



بسم الله الرحمن الرحيم

mekanik حاکمی غیر اشباع ضریب فشار جانی و خریفت برابری پی بر روی خاک غیر اشباع

Unsaturated soils

Hasan Ghasemzadeh

1

mekanik حاکمی غیر اشباع

Investigation of Soil Active Wedge Angle with Linear Matric Suction Distribution Below the Footing

H. Ghasemzadeh, F. Akbari

International Journal of Civil Engineering 18 (2), 161-168, 2019

Determining the bearing capacity factor due to nonlinear matric suction distribution in the soil

H. Ghasemzadeh, F. Akbari

Canadian Journal of Soil Science 99 (4), 434-446, 2020

Dr. Hasan Ghasemzadeh

2

ضریب فشار جانبی در حالت سکون

تعیین ضریب فشار جانبی در حالت سکون

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma'_x - \mu(\sigma'_y + \sigma'_z)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma'_y - \mu(\sigma'_z + \sigma'_x)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma'_z - \mu(\sigma'_x + \sigma'_y)]$$

با قرار دادن تعریف تنش موثر بیشاب

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

3

ضریب فشار جانبی در حالت سکون

قانون هوک توسعه یافته برای خاک غیر اشباع

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x - u_a}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_y + \sigma_z - 2u_a) + \frac{(1-2\mu)\chi(u_a - u_w)}{E}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y - u_a}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_z - 2u_a) + \frac{(1-2\mu)\chi(u_a - u_w)}{E}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z - u_a}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y - 2u_a) + \frac{(1-2\mu)\chi(u_a - u_w)}{E}$$

با توجه به شکل

$$\varepsilon_h = \frac{\sigma_h - u_a}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_v + \sigma_h - 2u_a) + \frac{(1-2\mu)\chi(u_a - u_w)}{E}$$

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v - u_a}{E} - \frac{2\mu}{E} (\sigma_h - u_a) + \frac{(1-2\mu)\chi(u_a - u_w)}{E}$$

$$\varepsilon_h = \varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$$

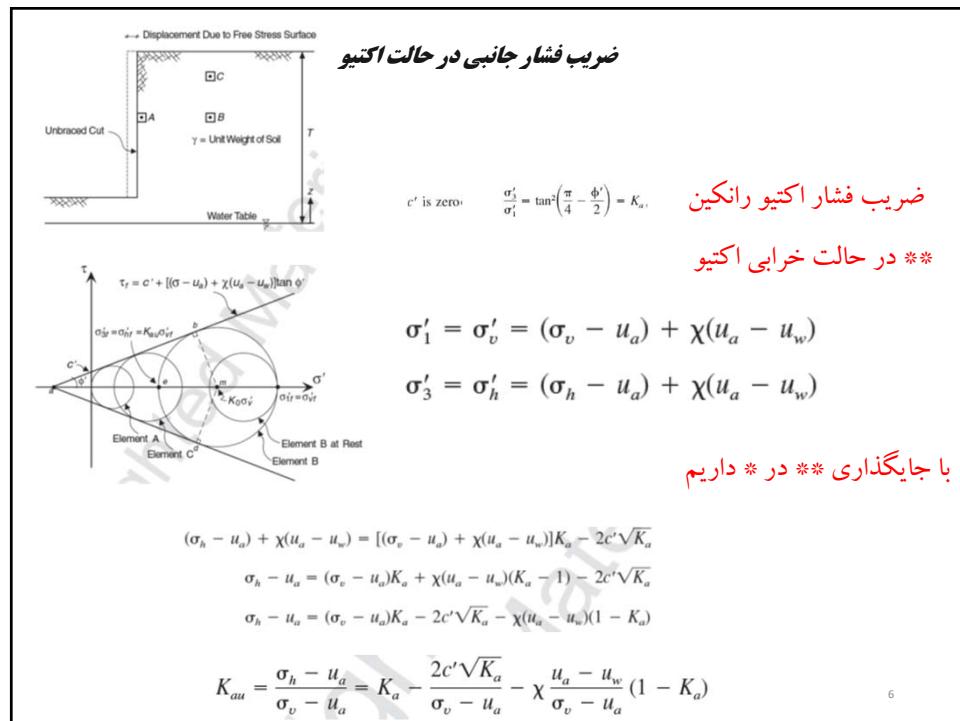
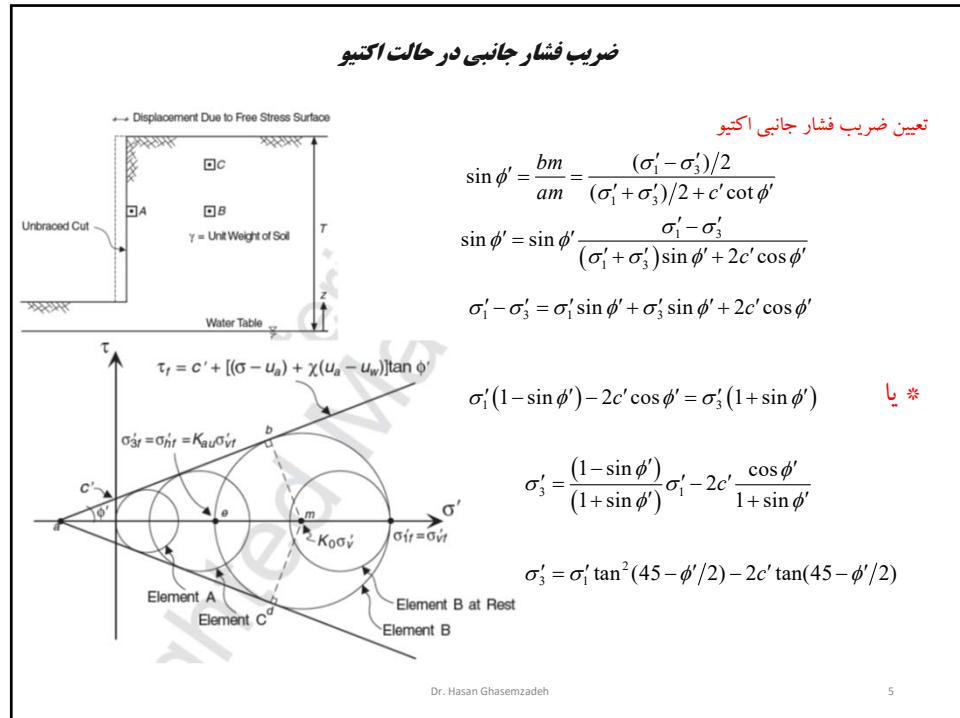
$$\sigma_h - u_a = \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_v - u_a) - \frac{1-2\mu}{1-\mu} \chi (u_a - u_w)$$

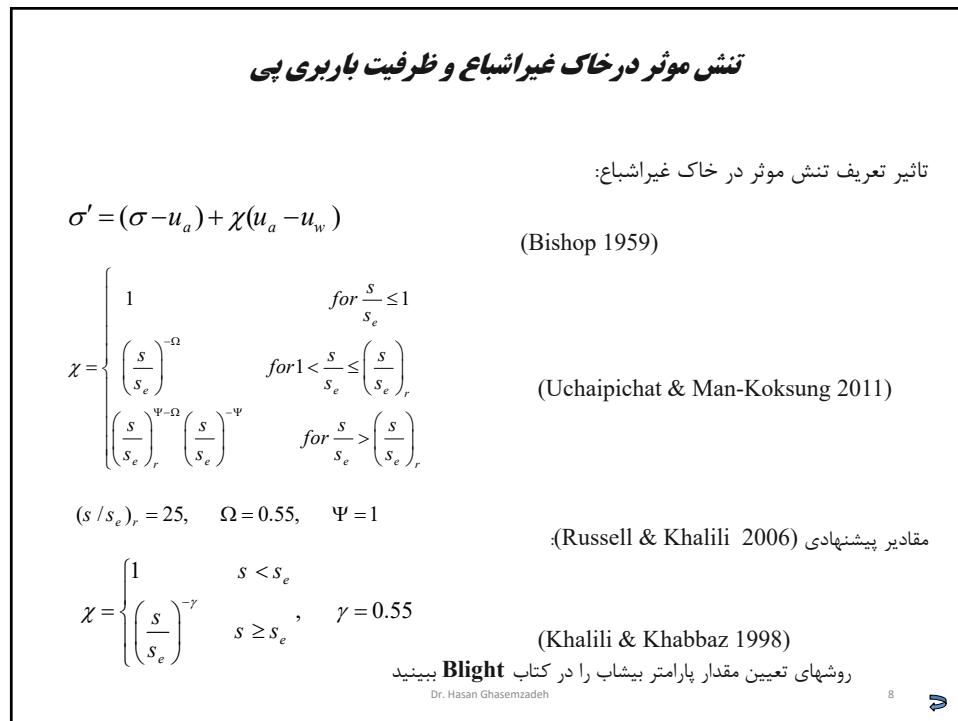
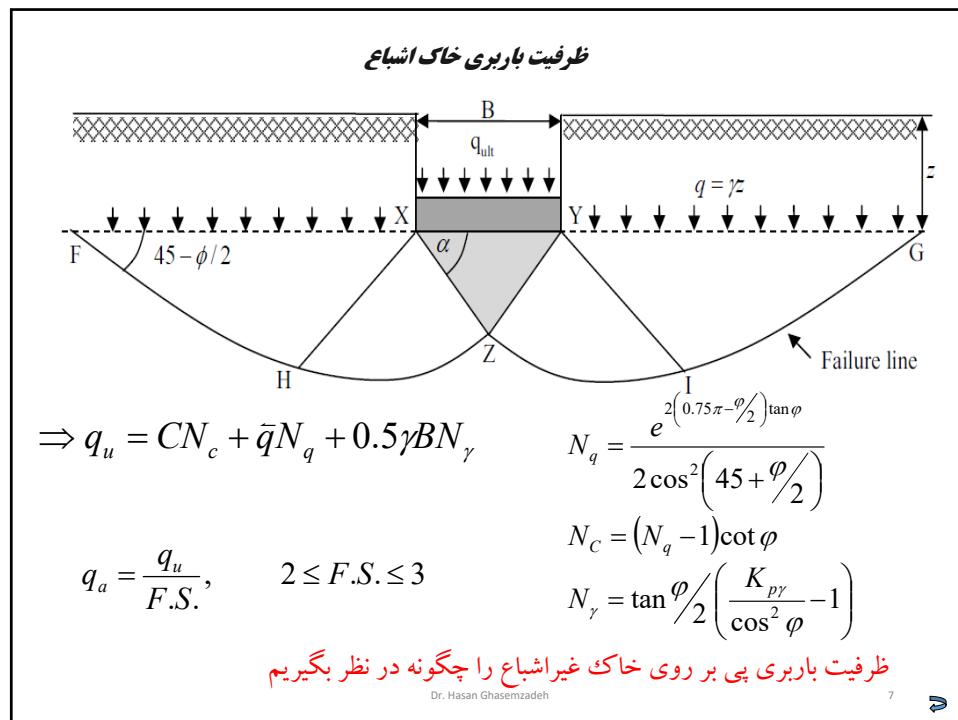
$$\frac{\sigma_h - u_a}{\sigma_v - u_a} = K_0 = \frac{\mu}{1-\mu} - \frac{1-2\mu}{1-\mu} \chi \frac{u_a - u_w}{\sigma_v - u_a}$$

یا

Dr. Hasan Ghasemzadeh

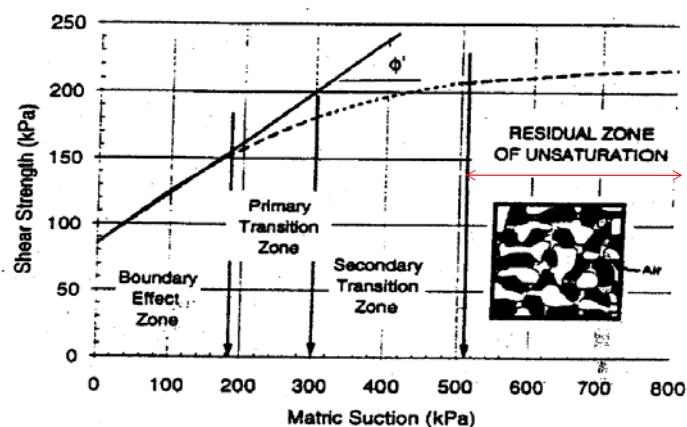
4





تأثیر مکش بر مقاومت خاک غیراشباع و ظرفیت باربری پی

تأثیر مکش در خاک غیراشباع:



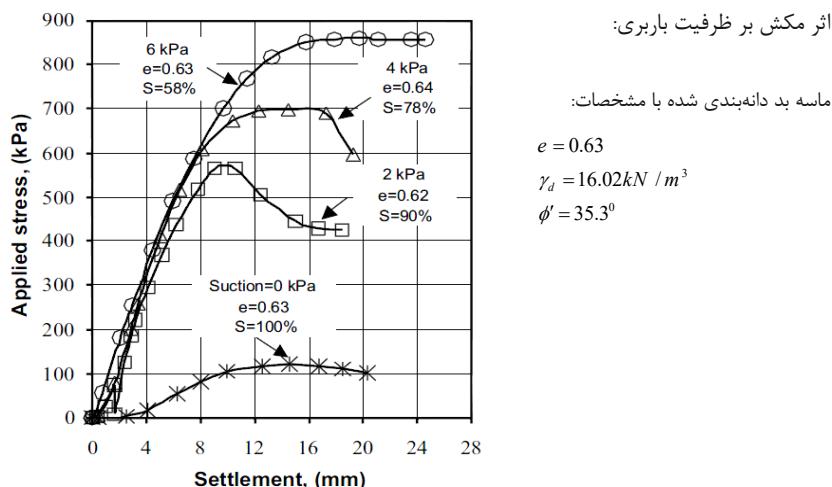
تغییرات مقاومت برشی نسبت به مکش بافتی

Dr. Hasan Ghasemzadeh

9

تأثیر مکش بر مقاومت خاک غیراشباع و ظرفیت باربری پی

اثر مکش بر ظرفیت باربری:



رابطه بین تنش اعمالی به نشست برای مدل پی با ابعاد
100mm × 100mm
(Vanapalli & Mohamed 2007)

10

مقاومت برشی غیراشباع و ظرفیت باربری پی

روابط ارائه شده برای محاسبه مقاومت برشی خاک غیراشباع

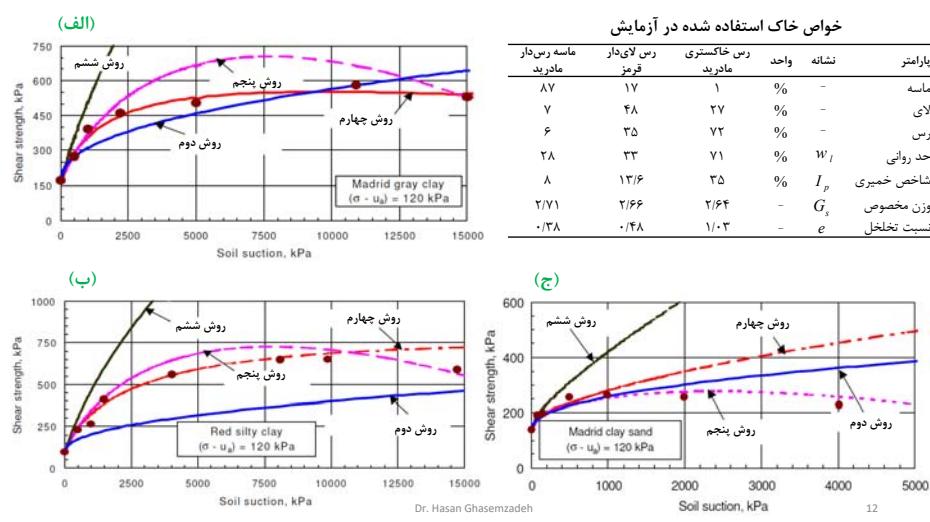
ردیف	محقق	رابطه
۱	(Bishop 1959)	$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi'] + [\chi (u_a - u_w) \tan \phi']$
۲	(Khalili & Khabbaz 1998)	$\chi = \left\{ \frac{(u_a - u_w)_f}{(u_a - u_w)_b} \right\}^{-0.55}$
۳	(Fredlund et.al 1978)	$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi'] + [(u_a - u_w) \tan \phi^b]$
۴	(Vanapalli et. al 1996)	$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi'] + (u_a - u_w) [\Theta^\kappa (\tan \phi')]$
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

11

مقاومت برشی غیراشباع و ظرفیت باربری پی

مقایسه روش‌های مختلف برای پیش‌بینی مقاومت برشی خاک غیراشباع (Vanapalli & Fredlund 2000)



ظرفیت باربری خاک غیراشع

رابطه ارائه شده توسط Oloo et al. 1997

رابطه ارائه شده توسط Vanapalli & Mohamed 2007

رابطه ارائه شده توسط Uchaipichat et al. 2011 جهت تعیین ظرفیت باربری خاک دانه‌ای

رابطه ارائه شده توسط Vanapalli & Oh 2011 جهت تعیین ظرفیت باربری خاک چسبنده

رابطه ارائه شده توسط Ghasemzadeh & Akbari (2019)

Dr. Hasan Ghasemzadeh

13

ظرفیت باربری خاک غیراشع

رابطه ارائه شده توسط Oloo et al 1997

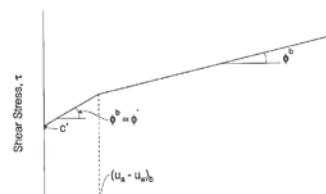
فرضیات: ۱- پوش مقاومت برشی دو خطی است. ۲- توزیع مکش در خاک ثابت است. ۳-

$$\tau = [c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b] + (\sigma - u_a) \tan \phi'$$

$$(u_a - u_w)_b \leq (u_a - u_w) \Rightarrow \phi^b = \phi'$$

$$\sigma = 0 \quad , \quad (u_a - u_w) > (u_a - u_w)_b \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tau = c' + (u_a - u_w)_b \tan \phi' + [(u_a - u_w) - (u_a - u_w)_b] \tan \phi'$$



پوش گسیختنی دو خطی برای خاک غیراشع در تنش نرمال خالص صفر

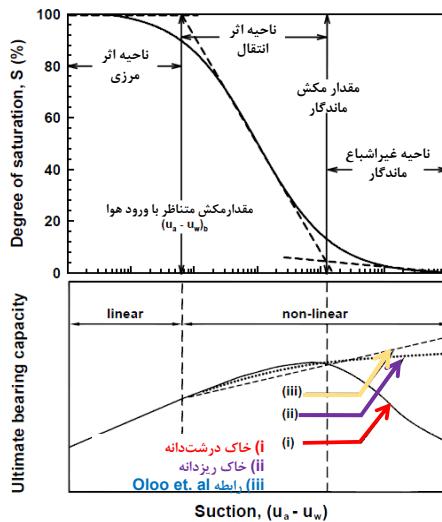
$$q_f = \left\{ c' + (u_a - u_w)_b \tan \phi' + [(u_a - u_w) - (u_a - u_w)_b] \tan \phi' \right\} N_c \cdot \frac{1}{2} B_0$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

14

ظرفیت باربری خاک غیراشباع

محدودیت رابطه ارائه شده توسط :Oloo et. al 1997



تفییرات ظرفیت باربری نسبت به مکش برای خاک‌های بیزدانه و درشت‌دانه Dr. Hasan Ghasemzadeh Vanapalli & oh 2010

15

ظرفیت باربری خاک غیراشباع

رابطه ارائه شده توسط :Vanapalli & Mohamed 2007

فرضیات:

$$q_u = [c' + (u_a - u_w)_b \tan \phi^b] N_c + 0.5B \gamma N_\gamma$$

۱- توزیع ثابت مکش در عمق خاک

$$\tan \phi^b = S^\kappa \tan \phi'$$

$$\alpha = 45 + \frac{\phi^0}{2} \quad \text{۲}$$

$$q_u = [c' + (u_a - u_w)_b (1 - S^\psi) \tan \phi' + (u_a - u_w)_{AVR} S^\psi \tan \phi']$$

۳- در نظر گرفتن تغییرات غیرخطی مقاومت
برشی به علت وجود مکش، $\tan \phi^b$

$$\times N_c \left[1.0 + \left(\frac{N_q}{N_c} \right) \left(\frac{B}{L} \right) \right] + 0.5B \gamma N_\gamma \left[1.0 - 0.4 \left(\frac{B}{L} \right) \right]$$

$$(u_a - u_w)_{AVR} = \frac{1}{2} [(u_a - u_w)_1 + (u_a - u_w)_2]$$

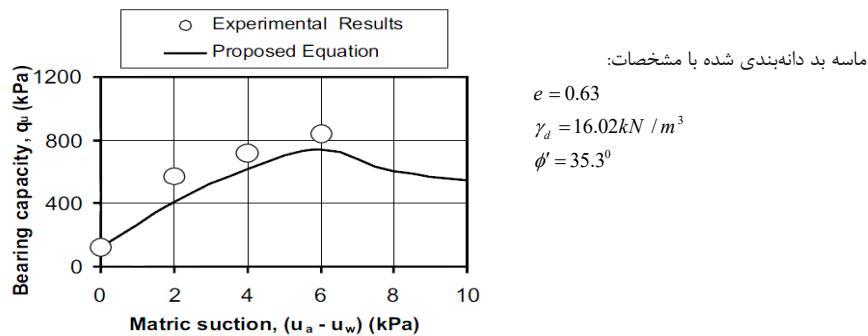
$$\Psi = 1.0 + 0.34I_p - 0.0031I_p^2$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

16

ظرفیت باربری خاک غیراسباع

محدودیت رابطه ارائه شده توسط Vanapalli & Mohamed 2007



مسه بد دانه‌بندی شده با مشخصات:

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

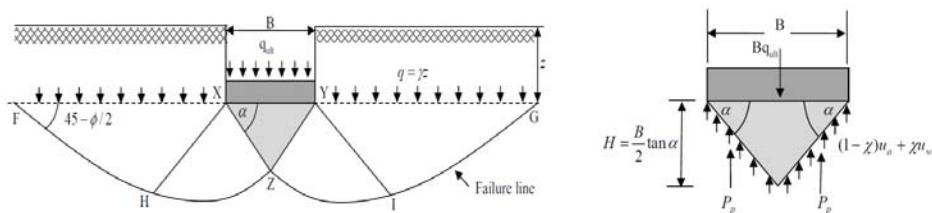
مقایسه بین ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نسبت به
مکش بافتی برای بی‌با ابعاد $100\text{mm} \times 100\text{mm}$
(Vanapalli & Mohamed 2007)

Dr. Hasan Ghasemzadeh

17

ظرفیت باربری خاک غیراسباع

رابطه ارائه شده توسط Uchaipichat et al. 2011 جهت تعیین ظرفیت باربری خاک دانه‌ای:



فرضیات:

-۱ پی نواری

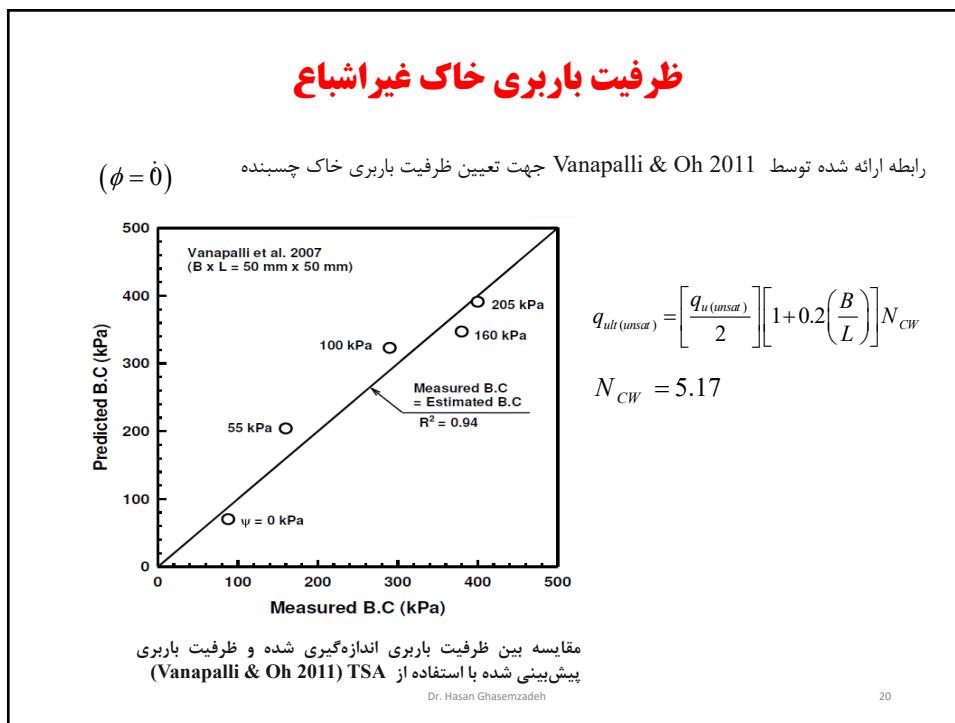
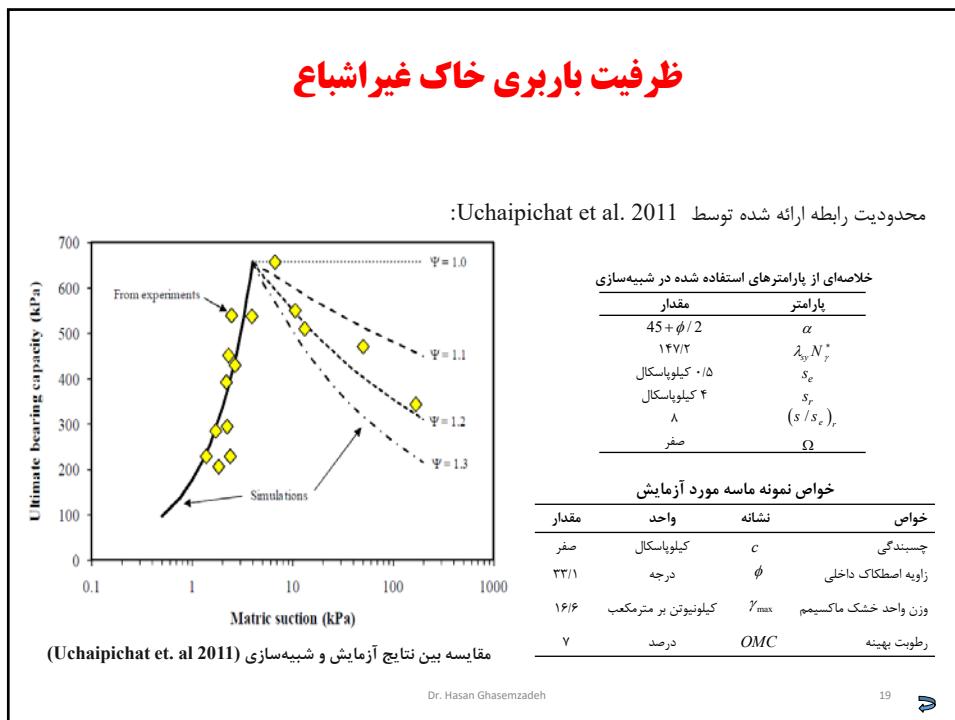
$$c = 0$$

$$\alpha = 45 + \frac{\phi}{2}$$

$$\begin{aligned} Bq_{ult} &= 2P_p - W_{XYZ} + [(1-\chi)u_a + \chi u_w]B \Rightarrow \\ Bq_{ult} &= \left[2K \left(q' + \frac{\sigma_v}{2} - u_a + \chi s \right) \frac{B}{2} \tan \alpha \right] - \left[\gamma \left(\frac{B}{2} \right)^2 \tan \alpha \right] + [(1-\chi)u_a + \chi u_w]B \\ \Rightarrow q_{ult} &= q' N_q + \left[\frac{1}{2} \gamma B - 2 \frac{(u_a - \chi s)}{\tan \alpha} \right] N_\gamma \quad N_\gamma = \tan \alpha (N_q - 1)/2 \\ &\quad N_q = K \tan \alpha \end{aligned}$$

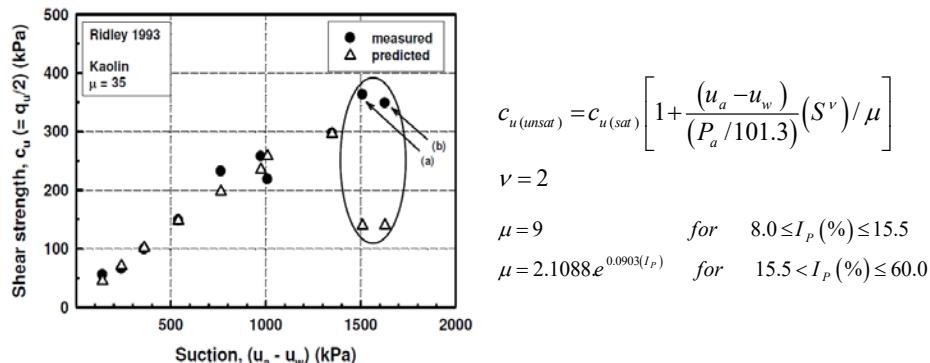
Dr. Hasan Ghasemzadeh

18



ظرفیت باربری خاک غیراسیاع

رابطه مقاومت برشی خاک ریزدانه غیراسیاع ارائه شده توسط Oh & Vanapalli 2009



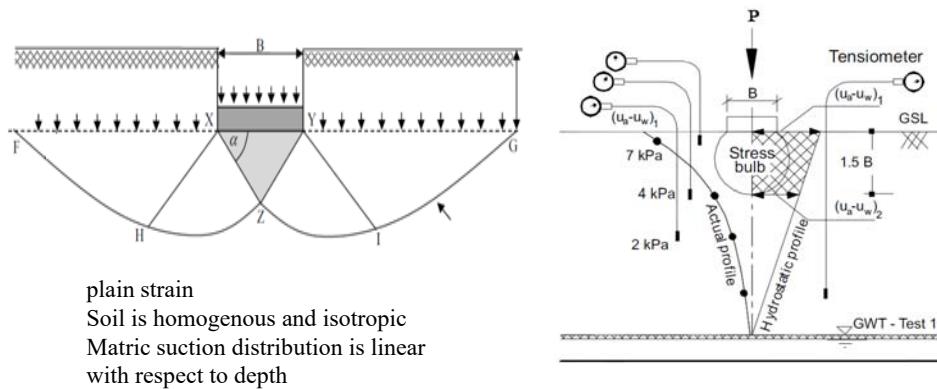
مقایسه بین مقاومت برشی زهکشی نشده اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده (Vanapalli & Oh 2011)

Dr. Hasan Ghasemzadeh

21

ظرفیت باربری خاک غیراسیاع

Ghasemzadeh & Akbari (2019)



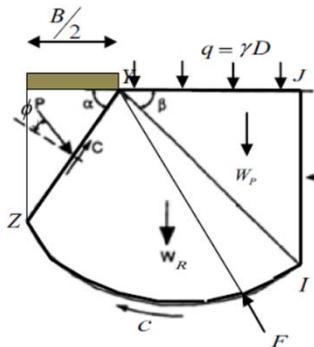
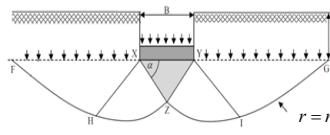
$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M_Y = 0$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

22

ظرفیت باربری خاک غیراسباع

Ghasemzadeh & Akbari (2019)



$$P_p = (\gamma z + q) K_p + 2c \sqrt{K_p} \quad K_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$$

Total cohesion (c) =
intrinsic cohesion (c') + cohesion due to matric suction

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi$$

$$\tan \phi^b = \Theta^k \tan \phi$$

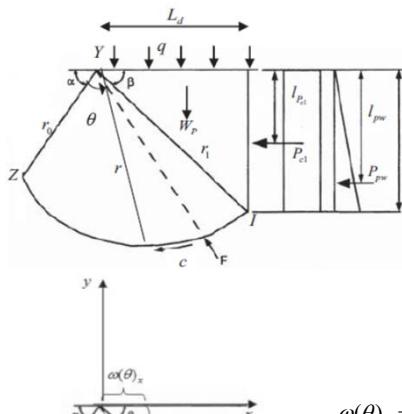
$$\Theta = \left(1 - \frac{\ln(1 + (u_a - u_w)/(u_a - u_w)_r)}{\ln(1 + 1000000/(u_a - u_w)_r)} \right) \left[\frac{1}{\ln(e + ((u_a - u_w)/a)^n)} \right]^m$$

$$(u_a - u_w)_z = \frac{h_w - z}{h_w} (u_a - u_w)_s$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 23 تغییرات خطی مکش نسبت به عمق

ظرفیت باربری خاک غیراسباع

Ghasemzadeh & Akbari (2019)



نیروی مقاوم ناشی از چسبندگی ذاتی

$$P_{c1} = 2c' H_d \sqrt{K_p} \quad l_{P_{c1}} = \frac{H_d}{2}$$

مقدار لنگر ناشی از چسبندگی ذاتی در امتداد طول مارپیچ لگاریتمی

$$M_{c1} = \int_0^{\theta_i} c' r^2 d\theta = \frac{c'}{2 \tan \phi'} (r_i^2 - r_0^2)$$

$$r_i = r_0 \exp((\pi - \alpha - \beta) \tan \phi')$$

رابطه اسپیرال لگاریتمی در جهات دکارتی

$$\omega(\theta)_x = r \cos(\pi + \alpha + \theta)$$

$$\omega(\theta)_y = r \sin(\pi + \alpha + \theta)$$

مولفهای در جهات x و y نیروی چسبندگی ذاتی

$$C_x = - \int_0^{\pi - \alpha - \beta} \omega'(\theta)_x \times c' \times r d\theta$$

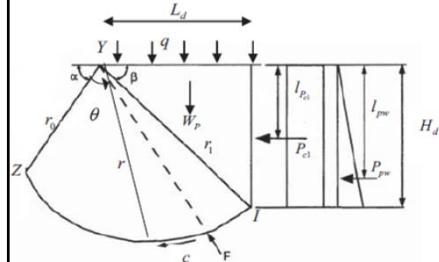
$$C_y = - \int_0^{\pi - \alpha - \beta} \omega'(\theta)_y \times c' \times r d\theta$$

ظرفیت باربری خاک غیراشعاع

Ghasemzadeh & Akbari (2019)

نیروی مقاوم در اثر وزن خاک

$$P_{pw} = \frac{1}{2} \gamma H_d^2 K_p \quad , \quad l_{pw} = \frac{2}{3} H_d$$



نیروی ناشی از سربار

$$P_{pw}^* = q H_d K_p \quad , \quad l_{pw}^* = \frac{H_d}{2}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

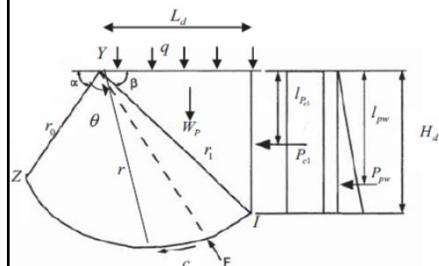
25

ظرفیت باربری خاک غیراشعاع

Ghasemzadeh & Akbari (2019)

وزن گوه مقاوم

$$W_p = \frac{1}{2} \gamma H_d L_d \quad , \quad L_w = \frac{2}{3} L_d$$



وزن ناحیه برش شعاعی

$$W_R = \frac{(r_1^2 - r_0^2)}{4 \tan \phi'} \gamma$$

وزن گوه فعال

$$W = \frac{1}{2} BH\gamma$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

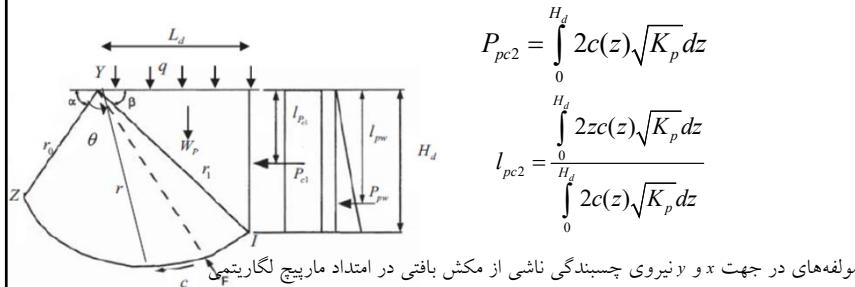
26

ظرفیت باربری خاک غیراشع

Ghasemzadeh & Akbari (2019)

$$c(z) = (u_a - u_w)_z \left[\Theta^k(z) \tan \phi' \right]$$

نیروهای ایجاد شده در اثر مکش بافتی



$$z = h = r \sin(\alpha + \theta)$$

$$C_{sx} = - \int_0^{\pi-\alpha-\beta} \omega'(\theta)_x \times c(h) \times r d\theta$$

$$C_{sy} = - \int_0^{\pi-\alpha-\beta} \omega'(\theta)_y \times c(h) \times r d\theta$$

$$P_{pc2} = \int_0^{H_d} 2c(z) \sqrt{K_p} dz$$

$$l_{pc2} = \frac{1}{\int_0^{H_d} 2c(z) \sqrt{K_p} dz}$$

$$M_c = \int_0^{\pi-\alpha-\beta} c(h) r^2 \sin \phi' d\theta$$

لنگر ناشی از مکش بافتی در امتداد مارپیچ لگاریتمی

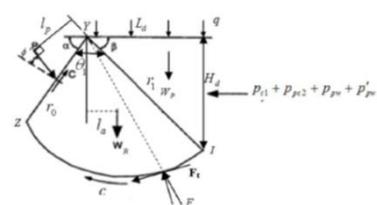
Dr. Hasan Ghasemzadeh

27

ظرفیت باربری خاک غیراشع

Ghasemzadeh & Akbari (2019)

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M_Y = 0$$



$$\sum M_Y = 0$$

$$-2cH_d\sqrt{K_p} \times \frac{H_d}{2} - \frac{c'}{2\tan\phi'}(r_1^2 - r_0^2) - \frac{1}{2}\gamma H_d^2 K_p \times \frac{2}{3}H_d - \frac{1}{2}\gamma H_d r_i \cos \beta \times \frac{2}{3}r_i \cos \beta$$

$$- \frac{r_1^2 - r_0^2}{4\tan\phi'} \times \gamma \times l_a - qH_d K_p \times \frac{H_d}{2} - \int_0^H 2c(z)\sqrt{K_p} dz \times l_{pc2} - \int_0^{\pi-\alpha-\beta} c(h)r^2 \sin \phi' d\theta + Pl_p = 0$$

$$\sum F_x = 0$$

$$-2cH_d\sqrt{K_p} \times \frac{1}{2}\gamma H_d^2 K_p + C_\alpha + \frac{c' H}{\sin \alpha} \times \cos \alpha +$$

$$C_{aa} - qH_d K_p - \int_0^H 2c(z)\sqrt{K_p} dz + (F_a)_z + (F_t)_z + P \cos(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi') = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$C_\gamma + C_{ap} + c'H + C_{ap} - \frac{1}{2}\gamma H_d r_i \cos \beta - q \times r_i \cos \beta - \frac{r_1^2 - r_0^2}{4\tan\phi'} \times \gamma$$

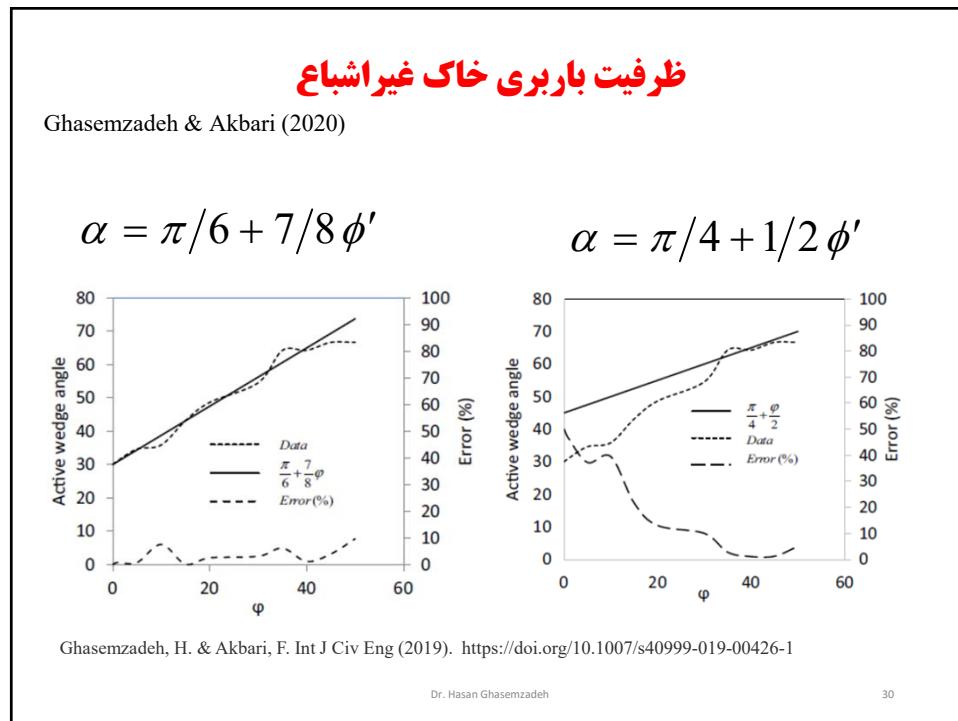
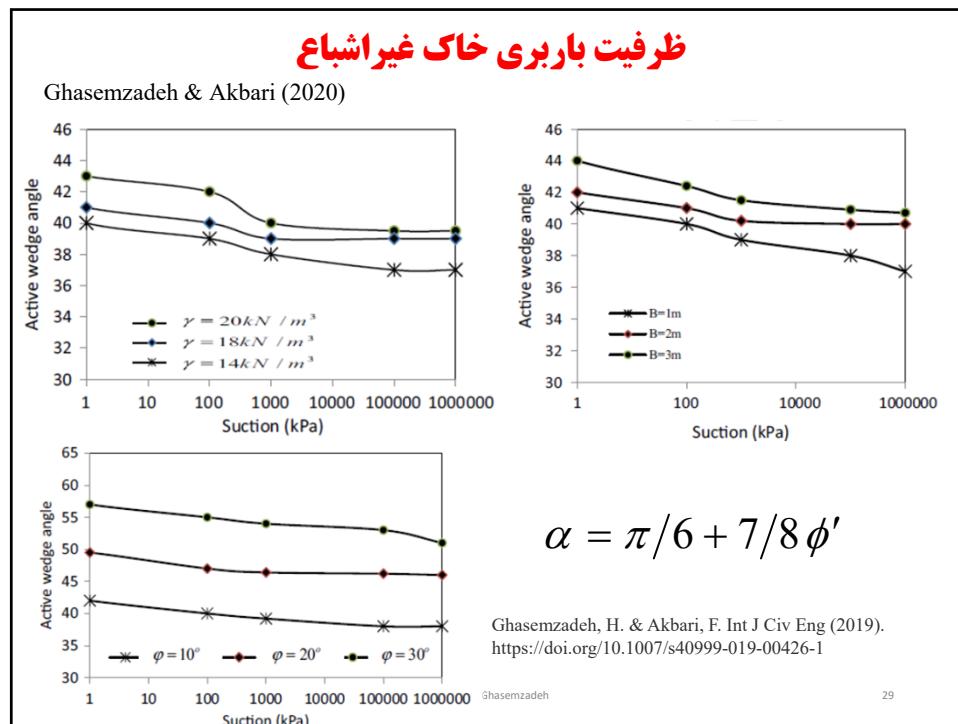
$$+ (F_a)_y + (F_t)_y - P \sin(\frac{\pi}{2} - \alpha + \phi) = 0$$

Parameter	Amount range
e	2.71828
q (kPa)	0-100
c (kPa)	0-300
ϕ (rad)	$0 - \frac{\pi}{3.58}$
γ (kN/m ³)	12-25
B (m)	0.01-3
$(u_a - u_w)_s$ (kPa)	$10^{-3}-10^6$
$(u_a - u_w)_r$ (kPa)	$10^{-1}-10^6$
k	0-30
a (kPa)	$10^{-3}-20000$
n	(-30)-50
m	(-20)-30
h_w (m)	$10^{-3}-30$

The non-linear equations system is solved based on the least squares method

28

Dr. Hasan Ghasemzadeh

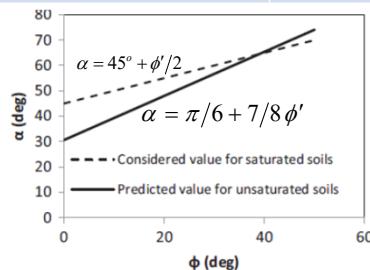


ظرفیت باربری خاک غیر اشباع

Ghasemzadeh & Akbari (2020)

Comparison between the predicted and assumed value of active wedge angles for unsaturated soil

Researchers	ϕ' (deg)	ϕ' (deg)	$\alpha = \pi/6 + 7/8 \phi'$	$\alpha = 45^\circ + \phi'/2$ (Saturated soil)
		Presented method		
Vanapalli & Mohamed [5]	39	64.6	64.5	
Schanz et al. [7]	46.9	71.4	68.5	
Uchaipichat & Man-Koksung [17]	33.1	59.4	61.5	
Rojas et al. [18]	26	53.2	58	
Oh & Vanapalli [19]	21	49	55.5	



Ghasemzadeh, H. & Akbari, F. Int J Civ Eng (2019).
<https://doi.org/10.1007/s40999-019-00426-1>

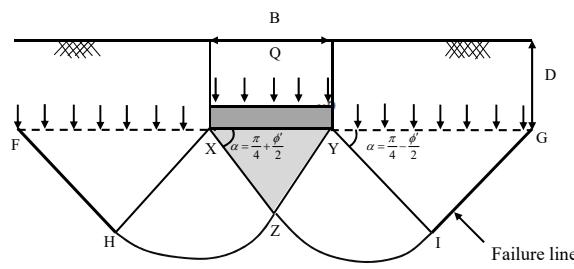
1 Ghasemzadeh

31

Unsaturated Bearing Capacity (Ghasemzadeh&Akbari 2019)

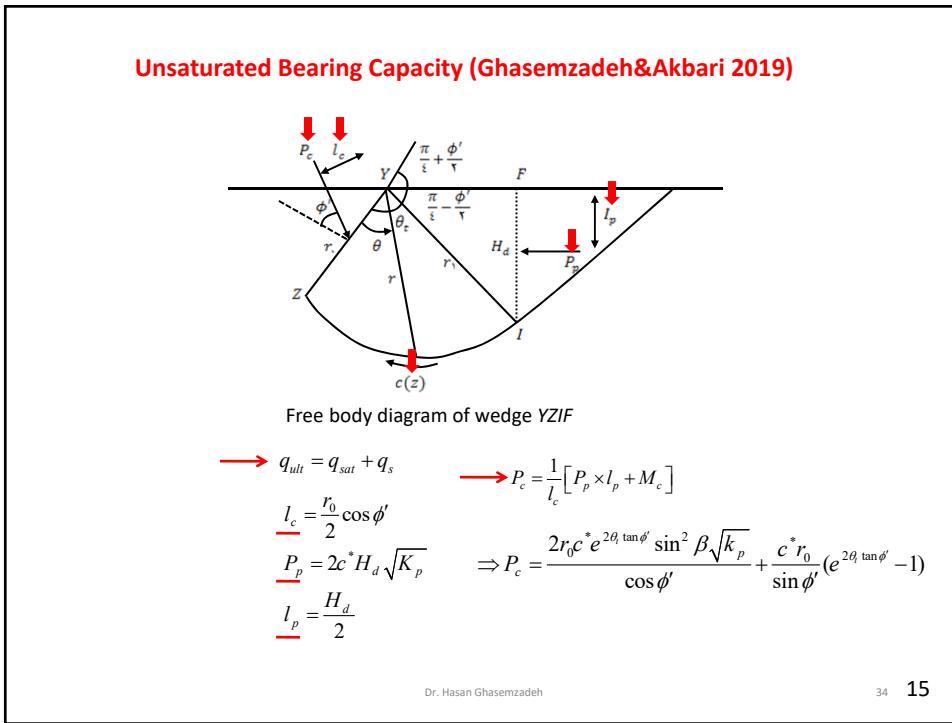
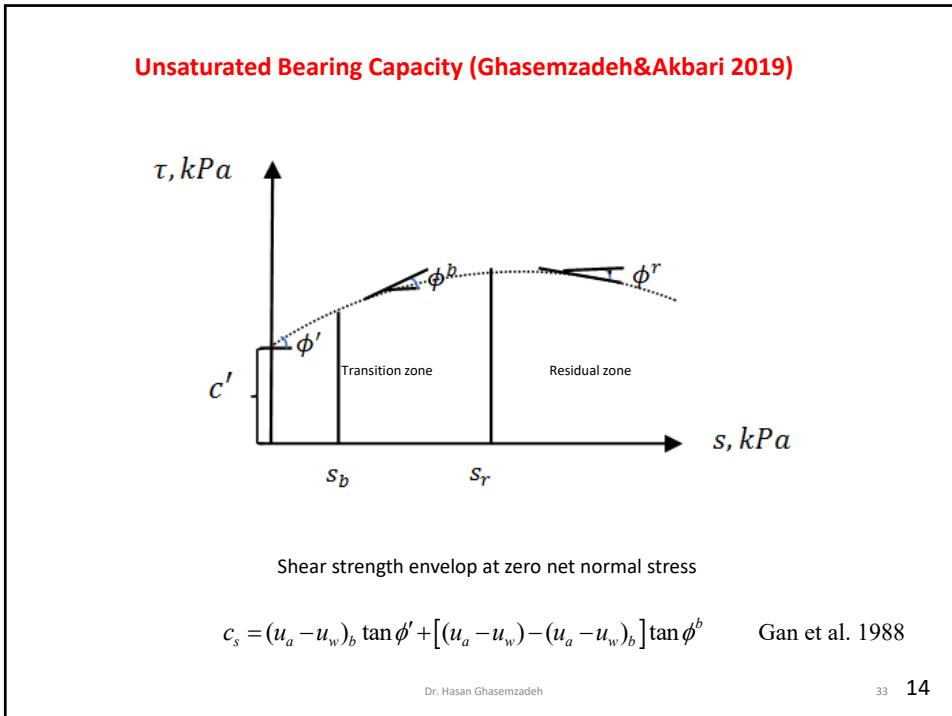
Assumptions:

1. The general shear failure mechanism is dominant below the footing
2. The length of footing is sufficiently larger than its width
3. The soil below footing is weightless, homogenous and isotropic
4. The principle of superposition is applicable to individual components of bearing capacity

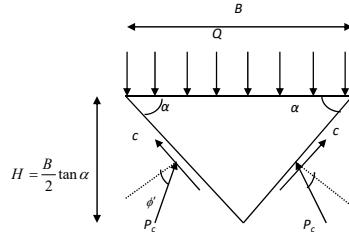


The assumed failure Prandtl mechanism

32 13



Unsaturated Bearing Capacity (Ghasemzadeh&Akbari 2019)



Equilibrium of the active wedge

$$(q_s)_{cst} \times B = 2c^* \times \frac{B}{2 \cos \alpha} \times \sin \alpha + 2P_c \cos(\alpha - \phi')$$

$$(q_s)_{cst} = [c_{act} + s \tan \phi^b] \times \cot(\phi') [e^{\pi \tan \phi'} \tan^2(\alpha) - 1]$$

$$\rightarrow q_{ult} = [c' + (u_a - u_w)_b (\tan \phi' - \tan \phi^b)] N_c + qN_q + 0.5B\gamma N_\gamma + (u_a - u_w) \tan \phi^b (N_s)_{cst}$$

$$(N_s)_{cst} = \cot(\phi) [e^{\pi \tan \phi} \tan^2(\alpha) - 1]$$

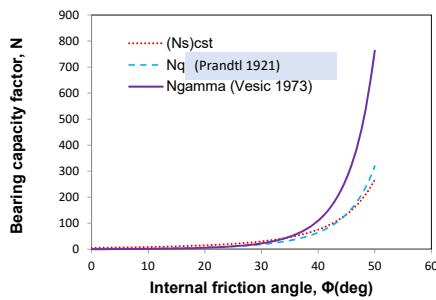
Dr. Hasan Ghasemzadeh 35 16

Unsaturated Bearing Capacity (Ghasemzadeh&Akbari 2019)

The bearing capacity equation of unsaturated soils with constant suction profile:

$$q_{ult} = q_{sat} + q_s$$

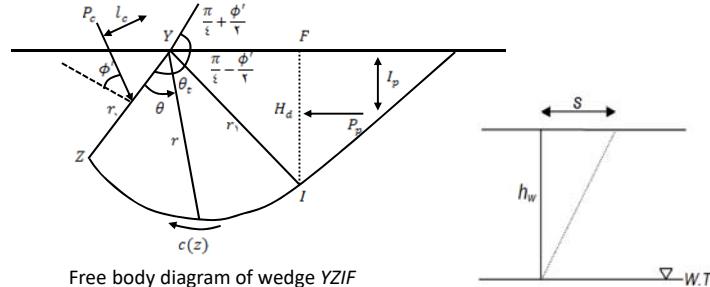
$$q_{ult} = [c' + (u_a - u_w)_b (\tan \phi' - \tan \phi^b)] N_c + qN_q + 0.5B\gamma N_\gamma + (u_a - u_w) \tan \phi^b (N_s)_{cst}$$



Dr. Hasan Ghasemzadeh

36 17

Bearing capacity with assumption of Prandtl mechanism



Free body diagram of wedge YZIF

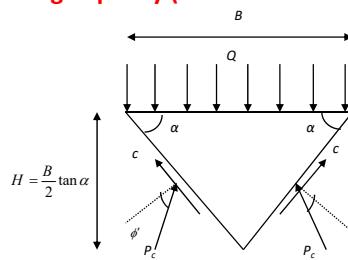
Matric suction variation with depth

$$\begin{aligned} c(z) &= c_0 - \lambda z & l_c &= \frac{2}{3} r_0 \cos \phi' \\ c_0 &= s \tan(\phi^b) & P_p &= \int_0^{H_d} 2\lambda z \sqrt{k_p} dz = \frac{s}{h_w} \times \tan(\phi^b) \sqrt{k_p} \times H_d^2 \\ \lambda &= \frac{s \tan(\phi^b)}{h_w} & l_p &= \frac{2}{3} H_d \\ P_c &= \frac{1}{l_c} [P_p \times l_p + M_c] & \end{aligned}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

37 18

Unsaturated Bearing Capacity (Ghasemzadeh&Akbari 2019)



Equilibrium of the active wedge

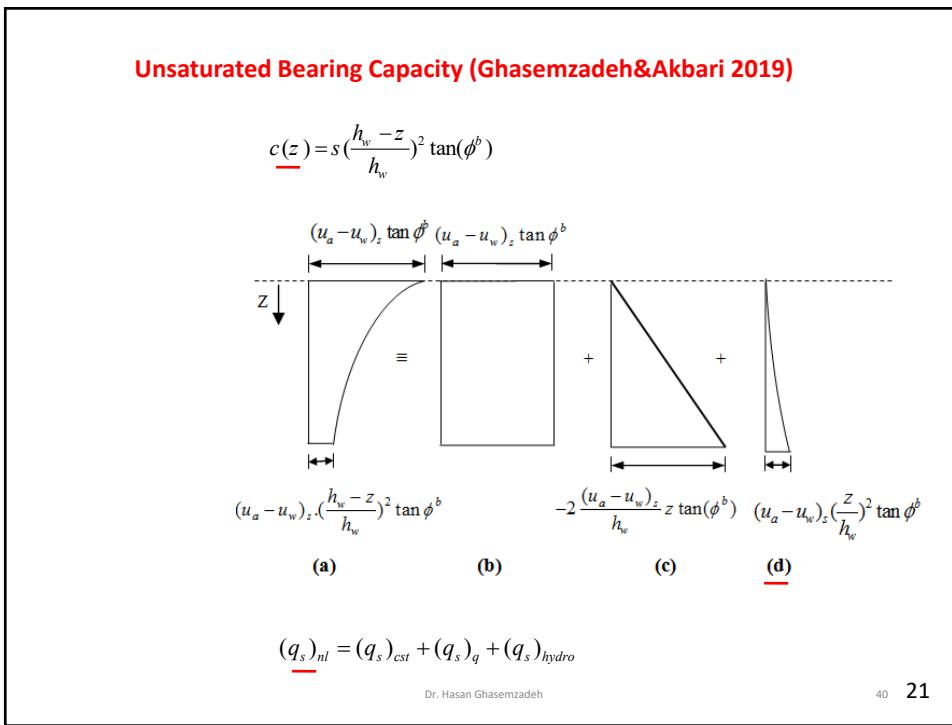
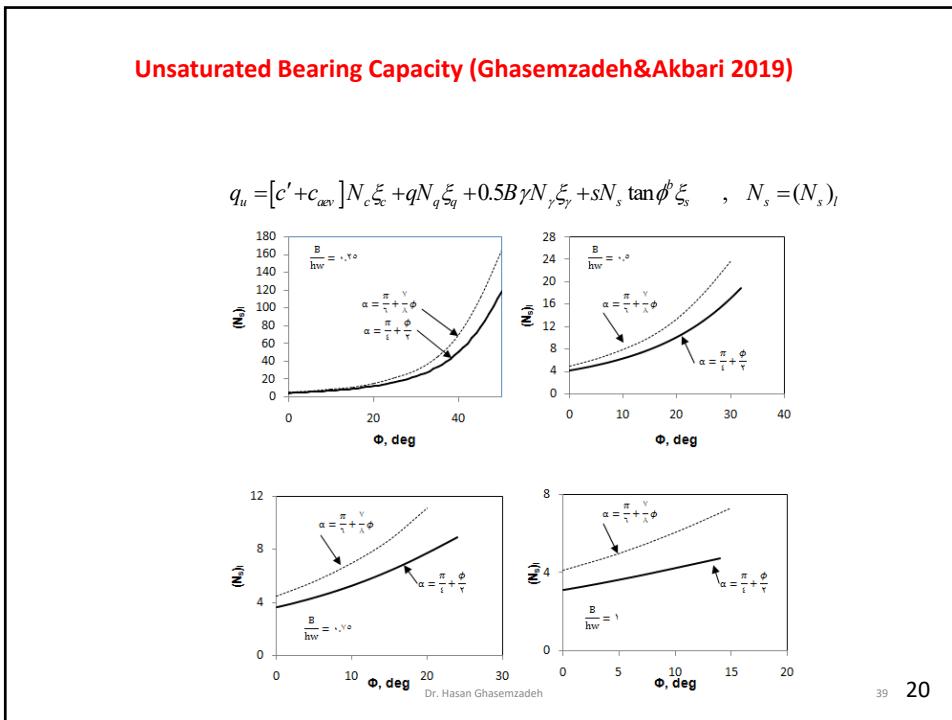
$$(q_s)_{hydro} \times B = 2P_c \cos(\alpha - \phi') + 2 \sin(\alpha) \int_0^H c(z) \frac{dz}{\sin \alpha}$$

$$(q_s)_l = (q_s)_{cst} + (q_s)_{hydro} \Rightarrow (q_s)_l = s \tan(\phi^b) \times (N_s)_l$$

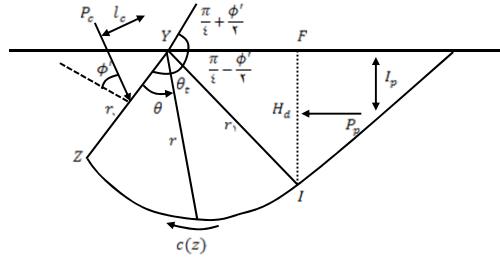
$$(N_s)_l = (N_s)_{cst} - \frac{H}{2h_w} \left[\tan(\alpha) + e^{\frac{3}{2}\pi \tan \phi'} - \frac{3}{\cos \alpha} \times \frac{1}{8 \cos^2 \phi' - 9} \times \left[\begin{array}{l} e^{\frac{3}{2}\pi \tan \phi'} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3}{2}\phi'\right) + \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3}{2}\phi'\right) + \\ 2 \sin \phi' (e^{\frac{3}{2}\pi \tan \phi'} \cos(\alpha) - \sin(\alpha)) \end{array} \right] \right]$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

38 19



Unsaturated Bearing Capacity (Ghasemzadeh&Akbari 2019)



Free body diagram of wedge YZIF

$$P_c = \frac{1}{l_c} [P_p \times l_p + M_c]$$

$$l_c = \frac{3}{4} r_0 \cos \phi'$$

$$P_p = \int_0^{H_d} 2s \left(\frac{z}{h_w}\right)^2 \tan(\phi^b) \sqrt{k_p} dz$$

$$l_p = \frac{3}{4} H_d$$

$$M_c = \int_0^{\theta_t} c(h) r^2 d\theta = \frac{s}{h_w^2} \tan(\phi^b) r_0^2 \int_0^{\theta_t} e^{4\theta \tan(\phi')} \sin^2(\alpha + \theta) d\theta$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 41 22

Unsaturated Bearing Capacity (Ghasemzadeh&Akbari 2019)

Equilibrium of the active wedge:

$$(q_s)_q \times B = 2P_c \cos(\alpha - \phi') + 2\sin(\alpha) \int_0^H c(z) \frac{dz}{\sin \alpha} \quad , \quad \int_0^H c(z) dz = \frac{s}{h_w^2} \times \tan(\phi^b) \times \frac{H^3}{3}$$

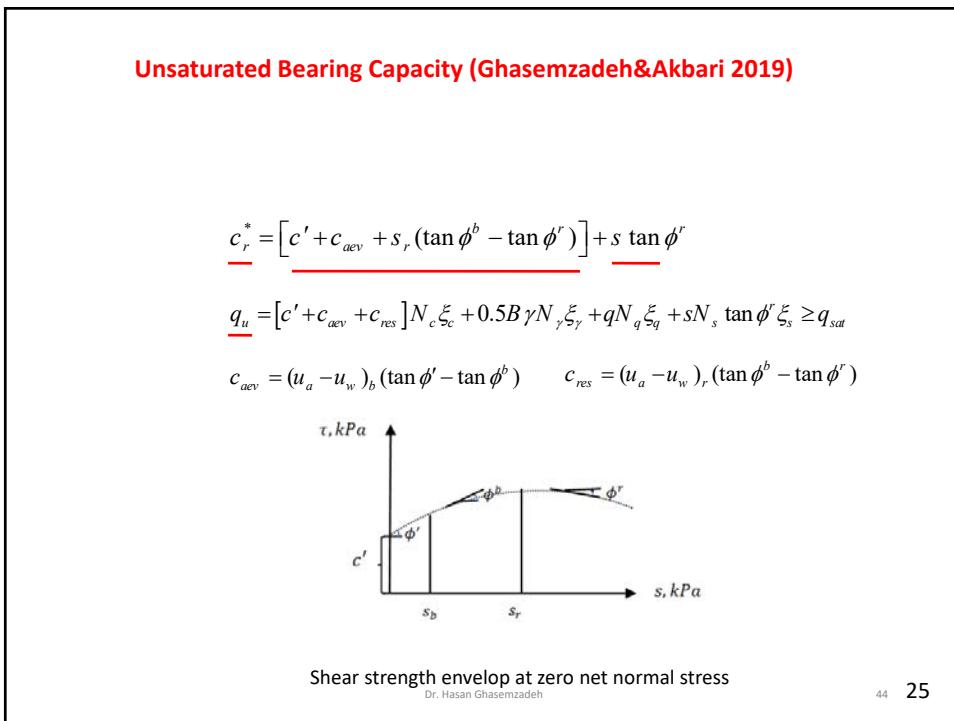
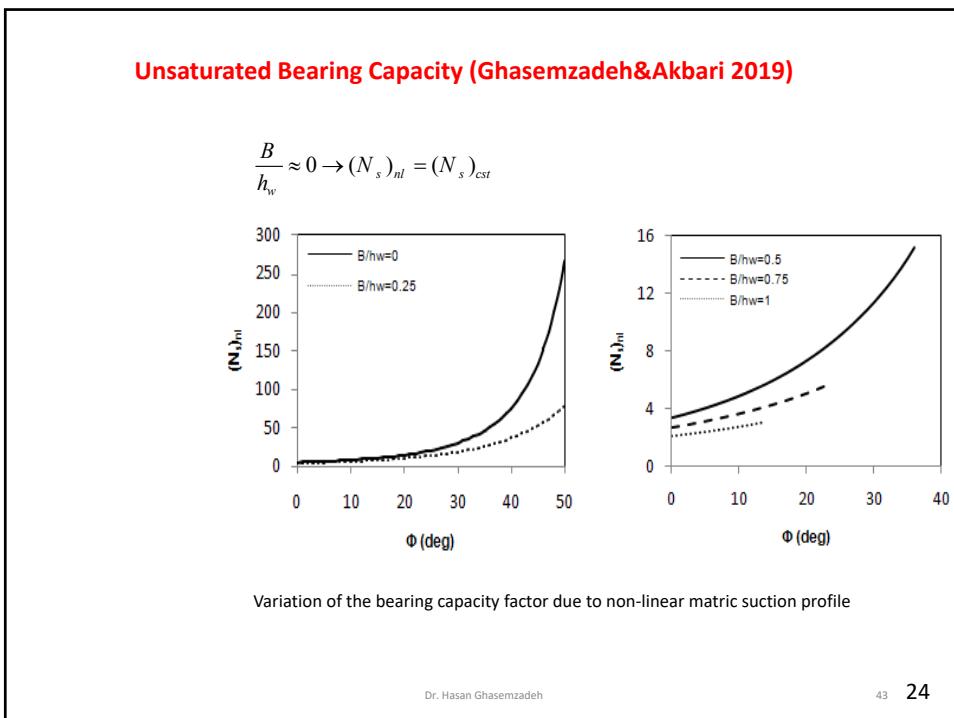
$$(q_s)_q = s \tan(\phi^b) \times (N_s)_q$$

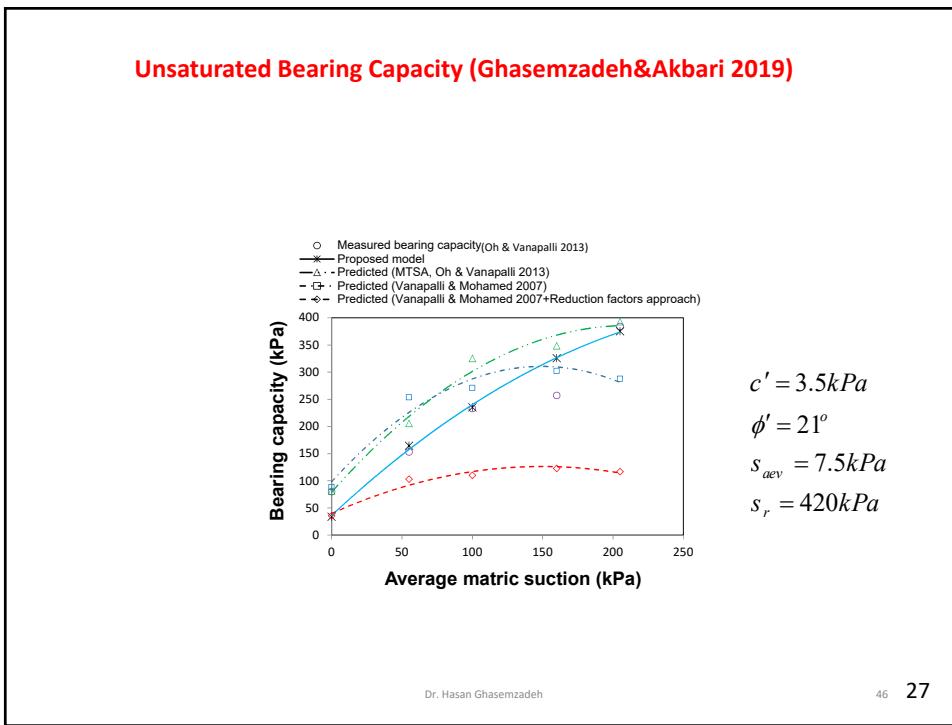
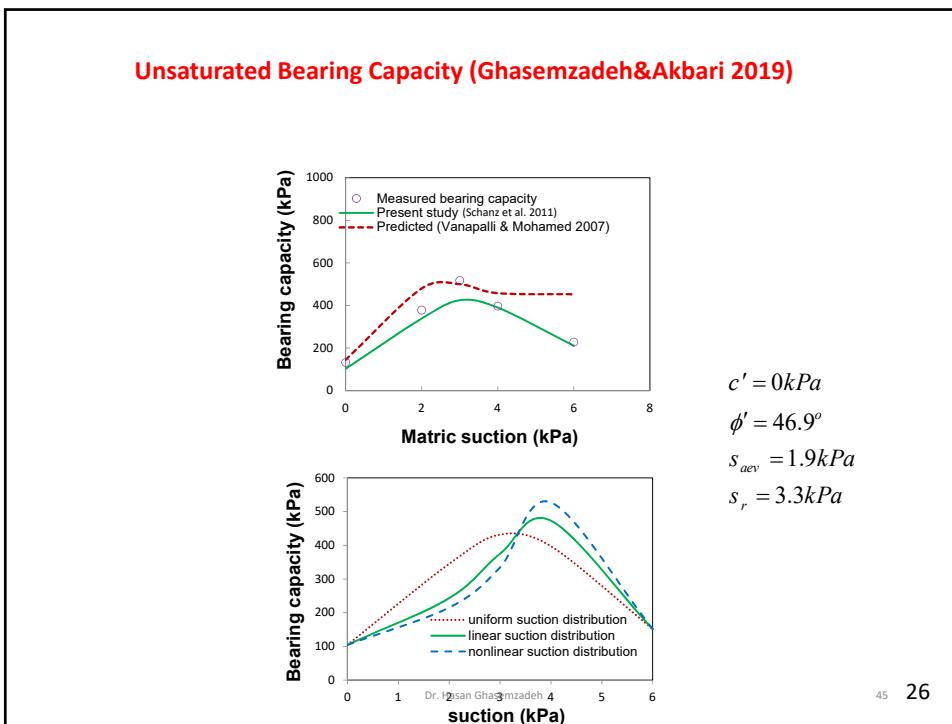
$$(N_s)_q = \frac{1}{3} \left(\frac{H}{h_w} \right)^2 \left[\tan \alpha + \frac{e^{2\pi \tan \phi'}}{\tan \alpha} + \frac{1}{2 \tan \alpha} \times \frac{1}{(3 \cos^2 \phi' - 4) \sin \phi'} \times \left[\begin{array}{l} e^{2\pi \tan \phi'} (-8 \sin^2 \phi' - 8 \sin^2 \alpha \sin \phi' - 4 \sin^2 \alpha) \\ + 8 \cos^2 \phi' - 8 \sin^2 \alpha \sin \phi' + 8 \tan^2 \alpha - 28 \sin^2 \alpha \end{array} \right] \right]$$

$$\underline{q_u} = [c' + c_{av}] N_c \xi_c + 0.5B \gamma N_\gamma \xi_\gamma + q N_q \xi_q + s N_s \tan \phi^b \xi_s \quad , \quad N_s = (N_s)_{nl}$$

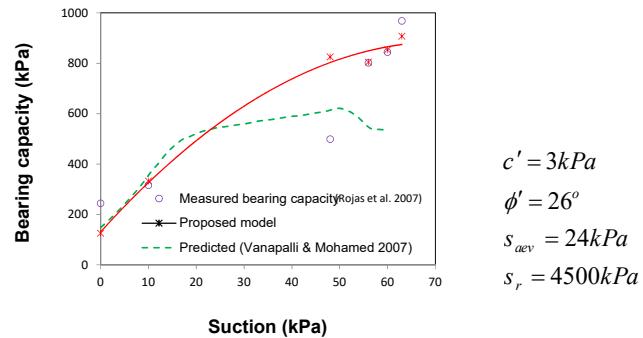
Dr. Hasan Ghasemzadeh

42 23





Unsaturated Bearing Capacity (Ghasemzadeh&Akbari 2019)



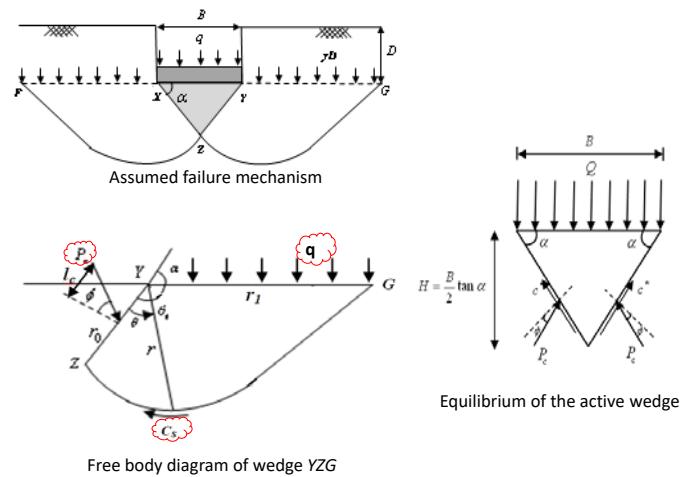
$$\begin{aligned}c' &= 3 \text{ kPa} \\ \phi' &= 26^\circ \\ s_{aev} &= 24 \text{ kPa} \\ s_r &= 4500 \text{ kPa}\end{aligned}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

47 28

Unsaturated Bearing Capacity (Ghasemzadeh&Akbari 2019)

Bearing capacity with assumption of continuous log spiral



Free body diagram of wedge YZG

Dr. Hasan Ghasemzadeh

48 29

Unsaturated Bearing Capacity (Ghasemzadeh&Akbari 2019)

Bearing capacity with assumption of continuous log spiral

$$(q_s)_{cst} = [c' + c_{\alpha\nu}] N_c \xi_c + q N_q \xi_q + 0.5 B \gamma N_\gamma \zeta_\gamma + s N_s \tan \phi' \xi_s \quad , \quad N_s = (N_s)_{cst}$$

$$(N_s)_{cst} = \tan(\alpha) \left[1 + \frac{e^{2(\pi-\alpha)\tan\phi'} - 1}{\sin\phi'} \right]$$

$$\rightarrow \frac{\partial(N_s)_{cst}}{\partial\alpha} = -e^{(2\pi-2\alpha)\tan\phi'} \left[\frac{\sin\phi'(-1+2\cos^2\alpha+\sin 2\alpha\tan\phi')}{\sin\phi'\cos^2\alpha} \right] = 0$$

$$\tan\alpha = \frac{1+\sin\phi'}{\cos\phi'} \Rightarrow \alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

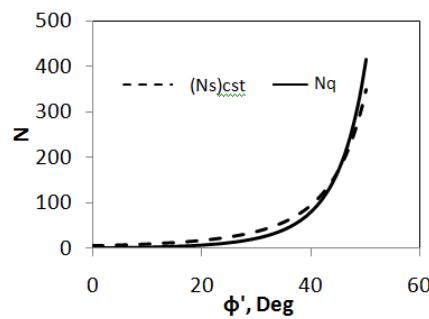
49 30

Unsaturated Bearing Capacity (Ghasemzadeh&Akbari 2019)

Bearing capacity with assumption of continuous log spiral

$$q_{ult} = q N_q \quad N_q = \frac{\cos(\alpha-\phi')}{\cos\phi'} \cdot \frac{1}{\cos\alpha} e^{2(\pi-\alpha)\tan\phi'}$$

$$\frac{\partial N_q}{\partial\alpha} = \tan\phi' e^{2(\pi-\alpha)\tan\phi'} \left[-1 + \tan^2\alpha - 2\tan\alpha\tan\phi' \right] = 0 \Rightarrow \alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}$$



Dr. Hasan Ghasemzadeh

50 31

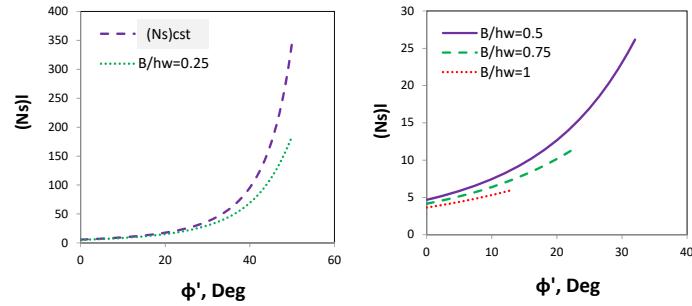
Unsaturated Bearing Capacity (Ghasemzadeh&Akbari 2019)

Bearing capacity with assumption of continuous log spiral

Linear suction distribution:

$$q_u = (c' + c_{aev}) N_c \xi_c + q N_q \xi_q + 0.5B \gamma N_r \xi_r + s N_s \tan \phi^b \xi_s \quad , \quad N_s = (N_s)_l$$

$$\frac{B}{h_w} \approx 0 \rightarrow (N_s)_l = (N_s)_{cst}$$



Dr. Hasan Ghasemzadeh

51 32

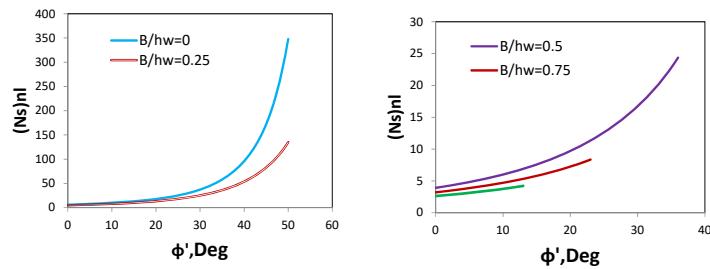
Unsaturated Bearing Capacity (Ghasemzadeh&Akbari 2019)

Bearing capacity with assumption of continuous log spiral

Nonlinear suction distribution:

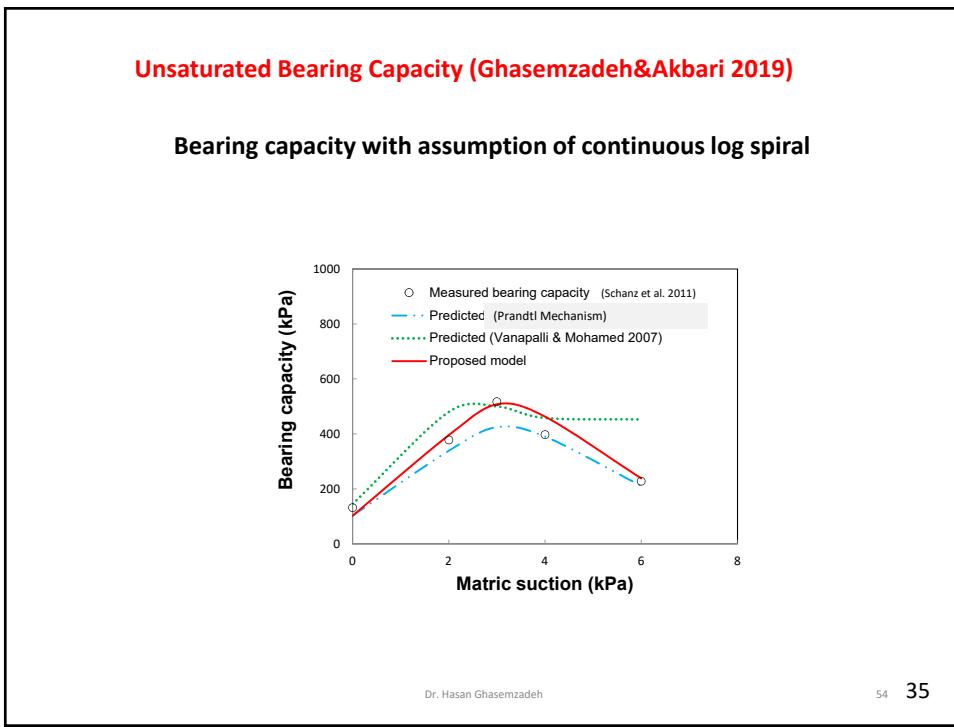
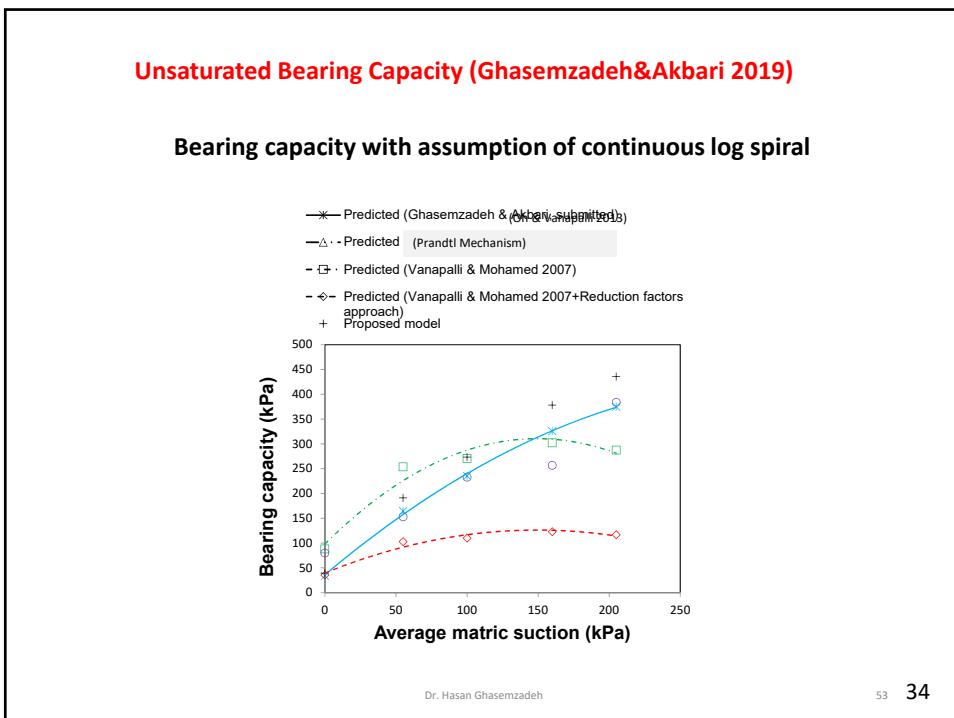
$$q_u = (c' + c_{aev}) N_c \xi_c + 0.5B \gamma N_r \xi_r + q N_q \xi_q + s N_s \tan \phi^b \xi_s \quad , \quad N_s = (N_s)_{nl}$$

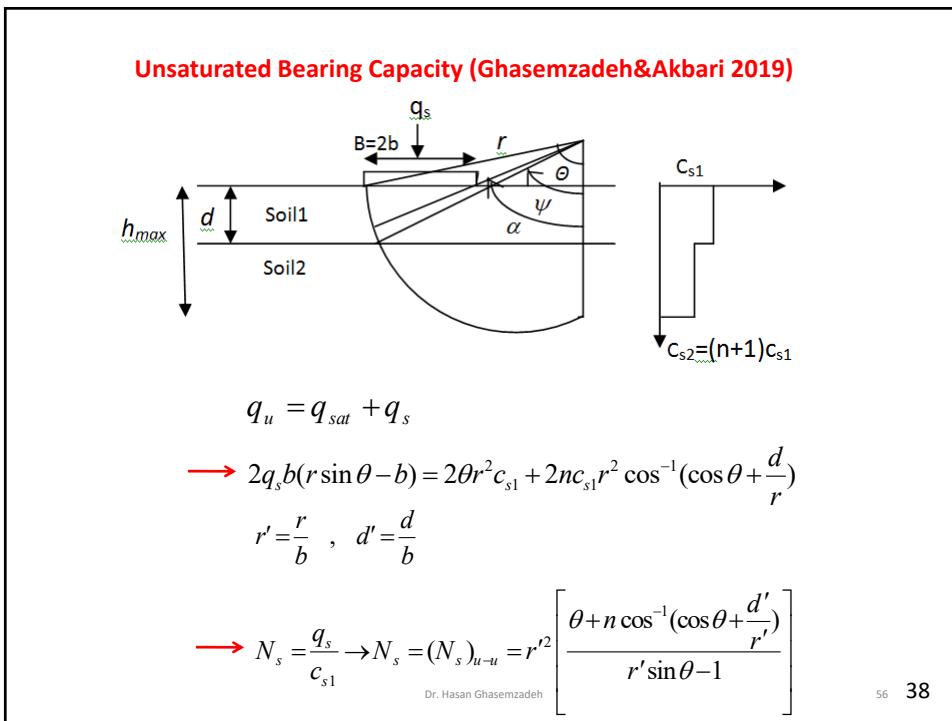
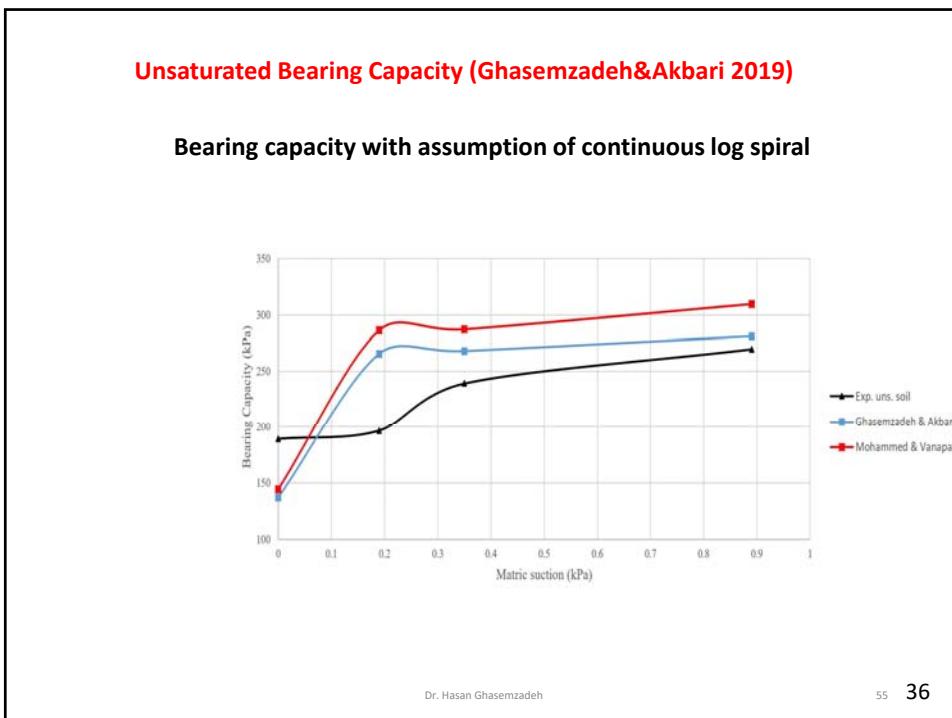
$$\frac{B}{h_w} \approx 0 \rightarrow (N_s)_{nl} = (N_s)_{cst}$$

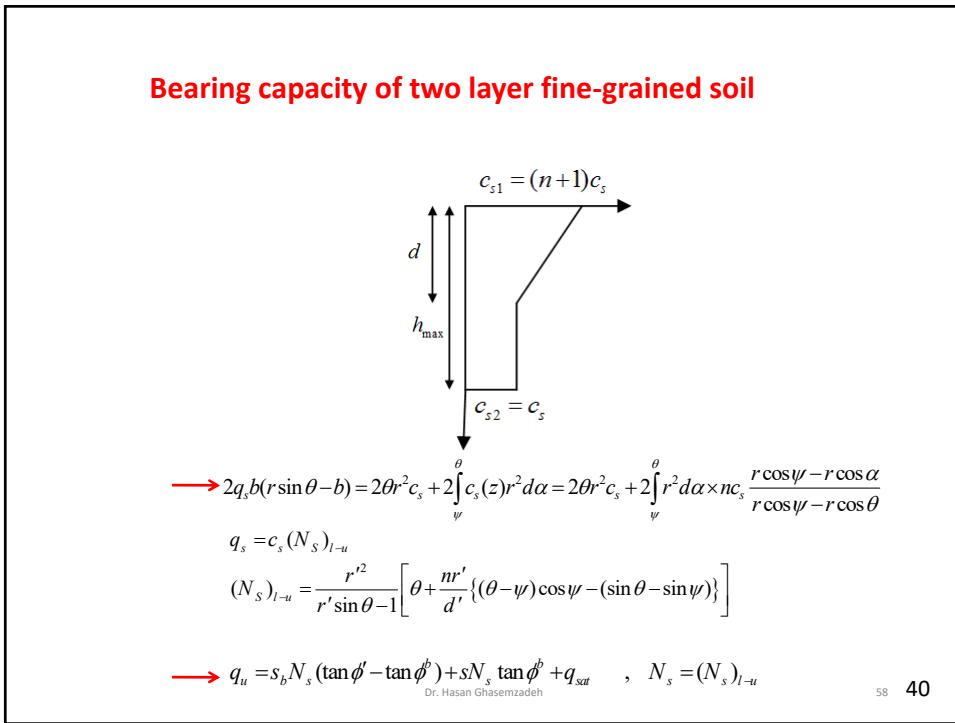
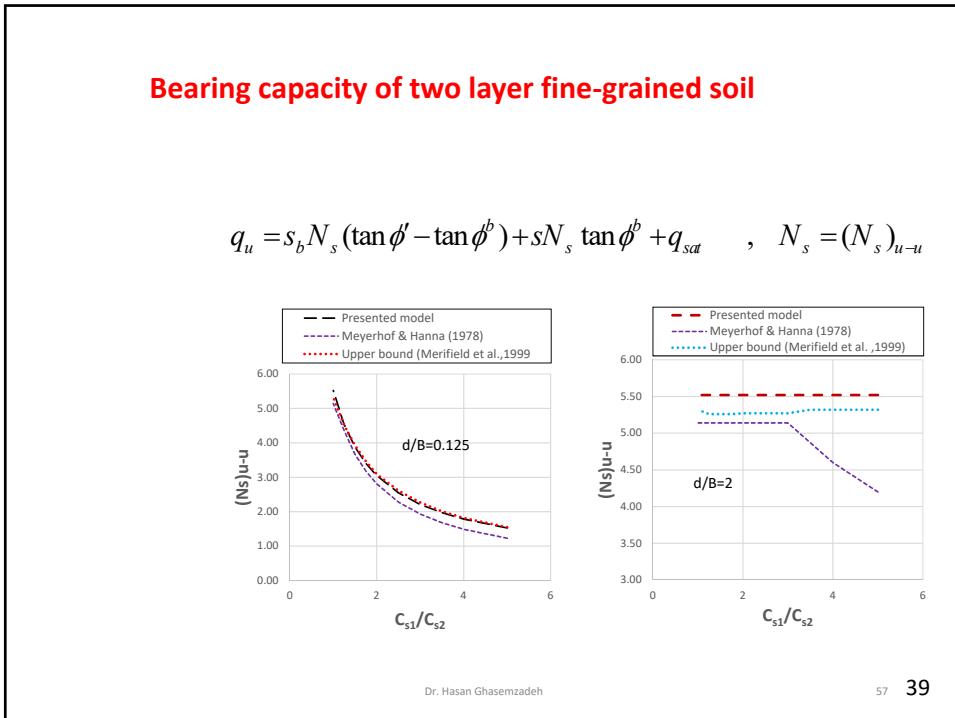


Dr. Hasan Ghasemzadeh

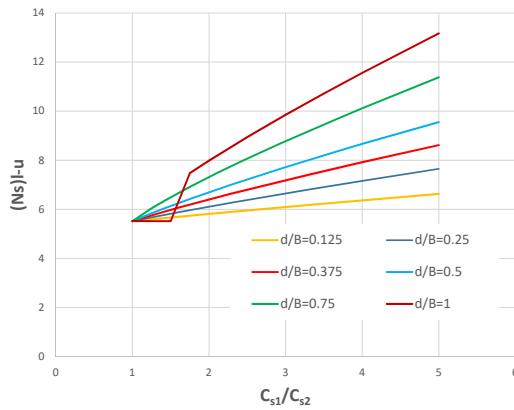
52 33







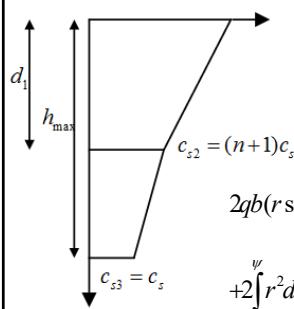
Bearing capacity of two layer fine-grained soil



Dr. Hasan Ghasemzadeh

59 41

Bearing capacity of two layer fine-grained soil



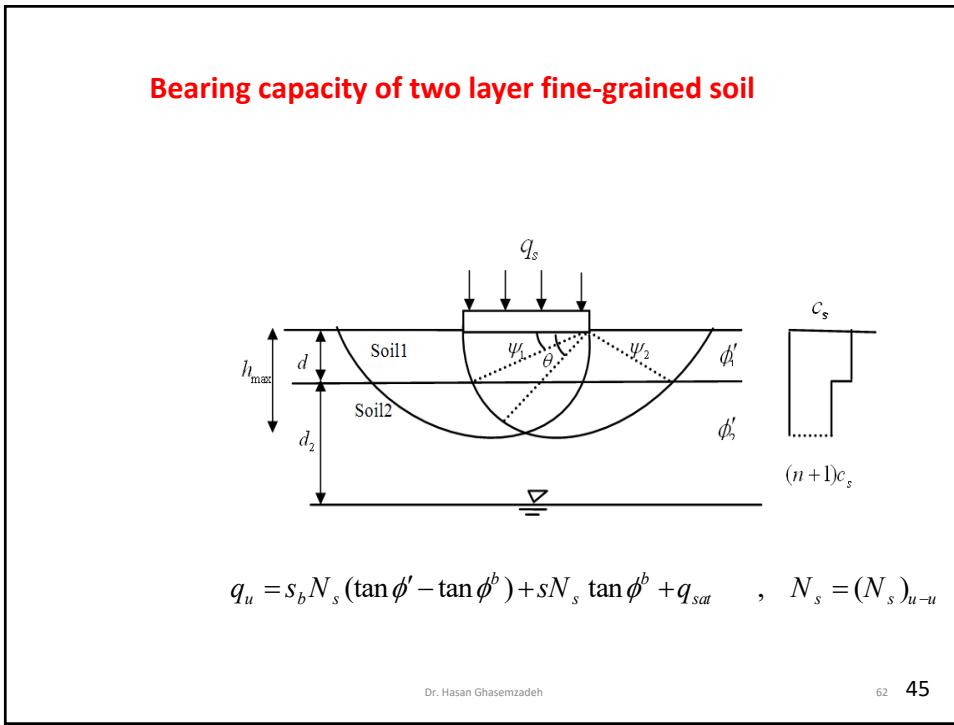
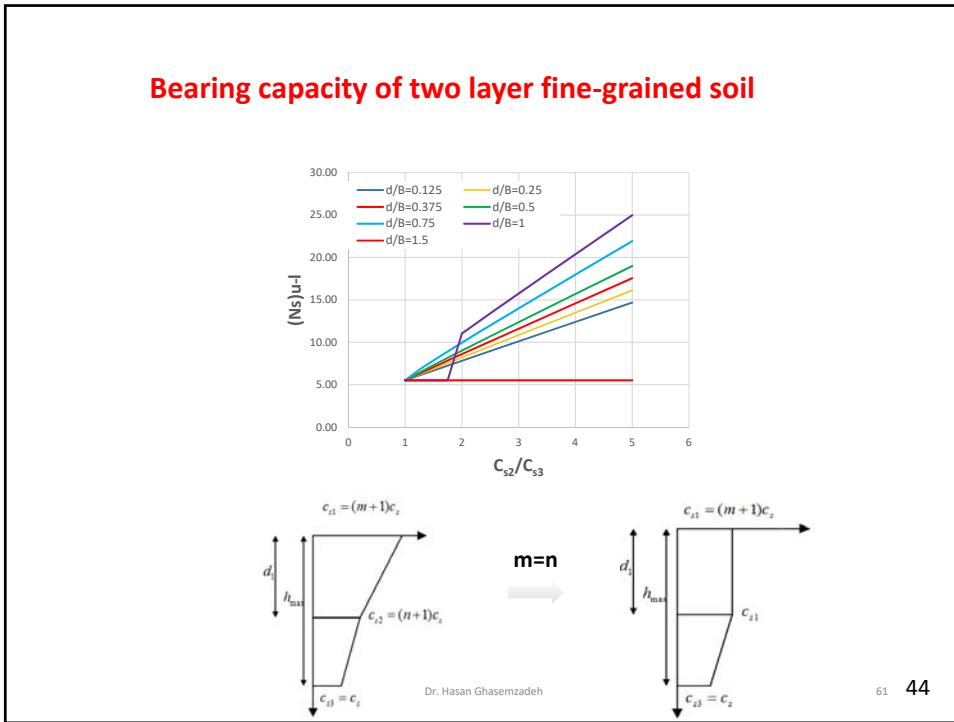
$$2qb(r \sin \theta - b) = 2\theta r^2 c_s + 2 \int_0^\theta r^2 d\alpha (m-n)c_s \times \frac{r \cos \psi - r \cos \alpha}{r \cos \psi - r \cos \theta} + 2(\theta - \psi)r^2 n c_s \\ + 2 \int_0^\psi r^2 d\alpha n c_s \times \frac{r - r \cos \alpha}{r - r \cos \psi}$$

$$q = s_b N_s (\tan \phi' - \tan \phi^b) + s N_s \tan \phi^b \quad , \quad N_s = (N_s)_{l-l}$$

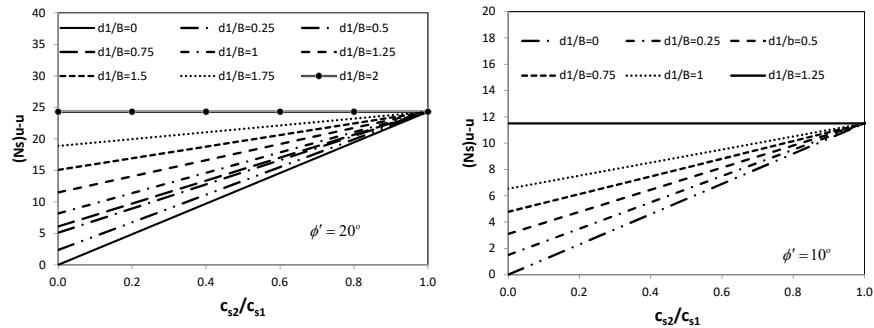
$$(N_s)_{l-l} = \frac{\theta r'^2 (1+n)}{r' \sin \theta - 1} + \frac{(m-n)}{r' \sin \theta - 1} \times \frac{r'^3}{d'_1} \{ (\theta - \psi) \cos \psi - (\sin \theta - \sin \psi) \}$$

$$- \frac{r'^2 \psi n}{r' \sin \theta - 1} + \frac{r'^2 n}{(1 - \cos \psi)(r' \sin \theta - 1)} \{ \psi - \sin \psi \} \quad , \quad d'_1 = \frac{d_1}{b}$$

60 42



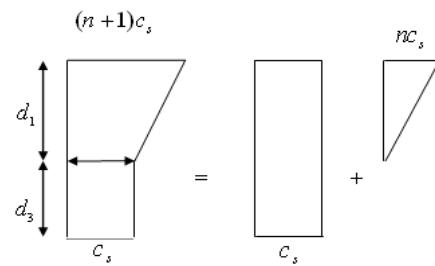
Bearing capacity of two layer fine-grained soil



Dr. Hasan Ghasemzadeh

63 46

Bearing capacity of two layer fine-grained soil



$$q_u = s_b N_s (\tan \phi' - \tan \phi^b) + s N_s \tan \phi^b + q_{sat} \quad , \quad N_s = (N_s)_{l-u}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

64 47

Bearing capacity of two layer fine-grained soil

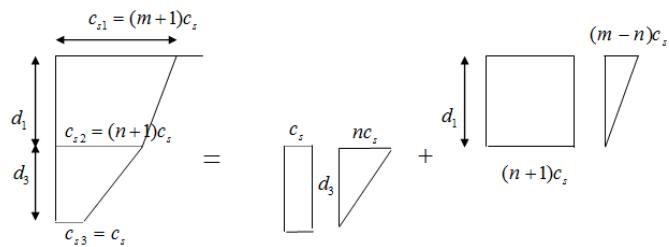
$\phi' = 20$									
c1/c2	d1/B = 0	d1/B = 0.25	d1/B = 0.5	d1/B = 0.75	d1/B = 1	d1/B = 1.25	d1/B = 1.5	d1/B = 1.75	d1/B = 2
0.00	24.30	23.12	21.77	21.30	20.31	18.82	17.39	16.18	16.18
0.20	24.30	23.36	22.28	21.90	21.11	19.91	18.77	17.81	17.81
0.40	24.30	23.59	22.78	22.50	21.91	21.01	20.15	19.43	19.43
0.60	24.30	23.83	23.29	23.10	22.71	22.11	21.54	21.05	21.05
0.80	24.30	24.06	23.79	23.70	23.50	23.20	22.92	22.68	22.68
1.00	24.30	24.30	24.30	24.30	24.30	24.30	24.30	24.30	24.30
1.20	24.30	24.54	24.80	24.90	25.10	25.40	25.68	25.92	25.92
1.40	24.30	24.77	25.31	25.50	25.89	26.49	27.06	27.55	27.55
1.60	24.30	25.01	25.82	26.10	26.69	27.59	28.45	29.17	29.17
1.80	24.30	25.24	26.32	26.70	27.49	28.68	29.83	30.79	30.79
2.00	24.30	25.48	26.83	27.30	28.29	29.78	31.21	32.42	32.42
2.20	24.30	25.72	27.33	27.90	29.08	30.88	32.59	34.04	34.04
2.40	24.30	25.95	27.84	28.51	29.88	31.97	33.97	35.66	35.66
2.60	24.30	26.19	28.34	29.11	30.68	33.07	35.36	37.29	37.29
2.80	24.30	26.42	28.85	29.71	31.47	34.16	36.74	38.91	38.91
3.00	24.30	26.66	29.35	30.31	32.27	35.26	38.12	40.54	40.54
6.00	24.30	30.20	36.94	39.32	44.23	51.70	58.85	64.89	64.89
8.00	24.30	32.56	41.99	45.33	52.20	62.67	72.67	81.13	81.13

Dr. Hasan Ghasemzadeh

65 48

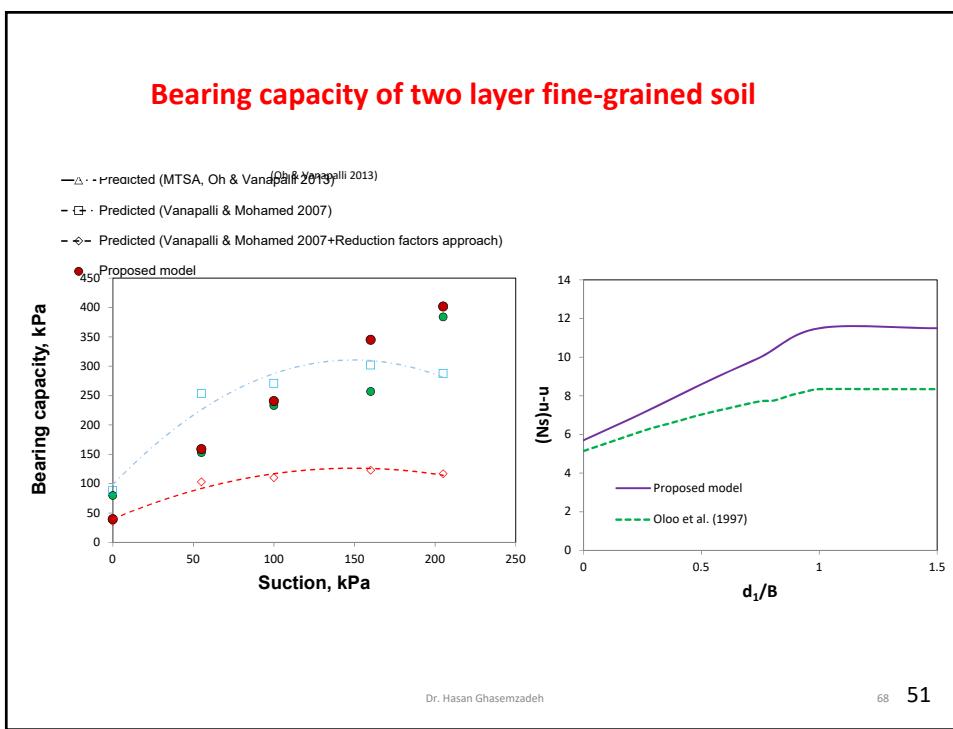
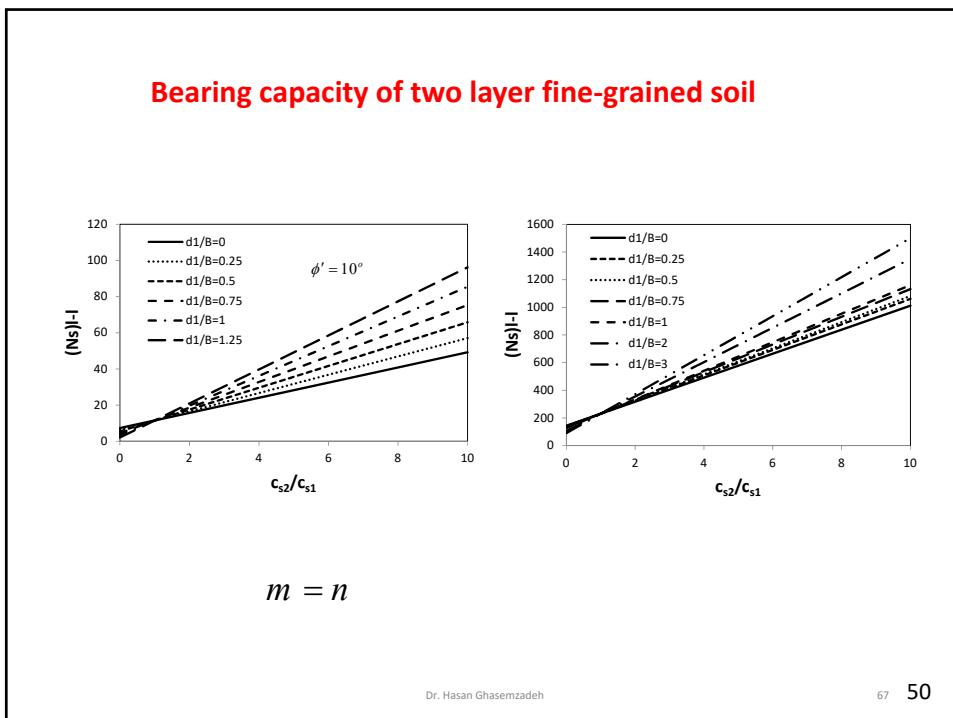
Bearing capacity of two layer fine-grained soil

$$q_u = s_b N_s (\tan \phi' - \tan \phi^b) + s N_s \tan \phi^b + q_{sat} \quad , \quad N_s = (N_s)_{l-l}$$

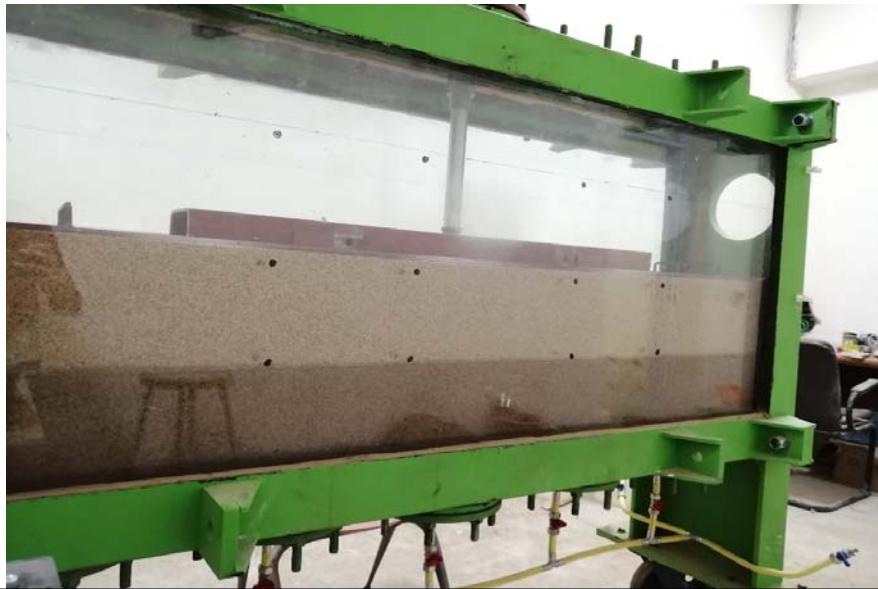


Dr. Hasan Ghasemzadeh

66 49



❖ مشخصات فنی دستگاه ظرفیت باربری غیراشباع

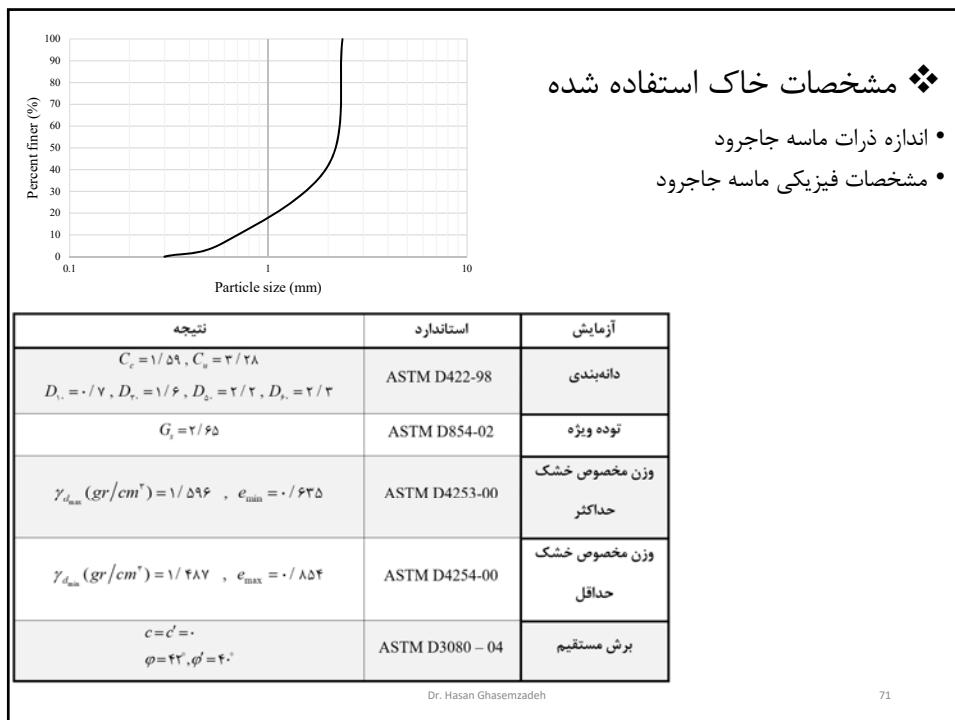


❖ مشخصات فنی دستگاه ظرفیت باربری غیراشباع



- تجهیزات مربوط به آب و هوا
- سنسورهای اندازه گیری نیرو و جابجایی
- جک بارگذاری و سیستم ثبت داده ها

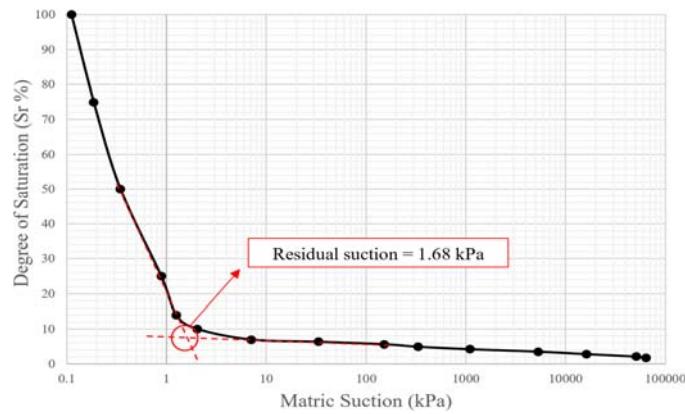




❖ بررسی نتایج آزمایش های انجام شده

- آزمایش فیلتر کاغذی

SWCC

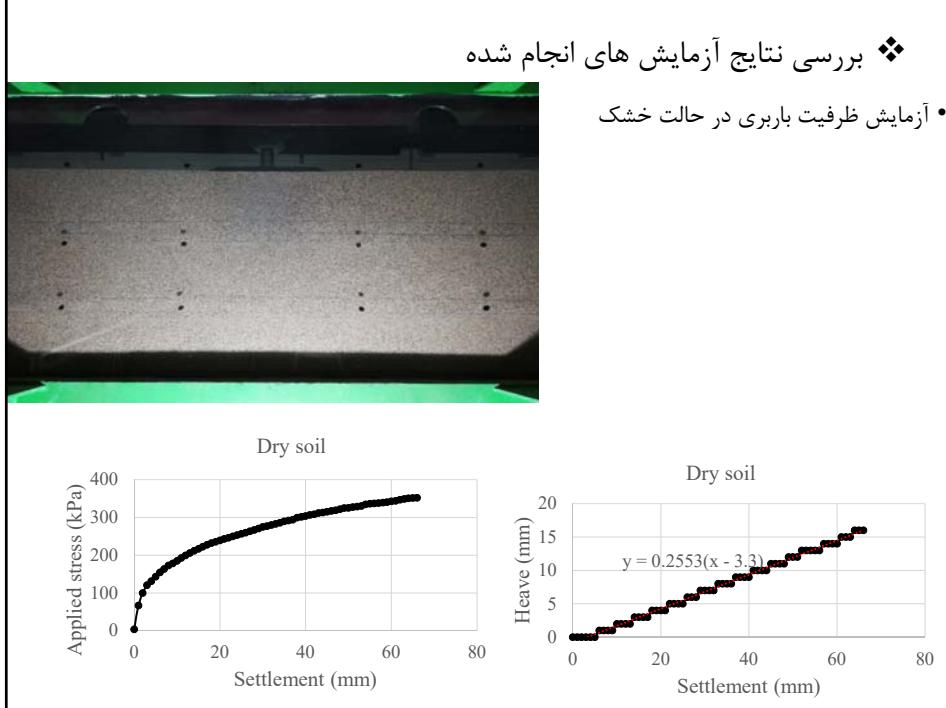


Dr. Hasan Ghasemzadeh

73

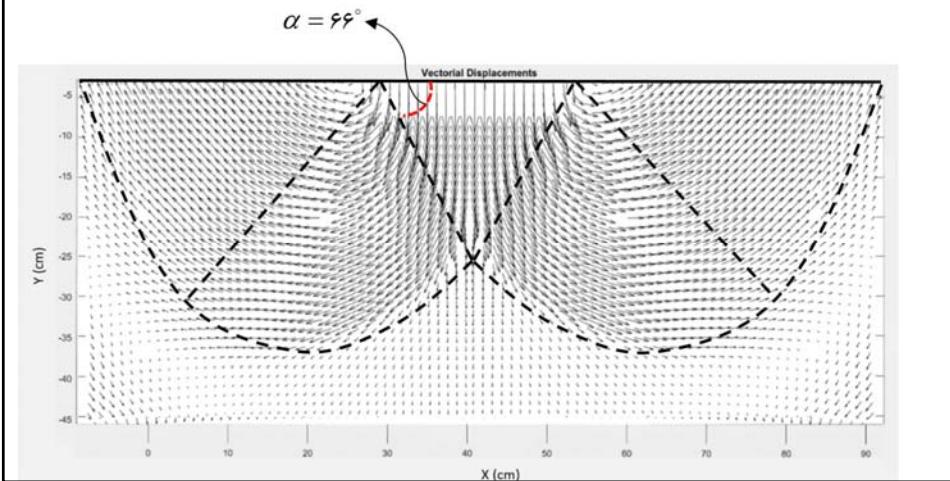
❖ بررسی نتایج آزمایش های انجام شده

- آزمایش ظرفیت باربری در حالت خشک

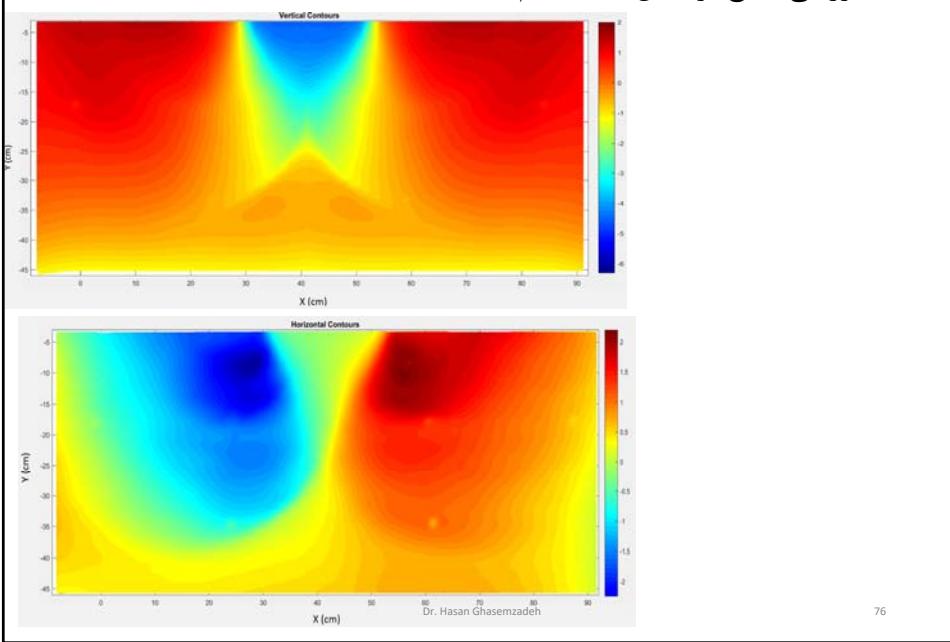


❖ بررسی نتایج آزمایش های انجام شده

- آزمایش ظرفیت باربری در حالت خشک

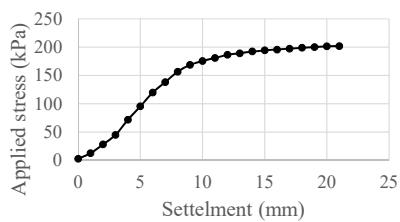


❖ بررسی نتایج آزمایش های انجام شده

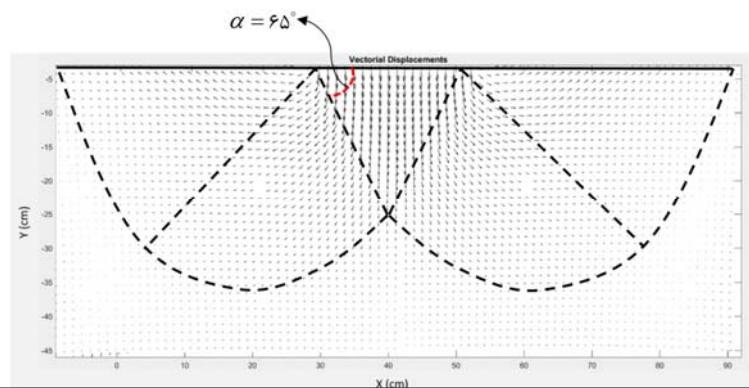


❖ بررسی نتایج آزمایش های انجام شده

Saturated soil ($S_r=100\%$)



- آزمایش ظرفیت باربری در حالت اشباع

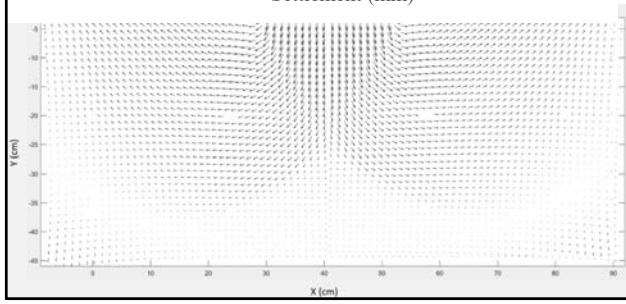
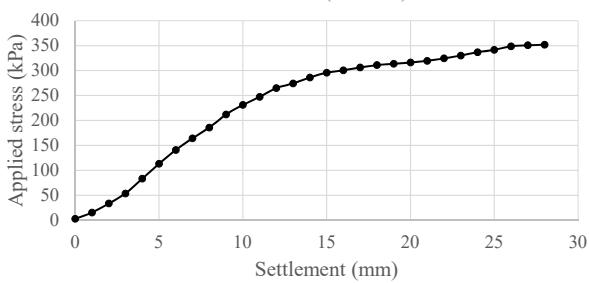


77

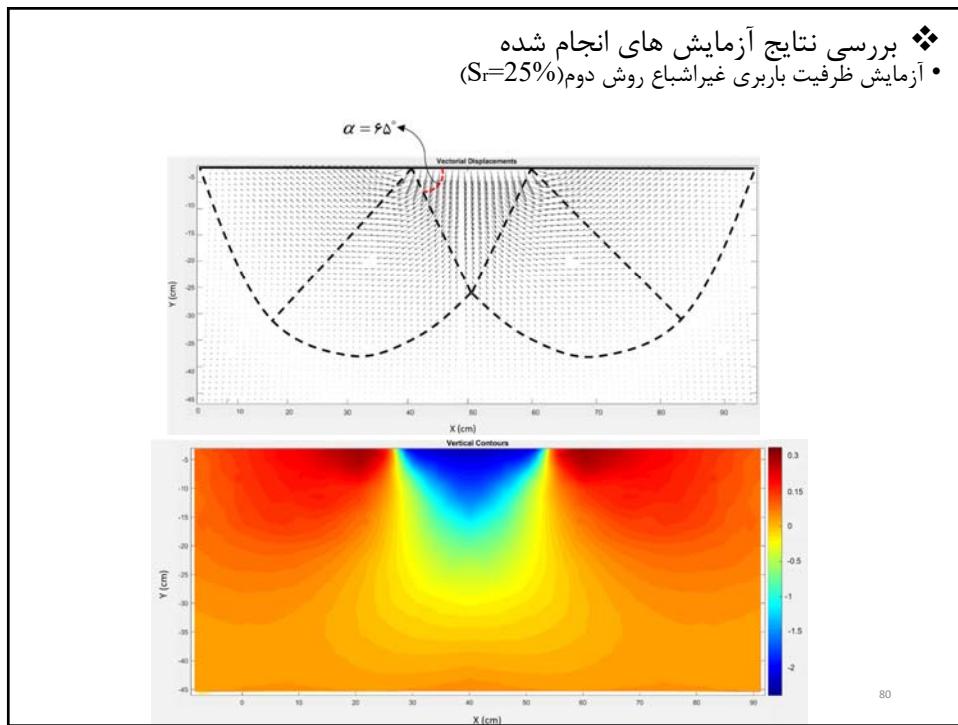
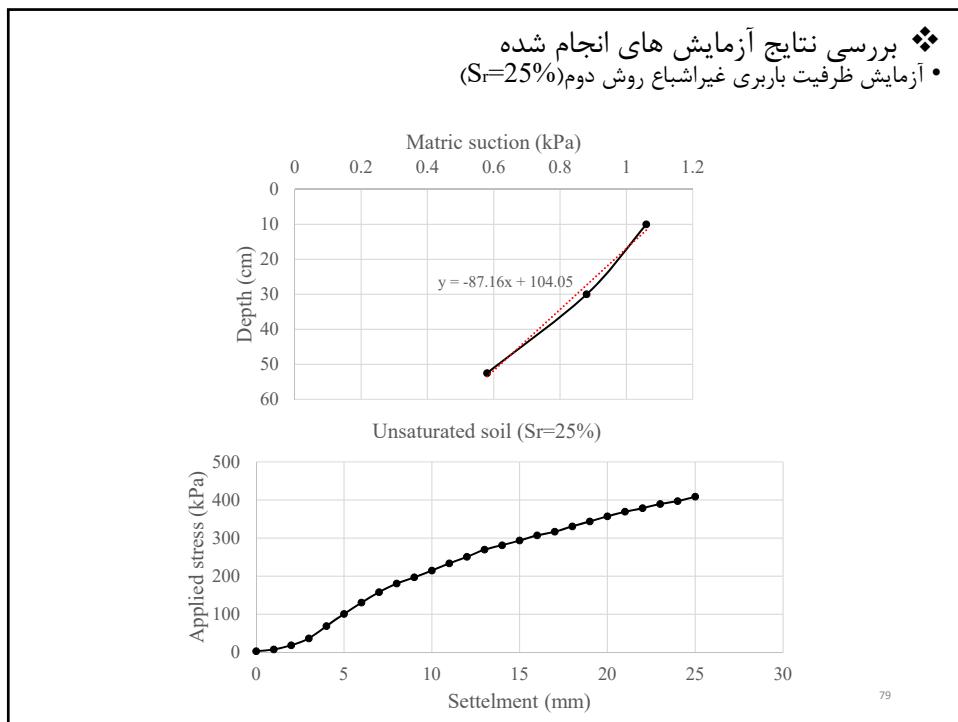
❖ بررسی نتایج آزمایش های انجام شده

• آزمایش ظرفیت باربری غیراشباع روش اول ($S_r=50\%$)

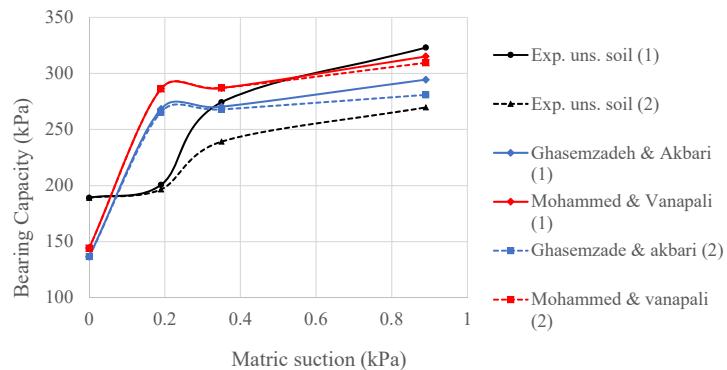
Unsaturated soil ($S_r=50\%$)



78



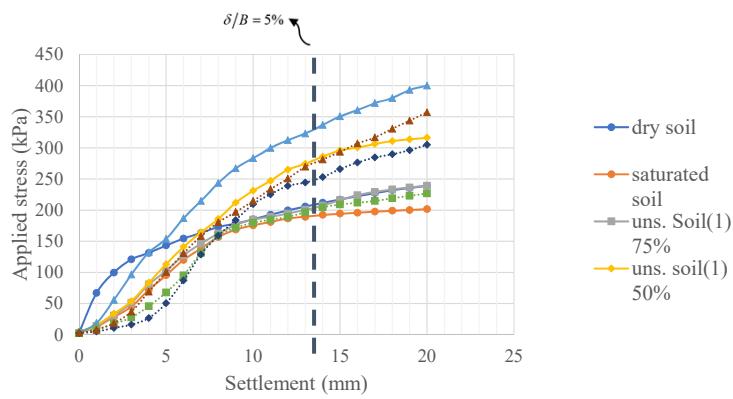
❖ جمع بندی نتایج آزمایش های انجام شده



Dr. Hasan Ghasemzadeh

81

❖ جمع بندی نتایج آزمایش های انجام شده



Dr. Hasan Ghasemzadeh

82

❖ مقایسه نتایج

- افزایش ظرفیت باربری ماسه جاگرود با کاهش درجه اشباع (افزایش مکش)

روش اول

$$\begin{cases} Sr = 75\% \Rightarrow \frac{B.C_{Sr=75\%}}{B.C_{Dry}} = 0.98, \quad \frac{B.C_{Sr=75\%}}{B.C_{Sat.}} = 1.06 \\ Sr = 50\% \Rightarrow \frac{B.C_{Sr=50\%}}{B.C_{Dry}} = 1.31, \quad \frac{B.C_{Sr=50\%}}{B.C_{Sat.}} = 1.43 \\ Sr = 25\% \Rightarrow \frac{B.C_{Sr=25\%}}{B.C_{Dry}} = 1.57, \quad \frac{B.C_{Sr=25\%}}{B.C_{Sat.}} = 1.68 \end{cases}$$

15/22

Dr. Hasan Ghasemzadeh

83

❖ مقایسه نتایج

- افزایش ظرفیت باربری ماسه جاگرود با کاهش درجه اشباع (افزایش مکش)

روش دوم

$$\begin{cases} Sr = 75\% \Rightarrow \frac{B.C_{Sr=75\%}}{B.C_{Dry}} = 0.95, \quad \frac{B.C_{Sr=75\%}}{B.C_{Sat.}} = 1.03 \\ Sr = 50\% \Rightarrow \frac{B.C_{Sr=50\%}}{B.C_{Dry}} = 1.19, \quad \frac{B.C_{Sr=50\%}}{B.C_{Sat.}} = 1.28 \\ Sr = 25\% \Rightarrow \frac{B.C_{Sr=25\%}}{B.C_{Dry}} = 1.29, \quad \frac{B.C_{Sr=25\%}}{B.C_{Sat.}} = 1.38 \end{cases}$$

16/22

Dr. Hasan Ghasemzadeh

84

❖ نتیجه گیری ❖

- تفاوت نتایج روش های اول و دوم و سازگاری با شرایط خاک موجود در طبیعت
- مکانیزم گسیختگی برشی تشکیل شده برای نمونه های آزمایش شده
- زاویه گوه فعال خاک در نمونه های غیراشباع

$$(\alpha = \frac{\pi}{6} + \frac{7}{8}\varphi' = 65^\circ)$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

85

مراجع

Ghasemzadeh, H. and F. Akbari, Determining the bearing capacity factor due to non-linear matric suction distribution in the soil. Canadian Journal of Soil Science, 2019(ja). doi.org/10.1139/CJSS-2019-0071

Ghasemzadeh, H. and F. Akbari, Investigation of Soil Active Wedge Angle with Linear Matric Suction Distribution Below the Footing. International Journal of Civil Engineering, 2020: p. 1-8. doi.org/10.1007/s40999-019-00426-1

Dr. Hasan Ghasemzadeh

86