جزوه کامل

مهندسی پی

استاد شیخی نژاد

تنظیم و انتشار :

سید علی ضیایی

روح ا...افشارپور

مهندسی عمران دانشگاه آزاد آبادان

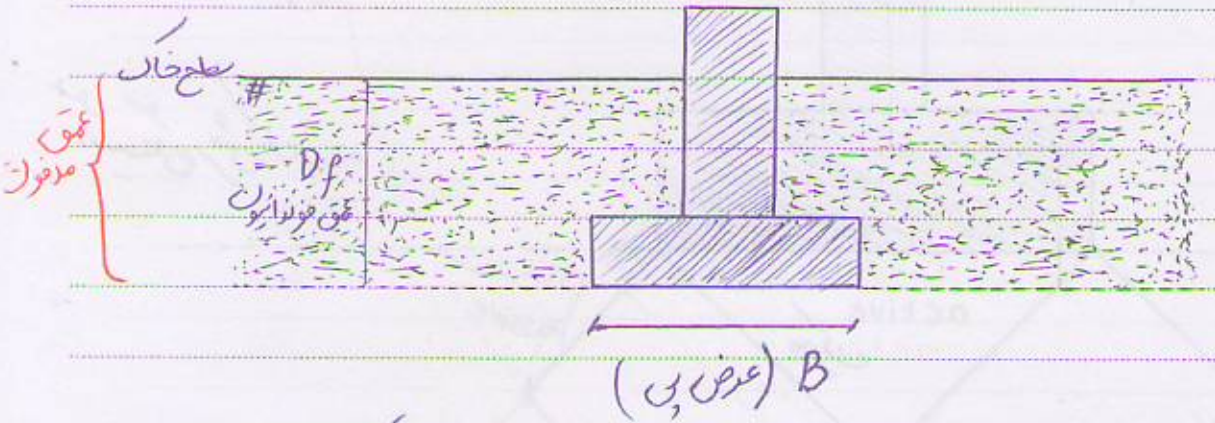
WWW.ABADANOMRAN.COM

WWW.ABADANCIVIL.IR

«مهندسی پی»

منبع: اصول مهندسی ژئوتکنیک (جلد دوم) مهندسی پی — نویسنده: شاپور طاحونی

انواع پی ها (شالوده ها): ۱_ سطحی ۲_ نیمه عمیق ۳_ عمیق

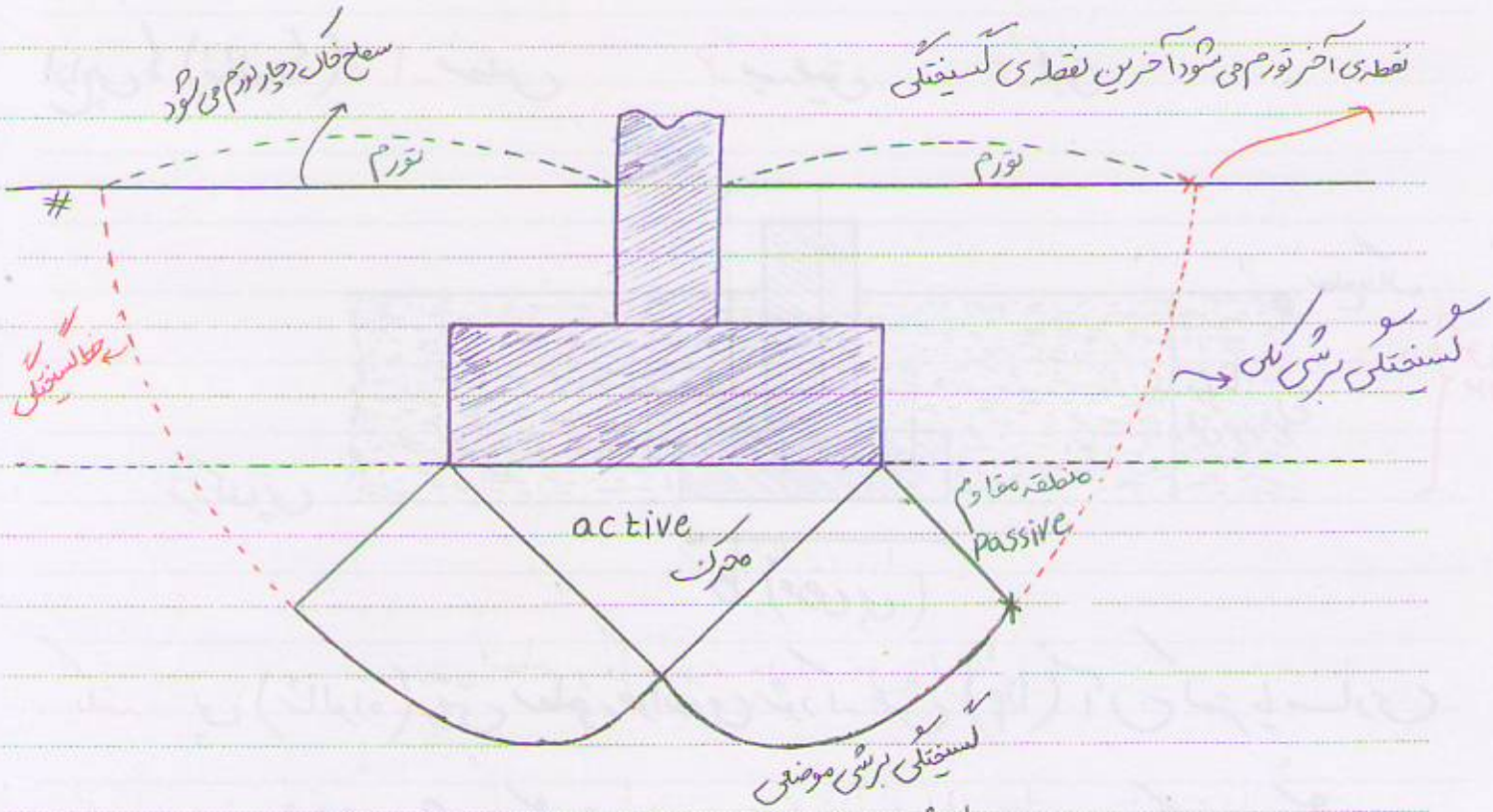


نکته: پی (شالوده) وقتی سطحی خوانده می شود که عمق (Df) آن کمتر یا مساوی عرض پی (B) باشد. اگر بیشتر از عرض پی (B) در سطح زیر خاک قرار گیرد پی نیمه عمیق و اگر در ارتفاع زیاد در زیر زمین قرار گیرد پی عمیق می باشد (مانند شمع ها)

نکته: یک شالوده ی سطحی زمانی دارای عملکرد صحیح است که اولاً در خاک زیر پی گسیختگی برشی به وجود نیاید و ثانیاً نشست های پی بیشتر از مقدار مجاز نباشد و نیت ها یکنواخت باشد.

ظرفیت باربری پی های سطحی :

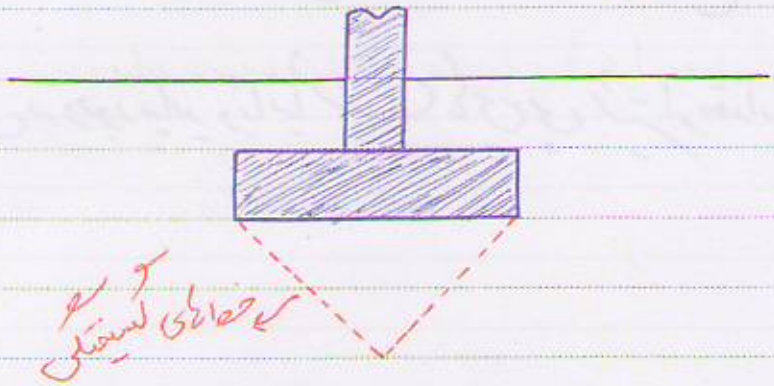
اولین کسی که در مورد ظرفیت باربری پی های سطحی تحقیقاتی انجام داد شخصی به نام ترزاقی بود.



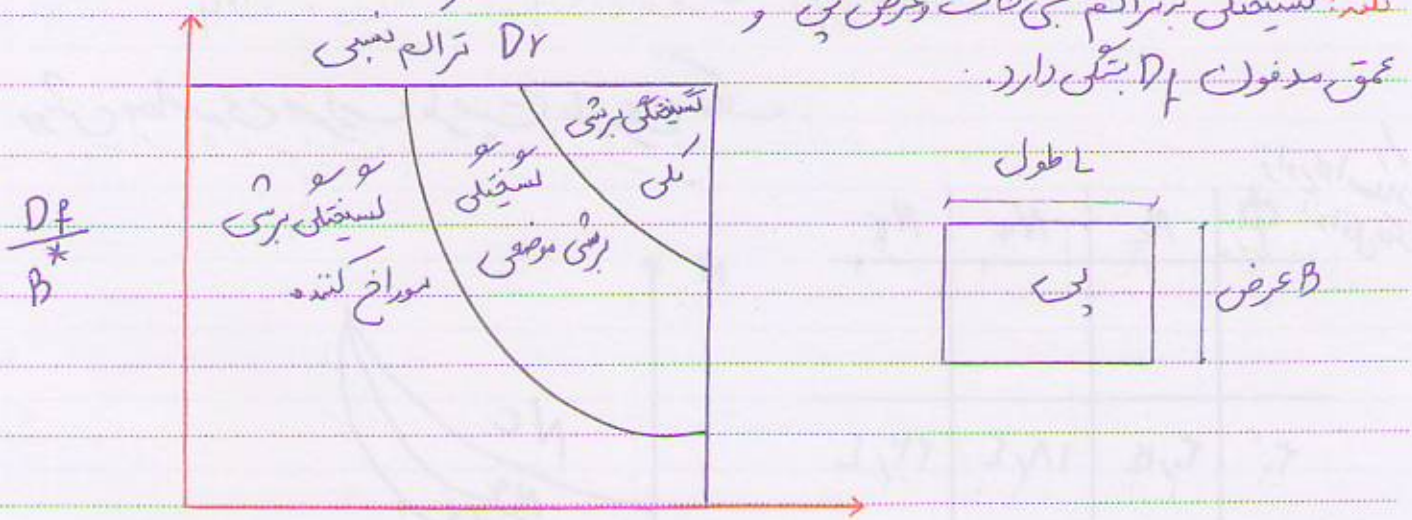
Local shear failure

اگر گسیختگی به سطح خاک برسد می شود گسیختگی برشی کلی General shear failure

نوع سوم گسیختگی، گسیختگی سوراخ کننده یا پانچ می باشد که در این حالت سطح گسیختگی مانند شکل زیر است.



نکته: گسیختگی برشی خاک و عرض پی B و تراکم نسبی Dr و عمق مدفون Df بستگی دارد.



$$B^* = \frac{2BL}{B+L}$$

عرض شالوده — طول شالوده

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

تخلخل خاک وقتی مقدارش max باشد — تخلخل خاک موجود — تراکم نسبی — تخلخل خاک وقتی مقدارش min باشد.

نکته: L همواره از B بزرگتر است.

با استفاده از اصول تعادل، ترزاقی ظرفیت باربری نهایی را به صورت زیر پیشنهاد کرد:

برای پی نواری (شالوده‌ی نواری):

$$q_u = c N_c + q N_q + \frac{1}{2} B \gamma N_\gamma$$

حداکثر ظرفیت باربری پی

c: چسبندگی خاک $\left(\frac{kN}{m^2}\right)$ جزء مشخصات اولیه خاک موجود

q: سربار $\left(\frac{kN}{m^2}\right)$ — $q = \gamma \times Df$ — وزن مخصوص خاک $\left(\frac{kN}{m^3}\right)$ — عمق مدفون

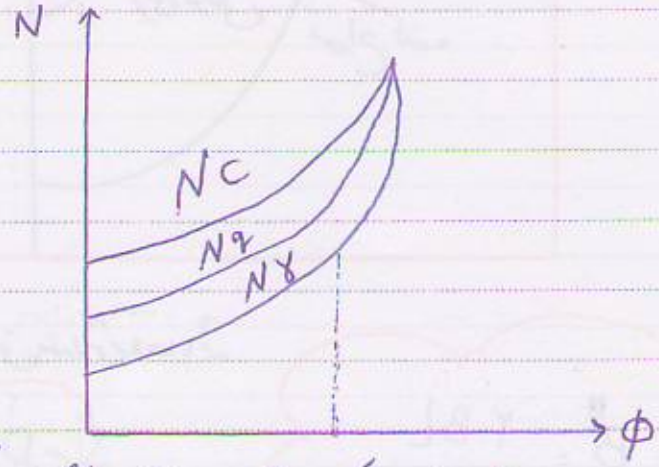
B: عرض پی (m)

N_c ، N_q ، N_γ : ضرایب ظرفیت باربری خاک

روش محاسبه‌ی ضرایب ظرفیت باربری خاک :

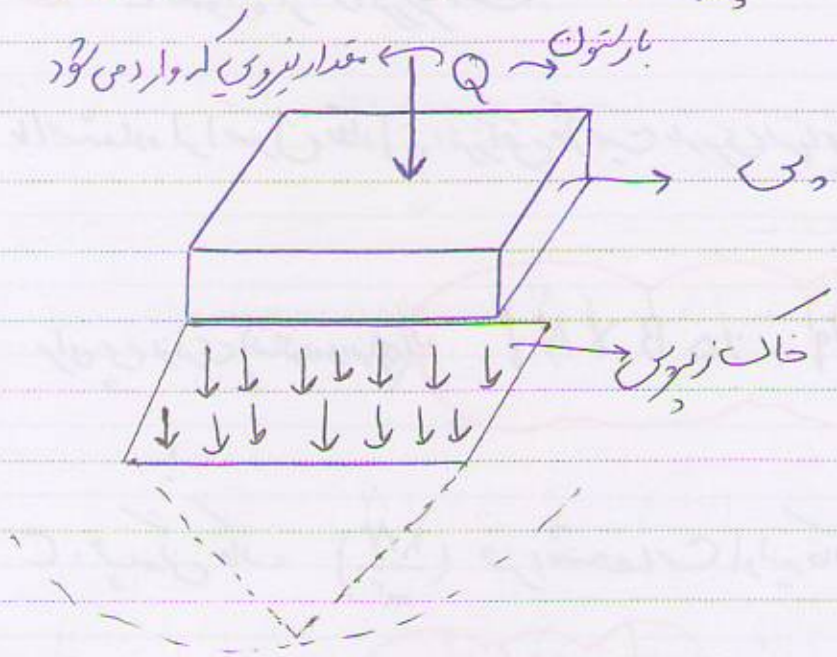
زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ϕ	N_c	N_q	N_γ
۰			
۳۰	۳۰/۱۴	۱۸/۴	۲۲/۴
۵۰			

روش اول



روش دوم } براساس زاویه ϕ بر روی هر یک از گراف‌ها ضریب مورد نظر یافت می‌شود.

q_u : تنش : حداکثر تنشی که بر خاک زیر پی می‌توان وارد کرد تا در آن گسیختگی ایجاد نشود.



$$q_{all} = \frac{q_u}{F.S}$$

ظرفیت باربری مجاز ← q_{all}

q_u ← حداکثر ظرفیت باربری

F.S ← ضریب اطمینان

F.S = ۲-۴

$Q_u = q_u \times A$ ← بار گسیختگی ستون

$Q_{all} = q_{all} \times A$ ← بار مجاز ستون

A ← مساحت پی در روی خاک

گسیختگی برشی کلی - نواری

$$q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}B\gamma N_\gamma$$

گسیختگی برشی کلی - مربعی

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4B\gamma N_\gamma$$

گسیختگی برشی کلی - دایره‌ای

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.3B\gamma N_\gamma$$

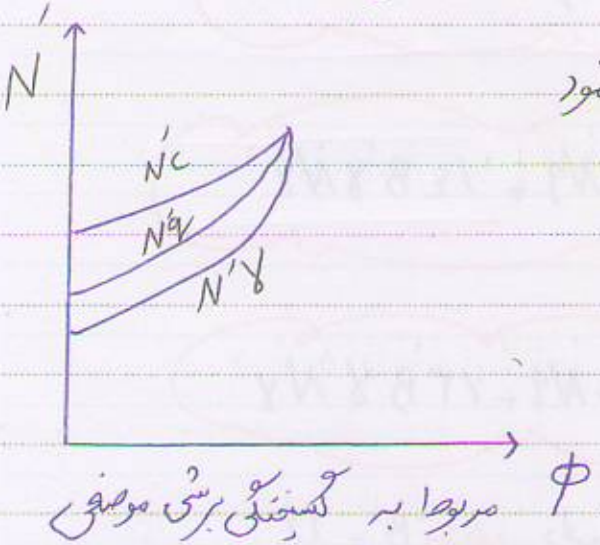
B = D قطر دایره: دایره‌ای

گسیختگی برشی موضعی - نواری $q_u = \frac{2}{3} c N'_c + q N'_q + 0.5 B \gamma N'_\gamma$

گسیختگی برشی موضعی - مربعی $q_u = 1.67 c N'_c + q N'_q + 0.4 B \gamma N'_\gamma$

گسیختگی برشی موضعی - دایره‌ای $q_u = 1.67 c N'_c + q N'_q + 0.3 B \gamma N'_\gamma$

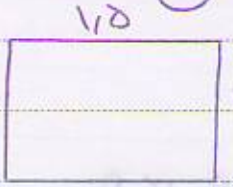
N'_c ، N'_q ، N'_γ : ضرایب ظرفیت باربری اصلاح شده می باشند و آن ها را می توان از روابط یا نمودارهای N_c ، N_q ، N_γ با جایگزین کردن $\phi' = \tan^{-1}\left(\frac{2}{3}\tan\phi\right)$ محاسبه نمود



مربوط به گسیختگی برشی موضعی

مثال) ابعاد یک شالوده‌ی مربع در پلان $1.5 \times 1.5 m$ می باشد. خاکی که شالوده بر روی آن قرار دارد دارای $\phi = 20^\circ$ ، $c = 15.2 \frac{kN}{m^2}$ وزن مخصوص خاک $\gamma = 17.8 \frac{kN}{m^3}$ می باشد، با استفاده از ضریب اطمینان $F.S = 4$ باربری مجاز شالوده

را تعیین کنید؟ عمق شالوده 1m و فرض کنید گسیختگی برشی کلی در خاک رخ دهد.



$\phi = 20^\circ \xrightarrow{\text{گراف}}$ $N_c = 17/7$, $N_q = 7/4$, $N_\gamma = 5$

گسیختگی برشی کلی - مربعی $q_u = 1/3 c N_c + q N_q + 0/4 B \gamma N_\gamma$

سربار $q = \gamma D_f = 17/8 \times 1 = 17/8 \ \frac{kN}{m^2}$

حداکثر $q_u = (1/3 \times 15/2 \times 17/7) + (17/8 \times 7/4) + (0/4 \times 1/5 \times 17/8 \times 5) =$

$q_u = 534/872$

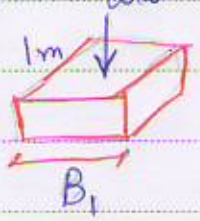
$q_{all} = \frac{q_u}{F.S} = \frac{534/872}{4} = 133/71$

$Q_{all} = q_{all} \times A = 133/71 \times (1/5)^2 = 300 \ kN$

مثال) برای یک پی نواری که بر روی خاکی با مشخصات مثال قبل قرار دارد عرض پی را طوری طراحی کنید که این پی نواری قابلیت انتقال 500 kN بار را برای واحد طول آن داشته باشد.

گسیختگی برشی کلی - نواری $q_u = c N_c + q N_q + 0/5 B \gamma N_\gamma$

$q = \gamma D_f = 17/8 \times 1 = 17/8 \ \frac{kN}{m^2}$



$$q_u = (15/2 \times 17/7) + (17/8 \times 7/4) + (70B \times 17/8 \times 2)$$

$$q_u = 400/74 + 44/20B$$

$$q_{all} = \frac{q_u}{F.S} = \frac{400/74 + 44/20B}{4} = 100/19 + 11/12B$$

$$Q_{all} = q_{all} \times A = (100/19 + 11/12B) \times B \times 1 \Rightarrow 500 = 100/19B + 11/12B^2$$

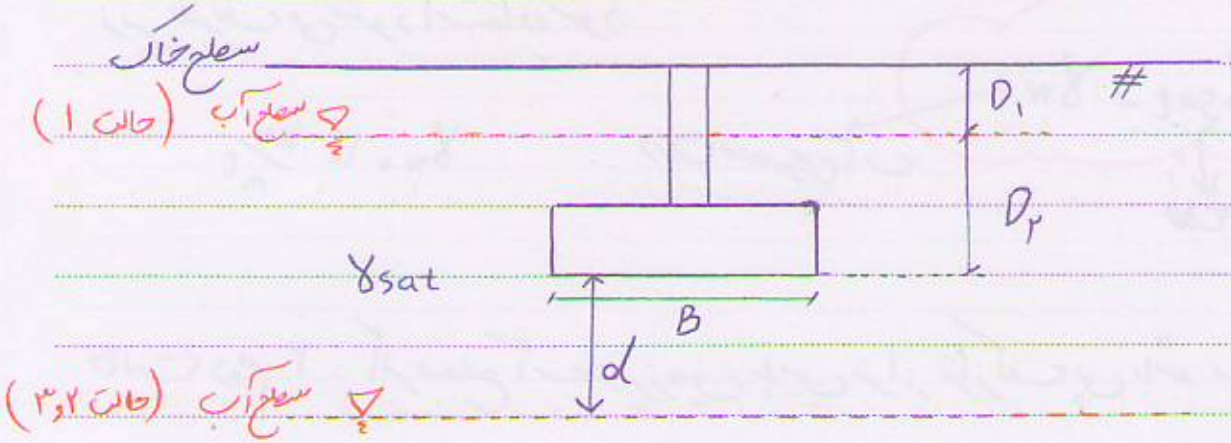
$$11/12B^2 + 100/19B - 500 = 0$$

$$\Delta = b^2 - 4ac = (100/19)^2 - 4(11/12)(-500) \Rightarrow \Delta = 34240$$

$$B = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} = \frac{(-100/19) \pm 179/5}{22/24} = \frac{79/31}{22/24} = 3/54$$

$$\boxed{B = 3/59\ m}$$

اصلاح رابطه‌ی ظرفیت باربری در صورت وجود سفره‌ی آب زیرزمینی:



رابطه‌ی ظرفیت باربری که ارائه شد برای حالتی بود که سطح آب زیرزمینی به میزان قابل توجهی از تراز کف پی فاصله داشته باشد. اگر سطح آب زیرزمینی به شالوده نزدیک باشد، لازم است اصلاحاتی در رابطه‌ی ظرفیت باربری پی انجام شود. و سه حالت پیش خواهد آمد:

حالت اول 1: در این حالت سطح آب زیرزمینی بین سطح خاک و تراز کف پی قرار دارد. یعنی $0 \leq D_1 \leq D_f$ و لازم است اصلاحات زیر صورت گیرد:

۱- به جای استفاده از q (سربار) باید از رابطه‌ی زیر برای محاسبه‌ی q استفاده شود:

$$q = \gamma D_1 + D_2 (\gamma_{sat} - \gamma_w)$$

$\gamma_{sat} - \gamma_w$: وزن مخصوص اشباع

γ_w: وزن مخصوص آب

۲- در جمله‌ی سوم رابطه‌ی ظرفیت باربری به جای وزن مخصوص γ از γ' که با فرمول زیر تعریف می‌شود استفاده شود.

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

γ_{sat}: وزن مخصوص اشباع خاک

γ_w: وزن مخصوص آب $\quad \gamma_w = 10 \frac{kN}{m^3}$

حالت دوم ۲: اگر سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز کف پی باشد به طوری که $0 \leq d \leq B$ باشد در این حالت تنها یک تغییر در جمله‌ی سوم رابطه‌ی ظرفیت باربری لازم است و باید مقدار γ با مقدار $\bar{\gamma}$ که طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود جایگزین شود. و مقدار q نیز از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

d: فاصله‌ی کف پی تا تراز آب — B: عرض پی

$$\bar{\gamma} = \gamma' + \frac{d}{B}(\gamma_{sat} - \gamma_w)$$

($\gamma_{sat} - \gamma_w$)

$$q = \gamma D_f$$

حالت سوم ۳: در این حالت سطح آب زیرزمینی در ترازی قرار دارد که $d > B$ در این حالت نیازی به تغییر در روابط نیست و سطح آب زیرزمینی تأثیری بر ظرفیت باربری نخواهد داشت.

اشکالات رابطه‌ی ترزاقی (محدودیت‌ها):

۱- به‌علت حذف خاک بالای تراز کف پی و جایگزین کردن یک سربار به شدت (γD_f) باعث شده تا حدی از دقت رابطه‌ی ترزاقی کاسته شود. که این امر باعث افزایش ضریب اطمینان در نتایج شده است ولی با این وجود امروزه استفاده‌ی زیادی از این رابطه می‌شود.

۲- رابطه‌ی ترزاقی تنها زمانی صحیح است که بار به صورت قائم به پی وارد شود، در صورتی که بار وارده با راستای قائم دارای زاویه باشد، دیگر نمی‌توان از رابطه‌ی ترزاقی استفاده کرد.

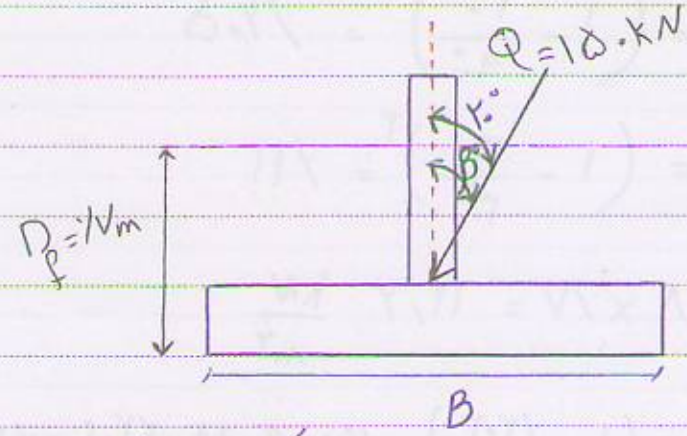
۳- رابطه‌ی ترزاقی تنها برای پی‌های مربعی، دایره و نواری ارائه شده است در صورتی که اغلب پی‌ها مستطیلی هستند.

بنابر مطالب گفته شده لازم بود رابطه‌ی ترزاقی اصلاح شود که بعد از ترزاقی سایر محققین روی این محدودیت‌ها کار کردند و رابطه‌ی عمومی ظرفیت باربری به شکل زیر ارائه شد:

مثال) شالوده پایی مربع یک ستون باید باری به مقدار ۱۵۰ kN را تحمل نماید، عمق شالوده ۱m است و بار وارده با محور قائم زاویه‌ی ۲۰° می‌سازد. مطلوب است تعیین بعد B؟

وضریب اطمینان را ۳ در نظر بگیرید. F.S=۳

C=۰
Φ=۳۰°
γ=۱۸ kN/m³



تذکر: چنانچه از رابطه‌ی عمومی ظرفیت باربری استفاده کنیم و هریک از سه مورد شکل، شیب بار، یا عمق مطابق با فرضیات ترزاقی باشند برای ضریب آن عدد ۱ استفاده می‌شود.

به عنوان مثال در این مسئله پی مربعی بنابراین ضرایب شکل را ۱ در نظر می‌گیریم

$$q_u = cN_c F_{ci} F_{cd} + qN_q F_{qi} F_{qd} + \frac{1}{2} B \gamma N_\gamma F_{\gamma i} F_{\gamma d}$$

از جدول با توجه به Φ برابر ۳۰°

- $N_c = ۳۰/۱۴$ (چون C=۰ پس کاری با Nc نداریم)
- $N_q = ۱۸/۴$
- $N_\gamma = ۲۲/۴$

$$F_{qd} = 1 + 2\tan\phi(1-\sin\phi)^2 \frac{D_f}{B}$$

$$F_{qd} = 1 + 2\tan 30^\circ (1-\sin 30^\circ)^2 \frac{1.7}{B} = 1 + \frac{0.202}{B}$$

$$F_{\gamma d} = 1$$ یعنی عمق روی γ تأثیری ندارد

$$F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ}\right)^2 = \left(1 - \frac{20^\circ}{90^\circ}\right)^2 = 0.605$$

$$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{\phi}\right)^2 = \left(1 - \frac{20^\circ}{30^\circ}\right)^2 = 0.11$$

$$q = \gamma D_f = 18 \times 1.7 = 12.6 \ \frac{kN}{m^2}$$

$$q_u = 12.6 \times 18.4 \times 0.605 \times \left(1 + \frac{0.202}{B}\right) + 0.5 \times B \times 18 \times 22.4 \times 0.11 \times 1$$

$$q_u = 140.2 + \frac{28.3}{B} + 22.17B \Rightarrow q_{all} = \frac{q_u}{F.S} = \frac{q_u}{3}$$

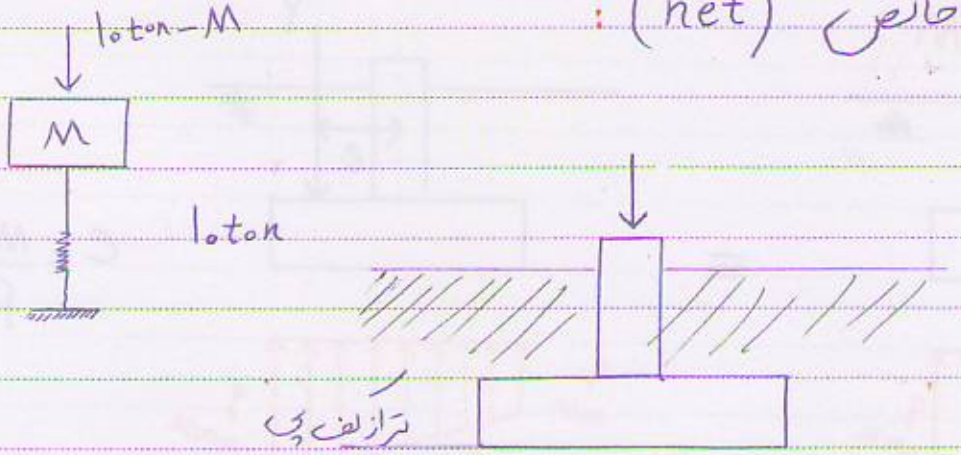
$$q_{all} = \frac{P}{A} = \frac{150}{B^2} \Rightarrow \frac{140.2}{3} + \frac{28.3}{3B} + \frac{22.17B}{3} = \frac{150}{B^2}$$

$$\frac{22.17B^3}{3} + \frac{28.3}{3}B + \frac{140.2}{3}B^2 = 150$$

$$\frac{140.2B^2}{3} + \frac{22.17B^3}{3} + \frac{28.3B}{3} = 150 \Rightarrow 7.39B^3 + 46.7B^2 + 9.4B = 150$$

$B \approx 1.53$ با آزمون و خطا

ظرفیت باربری خالص (net):



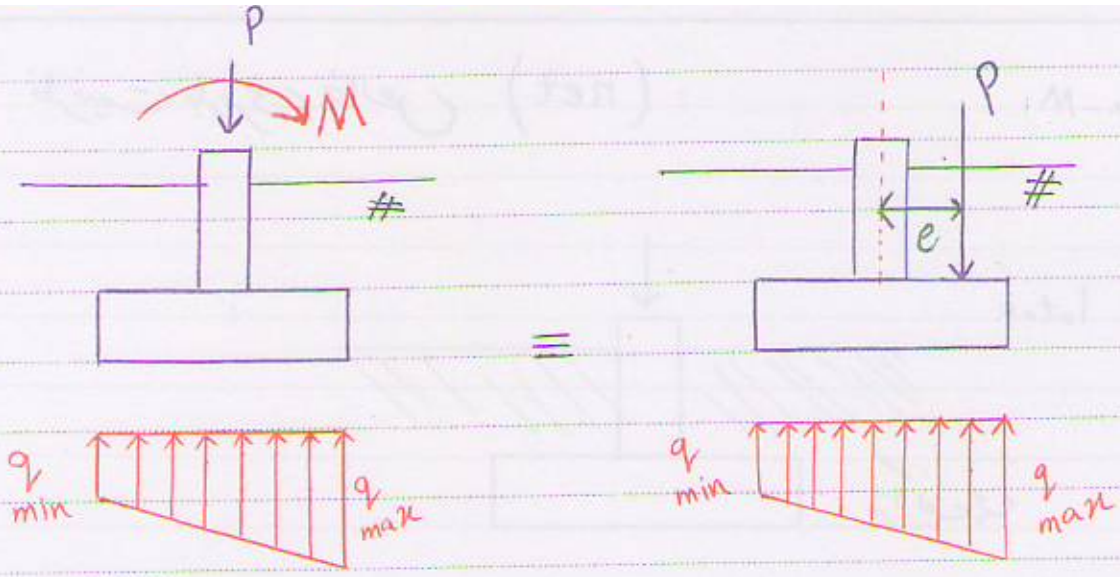
نکته: چون وزن مخصوص بتن به وزن مخصوص خاک نزدیک است از وزن دال بتنی صرف نظر می‌کنیم و فرض می‌کنیم همش خاک است.

$q_{net} = q_u - q$ ← وزن دال بتنی

$$q_{net} = q_u - q$$

ظرفیت باربری شالوده با بار برون محور:

در بسیاری از حالات عملی، شالوده علاوه بر انتقال بار قائم، لنگر (M) را نیز انتقال می‌دهد. در این حالت توزیع فشار خاک زیر شالوده به صورت یکنواخت نیست و آنرا با استفاده از روابط مقاومت مصالح می‌توان بدست آورد.



$e = \frac{M}{P}$

P: بار وارده
M: لنگر
B: عرض پی
L: طول پی

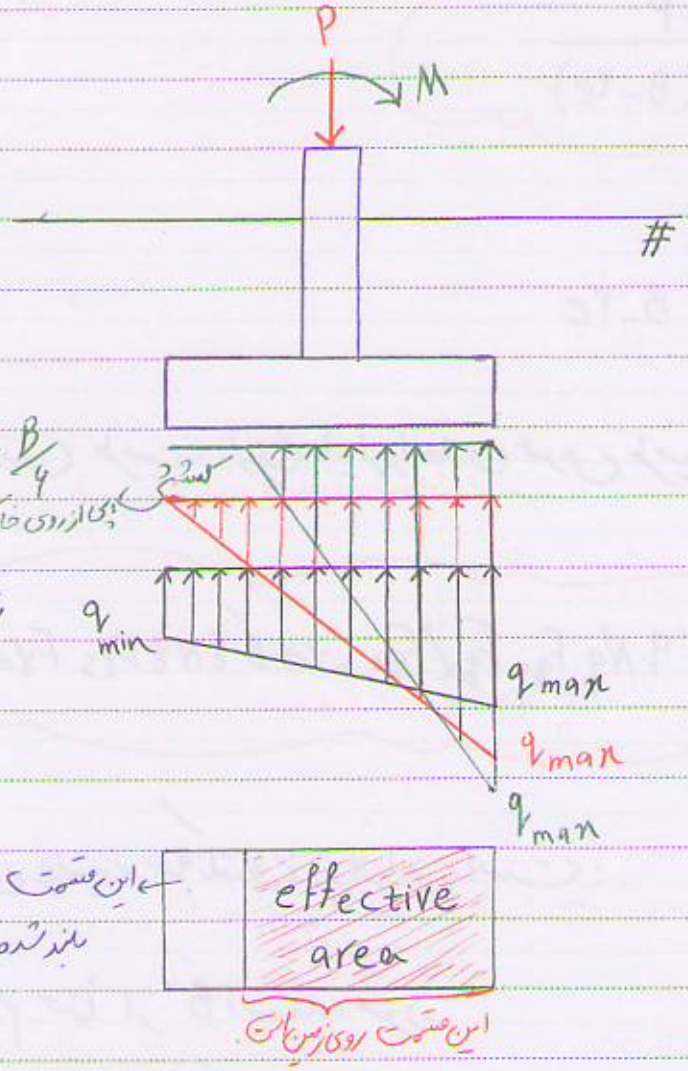
$$\Sigma F_y = 0 \quad \Sigma M_o = 0 \Rightarrow \begin{cases} q_{max} = \frac{P}{BL} + \frac{6M}{B^2L} \\ q_{min} = \frac{P}{BL} - \frac{6M}{B^2L} \end{cases}$$

$$e = \frac{M}{P} \Rightarrow M = eP$$

$$q_{max} = \frac{P}{BL}\left(1 + \frac{6e}{B}\right) \quad \text{(الف}$$

$$q_{min} = \frac{P}{BL}\left(1 - \frac{6e}{B}\right) \quad \text{(ب}$$

برای محاسبه ی ظرفیت باربری پی های دارای خروج از مرکزیت از روشی به نام روش مساحت مؤثر (effective area) که توسط مایرهوف پیشنهاد شده است استفاده می شود.



در معادلات الف و ب چنانچه مقدار خروج از مرکزیت (e) برابر با $\frac{B}{6}$ باشد $e=\frac{B}{6}$ باشد

سپس $q_{min}=0$ صفر می شود و چنانچه $e > \frac{B}{6}$ باشد، مقدار q_{min} (علامت تنش) منفی می شود که نشان دهنده ی ایجاد کشش در سطح تماس است و از آنجا که در سطح تماس خاک و پی امکان مقاومت کششی وجود ندارد، پی از خاک جدا می

رخ می دهد که اصطلاحاً به این منطقه، منطقه‌ی بدون فشار گفته می شود. در این حالت

با نوشتن روابط تعادل q_{max} به صورت زیر بدست می آید:

$$q_{max} = \frac{\varepsilon P}{3L(B-2e)}$$

طول مؤثر $\rightarrow L' = L$

عرض مؤثر $\rightarrow B' = B - 2e$

برای بدست آوردن ظرفیت باربری باید از رابطه‌ی عمومی ظرفیت باربری استفاده شود.

$$q'_{ult} = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \gamma B' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

در رابطه‌ی فوق رعایت سه نکته‌ی زیر الزامی است:

۱) در جمله‌ی سوم حتماً از B' استفاده شود.

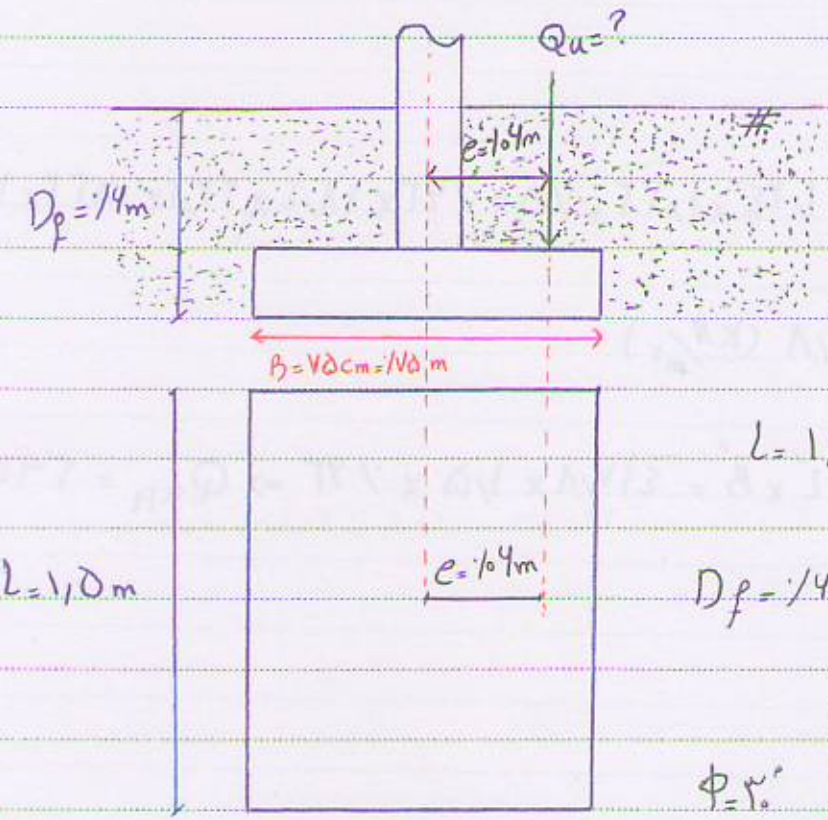
۲) برای محاسبه‌ی ضرایب شکل $(F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s})$ حتماً از طول و عرض مؤثر استفاده شود.

۳) برای محاسبه‌ی ضرایب عمق $(F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d})$ B را با B' جایگزین نکنید.

$$Q_{ult} = q'_u \times L' \times B'$$

نکته: برون محوری باعث کاهش ظرفیت باربری می‌شود، در چنین حالتی درصورتی که جهت (M) ثابت بماند ستون می‌تواند نسبت به شالوده طوری برون محوری داشته باشد تا برون محوری ستون، لنگر دیگر را خنثی نماید و توزیع تنش زیر پی به حالت یکنواخت درآید.

مثال) یک پی بر روی خاکی با مشخصات وزن مخصوص $\gamma = 18.4 \frac{kN}{m^3}$ ، $C = 0$ ، $\Phi = 30^\circ$ قرار دارد. حداکثر باری را که این شالوده می‌تواند تحمل کند با توجه به شکل زیر بدست آورید.



$\gamma = 18.4 \frac{kN}{m^3}$

$C = 0$ $\quad e = .04m$

$L = 1.5m$ $\quad B = .75m$

$D_f = .4m$ $\quad Q_u = ?$

$\Phi = 30^\circ$ $\begin{cases} N_c = 30.14 \\ N_q = 18.4 \\ N_\gamma = 22.4 \end{cases}$

حل)

$B = .75m$ $\begin{cases} B' = B - 2e = .75 - 2(.04) \Rightarrow B' = .67m \\ L = 1.5m \quad L' = 1.5m \end{cases}$

$$q'_{ult} = q N_q F_{qs} F_{qd} + \frac{1}{2} B' \gamma N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d}$$

$$q = \gamma D_f \Rightarrow q = 18.4 \times 1.4 \Rightarrow q = 110.4 \ \frac{kN}{m^2}$$

ضریب شکل $F_{qs} = 1 + \frac{B'}{L'} \tan\phi = 1 + \frac{1.43}{1.5} \times \tan 30^\circ \Rightarrow F_{qs} = 1.24$

ضریب عمق $F_{qd} = 1 + 2\tan\phi (1 - \sin\phi)^2 \times \frac{D_f}{B} = 1 + 2\tan 30^\circ (1 - \sin 30^\circ)^2 \times \left(\frac{1.4}{1.75}\right) \Rightarrow$

$$\Rightarrow F_{qd} = 1.22$$

ضریب شکل $F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B'}{L'} = 1 - 0.4 \left(\frac{1.43}{1.5}\right) \Rightarrow F_{\gamma s} = 0.832$

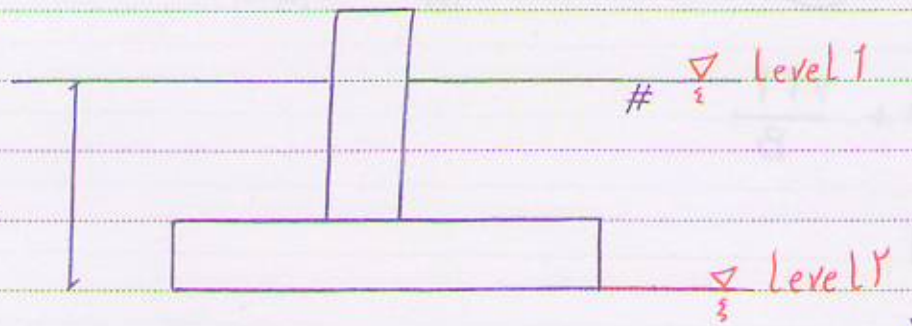
ضریب عمق $F_{\gamma d} = 1$

$$q'_{ult} = 110.4 \times 18.4 \times 1.24 \times 1.22 + 0.5 \times 1.43 \times 18.4 \times 22.4 \times 0.832 \times 1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow q'_{ult} = 4178 \ (kN/m^2)$$

$$Q_{ult} = q'_u \times L' \times B' = 4178 \times 1.5 \times 1.43 \Rightarrow Q_{ult} = 3948 \ kN/m^2$$

مثال) در صورتی که در اثر بارندگی سطح آب زیرزمینی از Level ۲ به Level ۱ صعود کند، ظرفیت باربری چند درصد افزایش یا کاهش می یابد؟



$C = ۲۰ \frac{kN}{m^۲}$

$\phi = ۲۵^\circ$

$\gamma = ۱۸ \frac{kN}{m^۳}$

$\gamma_{sat} = ۲۰ \frac{kN}{m^۳}$

$\gamma_w = ۱۰ \frac{kN}{m^۳}$

حل)

$\phi = ۲۵^\circ \begin{cases} N_c = ۲۰,۷۲ \\ N_q = ۱۰,۴۴ \\ N\gamma = ۱۰,۸۸ \end{cases}$

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{ci} F_{cd} + qN_q F_{qs} F_{qi} F_{qd} + \frac{1}{2} B \gamma' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma i} F_{\gamma d}$$

حالت اول) Level 1) $D_1 = ۰$, $D_۲ = D_f = 1m$

$$q = \gamma D_1 + D_۲ (\gamma_{sat} - \gamma_w) \Rightarrow q = ۱۸ \times ۰ + 1(۲۰ - ۱۰) \Rightarrow q = ۱۰ \frac{kN}{m^۲}$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = ۲۰ - ۱۰ \Rightarrow \gamma' = ۱۰ \frac{kN}{m^۳}$$

ضریب شکل $F_{cs} = 1 + \frac{B}{L} \times \frac{N_q}{N_c} = 1 + \frac{B}{L} \times \frac{۱۰,۴۴}{۲۰,۷۲} \Rightarrow F_{cs} = \left(1 + \frac{۰,۵۱ B}{L}\right)$

ضریب شکل $F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan\phi = 1 + \frac{B}{L} \times \tan ۲۵^\circ \Rightarrow F_{qs} = \left(1 + \frac{۰,۴۶ B}{L}\right)$

ضریب شکل $F\gamma_s = \left(1 - 0.4 \frac{B}{L}\right)$

ضریب عمق $Fcd = 1 + 0.4 \frac{Df}{B} \Rightarrow Fcd = \left(1 + \frac{0.4}{B}\right)$ ← فرض می‌کنیم $\frac{Df}{B} \leq 1$

ضریب عمق $Fqd = 1 + 2\tan\Phi (1 - \sin\Phi)^2 \times \frac{Df}{B} = 1 + 2\tan 25^\circ (1 - \sin 25^\circ)^2 \times \frac{1}{B}$

$$Fqd = 1 + \frac{0.31}{B}$$

$$F\gamma d = 1$$

$$q_u = C N_c F_{cs} F_{cd} + q N_q F_{qs} F_{qd} + 0.5 B \gamma' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d}$$

$$q_u = 20 \times 20.72 \times \left(1 + 0.51 \frac{B}{L}\right)\left(1 + \frac{0.4}{B}\right) + 10 \times 10.44 \times \left(1 + 0.4 \frac{B}{L}\right)\left(1 + \frac{0.31}{B}\right) +$$

$$+ 0.5 B \times 10 \times 10.88 \times \left(1 - 0.4 \frac{B}{L}\right) \times 1 \Rightarrow$$

$$q_u = 414.4 \times \left(1 + 0.51 \frac{B}{L}\right)\left(1 + \frac{0.4}{B}\right) + 104.4 \times \left(1 + 0.4 \frac{B}{L}\right)\left(1 + \frac{0.31}{B}\right) +$$

$$+ 54.4 B \times \left(1 - 0.4 \frac{B}{L}\right) \Rightarrow$$

$$q_u = \left(414.4 + 211.3 \frac{B}{L}\right)\left(1 + \frac{0.4}{B}\right) + \left(104.4 + 43.03 \frac{B}{L}\right)\left(1 + \frac{0.31}{B}\right) +$$

$$+ \left(54.4 B - 21.74 \frac{B^2}{L}\right) \Rightarrow$$

$$q_u = \left(414.4 + \frac{1485.74}{B} + \frac{2113.4\,B}{L} + \frac{845.02}{L}\right) + \left(104.74 + \frac{233.04}{B} + \frac{49.3\,B}{L} + \frac{15.2}{L}\right) +$$

$$+ \left(85.4\,B - 21.74\,\frac{B^2}{L}\right) \Rightarrow$$

$$q_u = 521 + \frac{1481.8}{B} + \frac{2470.33\,B}{L} + \frac{99.72}{L} + 85.4\,B - 21.74\,\frac{B^2}{L}$$

$$q_u = \frac{B^2}{L}\left(-21.74 + \frac{2470.33}{B} + \frac{99.72}{B^2} + \frac{85.4\,L}{B} + \frac{1481.8\,L}{B^3}\right) + 521$$

Level 1) $q_u = 521 + \frac{B^2}{L}\left(-21.74 + \frac{2470.33}{B} + \frac{99.72}{B^2} + \frac{85.4\,L}{B} + \frac{1481.8\,L}{B^3}\right)$

Level 2) $D_1 = D_f = 1\,m$, $D_2 = 0$ (حالت اول)

$$q = \gamma D_1 + D_2(\gamma_{sat} - \gamma_w) \Rightarrow 18 \times 1 + 0\,(\text{صفر})(20 - 10) \Rightarrow q = 18\ kN/m^2$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 20 - 10 = 10 \Rightarrow \gamma' = 10\ kN/m^3$$

$$q_u = \left(414.4 + \frac{1485.74}{B} + \frac{2113.4\,B}{L} + \frac{845.02}{L}\right) + \left(191.9 + \frac{885.2\,B}{L}\right)\left(1 + \frac{0.31}{B}\right) +$$

$$+ \left(85.4\,B - 21.74\,\frac{B^2}{L}\right) \Rightarrow$$

$$q_u = \left(414.4 + \frac{1485.74}{B} + \frac{2113.4\,B}{L} + \frac{845.02}{L}\right) + \left(191.9 + \frac{85.4}{B} + \frac{885.2\,B}{L} + \frac{27.43}{L}\right) +$$

$$+ \left(85.4\,B - 21.74\,\frac{B^2}{L}\right) \Rightarrow$$

$$q_u = 606.3 + \frac{2285.14}{B} + \frac{2998.5\,B}{L} + \frac{1113.82}{L} + 85.4\,B - 21.74\,\frac{B^2}{L}$$

$$q_u = 404/3 + \frac{B^2}{L}\left(-21/76 + \frac{2225/16\,L}{B^3} + \frac{299/5}{B} + \frac{111/82}{B^2} + \frac{54/42\,L}{B}\right)$$ (Level 2)

$$q_u = 521 + \frac{B^2}{L}\left(-21/76 + \frac{198/18\,L}{B^3} + \frac{260/33}{B} + \frac{99/72}{B^2} + \frac{54/42\,L}{B}\right)$$ (Level 1)

$$\frac{521}{404/3} = 0/86 \Rightarrow \%86 \times 100 = 86\%$$

$$100 - 86 = 14\%$$

درصورتی که سطح آب زیرزمینی از Level 2 به Level 1 صعود کند ظرفیت باربری در حدود (14٪) کاهش پیدا می کند.

مثال) یک پی مربعی باری به میزان 1200 kN را حمل می نماید. چنانچه مشخصات خاک زیر پی به شرح زیر باشد و بار وارده حداکثر باری باشد که پی مربعی توانسته تحمل کند چنانچه بخواهیم از پی مستطیلی استفاده کنیم، طول و عرض پی مستطیلی را بدست آورده و از نظر حجم مصالح مصرفی دو پی را مقایسه نمایید.

$C = 0$ $\Phi = 30^\circ$

$\gamma = 19\ kN/m^3$ $D_f = 1m$

(حل)

$\Phi = 30^\circ$ $\begin{cases} N_c = 30/14 \\ N_q = 18/4 \\ N_\gamma = 22/4 \end{cases}$

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{ci} F_{cd} + qN_q F_{qs} F_{qi} F_{qd} + \frac{1}{2} B \gamma N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma i} F_{\gamma d}$$

$$q = \gamma D_f = 19 \times 1 \Rightarrow q = 19\ kN/m^2$$

$$F_{qd} = 1 + 2 \tan\phi (1 - \sin\phi)^2 \frac{D_f}{B} = 1 + 2\tan 30 (1 - \sin 30)^2 \frac{1}{B} \Rightarrow$$

$$F_{qd} = 1 + \frac{1/28}{B} \qquad F_{\gamma d} = 1$$

$$q_u = \left(19 \times 18/4 \times \left(1 + \frac{1/28}{B}\right)\right) + \left(\frac{1}{2} \times B \times 19 \times 22/4 \times 1\right)$$

$$q_u = \left(349/4 + \frac{98}{B}\right) + \left(212/8\, B\right)$$

$$Q_u = q_u \times A \Rightarrow 120 = \left(349/4 + \frac{98}{B} + 212/8 B\right) \times B^2$$

مربعی

$$120 = 349/4 B^2 + 98 B + 212/8 B^3 \Rightarrow B = 1/42\ m$$ با آزمون و خطا بدست آمده

$$\Rightarrow A = 1/7644\ m^2$$

$$A = 1/7644\ m^2 \Rightarrow \text{ابعاد متقابل} \Rightarrow \begin{cases} B = 1/2\ m \\ L = 1/88\ m \end{cases}$$

$$F_{qd} = 1 + 2\tan\phi (1 - \sin\phi)^2 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right) \Rightarrow \text{زیرا} \Rightarrow \frac{D_f}{B} = \frac{1}{1/2} = 5 > 1$$

$$F_{qd} = 22/7 \qquad F_{\gamma d} = 1$$

$$q = \gamma D_f = 19 \times 1 \Rightarrow q = 19\ kN/m^2$$

$$F_{qs} = 1 + \frac{B}{L}(\tan\phi) = 1 + \frac{٪۲}{٪۸۸} \times \tan ۳۰ \Rightarrow F_{qs} = ۱٫۱۳$$

$$F_{\gamma s} = 1 - ٪۴\frac{B}{L} \Rightarrow F_{\gamma s} = ۱ - ۰٫۴ \times \left(\frac{٪۲}{٪۸۸}\right) \Rightarrow F_{\gamma s} = ٪۹$$

$$q_u = (۱۹ \times ۱۸٫۴ \times ۱٫۱۳ \times ۲۳٫۷) + (٪۵۰ \times ٪۲ \times ۱۹ \times ۲۲٫۴ \times ٪۹ \times ۱)$$

$$\Rightarrow q_u = ۹۴۰۰ \ kN/m^۲$$

$$\text{پی مستطیلی } Q_u = q_u \times A = ۹۴۰۰ \times ٪۲ \times ٪۸۸ \Rightarrow Q_u = ۱۶۵۴٫۴ \ kN$$

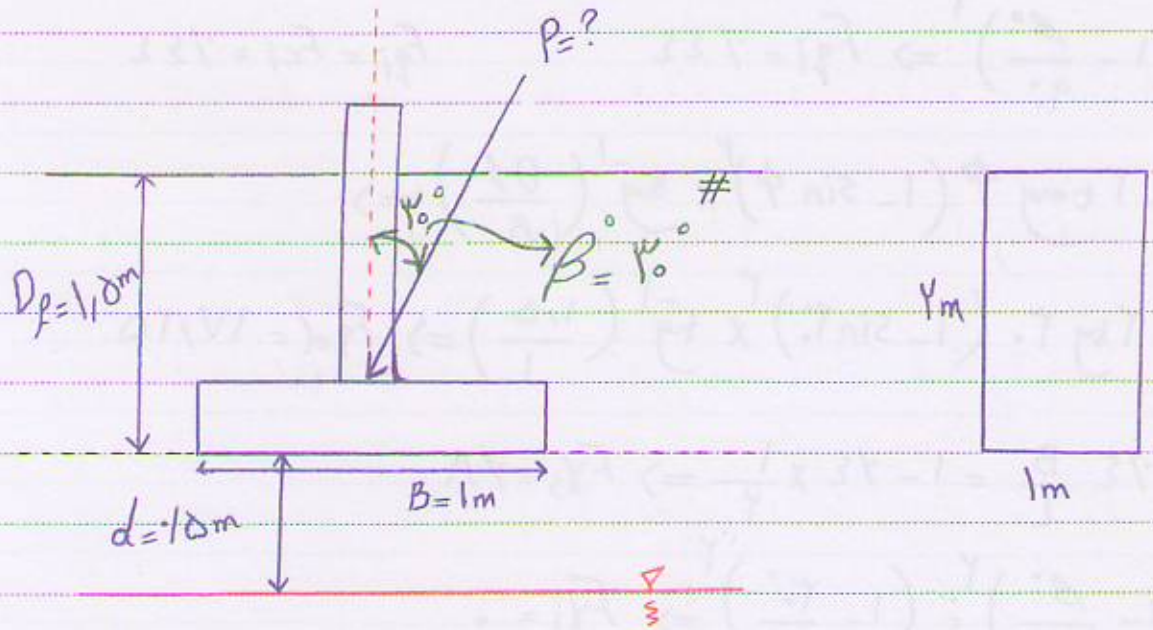
پی مربعی	$Q_u = ۱۲۰ \ kN$	$A = ٪۱۷۶$	$B = ٪۴۲ m$	$L = ٪۴۲ m$
پی مستطیلی	$Q_u = ۹۴۰۰ \ kN$	$A = ٪۱۷۶$	$B = ٪۲ m$	$L = ٪۸۸ m$

از اعداد فوق می توان نتیجه گرفت که با انتخاب ابعاد مناسب برای پی مستطیلی می توان میزان باربری مستطیلی را تا حد زیادی نسبت به میزان باربری مربعی افزایش داد.

مثال) الف) حداکثر بار P که می‌توان بر پی مستطیلی زیر وارد نمود چقدر است؟

ب) با در نظر گرفتن $F.S=3$ ، P_{all} مجاز را محاسبه نمایید.

ج) مقدار q_{net} را بدست آورید.



$F.S=3$ $\quad c=20\ kN/m^2$ $\quad \phi=30^\circ$ $\quad \beta=30^\circ$ $\quad \gamma=18\ kN/m^3$

$\gamma_{sat}=20\ kN/m^3$ $\quad \gamma_w=10\ kN/m^3$ $\quad P_{max}=?$ $\quad P_{all\ مجاز}=?$ $\quad q_{net}=?$

$\phi=30$:
- $N_c=30,14$
- $N_q=18,40$
- $N\gamma=22,40$

$L=2m$ $\quad B=1m$

$D_f=1,5m$

$$q_u=cN_cF_{cs}F_{ci}F_{cd}+qN_qF_{qs}F_{qi}F_{qd}+\tfrac{1}{2}B\bar{\gamma}N\gamma F_{\gamma s}F_{\gamma i}F_{\gamma d}$$

$$F_{cs}=1+\frac{B}{L}\times\frac{N_q}{N_c}=1+\frac{1}{2}\times\frac{18,4}{30,14}\Rightarrow F_{cs}=1,3$$

$$F_{ci} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ}\right)^2 = \left(1 - \frac{30}{90}\right)^2 \Rightarrow F_{ci} = \%44 \qquad F_{ci} = F_{qi} = \%44$$

$$F_{cd} = 1 + \left(\%4 \times \tan^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right)\right) = 1 + \left(\%4 \tan^{-1}\left(\frac{1.5}{1}\right)\right) \Rightarrow F_{cd} = 22.5$$

$$F_{qs} = 1 + \frac{B}{L}\tan\phi = 1 + \frac{1.5}{2} \times \tan 30 \Rightarrow F_{qs} = 1.43$$

$$F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ}\right)^2 \Rightarrow F_{qi} = \%44 \qquad F_{qi} = F_{ci} = \%44$$

$$F_{qd} = 1 + 2\tan\phi(1 - \sin\phi)^2 \times \tan^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right) \Rightarrow$$

$$F_{qd} = 1 + 2\tan 30\,(1 - \sin 30)^2 \times \tan^{-1}\left(\frac{1.5}{1}\right) \Rightarrow F_{qd} = 17.25$$

$$F_{\gamma s} = 1 - \%4\,\frac{B}{L} = 1 - \%4 \times \frac{1}{2} \Rightarrow F_{\gamma s} = \%8$$

$$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{\phi}\right)^2 = \left(1 - \frac{30^\circ}{30^\circ}\right)^2 \Rightarrow F_{\gamma i} = 0$$

$$F_{\gamma d} = 1 \qquad q = \gamma D_f = 18 \times 1.5 \Rightarrow q = 27\ kN/m^2$$

$$q_u = \left(20 \times 30.14 \times 1.3 \times \%44 \times 22.5\right) + \left(27 \times 18.4 \times 1.43 \times \%44 \times 17.25\right)$$

$$q_u = 8102.18 + 5292.11 \Rightarrow q_u = 13494.94\ kN/m^2$$

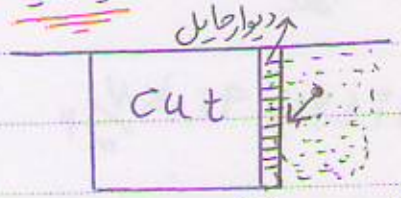
$$Q_u = q_u \times A = 13494.94 \times 2 \times 1 \Rightarrow P_{max} = 26998.88\ kN$$

$$q_{all} = \frac{q_u}{F.S} = \frac{13494.94}{2} \Rightarrow q_{all} = 6748.31\ kN/m^2$$

$Q_{all} = q_{all} \times A = ٤٤٩٨,٣١ \times ٢ = ٨٩٩٤,٤ \Rightarrow P_{all} = ٨٩٩٤,٤$

$q_{net} = q_u \quad q = ١٣٤٩٤,٩٤ - ٢٧ \Rightarrow q_{net} = ١٣٤٩٧,٩٤ \ kN/m^٢$

دیوارهای حایل : اگر سطح خاک را به هر دلیلی cut کنیم مجبوریم برای کناره ها از دیوار حایل استفاده کنیم



چون خاک به شکل یک سطح شیب دار عمل می کند و میل دارد سُر بخورد

و برعکس پایین بیاید آن چیزی که مقاومت می کند، یکی چسبندگی است و یکی اصطکاک می باشد.

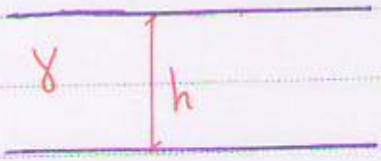
$mg \sin\alpha > \tau$ مقاومت برشی خاک $\Rightarrow$ خاک دچار لغزش می شود

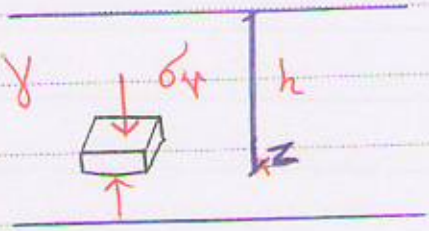
$mg \sin\alpha < \tau$ $\Rightarrow$ خاک دچار لغزش نمی شود و مقاومت می کند

فشار خاک خشک :

می خواهیم ببینیم در عمق (Z) از یک خاک خشک که وزن مخصوص آن (γ) می باشد

تنش (σ) چقدر می باشد.



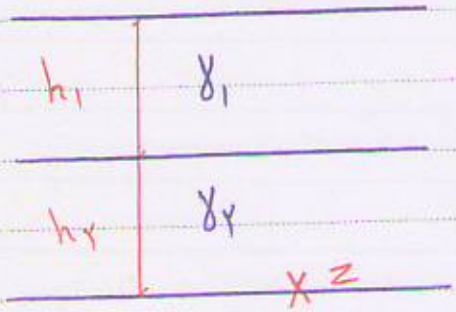


وزن مخصوص خاک خشک

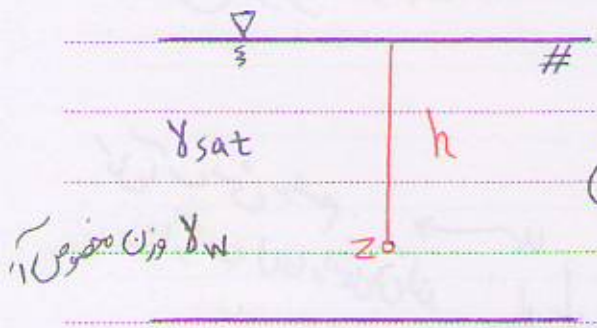
تنش قائم کل $\sigma_v = \gamma h$ ارتفاع

اگر خاک دو لایه شود در عمق (Z) تنش از رابطه ی زیر بدست می آید: (Vertical = قائم)

$\sigma_v = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2$



تنش کل در خاک اشباع :

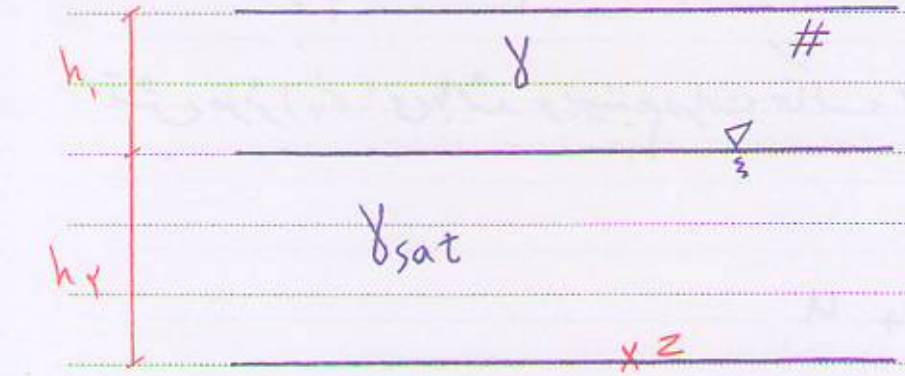


تنش کل در خاک اشباع

$\sigma_v = \gamma_{sat} \cdot h$

فشار آب در عمق z ← $u = \gamma_w \cdot h$

↓ وزن مخصوص آب

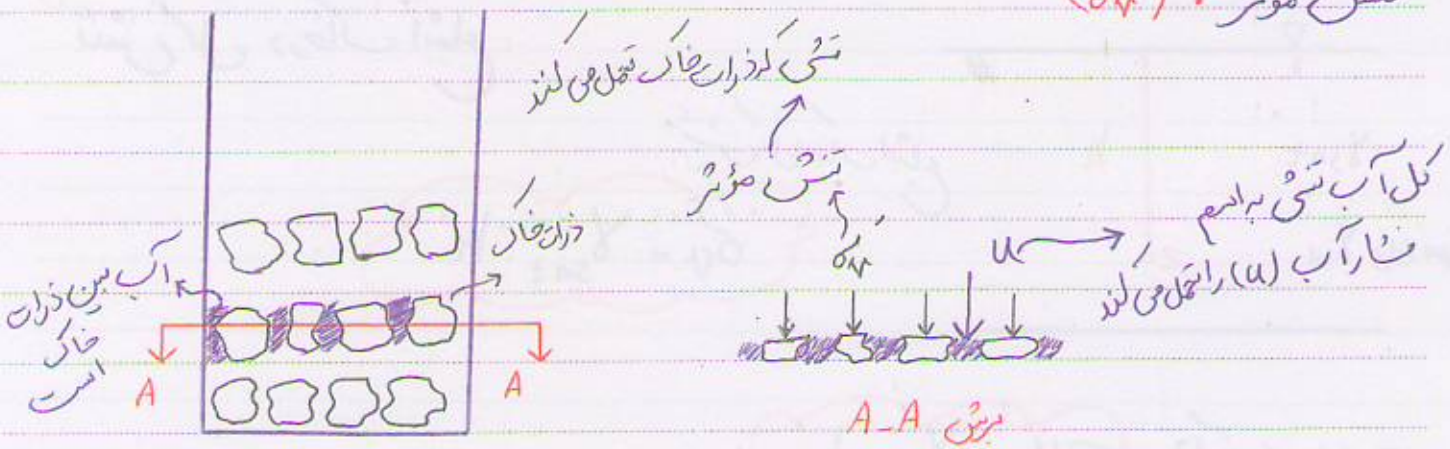


$\sigma_v = \gamma h_1 + \gamma_{sat} \cdot h_2$

$u = \gamma_w \times h_2$

تذکر: فشار آب در یک نقطه برابر است با وزن مخصوص آب ضرب در فاصله‌ی نقطه‌ی مورد نظر تا سطح آب

تنش مؤثر : (σ')



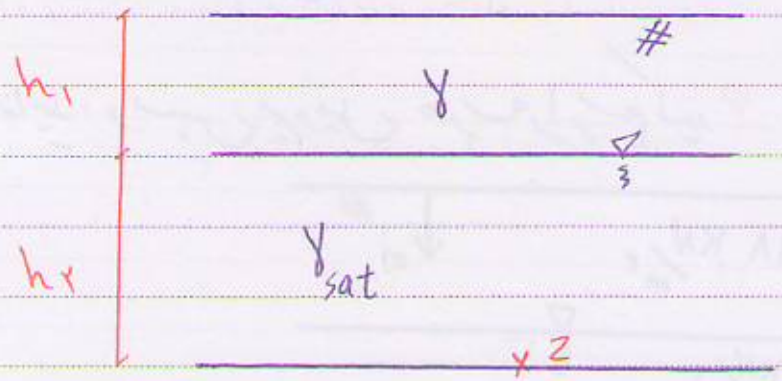
نکته: آن قسمت از تنش کل که فقط توسط بدنه ی ذرات خاک تحمل می شود تنش مؤثر (σ') نام دارد. (یعنی تنشی که داخل ذرات خاک وجود دارد) و آن چه که اهمیت دارد تنش مؤثر (σ') می باشد و ببینیم ذرات خاک چقدر فشار تحمل می کنند.

$$\sigma = \sigma' + u$$

تنش مؤثر

$$\sigma' = \sigma - u$$ → فشار آب

تنش کل



$$\sigma'_v = \sigma_v - u$$

$$\sigma'_v = \gamma h_1 + \gamma_{sat} h_2 - \gamma_w h_2$$

$$\sigma'_v = \gamma h_1 + h_2 (\gamma_{sat} - \gamma_w) = \gamma h_1 + \gamma' h_2$$

$$\sigma'_v = \gamma h_1 + \gamma' h_2$$

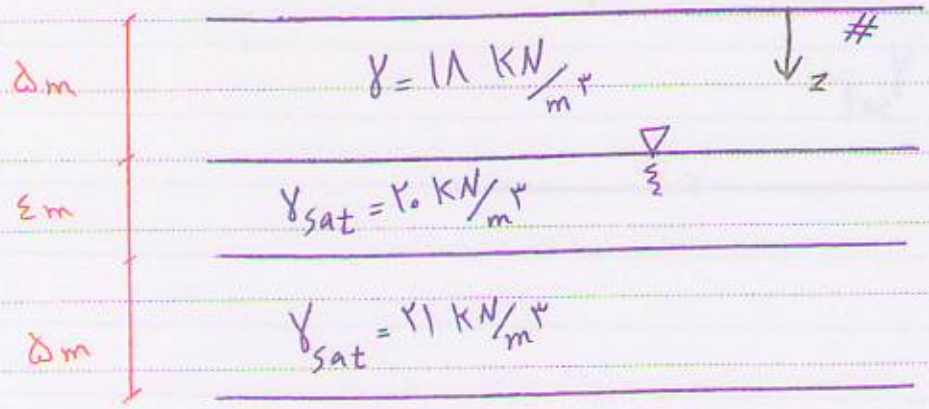
برای محاسبه‌ی تنش مؤثر ۲ دو روش وجود دارد:

روش اول) مطابق آنچه گفته شد با کسر فشار آب از تنش کل تنش مؤثر بدست می‌آید.

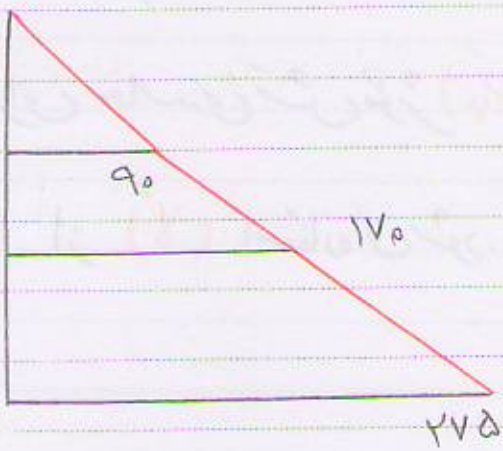
روش دوم) برای محاسبه‌ی تنش مؤثر (σ') در ارتفاعی که خاک اشباع است به جای (γ_{sat}) از (γ') استفاده می‌شود.

مثال) برای خاک مقابل در اعماق مختلف خاک، تنش کل، فشار آب، تنش موثر را محاسبه نمایید. و سپس پروفیل هر سه را رسم کنید؟

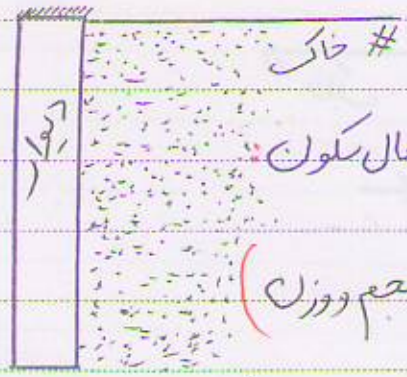
$\gamma_w = 10\ KN/m^3$



Z	σ_v	u	σ'_v
۰	۰	۰	۰
۵	$\gamma \times h$ $18 \times 5 = 90$ (۹۰)	$\gamma_w \times h = ?$ $0 \times 5 = 0$ (۰)	$\sigma' = \sigma_v - u$ $90 - 0 = 90$ (۹۰)
۹	$90 + (20 \times 4) = (170)$	$10 \times 4 = (40)$	(۱۳۰)
۱۴	$170 + (21 \times 5) = (275)$	$10 \times 9 = (90)$	(۱۸۵)



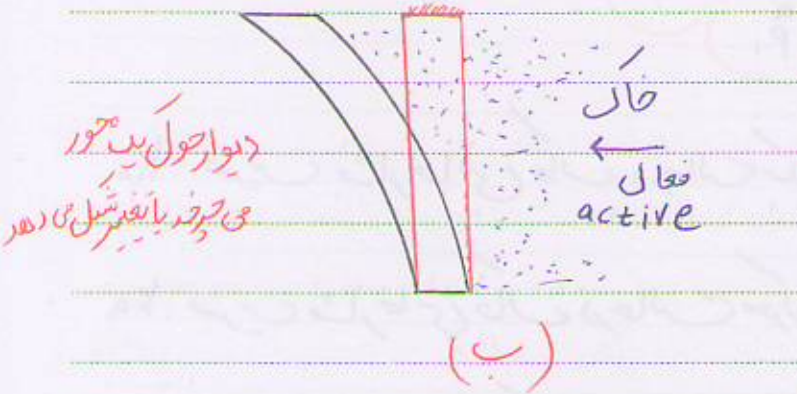
فشار جانبی خاک:



۳ نوع فشار داریم: حالت اول) فشار جانبی در حال سکون: (در حالت اول دیوار به اندازه‌ای بزرگ است (از نظر حجم و وزن) که خاک نیروی که به دیوار وارد می‌کند آن قدری نیست که بتواند دیوار را تکان دهد

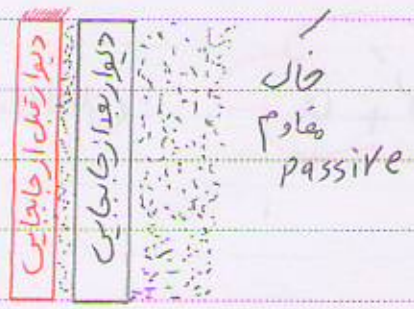
حالت دوم) ۲- فشار جانبی در حالت محرک یا فعال یا active:

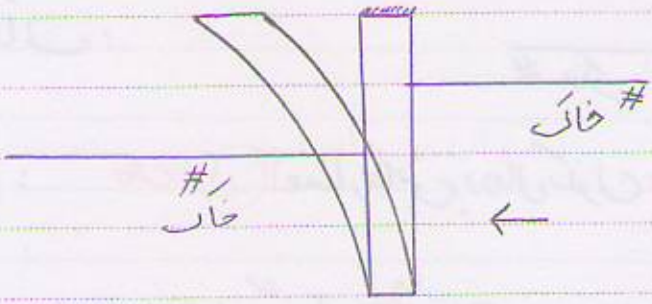
در این حالت دیوار از خاک دور می‌شود، یا دیوار حول یک محور می‌چرخد و یا به اندازه‌ی Δx به سمت جلو حرکت می‌کند.

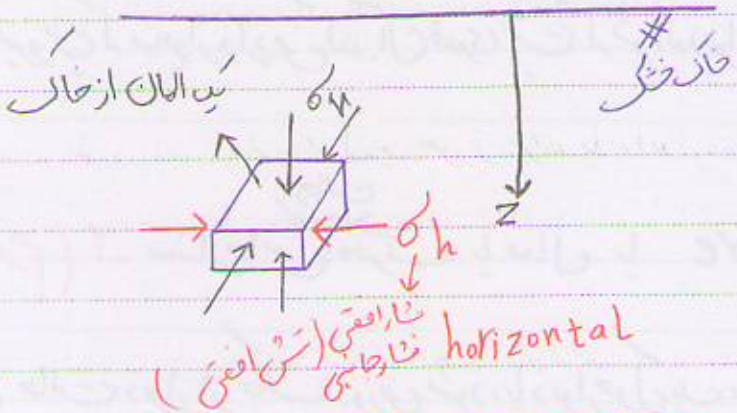


حالت سوم) ۳- فشار مقاوم یا passive:

دیوار به اندازه‌ی (Δx) به سمت خاک روانه می‌شود.







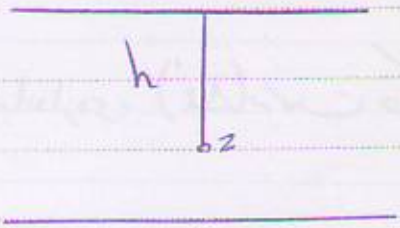
رابطه‌ی کلی :

$$\sigma_h = K_{a,p}\,\sigma_v$$

K_0 : ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون

K_a : ضریب فشار جانبی خاک در حالت محرک (active)

K_p : ضریب فشار جانبی خاک در حالت مقاوم (passive)



رابطه‌ی اصلی :

$$\sigma_h = K_0\,\sigma' + u$$

محاسبه‌ی K_0 :

زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک

$K_0 = 1 - \sin\phi$ ⇐ در خاک‌های دانه‌ای

$K_0 = 0.95 - \sin\phi$ ⇐ در خاک‌های ریزدانه‌ی تحکیم یافته

ϕ : زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک

دو نوع خاک داریم : ۱- خاک عادی تحکیم یافته ۲- خاک پیش تحکیم یافته

نشت دو نوع است

- نشت آنی (۱) ← ذرات خاک تغییر شکل می‌دهند
- نشت تحکیمی ← در اثر خروج آب و هوا از خاک تحت بار مترا رتکبیر می‌دهد.

(خاک پیش تحکیم یافته) ⇐

فرض کنیم قبلاً بر یک خاک 1000ton بار وارد شده

فرض کنیم امروز بر یک خاک 200ton بار وارد می‌شود.

1000ton قبلاً باعث تحکیم آن خاک شده و 200ton تأثیری بر تحکیم خاک ندارد.

(خاک عادی تحکیم یافته) ⇐

فرض کنیم قبلاً بر یک خاک 1000ton بار وارد شده

فرض کنیم امروز بر یک خاک 3000ton بار وارد می‌شود

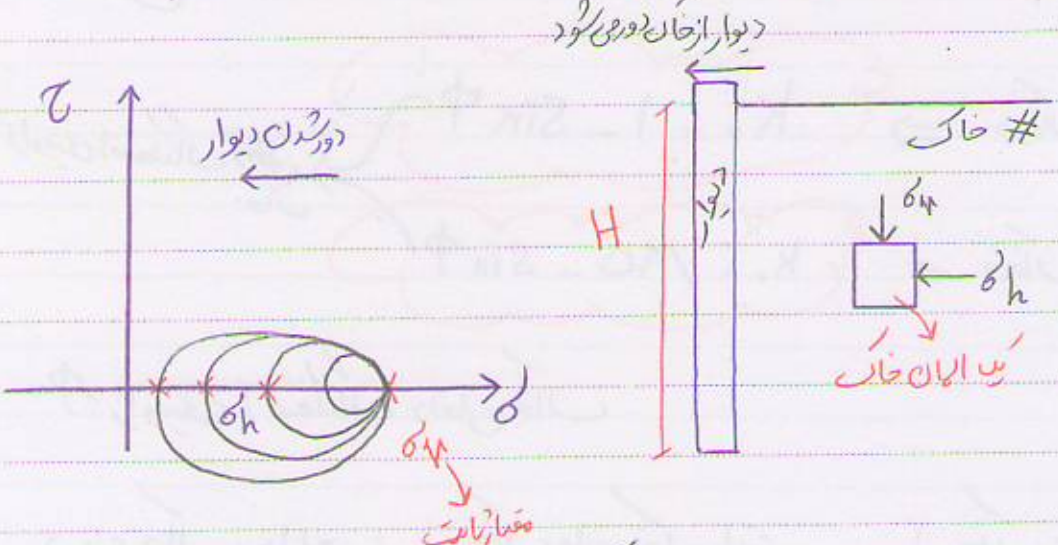
نسبت پیش تحکیمی $OCR = \frac{3000}{1000} = 3$

OCR = (over consolidation Ratio)

تحکیم نسبت

K_0 پیش تحکیم یافته $= (K_0$ عادی تحکیم یافته$) \times \sqrt{OCR}$ ← معمولاً در مسئله داده می‌شود

فشار محرک رانکین : (active)



هر چقدر دیوار از خاک دور شود مقدار تنش افقی (σ_h) کم می‌شود اما مقدار تنش قائم (σ_v) ثابت است.

(علامت منفی نشان دهنده‌ی کاهش تنش است)

$$\sigma_a = \sigma_v k_a - 2c\sqrt{k_a}$$

σ_a: تنش افقی حالت محرک (active)

σ_v: تنش قائم

c: چسبندگی

(آب مقاومت برشی ندارد و بار وزنش را به دیوار منتقل می‌کند)

(اما خیر در حالت افقی بار وزنش را به دیوار انتقال نمی‌دهد. چون چسبندگی بین ذرات خیر از چسبندگی بین ذرات آب بهتر است)

$$k_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

$$k_0 = 1 - \sin\phi$$

استاتیکی

$$\sigma_h = k_0 \times \sigma_v$$

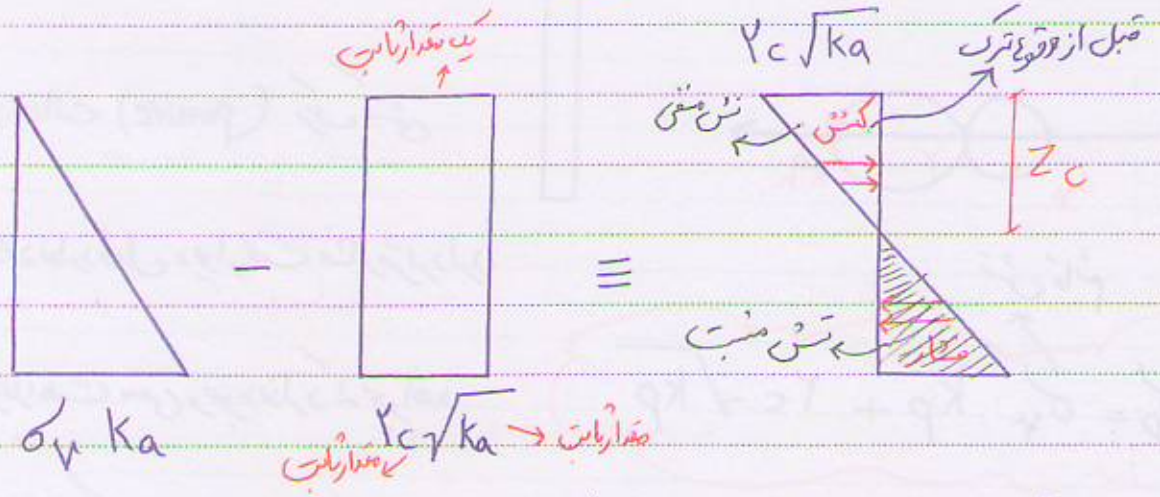
نکته: هر چقدر چسبندگی افزایش پیدا کند مقدار تنش محرک کاهش می‌یابد.

$z = 0 \Rightarrow \sigma_a = 0 \Rightarrow \sigma_v\, k_a - 2c\sqrt{k_a} = 0$

$\sigma_v = \gamma z_c$

عمق ترک کششی

$$z_c = \frac{2c\sqrt{k_a}}{\gamma k_a} = \frac{2c}{\gamma\sqrt{k_a}}$$



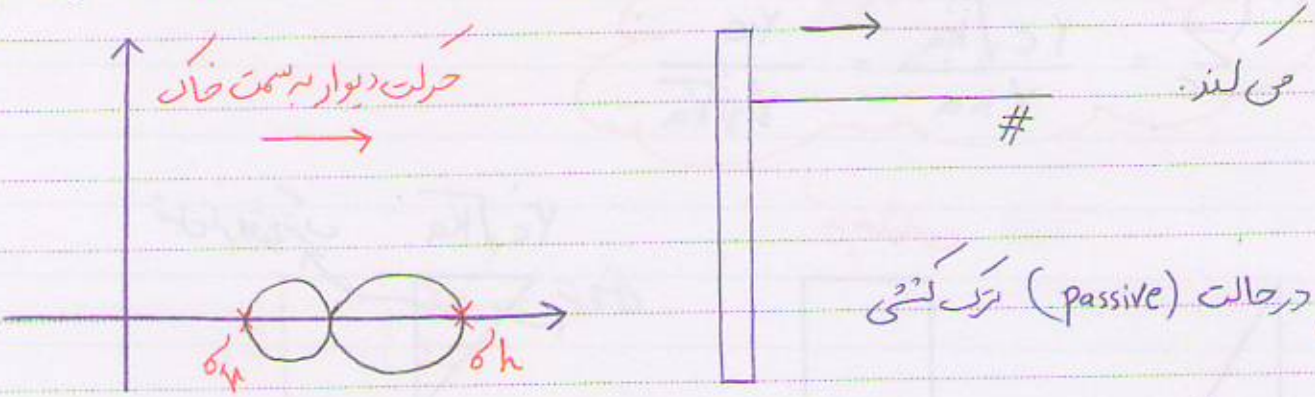
(z_c) عمق ترک کششی نامیده می‌شود. زیرا تنش کششی در خاک بالاخره باعث ترک در امتداد سطح تماس با دیوار خواهد شد. متعاقب ترک خوردگی، تنشی که بعد از وقوع ترک بر دیوار وارد می‌شود.

طول دیوار که در تماس با خاک است

نکته: مقدار تغییر مکان لازم برای خاکریز دانه‌ای بین $(0.1\,H$ تا $0.01\,H)$ و برای خاکریزهای چسبنده بین $(0.4\,H$ تا $0.1\,H)$ می‌باشد.

فشار مقاوم رانکین (Passive):

در حالت مقاوم دیوار به سمت خاک حرکت می کند. و تنش های افقی افزایش پیدا می کند.



در حالت (Passive) ترک کششی وجود ندارد و کل دیوار تحت فشار قرار دارد.

وعلامت منفی وجود ندارد که بخواهد تنش ها را در کشش قرار دهد)

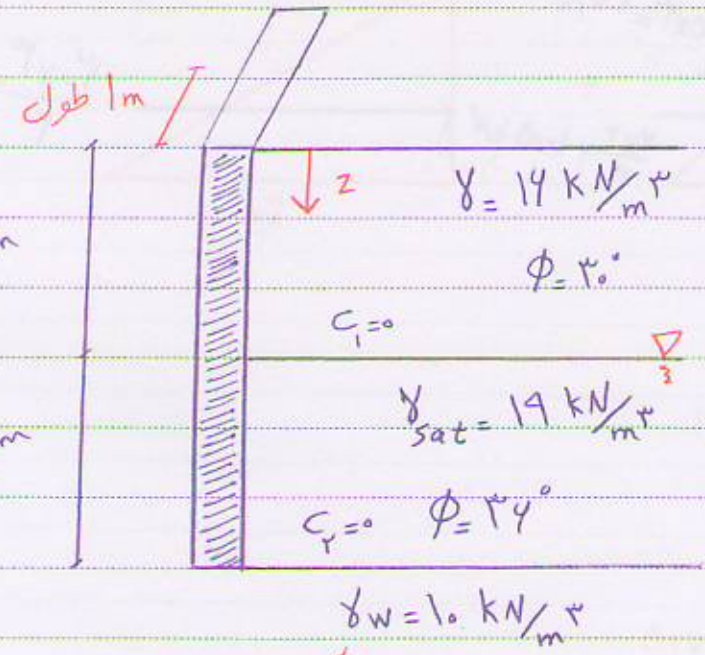
تنش قائم

$$\sigma_p = \sigma_v \, k_p + 2c\sqrt{k_p}$$

$$k_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

نکته: مقدار تغییر مکان جانبی لازم در حالت (Passive) برای ماسه ی متراکم (0.005H) برای ماسه ی شل (0.01H) برای رس سفت (0.1H) و برای رس نرم (0.05H) می باشد.

مثال) با فرض تغییر مکان جانبی کافی برای دیوار زیر در حالت محرک، نیروی وارد بر واحد طول دیوار را محاسبه کنید؟ و در پایان محل اثر نیروی برآیند را نیز بدست آورید؟



$$K_{a_1} = tg^2\left(45 - \frac{30}{2}\right) = tg^2 30 = \frac{1}{3} = 0.33$$

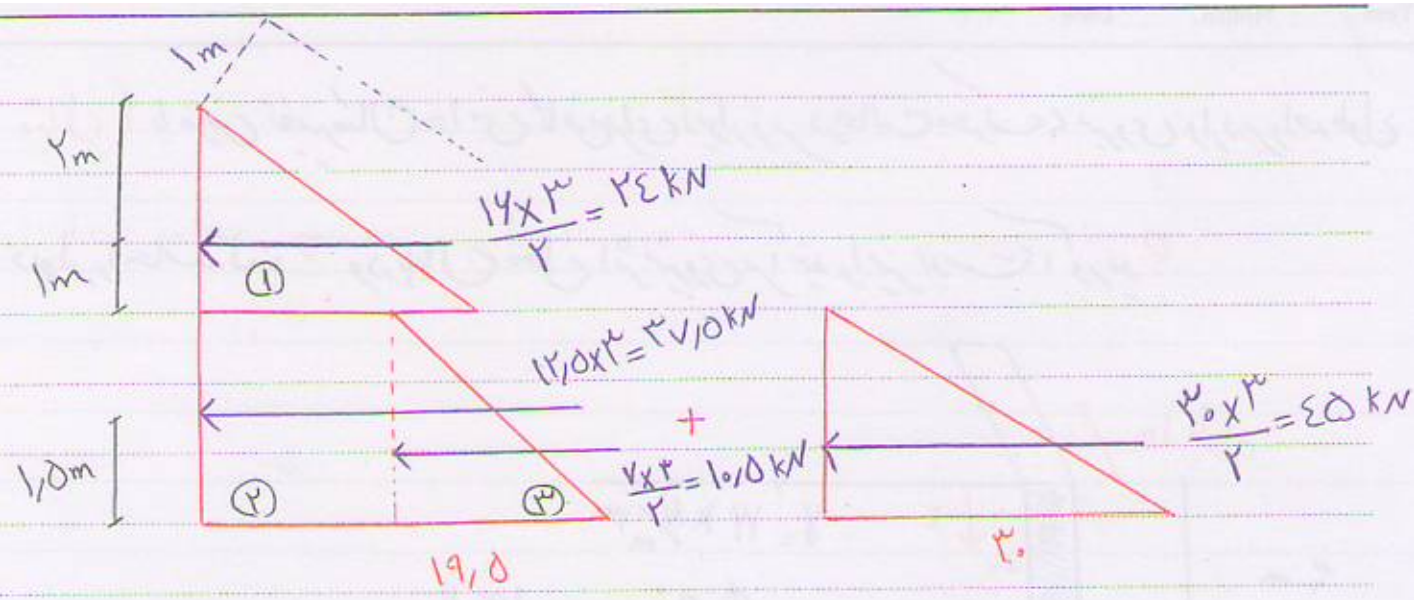
$$Ka_2 = tg^2\left(45 - \frac{36}{2}\right) = tg^2 9 = 0.26$$

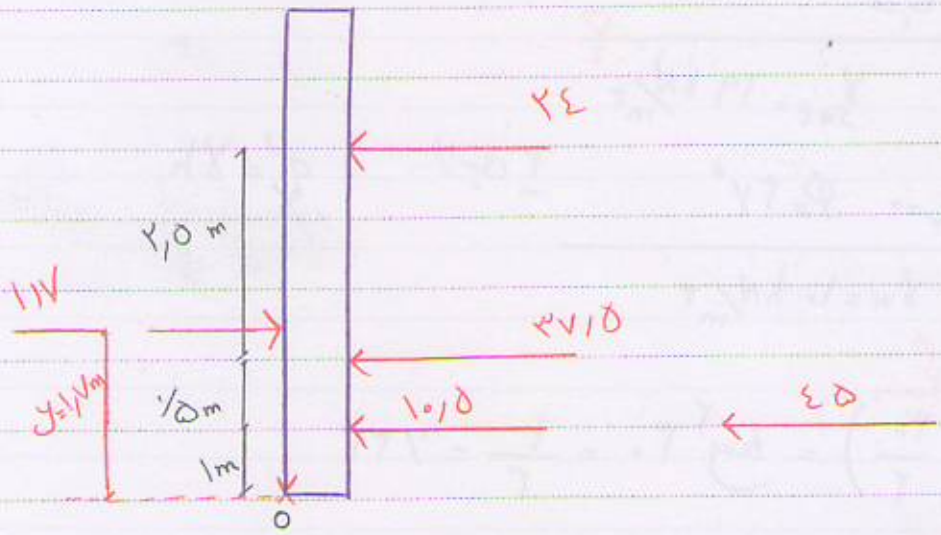
$$\sigma_a = \sigma'_v K_a - 2c\sqrt{K_a}$$

$$\sigma_a = \sigma'_v Ka$$

چون خشک است آب پیش می آید تنش موثر در نظر می گیریم

z	σ_v	u	σ'_v	$\sigma_a = \sigma'_v \times Ka$
0	0	0	0	0
3 m لایه بالا	$3\times14 = 48$	0	48	$48\times\frac{1}{3} = 16$
3 m لایه پایین	$3\times14 = 48$	0	48	$48\times0.26 = 12.5$
6 m	$48 + (3\times19) = 105$	$3\times10 = 30$	$105 - 30 = 75$	$75\times0.26 = 19.5$

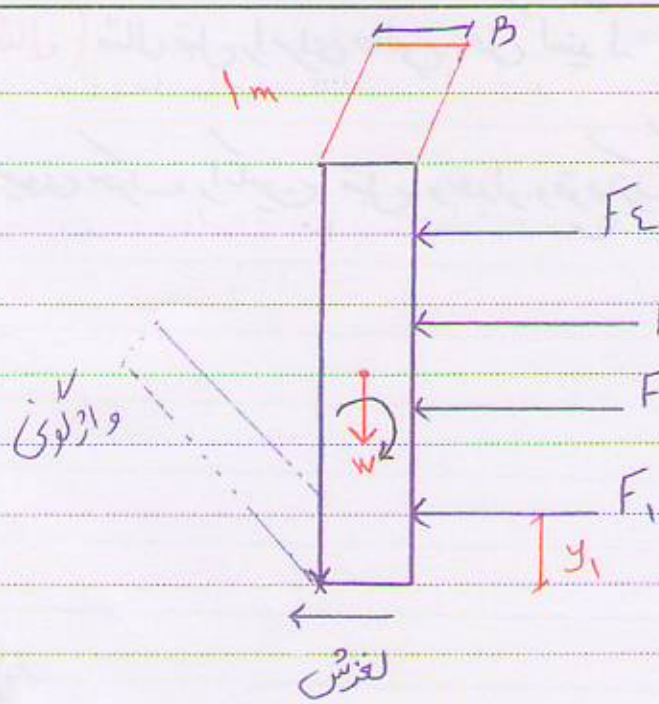




$$R = ۲۴ + ۳۷,۵ + ۴۵ + ۱۰,۵ = ۱۱۷$$

$$\curvearrowright \sum M_{O=0} \Rightarrow ۱۱۷ \times y = (۱۰,۵ + ۴۵)۱ + ۳۷,۵(۱,۵) + ۲۴(۴)$$

$$۱۱۷ \times y = ۲۰۷,۷۵ \Rightarrow y = ۱,۷ m$$



وزن مخصوص بتن = ۲۴ kN/m^3

لنگر محرک : $M = F_1 y_1 + F_2 y_2 + \cdots$

لنگر مقاوم : $W \times \frac{B}{2}$ ← عرض دیوار

↙ وزن دیوار

عاملی که باعث واژگونی می‌شود

لنگر محرک < لنگر مقاوم ⇐ باید ⇐ برای آنکه واژگونی رخ ندهد

ضریب اطمینان از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$F.S = \frac{\text{لنگر مقاوم}}{\text{لنگر محرک}}$$

مثال) مثال قبل را برای حالتی حل کنید که دولایه‌ی خاک دارای چسبندگی مساوی با $20 \frac{KN}{m^2}$ باشند

نیروی محرک رانکین قبل و بعد از وقوع ترک کششی را حساب کنید؟