

کانونک خاکهای غیر اشباع
(کانونک خاکهای اشباع چند جزئی)
نتایج تجربی

Unsaturated soils

Hasan Ghasemzadeh

فهرست عناوین و فصول

- ۱- مقدمه - آشنایی - مختصری از ترمودینامیک
- ۲- رفتار فازهای مختلف در خاک غیر اشباع
- ۳- اندازه گیری در خاک غیر اشباع
- ۴- نتایج آزمایشات خاک غیر اشباع
- ۵- تنش موثر و کرنش
- ۶- تئوری های خاک غیر اشباع
- ۷- جریان در خاک غیر اشباع
- ۸- کاربرد خاک غیر اشباع در مهندسی

فهرست عناوین و فصول

نتایج آزمایشات خاک غیر اشباع

- ۱- تعریف تنش های موثر در خاک غیر اشباع
- ۲- نفوذپذیری در خاک غیر اشباع
- ۳- منحنی مشخصه آب-خاک
- ۴- تغییرات حجم خاک غیر اشباع
- ۵- مقاومت برشی خاک غیر اشباع

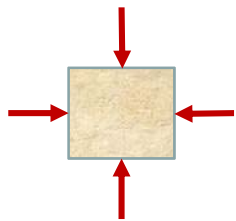
Dr. Hasan Ghasemzadeh

3

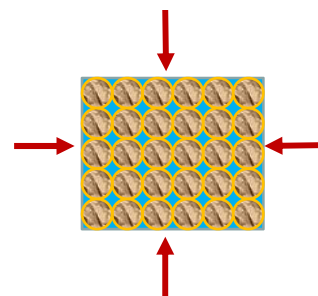
تنش موثر

رفتار مکانیکی خاک های خشک با تنش خاک تعیین می شود

مفهوم تنش موثر



$$\sigma' = \sigma - u_w$$

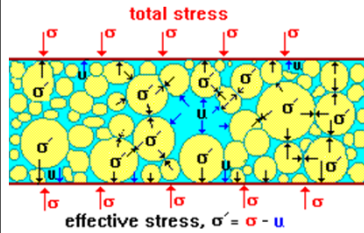


4

Dr. Hasan Ghasemzadeh

تنش موثر

رفتار مکانیکی خاک‌های اشباع با تنش موثر تعیین می‌شود.



تنش موثر ترزاچی (۱۹۳۶)

$$\sigma' = \sigma - u_w$$

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_w \delta_{ij}$$

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}$$

$$\sigma' = \begin{pmatrix} \sigma_{11} - u_w & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} - u_w & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} - u_w \end{pmatrix}$$

5

Dr. Hasan Ghasemzadeh

تنش موثر

$$\sigma' = \sigma - \left(1 - \frac{B_{sk}}{B_g} \right) u_w$$

تنش موثر اسکمپتون (۱۹۶۰)

B_{sk} مدول حجمی (تراکم پذیری) خاک خشک

B_g مدول حجمی (تراکم پذیری) ذرات خاک

$$0 \leq \frac{B_{sk}}{B_g} \leq 1$$

نسبت سختی‌ها در فشار محصور کننده کم برابر صفر و در فشار محصور کننده زیاد (مسطح شدن سطح تماس و سماتنه شدن) برابر یک است

در صورتیکه سیال و دانه‌ها تراکم ناپذیر باشند تنش موثر اسکمپتون به تنش موثر ترزاچی تبدیل می‌شود

6

Dr. Hasan Ghasemzadeh

تنش موثر

تنش موثر Seridharan and Rao (۱۹۷۳)

$$\sigma' = \sigma - u_w - (R_{dl} - Att)$$

در بعضی حالات با تنش موثر ترازقی ثابت تغییر شکل داریم
مانند انقباض رس در خروج آب از نمونه رس در فشارهای
ثابت یا در اثر ورود یک نمک به خاک که نیروی دافعه بین
ذرات را کم می کند

R_{dl} نیروی دافعه ناشی از لایه دوگانه

Att نیروی ناشی از جذب (الکترواستاتیک و الکترومغناطیس یا واندروالس)

$$\sigma' = \sigma - \mu u_w$$

تعریف عمومی تنش موثر در خاک اشباع

$$0 < \mu \leq 1$$

7

Dr. Hasan Ghasemzadeh

تنش موثر

رفتار مکانیکی خاک غیر اشباع چگونه تعیین می شود؟
بطور معمول رفتار مکانیکی خاک های غیر اشباع نیز با استفاده از متغیرهای تنش شرح داده می شوند.
اما این متغیرها کدامند؟

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + P_w \delta_{ij} \quad \text{خاک های اشباع}$$

تنش موثر در خاک های غیر اشباع

۱- تنش موثر بیشاب

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - P_a \delta_{ij}) + \chi_w s \delta_{ij} \quad \text{مکش بافتی} \quad s = P_a - P_w = u_a - u_w$$

مکش بافتی تفاوت فشاری بین فشار هوای حفره ای و فشار آب حفره ای ($u_a - u_w$) است.

به عنوان مثال $u_a - u_w = 1 \text{ Pa}$ یعنی فشار آب خاک ۱ پاسکال کمتر از فشار هوای محیط است.

8

Dr. Hasan Ghasemzadeh

مکش بافتی

سوالات اساسی در مورد مکش بافتی مطرح است :

۱- آیا مکش بافتی یک متغیر از جنس تنش است ؟

۲- آیا مکش بافتی یک متغیر کیفی تنش است ؟

این گونه به نظر می رسد که مکش بافتی نه متغیری از جنس تنش وارده به REV سه فازه و نه تنش فیزیکی وارده به وجه REV سه فازه می باشد، ولی کمیت $\chi_w S$ تنش فیزیکی اعمالی بر وجه های المان پایه معرف سه فازه می باشد.

در حالت کلی یک متغیر اصلی می تواند با هر نوع متغیر دیگری که بر متغیر اصلی ما تاثیر دارد، توصیف گردد. بنابراین مکش بافتی یک متغیر کیفی تنش است.

Dr. Hasan Ghasemzadeh

9

تنش موثر

۲- مستقل های تنش

$$\sigma_{ij} - P_a \delta_{ij} \quad \text{و} \quad S = u_a - u_w$$

matric suction represents the energy J per unit volume of soil water,
not per unit volume of unsaturated soil

10

Dr. Hasan Ghasemzadeh

تانسور تنش با دو مستقل تنشی

$$\sigma_{net} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} - u_a & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} - u_a & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} - u_a \end{pmatrix}$$

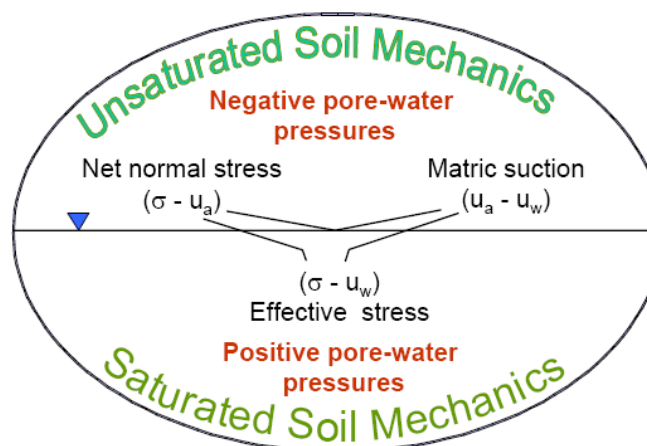
$$s = \begin{pmatrix} u_a - u_w & 0 & 0 \\ 0 & u_a - u_w & 0 \\ 0 & 0 & u_a - u_w \end{pmatrix}$$

Matric Suction Stress Tensor

Dr. Hasan Ghasemzadeh

11

تنش موثر



Dr. Hasan Ghasemzadeh

12

Different stress variable

	Stress variable 1	Stress variable 2
Alonso <i>et al.</i> (1990) Cui <i>et al.</i> (1995) Wheeler & Sivakumar (1995)	$\sigma - u_a$	$u_a - u_w$
Bolzon <i>et al.</i> (1996)	$\sigma - u_a + \chi(u_a - u_w),$ $\chi = S_r$	$u_a - u_w$
Modaressi & Abou-Bekr (1994a & 1994b)	$\sigma - \pi_c,$ $\pi_c = \text{capillary pressure}$	π_c
Kohgo <i>et al.</i> (1993a & 1993b)	$\sigma - u_{eq},$ $u_{eq} = \text{equivalent pore}$ pressure	$u_a - u_w - s_e,$ $s_e = \text{air entry suction}$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

13

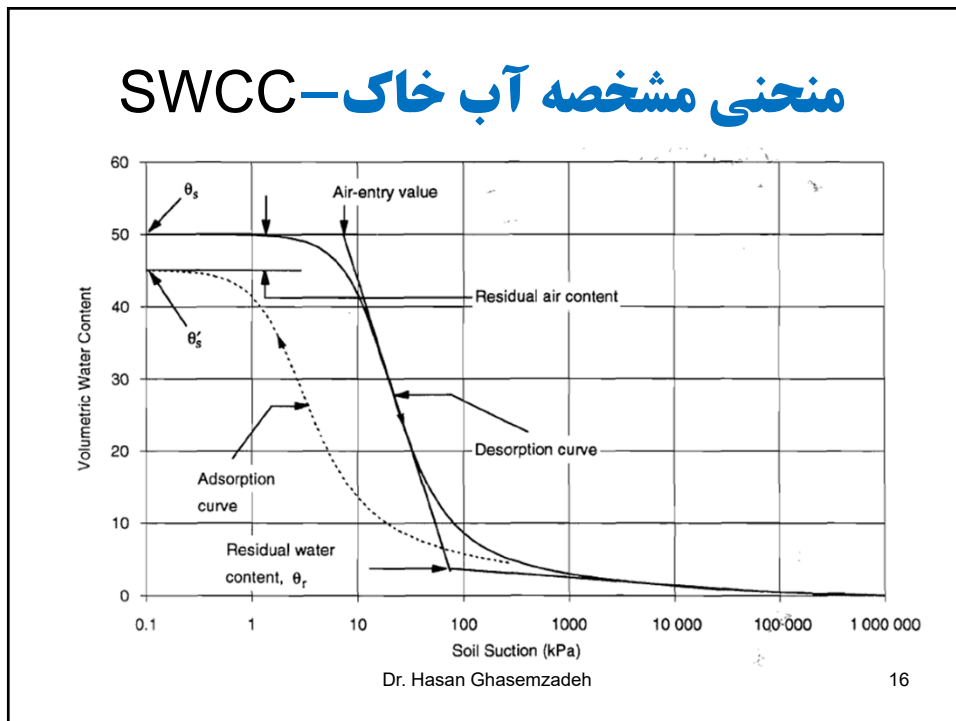
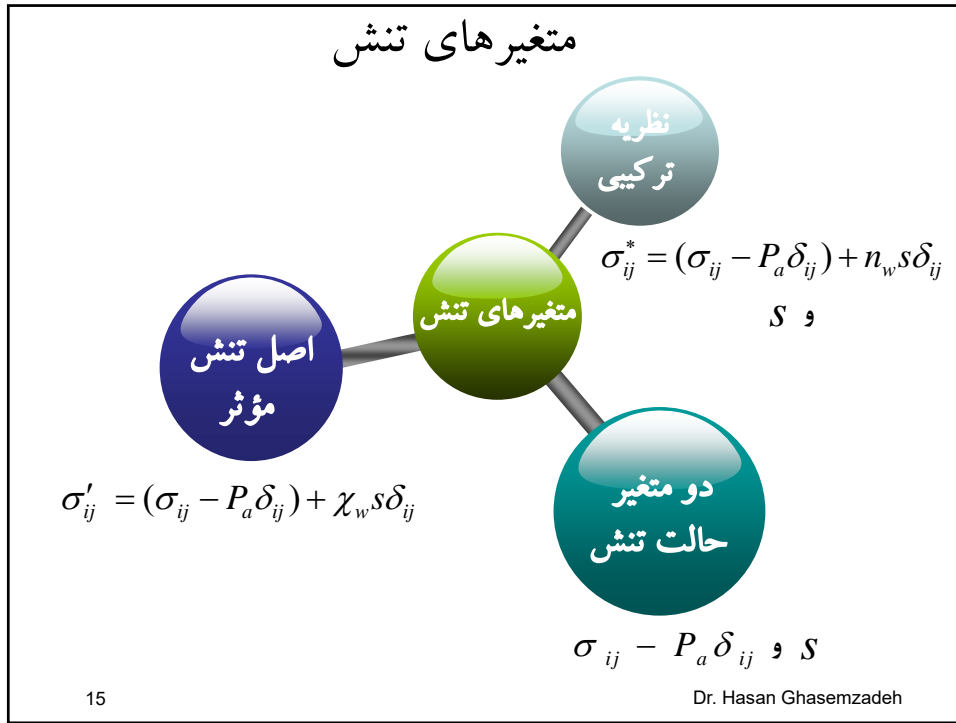
تنش موثر

۳- تنش ترکیبی

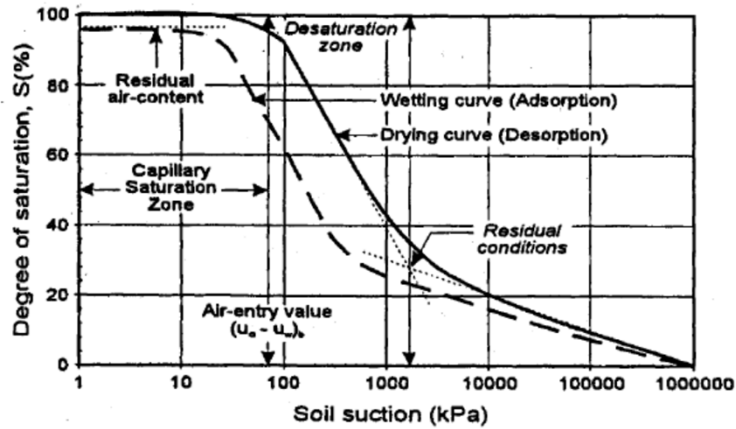
$$\sigma_{ij}^* = (\sigma_{ij} - P_a \delta_{ij}) + n_w s \delta_{ij} \quad , \quad s = P_a - P_w$$

14

Dr. Hasan Ghasemzadeh



رابطه مکش و میزان آب



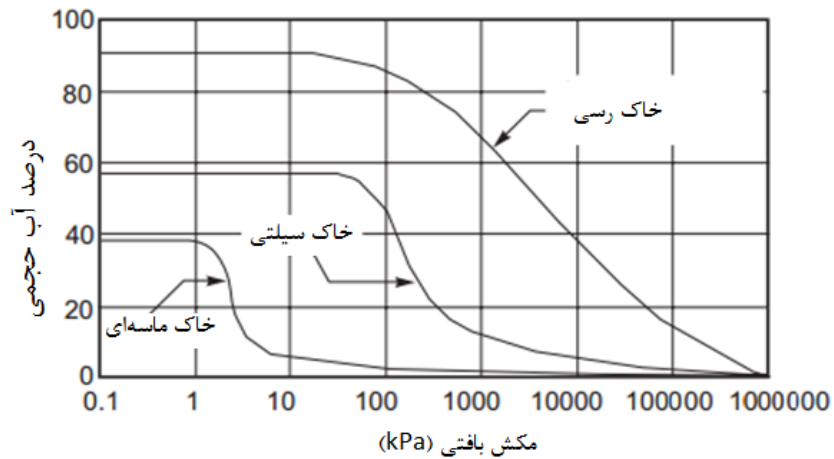
Typical water retention curve (after Fredlund (1998))

Dr. Hasan Ghasemzadeh

آشام و تخلیه

17

منحنی مشخصه آب خاک-SWCC



Dr. Hasan Ghasemzadeh

18

منحنی مشخصه آب خاک – SWCC

$$\theta = \theta_s \left[\frac{1}{\ln \left[e + (\psi / a)^n \right]} \right]^m$$

فردلند و زینگ 1994

به ترتیب بیانگر درصد حجمی آب در یک مکش دلخواه و حالت اشباع کامل بوده و θ_s θ

بیانگر مکش موجود در خاک است که می توان مکش کل یا بافتی باشد. ψ

Dr. Hasan Ghasemzadeh

19

منحنی مشخصه آب خاک – SWCC

در صورتیکه رابطه مکش و درجه اشباع از رابطه فردلند و زینگ با ثوابت $(a=n=0.5, m=1)$ تبعیت کند مقدار مکش در خاک چقدر است. $\theta_s = 0.29$ $\theta = 0.087$

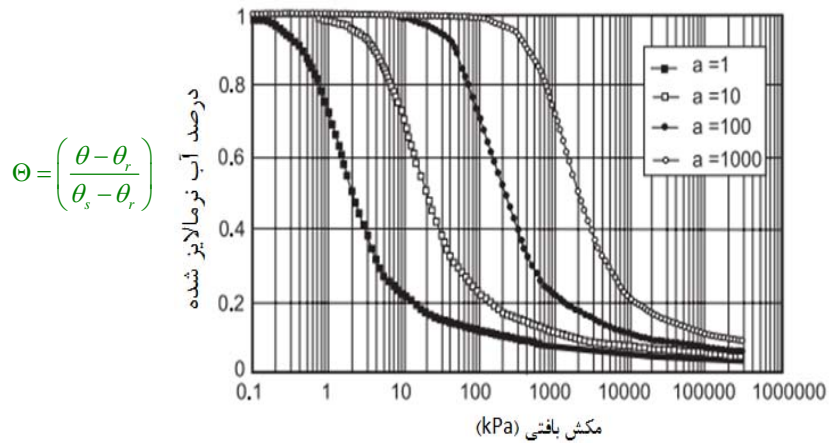
$$\theta = \theta_s \left[\frac{1}{\ln \left[e + (\psi / a)^n \right]} \right]^m = 0.087$$

$$0.29 \left[\frac{1}{\ln \left[e + (\psi / 0.5)^{0.5} \right]} \right]^1 = 0.087 \rightarrow \psi = 320.38 \text{ kPa}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

20

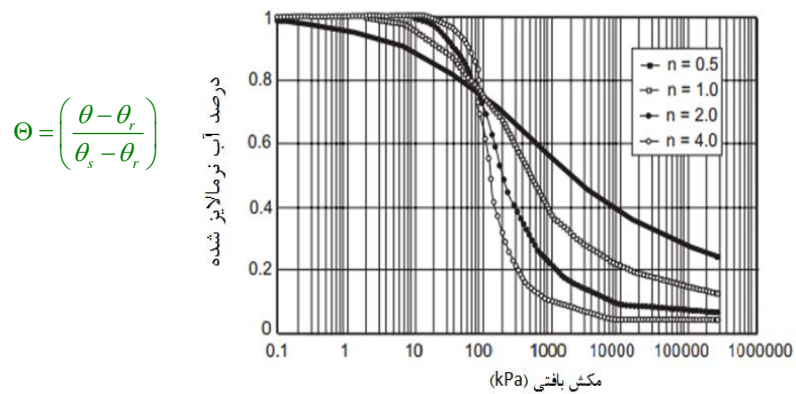
منحنی مشخصه آب خاک – SWCC



Dr. Hasan Ghasemzadeh

21

منحنی مشخصه آب خاک – SWCC

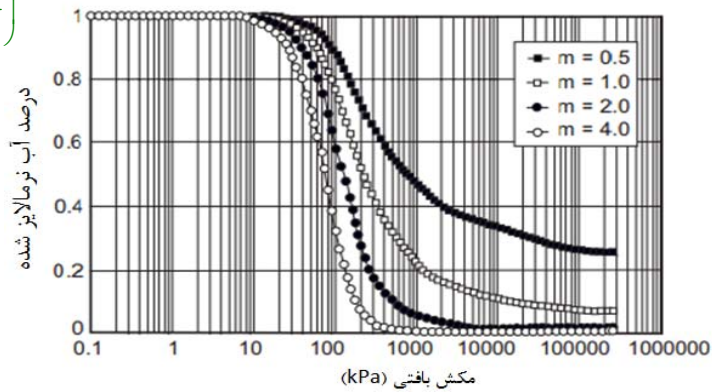


Dr. Hasan Ghasemzadeh

22

منحنی مشخصه آب خاک – SWCC

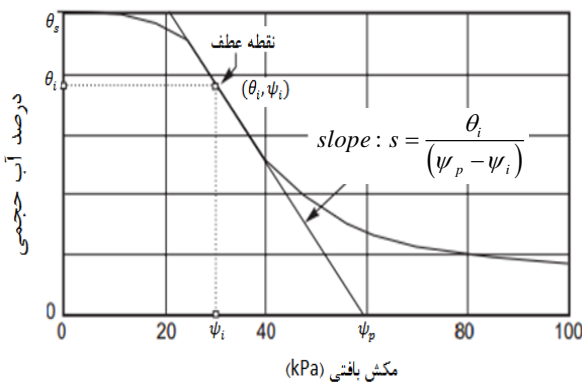
$$\Theta = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)$$



Dr. Hasan Ghasemzadeh

23

منحنی مشخصه آب خاک – SWCC



Fredlund & xing 1994

$$\theta(\psi, a, n, m) = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + (\psi / a)^n \right] \right\}^m}$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi / \psi_r)}{\ln[1 + (10^6 / \psi_r)]}$$

$$a = \psi_i \quad m = 3.67 \ln \left(\frac{\theta_s}{\theta_i} \right) \quad n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} 3.72s\psi_i$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

24

منحنی مشخصه آب خاک – SWCC

اصلاح برای مکش های زیاد

$\theta(\psi, a_f, n_f, m_f) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\psi/a_f)^{n_f}]\}^{m_f}}$

$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln[1 + (10^6/\psi_r)]}$

$1.5 MPa \leq \psi_r \leq 3 MPa$ معمولا

$a_f = \psi_i$
 $m_f = 3.67 / \ln\left(\frac{\theta_s C(\psi_i)}{\theta_i}\right)$
 $n_f = \frac{1.31^{m_f+1}}{m_f C(\psi_i)} 3.72 s^*$

$s^* = \frac{s}{\theta_s} - \frac{\psi_i}{1.31^m (\psi_i + \psi_r) \ln[1 + (10^6/\psi_r)]}$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 25

منحنی مشخصه آب خاک – SWCC

روابط تغییرات محتوای حجمی آب با مکش در خاک غیراشباع

ردیف	محقق	رابطه
1	Gardner 1958	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + a\psi^b}$
2	Brooks & Corey 1964	$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(a/\psi)^b$
3	Van Genuchten 1980	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + a\psi^b]^c}$
4	Fredlund et.al 1995	$\theta = \theta_s \left(1 - \frac{\ln(1 + (u_a - u_w)/(u_a - u_w)_r)}{\ln(1 + 1000000/(u_a - u_w)_r)} \right) \left[\frac{1}{\ln(e + ((u_a - u_w)/a)^n)} \right]^m$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 26

منحنی مشخصه آب خاک – SWCC

روابط تغییرات محتوای حجمی آب با مکش در خاک غیراشباع

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + \alpha \psi^b]^c}$$

Van Genuchten 1980

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$$\theta_e = \frac{1}{[1 + (\alpha(u_a - u_w))^n]^{1-1/n}} \quad \alpha = \frac{1}{u_{aAEV}} \quad n = \text{pore-size spectrum number}$$

The larger the value of n is, the wider the range of pore sizes

Dr. Hasan Ghasemzadeh

27

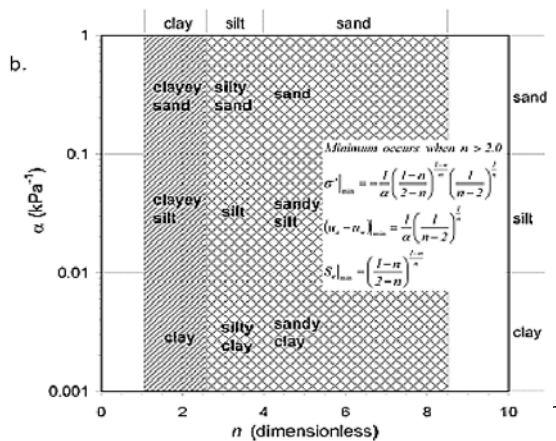
منحنی مشخصه آب خاک – SWCC

Van Genuchten 1980

$$\theta_e = \frac{1}{[1 + (\alpha(u_a - u_w))^n]^{1-1/n}}$$

$$\alpha = \frac{1}{u_{aAEV}}$$

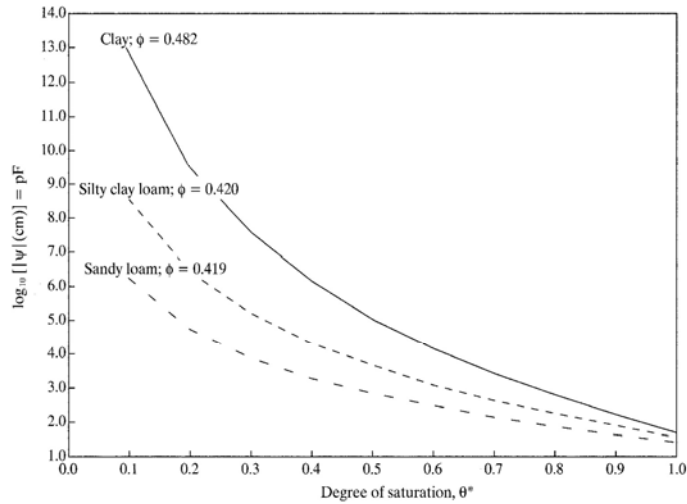
n = pore-size spectrum number



28

منحنی مشخصه آب خاک – SWCC

Figure 7.16 Soil-water pressure (tension), $|\psi|$, versus degree of saturation, θ^* , for soils of three different textures. Note that the vertical axis gives the base-10 logarithm of the tension expressed in cm of water (pF). Curves are based on typical values given by Clapp and Hornberger (1978).



Dr. Hasan Ghasemzadeh

29

نفوذپذیری آب در خاک غیر اشباع

روابط نفوذپذیری با درجه اشباع آب در خاک غیر اشباع

ردیف	محقق	رابطه
1	Corey 1957	$k_w = k_{w0} \left(\frac{S_r - S_{ru}}{[1 - S_{ru}]} \right)^d$
2	Gardner 1958	$k_w = \frac{k_{w0}}{\left[1 + a \left(\frac{P_w - P_g}{\rho_w} \right)^b \right]}$
3	Richards et Chan 1969	$k_w = E + \frac{D}{A + B(P_g - P_w)^m + C(P_g - P_w)^n}$
4	Kovacs 1981	$k_w = k_{w0} \left(\frac{S_r - S_{ru}}{[1 - S_{ru}]} \right)^d$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

30

نفوذپذیری

$$K = K(n, \theta, T)$$

نفوذپذیری تابعی از تخلخل، محتوای حجمی و درجه حرارت است

$$K = K_{int}(n)k_r(\theta)$$

$K_{int}(n)$ نفوذپذیری مطلق برحسب دارسی یا متر مربع *intrinsic permeability and absolute permeability*

$K_r(\theta)$ نفوذپذیری نسبی

Table 3. Intrinsic permeabilities and saturated hydraulic conductivities obtained for 5 soil samples

Soil type	Intrinsic permeability (K_{int} , m^2) (gas flow experiments)		Saturated water conductivity (k_w , m/s) (water flow experiments)	
	Average	s.d.	Average	s.d.
Coarse sand	1.03×10^{-10}	3%	1.38×10^{-3}	9%
Stockton sand	7.14×10^{-11}	10%	5.96×10^{-4}	26%
Silica	3.12×10^{-11}	12%	3.03×10^{-4}	10%
Dark mineral sand	1.40×10^{-11}	9%	1.60×10^{-4}	6%
Ballotini	6.35×10^{-12}	61%	6.65×10^{-5}	11%

1 darcy = $10^{-12}m^2$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

31

نفوذپذیری

$$K = K_{int}(n)\rho g / \mu$$

K هدایت هیدرولیکی بر حسب m/s

μ لزجت بر حسب $kg.m/s$ or Ns/m^2 or $Pa.s$

Material	m/s
Coarse sands	1.0E-03
Sands	1.0E-04
Most soils	1.0E-05
Clay/weathered till	1.0E-06
Heavy Clays	1.0E-07
Solonetzic soils	1.0E-08
Unweathered till to	1.0E-09
- compacted clay barriers	1.0E-10

1 darcy = $10^{-12}m^2$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

32

نفوذپذیری نسبی در برابر آب

$$K_w = K_{int}(n)k_{rw}(\theta) / \mu$$

K_w نفوذپذیری در برابر آب در خاک غیراشباع

$K_{rw}(\theta)$ نفوذپذیری نسبی در برابر آب

$K(n)$ نفوذپذیری مطلق بر حسب داریسی

μ_w لزجت بر حسب Ns / m^2

$$K_w = K_{w0} \cdot 10^{ae} \cdot \left(\frac{S_r - S_{ru}}{1 - S_{ru}} \right)^d \left(\frac{\mu_w(T_r)}{\mu_w(T)} \right)$$

برای نمونه

$$\mu_w = 0.06612(T - 229)^{-1.562} \quad \text{Kaye and Laby (1973)}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

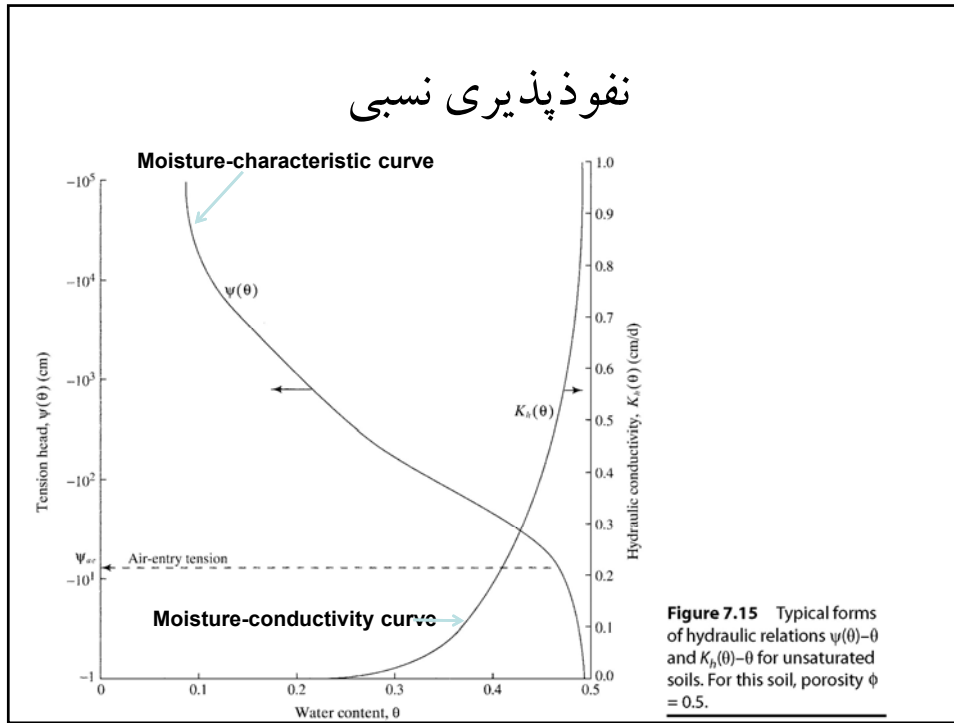
33

نفوذپذیری نسبی

Référence	Perméabilité à l'eau	Les paramètres
Irmay 1954	$K_w = K_{w0} \left(\frac{S_r - S_m}{1 - S_m} \right)^d$	$S_{ru}, d=3$
Corey 1957	$K_w = K_{w0} \left(\frac{S_r - S_m}{1 - S_m} \right)^d$	$S_{ru}, d=4$
Gardner 1958	$K_w = \frac{K_{w0}}{\left[1 + a(P_w - P_g) / \rho_w \right]^b}$	a, b
Scott 1963	$K_w = K_{w0} [1 - n(1 - S_r)]$	
Richards et Chan 1969	$K_w = E + \frac{D}{A + B(P_g - P_w)^m + C(P_g - P_w)^n}$	A, B, C, D, E, m, n
Kovacs 1981	$K_w = K_{w0} \left(\frac{S_r - S_m}{1 - S_m} \right)^d$	$S_{ru}, d=3,5$
Gens et al 1997	$K_w = \frac{K_{w0}}{\mu_w} K_{rw}(S_r) \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \left(\frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} \right)$	n_0
Gatmiri 1997	$K_w = K_{w0} \cdot 10^{ae} \left(\frac{S_r - S_m}{1 - S_m} \right)^d \left(\frac{\mu_w(T_r)}{\mu_w(T)} \right)$	a, S_{ru}, d

Dr. Hasan Ghasemzadeh

34



نفوذپذیری نسبی

$$q_z = -K_h [1 + d\psi(\theta)/dz]$$

Porosity
↓
 ϕ

Saturated value
↓
 K_h^s

$\psi = \psi_{ae} (\theta/\phi)^b$
↓
 $|\psi_{ae}|$

↓
 b

Soil Texture	ϕ	K_h^s (cm s ⁻¹)	$ \psi_{ae} $ (cm)	b
Sand	0.395 (0.056)	1.76×10^{-2}	12.1 (14.3)	4.05 (1.78)
Loamy sand	0.410 (0.068)	1.56×10^{-2}	9.0 (12.4)	4.38 (1.47)
Sandy loam	0.435 (0.086)	3.47×10^{-3}	21.8 (31.0)	4.90 (1.75)
Silt loam	0.485 (0.059)	7.20×10^{-4}	78.6 (51.2)	5.30 (1.96)
Loam	0.451 (0.078)	6.95×10^{-4}	47.8 (51.2)	5.39 (1.87)
Sandy clay loam	0.420 (0.059)	6.30×10^{-4}	29.9 (37.8)	7.12 (2.43)
Silty clay loam	0.477 (0.057)	1.70×10^{-4}	35.6 (37.8)	7.75 (2.77)
Clay loam	0.476 (0.053)	2.45×10^{-4}	63.0 (51.0)	8.52 (3.44)
Sandy clay	0.426 (0.057)	2.17×10^{-4}	15.3 (17.3)	10.4 (1.64)
Silty clay	0.492 (0.064)	1.03×10^{-4}	49.0 (62.1)	10.4 (4.45)
Clay	0.482 (0.050)	1.28×10^{-4}	40.5 (39.7)	11.4 (3.70)

Dr. Hasan Ghasemzadeh 36

نفوذپذیری در برابر گاز

$$K_g = K_{int}(n)k_{rg}(\theta_g) / \mu_g$$

$K_{int}(n)$ نفوذپذیری مطلق بر حسب داری

$K_{rg}(\theta)$ نفوذپذیری نسبی در برابر گاز

μ_g لزجت بر حسب Ns / m^2

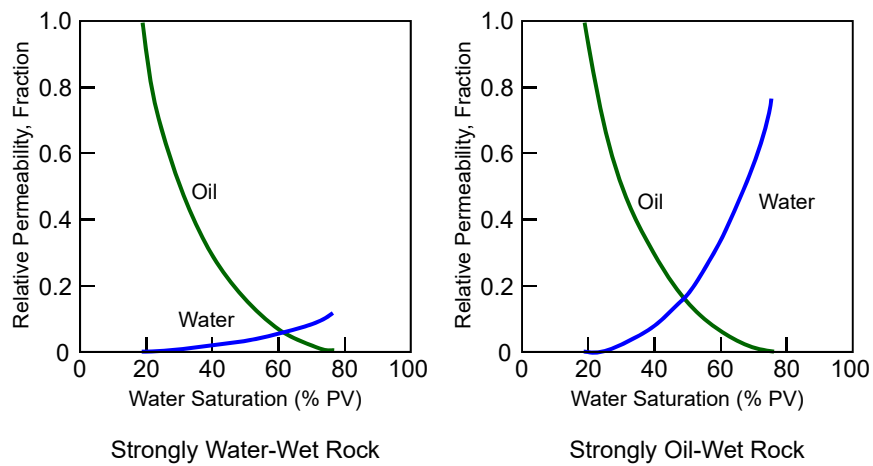
$$\mu_w = 0.06612(T - 229)^{-1.562}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

37

نفوذپذیری نسبی

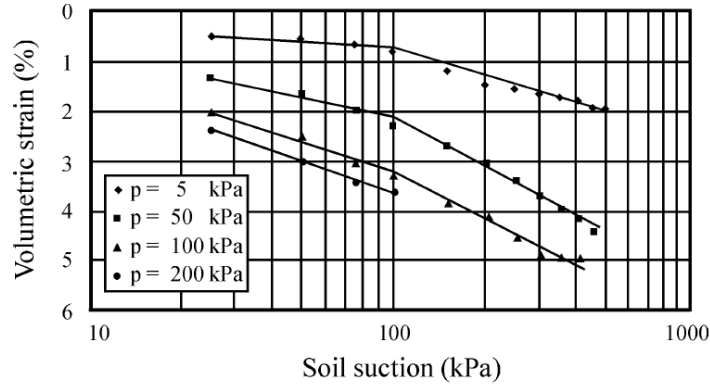
Introduction to Relative Permeability



Dr. Hasan Ghasemzadeh

38

تغییر حجم ناشی از مکش

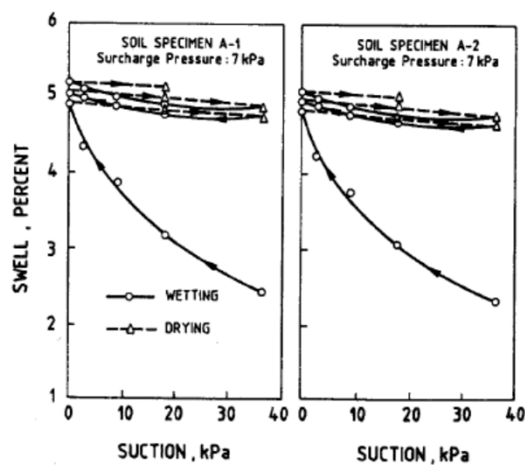


The relationship between volumetric strains and the increase in soil suction (after Chen *et al.* (1999))

Dr. Hasan Ghasemzadeh

39

تغییر حجم ناشی از مکش

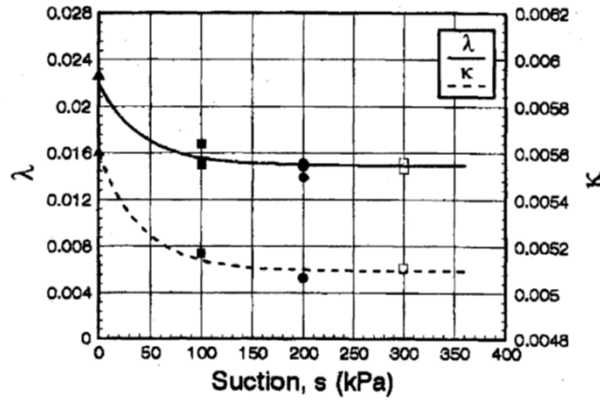


Relationship between suction and swelling (after Chu & Mou (1973))

Dr. Hasan Ghasemzadeh

40

تغییر تراکم پذیری ناشی از مکش

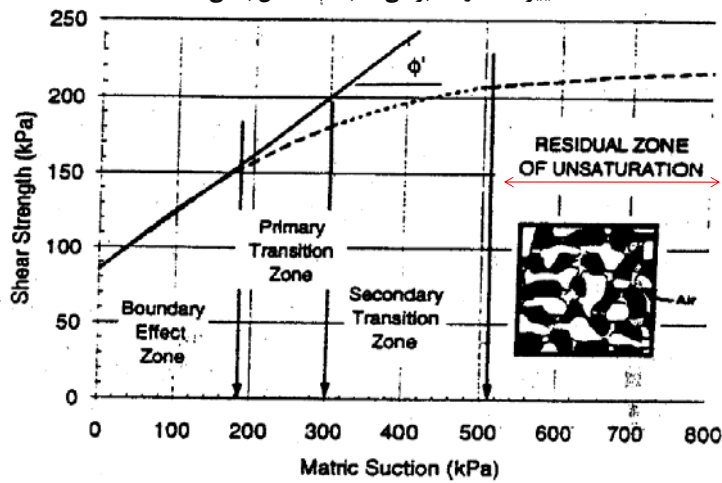


Influence of suction on parameters κ and λ (after Rampino et al. (2000))

Elastic (pre-yield) compressibility coefficient κ
 Elastioplastic (post-yield) compressibility coefficient λ
 Dr. Hasan Ghasemzadeh

مقاومت برشی

تغییرات مقاومت برشی نسبت به مکش بافتی



Dr. Hasan Ghasemzadeh

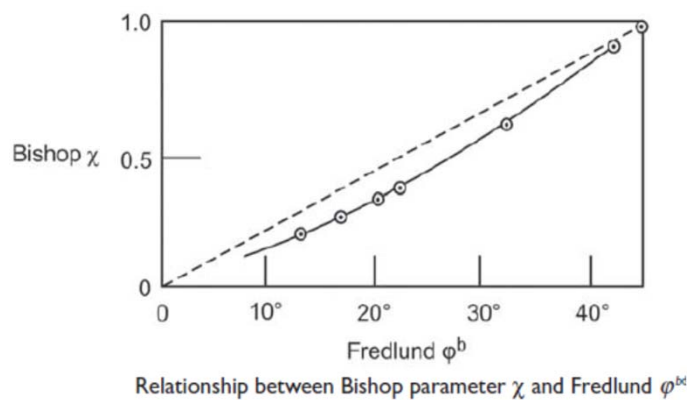
مقاومت برشی

روابط ارائه شده برای محاسبه مقاومت برشی خاک غیراشباع

ردیف	محقق	رابطه
۱	(Bishop 1959)	$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi'] + [\chi (u_a - u_w) \tan \phi']$
۲	(Khalili & Khabbaz 1998)	$\chi = \left\{ \frac{(u_a - u_w)_f}{(u_a - u_w)_b} \right\}^{-0.55}$
۳	(Fredlund et.al 1978)	$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi'] + [(u_a - u_w) \tan \phi^b]$
۴	(Vanapalli et. al 1996)	$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi'] + (u_a - u_w) [(\Theta^k) (\tan \phi')]$
۵	(Vanapalli et. al 1996)	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[\tan \phi' \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right]$
۶	(Oberg & Sallfors 1997)	$\tau_f = c' + (\sigma - S_r u_w - (1 - S_r) u_a) \tan \phi'$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

43



Dr. Hasan Ghasemzadeh

44

مقاومت برشی

مقایسه روش‌های مختلف برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک غیراشباع (Vanapalli & Fredlund 2000):
خواص خاک استفاده شده در آزمایش

پارامتر	نشانه	واحد	رس خاکستری مادرید	رس لای دار قرمز	ماسه رس دار مادرید
ماسه	-	%	۱	۱۷	۸۷
لای	-	%	۲۷	۴۸	۷
رس	-	%	۷۲	۳۵	۶
حد روانی	-	%	۷۱	۳۳	۲۸
شاخص خمیری	w_l	%	۳۵	۱۳/۶	۸
وزن مخصوص	I_p	-	۲/۶۴	۲/۶۶	۲/۷۱
نسبت تخلخل	G_s e	-	۱/۰۳	۰/۴۸	۰/۳۸

$$(u_a - u_w)_f = 5500 \text{ kPa}$$

$$\Theta = 0.5 \rightarrow \chi = 0.12$$

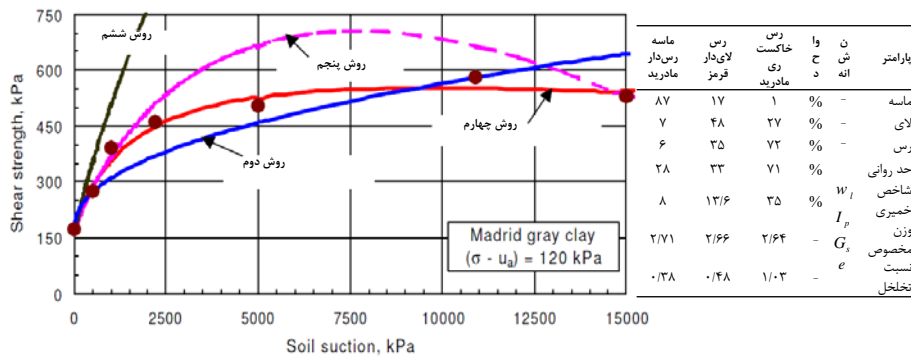
روش اول: بیشاب

Dr. Hasan Ghasemzadeh

45

مقاومت برشی

مقایسه روش‌های مختلف برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک غیراشباع (Vanapalli & Fredlund 2000):
خواص خاک استفاده شده در آزمایش

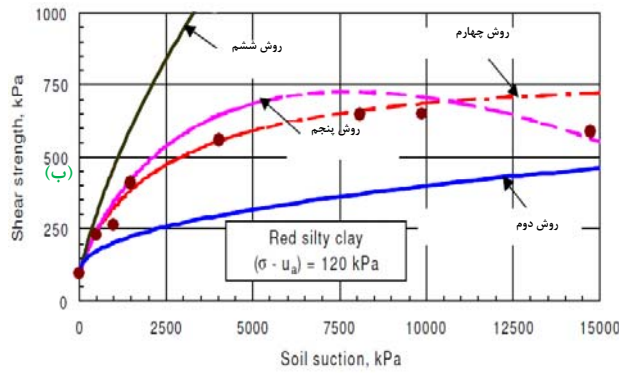


Dr. Hasan Ghasemzadeh

46

مقاومت برشی

مقایسه روش‌های مختلف برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک غیراشباع (Vanapalli & Fredlund 2000):
خواص خاک استفاده شده در آزمایش

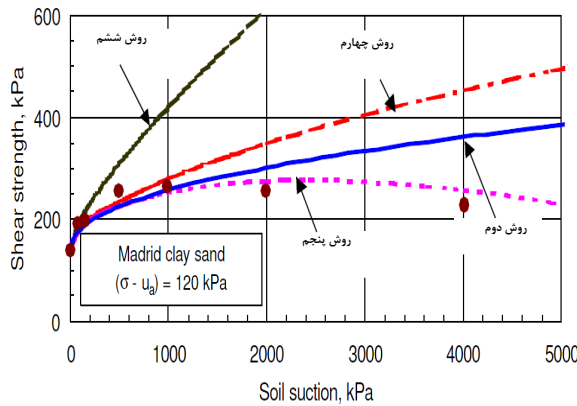


پارامتر	نشا	واحد	نسبت خاکستری مادرید	رس لای‌دار قرمز	ماسه رس‌دار مادرید
ماسه لای	-	%	۱	۲۷	۴۸
رس	-	%	۷۲	۳۵	۶
حد روانی شاخص خمیری	W_L	%	۷۱	۳۳	۲۸
وزن مخصوص	I_p	%	۳۵	۱۳/۶	۸
نسبت تخلخل	G_s	-	۲/۶۴	۲/۶۶	۲/۷۱
	e	-	۱/۰۳	۰/۴۸	۰/۳۸

47

مقاومت برشی

مقایسه روش‌های مختلف برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک غیراشباع (Vanapalli & Fredlund 2000):
خواص خاک استفاده شده در آزمایش



پارامتر	نشا	واحد	نسبت خاکستری مادرید	رس لای‌دار قرمز	ماسه رس‌دار مادرید
ماسه لای	-	%	۱	۲۷	۴۸
رس	-	%	۷۲	۳۵	۶
حد روانی شاخص خمیری	W_L	%	۷۱	۳۳	۲۸
وزن مخصوص	I_p	%	۳۵	۱۳/۶	۸
نسبت تخلخل	G_s	-	۲/۶۴	۲/۶۶	۲/۷۱
	e	-	۱/۰۳	۰/۴۸	۰/۳۸

48

Shear modulus

$$G_{\max} = Af(e)p'^m \quad p' = p_n + \chi\psi \quad p_n = p - u_a \quad \text{Hardin and Black 1968}$$

$$G_{\max} = Af(e)p_n^n - B\psi \quad \text{Mancuso et al.2002}$$

$$G_{\max} = AP_a \left[\frac{p'_{c0}}{p_n} \exp\left(\frac{\Delta e^p}{\lambda - \kappa}\right) \right]^K \left[\frac{p_n}{p'} \exp(b[S_{e0} - S_e]) \right]^{K'} \left[\frac{p'}{p_a} \right]^n$$

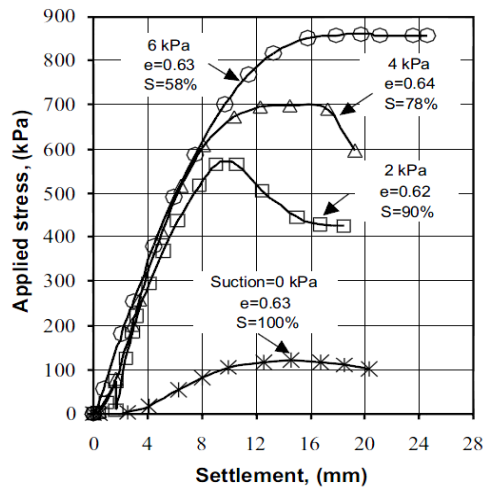
$$S_e = \frac{S_r - S_{r,res}}{1 - S_{r,res}}$$

Khosravi and McCartney 2012

Dr. Hasan Ghasemzadeh

49

ظرفیت باربری



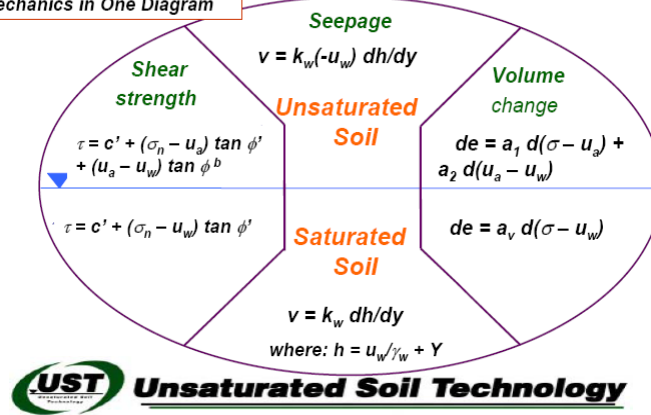
$e = 0.63$
 $\gamma_d = 16.02 \text{ kN} / \text{m}^3$
 $\phi' = 35.3^\circ$

رابطه بین تنش اعمالی به نشست برای مدل پی با ابعاد $100\text{mm} \times 100\text{mm}$
 Dr. Hasan Ghasemzadeh (Vanapalli & Mohamed 2007) 50

روابط ساختاری

Constitutive Relations for Saturated/Unsaturated Soil Mechanics

Fundamentals of Soil Mechanics in One Diagram



Dr. Hasan Ghasemzadeh

51