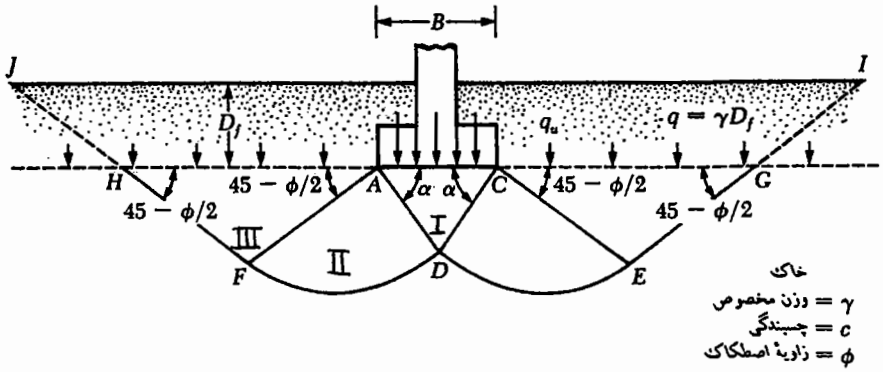
فصل سوم

ظرفیت باربری پی‌ها

مقدمه:

یک پی باید قادر باشد که بارهای وارده از طرف هر سازه مهندسی را بدون آن که شکست برشی در خاک رخ دهد، به خاک منتقل نماید. همچنین نشست‌های ایجاد شده در سیستم پی باید برای سازه قابل تحمل باشد.

در این فصل در مورد ظرفیت باربری نهایی خاک (q_{ult}) گفتگو خواهد شد. در بیشتر موارد ظرفیت باربری مجاز خاک براساس q_{ult} تعیین می‌شود و در موارد دیگر معیار نشست است که ظرفیت باربری مجاز خاک را تعیین می‌نماید.



شکل (۳-۱): مکانیسم گسیختگی کلی خاک زیر پی

نمودار (۳-۱): دایره‌ی مور برای خاک زیر پی در منطقه I و منطقه III

وضعیت عمومی گسیختگی خاک در زیر پی به صورت نشان داده شده در نمودار (۳-۱) است، آزمایشات انجام‌شده نیز صحت این مکانیسم را نشان داده‌اند. قسمت‌های I و III دو مثلث متساوی‌الساقین با زوایای $۴۵+\frac{\varphi}{۲}$ و $۴۵-\frac{\varphi}{۲}$ هستند، قسمت II وصل‌کننده‌ی قسمت‌های I و III به هم می‌باشد. منحنی تحتانی قسمت II در خاک‌های رسی اشباع دایره و در سایر خاک‌ها نزدیک به پیچ لگاریتمی است.

نخستین بار Terzaghi معادله‌ی ظرفیت باربری یک پی نواری نامحدود را که Prandtl در حدود سال ۱۹۲۰ براساس تئوری پلاستیسیته ارائه کرده بود، اصلاح کرد. بعدها میرهوف (Meyerhof) و هانسن (Hansen) و وسیک (Vesic) فرمول‌هایی در همین روال ارائه کردند. گرچه فرمول‌های پیشنهادی Terzaghi هنوز به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی بیش از حد محافظه‌کارانه بودن آن از یک طرف و قابلیت بیشتر روش‌های میرهوف و هانسن در اعمال اثراتی نظیر خارج از محور بودن بار، شیب زمین، شکل پی و... از طرف دیگر باعث شده است که امروزه سایر روش‌ها بیشتر مورد استفاده داشته باشند.

تعیین ظرفیت باربری به روش Terzaghi:

Terzaghi روابط زیر را برای ظرفیت باربری انواع پی‌ها ارائه نموده است:

$$\text{پی نواری}\quad q_{ult} = \overbrace{CN_C}^{\text{adhision}} + \overbrace{\bar{q}N_q}^{\text{depth}} + \overbrace{0.5\gamma BN_\gamma}^{\text{width}}$$

$$\text{پی مربعی}\quad q_{ult} = 1.3CN_C + \bar{q}N_q + 0.4\gamma BN_\gamma$$

$$\text{پی دایره‌ای}\quad q_{ult} = 1.3CN_C + \bar{q}N_q + 0.3\gamma BN_\gamma$$

ضرایب N از فرمول‌های زیر بدست می‌آیند:

$$N_q = \frac{a^2}{2\cos^2(45+\frac{\varphi}{2})} \qquad a = e^{(0.75\pi-\frac{\varphi}{2})\tan\varphi}$$

$$N_c = (N_q - 1)\cot\varphi$$

$$N_\gamma = \frac{\tan\varphi}{2}\left(\frac{K_{P\gamma}}{\cos^2\varphi} - 1\right)$$

$K_{P\gamma}$ از جدول (۳-۱) قابل استخراج می‌باشد.

جدول (۳-۱): مقادیر $K_{P\gamma}$ بر حسب ϕ

ϕ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$K_{P\gamma}$	10.8	12.2	14.7	18.6	25.0	35.0	52.0	82.0	141.0	298.0	800.0

به جای محاسبه ضرایب N از فرمول‌های فوق، می‌توان از منحنی‌ها و یا جداول* نیز که سهولت بیشتری دارند استفاده کرد.

ضرایب N فوق با این فرض ارائه شده‌اند که گسیختگی کلی (General Failure) در خاک زیر پی اتفاق بیفتد. در صورتی که گسیختگی جزیی (Partial Failure) یا گسیختگی از نوع سوراخ شدگی (Punching Failure) موردنظر باشد آنگاه ضرایب N باید اصلاح شود.

لازم به دکر است در روش Terzaghi هیچگونه پیش‌بینی جهت کاهش ظرفیت باربری خاک در اثر مایل بودن بار وارد بر پی یا شیب‌دار بودن زمین یا ... انجام نشده است.

تعیین ظرفیت باربری به روش میرهوف (Meyerhof):

در این روش تفکیکی بین ظرفیت باربری پی در زیر بارهای قائم و در زیر بارهای مایل به عمل آمده است.

برای بارهای قائم $q_{ult} = CN_C S_C d_C + \bar{q} N_q S_q d_q + 0.5\gamma B N_\gamma S_\gamma d_\gamma$

برای بارهای مایل $q_{ult} = CN_C i_C d_C + \bar{q} N_q i_q d_q + 0.5\gamma B N_\gamma i_\gamma d_\gamma$

ضرایب N از فرمول‌های زیر بدست می‌آیند (و یا از جداول تعیین می‌گردند):

$$N_q = e^{\pi \tan\varphi} \tan^2(45 + \frac{\varphi}{2})$$

$$N_c = (N_q - 1)\cot\varphi$$

$$N_\gamma = (N_q - 1)\tan(1.4\varphi)$$

سایر فاکتورها به شرح زیرند:

ضرایب شکل (Shape coefficients)

$$\begin{cases} S_c = 1 + 0.2K_P \dfrac{B}{L} & \\ S_q = S_\gamma = 1.0 & \varphi = 0 \\ S_q = S_\gamma = 1.0 + 0.1K_P \dfrac{B}{L} & \varphi \geq 10^\circ \end{cases}$$

ضرایب عمق (Depth coefficients)

$$\begin{cases} d_c = 1 + 0.2\sqrt{K_P}\dfrac{D}{B} & \\ d_q = d_\gamma = 1.0 & \varphi = 0 \\ d_q = d_\gamma = 1.0 + 0.1\sqrt{K_P}\dfrac{D}{B} & \varphi \geq 10^\circ \end{cases}$$

* نمونه‌ای از این جداول و نمودارها در پیوست آمده است.

ضرایب انحراف بار (Leaning coefficients)

$$\begin{cases} i_q = \left(1-\frac{\alpha^\circ}{90}\right)^2 \\ i_c = \left(1-\frac{\alpha^\circ}{90}\right)^2 \\ i_\gamma = \left(1-\frac{\alpha^\circ}{\varphi}\right)^2 \end{cases}$$

در روابط فوق $K_P = \tan^2(45+\frac{\varphi}{2})$ و α زاویه منتجه‌ی نیروهای وارد بر پی نسبت به امتداد قائم می‌باشد.

در صورتی که φ به دست آمده براساس آزمایش سه محوری است می‌توان φ_{PS} را به صورت زیر محاسبه نموده و در فرمول‌ها بکار برد:

$$\varphi_{PS} = (1.1 - 0.1\frac{B}{L})\varphi_{tr}$$

بکاربردن φ_{tr} و φ_{PS} بستگی به وضعیت بار وارده و شکل پی دارد.

نکته: باید توجه داشت shape factor (S) و inclination factor (i) تواماً به کار برده نمی‌شوند.

تعیین ظرفیت باربری به روش هانسن (Hansen):

در این روش روابط ارائه شده برای ظرفیت باربری به صورت زیر هستند:

$$q_{ult} = CN_C S_C d_C i_C g_C b_C + \bar{q}N_q S_q d_q i_q g_q b_q + 0.5\gamma B N_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$$

ظرفیت باربری خاک‌های رسی اشباع در حالت زهکشی نشده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$q_{ult} = 5.14 S_U (1 + S'_C + d'_C - i'_C - b'_C - g'_C) + \bar{q}$$

ضرایب N در این روش از فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$N_q = e^{\pi \tan\varphi} \tan^2(45+\frac{\varphi}{2})$$

$$N_c = (N_q - 1)\cot\varphi$$

$$N_\gamma = 1.5(N_q - 1)\tan\varphi$$

$$\varphi_{PS} = 1.1\varphi_{tr}$$

Nها را می‌توان از جداول نیز به دست آورد. سایر فاکتورها از جداول پیوست به دست می‌آیند.

مشاهدات کلی در مورد معادلات ظرفیت باربری:

مشاهدات کلی در مورد معادلات ظرفیت باربری را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

۱. عبارت مربوط به چسبندگی ($C.N_C$) در خاک‌های چسبنده مهمترین نقش را دارد.

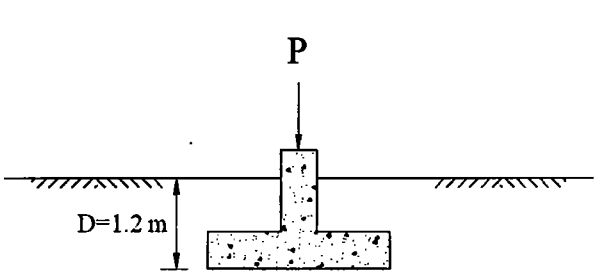
۲. عبارت مربوط به عمق ($\bar{q}N_q$) در خاک‌های دانه‌ای مهمترین نقش را دارد.

۳. عبارت مربوط به عرض پی ($0.5\gamma B N_\gamma$) در هر دو نوع خاک چسبنده و دانه‌ای باعث افزایش نسبی ظرفیت باربری می‌شود، ولی در حالتی که B کمتر از ۳ متر باشد میزان این افزایش چندان قابل توجه نیست.

۴. قرار دادن پی روی سطح زمین در خاک‌های دانه‌ای توصیه نمی‌شود.

۵. قرار دادن پی روی خاک دانه‌ای سست که D_r آن کمتر از ۰/۴۵ باشد صلاح نیست و توصیه می‌شود که در این قبیل موارد قبلاً بستر را تا رسیدن به D_r حداقل ۰/۷۵ متراکم کرد.

مثال۳-۱: ظرفیت باربری مجاز خاک را در زیر پی زیر با روش Terzaghi بدست آورید. ضریب اطمینان را ۳ در نظر بگیرید. اگر اطلاعات داده شده بر مبنای یک سری آزمایش سه محوری UU بدست آمده باشد آیا این خاک اشباع است؟



γ=18.5 kN/m³
Φ=20°
C=15 kPa

شکل (۳-۲): شکل مثال ۳-۱

حل:

خاک اشباع نیست چون آزمایش UU در خاک چسبنده با C=15 kPa انجام شده ولی $\varphi \neq 0$ بدست آمده است.

$$N_q = \frac{e^{2(0.75\pi - \frac{\frac{20\pi}{180}}{2})\tan 20^\circ}}{2\cos^2(45+\frac{20}{2})} = 7.4$$

$$N_c = (7.4-1)\cot 20 = 17.6$$

$$N_\gamma = \frac{\tan 20}{2}(\frac{25}{\cos^2 20}-1) = 4.97$$

$$q_{ult} = (1.3\times 15\,kPa\times 17.6) + (1.2m\times 18.5\,kN/m^3\times 7.4) + (0.4\times 18.5\times B\times 4.97)$$

$$q_{ult} = 507.48\,kPa + 36.78B$$

$$q_a = \frac{q_{ult}}{3} = 169.16\,kPa + 12.2B$$

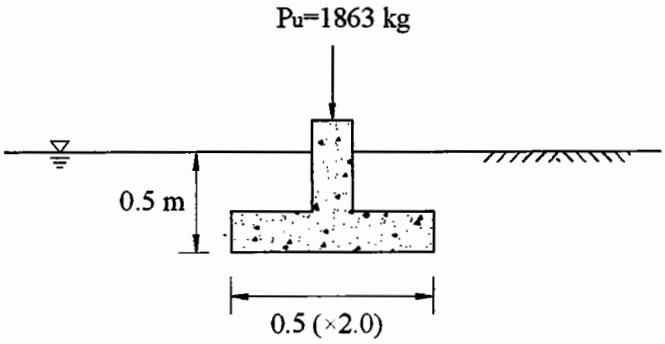
دیده می‌شود که هرچه عرض پی بیشتر باشد ظرفیت باربری کمی افزایش می‌یابد برای مثال اگر

$$B = 2.4m \longrightarrow q_a = 198.4\,kPa \approx 20\frac{T}{m^2}$$

مثال۳-۲: ظرفیت باربری نهایی خاک را در زیر پی زیر با سه روش ترزاقی، میرهوف و هانسن بدست آورده و نتایج را با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه کنید.

$$P_{ult} = 1863kN$$

$$q_{ult} = \frac{1863}{0.5\times 2} = 1863\frac{KN}{m^2}$$



$\phi_{tr} = 42.7°$

$C = 0$

$\gamma = 19.31\,kN/m^3$

$\gamma_{آب} = 10.0\,kN/m^3$

شکل (۳-۳): شکل مثال ۳-۲

حل:

۱- روش ترزاقی:

$$q_{ult} = CN_C + \bar{q}N_q + 0.5\gamma BN_\gamma$$

$$N_q = \frac{e^{2(0.75\times\pi - \frac{42.7\times\pi}{2\times180})\cdot\tan 42.7}}{2\cos^2(45+\frac{42.7}{2})} = \frac{38.896}{0.322} = 120.77$$

$$N_C = (N_q - a)\cot\varphi = (120.7-1)\cot 42.7 = 129.8$$

$$N_\gamma = \frac{\tan 42.7}{2}(\frac{225.7}{\cos^2 42.7} - 1) = 192.3$$

$$\rightarrow \quad q_{ult.} = 0 + (0.5\times9.31\times120.77) + (0.5\times9.31\times0.5\times192.3) = 562.2 + 447.5 = 1009.7$$

۲- روش میرهوف:

$$q_{ult} = CN_CS_Cd_C + \bar{q}N_qS_qd_q + 0.5\gamma BN_\gamma S_\gamma d_\gamma$$

$$\varphi_{PS} = (1.1 - 0.1\frac{0.5}{2.0})42.7° = 46° \longrightarrow \begin{cases} N_q = 157 \\ N_c = 150.7 \\ N_\gamma = 325.6 \end{cases}$$

$$k_p = \tan^2(45+\frac{\varphi}{2}) = \tan^2(45+\frac{46}{2}) = 6.12$$

$$\begin{cases} S_c = 1 + 0.2\times6.12\frac{0.5}{2} = 1.3 \\ S_q = S_\gamma = 1 + 0.1\times6.12\times\frac{0.5}{2} = 1.15 \end{cases} \qquad \begin{cases} d_c = 1 + 0.2\sqrt{6.12}\frac{0.5}{0.5} = 1.5 \\ d_q = d_\gamma = 1 + 0.1\sqrt{6.12}\frac{0.5}{0.5} = 1.25 \end{cases}$$

$$q_{ult} = 0 + 0.5\times9.31\times157\times1.15\times1.25 + 0.5\times9.31\times0.5\times325.6\times1.15\times1.25$$

$$q_{ult} = 2140 kN/m^2$$

۳- روش هانسن:

$$q_{ult} = 0 + \bar{q}N_qS_qd_qi_qg_qb_q + 0.5\gamma BN_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$$

$$\varphi_{PS} = 1.1\varphi_{tr} = 1.1\times 42.7^\circ = 47^\circ \longrightarrow \begin{cases} N_q = 187 \\ N_\gamma = 299 \end{cases}$$

$$\begin{cases} S_q = 1 + \sin\phi\dfrac{B}{L} = 1.27 \\ S_\gamma = 1 - 0.4\times\dfrac{B}{L} = 0.9 \end{cases} \qquad \begin{cases} d_q = 1 + 2\tan\phi(1-\sin\phi)^2\dfrac{D}{B} = 1.15 \\ d_\gamma = 0.1 \end{cases}$$

بقیه‌ی ضرایب مساوی واحد هستند.

$$q_{ult} = 0.5\times 9.31\times 187\times 1.27\times 1.15 + 0.5\times 9.31\times 0.5\times 299\times 0.9\times 1 = 1897\ kN/m^2$$

با مقایسه‌ی نتایج سه روش با مقدار اندازه‌گیری شده، ملاحظه می‌شود که در این مسئله جواب روش هانسن نزدیک‌تر به واقعیت است. به هر حال از هر روشی که استفاده شود، مبنای طراحی پی $\frac{q_{ult.}}{F.S.}$ خواهد بود که اگر ضریب اطمینان (F.S.) ۲ یا ۳ در نظر گرفته شود q مجاز به دست آمده با تنش واقعی که باعث گسیختگی خاک زیر پی می‌شود فاصله‌ی کافی خواهد داشت.

$$q_{ult} = \begin{cases} 1009.7 \\ 2140 \\ 1897 \end{cases} \longleftrightarrow 1863\frac{KN}{m^3}$$

محاسبه ظرفیت باربری خاک زیر پی در حالت زهکشی نشده:

در حالتی که خاک زیر پی هنگام بارگذاری رفتار زهکشی نشده (Undrained) از خود نشان دهد، زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک بروز نکرده و $\phi_U = 0$ خواهد بود. در این حالت خاص، ضرایب ظرفیت باربری خاک به صورت زیر است:

روش ترزاقی: $N_\gamma = 0.0$, $N_q = 1.0$, $N_C = 5.7$

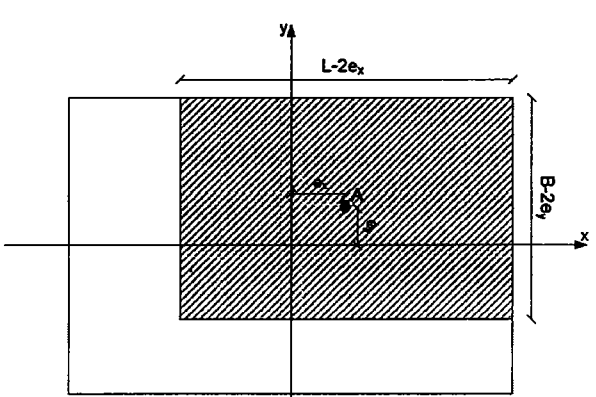
سایر روش‌ها: $N_\gamma = 0.0$, $N_q = 1.0$, $N_C = 5.14$

ظرفیت باربری پی‌ها با بار خارج از مرکز:

ممکن است بار وارده بر روی پی خارج از مرکز باشد و یا ستون علاوه بر بار محوری، لنگر نیز حول محور x یا y داشته باشد. در این صورت ابعاد مؤثر پی به صورت زیر خواهد بود:

$$L' = L - 2e_x$$
$$B' = B - 2e_y$$

و سطح موثر پی $A' = B'\cdot L'$ در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۳-۴): بار برون محور روی یک پی مستطیلی

برای این نوع پی‌ها، در محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی‌ها در معادلات میرهوف و هانسن باید در عبارت $0.5\gamma BN_\gamma$ به جای B از B' استفاده کرد. همچنین در محاسبات ضرایب شکل (Shape factors) نیز باید از B' استفاده شود. q_{ult} به دست آمده باید در سطح A' ضرب شود تا بار نهایی P_{ult} به دست آید.

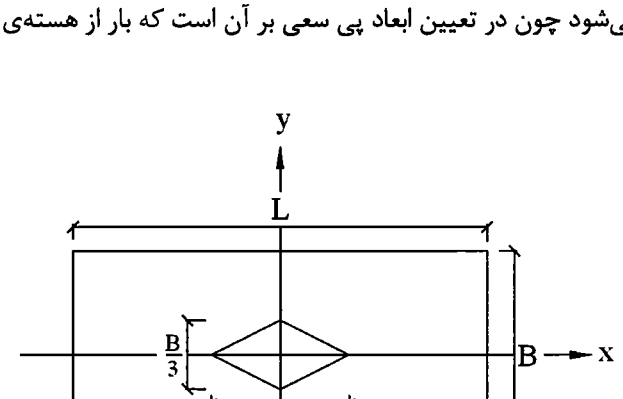
$$P_{ult.} = q_{ult.} \cdot A'$$

روش دیگری که توسط میرهوف پیشنهاد شده استفاده از ضریب اصلاحی R_e می‌باشد. در این روش ابتدا q_{ult} برای بار محوری مشابه یکی از روش‌های اصلی بدست می‌آید. سپس نتیجه در ضریب کاهش دهنده‌ای مانند R_e ضرب می‌شود.

$$q_{ult.} = q_{ult.} \cdot R_e$$

$$\begin{cases} R_e = 1 - 2(\frac{e}{B}) & \text{برای خاک‌های چسبنده} \\ R_e = 1 - (\frac{e}{B})^{1/2} & \text{برای خاک‌های دانه‌ای} \quad (0 < \frac{e}{B} < 0.3) \end{cases}$$

$\frac{e}{B}$ ندرتاً از ۰/۲ بیشتر می‌شود چون در تعیین ابعاد پی سعی بر آن است که بار از هسته‌ی مرکزی پی خارج نشود.



پلان پی

شکل (۳-۵): محدوده‌ی هسته‌ی مرکزی پی در پلان

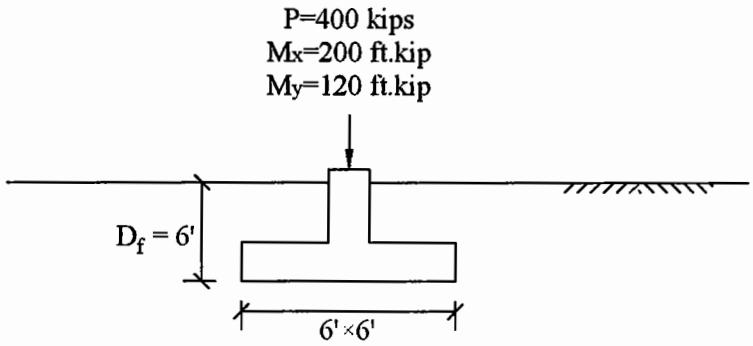
$$e_y \le \frac{B}{6} \longrightarrow \frac{e_y}{B} \le 0.16$$

$$e_x \le \frac{L}{6} \longrightarrow \frac{e_x}{L} \le 0.16$$

اگر خارج از محوری در دو جهت x و y به صورت همزمان وجود داشته باشد، در آن صورت اعمال دو ضریب اصلاحی R_e لازم است.

$$q_{ult.} = q_{ult.} \cdot R_{ex} \cdot R_{ey}$$

مثال۳-۳: اگر ضریب اطمینان را ۳ در نظر بگیریم ظرفیت باربری مجاز خاک چقدر است؟ از روش هانسن استفاده شود.



γ=115 lb/ft³
φ=32.7°
C=200 lb/ft²

شکل (۳-۶): شکل مثال ۳-۳

حل:

در این مسأله از سیستم آحاد انگلیسی استفاده می‌شود.

$$e_x = \frac{M_y}{P} = \frac{120}{400} = 0.3 \longrightarrow \frac{e_x}{L} = 0.05$$

$$e_y = \frac{M_x}{P} = \frac{200}{400} = 0.5 \longrightarrow \frac{e_y}{B} = 0.08$$

$$\begin{cases} L' = 6 - 2\times 0.3 = 5.4 \quad ft \\ B' = 6 - 2\times 0.5 = 5.0 \quad ft \end{cases}$$

لازم به ذکر است که L' و B' فقط برای محاسبه ضرایب شکل (Shape Factor) به کار برده می‌شوند.

$$\begin{cases} N_q = e^{\pi \tan 32.7} \tan^2(45 + \frac{32.7}{2}) = 25 \\ N_c = (25-1)\cot 32.7 = 37 \\ N_\gamma = 1.5(25-1)\tan 32.7 = 23 \end{cases}$$

$$\begin{cases} S_C = 1 + N_q \dfrac{B'}{N_c L'} = 1 + \dfrac{25\times 5}{37\times 5.4} = 1.62 \\ S_q = 1 + \tan\varphi \dfrac{B'}{L'} = 1 + \tan 32.7 \dfrac{5}{5.4} = 1.6 \\ S_\gamma = 1 - 0.4\times \dfrac{B'}{L'} = 1 - 0.4\times \dfrac{5}{5.4} = 0.63 \end{cases} \qquad \begin{cases} d_C = 1 + 0.4\dfrac{D}{B} = 1 + 0.4\dfrac{6}{6} = 1.4 \\ d_q = 1 + 2\tan\varphi(1-\sin\varphi)^2 \dfrac{D}{B} = 1.27 \\ d_\gamma = 1.00 \end{cases}$$

بار مایل نیست $\longrightarrow$ $i = 1$

پی در کنار شیب نیست $\longrightarrow$ $g = 1$

بستر پی افقی است $\longrightarrow$ $b = 1$

$$q_{ult} = CN_C S_C d_C + \bar{q} N_q S_q d_q + 0.5\gamma B' N_\gamma S_\gamma d_\gamma$$

$$q_{ult} = 200\times 37\times 1.62\times 1.4 + 6\times 115\times 25\times 1.6\times 1.27 + 0.5\times 115\times 5\times 23\times 0.63\times 1$$

$$q_{ult} = 16783.2 + 35052 + 4165.9$$

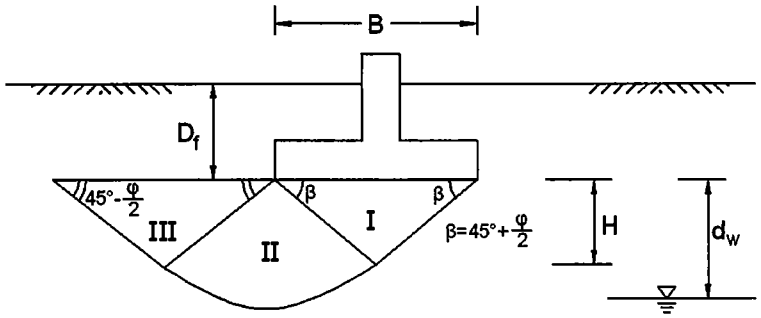
$$q_{ult} = 56000\ \text{lb/ft}^2 = 56\ \text{kip/ft}^2$$

$$q_a = \frac{q_{ult}}{\text{F.S.}} = \frac{56}{3} = 18.67\ \text{kip/ft}^2$$

$$P_a = 18.67\times 5\times 5.4 = 504\ \text{kips} > 400\ \text{kip} \longrightarrow \text{O.K.}$$

تأثیر سطح سفرهٔ آب زیرزمینی بر ظرفیت باربری:

هنگامی‌که سطح سفره آب زیرزمینی پائین تر از ناحیه I یعنی پائین تر از عمق $0.5B\tan(45+\frac{\varphi}{2})$ قرار دارد (یا از این حد بالاتر نمی‌آید) می‌توان از اثر سطح سفره آب زیرزمینی بر ظرفیت باربری پی صرف‌نظر کرد.



شکل (۳-۷): گسیختگی خاک زیر پی تحت اثر آب زیرزمینی

اگر آب بالاتر از این حد قرار گیرد در جمله‌ی $0.5\gamma BN_\gamma$ باید از γ_e (وزن مخصوص مؤثر خاک) استفاده کرد. برای محاسبه γ_e می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد:

$$\gamma_e = (2H - d_w)\frac{d_w}{H^2}\gamma_{wet} + \frac{\gamma'}{H^2}(H - d_w)^2$$

که در این رابطه:

$$H = 0.5B\tan(45+\frac{\varphi}{2})$$

d_w: فاصله‌ی سطح سفره‌ی آب زیرزمینی تا زیر پی

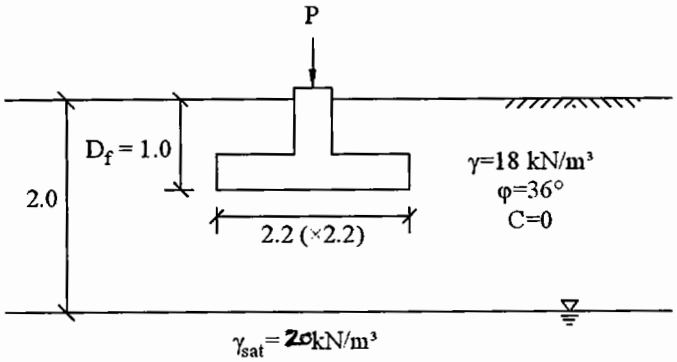
γ_{wet}: وزن مخصوص مرطوب خاک

$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$: وزن مخصوص مستغرق خاک

می‌باشد.

آب ندرتاً از تراز کف پی بالاتر می‌آید ولی اگر سطح آب زیرزمینی از کف پی بالاتر باشد باید در عبارت $\overline{q}N_q$ نیز از وزن مخصوص مؤثر خاک استفاده شود. وزن مخصوص مؤثر خاک در یک لایه خاک اشباع γ' می‌باشد.

مثال۳-۴: برای پی زیر در صورتی که ضریب اطمینان ۳ باشد ظرفیت باربری مجاز پی را پیدا کنید. از روش هانسن استفاده نمایید.



شکل (۳-۸): شکل مثال ۳-۴

حل:

$$H = \frac{B}{2}\tan(45+\frac{\varphi}{2}) = \frac{2.2}{2}\tan(45+\frac{36}{2}) = 2.15 \quad m$$

$$2.15\,m \quad > \quad 2.0-1.0 = 1.0\,m$$

بنابراین آب در میزان ظرفیت باربری نقش دارد.

$$\gamma_e = (2H-d_w)\frac{d_w}{H^2}\cdot\gamma_{wet} + \frac{\gamma'}{H^2}(H-d_w)^2$$

$$\gamma_e = (2\times 2.15-1.0)\frac{1}{(2.15)^2}\times 18 + \frac{20-9.81}{(2.15)^2}(2.15-1.0)^2 = 15.77 \quad kN/m^3$$

از آنجا که پی مربعی است و بارگذاری به حالت axisymmetric یعنی آزمایش سه محوری شباهت دارد، لذا نیازی به اصلاح φ_{tr} نیست.

$$\begin{cases} N_q = e^{\pi.\tan 36^\circ}.\tan^2(45+\frac{36}{2}) = 37 \\ N_C = \text{نیست} \quad \text{محاسبه لازم آن} \quad \text{است،} \quad C = 0 \text{ چون} \\ N_\gamma = 1.5(N_q-1)\tan\phi = 1.5(37-1)\tan 36^\circ = 39 \end{cases}$$

$$\begin{cases} S_C = \text{نیست} \quad \text{لازم} \\ S_q = 1+\frac{B}{L}\sin\phi = 1+\frac{2.2}{2.2}\sin 36^\circ = 1.59 \\ S_\gamma = 1-0.4\frac{B}{L} = 1-0.4(\frac{2.2}{2.2}) = 0.6 \end{cases}$$

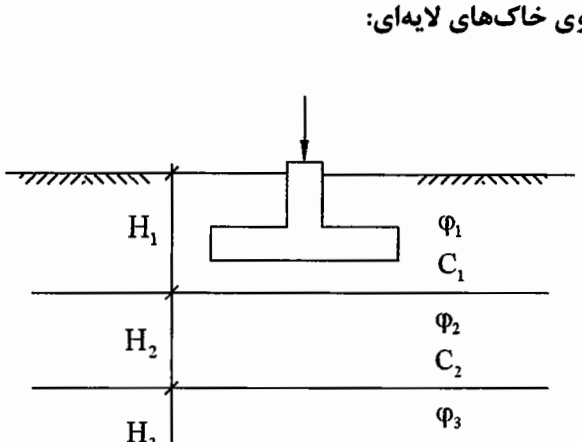
$$\begin{cases} d_C = \text{نیست} \quad \text{لازم} \\ d_q = 1+2\tan\phi\cdot(1-\sin\phi)^2\dfrac{D}{B} = 1+2\tan 36^\circ(1-\sin 36^\circ)\dfrac{1}{2.2} = 1.1 \\ i = g = b = 1.00 \end{cases}$$

$$q_{ult.} = \bar{q}\cdot N_q\cdot S_q\cdot d_q + 0.5\gamma\cdot B\cdot N_\gamma\cdot S_\gamma\cdot d_\gamma$$

$$= (1\times 18\times 37\times 1.59\times 1.1) + (0.5\times 15.77\times 2.2\times 39\times 0.6\times 1.0) = 1570.75 \quad kN/m^2$$

$$q_a = \frac{1570.75}{3.0} = 523.6 \quad \frac{kN}{m^2}$$

ظرفیت باربری پی‌ها بر روی خاک‌های لایه‌ای:



شکل (۳-۹): وضعیت قرارگیری پی روی خاک‌های لایه‌ای

در صورتی که لایه‌های نازک خاک در زیر پی موجود باشند به نحوی که منحنی گسیختگی از همه‌ی آن‌ها عبور کند، یک راه حل ممکن آن است که مقادیر متوسط وزنی φ و C را به شرح زیر در محاسبات دخالت دهیم:

$$C_{av} = \frac{C_1H_1 + C_2H_2 + ... + C_nH_n}{\sum H_i}$$

$$\varphi_{av} = \text{Arc}\tan\frac{H_1\tan\varphi_1 + H_2\tan\varphi_2 + ... + H_n\tan\varphi_n}{\sum H_i}$$

φ یا C در هر یک از لایه‌ها می‌توانند صفر باشند. در طبیعت چنین وضعی معمولاً رخ نمی‌دهد، لذا این راه حل، تقریبی بوده و میزان دقت نیز در آن مشخص نیست. بنابراین انجام مراحل زیر توصیه می‌شود:

۱- در صورتی که از کف پی تا فاصله $0.5B\tan(45+\frac{\varphi}{2})$ را لایه‌ی خاک فوقانی تشکیل دهد می‌توان با تقریب فرض کرد که لایه‌ی خاک تحتانی وجود ندارد.

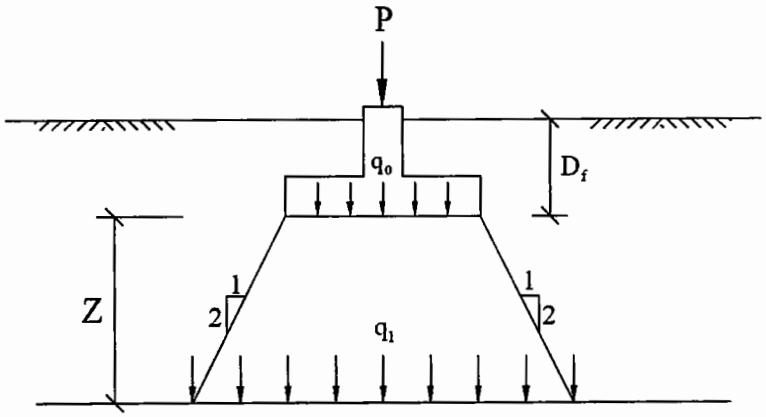
۲- اگر فاصله کف پی تا لایه تحتانی از 0.5B کمتر باشد می‌توان فرض کرد که پی مستقیماً روی لایه تحتانی قرار دارد.

۳- در صورتی که یکی از بندهای ۱ یا ۲ برقرار نباشد در تعیین ظرفیت باربری با دو لایه خاک مواجه خواهیم بود. فشار وارد بر خاک زیر پی $q_0 = \frac{P}{B\times L}$ و فشار وارد بر لایه خاک دوم یعنی q_1 با فرض توزیع تنش با شیب 1H:2V محاسبه می‌شود (شکل ۳-۱۰).

حال ظرفیت باربری لایه تحتانی با پی فرضی به ابعاد $(B+Z)\times(L+Z)$ محاسبه می‌شود. باید توجه داشت که در محاسبه‌ی ظرفیت باربری لایه تحتانی، وزن خاک لایه فوقانی به ضخامت $D+Z$ باید در عبارت $\overline{q}N_q$ منظور شود.

بار وارده q_1 از ظرفیت باربری به دست آمده به ازای لایه‌ی تحتانی (با توجه به ضریب اطمینان لازم) باید کمتر باشد. q_0 هم باید از ظرفیت باربری لایه‌ی فوقانی کمتر باشد، از این دو هر کدام کمتر باشد ملاک طراحی پی خواهد بود.

در تحلیل فوق، از مقاومت برش پانچ لایه‌ی فوقانی در جهت اطمینان صرف‌نظر شده است. در صورتی که لایه‌ی خاک سومی نیز در گسیختگی خاک زیر پی مؤثر باشد، می‌توان همین روند را ادامه داد و q_2 وارد بر لایه‌ی سوم را محاسبه کرد. سپس بحرانی‌ترین q حاصله را در طراحی پی مورد استفاده قرار داد.



$$q_1 = \frac{p}{(B+Z)(L+Z)}$$

شکل (۳-۱۰): توزیع تنش در عمق Z خاک (روش شیب ۲:۱)

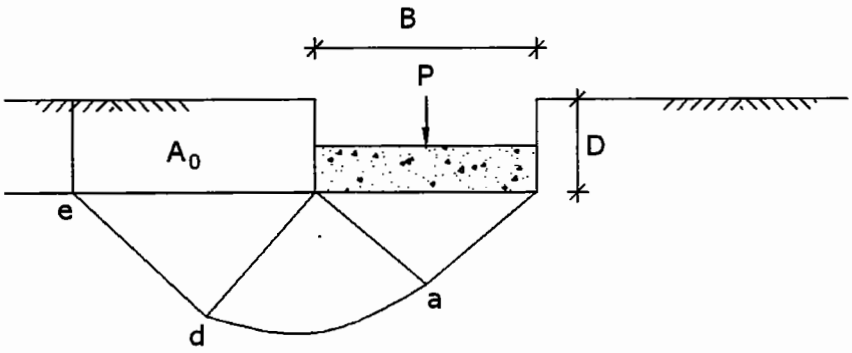
ظرفیت باربری پی‌های واقع بر روی شیب:

هنگامی‌که پی روی شیب و یا در مجاورت یک شیب قرار دارد، به علت کاهش وزن خاک جانبی، عبارت $\overline{q}N_q$ کاهش یافته و ظرفیت باربری خاک زیر پی کم می‌شود. به این مسأله در روش ترزاقی توجهی نشده است ولی در روش هانسن اثر آن با ضرایب g اعمال شده است. در روش میرهوف نیز به این صورت عمل می‌شود که ضرایب N با توجه به شکل‌های (۳-۱۱) تا (۳-۱۳) اصلاح می‌شوند.

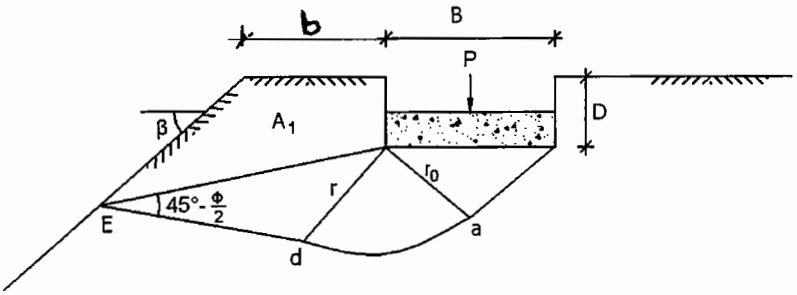
$$N_C^* = N_C \frac{adE}{ade}$$

$$N_q^* = N_q \frac{A_1}{A_0}$$

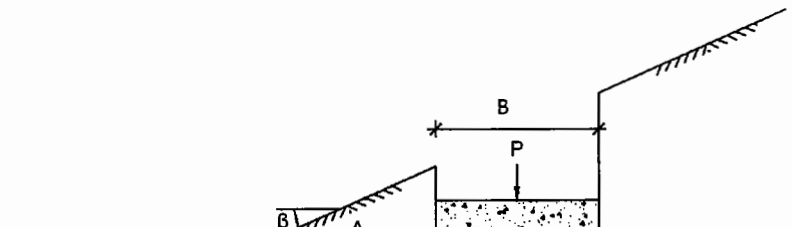
از اصلاح N_γ نیز صرفنظر می‌شود.



شکل (۳-۱۱): مکانیسم گسیختگی خاک زیر پی در زمین‌های بدون شیب



شکل (۳-۱۲): مکانیسم گسیختگی خاک زیر پی در زمین‌های شیب‌دار



شکل (۳-۱۳): مکانیسم گسیختگی خاک زیر پی در زمین‌های شیب‌دار

به جای ترسیم نمودارها و محاسبات فوق می‌توان از جداول پیوست استفاده نمود. دراین جدول براساس β و φ و... می‌توان N_q^* و N_C^* را بدست آورد. فرمول محاسبهٔ ظرفیت باربری در این‌حالت به شرح زیر می‌باشد:

$$q_{ult} = CN_C^*S_Ci_C + \bar{q}N_q^*S_qi_q + 0.5\gamma BN_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma$$

چند نکته:

۱. اثر عمق در N_q^* و N_C^* ملحوظ شده است، لذا ضرایب d در دو ترم اول ظاهر نمی‌شود.
۲. به علت اثر شیب، اصلاح φ_{tr} به φ_{ps} لازم نیست.
۳. بررسی پایداری عمومی‌شیب تحت اثر بارهای وارده فراموش نشود.

تعیین ظرفیت باربری براساس نتایج آزمایش SPT:

از آنجا که SPT آزمایشی است که به طور وسیع جهت تعیین مشخصات مکانیکی خاک استفاده می‌شود، جداول و نمودارهای زیادی وجود دارد که براساس نتیجه این آزمایش φ و یا C خاک را مشخص می‌کنند و یا ظرفیت باربری

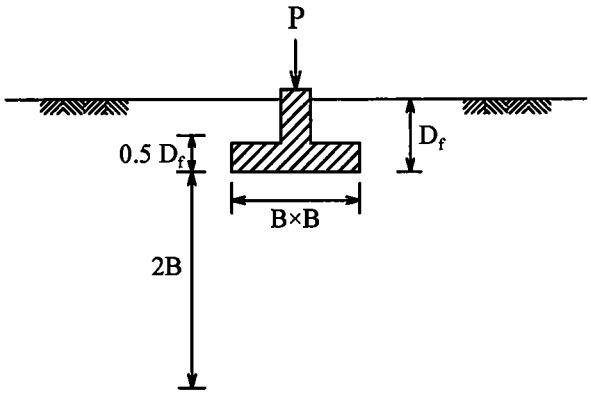
خاک را تعیین می‌کنند. Bowles براساس فرمول‌های میرهوف (با ۵۰٪ افزایش) و برای ۲/۵ سانتیمتر نشست فرمول‌های تجربی زیر را پیشنهاد می‌کند:

$$\begin{cases} q_a = \dfrac{N}{0.05} k_d & : B \le 1.2m \\ q_a = \dfrac{N}{0.05}\left(\dfrac{B+0.3}{B}\right)^2 k_d & : B > 1.2m \\ q_a = \dfrac{N}{0.08} k_d & : B = \text{too large (mat foundation)} \end{cases}$$

$$k_d = 1 + 0.33\frac{D}{B} \le 1.33$$

N_{55} در روابط فوق مقدار متوسط آماری مقادیر به دست آمده از آزمایش SPT با انرژی ۵۵ درصد در حدفاصل نشان داده شده در شکل (۳-۱۴) است. q_a نیز فشار باربری مجاز خاک برای ۲/۵ سانتیمتر نشست برحسب کیلوپاسکال می‌باشد. اگر نشست بیشتری مجاز باشد، می‌توان به همان نسبت q_a را بیشتر در نظر گرفت:

$$q_{a(S)} = \frac{S}{2.5} \times q_a$$



شکل (۳-۱۴): محدوده‌ی موردنظر در تعیین متوسط عدد N

تعیین ظرفیت باربری از آزمایش CPT:

مشابه با بند قبل، و با توجه به متداول شدن آزمایش CPT در عملیات صحرایی، روابطی برای تخمین ظرفیت باربری مجاز (q_a) یا ظرفیت باربری نهایی ($q_{ult.}$) بر اساس مقاومت لازم جهت فرورفتن نوک مخروط (q_c) در آزمایش CPT ارائه شده است که در اینجا به ذکر دو سری رابطه که استفاده از آن‌ها معمول‌تر است اکتفا می‌شود.

روابط پیشنهادی Meyerhof (1965) جهت تخمین ظرفیت باربری مجاز برای ۲/۵ سانتیمتر نشست:

$$\begin{cases} \text{عرض پي } B \le 1.2\,m \longrightarrow q_a = \dfrac{q_c}{10 \sim 60} \\ \text{عرض پي } B > 1.2\,m \longrightarrow q_a = \dfrac{q_c}{50}\left(\dfrac{B+0.3}{B}\right)^2 \\ \text{اگر } B \text{ خيلي بزرگ باشد} \longrightarrow q_a = \dfrac{q_c}{25} \end{cases}$$

روابط پیشنهادی Schmertman (1978) برای تخمین ظرفیت باربری نهایی:

$$\text{خاک‌های دانه‌ای} \begin{cases} \text{پي نواري} \longrightarrow q_{ult.} = 28 - 0.0052(300 - q_c)^{1.5} \quad kg/cm^2 \\ \text{پي مربعي} \longrightarrow q_{ult.} = 48 - 0.009(300 - q_c)^{1.5} \quad kg/cm^2 \end{cases}$$

خاک‌های چسبنده
$$\begin{cases} \text{پي نواري} \longrightarrow q_{ult.} = 2.0 + 0.28\, q_c \quad kg/cm^2 \\ \text{پي مربعي} \longrightarrow q_{ult.} = 5.0 + 0.34\, q_c \quad kg/cm^2 \end{cases}$$

ضریب اطمینان در تعیین ظرفیت باربری:

در تعیین ظرفیت باربری مجاز خاک زیر پی بر اساس ظرفیت باربری نهایی، لازم است ظرفیت باربری نهایی بر ضریب اطمینان (S.F) تقسیم شود. آئین‌نامه‌ها برای ضریب اطمینان مقادیر مختلفی را پیشنهاد نموده‌اند. مقادیر ضریب اطمینان برای پروژه‌های مختلف در محدوده‌ی جدول (۳-۲) قرار دارد.

جدول (۳-۲): مقادیر ضریب اطمینان برای پروژه‌های مختلف

کارهای خاکی (سدهای خاکی/ خاکریز و...)		1.2 ~ 1.6
سازه‌های حائل	دیوارهای حائل	1.5 ~ 2.0
	سپرها و (Coffer Dam)	1.2 ~ 1.6
پی‌ها	منفرد	2 ~ 3
	گسترده	1.7 ~ 2.5
	تحت کشش	1.7 ~ 2.5

مراجع برای مطالعه بیشتر

[1] Foundation Analysis and Design, Bowles J.E., 1996, McGraw-Hill.
[2] Principle of Foundation Engineering, Das B.M., 1990, PWS-KENT.
[3] Geotechnical Engineering: Principles and Practices, Coduto D.P., 1999, Prentice-Hall.
[4] Design Aids in Soil Mechanics and Foundation Engineering, Kaniraj S.R., 1988, TATA McGraw-Hill.