



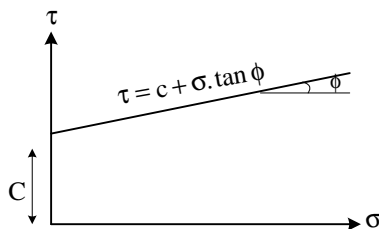
# مکانیک خاک



## مقاومت برشی خاک

طبق نظریه مور-کولمب، ترکیبی بحرانی از تنش قائم و برشی حداکثر باعث گسیختگی خاک می شود.

$$\tau = C + \sigma \tan \phi$$



$\tau$ : تنش برشی

$\sigma$ : تنش قائم در صفحه گسیختگی

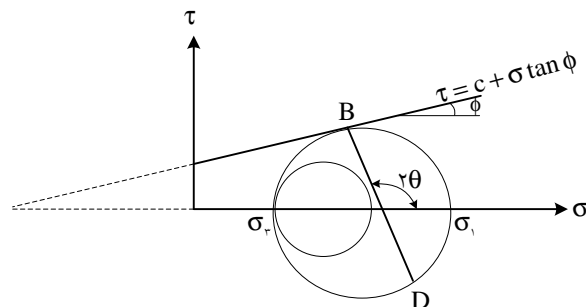
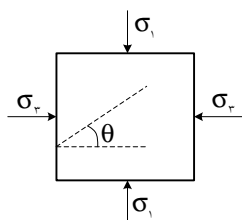
$\phi$ : زاویه اصطکاک داخلی

$C$ : چسبندگی

$c$  زهکشی شده برای ماسه، لای غیر آلی و رس عادی تحکیم یافته برابر صفر و برای رس پیش تحکیم یافته بزرگتر از صفر است.

$\phi$  زهکشی شده برای خاک های رسی معمولاً با افزایش نشانه خمیری کاهش می یابد.

## تنش های اصلی و گسیختگی خاک:



$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \cos 2\theta \quad \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \sin 2\theta$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \theta + 2c \cdot \tan \theta \quad \sigma_1 = \sigma_3 \cdot \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \cdot \tan \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

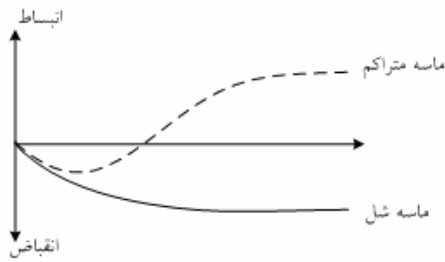
## آزمایش مقاومت برشی:

۱- آزمایش برش مستقیم: این آزمایش در دو حالت زهکشی شده (کند) و زهکشی نشده (تند) انجام می گیرد. تنش قائم و تنش برشی در صفحه گسیختگی (صفحه افقی در امتداد شکاف بین دو جعبه برشی) به صورت زیر محاسبه می شود.

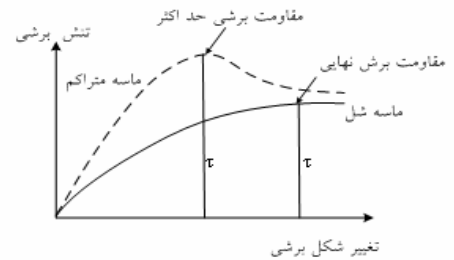
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \tau = \frac{T}{A}$$

$A$ : سطح مقطع نمونه

آزمایش برشی مستقیم می تواند با کنترل تنش و یا کنترل تغییر شکل باشد. در آزمایش با کنترل تغییر شکل بر روی ماسه متراکم، هم مقاومت برشی حداکثر و هم مقاومت برشی نهایی را می توان اندازه گیری کرد. ولی در آزمایش کنترل تنش، تنها مقاومت برشی حداکثر را می توان اندازه گیری نمود.



تغییرات ارتفاع نمونه



تغییر شکل برشی

۲- آزمایش برش سه محوری: این آزمایش برای تعیین مقاومت برشی خاک به کار می‌رود.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{F_d}{A} = \sigma_3 + \Delta\sigma_d$$

$F_d$ : نیروی محوری

$A$ : سطح مقطع نمونه

آزمایش سه محوری به سه صورت قابل اجراست.

۱- آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده (آزمایش CD)

۲- آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (آزمایش CU)

۳- آزمایش سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده (آزمایش UU)

آزمایش تحکیم یافته زهکشی شده (CD):

در ابتدای آزمایش:

$$\begin{cases} \sigma_3 = U_c & \text{اگر خاک اشباع باشد} \\ \sigma_3 = U_c + U_a \rightarrow \sigma_3 > U_c & \text{اگر خاک اشباع نباشد} \end{cases}$$

$$\frac{U_c}{\sigma_3} = B$$

$B$ : فشار آب حفره‌ای اسکمپتون

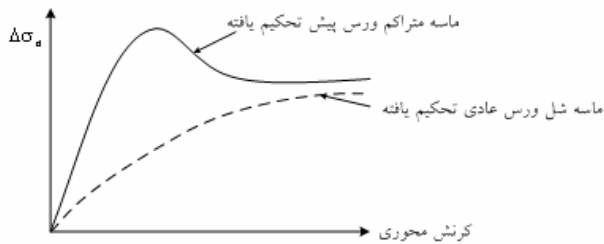
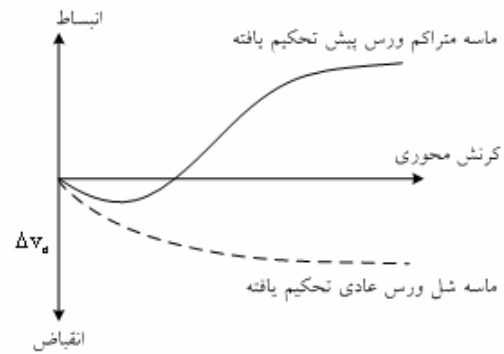
در پایان تحکیم  $U_c = 0$  شود و تنش انحرافی  $\Delta\sigma_d$  به نمونه وارد می‌شود تا تمام اضافه فشار آب حفره‌ای در پایان آزمایش به تنش موثر

تبدیل شود. اضافه فشار آب حفره‌ای در اثر اعمال  $\Delta\sigma_d$

$$\Delta\sigma_d = \Delta\sigma'_d$$

در پایان آزمایش:

$$\begin{cases} \sigma'_3 = \sigma_3 - u_c - \Delta u_d \\ \sigma'_1 = (\sigma_3 + \Delta\sigma_d) - (u_c + \Delta u_d) \end{cases}$$



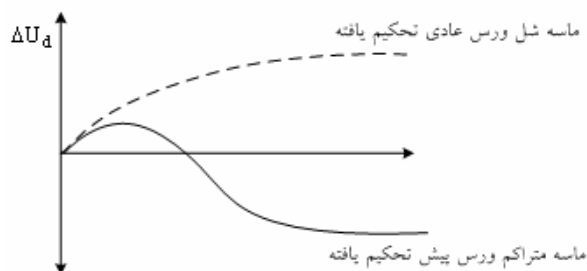
آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده (CU):

$$A = \frac{\Delta u_d}{\Delta \sigma_d} \quad \sigma'_1 = \sigma_1 - \Delta u_d \rightarrow \sigma_1 > \sigma'_1$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - \Delta u_d \rightarrow \sigma_3 > \sigma'_3$$

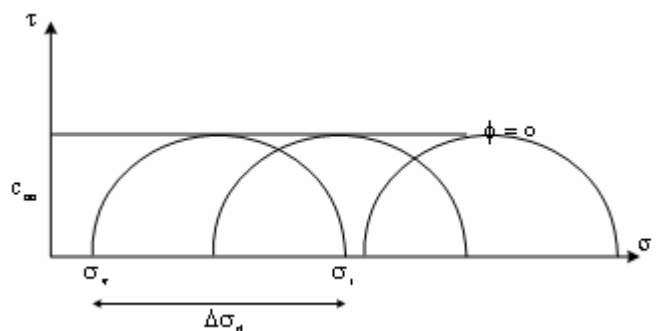
A: فشار حفره‌ای اسکمپتون

نمودار تغییرات تنش انحرافی  $\Delta \sigma_d$  در برابر کرنش محوری در آزمایش CU شبیه آزمایش CD است.



آزمایش تحکیم نیافته زهکشی شده (UU):

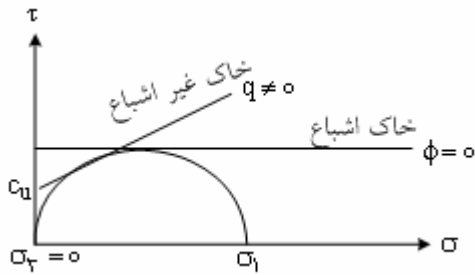
$$u = u_C + \Delta u_d, \quad \Delta u = B\sigma_3 + A\Delta \sigma_d$$



$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\Delta \sigma_d}{2} = C_{uu}$$

$C_{uu}$  مقاومت برشی زهکشی نشده

اگر در آزمایش uu بدون وارد کردن فشار محدود کننده  $\sigma_3$ ، تنش انحرافی  $\Delta \sigma_d$  را به نمونه وارد کنیم، به آن آزمایش فشاری محدود نشده می‌گوییم.



$q_u$ : مقاومت فشاری محدود نشده

$$C_u: \text{مقاومت برشی زهکشی نشده} \quad \tau = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = C_u$$

دقت شود در آزمایش  $uu$  اگر خاک غیر اشباع باشد  $\phi = 0$  است.

در آزمایش فشاری محدود نشده  $C_u$  به دست آمده برای خاک رس اشباع، قدری کمتر از  $C_u$  به دست آمده از آزمایش  $uu$  است، علت این امر فشار جانبی است که باعث بسته ماندن ترکها و افزایش مقدار  $C_u$  می شود.

در خاکهای رسی عادی تحکیم یافته، مقاومت برشی زهکشی نشده ( $C_u$ )، با افزایش فشار موثر سربار، افزایش می یابد و با وجود نشانه خمیری ( $PI$ ) و فشار موثر سربار ( $p$ ) به صورت زیر تعیین می گردد.  
 $PI$  (بر حسب درصد می باشد)

$$\frac{C_u}{p} = 0.11 + 0.0037PI$$

$$\frac{C_u}{p} = \frac{\text{بیش تحکیم یافته}}{\text{عادی تحکیم یافته}} = \frac{C_u}{p} \quad \text{نسبت پیش تحکیم (OCR)}$$

$$S_t = \frac{\text{دست نخورده}}{\text{دست خورده}} \quad \text{درجه حساسیت}$$

$$UU > CU > CD \quad \text{سرعت آزمایش در ریزدانه ها}$$

## پایداری شیروانی ها:

پایداری یک شیروانی خاکی به عوامل متعددی مانند لایه بندی خاک، حرکت آب در خاک، مقاومت برشی خاک و ... بستگی دارد. برای تعریف پایداری شیروانی خاکی از ضریب اطمینان استفاده می شود.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad 1- \text{ضریب اطمینان کلی } (F_s):$$

$$\tau_f = C + \sigma \cdot \tan \phi \quad \tau_f: \text{مقاومت برشی متوسط خاک}$$

$$\tau_d = C_d + \sigma \cdot \tan \phi_d \quad \tau_d: \text{مقاومت برشی بسیج شده خاک که درصدی از } \tau_f \text{ می باشد.}$$

$$F_s = \frac{C + \sigma \cdot \tan \phi}{C_d + \sigma \tan \phi_d}$$

$$F_c = \frac{C}{C_d} \quad 2- \text{ضریب اطمینان جزئی نسبت به چسبندگی } (F_c):$$

$$F_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} \quad 3- \text{ضریب اطمینان جزئی نسبت به اصطکاک } (F_\phi):$$

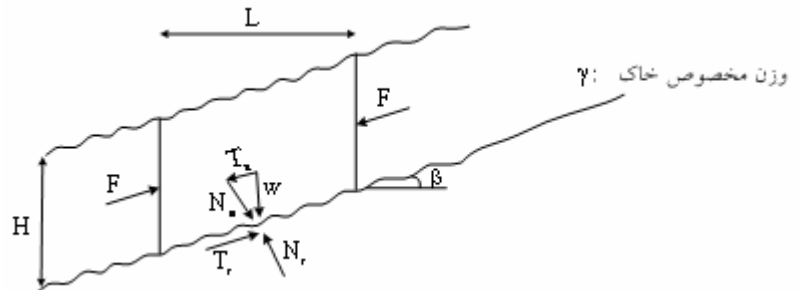
$$F_c = F_\phi \rightarrow \frac{C}{C_d} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} \rightarrow \frac{C + \sigma \tan \phi}{C_d + \sigma \tan \phi_d} = \frac{C}{C_d} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} \rightarrow F_s = F_\phi = F_c$$

## تحلیل پایداری شیروانی ها:

۱- پایداری شیروانی نامحدود:

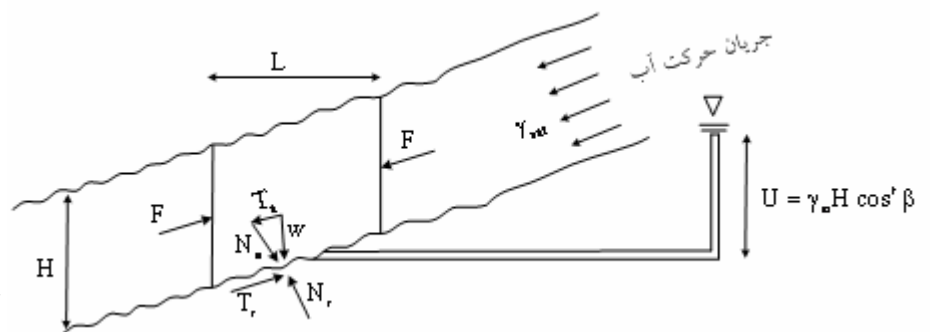
الف- سطح لغزش به موازات سطح شیبدار است و آب زیرزمینی در آن جریان ندارد.

$$w = \gamma L H \quad \begin{aligned} T_a &= W \sin \beta = \gamma L H \sin \beta \\ N_a &= W \cos \beta = \gamma L H \cos \beta \end{aligned} \rightarrow \tau = \frac{T_a}{L} = \gamma H \sin \beta \cos \beta, \quad \sigma = \frac{N_a}{L} = \gamma H \cos^2 \beta$$



ب- آب در خاک جریان دارد.

$H_{cr}$ : ارتفاع بحرانی



$$\frac{H \cos^2 \beta \cdot \tan \phi + c}{\gamma H \sin \beta \cos \beta} \rightarrow F_s = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} + \frac{c}{\gamma H \sin \beta \cos \beta}$$

$$\rightarrow H_{cr} = \frac{c}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi)}$$

$$\tau = \sigma' \tan \phi' + c' \quad F_s = \frac{\gamma' H \cos^2 \beta \cdot \tan \phi' + c'}{\gamma_{sat} H \sin \beta \cos \beta} \quad F_s = \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma_{sat} \tan \beta} + \frac{c'}{\gamma_{sat} H \sin \beta \cos \beta}$$

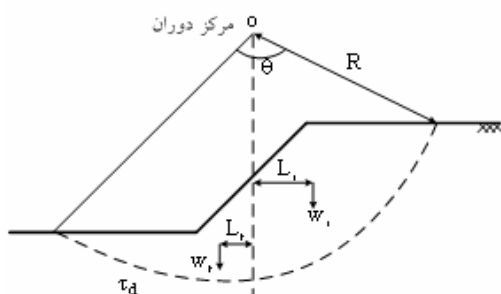
$$F_s = 1 \rightarrow H_{cr} = \frac{c'}{\cos^2 \beta (\gamma_{sat} \tan \beta - \gamma' \tan \phi')}$$

۲- ضریب اطمینان شیروانی خاکی محدود:

$$M_d = \sum \omega_i L_i = \omega_1 L_1 - \omega_2 L_2$$

$$M_R = \tau_d \times R \theta \times R = \tau_d R^2 \theta$$

$$F_s = \frac{\tau_f R^2 \theta}{\omega_1 L_1 - \omega_2 L_2}$$

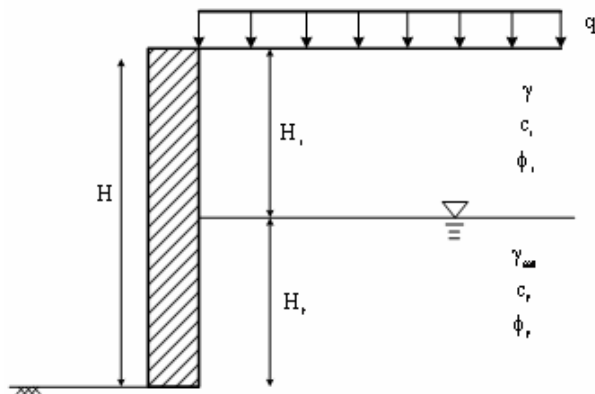


## فشار جانبی خاک

تعیین ضریب فشار خاک در حالت سکون ( $k_o$ ):

خاک رس عادی نهکیم یافته  $k_o = 0.95 - \sin \phi$

خاک رس پیش نهکیم یافته  $k_o = k_o \times \sqrt{OCR}$  رس عادی نهکیم یافته  $k_o = k_o$



ماسه شل و معمولی  $k_o = 1 - \sin \phi$

ماسه متراکم  $k_o = 1 - \sin \phi + \left( \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmin}} - 1 \right) \times 0.5$

تعیین فشار قائم خاک:

$$z = 0 \rightarrow \sigma_v = \sigma'_v = q$$

$$z = H_1 \rightarrow \sigma_v = \sigma'_v = q + \gamma H_1$$

$$z = H \rightarrow \sigma_v = q + \gamma H_1 + \gamma_{sat} H_2 \rightarrow \sigma'_v = q + \gamma H_1 + \gamma H_2$$

$$\sigma_h = k_o \sigma'_v + u$$

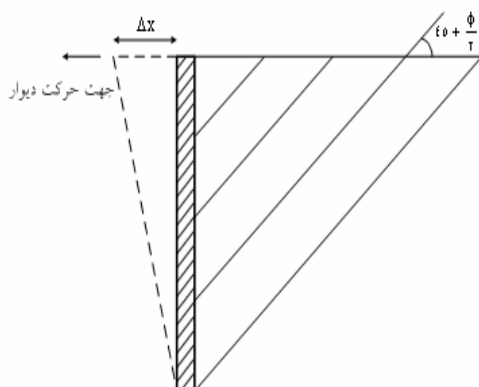
$$\sigma_h = k \sigma_v \rightarrow \text{اگر خاک خشک باشد}$$

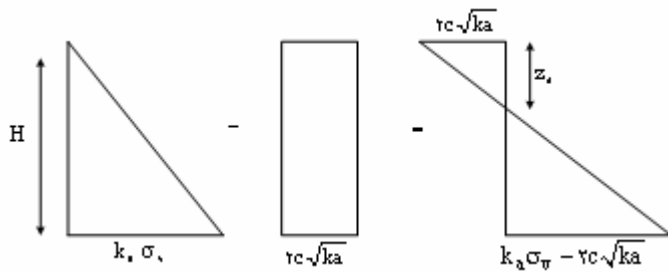
فشار محرک و مقاوم خاک:

سطوح لغزش در خاک زاویه  $45 + \frac{\phi}{2}$  با افق می سازد.

$$\sigma_a = \sigma_v k_a - 2c \sqrt{k_a} \quad \sigma_a: \text{فشار محرک رانکین}$$

$$k_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad k_a: \text{ضریب فشار محرک رانکین}$$





تعیین عمق ترک کششی ( $Z_c$ ):

$$\sigma_a = 0 \rightarrow \sigma_v k_a - \tau c \sqrt{k_a} = 0 \rightarrow z_c = \frac{\tau c}{\gamma \sqrt{k_a}}$$

نیروی محرک رانکین وارد بر دیوار ( $P_a$ ):

$$P_a = \frac{1}{2} \sigma_v k_a H - \tau c H \sqrt{k_a}$$

۱- قبل از وقوع ترک:

$$P_a = \frac{1}{2} (H - Z_c) (\sigma_v k_a - \tau c \sqrt{k_a})$$

۲- بعد از وقوع ترک:

فشار مقاوم رانکین:

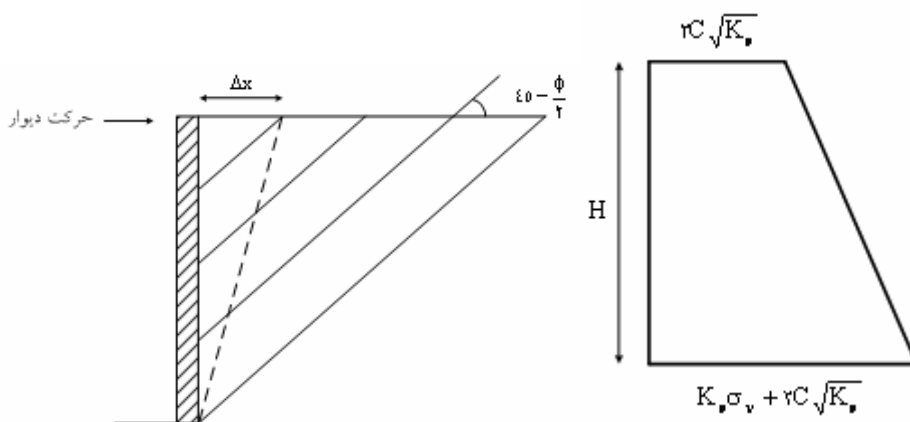
سطوح لغزش در خاک زاویه  $45^\circ - \frac{\phi}{2}$  با افق می سازند.

$$\sigma_p = \sigma_v k_p + \tau c \sqrt{k_p}$$

$\sigma_p$ : فشار مقاوم رانکین

$$k_p = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad k_p = \frac{1}{k_a}$$

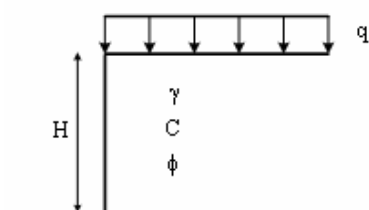
$k_p$ : ضریب فشار مقاوم رانکین



$$P_p = \frac{1}{2} \sigma_v k_p H + \tau c \sqrt{k_p} H$$

روش دیگری نیز برای محاسبه فشار محرک و مقاوم خاک به کار می رود که روش کولمب نام دارد. در این روش بر خلاف تئوری رانکین. اصطکاک بین توده خاک و دیوار در نظر گرفته می شود و این زاویه بین صفر تا  $\phi$  (زاویه اصطکاک داخلی خاک) تغییر می کند. روش کولمب مختص خاک های دانه ای ( $c=0$ ) می باشد.

**مماسبه هداکتر ارتفاع ترانشه:**



$$H_1 = \frac{C}{\gamma \cdot N_s \cdot F_s} \quad \text{بدون حضور سربار}$$

$C$  = چسبندگی خاک

$\gamma$ : وزن مخصوص خاک

$N_s$ : عدد پایداری تراشه

$F_s$ : ضریب اطمینان

$q = (H_1 - H)\gamma$  مقدار باری که می‌تواند روی تراشه قرار گیرد بدون اینکه تراشه ریزش کند.

### پایداری دیوارهای هائل:

۱- کنترل در مقابل واژگونی حول پنجه دیوار

$$F.S = \frac{\sum M_R}{\sum M_o}$$

$\sum M_R$  = مجموع لنگرهای مقاوم در برابر واژگونی

$\sum M_o$  = مجموع لنگرهای محرک در برابر واژگونی

۲- کنترل در مقابل لغزش در امتداد پایه دیوار

$$F.S = \frac{\sum F_R}{\sum F_d}$$

$\sum F_R$  = مجموع نیروهای مقاوم در برابر لغزش

$\sum F_d$  = نیروهای محرک لغزش