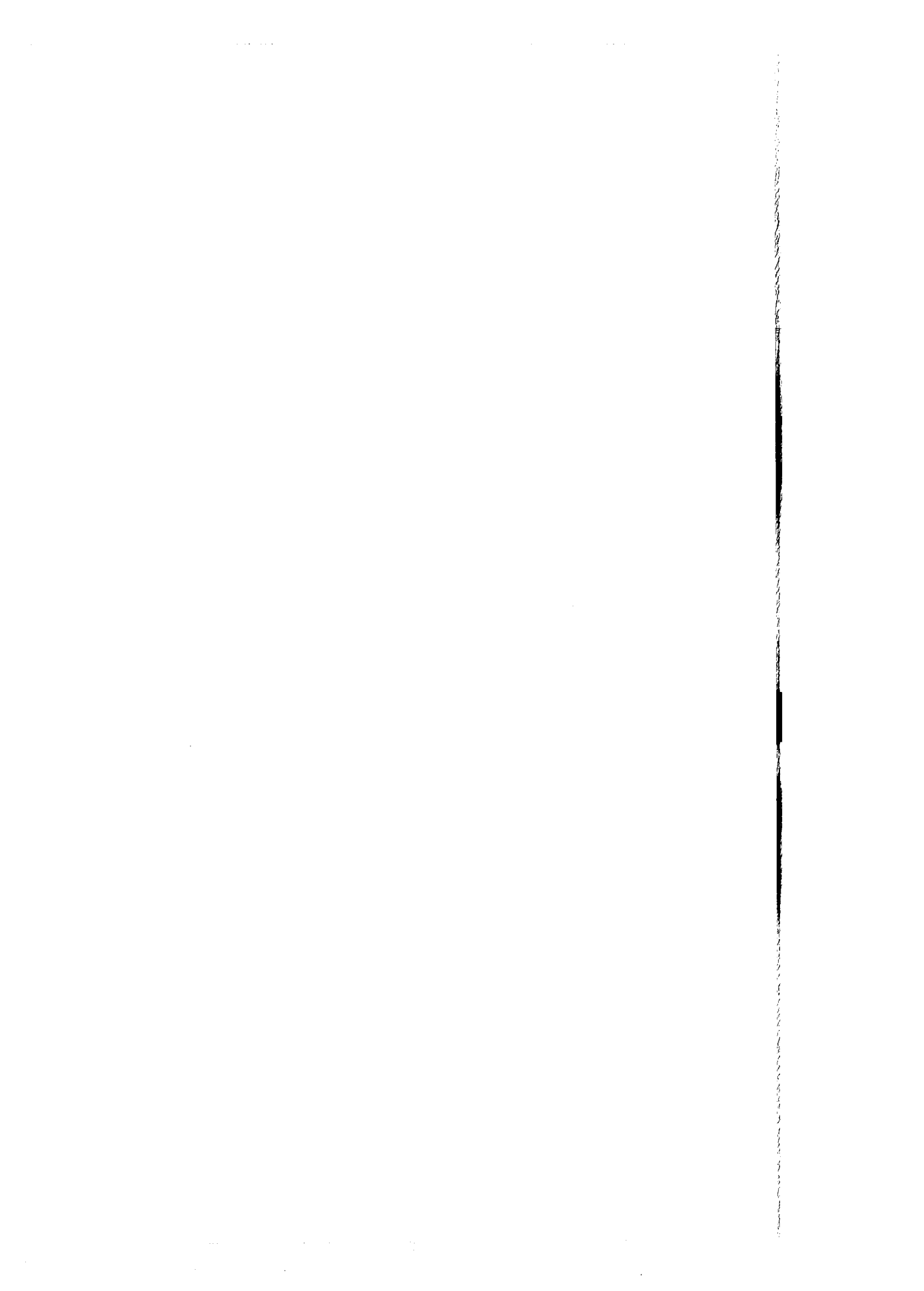


27 Ekim 2005 Perşembe

**V. Oturum**  
**Temel Mühendisliği**



# DOYMAMIŞ ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİ

M. Arslan TEKİNSOY

## ÖZET

Bu tebliğde suya doygun olmayan zeminlerin su ile olan ilişkileri göz önüne alınmış, buna bağlı olarak hidrolik özelliklerin ve gerilme ilişkilerinin değişimi incelenmiştir. Hidrolik özelliklerin temelini oluşturan potansiyel kavramı belirtilmiş ve doymamış bir zeminin iletkenliği tanımlanmıştır. Zeminin doygunluk derecesi, emme basınçlarını etkilemekte, bu da efektif gerilmelerin değişmesine yol açmaktadır.

Suya doygun olmayan bir zeminin hacim değiştirme ve konsolidasyon ilişkileri, doygun zeminlerinki iki boyutlu iken, üç boyutlu bir durum arz etmektedir. Doygun bir zeminin deformasyon- zaman ilişkisi lineer bir diferensiyel denklem ile ifade edilirken, doymamış zeminde lineer olmayan kısmi türevli diferensiyel denklem söz konusudur.

Kırılma zarfları da doygunluk derecesine ve içerdiği su içeriğine bağlı olarak eğrisel bir durum arz eder. Emme basınçları, zeminin sahip olduğu mevcut yapıyı güçlendirecek doğrultuda etki ederek, daha mukavemetli bir ortamı kullanıma sunar. Gerekli drenaj önlemleri alınmak kaydıyla, ekonomik sonuçlar doğurabilecek, emin taşıma gücü değeri verilebilir. Başka bir ifade ile zeminin taşıma kapasitesinden daha iyi yararlanılabilir.

## 1 GİRİŞ

Mühendislikteki emniyet kavramı veya emniyetli tarafta kalma kaygısı, zeminlerin mukavemet bakımından en zayıf durumu olan doygun

zeminlerin incelenmesini gündeme getirmiştir. Oysa doygun zemin kavramı, zeminlerin çok özel durumunu ifade eder. Doğada % 100 suya doygun bir zeminin bulunması da çoğu kez imkansız gibidir. Sonuç olarak doğal durumda, tam doygun bir zemine rastlamak da olanaksızdır. Kurak ve yarı kurak bölgelerdeki zeminler, eğer yer altı su seviyesi altında değillerse, tümüyle doymamış durumdadırlar. Bazı zaman; zeminin su içeriği, rötrelimitinin altında olabilmektedir.

Zeminlerin mühendislik özelliklerindeki değişmeler genellikle, su ile olan ilişkisine bağlıdır. Herhangi bir zeminin doygunluk derecesi  $S_r = \% 95'$  in altına düştüğü zaman, zemin içindeki hava süreklilik kazanır. Bu durumda zemin boşluklarında su-hava ara yüzeyleri oluşur. Ara yüzeylerin oluşması minüsküs yarıçapını değiştirerek, yüzey gerilim kuvvetlerinin hakim duruma gelmesine neden olur. Yüzey gerilimin hakim duruma gelmesi, zemine ait her türlü özeliğın etkilenererek, mühendislik özelliklerinin de su içeriğine bağlı olarak değişmesini sağlar.

Bu tebliğde; suya doygun olmayan zeminlerin mühendislik özellikleri ele alınacak, doygun zeminler ile olan ilişkisi gösterilip, değişimlerin nasıl olduğu belirtilecektir. Başka bir ifade ile doygun ve doymamış zeminlerin kısa bir karşılaştırılması yapılacaktır.

## **2. DOYMAMIŞ ZEMİNLERİN HİDROLİK VE GERİLME ÖZELLİKLERİ**

Kohezif ve kumlu zeminlerin birer kritik su içerikleri mevcuttur. Bu su içeriklerinin altında, doğal durumda, suyun zeminden çıkması veya zemin dışına alınması hemen hemen imkansız gibidir. Örneğın killi bir zeminin doygunluk derecesi;  $S_r = \% 85$  ve kumlu bir zemin için  $S_r = \% 20$  doygunluk derecesi altında, zemin örneği hacim değişimi yapsa bile, ağırlıkça su içeriği yaklaşık sabit kalır. Oysa hacimsel su içeriklerinde büyük değişiklikler olduğu

gibi, zeminin boşluk yapısı değişir. Boşluk yapısındaki değişim de zeminin hidrolik ve mekanik özelliklerinde değişiklik yaratır. Ayrıca ağırlıkça su içeriğine göre kütle transfer denkleminin yazılışı daha zordur. Bu mahsurları ortadan kaldırmak için; doymamış zeminlerde, hacimsel su içeriğinin kullanımı hem daha anlamlı, hem de tercih edilen bir büyüklüktür. Hacimsel su içeriği aşağıda verildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$\theta = \frac{V_w}{V} = S_r n \quad \text{veya}$$

$$\gamma_w \theta = \gamma_k w \dots\dots\dots(1)$$

Burada  $\theta$  hacimsel su içeriğini,  $S_r$  doygunluk derecesini  $\gamma_k$  kuru birim ağırlığı  $\gamma_w$  boşluk suyunun birim hacim ağırlığını gösterir.

Doygun bir zeminin mühendislik özellikleri arasında lineer bir değişim söz konusu iken, doymamış zeminlerde lineer olmayan (nonlinear) değişimler bulunur. Bu nedenle doymamış zeminlerin konsolidasyon, mukavemet, kompaksiyon v.b. gibi özelliklerinin belirlenmesi zorlaşır. Bu amaçla özel ölçme düzenekleri ve deney yöntemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Ancak doymamış bir zeminin mühendislik özellikleri; yukarıda ifade edildiği gibi, büyük ölçüde yüzey gerilim kuvvetlerine bağlı olduğu için her aşamada, kapiler emmenin kontrolü ve ölçümünü zorunlu kılar. Bu nedenle ölçmelerde üç eksenli aletin kullanılması tercih edilir. Yine doymamış bir zemin içinden su akımı kapiler kuvvetler vasıtasıyla olur. Bu akımın negatif işaretle aşağıdaki gibi Darcy yasası ile ifade edilebileceği Hubbert, 1956 tarafından gösterilmiştir.

$$J_w = -K \nabla \phi \dots\dots\dots(2)$$

İfadede  $J_w$  kapiler su akısını ( $L^3 / L^2 T$ ),  $K$  hidrolik geçirgenliği,  $\phi$  hidrolik potansiyeli ve  $\nabla$  da del operatörünü gösterir.

Verilen (2) numaralı ifadedeki K orantılılık katsayısı, zeminin su geçirgenliğini ifade eden, su içeriğine bağlı olarak değişen bir katsayıdır. Su içeriği azaldıkça küçülen bir değere sahiptir. Doygun zeminlerde ise permeabilite adını alır ve sabit bir değeri ifade eder. Doymamış zeminlerde permeabilite, boşluk geometrisini ifade eden  $L^2$  boyutunda bir büyüklüktür. Bu hususun özellikle karıştırılmaması gerekir. Ayrıca (2) numaralı ifadede görülen  $J_w$  su akısı hız boyutunda olmasına rağmen, doymamış zeminlerde olduğundan, farklı anlam taşır. Doygun zeminlerde  $J_w$ ; su akım hızına eşit olmasına rağmen; doymamış zeminlerde birim alandan, birim zamanda geçen su miktarını ifade eder. Bu ise zemin su içeriği ile doğrudan ilgilidir.

$$\vec{J}_w = \theta \vec{v} \dots\dots\dots(3)$$

Burada  $\vec{J}_w$  akı vektörünü;  $\theta$  hacimsel su içeriğini ve  $\vec{v}$  boşluk suyuna ait hız vektörünü gösterir. İfadeden de görüldüğü gibi, boşluk suyu hızı ile akı farklı iki büyüklüktür.

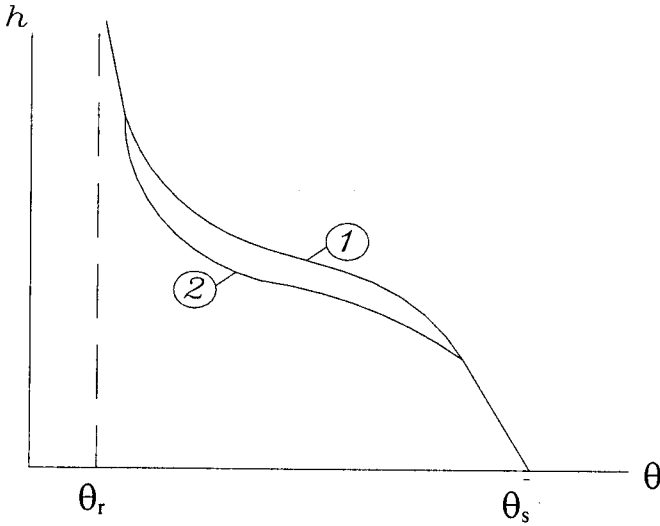
Öte yandan zemin ısı ilişkileri, zemin yüzeyinden yaklaşık 1 veya 1,5 m.'lik derinlik için söz konusudur. Bu ilişki de atmosferik değişimlere bağlıdır. Oysa laboratuvarında kontrollü koşullarda deney yapıldığından, zemin sıcaklığının sabit kaldığı varsayılabilir. Bu nedenle doymamış bir zemin içindeki su akımı, izotermal koşullardaki uniform, barotropik ve kapiler akım olarak tanımlanmaktadır. Böyle bir akımı sağlayan toplam potansiyelin matrik emme, osmotik emme ve pünomatik emmenin toplamı olduğu varsayılmaktadır. Söz konusu üç potansiyelin toplamı olan toplam potansiyel, zemin su potansiyeli ve gravitasyonel potansiyel olarak da ifade edilmektedir.

$$\psi = \psi_{zs} + \psi_g = \psi_m + \psi_o + \psi_p \dots\dots\dots(4.a)$$

$$\phi = \psi_m + \psi_g = h + z \dots\dots\dots(4.b)$$

Burada  $h$ 'a basınç yükü,  $z$ 'ye de geometrik yük denmektedir. Kullanılan zemin örneklerinin boyutları küçüktür. Bu nedenle ölçüm sırasında  $h$  yanında  $z$  büyüklüğü terk edilir. Oysa doymun bir zeminde  $\phi$  toplam potansiyeli, doğrudan doğruya  $h$  basınç yüküne eşit olup, o da boşluk suyu basıncını ifade eder.

Basınç ve su içeriği değişimi, poroz bir ortamdaki su akımı ve iletkenliği üzerinde Richards (1931); Richards ve Week (1953) tarafından yapılan araştırmalar,  $h$  basınç yükü ile  $\theta$  su içeriği arasında birebir (unique) bir ilişkinin olduğunu vermiştir. Başka bir deyişle  $h=f(\theta)$  gibi bir fonksiyonla ifade edilebilir. Sonuçta  $\theta$  ve  $h$  arasında Şek.1'de gösterildiği gibi bir ilişki vardır. Bu ilişkiye su-karakteristik eğrisi denilir. Su-karakteristik eğrisi Şek.1'de gösterildiği gibi ıslanma(2 no'lu eğri) ve kurumada (1 no'lu eğri) farklı yol izler.



Şekil 1. Su-Karakteristik Eğrisi

Bu nedenle bir histerisis olgusundan söz edilir. Şekilde  $\theta_s$  doymun su içeriğini,  $\theta_r$  de residüel su içeriğini gösterir.

Yapılan araştırmalar, doymamış bir zemin içindeki su akımını ve mukavemetini,  $\theta_r$  residüel su içeriğinin etkilediğini göstermiştir. Sonuç olarak zeminin doğal su içeriği, doymamış bir zeminin mühendislik özerlikleri üzerindeki değişimde, önemli role sahiptir. Örneğin  $\theta_r$  'ye göre doymamış bir zeminin infiltrasyon parametreleri değiştiği gibi, emme mukavemeti denilen özelliği de değişir. Bunlara göre hidrolik iletkenlik, mukavemet v.s. gibi özellikler, zemin su içeriğinin bir fonksiyonudur. Residüel  $\theta_r$  hacimsel su içeriği, doğal durumda, değiştiğine göre; incelenen problemlerin sınır koşulları da değişken olup, birer fonksiyon niteliğindedir. Sonuçta çözümler kararlı (steady) ve kararsız (unsteady) olmak üzere ikiye ayrılır.

Doymamış bir zeminde hava miktarının artması, kapiler (kılcal) gerilmeleri artırır ve su geçirimliliğini azaltır. Bu nedenle hidrolik iletkenlik; suyun viskozitesi, boşluk geometrisi ve permeabilite denilen temel geçirgenliğe bağlı olarak verilir.

$$K_w = \frac{\rho_w g}{\nu_w} K = \frac{\gamma_w}{\nu_w} K \dots\dots\dots(5)$$

Hidrolik iletkenlik çok hassas bir büyüklüktür. Su sıcaklığı, suyun içerdiği maddelerin konsantrasyonu, boşluk yapısı v.s. gibi özelliklerden çok etkilenir. Bu nedenle iki ayrı yöntemle bulunan geçirgenlikler, birbirinden 100 kat farklı olsa bile, doğru olarak kabul edilir. Bu mahsuru ortadan kaldırmak ve su içeriğine göre unique bir fonksiyon elde etmek amacı ile difüzivite kavramı getirilmiştir.(Klute,1965)

$$D = K \frac{dh}{d\theta} \dots\dots\dots(6)$$



Tanımlanan D, difüzivite katsayısı, su karakteristik eğrisinin  $h=f(\theta)$  gibi bir fonksiyonla ifade edilebilmesi ve K hidrolik iletkenliğin de  $\theta$  su içeriğine bağlı olması nedeniyle, unique bir fonksiyonla ifade edilebilme olanağını verir. Difüzivite katsayısı, hidrolik iletkenlikten daha az hassas olup, kararlı bir fonksiyon durumundadır. Bu nedenle hesaplarda tercih edilirler.

Hidrolik iletkenlik ve difüzivite katsayısının bulunması için verilen tüm yöntemler, su karakteristik eğrisinin çıkarılmasına ve istatistik olarak boşluk geometrisinin değişimine dayanmaktadır. Yine yapılan çalışmalar iletkenlikler üzerinde, özellikle kumlu zeminlerde, efektif çapın ( $D_{10}$ ) önemli etkisi olduğunu göstermiştir. Düşük emme basınçları için, boşluk suyu makro boşluklardan akar. Doymunluk derecesi düştükçe boşluk suyu, büzülen veya daha küçük mikro boşluklara çekilir.(Önalp,1997)

Mikro boşluklardan suyun akması için, yüksek emme gerilmelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, doymun olmayan zeminlerde, emme gerilmeleri mevcut dokuyu güçlendirir. Zemin doymun hale geldikçe, yüksek gerilme seviyelerinde, doğal dokuları tahrip olmaya başlar. Sonuç olarak bir zeminde su içeriğinin değişmesi, efektif gerilmelerin değişmesine neden olur. Doymamış bir zeminde; emme gerilmelerinin mevcut dokuyu güçlendirmesi nedeniyle, zemin üzerine kayma ve basınç gerilmeleri uygulandığı zaman, doku kolayca bozulmaz.

Efektif gerilmelerin değişmesi için, aşağıdaki ifade önerilmiştir.

$$\sigma' = \sigma + X_1(u_a - u_w) + X_2 p_{sol} \dots\dots\dots (7)$$

Bu ifadede  $X_1$  ve  $X_2$  parametreleri  $0 \leq X \leq 1$  arasında bir sayı olup, doymunluk derecesine bağlıdır. Doymun durumda bu parametreler 1'e eşittir.

İfadedeki  $(u_a - u_w)$  terimi kapiler emmeyi veya matrik emmeyi gösterir.

$p_{sol}$  ise eriyik emmesini belirtmektedir. Ancak temel inşaatında; zeminin kimyasal etkilerinden uzak, C horizonu kullanılmaya çalışıldığından, eriyik

emmesi genellikle terk edilmektedir. Bu durumda doymamış bir zemin için gerilme değişkenleri ve gerilme matrisi, aşağıdaki gibi verilebilmektedir. (Fredlund ve Rahardjo,1993; Önalp,1997)

$$\begin{bmatrix} \sigma_x' \\ \sigma_y' \\ \sigma_z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x - u_a & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - u_a & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - u_a \end{bmatrix} + X_1 \begin{bmatrix} u_a - u_w & 0 & 0 \\ 0 & u_a - u_w & 0 \\ 0 & 0 & u_a - u_w \end{bmatrix} \dots\dots(8)$$

Doymamış bir zeminde su içeriği veya doygunluk derecesi belli seviyelerin altına düşünce, yukarıda (3) numaralı ifade ile verilen eşitlik gereğince, zeminin boşluk suyu hızında değişmeler ve bir hız dağılımı gündeme gelir.

Boşluk suyuna ait hız alanındaki değişmeler ve hız farklılıkları, dispersiyon olayını doğurur. Dispersiyon olayında: zemin suyu içinde eriyik halde bulunan tuz, toprak alkali metal vs. konsantrasyonları önemlilik arz etmeye başlar. Bu durumda  $X_2$  parametresinin değeri ve

$p_{sol}$  eriyik emmesinin bilinmesi söz konusu olur. Dispersiyon olayı uzun vadede, zeminin boşluk yapısının ve iletkenliğin değişmesi üzerinde etkilidir.

Eriyik emmesinin hesaba katılması daha çok çevre geotekniğinde ve tarımda, sulama-kurutma veya zemin ıslahında önemlidir. Örneğin deponi alanlarındaki bariyer etütlerinde dispersiyon ve eriyik emmesi, konsolidasyon ve infiltrasyon birlikte göz önüne alınarak kullanılır. Oysa temel inşaatında genellikle eriyik emmesi ve dispersiyon terk edilerek, kapiler emme değeri ile yetinilmektedir (Tekinsoy,2002)

### 3. DOYMAMIŞ ZEMİNLERİN KONSOLİDASYONU

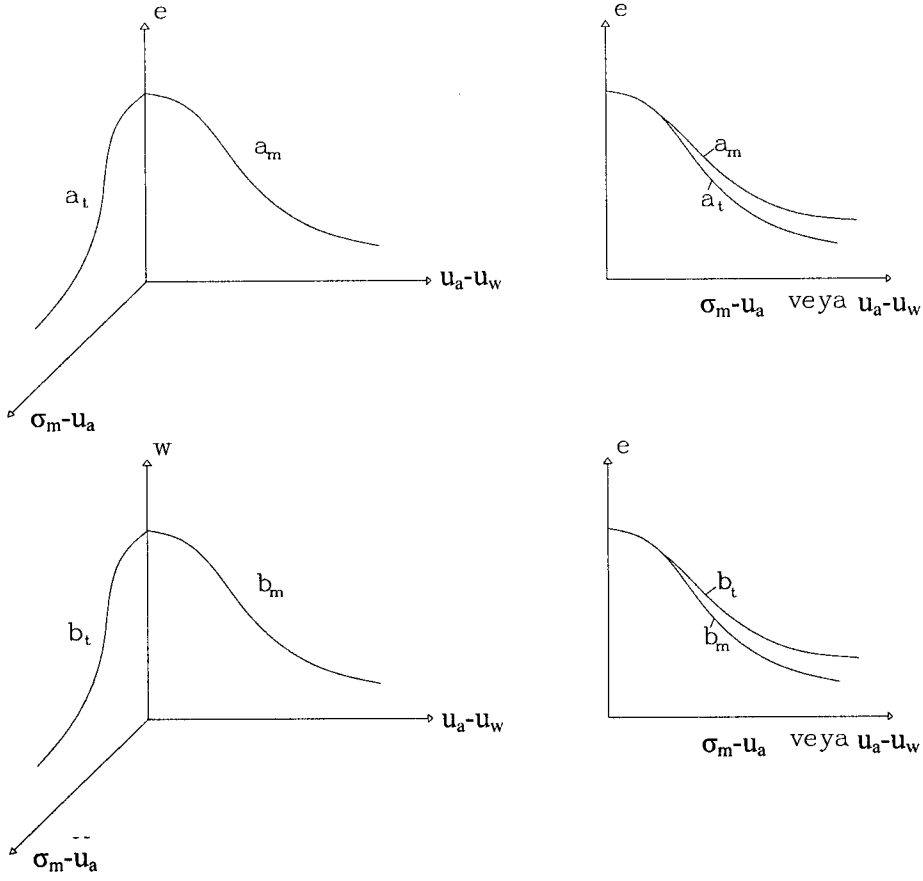
Genel anlamıyla konsolidasyon, sabit basınç altında zemin içindeki akışkanların zemin dışına çıkması sonucu oturma olarak tanımlanmaktadır.

Doymamış zeminlere ait konsolidasyon oturması, doymuş zeminlere göre daha küçüktür. Bunun nedeni, yukarıda ifade edildiği gibi, kapiler emmenin doku ve yapıyı muhafaza edecek şekilde etki etmesidir.

Bir konsolidasyon olayında iki tür ilişki söz konusudur. Bunlardan ilki gerilme-deformasyon ilişkisi, ikincisi de deformasyon-zaman ilişkisidir. Bu ilişkileri belirleyen, düzgün iç yapılı katı cisimlerde olduğu gibi, standart ve sabit bir değer verilememektedir. Örneğin, yapı çeliği veya betonda olduğu gibi, ne belli bir poisson oranı ne de bir elastisite modülünden söz edilemez. Zeminlerin heterogen ve anizotrop yapısı nedeniyle, her seferinde, her zemin örneği üzerinde, arazideki durumu simüle eden deney yapma zorunluluğu vardır. Yalnız, doğruluğu kabul edilmiş belli başlı prensiplere göre hareket edilir.

Doymamış zeminlerde de, doymuş zeminlerde olduğu gibi, gerilme-deformasyon bağıntıları incelenirken; zemin hacmindeki değişmelerin, boşluk hacmindeki değişmelere eşit olduğu varsayılır. Zemin danelerinin sıkışmadığı kabul edilir. Doymamış zemin durumunda; boşluk hacmindeki değişmeye, boşluk-suyu ve boşluklardaki hava hacimlerindeki değişmelerin katkıları göz önüne alınır.

Su ve hava hacimlerindeki değişme üzerinde, toplam boşluk basıncı ve bunun bileşenlerinin önemi vardır. Zemin dokusunun muhafaza edilmesine, sözü edilen bileşenlerden, kapiler emme ve boşluk hava basıncı birlikte yardımcı olur. Bu bileşenlerin ortak davranışı, boşluk oranının değişmesini kontrol eder. Bu nedenle doymamış zeminlerin konsolidasyonunda kapiler emme ve net gerilmelerin birlikte kontrol edildiği deneyler uygulanır. Bu deneyler ile su içeriği ve hacim değişimi arasındaki ilişki bulunmaya çalışılır. Başka bir ifade ile  $\Delta V / V_0 = f(w)$  ilişkisi çıkarılır. Söz konusu deneyler sonunda, Şekil 2'de gösterilen, gerilme yüzeyleri belirlenir.(Önalp,1997)



Şekil 2, Gerilme Yüzeyleri ve Boşluk Oranı Değişimi

Şek. 2’de gösterilen gerilme yüzeyleri veya daha önce sözü edilen su-karakteristik eğrisi belirlenirken, kapiler emme değerleri veya emme basınçları çok büyük olabilir. Bu durumda pF eğrileri kullanılır. Yine Şek. 2’de verilen boşluk oranı ve su içeriğindeki değişimler, aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$de = a_t d(\sigma_m - u_a) + a_m d(u_a - u_w) \dots \dots \dots (9.a)$$

$$dw = b_t d(\sigma_m - u_a) + b_m d(u_a - u_w) \dots \dots \dots (9.b)$$

Bu eşitliklerde görülen a ve b parametreleri, Şek. 2’de gösterilen eğrilerin eğimleridir. Normal gerilmelerden kaynaklanan hacimsel sıkışma katsayısı

$a_1, v, e, b_1$  ve kapiler emmelerden kaynaklanan hacimsel sıkışma katsayısı  $a_m$  ve  $b_m$  ile ifade edilmiştir. Ancak bu yaklaşımda yapılan varsayım, doymun zeminlerde olduğu gibi, deformasyonların küçük olduğu varsayımdır. Bu nedenle (9.a) ve (9.b) ifadelerindeki hacimsel sıkışma katsayılarını ifade eden a ve b parametreleri, diferansiyelden bağımsız kalmışlardır. (Fredlund ve Rahardjo,1993)

Deformasyon-zaman bağıntılarına gelince, doymamış bir zeminin boşluk basıncı, doymun bir zeminin boşluk basıncına göre daha çabuk söner. Sıkışmanın büyüklüğüne bağılı olarak; boşluk basıncı, zemin su içeriği, hidrolik iletkenlik ve hacimsel sıkışma katsayısı, yukarıda yapılan varsayımın aksine, değişken bir hüviyete sahiptir. Sonuç olarak hem hidrolik iletkenlik, hem de difüzyon katsayısı su içeriğinin birer fonksiyonudur. Bunun tersi olarak; zemin su içeriği de, zemin örneği üzerine uygulanan, toplam basıncın bir fonksiyonu olup, fiziksel özelliği olması nedeniyle, hacimsel sıkışma katsayısına bağılıdır. Sonuç olarak zeminin sıkışması ve bunu simgeleyen konsolidasyon katsayısı, zemin su içeriğine bağılı değişken bir parametredir. Bu nedenle konsolidasyon katsayısı, deformasyon-zaman ilişkisini belirleyen diferansiyel denklemde, türev içinde olması gerekir. Problem non-lineer difüzyon karakterine sahip fiziksel bir olay mahiyetindedir.

Tüm bu zorluklara rağmen, olayın ifade edilebilmesi için, Fredlund ve Hasan ,1979, tarafından zemin danelerinin sıkışmadığı ve deformasyonların küçük olduğu; (9.a) ve (9.b) ifadeleri ile verilen, varsayımlar yapılmıştır. Bu varsayımların yapılışı, hacim değişiminin lineer olduğu ve hacim değiştirme katsayılarının parametre olarak alınabileceği kabulüne götürmüştür. Buna göre hacim değişiminin zamana göre değişmesi aşığıdaki şekilde verilmiştir.

$$\frac{\partial(V_w / V_0)}{\partial t} = m_{1k}^w \frac{\partial(\sigma_z - u_a)}{\partial t} + m_2^w \frac{\partial(u_a - u_w)}{\partial t} \dots\dots\dots (10)$$

Zikredilen kabullere ilave olarak, hava fazının sürekli ve atmosferik basınca eşit olduğu varsayılmış ve su buharı hareketi ihmal edilmiştir. Yalnızca su fazına bağlı, aşağıdaki ilişki yazılmıştır.

$$\frac{\partial(V_w / V_0)}{\partial t} = \frac{\partial(-K \frac{\partial h_w}{\partial z})}{\partial z} \dots\dots\dots (11)$$

Verilen (10) ve (11) numaralı eşitlikler birbirlerine eşitlenerek tek boyutlu konsolidasyon diferansiyel denklemi bulunmuştur.

$$m_2^w \frac{\partial u_w}{\partial t} = -(m_{1k}^w - m_2^w) \frac{\partial u_a}{\partial t} + \frac{K_w}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} + \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial K_w}{\partial z} \frac{\partial u_w}{\partial z} + \frac{\partial K_w}{\partial z} \dots\dots\dots (12)$$

Bulunan bu diferansiyel denklemin bu haliyle analitik çözümü oldukça zor ve olanaksız gibidir. Bu nedenle çözümler, sonlu farklar yöntemi kullanılarak, nümerik olarak sunulmuştur. (Fredlund ve Rahardjo,1993). Deformasyonların küçük ve lineer, hacim değiştirme katsayısının sabit alınması nedeni ile, ince zemin örneklerine uygulanabilmekte, kalın ve büyük boyutlu zemin örneklerinde yaklaşık sonuçlar vermektedir. Oysa aslında non-lineer difüzyon tipinde bir olay söz konusudur. Böyle bir olayı ifade eden diferansiyel denklem Fucker-Planck tipi non-lineer difüzyon denklemdir. Bu tip bir diferansiyel denklem, boşluk-basıncı ve hidrostatik basınç nedeniyle, türev altında induktif bir terim içerir. Sonuç olarak problemi çözebilmek için, problemin özelliğine göre ve sınır koşullarına bağlı olarak iki kez dönüşüm yapmak gerekir.

Sözü edilen tipte diferansiyel denklemin steady çözümleri (zamandan bağımsız çözümleri, başka bir ifade ile  $\partial\theta/\partial t = 0$  olan çözümleri) su karakteristik eğrisine dayanarak ve bu eğri eşit aralıklara bölünerek Gardner (1956) tarafından ve yine boşluk dağılımına göre önce Childs ve Collis George (1950) ve sonra Marshall (1958) ve bunu modifiye

ederek Millington ve Quirk(1959;1961), kararlı(steady) durum için nümerik bir yaklaşımla çözerek, hidrolik iletkenlik için birer yöntem vermişlerdir. Bunlar dışında Philip(1955;1957) serisel yaklaşımla non-lineer difüzyon olayına çözüm getirmiştir. Ayrıca Philip yine kararlı (steady) durum için, hidrolik iletkenliği

$$K = K_0 e^{\alpha u} \dots\dots\dots(13)$$

şeklinde bir fonksiyonla ifade ederek, diferansiyel denklemi lineerleştirmiştir. Sözü edilen son çözüm daha çok doygun duruma yakın, genellikle  $S_r \cong \%90$  dolaylarında, deneylere uygun sonuçlar vermektedir.

Tam analitik çözümler Tekinsoy (2002) tarafından yapılmış ve infiltrasyon teorisi içinde verilmiştir. Bulunan çözüm complementary-error function türünden olup,  $C_v$  konsolidasyon katsayısı ve D difüzyon katsayısı, fiziksel olayı niteleyen parametre durumundadır. Bu nedenle  $C_v$  ve D büyüklüklerinin değişimi önceden, su içeriği veya basınca göre bulunup, çözümde yerine konulması gerekir.

Doymamış zeminlerin konsolidasyonuna ait yukarıda zikredilen tüm özellikler göz önüne alınarak, Darcy yasasının geçerli olduğu ve hiçbir deformasyon kısıtlamasına gidilmeden, iç kuvvetlerin işinin dış kuvvetlerin yaptığı işe eşit olma prensibinden gidilerek, Tekinsoy(1990) tarafından aşağıdaki konsolidasyon diferansiyel denklemi verilmiştir. (Tekinsoy ve Haktanır,1990)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( c_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(14.a)$$

$$c_v = \frac{K}{m_v \gamma_w} = z \left( D \frac{\partial \theta}{\partial z} + K \right) \dots\dots\dots(14.b)$$

Burada  $u$  boşluk basıncını,  $C_v$  konsolidasyon katsayısını ve  $m_v$  de hacim değiştirme katsayısını ifade etmektedir. Denklemden görüldüğü gibi;  $C_v$  konsolidasyon katsayısı, türev içinde olup, değişken mahiyettedir. Konsolidasyon deneylerinde zemin örneği baştan doyurulmakta, sonra su ve hacim azalması ölçülmektedir. Zemin hava giriş değerine kadar hacmini doymuş olarak azaltmakta, bu noktadan sonra doymamış koşullar geçerli olmaya başlamaktadır. Bu nedenle boşluk basıncı, su içeriğinin  $u = f(\theta)$  şeklinde bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmektedir. Yine ifadede  $D$  difüzyon katsayısını göstermekte olup,

$$D = K \left( \frac{1}{\gamma_w m_v} - z \right) \dots \dots \dots (15)$$

ile ve boşluk basıncı da

$$u = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} z + \theta z + \frac{p}{\gamma_w} - z \dots \dots \dots (16)$$

Şeklinde ifade edilebilmektedir.

Yukarıda (14) no'lu diferansiyel denklemin kararlı ve kararsız çözümleri hem infiltrasyon teorisi, hem de doğal sıkışma yasası kullanılarak lineerleştirilip çözülmüştür. Konsolidasyon olayı, infiltrasyon olayı ile ilgili olduğu için, verilen diferansiyel denklem, basınç altında kapiler sızma hakkında da fikir verebilmektedir. Bunun sonucu olarak su içeriği değişimleri; su yüksekliği, sorptivite ve infiltrasyon değişkenleri cinsinden verilebilmektedir.

Öte yandan lineerleştirme sonunda  $C_v$  parametre durumuna geldiği için, klasik teoride tanımlanan  $T_v$  zaman faktörü, değişken özellik kazanmakta ve bir diferansiyel denklemle ifade edilmektedir.



$$c_v = -\frac{s\lambda}{2} \dots\dots\dots(17.a)$$

$$\lambda \frac{dT_v}{d\lambda} + 2T_v = \frac{2s}{\lambda} \dots\dots\dots(17.b)$$

$$s = \int_{\theta_0}^{\theta} \lambda d\theta \dots\dots\dots(17.c)$$

$$\lambda = \frac{s}{\theta_0 - \theta} = \frac{z}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots(17.d)$$

$$\Delta\theta = \frac{s}{\lambda} \dots\dots\dots(17.e)$$

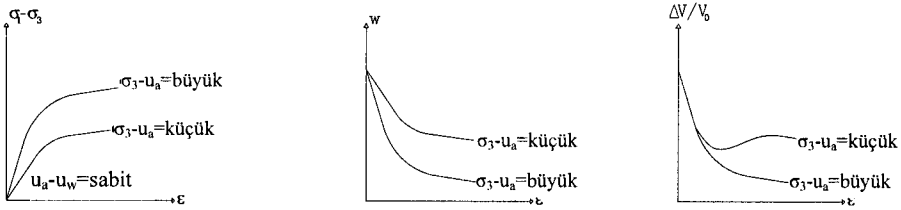
Burada s sorptiviteyi,  $\lambda$  infiltrasyon parametresini göstermekte olup, dikkat edilirse değişken birer büyüklük karakterine sahiptirler.

Buraya kadar sunulan konsolidasyon problemi; zeminin homogen ve izotrop bir poroz ortam olduğu ve sıcaklığın sabit kaldığı varsayımları altında ele alınmış bulunmaktadır. Oysa zeminin kendi doğası gereği; hem heterogen-anizotrop, hem de uniform değildir. Konunun bu tarzda ele alınması, daha da karmaşık ifadelerin elde edilmesine neden olmaktadır.

Öte yandan problem izotermal olmayan koşullar için de ele alınmakta ve sıcaklığın konsolidasyona olan etkileri incelenmektedir. Zaten zeminlerin termal özellikleri hakkında, don olayı hariç, çok az bilgiye sahip bulunmaktayız. Zeminlerin termal özellikleri, yüksek enerji hatlarının yer altından geçirilmesi, tarımda mevsimlik sıcaklık değişmelerinin etkisi, bunun sonucu olarak sulama kurutma ve zemin ıslahı problemlerinde önem arz etmektedir. Bu konularda da araştırmaların hızlanması gerekir.

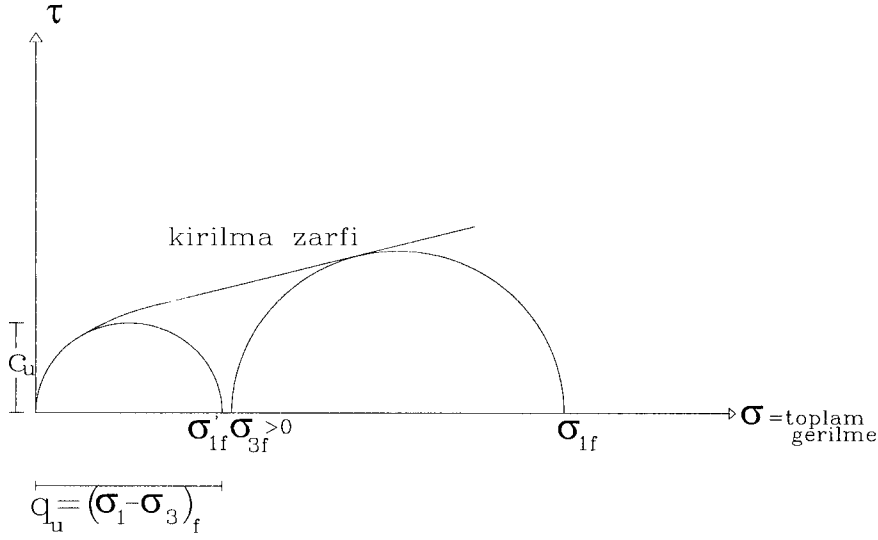
#### 4. DOYMAMIŞ ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİ

Arazideki doğal zeminler genellikle doymamış şekilde bulunurlar. Bu nedenle böyle zeminlerde emme basınçları etkin olup, gerilme-deformasyon ilişkileri, doymuş zeminlere göre daha karmaşıktır. Bir üç eksenli basınç aleti ile yapılan CD (konsolidasyonlu-drenajlı) deneyinde, deformasyon-deviatorik gerilme ilişkisi; su içeriği-deformasyon ve hacim değiştirme-deformasyon ilişkileri Şek. 3'te gösterilmiştir.



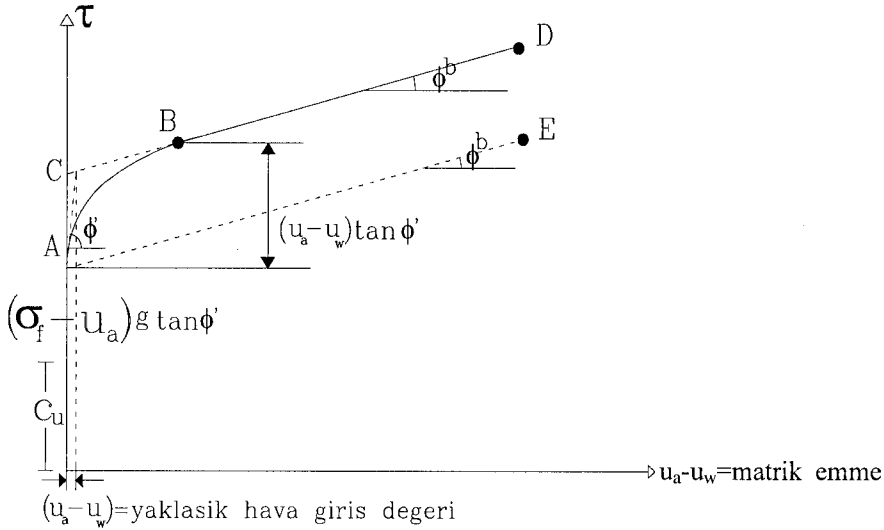
Şek. 3. Doymamış bir zeminde deformasyon-gerilme; su içeriği-deformasyon ve hacim değiştirme-deformasyon ilişkileri (Önalp,1997)

Daha önce ifade edildiği gibi; bir doymamış zeminin mekanik davranışı ile ilgili iki bağımsız değişken bulunmaktadır. Bunlardan biri  $(\sigma - u_a)$  net normal gerilmesi, diğeri de  $(u_a - u_w)$  matrik emmesidir. Bir zeminin doymunluk derecesi azaldıkça, zeminde kapiler ve matrik emmeler artar. Bu artış da zemin mukavemetini arttırır. Ancak mukavemetteki artış non-lineer bir artıştır. Örneğin arazide, genellikle yerinde yapılan serbest basınç mukavemeti deneylerinde Şek. 4'te görüldüğü gibi bir kırılma zarfı elde edilir.



Şekil 4. Serbest Basınç Deneyinde Kırılma Zarfı (Önalp,1997)

Öte yandan üç eksenli hücrede yapılan mukavemet deneylerinde, kayma mukavemetinin matris emmeye göre değişimi, grafik olarak gösterilirse, Şek.5'te gösterildiği gibi bir eğri elde edilir.



Şek.5 Doymamış Bir Zeminde Kırılma Zarfı (Fredlund ve Rahardjo,1993)

Sonuç olarak doymamış bir zeminin kayma mukavemeti zarfı, lineer olmayan eğrisel (non-linear) ve gerilme değişkenlerine göre, üç boyutlu bir yapı arz etmektedir. Yine doymamış zeminler üzerinde yapılan gözlemler, zemin su içeriğinin residüel su içeriğine yaklaşıırken, matrik emmenin kayma mukavemetine olan etkisinin ortadan kalktığını göstermiştir.

Buraya kadar ifade edilen, lineer olmayan kayma mukavemeti davranışını göz önüne alan Bishop ve Blight(1963), doymamış zeminler için, aşağıda verilen eşitliği önermişlerdir.

$$\tau_g = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + X(u_a - u_w) \tan \phi' \dots\dots\dots (18)$$

Bu ifadede  $c'$  efektif kohezyonu,  $(u_a - u_w)$  matrik emmeyi,  $(\sigma - u_a)$  net normal gerilmeyi, X ise doygunluk derecesine bağlı bir parametreyi gösterir. Zemin doygun durumda iken  $X=1$  değerine sahip olup,  $(u_a - u_w)$  matrik emmesinin değeri sıfıra eşittir. Yine bu durumda  $(u_a - u_w)$  matrik emmesi,  $(\sigma - u_a)$  net normal gerilmeye eşittir.  $\phi'$  ise efektif iç sürtünme açısına eşittir.

Daha sonra Fredlund ve Ark. (1978),  $(u_a - u_w)$  matrik emmesinin kayma mukavemetine olan etkisini göz önünde tutarak, aşağıdaki ampirik ilişkiyi önermişlerdir.

$$\tau_g = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \dots\dots\dots (19)$$

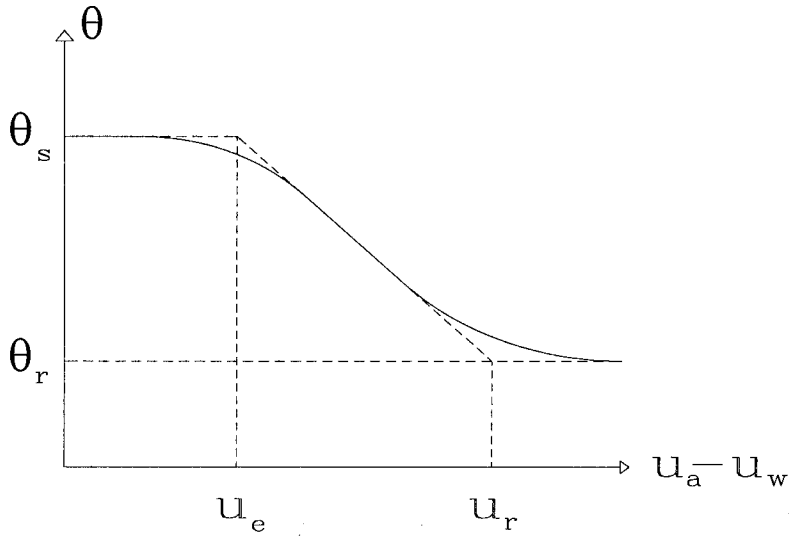
Bu eşitlikte  $c'$ ,  $(\sigma - u_a)$  ve  $\phi'$  büyüklükleri yukarıda verilen anlamları taşımakla birlikte,  $\overline{BD}$  doğru parçasının eğimi olan  $\phi^b$  açısını içermektedir (Şekil 5). Bu açı; matrik emmenin kayma mukavemetine olan, etki oranını ifade eder. Ayrıca hava giriş değerinde  $\phi^b = \phi'$  dır. Yüksek

matrik emmeler için  $\phi^b$  'nin değeri küçülür. Sonuçta matrik emmenin kayma mukavemetine olan katkısı,  $\tau_{us}$  emme mukavemeti olarak adlandırılmıştır.

Emme mukavemeti üzerindeki araştırmalar hala devam etmektedir. Örneğin Vanapalli ve Ark. (1996), su karakteristik eğrisine bağlı olarak, aşağıda verilen ampirik ilişkiyi önermişlerdir.

$$\tau_{us} = (u_a - u_w) \tan \phi' \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \dots \dots \dots (20)$$

Burada  $\theta$  hacimsel su içeriğini göstermekte olup,  $\theta_r$  ve  $\theta_s$  sırasıyla residüel ve doygunluk su içerikleridir. Bu su içerikleri Şek.6'da gösterilen su karakteristik eğrisinde görülen  $u_r$  residüel matrik emme ile,  $u_e$  hava giriş değerlerine karşı gelen su içerikleridir.



Şek.6 Su Karakteristik Eğrisi

Su karakteristik eğrisine dayanan ve yukarıdakinden daha karmaşık olan, emme mukavemeti ilişkileri için Rassam ve Cook (2002); Mio ve Ark.(2002) tarafından verilen ampirik eşitlikler yanında, Escario ve Juca (1989) tarafından önerilen  $2.5^o$ 'lık eliptik emme mukavemeti ilişkisi zikredilebilir.

Üç eksenli deney sonuçlarının değerlendirilmesi sonucunda elde edilen ve şimdiye kadar verilen ifadelerden daha çok, deney sonuçlarına yaklaşabilen, logaritmik model olarak adlandırılan, emme mukavemeti ilişkisi en son Tekinsoy ve Ark. (2004) tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$\tau_{us} = \tan \phi' (u_e + p_{at}) \ln \left( \frac{u + p_{at}}{p_{at}} \right) \dots \dots \dots (21)$$

Burada  $u = u_a - u_w$  ve  $u_e = (u_a - u_w)_e = (\sigma - u_a)_e$ 'yi göstermektedir.  $u_e$  hava giriş basıncıdır. Bulunan bu ifade; yarı ampirik bir ifade olup, verilen son hali, problemin koşullarına göre parametreler yerine konulmuş şeklindedir.

## 5. SONUÇ:

Zeminler, doğal halde iken, genellikle doymamış durumda bulunurlar. Doygun duruma göre mukavemetleri de, kapiler emme nedeni ile, daha fazladır. Gerekli drenaj v.s. gibi önlemler alınarak, doymamış zemin mukavemetinden yararlanılabilir. Oysa uygulamada, en emniyetsiz durum olan, doygun duruma göre projeler üretmekte ve zeminlerin taşıma kapasitelerinden tam olarak yararlanmamaktayız. Araştırmalar belli seviyelere geldiği zaman, sözü edilen durum gerçekleşecektir. Bu durum ise malzeme ve işçilik maliyetlerinin azalmasına götürecektir.

Öte yandan doymun zeminler ile ilgili bugünkü zemin mekaniği, zeminlerin çok özel bir halini oluşturur. Bu nedenle zemin mekaniği derslerinde önce doymun olmayan zeminlerin, öğretilmesi ve sonra özel hal olarak doymun zeminlerin verilmesi, zemin mekaniği öğretiminde, daha doğru bir yaklaşım olur. Bu öğretim tarzı hem kapsamlı, hem de daha kolay bir yol olarak gözükmeKtedir.

## KAYNAKLAR

- 1) Hubbert,M.King,1956 ,”Darcy’s law and field equations of the flow of underground fluids”.Trans.American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers,207;222-239
- 2) Richards,L.A.,1931,”Capillary Conduction of liquid through porous media” Physics 1;318-333.
- 3) Richards,S.J.,and L.V. Weeks,1953, “Capillary Conductivity values from moisture yield and tension measurements on soil columns”,soil sci.soc.Amer.proc. 17 ;206-209.
- 4) Klute,A.,1965,”Water diffusivity”,In Black ,C.A. (e.d.) Methods of soil analysis.” Amer.Soc.Agron.Monograph 9,Pait 1. p.262.
- 5) Önalp,A.1997,”Geoteknik Bilgisi I,Zeminler ve Mekaniği “,Sakarya Üniversitesi Yayın No=27, Adapazarı ,358-402.
- 6) Fredlund ,D.G. and H.Rahrdjo ,1993 “Soil Mechanics for unsaturated Soils”,A.Witey –Interscience Publication,John Wiley and sons,Inc.,New York ,U.S.A.
- 7) Tekinsoy,M.A.,2002, “Doymamış Zeminlerin İndeks ve Hidrolik Özellikleri “S.D.Ü. Yayın No.22.Tek .Ey.Fak.Isparta,Türkiye.
- 8) Fredlund ,D.G. and J.U.Hasan,1979,”One-dimensional Consolidation Theory :Unsaturated soils,”Can.Geot.Jour.,Vol.16,no.3,pp.521-531.Canada.
- 9) Gardner,W.R.,1956, “Calculation of Capillary Conductivity from Pressure Outflow Data “,Soil.Sci.Soc.Amer.Proc.20:317-320.
- 10)Childs,E.C.,and N.Collis-George,1950,”The permeability of Porous Materials”,Proc.Roy.Soc.Londra A201:392-405.
- 11) Marshall,T.J.,1958,”A relation between Permeability and Distribution of Pores.”,J.Soil Sci.9:1-8.
- 12) Millington,R.J.and J.P. Quirk,1959,”Permeability of Porous Media”,Nature 183:387-388.



- 13) Millington, R.J. and J.P. Quirk, 1961, "Permeability of Porous Solids", *Faraday Soc.* 59:1200-1207.
- 14) Philip, J.R., 1955, "Numerical Solution of equation of the diffusion type and diffusivity Concentration-dependent" *Trans. Faraday Soc.* 51:885-892.
- 15) Philip, J.R., 1957a, "Numerical Solution of equation of the diffusion type with diffusivity Concentration-dependent." 2. *Australian J. Phys.* 10:29-42.
- 16) Philip, J.R., 1957b, "The theory of Infiltration :1. The infiltration equation and its solution" *soil sci.* 83:345-357.
- 17) Fredlund, D.G., N.R. Morgenstein; R.A. Widger, 1978, The shear strength of unsaturated soil " *Can. Geotech. J.* 15:313-21.
- 18) Vanapalli, S.K.; Fredlund, D.G.; Pufahl, D.E.; Clifton, A.W., 1996, "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction" *Can. Geotech. J.*, 33:379-92.
- 19) Bishop A.W and Blight, G.E., 1963, "Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils", *Geotechnique*, 13(3):177-97.
- 20) Rassam, D.W. and Cook F., 2002, "Predicting the shear strength envelope of unsaturated soils", *Geotech. Test J.* 25(2):215-20.
- 21) Escario, V. and Juca, J., 1989, "Strength and deformation of partly saturated soils: Proceedings of the 12th international conference on soil mechanics and foundation engineering, Vol. 11. Rio De Janeiro, p.43-6.
- 22) Miao L.; Liu, Y. 2002, "Research of soil-water characteristics and shear strength features of nonyang expansive soil" *Eng. Geol.* 65. Amsterdam, Elsevier Science, p.261-7.

