



رابطی مقدم

مهندسی پی

ظرفیت باربری پی های سطحی

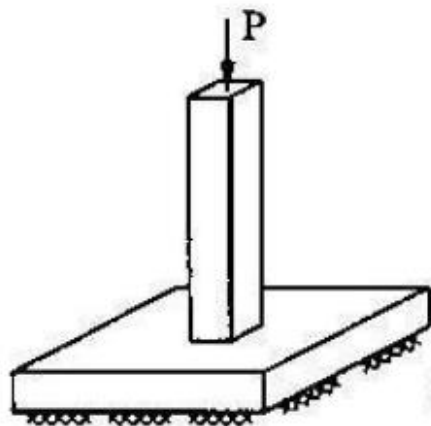
**Bearing Capacity
of
Shallow Foundations**



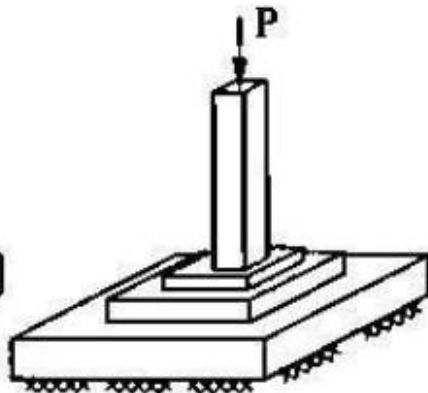
پی های سطحی : (بند ۷-۱-۳-۲ مبحث هفتم) به پی هایی گفته می شود که در عمق کم و نزدیک سطح زمین (عمق پی (D) کمتر از سه برابر عرض پی (B) $\frac{D}{B} \leq 3$) ساخته می شوند. این پی ها شامل: پی های منفرد، نواری، شبکه ای و گسترده می باشند. جنس پی های سطحی ممکن است سنگی، بتنی و یا بتن آرمه باشند.

انواع پی های سطحی :

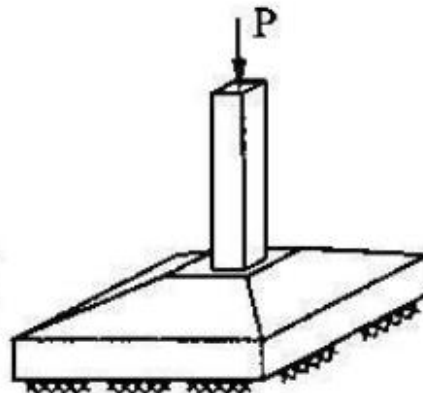
۱- پی منفرد Spread Footing : بار یک ستون را حمل می کند.



پی ساده



پی پله‌ای

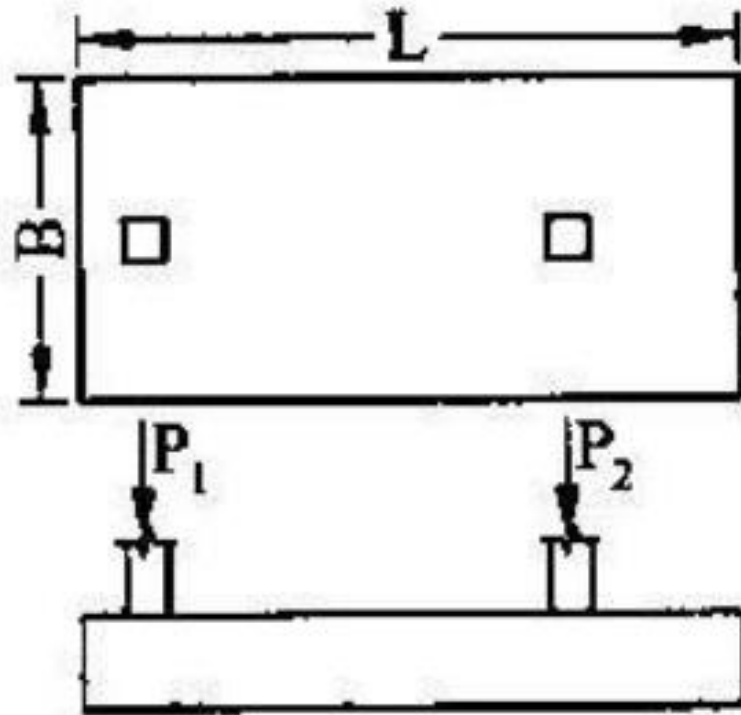


پی شیب‌دار

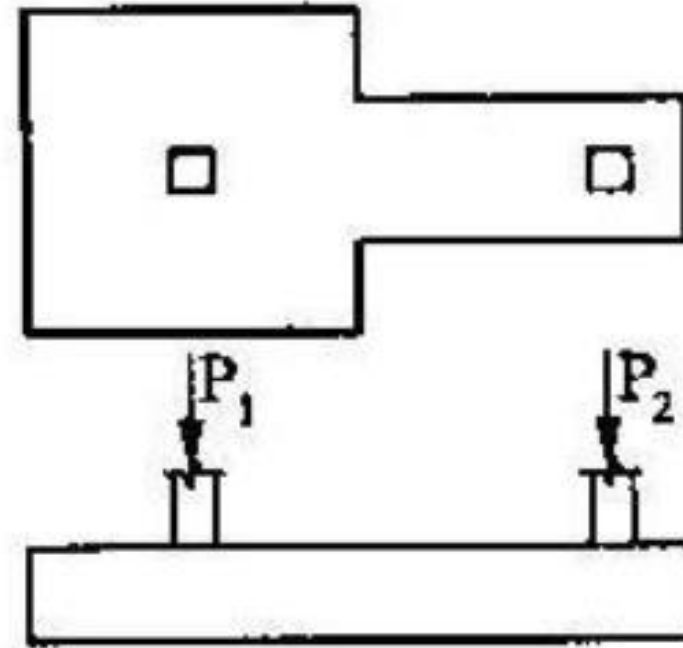


پی دایره‌ای

۲- پی مرکب combined footing : بار دو ستون مجاور را حمل می کند

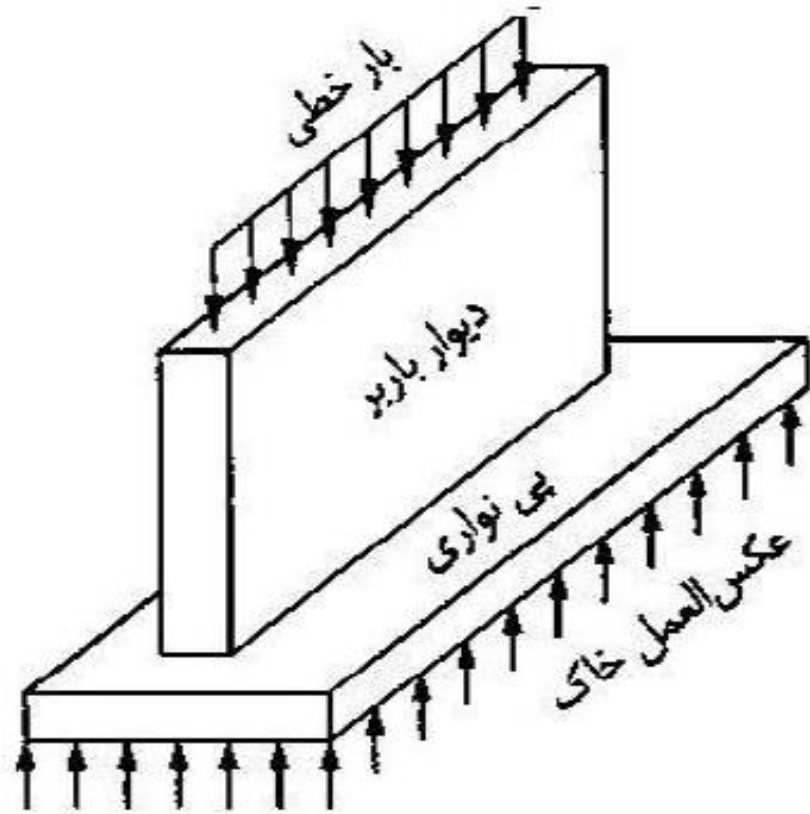


پی مرکب مستطیلی

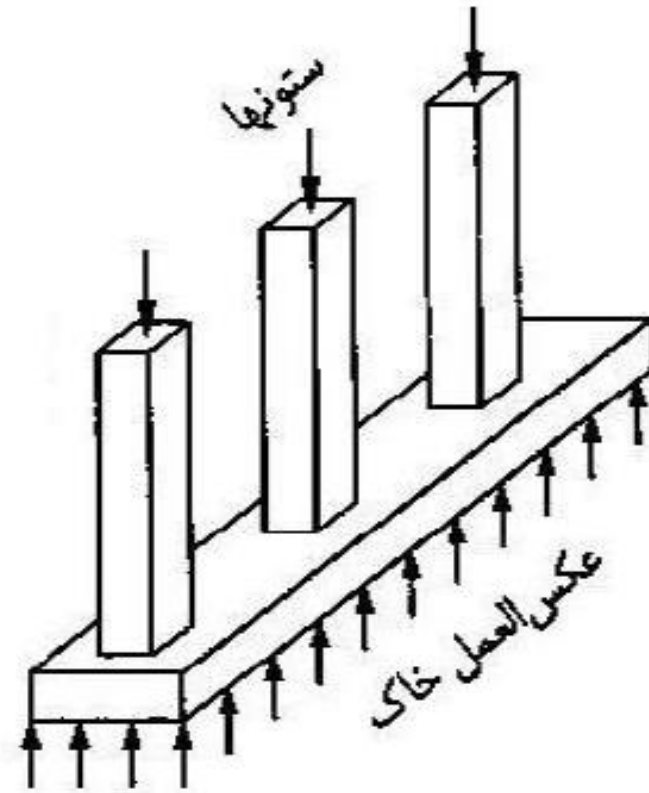


پی مرکب T شکل

۳- پی نواری strip or continuous footing : به پی زیر دیوار یا زیر ستونهایی که روی یک محور قرار دارند اطلاق می شود.

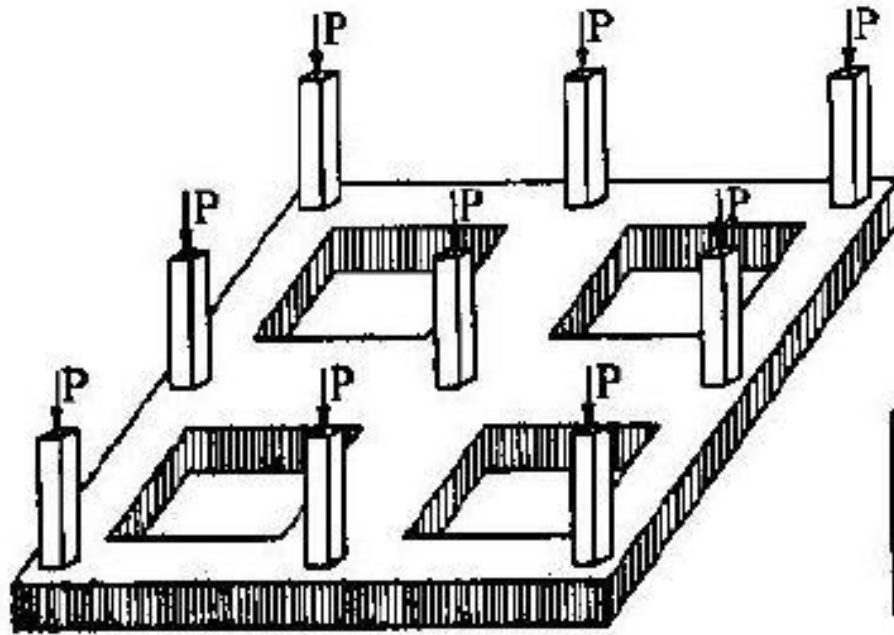


پی نواری زیر دیوار

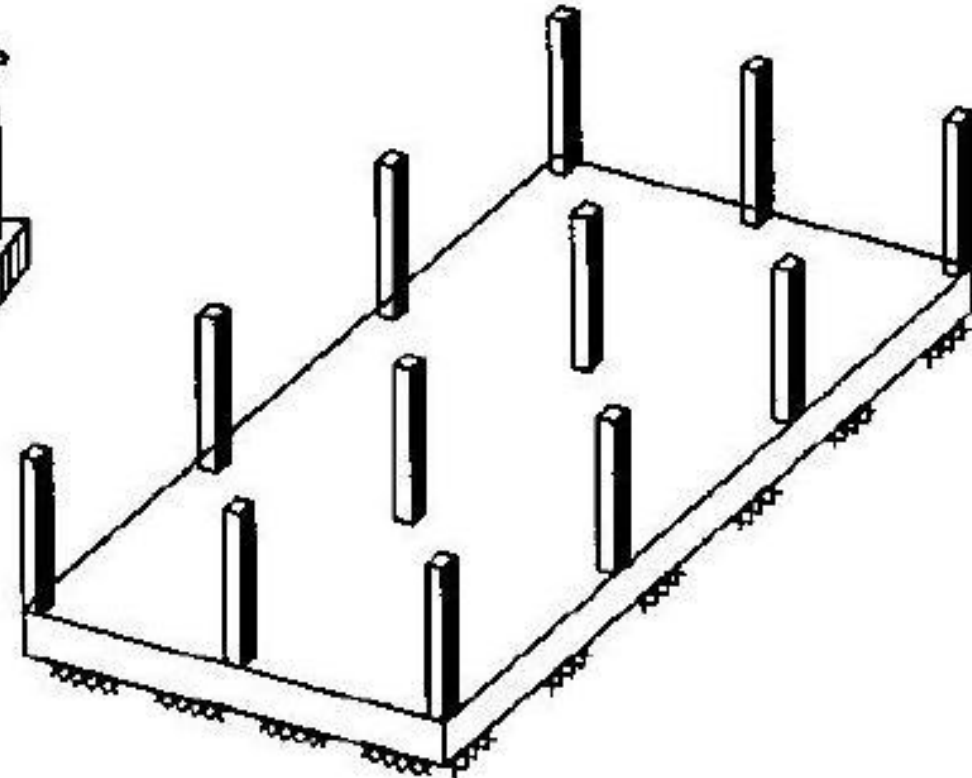


پی نواری زیر ستونهای یک محور

۴- پی گسترده raft or mat footing



پی تباری دوطرفه (پی شبکه ای)



پی گسترده

انتخاب نوع شالوده بستگی دارد به : مقدار بار ستونها، مقاومت خاک، نوع سازه و شرایط خاص دیگر.

ظرفیت باربری

Bearing Capacity

ظرفیت باربری شالوده های سطحی : حداکثر تنش که یک شالوده می تواند به خاک اعمال کند را ظرفیت باربری شالوده می نامند. یک شالوده سطحی Shallow Foundation وقتی دارای عملکرد صحیح است که تنش ایجاد شده در زیر آن به نحوی باشد که دو شرط زیر را برآورده نماید :

۱- گسیختگی برشی در خاک زیر شالوده ایجاد نکند.

۲- نشستهای بیشتر از مقدار مجاز در زیر شالوده رخ ندهد.

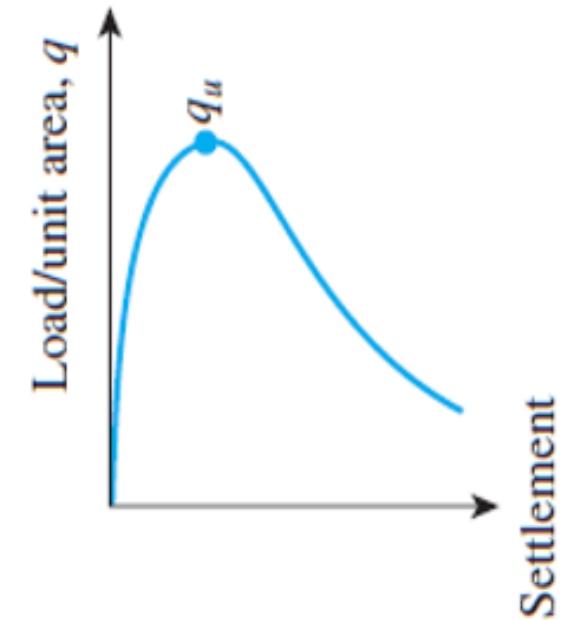
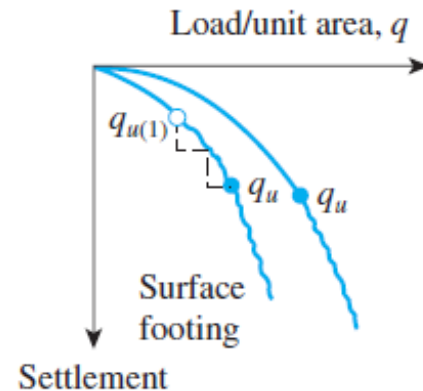
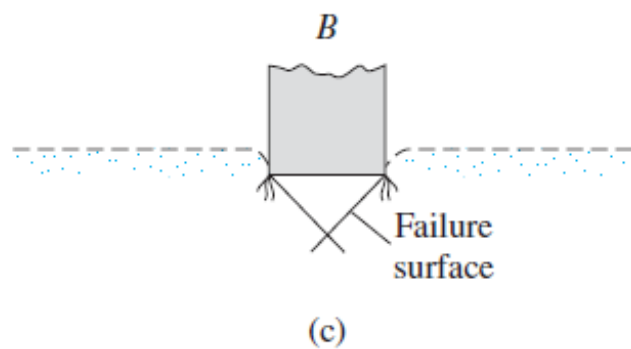
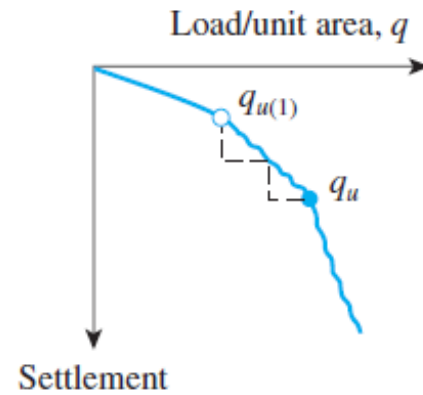
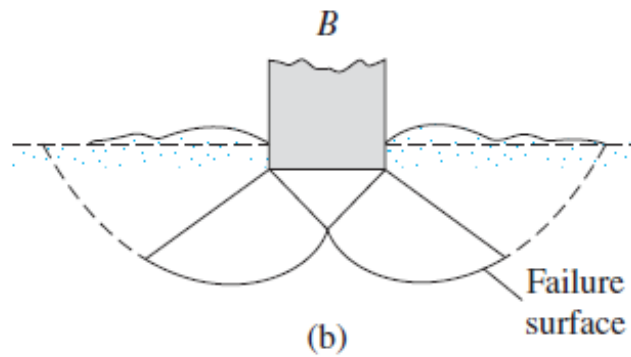
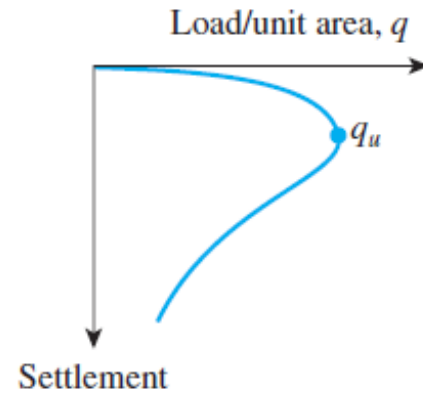
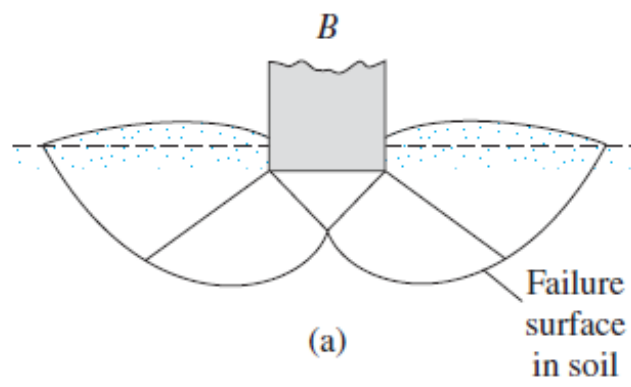
لازم به ذکر است که دو معیار فوق مستقل از هم بوده و باید جداگانه برای شالوده کنترل شود.

$$q_{max} \leq q_a = \min \left\{ \frac{q_u}{FS}, q_s \right\}$$

فصل سوم

فصل چهارم

ظرفیت باربری

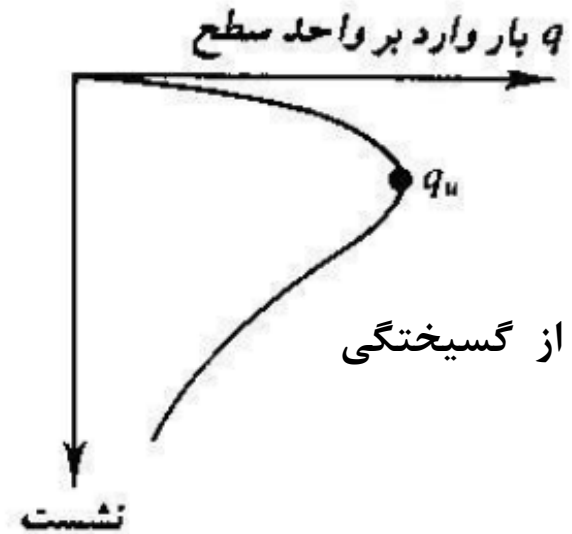
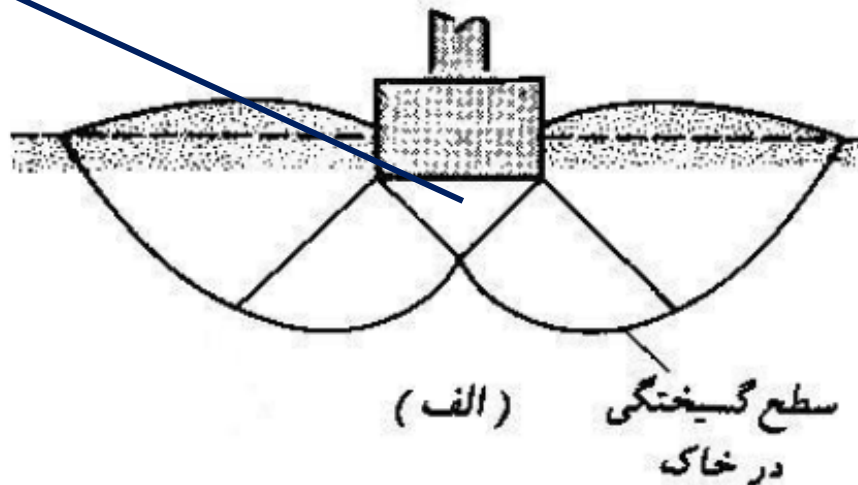


انواع گسیختگی برشی در خاک

(۱) گسیختگی برشی کلی general shear failure

شالوده نواری را در نظر بگیرید بر روی یک خاک ماسه ای متراکم یا خاک رسی چسبنده و سفت اگر بار به تدریج بر شالوده وارد شود نشست افزایش پیدا می کند در یک نقطه مشخص وقتی که فشار زیر شالوده مساوی q_u می باشد یک گسیختگی ناگهانی در خاک زیر شالوده رخ می دهد و سطح گسیختگی تا سطح زمین ادامه می یابد فشار q_u ظرفیت باربری نهایی شالوده سطحی نامیده می شود.

مثل میخ یا تبر به داخل خاک فرو می رود و خاک های نزدیک خود را به اطراف فشرده می سازد.

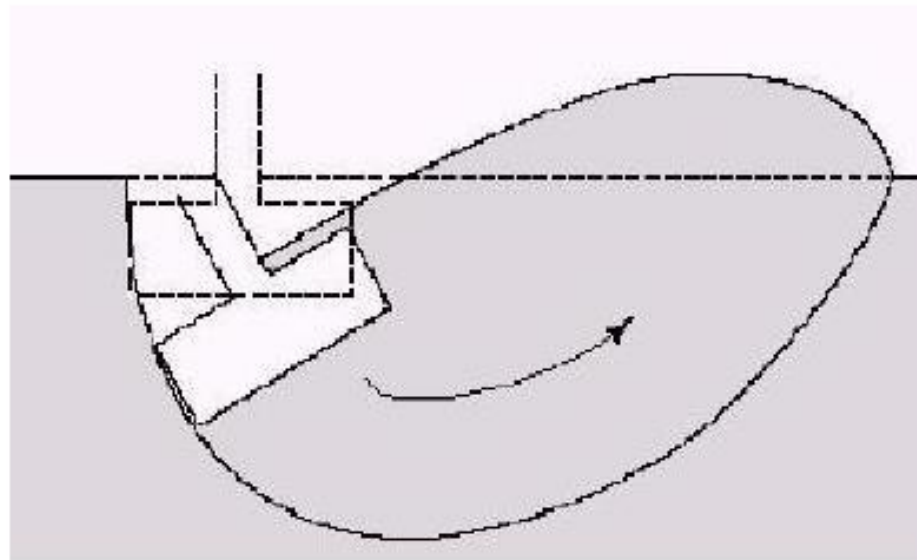


نشست تا قبل از گسیختگی کم است.

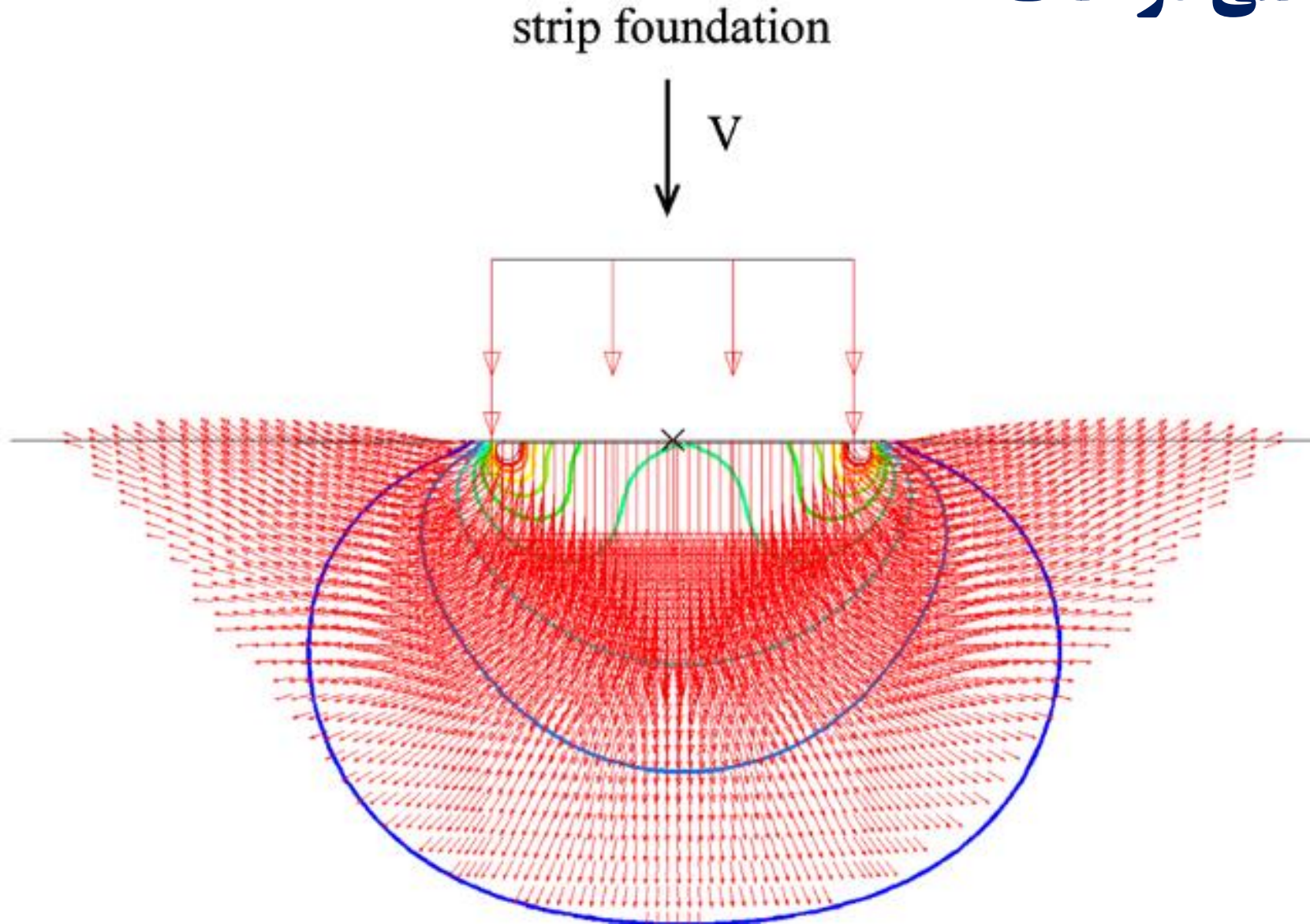
انواع گسیختگی برشی در خاک

(۱) گسیختگی برشی کلی general shear failure

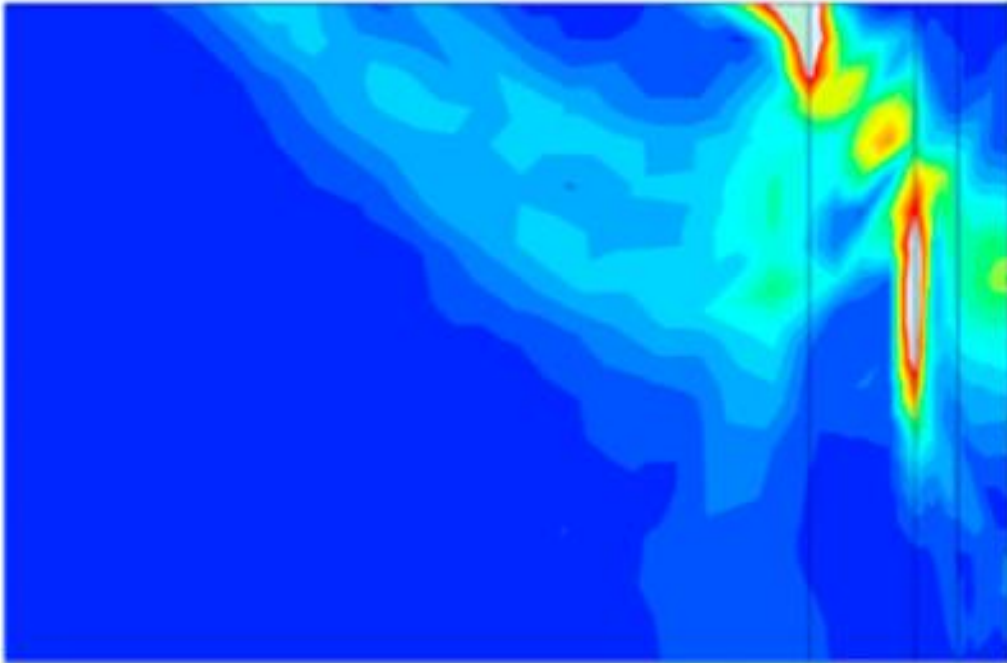
این گسیختگی در خاک های خیلی متراکم رخ می دهد (در خاک ماسه ای متراکم یا رس سخت) که در آن خاک دو طرف بالا آمده اما در نهایت سطح لغزش و چرخش پی در یک طرف رخ می دهد



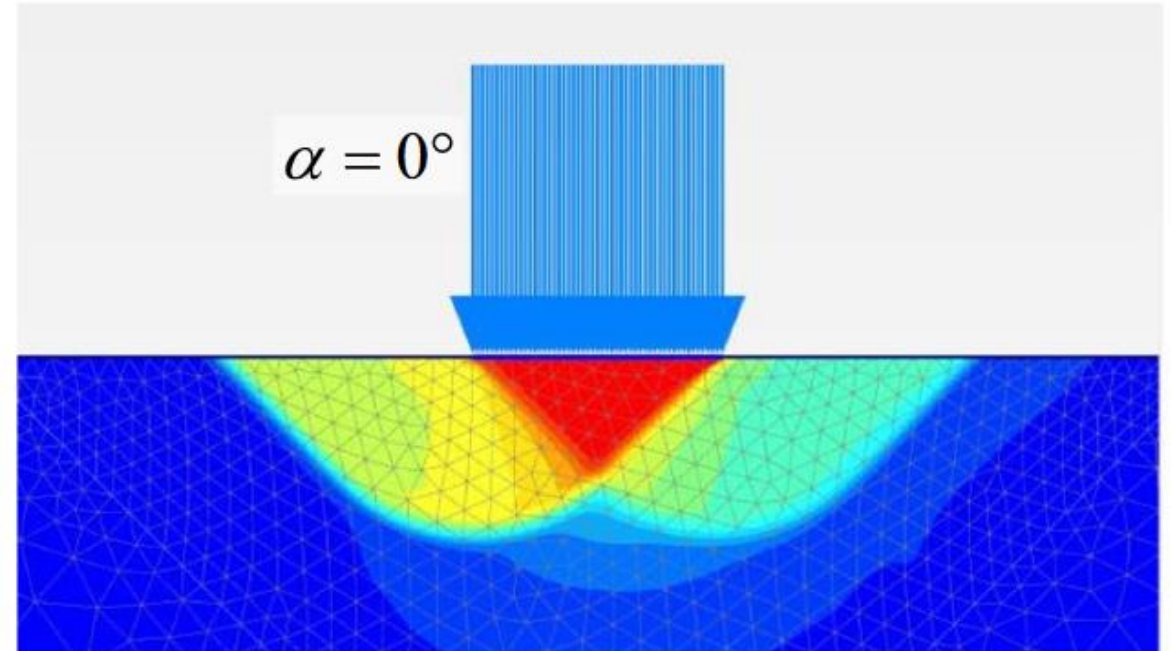
نواحی گسیختگی برشی کلی در خاک



نواحی گسیختگی برشی کلی در خاک



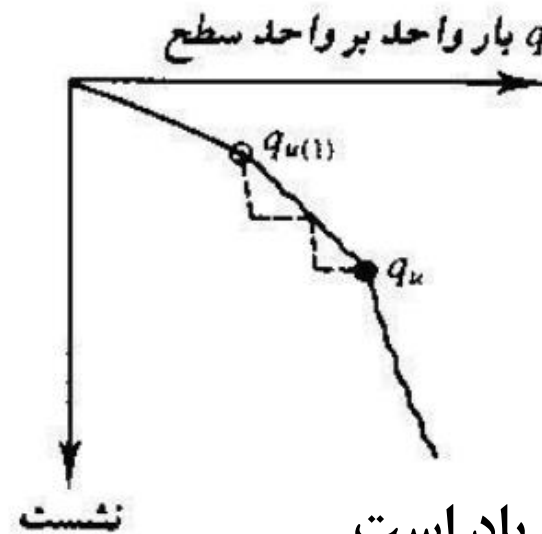
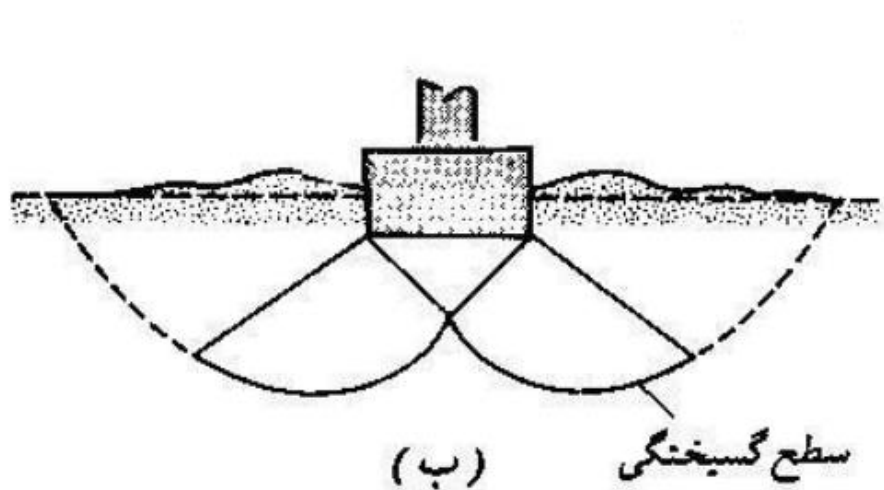
(a) General failure (named G)



انواع گسیختگی برشی در خاک

(۲) گسیختگی برشی موضعی local shear failure

این گسیختگی در خاک های ماسه ای با تراکم متوسط و در رس با سفتی متوسط رخ می دهد در این حالت چرخش در پی صورت نمی گیرد و میزان بالا آمدگی خاک طرفین کمتر است به دلیل تراکم متوسط خاک، پی راحت تر در خاک زیرین فرو رفته و خاکهای اطراف را فشرده می کند.

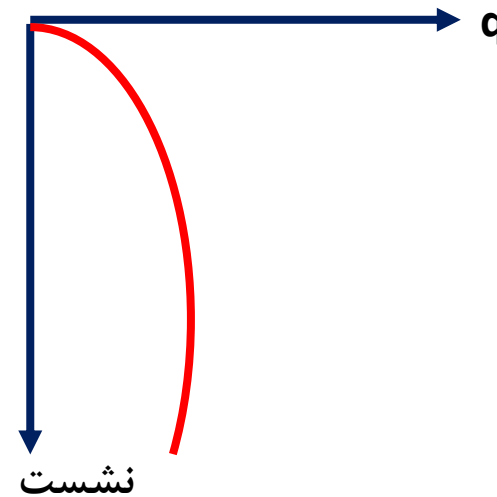
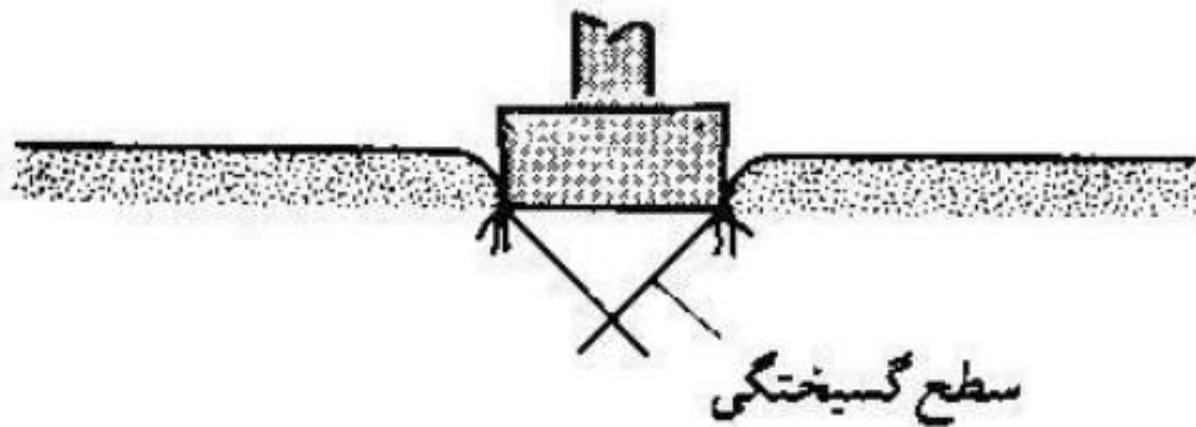


نشست از همان ابتدای بارگذاری نسبتاً زیاد است.

انواع گسیختگی برشی در خاک

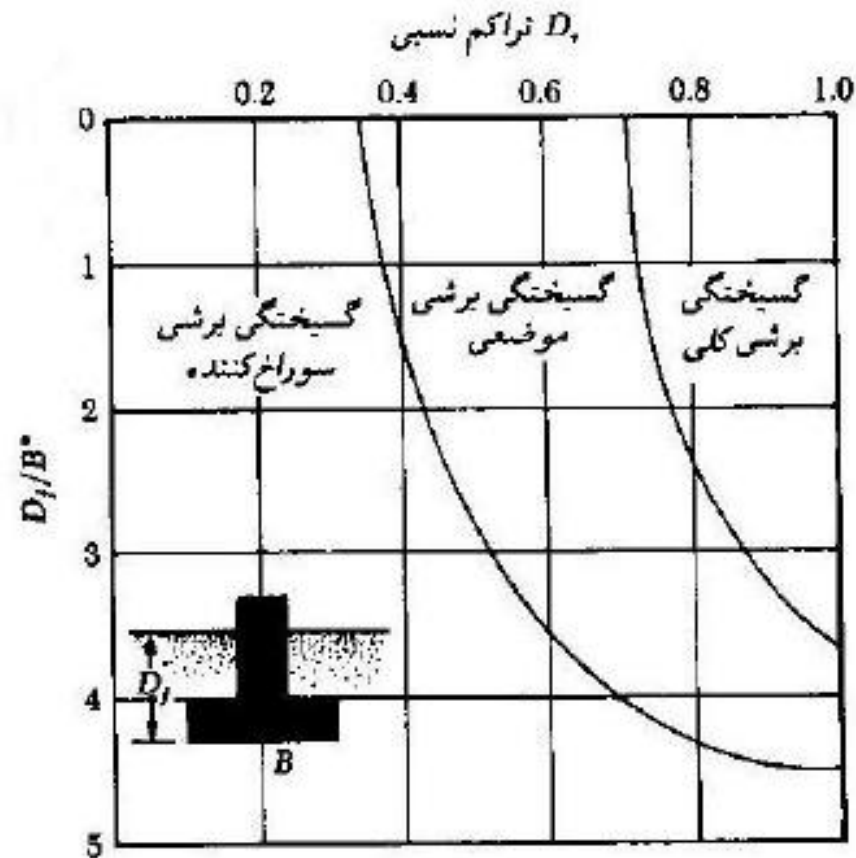
۳) گسیختگی برشی منگنه ای (سوراخ کننده) **punching shear failure**

این گسیختگی در خاک های بسیار سست و نرم (مانند لجن) پیش می آید. در این گسیختگی پی با بارهای کم، نشست چشمگیری می کند و از اینرو، در چنین خاکهایی به جای پی های سطحی از پی های عمیق استفاده می شود.



انواع گسیختگی برشی در خاک

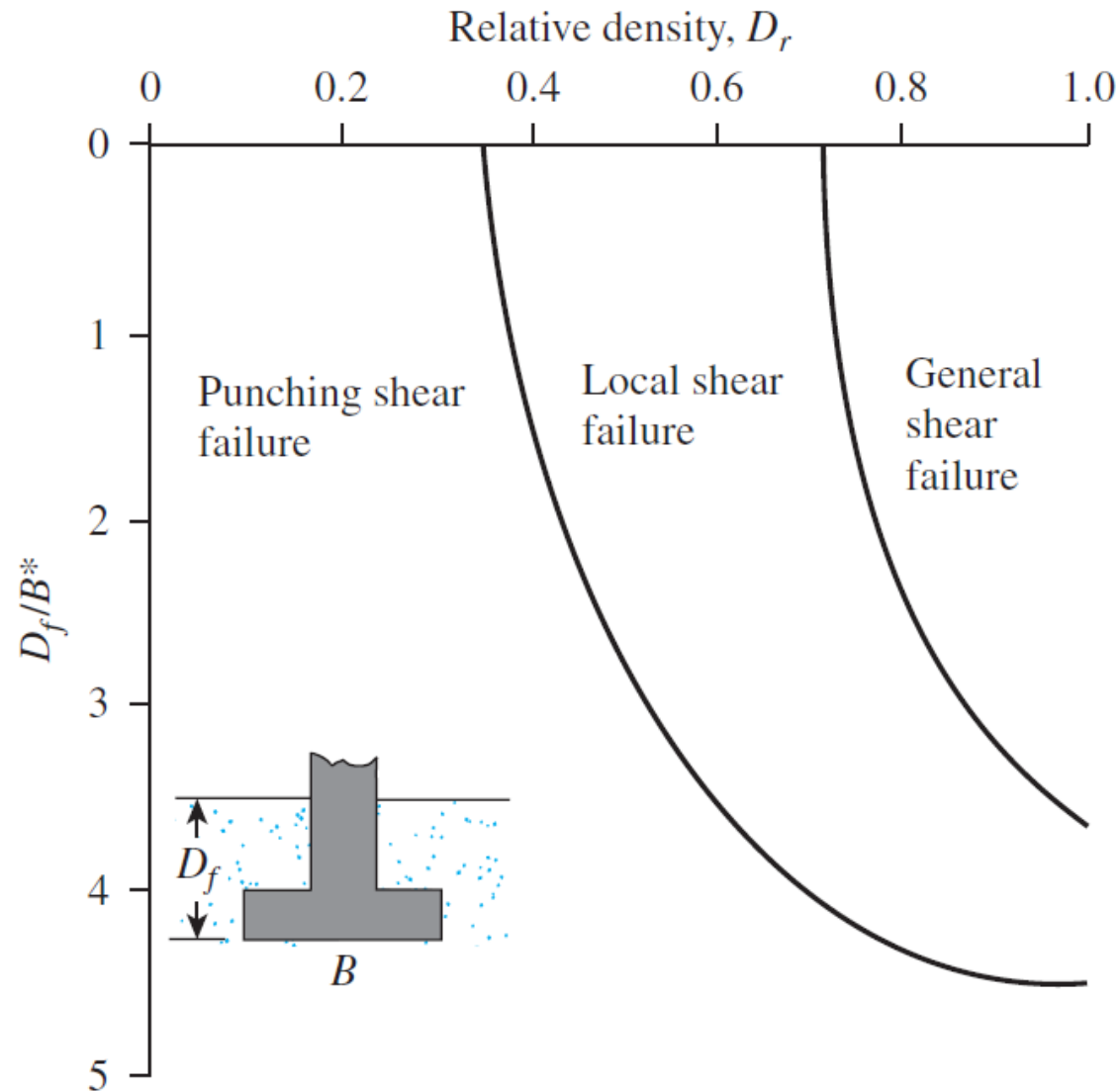
بر پایه نتایج تجربی وسیک (۱۹۷۳) رابطه ای برای نوع گسیختگی برشی در شالوده های متکی بر ماسه پیشنهاد کرد. نوع گسیختگی محتمل به میزان فشردگی (تراکم) خاک و به نسبت عمق قرارگیری پی به عرض آن بستگی دارد.



$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad \text{نسبی تراکم}$$

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

انواع گسیختگی برشی در خاک



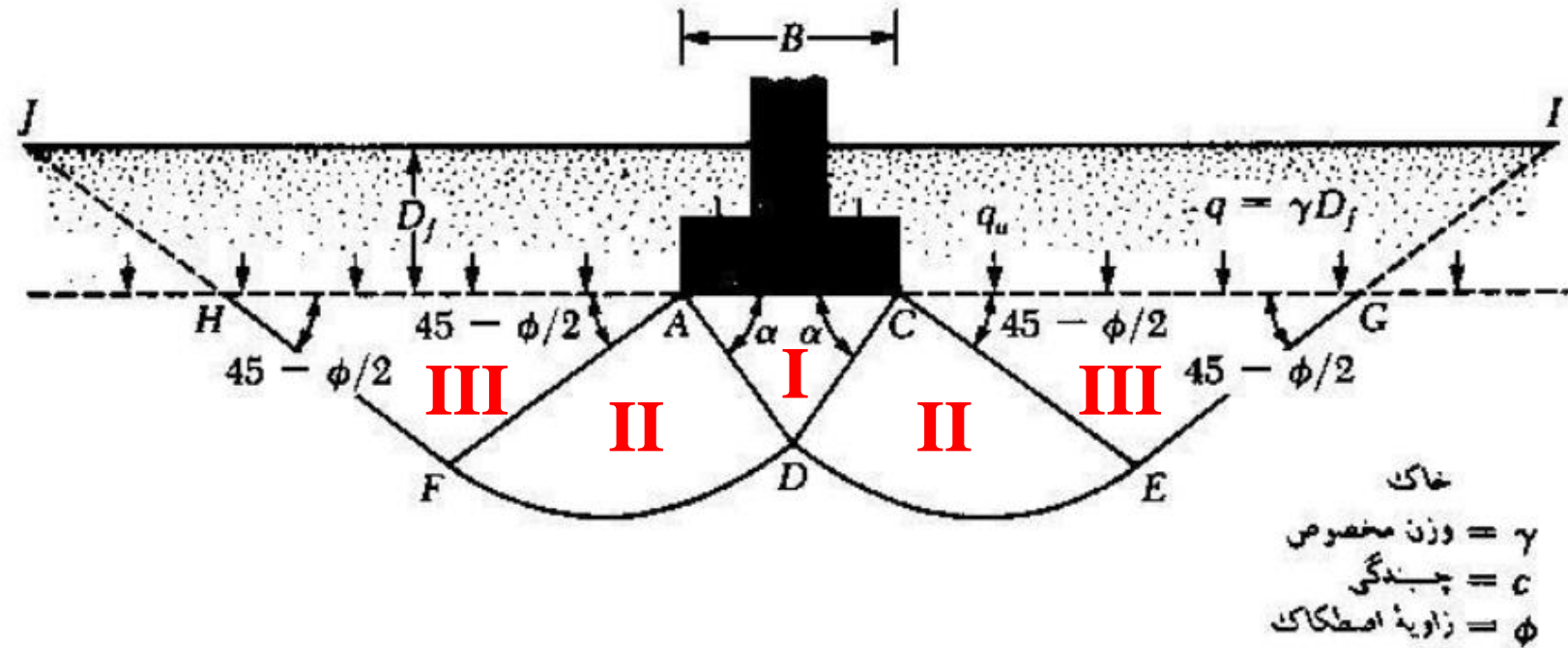
انواع گسیختگی برشی در خاک

✓ در حالت **گسیختگی برشی کلی**، بار نهایی در نشست در حدود ۴ تا ۱۰ درصد عرض شالوده (B) رخ می دهد.

✓ در حالت **گسیختگی برشی موضعی و سوراخ کننده**، بار نهایی در نشست در حدود ۱۵ تا ۲۵ درصد عرض شالوده (B) رخ می دهد.

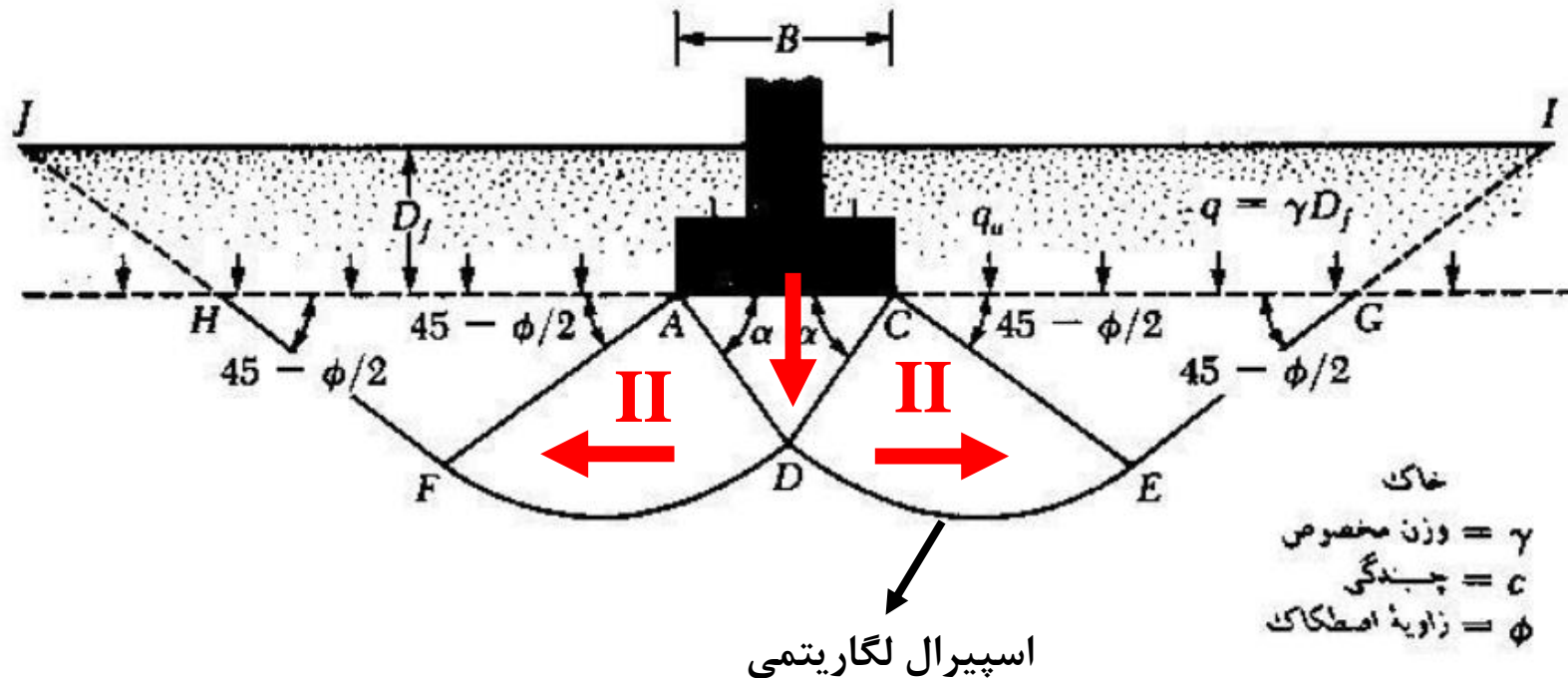
✓ از آنجا که خاک زیر پی معمولاً سفت و متراکم است (و در صورت سست یا نرم بودن به نحوی متراکم و یا تثبیت می شود) بنابراین در تعیین ظرفیت باربری عمدتاً گسیختگی از نوع **گسیختگی برشی کلی** فرض می شود.

نواحی گسیختگی برشی کلی در خاک



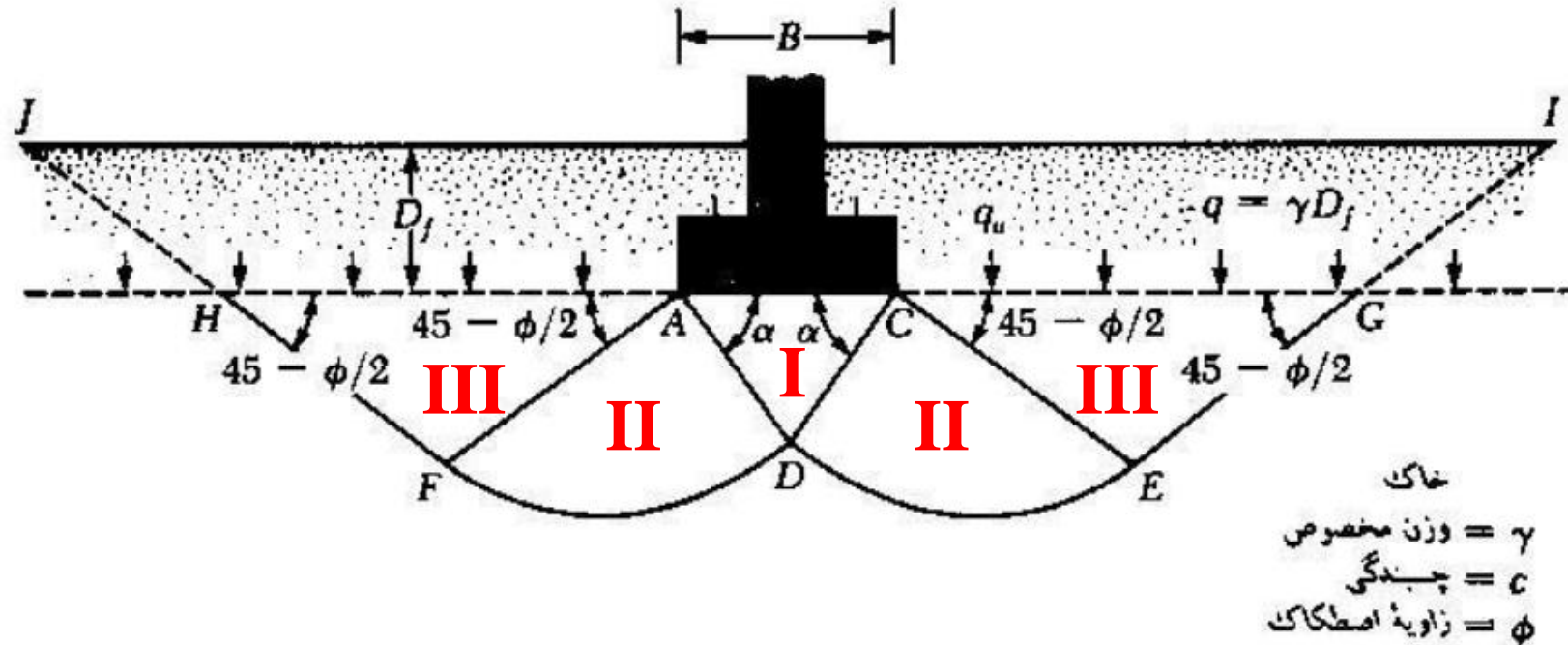
نواحی گسیختگی برشی کلی در خاک

ناحیه II: نواحی برشی شعاعی با سطوح گسیختگی DF و DE که با حرکت بخش I به سمت پایین، این نواحی به حالت حدی مقاوم (Passive) رسیده و به طرفین حرکت می کنند. بخشی از سطح گسیختگی در این نواحی به صورت اسپیرال لگاریتمی و در حالت $\phi=0$ به صورت دایره ای است.



نواحی گسیختگی برشی کلی در خاک

در گسیختگی برشی کلی هر سه ناحیه I و II و III تشکیل می شوند. در حالیکه در گسیختگی برشی موضعی تنها نواحی I و II و در گسیختگی برشی سوراخ کننده فقط ناحیه I تشکیل می شود.



معادلات ظرفیت باربری



Terzaghi

۱- ترزاقی ۱۹۴۳



Meyerhof

۲- میرهوف ۱۹۵۱

Hansen

۳- هنسن ۱۹۷۰



Vesic

۴- وِسیک ۱۹۷۳

معادلات ظرفیت باربری

TERZAGHI, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*, Wiley, New York.

MEYERHOF, G. G. (1953). "The Bearing Capacity of Foundations Under Eccentric and Inclined Loads," *Proceedings, Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zürich, Vol. 1, pp. 440–445.

MEYERHOF, G. G. (1963). "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 16–26.

HANSEN, J. B. (1970). *A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity*, Bulletin 28, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen.

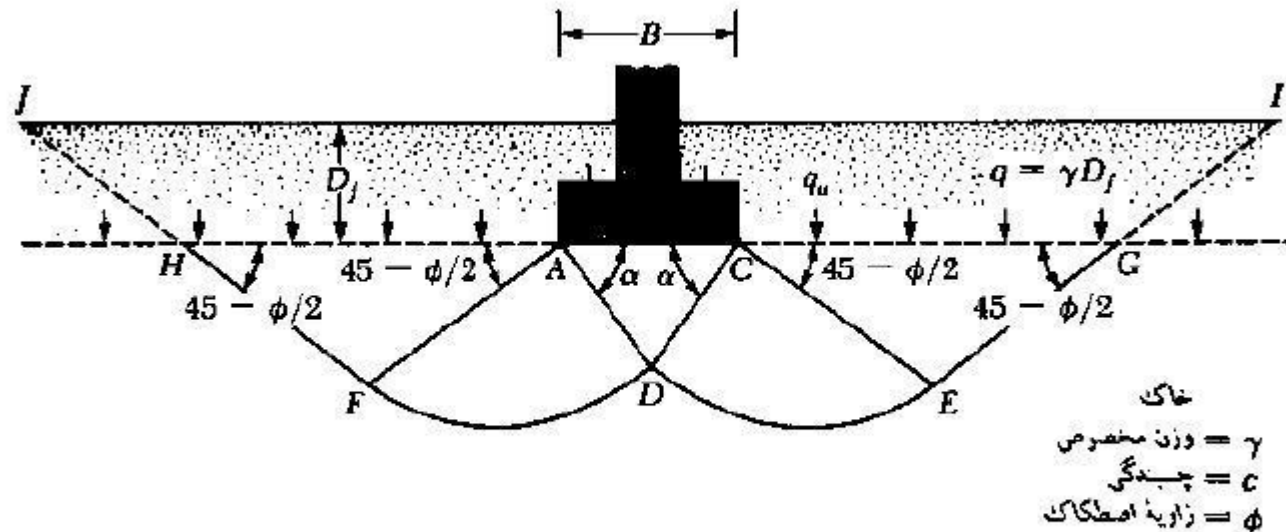
VESIC, A. S. (1973). "Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 99, No. SM1, pp. 45–73.

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

ترزاقی با لحاظ فرضیات زیر، رابطه ای برای تعیین ظرفیت باربری به دست آورد.

فرضیات ترزاقی

- ✓ گسیختگی برشی کلی در زیر شالوده رخ می دهد.
- ✓ طول شالوده زیاد است (شالوده نواری بوده و شرایط کرنش مسطح برقرار است)
- ✓ عمق شالوده کمتر یا مساوی عرض آن است ($D_f \leq B$) است



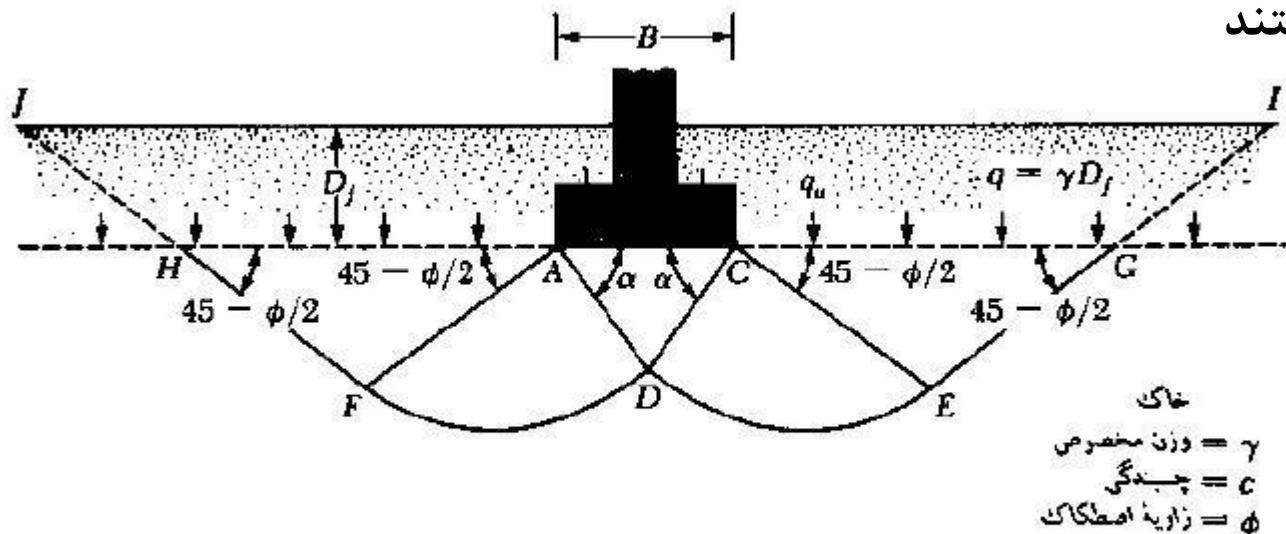
گسیختگی برشی در باربری نهایی یک شالوده نواری صلب با سطح تماس زیر

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

ترزاقی با لحاظ فرضیات زیر، رابطه ای برای تعیین ظرفیت باربری به دست آورد.

فرضیات ترزاقی

- ✓ خاک موجود در بالای سطح زیرین شالوده را با سرباری برابر $q = \gamma D_f$ جایگزین کرد.
- ✓ مقاومت برشی خاک در امتداد خطوط گسیختگی GI و HJ در جهت اطمینان نادیده گرفته می شود
- ✓ DE و DF قسمتی از نمودار اسپیرال لگاریتمی هستند



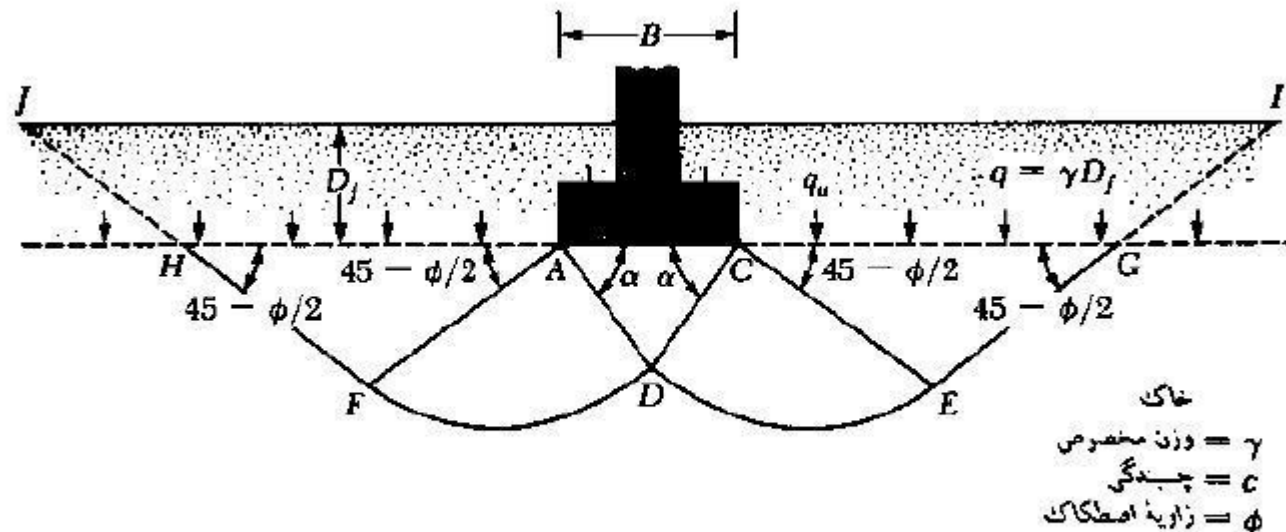
گسیختگی برشی در باربری نهایی یک شالوده نواری صلب با سطح تماس زیر

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

ترزاقی با لحاظ فرضیات زیر، رابطه ای برای تعیین ظرفیت باربری به دست آورد.

فرضیات ترزاقی

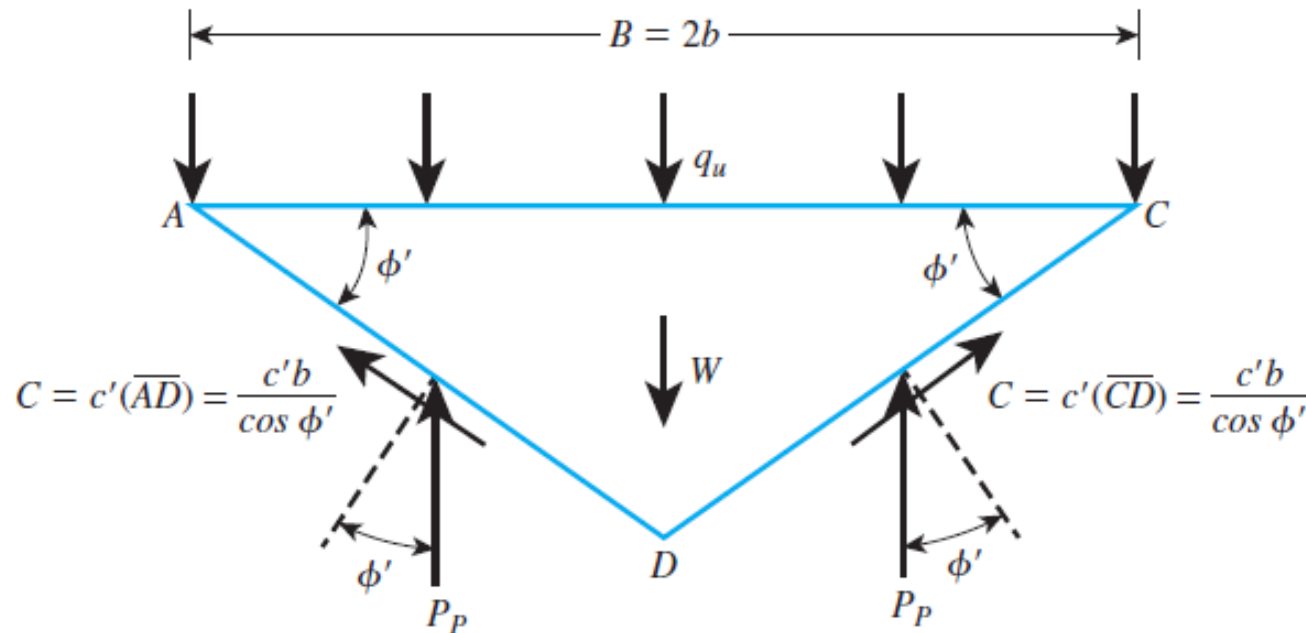
- ✓ نواحی AFH و CEG دو ناحیه مقاوم رانکین می باشند. (به همین دلیل زاویه گسیختگی برابر با $45 - \phi/2$ است).
- ✓ زاویه α مساوی زاویه اصطکاک داخلی خاک پی (ϕ) است.



گسیختگی برشی در باربری نهایی یک شالوده نواری صلب با سطح تماس زیر

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

The ultimate bearing capacity, q_u , of the foundation now can be obtained by considering the equilibrium of the triangular wedge ACD shown in Figure 4.6. This is shown on

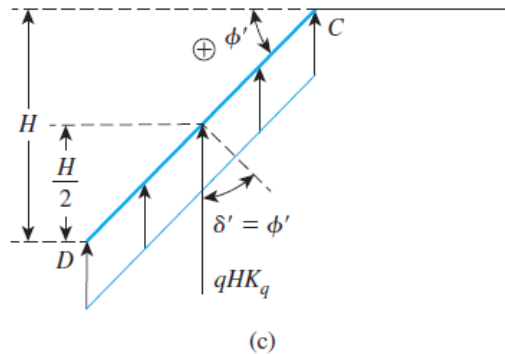
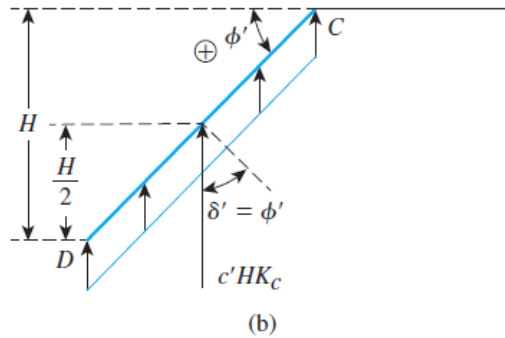
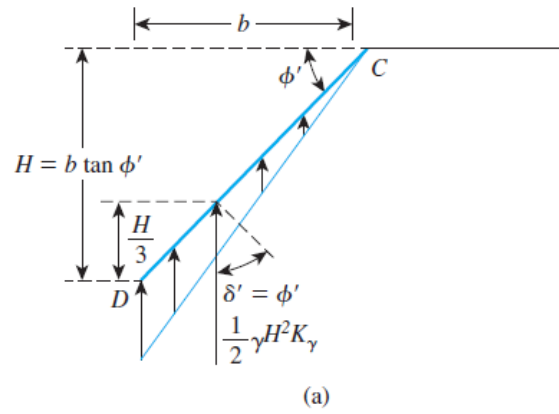


$$(q_u)(2b)(1) = -W + 2C \sin \phi' + 2P_p$$

$$2bq_u = 2P_p + 2bc' \tan \phi' - \gamma b^2 \tan \phi'$$

$$q_u = \frac{P_p}{b} + c' \tan \phi' - \frac{\gamma b}{2} \tan \phi'$$

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی



Note: $H = b \tan \phi'$

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_\gamma + c' H K_c + q H K_q$$

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma (b \tan \phi')^2 K_\gamma + c' (b \tan \phi') K_c + q (b \tan \phi') K_q$$

Figure 4.8 Passive force distribution on the wedge face CD shown in Figure 4.7:
 (a) contribution of soil weight γ ;
 (b) contribution of cohesion c' ;
 (c) contribution of surcharge q .

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

معادله ظرفیت باربری ترزاقی از تعادل نیروهای قائم روی گوه ADC به صورت زیر به دست می آید.

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

معادله ظرفیت باربری ترزاقی

عبارت اول در رابطه فوق عبارت چسبندگی عبارت دوم سربار ناشی از قرارگیری در عمق و عبارت سوم عبارت وزن مخصوص خاک می باشد.

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

Ultimate Bearing Capacity

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

q_u : ظرفیت باربری نهایی خاک

q : سربار خاک در تراز کف شالوده ($q=\gamma D_f$)

γ : وزن مخصوص خاک پی

c : چسبندگی خاک پی

B : عرض شالوده

N_c, N_q, N_γ ضرایب بدون بعد ظرفیت باربری

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

N_c, N_q, N_γ ضرایب ظرفیت باربری بدون بعد می باشند که فقط تابعی از ϕ (زاویه اصطکاک داخلی خاک) می باشند

$$N_q = \frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)\tan\phi}}{2\cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)}$$

$$N_c = \cot\phi \left[\frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)\tan\phi}}{2\cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)} - 1 \right] = \cot\phi [N_q - 1]$$

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

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \tan\phi' (K_\gamma \tan\phi' - 1)$$

در روابط بالا ϕ به رادیان است.

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

Bearing-capacity factors for the Terzaghi equations

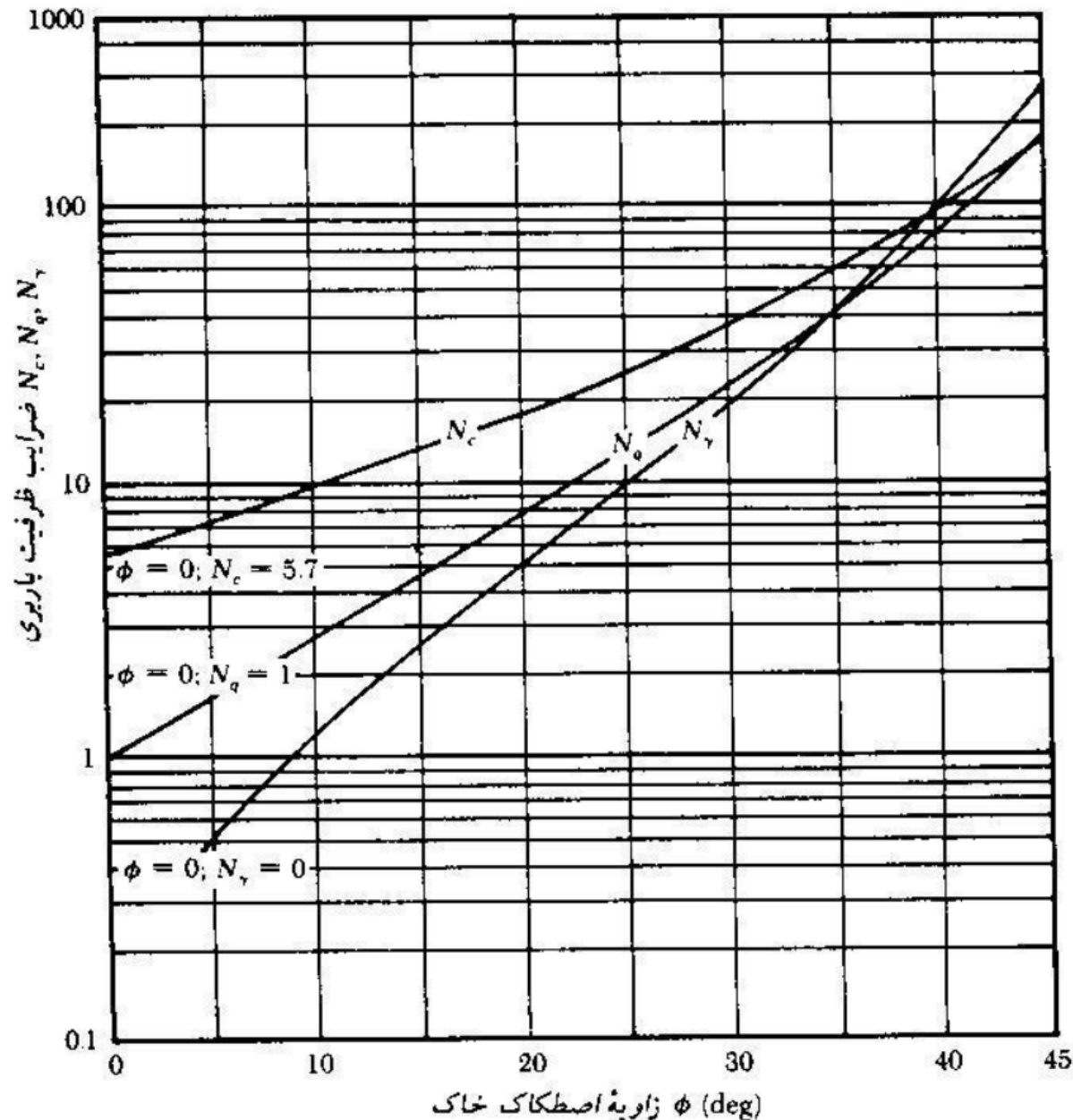
Values of N_γ for ϕ of 0, 34, and 48° are original Terzaghi values and used to back-compute $K_{p\gamma}$

ϕ , deg	N_c	N_q	N_γ	$K_{p\gamma}$
0	5.7*	1.0	0.0	10.8
5	7.3	1.6	0.5	12.2
10	9.6	2.7	1.2	14.7
15	12.9	4.4	2.5	18.6
20	17.7	7.4	5.0	25.0
25	25.1	12.7	9.7	35.0
30	37.2	22.5	19.7	52.0
34	52.6	36.5	36.0	
35	57.8	41.4	42.4	82.0
40	95.7	81.3	100.4	141.0
45	172.3	173.3	297.5	298.0
48	258.3	287.9	780.1	
50	347.5	415.1	1153.2	800.0

* $N_c = 1.5\pi + 1$. [See Terzaghi (1943), p. 127.]

$$K_{p\gamma} = 3. \tan^2 \left(45 + \left(\frac{\phi + 33}{2} \right) \right)$$

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی



ضرایب ظرفیت باربری ترزاقی برای گسیختگی برشی کلی

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

رابطه فوق برای شالوده نواری است $L \gg B$ که در آن در حین گسیختگی، گوه خاک زیر شالوده تشکیل می شود اما در حالتی که شالوده مربعی یا دایره ای باشد مسئله از حالت دو بعدی خارج شده و به صورت سه بعدی در می آید و گوه تبدیل به یک هرم یا مخروط می گردد. در این حالت ترزاقی رابطه خود را به شکل زیر اصلاح می کند:

$$q_u = 1.3 c N_c + q N_q + 0.4 \gamma B N_\gamma \quad \text{فونداسیون مربعی (B \times B)}$$

$$q_u = 1.3 c N_c + q N_q + 0.3 \gamma B N_\gamma \quad \text{فونداسیون دایره ای (B = قطر)}$$

$$q_u = \left(1 + 0.3 \frac{B}{L}\right) c N_c + q N_q + \left(1 - 0.2 \frac{B}{L}\right) \times 0.5 \gamma B N_\gamma \quad \text{فونداسیون مستطیلی (B \times L)}$$

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

رابطه کلی ترزاقی برای همه انواع پی:

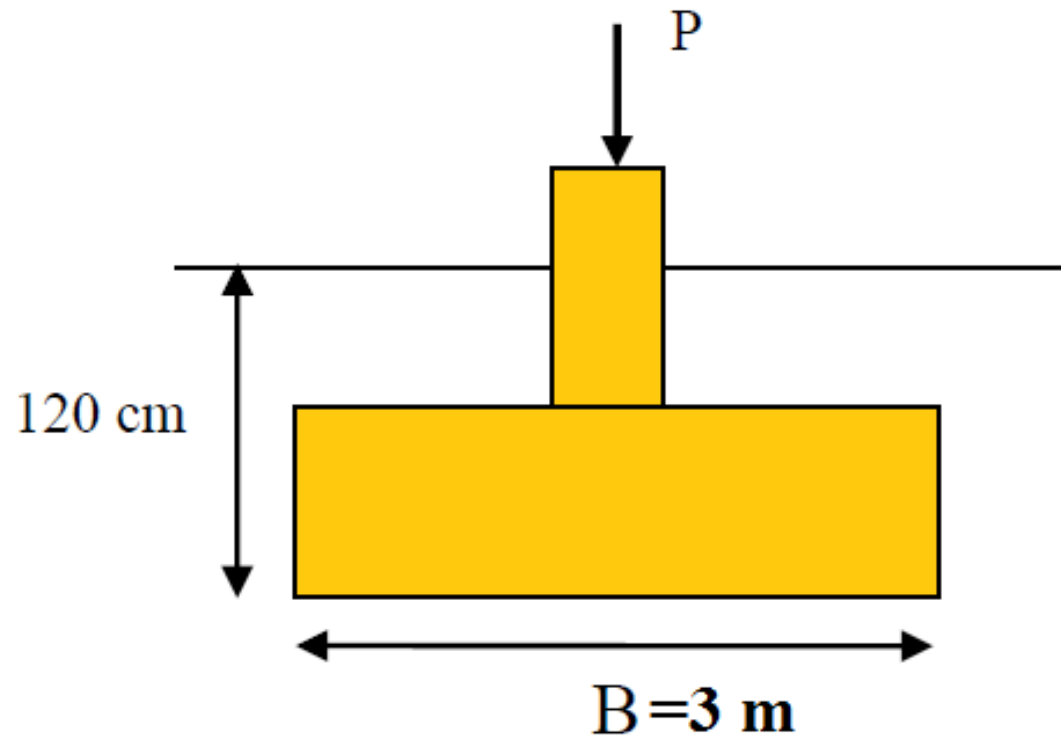
$$q_u = cN_c s_c + qN_q + 0.5\gamma B N_\gamma s_\gamma$$

ضرایب s_c و s_γ ضرایب شکل پی بوده و طبق جدول زیر برای پی های مختلف تعیین می شود:

نوع پی	s_c	s_γ
نواری	1	1
مربعی	1.3	0.8
دایره ای	1.3	0.6
مستطیلی	$1+0.3B/L$	$1-0.2B/L$

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

مثال ظرفیت باربری نهایی (q_u) را با استفاده از روش ترزاقی برای پی مربعی نشان داده محاسبه کنید.



$$\gamma = 17.3 \text{ kN/m}^3$$

$$\phi = 20^\circ$$

$$C = 20 \text{ kPa}$$

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

مثال ظرفیت باربری نهایی (q_u) را با استفاده از روش ترزاقی برای پی مربعی نشان داده محاسبه کنید.

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma$$

اگر شالوده مربعی باشد

$$\varphi = 20^\circ \longrightarrow N_c = 17.7 \quad N_q = 7.4 \quad N_\gamma = 5.0$$

$$q_{ult} = (1.3 * 20 * 17.7) + (1.2 * 17.3) * 7.4 + 0.4 * 17.3 * 3 * 5$$

$$q_{ult} = 717.6 \text{ kPa} \quad Q_{ult} = 717.6 \text{ kPa} * 3 * 3 \text{ m}^2 = 6458.4 \text{ kN} = 645.84 \text{ Ton}$$

نظریه ظرفیت باربری ترزاقی

Example 4.1

A square foundation is $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ in plan. The soil supporting the foundation has a friction angle of $\phi' = 25^\circ$ and $c' = 20\text{ kN/m}^2$. The unit weight of soil, γ , is 16.5 kN/m^3 . Determine the allowable gross load on the foundation with a factor of safety (FS) of 3. Assume that the depth of the foundation (D_f) is 1.5 m and that general shear failure occurs in the soil.

Solution

From Eq. (4.17)

$$q_u = 1.3c'N_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma$$

From Table 4.1, for $\phi' = 25^\circ$,

$$N_c = 25.13$$

$$N_q = 12.72$$

$$N_\gamma = 8.34$$

Thus,

$$\begin{aligned} q_u &= (1.3)(20)(25.13) + (1.5 \times 16.5)(12.72) + (0.4)(16.5)(2)(8.34) \\ &= 653.38 + 314.82 + 110.09 = 1078.29 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

So, the allowable load per unit area of the foundation is

$$q_{\text{all}} = \frac{q_u}{\text{FS}} = \frac{1078.29}{3} \approx 359.5 \text{ kN/m}^2$$

Thus, the total allowable gross load is

$$Q = (359.5) B^2 = (359.5) (2 \times 2) = 1438 \text{ kN}$$



Example 4.2

Refer to Example 4.1. Assume that the shear-strength parameters of the soil are the same. A square foundation measuring $B \times B$ will be subjected to an allowable gross load of 1000 kN with $FS = 3$ and $D_f = 1$ m. Determine the size B of the foundation.

Solution

Allowable gross load $Q = 1000$ kN with $FS = 3$. Hence, the ultimate gross load $Q_u = (Q)(FS) = (1000)(3) = 3000$ kN. So,

$$q_u = \frac{Q_u}{B^2} = \frac{3000}{B^2} \quad (a)$$

$$q_u = 1.3c'N_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma$$

For $\phi' = 25^\circ$, $N_c = 25.13$, $N_q = 12.72$, and $N_\gamma = 8.34$.

Also,

$$q = \gamma D_f = (16.5)(1) = 16.5 \text{ kN/m}^2$$

Now,

$$\begin{aligned} q_u &= (1.3)(20)(25.13) + (16.5)(12.72) + (0.4)(16.5)(B)(8.34) \\ &= 863.26 + 55.04B \end{aligned} \quad (b)$$

Combining Eqs. (a) and (b),

$$\frac{3000}{B^2} = 863.26 + 55.04B \quad (c)$$

By trial and error, we have

$$B = 1.77 \text{ m} \approx 1.8 \text{ m}$$

