3	Batık yoğunluk (2-11 eşitliği)
ρ_d	M/L^3	kg/m^3	Kuru yoğunluk (2-9 eşitliği)
ρ_s	M/L^3	kg/m^3	Katı partikül yoğunluğu (2-7 eşitliği)
ρ_{sat}	M/L^3	kg/m^3	Doğgun yoğunluk (2-10 eşitliği)
ρ_w	M/L^3	kg/m^3	Suyun yoğunluğu (2-8 eşitliği)

Bu listede L =uzunluk ve M =küttedir. Katıların ve suyun yoğunluğu kg/m^3 cinsinden ifade edilmek istendiğinde ortaya çıkan rakamlar genellikle oldukça büyüktür. Sözelimi

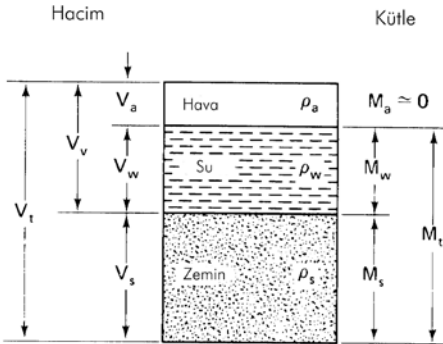
suyun yoğunluğu 1000 kg/m^3 'dür. $1000 \text{ kg}=1 \text{ Mg}$ olduğundan, rakamların da daha kolay ele alınabilmesi bakımından, yoğunluk için genellikle Mg/m^3 kullanacağız. SI metrik birimleri ve bunların dönüşüm faktörleri ile aşinalığınız yoksa, bu bölümün geri kalan kısmına devam etmeden önce Ek A'yı okumanızı tavsiye ederiz.

2.2 TEMEL TANIMLAR VE FAZ İLİŞKİLERİ

Genelde bir zemin kütlesi katı partiküller ile bunların arasındaki boşluklardan oluşur. Katı partiküller değişik minerallerin küçük tanelerinden oluşmuştur. Boşluklar ise su veya havayla doludur veya kısmen doludur (Şekil 2.1). Başka bir deyişle, zemin kütlelerinin toplam hacmi V_t , katı partiküllerin hacmi V_s ile boşlukların hacmi V_v 'den ibarettir. Boşluk hacmi genelde suyun hacmi V_w ile havanın hacmi V_a 'dan oluşur. Bu üç fazı şematik olarak bir faz diyagramında göstermek mümkündür (Şekil 2.2). Bu diyagramda üç fazın herbirini ayrı ayrı göstermek mümkündür. Diyagramın sol tarafında genellikle üç faza ait hacim bileşenleri ve sağ tarafında da bunlara karşılık gelen kütle bileşenleri yer alır. Faz diyagramı iki boyutta verilmiş olsa da, hacim için m^3 veya cm^3 kullanımı uygun olacaktır.



Şekil 2.1 Hava (A) ve suyla (W) dolu boşluklar ile katı partiküllerden (S) oluşan zemin iskeleti.



Şekil 2.2 Faz diyagramı üzerinde bir zeminin hacim ve kütle ilişkilerinin gösterimi.

Mühendislik uygulamalarında genellikle toplam hacim V_t , suyun kütlesi M_w ve katı partiküllerin kütlesi M_s 'yi ölçeriz. Daha sonra geri kalan büyüklükleri ve ihtiyaç duyduğumuz

kütle-hacim ilişkilerini hesaplarız. Bu ilişkilerin çoğu, numune büyüklüğünden bağımsızdır ve çoğu zaman da boyutsuzdur. Bu ilişkiler özellikle bir faz diyagramı çizildiği zaman çok daha basit ve hatırlanması kolay olmaktadır. Bunların ezberlenmesi gerekebilir, fakat faz problemleri ile uğraşırken ezberleme işi kendiliğinden oluşacaktır.

Geoteknik mühendisliğinde çok faydalı üç hacimsel oran vardır ve bunlar Şekil 2.2'deki faz diyagramından doğrudan tanımlanabilmektedir.

1. **Boşluk oranı e ,**

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2-1)$$

şeklinde tanımlanır. Formüldeki V_v , boşlukların hacmi; V_s de katı partikül hacmidir. Boşluk oranı e genellikle ondalık olarak ifade edilir. e 'nin alabileceği maksimum değer sıfır ile sonsuz aralığında bir sayıdır. Ancak, kum için tipik değerler 0,4 ile 1,0 arasında; kil için ise 0,3 ile 1,5 aralığındadır. Organik zeminlerde çok daha yüksek değer alabilir.

2. **Porozite n ,**

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad (\%) \quad (2-2)$$

şeklinde tanımlanır. Formüldeki V_v , boşlukların hacmi; V_t de toplam hacimdir. Porozite geleneksel olarak yüzde şeklinde ifade edilmektedir. Alabileceği değer %0 ile %100 arasındadır. (2-1) ve (2-2) eşitliklerinden,

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2-3a)$$

ve

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (2-3b)$$

3. **Doygunluk derecesi S ,**

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (\%) \quad (2-4)$$

olarak tanımlanır. Doygunluk derecesi bize boşlukların hacminin yüzde kaçının suyla dolu olduğunu ifade eder. Zeminin tamamen kuru olması halinde $S=0$; boşlukların tamamının suyla dolu olması halinde zemin tamamen doymuş ve $S=100$ 'dür.

Şimdi de Şekil 2.2'deki faz diyagramının kütle tarafına bakalım. Öncelikle, bir zemin hakkında belki de bilmemiz gereken en önemli özellik olan bir kütle oranını tanımlayalım. Bir zeminde katı partiküllere kıyasla ne kadar su bulunduğunu bilmek isteriz. Buradan hareketle **su içeriği** olarak ifade edilen,

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (\%) \quad (2-5)$$

oranını tanımlarız. Formüldeki M_w suyun kütlesi; M_s de katı partiküllerin kütlesidir.

Bir zeminin bünyesinde bulunan su miktarının zemin tanelerinin miktarına oranını belirlemede zeminin toplam kütlesi değil *kuru kütlesi* esas alınır. Genellikle *yüzde olarak ifade edilen* su içeriğinin değeri sıfır (kuru zemin) ile yüzde birkaç yüz arasında değişir. Bazı denizel killerde veya organik zeminlerde %500 veya daha yüksek değerlere çıkabilse de çoğu zeminlerin doğal su içeriği %100'ün çok altındadır.

Su içeriğinin laboratuvarında tayin edilmesi son derece kolaydır. ASTM (1980) D2216 standardında bunun nasıl yapıldığı izah edilmiştir. Zeminden temsilci bir numune alınır ve toplam veya ıslak kütlesi belirlenir. Daha sonra bu zemin örneği 110 °C ısıdaki etüvde ağırlığı sabit kalana kadar kurutulur. Zemin örneğinin etüvde bir gece bırakılması genellikle kuruma için yeterli görülmektedir. Numunun konduğu kabın darası ıslak ve kuru kütlelerden mutlaka çıkarılmalıdır. Bundan sonra yapılması gereken sadece su kütlesinin (2-5) eşitliğine göre belirlenmesinden ibarettir. Örnek 2.1'de su içeriğinin pratikte nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.

ÖRNEK 2.1

Verilen:

Islak bir zemin örneğinin kütlesi kap ile beraber 462 g gelmektedir. Etüvde kurutulduktan sonra yine kabın kütlesi ile beraber tartıldığında 364 g gelmiştir. Kabın darası 39 gramdır.

İstenen:

Zeminin su içeriğini belirleyiniz.

Çözüm:

Aşağıdaki gibi liste oluşturunuz. (a), (b) ve (d) şıklarına problemde verilen veya ölçülen değerleri koyunuz. (c), (e) ve (f)'de istenenleri hesaplayınız.

- a. Islak zemin + kabın kütlesi=462 g
- b. Kuru zemin + kabın kütlesi=364 g
- c. Suyun kütlesi (a–b) = 98 g
- d. Kabın kütlesi (darası) = 39 g
- e. Kuru zeminin kütlesi (b–d) =325 g
- f. Su içeriği (c/e) x 100 (%) =%30,2

Laboratuvarında kütleler genellikle bir hassas terazide ve gram (g) cinsinden belirlenmektedir.

Geoteknik mühendisliğinde çok kullanılanı diğer bir kavram **yoğunluktur**. Fizikten yoğunluğun, birim hacmi dolduran kütle; biriminin de kg/m^3 olduğunu biliyorsunuz (cgs ve İngiliz Mühendislik Sistemleri'nde karşılık gelen birimler için Ek A'ya bakınız). *Yoğunluk*, faz diyagramında hacim tarafını kütle tarafına bağlayan bir orandır. Geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan birkaç yoğunluk çeşidi vardır. Bunlar, **doğal (veya ıslak) yoğunluk** ρ ,

kati partikül yoğunluğu ρ_s ve suyun yoğunluğu ρ_w 'dir. Şekil 2.2'den kütle ve hacimlerden hareketle:

Doğal zeminlerde yoğunluğun değeri boşluklarda bulunan suyun miktarına ve mineral tanelerinin kendi yoğunluklarına bağlı olarak değişecektir. ρ 'nun değeri genellikle 1000

$$\rho = \frac{M_t}{V_t} = \frac{M_s + M_w}{V_t} \quad (2-6)$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2-7)$$

$$\rho_w = \frac{M_w}{V_w}$$

kg/m³ ile 2400 kg/m³ arasında değişmektedir (1,0–2,4 Mg/m³). Çoğu zeminler için ρ_s 'nin tipik değeri 2500–2800 kg/m³ (2,5–2,8 Mg/m³) aralığındadır. Kumlarda bu değer 2,6–2,7 Mg/m³ arasındadır. Sözelimi çok yaygın bir mineral olan kuvars için $\rho_s=2,65$ Mg/m³tür. Zeminde egemen olan mineralin türüne bağlı olarak ρ_s kilerde 2,65–2,80 Mg/m³ aralığındadır. Sonuç olarak ρ_s için spesifik bir değer verilmediği sürece geoteknik uygulamalarındaki birçok faz problemlerinde $\rho_s=2,65$ veya 2,70 Mg/m³ kabul edilebilir.

Sıcaklığa bağlı olarak suyun yoğunluğu az da olsa değişebilmektedir. 4 °C'da su en yoğun halindedir ve ρ_w tam olarak 1000 kg/m³'e (1 g/cm³) eşittir. Bu yoğunluk bazan ρ_0 sembolü ile ifade edilmektedir. Çoğu mühendislik hesaplamalarında $\rho_w, \rho_0=1000$ kg/m³=1 Mg/m³ almakta bir sakınca yoktur.

Zemin mühendisliğinde bunlardan başka üç diğer yoğunluk çeşidi vardır. Bunlar, kuru yoğunluk ρ_d , doymun yoğunluk ρ_{sat} ve batık yoğunluk ρ' dür.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t} \quad (2-9)$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + M_w}{V_t} \quad (V_a = 0, \quad S = \%100) \quad (2-11)$$

$$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w$$

Daha doğru bir ifade ile, (2-11) eşitliğinde ρ_{sat} yerine doğal yoğunluk ρ kullanılmalıdır. Ancak, çoğu durumlarda tamamen batık zeminler zaten tam doymundur veya en azından doymun olduklarını kabul etmek makul sayılmaktadır. Kuru yoğunluk ρ_d , toprak dolgularda sıkışma derecesini belirlemede (Bölüm 5) önemli bir ölçüttür. Değişik zemin grupları için ρ_d , ρ_{sat} ve ρ' ne ait tipik değerler Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Bazı yaygın zemin malzemelerinin değişik yoğunlukları için tipik değerler.

Zemin Türü	Yoğunluk (Mg/m ³)		
	ρ_{sat}	ρ_d	ρ'
Kum ve çakıl	1,9–2,4	1,5–2,3	1,0–1,3
Silt ve kil	1,4–2,1	0,6–1,8	0,4–1,1
Buzul tili	2,1–2,4	1,7–2,3	1,1–1,4
Ezilmiş kaya	1,9–2,2	1,5–2,0	0,9–1,2
Turba	1,0–1,1	0,1–0,3	0,0–0,1
Organik silt, kil	1,3–1,8	0,5–1,5	0,3–0,8

*Hansbo (1975)'den değiştirilerek alınmıştır.

Bir sonraki bölümde verdiğimiz örneklerde olduğu gibi, bu bölümde verilen temel tanımlamalardan diğer faydalı ilişkiler türetilmektedir.

2.3 FAZ PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ

Faz problemleri zemin mühendisliğinde son derece önemlidir. Bu bölümde bazı sayısal örneklerin de yardımıyla çoğu faz problemlerinin nasıl çözüleceğini göreceğiz. Çoğu disiplinlerde geçerli olduğu gibi, ne kadar çok problem çözerseniz problemler o kadar basitleşir ve problem çözmede yeterli olursunuz. Ayrıca, faz problemlerini çözmek suretiyle kısa bir süre içerisinde önemli tanım ve ilişkilerini ezberleyecek ve böylece formüller üzerinde harcamayacağınız zamandan tasarruf etmiş olacaksınız.

Faz problemlerini çözmeye yapabileceğiniz en önemli iş, sadece bir *faz diyagramının çizilmesinden ibarettir*. Özellikle yeni başlayanlar için bu daha da önemlidir. Problem çözmede doğru formülü bulmak için zamanı boşa harcamayınız. Bunun yerine daima bir faz diyagramı çizerek verilen bilgileri ve bilinmeyenleri bunun üzerine aktarmaya gayret ediniz. Bu yöntemle bazı problemlerde hemen çözüme gitmek mümkündür. En azından problemin çözümüne dair doğru yöntemin bulunması sağlanır. Ayrıca, Örnek 2.2'de de gösterildiği gibi, aynı problemin çözümü için çoğu zaman alternatif yöntemler mevcuttur.

ÖRNEK 2.2

Verilen:

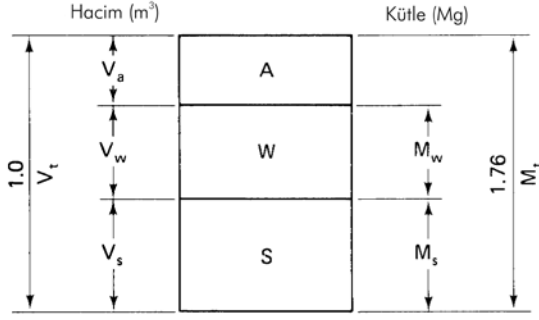
$\rho = 1,76 \text{ Mg/m}^3$ (doğal yoğunluk)
 $w = \%10$ (su içeriği)

İstenen:

ρ_d (kuru yoğunluk), e (boşluk oranı), n (porozite), S (doygunluk derecesi) ve ρ_{sat} 'ı (doygun yoğunluk) hesaplayınız.

Çözüm:

Bir faz diyagramı çiziniz (Şekil Ör. 2.2a). $V_f = 1 \text{ m}^3$ kabul ediniz.



Şekil Ör. 2.2a

Su içeriği ve doğal yoğunluğun tanımlarından (2-5 ve 2-6 eşitlikleri) M_s ve M_w 'yi bulabiliriz. Hesaplamalarda su içeriğinin ondalık olarak alındığına dikkat ediniz.

$$w = 0,1 = \frac{M_w}{M_s}$$

$$\rho = 1,76 \text{ Mg} / \text{m}^3 = \frac{M_t}{V_t} = \frac{M_w + M_s}{1,0 \text{ m}^3}$$

$M_w = 0,1 M_s$ 'yi eşitlikteki yerine koyarak,

$$1,76 \text{ Mg} / \text{m}^3 = \frac{0,1 M_s + M_s}{1,0 \text{ m}^3}$$

$M_s = 1,60 \text{ Mg}$ ve $M_w = 0,16 \text{ Mg}$ elde ederiz.

Bu değerler faz diyagramının (Şekil Ör. 2.2b) kütle tarafına yerleştirilir ve bulunması gerekli diğer büyüklükler hesaplanır.

ρ_w 'nin tanımından (2-8 eşitliği) V_w 'yi bulabiliriz.

$$\rho_w = \frac{M_w}{V_w}$$

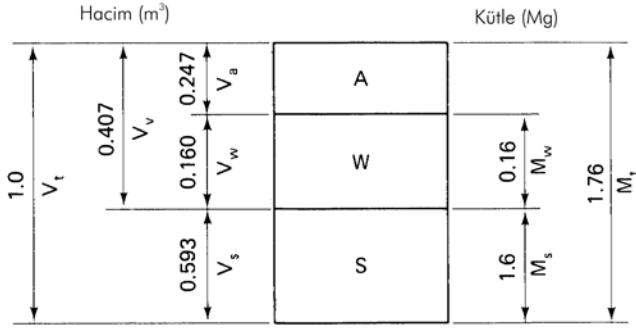
veya,

$$V_w = \frac{M_w}{\rho_w} = \frac{0,16 \text{ Mg}}{1 \text{ Mg} / \text{m}^3} = 0,16 \text{ m}^3$$

Bu değeri Şekil Ör. 2.2b'deki faz diyagramına aktarınız.

V_s 'yi hesaplamak için katı partiküllerin yoğunluğuna (ρ_s) dair bir varsayımda bulunmamız gerekir. $\rho_s = 2,70 \text{ Mg} / \text{m}^3$ kabul edersek ρ_s 'nin tanımından (2-7 eşitliği) V_s 'yi doğrudan bulabiliriz:

$$V_s = \frac{M_s}{\rho_s} = \frac{1,6 \text{ Mg}}{2,70 \text{ Mg} / \text{m}^3} = 0,593 \text{ m}^3$$



Şekil Ör. 2.2b

$V_f = V_a + V_w + V_s$ olduğundan ve V_w ile V_s terimlerinin değerlerini bildiğimizden V_a 'yı hesaplayabiliriz.

$$V_a = V_t - V_w - V_s = 1,0 - 0,593 - 0,160 = 0,247 \text{ m}^3.$$

Faz diyagramındaki tüm değerler yerine konulduktan sonra yapılması gereken şey, problemde diğer istenenleri bulmak için, sadece rakamları eşitlikteki yerlerine koymaktan ibaret olacaktır. Hesaplamaları yaparken, eşitlikleri önce semboller halinde yazmanızı, daha sonra da rakamları yerlerine koymanızı tavsiye ederiz. Ayrıca, değerleri eşitlikteki yerine koyarken, hemen yanına birimini de yazmak iyi bir alışkanlık kazandıracaktır.

İstenenler arasında geri kalanların bulunması oldukça kolaydır.

(2-9) eşitliğinden,

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t} = \frac{1,6 \text{ Mg}}{1 \text{ m}^3} = 1,6 \text{ Mg / m}^3$$

(2-1) eşitliğinden,

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_s} = \frac{0,247 + 0,160}{0,593} = 0,686$$

(2-2) eşitliğinden,

$$n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_a + V_w}{V_t} = \frac{0,247 + 0,160}{1,0} \times 100 = \%40,7$$

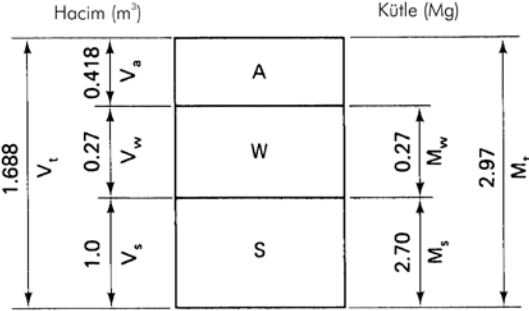
(2-4) eşitliğinden,

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_a + V_w} \times 100 = \frac{0,16}{0,247 + 0,16} \times 100 = \%39,3$$

Doygun yoğunluk ρ_{sat} tüm boşlukların suyla dolu olduğu; $S=\%100$ olduğu (2-10 eşitliği) durumdaki yoğunluktur. Bu nedenle, V_a hacmi suyla dolarsa, kütlesi $0,247 \text{ m}^3 \times 1 \text{ Mg/m}^3=0,247 \text{ Mg}$ olur. O halde,

$$\rho_{sat} = \frac{M_w + M_s}{V_t} = \frac{(0,247 \text{ Mg} + 0,16 \text{ Mg}) + 1,6 \text{ Mg}}{1 \text{ m}^3} = 2,01 \text{ Mg} / \text{m}^3$$

Bu problemi çözmenin belki de daha kolay olan bir diğer yolu da, V_s 'yi 1 birim (1 m^3) kabul etmektir. O halde, ρ_s 'nin tanımından ($\rho_s=2,7 \text{ Mg/m}^3$ kabul edildiği takdirde) $M_s=\rho_s V_s=2,7$ 'dir. Değerleri tamam olarak hesaplanmış faz diyagramı Şekil Ör. 2.2c'de verilmiştir.



Şekil Ör. 2.2c

$w=M_w/M_s=0,1$ olduğundan $M_w=0,27 \text{ Mg}$ ve $M_t=M_w+M_s=2,97 \text{ Mg}$ 'dir. Ayrıca, $\rho_w=1,0 \text{ Mg/m}^3$ olduğundan $V_w=M_w$; yani, $0,27 \text{ m}^3$ hacmi dolduran suyun kütlesi $0,27 \text{ Mg}$ 'dir. Geri kalan çözümleri yapabilmemiz için iki bilinmeyen kaldı: V_a ve V_t . Bu değerleri elde etmek için $\rho=1,76 \text{ Mg/m}^3$ şeklinde verilen bilgiyi kullanacağız. Doğal yoğunluğun tanımından (2-6 eşitliği),

$$\rho = 1,76 \text{ Mg} / \text{m}^3 = \frac{M_t}{V_t} = \frac{2,97 \text{ Mg}}{V_t}$$

Buradan V_t çekilerek,

$$V_t = \frac{M_t}{\rho} = \frac{2,97 \text{ Mg}}{1,76 \text{ Mg} / \text{m}^3} = 1,688 \text{ m}^3$$

bulunur. Buradan,

$$V_a = V_t - V_w - V_s = 1,688 - 0,27 - 1,0 = 0,418 \text{ m}^3$$

olur. Şekil Ör. 2.2c'yi kullanarak, çözümün geri kalan kısmının Şekil Ör. 2.2b'deki verilerle elde edilen sonuçlar ile aynı olduğunun sağlanmasını yapabilirsiniz.

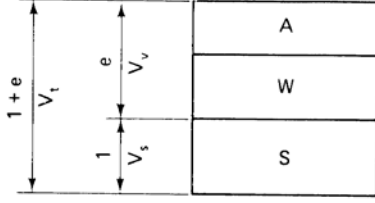
ÖRNEK 2.3

İstenen:

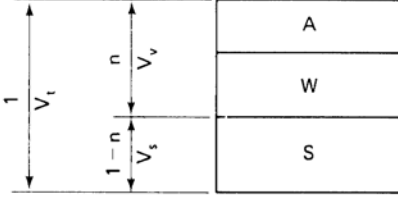
Poroziteyi (n) boşluk oranı (e) (2-3a eşitliği) ve boşluk oranını da porozite cinsinden ifade ediniz (2-3b eşitliği).

Çözüm:

Bir faz diyagramı çiziniz (Şekil Ör. 2.3a).



Şekil Ör. 2.3a



Şekil Ör. 2.3b

Bu problem için $V_s=1$ (birimi önemli değil) kabul ediniz. $V_s=1$ olduğu için (2-1) eşitliğinden $V_v=e$. Buradan, $V_t=1+e$. (2-2) eşitliğinden porozitenin tanımı V_v/V_t dir; veya,

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2-3a)$$

(2-3b) eşitliği cebirsel olarak elde edilebildiği gibi faz diyagramından da (Şekil Ör. 2-3b) elde edilebilir. Bu durum için $V_t=1$ kabul ediniz. Buradan, $V_s=1-n$. (2-1) eşitliğinden boşluk oranının tanımı $e=V_v/V_s$. Böylece,

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (2-3b)$$

ÖRNEK 2.4

Verilen:

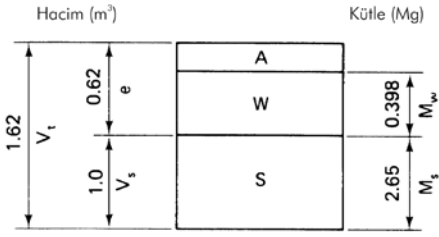
$$e=0,62 \quad w=\%15 \quad \rho_s=2,65 \text{ Mg/m}^3.$$

İstenen:

- ρ_d
- ρ
- $S=\%100$ iken w
- $S=\%100$ iken ρ

Çözüm:

Bir faz diyagramı çiziniz (Şekil Ör. 2.4).



Şekil Ör. 2.4

a. Herhangi bir hacim verilmemiş olduğundan $V_s=1 \text{ m}^3$ kabul ediniz. Tıpkı Örnek 2.3'de olduğu gibi, buradan $V_w=e=0,62 \text{ m}^3$ ve $V_t=1+e=1,62 \text{ m}^3$ bulunur. (2-9 eşitliğinden),

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t}$$

ve $M_s = \rho_s V_s$ (2-7 eşitliğinden). Böylelikle,

$$\rho_d = \frac{\rho_s V_s}{V_t} = \frac{\rho_s}{1+e}$$

Şekil Ör. 2.4'de $V_s=1 \text{ m}^3$ olduğundan,

$$= \frac{2,65}{1+0,62} = 1,636 \text{ Mg / m}^3$$

Aşağıdaki ilişkinin faz problemlerinin çözümünde çok faydalı olduğunu unutmayınız.

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1+e} \quad (2-12)$$

b. Şimdi de ρ için,

$$\rho = \frac{M_t}{V_t} = \frac{M_s + M_w}{V_t}$$

Bildiğimiz ilişkiler,

$$M_w = w M_s \quad (2-5 \text{ eşitliğinden}) \quad \text{ve} \quad M_s = \rho_s V_s$$

$$\rho = \frac{\rho_s V_s + w \rho_s V_s}{V_t} = \frac{\rho_s (1+w)}{1+e} \quad (V_s=1 \text{ m}^3 \text{ idi})$$

Bunları yerine koyarak:

$$\rho = \frac{2,65(1+0,15)}{1+0,62} = 1,88 \text{ Mg} / \text{m}^3$$

$$\rho = \frac{\rho_s(1+w)}{1+e} \quad (2-13)$$

Aşağıdaki ilişkinin bilinmesi bu problemlerde size önemli ölçüde yardımcı olacaktır.
Sağlama:

$$= 1,88 / 1,15 = 1,636 \text{ Mg} / \text{m}^3$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} \quad (2-14)$$

Hatırlanmasında yine sizin için fayda olan $\rho_d = \rho / (1+w)$ diğer bir ilişkinin sağlanmasını da yapmalısınız.

c. $S = \%100$ için su içeriği. (2-4) eşitliğinden $V_w = V_v = 0,62 \text{ m}^3$ olduğunu biliyoruz. (2-8) eşitliğinden $M_w = V_w \rho_w = 0,62 \text{ m}^3 (1 \text{ Mg} / \text{m}^3) = 0,62 \text{ Mg}$. Bundan dolayı, $S = \%100$ için su içeriği:

$$w_{(S=\%100)} = \frac{M_w}{M_s} = \frac{0,62}{2,65} = 0,234 \quad \text{veya} \quad \%23,4$$

d. ρ_{sat} . (2-10) eşitliğinden $\rho_{sat} = (M_s + M_w) / V_i$ olduğunu biliyoruz; ya da,

$$\rho_{sat} = \frac{2,65 + 0,62}{1,62} = 2,019 \quad \text{veya} \quad 2,02 \text{ Mg} / \text{m}^3$$

(2-13) eşitliği ile sağlama:

$$\rho_{sat} = \frac{\rho_s(1+w)}{1+e} = \frac{2,65(1+0,234)}{1,62} = 2,02 \text{ Mg} / \text{m}^3$$

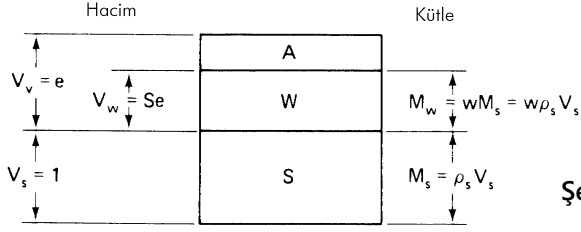
ÖRNEK 2.5

İstenen:

S , e , w ve ρ_s arasında bir ilişki elde ediniz.

Çözüm:

$V_s = 1$ olan faz diyagramına (Şekil Ör. 2.5) bakınız.



Şekil Ör. 2.5

(2-4) eşitliğinden ve Şekil 2.5'den $V_w = SV_v = Se$ olduğunu biliyoruz. Su içeriği ve ρ_s 'nin tanımlarından (2-5 ve 2-7 eşitlikleri) faz diyagramına M_s ve M_w eşdeğerlerini koyabiliriz. (2-8) eşitliğinden $M_w = \rho_w V_w$ olduğundan dolayı aşağıdaki eşitliği yazabiliriz:

$$M_w = \rho_w V_w = wM_s = w\rho_s V_s$$

veya,

$$\rho_w Se = w\rho_s V_s$$

$V_s = 1 \text{ m}^3$ olduğundan

$$\rho_w Se = w\rho_s \quad (2-15)$$

15)

(2-15) eşitliği faz problemlerinde kullanılan tüm eşitlikler arasında en faydalı olanlardan biridir. Bu eşitliğin sağlamasını ayrıca ρ_w , S , e , w ve ρ_s 'nin kendi denklemlerini yazarak da yapabilirsiniz.

(2-15) eşitliğini kullanarak (2-13) eşitliğini bir başka şekilde yazmak mümkündür:

$$\rho = \frac{\rho_s \left(1 + \frac{\rho_w Se}{\rho_s} \right)}{1 + e} = \frac{\rho_s + \rho_w Se}{1 + e} \quad (2-16)$$

$S = \%100$ olduğunda (2-16) eşitliği,

$$\rho_{sat} = \frac{\rho_s + \rho_w e}{1 + e} \quad (2-17)$$

ÖRNEK 2.6

Verilen:

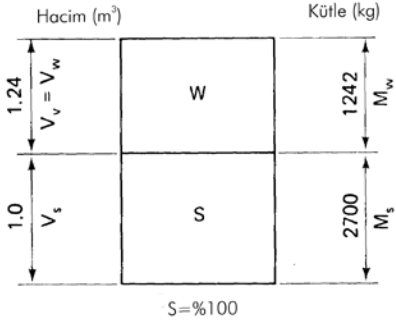
Siltli kil türü bir zemin için $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$, $S = \%100$ ve su içeriği $\%46$ 'dır.

İstenen:

Boşluk oranı e , doygun yoğunluk ve batık yoğunluğu kg/m^3 cinsinden hesaplayınız.

Çözüm:

Verilen bilgileri bir faz diyagramı üzerine aktarınız (Şekil Ör. 2.6).



Şekil Ör. 2.6

$V_s=1 \text{ m}^3$ alınız. Buradan hareketle $M_s=V_s \rho_s=2700 \text{ kg}$. (2-15) eşitliğinden e 'yi doğrudan bulabiliriz:

$$e = \frac{w\rho_s}{\rho_w S} = \frac{0,46(2700)}{1000(1,0)} = 1,242$$

$V_s=1,0$ olduğu için e ayrıca V_v 'ye eşittir. Benzer şekilde, $\rho_w=1000 \text{ kg/m}^3$ ve M_w sayısal olarak V_w 'ye eşit olduğundan $M_w=1242 \text{ kg}$ 'dir. Şu halde tüm bilinmeyenler bulunduğundan doymun yoğunluğu (2-10 eşitliği) hesaplayabiliriz.

$$\rho_{sat} = \frac{M_t}{V_t} = \frac{M_w + M_s}{1 + e} = \frac{(1242 + 2700) \text{ kg}}{(1 + 1,24) \text{ m}^3} = 1758 \text{ kg/m}^3$$

Ayrıca (2-17) eşitliğini doğrudan da kullanabiliriz:

$$\rho_{sat} = \frac{\rho_s + \rho_w e}{1 + e} = \frac{2700 + 1000(1,242)}{1 + 1,242} = 1758 \text{ kg/m}^3$$

Bir zemin su altında kaldığı zaman, zeminin gerçek birim ağırlığı suyun kaldırma kuvveti tarafından azaltılır. Suyun kaldırma kuvveti, yerdeğiştiren suyun ağırlığına eşittir. Böylece, yoğunluklar cinsinden (2-11 ve 2-17 eşitlikleri),

$$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w = 1758 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3 = 758 \text{ kg/m}^3.$$

veya

$$\begin{aligned} \rho' &= \frac{\rho_s + \rho_w e}{1 + e} - \rho_w \\ &= \frac{\rho_s - \rho_w}{1 + e} \end{aligned} \quad (2-18)$$

$$\rho = 758 \text{ kg/m}^3$$

Bu örnekte ρ suyun yoğunluğundan daha küçüktür. Tablo 2.1'e giderek ρ nün tipik değerlerine tekrar bakınız. Bir zeminin batık yoğunluğunun daha sonraki bölümlerde konsolidasyon, oturma ve dayanım konularında çok önemli olduğu görülecektir.

Özetlemek gerekirse, faz problemlerinin kolay çözümü için pekçok karmaşık formülü ezberlemek zorunda değilsiniz. Önceki örneklerde olduğu gibi, bu formüllerin çoğu faz diyagramlarından kolaylıkla türetilir. Sadece aşağıdaki basit kuralları hatırlamanız yeterlidir:

1. w , e , ρ_s , S ve benzeri özelliklerin temel tanımlarını hatırlayın.
2. Bir faz diyagramı çizin.
3. Eğer verilmemiş ise $V_s=1$ veya $V_f=1$ kabul ediniz.
4. $\rho_w S e = w \rho_s$ ilişkisini sıkça kullanınız.

2.4 ZEMİN DOKUSU

Buraya kadar anlattıklarımızda zemin kütlelerinin "katı" kısmının nelerden oluştuğu hakkında çok fazla birşey söylemedik. Bölüm 1'de mühendislik bakış açısından zeminin genel tanımlamasını yaptık: Temel kaya üzerinde bulunan mineral veya organik malzemenin gevşek bir yığılması... Yerin yüzeyine yakın kesimde veya yüzeydeki kayaların bozuşma ve diğer jeolojik süreçlerle nasıl zemine dönüştüğünü kısaca açıklamıştık. Bundan dolayıdır ki, zemin kütlelerinin katı kısmı başlıca değişik boyut ve miktardaki mineral parçacıkları ile organik maddeden oluşmaktadır.

Bir zeminin dokusu onun görünümü veya verdiği "his"dir. Partiküllerin şekil ve göreceli boyları ile bunların zemin içindeki oranına veya dağılımına bağlıdır. Bu nedendir ki, *kum* ve *çakıl* gibi iri taneli zeminlerin dokusu kabadır. İnce dokulu zeminler ise gözle görülemeyecek derecede küçük mineral taneciklerinden oluşmaktadır. *Silt* ve *killer* ince dokulu zeminlere örneklerdir.

Zemin dokusu ile (özellikle iri taneli zeminlerde) mühendislik davranışı arasında bir ilişki vardır. Bu anlamda zemin dokusu özellikle toprak bilimindeki zemin sınıflamalarında temel rolü oynamaktadır. Dokusal sınıflama terimleri (çakıl, kum, silt ve killer) geoteknik mühendisliği uygulamalarında genel anlamda halen geçerlidir. İnce taneli zeminlerde zemin davranışını etkileyen tane boyu veya dokudan ziyade suyun varlığıdır. Su, mineral taneleri arasındaki etkileşimi kontrol eder ve bu da zeminin *plastisite* veya *kohezyonluluğunu* etkiler.

Dokusal olarak zeminler iri taneli ve ince taneli olarak iki gruba ayrılabilirler. Bu ayırım için en uygun boyut çıplak gözle ayırt edilebilen tane boyudur. Bu boyuttan (yaklaşık 0,05 mm) daha büyük partiküller iri taneli; daha küçük olanlar ise ince taneli olarak adlandırılmaktadır. Çakıl ve kumlar iri taneli; silt ve killer ince tanelidir. Zeminleri sınıflamada bir diğer uygun yöntem de plastisite ve kohezyonlarına göre ayırmaktır (fizikte kohezyon, benzer özellikteki materyalin yapışarak bir araya gelmesi demektir). Sözelimi kumlar ne

plastik ne de kohezyonludur. Diğer taraftan killeri hem plastik hem de kohezyonludur. Siltler kum ve kil arasında bir yerde bulunmaktadır. İnce taneli oldukları halde plastik ve kohezyonlu değildirler. Bu tür ilişkiler ve diğer bazı genel mühendislik özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir. Dokuya ve plastisite ile kohezyon gibi diğer bazı genel karakteristiklere göre zeminleri teşhis etmede biraz tecrübeye ihtiyacınız olacaktır (en iyi olarak da laboratuvarında elde edilir!). Ayrıca, dikkat etmeniz gereken başka bir konu, *kil* terimidir. Bu terim, hem kil mineralleri olarak adlandırılan spesifik mineralleri (Bölüm 4'de tartışılmıştır) hem de kil minerali içeren zeminleri işaret eder. Bazı zeminlerin davranışı kil minerallerinin varlığından önemli ölçüde etkilenir. Geoteknik mühendisliğinde sadece kolaylık olması bakımından böyle zeminler genellikle *kil* olarak adlandırılır. Fakat gerçekte bazı kil minerallerinin varlığının bunların davranışına etkideği zeminleri kastediyoruz.

Tablo 2.2 Zeminlerin dokusal ve diğer karakteristikleri.

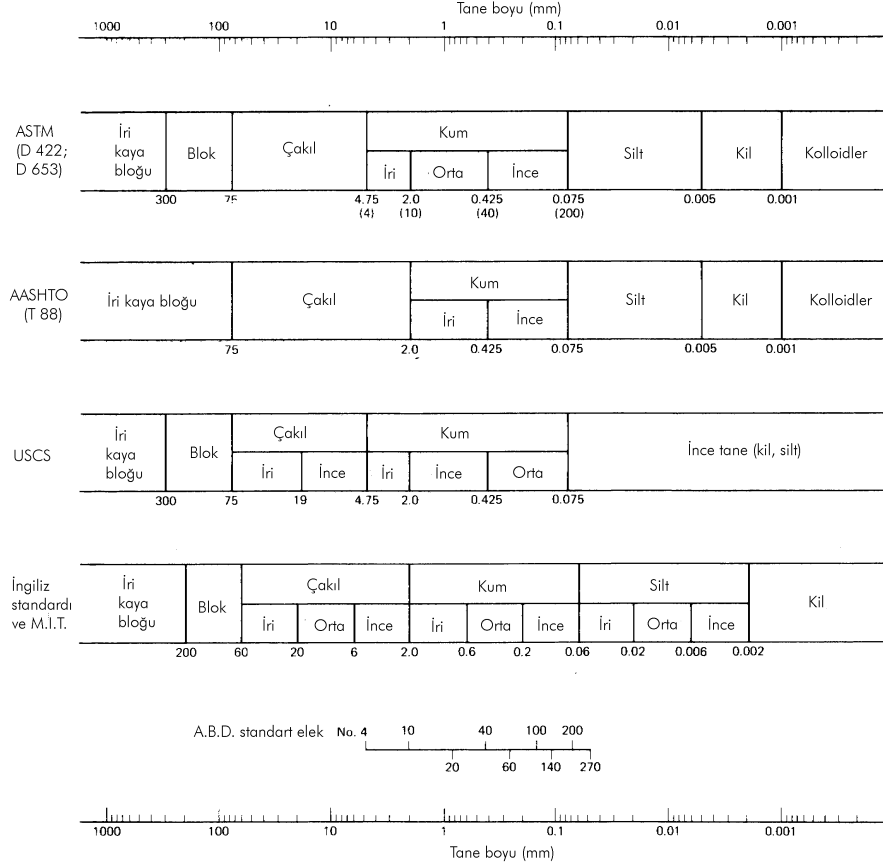
Zeminin adı:	Çakıl, Kum	Silt	Kil
Tane boyu:	İri taneli Münferit taneler çıplak gözle görülebilir.	İnce taneli Münferit taneler çıplak gözle görülmez	İnce taneli Münferit taneler çıplak gözle görülmez
Özellikler:	Kohezyonsuz Plastik değil Granüle	Kohezyonsuz Plastik değil Granüle	Kohezyonlu Plastik
Suyun mühendislik davranışı üzerine etkisi:	Genelde önemsiz (istisnası: gevşek doymun granüle malzemeler ve dinamik yükler)	Önemli	Çok önemli
Tane boyu dağılımının mühendislik davranışı üzerine etkisi:	Önemli	Genelde önemsiz	Genelde önemsiz

2.5 TANE BOYU VE TANE BOYU DAĞILIMI

Bir önceki bölümde de önerildiği gibi, özellikle granüle zeminlerde zemin partikülünün boyutu zeminin mühendislik davranışını etkilemektedir. O nedenle, sınıflama amaçlı çalışmalarda çoğu zaman bir zemin içindeki partikül veya tane boyu ile bunların dağılımını bilmek isteriz.

Zeminlerdeki tane boyunun dağılım aralığı fevkalade geniştir. Zeminler, çapı desimetre mertebesindeki bloklardan çok ince taneli kolloidal malzemeye kadar tüm boydaki tanelerden oluşabilir. Tane çapındaki bu değişimin ölçüsü 10^8 mertebesinde olabilir. O nedenle, tane boyu dağılımlarını grafikte genellikle ortalama tane çapının *logaritması* şeklinde gösteririz. **Şekil 2.3'de, yaygın olarak kullanılan bazı sınıflama sistemleri**ne göre, değişik dokusal boyların bölümleri görülmektedir. A.B.D.'nde kullanılan sınıflamalarda

muhtelif boylar için kullanılan birimlerin tane boyuna göre değiştiğine dikkat ediniz. 5 mm'den (yaklaşık ¼ inç) daha büyük çaplı malzemeler için genellikle inç kullanılmakta ise de milimetrenin kullanıldığı da olmaktadır. 5 mm ile 0,074 mm arasındaki çaplar A.B.D. standard elek çapına göre sınıflanmıştır. Şekil 2.3'de bu durum spesifik tane boyları için ayrıca belirtilmiştir. **200 No'lu elek çapı**ndan daha ince zeminler genellikle milimetre ile; çok ince taneli koloidal parçacıklar ise mikron ile boyutlandırılmaktadır.



ASTM: American Society for Testing Materials (1980)
AASHTO: American Association for State Highway and Transportation Officials (1978)
USCS: Unified Soil Classification System (U.S. Bureau of Reclamation, 1974; U.S. Army Engineer WES, 1960)
M.I.T.: Massachusetts Institute of Technology (Taylor, 1948)

Şekil 2.3 Birkaç değişik zemin sınıflamasının tane boyu aralıkları (Al-Hussaini, 1977'den değiştirilmiş). **DİKKAT USCS'DE KUM „İRİ ORTA İNCE“ ŞEKLİNDE OLACAK**

Tane boyu dağılımı nasıl elde edilir? Bu işlem **mekanik analiz veya gradasyon deneyi** olarak adlandırılır. **İri taneli zeminler için elek analizi** yapılır. Bu işlemde kuru zemin, elek açıklığı üstten alta doğru küçülecek şekilde dizilmiş dokumalı telden oluşan kare delikli eleklerde mekanik olarak sallanır. Başlangıçtaki kuru zeminin toplam kütlesi bilindiğinden,

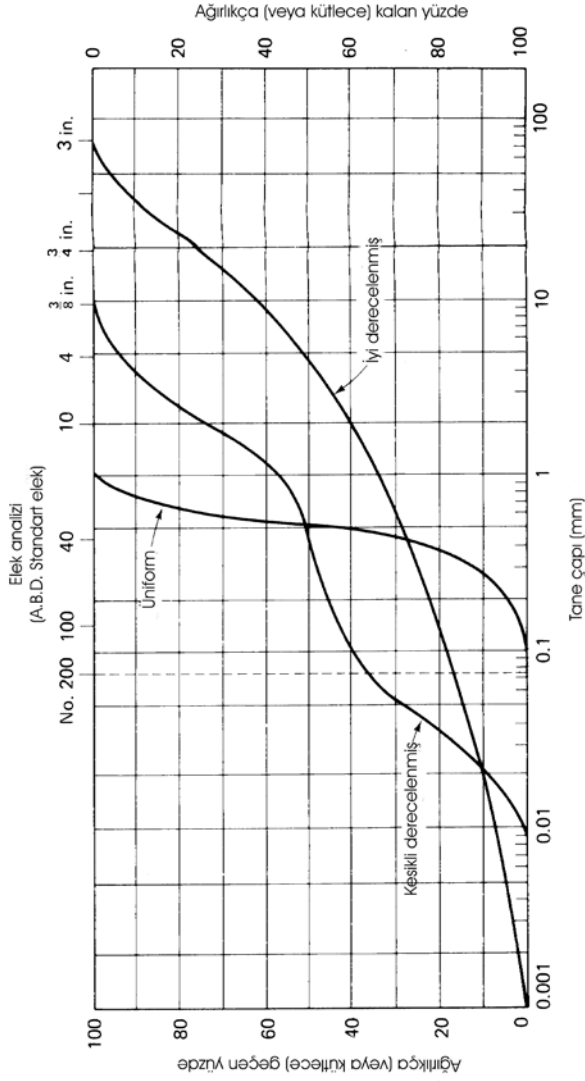
elemen sonra herbir elek üzerinde kalan (veya geçen) miktarın tartılmak suretiyle yüzdesi belirlenebilir. Bu deney için ayrıntılı prosedürler ASTM (1980) C136 ve D422 standartlarında tanımlanmıştır. Bunlara karşılık gelen AASHTO (1978) deney standartları T27 ve T88'dir. Zeminlerin tane boyu analizinde yaygın olarak kullanılan A.B.D. standart elek numaraları Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3 A.B.D. standart elek çapları ve karşılık gelen açıklık boyutları.

A.B.D. Standart Elek No.	Elek Açıklığı (mm)
4	4,75
10	2,00
20	0,85
40	0,425
60	0,25
100	0,15
140	0,106
200	0,075

Yaklaşık olarak 0,05 mm'den 0,075 mm'ye (A.B.D. standardında 200 No'lu elek) olan elek açıklıklarında elek analizi yapmak pratikte çok zordur. O nedenle, **ince taneli zeminler olan silt ve killer için elek analizi yerine yaygın olarak hidrometre analizi kullanılır**. Bu deneyin esası, viskoz sıvı içinde düşen küreler için Stoke yasasına dayanır. Stoke yasasında, viskoz sıvı içinde düşen tanelerin nihai hızı tanenin çapına ve süspansiyon halindeki taneler ile sıvının yoğunluğuna bağlıdır. Düşüş mesafesi ve zamanı bilindiği için tanenin çapı hesaplanabilmektedir. Hidrometre ile ayrıca süspansiyonun spesifik gravitesi (veya yoğunluğu) da belirlenebilmektedir. Buradan da eşdeğer tane çapına karşılık gelen partikül yüzdesi bulunabilmektedir. Elek analizinde olduğu gibi, halen süspansiyon halinde bulunan (veya çökmüş olan) toplam örneğin yüzdesi kolaylıkla tanımlanabilir. Hidrometre deneyi için ayrıntılar ASTM (1980)'de D422 ve AASHTO (1978)'de T88 standartlarında verilmiştir. Bu deney için benzer standart prosedürler USBR (1974) ve U.S. Army Corps of Engineers (1970)'de de mevcuttur. Toplam numunenin belirli bir elek çapından veya hesaplanmış tane çapından daha az yüzdesinin dağılımı, bir histogram şeklinde veya (daha yaygın olarak) kümülatif sıklık diyagramında gösterilebilir. Eşdeğer tane çapları logaritmik yatay eksen (absisde) işaretlenirken, toplam numunenin ağırlıkça (veya kütlece) yüzdesi ya geçen (daha ince) veya kalan (daha iri) şeklinde aritmetik olarak düşey eksen (ordinatta) işaretlenir (Şekil 2.4). Bu şekil bazan tane boyu sağa doğru küçülecek şekilde de kullanılmaktadır. *İyi derecelenmiş* bir zeminde geniş bir aralıktaki tane boyu dağılımı sözkonusudur. Böyle bir zeminin gradasyon eğrisi genellikle düz ve yukarı doğru içbükeydir. *Kötü derecelenmiş* bir zeminde ise belirli boyuttaki tanelerin fazlalığı veya eksikliği sözkonusudur; ya da tanelerinin çoğunluğunun çapı aşağı yukarı aynı boydadır. Şekil 2.4'deki *uniform* gradasyon, kötü derecelenmiş bir zemine örnek gösterilebilir. Yine Şekil 2.4'deki *boşluklu derecelenmiş* veya *kesikli derecelenmiş* zeminler de kötü derecelenmiş kategorisinde yer alır ve bu eğrilerde 0,5 ile 1,0 mm arasındaki tane boylarının yüzdesi oldukça düşüktür.

Tane boyu dağılımları için ayrıca yaygın olarak kullanılan istatistik parametrelerini de (ortalama, medyan, standart sapma vb.) elde edebiliriz. Ancak bu durum zemin mekaniğinden ziyade sedimentler petrolojide başvurulan bir yöntemdir. Belli bir zeminde bulunan tane çaplarının *aralığı* elbette ki önemlidir. Buna ek olarak tane boyu dağılım eğrisi üzerinde ayrıca belirli tane çaplarına karşılık gelen eşdeğer "geçen yüzde" olan D_y 'yi kullanıyoruz. Sözelimi D_{10} , numunenin ağırlıkça geçen %10'una karşılık gelen tane çapını temsil eder. Başka bir ifadeyle, tanelerin %10'u D_{10} çapından daha küçüktür. Bu parametre, tane boyu dağılımının tane boyu eksenindeki yerini belirler ve bazan *efektif çap* olarak adlandırılır. *Uniformluk katsayısı* C_u kaba bir şekil parametresidir ve,



Şekil 2.4 Tipik tane boyu dağılımları.

$$C_u = D_{60} / D_{10} \quad (2-19)$$

şeklinde ifade edilir. Bağlıntıdaki D_{60} ağırlıkça %60 geçene karşılık gelen tane çapı (mm) ve D_{10} da ağırlıkça %10 geçene karşılık gelen tane çapıdır (mm). Katsayı küçüldükçe gradasyon daha *üniform* olduğu için, üniformluk katsayısı aslında yanlış bir adılamadır. Gerçekte bu katsayı *üniform olmayışlık* katsayısı olsa gerektir. Sözelimi $C_u=1$ tek bir tane çapından oluşan zemini işaret eder. Mesela, plaj kumu gibi çok kötü derecelenmiş zeminlerin C_u değerleri 2–3 civarında iken çok iyi derecelenmiş zeminlerin C_u değerleri 15 veya üzerinde olabilmektedir. Arada bir de olsa C_u değerleri 1000 civarında yüksek rakamlara ulaşabilir. Bir örnek olması bakımından, Kaliforniya'daki Oroville Barajı'nın kil çekirdeğindeki malzeme blok boyundan çok ince kil boyutuna değiştiğinden üniformluk katsayısı 400–500 arasındadır.

Zemin sınıflamasında kullanılan bir diğer şekil parametresi de,

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60}(D_{10})} \quad (2-20)$$

eğrilik katsayısıdır. Bağlıntıdaki D_{30} ağırlıkça (veya kütlece) %30 geçene karşılık gelen tane çapıdır (mm). Eğrilik katsayısı 1 ile 3 arasında olan bir zemin, C_u çakıllar için 4'den ve kumlar için de 6'dan büyük olmak şartıyla, iyi derecelenmiş kabul edilir.

ÖRNEK 2.7

Verilen:

Şekil 2.4'de verilen tane boyu dağılımı.

İstenen:

Herbir dağılım için D_{10} , C_u ve C_c 'yi belirleyiniz.

Çözüm:

Şekil 2.4'deki herbir dağılımdan (2-19) ve (2-20) eşitlikleri için gerekli olan D_{10} , D_{30} ve D_{60} 'ı bulmamız gerekir.

a. İyi derecelenmiş zemin; sadece %10, %30 ve %60 geçene karşılık gelen çapları yatay eksenden okuyunuz.

$$D_{10}=0,02 \text{ mm}$$

$$D_{30}=0,6 \text{ mm}$$

$$D_{60}=9 \text{ mm}$$

(2-19) eşitliğinden,

$$C_u = D_{60} / D_{10} = 9 / 0,02 = 450$$

(2-20) eşitliğinden,

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}(D_{60})} = \frac{(0,6)^2}{0,02(9)} = 2$$

$C_u > 15$ ve C_c de 1 ile 3 arasında olduğundan, bu zemin gerçekten iyi derecelenmiştir.

b. Boşluklu derecelenmeli zemin; (a)'daki prosedürün aynısını kullanın:

$$D_{10}=0,022$$

$$D_{30}=0,052$$

$$D_{60}=1,2$$

(2-19) eşitliğinden,

$$C_u = D_{60}/D_{10} = 1,2/0,022 = 55$$

(2-20) eşitliğinden,

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}(D_{60})} = \frac{(0,052)^2}{0,022(1,2)} = 0,1$$

Üniformluk katsayısına göre iyi derecelenmiş kategorisine düşen bu zemin, eğrilik katsayısı açısından tatmin edici olmadığından, kötü derecelenmiş olarak değerlendirilmek durumundadır.

c. Üniform zemin; (a)'daki prosedürün aynısını kullanın:

$$D_{10}=0,3$$

$$D_{30}=0,43$$

$$D_{60}=0,55$$

(2-19) eşitliğinden,

$$C_u = D_{60}/D_{10} = 0,55/0,3 = 1,8$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}(D_{60})} = \frac{(0,43)^2}{0,3(0,55)} = 1,12$$

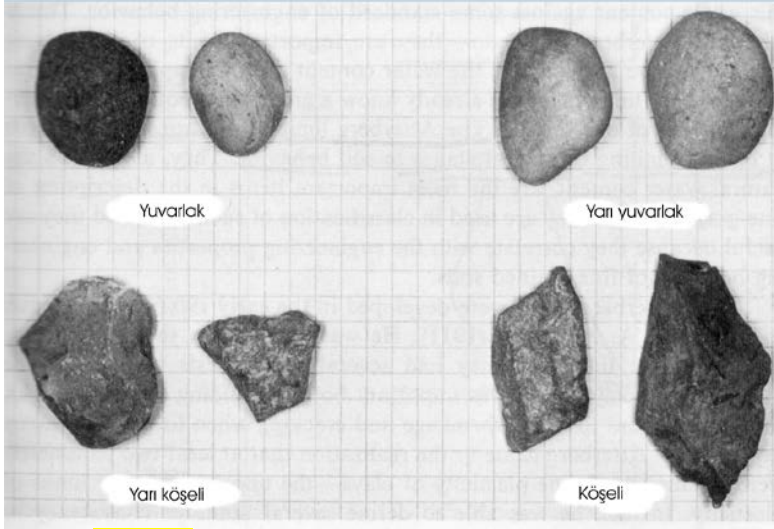
C_c 1'den biraz büyük olsa da C_u çok küçük olduğu için bu zemin kötü derecelenmiş bir zemindir.

2.6 TANE ŞEKLİ

Granüle zeminlerin mühendislik davranışı üzerinde tane boyu dağılımı kadar münferit tane şeklinin de etkisi vardır. Sedimenter petrologlar tarafından geliştirilen kurallara göre, tanenin şeklini nicel olarak ifade etmek mümkün olsa da, bu yöntem geoteknik uygulamalarında sıkça başvurulan bir yöntem değildir. Zeminlerin görsel sınıflamasının bir parçası olarak sadece nitel şekil tanımlamaları yapılmaktadır. İri taneli zeminler genellikle Şekil 2.5'de verilen şekillere göre sınıflanmaktadır.

Başka bir ayırım da, yapraksı ve iğnemsî taneler ile *tombul* taneler arasında yapılabilir. Yapraksı tanelere en iyi örnek mika tanecikleri; iğnemsî tanelere örnek olarak da Ottawa kumu gösterilebilir. Bu iki farklı tane şekillerinden oluşan zeminden hazırlanan silindirik numuneler bir piston vasıtasıyla sıkıştırıldığında tamamen farklı davranışlar sergilemektedir.

Tombul taneli zeminler gevşek halde bile olsa zor sıkışmaktadır. Yapraklı mika tanecikleri ise küçük basınçlar altında bile ilk hacimlerinin yarısına kadar incek şekilde sıkışabilmektedir. Kumların kayma dayanımlarını ele alırken granüle zeminlerin sürtünme karakteristiklerini tanımlamada tane şeklinin ne kadar önemli olduğunu göreceksiniz.



Şekil 2.5 Tipik tane şekilleri (Fotoğraf: M. Surendra).

2.7 ATTERBERG LİMİTLERİ VE KIVAM İNDİSLERİ

Boşluklarda suyun varlığının zeminlerin mühendislik davranışını, özellikle de ince taneli zeminlerinkini etkilediğini belirtmiştik (Tablo 2.2). Bir zeminde, meselâ doğal bir zemin çökelinde, ne kadar su bulunduğunu (su içeriğini) bilmek tek başına yeterli olmamaktadır. Bu su içeriğinin belirli mühendislik davranışını veren standart değerler ile karşılaştırılması gereklidir. Burada, mühendislik davranışında önemli limitler olan Atterberg limitleri devreye girmektedir. Atterberg limitlerine göre numunemizin su içeriğinin nerede olduğunu bilirsek onun mühendislik davranışı hakkında halihazırda birçok şey biliyoruz demektir. O halde Atterberg limitleri, zemin davranışında belirli limitlerdeki veya kritik aşamalardaki su içeriğini ifade eder. İnce taneli zeminlerin tanımlanmasında Atterberg limitleri doğal su içeriği ile beraber en önemli kavramları teşkil etmektedir. Böyle zeminlerin sınıflanmasında kullanıldıkları gibi, mühendislik özellikleri ve ince taneli zeminlerin mühendislik davranışlarıyla deneştirilebilir olmalarından dolayı oldukça yararlıdır.

Atterberg limitleri 1900'lerde İsveçli bir toprak bilimcisi A. Atterberg (1911) tarafından önerilmiştir. Atterberg'in çalıştığı seramik endüstrisinde killerin plastikliğini tanımlamada birkaç deney kullanılmaktaydı. Bu özellik, gerek killerden tuğla dökülmesinde ve gerekse fırınlandığı zaman çatlamayı önlemek açısından önemlidir. Pekçok deney yaptıktan sonra Atterberg'in geldiği nokta, killerin plastisitesini tanımlamada iki parametreye ihtiyaç olduğu idi: Plastisitenin alt ve üst sınırları. Atterberg birkaç kıvam veya davranış limiti belirledi ve bunları tanımlayan basit laboratuvar deneyleri geliştirdi. Bunlar:

1. Viskoz akışın üst sınırı
2. Likit limit – viskoz akışın alt sınırı
3. Yapışkanlık limiti – kilin metal bıçağa yapışma özelliğini kaybetmesi
4. Kohezyon limiti – tanelerin birbirine yapışmayı sona erdirmesi
5. Plastik limit – plastik durumun alt sınırı
6. Büzülme limiti – hacim değişiminin alt sınırı

Atterberg ayrıca zeminin plastik olduğu zamanki su içeriği aralığı demek olan *plastisite indeksini* tanımlamış ve bu özelliğin zemin sınıflamasında kullanılmasını ilk kez öneren kişi olmuştur. 1920'lerde A.B.D. Umumi Yollar Müdürlüğü'nde çalışan K. Terzaghi ve A. Casagrande zemin sınıflamalarında kolaylıkla kullanılacak şekilde Atterberg limitlerini standartlaştırmışlardır. Günümüz geoteknik uygulamalarında genellikle likit limit (LL veya w_L) ve plastik limiti (PL veya w_p); bazen de büzülme limitini (SL veya w_s) kullanıyoruz. Yapışkanlık ve kohezyon limitleri daha çok seramikte ve ziraatte kullanılmaktadır.

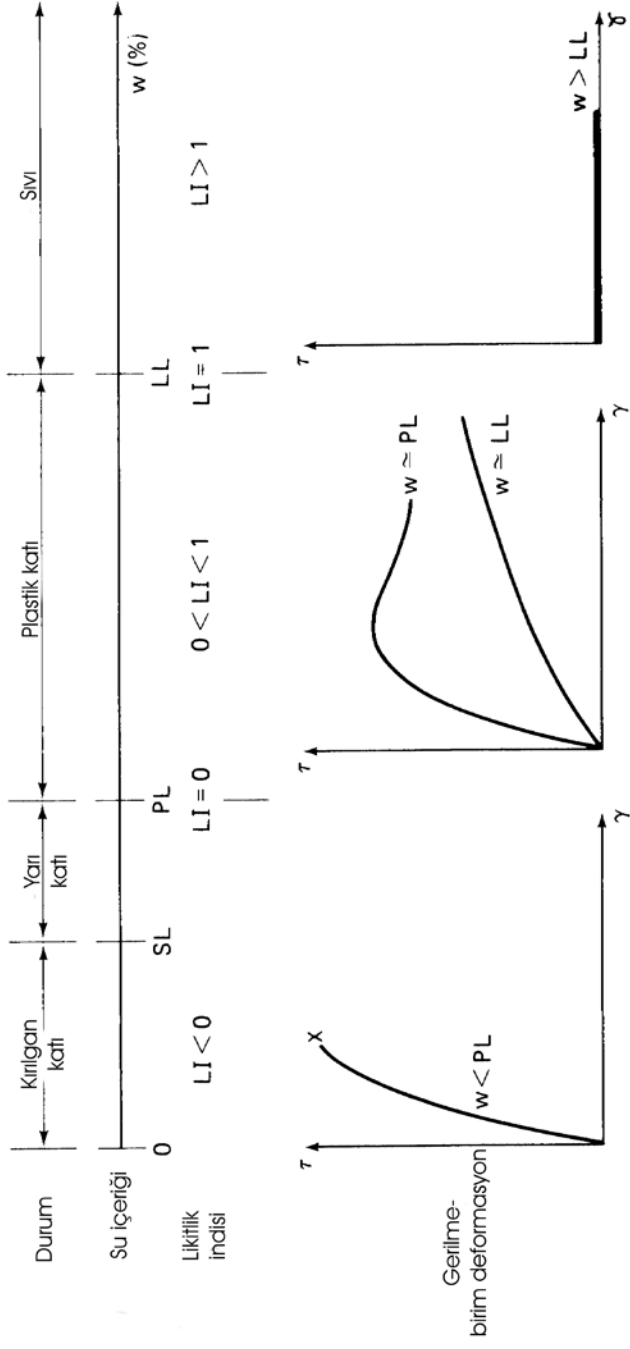
Atterberg limitleri zemin davranışında bir değişikliğin sözkonusu olduğu durumlardaki su içerikleri olduğuna göre, Şekil 2.6'daki gibi bir su içeriği bandında bu limitleri gösterebiliriz. Şekil 2.6'da ayrıca belirli su içeriği aralıkları için zemin davranış şekilleri de verilmiştir. Su içeriği artarken, zeminin durumu kırılğan katıdan plastik katıya ve sonra da viskoz sıvıya dönüşmektedir. Aynı su içeriği bandında bahsedilen bu durumlara karşılık gelen genelleştirilmiş madde davranışını (gerilme-birim deformasyon) gösterebiliriz.

Akışkanlar mekaniğinden Şekil 2.7'de verilen kayma gerilmesi–kayma hızı gradyanı eğrilerini hatırlayacaksınız. Su içeriğine bağlı olarak zemin davranışı bu eğrilerden (belki ideal Newton sıvısı hariç) herhangi birine uyabilmektedir. Bu davranışın çelik, beton veya ahşap gibi diğer mühendislik malzemelerinin davranışından ne kadar farklı olduğuna ayrıca dikkat ediniz.

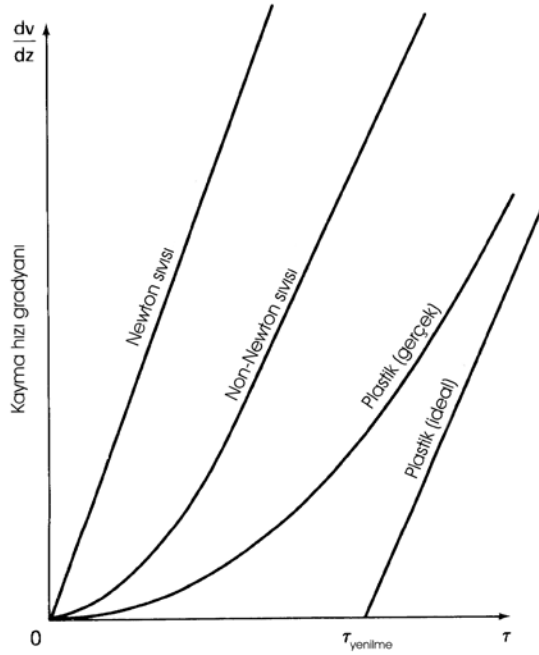
Atterberg'in orijinal kıvam limitleri oldukça değişken ve özellikle de deneyimsiz operatörler tarafından kolaylıkla tekrarlanamayan türden idi. Daha önce de bahsedildiği gibi, Casagrande (1932b, 1958) bu limitleri standartlaştırmak için çalışmalar yapmış ve deneyin operatörden bağımsız olarak yapılmasını sağlayabilecek bir likit limit aleti geliştirmiştir (Şekil 2.8). Casagrande likit limiti şu şekilde tanımlamıştır: Zemin numunesi yoğurularak likit limit kabı içine yerleştirilir (Şekil 2.8a). Oluk açma bıçağı ile zemin içinde standart bir yarık oluşturulur (Şekil 2.8b). Likit limit kabı bu halde 10 mm yüksekte sert plastik yüzey üzerine peş peşe düşürülür. Yarığın 25 düşüşte 13 mm (0,5 inç) kapanmasını (Şekil 2.8c) sağlayan su içeriği, zeminin likit limitini verir. Pratikte yarığın 25 düşüşte belirtildiği kadar kapanmasını sağlayacak su muhtevasını yakalamak çok zordur. Bunun için Casagrande'nin bulunduğu çözüme göre, 13 mm'lik yarığın değişik düşüş sayılarında kapanmasını sağlayan su içeriklerinin vuruş sayılarının logaritması ile grafiği çizilirse akış eğrisi olarak adlandırılan düz bir çizgi elde edilir. Akış eğrisinin 25 vuruşu kestiği yere karşılık gelen su içeriği LL değerini vermektedir.

Plastik limit deneyi biraz daha değişken olup, istikrarlı ve tekrarlanabilir sonuçların elde edilebilmesi için biraz tecrübe gerektirir. Zemin numunesinin ip şeklinde yuvarlatılması sırasında çapın tam 3 mm'ye düşmesi sırasında kopmalar–kırılmalar başladığı durumdaki su içeriği, PL değerini verir. Yuvarlatılan zemin 3 mm'den daha ince çapa inebiliyorsa su içeriği PL'den büyük demektir; 3 mm'ye erişmeden kopmalar başlıyorsa su içeriği PL'den

daha düşük demektir. Uygun şekilde yuvarlanmış PL numuneleri Şekil 2.8'dekine benzeyecektir.



Şekil 2.6 Değişik su muhtevalarında zeminin gerilme-birim deformasyon tepkileri.



Şekil 2.7 Değişik su muhtevalarında zemin ve diğer birkaç malzemenin davranışı.

Likit limit ve plastik limit deneyleri kolay gibi gözükse de, iki deneyde de tutarlı sonuçların elde edilmesi biraz tecrübe gerektirmektedir. İsveç'te likit limitin tayini, düşen koni deneyi ile yapılmaktadır (Hansbo, 1957). Özellikle İsveç killeri için bu aletin verdiği sonuçlar Casagrande cihazınınkinden daha güvenli ve kullanımı da daha kolay ve hızlıdır. İki deneyin de güvenilirlik derecesi hakkında iyi bir değerlendirme Karlsson (1977) tarafından yapılmıştır.

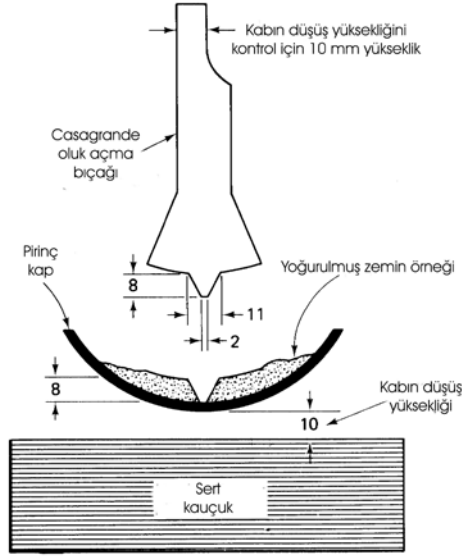
Jeolojik kökenleri benzer olan zeminlerin akış eğrileri de benzer olduğundan bazan *tek nokta likit limit deneyleri* kullanılmaktadır. Bu yöntem ile yapılması gereken tek şey, sadece herhangi bir n vuruş sayısında yarığın kapanmasını sağlayacak bir deney yapıp aşağıdaki bağıntıyı kullanmaktan ibarettir:

$$LL = w_n (n/25)^{\tan\beta} \quad (2-21)$$

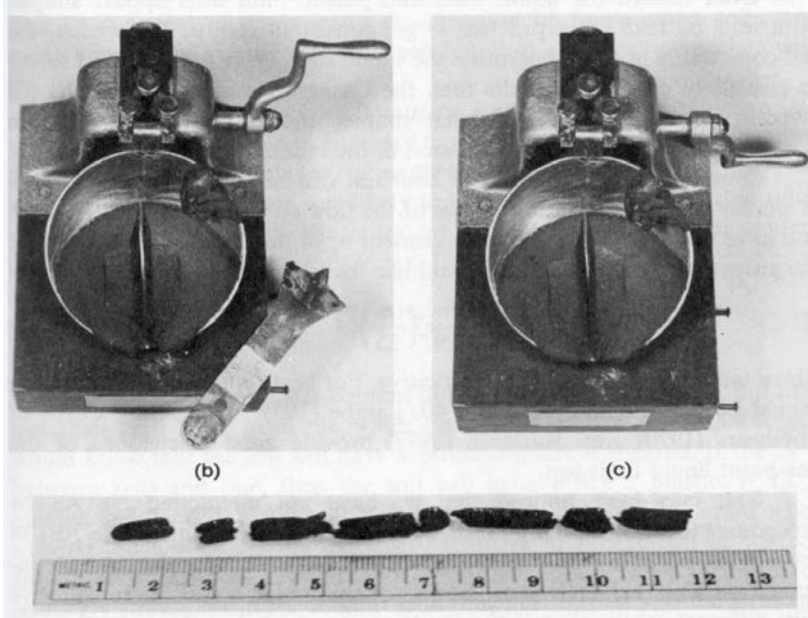
Verilen bağıntıdaki $\tan\beta$ akış eğrisinin eğimidir. En iyi sonuçlar n 10 ile 40 arasında olduğu zaman elde edilmektedir. Tek nokta likit limit deneyi ile ilgili ayrıntılı görüşler Lambe (1951), U.S. Army Corps of Engineers (1970) ve Karlsson (1977)'da bulunabilir.

Atterberg limitleri deneyleri için ASTM prosedürlerinden bahsetmeyişimiz dikkatinizden kaçmamıştır. ASTM prosedürlerini birkaç sebepten dolayı tavsiye etmiyoruz. Birincisi, bu prosedürlerde limit deneylerinin açık havada kurutulmuş numuneler üzerinde yapılması gerekmektedir. Böyle bir yöntem bazı zeminlerde deneyin doğal su içeriğinde yapılması halinde çok farklı sonuçlar verecektir (Karlsson, 1977). ASTM ile ilgili bir diğer problem de, likit limit deneyinin oluk açma bıçağıdır. Yarığın yüksekliği kontrol edilmediği için elde edilen

sonuçlar tutarsız olmaktadır. Bu nedenle, biz Casagrande'nin oluk açma bıçağının (Şekil 2.8) kullanılmasını tavsiye ediyoruz.



(a)



Şekil 2.8 (a) Casagrande likit limit cihazı ile oluk açma bıçağının şematik görünümü; boyutlar mm cinsinden. (b) Bıçakla açılmış oluğun kolu çevirmeden önceki görünümü. (c) Kolu yeterli sayıda çevirerek kabı düşürmek suretiyle oluğun 13 mm kapanması durumu. (d) Plastik limit iplikli çubukları. (a)'dan (c)'ye olan bölüm Hansbo (1975)'dan alınmıştır (Fotoğraflar: M. Surendra).

Likit limit değerleri sıfır ile 1000 arasında değişse de, çoğu zeminler için genellikle 100'den daha küçüktür. Plastik limit sıfır ile 100 arasında veya daha da yüksek olabilmektedir. Genellikle 40'ın altındadır. Atterberg limitleri gerçekte bir su içeriği olmasına rağmen, değişik mühendislik davranışları arasındaki sınırları da teşkil etmektedirler. Casagrande (1948) limit değerlerinin yüzde işareti *kullanılmadan* ifade edilmesini tavsiye etmektedir. Bunlar ince taneli zeminleri sınıflamada kullanılan *sayılardır* ve zemin davranışını *kategorize* ederler. Bu limit değerlerinin LL ve PL ile w_L ve w_P gibi her iki sembol gruplarıyla ve de yüzde işareti ile kullanıldığı durumlara da rastlayacaksınız.

Geoteknik uygulamalarında bazan kullanılan bir diğer Atterberg limiti de büzülme limiti olup Bölüm 6'da ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Atterberg'in zeminin plastik olduğu durumda su muhtevası aralığını *plastisite indeksi* adı verilen bir indis ile tanımladığından daha önce söz etmiştik. **Plastisite indeksi PI** veya I_P sayısal olarak likit limit ile plastik limit arasındaki farka eşittir:

$$PI=LL-PL \quad (2-22)$$

İnce taneli zeminlerin mühendislik sınıflamasında PI oldukça faydalı olup, pekçok mühendislik özelliğinin PI ile ampirik olarak denenebilir olduğu gözlenmiştir.

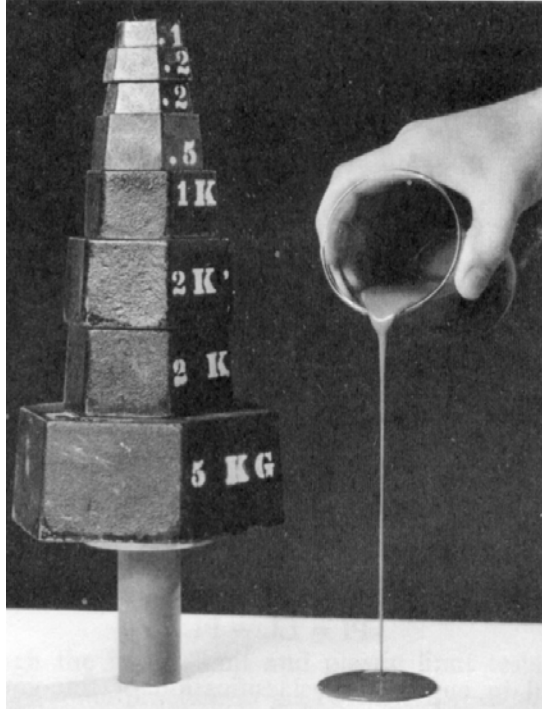
Atterberg limitleri ile ilgili tartışmamızın baş kısımlarında elimizdeki su içeriğini, tanımlanmış başka sınırlar veya mühendislik tepkileri ile kıyaslamak istediğimizi ifade etmiştik. Bu sayede elimizdeki örneğin davranışının plastik, kırılğan katı ve sıvı davranışlardan hangisi olacağını bilebilmemiz mümkün olmaktadır. Bir zemin örneğinin doğal su içeriğinin kıyaslanmasında kullanılan indis likitlik indeksi LI veya I_L olup,

$$LI=(w_n - PL)/PI \quad (2-23)$$

şeklinde tanımlanır. Bağlıntıdaki w_n bahis konusu zemin örneği için doğal su içeriğidir. Eğer LI sıfırdan küçük ise, Şekil 2.6'daki su içeriği bandından bu zeminin kesmeye maruz kaldığında bir kırılğan çatlak oluşturacağını düşünürüz. LI'nın sıfır ile 1 arasında olması halinde zemin plastik gibi davranacaktır. LI 1'den büyük ise, zeminin kesmeye maruz kalması halinde çok viskoz bir sıvı gibi davranması beklenmelidir. Böyle zeminler, zemin yapısının göçmesi açısından son derece hassas olabilir. Bir şekilde örselenmedikleri sürece oldukça mukavim olabilirler. Ancak, bir sebepten kesmeye maruz kalmaları ve yapının göçmesi durumunda bir sıvı gibi akabilmektedirler. Doğu Kanada ve İskandinavya'da *aşırı hassas* (ultra-sensitive) *killer* bulunmaktadır. Şekil 2.9'da Ottawa, Ontario'daki Leda kilinin aynı su içeriğindeki örselenmemiş ve yoğurulmuş durumu görülmektedir. Örselenmemiş numune 100 kPa'dan daha büyük düşey gerilmeyi taşıyabilirken, tamamen yoğurulmuş halde iken bir sıvı gibi davranmaktadır.

Limit deneylerinin tamamen *yoğurulmuş* numuneler üzerinde yapıldığı konusu daha önceden vurgulanmamıştı. Bölüm 4'de killerin yapısını tartışırken, bir zeminin doğal yapısının onun mühendislik davranışını büyük ölçüde etkilediğini göreceğiz. O halde, nasıl oluyor da Atterberg limitleri kullanılabilir? Atterberg limitleri ampirik olarak kullanılmaktadır; yani, *hem Atterberg limitleri hem de mühendislik özellikleri aynı şeyler tarafından etkilendiğinden* Atterberg limitleri, mühendislik özellikleri ve davranış ile

deneştirilebilmektedir. Bu “şeylerin” bazıları kil mineralleri, gözenek suyundaki demir iyonu, zemin çökelinin gerilme tarihçesi ve benzeridir. Bu faktörler zemin yapısını işleyen bölümde (Bölüm 4) ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Şimdilik, çok kolay, değişken ve ampirik Atterberg limitlerinin zeminlerin mühendislik amaçlı sınıflamalarında çok faydalı olduğunu ve zeminlerin mühendislik davranışı ile oldukça iyi bir korelasyon içinde olduğunu kabul edelim.



Şekil 2.9 Ottawa, Ontario'dan Leda kilinin (a) örselenmemiş ve (b) tamamen yoğurulmuş örneği (Fotoğraf izni Kanada Milli Araştırmalar Konseyi, Yapı Araştırmaları Bölümü'nden D. C. MacMillan'dan).

2.8 AKTİVİTE

1953'te Skempton bir kilin *aktivitesini*

$$A = \text{PI} / \text{kil yüzdesi} \quad (2-24)$$

şeklinde tanımlamıştır. Bağlıdaki kil yüzdesi zemin içinde 2 mikrondan daha küçük partiküllerin ağırlıkça yüzdesini ifade etmektedir. Aktivitesi 1 civarında olan killer ($0,75 < A < 1,25$) “normal”; $A < 0,75$ killer “pasif” ve $A > 1,25$ olanlar da “aktif” olarak sınıflandırılmaktadır. Aktivite, özellikle pasif ve aktif killerde bazı sınıflama ve mühendislik özelliği korelasyonları için oldukça yararlı bir kavramdır. Ayrıca, mineral türü ile aktivite

arasında orta-iyi şeklinde bir korelasyon vardır (Bölüm 4). Ancak, bu amaçlar için Atterberg limitleri tekbaşına yeterlidir ve aktivite aslında bir yeni bilgi temin etmemektedir.

PROBLEMLER

2-1. Siltli kil türü bir zemin örneği üzerinde bir su içeriği deneyi yapılmıştır. Islak zemin ile kabın ağırlığı 17,53 g, kuru zemin ile kabın ağırlığı 14,84 gramdır. Boş kabın ağırlığı 7,84 g olduğuna göre numunenin su içeriğini hesaplayınız.

2-2. Bir zemin örneği için plastik limit deneyi sırasında aşağıdaki bilgiler kaydedilmiştir:

$$\begin{aligned} \text{Yaş ağırlık+kap} &= 22,12 \text{ g} \\ \text{Kuru ağırlık+kap} &= 20,42 \text{ g} \\ \text{Kabın ağırlığı} &= 1,5 \text{ g} \end{aligned}$$

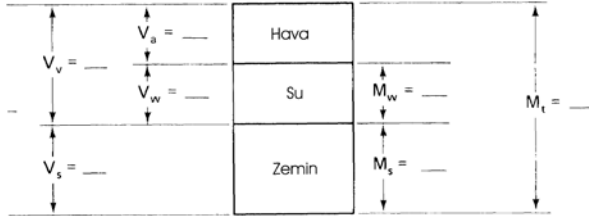
Zeminin plastik limitini belirleyiniz.

2-3. Tamamen doymuş bir kil örneğinin doğal haldeki ağırlığı 1350 g iken kurutulduktan sonraki ağırlığı 975 gramdır. Zeminin doğal su içeriği kaçtır?

2-4. 2-3'de verilen örnek için (a) boşluk oranını, (b) poroziteyi hesaplayınız.

2-5. 2-3'de verilen zemin örneği için (a) doğal yoğunluğu, (b) kuru yoğunluğu hesaplayınız. Cevaplarınızı Mg/m^3 , kg/m^3 ve lbf/ft^3 cinsinden veriniz.

2-6. Islak bir zemin örneğinin 1 m^3 'ünün kütlesi 2000 kg 'dır. Su içeriği %10'dur. $\rho_s=2,7 \text{ Mg/m}^3$ varsayarak Şekil P2.6'da faz diyagramındaki boşlukları doldurunuz.



Şekil P2.6

2-7. Problem 2-6'da verilen bilgi ile (a) boşluk oranını, (b) poroziteyi ve (c) kuru yoğunluğu hesaplayınız.

2-8. Sıkıştırılmış bir kumun kuru yoğunluğu $1,82 \text{ Mg/m}^3$ ve katıların yoğunluğu da $2,67 \text{ Mg/m}^3$ 'dür. Bu malzeme doymuş iken yoğunluğu ne olur?

2-9. %100 doymuş bir zeminin toplam yoğunluğu 2050 kg/m^3 ve su içeriği de %25'dir. Katıların yoğunluğunu ve zeminin kuru yoğunluğunu hesaplayınız.

2-10. Kuru yoğunluğu $1,7 \text{ Mg/m}^3$ olan bir zeminin doymuş halindeki su içeriğini bulunuz. $\rho_s=2,7 \text{ Mg/m}^3$ varsayınız.

2-11. Kuru bir kuvars kumunun yoğunluğu $1,68 \text{ Mg/m}^3$ 'dür. Doymuluk %75 iken yoğunluğunu bulunuz. Kuvars partiküllerinin yoğunluğu $2,65 \text{ Mg/m}^3$ 'dür.

2-12. Bir zeminin kuru yoğunluğu $1,65 \text{ Mg/m}^3$ ve katı parçacıkların yoğunluğu da $2,68 \text{ Mg/m}^3$ 'dür. (a) Su içeriğini (doymuş halde iken), (b) boşluk oranını ve (c) zemin doymuş halde iken yoğunluğunu hesaplayınız.

2-13. Bir doğal zemin çökelinin su içeriği %20 ve doygunluk derecesi de %90 olarak belirlenmiştir. Bu zeminin boşluk oranını bulunuz.

2-14. Killi bir zeminin boşluk oranı 0,5 ve doygunluk derecesi %70'dir. Katıların yoğunluğunu 2750 kg/m³ olarak (a) su içeriğini, (b) kuru ve doğal yoğunlukları hem SI hem de İngiliz Mühendislik Birimleriyle hesaplayınız.

2-15. Yaş bir zemin örneğindeki suyun hacmi 0,056 m³'dür. Katıların hacmi $V_s=0,28$ m³'tür. Katıların yoğunluğu $\rho_s=2590$ kg/m³ olduğuna göre su içeriğini bulunuz.

2-16. Aşağıdaki eşitliklerin doğruluğunu ispat ediniz:

$$(a) \rho = \rho_s(1+w)/(1+e) = (\rho_s + \rho_w Se)/(1+e)$$

$$(b) \rho = \rho_d(1+w)$$

$$(c) w\rho_s / \rho_w = Se$$

$$(d) e = n/(1-n)$$

$$(e) n = e/(1+e)$$

2-17. (a) tamamen doygun bir zemin ve (b) kısmen doygun bir zemin için ρ_s 'yi porozite n ve su içeriği w cinsinden ifade eden bir formül türetiniz.

2-18. (a) Kuru yoğunluk, (b) boşluk oranı ve (c) doygunluk derecesi için ρ , ρ_s , ρ_w ve w terimlerinden oluşan formüller elde ediniz.

2-19. (a) Doğal yoğunluk ve (b) batık yoğunluk için su içeriği, katı partikül yoğunluğu ve suyun yoğunluğundan oluşan formüller elde ediniz.

2-20. Arşimed kuralından (2-11) eşitliğindeki $\rho' = \rho_{sat} - \rho_w$ 'nin $(\rho_s - \rho_w)/(1+e)$ ile aynı olduğunu gösteriniz.

2-21. "Parça yoğunluğu" yöntemi özellikle ufalanabilir ve düzensiz şekilli numunelerde birim ağırlığı (ve diğer gerekli bilgiyi) elde etmede sıkça başvurulan bir yöntemdir. Doğal su içeriğindeki numune (1) tartılır, (2) parafin veya bal mumu ile ince bir zar şeklinde üzeri sıvanır (suyun gözeneklere girmesi önlenmiş olur), (3) tekrar tartılır ($W_t + W_{parafin}$), ve (4) suda tartılır (numunenin hacmi + balmumu tabakasının hacmini elde etmek için... Arşimed kuralını hatırlayın!). Son olarak numunenin doğal su içeriği tanımlanır. Siltli kum şeklindeki bir zemin örneği bu şekilde muamele edilerek "parça yoğunluğu" bulunmuş olur. Aşağıda verilen bilgiyi kullanarak numunenin (a) doğal yoğunluğunu, (b) kuru yoğunluğunu, (c) boşluk oranını ve (d) doygunluk derecesini belirleyiniz.

Verilen:

Doğal su içeriğinde numunenin ağırlığı = 181,8 g

Numunenin ağırlığı + parafin tabakası = 215,9

Suda numune ağırlığı + parafin = 58,9

Doğal su içeriği = %2,5

Katı partikül yoğunluğu, ρ_s = 2700 kg/m³

Parafinin yoğunluğu, ρ_{par} = 940 kg/m³

İpucu: Faz diyagramından yararlanınız.

- 2-22. Bir zemin örneğinin toplam hacmi 80.000 mm^3 ve ağırlığı da 145 gramdır. Örneğin kuru ağırlığı 128 g ve katıların yoğunluğu $2,68 \text{ Mg/m}^3$ 'tür. (a) Su içeriğini, (b) boşluk oranını, (c) poroziteyi, (d) doygunluk derecesini, (e) doğal yoğunluğu ve (f) kuru yoğunluğu hesaplayınız. (e) ve (f) şıklarına cevabınızı SI ve İngiliz Mühendislik birimlerinde birlikte veriniz.
- 2-23. Saf silis kumu için minimum ve maksimum boşluk oranları sırasıyla 0,46 ve 0,66 olarak bulunmuştur. Bunlara karşılık gelen doymuş yoğunluğu kg/m^3 cinsinden hesaplayınız.
- 2-24. Hacmi 588 cm^3 olan ıslak kumun ağırlığı 1010 gramdır. Kuru ağırlığı 918 g ve katı yoğunluğu da 2670 kg/m^3 'dür. Boşluk oranı, porozite, su içeriği, doygunluk derecesi ve doğal yoğunluğu kg/m^3 cinsinden hesaplayınız.
- 2-25. Doymuş bir buzul kili örneğinin su içeriği %47'dir. $\rho_s=2,70 \text{ Mg/m}^3$ varsayarak boşluk oranı, porozite ve doymuş yoğunluğu hesaplayınız.
- 2-26. Hassas bir volkanik kil zemin laboratuvarında test edildiğinde aşağıdaki veriler elde edilmiştir:
 $\rho=1,28 \text{ Mg/m}^3$, (b) $e=9,0$, (c) $S=\%95$, (d) $\rho_s=2,75 \text{ Mg/m}^3$, (e) $w=\%311$.
 Sonuçların sağlanması yapılırken birinin yanlış olduğu belirlenmiştir. Yanlış olan değeri bularak doğrusunu yazınız.
- 2-27. Bir zeminin doymuş yoğunluğu $\rho_{\text{sat}}=135 \text{ lbf/ft}^3$ 'tür. Bu zeminin batık yoğunluğunu lbf/ft^3 ve kg/m^3 cinsinden ifade ediniz.
- 2-28. Bir kumu oluşturan tanelerin yoğunluğu $2,68 \text{ Mg/m}^3$ 'dür. Boşluk oranı da 0,58 olduğuna göre, kumun kuru ve doymuş haldeki yoğunluklarını bularak batık yoğunluğu ile kıyaslayınız.
- 2-29. Bir doğal buzul çökelinden yeraltı su seviyesi altındaki bir seviyeden numune alınmıştır. Su içeriği %55 olan bu örneğin doğal yoğunluğunu, kuru yoğunluğunu, batık yoğunluğunu, porozitesini ve boşluk oranını bulunuz. Yaptığınız varsayımları belirtiniz.
- 2-30. (a) 30 mm çapındaki ping-pong toplarından oluşan bir yığının, (b) 0,3 mm çapındaki mini bilyelerden oluşan bir yığının maksimum porozitesini ve boşluk oranını hesaplayınız.
- 2-31. 500 cm^3 'lük bir silindir içinde 750 gram ağırlığında gevşek ve kuru kum bulunmaktadır. Bu kum üzerine statik olarak 200 kPa'lık yükleme yapıldığında hacmi %1 azalmaktadır. Bunun arkasından titreşim uygulanarak sıkıştırıldığında kumun hacmi başlangıçtaki hacmin %10'u oranında azalmaktadır. Kum tanelerinin yoğunluğunun $2,65 \text{ Mg/m}^3$ olduğunu varsayarak aşağıdaki her bir durum için boşluk oranı, porozite, kuru yoğunluk ve toplam yoğunluğu hesaplayınız.
 (a) Gevşek kumda (b) Statik yük altındaki kumda
 (c) Titreşimle sıkıştırılmış ve yüklenmiş kumda.
- 2-32. Bir zeminin su içeriği %11,5'dir. Bu zeminin maksimum yoğunluğu, su içeriği %21,5'e çıkarıldığında elde edilmektedir. Su içeriğinin %21,5'e çıkarılması için (doğal haldeki zeminin) her 1000 gramına kaç gram su eklenmesi gerektiğini hesaplayınız.
- 2-33. Aşağıdaki tabloda A'dan F'ye kadar isimlendirilen 6 zeminin tane boyu dağılımına ait grafiği 5 devirli bir logaritmik kağıt üzerinde çiziniz. Her bir zemin için efektif çap,

üniformluk katsayısı ve eğrilik katsayısını bulunuz. Ayrıca her bir zemindeki çakıl, kum, silt ve kil yüzdesini (a) ASTM, (b) AASHTO, (c) USCS ve (d) İngiliz Standardı'na göre belirleyiniz.

A.B.D. Standart Elek No. veya Tane Boyu	Ağırlıkça Geçen Yüzde					
	Zemin A	Zemin B	Zemin C	Zemin D	Zemin E	Zemin F
75 mm (3 inç)	100		100			
38 mm (1,5 inç)	70		-			
19 mm (3/4 inç)	49	100	91			
9.5 mm (3/8 inç)	36	-	87			
No. 4	27	88	81		100	
No. 10	20	82	70	100	89	
No. 20	-	80	-	99	-	
No. 40	8	78	49	91	63	
No. 60	-	74	-	37	-	
No. 100	5	-	-	9	-	
No. 140	-	65	35	4	60	
No. 200	4	55	32	-	57	100
40 μ m	3	31	27		41	99
20 μ m	2	19	22		35	92
10 μ m	1	13	18		20	82
5 μ m	<1	10	14		8	71
2 μ m	-	-	11		-	52
1 μ m	-	2	10		-	39

Not: Eksik veriler "-" sembolü ile işaretlenmiştir.

- 2-34. (a) Tane boyu dağılım eğrilerini grafik olarak göstermede aritmetik ölçek yerine neden logaritmik ölçeğin tercih edildiğini kısaca açıklayınız.
 (b) Aritmetik olarak çizildiğinde tane boyu dağılım eğrileri logaritmik eksenli çizim ile benzerlik gösteriyor mu (mesela C_u ve C_c değerleri aynı mı) ?
- 2-35. Problem 2-33'deki zeminlerin Atterberg limitleri ve doğal su içerikleri aşağıdaki tabloda verildiği gibidir. Her bir zemin için PI ve LI'yı belirleyiniz. Genel aktiviteleri hakkında yorum yapınız.

Özellik	Zemin A	Zemin B	Zemin C	Zemin D	Zemin E	Zemin F
w_n , %	27	14	14	11	8	72
LL	13	35	35	-	28	60
PL	8	29	18	NP	NP	28

- 2-36. Aşağıdaki G ve H zeminlerinin Atterberg limitlerinin geçerliliği hakkında yorum yapınız.

	Zemin G	Zemin H
LL	55	38
PL	20	42
SL	25	-

- 2-37. Aşağıdaki veriler siltli kil türü bir zemine ait likit limit deneylerinden elde edilmiştir.

Vuruş Sayısı	Su İçeriği, %
35	41,1
29	41,8
21	43,5
15	44,9

Yapılan iki adet plastik limit deneyindeki su içerikleri sırasıyla %23,1 ve 23,6'dır. LL, PI, akış indeksi ve sağlamlık indeksini belirleyiniz. Akış indeksi, likit limit deneyinden elde edilen logaritmik vuruş sayısı-su içeriği eğrisinin eğimi; sağlamlık indeksi de PI'nin akış indeksine oranıdır.