

فصل یازدهم

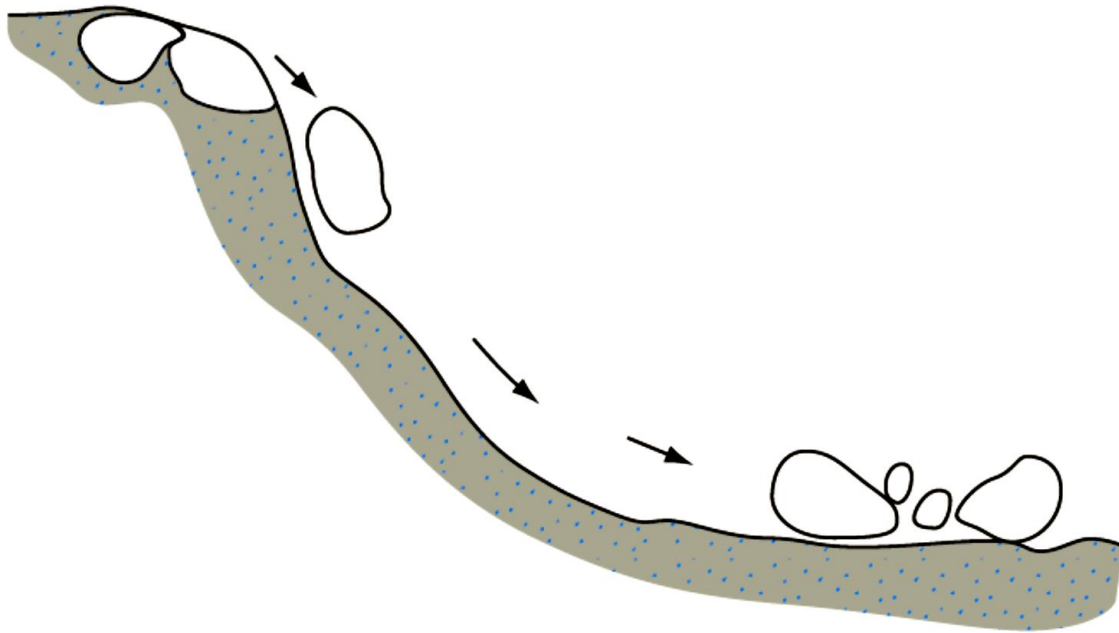
پایداری شیروانی خاکی

Slope Stability

حالت‌های گسیختگی شیروانی

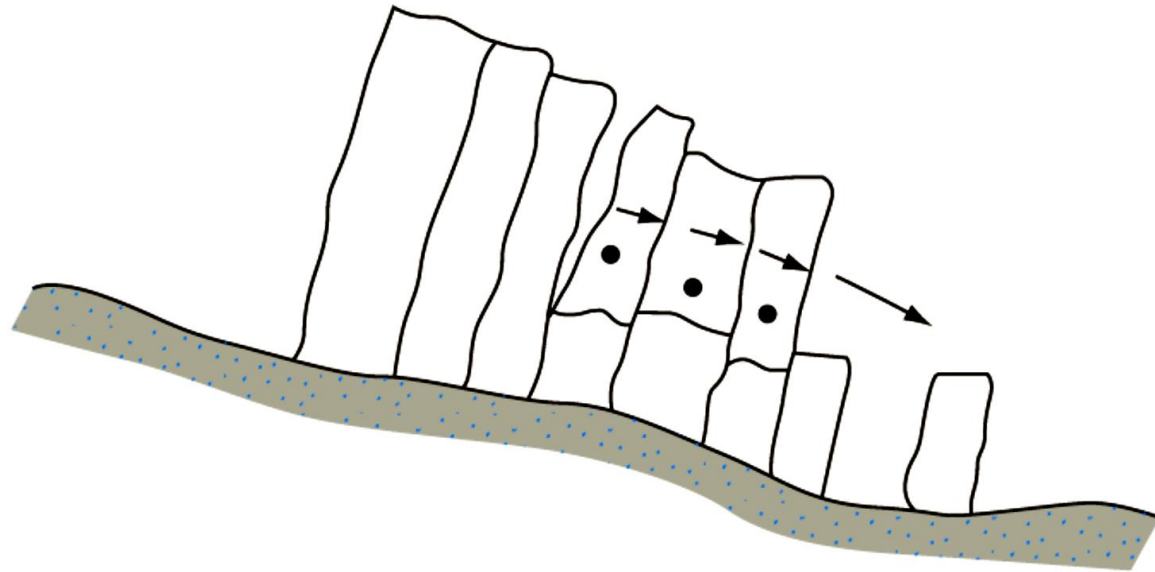
سطح نمایان زمینی که با افق زاویه دارد، شیروانی یا شیب غیرمقید نامیده می‌شود. این شیروانی ممکن است طبیعی یا ساخته بشر باشد. شیروانی به چند حالت مختلف گسیخته می‌شود. Cruden و Varnes (۱۹۹۶) گسیختگی شیروانی‌ها را به پنج دسته اصلی طبقه‌بندی کردند که عبارتند از:

۱- **سقوط:** جدا شدن خاک و / یا قطعات سنگ و سقوط آنها به پایین شیب (شکل ۱-۱۵)، این حالت در شکل ۱۵-۲ نشان داده شده است که در آن مقدار زیادی از توده خاک به پایین شیب لغزیده است.



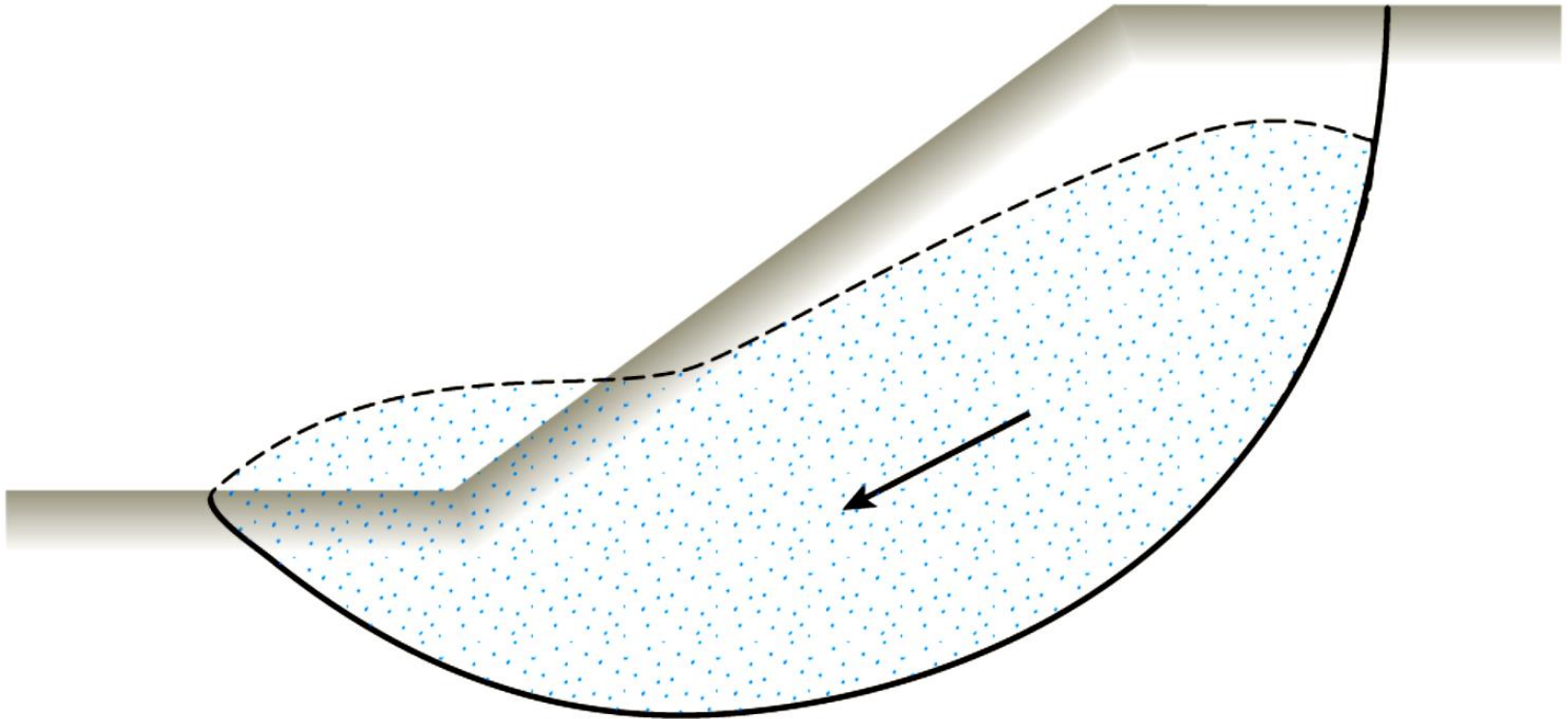
شکل ۱-۱۵ زمین لغزه نوع «سقوطی».

۲- واژگونی: یعنی دوران رو به جلوی توده خاک و/یا سنگ حول محوری در زیر گرانیگاه توده‌ای که جابه‌جا می‌شود (شکل ۱۵-۳).



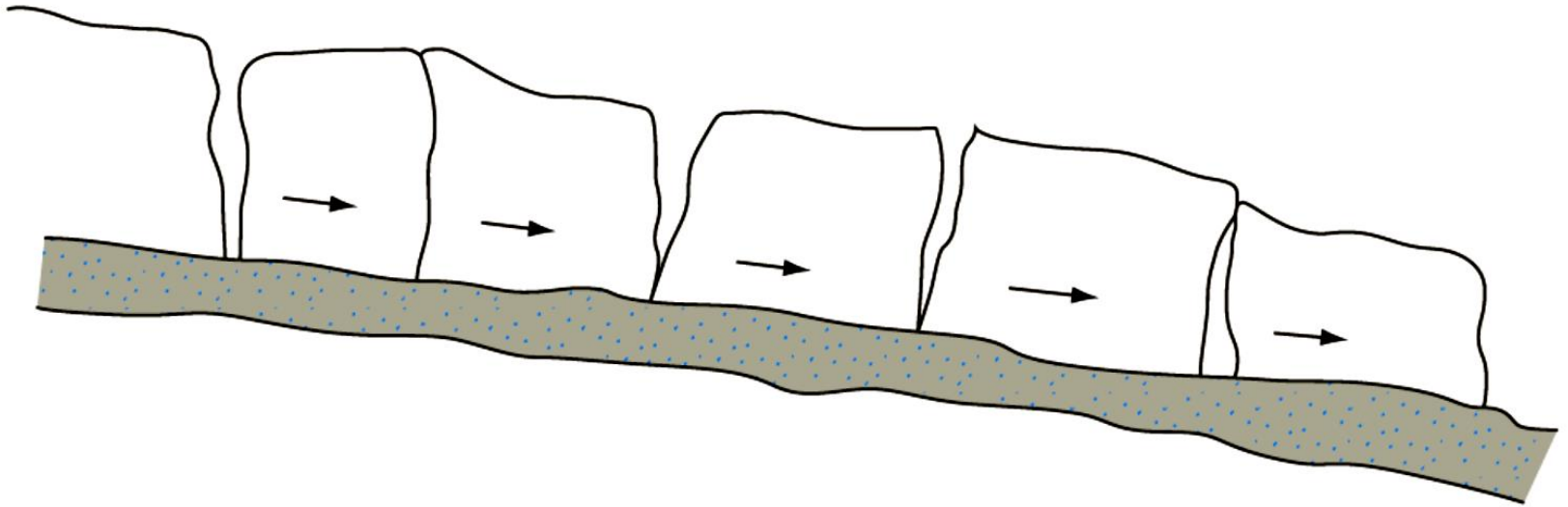
شکل ۱۵-۳ گسیختگی شیروانی با واژگونی.

۳- لغزش: حرکت رو به پایین توده خاک بر روی سطح گسیختگی (شکل ۴-۱۵).



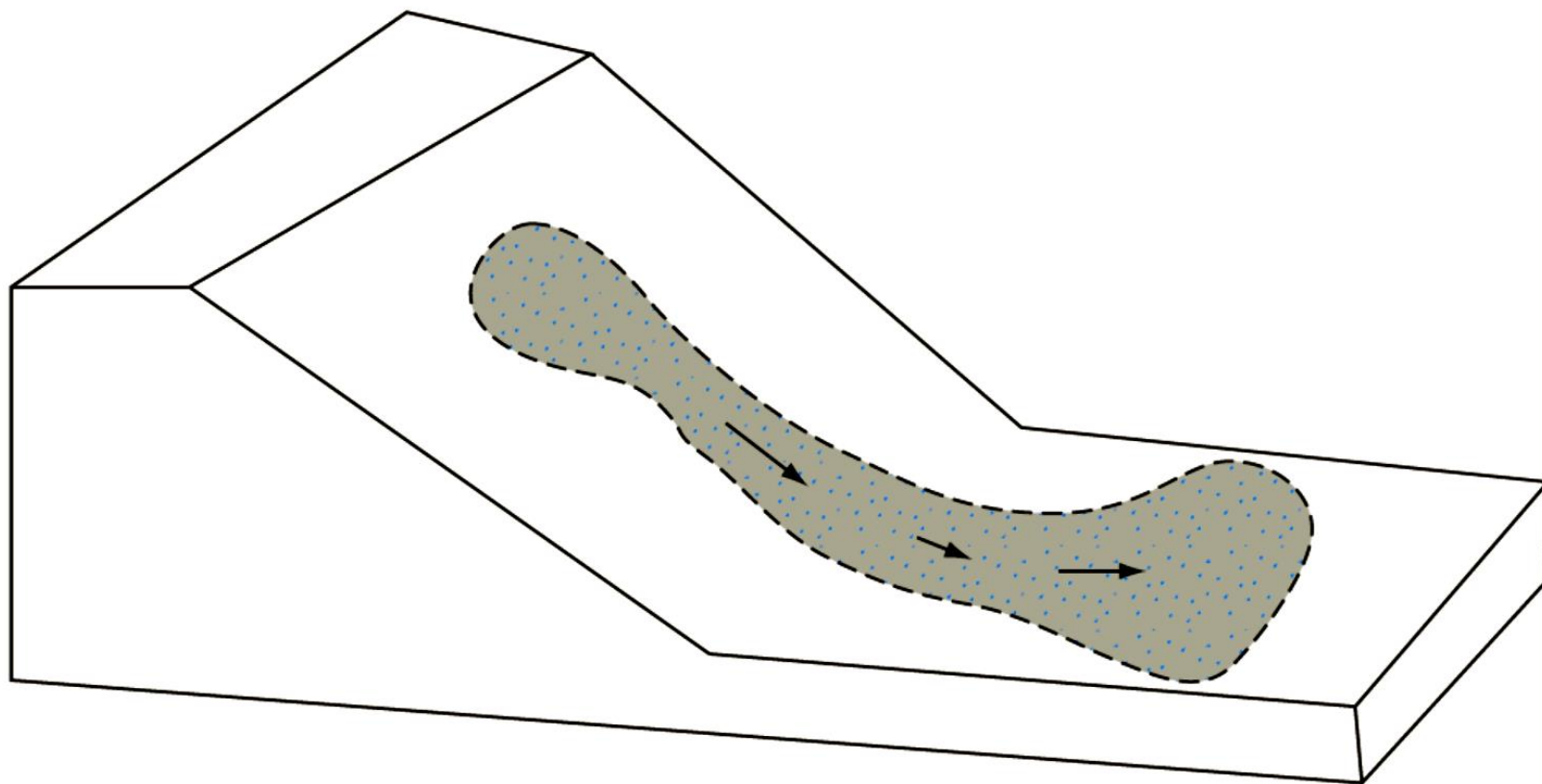
شکل ۴-۱۵ گسیختگی شیروانی با لغزش.

۴- **گسترش:** شکلی از لغزش که با انتقال انجام می‌شود (شکل ۱۵-۵). این حالت با «حرکت ناگهانی درزه‌های آبداری از ماسه‌ها یا لای‌هایی روی می‌دهد که بر روی رس‌ها قرار دارند یا با خاکریز بارگذاری شده‌اند» (Varnes و Cruden ، ۱۹۹۶).



شکل ۱۵-۵ گسیختگی شیروانی با گسترش جانبی.

۵- جریان: این حرکت رو به پایین توده خاک مشابه با سیال گرانبرو است (شکل ۱۵-۶).



شکل ۱۵-۶ گسیختگی شیروانی با جاری شدن.

ضریب ایمنی

وظیفه مهندس مسئول تحلیل پایداری شیروانی، تعیین ضریب ایمنی است. معمولاً ضریب ایمنی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (1-15)$$

که در این جا: F_s = ضریب ایمنی نسبت به مقاومت

τ_f = مقاومت برشی متوسط خاک

τ_d = تنش برشی متوسط ایجاد شده در امتداد سطح گسیختگی بالقوه.

مقاومت برشی خاک شامل دو مؤلفه است، چسبندگی و اصطکاک و آن را می‌توان به صورت زیر

نوشت:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2-15)$$

که در این جا: c' = چسبندگی

ϕ' = زاویه اصطکاک

σ' = تنش قائم روی سطح گسیختگی بالقوه.

به روشی مشابه می‌توان نوشت:

$$\tau_d = c'_d + \sigma' \tan \phi'_d \quad (۳-۱۵)$$

که در این جا c'_d و ϕ'_d به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک ایجاد شده در امتداد سطح گسیختگی بالقوه. با جایگزین کردن معادلات (۲-۱۵) و (۳-۱۵) در معادله (۱-۱۵) نتیجه می‌شود:

$$F_s = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{c'_d + \sigma' \tan \phi'_d} \quad (۴-۱۵)$$

حال می‌توان جنبه‌های دیگری از ضریب ایمنی را معرفی کرد - یعنی ضریب ایمنی نسبت به چسبندگی $F_{c'}$ و ضریب ایمنی نسبت به اصطکاک $F_{\phi'}$. این ضرایب ایمنی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$F_{c'} = \frac{c'}{c'_d} \quad (۵-۱۵)$$

و

$$F_{\phi'} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_d} \quad (۶-۱۵)$$

با مقایسه معادلات (۱۵-۴) تا (۱۵-۶) مشاهده می‌شود که با مساوی شدن $F_{c'}$ و $F_{\phi'}$ ، ضریب ایمنی نسبت به مقاومت به دست می‌آید. یا چنانچه:

$$\frac{c'}{c'_d} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_d}$$

می‌توان نوشت:

$$F_s = F_{c'} = F_{\phi'}$$

(۱۵-۷)

زمانی که F_s برابر با یک است، شیروانی در آستانه گسیختگی است. معمولاً ضریب ایمنی ۱/۵ نسبت به مقاومت برای طراحی شیروانی پایدار قابل پذیرش است.

پایداری شیروانی‌های نامحدود

با توجه به مسئله پایداری شیروانی، اجازه دهید نخست به شیروانی نامحدود نشان داده شده در شکل ۷-۱۵ پردازیم. مقاومت برشی خاک را می‌توان با معادله (۲-۱۵) بیان کرد:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$$

با فرض صفر بودن فشار آب منفذی، ضریب ایمنی را در برابر گسیختگی احتمالی شیروانی در امتداد صفحه AB واقع در عمق H در زیر سطح زمین ارزیابی می‌کنیم. گسیختگی شیروانی با حرکت خاک بالای صفحه AB از راست به چپ روی می‌دهد.

حال جزء کوچک $abcd$ از شیروانی را با طول واحد عمود بر صفحه مقطع نشان داده شده در نظر بگیرید. نیروهای F وارد بر سطوح ab و cd برابر و مخالفند و آنها را می‌توان نادیده گرفت. وزن جزء خاک عبارت است از:

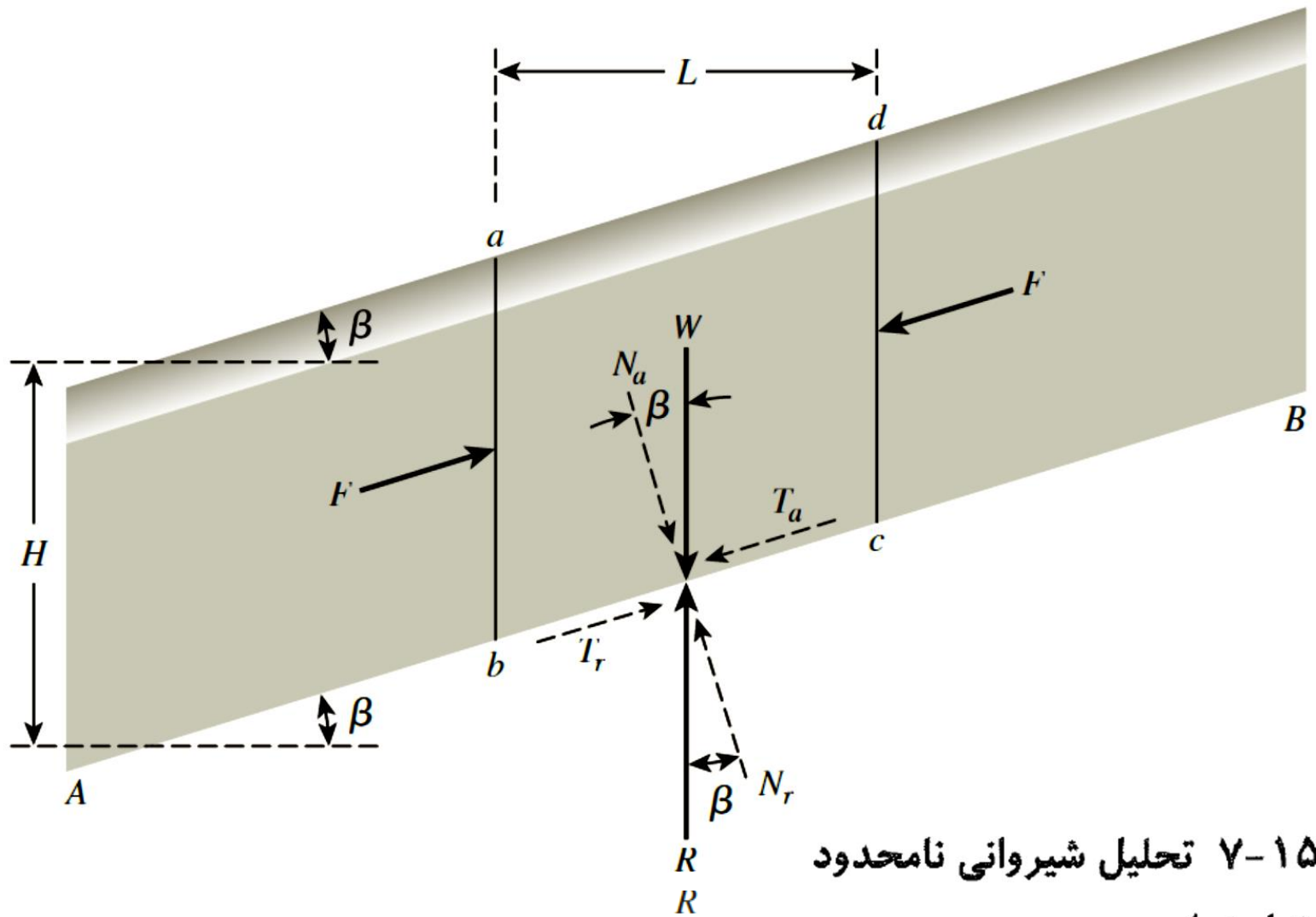
$$W = (\text{حجم جزء خاک}) \times (\text{وزن مخصوص خاک}) = \gamma LH \quad (۸-۱۵)$$

وزن W را می‌توان به دو مؤلفه تجزیه کرد:

$$۱ - \text{نیروی عمود بر صفحه } AB = N_a = \gamma LH \cos \beta = W \cos \beta$$

$$۲ - \text{نیروی موازی با صفحه } AB = T_a = \gamma LH \sin \beta = W \sin \beta$$

سبب لغزش در امتداد صفحه می‌شود.



شکل ۱۵-۷ تحلیل شیروانی نامحدود
(بدون تراوش).

بدین ترتیب تنش قائم مؤثر و تنش برشی در قاعده جزء کوچک شیروانی را به ترتیب می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma' = \frac{N_a}{\text{Area of base}} = \frac{\gamma LH \cos \beta}{\left(\frac{L}{\cos \beta}\right)} = \gamma H \cos^2 \beta \quad (9-15)$$

و

$$\tau = \frac{T_a}{\text{Area of base}} = \frac{\gamma LH \sin \beta}{\left(\frac{L}{\cos \beta}\right)} = \gamma H \cos \beta \sin \beta \quad (10-15)$$

واکنش در مقابل وزن W برابر است با نیروی مساوی و مخالف R . مؤلفه‌های عمودی و مماس R نسبت به صفحه AB عبارتند از:

$$N_r = R \cos \beta = W \cos \beta \quad (11-15)$$

و

$$T_r = R \sin \beta = W \sin \beta \quad (12-15)$$

از نظر تعادل، تنش برشی مقاوم ایجاد شده در قاعده این جزء کوچک برابر است با:

$(T_r) / (\text{مساحت قاعده}) = \gamma H \sin \beta \cos \beta$. همچنین تنش برشی مقاوم را می‌توان به همان صورت معادله (۳-۱۵) نوشت:

$$\tau_d = c'_d + \sigma' \tan \phi'_d$$

مقدار تنش قائم با معادله (۹-۱۵) بیان می‌شود. با جایگزین کردن معادله (۹-۱۵) در معادله (۳-۱۵) نتیجه می‌شود:

$$\tau_d = c'_d + \gamma H \cos^2 \beta \tan \phi'_d \quad (۱۳-۱۵)$$

بنابراین:

$$\gamma H \sin \beta \cos \beta = c'_d + \gamma H \cos^2 \beta \tan \phi'_d$$

یا

$$\frac{c'_d}{\gamma H} = \sin \beta \cos \beta - \cos^2 \beta \tan \phi'_d = \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi'_d) \quad (۱۴-۱۵)$$

ضریب ایمنی نسبت به مقاومت با معادله (۷-۱۵) تعریف شد که از آن می‌توان نتیجه گرفت:

$$\tan \phi'_d = \frac{\tan \phi'}{F_s} \quad \text{و} \quad c'_d = \frac{c'}{F_s}$$

با جایگزین کردن روابط قبل در معادله (۱۴-۱۵) نتیجه می‌شود:

$$F_s = \frac{c'}{\gamma H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (۱۵-۱۵)$$

در خاک‌های دانه‌ای، $c' = 0$ و ضریب ایمنی F_s به صورت $(\tan \phi')/(\tan \beta)$ تبدیل می‌شود. این رابطه نشانگر آن است که در شیروانی نامحدود ماسه‌ای، مقدار F_s مستقل از ارتفاع H است و شیروانی تا زمانی پایدار است که $\beta < \phi'$.

چنانچه خاک دارای چسبندگی و اصطکاک باشد، عمق صفحه‌ای که تعادل بحرانی در امتداد آن صورت می‌گیرد، با جایگزین کردن $F_s = 1$ و $H = H_{cr}$ در معادله (۱۵-۱۵) تعیین می‌شود. بدین ترتیب:

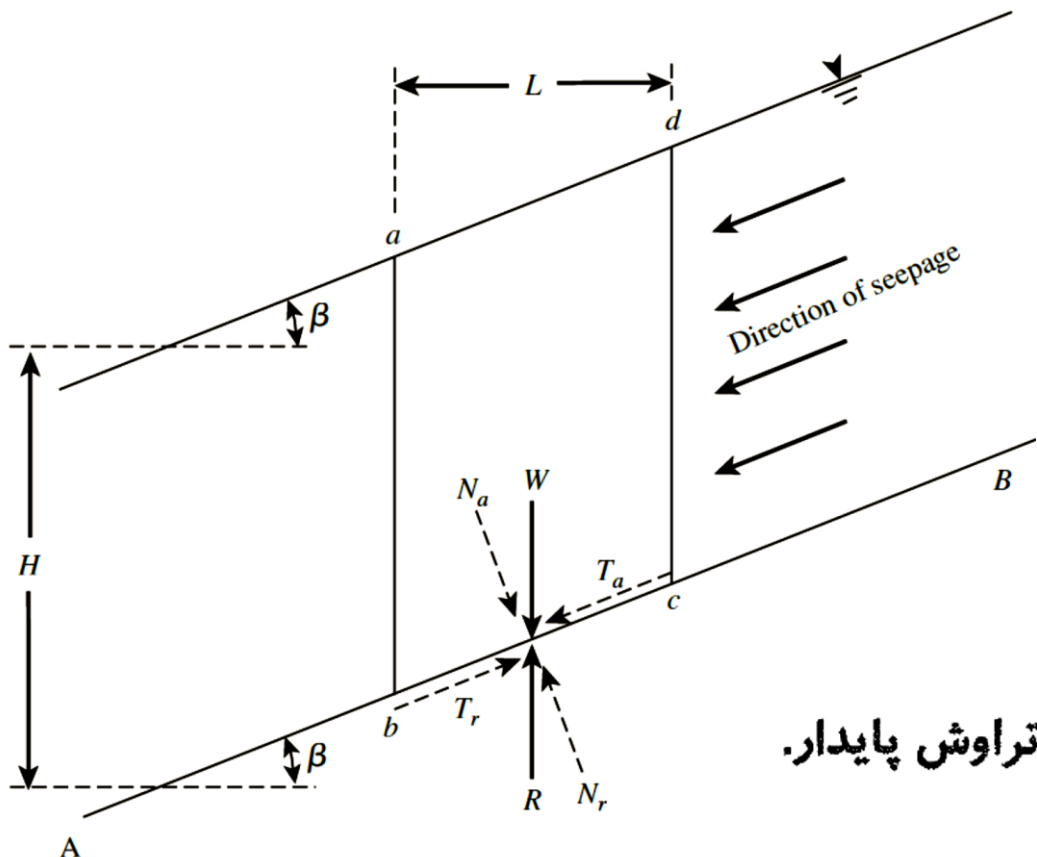
$$H_{cr} = \frac{c'}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \quad (۱۶-۱۵)$$

در صورت وجود تراوش پایدار در خاک و قرار داشتن سطح آب زیرزمینی در سطح زمین (شکل ۱۵-۸)، ضریب ایمنی در برابر لغزش را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

$$F_s = \frac{c'}{\gamma_{sat} H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma_{sat} \tan \beta} \quad (15-17)$$

که در این جا: γ_{sat} = وزن مخصوص اشباع خاک

$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ = وزن مخصوص مؤثر خاک.



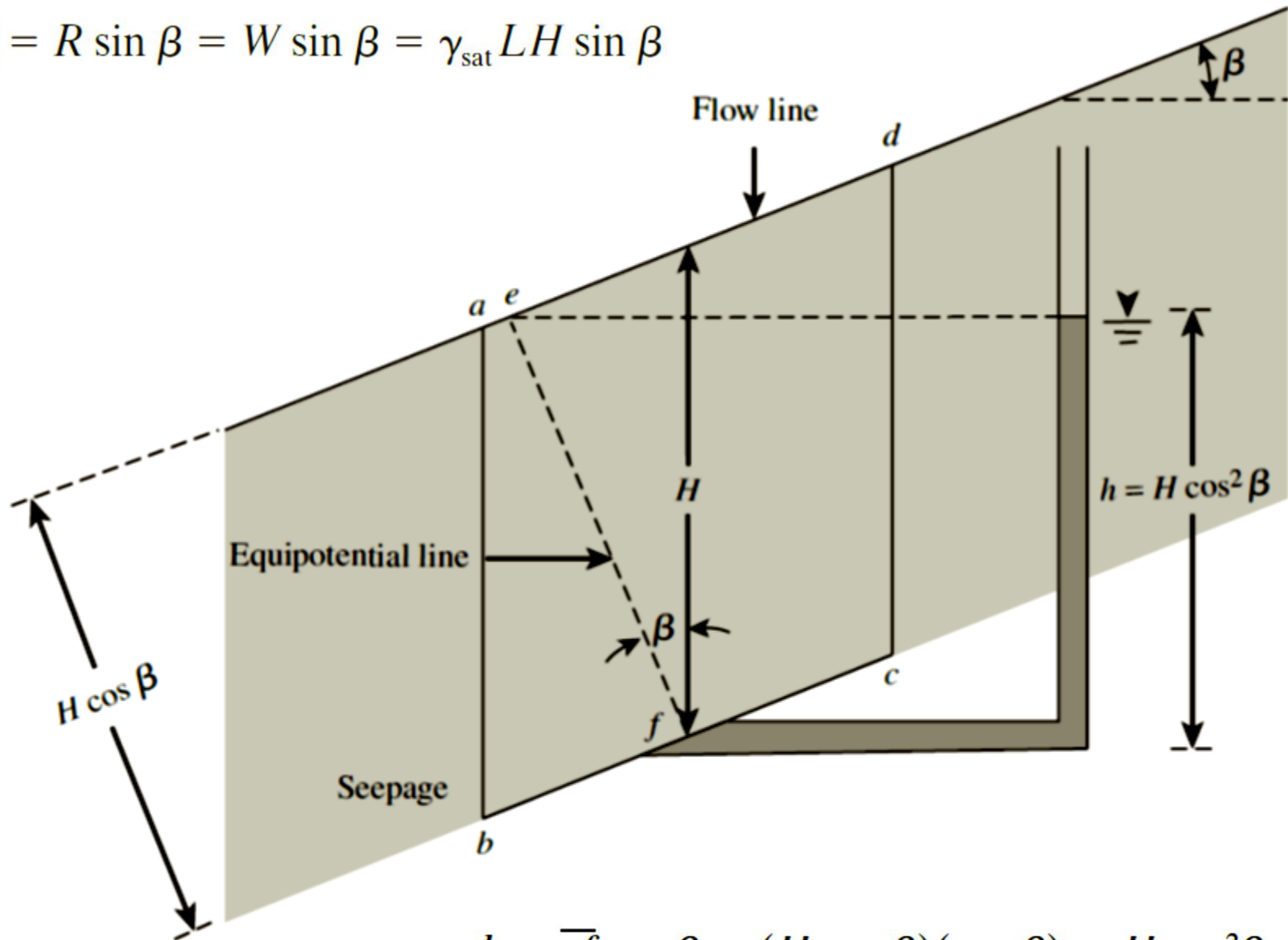
$$N_a = W \cos \beta = \gamma_{sat} LH \cos \beta$$

$$T_a = W \sin \beta = \gamma_{sat} LH \sin \beta$$

شکل ۱۵-۸ شیروانی نامحدود با تراوش پایدار.

$$N_r = R \cos \beta = W \cos \beta = \gamma_{\text{sat}} LH \cos \beta$$

$$T_r = R \sin \beta = W \sin \beta = \gamma_{\text{sat}} LH \sin \beta$$



$$h = \bar{ef} \cos \beta = (H \cos \beta)(\cos \beta) = H \cos^2 \beta$$

$$\sigma = \frac{N_r}{\left(\frac{L}{\cos \beta}\right)} = \gamma_{\text{sat}} H \cos^2 \beta$$

$$\tau = \frac{T_r}{\left(\frac{L}{\cos \beta}\right)} = \gamma_{\text{sat}} H \cos \beta \sin \beta$$

$$\tau_d = c'_d + \sigma' \tan \phi'_d = c'_d + (\sigma - u) \tan \phi'_d \quad u = \gamma_w H \cos^2 \beta$$

$$\begin{aligned} \tau_d &= c'_d + (\gamma_{\text{sat}} H \cos^2 \beta - \gamma_w H \cos^2 \beta) \tan \phi'_d \\ &= c'_d + \gamma' H \cos^2 \beta \tan \phi'_d \end{aligned}$$

$$\gamma_{\text{sat}} H \cos \beta \sin \beta = c'_d + \gamma' H \cos^2 \beta \tan \phi'_d \quad \frac{c'_d}{\gamma_{\text{sat}} H} = \cos^2 \beta \left(\tan \beta - \frac{\gamma'}{\gamma_{\text{sat}}} \tan \phi'_d \right)$$

$$F_s = \frac{c'}{\gamma_{\text{sat}} H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma_{\text{sat}} \tan \beta}$$

شیروانی‌های محدود

زمانی که مقدار H_{cr} به ارتفاع شیروانی نزدیک می‌شود، شیروانی معمولاً محدود در نظر گرفته می‌شود. از نظر سادگی، در زمان تحلیل پایداری شیروانی محدود در خاک همگن باید شکلی کلی از سطح گسیختگی بالقوه را فرض کرد. با وجود شواهد قابل توجهی مبنی بر آن که گسیختگی شیروانی‌ها معمولاً بر روی سطوح گسیختگی خمیده روی می‌دهد، Culmann (۱۸۷۵) سطح گسیختگی بالقوه را به صورت صفحه تقریب زد. ضریب ایمنی F_s محاسبه شده بر اساس تقریب Culmann تنها برای شیروانی‌های نزدیک به حالت قائم نتایج نسبتاً خوبی به دست می‌دهد. گروه ژئوتکنیک سوئد در دهه ۱۹۲۰ پس از بررسی وسیع گسیختگی شیروانی‌های خاکی پیشنهاد کرد که سطح واقعی لغزش را می‌توان به صورت استوانه دایره‌ای تقریب زد.

تحلیل شیروانی‌های محدود با سطح گسیختگی صفحه‌ای (روش Culmann)

در شکل ۱۵-۱۰ یک شیروانی خاکی به ارتفاع H نشان داده شده است. زاویه شیب این شیروانی نسبت به افق β است. AC یک صفحه گسیختگی آزمایشی است. در صورت در نظر گرفتن طول واحدی عمود بر مقطع شیروانی، وزن گوه خاک ABC برابر است با:

$$W = \frac{1}{2} (H)(\overline{BC})(1)(\gamma) = \frac{1}{2} H(H \cot \theta - H \cot \beta) \gamma = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \quad (18-15)$$

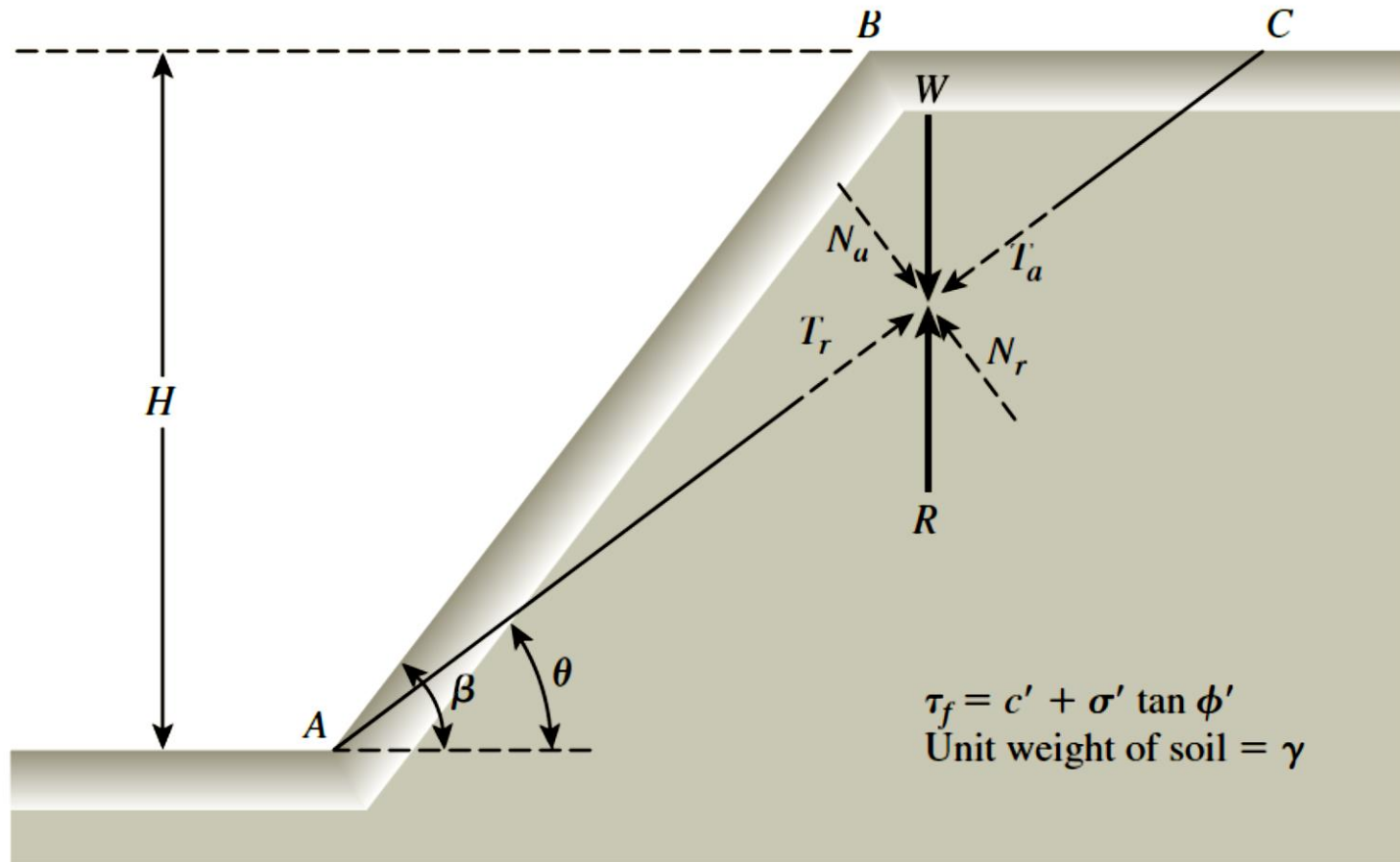
مؤلفه‌های عمودی و مماسی W نسبت به صفحه AC عبارتند از:

$$N_a = \text{مؤلفه عمودی} = W \cos \theta = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \cos \theta \quad (19-15)$$

$$T_a = \text{مؤلفه مماسی} = W \sin \theta = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \sin \theta \quad (20-15)$$

تنش قائم مؤثر متوسط و تنش برشی متوسط روی صفحه AC به ترتیب عبارتند از:

$$\sigma' = \frac{N_a}{(\overline{AC})(1)} = \frac{N_a}{\left(\frac{H}{\sin \theta} \right)} = \frac{1}{2} \gamma H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \cos \theta \sin \theta \quad (21-15)$$



شکل ۱۵-۱۰ تحلیل شیروانی محدود - روش Culmann.

$$\tau = \frac{T_a}{(\overline{AC})(1)} = \frac{T_a}{\left(\frac{H}{\sin \theta}\right)} = \frac{1}{2} \gamma H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \sin^2 \theta \quad (22-15)$$

همچنین تنش برشی مقاوم متوسط ایجاد شده در امتداد صفحه AC را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\tau_d = c'_d + \sigma' \tan \phi'_d = c'_d + \frac{1}{2} \gamma H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \cos \theta \sin \theta \tan \phi'_d \quad (23-15)$$

حال از معادلات (22-15) و (23-15) داریم:

$$\frac{1}{2} \gamma H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \sin^2 \theta = c'_d + \frac{1}{2} \gamma H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \sin \theta} \right] \cos \theta \sin \theta \tan \phi'_d \quad (24-15)$$

یا

$$c'_d = \frac{1}{2} \gamma H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)(\sin \theta - \cos \theta \tan \phi'_d)}{\sin \beta} \right] \quad (25-15)$$

عبارت موجود در معادله (۱۵-۲۵) برای صفحه گسیختگی آزمایشی AC به دست آمده است. برای تعیین صفحه گسیختگی بحرانی باید از اصل بیشینه و کمینه به ازای مقدار مفروض (ϕ'_d) جهت یافتن آن زاویه‌ای از θ استفاده کرد که در آن حالت چسبندگی برانگیخته حداکثر است. بدین ترتیب نخست مشتق c_d نسبت به θ را صفر قرار می‌دهیم:

$$\frac{\partial c'_d}{\partial \theta} = 0 \quad (۱۵-۲۶)$$

به دلیل ثابت بودن γ ، H و β در معادله (۱۵-۲۵) داریم:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} [\sin(\beta - \theta)(\sin \theta - \cos \theta \tan \phi'_d)] = 0 . \quad (۱۵-۲۷)$$

از حل معادله (۱۵-۲۷) مقدار بحرانی θ به دست می‌آید:

$$\theta_{cr} = \frac{\beta + \phi'_d}{2} \quad (۱۵-۲۸)$$

با جایگزین کردن مقدار $\theta = \theta_{cr}$ در معادله (۱۵-۲۵) نتیجه می‌شود:

$$c'_d = \frac{\gamma H}{4} \left[\frac{1 - \cos(\beta - \phi'_d)}{\sin \beta \cos \phi'_d} \right] \quad (۱۵-۲۹)$$

معادله قبل را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{c'_d}{\gamma H} = m = \frac{1 - \cos(\beta - \phi'_d)}{4 \sin \beta \cos \phi'_d} \quad (30-15)$$

که در این جا: $m =$ عدد پایداری.

حداکثر ارتفاع شیروانی برای ایجاد تعادل بحرانی، با جایگزین کردن $c'_d = c'$ و $\phi'_d = \phi'$ در معادله (۲۹-۱۵) به دست می‌آید:

$$H_{cr} = \frac{4c'}{\gamma} \left[\frac{\sin \beta \cos \phi'}{1 - \cos(\beta - \phi')} \right] \quad (31-15)$$

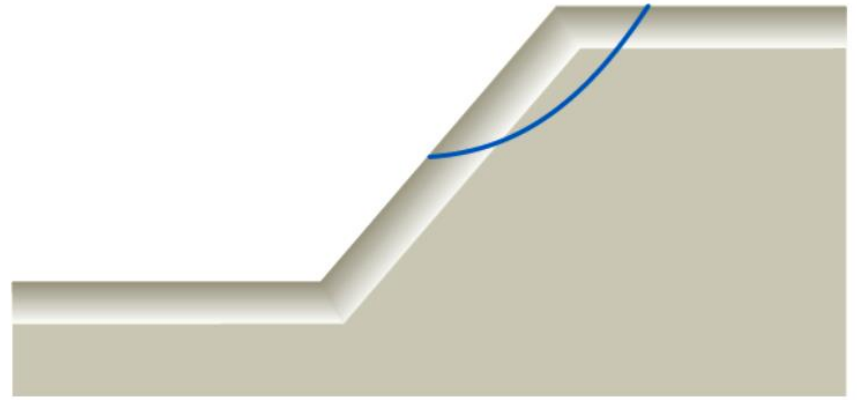
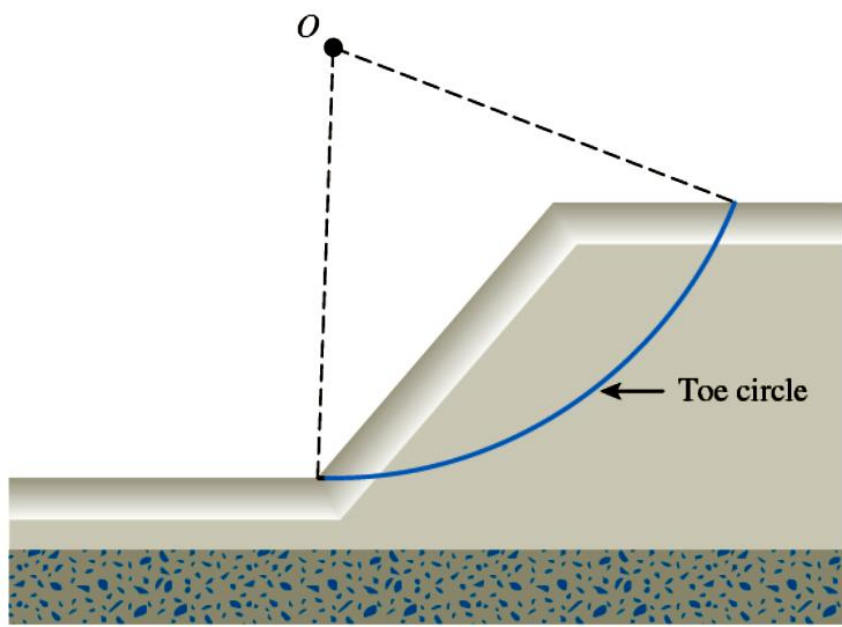
تحلیل شیروانی‌های محدود با سطح گسیختگی دایره‌ای

حالت‌های گسیختگی

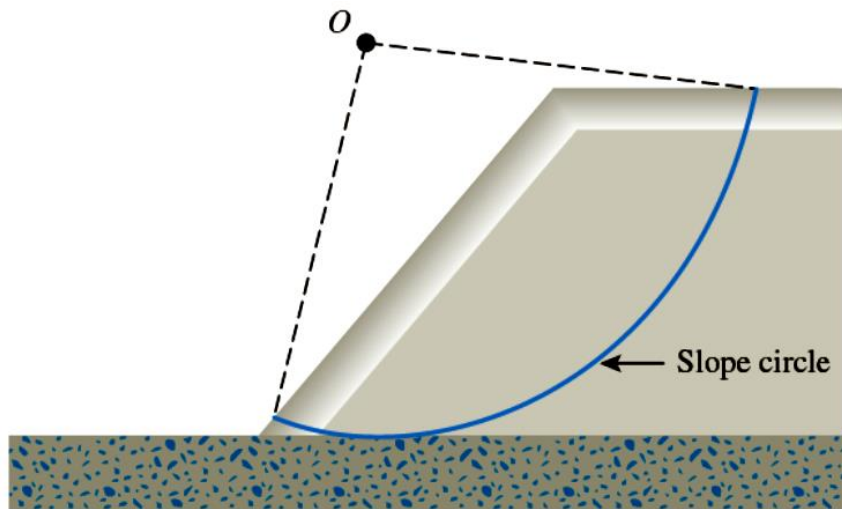
به طور کلی گسیختگی شیروانی محدود به یکی از حالت‌های زیر روی می‌دهد (شکل ۱۵-۱۱):

۱- چنانچه گسیختگی طوری روی دهد که سطح لغزش، شیروانی را در پای شیب یا بالای آن قطع کند، آن را **گسیختگی دامنه می‌نامند** (شکل ۱۵-۱۱-الف). چنانچه دایره گسیختگی از پای شیروانی عبور کند، آن را **دایره پای شیروانی** و اگر از بالای آن عبور کند، آن را **دایره دامنه می‌نامند**. تحت شرایط معینی ممکن است همانند شکل ۱۵-۱۱-ب، **گسیختگی کم‌عمق دامنه روی دهد**.

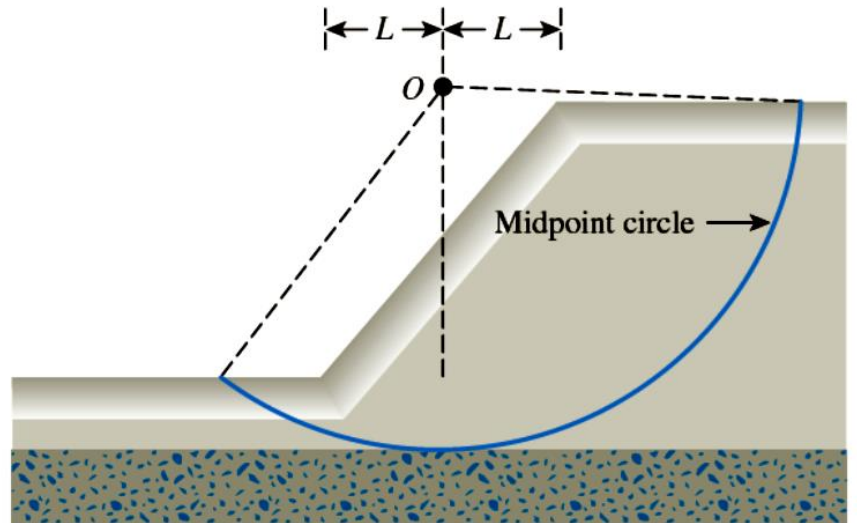
۲- چنانچه گسیختگی طوری روی دهد که سطح لغزش در فاصله‌ای از پای شیروانی عبور کند، آن را **گسیختگی عمیق می‌نامند** (شکل ۱۵-۱۱-ج). در حالت گسیختگی عمیق، دایره گسیختگی را **دایره عمیق می‌نامند**.



(b)



(a)



(c)

شکل ۱۱-۱۵ حالت‌های گسیختگی شیروانی محدود: (الف) گسیختگی دامنه، (ب) گسیختگی کم عمق، و (ج) گسیختگی عمده..

روش توده - شیروانی های خاک رس همگن با $\phi = 0$

در شکل ۱۵-۱۲ یک شیروانی از خاک همگن نشان داده شده است. مقاومت برشی زهکشی نشده خاک نسبت به عمق ثابت فرض می شود و آن را می توان به صورت $\tau_f = c_u$ بیان کرد. برای انجام تحلیل پایداری، یک منحنی لغزش بالقوه آزمایشی مانند AED را انتخاب می کنیم که قوسی از دایره ای به شعاع r است. مرکز این دایره در نقطه O قرار دارد. با در نظر گرفتن طول واحدی از شیروانی عمود بر مقطع نشان داده شده، وزن خاک بالای منحنی AED را می توان به صورت $W = W_1 + W_2$ بیان کرد که در آن:

$$W_1 = (\text{مساحت } FCDEF)(\gamma)$$

9

$$W_2 = (\text{مساحت } ABFEA)(\gamma)$$

گسیختگی شیروانی ممکن است در اثر لغزش توده خاک روی دهد. گشتاور نیروی رانشی حول نقطه O که سبب ناپایداری شیروانی می‌شود، عبارت است از:

$$M_d = W_1 l_1 - W_2 l_2 \quad (۱۵-۳۲)$$

که در این جا: l_1 و $l_2 =$ بازوهای گشتاور.

مقاومت در برابر لغزش از چسبندگی موجود در امتداد سطح بالقوه لغزش ناشی می‌شود. چنانچه c_d چسبندگی برانگیخته لازم باشد، گشتاور نیروهای مقاوم حول نقطه O عبارت است از:

$$M_R = c_d (\widehat{AED})(1)(r) = c_d r^2 \theta \quad (۱۵-۳۳)$$

برای تعادل: $M_R = M_d$ ، بنابراین:

$$c_d r^2 \theta = W_1 l_1 - W_2 l_2$$

یا

$$c_d = \frac{W_1 l_1 - W_2 l_2}{r^2 \theta} \quad (۱۵-۳۴)$$

حال می‌توان ضریب ایمنی در برابر لغزش را به دست آورد:

$$F_s = \frac{M_R}{M_d} = \frac{c_d r^2 \theta}{W_1 l_1 - W_2 l_2} \quad (۱۵-۳۵)$$