

ZEMİN MEKANİĞİ

Prof.Dr. A. Vahap YAĞANOĞLU

**Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi
Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü**

sun
lik
eya
kil
ak
an
rın

klı
ri,
cil
ar

si,
r,
er

e
gi
s

ÖNSÖZ

Ülkemizde artan nüfusla birlikte özellikle kırsal alanda yaşayan nüfusun üzerinde yaşadığı kırsal mekanın ve altyapı hizmetlerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalara hız verilmiştir. Bu çalışmalarda ortaya çıkacak yapının temelini veya doğrudan doğruya yapının kendisini inşaat malzemesi olarak zemin teşkil etmektedir. Bu bakımdan değişik amaçlarla inşa edilen toprak baraj, gölet, toprak kanal, değişik su yapıları, sera, yem silosu gibi tarımsal yapıların temelini oluşturan zeminin özelliklerinin ve mukavemetinin iyice etüd edilip zeminle ilgili sorunların bilinmesi önem taşımaktadır.

Zeminlerin diğer inşaat mühendisliği malzemelerinden oldukça farklı davranışlar gösteren malzemeler olmaları nedeniyle özellikle, zemin-su ilişkileri, boşluk suyu basınçları, efektif gerilme kavramı, zeminlerin yük altında şekil değiştirmesi, zeminlerin sıkıştırılması ve mukavemet gibi temel kavramlar önemlidir.

Ders notunda; zeminlerin temel özellikleri, zeminlerin sınıflandırılması, zemin suyu, zeminlerin su geçirme özelliği, zeminlerde sızıntı ve akım ağı, filtreler, zemin gerilmeleri ve zeminlerin sıkıştırılması ile ilgili temel ve teknik bilgiler sunulmuştur.

Bu ders notu, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü ile Tarım Teknolojisinde öğrenim gören öğrencilerin Lisans Programında almış oldukları Zemin Mekaniği Dersine yönelik olarak hazırlanmış olup, ders notunun hazırlanmasında geniş ölçüde K. Özaydın'a ait Zemin Mekaniği kitabından yararlanılmıştır.

Ders notunun öğrenciler ve ilgililere yararlı olmasını dilerim.

Erzurum , 2000

Prof.Dr.A.Vahap YAĞANOĞLU

İÇİNDEKİLER

1.	GİRİŞ.....	1
2.	ZEMİNLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1.	Zeminlerin Ağırlık ve Hacimsel Özellikleri ile İlgili Boyutlar.....	6
2.2.	Temel Özelliklerin Belirlenmesi.....	12
3.	ZEMİNLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	18
3.1.	Genel Zemin Cinsleri.....	19
3.2.	Zeminlerin Tane Dağılımı.....	21
3.2.1.	Elek Analizi.....	22
3.2.2.	Islak Analiz	26
3.2.3.	Tane Çapı Dağılım Ölçütleri.....	32
3.2.4.	Tane Çapı Dağılımının Önemi.....	33
3.2.5.	Zeminlerin Tane Şekli.....	33
3.3.	İnce Taneli Zeminlerin Kıvamı ve Kıvam Limitleri.....	36
3.3.1.	Kıvam İndeksleri.....	42
3.4.	Zeminlerin Sınıflandırma Sistemleri.....	45
3.4.1.	Tane Çapına Göre Sınıflandırma.....	46
3.4.2.	Birleşik Zemin Sınıflandırması.....	47
3.4.3.	Zeminlerin Arazide Ön Sınıflandırması.....	50
4.	ZEMİN SUYU VE ZEMİNLERİN SU GEÇİRME ÖZELLİĞİ.....	58
4.1.	Zemin Suyu.....	58
4.2.	Zeminlerde Geçirimsizlik ve Su Akımı.....	60
4.2.1.	Permeabilite Katsayısının Ölçülmesi.....	62
5.	ZEMİNLERDE SIZINTI VE AKIM AĞI.....	73
5.1.	Sızma Kuvvetleri ve Su Basınçları.....	77
5.2.	Akıcı Kum ve Borulanma.....	78
5.3.	Zeminde Su Akımının Matematiksel İfadesi.....	80
5.3.1.	La Place Denkleminin Çözümü ve Akım Ağlarının Çözümüne İlişkin Esaslar.....	85
5.3.1.1.	Toprak Baraj Gövdesinden Sızan Su Miktarının Belirlenmesi.....	94
5.3.1.2.	Anizotropik Zeminde Akım Ağının Çizimi.....	97

6.	FİLTRELER	98
6.1.	Filtre Kalınlığının Belirlenmesi.....	103
7.	ZEMİN GERİLMELERİ	106
7.1.	Etkili Gerilme, Nötr Gerilme ve Boşluk Basıncı.....	106
7.2.	Yüzey Yüklemelerin Yolaçtığı Düşey Gerilmeler.....	109
7.2.1.	Gerilmelerin Belirlenmesi.....	110
7.3.	Bir Noktadaki Gerilme Durumu ve Mohr Daireleri.....	120
8.	ZEMİNLERİN SIKIŞTIRILMASI (KOMPAKSİYON)	126
8.1.	Proktor Deneyi.....	127
8.2.	Arazide Kompaksiyon.....	130
8.2.1.	Arazide Sıkıştırmanın Yapılışı.....	132
8.2.2.	Kompaksiyonu Etkileyen Faktörler.....	133

1. GİRİŞ

Yerkürenin yüzeyi zemin ve kaya olarak nitelendirilen doğal malzeme ile kaplanmıştır. Kayaların ve zeminlerin oluşumlarını, özelliklerini ve değişik çevre ve yüklenme koşulları altında davranışlarını inceleyen bilimlere genel olarak yer bilimleri denir. Yerkürede dağların oluşumu, ayrışma ve erezyona uğraması, bunun sonucu ortaya çıkan malzemelerin taşınması, değişik çevre koşulları altında çökmesi, sıkışması ve çimentolaşması ile farklı yapıdaki zeminlerin oluşumu ve bunların uğradığı değişimler jeoloji biliminin konusu içerisinde yer alır.

Zemin olarak nitelendirilen malzemeler ise temelde kayaların çevre koşulları etkisi altında ayrışması ve parçalanması sonucu oluşmaktadır. Kayaların ayrışmasına yol açan etkenler mekanik ve kimyasal olarak iki ayrı grup içinde düşünülebilir. Sıcaklık farklılıkları, don, rüzgar, su ve bitki köklerinin etkisi gibi fiziksel nedenlerin yol açtığı mekanik ayrışma sonucu kayalar parçalanmaktadır. Kayalar içinde yer alan bazı mineraller kimyasal ayrışmaya uğrayarak daha küçük parçalara ayrılmaktadır. Bu şekilde mineraller boyutları ve şekilleri farklı çok sayıda küçük taneciklere ayrılır. Bu katı taneler ve aralarında yer alan boşluklar zeminleri oluşturmaktadır. Zemin boşlukları ise kısmen veya tamamen su ile doludur.

Kayaların ayrışması sonucu oluşan taneler; ana kayanın olduğu yerde kalarak oluşmasına yerinde oluşmuş zeminler, bazı etkenlerle uzaklara taşınarak belirli yerlere çökerek oluşan zeminlere de taşınmış zeminler adı verilir.

Yeryüzünün büyük bir kısmı zemin tabakaları ile kaplanmıştır. Tarımsal üretim ancak zemin tabakaları ile kaplanmış bölgelerde olmaktadır. Ayrıca çeşitli yapılar da bu bölgelerde inşa edilmektedir. Değişik amaçlı çalışmalarda zemin özelliklerinin bilinmesi zorunlu olmaktadır. Zemin değişik boyuttaki ve şekildeki mineral taneciklerin toplamıdır. Doğal durumda bir zemin içerisinde hava, katı madde ve su olmak üzere üç eleman bulunmaktadır. Böylece zemin katı, sıvı ve havadan oluşan ve fiziksel özellikleri yönünden farklı olan üç cismin konumundan oluşmaktadır. Zemin fiziksel davranışları yönünden diğer inşaat malzemelerine göre farklı özellik gösterir.

Zeminin fiziksel davranışlarının incelenmesi çok eski zamanlardan beri bilim adamlarının ilgisini çekerek zemin mekaniği ayrı bir bilim dalı olarak gelişmiştir. Zemin mekaniği, zemin olarak nitelendirilen doğal malzemelerin davranışlarını mekanik ve hidrolik prensiplerinden yararlanarak inceleyen bilim dalı olarak tanımlanabilir.

Zemin özelliklerinin her proje alanı için deneysel olarak belirlenmesi ve bu yapılırken arazide geçerli olacak koşulların gözönüne alınması gerekmektedir. Bu amaca uygun olarak, topraksu ve diğer tarımsal yapıların projelenmesinde zemine ilişkin temel prensiplerin bilinmesi gerekir. Bu ders kapsamında zemin mekaniğinin temel ilkeleri incelenmeye çalışılmıştır.

Çeşitli mühendislik uygulamalarında karışık bazı problemlerin ortaya çıkması olasıdır. Uygulamada karşılaşılan problemler için yeterli çözümler geliştirilmesi, zemin davranışlarının iyi kavranmasına bağlıdır. Zeminlerle ilgili başlıca problemler aşağıda özetlenmiştir.

a) Temellerle ilgili problemler : Mühendislik yapıları (binalar, köprüler, karayolları, barajlar vb.) zemin veya kaya tabakaları üzerine oturtulmaktadır. Yapıların kendi ağırlıklarından ve hareketli yüklerden kaynaklanan yüklerin doğal zemin veya kaya tabakasına aktarılmasını sağlayan sistemlere genel olarak temel adı verilmektedir. Yapı temellerinin zemin tabakaları üstüne veya içine oturtulması durumunda, yapıdan aktarılabilecek yükler altında arazideki zeminlerin davranışlarının göz önüne alınması gerekmektedir. Uygulanan yükler altında zeminin mukavemetinin aşılması durumunda göçme oluşması, yük altında şekil değiştirmesi ile yapının güvenliğinin tehlikeye girmesi söz konusudur. Diğer yandan üniform bir yapıya sahip olmayan doğal zeminlerde, yapının değişik noktaları altında farklı oturmalar oluşması üst yapı üzerinde istenmeyen zorlamalar yaratmaktadır. İyi tasarlanmış bir temel sisteminde üst yapıdan gelen yükleri temel altı zemin tabakalarında göçme veya aşırı oturmalarla yol açmayacak şekilde zemine aktarması gerekmektedir. Zemin yüzeyine yakın tabakaların yeterli mukavemet ve sıkışma özelliklerine sahip olması durumunda yüzeysel temel sistemleri kullanılmaktadır. Zemin yüzeyine yakın tabakaların yapıdan gelecek yükleri

güvenlikle taşıyacak özelliklere sahip olmaması durumunda ise, yapı yüklerinin daha derinliklerdeki sağlam zemin veya kaya tabakasına aktarılması yoluna başvurulmalıdır.

b) Zeminlerin inşaat malzemesi olarak kullanılması : Karayolları, bentler, toprak barajlar vb. birçok inşaat mühendisliği projesinde zeminlerin doğrudan inşaat malzemesi olarak kullanılmasında, yapının amacına uygun malzemenin seçilmesi, zeminin uygun bir şekilde yerleştirilmesi ve sıkıştırılması gibi hususlara özen gösterilmelidir.

c) Kazılar ve şevler : Zemin yüzeyinin eğik olması durumunda, şev açısı ve yüksekliğine bağlı olarak, zemin kütlelerinin yerçekimi kuvveti etkisi altında kayma tehlikesi vardır. Doğal şevlerde, kazı kenarlarında ve dolgu şevlerinde kayaların oluşmasını önlemek oldukça karmaşık bir problem yaratır. Kazı ve dolgularda güvenli şev açısının ve yüksekliğinin seçilebilmesi ve doğal şevlerin kaymaya karşı güvenlik katsayılarının belirlenebilmesi için zeminlerin kısa ve uzun süreli kayma mukavemetlerinin ve muhtemel kayma yüzeyinin belirlenmesi gerekir.

d) İstinat yapıları : Kazı ve dolgu şevlerinin uzun süre düşey olarak tutulabilmesi için zemin kütlelerinin önüne bir istinat yapısı yerleştirilmesi gerekmektedir. Yaygın olarak kullanılan istinat yapıları istinat duvarları, palplanşlar, kazıklar ve betonit-hendek duvar gibi yapılar sayılabilir. İstinat yapısının güvenliği, zemin özelliklerinin sağlıklı olarak saptanması durumunda sağlanabilmektedir.

e) Yeraltı yapıları : Zemin tabakaları içine gömülü yapıların inşası için arazideki zeminlerin özelliklerinin ve davranış biçimlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Yukarıda özetlenen zeminlerle ilgili problemler, hesap yöntemleri yönünden üç grupta incelenebilir.

1. Stabilitate Problemleri

Stabilitate problemleri, plastik akımla kırılmadan önce, zeminlerin denge koşullarına ilişkin problemlerdir. Bu gruba giren problemler arasında temellerin taşıma gücünün hesabı, şevlerin ve istinat yapılarının hesapları sayılabilir. Bu problemlerin

çözülebilmesi için, zeminde göçme yapacak gerilme koşullarının bilinmesi yeterlidir.

2. Elastisite Problemleri

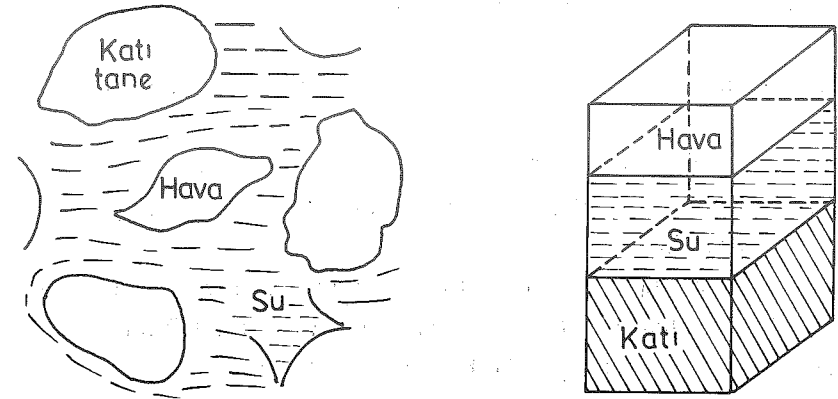
Zeminler üzerine yük uygulandığı zaman şekil değişimleri oluşabilmektedir. Şekil değişikliklerinin belirli sınırlar arasında kalması gerekir. Aksi halde yapının fonksiyonunu yerine getirmemesi, görünüşünün bozulması, taşıyıcı olmayan elemanların zarar görmesi gibi zararlara yol açacak etkiler görülebilir. Bu gruba giren problemlerin çözülmesinde zeminin gerilme ve deformasyonlarının belirlenmesi ve uygulanacak yükler altında meydana gelmesi olası şekil değiştirmelerinin hesaplanması gerekir.

3. Zemin İçindeki Su Hareketi ile İlgili Problemler

Zeminler su geçirgenliği olan malzemeler olduklarından, zemin içinde su akımı ve bununla ilgili sorunlar zemin mekaniğinin önemli konularından birini oluşturmaktadır. Bu problemlerin çözümü için hidrolik prensiplerinden yararlanılmaktadır. Zemin içinde sızan su miktarı, hızı ve sızan suyun zemin kütleleri ve üzerlerindeki yapılara uyguladığı basınçlar ile zemin davranışı üzerine etkisi önemli olmaktadır.

2. ZEMİNLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

Bir zemin kütlesi katı taneler ve bunların arasındaki boşluklardan oluşmaktadır. Boşluklar tamamen veya kısmen su ile doludur. Bu durumda toprak kütlesi, katı parçacıklar su ve hava olmak üzere üç unsurdan ibarettir. Bu üç unsurun hacimleri ve ağırlıkları grafiksel olarak gösterilebilir (Şekil 2.1)



Ağırlık		Hacim
W_h	Hava	V_h
W_w	Su	V_w
W_k	Katı	V_k
W		V_b
		V

Şekil 2.1. Zeminin Katı, Su ve Hava Unsurlarının Şematik Olarak Belirtilmesi

Zeminin hava, su ve katı unsurlarının ağırlıkları sırasıyla W_h , W_w , W_k , hacimleri aynı sırayla V_h , V_w , V_k sembolleri ile gösterilmiştir.

2.1. Zeminlerin Ağırlık ve Hacimsel Özellikleri ile İlgili Boyutlar

Bir zeminde hava ve su zeminin boşluklarını doldurmakta olup, biri artınca diğeri azalır. Kuru zeminlerde suyun yerini tümünden hava almakta, doymun zeminde ise boşlukların tümü su ile dolu duruma gelmektedir.

Zeminlerde boşlukların miktarı, zeminin davranışı ile yakından ilişkili olan önemli bir özelliktir.

Zeminlerin temel özellikleri aşağıdaki gibi açıklanabilir.

1. Zeminlerin Su İçeriği (ω)

Zemin ile ilgili çalışmalarda zeminin içerdiği su miktarının bilinmesi zorunludur.

Belli bir hacimdeki zeminin su içeriği, içerisindeki suyun ağırlığının, aynı hacimdeki katı taneciklerin ağırlığına oranıdır. Zeminlerin su içeriği aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\omega = \frac{W_w}{W_k} \cdot 100$$

Eşitlikte;

ω : Zeminin su içeriği (%),

W_w : V hacmindeki zeminde bulunan su ağırlığı (g),

W_k : V hacmindeki zeminde bulunan katı taneciklerin ağırlığı (g).

2. Tane Birim Hacim Ağırlığı (γ_s)

Bir zemindeki katı taneciklerin ağırlığının (W_k) bu taneciklerin hacmine (V_k) oranı olup, aşağıdaki eşitlikle belirlenebilir.

$$\gamma_s = \frac{W_k}{V_k}$$

Tane birim hacim ağırlığı tanelerin oluştuğu kayaca bağlı olarak değişir. Çoğu zeminlerin tane birim hacim ağırlıkları 2,60-2,80 g/cm³ arasında değişir.

3. Tane Özgül Ağırlık (G_s)

Tane özgül ağırlık, zeminin tane birim hacim ağırlığının (γ_s), suyun özgül ağırlığına (γ_w) oranıdır. Tane özgül ağırlığı (G_s) aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

Çakıl, kum, silt ve kilin tane özgül ağırlıkları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Zeminlerin Tane Özgül Ağırlıkları

Zemin cinsi	Özgül ağırlık (G_s)
Çakıl	2,65-2,68
Kum	2,65-2,68
Silt	2,66-2,70
Kil	2,68-2,80

4. Birim Hacim Ağırlık (γ)

Özgül ağırlık tanımı zeminin tanecikleri ile ilgili bir tanımdır. Oysa, zemin için önemli olan boşluklu durumudur. Zemin birim hacim ağırlığı (γ), birim hacimde zeminin (V), içindeki suyla beraber toplam ağırlığıdır (W).

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_k + W_s}{V}$$

Bir zemin dört değişik durumda bulunur.

- Laboratuvarda tamamen kurutulmuş zemin, boşluklarında sadece hava bulunan zemin,
- Boşluklarında su ve hava bulunan zemin,
- Suyu doymun zemin,
- Doğal durumda su düzeyi altında suya batmış zemin.

Birim hacim ağırlık, zeminin verilen dört durumuna göre adlandırılır.

a) **Kuru birim hacim ağırlık (γ_k)** : Boşluklarında yalnız hava bulunan bir zeminin birim hacimdeki ağırlığıdır.

$$\gamma_k = \frac{W_k}{V}$$

b) **Doğal birim hacim ağırlık (γ_n)** : Zeminin bozulmamış numunesinin, diğer bir anlatımla, boşluklarında su ve hava bulunan zeminin birim hacimdeki ağırlığıdır.

$$\gamma_n = \frac{W}{V} = \frac{W_k + W_w}{V}$$

c) **Suya doygun birim hacim ağırlık (γ_d)** : Boşlukları su ile dolu olan zeminin birim hacimdeki ağırlığıdır.

$$\gamma_d = \frac{W_k + V_b \cdot \gamma_w}{V}$$

d) **Su altındaki birim hacim ağırlık (γ_A)** : Taban suyu kotu altında bulunan malzemenin birim hacim ağırlığıdır.

$$\gamma_A = \frac{W_k + V_b \cdot \gamma_w}{V} - \frac{V \gamma_w}{V}$$

$$\gamma_A = \gamma_d - \gamma_w$$

5. Boşluk Oranı (e)

Doğada zeminler gevşek veya sıkı durumda bulunabilir. Gevşek terimi ile zeminin çok boşluk içerdiği, sıkı terimi ile de az boşluk içerdiği anlaşılır. Zemin mekaniğinde bu durum boşluk oranı terimi ile açıklanır.

Bir zeminin boşluk oranı, o zeminin hacmindeki toplam boşluk hacminin ($V_h + V_w$), katı tanecikler hacmine oranı olup, bu aşağıdaki eşitlikte ifade edilir.

$$e = \frac{V_h + V_w}{V_k} \cdot 100$$

6. Porozite (n)

Zeminde boşlukların hacminin, tüm zemin hacmine oranına porozite denir. Porozite aşağıdaki eşitlikte gösterilebilir.

$$n = \frac{V_h + V_w}{V} \cdot 100 = \frac{V_b}{V} \cdot 100$$

Porozite, boşluk oranı cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$n = \frac{e}{e+1}$$

7. Doygunluk Oranı (S)

Bir zeminin boşluklarının ne oranda su ile dolu olduğunu gösterir. Zemin numunesinin içerdiği su hacminin boşluk hacmine oranı olup, aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

$$S = \frac{V_w}{V_w + V_h} \cdot 100$$

Zeminlerin su içeriklerinden zeminlerin yapısı hakkında bilgi edinilebilir. Özellikle yapışkan zeminlerin kıvamları hakkında su içeriği bir ölçüttür.

8. Oransal Sıkılık - Oransal Gevşeklik

Zeminlerin boşluk oranı, tanelerin şekline ve agregat yapısına bağlıdır. Bir zeminin gerçek boşluk oranı ile maksimum ve minimum boşluk oranları arasındaki ilişki oransal sıkılık veya oransal gevşeklik terimi ile açıklanmaktadır. Bu terim zeminin sıkılık durumunu gösterir. Oransal sıkılık aşağıdaki eşitlikte ifade edilir.

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

Eşitlikte;

D_r = Sıkılık derecesi (%),

$e_{\max}$ = Gevşek durumdaki gözenek oranı,

$e_{\min}$ = Sıkı durumdaki gözenek oranı

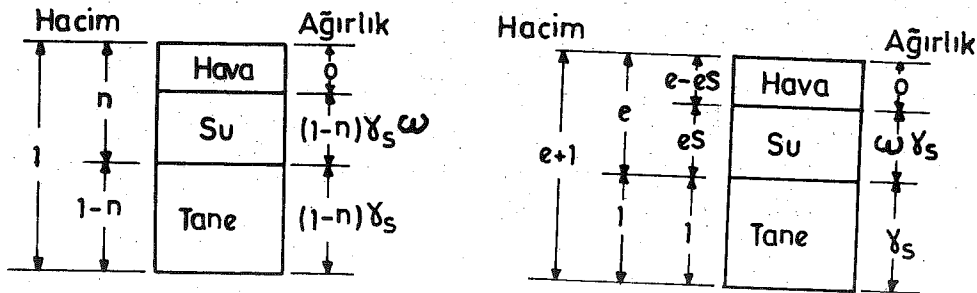
Bir zeminin oransal sıkılığı % 50'den az ise bu zemin gevşek, % 50'den büyük ise sıkı zemin olarak tanımlanır. Gevşek zeminler stabil değildir. Böyle zeminlerde çarpma ve titreşimler tanelerin hareketine neden olur. Sıkı zeminler ise çarpma ve titreşimlerden az etkilenmekte olup stabildirler. Zeminlerde $D_r = 100$ olduğu zaman en sıkı, $D_r = 0$ olduğu zaman en gevşek yerleşme görülür.

İri taneli zeminlerin sıkılık derecelerini tanımlamak için kullanılan taneler ve bunlara karşılık gelen sıkılık derecesi Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. İri Taneli Zeminlerin Sıkılık Derecesi

Sıkılık Derecesi	Oransal Sıkılık (D_r)
Çok gevşek	0-0,15
Gevşek	0,15-0,35
Orta sıkı	0,35-0,65
Sıkı	0,65-0,85
Çok sıkı	0,85-1,0

Yukarıda tanımlanan zeminlerin temel özellikleri (γ_n , γ_k , γ_d , γ_s , γ_A , ω , e , n , S , D_r) zemin içindeki katı, sıvı ve hava kısımlarının birbirine göre değişik hacimsel ve kütle oranlarını ifade etmektedir. Söz konusu bu özellikler birbirlerinden bağımsız olmayıp, birbirlerine bazı bağıntılarla bağlıdır. Temel özellikler arasındaki ilişkileri belirlemek için Şekil 2.2'de gösterilen şemalar kullanılabilir.



Şekil 2.2. Tüm Hacmi ve Tane Hacmi 1 Olan Bir Zemin İçin Bileşenler Şeması

Şekil 2.2'de gösterilen birim hacimde bir zeminin kütlesi göz önüne alınarak ve daha önce verilen tanımlamalar kullanılarak aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$e = \frac{n}{1-n}$$

$$\gamma_k = (1-n) \gamma_s$$

$$\gamma_n = (1-n) \gamma_s + (1-n) \gamma_s \omega = (1-n) \gamma_s (1+\omega) = \gamma_k (1+\omega)$$

$$\gamma_d = (1-n) \gamma_s + n\gamma_w$$

$$\gamma_A = \gamma_d - \gamma_w = (1-n) (\gamma_s - \gamma_w)$$

$$nS\gamma_w = \omega (1-n) \gamma_s$$

$$\gamma_n = (1-n) \gamma_s + nS \gamma_w$$

$$n \gamma_w = \omega (1-n) \gamma_s \quad (S = \% 100)$$

$$n = \frac{e}{1+e}$$

$$\gamma_k = \frac{\gamma_s}{1+e}$$

$$\gamma_n = \frac{\gamma_s + \omega \gamma_s}{1+e} = \frac{\gamma_s + eS\gamma_w}{1+e}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e}$$

$$\gamma_A = \gamma_d - \gamma_w = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e}$$

$$S.e.\gamma_w = \omega.\gamma_s$$

$$e\gamma_w = \omega\gamma_s \quad (S = \% 100)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e}$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_k} - 1$$

$$e_{\max} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{k\min}} - 1$$

$$e_{\min} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{k\max}} - 1$$

$$Dr = \frac{\gamma_{k\max}}{\gamma_k} \left(\frac{\gamma_k - \gamma_{k\min}}{\gamma_{k\max} - \gamma_{k\min}} \right)$$

$$Dr = \left(\frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}} \right) \left(\frac{1 - n_{\min}}{1 - n} \right)$$

2.2. Temel Özelliklerin Belirlenmesi

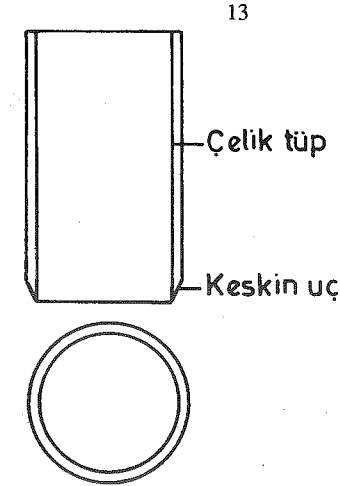
Temel özelliklerin bazıları deneysel, bazıları da temel özelliklere ilişkin bağıntılar kullanılarak belirlenir.

Zeminin temel özelliklerinden doğal birim hacim ağırlık, tane birim hacim ağırlığı, su içeriği, maximum ve minimum boşluk oranları deneysel olarak belirlenebilir.

1. Doğal Birim Hacim Ağırlığının Belirlenmesi

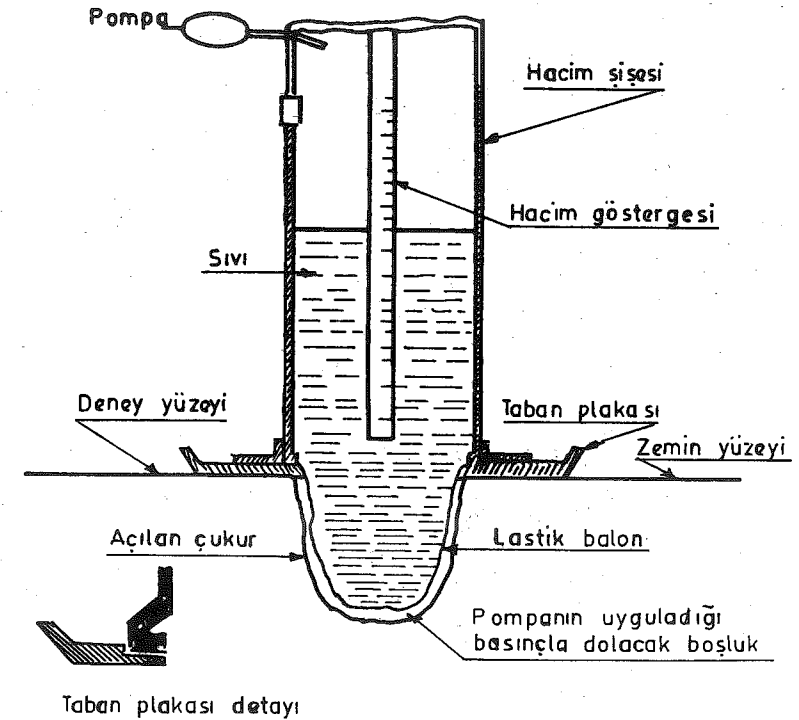
Doğal zeminin veya sıkıştırılan bir dolgunun birim hacim ağırlığı, silindirik örnek yöntemi, lastik balon yöntemi, kum silindir yöntemi, su taşıma yöntemlerinden birisiyle belirlenebilir.

a) Silindirik örnek yöntemi : Bu yöntemde zeminin doğal durumunun ve biçiminin korunduğu örselenmemiş örnek alınır. Daha çok taşsız, ince taneli ve kohezyonlu zeminler için uygun olan bu yöntemde örselenmemiş örnek alabilmek için, ucu keskin bir çelik tüp (Şekil 2.3) örnek alınacak zeminin düzeltilmiş yüzeyi üzerine oturtulur. Çelik tüp zemine çakılır. Tüpün üst kenarlarını korumak için bir ahşap başlık kullanılır. İçi zeminle dolan tüpün çevresi kazılarak boşaltılır ve tüp zeminden çıkarılır. Laboratuvar da örnek bozulmadan dışarı çıkartılır. Zeminin alt ve üst yüzeylerinden bir kısım kesilerek belli uzunlukta zemin örneği elde edilir ve ağırlığı tartılır. Zeminin hacmi, silindirin hacmine eşittir. Doğal birim hacim ağırlık için verilen eşitlik ($\gamma_n = W/V$) kullanılarak zeminin doğal birim hacim ağırlığı bulunur.



Şekil 2.3. Örselenmemiş Örnek Alıcı

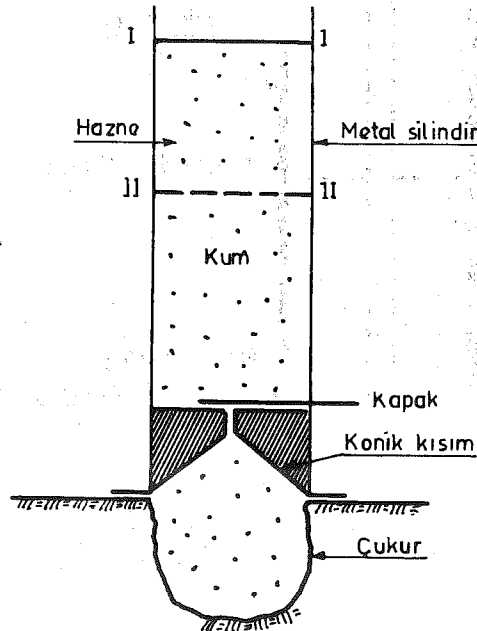
b) Lastik balon yöntemi : Bu yöntem daha çok kohezyonlu zeminlerle örselenmemiş örnek alınamayan taşlı, çakıllı, kumlu ve sert zeminler için uygulanabilir. Zemin yüzeyi düzeltilerek bir çukur açılır. Çukurdan alınan örnek kayıpsız olarak tartılır. Çukurun hacmi, lastik balon aleti ile ölçülür (Şekil 2.4). Lastik balon aleti;



Şekil 2.4. Lastik Balon Aleti

hacim bölümlü bir cam silindir olup, içi su ile doludur. Silindirin tabanında el pompası ile şişirilebilen bir lastik balon bulunur. Aletteki su düzeyi tam yatay durumda iken belirlenir. Alet zeminin alındığı çukura yerleştirilir ve el pompası ile balon kısmı şişirilerek çukuru bütünüyle sarması sağlanır. Bu durumdaki su düzeyi belirlenir. İki su düzeyi arasındaki fark çukurun hacmini verir. Ağırlığı ve hacmi belirlenen zeminin doğal birim hacim ağırlığı (γ_n) ilgili eşitlik kullanılarak belirlenir.

c) Kum silindir yöntemi : Bu yöntem kohezyonlu, taşlı, çakıllı ve kumlu zeminler için uygundur. Lastik balon yöntemine çok benzeyen söz konusu yöntemde kullanılan alet; alt kısmında konik bir boşluk bulunan, içi boş metal bir silindir (Şekil 2.5). Aletle zeminden alınan örneğin hacmi bulunmaya çalışılır. Haznesinde üniform çaplı kum bulunan alet, örnek alınan çukur üzerine yerleştirilerek haznedeki kumun, çukuru ve aletteki konik kısmı doldurması sağlanır. Aletin kullanılmadan önceki ve sonraki ağırlıkları arasındaki fark, konik kısmı ve çukuru dolduran kum ağırlığını verir. Aletin kalibre edilmesi gerekir. Kalibre için alet düz



Şekil 2.5. Kum ile Hacim Ölçme Yöntemi

bir yüzeye oturtulur ve konik kısmı dolduran kumun ağırlığı belirlenir. Aletin taban iç çapında ve düzgün silindirik hacimli bir metal kalibrasyon kabı kullanılarak, serbest akma ile hacim dolduran kumun kuru birim hacim ağırlığı belirlenir. Çukuru dolduran kumun ağırlığı, kumun kuru birim hacim ağırlığına bölünerek çukurun hacmi bulunur. Ağırlığı ve hacmi bilinen zeminin doğal birim hacim ağırlığı, ilgili eşitlikle belirlenir.

d) Su taşıma yöntemi : Kohezyonlu zeminler için kullanılan bu yöntemde, zemin örneğinin gevşek kısımları kesilerek atılır. Zeminin doğal ağırlığı belirlenir. Zeminin içine su girmemesi için parafin mumu ile sıvanır. Parafinle kaplanmış zeminin ağırlığı da bulunur. Zemin örneği içi su dolu bir cam silindir içine bırakılır. Su düzeyleri arasındaki fark parafinli zeminin hacmini verir. Zeminin doğal birim hacim ağırlığı aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$\gamma_n = \frac{W_1}{V - \left(\frac{W_2 - W_1}{\gamma_p} \right)}$$

Eşitlikte;

W_1 = Zeminin doğal ağırlığı (g),

W_2 = Parafinle kaplı zeminin ağırlığı (g),

V = Parafinli zeminin hacmi (cm^3),

γ_p = Parafinin birim ağırlığı (g/cm^3).

2. Su İçeriğinin Belirlenmesi

Zeminlerin su içeriğinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler var ise de burada sadece laboratuvarında kullanılan yöntem üzerinde durulacaktır.

Su içeriği belirlenecek yaş zeminden bir miktar alınarak, ısıya dayanıklı cam bir kap içine konulur ve zeminin cam kapla birlikte ağırlığı belirlenir (W). Daha sonra zemin örneği 105°C etüvde 24 saat bekletilerek kurutulur ve ağırlığı belirlenir (W_k). İki ağırlık arasındaki fark zemindeki su miktarıdır. Zeminin su içeriği ise,

$$\omega = \frac{W_w}{W_k} \cdot 100$$

eşitliği ile belirlenir.

3. Tane Birim Hacim Ağırlığının Belirlenmesi

Tane birim hacim ağırlığının belirlenmesinde piknometre denen şişeler kullanılır. Piknometre damıtık su ile doldurulup, dışı iyice kurularak tartılır (W_1). Kurutulmuş ve ufalanarak tanelenmiş zeminden bir miktar alınır (W_k). Piknometre içine konur, üzeri damıtık su ile doldurularak tartılır (W_2), aşağıda verilen eşitlikle zeminin tane birim hacim ağırlığı hesaplanır.

$$\gamma_s = \frac{W_k}{[W_k - (W_2 - W_1)]/\gamma_w}$$

4. Maksimum ve Minimum Boşluk Oranlarının Belirlenmesi

Taneli zeminlerin oransal sıkılık veya gevşekliğini belirlemek için zemine ilişkin minimum ve maksimum boşluk oranlarının bilinmesi gerekir.

Maksimum boşluk oranı (e_{max}), taneli zeminin en gevşek durumdaki boşluk oranıdır. En gevşek durumda zemin minimum kuru birim hacim ağırlığa (γ_{kmin}) sahiptir. Maksimum boşluk oranını bulmak için 0,1 - 1 kg ağırlığındaki kuru kum, bir litrelik hacim bölümlü cam silindire konularak cam silindir iki el arasında bir kaç kez alt üst edilir. Silindir yavaşça ilk konumuna getirilerek kumun hacmi bulunur. Bu şekilde kum en gevşek duruma gelebilmektedir. Zeminin minimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmin}) hesaplanır. Zeminin tane birim hacim ağırlığı;

$$\gamma_s = \frac{W_k}{V_k}$$

bilinirse, zeminin maksimum boşluk oranı,

$$e_{max} = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{kmin}} - 1 \right)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanabilir.

Zeminlerin minimum boşluk oranlarının (e_{min}) bulunmasında ise kuru kum, metal bir silindire konulup tokmakla sıkıştırılır veya titreşim uygulanarak yerleştirilir. Bu şekilde zeminin en sıkı duruma gelmesi sağlanır. Silindirdeki kum yüzeyi düzeltilerek bilinen hacim ve ağırlık değerlerinden zeminin kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) hesaplanır. Zemin tane birim hacim ağırlığı bilinirse, minimum boşluk oranı ilgili eşitlik,

$$e_{min} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{kmax}} - 1$$

kullanılarak hesaplanır.

3. ZEMİNLERİN SINIFLANDIRILMASI

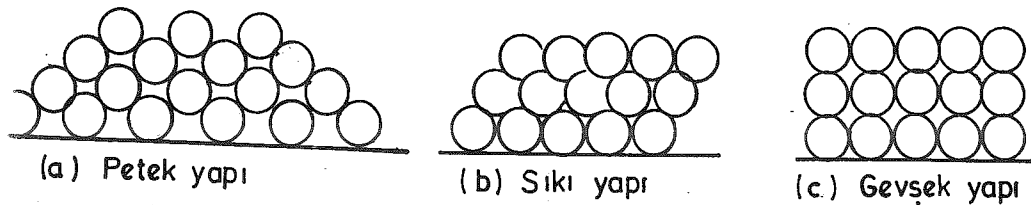
Zemin içinde taneciklerin oluşturduğu kuvvetler zeminin özelliğini büyük ölçüde etkiler. Zeminler genel anlamda iki grupta toplanabilir.

- Taneciklerin ağırlıklarının etkili olduğu zeminler (kohezyonsuz)

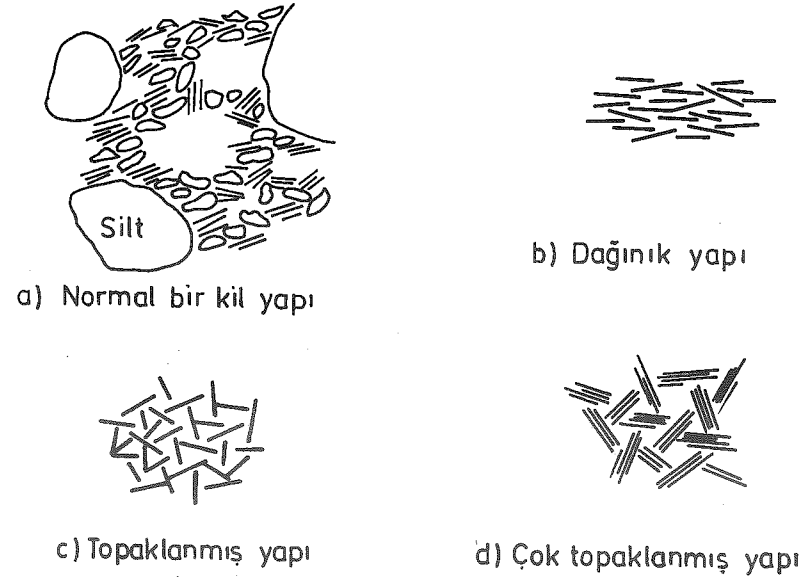
- Yüzeysel kuvvetlerin etkili olduğu zeminler (kohezyonlu)

İki grubu birbirinden ayırt eden en önemli unsur tanecik boyutudur. Büyüklükleri 0,001 - 0,002 mm'den daha büyük tanelerde yüzeysel kuvvetlerin herhangi bir etkisi yoktur. Başka bir anlatımla, tanecikler arası çekim ihmal edilebilecek düzeyde kalır. Büyüklükleri 0,001 - 0,002 mm'den daha büyük boyutlara sahip taneciklerin oluşturduğu malzemelere kohezyonsuz zeminler veya ayrık taneli zeminler denir. Bu tip zeminler içindeki tanecikler parmakla hissedilebilir ve gözle görülebilir. Kohezyonsuz zemin taneleri gevşek veya sıkı bağlarla bir araya gelirler (Şekil 3.1). Bu zeminlerin kayma gerilmesi, taneler arasındaki sürtünmeye bağlıdır.

Boyutları 0,001-0,002 mm'den daha küçük tanelerin oluşturduğu zeminlerde, tanecikler arası adhezyon kuvvetleri rol oynar. Bu zeminlere kohezyonlu zeminler denir. Böyle zeminlerdeki malzeme kurutulduğunda sert bir yapı elde edilir. Islak durumda toz haline getirilemez. Bu zeminlerin kayma gerilmeleri sürtünme ve kohezyon kuvvetinin birlikte etkileri ile meydana gelir. Kohezyonlu zeminler dağınık veya topaklanmış yapılarda görülürler (Şekil 3.2).



Şekil 3.1. Kohezyonsuz Zemin Yapısı



Şekil 3.2. Kohezyonlu Zeminler

Doğada zeminler çok geniş tane boyutlarına sahip olduklarından, sınıflandırmada tane boyutlarını ayıran bir dizilim gerekir. Kohezyonlu zeminlerin sınıflandırılmasında kohezyon durumunun belirlenmesi zorunludur. Genel olarak ayrık taneli zeminler (kohezyonsuz) için kaya, çakıl, kum; kohezyonlu zeminler için ise silt, kil ve turba gibi terimler kullanılmaktadır.

Zemin mekaniği çalışmalarında hangi isimden hangi tip zeminin kastedildiğinin anlaşılabilmesi için zeminlerin bir sınıflandırma sistemine tabi tutulması gerekir.

3.1. Genel Zemin Cinsleri

Zeminlerin oluştuğu ana kayanın ayrışma durumuna ve bu ayrışma ürünlerinin büyüklük ve bileşimlerine göre zeminler genel zemin cinslerine ayrılırlar. Zeminler incelenirken örnek alınması sırasında genel zemin cinsinin belirlenmesi gerekir. Yapı tekniği yönünden zemin cinslerinin özellikleri değişik olduğundan temel zeminlerini derinlemesine araştırırken her katmandaki zeminin cinsinin belirlenmesi ve bir sondaj çizelgesine işlenmesi gerekir.

Zeminler, yedi genel zemin cinsine ayrılabilirler.

- Kaya zeminler,

- Kum ve çakıl zeminler,
- Silt,
- Kil zeminler,
- Marnlar,
- Lössler,
- Organik zeminler.

a) **Kaya zeminler** : Kimyasal ayrışmaya uğramamış, fiziksel parçalanmaya ise çok az uğramış veya uğramamış zeminlerdir. Kaya zeminler jeolojik oluşumlarına göre volkanik, metamorfik ve tortul kayalar olmak üzere üç gruba ayrılır. Bu gruplara giren basınç dayanıkları ve dirençleri büyük olan sert kayalar (granit, syanit, diabaz, bazalt, serpentina, mermer, sağlam kireç taşı, dolomit gibi) yapı temeli olarak çok uygundur. Dayanıkları zayıf olan kayalar, yarı sert kayalar (konglomeratlar, sert jips, anhidrit) adını alırlar. Kaya zeminlerinin minimum tane boyutları 200 mm olup yuvarlak ve köşeli olarak şekillenmiştir.

b) **Çakıl ve kum zeminler** : Yuvarlak ayırık taneli zeminlerdir. Bu zeminlerin çekmeye karşı dayanımları yoktur. Kaymaya karşı ise çok az dayanım gösterirler. Çakıl ve kum zeminlerde katışık ince malzeme olmaması durumunda su depolama yapıları için en uygun zemin özelliği gösterir. Çakıllar, tane çapları 2-60 mm arasında değişen kaya parçalarıdır. İnce çakılların tane çapları 2-6 mm arasında yer alır. Tane çapları 0,06-2 mm arasında değişen kaya parçalarına kum denir. Tane çapları 0,06-0,2 mm arasında olanlar ince kum, 0,2-0,6 mm olanlar orta kum ve 0,6 - 2 mm arasında olanlar iri kum adını alırlar.

c) **Silt** : Tane çapları 0,002-0,06 mm arasında değişen çok ince kaya parçalarıdır.

d) **Kil zeminler** : Killer 0,002 mm'den daha küçük taneciklerden oluşmuş aliminyum silikatlarıdır.

Killerin gözenekleri ince, su emmeleri yavaş, ağırlığı fazla ve yapışkandır. Su içerdikleri zaman plastik özellik gösterirler. En önemli özelliği plastisite özelliğine sahip olmasıdır. Plastisite; bir malzemenin sabit bir hacim ile kohezyonu bozulmaksızın deforme

edilebilmesidir. Plastik deformasyonlar yük kaldırıldığında kaybolmazlar.

Killer içeriklerine göre adlandırılırlar. Silisli killer zayıf kil, aliminyumlu killer yağlı kil adını alırlar. Su ile doymuş killerin iç sürtünmeleri yoktur. Kil çeşidine bağlı olmakla birlikte, şev kayma tehlikesi yüksektir.

e) **Marn** : Marn, içinde kil bulunan kalker veya dolomit olup, kalkerin miktarına göre kireçli marn, killi marn adını alır. Marn mekanik özelliği yönünden kille kum arasında yer alır.

f) **Lössler** : Kireçle birbirine yapışmış kuvarz ve feldspat tozudur. Rüzgarlar tarafından taşınarak oluşurlar. Tane çapları 0,05 mm'den daha küçüktür. Oldukça gevşek ve tabakasızdır. Az miktarda kil içerirler ve az plastiktirler. Kuruduklarında birbirine yapışırken, ıslatıldıklarında çabuk ayrılırlar. Toprak su yapılarında bu gibi topraklar yapı tekniği yönünden en tehlikeli zeminlerdir.

g) **Organik zeminler** : Bitki artıklarının havasız koşullarda ayrışması sonucu humus oluşur. Kalınlıkları fazla değildir. Humusun zamanla bozulması ve humin asitlerinin betonu etkilemesi sonucu organik zeminlerin mühendislik yapılarında kullanılması sakıncalıdır.

3.2. Zeminlerin Tane Dağılımı

Zeminlerin fiziksel özelliklerine en çok etki eden tane büyüklükleri ve bunların dağılımıdır. Tane dağılımı çeşitli büyüklükteki tanelerin zemin içerisinde hangi oranda bulunduğudır. Zemindeki tanelerin büyüklükleri ile bunların kuru ağırlık olarak, zemin içindeki yüzdelilerinin bilinmesi gerekir. Tane dağılımı, en iyi şekilde tane dağılım eğrileri ile açıklanır. Bir zemin içinde hangi boyuttaki tanelerin ne kadar bulunduğunu gösteren grafiklere tane dağılım grafikleri veya granülometre eğrileri adı verilir.

Tane büyüklüklerini belirlemek için tane büyüklüğü analizi veya mekanik analiz uygulanır. Mekanik analiz; elek analizi ve ıslak analiz olmak üzere iki aşamada yapılır. Genel olarak bir zemin, iri

ve ince taneleri içerir. Elek analizi zeminin iri taneli kısmına, ıslak analiz ise zeminin ince taneli kısmına yöneliktir.

3.2.1. Elek Analizi

Bir zeminin tane dağılımının belirlenmesi için en uygun ve hızlı metot onu açıklığı bilinen gözeneklere sahip eleklerden elemektir. Söz konusu bu işlem mekanik veya elek analizi olarak adlandırılır. Elek analizi ile taneli zeminlerden iyi sonuçlar alınır ise de kohezyonlu zeminlerde taneler birbirine yapıştığından elek analizi gerçeğe uymayan sonuçlar verir.

Elekler, belli büyüklüklerde göz açıklığı olacak şekilde delinmiş metal bir levha veya tel dokumadan yapılmaktadır. Eleklerin 1 cm² alandaki göz sayısı bellidir. Göz genişlikleri standart numara ile belirtilir. A.B.D., İngiltere ve Ülkemizde uygulanan standart elek çapları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

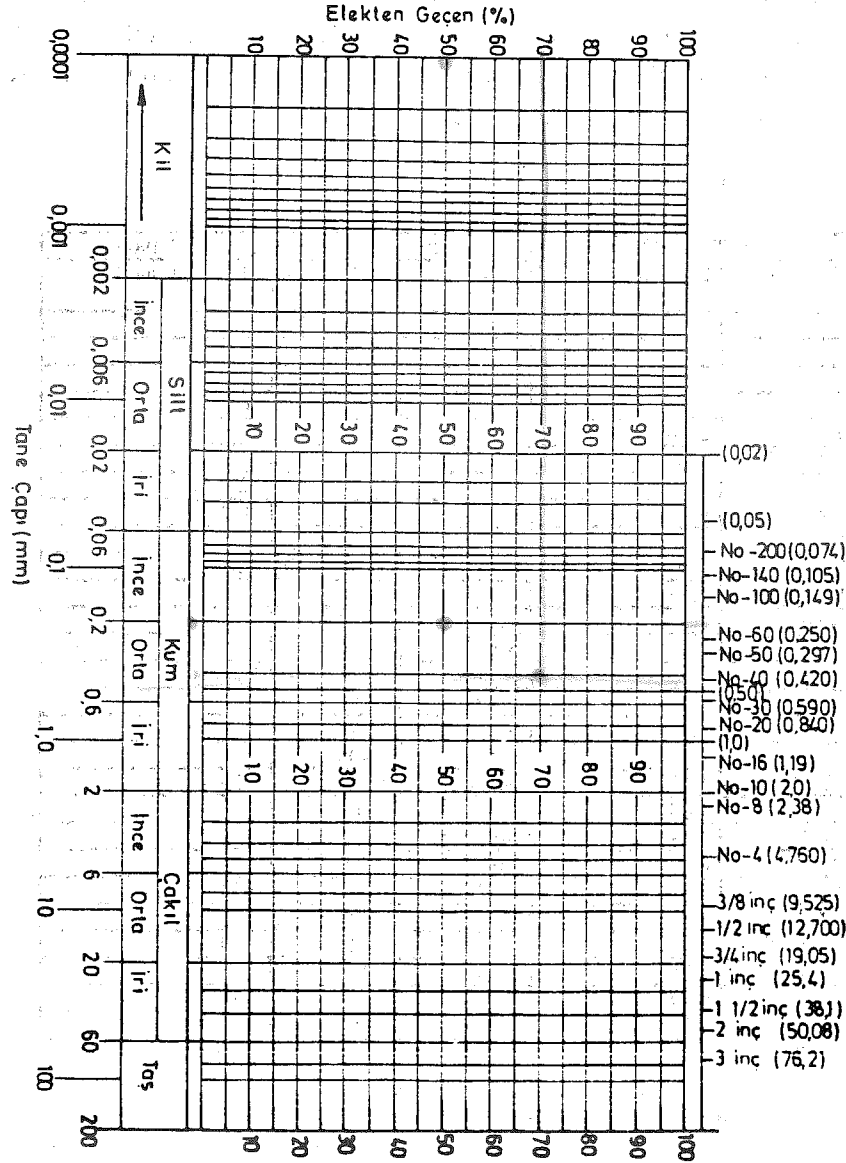
Mekanik analizlerde kullanılmak üzere alınan zemin örneği 105 °C 'deki etüvde ağırlığı sabitleşinceye kadar kurutulduktan sonra, agrega halinde olan parçalara ayrılır ve göz açıklıkları yukarıdan aşağıya küçülecek şekilde üst üste dizilmiş bir elek takımına konur. Elekler mekanik bir sarsıcı veya elle, belirli bir hızda 10-15 dakika sallanarak zemin örneğinin eleklerden geçmesi sağlanır. Eleme işlemi tamamlandıktan sonra, elekler büyüktür küçüğe doğru açılarak her elek üzerinde kalan miktar ayrı ayrı tartılır. Kalan örnek ağırlıkları toplamaları, başlangıçtaki malzeme ağırlığına eşit olmalıdır. Eleklerden geçen tanelerin miktarı, örneğin ağırlığına göre % olarak belirtilir. Hesaplanan değerler yarı logaritmik bir eşelde işaretlenerek malzemenin granülometrik eğrisi çizilir. Tane çapı dağılımı için grafik Şekil 3.3'te verilmiştir.

Tane dağılım eğrisinin çiziminde, daha küçük tanelerin % miktarı aritmetik eşelde (ordinatta), eleklerin göz genişlikleri veya tane çapları da logaritmik eşelde (Şekil 3.4) gösterilir. Eğrinin şekli, zeminde bulunan tanelerin büyüklüklerine göre miktarının değişimini ve zemin cinsini gösterir. Bir eğrinin üstünde veya solunda bulunan diğer eğriler, daha ince taneli zeminleri (Şekil 3.4 C), altında veya sağ tarafında olanlar ise daha iri taneli zeminleri gösterir (Şekil 3.4 E). Eğrinin genel eğimi, zeminin bileşimindeki tane çaplarının sıralanışını göstermektedir. Değişik boyutta tane bulunduran zeminler, iyi derecelenmiş olarak nitelendirilir. Dik bir

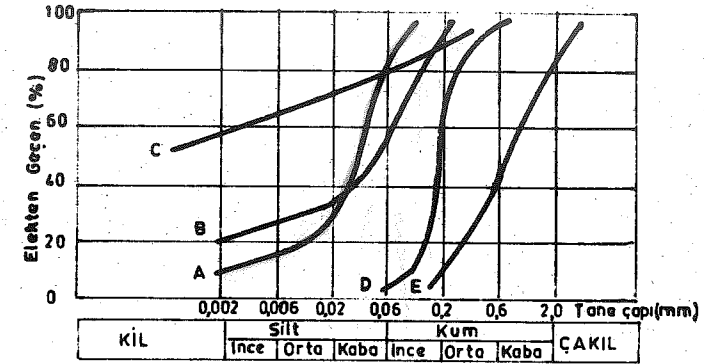
granülometri eğrisi malzeme içindeki tane boylarının birbirine yakın olduğunu gösterir. Başka bir anlatımla, eğri dikleştikçe zeminin homojen bir yapıya sahip olduğu anlaşılır. Yatık bir eğri ise yaygın granülometriyi gösterir. Eğride basamakların bulunması malzemenin iki veya daha çok üniform granülometreli zeminlerin karışımından oluştuğunu gösterir.

Çizelge 3.1. Standart Elek Çapları

ASTM D 422		BS 1377		TS 1900
Elek No.	Elek Çapı (mm)	Elek No.	Elek Çapı (mm)	Elek Çapı (mm)
				80
				63
				50
				40
1"	25.40			25
3/4"	19.05			20
				12.5
3/8"	9.53			10.0
No.3	6.35			6.3
No.4	4.76			5.0
No.5	4.00			
No.6	3.36	No.5	3.353	
No.7	2.83	No.6	2.812	
No.8	2.38	No.7	2.411	2.5
No.10	2.00	No.8	2.057	
No.12	1.68	No.10	1.676	
No.14	1.41	No.12	1.405	
No.16	1.19	No.14	1.204	1.25
No.18	1.00	No.16	1.003	
No.20	0.84	No.18	0.853	
No.25	0.71	No.22	0.699	
No.30	0.59	No.25	0.599	0.63
No.35	0.50	No.30	0.500	
No.40	0.42	No.36	0.422	0.40
No.45	0.35	No.44	0.353	
No.50	0.297	No.52	0.295	0.315
No.60	0.250	No.60	0.251	
No.70	0.210	No.72	0.211	0.200
No.80	0.177	No.85	0.178	
No.100	0.149	No.100	0.152	0.1600
No.120	0.125	No.120	0.124	
No.140	0.105	No.150	0.104	
No.170	0.088	No.170	0.089	
No.200	0.074	No.200	0.076	0.080
No.230	0.062	No.240	0.066	
No.270	0.053	No.300	0.053	
No.325	0.044			
No.400	0.037			



Şekil 3.4'deki A eğrisi dik bir eğimde olup, taneciklerin büyük bir kısmı kaba silt boyutundadır. Çapı 0,2 mm'den büyük boyutta tane içermemekte olup orta ve ince silt boyutundaki tanecikler, toplam ağırlığın % 15'i dolayındadır. Eğri, kaba silt zemine ilişkin olmaktadır. B eğrisi, tane çapı yönünden daha geniş alanı kapsamakta olup, örneğin % 40 kadarı ince kum bölgesindedir. Zeminin % 25 kadarı ince ve orta silt boyutundadır. Bu zeminde kaba silt miktarı A eğrisine oranla daha azdır. C eğrisi, A ve B eğrileri üzerinde olup, tane çapları daha küçüktür. Bu nedenle kil sınırı içinde daha çok ince malzemeler yer almaktadır. D eğrisi 0,2 mm boyutunda olup, fazla eğime sahiptir. Taneciklerin çoğu 0,2 mm boyutundadır ve üniform görünümlü ince kumdur. E eğrisi granülometri eğrisinin en sağında yer aldığından kaba taneleri



Şekil 3.4. Değişik Tane Çapı Dağılım Eğrileri

içermektedir. Eğri eğiminin az oluşu zeminin iyi derecelendiğini göstermekte olup, bu özellikteki kum, beton üretimi için uygundur.

Granülometri eğrileri, ağırlık olarak, zemin içindeki tanelerin ne kadarının belirli bir çaptan daha küçük olduğunu göstermektedir.

Elek analizi yaparken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalar, deney uygulama örneğinin arazideki tabakayı temsil etmesi ve tanelerin birbirinden ayrılmasının sağlanmasıdır. Özellikle içinde ince taneler bulunan zeminlerde taneler birbirine yapışmaktadır. Bu çeşit zeminler eleklerden geçirilmeden önce,

tanelerin mekanik olarak veya yıkanarak birbirinden ayrılmasının sağlanması gerekir.

Zemin mekaniğinde kullanılan en ince elek No. 200 olmaktadır. Bu elekten geçen taneler silt ve kil sınıfına girmekte, bu eleğin üstünde kalanlar ise kum ve çakıl malzemeyi oluşturmaktadır. Bu nedenle No. 200 elek ince ve iri taneli zeminleri birbirinden ayırmaktadır.

Zeminin kuru ağırlık olarak % 50'den fazlası No. 200 elek üzerinde kalırsa, bu zeminlere kaba zemin, % 50'den fazlası No. 200 elekten geçerse bu zeminlere de ince zemin adı verilir. Kaba zeminler No. 4 elek yardımıyla kum ve çakıla ayrılır. Kuru ağırlığa göre zeminin % 50'den fazlası No. 4 elek üzerinde kalan zeminler çakıl, No. 4 elekten geçen zeminler ise kum olarak tanımlanır. Zemin içerisinde kuru ağırlığa göre % 5 ince malzeme olduğunda, zemin kaba zemin olarak nitelendirilebilir.

3.2.2. Islak Analiz

Elek analizi, ayırık taneli zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan bir yöntemdir. Doğada ayırık taneli zeminlerin sınıflandırılmasında kullanılan, en küçük elek çapı 0,074 mm olan elekten daha küçük çapa sahip olan malzemelerde bulunmaktadır. Tane çapı 200 Nolu elek boyutundan daha küçük olan zeminlerin belirlenmesinde ıslak analiz yöntemlerinden yararlanılır.

Yöntemin temeli, aynı özgül ağırlığa sahip küresel taneciklerin su içinde çökme hızının çapa bağlı olduğunu gösteren Stokes Yasasına dayanır. Söz konusu yasaya göre, belirli bir boyuttan daha küçük tanelerin miktarı saptanır. Ancak bir toprak süspansiyonunda 0,0002 mm'den daha küçük taneler çökemediğinden, çökme yöntemleriyle 0,0002 mm'den daha küçük taneler alt fraksiyonlara ayrılamazlar. Diğer yandan 0,2 mm'den daha büyük taneler çöklerken türbülanslık meydana getirdiklerinden tanelerin çökme hızı değişir. Bu nedenle Stokes Yasası, genel olarak 0,2 mm ile 0,0002 mm boyutları arasında bulunan tanelerin % miktarlarının belirlenmesinde kullanılır.

Stokes Yasasına göre, durgun bir sıvı içerisinde düşmeye bırakılan küresel bir tane, gittikçe hızlanır ve kısa bir süre sonra sabit bir düşme hızına ulaşır. Bu sabit hızda tanenin etkilendiği

sürtünme ile yerçekimi kuvveti arasında bir denge bulunmaktadır. Tanenin sabit düşme hızı, tanenin büyüklüğüne, ağırlığına, şekline, sıvının özgül ağırlık ve vizkozitesine bağlıdır.

Stokes, sıvı içerisinde düşmeye bırakılmış tanenin etkisinde bulunduğu sürtünme ile yerçekimi arasındaki dengeden yararlanarak, tanenin durgun bir süspansiyon içindeki çökme hızını aşağıdaki eşitlikte açıklamaktadır.

$$V = \frac{d^2 (\gamma_s - \gamma_w)}{18 \mu}$$

Eşitlikte;

V = Tanenin düşme hızı (cm/s),

γ_s = Zeminin tane birim hacim ağırlığı (g/cm³),

γ_w = Suyun birim hacim ağırlığı (g/cm³),

d = Tanenin çapı (cm),

μ = Suyun dinamik viskozitesi (gs/cm²).

Eşitlikten anlaşılacağı gibi, tanenin çökme hızı tanenin çapının karesiyle doğru orantılı olarak artar. Eşitlikten tane çapı aşağıdaki gibi belirlenir.

$$d = \left(\frac{18 \mu V}{(\gamma_s - \gamma_w)} \right)^{1/2}$$

Süspansiyon yüzeyinden herhangi bir h derinliğinde bir nokta göz önüne alındığında, çökelmenin başlangıcından, bir t süresi sonunda bu noktaya ulaşmış bir tanenin çapı da yukarıdaki eşitlik yardımıyla saptanabilir.

$$d = \left(\frac{18 \mu}{(\gamma_s - \gamma_w)} \cdot \frac{h}{t} \right)^{1/2}$$

Eşitliğe göre, belirli bir çaptaki küresel bir tane için belirli bir çökme hızı vardır. Tanenin belirli bir derinliğe ulaşması için bir t süresinin geçmesi gerekir. Söz konusu h derinliğinde, t süresi sonunda yukarıdaki eşitlikle hesaplanan d 'den daha büyük çaplı tane bulunmaz. d 'den daha büyük çaplı taneler, t süresi sonunda h 'tan daha derinlere inerler. Diğer yandan h derinliğinde t süresi sonunda d 'den daha küçük tanelerin miktarında bir değişme olmaz.

Belirli bir çökme süresi sonunda, belirli h derinliğine inen tanenin çapı belirlendikten sonra, d çapından küçük tanelerin oranı aşağıdaki eşitliklerle belirlenebilir.

$$N = \frac{W_T}{W} \cdot 100$$

$$N = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \cdot \frac{V}{W_z} (\gamma_{süs} - \gamma_w)$$

Eşitliklerde;

N = Göz önüne alınan d'den daha küçük çaplı tanelerin ağırlığının, tüm zeminin ağırlığına oranı (%),

W_T = t zamanı sonunda süspansiyonun h derinliğinde 1 cm³ hacminde bulunan tane ağırlığıdır (g),

W = Deney başlangıcında süspansiyonun 1 cm³ hacminde bulunan tane ağırlığı (g),

V = Süspansiyonun hacmi (cm³),

γ_s = Tanelerin birim hacim ağırlığı (g/cm³),

$\gamma_{süs}$ = Göz önüne alınan derinlikteki süspansiyonun birim hacim ağırlığı (g/cm³),

γ_w = Suyun birim hacim ağırlığı (g/cm³),

W_z = Süspansiyondaki zeminin ağırlığı (g).

Görüldüğü gibi, herhangi bir süspansiyonun birim hacim ağırlığı, hacmi ve içindeki katı madde miktarı bilinmesi durumunda göz önüne alınan tanelerden daha küçük tanelerin % oranı bulunabilir.

Islak analizde metot, su ile zemin tanelerinden bir süspansiyonun hazırlanması ve çökeltme başladıktan sonra, değişik zamanlarda, süspansiyonun her cm³'deki zemin ağırlığının (W_T) ölçülmesidir. Bu işlem hem pipet, hem de hidrometre metodu ile yapılabilir. Hangi metot kullanılırsa kullanılsın zemin, organik maddelerden temizlenmesi için bir oksidasyon eriyiği ve asit ile, yumaklanmayı önlemek için de dağıtıcı bir eriyik ile ön işleme tabi tutulur.

Organik maddenin temizlenmesi, zeminin önce hidrojen peroksit ve sonra da sulandırılmış hidroklorik asit ile bir ön işleme tabi tutulması ile yapılır. Zemindeki organik madde yüzdesi, ön işleme tabi tutulmuş zeminin kuru ağırlığındaki kayıptan hesaplanır.

Pipet metodu, basit olduğu halde, hidrometre metodundan daha yorucudur. Ayrıca çok duyarlı teraziler gerekir. Çökeltme başladıktan sonra, belirli zaman aralıklarında, belli bir derinlikten süspansiyon bir pipet yardımı ile dışarıya alınır. Örnekler, genellikle 10 cm³ hacminde olup, 10 cm derinlikten alınır.

Her cm³ kuru zemin ağırlığını (W_k) belirlemek için, her süspansiyon örneğindeki su buharlaştırılır ve kalan kuru zemin tartılır. Çökeltme başladıktan sonra geçen t zamanı ve süspansiyon örneğinin alındığı h derinliğinden en büyük tane çapı bulunur.

Hidrometre metodunda temel, tanelerin çökeldiği süspansiyonun birim hacim ağırlığındaki azalışın, bir hidrometre ile ölçülmesidir. Bu amaçla aerodinamik şekilli hidrometreler kullanılır (Şekil 3.5).

Süspansiyona daldırılan hidrometre, süspansiyonun birim hacim ağırlığına bağlı olarak değişik derinliklere iner. Her daldırışta hidrometrenin hangi derinliğe daldırıldığının bilinmesi gerekir. Hidrometreler süspansiyon içine daldığı derinliği ve bu derinlikteki süspansiyonun birim hacim ağırlığını gösterirler.

Hidrometrenin süspansiyonun birim hacim ağırlığını gösterdiği nokta, hidrometrenin hacim merkezinin (bataklık merkezinin) sıvının gerçek yüzeyinden olan derinliğidir.

Hidrometre okumalarında gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra, hidrometrenin dalmış olduğu gerçek h derinliği ve bu derinlikteki süspansiyonun birim hacim ağırlığı elde edilir. Bu değerlerden yararlanılarak h derinliğindeki süspansiyonun tane çapı ve bu çaptan küçük tanelerin zemin örneği içindeki oranı verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir.

Ölçümler yapılırken hidrometrenin daldırıldığı kabın kesit alanı küçük olduğundan, hidrometrenin daldırılması, sıvının 0-0 gerçek düzeyinin, geçici bir T-T düzeyine yükselmesine neden olur (Şekil 3.5). Bu nedenle A kesit alanı bilinen bir kapda, hidrometrenin kullanılabilmesi için ayarlanması gerekir.

Hidrometrenin özgül ağırlığı yaklaşık 1 olduğu için, cm³ olarak V_H hacmi, gram olarak ağırlığına çok yakındır. V_H hacmini bulmak için hidrometre tartılır. Hidrometre sapının suya daldırılmayan kısmından doğan hata ihmal edilebilir. Hidrometre gövde üzerinde

h_0 ve h_1 mesafeleri ölçülebilir (Şekil 3.5). Kabın kesit alanı, A olduğuna göre, yüzeyin yükselmesi, V_H/A dır.

T seviyesindeki her hidrometre okuması için, (Şekil 3.5) en alt h_1 mesafesi her durum için bellidir. Gövdenin merkezi seviyesindeki sıvının yükselmesi $V_H/2A$ kadardır. Böylece, gövdenin gerçek derinliği (h),

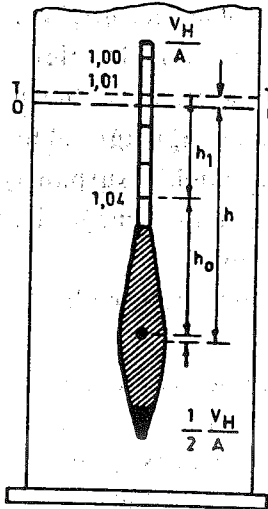
$$h_1 + h_0 + \frac{V_H}{2A} \text{ veya } h_1 + (h_0 - \frac{V_H}{2A})$$

olur. Parantez içindeki terim, verilen her hidrometre için sabittir. Her hidrometre okumasına tekabül eden ve h değerlerini gösteren bir ayarlama eğrisi de çizilebilir.

Hidrometre okuması süspansiyonun birim hacim ağırlığını gösterir. Bu ise, verilen hacimdeki süspansiyon ağırlığı ile, aynı hacimdeki su ağırlığı arasındaki orandır. Süspansiyonunun birim hacim ağırlığı aşağıdaki eşitlikle bulunabilir.

$$\gamma_{\text{süs}} = \frac{\text{Su ağırlığı / cm}^3 + \text{su altında tane ağırlığı / cm}^3}{\text{su ağırlığı / cm}^3}$$

$$= 1 + \text{suya daldırılmış tane ağırlığı / cm}^3$$



Şekil 3.5. Hidrometre

Hidrometre okumaları kaydedilirken, kolaylık olmak üzere, başdaki 1 g/cm³'den vazgeçilir ve ondalık hane, üç hane sağa

götürülür. Örneğin hidrometre üzerindeki 1,012 taksimati 12 olarak okunur.

Bu şekilde yapılan hidrometre okumasının RH ve aşağıda açıklanan düzeltmeler yapıldıktan sonra, okumanın R olduğu göz önüne alındığında süspansiyonun birim hacim ağırlığı;

$$\gamma_{\text{süs}} = 1 + \frac{R}{1000} = 1 + \text{suya daldırılmış tane ağırlığı / cm}^3$$

$$= 1 + W_T \left(\frac{G_s - 1}{G_s} \right)$$

Bu eşitlikten,

$$\frac{R}{1000} = \left(\frac{G_s - 1}{G_s} \right) W_k$$

ve

$$W_k = \frac{R}{1000} \left(\frac{G_s}{G_s - 1} \right)$$

bulunur.

Geçen t zamanı ve h gerçek derinliğine tekabül eden D tane çapı ile D den daha küçük tanelerin yüzdesi, ilgili eşitliklerden yararlanılarak bulunur.

Hidrometre okumalarında aşağıda belirtilen düzeltmeler yapılır.

- **Menisküs düzeltmesi (C_m)** : Süspansiyonun yoğun olması okumaların menisküsün tepesinde yapılması zorunluğu vardır. Yapılacak düzeltme, sıvı seviyesi ile menisküsün tepe okuması arasındaki farktır. Bu fark belirli bir hidrometre için sabit olup, alet berrak bir suya konulduğunda kolayca ölçülebilir. Düzeltme okumaya eklenerek yapılır.

- **Sıcaklık düzeltmesi (M_t)** : Hidrometreler, genellikle 20 °C ayarlanırlar. Süspansiyon bu sıcaklıkta değilse, sıvının yoğunluğunda bir değişiklik yapmak için, bir sıcaklık düzeltmesi yapılmalıdır. Bu düzeltme, sıcaklık 20 °C'nin üstünde ise ilave edilerek, altında ise çıkarılarak yapılır.

- **Ayırıcı madde düzeltmesi (C_d)** : Ayırıcı maddenin eklenmesi sıvının özgül ağırlığını artırdığından, düzeltme çıkartılarak yapılır. Bu düzeltmelerin değeri deney sırasında

kullanılan ve standard konsantrasyonu 0,8 olan sodyum oksalata havi damıtık suyun özgül ağırlığını ölçmekle bulunur.

Düzeltilen hidrometre okuması aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R = R_H + C_m + M_t - C_d$$

3.2.3. Tane Çapı Dağılım Ölçütleri

Kohezyonsuz zeminlerin mühendislik özellikleri tane çapı dağılımı ile yakından ilgilidir. Zeminin granülometrisinden yararlanılarak elde edilen etkili tane büyüklüğü, uniformluk katsayısı ve eğrilik katsayısı parametreleri kullanılarak zeminin özellikleri yaklaşık açıklanabilir.

a) Etkili tane büyüklüğü (D_{10}) : Tane dağılım eğrilerinde zeminin % 10'undan daha küçük çapa sahip olduğu çap, etkili tane büyüklüğünü verir. Buna göre taneciklerin % 10'u etkili veya efektif çaptan daha ince, % 90'ı ise daha büyüktür.

b) Uniformluk (değişmezlik) katsayısı (C_u) : Tane dağılım eğrisinde zeminin % 60'ından daha küçük olduğu çapın (D_{60}), etkili tane büyüklüğüne (D_{10}) oranı ;

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

uniformluk katsayısı olarak adlandırılır.

Uniformluk katsayısı, tane büyüklüğünün uniformluk durumunu gösteren bir ölçüttür. Uniformluk katsayısı büyüdükçe, tane çaplarının uniformluğu azalır. Uniformluk katsayısı büyük olan zeminlere ($C_u > 4-6$) iyi derecelenmiş zeminler denir. Uniformluk katsayısı 1 olan zeminlere uniform zeminler olup kötü derecelenmiş zeminler olarak kabul edilirler. Bu çeşit bir zemin, değişik taneler içeren iyi derecelenmiş zemine oranla mühendislik yönünden daha az sağlamdır.

c) Eğrilik (Derecelenme) katsayısı (C_c) : Tane dağılım eğrisinin şekli, eğrilik katsayısı ile belirtilir. Eğrilik katsayısı aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

Bir zemin örneğine ilişkin granülometri eğrisinde bazı tane boyutlarının eksik olup olmadığı eğrilik katsayısıyla kontrol edilebilir. Zeminin sürekli bir tane dağılımına sahip olması $1 < C_c < 3$ koşuluyla olasıdır.

3.2.4. Tane Çapı Dağılımının Önemi *

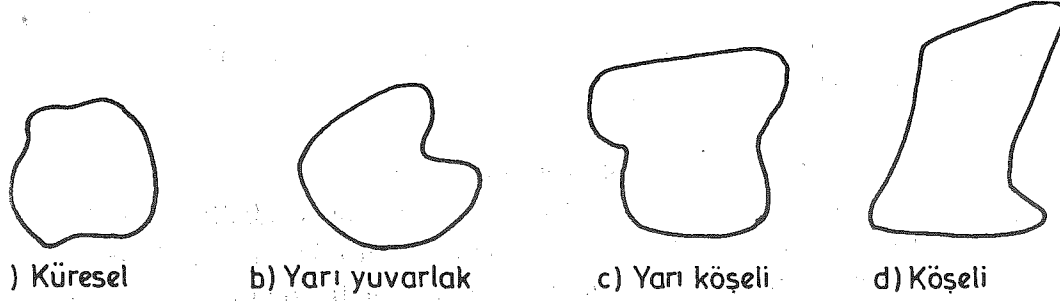
Tane çapı dağılımı zeminlerin bir çok mühendislik özelliğini etkilemektedir. Bunlar arasında aşağıdaki özellikler sıralanabilir.

- Temiz iri taneli zeminler ince taneli zeminlerden daha yüksek su geçirgenliğine sahip olmaktadır.
- İyi derecelenmiş zeminler daha yüksek mukavemete ve taşıma gücüne sahiptir.
- İyi derecelenmiş zeminler uygulanan yükler altında, kötü derecelenmiş veya uniform zeminlerden daha az sıkışma gösterirler.
- Zemin içinde kapillar su yükseklikleri doğrudan tane çapı dağılımına bağlıdır.
- Zeminlerin dondan etkilenme oranı tane çapı dağılımına bağlıdır.
- Zeminlerin su geçirgenliğine bağlı olarak yük altında sıkışma hızı yükleme sırasında içindeki suyun dışarı çıkabilme kolaylığı tane çapı dağılımından etkilenmektedir.
- Değişik amaçlarla malzeme seçiminde tane çapı dağılımı belirleyici rol oynar.
- Zeminlerin standart sistemlere göre sınıflandırılması ancak granülometri eğrilerine göre olmaktadır.

3.2.5. Zeminlerin Tane Şekli

Doğal zeminleri oluşturan taneler, kayaların mekanik ve kimyasal ayrışma ve küçük parçalara bölünmesi sonucu oluşmaktadır. Taneleri oluşturan kayaların birbirinden farklı minerolojik yapıları sahip olmaları ve ayrışmaya yol açan faktörlerin çok çeşitli olması nedeniyle doğal zeminler içinde farklı boyutlarda ve biçimlerde taneler yer almaktadır. Kayalar içindeki minerallerin özellikleri, zeminlerin ince taneli ve iri taneli olmalarına neden olmaktadır. Böylece ince ve iri taneli zeminlerin

biçimleri birbirinden çok farklıdır. Şekil 3.6'da iri taneli zeminlerde rastlanan bazı zemin şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6. İri Taneli Zeminlerin Tane Biçimleri

Tane şeklini belirleyici ölçütler olarak küresellik, yassılık, uzanıklık ve köşelilik oranları ile özgül yüzey tanımı kullanılmaktadır.

a) **Küresellik oranı (x)** : Bir tanenin küresellik oranı, o tanenin boyutları arasındaki farklılığı belirler. Küresellik oranı (x), eşdeğer tane çapının (d_e), tane boyuna (L) oranıdır (Şekil 3.7a). Eşdeğer tane çapı, bir tanenin hacmindeki bir kürenin çapıdır. Kürenin küresellik oranı, bire eşit olup, yassı tanelerin küresellik oranı birden küçüktür. Küresellik oranı aşağıdaki eşitlikte belirlenebilir.

$$x = \frac{d_e}{L}$$

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$$

Eşitliklerde,

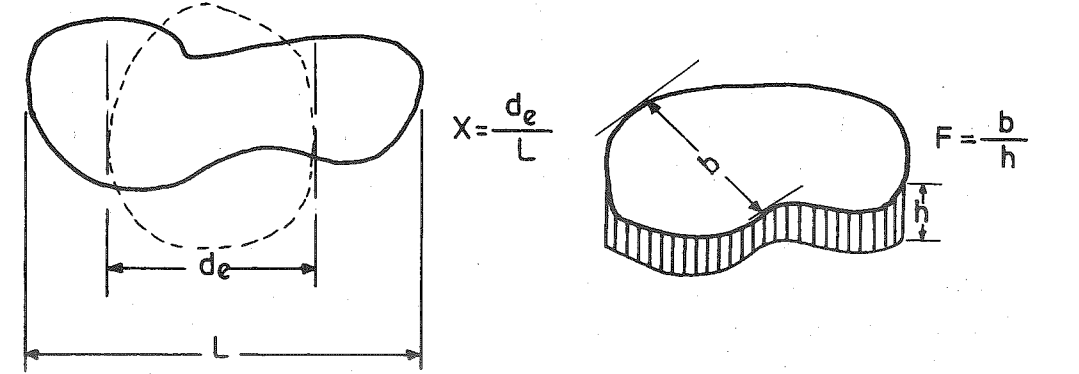
x = Küresellik oranı,

d_e = Eşdeğer tane çapı (mm),

V = Zemin tanesinin hacmi (mm^3)

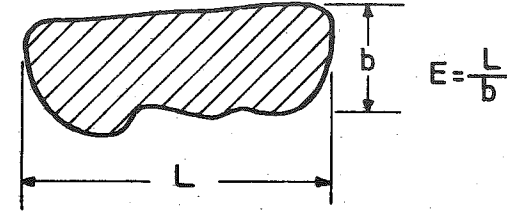
b) **Yassılık oranı (F)** : Bir tanenin genişliğinin (b), kalınlığına (h) oranıdır ($F = b/h$, Şekil 3.7b).

c) **Uzanıklık oranı (E)** : Bir tanenin boyunun (L), genişliğine (b) oranıdır ($E = L/b$, Şekil 3.7c).

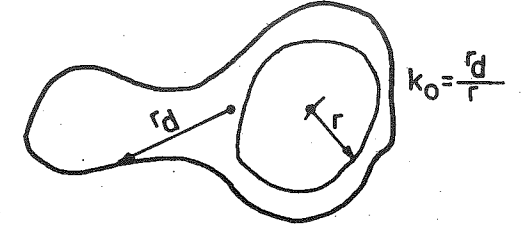


(a) Küresellik oranı

(b) Yassılık oranı



(c) Uzanıklık oranı



(d) Köşelilik oranı

Şekil 3.7. Tane Şeklini Belirleyici Ölçütler

d) **Köşelilik (yumuşaklık) oranı (k_o)** : Köşe ve kenarlarının ortalama yarıçapının (r_d), tane içine çizilen en büyük kürenin yarıçapına (r) oranıdır ($K_o = r_d/r$, Şekil 3.7d).

Bir zeminin elle işlenebilirlik kolaylığı, çarpmaya karşı dayanımı, yük altında kırılmaya karşı dayanımı zemin tanelerinin küresellik, yassılık ve uzanıklık oranları ile yakından ilgilidir. Zeminlerin küresellik oranı ne kadar büyük, yassılık ve uzanıklık oranı ne kadar küçük ise kırılma ve yük altında ezilmeye dayanıkları o kadar fazladır.

Küresellik mühendislik yönünden zeminlerin davranışına etkili bir özelliktir. Köşeli zeminlerin yük altında ezilmeye dayanımları az olmasına karşın zeminin yer değiştirmesine karşı direnç gösterirler.

e) **Özgül yüzey** : Tanelerin yüzey alanlarının, hacimlerine oranlarına özgül yüzey denir. Kil tanelerinin boyutları ve özgül yüzeyleri mineral yapısına bağlıdır.

İnce zeminleri oluşturan tanelerin mineral yapısı, boyutları ve biçimleri ile fazla özgül yüzeye sahip olmaları, bu zeminlerin mühendislik özelliklerini ve zeminin içerisindeki su ile ilişkisini kontrol eden çok önemli unsurlar olmaktadır.

Zemin taneleri şekil yönünden şişkin taneler, pul taneler ve iğne taneler olmak üzere üçe ayrılır.

- **Şişkin taneler** : Tanelerin uzunluk, genişlik ve kalınlıkları yaklaşık olarak birbirine yakın olan tanelere şişkin taneler denir. Şişkin tanelerin küresellik oranı yaklaşık 1 dolayındadır. Şişkin tanelerin çapları 0,001 mm'den daha büyüktür. Bu taneler fiziksel ayrışma sonucu oluşmuşlardır. Şişkin tanelerden oluşan zeminler, gevşek tuğla ve kırma toza benzer bir davranış gösterirler. Çarpma ve titreşimler sonucu şişkin taneler kolayca yer değiştirirler.

- **Pul taneler** : Küresellik oranları çok küçük, yassılık oranı 300-500 dolayında olup, kağıt yaprağına benzeyen bir görünümüne sahiptir. Boyutları 0,005 mm'den küçük olan pul taneler, şişkin taneler arasına girerek zemini esnek ve yumuşak duruma sokarlar. Pul tanelerden oluşan zeminler sıkışabilir nitelikte olup, statik yük altında deforme olurlar. Çarpma ve titreşim etkilerine karşı dayanımları çok fazladır.

- **İğne yapılı taneler** : Tanelerin uzanıklık oranı 100'ün üzerinde olan tanelerdir. Esnektirler ve yük altında kolaylıkla kırılırlar. İnce taneli zeminlerin kalınlıkları diğer boyutlara göre çok az olan ince plakalar şeklindedirler. İnce taneler daha çok mikroskop altında incelenebilir.

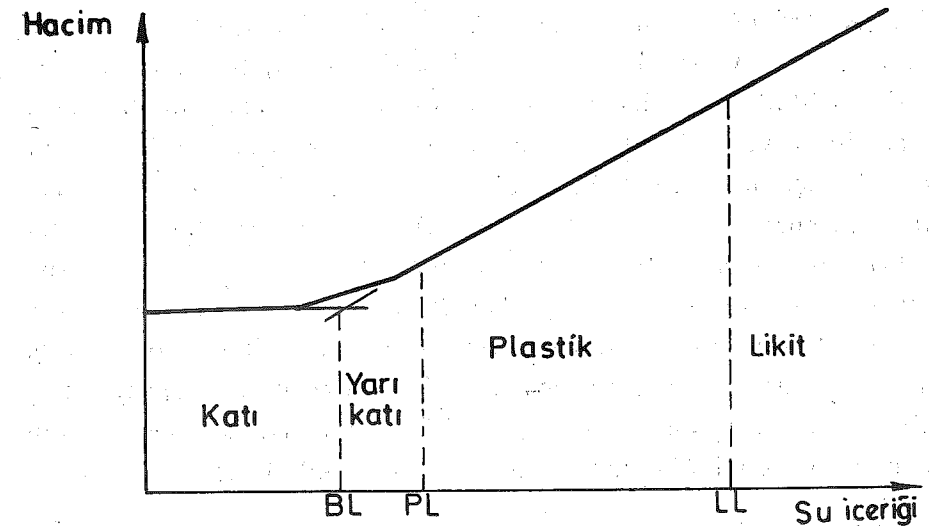
3.3. İnce Taneli Zeminlerin Kıvamı ve Kıvam Limitleri

Zeminler içerdikleri su miktarına göre birbirlerinden tanımlanabilen farklılıklarla fiziksel özellik gösterirler. Örneğin killi bir toprağa yeterli miktarda su karıştırılırsa toprak sıvı özelliği

kesmeye karşı dayanım göstermez. Bu toprak belirli bir dereceye kadar kurutulur, katı duruma geçer ve bir kesme dayanımı kazanır. Toprağın su içeriğine bağlı farklı fiziksel özellikler gösterdiği tanımlanabilir durumlarına zeminlerin kıvamı denir.

Ayrık taneli zeminlerde su içeriği değişimi, zemin partiküllerinin özelliklerine önemli etkide bulunmaz. Bu tip zeminlerde su içeriği değiştikçe birim hacim ağırlıklarında da bir değişim olur. Kohezyonlu zeminlerde ise malzemeye etkide bulunan en önemli etken su içeriğidir.

Kil boyutlu taneler negatif elektrik yükü taşıdığı için yüzeysel bir aktivite gösterirler. Bu yükün şiddetine bağlı olarak partikülün yüzeysel aktivitesi yüksek veya düşük olur. Yüzeysel aktiviteleri bulunan zemin taneleri su moleküllerini çeker ve etraflarında bir su katmanı oluşur. Bu şekilde yüzeye bağlı su tabakasına adsorbe edilmiş su tabakası denir. Adsorbe suyun özelliği normal suyun özelliklerinden biraz farklıdır. Taneciklerin alt kısmında katı, orta kısımlarda vizkoz bir kıvamdadır. Tabakanın en dışında normal su özelliğindedir. Böylece killi zeminler katı, plastik ve akıcı olmak üzere farklı durumlar gösterebilirler (Şekil 3.8). Söz konusu yapısal değişikliklere neden olan su miktarları, Atterberg tarafından ortaya konan yöntemle göre bulunur.



Şekil 3.8. Kıvam Limitleri Grafiği

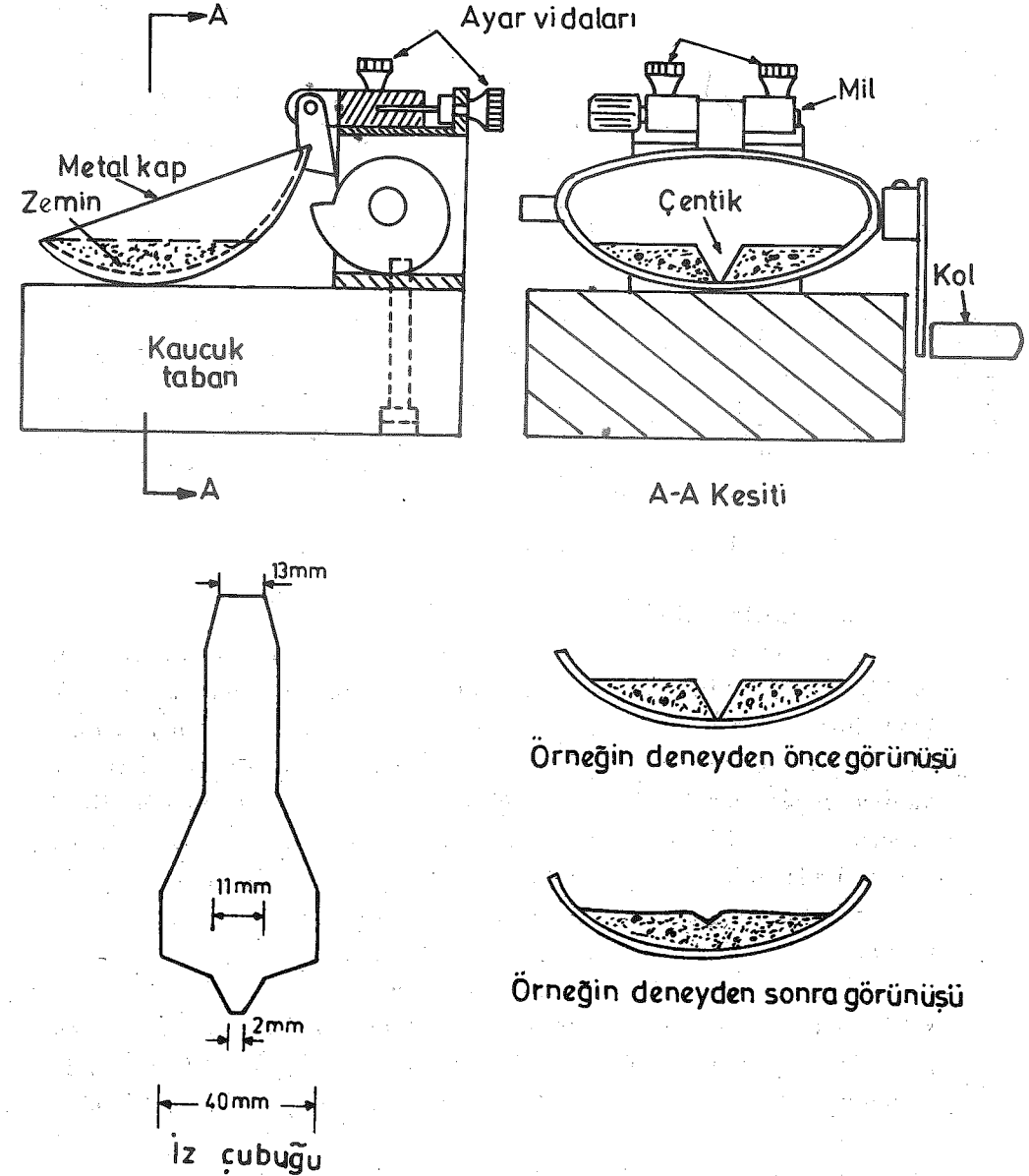
İnce taneli zeminler, su içeriklerine göre, değişik durumlarda olabilirler. İnce taneli kuru bir zemine su eklendiğinde zeminin hacmi artar ve sırasıyla katı durumdan, yarı katı durum, plastik durum ve likit duruma dönüşür (Şekil 3.8). Zeminlerin bir kıvamdan diğerine geçişteki su içeriklerine kıvam limitleri denir. Kıvam limitleri akma (likit) limit (LL), plastik limit (PL) ve büzülme (rötre) limit (BL) olmak üzere üç sınıfa ayrılır (Şekil 3.8).

1. Akma (Likit) Limit

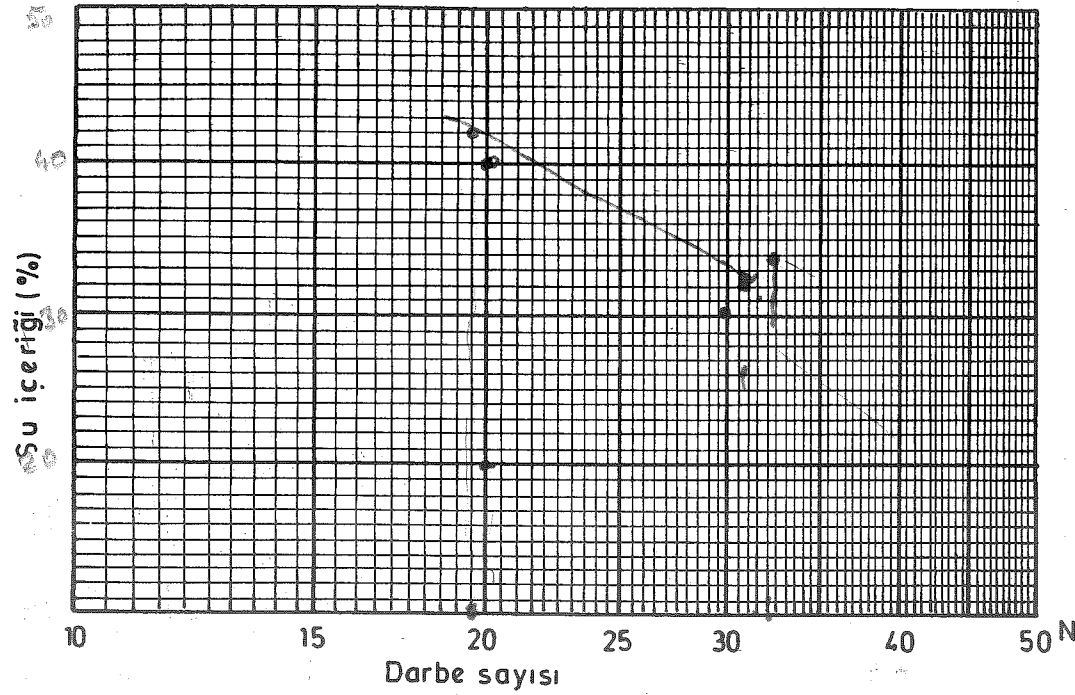
Yapışkan zeminlerde viskoz sıvı kıvamı ile plastik katı kıvamı arasındaki sınırı oluşturur. Zeminin kendi ağırlığı altında aktığı minimum su içeriği akma limitidir. Akma limiti yüksek olan topraklar çok ince taneli zeminlerdir. Bunlar kaymaya yatkın olduklarından yapı temellerine uygunlukları düşüktür. Zemin örneğinin hacmi azaldıkça plastik bir yapı oluşur ve böylece kayma mukavemeti belirir. Zemin örneği, akıcı bir yapıdan plastik bir yapıya geçtiği sırada, kuru ağırlığa göre nem miktarı, likit limit değerini verir. Likit limit değerinden daha fazla nem miktarında, killi zeminler akıcı halde bulunur.

Likit limit değeri, likit limit aleti ile belirlenir (Şekil 3.9).

Bir zeminin likit limit değerini belirlemek için 40 nolu elekten elenerek alta geçen killi zeminden bir miktar (100-200 g) örnek alınıp su ile karıştırılarak yumuşak macun kıvamına getirilir. Örnek likit limit aletinin örnek kabına konarak düzeltilir. İz çubuğu yardımıyla derinliği 1 cm, üst genişliği 1 cm, alt genişliği 2 mm olan bir yarık açılır. Örnek kap 1 cm yükseklikten düşecek şekilde elle çevrilir. Kolun her bir devrinde kap 1 cm yükseklikten taban üzerine düşer ve açılan kanal alt taraftan kapanmaya başlar. Zemin örneğinde açılan 1 cm'lik kısmının kapanması için düşüm sayısı sayılır ve örneğin su içeriği belirlenir. Aynı işlem örneğin su içeriği değiştirilerek tekrar edilir. Her defasında darbe sayısı ve bu darbe sayısına isabet eden su içeriği belirlenerek bir grafikte gösterilir. Darbe sayıları logaritmik olmak üzere işaretlenir. Elde edilen bütün noktalar bir doğru üzerinde yer alır. Söz konusu bu doğruya akış çizgisi denir. Doğrunun üzerinde 25 darbeye isabet eden, zemin örneğinin su içeriği likit limit sınırını verir (Şekil 3.10).



Şekil 3.9. Likit Limit Aleti



Şekil 3.10. Likit Limit Çizelgesi

2. Plastik Limit

İnce taneli zeminin nem miktarı, likit limit değerinden başlayarak azaldıkça örnek hacmi küçülür ve plastik özellik kaybolmaya başlar. Sonuçta uygulanacak olan yük deformasyondan çok kopma oluşturur. Böylece plastik bir yapıdan yarı katı bir yapıya geçen zemin örneğinin içerisinde bulunan su, plastik limit değerini verir. Plastik limit değeri kuru ağırlığa göre nem miktarı olarak ifade edilir. Killi zeminler, likit limitle plastik limit arasında nem içerdiklerinden plastik halde bulunur. Plastik limit, zeminin plastik durumu ile katı durumunu ayıran su içeriği sınırıdır.

Plastik limit değerinin belirlenmesinde, 40 nolu elekten geçen killi zeminden alınan örnek su eklenerek hamur durumuna getirilir. Hazırlanan örnek sicim haline getirilip filtre üzerinde yuvarlanır. Bu sırada zemin örneğinin suyu filtre kağıdı tarafından emilir ve bunun sonunda kırılma meydana gelir. Yaklaşık olarak 3 mm çapında ve 10 mm boyunda olan örneklerde yüzeysel çatlama ve kopmaların başladığı andaki örneğin su içeriği plastik limit değerini verir.

3. Büzülme Limiti

Plastik yapıda bulunan zeminin nem miktarı azaldıkça, yüzeysel gerilme kuvvetinin etkisi ile taneler birbirine yaklaşır ve hacimsel olarak herhangi bir azalma meydana gelmez. Zemin hacminde bir azalmanın olmadığı durumda bulunan su miktarı büzülme limitini verir. Büzülme limiti bir zeminin katı durumu ile sert durumunu belirleyen, su içeriklerini ayıran sınırdır.

Büzülme limitinde bulunan zeminler suya doymun halde bulunur. Söz konusu durumda, su azaldıkça boşluklara hava girer ve hacminde bir değişiklik olmaz. Büzülme limitinden daha küçük nem miktarında katı bir yapı görülür ve yük taşıma kapasitesi en yüksek bir değerde bulunur.

Büzülme limiti zeminin su içeriğinin azalmasına karşın hacim değişiminin olmamaya başladığı sıradaki su içeriğinin bilinmesiyle bulunur. Deney için 40 nolu elekten geçen zemin plastik duruma gelinceye kadar su ile karıştırılır. Ağırlığı bilinen örnek, cıva dolu bir kaba konarak, taşan cıvanın hacmi belirlenir. Daha sonra zemin örneği cıva içinden alınır ve belli bir süre kurumaya bırakılarak hacimde bir azalmanın meydana gelmesi sağlanır. Hacim azalmasının belirlenmesi için, örnek yeniden cıva içine konur. Hacim değişikliği sırasında meydana gelen nem azalmasını belirleyebilmek için zemin örneği kurumaya bırakılarak tekrar tartılır. Bu şekilde yapılan iki tartı arasındaki zemin örneğinin ağırlığına göre nem miktarı belirlenir. Sonuçlar; su içeriği her 100 g kuru zeminin cm³ cinsinden hacmi arasındaki ilişkiyi veren bir diyagramla gösterilir (Şekil 3.11).

Zemin doymun kaldığı sürece hacimdeki azalma kaybolan suya eşittir. Değerler 45° eğimli doğru üzerinde bulunur. Bu doğrunun en küçük hacminden geçen yatay doğru ile kesiştiği nokta büzülme limitini verir.

Yukarıda açıklanan deneyde büzülme limiti aşağıdaki eşitlikle de belirlenebilir.

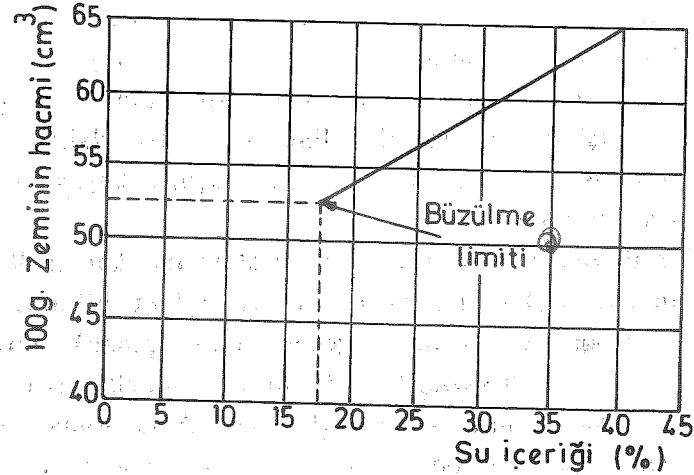
$$BL = \omega - \frac{V - V_k}{W_k} \cdot 100$$

Eşitlikte;

BL = Büzülme limiti,

ω = Örneğin su içeriği (%),

V = Yaş örneğin hacmi (cm^3),
 V_k = Kuru örneğin hacmi (cm^3),
 W_k = Kuru örneğin ağırlığı (g).



Şekil 3.11. Büzülme Limiti Çizelgesi

3.3.1. Kıvam indeksleri

İnce taneli zeminlerin sınıflandırılmasında kıvam limitlerine göre saptanan indeksler göz önüne alınmaktadır.

a) **Plastisite indeksi (PI)** : Bir zeminin plastik kıvam sınırları arasında tuttuğu su oranına zeminin plastisite indeksi denir. Buna göre plastisite indeksi, likit limitle plastik limit arasındaki fark olup zeminin bu iki sınır arasındaki içerdiği su yüzdesidir. Aşağıdaki eşitlikte açıklanabilir.

$$PI = LL - PL$$

Eşitlikte;

PI = Plastisite indeksi (% su),
 LL = Likit limiti (% su),
 PL = Plastik limit (% su).

Plastisite indeksi ile zeminlerin kaymaya karşı karakteristikleri belirlenir.

b) **Likitlik indeksi (LI)** : Doğal zeminlerin özelliklerini belirten bir büyüklüktür. Likitlik indeksi aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$LI = \frac{LL - \omega}{PI} \cdot 100$$

Eşitlikte;

LI = Likitlik indeksi (%),
 ω = Zeminin doğal koşuldaki su içeriği (%),
 PI = Plastik indeksi (%).

c) **Büzülme indeksi (PB) ve büzülme oranı (R)** : Zeminlerin plastik limitle, büzülme limiti arasında tutulan su yüzdelere büzülme indeksi denir.

$$PB = PL - BL$$

Birim hacimdeki azalma ile zeminin su içeriğindeki azalma arasındaki orana büzülme oranı denir. Bu oran, toprak hacmi ile toprağın su içeriği arasındaki ilişkiyi gösteren doğrunun eğimidir. Büzülme oranı aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$R = \frac{W_k}{V_k \cdot \gamma_w}$$

Eşitlikte;

R = Büzülme oranı,
 W_k = Kuru zemin örneğinin ağırlığı (g),
 V_k = Kuru zemin örneğinin hacmi (cm^3),
 γ_w = Suyun birim hacim ağırlığı (g/cm^3).

d) **Kıvam indeksi (I_c)** : Zeminin durumunu açıklayan bir indekstir. Aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$I_c = \frac{\omega_L - \omega}{\omega_L - \omega_p}$$

Eşitlikte;

- I_c = Kıvam indeksi,
 ω_L = Likit limitteki zeminin su içeriği (%),
 ω_p = Plastik limitteki zeminin su içeriği (%),
 ω = Zeminin doğal durumdaki su içeriği (%).

Kıvam limitleri ince taneli zeminlerin, değişik su içeriklerindeki mukavemetlerinin bir ölçüsü olmaktadır. Zeminin doğal durumdaki su içeriğinin kıvam limitleri ile karşılaştırılması, zeminin mukavemeti üzerine bir fikir verebilmektedir. Kıvam limitleri değerleri ile zemin kıvamı Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. İnce Taneli Zeminlerin Kıvamı

Zemin kıvamı	LI	I_c
Viskoz sıvı	$I > 1$	$I < 0$
Plastik	$0 < LI < 1$	$0 < I_c < 1$
Katı	$LI < 0$	$I_c > 1$

Kıvam limitleri, özellikle zemin özelliklerini belirlemede kullanılır. İnce taneli zeminlerin su geçirgenlik özellikleri, değişik amaçlar için inşaat malzemesi olarak seçilmesi, yükler altında sıkışması, şişme potansiyeli, arazide sıkıştırma ve çalışma koşulları yönünden yararlı ön bilgiler vermektedir. Zeminlerde plastisite arttıkça şişme ve sıkışma potansiyeli artmakta, su geçirgenliği azalmakta, kazı ve dolgu işlemleri sırasında güçlükler olmaktadır.

e) Aktivite katsayısı (A) : İnce taneli zeminlerin plastisite indeksinin kil yüzdesine (0,002 mm'den küçük tane miktarı) oranı aktivite katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

$$A = \frac{PI}{\text{Kil yüzdesi}}$$

Aktivite katsayısı, zemin içindeki kil numunelerin cinsi hakkında fikir vermektedir. Aktivite katsayısı 0,38 olan killer kaolin, 0,90 olanlar illit, 7,20 olanlar ise montmorillonittir. Diğer yandan aktivite katsayısı 0,75'den küçük olanlar aktif olmayan

killer, 0,75-1,25 arasında olanlar normal killer, 1,25'ten büyük olanlar ise aktif killer olarak kabul edilmektedir.

3.4. Zeminlerin Sınıflandırma Sistemleri

Zeminlerin sınıflandırılması, özellikle yapı projelerinin başlangıcında önem taşırlar.

Zeminler fiziksel özellikleri yönünden çok değişik kombinasyonlar gösterirler. Zeminlerin çeşitli koşullardaki davranışları yalnız başına zemin tanelerinin büyüklüklerine bağlı değildir. Bunun yanında tanelerin şekli de önem taşımaktadır. Ayrıca zeminin ince fraksiyonlarından olan kil taneleri, etkilere karşı farklı davranmalara neden olur. Hiçbir zemin bir diğerinin aynısı değildir. Ancak zeminin yetenek ve özellikleri konusunda bir sonuç çıkarabilmek amacıyla zeminler, çeşitli benzer özelliklerine göre sınıflandırılmaya çalışılmıştır. Zeminlerin sınıflandırılmasıyla aynı sınıftaki özelliklerin bilinen zeminler yardımıyla diğer zeminlerin özelliklerinin tahmin edilmesi olanağı elde edilmektedir.

Zeminler için kullanılmakta olan birçok sınıflandırma sistemi vardır. Bunlar arasında Tane Çapına Göre Sınıflandırma, Karayolları Sınıflandırma, Birleşik Zemin Sınıflandırma ve Yapı Araştırma Sınıflandırma Sistemleri sayılabilir. Mühendislik çalışmasının çeşit ve amacına göre, bu sistemlerden amaca en uygun olanından yararlanılır. Örneğin, zeminlerin yol yapımına uygunluğu konusu araştırılırken zeminin karayolları sistemindeki sınıfının bulunması amaca daha uygun düşer. Mühendislik çalışmasında hangi sınıflamadan yararlanılacağı mühendis ve mühendislik çalışmasının çeşidine bağlıdır.

Sınıflandırma sistemleri mühendisler arasında bir iletişim dilidir. Bunun yanında sınıflandırma sistemleri zeminin incelenmesi ve gereken deneylerin yapılması gereksinimini ortadan kaldırmazlar. Örneğin zeminlerin birim hacim ağırlıkları, sıkışma özellikleri, hassaslığı vb. özellikleri sınıflandırmada söz konusu olmadığı halde, tasarım için önemli özelliklerdir.

Bu bölümde, zemin sınıflandırma sistemlerinden Tane Çapına Göre Zeminlerin Sınıflandırılması ile Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılması açıklanmaya çalışılacaktır.

3.4.1. Tane Çapına Göre Sınıflandırma

Zeminlerdeki tanecikler hiçbir zaman eşit boyutta değildir. Zeminlerin tane çapları taşlardan başlayarak 10^{-7} mm çapındaki ince kil tanelerine kadar değişik büyüklüklerde olabilir. Zeminlerin tanelerini belli çap sınırlarına göre ayırmak ve adlandırmak için farklı sistemler geliştirilmiştir. Bu konuda kabul edilmiş 5 ayrı sistem bulunmaktadır.

- Uluslararası zemin örgütü sistemi,
- ABD tarım örgütü sistemi,
- Avrupa'da kullanılan kontinental sistemi,
- ABD Zemin Bürosu ve Karayolları İdari Sistemi,
- MIT (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü) Sistemi.

Bu sistemlerin birbirine üstün yanları olmayıp, bazı hususlar göz önünde bulundurularak bir sınıflanmaya gidilmiştir. Tane boyutları göz önünde bulundurularak yapılan bu sınıflandırma sistemlerinden MIT sınıflandırılması daha kolay anlaşılabilir durumdadır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Zeminlerin Tane Çapına Göre Sınıflandırılması (MIT)

Zeminin cinsi	Tane çapı (mm)
Taş	200-60
Çakıl	60-2
İri çakıl	60-20
Orta çakıl	20-6
İnce çakıl	6-2
Kum	2-0,06
İri kum	2-0,6
Orta kum	0,6-0,2
İnce kum	0,2-0,06
Silt	0,06-0,002
İri silt	0,06-0,02
Orta silt	0,02-0,006
İnce silt	0,006-0,002
Kil	< 0,002

Bu sınıflanmaya göre 60 mm'den büyük tanelere sahip zeminler kaya, 60 mm-2 mm arasındakiler çakıl, 2 mm - 0,06 mm kum, 0,06-0,002 mm silt, 0,002 mm'den daha küçük tanelere de kil denir. Bu sınıflamada kil çapına sahip malzemelerin kohezyonlu olduğu kabul edilir. Ancak MIT sınıflandırmasında karışımları ve

kohezyon durumu göz önünde bulundurmadığı için yetersiz kalabilir.

3.4.2. Birleşik Zemin Sınıflandırması

Bu sistemde zeminler mühendislik yönünden gösterdikleri özelliklere göre 15 tipe ayrılmıştır. Toprakları meydana getiren unsurlara dayanarak her zemin bunlardan biri ile ifade edilebilir. Böylece zeminlerin nitelikleri konusunda bilgi edinilir.

Birleştirilmiş zemin sınıflandırılmasında başlıca 5 grup zemin tipi vardır. Bunlar çakıl, kum, silt, kil ve organik maddeler (turba)'dır. Bir zeminde 0,074 mm'den büyük tanelerin miktarı, ağırlığının % 50'den fazla ise kaba taneli olarak adlandırılır. Aynı şekilde tanelerin ağırlıkça % 50'den fazlası 0,074 mm'den küçük olan taneler ince taneli olarak adlandırılır.

Birleştirilmiş sınıflama sisteminde zemin tane büyüklüğüne göre zemin grupları ve bunlar için kullanılan semboller Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

Zemin Grupları ve Semboller		
Zemin cinsi	Tane çapı (mm)	Grup sembolü
İri Taneli Zeminler	> 76,0	G
Çakıl	76,2 - 4,76	"
İri çakıl	76,2 - 19,1	"
İnce çakıl	19,1 - 4,76	"
Kum	4,76 - 0,074	S
İri kum	4,76-2,0	"
Orta kum	2,0-0,420	"
İnce kum	0,420 - 0,074	"
İnce Taneli Zeminler	< 0,074	
Silt		M
Kil		C
Turba		Pt

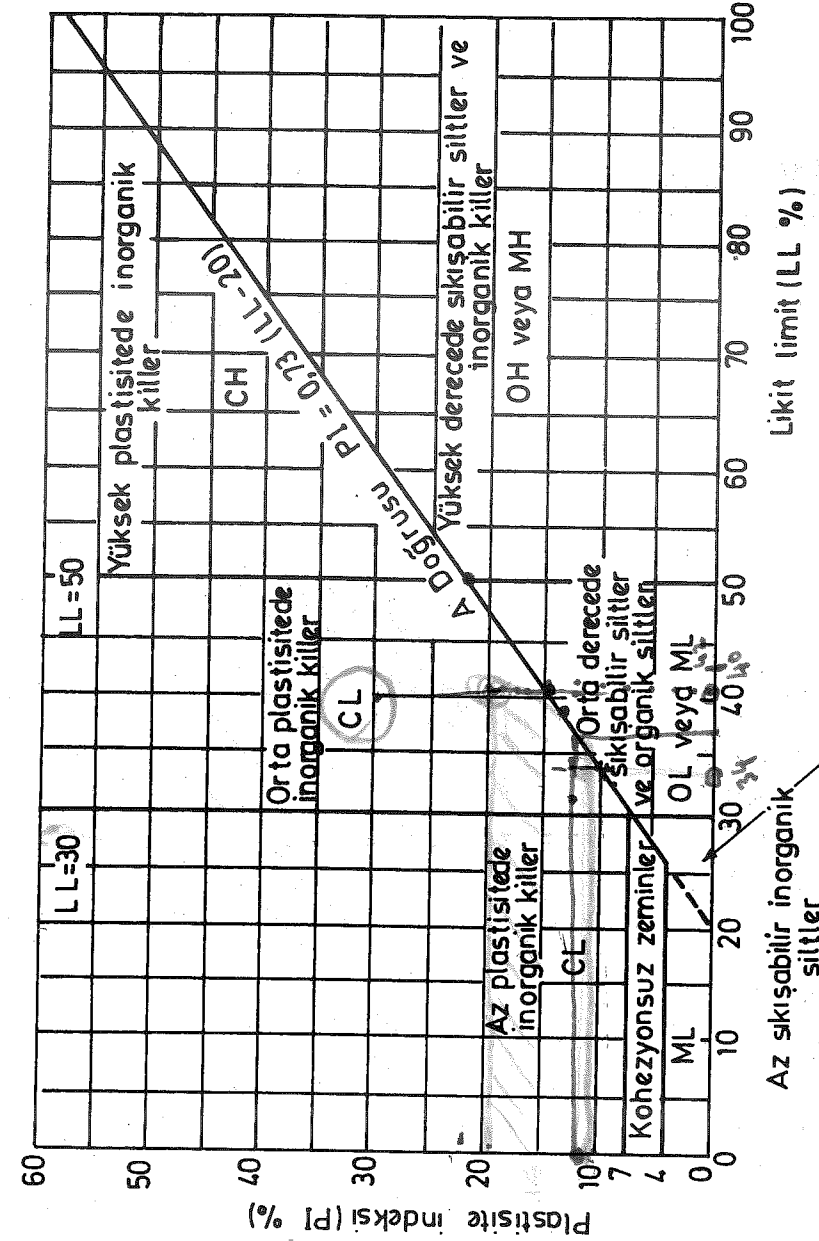
Çakıl ve kum olarak adlandırılan iri taneli zeminlerin miktarı elek analizleri ile bulunabilir. Ancak kil ve siltler elek analizi ile ayırlamadığı için likit limit ve plastisite indeksi göz önüne alınarak Şekil 3.12'de verilen plastisite grafiğinden yararlanılarak sınıflandırılır. Düşük plastisiteli zeminler için (L), yüksek plastisiteli zeminler için (H), İyi derecelenmiş tane dağılımı için (W), kötü derecelenmiş tane dağılımı için ise (P) sembolleri kullanılmaktadır.

Zeminler, genellikle farklı özelliklere sahip zeminlerin karışımından oluşmaktadır. Bu durumda zeminler sınıflandırılırken çift sembol kullanılmaktadır. Değişik zemin grupları için kullanılan semboller Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Zemin grupları belirlenirken ana zemini gösteren sembol ilk harf olarak, katkı malzemesi ve granülometri veya plastisite özelliğini gösteren semboller ikinci harf olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 3.4. Değişik Zemin Grupları İçin Kullanılan Semboller

Zemin Özelliği	Kullanılan Sembol
İyi derecelenmiş çakıl	GW
Kötü derecelenmiş çakıl	GP
İyi derecelenmiş kum	SW
Kötü derecelenmiş kum	SP
Siltli çakıl	GM
Killi çakıl	GC
Siltli kum	SM
Killi kum	SC
Düşük plastisiteli silt	ML
Yüksek Plastisiteli silt	MH
Düşük plastisiteli kil	CL
Yüksek plastisiteli kil	CH
Düşük plastisiteli organik zemin	OL
Yüksek plastisiteli organik zemin	OH
Turba zemin	Pt



Şekil 3.12. Plastisite Grafiği
veya kartı.

Birleştirilmiş zemin sınıflama sistemine ilişkin çizelge, Çizelge 3.5'de verilmiştir. Çizelgenin kullanılmasını kolaylaştırmak için akış diyagramları da Şekil 3.13'de ve Şekil 3.14'de verilmiştir.

Bu sistemde zeminin esas olarak iri taneli veya ince taneli bir zemin olarak nitelendirilebilmesi için zeminin 200 nolu elekten geçen miktarının belirlenmesi gerekir. Zeminin 200 nolu elekten geçen miktarı % 50'den fazla ise zemin ince taneli, % 50'den az ise iri taneli kabul edilmektedir. İri taneli zeminler içerdikleri ince kısmın cinsine, yüzdesine ve granülometri özelliklerine göre alt gruplara ayrılmaktadır (Şekil 3.13). İnce taneli zeminler ise kıvam limitlerine ve organik madde içerip içermediklerine göre alt gruplara ayrılmaktadır (Şekil 3.14). İnce taneli zeminlerin sınıflandırılmasında Şekil 3.12'de verilen plastisite grafiğinden de yararlanılır.

3.4.3. Zeminlerin Arazide Ön Sınıflandırması

Bazı durumlarda, laboratuvar deney sonuçlarını beklemeden zeminlerin arazide ön sınıflandırılması gerekebilir. Özel ekipman kullanılmaksızın arazide yapılan testlere arazi sınıflama testleri denmektedir.

Zeminin iri taneli veya ince taneli zemin olup olmadığını belirlemek için iki ayrı test yapılabilmektedir.

1. Zemin örneği düz bir yüzey üzerine yayılarak, aynı büyüklükteki taneler ayrılır. Örneğin % 50'den fazlası gözle görülebilen ayrık tanelerden oluşmuş ise zemin iri taneli, % 50'den azı ayrık tanelerden oluşmuş ise ince taneli zemindir.

2. Bir cam kavanozun yaklaşık % 40'ı zemin örneği, geri kalan kısım ise su ile doldurularak süspansiyon oluncaya kadar çalkalanır. Düz bir yüzey üzerinde 25 saniye içinde örneğin çökelen kısmı tahmine çalışılır. Zeminin % 50'den fazlası çökerse zemin iri taneli % 50'den azı çökerse ince taneli zemin olduğu anlaşılır.

İri taneli zeminlerin arazide ön sınıflandırılması basit bir şekilde yapılabilir. Zemin örneği düz bir yüzey üzerine yayılarak, gözle görülebilen tanelerin yarısından fazlası bezelye büyüklüğünde veya daha büyükse zemin çakıl küçük ise kumdur.

Zeminin kum veya çakıl olduğu belirlendikten sonra, zeminin içerdigi ince tanelerin özelliklerine göre tekrar sınıflandırılabilir. Bu

Çizelge 3.5. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi.

Organik Zeminler	İnce Taneli Zeminler (No.200 Elekten Geçen > % 50)		İri Taneli Zeminler (No.200 Elekten Geçen < % 50)		Zemin Cinsi	Laboratuvar Sınıflandırma Kriterleri														
	Siltler ve Killler		Kumlar				Çakıllar													
	Yüksek plastisiteli siltler ve killler ($w_L > 50$)	Düşük plastisiteli siltler ve killler ($w_L < 50$)	Siltli ve killi kumlar (No.200 elek altı > % 12)	Temiz kumlar (No.200 Elek altı < % 5)																
Organik Zeminler	PT	OH	CH	MH	OL	CL	ML	SC	SM	SW	SP	GC	GM	GW	Zemin Cinsi	Laboratuvar Sınıflandırma Kriterleri				
	Yüksek plastisiteli organik killler ve siltler		Yüksek plastisiteli inorganik killler ve siltli killler		Düşük plastisiteli organik siltler ve killi siltler		Düşük plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler		Kötü derecelenmiş temiz kumlar, çakıllı kumlar		İyi derecelenmiş temiz kumlar, çakıllı kumlar		Kıllı çakıllar, çakıl-kum-silt karışımları				Kıllı çakıllar, çakıl-kum-silt karışımları		Kötü derecelenmiş temiz çakıllar ve çakıl-kum karışımları	
	Yüksek plastisiteli organik killler ve siltler		Yüksek plastisiteli inorganik killler ve siltli killler		Düşük plastisiteli organik siltler ve killi siltler		Düşük plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler		Kötü derecelenmiş temiz kumlar ve çakıllı kumlar		İyi derecelenmiş temiz kumlar, çakıllı kumlar		Kıllı çakıllar, çakıl-kum-silt karışımları				Kıllı çakıllar, çakıl-kum-silt karışımları		Kötü derecelenmiş temiz çakıllar ve çakıl-kum karışımları	
	Yüksek plastisiteli organik killler ve siltler		Yüksek plastisiteli inorganik killler ve siltli killler		Düşük plastisiteli organik siltler ve killi siltler		Düşük plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler		Kötü derecelenmiş temiz kumlar ve çakıllı kumlar		İyi derecelenmiş temiz kumlar, çakıllı kumlar		Kıllı çakıllar, çakıl-kum-silt karışımları				Kıllı çakıllar, çakıl-kum-silt karışımları		Kötü derecelenmiş temiz çakıllar ve çakıl-kum karışımları	

Plastisite İndisi, PI (%)

0 10 20 30 40 50 60 70

10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

CL - ML

ML veya OH

CL

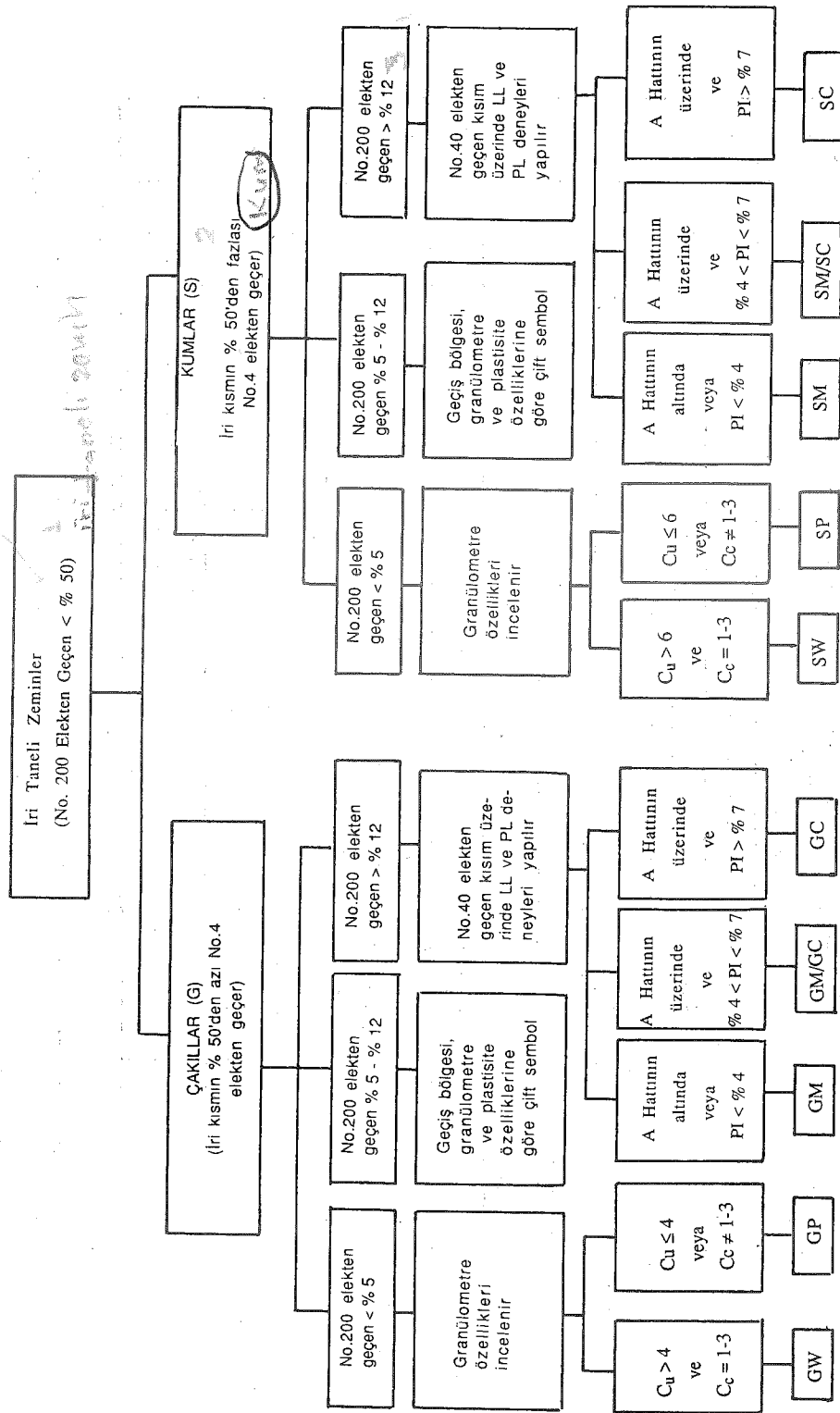
OH

A-hattı

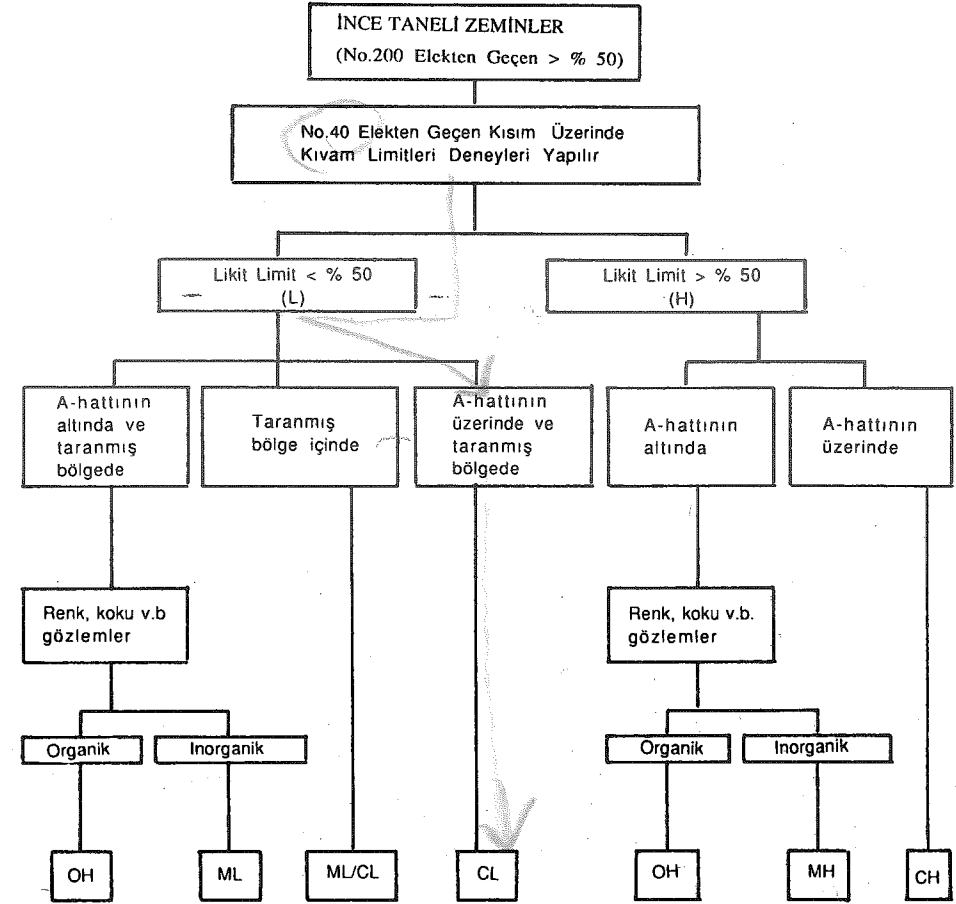
Casa grande

Plastisite Kartı

Likitt Limit, LL (%)



Şekil 3.13. İri Taneli Zeminlerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine Göre Sınıflandırılması



Şekil 3.14. İnce Taneli Zeminlerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılma Sistemine Göre Sınıflandırılması

amaçla parmakla ayıklanması mümkün olan iri taneler ayıklanır. Ayıklama işi, bir yüzey üzerinde zemini ince bir tabaka halinde yayıp, iri taneleri kenara doğru yuvarlayarak veya zemini bir dosya kağıdı üzerine ince bir tabaka halinde yayıp, dosya kağıdına hafifçe vurarak iri taneleri kağıdın kenarına toplamak suretiyle yapılabilir. İri taneleri ayıklanmış zemin örneği su karıştırıp doyurularak avuç içinde yoğrulur. Zemin örneği içinde % 5'den az ince tane olması durumunda avuç içinde leke olmayacaktır. Böyle bir zemin çakıl ise iyi derecelenmiş çakıl (GW) veya kötü derecelenmiş çakıl (GP) olacaktır. Zemin örneğinin kuru olması durumunda ise iyi veya kötü derecelenmiş kum (SW, SP) olma olasılığı yüksek olacaktır. Zemin içindeki ince tane miktarı % 12'den fazla olduğu zaman avuç içerisi kirlenecektir. Bu durumda incelenen zemin örneği çakıl ise siltli çakıl (GM) veya killi çakıl (GL), kum ise siltli kum (SM) veya killi kum (SL) olduğu anlaşılır.

Örneğin zemin içerisinde % 5'den daha az miktarda ince tane olması durumunda, ikinci bir zemin örneğindeki tane büyüklüğü dağılımı belirlenir. İri taneli zemin içerisinde her boyutta tane bulunursa iyi derecelenmiş çakıl veya kum, aynı büyüklükteki taneler içermesi halinde ise kötü derecelenmiş çakıl veya kum olmaktadır.

İnce taneli zeminlerin arazide ön sınıflandırılması sarsma, kuru mukavemet, katılık, şerit, yapışkanlık, likit limit, parlaklık, montmorillonit ve aseton testleri ile yapılabilir.

Basit şekilde yapılabilen bu arazi deneyleri zeminin 40 nolu elekten geçecek kısmı üzerinde yapılmalıdır. Bu nedenle 0,4 mm'den büyük taneler ayıklanmalı ve deneyler, geri kalan zemin üzerinde uygulanmalıdır.

a) Sarsma deneyi : Bu testi yapmak için nemli zeminden hacmi yaklaşık olarak 15 cm^3 olan bir dikdörtgen prizma yapılır. Prizma yapmadan önce zemin kuru ise, yumuşatmak için yeteri kadar su eklenir. Prizma avuç içine alınır ve yatay olarak çalkalanır. Prizmanın yüzlerinde suyun belirmesi pozitif reaksiyonu gösterir. Avuç içindeki örnek parlak bir görünüş alıncaya kadar devam edilir. Örnek baş parmak ile işaret parmağı arasında sıkıldığı zaman örneğin yüzündeki su ve parlaklık

kaybolacaktır. Çalkalama sırasında örneğin yüzeyinde suyun belirmesinin ve sıkıldığı zaman örnek yüzeyindeki suyun kaybolmasının çabukluğu veya yavaşlığı zemin içindeki ince tanelerin belirlenmesinde yardımcı olur. Düşük plastisiteli siltler (ML) hızlı bir reaksiyon gösterirken, yüksek plastisiteli siltler (MH), ile yüksek ve düşük plastisiteli killer (CH, CL) yavaş bir reaksiyon gösterirler.

b) Kuru mukavemet deneyi : Nemli durumdaki zemin bezelye büyüklüğüne getirilerek kurumaya bırakılır. Kuruduktan sonra parmaklar arasında sıkıştırılarak dayanımı kontrol edilir. Zeminlerin kuru mukavemeti, plastisitelerinin bir göstergesidir. Yüksek plastisiteli zeminlerin kuru mukavemetlerinin düşük plastisiteli zeminlerden çok daha fazla olduğu bilinmektedir.

Kolaylıkla ezilen zeminler düşük plastisiteli silt (ML), ezilmeye orta derecede direnç gösteren zeminler yüksek plastisiteli silt (MH) veya düşük plastisiteli kildir (SC). Yüksek plastisiteli killerin (CH) ezilmesi olanaksızdır olmaktadır.

c) Katılık deneyi : Katılık deneyi, plastik limit deneyine benzer şekilde yürütülür. Yaklaşık plastik limit dolayında su içeren bir zemin örneği, düzgün bir yüzey üzerinde avuç içi ile yuvarlanarak ince silindirler haline getirilir. Zeminin plastik limit kıvamındaki katılık derecesi, plastisite özelliklerinin bir göstergesi olmaktadır. Yüksek plastisiteli zeminler, plastik limit kıvamında, düşük plastisitelilerden daha katı bir kıvama sahip olmaktadır. Zemin örneğinden avuç içinde yapılan sicim, yuvarlama sırasında yaklaşık 2 cm uzunluğunda parçalara ayrıldığı zaman, zeminin plastik limit, sınırında olduğu anlaşılır. Bu örnek enine parçalanırsa düşük veya yüksek plastisiteli kil, uzunlamasına çatlamalar olduğunda ise yüksek plastisiteli silt olma olasılığı yüksektir.

d) Şerit testi : Bu testi yapmak için, nem içeriği plastik limitte veya daha az olan bir zemin örneği kullanılır. Zemin örneğinin başparmak ile işaret parmağı arasında sıkıktırmak ve başparmağı işaret parmağı üzerinde ileri doğru hareket ettirmek suretiyle bir şerit oluşturulur.

Kolaylıkla parçalanarak zayıf bir şerit düşük plastisiteli kil, oldukça kolay bir şekilde parçalanarak sert bir şerit yüksek plastisiteli silttir. Orta derecede dirence sahip esnek bir şerit düşük plastisiteli kil, sert ve esnek bir şerit ise yüksek plastisiteli kil olma olasılığı yüksektir.

e) **Yapışkanlık testi** : Yapışkanlık testi, zemin örneğini su ile doymak ve el üzerinde kurumaya bırakmak suretiyle yapılabilir. Düşük plastisiteli kil, el üzerinde kuruduktan sonra silkelenecek hemen çıkarılabilir. Düşük plastisiteli kil veya yüksek plastisiteli silt hafifçe ovalanarak suretiyle çıkar. Yüksek plastisiteli kil el üzerinde yapıştığı yerden çıkarmak için zeminin yeniden ıslatılması gerekir.

f) **Likit limit testi** : Likit limit (LL) testi yapmak için nemli zeminden yaklaşık olarak 8 cm³ hacminde bir topak yapılır. Topak yaparken zemin yeteri kadar nemli değilse yumuşak bir duruma gelinceye kadar su eklenir. Topak yapıldıktan sonra, zeminin dış yüzünü örtecek kadar su eklenir ve hemen avuç içindeki topak bölünerek açılır. Zeminin dış yüzünden içeriye su girmişse pozitif bir reaksiyon olduğu ve zeminin likit limitinin düşük olduğu anlaşılır. Zeminin dış yüzünden içeriye su girmemiş ise, zeminin likit limiti yüksektir. Bu olayın gözle görülmesi güneş altında çok daha kolay olur.

g) **Parlaklık testi** : Havada kurumuş bir zemin örneği bıçakla kazınır. Parlak bir yüzey, yüksek plastikliği gösterir. Bu parlaklık kurumuş ve yüksek derecede plastikliğe sahip ince tanelerden ileri gelmektedir.

h) **Montmorillonit testi** : Montmorillonit testi yapmak için zemin örneği üzerine benzin veya benzinin-hidroklorid'in su ile doyurulmuş eriyikinden birkaç damla damlatılır. Mavi veya yeşilimsi mavi bir rengin gözükmesi örneğin içinde montmorillonit kiline ait tanelerin bulunduğunu gösterir.

i) **Aseton testi** : Ağırlık esasına göre bir kısım zemin ve 10 kısım su küçük bir şişenin içine konulur. Şişenin ağzını bir mantar veya tapa ile kapatarak şişe 15'er dakikalık aralarla 6 defa çalkalanır. Şişenin içindeki karışım filtre kağıdından süzülür. Filtreden geçen kısmı aseton ile yarı yarıya karıştırılır. Süt renginde bir çökeleğin meydana gelmesi jipsin varlığını gösterir.

Yukarıda açıklanan bütün testler, zeminin geçici olarak sınıflandırılmasına yardım etmek amacıyla taşıyan arazi testleridir. Sınıfı belli olan örnekler üzerinde her testin uygulamasını yapmak suretiyle arazi sınıflandırma testleri için gerekli alışkanlık elde edilebilir. Bu testler fazla güvenilir değildir.

γ_w = Suyun birim hacim ağırlığı (g/cm³).

Temiz bir cam boruda yükselen damıtık su için kapillar yükseklik (h_c) = 0,304/d bağıntısı ile elde edilir. Görüldüğü gibi kapillar yükseklik boru çapı ile ters orantılıdır. Kapillar yükseklik, ince taneli zeminlerde büyük, iri taneli zeminlerde küçük olmaktadır.

Kapillar yükseklik aşağıdaki ampirik eşitlikle de yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$h_c = \frac{c}{e D_{10}}$$

Eşitlikte;

h_c = Kapillar yükseklik (cm),

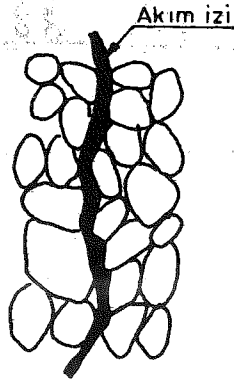
c = Katsayı ($c = 0,1 - 0,5$),

e = Borunun boşluk oranı (%),

D_{10} = Zeminin etkili tane çapı (cm).

4.2. Zeminlerde Geçirimsizlik ve Su Akımı

Zemin, aralarında boşluklar bulunan tanelerden oluştuğu ve bu boşlukların genellikle birbirine bağlı bulundukları bilinmektedir. Zemin içindeki bir su damlası, boşlukların oluşturduğu ve gelişigüzel bir iz takip eden kılcal kanallar boyunca hareket edebilmektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Zemin içindeki Su Akımı

Şekil 4.2'den görüleceği gibi zemin içindeki kanalların kesit alanları ve yönü sabit değildir. Bu nedenle su damlasının hızı ve

doğrultusu sürekli değişecektir. Ancak mühendislik problemlerinin çözümünde akımın, kesit alanına dik doğrultuda ve sabit hızla gerçekleştiği varsayımında bulunmaktadır. Zeminlerin içinden su geçmesine izin veren bu özelliklerine su geçirgenliği (permeabilite) adı verilmektedir.

Zemin içerisinde sızan suyun hızı, Darcy Yasası'na dayanılarak açıklanabilir. Söz konusu yasaya göre bir zemin içinde suyun sızması hidrolik eğimle doğru orantılıdır (Şekil 4.3).

$$v = k \cdot i$$

Eşitlikte;

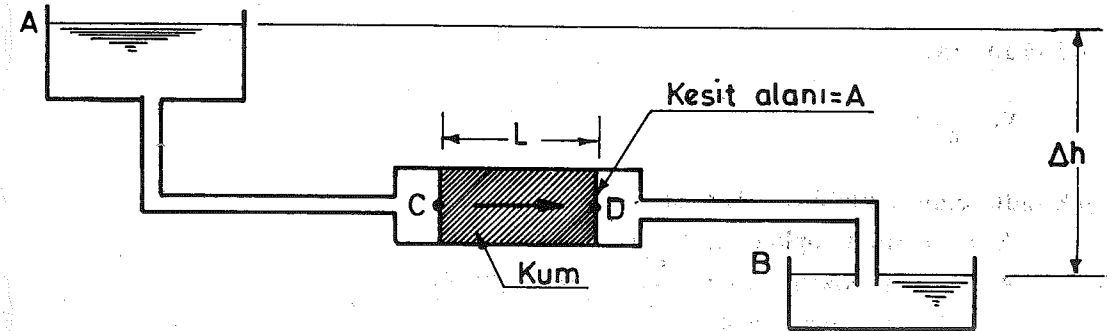
v = Zemin içindeki suyun sızma hızı (cm/s),

k = Permeabilite katsayısı (cm/s),

i = Hidrolik eğim ($i = \frac{\Delta h}{L}$),

Δh = Zemin elemanlarının iki ucu arasındaki su düzeyi farkı (cm),

L = Suyun akım yönünde, suyun katettiği zemin kalınlığı (cm).



Şekil 4.3. Permeabilite Deneyi

Permeabilite katsayısı (k) suyun birim hidrolik eğim altında zemin içinde sızma hızıdır. Şekil 4.3'deki zemin örneğinin akış

yönüne dik kesit alanı A ise, t zaman aralığında geçen su miktarı aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

Eşitlikte;

Q = Zeminden geçen su miktarı (cm^3/s),

k = Permeabilite katsayısı (cm/s),

i = Hidrolik eğim,

A = Akım yönüne dik kesit alanı (cm^2).

Darcy Yasası'na göre zeminden geçen hız, deşarj hızı olarak nitelendirilmekte olup, zeminin toplam kesitinden geçen suyun ortalama hızı olarak düşünülebilir. Gerçekte ise, suyun sadece zeminin boşluklarından geçtiği bilinmektedir. Boşluklardan akan suyun ortalama hızı, süreklilik kuralından yararlanılarak ve akım sırasında zemin hacminin sabit kaldığı varsayılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Q = V \cdot A = V_s \cdot A_v$$

$$V_s = \frac{V \cdot A}{A_v} = \frac{A}{A_v} \cdot V$$

$$\frac{A}{A_v} = \frac{1}{n}$$

olduğundan,

$$V_s = \frac{1}{n} k i$$

şeklinde elde edilebilir. Burada;

A = Zeminin toplam kesit alanı (cm^2),

A_v = Boşlukların toplam kesit alanı (cm^2),

n = Zeminin porozitesi (%),

V_s = Sızıntı hızı (cm/s),

k = Permeabilite katsayısı (cm/s).

4.2.1. Permeabilite Katsayısının Ölçülmesi

Permeabilite katsayısı, birim hidrolik eğim altında birim

zemin alanından sızan su miktarı olarak tanımlanabilir. Permeabilite katsayısı hız boyutu ile ifade edilmektedir.

Permeabilite toprak tabakalarının durumuna bağlı olduğu gibi granülometrinin, özgül ağırlığın, su içeriğinin değişmesi ile büyük farklar gösterebilir.

Zeminlerin permeabilite katsayıları ve bu katsayıların geçirgenlik sınıfları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

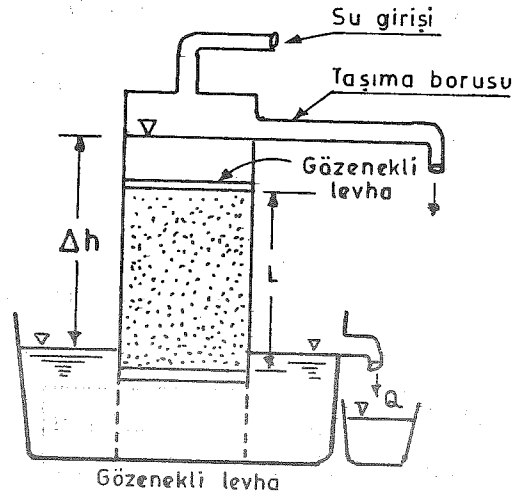
Çizelge 4.1. Çeşitli Zeminlerin Permeabilite Katsayıları ve Geçirgenlik Sınıfları

Zeminin sınıfı	k (cm/s)	Geçirgenlik derecesi
İri çakıl	$> 1 \times 10^{-1}$	Çok geçirimli
Kum, ince kum	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-3}$	Orta geçirimli
Siltli kum	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-5}$	Az geçirimli
Silt	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-7}$	Çok az geçirimli
Kil	$< 1 \times 10^{-7}$	Geçirimsiz

Permeabilite katsayısı zeminin fiziksel ve yapısal özelliklerine bağlı olarak farklı değerler aldığı için doğal zeminlerin permeabilitesinin deneysel olarak ölçülmesi gerekir. Bu amaçla geliştirilmiş laboratuvar ve arazi permeabilite deneyleri mevcuttur. Permeabilite katsayısı laboratuvarda sabit su düzeyli ve değişken su düzeyli permeametrelerle yapılır. Zeminin geçirgenliğine permeabilite de dendiğinden bunu ölçmek için kullanılan gereçlere permeametre denir. Sıkışmış yapışkan zeminler geçirimsiz kabul edildiklerinden çoğu durumlarda geçirgenlikleri belirlenmez. Ancak baraj, bent, gölet, kanal gibi yapılarda geçirgenliği önleyici kaplama olacak bir zeminin geçirgenliği ve yoğrulduktan sonraki geçirgenliğinin belirlenmesi zorunludur. Zeminlerin geçirgenlikleri laboratuvar ve arazide saptanabilir. Laboratuvarda sabit düzeyli ve değişken düzeyli permeametreler kullanılır.

1. Sabit Düzeyli Permeametre

Kum ve çakıl gibi iri taneli zeminlerin permeabilite katsayılarının belirlenmesi için kullanılır. Deney için kullanılan sistem Şekil 4.4'de görülmektedir.



Şekil 4.4. Sabit Düzeyli Permeametre

Bu deney düzeninde zemin örnekleri üzerindeki hidrolik yük (Δh), deney süresince sabit tutularak, belirli bir zaman süresi (t) içinde zeminden geçen su miktarı (Q) ölçülür. Zemin örneklerinin kesit alanı A olduğunda Darcy yasası'na göre k katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$v = k \cdot i = k \frac{\Delta h}{L}$$

$$Q = v \cdot A \cdot t = k \frac{\Delta h}{L} A t$$

$$Q = k \frac{\Delta h}{L} A t$$

$$k = \frac{Q \cdot L}{\Delta h \cdot A \cdot t}$$

Eşitlikte;

k = Permeabilite katsayısı (cm/s),

Q = t zaman aralığında geçen su miktarı (cm³),

L = Zemin örneğinin uzunluğu (cm),

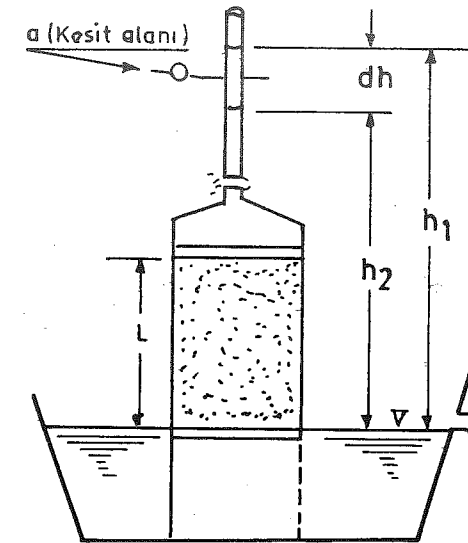
Δh = Hidrolik yük (cm),

A = Sızma alanı (cm²),

t = Sızma süresi (s).

2. Değişken Su Düzeyli Permeametreler

Değişken su düzeyli permeametreler, ince taneli zeminlerden kısa sürelerde, yeter miktarda sızma oluşmadığı için zemin örneğine giren su miktarından yararlanılarak permeabilite katsayısı belirlenir. Bu amaçla Şekil 4.5'de görülen değişken düzeyli permeametre kullanılır. Bu aletle örneğin içinde bulunduğu silindir, bir başlık ve cam boruya bağlanmıştır. Su, cam boruda belirli bir düzeye yükselinceye kadar alet su ile doldurulur. Sonra musluk açılır ve cam tüpteki düzey, ikinci bir noktaya düşüncüye kadar, suyun kabın tabanına doğru sızmasına izin verilir. Su düzeyindeki söz konusu değişme için geçen zaman kaydedilir.



Şekil 4.5. Değişken Düzeyli Permeametre

Belirli bir zaman (dt) sonunda, cam boru içindeki suyun alçalma miktarı (dh) ölçülür. Permeametrede su düzeyi dt zaman aralığında ($-dh$) kadar düşer. Cam boruda alçalan suyun miktarı, su düzeyindeki düşme hızı ile cam borunun kesit alanının (a) çarpımına eşittir. Bu miktar aynı zamanda kesit alanı A ve uzunluğu L olan zemin örneğinden sızan suyun miktarını verir. Sızan suyun miktarı belirli olduktan sonra Darcy Yasası'ndan yararlanarak permeabilite

katsayısı saptanabilir. Buna göre dt süresince çıkan su miktarı aşağıdaki eşitlikle saptanır.

$$Q = k \frac{h}{L} A dt = -adh$$

$$-\frac{dh}{h} = k \frac{A}{L.a} dt$$

Sızmanın başlangıcı ve sona erdiği zaman t_1 , t_2 ve bu zamanlarda cam borudaki suyun yüksekliği h_1 , ve h_2 olduğunda belirtilen sınırlar için, yukarı da verilen bağıntının integrali alınarak permeabilite katsayısının saptanmasında kullanılan ilişki elde edilebilir.

$$-\int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = k \frac{A}{L.a} \int_{t_1}^{t_2} dt$$

$$\left| \ln h \right|_{h_1}^{h_2} = k \frac{A}{L.a} \left| t \right|_{t_1}^{t_2}$$

$$\ln h_1 - \ln h_2 = k \frac{A}{L.a} (t_1 - t_2)$$

$$\ln \frac{h_1}{h_2} = k \frac{A}{L.a} (t_1 - t_2)$$

$$k = 2,3 \frac{L.a}{A(t_1-t_2)} \log \frac{h_1}{h_2}$$

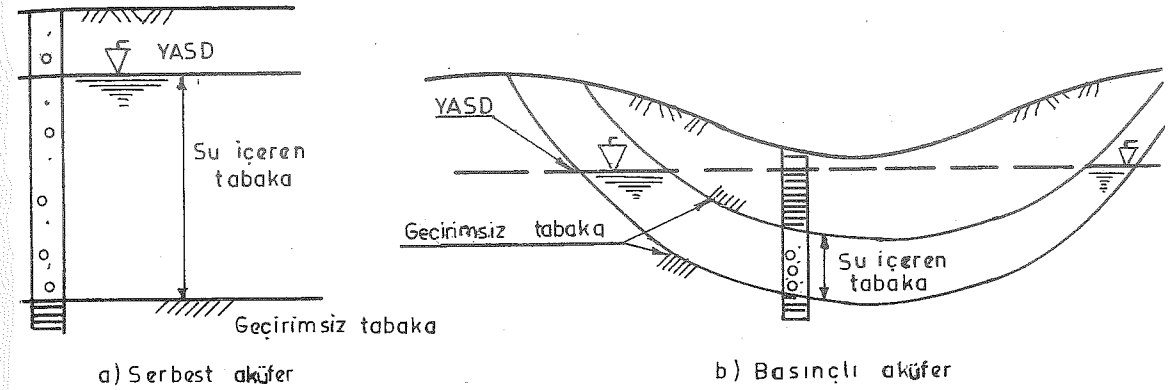
Yukarıda incelenen her iki laboratuvar deneyinde de zeminden belirli bir zaman aralığında su akımı sağlanmakta, sabit düzeyli permeametre ile zeminden geçen su miktarı, değişken düzeyli permeametre yardımıyla hidrolik yük değişimi ölçülerek, permeabilite katsayısı Darcy Yasası yardımıyla doğrudan hesaplanmaktadır. Sabit düzeyli permeametre su geçirgenliği yüksek zeminlerde, değişken düzeyli permeametre ise su geçirgenliği düşük zeminlerde kullanmak için daha uygundur.

3. Geçirgenliğin Arazide Ölçülmesi

Laboratuvar deneyleri ile geçirgenlik ölçümü çoğu zaman gerçek durumu tam yansıtmaz. Bu nedenle özellikle büyük

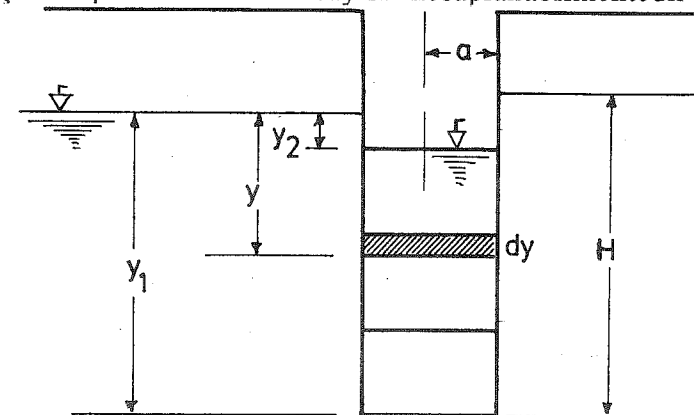
projelerde geçirgenliğin arazide ölçülmesi daha güvenilir sonuçlar verir.

Arazide su içeren geçirimli tabakaya aküfer denir. Aküferler, serbest ve basınçlı aküfer olarak ikiye ayrılır. Serbest aküferde yeraltı su düzeyi doymun bölgenin üst sınırındır. Basınçlı aküferde ise yeraltı suyu üstten geçirimsiz bir tabaka ile sınırlanmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Serbest ve Basınçlı Aküfer

Yeraltı su tablasının zemin yüzeyine yakın olduğu bölgelerde zeminin içinde sabit kesitli bir kuyu açarak önce içindeki suyu boşaltıp sonra su düzeyinin zamana bağlı olarak yüksekliğini ölçerek permeabilite katsayısı hesaplanabilmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Yüzeyle Yakın Bir Kuyu İçinde Permeabilitenin Ölçülmesi

Şekil 4.7'de yarıçapı a olan dairesel kesite sahip bir kuyu içinde iki değişik zamanda yükselen su düzeyi gösterilmiştir. Suyun kuyuya yatay yönde kenarlardan düşey yönde tabandan sızdığı göz önüne alınarak problemin çözümü Haughoudt tarafından verilmiştir. Buna göre dt zaman aralığında su düzeyinin dy kadar yükselmesi durumunda; permeabilite katsayısı aşağıdaki eşitlikle bulunabilir. Burada L uzunluğu, y hidrolik yükü göstermektedir.

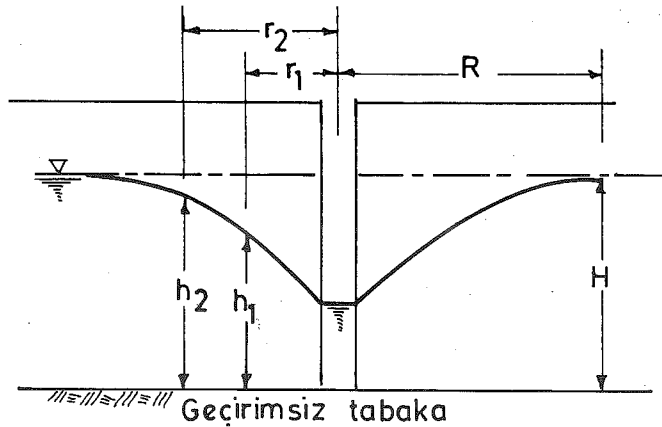
$$k = \frac{a.L}{(2H+a)t} \ln \frac{y_1}{y_2}$$

$L = 5aH$ alınarak aynı eşitlik Ernst tarafından farklı bir şekilde çözülmüştür.

$$k = \frac{40}{(20 + \frac{H}{a}) (2 \cdot \frac{y}{H})} \left(\frac{a}{y} \right) \left(\frac{\Delta y}{\Delta t} \right)$$

Eşitlikte; Δy , Su düzeyinde Δt zaman aralığında oluşan yükselme olup, bütün uzunluklar m cinsindendir.

Daha geniş bir bölgedeki doğal zemin tabakalarının ve daha kalın formasyonların ortalama permeabilite katsayısı değerini yerinde ölçmek için arazi pompalama deneylerinden yararlanılmaktadır. Şekil 4.8'de bir pompalama deneyinde ölçülen parametreler gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Arazi Pompalama Deneyi ile Permeabilitenin Ölçülmesi

Deneyde ölçümlere başlamadan önce kuyu içindeki su düzeyi sabit duruma gelinceye kadar belirli bir hızda kuyudaki su bir pompa ile boşaltılmaktadır. Kararlı duruma ulaştıktan sonra, r_1 ve r_2 gibi iki uzaklıktaki yeraltı su düzeyleri ölçülerek permeabilite katsayısı hesaplanmaktadır.

$$q = k.A.i = k.h (2\pi r) \frac{dh}{dr}$$

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{q}{r} dr = k 2\pi \int_{h_1}^{h_2} h dh$$

$$k = q \frac{\ln (r_2/r_1)}{\pi (h_2^2 - h_1^2)}$$

Yukarıdaki bağıntıdan permeabilite katsayısını hesaplayabilmek için pompalama kuyusundan ayrı h_1 ve h_2 su düzeylerinin ölçüleceği iki tane de gözlem kuyusu açmak gerekir. Su merkezinden R (tesir yarıçapı) gibi bir uzaklıktan sonra ise yeraltı su düzeyi pompalamadan etkilenmemektedir. Kalınlığı D olan basınçlı bir aküferin permeabilite katsayısı ise aşağıda verilen ilişkiye göre saptanabilir.

$$k = \frac{q \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi D (h_2 - h_1)}$$

Eşitliklerde;

k = Permeabilite katsayısı (m/s),

q = Belirli zaman aralığında geçen su miktarı (m^3),

r_1 = Birinci gözlem kuyusunun ölçme kuyusundan olan uzaklığı (m),

r_2 = İkinci gözlem kuyusunun ölçme kuyusundan olan uzaklığı (m),

h_1 = Birinci gözlem kuyusundaki suyun yüksekliği (m),

h_2 = İkinci gözlem kuyusundaki suyun yüksekliği (m),

D = Artezyen katmanın kalınlığı (m),

a = Kuyu yarıçapı (m).

Zeminlerin permeabilitesini etkileyen faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Tane çapı dağılımı,
- Boşluk oranı,
- Boşlukların ve akım kanallarının şekli,
- Zeminlerin suya doygunluk derecesi,
- Yeraltı suyunun özellikleri (yoğunluk, vizkozite, vb.).

a) **Tane çapı dağılımı:** Permeabiliteyi etkileyen en önemli faktör tane çapı dağılımı olmaktadır. Yapılan deneylerle, ölçümler permeabilite katsayısının zeminin etkili tane çapının karesi ile orantılı olduğunu göstermektedir.

Temiz kumlarda etkili tane çapı ile permeabilite arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikte belirtilmiştir. Eşitlikte yer alan C bir katsayıdır.

$$k = CD_{10}^2$$

Oldukça uniform kumların permeabilitesi ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$k = 200 D_{10}^2 e^2$$

b) **Boşluk oranı :** Zeminin boşluk oranı, permeabiliteyi etkilemektedir. Genellikle boşluk oranı küçüldükçe zeminin permeabilitesi de azalır. Zeminin boşluk oranına göre permeabilite katsayısı aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$k = \frac{e^2}{1+e}$$

c) **Boşlukların ve akım kanallarının şekli :** Zemin içerisinde suyun geçme hızı; zemin gözeneklerinin şekillerine, hacimlerine ve toprak tanelerinin şekillerine bağlıdır. Toprak taneleri boşluklar arasına konmuş filtreler gibi düşünülebilir. Bu nedenle zemindeki boşlukların zemin kesiti içerisindeki dizilişleri ve alanlarının toplamı suyun geçiş hızına doğrudan etki eder. Zemin

içinde boşluklar dışında çatlaklar bulunuyorsa su bu çatlaklardan boşalarak, beraberinde küçük taneleri de sürükler ve zeminin yapısı bozulur. Bu durumda yapısı bozulan zeminin geçirgenliği değişir.

Zeminlerdeki tabakalaşma da permeabiliteyi etkiler. Yatay olarak tabakalaşmış zeminlerde yatay doğrultudaki geçirgenlik, düşey doğrultudakine oranla daha büyüktür. Üniform yuvarlak kumlarda geçirgenlik birbirine eşittir. Zeminlerin yatay ve düşey yönlerde içerdiği boşlukları ve tane dizilişleri aynı ise izotrop zemin, farklı ise anizotrop zemin olarak adlandırılır. Zeminlerin permeabiliteleri belirlenirken yatay ve düşey yöndeki permeabilitelerinin de ölçülmesi gerekir. Tabakalı ortamlarda da permeabilite katsayısı Darcy Yasası'na göre belirlenir. Tabakalı zeminlerin yatay ve düşey permeabilite katsayıları aşağıdaki eşitliklerle belirlenebilir.

$$k_h = \frac{k_1 d_1 + k_2 d_2 + \dots + k_n d_n}{d_1 + d_2 + \dots + d_n}$$

$$k_v = \frac{\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \dots + \frac{d_n}{k_n}}{d_1 + d_2 + \dots + d_n}$$

Eşitliklerde;

k_h = Yatay yöndeki permeabilite katsayısı (m/s),

k_v = Düşey yöndeki permeabilite katsayısı (m/s),

$d_1, d_2 \dots d_n$ = Tabaka kalınlıkları (m),

$k_1, k_2 \dots k_n$ = $d_1, d_2 \dots d_n$ tabakalarındaki permeabilite katsayıları (m/s).

d) **Zemin suyunun doygunluk derecesi :** Geçirgenliğe etki eden bir diğer faktör de toprak gözenekleri içerisinde sıkışan hava kabarcıklarıdır. Hava kabarcıkları sızma yollarının tıkanmasına neden olarak, zeminin permeabilitesini olduğundan daha küçük bulunmasına yol açabilir. Zemin suyundaki basınç arttığında, havanın sudaki çözünürlüğü de artarak çözünen hava hacmi kadar boşluk oluşur. Bu durum permeabiliteyi olduğundan daha büyük gösterir. Bir zeminin gerçek permeabilitesi, o zemindeki mevcut

boşluklarda tutabildiği hava kabarcıkları ile bu durumdaki geçirgenliğidir. Bu nedenle laboratuvarında geçirgenlik belirlenmesinde zeminin tam doygun duruma getirilerek hava kabarcıklarından arındırılması gerekir. Suyu doygun zeminlerin permeabilitesi, suya az doygun zeminlere oranla biraz daha yüksektir.

e) Yeraltı suyunun özellikleri : Permeabiliteyi etkileyen yeraltı suyu özellikleri içerisinde suyun yoğunluğu, vizkozitesi, sıcaklığı sayılabilir.

Permeabilite topraktaki suyun birim hacim ağırlığı ile doğru, vizkozite ile ters orantılıdır. Su sıcaklığı yükseldikçe suyun vizkozitesi de azalacağından su sıcaklığı da permeabiliteyi etkilemektedir.

Permeabiliteyi etkileyen faktörler göz önüne alınarak, zeminin permeabilitesi aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$k = \frac{2g}{C_s} \left(\frac{\gamma_w}{\mu} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right) D_{10}^2$$

Eşitlikte yer alan C_s , akım kanallarının şekli olup, doğrudan ölçülememektedir. Bu katsayının 100 olarak alınması yeterli yaklaşıktadır sonuçlar vermektedir. Yeraltı su sıcaklığı çok az değiştiği için $\frac{\gamma_w}{\mu}$ oranı sabit kabul edilebilir. Zeminlerin boşluk oranı arttıkça permeabiliteleri de artmaktadır. Bu duruma göre zeminlerin permeabilitesi temelde tane çaplarına bağlı olarak değişmektedir.

5. ZEMİNLERDE SIZINTI VE AKIM AĞI

Suyun zemin içerisindeki hareketine sızma denir. Zeminlerde suyun sızmasına zeminlerin doğal drenajı da denir. Gölet, baraj ve kanal gibi yapıların projelenmesinde sızma olayı büyük rol oynar. Zeminlerin su sızdırmaları sonucu ortaya çıkan ve toprak-su yapılarının projelenmesinde önemli rol oynayan aşağıda belirtilen hususların bilinmesi gerekir.

- İnşaat sırasında temel çukuruna dolan suyun ve bir barajdan sızarak kaybolan suyun miktarının bilinmesi gerekir.

- Sızma ve sızma kuvvetinin temellerin dayanımına olan etkilerinin bilinmesi gerekir.

- Geçirgenliğin, yüklenmiş zemin tabakalarından fazla suyun sızma debisi üzerindeki etkisinin bilinmesi gerekir.

Yukarıda açıklanan sorunlar nedeniyle bazı mühendislik projelerinde suyun zemin içerisinde sızması ile ilgili bilgilere gerek duyulur. Bazı mühendislik yapılarının tasarım ve inşasında zemin içerisinde akan suyun hızı ve miktarı ile zeminde uyguladığı sızıntı ve kaldırma kuvvetlerinin sağlıklı olarak hesaplanması uygulamada sık karşılaşılan problemleri oluşturmaktadır. Bu nedenle yeraltı suyunun akım özelliklerinin incelenmesi önemli olmaktadır.

Zemin içinde iki nokta arasında bir su akımı meydana gelmesi için o iki noktanın toplam enerji seviyeleri arasında bir farklılık bulunması gerekir. Su yüksek enerji noktasından düşük enerji noktasına doğru akarken sürtünme kuvvetlerinden dolayı bir enerji kaybı ortaya çıkar.

Akışkanlar mekaniğinde sıkışması ihmal edilebilir sıvıların kararlı akım problemlerinde enerji kayıplarının ihmal edilebileceği durumlarda, akım kanalı boyunca toplam enerjinin sabit kalacağını ifade etmek için Bernoulli enerji denklemi kullanılmaktadır.

$$gz + \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2} = \text{Sabit enerji} = H$$

Eşitlikte enerji terimleri birim kütledeki enerji cinsinden ifade edilmiştir.

Eşitlikte;

gz = Belli bir noktadaki potansiyel enerji,

p/γ_w = Basınç enerjisi,

$\frac{v^2}{2g}$ = Kinetik enerji,

H = Toplam enerji.

Yukarıdaki eşitlik yerçekimi ivmesi g'ye bölünerek birim ağırlık için enerji cinsinden elde edilen aşağıdaki bağıntı daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$H = z + \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g}$$

Eşitlikte;

z = Yerçekiminden kaynaklanan hidrolik yük,

$\frac{p}{\gamma_w}$ = Sudaki basınçtan kaynaklanan hidrolik yük,

$\frac{v^2}{2g}$ = Akım hızından kaynaklanan hidrolik yük,

H = Toplam hidrolik yük.

Zeminlerde genel olarak akım hızı düşük olduğu için hız yükünün ($v^2/2g$) değeri ihmal edilebilir. Bu durumda, sızmayı meydana getiren hidrostatik veya hidrolik olarak adlandırılan yük, basınç (h_p) ile konum (h_e) yükünün toplamına eşit olacaktır.

$$H = \frac{p}{\gamma_w} + z \rightarrow h = h_e + h_p$$

= yerçekimi yükü + basınç yükü

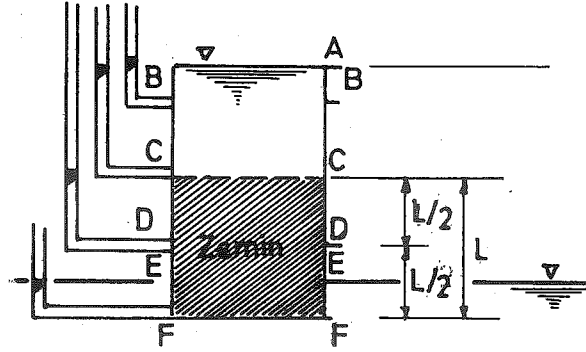
Su, zemin taneleri arasından geçerken sürtünme nedeniyle bir enerji başka bir ifadeyle hidrolik yük kaybı olacağı açıktır. Enerji kayıpları göz önüne alınarak akım bölgesi içindeki iki nokta için eşitlik aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma_w} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma_w} + \Delta h$$

Eşitlikteki Δh birinci nokta ile ikinci nokta arasındaki hidrolik yük kaybını göstermektedir. Söz konusu hidrolik yük kaybı ($\Delta h = h_1 - h_2$) iki nokta arasındaki toplam hidrolik yük farkından ileri gelmektedir. Gerçek akım problemlerinde daima enerji kayıpları olacağı için, akımın olabilmesi ancak $h_1 > h_2$ veya $\Delta h > 0$ durumunda olasıdır. Başka bir anlatımla, akım ancak toplam hidrolik yükü daha büyük olan bir noktadan daha küçük olan bir noktaya doğru olacaktır. Toplam hidrolik yükü birbirine eşit olan iki nokta arasında akım olmayacaktır. Darcy Yasası akım şiddeti ve hızının hidrolik eğimle doğrusal arttığını göstermektedir. Bu durum ancak düzgün akım koşullarında geçerlidir. Akımın hızı arttıkça akım düzgün akım olmaktan uzaklaşmakta ve Darcy Yasası geçerliliğini kaybetmektedir. Bu nedenle akım hızının çok yüksek olduğu iri çakıl gibi zeminlerde, akım problemlerinin incelenmesine özen gösterilmelidir. Diğer yandan su geçirgenliğinin çok düşük olduğu bazı killer üzerinde yapılan deneylerde de akım hızı ile hidrolik eğim arasındaki ilişkide doğrusallıktan sapmalar gözlenmiştir.

Şekil 5.1'de bir kısım zeminle doldurulmuş bir kap gösterilmiştir. Zeminin üstünde kalan kısmın A-A düzeyine kadar su ile dolu olarak tutulmakta olduğunu, zeminin alt yüzeyinin ise EE kadar su içine batırıldığı görülmektedir.

Bu durumda zemin içinde yukarıdan aşağıya doğru bir su akımı meydana gelmektedir. Kaba bağlanan piezometrelerde su gösterilen düzeylere yükselmiştir. Değişik düzeylerdeki hidrolik yükleri belirlemek için Çizelge 5.1 düzenlenebilir.



Şekil 5.1. Hidrolik Yükleri Tanımlamak İçin Kullanılan Bir Model

Çizelge 5.1. Hidrolik Yükler (Şekil 5.1'deki Model için E-E Referans)

Düzy	Basınç Yükü (h_p)	Yerçekimi yükü (z)	Toplam hidrolik yük (h)	Hidrolik yük kaybı (Δh)
B-B	AB	BE	AE	0 $\frac{1}{2}AE$ $\frac{1}{2}AE$
C-C	AC	CE	AE	
D-D	CD	DE	CE	
F-F	EF	-EF	O	

Görüldüğü gibi herhangi bir düzeydeki toplam hidrolik yük, piezometredeki su düzeyine eşittir. Basınç yükü ise toplam hidrolik yük ile yerçekimi yükü arasındaki farka eşittir.

Belirli bir düzeydeki su basıncı aşağıdaki eşitlikle belirlenebilir.

$$u = (h-z) \gamma_w$$

Eşitlikte;

$$u = \text{Su basıncı (kg/m}^2\text{)},$$

$$h = \text{Hidrolik yük (m)},$$

$$\gamma_w = \text{Suyun birim hacim ağırlığı (kg/m}^3\text{)}.$$

Su zemin içerisinde geçerken hidrolik yük doğrusal olarak azalmaktadır. Toplam hidrolik yük kaybı AE, hidrolik eğim (i) ise AE/L olmaktadır.

Zemin içinden geçen suyun hızı ve miktarı Darcy Yasasından yararlanılarak hesaplanabilir.

$$V = k \cdot i$$

$$q = k \cdot i \cdot A$$

Eşitlikte;

$$V = \text{Su hızı (m/s)},$$

$$k = \text{Zeminin hidrolik iletkenlik katsayısı (m/s)},$$

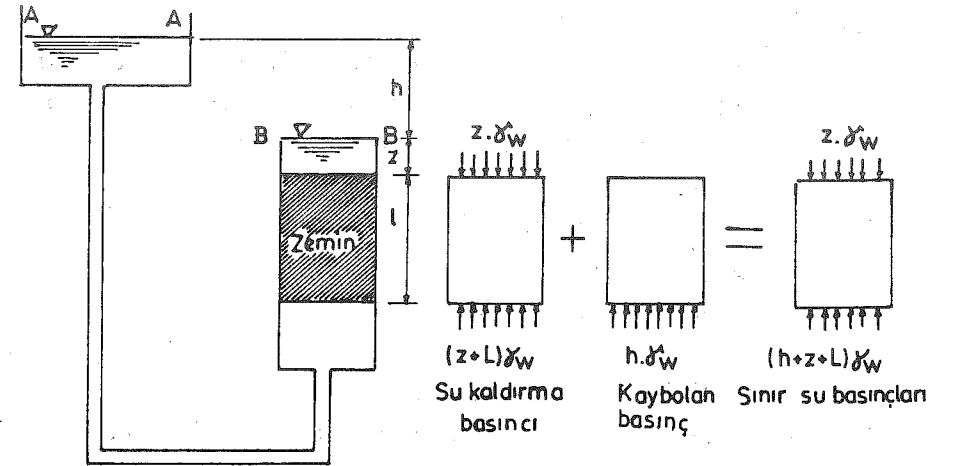
$$i = \text{Hidrolik eğim},$$

$$q = \text{Sızan su miktarı (m}^3\text{/s)},$$

$$A = \text{Zeminin kesit alanı (m}^2\text{)}.$$

5.1. Sızma Kuvvetleri ve Su Basınçları

Suyun zemin içinden geçerken zemine uyguladığı sızıntı kuvvetlerini incelemek için Şekil 5.2'deki gösterilen tek boyutlu akım problemi göz önüne alınabilir.



Şekil 5.2. Akım Bölgesindeki Bir Zemin Elemanına Etkiyen Basınçlar

Şekil 5.2'de A-A düzeyindeki su B-B düzeyinden daha yüksekte olduğundan su, zemin içinde aşağıdan yukarı doğru hareket etmektedir. Zemin elemanı üzerinde etkiyen basınçlar incelendiğinde su kaldırma basınçları (Şekil 5.2 2 nolu durum) ile

sızıntı şeklinde kaybolan su basınçları (Şekil 5.2 3 nolu durum) toplamı, toplam sınır basınçlarını oluşturur. Zemin kesit alanı A olduğunda suyun net kaldırma kuvveti (F) aşağıdaki eşitlikte bulunur.

$$F = (Z + L) \gamma_w \cdot A - z \gamma_w A = LA \gamma_w \\ = v \cdot \gamma_w$$

Birim zemin kütlesi üzerine etkiyen sızıntı kuvveti (J) ise aşağıdaki ilişki ile bulunabilir.

$$J = \frac{h \gamma_w \cdot A}{A \cdot L} \left(\frac{h}{L} \right) \gamma_w = i \gamma_w$$

Sızıntı kuvveti, suyun sürtünmeden dolayı zemine uyguladığı kuvvet olup şiddeti hidrolik eğimle doğru orantılıdır ve doğrultusu akım doğrultusuna paralel olmaktadır.

Sızıntı kuvvetlerinin etkisi altındaki zemin kütlelerinin dengesi incelendiğinde, toplam sınır basınçlarını ve zeminin toplam ağırlığını göz önüne alarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\Sigma F_v = (z \cdot \gamma_w \cdot A) + L \cdot A \cdot \gamma_d - (h + z + L) \gamma_w \cdot A \\ = z \cdot \gamma_w \cdot A + L \cdot A \cdot \gamma_d - \gamma_w \cdot h \cdot A - \gamma_w \cdot z \cdot A - \gamma_w \cdot A \cdot L \\ = L \cdot A (\gamma_d - \gamma_w) - h \cdot \gamma_w \cdot A$$

5.2. Akıcı Kum ve Borulanma

Bir zemin kütlesi üzerinde etkiyen sızıntı kuvveti yerçekimine ters doğrultuda ve eşit şiddetle olursa, kumlu zeminlerin dengesi bozulmakta ve akıcı kum veya kaynayan kum olarak nitelendirilen durum ortaya çıkmaktadır (Şekil 5.3).

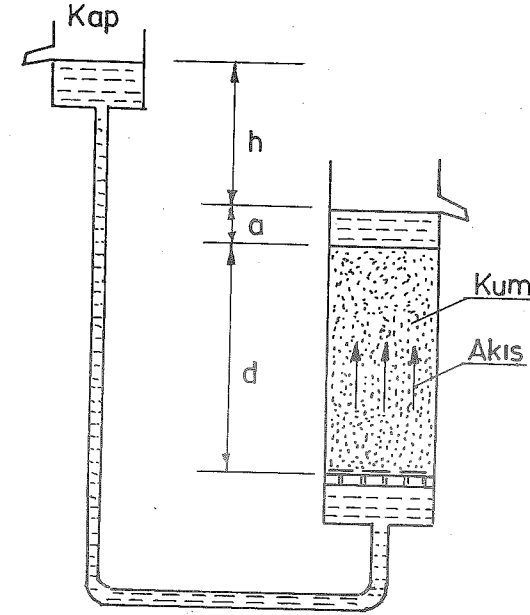
Şekil 5.3'teki zemin elemanı, göz önüne alındığında düşey yönden etkiyen kuvvetlerin toplamının sızma kuvvetine eşit olması durumunda;

$$\Sigma F_v = L \cdot A \cdot \gamma_A - h \gamma_w \cdot A = 0$$

olmakta, akıcı kum durumuna yol açan hidrolik eğim,

$$i_c = \frac{h}{L} = \frac{\gamma_A}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

değerini almaktadır.



Şekil 5.3. Akıcı Kum Olayı

Hidrolik eğimin bu değerine, kritik hidrolik eğim adı verilmektedir. Su yapılarında ve kazılarda hidrolik eğimin kritik değere ulaşmamasına dikkat edilmelidir. Aksi halde kumlu zeminlerin tamamen mukavemetini kaybederek bir sıvı gibi davrandığı akıcı kum durumları ile karşılaşılma tehlikesi bulunmaktadır.

Akıcı kum, bir kum çeşidi olmayıp, kaynamaya uğrayan kuma verilen addır. Kayma olup olmadığı, akım ağları kullanılarak anlaşılabilir. Bu amaçla, zemin içindeki suyun çıkış bölgelerindeki potansiyel farkı akım ağları ile hesaplanabilir. Potansiyel farkının su çıkış bölgelerinin uzunluğuna bölünmesiyle o bölgedeki hidrolik eğim belirlenir. Bulunan hidrolik eğimi, o zemin için tanımlanan kritik hidrolik eğimle karşılaştırılarak akıcı kum olayı tahmine çalışılır.

Zeminde akıcı kum olayının oluşumu, palplanş perdesi veya zemin yüzeyine geçirimsiz örtü oluşturarak akım yolu uzunluğu

arttırılarak veya o bölgeye suya geçen zemin tanelerini tutan ağırlık filtreleri yerleştirmekle önlenabilir.

Su zeminden çıkarken, zemin tanelerini de sürükleyerek götürebilir. Bu şekilde zemin kitlesinden sızan suyun, belirli koşullarda oluşturduğu kararsız duruma borulanma denir. Zeminden sızan su zeminde iç erozyon, başka bir anlatımla oyulma ve boşluklar oluşturabilir. Zeminde oluşan borulanma olayları, tüm zeminin göçmesine, yıkılmasına neden olabilir. Borulanmayı önlemek için filtreler oluşturulur.

5.3. Zeminde Su Akımının Matematiksel İfadesi

Sızma olayının incelenmesinde ve sızma ile olan akım miktarının belirlenmesinde bazı varsayımlardan hareket edilir. Bu varsayımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Zemin homojendir.
- Zemin içindeki suyun hareketi Darcy Yasasına göre olmaktadır.
- Suyun zemin içindeki hareketi üç boyutlu bir akımdır.

Bu varsayımlar sızma olayının çözüm ve incelenmesini kolaylaştırmaktadır. Ancak üç boyutlu akımların çözümü karmaşık olduğundan çoğunlukla analizlerde akımlar tek düzlemde olan iki boyutlu akım şeklinde düşünülerek bir yaklaşıma gidilir.

Yeraltı suyu akım bölgesi içindeki bir zemin elemanı göz önüne alındığında (Şekil 5.4), şekilde görüleceği gibi dx , dy , dz boyutlarında ve içinde x , y , z doğrultularında yeraltı suyu akımı gerçekleşmektedir.

Herhangi bir doğrultudaki su akımının Darcy Yasasına uygun hareket ettiği kabul edilebilir. Örneğin z doğrultusundaki akım göz önüne alındığında, zemin elemanına birim zamanda giren ve çıkan su miktarları sırasıyla;

$$q_{zi} = k_z \cdot i_z \cdot A = k_z \frac{dh}{dz} dydx$$

$$q_{zo} = k_z \left(\frac{\Delta h}{\Delta z} + \frac{\Delta^2 h}{\Delta z^2} dz \right) dydx$$

şeklinde ifade edilebilir. Zemin elemanın z doğrultusundaki net su akım miktarı, giren ve çıkan su miktarlarının farkına eşit olacaktır.

$$q_z = (q_{zi} - q_{zo}) = k_z \left(\frac{\Delta^2 h}{\Delta z^2} \right) dx dy dz$$

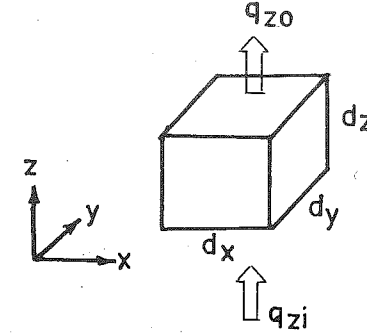
$$k_z \left(\frac{\Delta h}{\Delta z} \right) dydx - k_z \left(\frac{\Delta h}{\Delta z} \right) dydx - k_z \left(\frac{\Delta^2 h}{\Delta z^2} \right) dz dy dx$$

$$q_z = k_z \left(\frac{\Delta^2 h}{\Delta z^2} \right) dz dy dx$$

Aynı ifade x ve y doğrultuları için de yazılabilir.

$$q_x = k_x \left(\frac{\Delta^2 h}{\Delta x^2} \right) dx dy dz$$

$$q_y = k_y \left(\frac{\Delta^2 h}{\Delta y^2} \right) dx dy dz$$



Şekil 5.4. Akım Bölgesi İçinde Bir Zemin Elemanı

Su akımı sırasında zemin elemanı hacminin sabit kaldığı göz önüne alınarak, birim zamandaki toplam net su akımının sıfıra eşit olacağını, diğer bir anlatımla elemana giren toplam suyun çıkan toplam suya eşit olacağı söylenebilir.

$$q_t = (k_x \frac{\Delta^2 h}{\Delta x^2} + k_y \frac{\Delta^2 h}{\Delta y^2} + k_z \frac{\Delta^2 h}{\Delta z^2}) dx dy dz = 0$$

La Place adı verilen bu genel differansiyel denklem, hidrolik yükün akım bölgesi içindeki değişiminin matematiksel olarak ifade etmektedir. Denklemin çözümü ile akım bölgesi içindeki bütün noktalarda toplam hidrolik yük değeri elde edilmiş olmaktadır. Toplam hidrolik yük bulunduktan sonra, hidrolik eğimler, akım hızları, akım miktarı, sızma kuvvetleri ve su basınçları kolaylıkla bulunabilir. La Place denklemi, her yöndeki permeabilitesi aynı olan ($k_x = k_y = k_z$) izotropik koşullarda olacağı için differansiyel denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\Delta^2 h}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 h}{\Delta y^2} + \frac{\Delta^2 h}{\Delta z^2} = 0$$

Zemin mekaniği problemleri gerçekte üç boyutlu problemler olmakla beraber, uygulamada çözümü basitleştirmek için iki boyutlu bir problem haline indirgenebilir.

İki boyutlu problemlerde, zemin içinde su akımını tanımlayan La Place denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\Delta^2 h}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 h}{\Delta z^2} = 0 \quad k_x \frac{\Delta^2 h}{\Delta x^2} + k_z \frac{\Delta^2 h}{\Delta z^2} = 0$$

Eşitliklerde yer alan k_x ve k_z permeabilite, h ise hidrolik yükü göstermektedir.

Denklemden $h(x, z)$ potansiyel fonksiyonu akım bölgesindeki herhangi bir noktadaki x doğrultusundaki (dh/dx) ve z doğrultusundaki (dh/dz) hidrolik eğimi göstermektedir. Darcy Yasasına göre akım hızının hidrolik eğimle doğru orantılı olduğu bilindiğinden x ve z doğrultularındaki akım hızları aşağıdaki eşitlikler halinde yazılabilir.

$$\frac{dQ}{dx} = k \frac{dh}{dx}$$

$$\frac{dQ}{dz} = -k \frac{dh}{dz}$$

$$\frac{dQ}{dz} = -k \frac{dh}{dx}$$

Bu ifadelerin türevleri alınıp toplandığında,

$$\frac{\Delta^2 Q}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 Q}{\Delta z^2} = k \frac{\Delta^2 h}{\Delta x \Delta z} - k \frac{\Delta^2 h}{\Delta z \Delta x} = 0$$

şeklini alır.

Akım bölgesi içinde $Q(x, z)$ fonksiyonun değerinin (hız potansiyel fonksiyonu) sabit kaldığı ($Q = \text{sabit}$) bir eğri üzerinde, türevin sıfıra eşit olacağı göz önüne alınarak

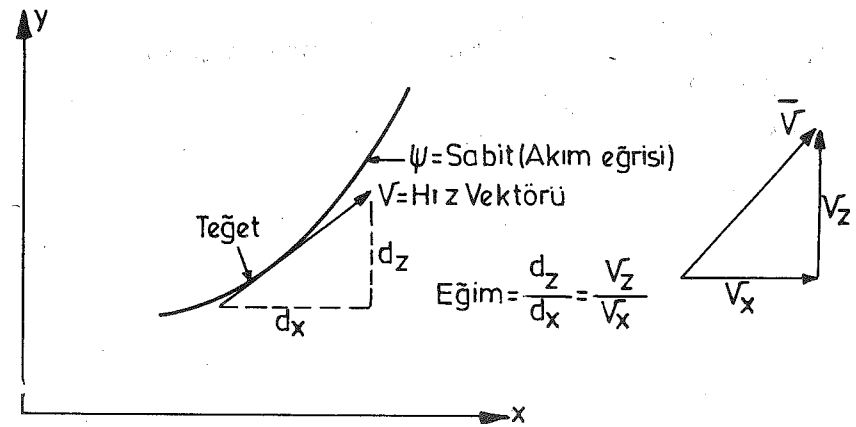
$$dQ = \frac{dQ}{dx} dx + \frac{dQ}{dz} dz = 0$$

denklemini elde edilir. Böyle bir eğrinin eğimi,

$$\frac{dz}{dx} = - \frac{\Delta Q / \Delta x}{\Delta Q / \Delta z} = \frac{\Delta h / \Delta z}{\Delta h / \Delta x} = \frac{V_z}{V_x}$$

şekline dönüşür.

Bu durumda, Q , sabit eğrilerine çizilecek teğetler, o noktadaki akım hızı vektörünü göstermektedir (Şekil 5.5).



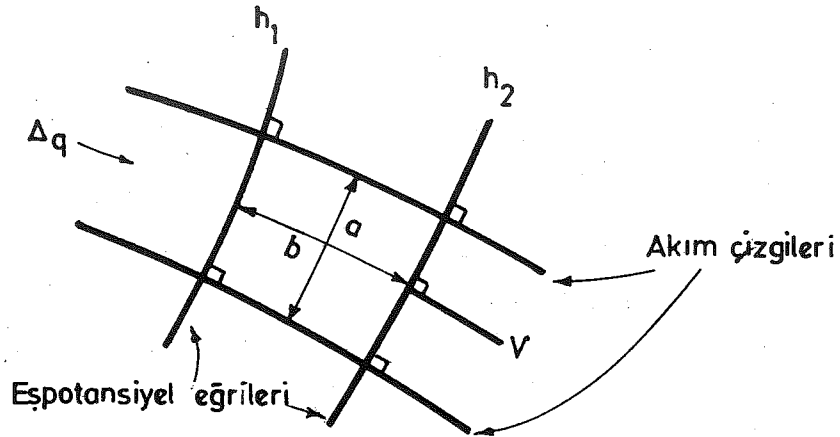
Şekil 5.5. Akım Eğrileri ve Hız Vektörleri

Q sabit eğrileri ise zemin içinde akan bir su damlasının izlediği yol olacaktır. Bu eğrilere zemin mekaniğinde akım eğrileri adı verilmektedir.

Akım bölgesi içinde hidrolik yük doğrularını gösteren $h(x, z)$ potansiyel fonksiyonun sabit değer aldığı ($h = \text{sabit}$) eğrilerinin eğimi ise,

$$\frac{dz}{dx} = - \frac{\Delta h / \Delta x}{\Delta h / \Delta z} = - \frac{V_x}{V_z}$$

şeklinde elde edilir. Bu durumda h sabit eğrilerinin eğimi, akım çizgilerinin eğiminin tersine eşit olmaktadır. Bu da akım çizgileri ile eşpotansiyel çizgilerinin birbirini dik açılarla kestiğini göstermektedir. Bir akım bölgesindeki akım ağı Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Akım Ağı

Zemin kütesinin birim uzunluğu için iki akım çizgisi arasında kalan bölgeden geçen su miktarı, Darcy Yasasından yararlanarak aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$\Delta q = k \left(\frac{a}{b} \right) \Delta h$$

Eşitlikte a ve b sırası ile ardışık akım çizgileri ve eş potansiyel çizgileri arasındaki uzaklıkları olmaktadır. Görüldüğü gibi, akım hızı vektörü eş potansiyel çizgilerine dik olmakta, şiddeti ise hidrolik eğim ($i = \frac{h_1 - h_2}{b}$) ile zemin permeabilite katsayısı çarpılarak elde edilmektedir.

5.3.1. La Place Denkleminin Çözümü ve Akım Ağlarının Çözümüne İlişkin Esaslar

La Place denklemi, grafiksel çözüm ve nümerik çözüm olmak üzere iki yöntemle çözülebilir.

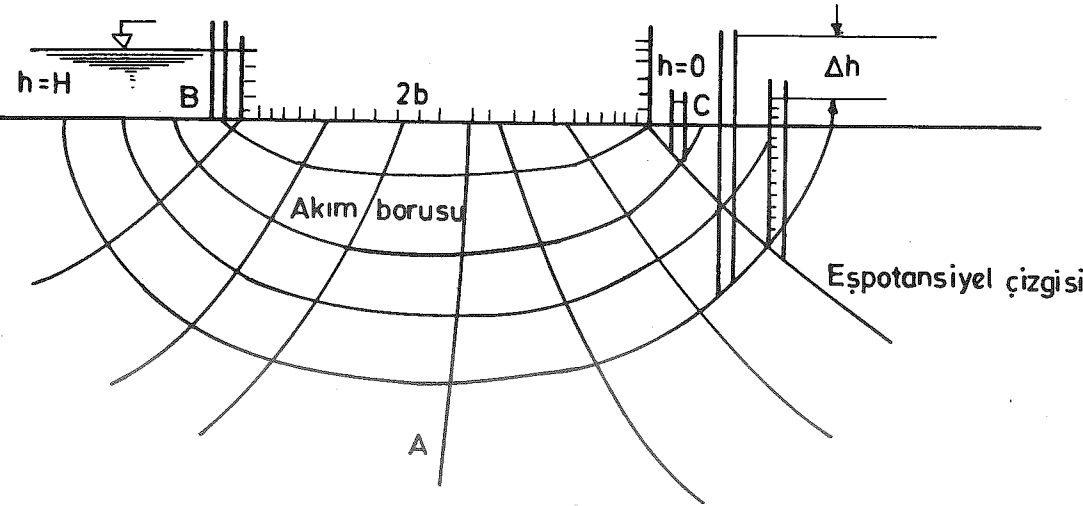
La Place denkleminin grafiksel çözümü ile birbirini dik açılarla kesen iki akım çizgisi elde edilir. Bunlardan bir grubu elips, diğer grubu ise hiperboldur. Bu çizgilerin bir grubuna akım çizgileri, diğer gruplarına da eş potansiyel çizgileri adı verilir.

Eldeki problemin sınır koşulları ile zemin özellikleri bilinirse La Place denkleminin analitik çözümü yapılabilir.

Zemin içerisinde bir su molekülünün izlediği yol Şekil 5.7'de görülmektedir.

Şekil 5.7'de görüldüğü gibi bir su molekülü B noktasından C noktasına gidişi sırasında yarım elips şeklinde bir yol izler. Akım alanı içerisinde su moleküllerinin izlediği bu yola akım çizgisi adı verilir. İki akım çizgisi arasında kalan alana akım borusu veya akım tüpü denir. Değişik akım çizgileri üzerine yerleştirilen piezometrelerde su basınca bağlı olarak her noktada farklı olmaktadır.

B noktasındaki piezometrede su yükü $H'a$ ($h = H$) eşitken C noktasında sıfır olur ($h = 0$). Akım alanı içerisinde su düzeyi aynı piezometrik yüksekliğe erişen noktaların birleştirilmesi ile hiperbolik bir eğri elde edilir. Bunlar eş potansiyel çizgileridir. Bu eş potansiyel çizginin tüm noktalarında su aynı piezometrik düzeye



Şekil 5.7. Geçirimsiz Zemin Altındaki Akım Ağı

erişir. Eş potansiyel çizgileri, komşu eş potansiyel çizgileri arasındaki basınç farkı eşit olacak şekilde çizilir. İki eş potansiyel çizgisi arasındaki bu basınç yüksekliği farkına potansiyel düşüm denilir (Δh). Potansiyel düşüm, toplam h yükünün potansiyel düşüm sayısına veya eş potansiyel çizgisinin bir eksiğine bölünmesiyle bulunur.

$$\Delta h = \frac{h}{n \cdot p}$$

Akım çizgileri ile potansiyel çizgisinin sınırladığı kare şeklindeki bölüme alan adı verilir. Akım alanında akım çizgileri ile eş potansiyel çizgilerinin oluşturduğu ağa akım ağı denir.

Grafiksel yöntemle akım ağının oluşturulmasında akım alanında sınır koşullarının belirlenmesi gerekir. Temellerden olan sızmalarla gövdelerden olan sızmalara akım olayının çizimi için farklı teknikler uygulanır.

Akım ağının özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Akım çizgileri ve eş potansiyel çizgileri birbirine diktir.
- Birbiri ile keşisen akım ve eş potansiyel çizgilerinin oluşturduğu eğri kenarlı dikdörtgenler birbirine benzer olmaktadır.

Çok defa dikdörtgenlerin, kenar oranlarının 1 olması ile kare oluşturulur.

- Akım kanalları arasından eşit miktarda su geçmelidir. Başka bir anlatımla toplam sızma miktarının sabit bir yüzdesi kadar su geçer.

- Birbirini izleyen eş potansiyel çizgileri arasındaki hidrolik yük farkı sabit olmalıdır.

- Eş potansiyel çizgileri, üst akım çizgisini eşit düşey aralıklarla kesmelidir.

Akım ağı doğru olarak elde edildikten sonra, akım bölgesi içindeki her noktada hidrolik eğimin, akım hızının, sızma kuvvetlerinin ve su basınçlarının değerleri ile sızan toplam su miktarı kolaylıkla hesap edilmektedir. La Place denklemi kuramsal olarak sonsuz sayıda akım çizgisi ve eş potansiyel çizgisinden oluşan bir akım ağının matematiksel ifadesi olmaktadır. Akım ağının deneme ve yanılma yöntemi ile grafiksel olarak elde edilmesinde ise akım ve eş potansiyel çizgilerinden belli sayıda çizilmesi ile yetinilmektedir. Bunların sayısı arttıkça daha duyarlı bir çözüm elde edilmesi olasıdır. Ancak uygulamada genellikle çok sık çizgilerden oluşan bir akım ağına gerek duyulmamaktadır.

Akım ağının çiziminde aşağıdaki adımların izlenmesi yararlı olmaktadır.

- Çizgisiz bir kağıda ölçekli olarak akım bölgesinin sınırları mürekkepli bir kalemle çizilir.

- Akım bölgesi için çizilecek akım kanalı sayısı seçilir. Genellikle 4-5 tane yeterli olmaktadır. Bunları veren akım çizgileri kurşun kalemle çizilir. Akım çizgilerinin sınır yüzeydeki eş potansiyel çizgisine dik olması sağlanır.

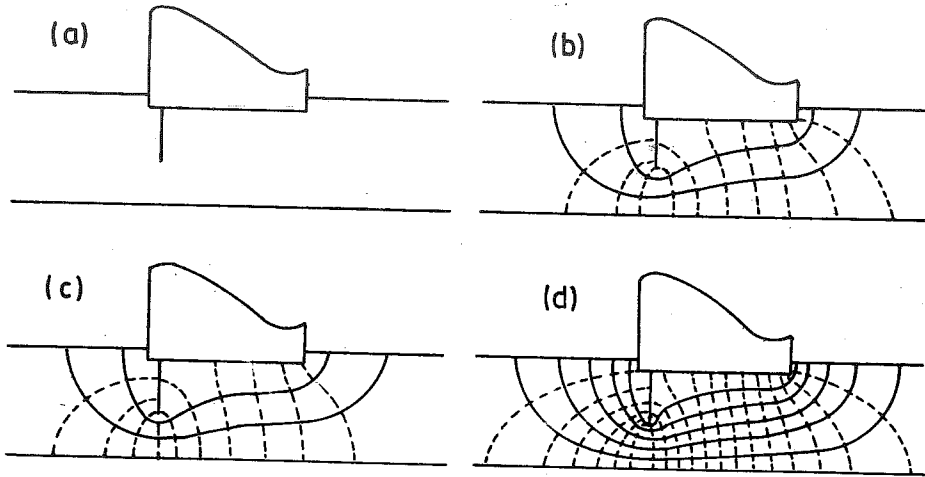
- Akım çizgilerini dik kesecek ve bunlarla genişlik/uzunluk oranı sabit dikdörtgenler oluşturacak şekilde eş potansiyel çizgileri çizilir.

- Eş potansiyel çizgilerinin, akım çizgisi ve geçirimsiz sınır yüzeylerine dik olmasına özen gösterilir.

Su yapıları için akış ağlarını değişik deneysel metotlarla elde etmek mümkün ise de, en uygun ve en ucuz olanı, grafik metotla akış ağının elde edilmesidir.

Akış ağının grafik metotla elde edilmesi için izlenen adımlar, Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Şekil 5.8 a'da, bir palplanş perdesi ile oluşturulmuş üzerinden su aşacak şekilde tertip edilmiş bulunan bir beton bağlamanın düşey kesitini göstermektedir.

Akış ağını çizmeye başlamadan önce, problemin hidrolik sınır koşullarını bu koşulların akım çizgilerinin şekilleri üzerine yapacağı etkiyi araştırmak gerekir. Bağlamanın Şekil 5.8 a'da gösterilmiş olan menba ve mansap taraflarına ait zemin üst yüzeyleri, birer eşpotansiyel çizgisidir. Bağlamanın tabanı ile yan duvarlar en yüksekte geçen akım çizgisini oluşturur. Geçirgen tabakanın tabanı ise, en alttan geçen akım çizgisinden ibarettir. Diğer akım çizgilerinin şekilleri bu iki eğrinin birinden diğerine doğru tedrici bir değişmeyi belirtmektedir. Öte yandan bütün akım çizgileri



Şekil 5.8. Bir Akış Ağının Çizilmesine İlişkin Adımlar

bağlamanın menba ve mansap taraflarında zemin üst yüzeyini düşey doğrultuda keserler. Akış ağını meydana getirmek için yapılacak işin birinci adımı, bütün bu koşulları yerine getirecek olan akım çizgilerini temsil etmek üzere tatlı eğrilikte bir kaç tane çizgi çizmektir (Şekil 5.8 b).

Bundan sonra, akım çizgilerini dik açı altında kesecek ve kabaca birer kare biçiminde alanlar oluşturacak şekilde bir kaç eşpotansiyel çizgisi çizilir. Böylelikle akış ağının birinci ve kaba olarak yaklaşık şekli elde edilmiş olur.

Çizimin ikinci adımında, birinci adımın kabaca yaklaşık akış ağı gözden geçirilip en belirli kusurları ortaya çıkarılır. Şekil 5.8 b'de görülen kabaca yaklaşık akış ağında, eşpotansiyel eğrileri ile akım çizgileri birbirleriyle yaklaşık dik açı altında kesişmekte iseler de, buradaki alanlardan birçokları kare şeklinde olmaktan çok uzaktır. Bu nedenle alanları kareye daha çok yakın olacak olan yeni bir akış ağı çizilir. Bu işleme, alanlar yaklaşık birer kare oluncaya kadar devam edelir (Şekil 5.8 c).

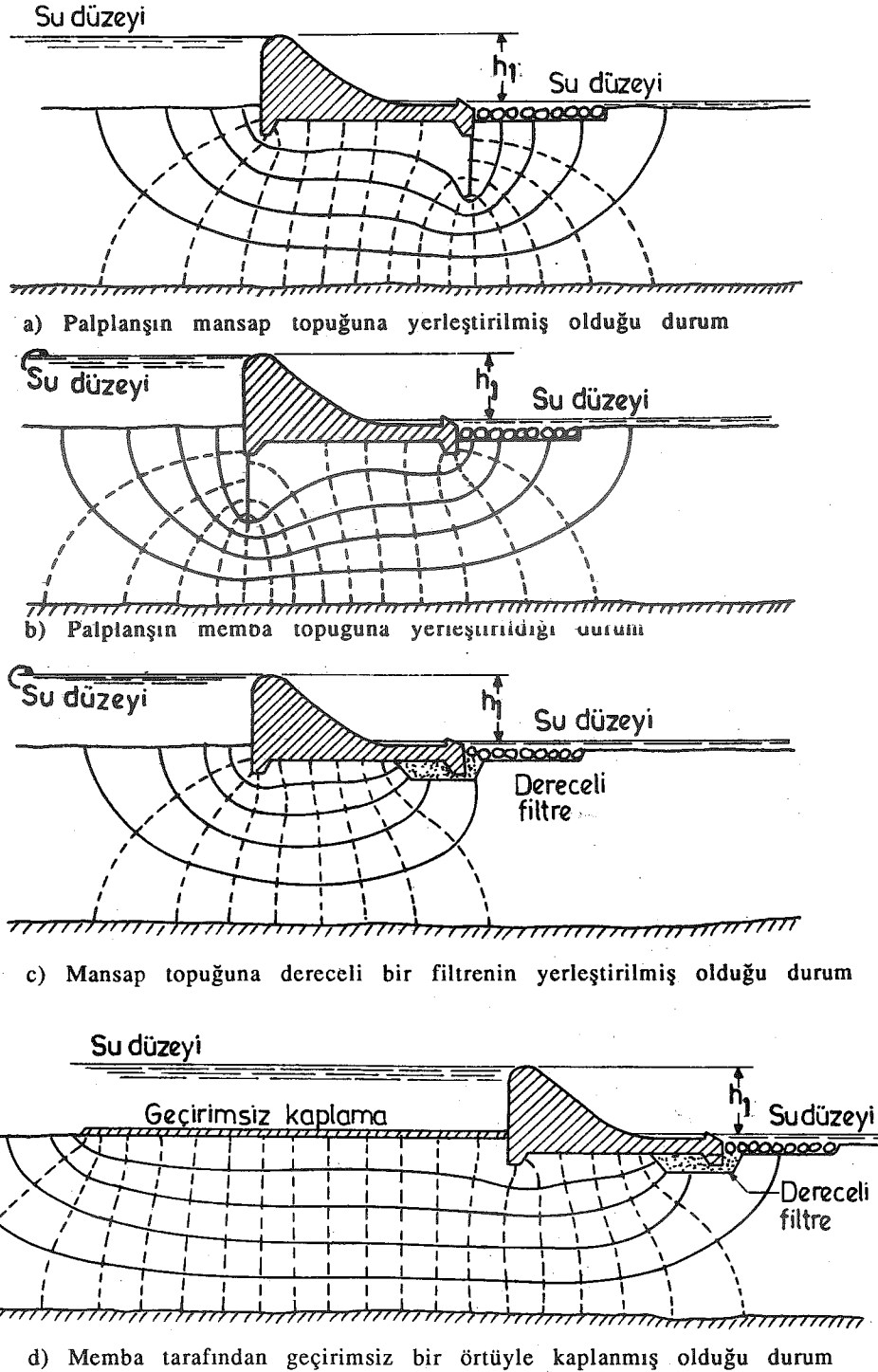
Şekil 5.8c'deki alanlar daha küçük parçalara ayrılır ve akış ağı, küçük alanların her biri kare şeklini alıncaya kadar, tekrar düzeltilir. Çizimin son şekli Şekil 5.8 d'de gösterilmiştir. Çizimin bu son adımında alanlar dört küçük parçaya bölünmüş ve görülen kusurlar giderilmiş bulunmaktadır.

Grafik çizim metodunun uygulanması ile bütün alanlar, kabaca kare şekline getirildikleri anda meydana gelen yaklaşık akış ağının her türlü pratik amaçlar için kullanılması yeterli sonuçlar verir. Görünüşte, hiç te mükemmel olmayan bir akış ağı bile iyi sonuçlar vermektedir. Değişik sınır koşullarını sağlayan akış ağlarının çizimi Şekil 5.9'da, perde duvarlı bir bent zeminine ilişkin akım ağı ise Şekil 5.10'da verilmiştir.

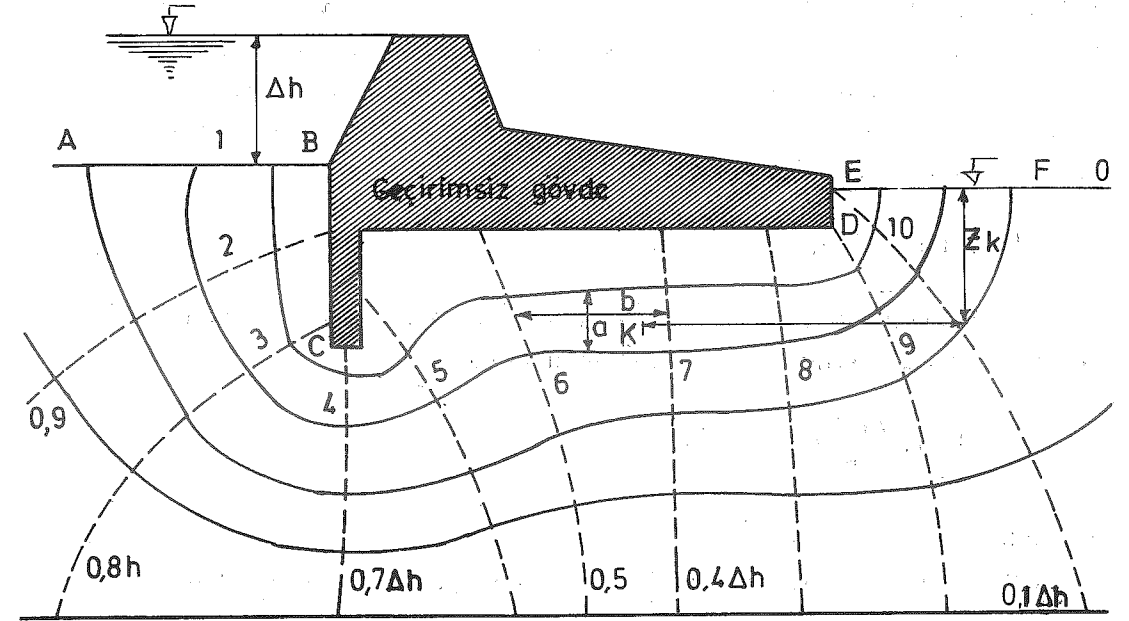
Şekil 5.10'da gösterilen bendin hidrolik sınır koşulları aşağıdadır.

- AB bir eşpotansiyel çizgisidir.
- EF bir eşpotansiyel çizgisidir.
- BCDE bir akım çizgisidir.
- Geçirimsiz tabaka bir akım çizgisidir.

Bendin sınır koşulları belirlendikten sonra akım çizgileri BCDE eğrisinden geçirimsiz tabaka yüzeyinden oluşan son akım çizgisine yavaş yavaş bir geçiş gösterirler. Ayrıca bu çizgiler memba ve mansap tarafından zemin yüzeyini dik olarak keserler. Bu koşullara uyularak tatlı eğimlere sahip yeterli akım çizgisi ve bu akım çizgilerini dik kesecek ve bunlarla yaklaşık olarak kare oluşturacak



Şekil 5.9. Beton Bir Bağlamanın Altındaki Homojen Kumda Suyun Sızma Akışı



Şekil 5.10. Perde Duvarlı Bir Bent Zeminine İlişkin Akım Ağı

eş potansiyel çizgileri çizilir. Akım ağı gözden geçirilerek gerekli düzeltmeler yapılır.

Şekil 5.10'da görülen bağlamada su soldan sağa doğru beton bağlama altından sızarken yatay ve düşey yönde hareket etmektedir. Gösterilen akım ağı 5 akım kanalından oluşmaktadır. Toplam hidrolik yük kaybı (Δh) 10 adımda (11 tane eş potansiyel çizgisi gözlenmiştir) gerçekleşmektedir. Birbirini izleyen eş potansiyel çizgileri arasındaki hidrolik yük kaybı $\Delta h/10$ olup, akım ağı boyunca sabittir. Herhangi bir K noktasında hidrolik eğimi bulmak için o noktanın solundaki ve sağındaki eş potansiyel çizgileri boyunca mevcut toplam hidrolik yük farkını iki çizgi arasındaki uzaklığa bölmek gerekir ($h_k = 0,10 \Delta h/b$). Eş potansiyel

çizgilerinin birbirine yaklaştığı bölgeler hidrolik eğimin ve akım hızının arttığı bölgeler olmaktadır. Şekil 5.10'da eş potansiyel çizgilerinin geçtiği noktalardaki toplam hidrolik yükler gösterilmiştir. Ana noktaların hidrolik yükü enterpolasyonla bulunabilir ($h_k = 0,45 \Delta h$). Aynı noktadaki su basıncı da, toplam hidrolik yük ile yerçekim yükü farkı suyun birim hacim ağırlığı ile çarpılarak elde edilebilir. Şekil 5.10'da sağdaki su yüzeyi referans düzlemi alınır K noktasının düzeyi $-Z_k$ olmaktadır. Bu durumda su basıncı aşağıdaki eşitlikle bulunabilir.

$$U_k = [h_k - (-Z_k)] \gamma_w = (h_k + Z_k) \gamma_w$$

Bağlamanın altında birim zamanda iki akım çizgisi arasında sızan su miktarı aşağıdaki eşitlikle bulunabilir.

$$\Delta q = k \cdot a \cdot \frac{\Delta h / N_d}{b}$$

Eşitlikte;

q = Birim genişlikten sızan su miktarı (m^3/s , birim uzunluk için),

k = Zeminin permeabilite katsayısı (m/s),

a = Herhangi bir noktada iki akım çizgisi arasındaki uzaklık (m),

b = Eş potansiyel çizgileri arasındaki uzaklık (m),

N_d = Hidrolik yük kaybı adım (düşüm) sayısı,

Δh = Hidrolik yük (m).

Akım ağı boyunca a/b oranı sabit kalacağından toplam sızma miktarını, N_f sayısında akım kanalında oluşan bir akım ağı için, aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

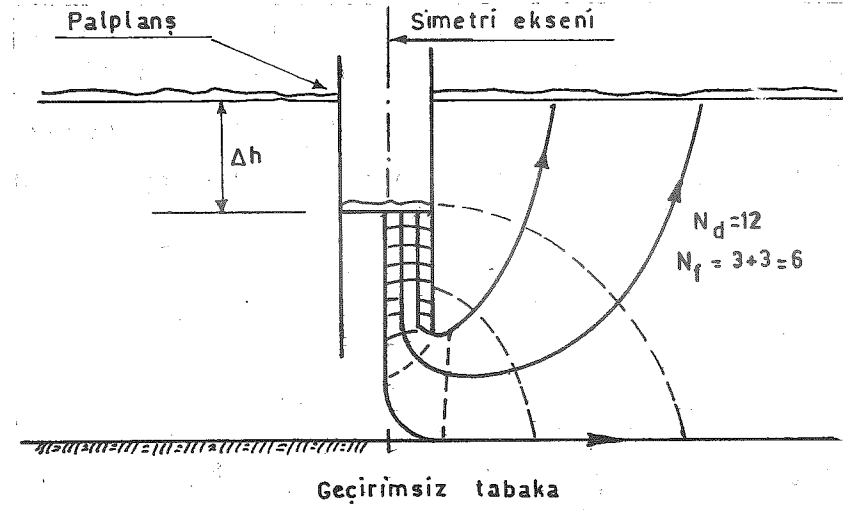
$$q = k \left(\frac{a}{b} \right) \frac{N_f}{N_d} \Delta h$$

Akım ağları kare şeklinde çizileceğinden $\frac{a}{b}$ oranı bire eşit olur. Bu durumda toplam sızma miktarı

$$q = k (\Delta h) \frac{N_f}{N_d}$$

şekline dönüşür.

Bazı problemlerde simetriden yararlanılarak akım ağının yarısını çizmekle yetinilebilir. Şekil 5.11'de kenarları palplanşlar ile tutulmuş bir hendeğe sızan su problemi için akım ağı gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Bir Palplanş Perdesi Altından Sızan Su Problemi İçin Akım Ağı

5.3.1.1. Toprak Baraj Gövdesinden Sızan Su Miktarının Belirlenmesi

Toprak baraj gövdesinden sızan su miktarının belirlenebilmesi için öncelikle akım ağının çizilmesi gerekir. Akım ağını çizebilmek için, sızma bölgesinin sınır koşullarının bilinmesi zorunludur. Barajın memba yüzü eşpotansiyel, tabanı da akım çizgisi olarak alınır. Sızma bölgesinin diğer bir sınır alanı da üst akım çizgisi, aşağıda açıklanan koşullar göz önüne alınarak belirlenir (Şekil 5.12).

- Üst akım çizgisi bir parabolüdür.

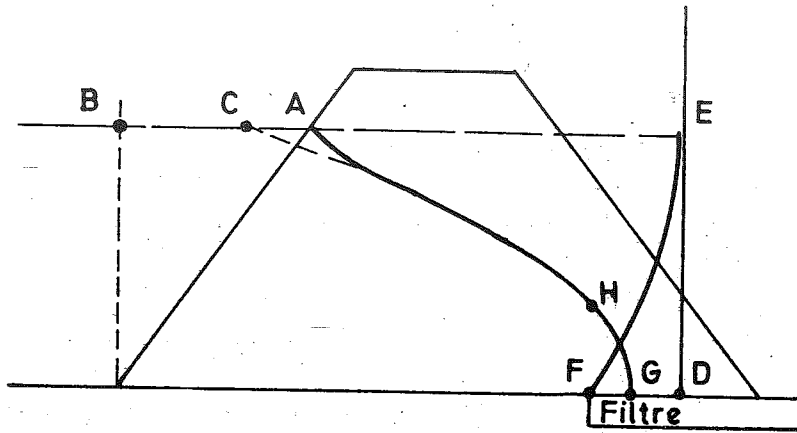
- Bu parabolün F odağı topuk filtresi su gelim ucu ile temel yüzeyinin kesiştiği noktadır (F noktası).

- Parabol C noktasından geçer. Bir toprak dolgusunda C'nin yeri

$$AC = 0,3 AB' \text{ dir.}$$

- F odaklı bu parabolün doğrultmanı CF yarı çaplı çemberin düşey DE teğetidir.

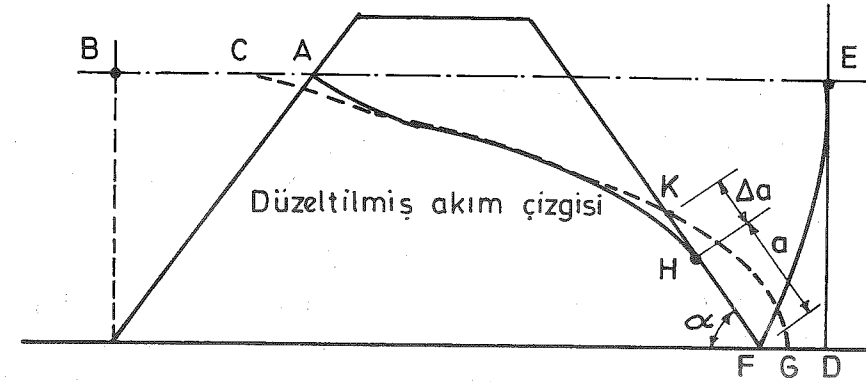
Bu değerler bilindikten sonra istenen üst akım çizgisi olan parabol DE doğrultmanına ve F noktasına eşit uzaklıkta olan noktanın geometrik yeridir. Bu koşullarda parabolün C noktası 0,3 AB kadar alınarak işaretlenir daha sonra CF yarıçaplı çember ve bunun DE teğeti çizildikten sonra $FG = \frac{1}{2} \cdot FD$ alınarak G noktasının yeri bulunur. Parabolün diğer noktaları ise F noktası ve DE



Şekil 5.12. Üst Akım Çizgisinin Elde Edilmesi

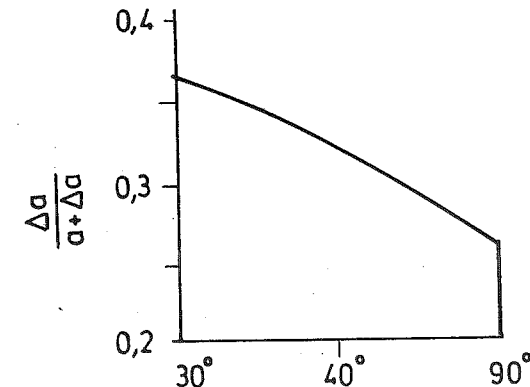
doğrusuna eşit uzaklıkta alınarak bulunur ve bu noktalardan geçen parabol çizilir. Bu teorik parabolün su gelim ucu A'dan geçerek dolgu yüzeyine dik olacak şekilde düzeltilir. Daha sonra diğer akım çizgileri ile eş potansiyel çizgileri çizilerek akım ağı oluşturulur.

Geçirimsiz temel üzerine oturtulmuş topuk filtresi olmayan bir dolguda üst akım çizgisi (Şekil 5.13), su gidim yüzeyini F'den a kadar bir uzaklıkta keser. Akım çizgilerinin F odağı dolgu eteğinin



Şekil 5.13. Topuk Filtresiz Dolguda Üst Akım Çizgisinin Elde Edilmesi

temeli kestiği noktadır. Topuk filtreli dolgularda olduğu gibi C noktasının yeri çizilebilir. Parabolün su gelim ucu A noktası ile birleştirilir. Teorik parabolün su gidim tarafı dolgu su gidim yüzeyine F noktasından $(a+\Delta a)$ kadar uzaklıkta bir K noktasında keser. Gerçekte ise bunun F'den a kadar uzakdaki H noktasından geçmesi gerekir. Sözü edilen a ve Δa oranında mansap şevinin eğim açısına bağlı bir ilişki bulunmaktadır (Şekil 5.14). Bu ilişkiden yararlanılarak a'nın değeri ve buna ilişkin olarak H'nın yeri bulunur.



Şekil 5.14. Dolgu Şev İle Δa ve a Arasındaki İlişki

Daha sonra parabolün su gidim ucu H'den geçecek şekilde düzeltilerek akım ağı oluşturulur.

5.3.1.2. Anizotropik Zeminde Akım Ağının Çizimi

Doğal zemin tabakalarında yatay ve düşey yöndeki permeabilitelerin birbirinden farklı olabileceği bilinmektedir. Genellikle yatay yöndeki permeabilite (k_h) düşey yöndeki zemin permeabilitesinden (k_v) daha büyüktür. Bu şekildeki anizotropik koşullarda, akım ağının çizilebilmesi için, yatay ve düşey doğrultularda ölçüğü farklı bir kesit çizme yoluna başvurulmaktadır. Yatay uzunluklar, değiştirme faktörü olan $(k_v/k_h)^{1/2}$ ile çarpılarak şekil yeniden çizilir. Bu durumda, sızan su miktarının hesaplanmasında, permeabilite katsayısı olarak, eşdeğer permeabilite katsayısı ($k_e = \sqrt{k_h \cdot k_v}$) kullanılarak aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$q = \Delta h \frac{N_f}{N_d} \sqrt{k_h \cdot k_v}$$

6. FİLTRELER

Herhangi bir mühendislik yapısında var olması tehlike yaratabilecek veya olumsuz etkileri bulunan suyu, sisteme zarar vermeden uzaklaştıran yapay süzgeçlere filtre denir.

Toprak barajlarda su sızması problemlerinde zemin suyunda basınç artışlarını kontrol etmek için, su geçirgenliği yüksek drenaj tabakalarının kullanılması uygun olmaktadır. Bu şekilde zemin içerisinde su hareketi kısıtlanmadan zemin içinde hidrostatik basınçların artışı incelenebilmektedir. Drenler çevresinde su basınçları önemli ölçüde düşer. Drenaj tabakalarının, borulanmaya ve tıkanmaya yol açmayacak şekilde planlanması gerekir. Bu nedenle drenaj tabakaları aşağıdaki koşulları sağlamalıdır.

- Dren zeminindeki boşluklar, drene olan zeminin ince tanelerinin dren içine sızması ve tıkanmaya yol açmayacak şekilde seçilmeli,

- Dren boşlukları, drene olan suyu serbestçe geçirebilmelidir.

Yukarıda değinilen iki koşul birbirleriyle çelişmektedir, her iki koşulu göz önüne alarak optimum bir çözümün elde edilmesi gerekir.

Homojen bir gölet gövdesinde mansap eteğine konulacak filtre şev üstüne çıkacak suyu boşaltarak "freatik çizginin" gövde içinde bitmesini sağlar. Böylece borulanmayı önlediği gibi mansap şevini doymun durumdan çıkartıp stabilizeyi artırır.

Gölet gövdesi ile killi olan temel arasına konulacak filtre temelın drenajını sağlayarak temelın oturması kolaylaştırılır. Aynı zamanda içteki hidrostatik basıncı azaltarak gövdenin stabilitesini artırır.

Drenaj çalışmalarında kullanılacak filtre, geçirimli bölge ile geçirimsiz bölge arasına yerleştirildiğinde drenaja yardım eder ve ince malzemenin geçirimli bölgenin iri malzemesi arasına sürüklenmesini engeller.

Filtreler akım yönünde tane boyutları büyüyen uygun kum ve çakıl tabakalarından oluşturulur. Çalışabilmeleri için permeabiliteleri ana malzemeye oranla büyük olmalı ayrıca granülometreleri ana malzeme incesinin kendi boşluklarını tıkamayacak şekilde olmalıdır. Filtreler yapılarına göre iki gruba ayrılırlar.

- Üniform granülometreli filtreler,
- Yaygın granülometreli filtreler,

a) Üniform granülometreli filtreler : Granülometri eğrileri diktir. Dolayısıyla tane boyutları çok dar sınırlar arasında değişir. Ortalama tane boyu boyutundaki elemanları % olarak esas malzemenin % 50' sine denktir.

Filtre işlevini yerine getirebilmesi için aşağıdaki bağıntının sağlanması gerekir.

$$5 < \frac{F_{50}}{Z_{50}} < 10$$

Eşitlikte;

F_{50} = Filtre malzemenin % 50 'sinin geçtiği elek açıklığı,

Z_{50} = Filtrenin temas halinde olacağı zemin örneğinin % 50'sinin geçtiği elek açıklığıdır.

Üniform granülometreli filtreler uygun seçildiğinde uzun ömürlü olurlar ise de hazırlanması zaman alıcı ve masraflı olduğundan uygulamada az kullanılmaktadır.

b) Yaygın granülometreli filtreler : Malzemenin granülometrisi yaygın ve tane boyutları daha büyük bir aralıkta değişir. Filtre malzemesi özellikleri aşağıdaki bağıntılar ile belirlenir.

$$5 < \frac{F_{50}}{Z_{50}} < 58$$

$$\frac{F_{15}}{Z_{85}} < 5$$

$$5 < \frac{F_{15}}{Z_{15}} < 40$$

F_{50} = Filtre malzemesinin % 50'sinin geçtiği elek açıklığı,

F_{15} = Filtre malzemesinin % 15'inin geçtiği elek açıklığı,

Z_{50} = Zemin malzemenin % 50'sinin geçtiği elek açıklığı,

Z_{15} = Zemin malzemenin % 15'inin geçtiği elek açıklığı.

Bu bağıntılardan $5 < \frac{F_{15}}{Z_{15}} < 40$ sağlanması filtre malzemesi

boşluklarının zemin incesi ile dolmayacağını belirtir. $\frac{F_{15}}{Z_{85}} < 5$ bağıntısının sağlanması ise filtre malzemesinin temas halinde olduğu zemine nazaran daha geçirgen olduğunu gösterir.

Genellikle elde mevcut ana zemin malzemesine göre filtrenin yaygın veya üniform granülometreli olacağına karar verilir. Bunu sınırlandıran unsur da filtrenin granülometrisidir. Uygulamada filtreler genellikle birkaç tabakadan meydana gelebilirler. Genellikle yaygın granülometreli filtreler üniform granülometreli filtreler göre daha ucuzdur. Ancak yerleştirilirken elemanların iri ve ince kısmının birbirinden ayrılması tehlikeli sonuçlar yaratabilir. Her tabaka gerekli olduğu şekilde sıkıştırılmalı ve filtre tabakalarının kalınlığı 25 cm'den az olmamalıdır. Kalınlığın seçilmesinde diğer bir faktör de filtrenin drenaj kapasitesinin, su yapısından sızacak sudan fazla olmasıdır.

Drenaj çalışmalarında dren borularının çevresine filtre konulmasının amacı, borulara sediment girmesini önlemek ve suyun, boruların içine rahatça akmasını sağlamaktır. Saman, sap, yonga, ağaç parçacıkları ve mısır koçanları filtre malzemesi olarak kullanılabilir ise de ömrü kısa olduğundan tane büyüklükleri iyi bir dağılım gösteren çakıl tercih edilmelidir. Filtre malzemesinin drenajı yapılan toprağa göre daha geçirgen olması gerekir. Filtre malzemesi taneleri arasındaki boşluk, toprak zerreciklerinin filtre malzemesinden geçerek borulara girmesine engel olacak kadar küçük olmalıdır. Filtre malzemesinin boşluklarının büyük olması, filtrenin tıkanmasına veya boru hattı boyunca çöküntülere neden olabilir. Boru etrafına konulacak minimum filtre kalınlığı 8-10 cm olmalıdır.

İyi bir filtre malzemesi seçmeden önce drenajı yapılacak ana toprağın mekanik analiz neticesi granülometri eğrileri belirlenir. Ana toprak, dren borularının konulacağı derinlikte bulunan topraktır. Ana topraktan örnekler alınarak mekanik analize tabi tutulur. Belirli bir ana toprakta kullanılacak olan filtre malzemesi için limitler belirlenir. Bu limitlerin başta belirtilen kriterlere uyması gereklidir. Genel olarak filtre malzemesinin zerre büyüklüğü dağılım eğrisi yaklaşık ana toprak zerre büyüklüğü

zerre büyüklüğü 4 cm'den büyük olmalı ve 200 No.lu elekten geçen kısmı da % 5'den fazla olmamalıdır.

Maksimum zerre büyüklüğünün sınırlandırılması, boruların sarsılması ve yerlerinden oynamalarına, 200 no.lu elekten geçen malzeme yüzdesinin sınırlandırılması ise ince malzemenin borulara girmesine engel olmak içindir.

Kullanılan kum ve çakıl ocaklarından devamlı olarak örnekler alınarak tane çapı dağılım eğrilerinin çizilmesi ve bu granülometri eğrilerinin ana zemin tane dağılım eğrileri limitleri ile karşılaştırılması sonucu, filtre malzemesi olarak kullanılabilir. Bu şekilde en uygun filtre malzemesi seçilebilir.

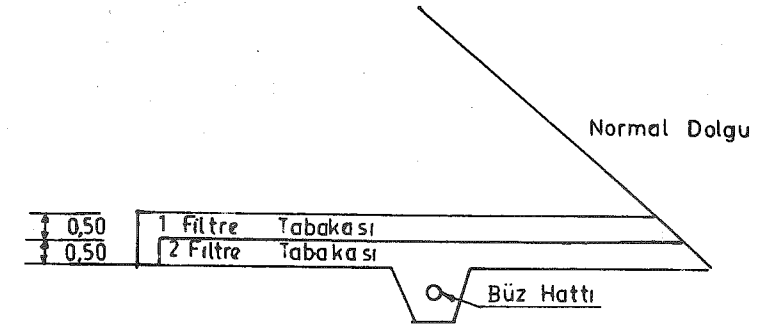
Hava ve su tarafından ayrışma uğramış, içinde organik ve yabancı madde bulunmayan sert ve temiz kum ve çakıl karışımı aynı zamanda arzu edilen tane çapı dağılımına sahipse, filtre malzemesi olarak kullanılabilir. Böyle bir filtre malzemesi Çizelge 6.1'de verilen dağılıma sahip olması gerekir.

Çizelge 6.1. Uygun Filtre Malzemesi

Elek No	Geçen Malzemenin %'si
2	100
No : 4 (4,76 mm)	95-100
No : 16	45-80
No : 50	10-30
No : 100	2-10
No : 200 (0,074 mm)	0-5

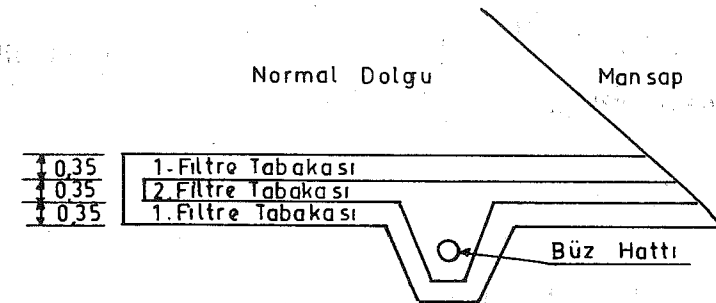
Filtrenin gövdedeki konumu ve gövde içine doğru derinliği göletteki en fazla su yükü altında freatik hat çizilip ondan sonra proje hazırlayıcı tarafından hesaplanır. Pratik olarak bu gövde eteğinden içeri doğru gövde yüksekliğinin 3 katı uzaklığı olarak alınabilir. Uygulamada tabakaların yerleştirilmesi farklı şekillerde olmaktadır.

Filtre tek taraflı çalışarak, sadece gövdeden sızacak suyu boşaltacaksa Şekil 6.1'de görüldüğü gibi yerleştirilir.



Şekil 6.1. Tek Taraflı Çalışan Filtre

Filtre çift taraflı çalışarak, hem gövdeden hem de tabandan kapilarite ile yükselecek suyu boşaltacaksa Şekil 6.2'deki gibi yerleştirilir.

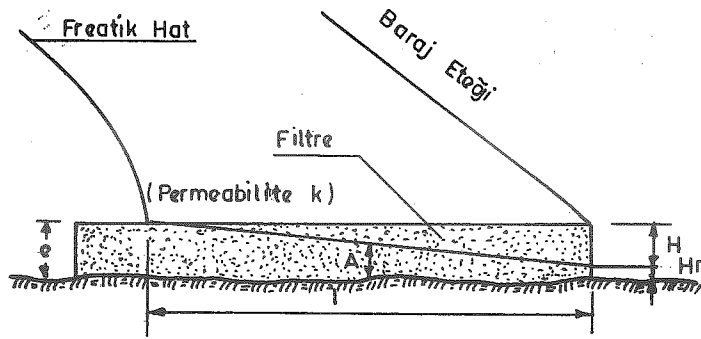


Şekil 6.2. Çift Taraflı Çalışan Filtre

Her tabaka yerleştirildikten sonra tokmakla sıkıştırılıp stabil bir duruma getirilmelidir. Ortalama filtre kalınlığı 1 m'den az olmamalıdır.

6.1. Filtre Kalınlığının Belirlenmesi

Filtre tabakasının kalınlığı Darcy Yasasına göre hesaplanır. Filtrenin boşaltım kapasitesi barajdan sızacak debinin iki katını aşacak şekilde alınır. Yatay olarak hazırlanmış bir filtrede (Şekil 6.3), filtre kalınlığı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır.



Şekil 6.3. Yatay Filtre Kalınlığı Hesabı

$$q' = k \cdot \frac{H}{L} \cdot A$$

$H = e - H_r$ $A = \frac{e + H_r}{2}$ bağıntıları ve $q' = 2q$ koşulu dikkate alındığında Darcy eşitliği,

$$e^2 - H_r^2 = 4 \frac{q \cdot L}{k} \text{ olur.}$$

İlk aşamada $H_r = 0$ kabul edildiğinde filtre kalınlığı,

$$e = 2 \sqrt{\frac{q \cdot L}{k}} \text{ eşitliği yardımıyla bulunur.}$$

Eşitliklerde;

e = Filtre kalınlığı (m),

L = Filtre uzunluğu (m),

H_r = Göletin eteğinden çıkacak suyun yüksekliği (m),

A = Islak kesitin ortalama değeri (1 m genişlik için) (m^2),

q' = Filtrenin drenaj kapasitesi (m^3/s),

q = Kretin 1 m uzunluğu için göletten sızan suyun debisi olarak gösterildiğinde Darcy Kanununa göre sızma (m^3/s),

k = Permeabilite katsayısı (m/s).

Bu şekilde belirlenen filtre kalınlığı istenilen değerden büyük çıkmış ise filtrenin drenaj kapasitesini büyütecek tedbirlere başvurulur. Örneğin filtre tabakaları içerisine, drene olan suları barajın eteğindeki genel bir toplayıcıya sevkeden delikli drenler yerleştirilir. Bu drenlerin galvanizli çelikten delikli borular olması tercih edilmektedir. Kırılma tehlikesinden dolayı şişmiş kil boruları veya delikli veya geçirimli beton borular kullanılmamalıdır.

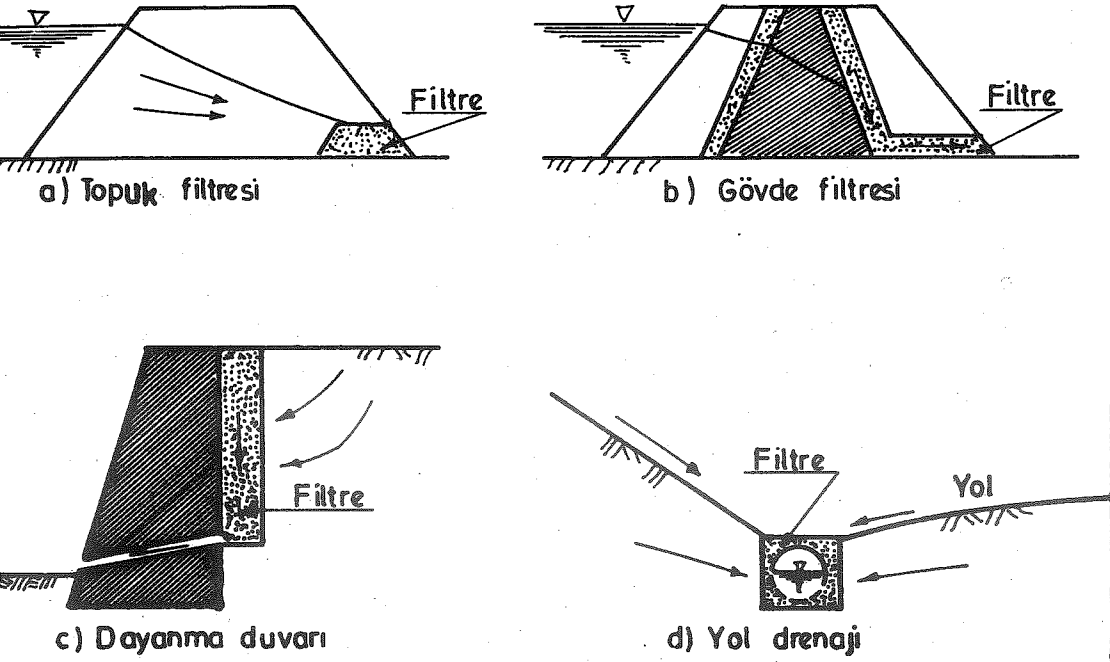
Drenaj işlerinde kullanılacak filtrenin her bir tabakasının kalınlığı 8 cm'den, gölet gövdesinde kullanılacak yatay filtrenin toplam kalınlığı 100 cm, tabakalı ise her bir tabakanın kalınlığı 25 cm'den az olmamalıdır.

İyi bir filtre teşkilinde kullanılacak tabakalardaki malzemelerin özellikleri Çizelge 6.2'de belirtildiği sınırlar arasında olmalıdır.

Çizelge 6.2. Filtre Malzemelerinin Özellikleri

Tabakalar	Tanelerin % 15'inin üst limiti (çapı) mm	Permeabilite katsayısı (cm/s)
Gövde (ana zemin)	0,01 mm	6×10^{-5} cm/s
İnce kum (1. tabaka)	0,09 mm	750×10^{-4} cm/s
Kaba kum (2. tabaka)	0,81 mm	1250×10^{-2} cm/s
Çakıl (3. tabaka)	7,3 mm	çok büyük

Filtrelerin toprak-su yapılarında değişik uygulamaları bulunmaktadır. Şekil 6.4'te değişik filtre uygulamaları gösterilmiştir.



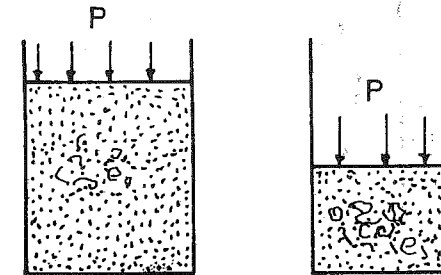
Şekil 6.4. Değişik Filtre Uygulamaları

7. ZEMİN GERİLMELERİ

Zeminler sürekli olarak bir yükün etkisi altında bulunurlar. Yüke ve zamana bağlı olarak zeminlerin özelliklerinde bazı değişimler olur. Yük zemin üzerinde belirli bir değerde sabit kaldığı gibi zamanla artan bir yapıda da olabilir. Bu bölümde zemin üzerine gelen yükler nedeniyle zeminde ortaya çıkan gerilmeler ve değişimler açıklanmaya çalışılacaktır.

7.1. Etkili Gerilme, Nötr Gerilme ve Boşluk Basıncı

Silindir şeklindeki bir kap içinde kuru zemine düzgün yayılı bir P yükünün uygulanması durumunda (Şekil 7.1) belirli bir süre sonra zeminde bir sıkışma meydana gelir. Zemindeki bu sıkışma, daha az hacime daha fazla taneciğin yerleştirilmesini ifade eder. Bu sıkışma sonucu zeminin başlangıçta e_0 olan boşluk oranı sıkışma süresi sonunda e_1 gibi daha küçük bir değer alır. Bu şekilde sıkışan zemin, daha sağlam bir yapı kazanır. Zeminin sıkışmasına ve sağlam bir yapı kazanmasına neden olan yükten doğan gerilmeye etkili gerilme (efektif gerilme) denir.



Şekil 7.1. Zeminin Yük Altında Sıkışması

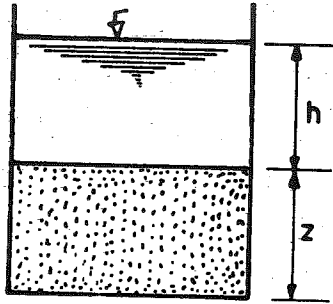
Mekanikte gerilme, birim alana uygulanan yük şiddeti olarak tanımlandığından etkili gerilme aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

$$\bar{P} = \frac{P}{A}$$

Eşitlikte;

$$\begin{aligned}\bar{P} &= \text{Efektif gerilme (kg/cm}^2\text{)}, \\ P &= \text{Uygulanan yük şiddeti (kg)}, \\ A &= \text{Kesit alanı (cm}^2\text{)}.\end{aligned}$$

Şekil 7.1'de verilen zemin örneğinin üzerine h yüksekliğinde su doldurulmuş olsun (Şekil 7.2). Bu su zemine bir basınç ($P = \gamma h$) uygular. Ancak bu basınç nedeni ile zeminin boşluk oranında ve hacminde bir değişme olmaz. Diğer bir anlatımla zemin bu yük altında sıkışmaz. Zemin özelliklerinde bir değişme oluşturmayan gerilmelere nötr gerilme denir. Nötr gerilme atmosfer basıncına eşitse sıfır kabul edilir. Şekil 7.2'de zemin içinde herhangi bir kesitteki nötr gerilme aşağıdaki eşitlikle açıklanabilir.



Şekil 7.2. Nötr Gerilme

$$u_w = \gamma_w \cdot h_w$$

Eşitlikte;

$$\begin{aligned}u_w &= \text{Nötr gerilme (kg/cm}^2\text{)}, \\ \gamma_w &= \text{Suyun özgül ağırlığı (kg/cm}^3\text{)}, \\ h_w &= \text{Su yüzeyinden göz önüne alınan kesite kadar olan derinlik (m)}.\end{aligned}$$

Nötr basınç, zemin tabanına zeminin boşluklarındaki su yardımıyla aktarılır. Oysa, efektif basınç zemin taneciklerinin birbirine intikal ettirilmesiyle aktarılır. Bu nedenle zeminin herhangi bir kesitine etkiyen toplam basınç nötr ve efektif gerilmeler olarak iki kısma ayrılır.

$$P = \bar{P} + u_w$$

Eşitlikte;

$$\begin{aligned}\bar{P} &= \text{Toplam basınç (kg/cm}^2\text{)}, \\ P &= \text{Efektif gerilme (kg/cm}^2\text{)}, \\ u_w &= \text{Nötr gerilme (kg/cm}^2\text{)}.\end{aligned}$$

Şekil 7.2'de su altındaki zeminde örnek tabanındaki efektif ve nötr gerilmeler hesaplanırsa;

$$\text{Tabandaki piezometrik su seviyesi : } h+z$$

Zemin örneğinin doygun birim hacim ağırlığı (γ_d), su altındaki birim hacim ağırlığı (γ_A) olduğunda nötr ve toplam gerilmeler aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilir :

$$\begin{aligned}u_w &= (h+z) \gamma_w \\ P &= h\gamma_w + z\gamma_d \\ P &= \bar{P} + u_w \\ \bar{P} &= P - u_w \\ \bar{P} &= (h\gamma_w + z\gamma_d) - (h+z) \gamma_w \\ \bar{P} &= h\gamma_w + z\gamma_d - h\gamma_w - z\gamma_w \\ \bar{P} &= z\gamma_d - z\gamma_w \\ \bar{P} &= z(\gamma_d - \gamma_w) \quad (\gamma_A = \gamma_d - \gamma_w) \\ \bar{P} &= z\gamma_A\end{aligned}$$

Zeminin tamamen kuru olması durumunda boşluklar tamamen hava ile dolu olacağı ve havanın sıkışabilirliği zemin iskeletine göre çok daha fazla olduğu için, efektif gerilme toplam gerilmeye eşit olacaktır.

Toplam, efektif ve nötr gerilmeler arasındaki bağıntı zemin mekaniğinin önemli bir bağıntısı olup, aşağıdaki eşitlikte ifade edilmektedir.

$$\sigma = \sigma' + u_w$$

Eşitlikte;

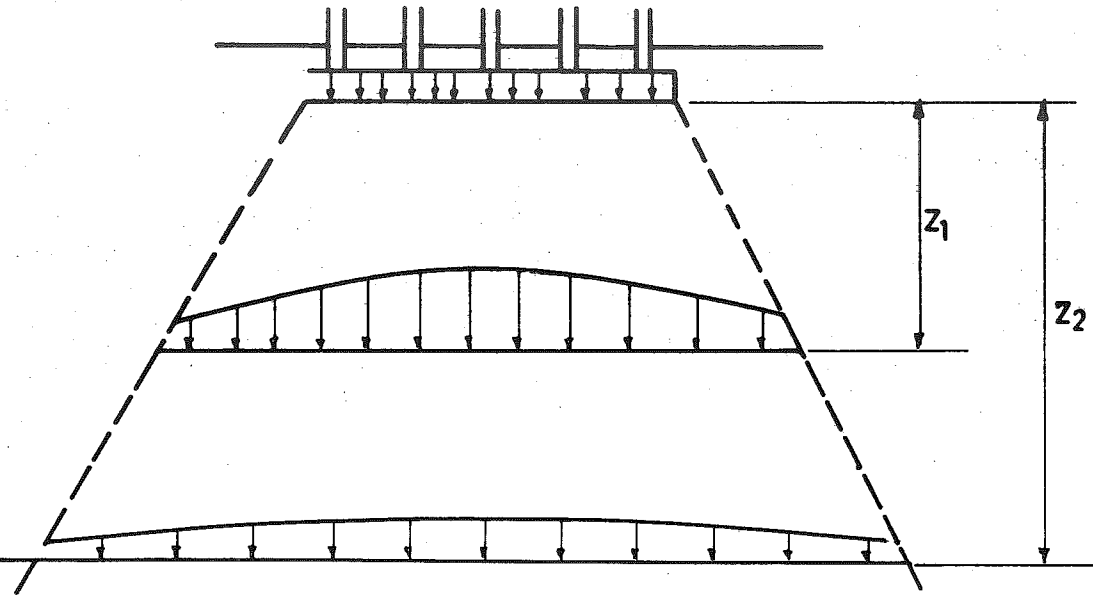
σ = Toplam gerilme (kg/cm²),

σ' = Efektif gerilme (kg/cm²),

u_w = Nötr gerilme (kg/cm²).

7.2. Yüzey Yüklemelerin Yolaçtığı Düşey Gerilmeler

Uygulanan bir yük, zemin kitlesinin bütün noktalarından geçen düşey düzlemler üzerinde bir gerilme artışı meydana getirir. Meydana gelen gerilmeler, yükün hemen altında bulunan yatay düzlemlerde en büyük bir değerde bulunmaktadır (Şekil 7.3). Buna karşılık uygulama noktasından uzaklaştıkça gerilme azalmaktadır.



Şekil 7.3. Bir Temel Altında Meydana Gelen Düşey Gerilme Artışları

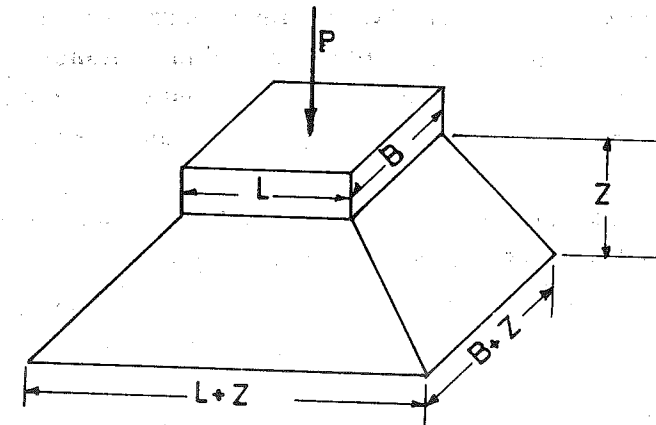
Yukarıda belirtilen durumlarda, herhangi bir yatay kesitin birim alanda meydana gelen gerilme artışlarının toplamı uygulanan yüke eşit olacaktır.

Yük nedeniyle alınan gerilmelerin değişimini belirleyebilmek için, uygulanan yükün şiddetinin, yük uygulanan alanın boyutlarının, şeklinin ve zemin özelliklerinin bilinmesi gerekir.

7.2.1. Gerilmelerin Belirlenmesi

Yatay bir zemin üzerine bir P yükü uygulandığında zemin içerisindeki gerilmeler artar. Uygulanan yük altındaki zeminin, bireysel kolonlardan ibaret olduğu varsayıldığında yük, sadece hemen altına isabet eden kolonlar tarafından taşınacak diğer kolonlara hiçbir etkisi olmayacaktır. Oysa, zemin birbirine elastik bir şekilde yapıştırılmış kolonlar gibidir. Bir noktadan uygulanan yük zemin kütlesi içerisinde derinlik arttıkça yatay yönde dağılarak alttaki tabakalara intikal eder.

Genişliği B ve uzunluğu L olan bir temel üzerine uygulanan bir P yükü altında zeminde ortaya çıkan gerilme, kenarlarının eğimi 2:1 olan pramit şeklinde bir dağılım gösterir (Şekil 7.4).



Şekil 7.4. Zemin İçinde Gerilme Artışı

Herhangi bir z derinliğindeki düşey gerilmelerin şiddeti aşağıdaki eşitlikle belirlenebilir.

$$\sigma_z = \frac{P}{(L+z)(B+z)}$$

Temel yüzeyindeki gerilmenin $P/L+z = q$ değeri eşitlikte konursa, belirli bir derinlikteki oluşan gerilme aşağıda verilen ilişkiye göre ifade edilebilir.

$$\sigma_z = q \cdot \frac{LB}{(L+z)(B+z)}$$

Ancak, Şekil 7.4'de verilen piramidin dışında kalan noktalarda ortaya çıkan gerilme artışları saptanamaz. Yüzeyde meydana gelen gerilmenin dağılımı temelin boyutlarına ve zemin ile temel arasındaki taban basıncının dağılımına bağlıdır.

Yukarıda belirtilen sakıncaları gidermek amacıyla Boussinesq adlı bir araştırmacı, temel zemininde meydana gelen gerilme artışlarını elastisite teorisine göre belirtmiştir. Boussinesq, üst yüzü yatay, elastik izotrop, homojen ve bütün doğrultularda uzanan sonsuz bir düzlem özelliğine sahip zemin içerisindeki gerilmeleri, matematik ilişki ile ifade etmiştir. Söz konusu varsayımların hepsini içeren zeminlere hemen hemen rastlanmaz. Ancak birçok killer, ileri sürülen varsayımlara oldukça yakın bulunur ve bu nedenle zemin yüzünden oldukça derinlerde bulunan noktaların gerilmelerinin saptanmasında Boussinesq tarafından verilen ilişki uygulanabilir.

Tekil bir yük altında, elastik ortamda gerilme dağılışı, Boussinesq tarafından 1885 de hesaplanmıştır. Q tekil yükü altında z derinliğinde ve r yatay uzaklıkta bir noktadaki düşey gerilme dağılımını

$$\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi z^2} \left[\frac{1}{1 + (r/z)^2} \right]^{5/2} = \frac{Q}{z^2} \cdot I_p$$

bağıntısından elde edilebileceğini göstermiştir. Burada I_p nokta kuvvet için tesir katsayısı olup,

$$I_p = \frac{3}{\pi} \left[\frac{1}{1 + (r/z)^2} \right]^{5/2}$$

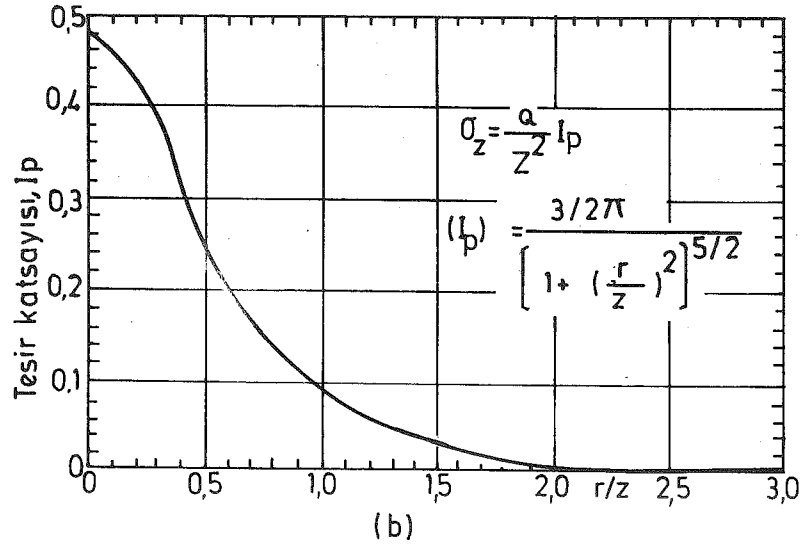
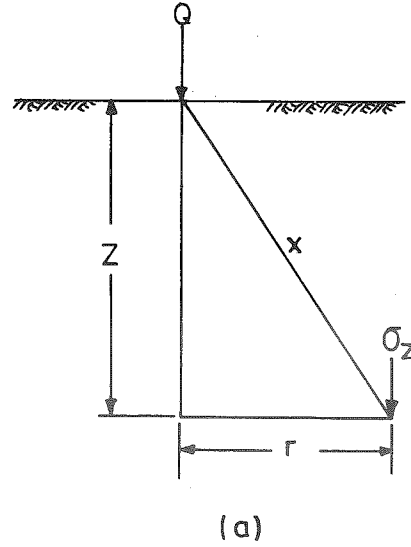
şeklinde ifade edilebilir. Tesir katsayısının değerleri değişik (r/z) oranları için çizelgeler veya eğriler şeklinde gösterilebilir (Çizelge 7.1, Şekil 7.5a, b). Şekil 7.5 a'da çözülen sistemin geometrisi ve Şekil 7.5 b'de yukarıdaki eğri ile Boussinesq çözümünden elde edilen I_p değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. Tekil Yük İçin Tesir Katsayıları

r/z	I	r/z	I	r/z	I
0,00	0,478	0,80	0,139	1,60	0,020
0,10	0,466	0,90	0,108	1,70	0,016
0,20	0,433	1,00	0,084	1,80	0,013
0,30	0,385	1,10	0,066	1,90	0,011
0,40	0,329	1,20	0,051	2,00	0,009
0,50	0,273	1,30	0,040	2,20	0,006
0,60	0,221	1,40	0,032	2,40	0,004
0,70	0,176	1,50	0,025	2,60	0,003

Elastisite teorisinden yararlanarak elde edilen çözümlerde, düşey gerilme dağılımlarının zeminin malzeme özelliklerinden bağımsız olmasıdır. Düşey gerilmeler sadece uygulanan yükün şiddetine ve geometrik parametrelere bağlı olarak değişmektedir.

Yapılardan zemine aktarılan yükler genellikle temeller vasıtası ile aktarıldığı için, nokta yük için elde edilen gerilme dağılımları birçok inşaat mühendisliği probleminde gerçekçi olmamaktadır. Fakat, nokta yük çözümlerinin entegrali alınarak yayılı yüklerin zeminlerde yol açacağı gerilme dağılımlarını bulmak mümkün olmaktadır. Bu yöntemle, biçimi geometrik olarak

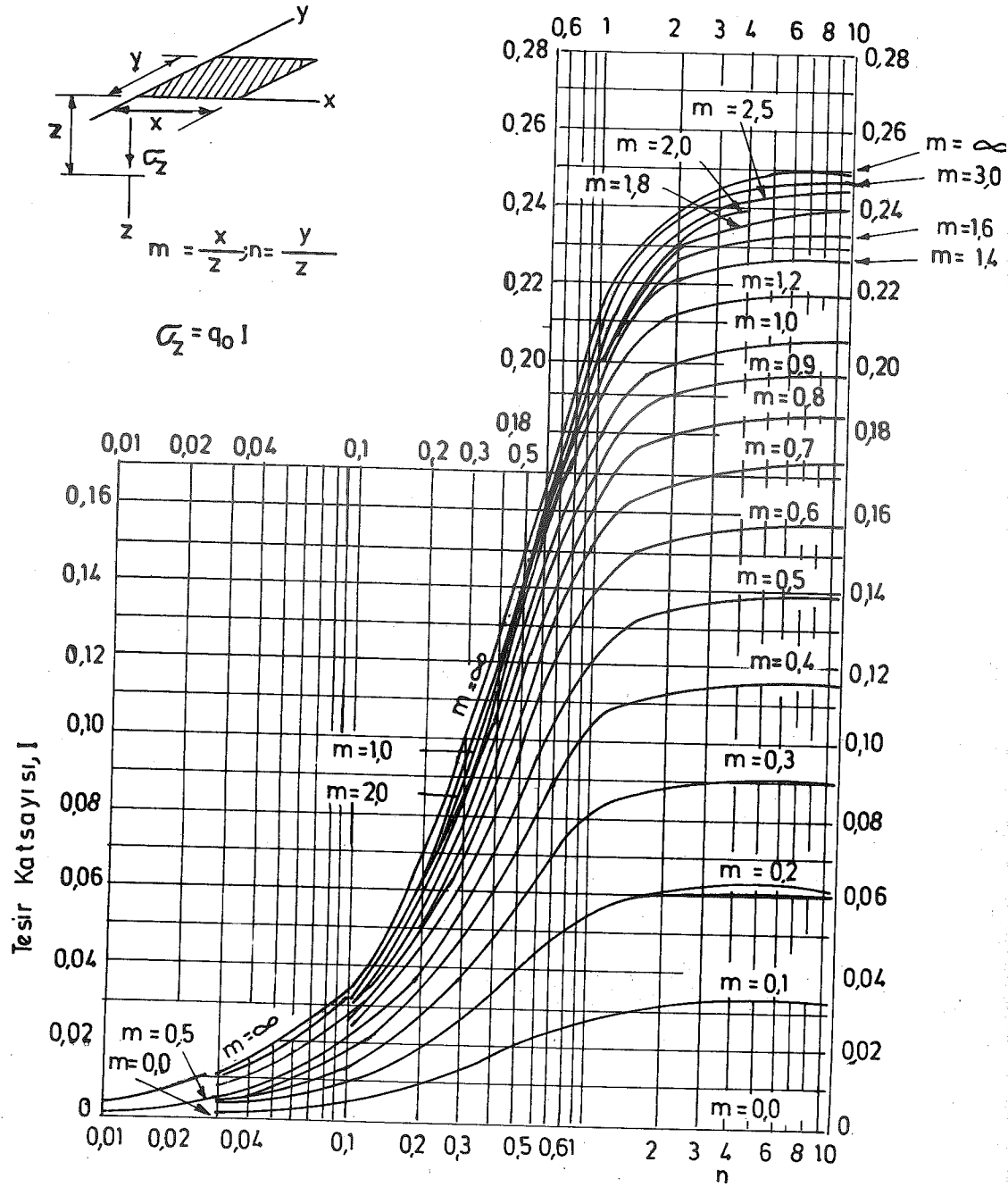


Şekil 7.5. Tekil Yük Altında Gerilme Dağılışı ve Tesir Katsayısı Diyagramı

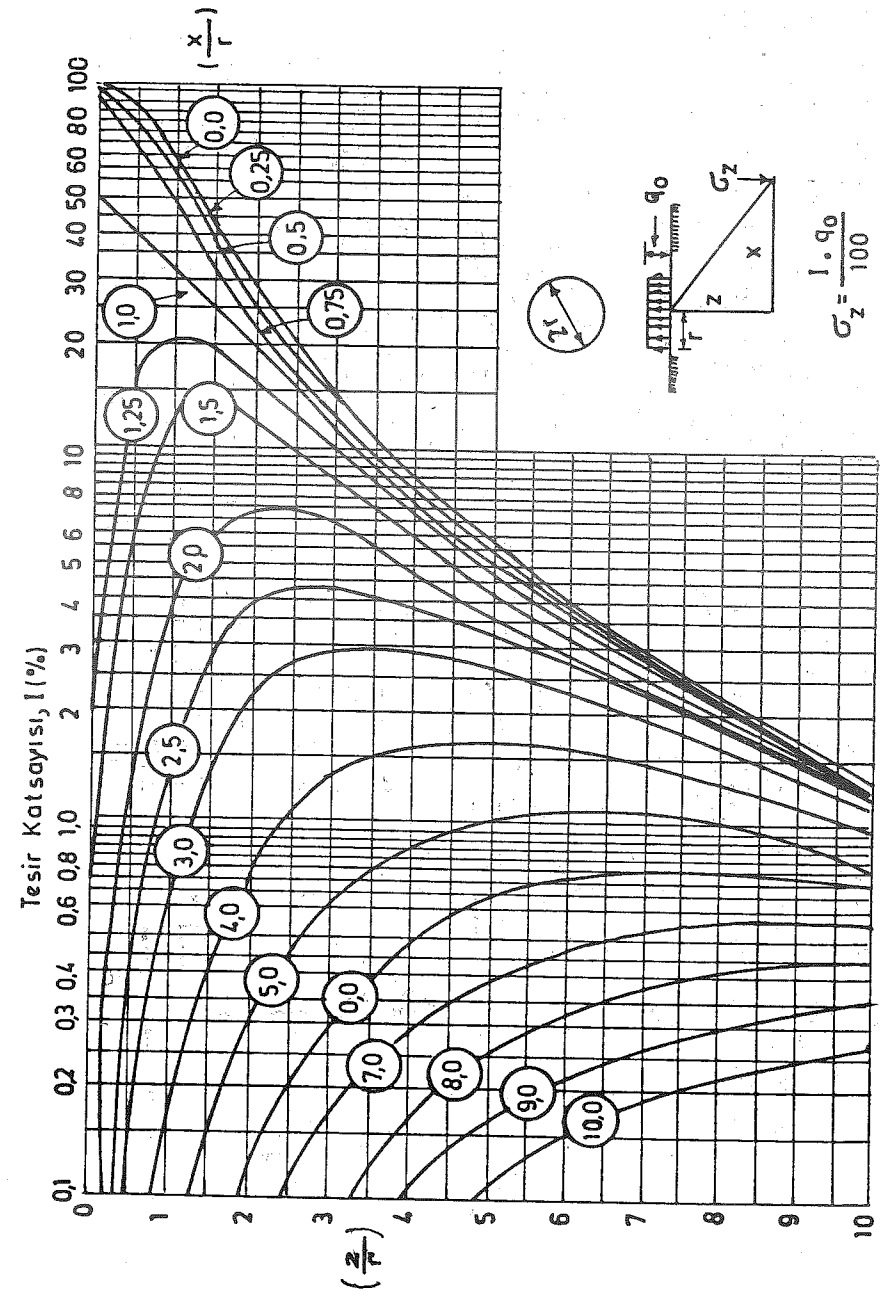
tanımlanabilen (dairesel, dikdörtgen, vb.) yayılı yükler için elde edilmiş hazır çözümler mevcuttur. Şekil 7.6'da üniform yayılı yüklü bir dikdörtgen alan için ve Şekil 7.7'de üniform yüklü bir dairesel alan için elde edilen çözümlerden, tesir katsayısının temel boyutları ve derinliğe bağlı olarak değişimleri gösterilmiştir. Bu şekillerde, temel boyutlarının derinliğe oranı alınarak, tesir katsayılarının değişimi boyutsuz parametrelere bağlı olarak verilmiştir.

Bazı durumlarda, temel zemin tabakaları üzerine uygulanan yükler üniform olmayabilir. Böyle durumlarda zeminde meydana gelecek gerilme dağılımını hesaplamak daha karmaşık bir problem oluşturmaktadır. Bazı özel yükleme halleri için elde edilmiş çözümler mevcuttur. Şekil 7.8'de kenarları eğimli çok uzun bir toprak dolgu altında meydana gelecek gerilme dağılımını veren tesir katsayıları Şekil 7.9'da ise üçgen bir yükleme altında düşey gerilmeleri veren tesir katsayıları gösterilmiştir. Şekil 7.6 ile Şekil 7.9'da gösterilen çözümler Boussinesq çözümünün yüklü alan üzerinde entegrali alınarak elde edilmiştir ve birçok pratik problemde kullanılması çok kolay sonuçları göstermektedir.

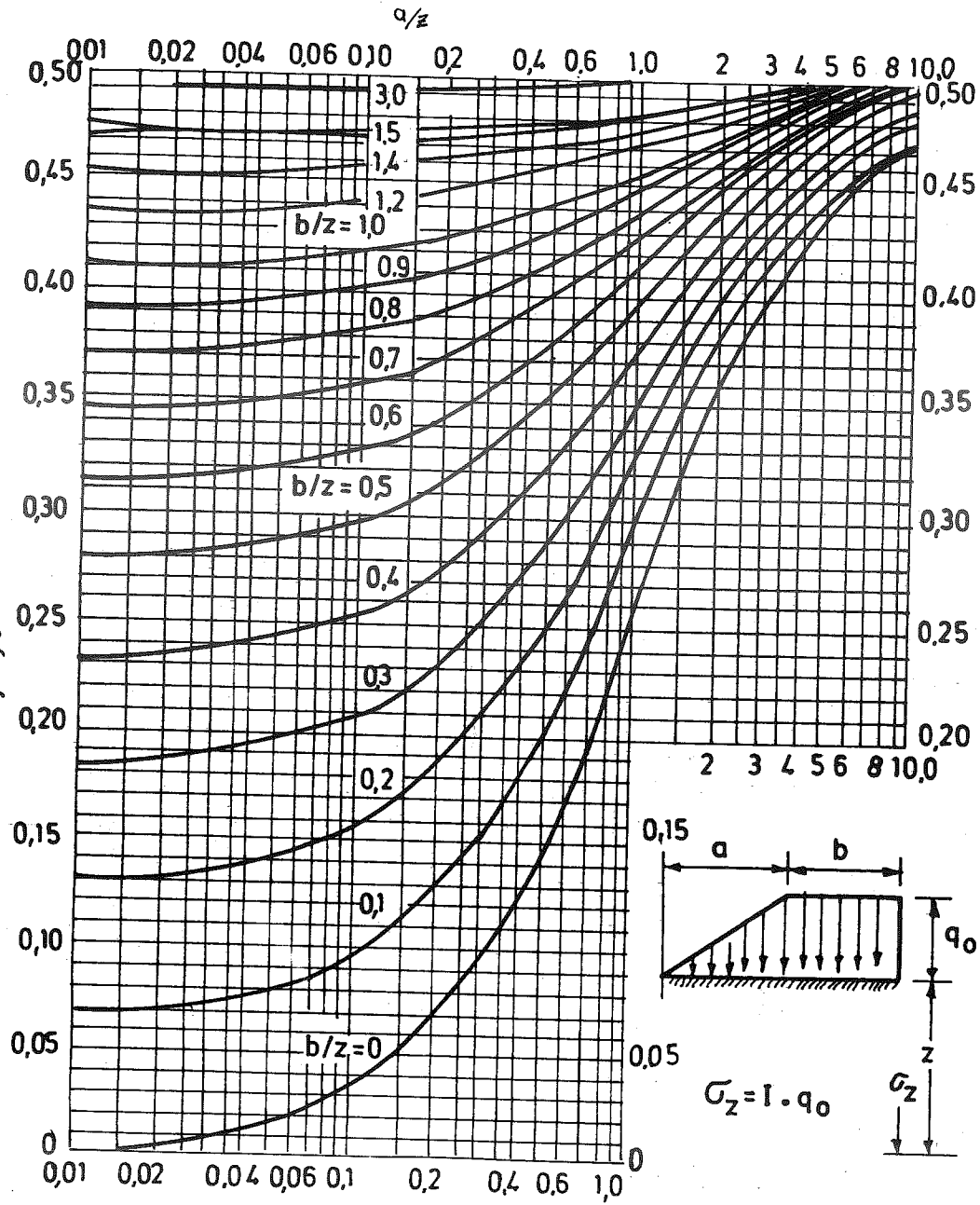
Üniform yüklü alanın dikdörtgen, daire gibi kolay tanımlanabilen bir biçime sahip olmaması durumunda Newmark (1942) tarafından geliştirilen tesir grafiklerini kullanmak mümkündür. Şekil 7.10'da Boussinesq çözümüne dayanan böyle bir tesir grafiği gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen AB uzunluğu grafiğin kullanılmasında ölçek olarak kullanılmaktadır. Önce bu AB uzunluğunu gerilme artışını bulmak istediğimiz derinliğe eşit olarak seçeceğimiz bir ölçeğe göre, yüklü alanın planı şeffaf bir kağıt üzerine çizilir. Sonra bu plan, altında gerilme artışı bulunacak nokta dairelerin merkezini oluşturan O noktası ile çakışacak şekilde Newmark tesir grafiğinin üzerine yerleştirilir (Şekil 7.11). Yüklü alanın altında kalan tesir bölgeleri sayılır. Bu grafik her tesir bölgesinin gerilme artışına katkısı eşit olacak şekilde hazırlandığı için yüklü alan ile kaplanan toplam tesir bölgesi sayısı, yüzeyde uygulanan yük ile çarpılarak o derinlikte gerilme artışı elde edilir. Başka bir derinlikteki gerilme artışını bulmak için AB uzunluğunu o derinliğe eşit alınacak yeni bir plan çizilmesi ve aynı adımların tekrarlanması gerekir.



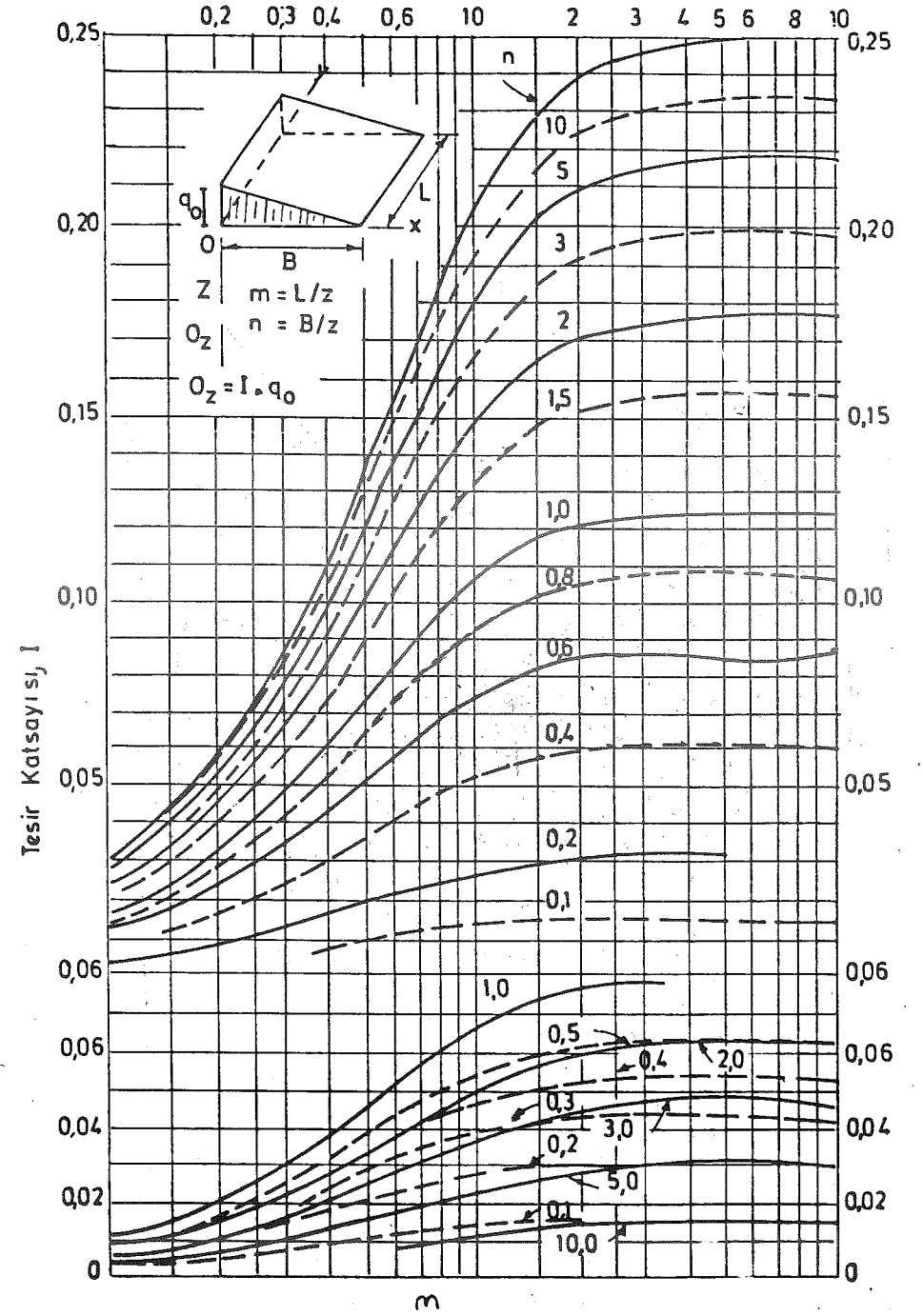
Şekil 7.6. Üniform Yüklü Bir Dikdörtgen Alan İçin Düşey Gerilmeleri Veren Tesir Katsayısı Değerleri



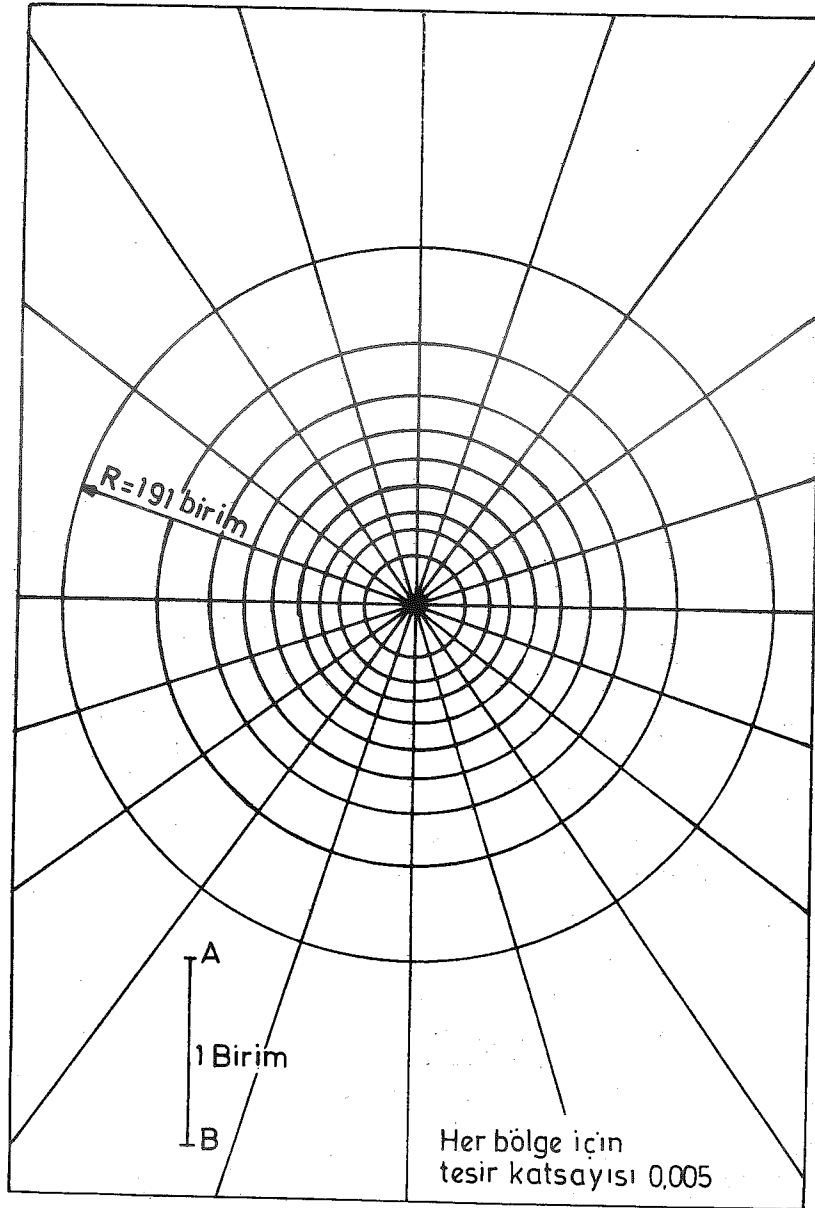
Şekil 7.7. Üniform Yüklü Dairesel Alan İçin Düşey Gerilmeleri Veren Tesir Katsayısı Değerleri



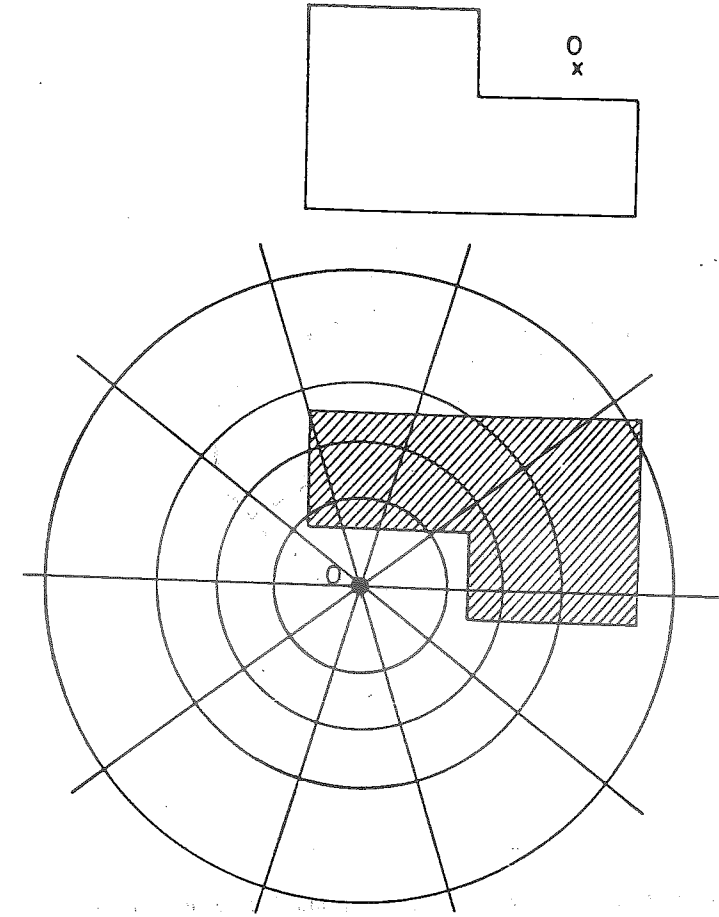
Şekil 7.8. Uzun Bir Dolgu Yüğü Altında Düşey Gerilmeleri Veren Tesir Katsayıları



Şekil 7.9. Üçgen Bir Yükleme Altında Düşey Gerilmeleri Veren Tesir Katsayıları



Şekil 7.10. Düşey Gerilme Artışlarını Hesaplamak İçin Geliştirilmiş Newmark Tesir Grafiği

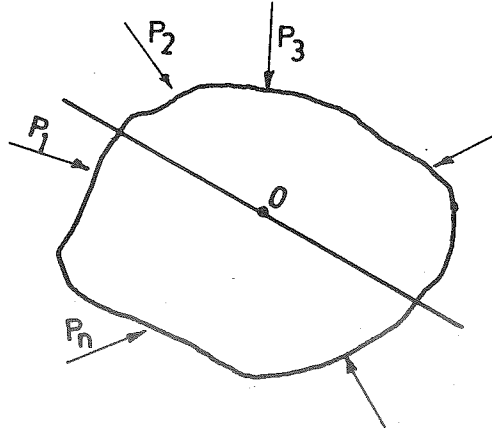


Şekil 7.11. Newmark Tesir Grafiğinin Kullanılması

7.3. Bir Noktadaki Gerilme Durumu ve Mohr Daireleri

Zemin tabakalarının kendi ağırlıklarının ve dış kuvvetlerin zeminde yol açtığı gerilme durumunu daha iyi anlayabilmek için, çok sayıda kuvvetin etki ettiği bir zemin kütlesi içindeki herhangi bir noktada ortaya çıkan gerilme durumunu incelemek yerinde olur. Şekil 7.12'de $p_1, p_2, \dots, p_n$ gibi kuvvetlerin etkisi altındaki bir zemin örneği gösterilmiştir.

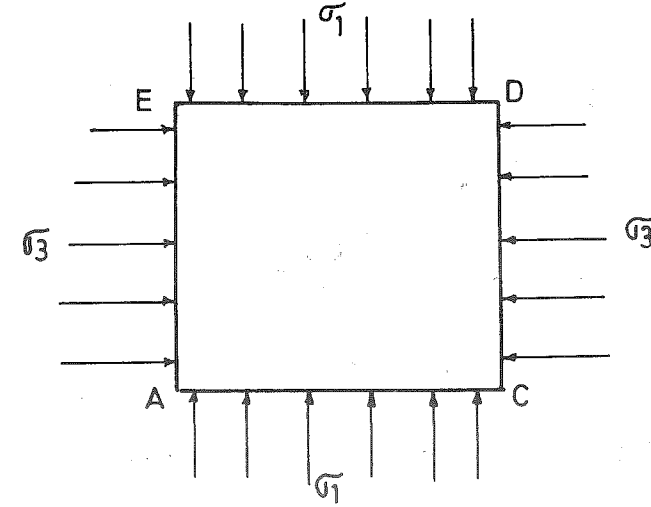
Bu yükleme sonucu zemin içindeki O gibi bir noktada ortaya çıkacak gerilme durumu bu noktadan geçen herhangi bir düzlem üzerinde incelenebilir. Şekildeki O noktasından sonsuz sayıda düzlem geçebilir.



Şekil 7.12. Dış Kuvvetler (Yükler) Altında Bir Zemin Kütlesi

Genel olarak bu düzlemlerin herhangi biri üzerinde normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri mevcut olacaktır. Ancak bu düzlemler içinde birbirine dik üç tane özel düzlem vardır ki bunlar üzerinde sadece normal gerilmeler etkiler, kayma gerilmeleri sıfır değerini alır. Bu düzlemlere asal gerilme düzlemleri denir. Asal gerilme düzlemine etkileyen normal gerilmeler ise asal gerilmeler olarak nitelendirilir. Asal gerilmeler şiddetlerine göre, en büyük asal gerilme (σ_1), ara asal gerilme (σ_2) ve küçük asal gerilme (σ_3) olarak bilinmektedir.

Normal ve kayma gerilmelerini ifade etmek amacıyla gerilmenin etkisi altında bulunan bir zemin elemanı göz önüne alınmış olsun (Şekil 7.13).



Şekil 7.13. Zemin İçinde Meydana Gelen Gerilmeler

Zemin örneğinin AC ve ED yüzeyinde meydana gelen σ_1 büyük asal gerilme, CD ve AE yüzeyinde meydana gelen σ_3 ise küçük asal gerilmedir. Bu durumda AC ve ED yüzeyleri büyük, CD ve AE yüzeyleri de küçük asal düzlemler olmaktadır.

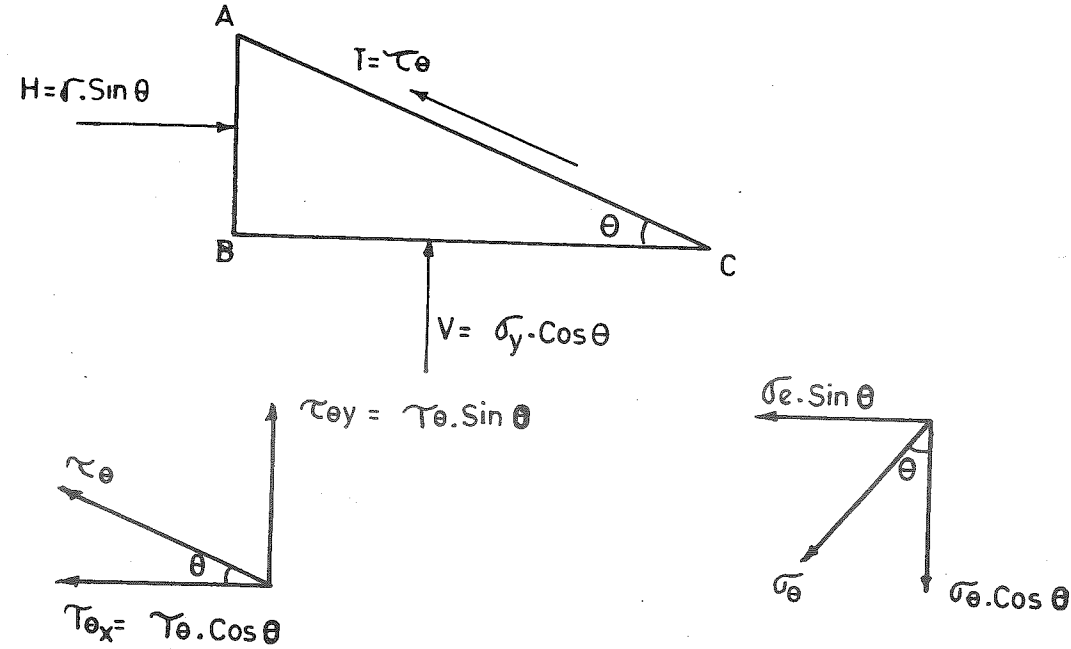
Şekil 7.12'de o noktasından geçen ve yatayla θ gibi bir açı yapan, bir düzlem üzerine etkileyen kuvvetlerin bileşkesi bu düzleme dik ve paralel iki bileşene ayrılabilir (Şekil 7.14).

Şekilde yatay ve düşey denge denklemleri yazıldığında aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\sigma_x \sin \theta - \tau \cos \theta - \sigma_\theta \sin \theta = 0$$

$$\sigma_y \cos \theta + \tau \sin \theta - \sigma_\theta \cos \theta = 0$$

Şekildeki AC alanı birim alan olarak alınırsa AB alanı $L \sin \theta$, RC alanı $L \cos \theta$ olacaktır.



Şekil 7.14. Bir Eleman Üzerine Etkiyen Kuvvet Bileşkeleri

Yukarıda verilen denge denklemlerinin çözümünden

$$\sigma_\theta = \sigma_x \sin^2\theta + \sigma_y \cos^2\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta$$

$$\tau_\theta = (\sigma_x - \sigma_y) \sin\theta \cdot \cos\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta$$

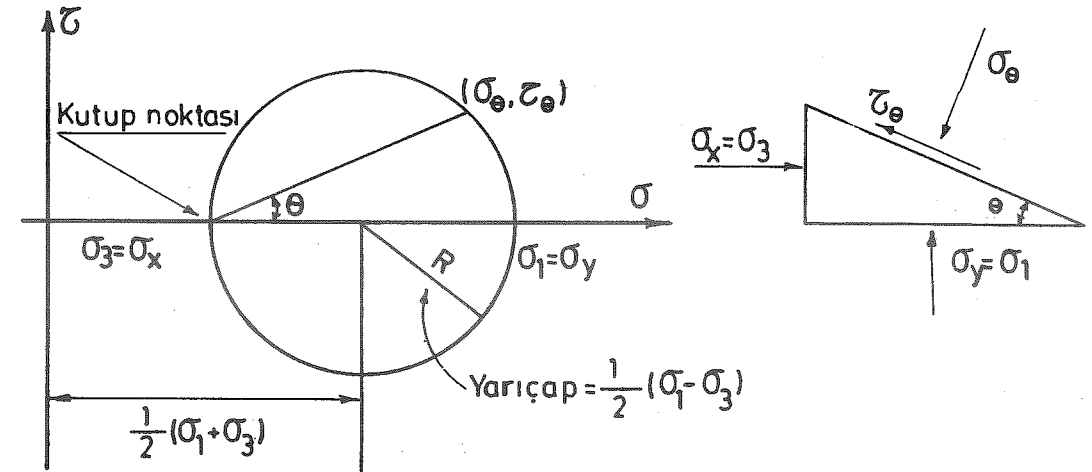
bağıntıları elde edilir. Bu bağıntıların karesi alınıp toplandığında

$$\left[\sigma_\theta - \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \right]^2 + \tau_\theta^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2$$

denklemini elde edilir. Bu denklem merkezi $\frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y)$ ve yarıçapı $\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)$ olan bir dairenin denklemini oluşturmaktadır.

Bu daire $\sigma - \tau$ düzleminde çizildiğinde mukavemette bilinen Mohr gerilme dairesi elde edilir (Şekil 7.15).

Mohr gerilme dairesi, denge durumundaki herhangi bir noktada etkiyen gerilme durumunu grafiksel olarak gösteren çok yararlı bir yöntemdir.



Şekil 7.15. Mohr Gerilme Dairesi

Yatay ve düşey düzlemler asal gerilme düzlemleri olduğu için bunlara gerilme üzerinde kayma gerilmelerinin bunlar üzerinde etkisi bulunmamaktadır. Mohr gerilme dairesi çiziminde bu düzlemlere etkiyen normal gerilmeler yatay eksen üzerinde yer almaktadır.

Şekil 7.15'deki Mohr gerilme dairesi en büyük ve en küçük asal gerilme düzlemleri için gösterilmiştir. Ara asal gerilmelerde düşünüldüğünde, σ_1 ve σ_2 ile σ_2 ve σ_3 için de iki ayrı Mohr dairesi çizmek gerekir.

Asal gerilmelerin veya birbirine dik düzlemde etkiyen normal gerilmelerin belli olması durumunda herhangi bir başka düzlem üzerindeki gerilmeleri daha önce verilen boyutlardan veya Mohr dairesinin çizilmesinden grafiksel olarak bulunabilir.

Grafik çözümde, Mohr dairesi üzerindeki özel bir noktadan (kutup noktası veya orijin) yararlanılarak çözüm kolaylaşmaktadır.

Kutup noktasından çıkan herhangi bir doğrunun Mohr dairesini kestiği noktanın koordinatları eğimi bir doğruya eşit olan düzlem üzerindeki gerilmeleri vermektedir. Dolayısıyla kutup noktası belirlendikten sonra herhangi bir düzlem üzerine etkiyen gerilmeler Mohr dairesi yardımıyla kolaylıkla bulunabilmektedir.

Asal gerilme düzlemleri yatay ve düşey düzlemlerden farklı düzlemler olabilirler. Bu durumda, Mohr dairesi çizildikten sonra önce bu daire üzerinde kutup noktasının bulunması gerekir. Bu nedenle en büyük asal gerilme (σ_1) noktasından, bu asal gerilme düzlemine paralel bir doğru çizilir. Bu doğrunun Mohr dairesini kestiği nokta kutup noktasını verir. Herhangi bir düzlem üzerindeki gerilmeleri bulmak için ise kutup noktasından geçen ve o düzleme paralel bir doğru çizilirse bu doğrunun Mohr dairesini kestiği nokta o düzlem üzerine etkiyen gerilmeleri verir.

8. ZEMİNLERİN SIKIŞTIRILMASI (KOMPAKSİYON)

Birçok mühendislik yapılarında zemin, inşaat malzemesi olarak kullanılmaktadır. Toprak dolgu barajlar, kanal dolguları, su bentleri, akarsu seddeleri gibi su yapılarındaki dolgularda zemin kullanılmaktadır. Zeminler genellikle üzerine aktarılan yükleri, taşıyacak sağlamlıkta olmayabilir. Bu nedenle doğal durumdaki zeminin özellikleri inşaat yönünden uygun duruma getirilmelidir. Zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde, sıkıştırma (kompaksiyon), katkı maddeleri kullanma, drenaj, ön yükleme, enjeksiyon gibi yöntemlere başvurulmaktadır. Bu yöntemlerden kompaksiyon yöntemi yaygın olarak kullanıldığından, bu kısımda kompaksiyon yöntemi açıklanmaya çalışılacaktır.

Kompaksiyon, dolgu yapılan zeminin mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi için, mekanik araçlar yardımıyla zeminin bünyesindeki su ve tane hacmi sabit iken havanın dışarı atılması, sıkıştırılması işlemidir. Başka bir anlatımla, kompaksiyon, zemin tanelerinin birbirine yaklaştırılması ve aralarındaki hava boşluklarının azaltılması sonucu, daha sıkı bir şekilde yerleşmesine sahip olmalarını sağlayan mekanik işlemlere verilen isimdir. Zeminin sıkıştırılması sonucu, birim hacim ağırlığı artmakta ve buna bağlı olarak mühendislik özellikleri iyileştirilmiş olmaktadır.

Kompaksiyon ile zeminin mekanik davranışında aşağıdaki iyileştirmeler gerçekleştirilir.

- Boşluk oranını azaltarak zeminin geçirgenliğini azaltmak, su emme ve su içeriğini değiştirme özelliklerini kontrol altına almak,
- Zeminin kayma mukavemetini ve dolayısıyla taşıma gücünü artırmak,
- Zemini titreşim ve yük etkisi altında hacim değiştirme, oturma ve deformasyonunu azaltmak,

Kompaksiyon işlemlerinin zemin üzerindeki etkisi aşağıdaki değişkenlere bağlıdır.

- Zemin cinsi ve fiziksel özellikleri,
- Sıkıştırma sırasındaki su içeriği,
- Sıkıştırmada kullanılan enerjinin büyüklüğü,
- Sıkıştırmada kullanılan araçlar.

Zemin taneleri arasındaki boşlukların azaltılması işlemi zemin üzerine ağırlık düşürerek, zemin üzerinden hareketli bir ağırlık geçirilerek, zemin üzerinde sarsıntı yaparak yapılır. Böylece zemin daha yüksek kesme dayanımına, daha çok sıkışabilirlik ve daha düşük geçirgenlik değerine ulaşır.

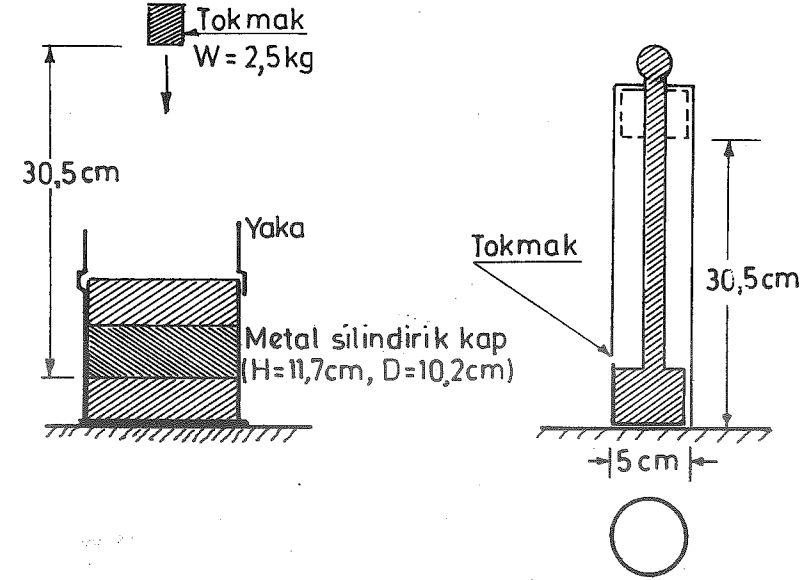
Zeminin sıkışma durumunun ölçüsü olarak kuru birim hacim ağırlığı esas alınır. Kuru zemine su verildiği zaman, tanelerin etrafında bir adsorbe su tabakası oluşur. Su miktarı artırılırsa, su tabakası daha kalınlaşır, taneler arasındaki sürtünme enerjisi en aza düşer ve taneler birbiri üzerinde kolayca kayarlar. Böylece yerleşme daha kolaylaşmış olur. Zeminin kuru birim hacim ağırlığı da artar. Bu durum zeminin optimum su içeriğine kadar geçerlidir. Optimum su içeriğine kadar eklenen su kendi hacmi ve eşit hacimdeki havayı dışarı atarak, tanelerin sıkışmasını sağlar. Ancak belli bir sınırdan sonra içeride sabit yer işgal eden havaya su etki edemez. Bu sırada fazla su zerrelere zemin tanelerinin yerini almaya başlar ve zeminin kuru birim hacim ağırlığı azalır. Her bir zemin için tek bir su içeriği bulunmaktadır. Bu su içeriğinde sıkıştırma en iyi yapılmakta, birim hacim ağırlık en yüksek değere ulaşmaktadır. Her zemin için sabit olan bu su içeriğine optimum su içeriği denmektedir.

8.1. Proktor Deneyi

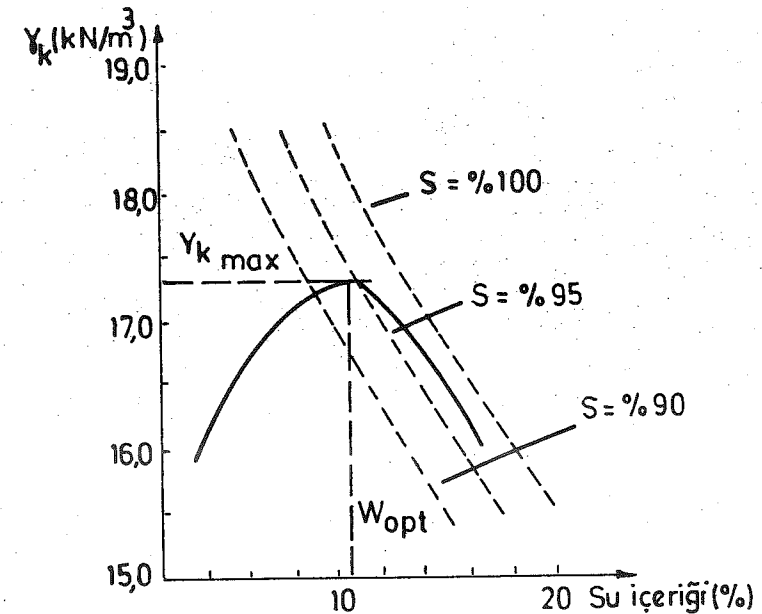
Zeminin kompaksiyonu için gerekli optimum su içeriği Proktor deneyi ile bulunur.

İç çapı 10,5 cm, yüksekliği 11,55 cm boyutlarında ve iç hacmi yaklaşık 0,001 m³ olan metal bir silindir (Şekil 8.1) içine zemin, üç tabaka halinde su serpilerek karıştırılır. Hazırlanan 3 tabaka zemin üzerine, düşme yüksekliği 30 cm olan 2,5 kg ağırlığındaki bir tokmakla 27 defa düşürülmesi ile sıkıştırılır. Kabın içindeki zeminin yaş ağırlığı belirlenir. Buradan ıslak birim hacim ağırlık (γ_{n1}) hesaplanır. Kap içindeki zeminin su içeriği (ω) bulunarak, zeminin kuru birim hacim ağırlığı (γ_{k1}) hesaplanır.

Deney çeşitli su içeriklerinde 4-5 defa tekrarlanarak su içeriği kuru birim hacim ağırlık eğrisi elde edilir (Şekil 8.2). Eğri üzerinden optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlenir.



Şekil 8.1. Standart Proktor Deneyi



Şekil 8.2. Kuru Birim Hacim Ağırlığı - Su İçeriği Eğrisi

Zeminin daha ağır kompaksiyon koşullarındaki kompaksiyon eğrisini elde etmek için Modifiye Proktor Deneyi ve Modifiye AASHO Deneyi olarak alınan deney yapılır. Bu deneyde zemin 5 tabaka halinde, her tabakaya 4,5 kg'lık tokmak 45 cm'den düşürülerek sıkıştırılır. Kompaksiyon deneylerinde boyutlar Çizelge 8.1'de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Kompaksiyon Deneylerinde Boyutlar

	Deney Adı Standart proktor	Modifiye proktor/AASHO
Örnek ağırlığı	5 kg	5 kg
En büyük tane çapı	20 mm	20 mm
Kalıp : Hacim	0,001 m ³	0,001 m ³
İç çap	105 mm	105 mm
Yükseklik	115,5 mm	115,5 mm
Ağırlık :	2,5 kg	4,5 kg
Çapı	50 mm	50 mm
Düşüş yüksekliği	300 mm	450 mm
Tabaka sayısı	3	5
Her tabakaya düşüş sayısı	27	27

Kompaksiyonun temel ilişkileri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla bulunur.

$$\gamma_n = \frac{\gamma_s (1 + \omega)}{1 + e}$$

$$\gamma_k = \frac{\gamma_s}{1 + e}$$

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_k} = 1 + \omega$$

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1 + \omega}$$

$$S.e = \gamma_s \omega$$

$$e = \frac{\gamma_s \omega}{S}$$

$$\gamma_k = \frac{\gamma_s}{1 + e} = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{\gamma_s \omega}{S}}$$

Eşitliklerde;

γ_n = Zeminin doğal birim hacim ağırlığı (g/m³),

γ_k = Zeminin kuru birim hacim ağırlığı (g/m³),

γ_s = Zeminin tane birim hacim ağırlığı (g/m³),

ω = Zeminin su içeriği (%),

e = Zeminin boşluk oranı (%),

S = Zeminin doygunluk derecesi (%).

Zeminin tane birim hacim ağırlığı bilinirse,

$$\gamma_k = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{\gamma_s \omega}{S}}$$

eşitliğinde zeminin % 100, % 90 ve % 95 doygunluk durumuna göre $\gamma_k - \omega$ eksen takımında çizilerek, çeşitli doygunluk çizgileri elde edilir. Bu şekilde doygunluk çizgileri ile, deneysel eğrinin herhangi bir noktasındaki doygunluk durumu belirlenir.

8.2. Arazide Kompaksiyon

Laboratuvarda yapılan kompaksiyon deneyi sonuçları arazide uygulama için bir ölçüt olarak alınır. Arazide zeminin su içeriğinin güvenilir bir şekilde kontrol edilmesi çok zordur. Bu nedenle kompaksiyonun arazide uygulanmasında sıkışma durumu, relatif sıkışma veya kompaksiyon oranı (I_r) ile ölçülür. Kompaksiyon oranı aşağıdaki eşitlikle belirlenebilir.

$$I_r = \frac{\gamma_{k\text{arazi}}}{\gamma_{k\text{mak}}} = \frac{\text{Arazide bulunan kuru birim hacim ağırlığı}}{\text{Aynı mal. üzerinde laboratuvarda bulunan max. kuru birim hacim Ağırlığı}}$$

Laboratuvar deneyleri bir zeminde elde olunabilecek en büyük kuru birim hacim ağırlığını ve değişik sıkıştırma yöntemleri ile bu birim hacim ağırlığına hangi su içeriği ile varılabileceğini gösterir. Toprak dolguların (baraj veya kanal) veya yol ve pist zeminlerinin taşıma gücü ve stabilitesinin korunumu için bulguların arazide gerçekleştirilmesi gerekir. Bunun sağlanması için;

- Sıkıştırılacak toprağın tabii su içeriğini optimum değerine uygun hale getirmek,

- Arazide yapılacak sıkıştırma için uygun kompaksiyon makinaları seçmek, sıkıştırılacak zemin üzerinde makinaların devir adetlerini veya dolaşma sürelerini saptamaktır.

Zeminin doğal durumdaki nem miktarı saptanırsa su verilerek veya verilmeden optimum su içeriğine göre ayarlanması mümkün olur. Zemin siltli veya kumlu ise serildikten sonra bir su tankerini yavaş hızla üstünden geçirmekle sulama işlemi yapılmış olur. Zemin killi ve ağır killi ise bu iş zorlaşır. Su tankeri ne kadar yavaş geçerse geçsin yüzeyde su gölcüklerinin meydana gelmesi önlenemeyecektir. Bu nedenle zeminin diskli pulluk veya tırmıklarla tırmıklanarak yırtılması ve verilen suyun yüzeyden aşağılara inmesi sağlanmalıdır.

Silindirleme, tokmaktama ve sarsma doğal zeminlerde kullanılan sıkıştırma yöntemleridir. Her yöntem için gerekli sıkıştırma süreci arazide yapılan deneme ve çalışmalarla bulunabilir. Hangi tip kompaksiyon seçilirse seçilsin amaç, laboratuvar da elde edilen en yüksek kuru birim hacim ağırlığına yakın bir kuru birim hacim ağırlığı elde etmektir.

Zeminlerin arazide sıkıştırılmasında yaygın olarak kullanılan başlıca kompaksiyon makineleri ve özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

1- Düz ayaklı silindirler : Hemen hemen her çeşit zeminin sıkıştırılmasında kullanılan bu makineler zemin yüzeyi ile % 100 temas halinde olup, 400 kPa'a kadar basınç uygulanabilir, en yaygın olarak sıkıştırılmış dolguların yüzeyinin yeniden sıkıştırılmasında kullanılırlar.

2- Lastik tekerlekli silindirler : Birbirine yakın çok sayıda lastik tekerleği olan ağır bir arabadan oluşan bu silindirler kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılmaktadır.

3- Keçi ayaklı silindirler : Çelik bir silindirik gövde üzerinde "ayak" biçiminde alanları 30-80 cm² çok sayıda çıkıntıdan oluşan bu silindirlerde temas alanı % 8 - % 12, uygulanan basınç 1400-7000 kPa arasında olup, sıkıştırma basınç etkisi yanında yoğrulma etkisinden de yararlanarak sağlanır. Geçiş sayısı arttıkça tabaka kalınlığı boyunca aşağıdan yukarı doğru sıkışma gerçekleşir. Keçi ayaklı silindirler özellikle kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılır.

4- Titreşimli silindirler : Kohezyonsuz zeminler en iyi titreşimli yükler altında sıkışmaktadır. Bu nedenle titreşimli silindirler arazide kohezyonsuz zemin tabakalarının sıkıştırılmasında en etkili şekilde kullanılırlar. Silindirlerin üzerine titreşim yaratan makineler yerleştirilerek basınç ve titreşim etkisinden birlikte yararlanılmaktadır.

5- Vibratörler: Büyük kompaksiyon makinelerin kolaylıkla giremediği yerlerde elle çalıştırılan titreşimli sıkıştırıcılar kullanılır. Motoru üzerine monte edilmiş vibratörlerin boyutları, genellikle 25 cm x 25 cm ile 125 cm x 125 cm arasındadır.

8.2.1. Arazide Sıkıştırmanın Yapılışı

Dolgu yapılacak yere malzeme, tane dağılımına ve plastiklik özelliklerine bağlı olarak değişebilen kalınlıkta bir tabaka halinde serilir. Bu kalınlık iri taneli zeminlerde 25-30 cm, porozitesi düşük ince bünyeli zeminlerde ise 15-20 cm olabilir. İnce bünyeli malzeme kullanılması durumunda, iri taşlar ayıklanıp atılmalıdır. Gevşek halde 20 cm'ye kadar kalınlıkta olacak şekilde düzeltilmelidir. Hızlı metodlardan biri ile nem miktarı saptanıp su içeriği bulunmalıdır. Bulunan değer optimum su içeriğinin altında ise su verilmelidir. Yaklaşık olarak sergide yayılmış toprağın miktarı belirlenerek, optimum su içeriğine göre eksik olan yüzde miktardan yararlanarak tüm sergiye kaç m³ su verileceği hesaplanmalıdır. Su verilme işi bir traktöre su tankı bağlanıp yavaş hızla malzeme üzerinde iç içe elipsler çizilecek şekilde dolaştırılması ile olur. Verilen suyun yüzeyde kalmayıp malzemenin her tarafına mümkün mertebe homojen dağılmasını sağlamak için derinliği 20 cm'ye ayarlanmış bir pulluk veya tırmığın tankerin arkasından dolaştırılması yararlı olur.

Nemlendirilen malzeme, sıkıştırıcı makinelerle sıkıştırılır. Keçi ayakları dolgu üzerinde iki saatten az olmamak üzere dolaştırılır. Bu süre arazide amprik olarak hesaplanır. Keçi ayakları saptanan zaman kadar dolgu üzerinde dolaştıktan sonra alan boşaltılır. Birim hacim ağırlığını kontrol için sıkıştırılan tabaka düzlenir, sonra bir çukur açılır, çukurdan çıkan zemin hiç madde kaybetmeksizin tartılır, açılan çukurun hacmi ölçülerek, zeminin su içeriği ve zeminin arazideki kuru birim hacim ağırlığı saptanır. Arazideki maksimum kuru birim hacim ağırlığı laboratuvarında yapılan deneyler sonucu bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlığına erişmişse veya % 95 yaklaşmışsa sıkıştırma yeterlidir. Laboratuvarında bulunan aynı malzemeye ait maksimum kuru birim hacim ağırlığına oranlanarak yüzde sıkışma(I_r) oranı bulunur. Kompaksiyon durumunun kontrolü için malzemenin doğal birim hacim ağırlığı ile su içeriğinin bilinmesi yeterli olacaktır.

Sıkıştırılan toprak dolguların arazideki sıklık derecesini yerinde ölçmek üzere değişik yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar arasında yaygın olarak kullanılanlar; kum şişesi yöntemi, balon yöntemi, yağ yöntemi ve nükleer aletler olmaktadır.

Bu yöntemlerden kum şişesi, balon ve yağ yöntemi aynı temel yaklaşımı esas almaktadır. Sıkıştırılan zemin yüzeyinde bir oyuk açılarak, oyuktan çıkan zeminin ağırlığı ve oyukun hacmi ölçülerek zeminin yoğunluğunu hesaplanabilmektedir. Oyukun hacmini ölçmek için kum şişesi, şişirilen bir balon veya yağ kullanılmaktadır. Ayrıca zeminin kuru ve ıslak ağırlıklarından, su içeriği de kolaylıkla hesap edilmektedir.

Nükleer aletler yardımı ile ise zeminin yoğunluğu ve su içeriği doğrudan saptanabilmektedir.

8.2.2. Kompaksiyonu Etkileyen Faktörler

Arazide kompaksiyonun randımanını etkileyen önemli etkenler aşağıda özetlenmiştir.

- **Zemin Özellikleri** : Elde olunacak toprak dolgunun sıklık derecesi ve mühendislik özelliklerini etkileyen başlıca zemin özellikleri, zeminin granülometrisi, zeminin su içeriği ve zeminin başlangıç sıklık derecesi olmaktadır.

- **Kompaksiyonda kullanılan makinenin özellikleri** : Sıkıştırmanın randımanını etkileyen başlıca makine özellikleri olarak; makinenin toplam ağırlığı, boyutları ve zemine uyguladığı basınç ile titreşimli makinelerde uygulanabilir titreşim frekansı aralığı ve çalışma frekansıdır.

- **Kompaksiyon yöntemleri** : Sıkışmanın randımanını etkileyen ve mühendis tarafından doğru seçilmesinde büyük yarar olan başlıca parametreler arasında; serilme kalınlığı, makinenin geçiş hızı, makinenin geçiş sayısı ve titreşim frekansı sayılabilir.

Kompaksiyon makinasının geçiş hızı yavaşladıkça ve geçiş sayısı arttıkça sıkışma artmakta buna karşılık maliyet de artmaktadır. Zemin cinsine ve serilen tabaka kalınlığına bağlı olarak, belli bir geçiş sayısından sonra elde edilen ilave sıkışma, maliyet artışını karşılamaktan uzak kalmaktadır. Genellikle 6-8 geçişten sonra randıman çok azalmaktadır. Dolayısıyla, geçiş sayısının ve hızının işin ekonomik yönü gözden uzak tutulmadan seçilmesi gerekir.

Kullanılan makinenin ağırlığına ve zemin cinsine bağlı olarak, belli bir derinliğin altında ve sıkıştırılan tabakanın üst yüzeyinde yeterli sıkışma sağlanamamaktadır. Bütün tabaka boyunca istenilen sıklık sağlanacak şekilde serilme kalınlıkları seçilmelidir.

Büyük hacimlerde toprak sıkıştırması yapılan projelerde, yukarıda sıralanan parametrelerin sağlıklı olarak saptanması için, arazide bir deneme dolgusu inşaatı ve elde olunan sıklık derecesinin yerinde kontrolü en randımanlı ve ekonomik yöntem olmaktadır. Daha küçük projelerde, geçmiş deneyimlerden yararlanılarak söz konusu bu parametrelerin seçimi yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Acun, N., 1960. Temel Zemini ve Yapı (Çeviri), 2. Baskı. İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul.
- Acun, N., 1964. Pratik Problemlerle Temel ve Su İnşaatı (Çeviri), 4. Baskı. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Anonymous, 1965. Zemin Mekaniği Notları, Zemin Mekaniği Konuları ve Laboratuvar Deneyleri. Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Yayın No:144, Ankara.
- Anonymous, 1987. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri, TS 1900. Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- Anonymous, 1991. Yamaç ve Şevlerin Dengesi ve Hesap Metotları-Zeminde, TS 8853. Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- Bowles, J.E., 1978. Engineering Properties of Soils and Their Measurement, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company, New York.
- Capper, P.L. and Cassie, W.F., 1969. The Mechanics of Engineering Soils, Fifth Edition, Richard Clay Ltd. Bungay England.
- Cedergren, H.R., 1977. Seepage, Drainage and Flow Nets, 2nd Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Craig, R.F., 1992. Soil Mechanics, ELBS with Chapman & Hall University and Professional Division 2-6 Boundary Row, London.
- Dönmezer, H., 1974. Teorik ve Pratik Zemin Mekaniği, 2. Baskı. Kurtuluş Matbaası, İstanbul.
- Duncan, J. M. and Buchignani, A.L., 1976. "An Engineering Manual for Settlement Studies," Geotechnical Engineering Report, University of California at Berkeley, U.S.A.
- Dunn, I.S., Anderson, L.R. and Kiefer, F.W., 1980. Fundamentals of Geotechnical Analysis, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Ertan, Y., S. Ülkü, 1978. Zemin Özellikleri ve Deneyleri. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Yayın No: 871, Ankara.

- Filiz, M., 1994. Zemin mekaniği, E.Ü. Ziraat Fakültesi Yayınları Ders Notları:6-3, İzmir.
- Gemalmaz, E., 1989. Gözenekli Ortam Hidroliği. A.Ü. Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü (yayınlanmamış ders notu), Erzurum.
- Holtz, R.D. and Kovacs, W.D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Kumbasar, V., 1967. Zemin Mekaniği Notları (Çeviri). İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- Kumbasar, V., ve F. Kip, 1973. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği (Çeviri), 3. Baskı. Çağlayan Basımevi, İstanbul.
- Kumbasar, V., ve F. Kip, 1984. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği (Çeviri), 4. Baskı. Çağlayan Basımevi, İstanbul.
- Kumbasar, V., ve F. Kip, 1985. Zemin Mekaniği Problemleri, 4. Baskı. Çağlayan Basımevi, İstanbul.
- Lambe, T.W., 1967. Soil Testing for Engineers, Twelfth Printing John Wiley and Sons Inc., New York.
- Lambe, T.W. and Whitman, R.V., 1969. Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Mertdoğan, S., 1982. Toprak Mekaniği Laboratuvarı El Kitabı. Köy İşleri ve Kooperatifler Bakanlığı Toprak Genel Müdürlüğü No: 713, Ankara.
- Mitchell, J.K., 1976. Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Okman, C., 1986. Zemin Mekaniği, İkinci Baskı. A.Ü. Ziraat Fakültesi Ders Notu Teksir No: 136, Ankara.
- Öncel, S., 1963. İstinat Duvarlarında Su ve Toprak Basıncı, Ankara.
- Özaydın, K., 1989. Zemin Mekaniği, Meya Matbaacılık ve Yayıncılık LTD. ŞTİ., İstanbul.

- Özüdoğru, K., O. Tan ve İ.H. Aksoy, 1988. Çözümlü Problemlerle Zemin Mekaniği. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Perloff, W.H. and Baron, W., 1976. Soil Mechanics-Principles and Applications, The Ronald Press Company, New York.
- Peynircioğlu, H., 1964. Zeminlerde Plastik denge ve Plastik Dengeye Dayanan Mühendislik Problemleri (Cilt 1), 3. Baskı. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Skempton, A.W., 1960. "Terzaghi's Discovery of Effective Stress" in From Theory to Practice in Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B., 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice, Wiley, New York.
- Toğrol, Ergün., M. Tümay, 1969. Zemin Mekaniği (Çeviri), İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- Uzuner, B.A., 1992. Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara.
- Bishop, A.W. and Henkel, D.J., 1962. The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, Edward Arnold Ltd., London.
- Ladd, C.C. and Foote, R., 1974. "A New Design Procedure for Stability of Soft Clays," Journal of Geotechnical Eng. Div., American Society of Civil Engineers, Vol. 100, No. GT7, 763-786.
- Lee, K.L. and Seed, H.B., 1967. "Drained Strength Characteristics of Sands," Journal of Soil Mech. and Found. Div., American Society of Civil Engineers, Vol. 93, No. SM6, 117-141.
- Yong, R.N. and Warkentin, B.P., 1975. Soil Properties and Behavior, Elsevier Scientific Publishing Co., New York.