

مکانیک خاکهای غیر اشباع

روابط نظری

Unsaturated soils

Hasan Ghasemzadeh

فهرست عناوین و فصول

- ۱- مقدمه و 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- روابط نظری در خاک غیر اشباع
- ۷- جریان در خاک غیر اشباع
- ۸- کاربرد خاک غیر اشباع در مهندسی

شکل REV سه فازی (خاک، آب، هوا)

Macro scale
Air-water-solid REV
Pore scale

تنش بین دانه‌ها؟
تنش موثر؟
تنش بین ذرات؟

ارتباط بین تنش‌ها؟

تنش بین ذرات در حالت ماکروسکوپی به تنش بین دانه‌ها تبدیل می‌شود

تنش بین دانه‌ها در تنش موثر وارد می‌شود

Dr. Hasan Ghasemzadeh
3

ماهیت کشش سطحی

Temp. (°C)	T_s (mN/m)
-8	77
-5	76.4
0	75.6
5	74.9
10	74.22
15	73.49
18	73.05
20	72.75
25	71.79
30	71.18
40	69.56
50	67.91
60	66.18
70	64.4
80	62.6
100	58.9

$d \approx 10 \text{ water layer} = 3 \text{ nm}$
 $T_s = \int_0^d (\sigma - u_w) \delta z$
 $T_s = 0.073 \text{ N / m at } 20^\circ \text{C}$

Dr. Hasan Ghasemzadeh
4

ارتفاع آب ناشی از کاپیلاری

$$h = P_a - P_w = \frac{2T_s \cos \alpha}{r}$$

$$R = \frac{r}{\cos \alpha}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

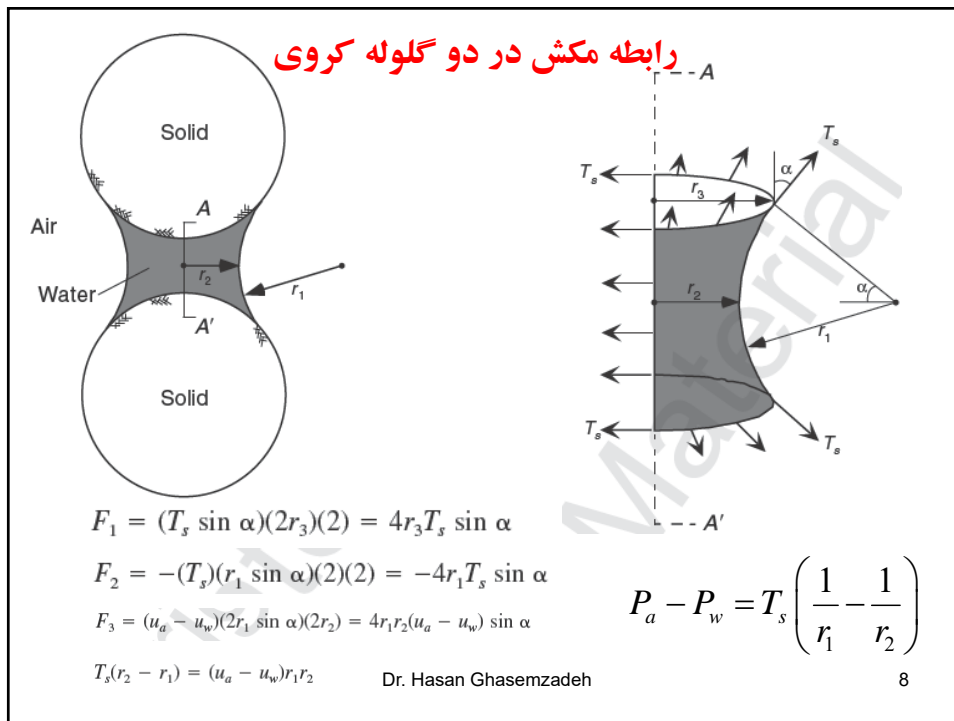
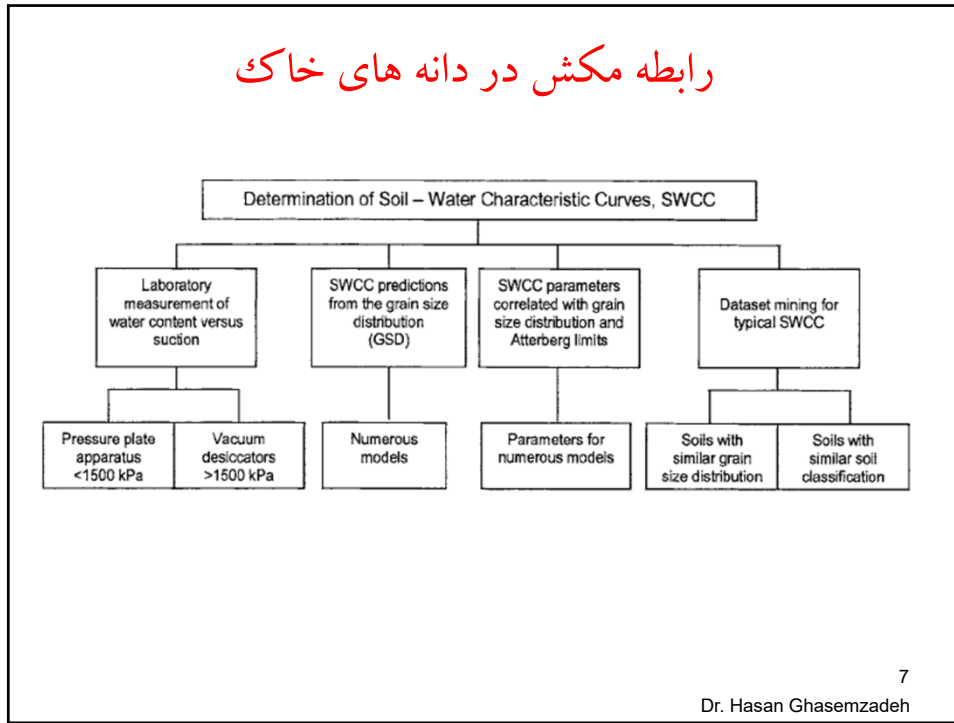
5

رابطه مکش در دانه های خاک

Meniscus water Air Bulk water

Schematic representation of bulk water and meniscus water (after Wheeler and Karube (1996))

6
Dr. Hasan Ghasemzadeh



رابطه مکش در دو گلوله

$$P_a - P_w = T_s \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{حالات مختلف بر اساس شعاع انحنا}$$

1. $r_1 < r_2: u_a > u_w$ کاهش فشار در آب و مکش مثبت
2. $r_1 = r_2: u_a = u_w$ عدم تغییر فشار در محل آب و هوا
3. $r_1 > r_2: u_a < u_w$ افزایش فشار آب، مکش منفی (رسها)

Dr. Hasan Ghasemzadeh

9

رابطه مکش در دو گلوله

کلوین: رابطه بین تغییرات فشار آب در سطح تماس با هوا

$$\mu_1 - \mu_0 = -RT \ln \left(\frac{P_{v1}}{P_{v0}} \right) = \frac{2T_s v_w \cos \alpha}{r}$$

	μ_0	پتانسیل شیمیایی آب آزاد
	μ_1	پتانسیل شیمیایی آب موجود
	R	ثابت جهانی گازها
	T_s	کشش سطحی
T	P_{v0}	فشار بخار اشباع آب در دمای T
	P_{v1}	فشار بخار آب موجود
	v_w	حجم مولی جزئی بخار آب
	T	درجه حرارت

جایگذاری در رابطه کاپیلاری

$$P_a - P_w = -\frac{RT}{v_w} \ln \left(\frac{P_{v1}}{P_{v0}} \right) = -\frac{RT}{v_w} \ln(RH) = \frac{2T_s \cos \alpha}{r}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

10

رابطه مکش در دو گلوله

زاویه تماس آب و اکثر خاکها کمتر از ۹۰ است بنابراین فشار بخار آب در خاکهای غیراشباع کمتر از فشار بخار آب در خاکهای اشباع است که از فرمول کلوین قابل محاسبه است

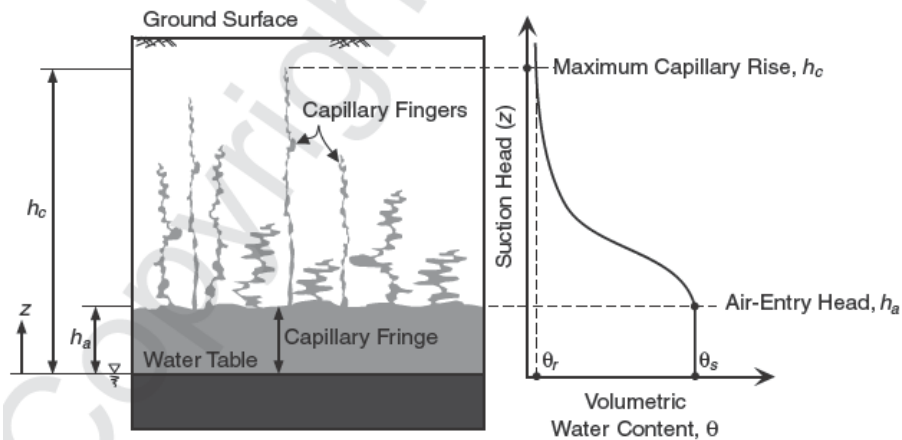
از اندازه گیری فشار بخار آب در خاک غیر اشباع می توان مقدار مکش را محاسبه نمود

عدم انحنای در سطح تماس آب با هوا یعنی عدم وجود مکش

Dr. Hasan Ghasemzadeh

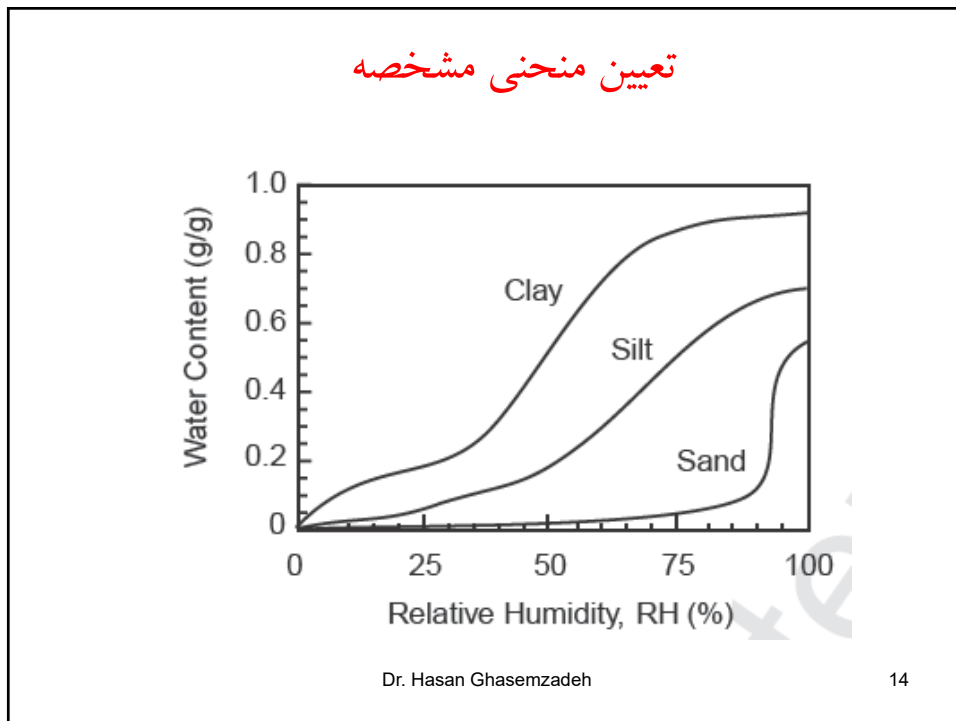
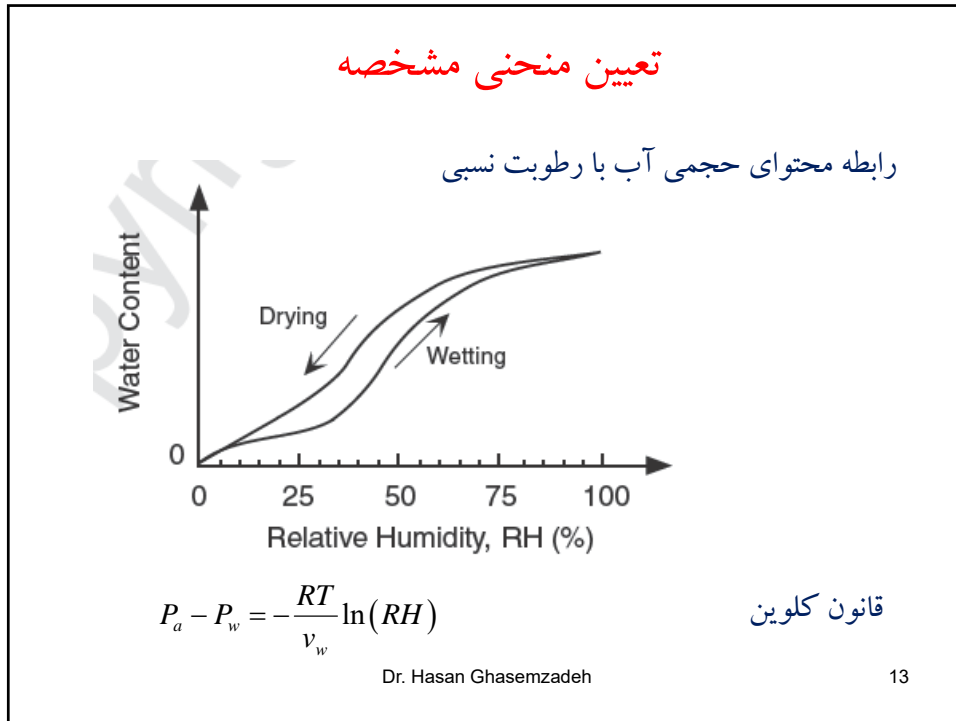
11

تعیین منحنی مشخصه



$$h_c = \frac{2T_s \cos \alpha}{r\gamma_w} \quad \begin{matrix} T_s = 0.072 \text{ N/m} \\ T = 25^\circ \\ \text{Dr. Hasan Ghasemzadeh} \end{matrix} \Rightarrow h_c = \frac{0.3}{d(\text{cm})}$$

12



تعیین منحنی مشخصه

Void Ratio $e = 0.91$ Void Ratio $e = 0.34$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 15

تعیین منحنی مشخصه

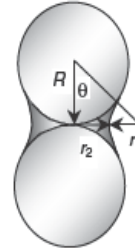
Cubic form Orthorhombic Rhombohedral

Cubic form: $(8R^3 - 4/3 \pi R^3)/8R^3 = 0.48$
 Orthorhombic: $(6.93 R^3 - 4/3 \pi R^3)/6.9R^3 = 0.40$
 Rhombohedral: $(5.66 R^3 - 4/3 \pi R^3)/5.66R^3 = 0.26$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 16

تعیین منحنی مشخصه

$$P_a - P_w = T_s \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$



$$r_1 = R \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad r_2 = R \tan \theta - r_1 \quad 0 \leq \theta \leq 85^\circ$$

$$P_a - P_w = \frac{T_s}{R} \frac{\cos \theta (\sin \theta + 2 \cos \theta - 2)}{(1 - \cos \theta)(\sin \theta + \cos \theta - 1)}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

17

تعیین منحنی مشخصه

حجم آب محصور در خاک

$$V_l = 2\pi R^3 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)^2 \left[1 - \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \tan \theta \right]$$

محتوای آب

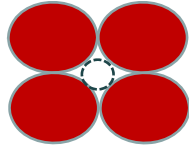
$$\frac{V_l}{V_s} = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)^2 \left[1 - \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \tan \theta \right]$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

18

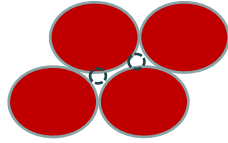
تعیین منحنی مشخصه

در صورتیکه گلوله‌ها به صورت هرمی قرار گیرند:



$$d_{sc} = 0.41D$$

قطر حفرات کوچکتر می‌شود بنابراین جذب آب بصورت کاپیلاری بیشتر می‌شود در صورتیکه گلوله‌ها به گونه ای روی هم بلغزند که کمترین مقدار حفرات را داشته باشیم (Tetrahedral)



$$d_{th} = 0.15D$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

19

تعیین منحنی مشخصه

در خاک معمولاً D_{10} در نظر گرفته می‌شود

$$h_c = \frac{C}{eD_{10}} \quad \text{در این حالت ارتفاع موینگی برابر است با (Peck 1974):}$$

$$h_c, D_{10} \quad \text{mm}$$

$$e \quad \text{تخلخل}$$

$$\text{این پارامتر بستگی به شکل ذرات و ناخالصی ها دارد} \quad 10 < C < 50 \text{ mm}^2$$

ارتفاع موینگی طبق نظر lane & Washburn 1946:

$$h_c = -990(\ln D_{10}) - 1540$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

20

تعیین منحنی مشخصه

Kumar & Malik 1990:

$$h_c = h_a + 134.84 - 5.16\sqrt{r}$$

h_c, h_a Cm
 r Micrometer

ارتفاع محدوده کاپیلاری h_a

$$i = \frac{h_c - z}{z}$$

سرعت حرکت کاپیلاری بر اساس نظر ترزاقی

ترزاقی ضریب هدایت هیدرولیکی در خاک اشباع و غیر اشباع را برابر گرفت که جوابهای نامناسبی می دهد

Dr. Hasan Ghasemzadeh

21

نیروهای بین ذرات

علامت محدوده عملکرد نیروهای بین ذرات شامل

F_{vdw}	$< 2nm$	نیروهای واندروالس، سمانتاسیون (کولانسی یا یونی)	نیروهای فیزیکی و شیمیایی
F_{ce}		و نیروی لایه دوگانه	
F_{edl}	$< 1000nm$		

$$F_{pc} = F_{vdw} + F_{edl} + F_{ce}$$

نیروهای کشش سطحی (کاپیلاری)

❖ این نیروها را می توان به صورت یک تنش ماکروسکوپی به نام تنش مکشی توصیف نمود.

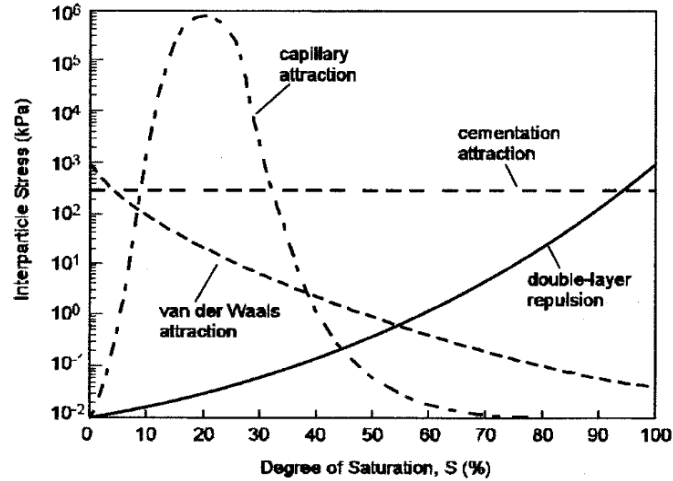
$$F_C \quad < 3nm \quad \text{Born's and steric repulsion}$$

نیروی دافعه ناشی از اتم ها : اتم ها نمی توانند از حدی بیشتر به هم نزدیک شوند
این نیرو ختنی کننده نیروهای فوق است

Dr. Hasan Ghasemzadeh

22

تغییرات تنش بین ذرات نسبت به درجه اشباع

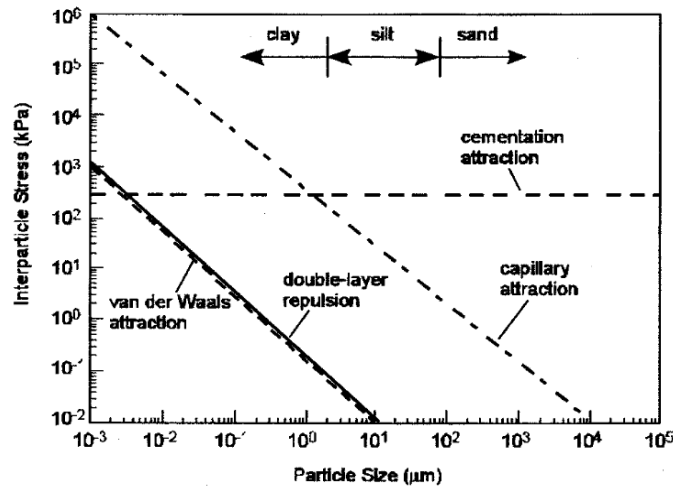


تنش بین ذرات شامل نیروهای واندروالس، سمانتاسیون، کاپیلاری و لایه دوگانه است

Dr. Hasan Ghasemzadeh

23

تغییرات تنش بین ذرات نسبت به اندازه ذرات

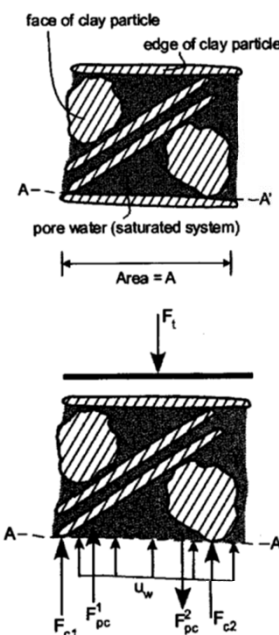


تنش بین ذرات با افزایش اندازه ذرات کاهش می یابد

Dr. Hasan Ghasemzadeh

24

تبادل بین ذرات در حالت اشباع



- نیروهای نوع ۱ (اسکلتی فعال) F_t
- نیروهای نوع ۲ (محلی فعال) $F_{pc} = F_{vdw} + F_{edl} + F_{ce}$
- نیروهای متعادل کننده (دافعه ذرات) F_c

تبادل نیروها در خاک بدون نیروی بیرونی و فشار آب

$$F_t = 0 \quad \text{so} \quad F_{c0} = F_{pc} \quad \text{or} \quad \sigma_{c0} = \sigma_{pc}$$

σ_{c0} همان چسبندگی خاک است

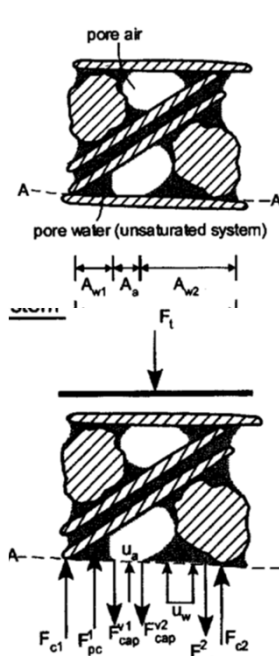
- تبادل نیروها در خاک اشباع

$$F_t + F_{pc} - F_c - u_w A = 0$$

$$\sigma_c = \sigma_t - u_w + \sigma_{pc}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 25

تبادل بین ذرات در حالت غیر اشباع



- در حالت غیر اشباع علاوه بر نیروی محلی F_{pc} نیروهای محلی دیگری نیز ایجاد می شوند، این نیروها عبارتند از:

- ۱- نیروی یکنواخت حاصل از فشار هوای حفره ای u_a
- ۲- نیروی موینگی محلی به خاطر کشش سطحی F_{cap}
- ۳- نیروهای هیدرواستاتیک محلی حاصل از فشار آب حفره ای منفی

تبادل نیروها:

$$F_t + F_{pc} + F_{cap} - F_c - u_w(A - A_a) - u_a A_a = 0$$

$$\sigma_c = \sigma_t - u_a + \sigma_{pc} + \sigma_{cap} + (u_a - u_w) \left(1 - \frac{A_a}{A}\right)$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 26

روابط تنش مکشی

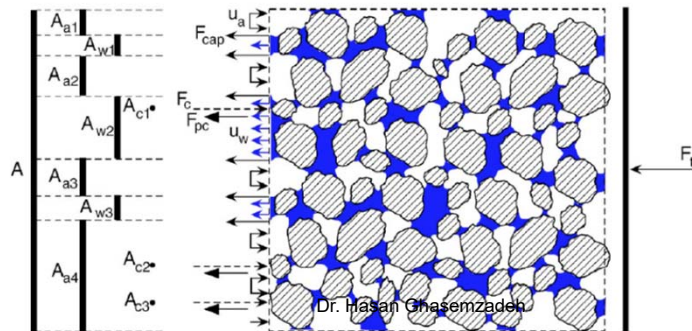
با توجه به رابطه Bishop داریم :

$$\sigma_c = \sigma_t - u_a + \sigma_{pc} + \sigma_{cap} + \chi(u_a - u_w)$$

$$\sigma_{pc} = \sigma_{C0} + \Delta\sigma_{pc}$$

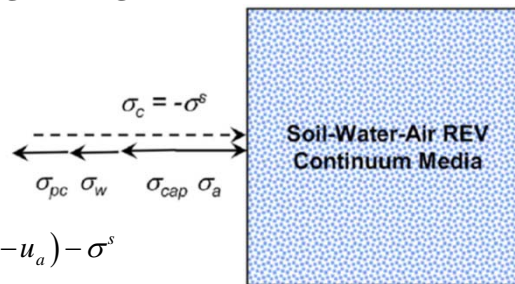
$$\sigma_c = \sigma_t - u_a + \sigma_{C0} + \Delta\sigma_{pc} + \sigma_{cap} + \chi(u_a - u_w)$$

σ_{C0} : تنش فیزیکی - شیمیایی در حالت اشباع (تنش کششی ظاهری)



27

روابط تنش مکشی



$$\sigma_c = (\sigma_t - u_a) - \sigma^s$$

or
$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s$$

$$\sigma^s = -(\sigma_{C0} + \Delta\sigma_{pc} + \sigma_{cap} + \chi(u_a - u_w))$$

تنش مکشی

$$\sigma^s = f(u_a - u_w) = f(s) = f(\theta)$$

or
$$\begin{cases} \sigma^s = -(u_a - u_w) & (u_a - u_w) \leq 0 \\ \sigma^s = f(u_a - u_w) & (u_a - u_w) \geq 0 \end{cases}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 28

روابط تنش مکشی

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s$$

Lu و همکاران (۲۰۱۰)

$$\sigma^s = -(u_a - u_w)\theta_e = -(u_a - u_w) \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

Van Genuchten 1980

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

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

Dr. Hasan Ghasemzadeh 29

روابط تنش مکشی

SWCC, $(u_a - u_w) = f(\theta)$

Suction stress (kPa) vs Matric suction (kPa)

Legend:

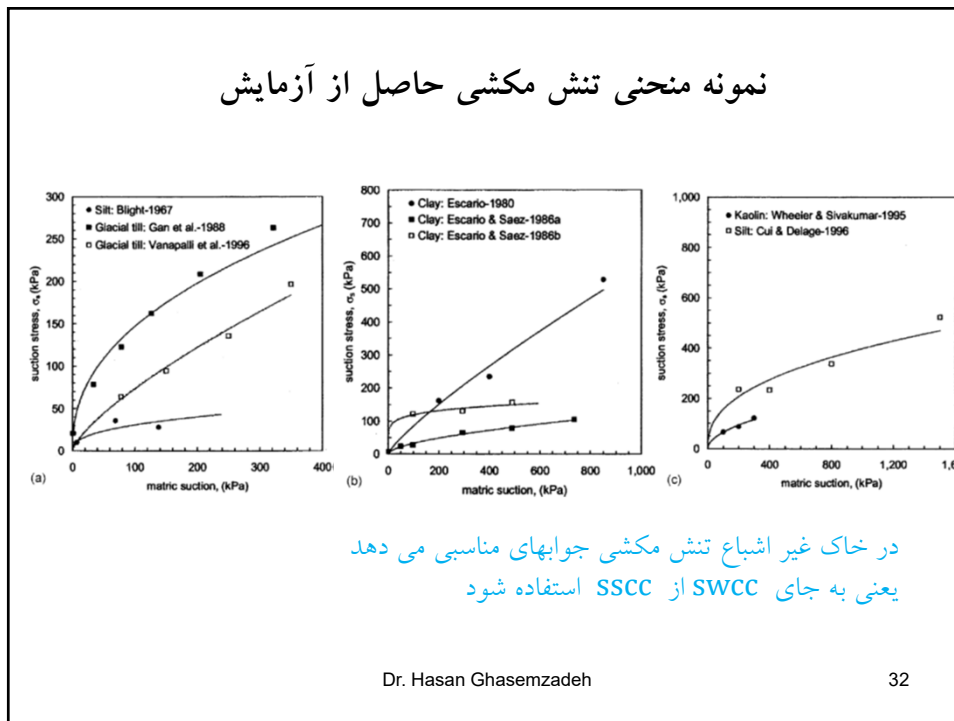
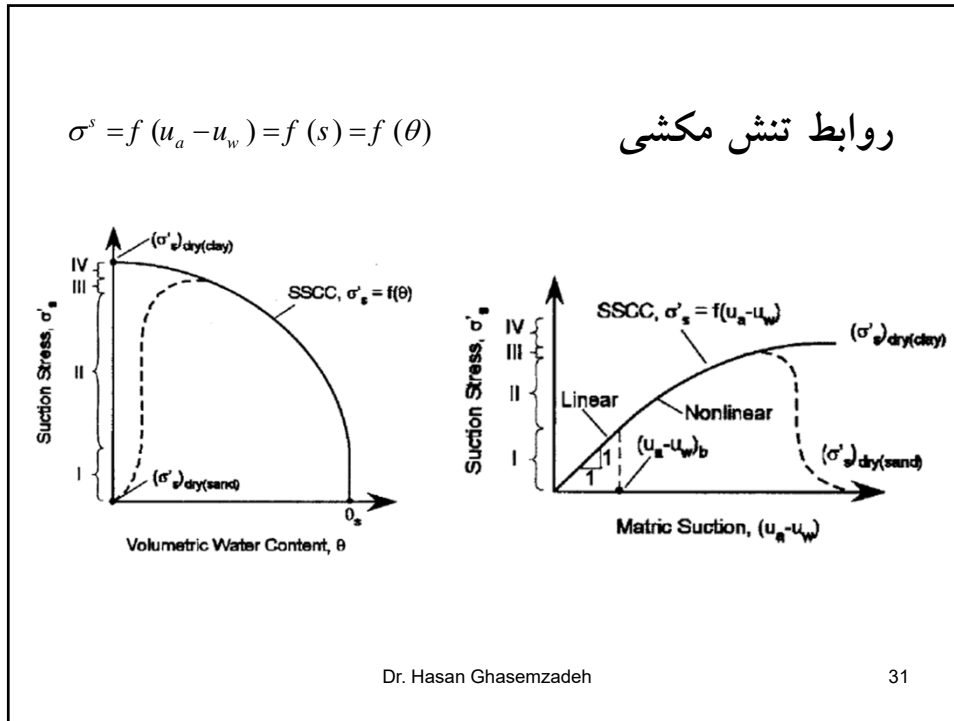
- Kaolin (Khali & Khabbaz, 1998)
- Kaolin-fitted: $ub = 395$ kPa, $n = 1.2$
- Jossigny silt (Cui & Delage, 1993)
- Jossigny silt-fitted: $ub = 182$ kPa, $n = 1.54$
- ▲ Madrid clayey sand (Escario and Saez, 1986)
- Madrid clayey sand-fitted: $ub = 127$ kPa, $n = 1.63$
- Sandy clay 1 (Blight, 1967)
- Sandy clay 1-fitted: $ub = 35$ kPa, $n = 1.59$

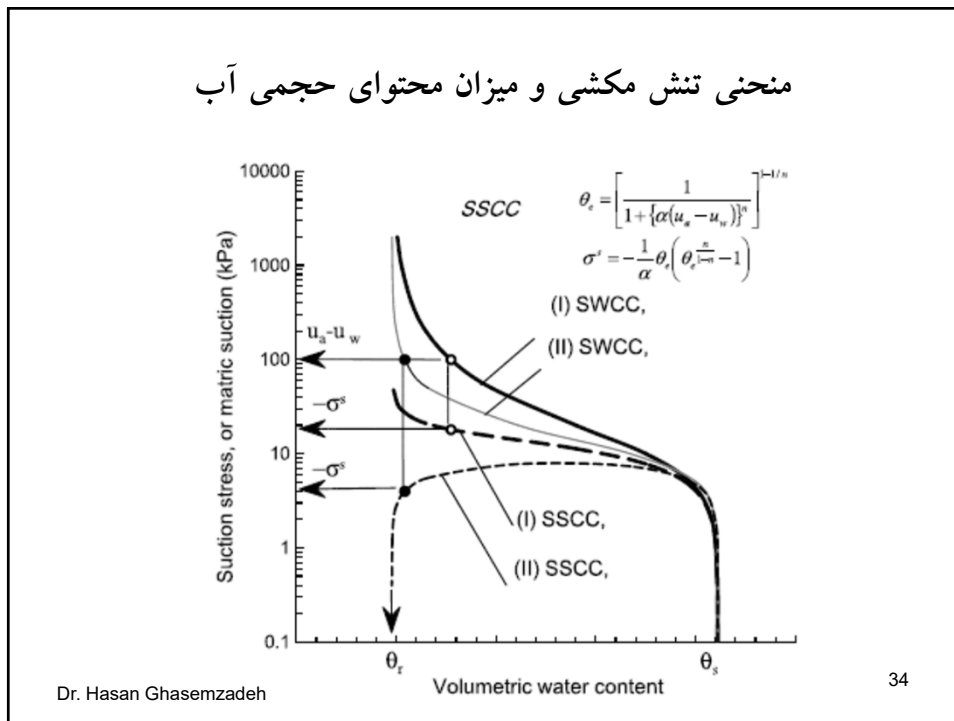
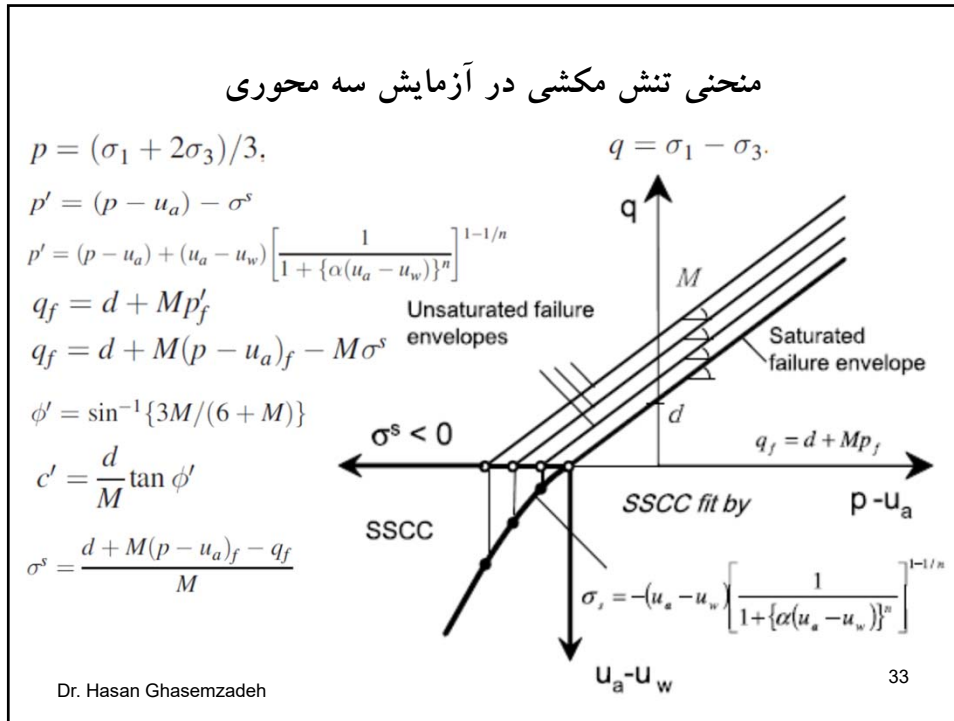
$\sigma^s = -(u_a - u_w)$

$ub = 1/\alpha$

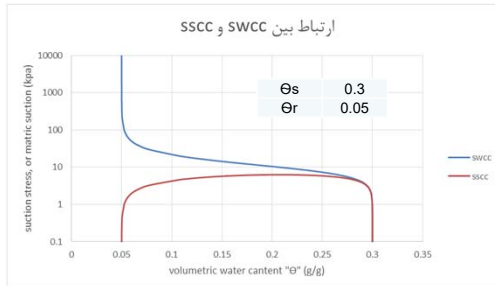
رابطه یگانه بین SWCC از SSCC وجود دارد

Dr. Hasan Ghasemzadeh 30

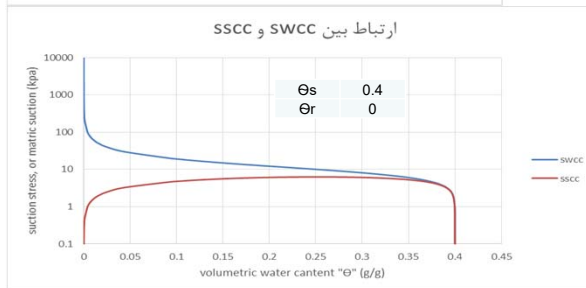




تأثیر پارامترهای θ_r و θ_s در منحنی های SWCC و SSCC



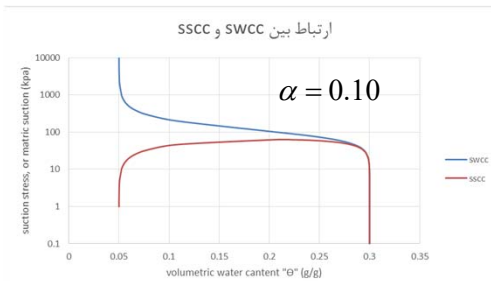
✓ با تغییر مقادیر سلول های θ_s و θ_r تغییرات عمده ای در شکل منحنی ها حاصل نمی شود و با تغییرات θ_s و θ_r صرفاً بازه منحنی ها تغییر می کنند.



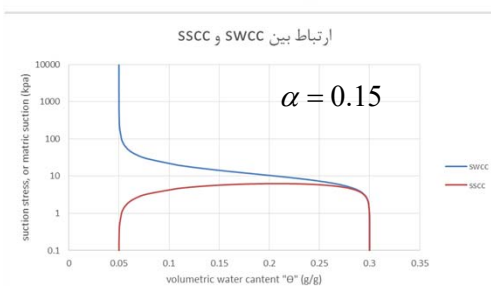
35

Dr. Hasan Ghasemzadeh

تأثیر پارامتر α در منحنی های SWCC و SSCC



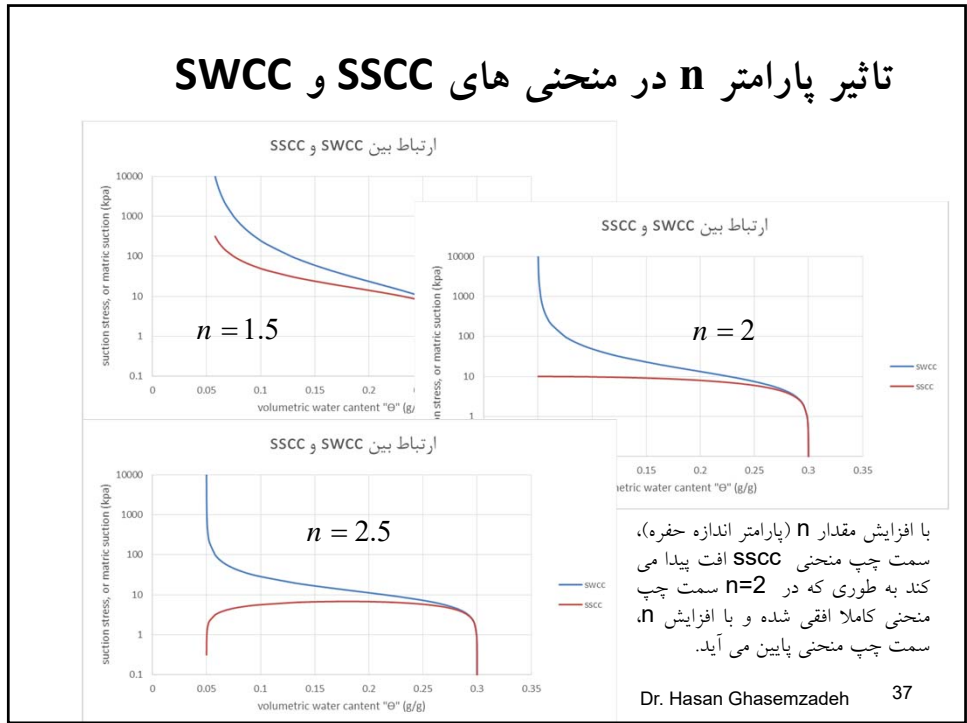
✓ با افزایش α ، مقدار تنش مکشی و مکش بافتی به ازای یک محتوای حجمی آب ثابت، کاهش می یابد، و شکل منحنی ها کمی افتاده تر می شود ولی شکل کلی تغییر خاصی نمی کند.



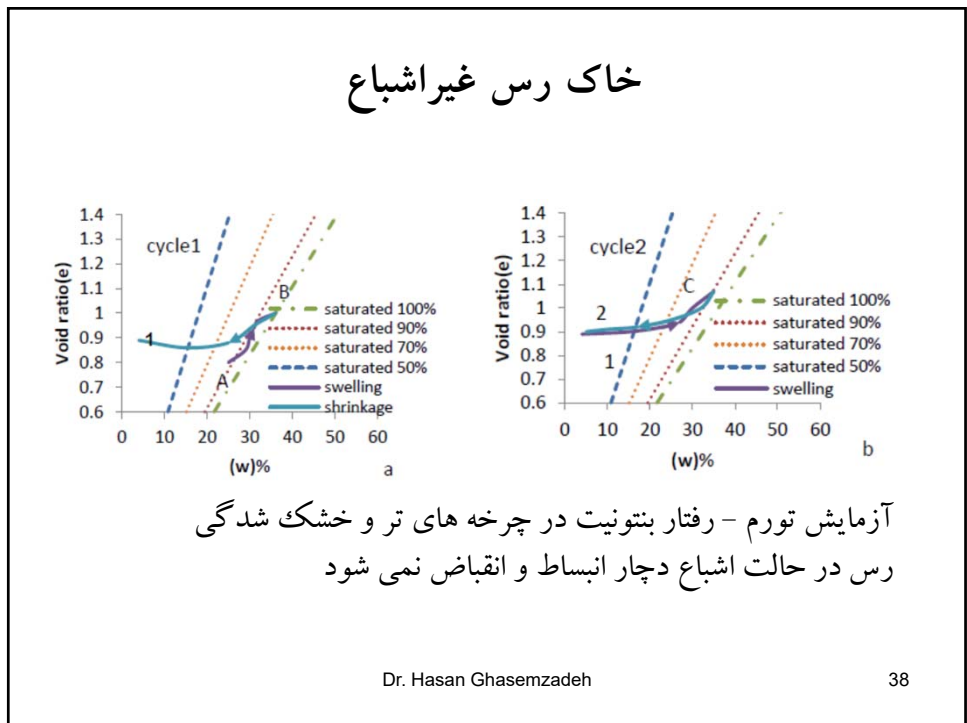
36

Dr. Hasan Ghasemzadeh

تأثیر پارامتر n در منحنی های $SSCC$ و $SWCC$



خاک رس غیر اشباع



آزمایش تورم - رفتار بنتونیت در چرخه های تر و خشک شدگی رس در حالت اشباع دچار انبساط و انقباض نمی شود