

فصل دهم

فشار جانبی خاک

Lateral Earth Pressure

فشار جانبی خاک: در حالت سکون

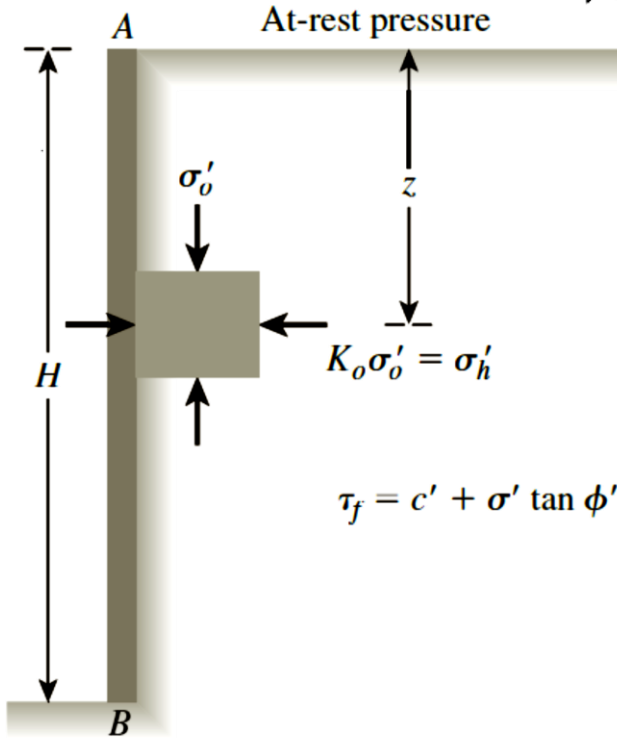
Coulomb و Rankine

در مهندسی پی اغلب با سازه‌های حایلی همچون دیوارهای حایل، دیوار زیرزمین‌ها و دیوارهای ساحلی برخورد می‌شود که در برابر شیروانی‌های خاکی مقاومت می‌کنند. طراحی و ساخت صحیح این سازه‌ها نیازمند آگاهی کامل از نیروهای جانبی موجود در بین سازه‌های حایل و توده‌های خاک نگه داشته شده است. این نیروهای جانبی در اثر فشار جانبی خاک ایجاد می‌شوند.

فشار خاک ساکن، محرک و مقاوم

توده خاک نشان داده شده در شکل ۱۳-۱-الف را در نظر بگیرید. این توده خاک توسط نیروی بدون اصطکاکی به ارتفاع AB نگه داشته شده است. جزء خاک واقع در عمق z تحت فشار مؤثر قائم σ'_o و فشار مؤثر افقی σ'_h قرار دارد. روی صفحات قائم و افقی این جزء خاک هیچ تنش برشی وجود ندارد. نسبت σ'_h به σ'_o را به صورت کمیت بی بعد K تعریف می‌کنیم:

$$K = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o} \quad (1-13)$$



(a)

حال به بررسی سه حالت ممکن برای دیوار حایل می‌پردازیم:

حالت ۱: در صورت ساکن بودن دیوار AB یعنی عدم حرکت دیوار به سمت راست یا چپ نسبت به موقعیت اولیه خود، توده خاک در حالت *تعادل استاتیکی* یا *ایستا* قرار دارد. در این حالت σ'_h را فشار خاک ساکن می‌نامند، یا

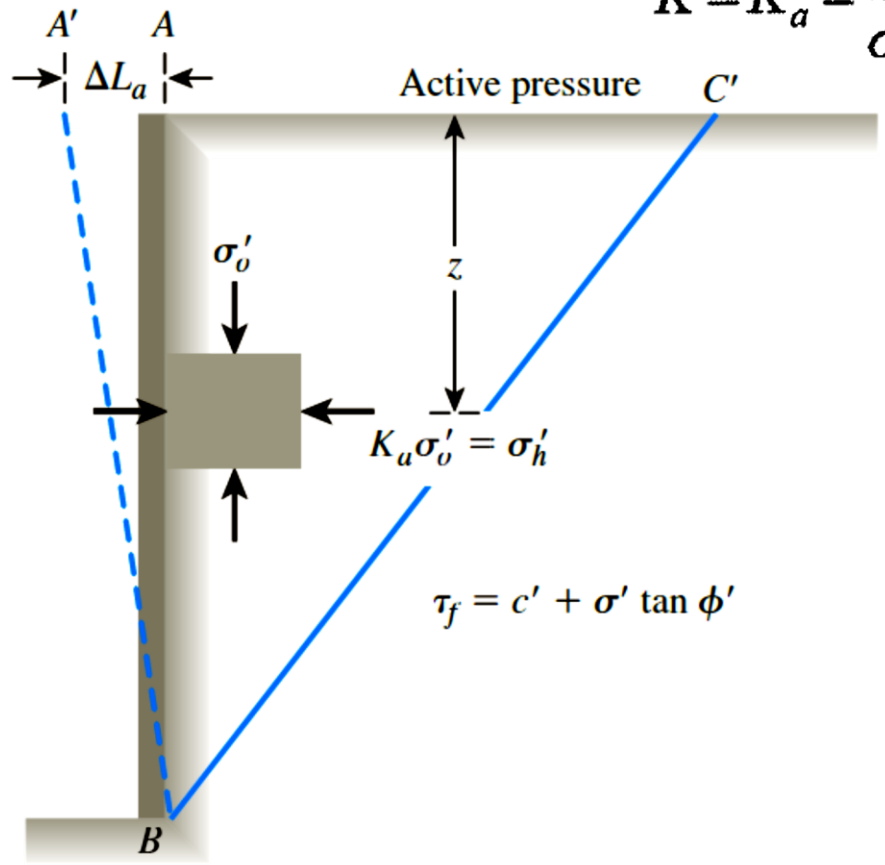
$$K = K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o} \quad (۲-۱۳)$$

که در این جا: $K_o =$ ضریب فشار خاک ساکن.

حالت ۲: چنانچه دیوار بدون اصطکاک به اندازه کافی حول قاعده خود دوران کرده و در موقعیت $A'B$ قرار گیرد (شکل ۱۳-۱-ب)، توده خاک مثلثی ABC' مجاور دیوار به حالت تعادل پلاستیک یا خمیری می‌رسد و با لغزش در امتداد صفحه BC' گسیخته می‌شود. در این زمان به تنش مؤثر افقی $(\sigma'_h = \sigma'_o)$ ، فشار محرک گفته می‌شود. در این حالت داریم:

$$K = K_a = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o} = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_o} \quad (۳-۱۳)$$

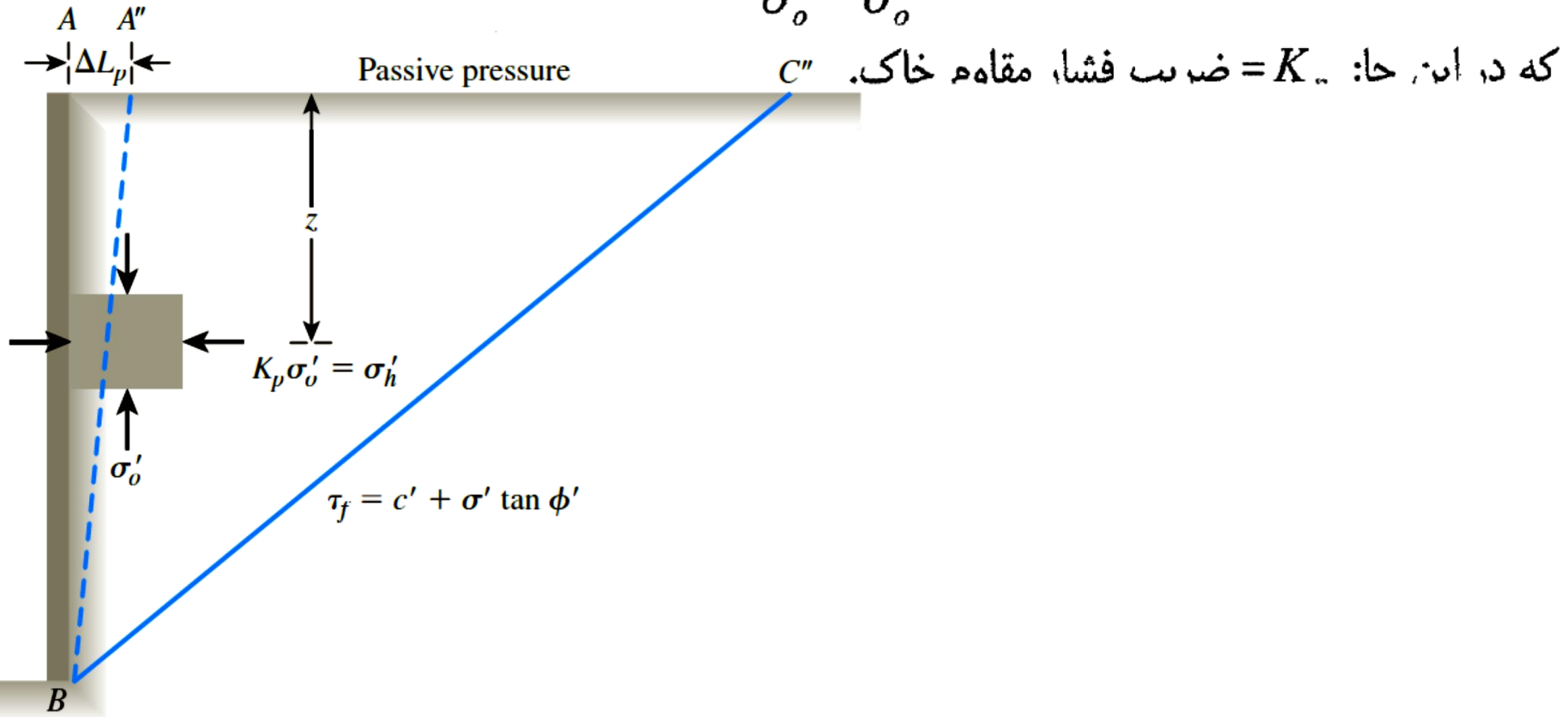
که در این جا: $K_a =$ ضریب فشار محرک خاک.



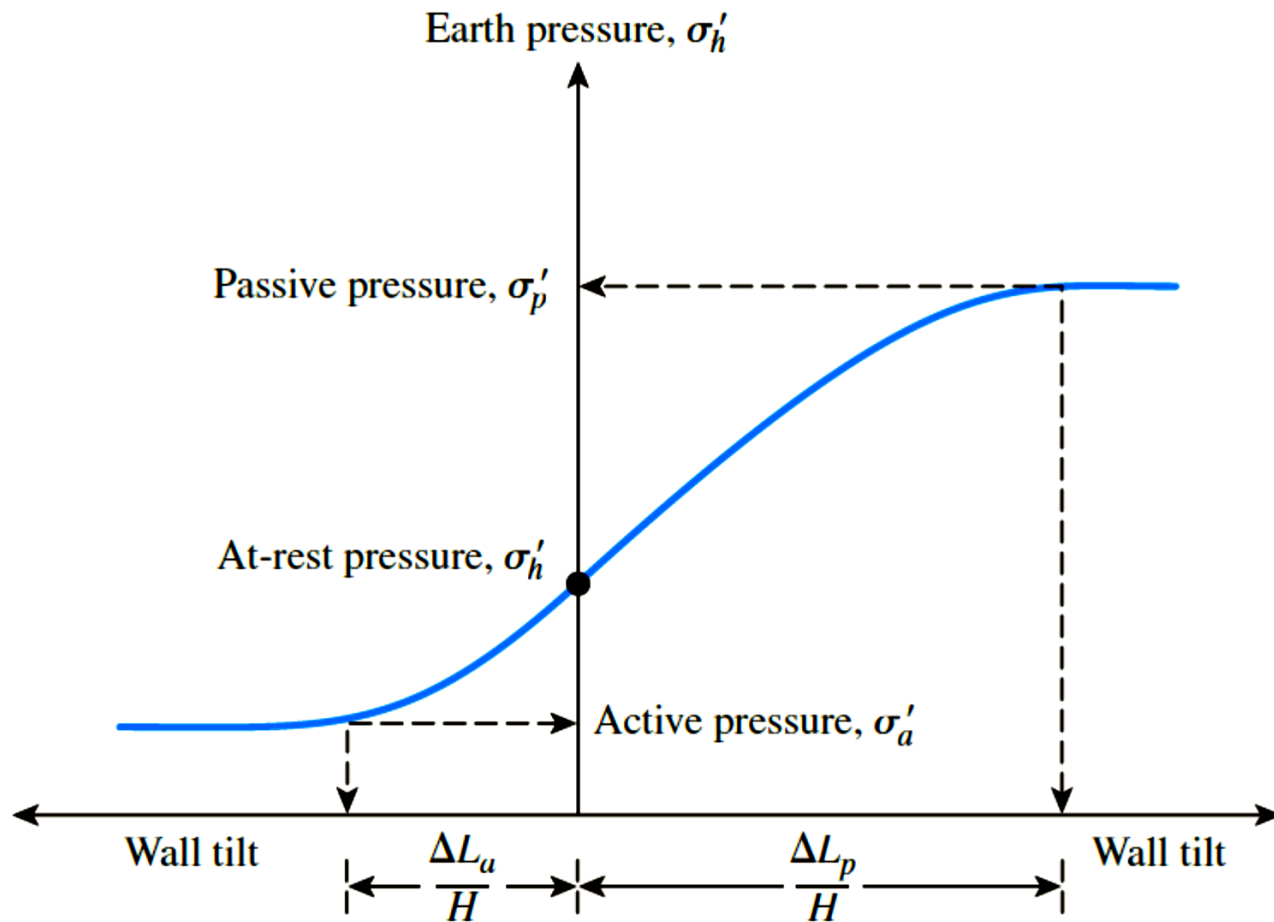
(b)

حالت ۳: چنانچه دیوار بدون اصطکاک به اندازه کافی حول قاعده خود دوران کرده و در موقعیت $A''B$ قرار گیرد (شکل ۱۳-۱-ج)، توده خاک مثلثی شکل ABC'' به حالت تعادل خمیری می‌رسد و با لغزش در امتداد صفحه BC'' گسیخته می‌شود. در این زمان به تنش مؤثر افقی $(\sigma'_h = \sigma'_p)$ ، فشار مقاوم گفته می‌شود. در این حالت داریم:

$$K = K_p = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_o} \quad (4-13)$$



در شکل ۱۳-۲ ماهیت تغییرات فشار جانبی خاک نسبت به میزان تمایل دیوار نشان داده شده است.



در جدول ۱-۱۳ مقادیر معمول $\Delta L_a/H$ ($\Delta L_a = A'A$) در شکل ۱-۱۳-ب) و $\Delta L_p/H$ در شکل ۱-۱۳-ج) جهت دستیابی به حالت محرک و مقاوم در انواع خاک‌ها ارائه شده است.

Table 13.1 Typical Values of $\Delta L_a/H$ and $\Delta L_p/H$

Soil type	$\Delta L_a/H$	$\Delta L_p/H$
Loose sand	0.001–0.002	0.01
Dense sand	0.0005–0.001	0.005
Soft clay	0.02	0.04
Stiff clay	0.01	0.02

فشار جانبی خاک در حالت سکون

فشار خاک ساکن

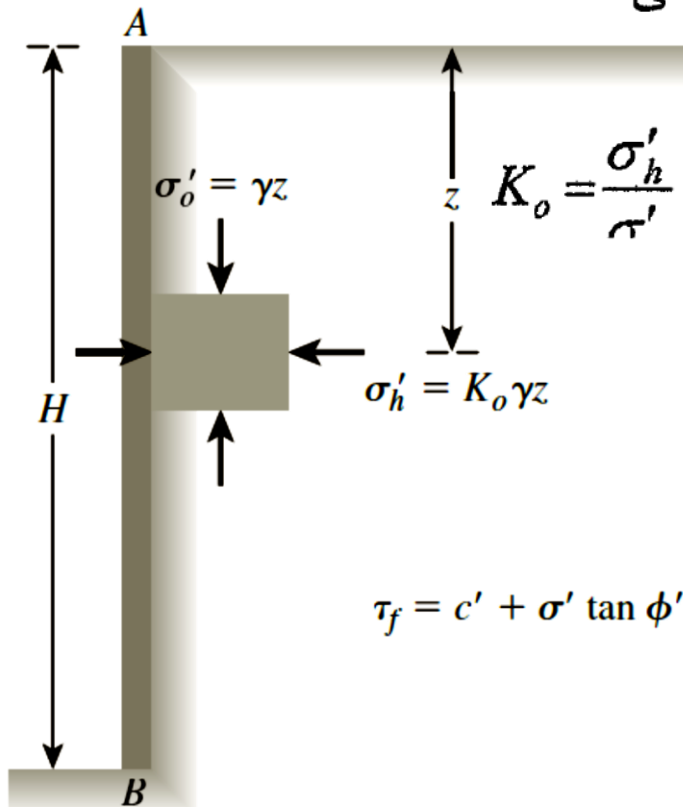
مفهوم پایه‌ای فشار خاک در حال سکون در بخش پیش مورد بررسی قرار گرفت. برای تعریف ضریب فشار خاک K_o در حالت سکون، به شکل ۱۳-۳ نگاه کنید که دیوار حایل AB را در خاک خشکی با وزن مخصوص γ نشان می‌دهد. دیوار حالت ایستا دارد. در عمق z داریم:

$$\text{تنش مؤثر قائم} = \sigma'_o = \gamma z$$

$$\text{تنش مؤثر افقی} = \sigma'_h = K_o \gamma z$$

بنابراین:

$$K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_o} = \text{ضریب فشار خاک در حالت سکون}$$



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

در خاک‌های درشت‌دانه، ضریب فشار خاک در حال سکون را می‌توان با استفاده از رابطه تجربی زیر تخمین زد (Jaky، ۱۹۴۴):

$$K_o = 1 - \sin \phi' \quad (۵-۱۳)$$

که در این جا: $\phi' =$ زاویه اصطکاک زهکشی شده.

Kulhawy و Mayne (۱۹۸۲) پس از ارزیابی ۱۷۱ نوع خاک، اصلاح زیر را برای معادله

(۵-۱۳) پیشنهاد کردند:

$$K_o = (1 - \sin \phi')(OCR)^{\sin \phi'}$$

(۷-۱۳)

که در این جا:

$OCR =$ نسبت بیش تحکیمی

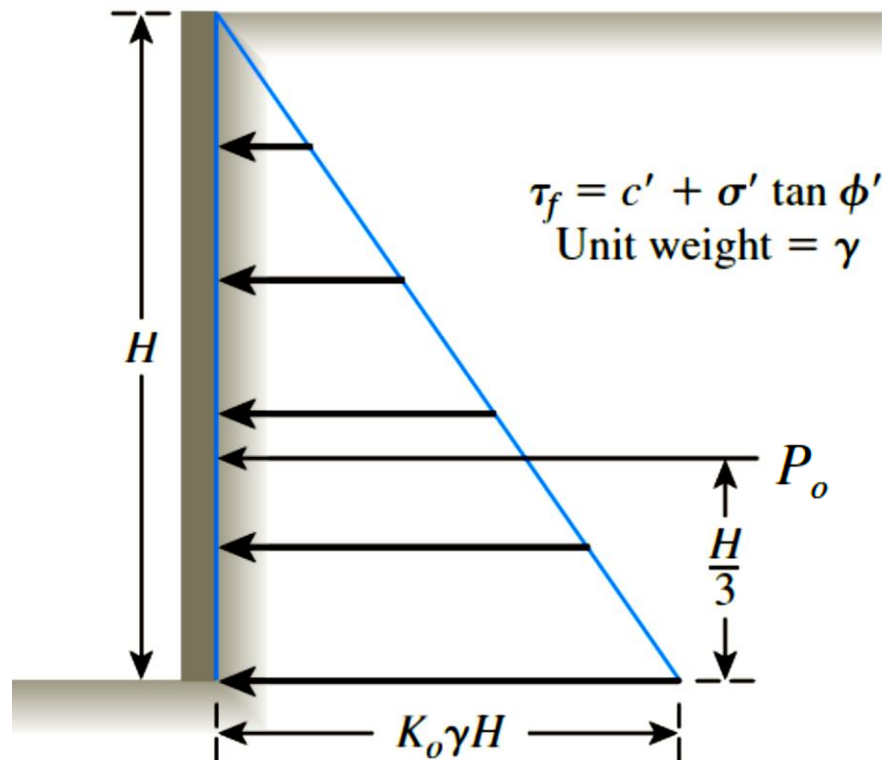
$$= \frac{\text{فشار بیش تحکیم، } \sigma'_c}{\text{فشار سربار مؤثر حاضر، } \sigma'_o}$$

برای رس‌های بیش تحکیم یافته، ضریب فشار خاک در حال سکون را می‌توان به صورت زیر تخمین زد:

$$K_{o(\text{overconsolidated})} = K_{o(\text{normally consolidated})} \sqrt{OCR} \quad (9-13)$$

در شکل ۴-۱۳ توزیع فشار جانبی خاک در حال سکون بر روی دیواری به ارتفاع H نشان داده شده است که خاک خشکی را با وزن مخصوص γ نگهداری می‌کند. نیروی کل وارد بر واحد طول دیوار یعنی P_o برابر است با سطح زیرنمودار فشار، بنابراین:

$$P_o = \frac{1}{2} K_o \gamma H^2$$



(10-13)

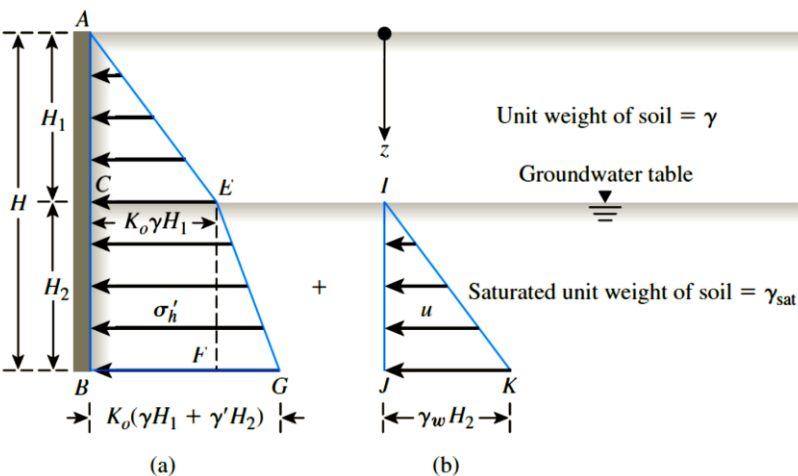
فشار خاک در حال سکون برای خاک نیمه غوطه‌ور

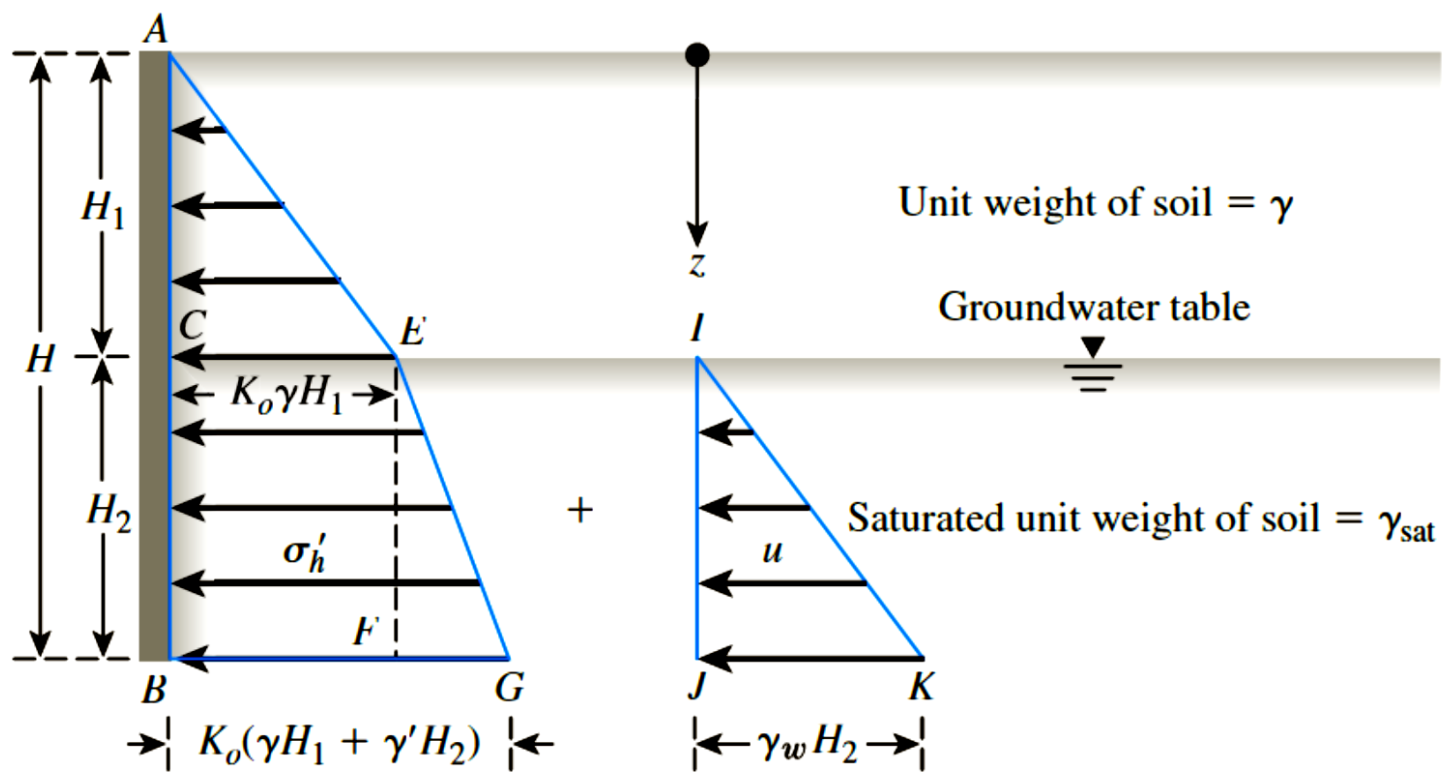
در شکل ۱۳-۵-الف دیواری به ارتفاع H نشان داده شده است. سطح آب زیرزمینی در عمق H_1 از سطح زمین قرار دارد و در سمت دیگر دیوار هیچ آبی برای توازن وجود ندارد. برای $z \leq H_1$ ، فشار جانبی خاک در حال سکون را می‌توان به صورت $\sigma'_h = K_o \gamma z$ بیان کرد. در شکل ۱۳-۵-الف تغییرات σ'_h نسبت به عمق با مثلث ACE نشان داده شده است. اما برای $z \geq H_1$ (یعنی زیر سطح آب زیرزمینی)، فشار روی دیوار از روی مؤلفه‌های تنش مؤثر و فشار آب منفذی با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\text{فشار قائم مؤثر} = \sigma'_o = \gamma H_1 + \gamma'(z - H_1) \quad (11-13)$$

که در این جا: $\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$ = وزن مخصوص خاک. بنابراین فشار جانبی مؤثر در حالت سکون برابر است با:

$$\sigma'_h = K_o \sigma'_o = K_o [\gamma H_1 + \gamma'(z - H_1)] \quad (12-13)$$





در شکل ۱۳-۵ الف تغییرات σ'_h نسبت به عمق با ذوزنقه $CEGB$ نشان داده شده است. در این جا نیز فشار جانبی ناشی از آب منفذی عبارت است از:

$$u = \gamma_w (z - H_1) \quad (13-13)$$

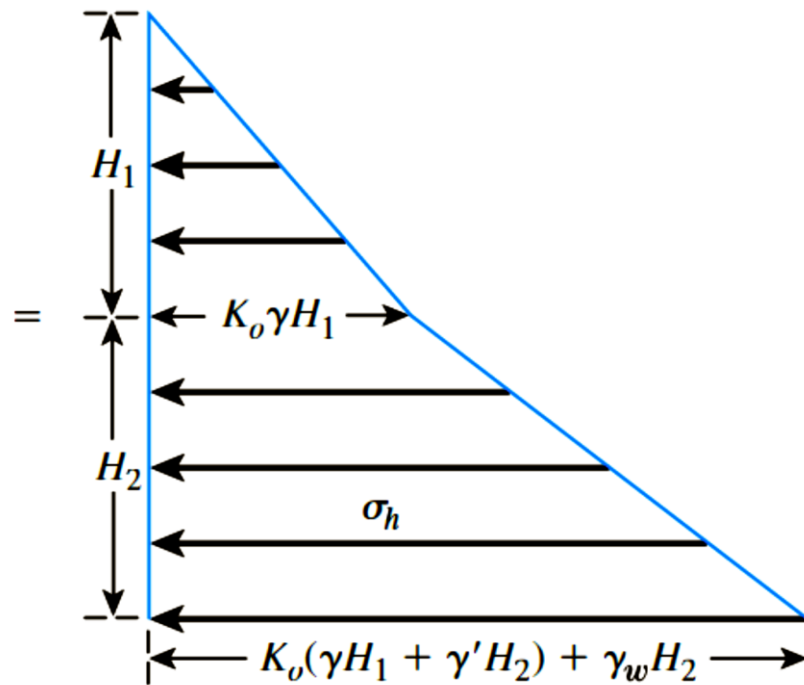
در شکل ۱۳-۵ ب تغییرات u نسبت به عمق نشان داده شده است.

بدین ترتیب فشار جانبی کل ناشی از خاک و آب در هر عمق $H_1 \leq z$ برابر است با:

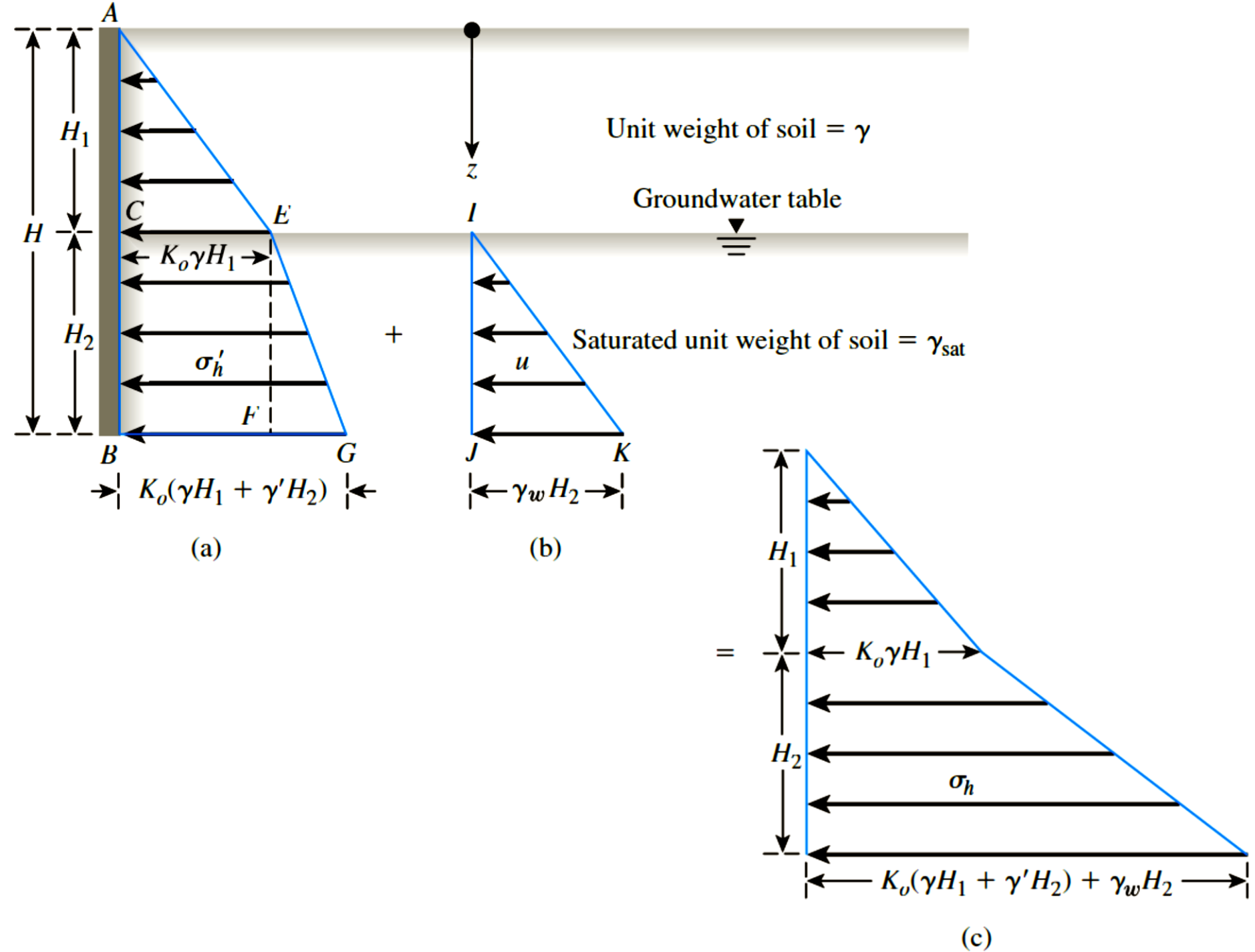
$$\begin{aligned} \sigma_h &= \sigma'_h + u \\ &= K_o [\gamma H_1 + \gamma' (z - H_1)] + \gamma_w (z - H_1) \end{aligned} \quad (13-14)$$

مقدار نیروی وارد بر واحد طول دیوار را می‌توان از جمع سطح زیر نمودارهای فشار شکل‌های ۱۳-۵-الف و ۱۳-۵-ب به دست آورد که برابر است با (شکل ۱۳-۵-ج):

$$P_o = \underbrace{\frac{1}{2} K_o \gamma H_1^2}_{\text{سطح ACE}} + \underbrace{K_o \gamma H_1 H_2}_{\text{سطح CEFB}} + \underbrace{\frac{1}{2} (K_o \gamma' + \gamma_w) H_2^2}_{\text{سطح IJK و EFG}} \quad (15-13)$$



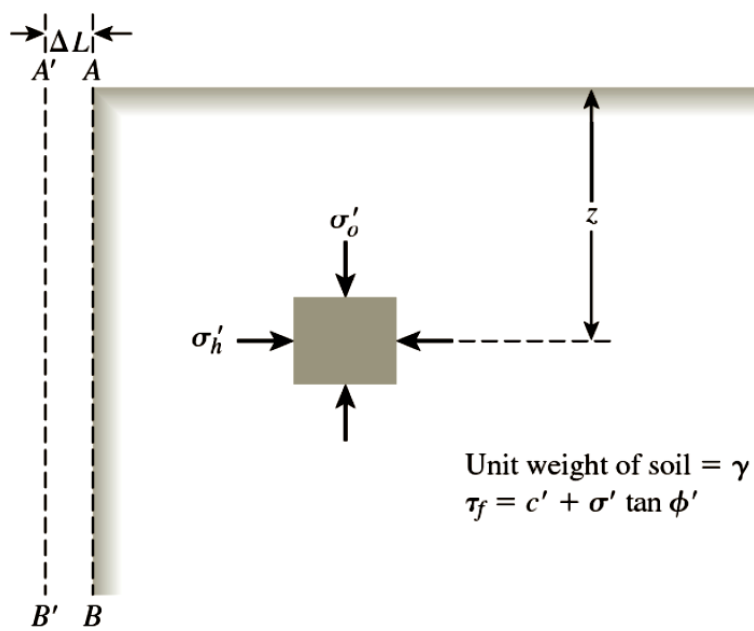
(c)



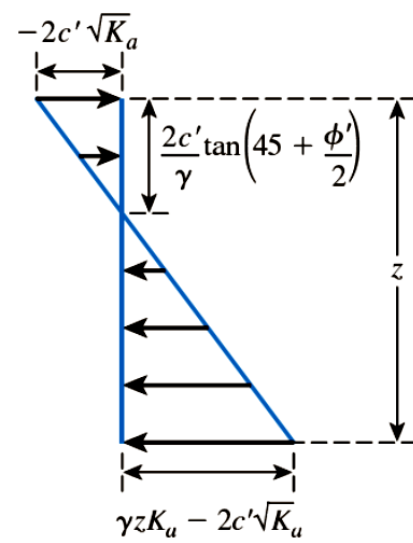
فشار خاک جانبی Rankine

نظریه فشار محرک Rankine

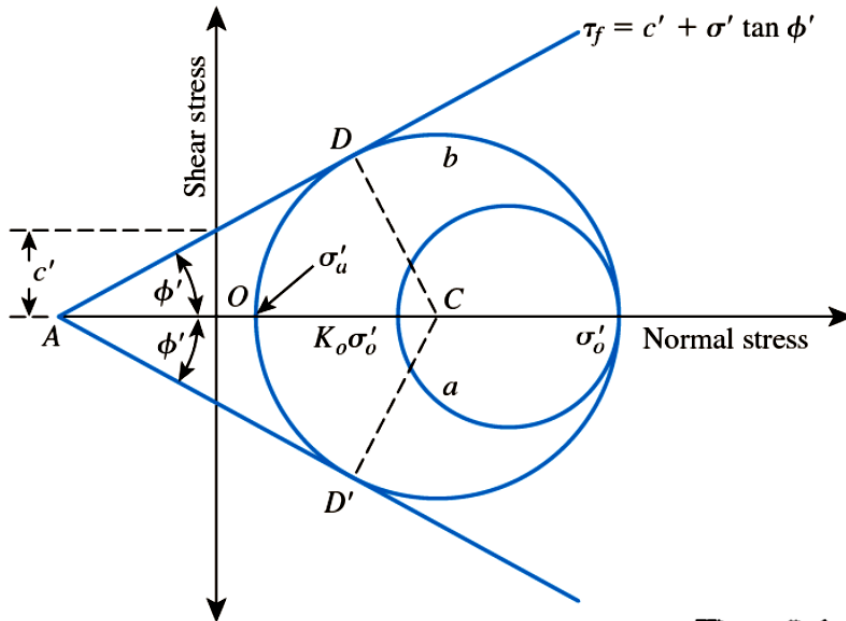
عبارت تعادل خمیری در خاک به شرایطی اشاره دارد که در آن هر نقطه‌ای از توده خاک در آستانه گسیختگی قرار دارد. Rankine (۱۸۵۷) شرایط تنش موجود در خاک را در حالت تعادل خمیری مورد بررسی قرار داد.



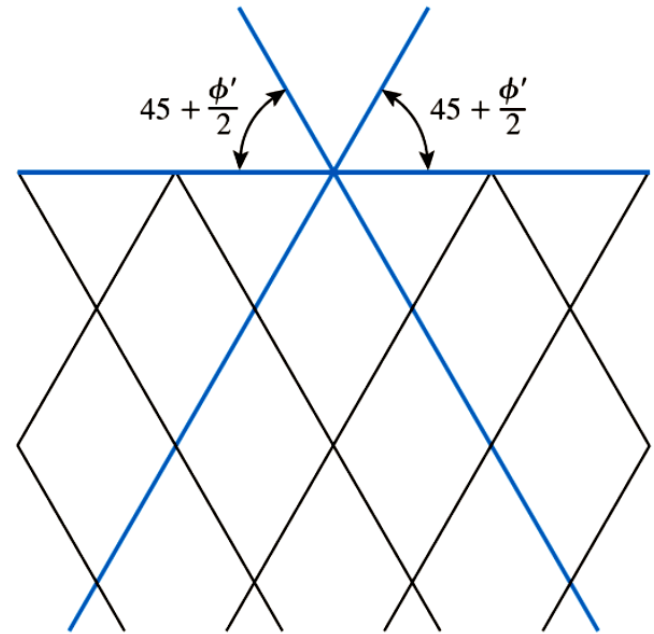
(a)



(c)



(b)



(d)

شکل ۱۳-۷ فشار خاک محرک رانکین

شکل ۱۳-۷- الف توده خاکی را نشان می‌دهد که توسط دیوار بدون اصطکاک AB با عمق بی‌نهایت محدود شده است. تنش‌های اصلی مؤثر قائم و افقی روی جزء خاک واقع در عمق z به ترتیب عبارتند از σ'_o و σ'_h . همان طور که در بخش ۱۳-۲ دیدیم، چنانچه دیوار AB امکان حرکت نداشته باشد، $\sigma'_h = K_o \sigma'_o$. شرایط تنش در جزء خاک را می‌توان با دایره a Mohr در شکل ۱۳-۷ ب نشان داد. اما چنانچه دیوار AB امکان جدا شدن تدریجی از توده خاک را داشته باشد، تنش اصلی افقی کاهش می‌یابد. در نهایت حالتی ایجاد می‌شود که شرایط تنش موجود در جزء خاک را می‌توان با دایره b Mohr نشان داد، یعنی حالت تعادل خمیری و خاک گسیخته می‌شود. این حالت نشانگر حالت محرک Rankine است و فشار مؤثر σ'_a روی صفحه قائم (که یک صفحه اصلی است)، فشار خاک محرک Rankine است. حال σ'_a را بر حسب γ ، z ، c' و ϕ' از روی شکل ۱۳-۷ ب به دست می‌آوریم.

$$\sin \phi' = \frac{CD}{AC} = \frac{CD}{AO + OC}$$

$$CD = \text{radius of the failure circle} = \frac{\sigma'_o - \sigma'_a}{2}$$

$$AO = c' \cot \phi'$$

و

$$OC = \frac{\sigma'_o + \sigma'_a}{2}$$

بنابراین:

$$\sin \phi' = \frac{\frac{\sigma'_o - \sigma'_a}{2}}{c' \cot \phi' + \frac{\sigma'_o + \sigma'_a}{2}}$$

یا

$$c' \cos \phi' + \frac{\sigma'_o + \sigma'_a}{2} \sin \phi' = \frac{\sigma'_o - \sigma'_a}{2}$$

یا

$$\sigma'_a = \sigma'_o \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} - 2c' \frac{\cos \phi'}{1 + \sin \phi'}$$

(۱۶-۱۳)

$$\sigma'_a = \text{فشار سربار مؤثر قائم} = \gamma z$$

$$\frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right)$$

و

$$\frac{\cos \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right)$$

با جایگزین کردن مقادیر پیشین در معادله (۱۳-۱۶) نتیجه می‌شود:

$$\sigma'_a = \gamma z \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) - 2c' \tan \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (۱۳-۱۷)$$

در شکل ۱۳-۷ ج تغییرات σ'_a نسبت به عمق نشان داده شده است. برای خاک‌های غیرچسبنده، $c' = 0$ و:

$$\sigma'_a = \sigma'_o \tan^2\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right) \quad (18-13)$$

نسبت σ'_a به σ'_o را ضریب فشار خاک محرک Rankine می‌نامند که به صورت زیر بیان می‌شود:

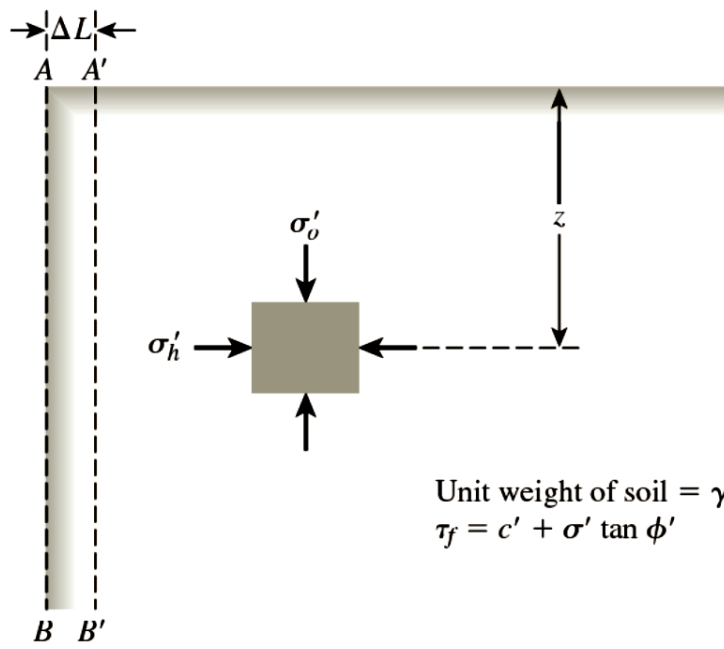
$$K_a = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_o} = \tan^2\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right) \quad (19-13)$$

باز هم از روی شکل ۱۳-۷ ب می‌توان دید که صفحات گسیختگی درون خاک با امتداد صفحه اصلی حداکثر (یعنی امتداد افقی) زاویه $\pm\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)$ درجه را تشکیل می‌دهند. این صفحات را صفحات لغزش بالقوه می‌نامند و در شکل ۱۳-۷ د نشان داده شده‌اند.

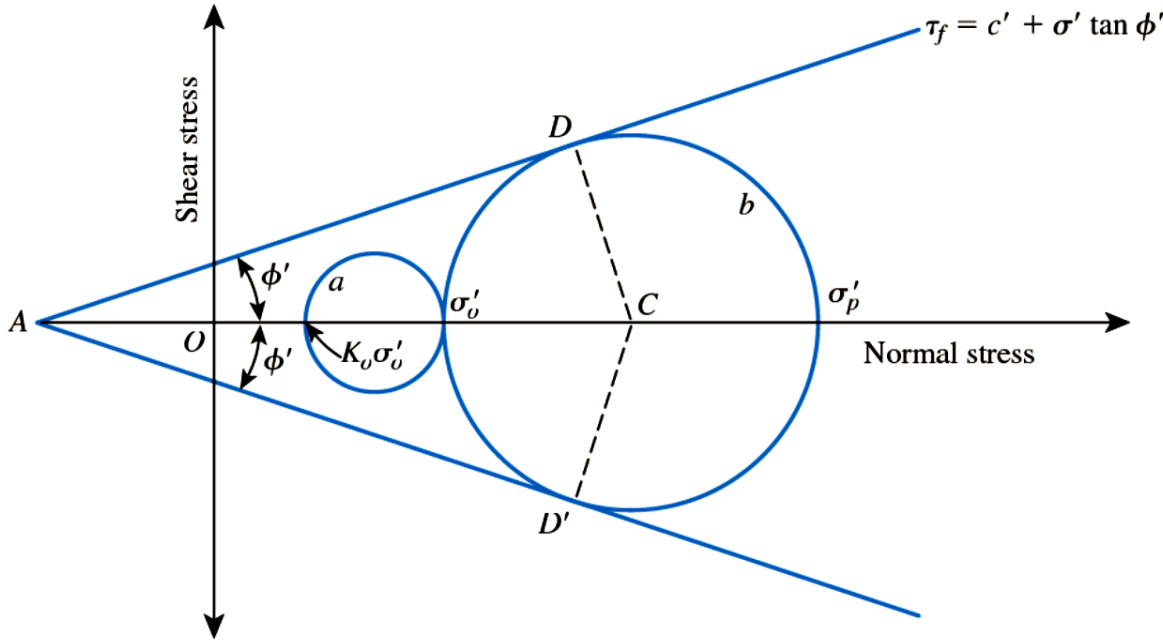
درک این نکته مهم است که برای σ_a می‌توان معادله مشابهی را بر اساس پارامترهای مقاومت برشی تنش کل به دست آورد، یعنی $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$. در این حالت:

$$\sigma_a = \gamma z \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) - 2c \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (20-13)$$

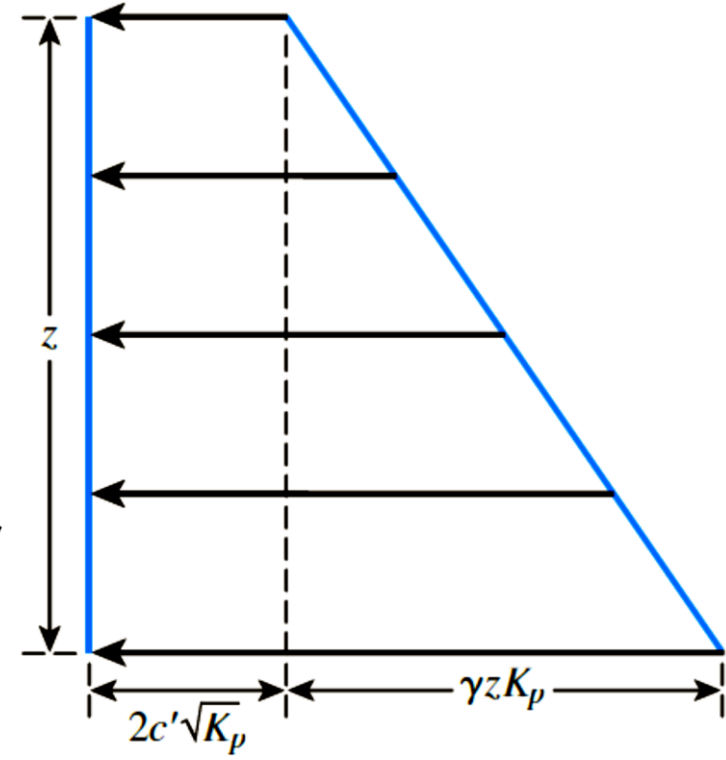
نظرية فشار مقاوم Rankine



(a)



(b)



(c)

در حالت مقاوم Rankine چنانچه دیوار به صورت تدریجی به درون توده خاک رانده شود، تنش اصلی مؤثر σ'_h افزایش پیدا خواهد کرد. در نهایت دیوار به حالتی می‌رسد که شرایط تنش جزء خاک را می‌توان با دایره Mohr b بیان کرد. در این زمان خاک دچار گسیختگی می‌شود. به این شرایط حالت مقاوم Rankine گفته می‌شود. فشار خاک جانبی σ'_p که تنش اصلی حداکثر است، فشار خاک مقاوم Rankine نامیده می‌شود. با توجه به شکل ۱۳-۸-ب مشاهده می‌شود که:

$$\begin{aligned}\sigma'_p &= \sigma'_o \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c' \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) \\ &= \gamma z \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) + 2c' \tan\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)\end{aligned}\quad (۱۳-۲۱)$$

چگونگی به دست آوردن این معادله شبیه حالت محرک Rankine است.

در شکل ۱۳-۸-ج تغییرات فشار محرک نسبت به عمق نشان داده شده است. برای خاک‌های غیرچسبنده ($c' = 0$) داریم:

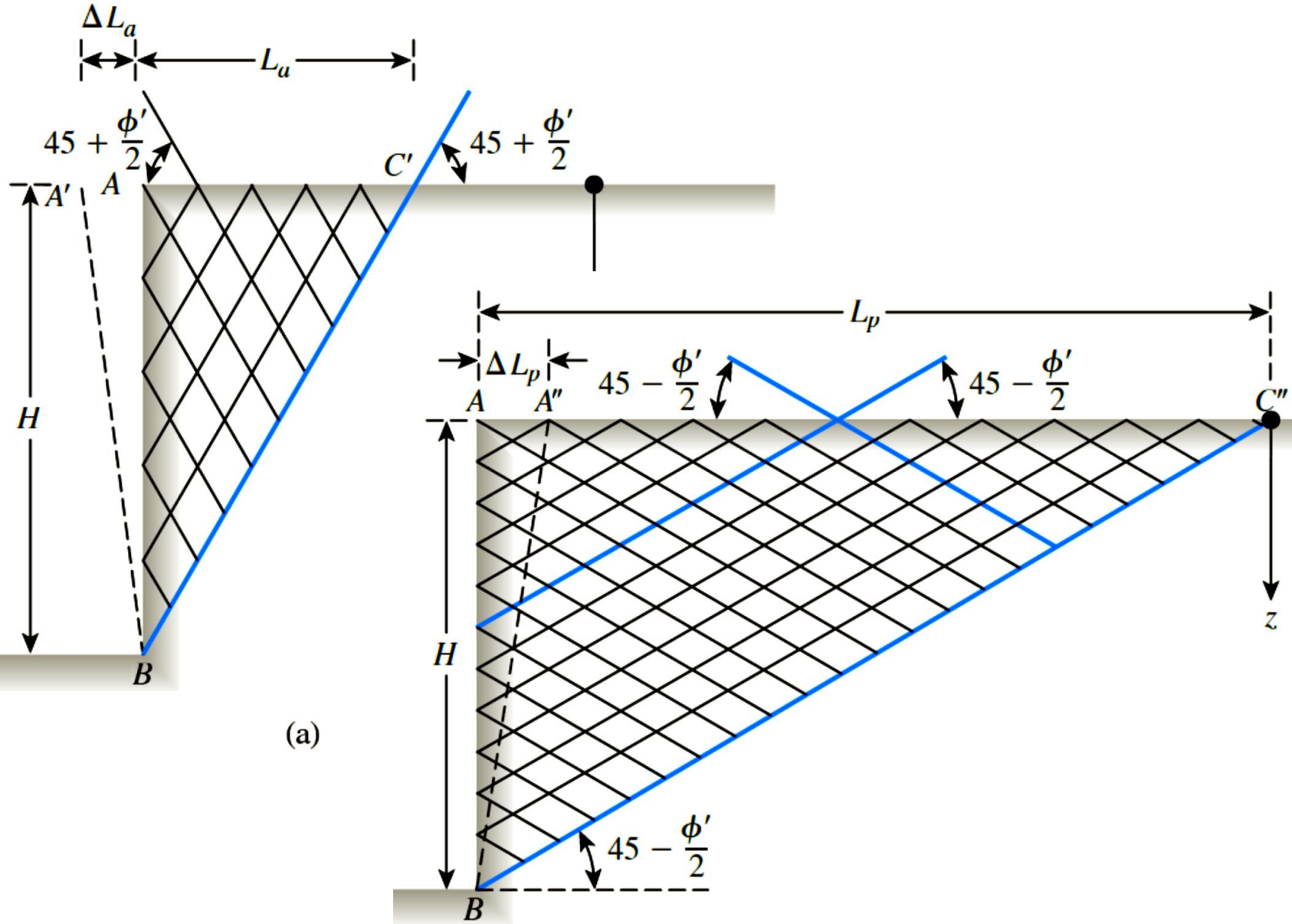
$$\sigma'_p = \sigma'_o \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right)$$

$$\frac{\sigma'_p}{\sigma'_o} = K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) \quad (۲۲-۱۳)$$

در معادله قبل به K_p یعنی (نسبت تنش‌های مؤثر)، ضریب فشار خاک مقاوم Rankine گفته می‌شود.

نقاط D و D' روی دایره گسیختگی (شکل ۱۳-۸-ب) به صفحات لغزش درون خاک مربوط‌اند. برای حالت مقاوم Rankine، زاویه صفحات لغزش با امتداد صفحه اصلی حداکثر (یعنی امتداد افقی) $(45 - \frac{\phi'}{2}) \pm$ درجه است. در شکل ۱۳-۸-د توزیع صفحات لغزش درون توده خاک نشان داده شده است.

تسلیم دیوار با ارتفاع محدود



(a)

(b)

نمودار توزیع فشار جانبی خاک بر روی دیوارهای حایل خاکریز - خاک غیرچسبنده با سطح افقی زمین

حالت محرک: در شکل ۱۳-۱۳-الف دیوار حایلی با خاکریزی از خاک غیرچسبنده با سطح افقی نشان داده شده است. وزن مخصوص و زاویه اصطکاک خاک به ترتیب γ و ϕ' است. برای حالت محرک Rankine، فشار خاک روی دیوار حایل در هر عمق را می‌توان با معادله (۱۳-۱۷) بیان کرد:

$$\sigma'_a = K_a \gamma z \quad (\text{Note: } c' = 0)$$

توجه داشته باشید که σ'_a به صورت خطی با عمق افزایش پیدا می‌کند و در پای دیوار برابر است با:

$$\sigma'_a = K_a \gamma H \quad (۱۳-۳۵)$$

نیروی کل وارد بر واحد طول دیوار برابر است با سطح زیر نمودار فشار، بنابراین:

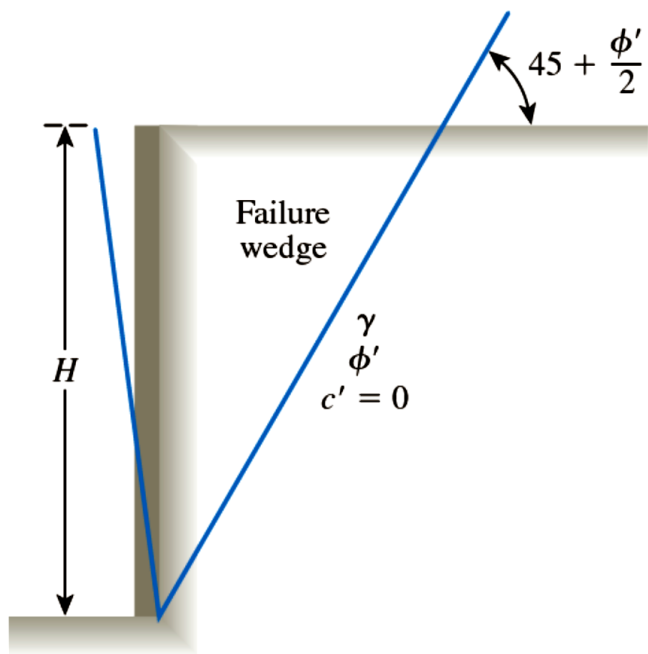
$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (۱۳-۳۶)$$

حالت مقاوم: در شکل ۱۳-۱۳- ب توزیع فشار جانبی بر روی دیوار حایلی به ارتفاع H برای حالت مقاوم Rankine نشان داده شده است. فشار جانبی خاک در هر عمق دلخواه z برابر است با [معادلهٔ (۱۳-۲۲)، $c' = 0$]:

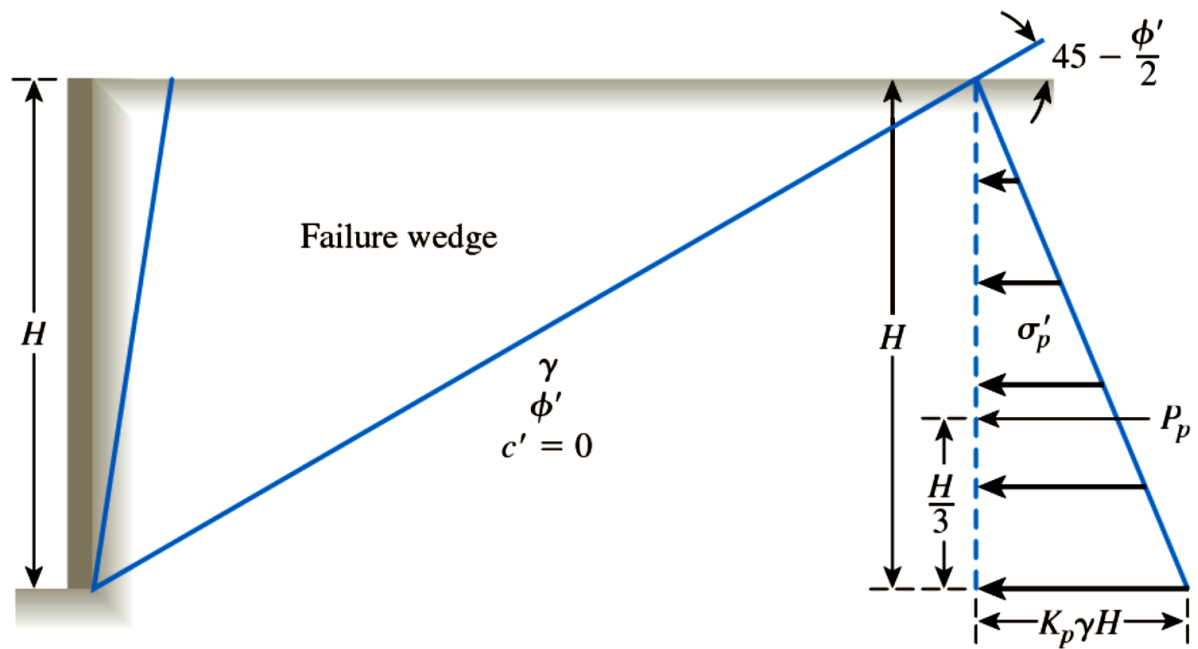
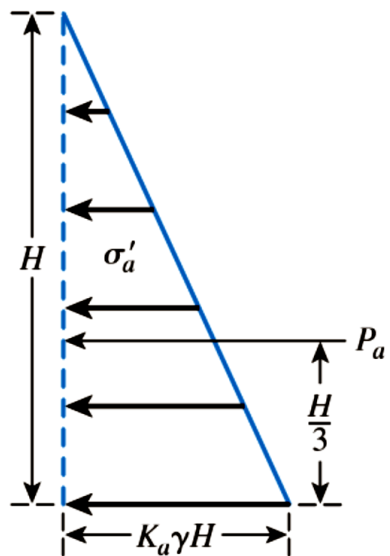
$$\sigma'_p = K_p \gamma H \quad (۱۳-۳۷)$$

نیروی کل وارد بر واحد طول دیوار عبارت است از:

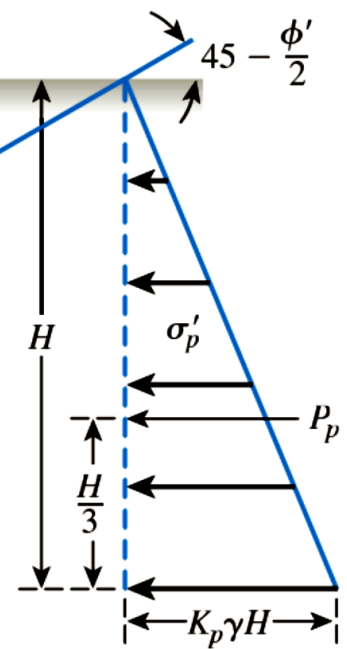
$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 \quad (۱۳-۳۸)$$



(a)



(b)



خاکریز - خاک غیرچسبنده نیمه غوطه‌ور همراه با سربار

حالت محرک: در شکل ۱۳-۱۴- الف دیوار حایل بدون اصطکاکی به ارتفاع H همراه با خاکریزی از خاک غیرچسبنده نشان داده شده است. سطح آب زیرزمینی در عمق H_1 از سطح زمین قرار دارد و بر روی خاکریز فشار سربار q بر واحد سطح وجود دارد. با استفاده از معادله (۱۳-۱۹)، فشار خاک محرک مؤثر در هر عمق دلخواه را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\sigma'_a = K_a \sigma'_o \quad (۱۳-۳۹)$$

که در این جا: σ'_o و σ'_a = به ترتیب فشار قائم و فشار جانبی مؤثر. در $z = 0$ داریم:

$$\sigma_o = \sigma'_o = q \quad (۱۳-۴۰)$$

و

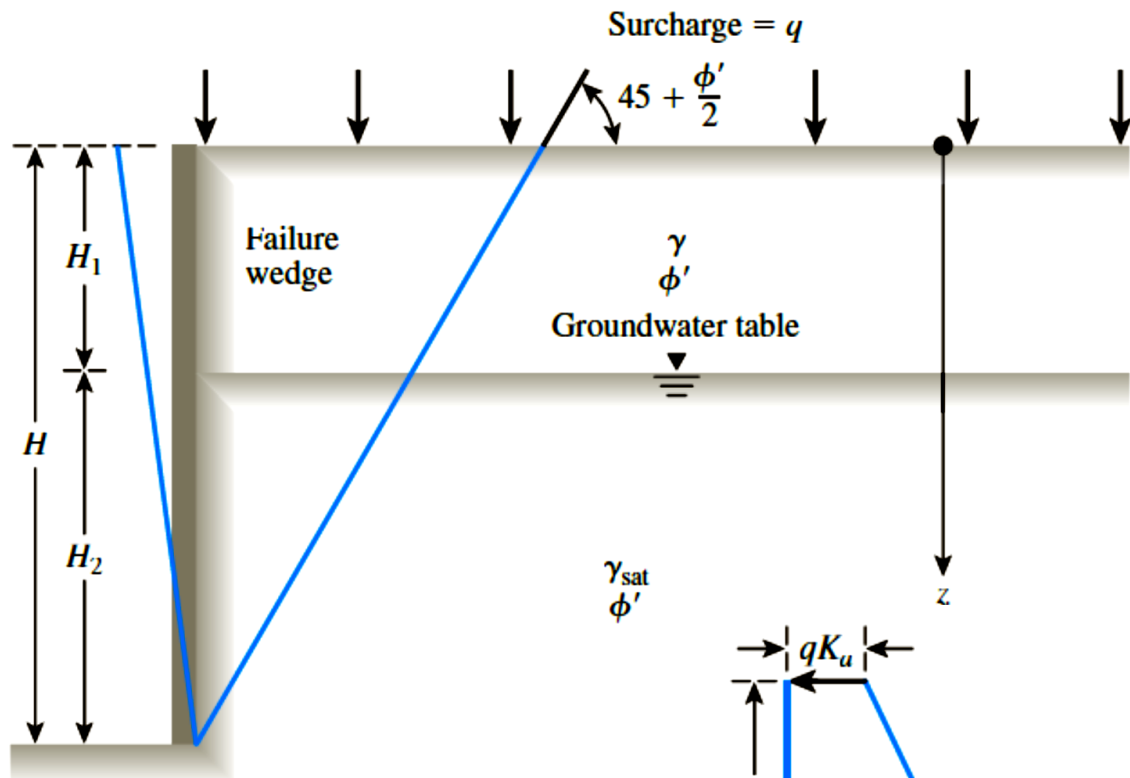
$$\sigma'_a = K_a q \quad (۱۳-۴۱)$$

در عمق $z = H_1$ داریم:

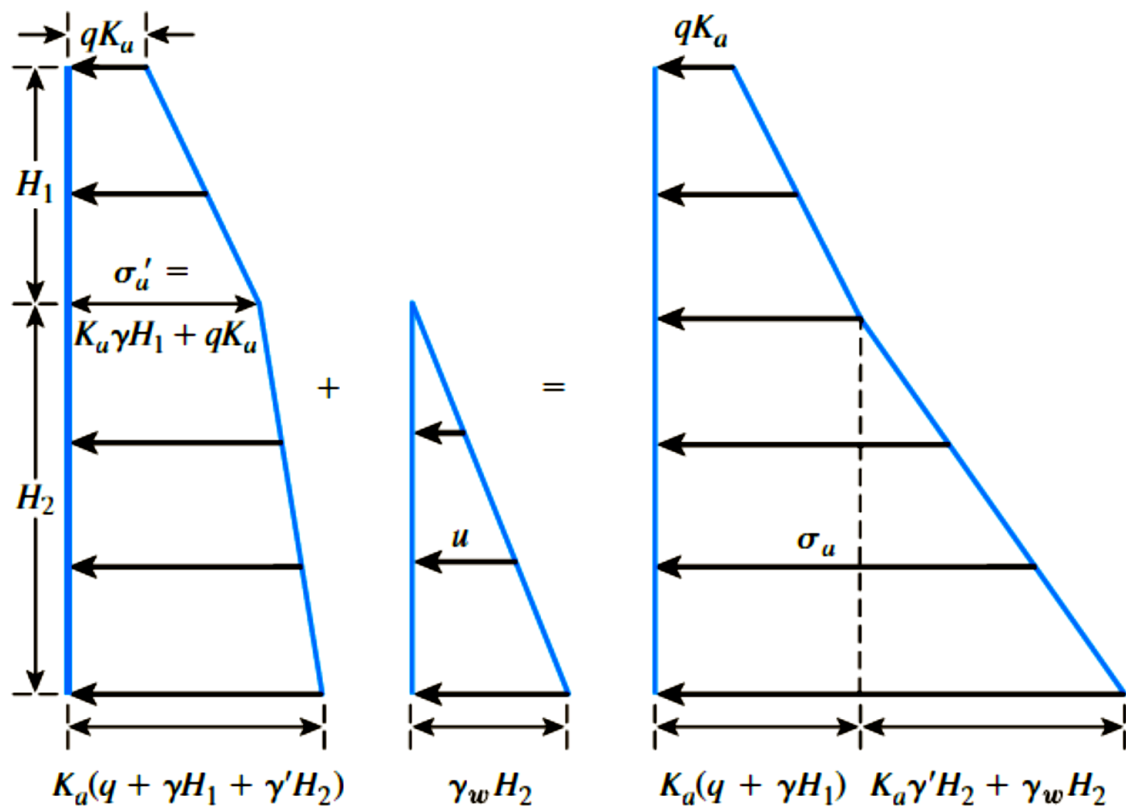
$$\sigma'_o = (q + \gamma H_1) \quad (۱۳-۴۲)$$

و

$$\sigma'_a = K_a (q + \gamma H_1) \quad (۱۳-۴۳)$$



(a)



شکل ۱۳-۱۴ توزیع فشار خاک مؤثر Rankine بر روی دیوار حایلی با خاکریزی از خاک غیرچسبنده نیمه غوطه‌ور همراه با سربار.

در عمق $z = H$ داریم:

$$\sigma'_o = (q + \gamma H_1 + \gamma' H_2) \quad (۱۳-۴۴)$$

و

$$\sigma'_a = K_a(q + \gamma H_1 + \gamma' H_2) \quad (۱۳-۴۵)$$

که در این جا: $\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$. در شکل ۱۳-۱۴ ب تغییرات σ'_a نسبت به عمق نشان داده شده است. فشار جانبی ناشی از آب منفذی بر روی دیوار از عمق $z = 0$ تا H_1 برابر با صفر و از عمق $H_1 < z$ به صورت خطی با عمق افزایش پیدا می کند (شکل ۱۳-۱۴ ج). در $z = H$ داریم:

$$u = \gamma_w H_2$$

نمودار فشار جانبی کل (شکل ۱۳-۱۴ د) جمع نمودارهای فشار در شکل های ۱۳-۱۴ ب و ۱۳-۱۴ ج است. نیروی محرک کل وارد بر واحد طول دیوار برابر است با سطح زیر نمودار فشار کل. بنابراین:

$$P_a = K_a q H + \frac{1}{2} K_a \gamma H_1^2 + K_a \gamma H_1 H_2 + \frac{1}{2} (K_a \gamma' + \gamma_w) H_2^2 \quad (۱۳-۴۶)$$

حالت مقاوم: در شکل ۱۳-۱۵- الف همان دیوار حایل شکل ۱۳-۱۴- الف نشان داده شده است.

فشار مقاوم Rankine روی دیوار در هر عمق دلخواه را می‌توان با استفاده از معادله (۱۳-۲۲) بیان کرد:

$$\sigma'_p = K_p \sigma'_o$$

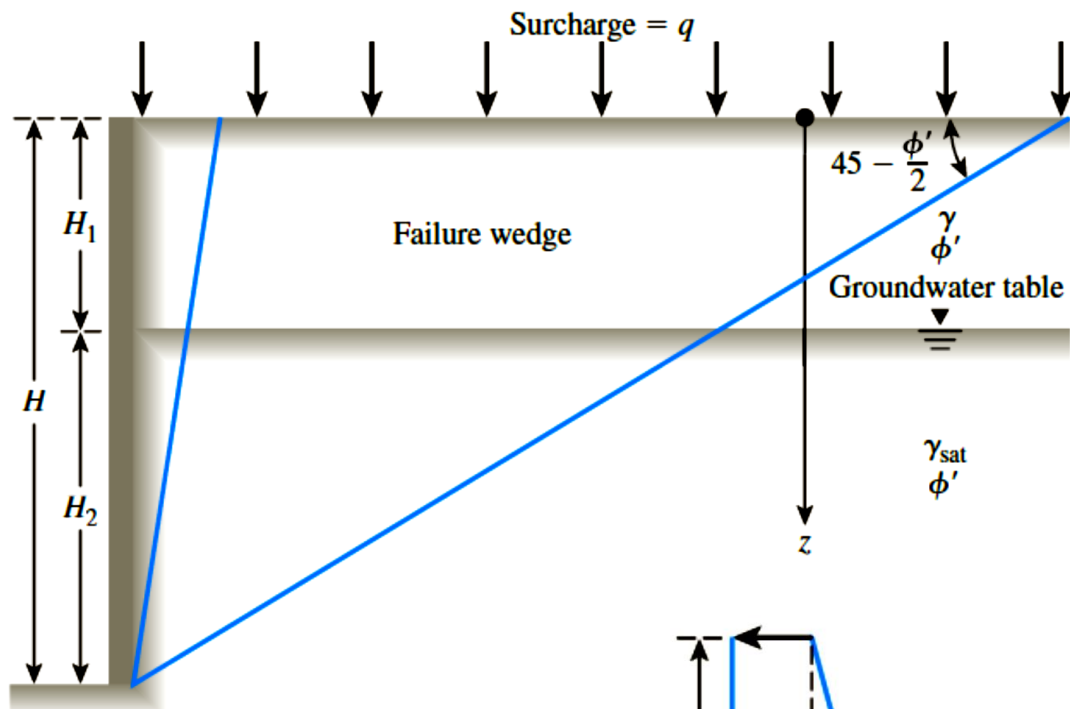
با استفاده از معادله قبل می‌توان تغییرات σ'_p نسبت به عمق را به صورت نشان داده شده در شکل

۱۳-۱۵- ب تعیین کرد. تغییرات فشار ناشی از آب منفذی بر روی دیوار در شکل ۱۳-۱۵- ج نشان داده

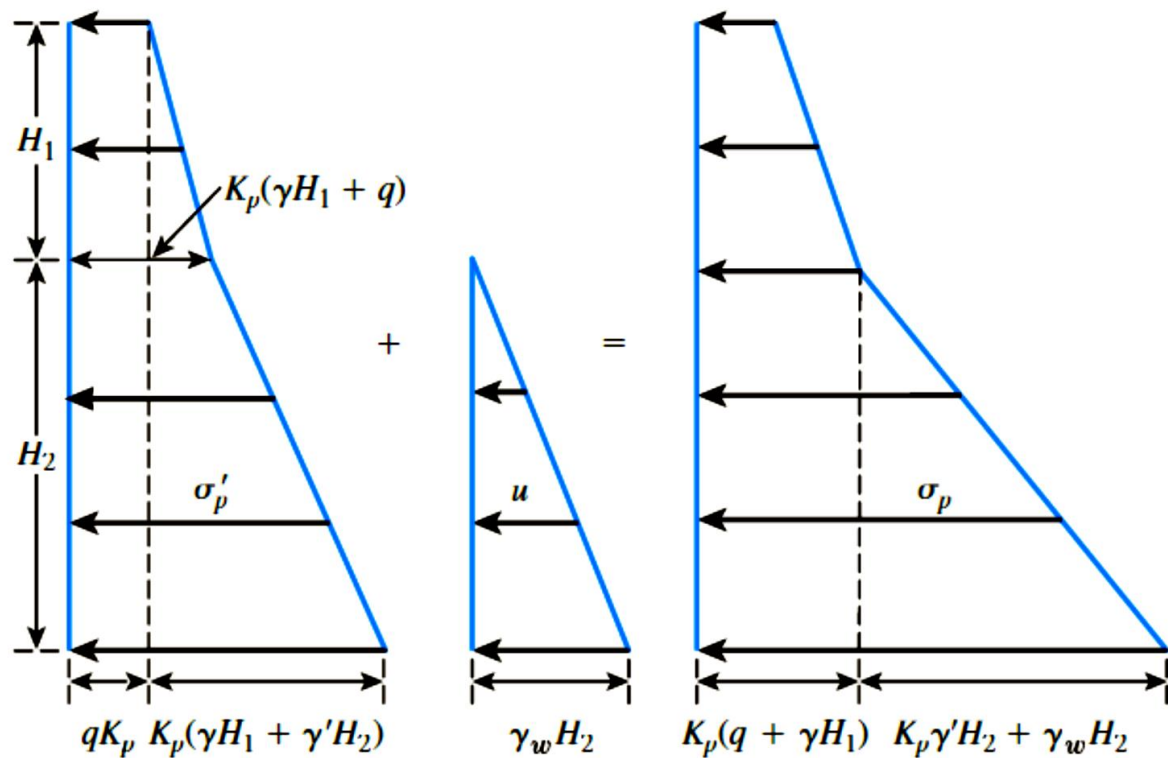
شده است و شکل ۱۳-۱۵- د توزیع فشار کل σ_p نسبت به عمق را نشان می‌دهد. نیروی مقاوم کل به

ازای واحد طول دیوار برابر است با سطح زیر نمودار نشان داده شده در شکل ۱۳-۱۵- د:

$$P_p = K_p qH + \frac{1}{2} K_p \gamma H_1^2 + K_p \gamma H_1 H_2 + \frac{1}{2} (K_p \gamma' + \gamma_w) H_2^2 \quad (۱۳-۴۷)$$



شکل ۱۳-۱۵ توزیع فشار خاک مقاوم Rankine بر روی دیوار حایلی با خاکریزی از خاک غیرچسبنده نیمه غوطه‌ور همراه با سربار.



خاکریز - خاک چسبنده با سطح افقی

حالت محرک: در شکل ۱۳-۱۶- الف دیوار حایل بدون اصطکاکی با خاکریزی از خاک چسبنده نشان داده شده است. فشار محرک روی دیوار در هر عمقی از سطح زمین را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [معادله (۱۳-۱۷)]:

$$\sigma'_a = K_a \gamma z - 2\sqrt{K_a} c'$$

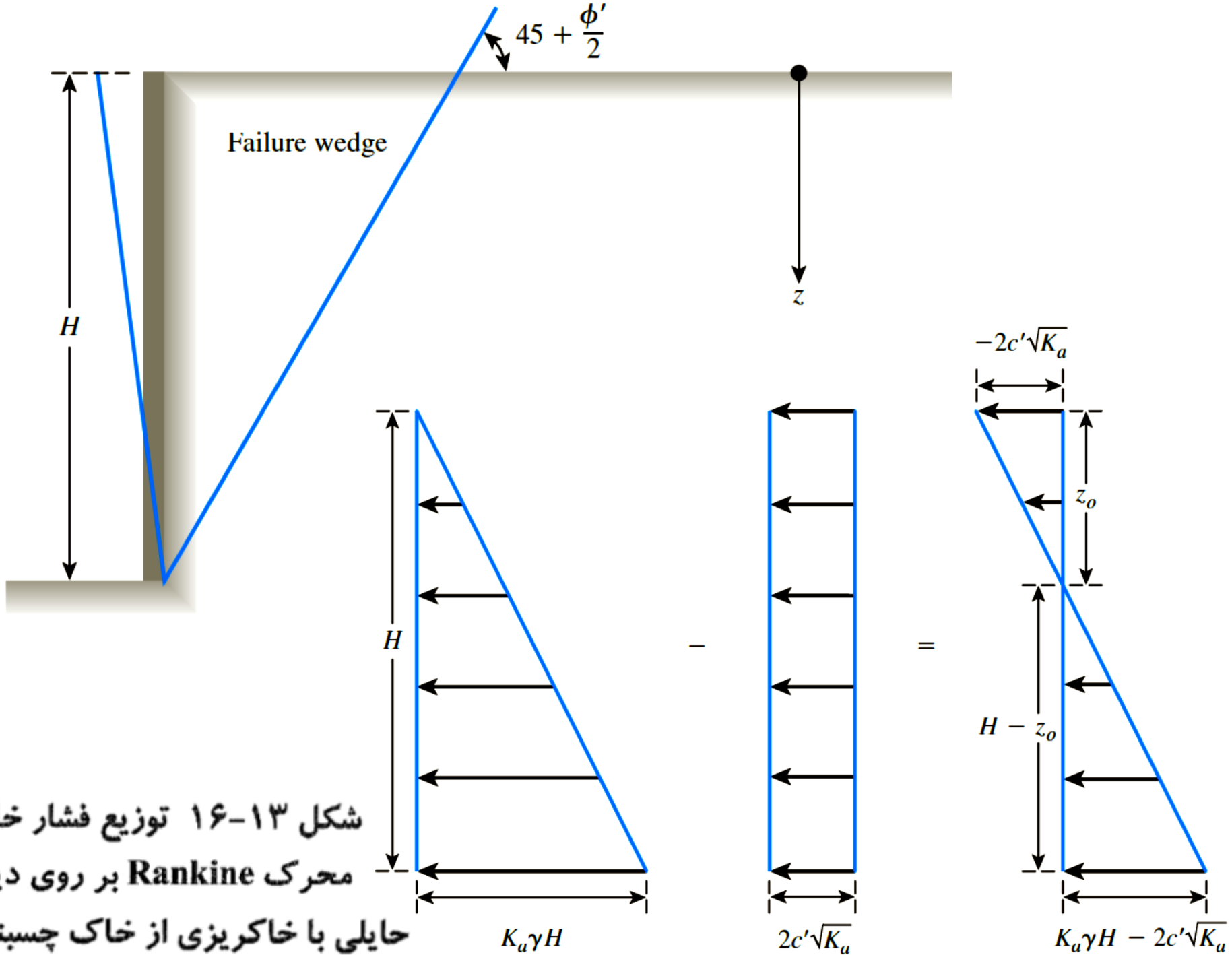
تغییرات $K_a \gamma z$ نسبت به عمق در شکل ۱۳-۱۶- ب و تغییرات $2\sqrt{K_a} c'$ نسبت به عمق در شکل ۱۳-۱۶- ج نشان داده شده است. توجه داشته باشید که $2\sqrt{K_a} c'$ تابعی از z نیست، به همین دلیل شکل ۱۳-۱۶- ج مستطیل است. تغییرات مقدار خالص σ'_a نسبت به عمق در شکل ۱۳-۱۶- د نشان داده شده است. همچنین توجه داشته باشید که به دلیل تأثیر چسبندگی، σ'_a در بخش بالایی دیوار حایل منفی است. عمق z_o که در آن فشار محرک صفر می‌شود را می‌توان با استفاده از معادله (۱۳-۱۷) به صورت زیر به دست آورد:

$$K_a \gamma z_o - 2\sqrt{K_a} c' = 0$$

یا

$$z_o = \frac{2c'}{\gamma\sqrt{K_a}}$$

(۱۳-۴۸)



شکل ۱۳-۱۶ توزیع فشار خاک
 محرک Rankine بر روی دیوار
 حایلی با خاکریزی از خاک چسبنده.

برای شرایط زهکشی نشده، یعنی $\phi = 0$ ، $K_a = \tan^2 45 = 1$ و $c = c_u$ (چسبندگی زهکشی نشده)، از معادله (۱۳-۲۰) داریم:

$$z_o = \frac{2c_u}{\gamma} \quad (۱۳-۴۹)$$

بنابراین با گذشت زمان، در سطح تماس خاک - دیوار ترک‌هایی کششی تا عمق z_o ایجاد می‌شود. نیروی محرک کل به ازای واحد طول دیوار را می‌توان از روی سطح زیرنمودار فشار کل (شکل ۱۳-۱۶-د) به دست آورد:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 - 2\sqrt{K_a} c' H \quad (۱۳-۵۰)$$

برای شرایط $\phi = 0$ داریم:

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 - 2c_u H \quad (۱۳-۵۱)$$

برای محاسبه نیروی محرک کل، روش معمول در نظر گرفتن ترک‌های کششی است. از آن جا که پس از ایجاد ترک‌های کششی، در بین خاک و دیوار تا عمق z_0 هیچ تماسی وجود ندارد، تنها توزیع فشار محرک روی دیوار در فاصله $z = 2c' / (\gamma \sqrt{K_a})$ و H (شکل ۱۳-۱۶-د) در نظر گرفته می‌شود. در این حالت:

$$P_a = \frac{1}{2} (K_a \gamma H - 2\sqrt{K_a} c') \left(H - \frac{2c'}{\gamma \sqrt{K_a}} \right)$$

(۵۲-۱۳)

$$= \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 - 2\sqrt{K_a} c' H + 2 \frac{c'^2}{\gamma}$$

برای شرایط $\phi = 0$ داریم:

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 - 2c_u H + 2 \frac{c_u^2}{\gamma}$$

(۵۳-۱۳)

حالت مقاوم: در شکل ۱۳-۱۷-الف همان دیوار حایل با خاکریزی مشابه با مورد شکل ۱۳-۱۶-الف نشان داده شده است. فشار مقاوم Rankine بر روی دیوار در عمق z را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [معادله (۱۳-۲۱)]:

$$\sigma'_p = K_p \gamma z + 2\sqrt{K_p} c'$$

در $z = 0$ داریم:

$$\sigma'_p = 2\sqrt{K_p} c' \quad (۱۳-۵۴)$$

در $z = H$ داریم:

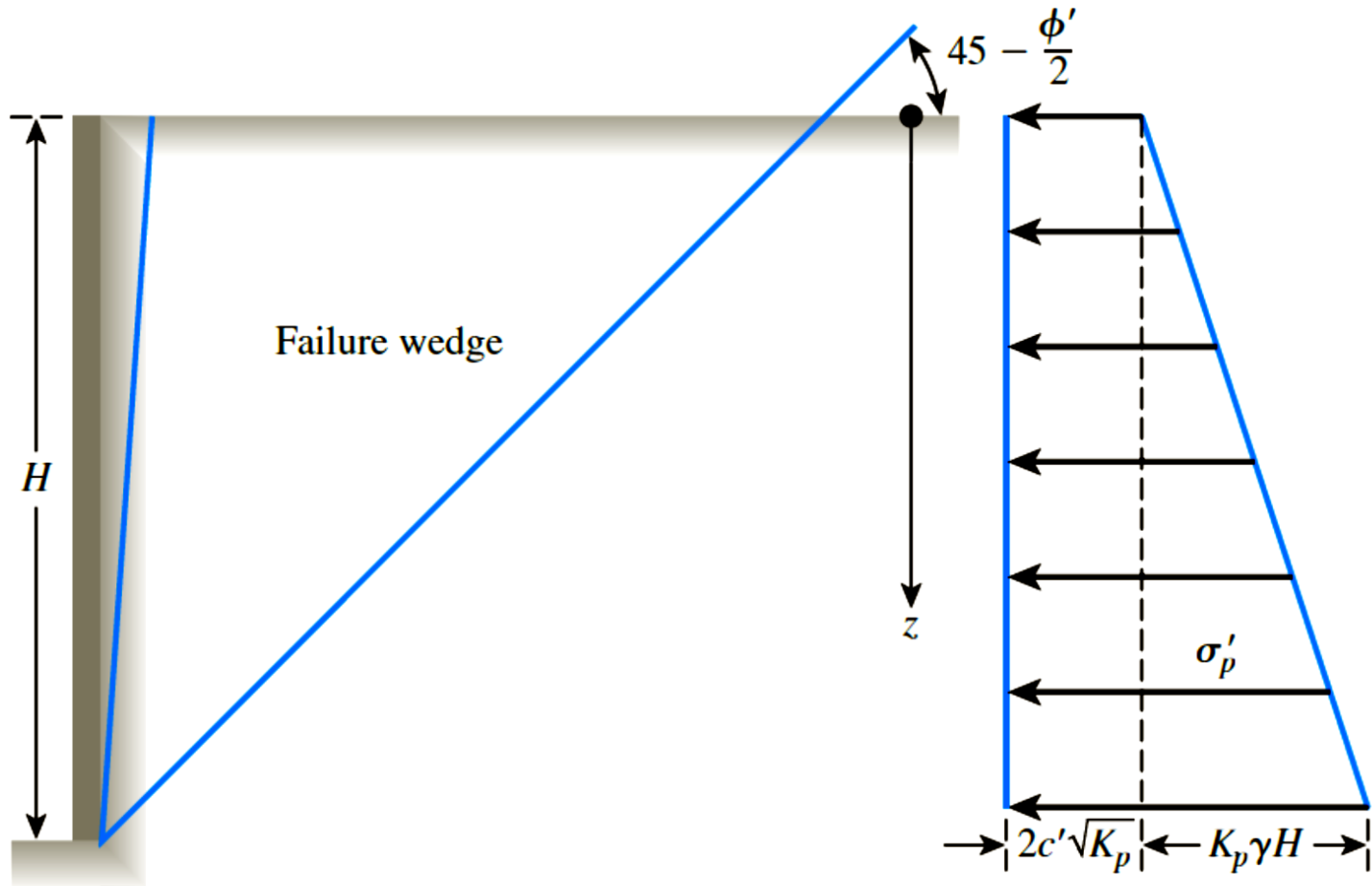
$$\sigma'_p = K_p \gamma H + 2\sqrt{K_p} c' \quad (۱۳-۵۵)$$

در شکل ۱۳-۱۷-ب تغییرات σ'_p نسبت به عمق نشان داده شده است. فشار مقاوم به ازای واحد طول دیوار را می‌توان از روی سطح زیر نمودارهای فشار به صورت زیر به دست آورد:

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 + 2\sqrt{K_p} c' H \quad (۱۳-۵۶)$$

برای شرایط $\phi = 0$ و $K_p = 1$ داریم:

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 + 2c_u H \quad (۱۳-۵۷)$$



شکل ۱۳-۱۷ توزیع فشار خاک مقاوم Rankine بر روی دیوار حایلی با خاکریزی از خاک چسبنده.

نظریه فشار خاک Coulomb

Coulomb (۱۷۷۶) بیش از ۲۰۰ سال پیش نظریه فشار خاک محرک و مقاوم بر روی دیوارهای حایل را ارائه کرد. در این نظریه، Coulomb فرض کرد که سطح گسیختگی یک صفحه است. اصطکاک دیوار نیز در نظر گرفته شد. در بخش‌های زیر اصول کلی چگونگی به دست آوردن نظریه فشار خاک Coulomb در خاکریزهای غیرچسبنده شرح داده می‌شود (مقاومت برشی تعریف شده با معادله $\tau_f = \sigma' \tan \phi'$).

فشار محرک Coulumb

در شکل ۱۳-۲۲- الف فرض کنید که سطح پشتی دیوار حایل نگهدارنده خاک دانه‌ای و α زاویه شیب ثابت سطح خاکریز با افق است. BC سطح گسیختگی آزمایشی است. از نظر پایداری گوه گسیختگی احتمالی ABC ، نیروهای زیر (به ازای واحد طول دیوار) دخالت دارند:

۱- W - وزن گوه خاک.

۲- F - برآیند نیروهای برشی و قائم وارد بر سطح گسیختگی BC . این برآیند با خط عمود بر صفحه BC زاویه ϕ' را تشکیل می‌دهد.

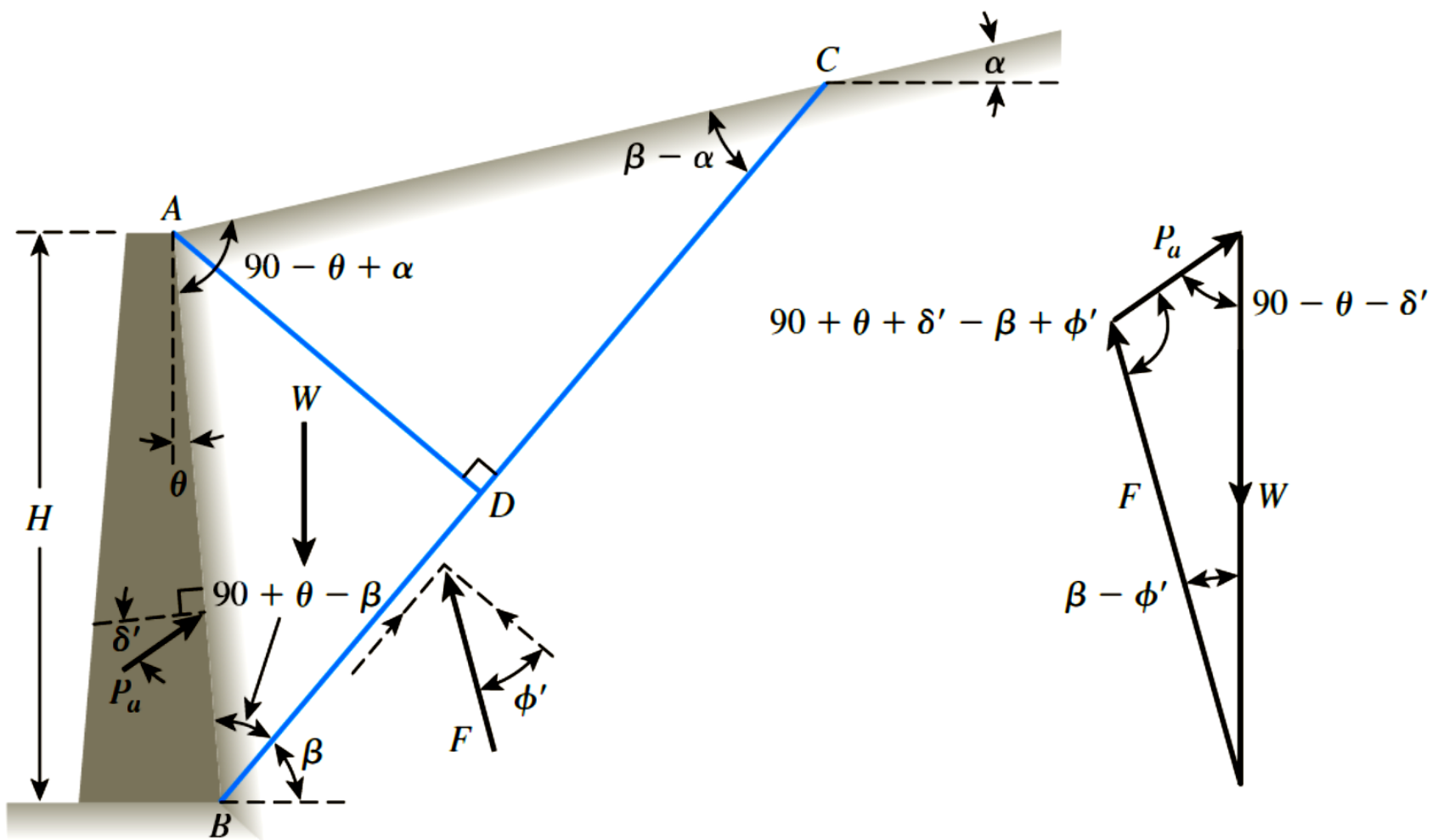
۳- P_a - نیروی محرک به ازای واحد طول دیوار. امتداد P_a با خط عمود بر سطح دیوار حایل زاویه δ' را تشکیل می‌دهد. δ' زاویه اصطکاک میان خاک و دیوار است.

در شکل ۱۳-۲۲- ب مثلث نیروی گوه خاک نشان داده شده است. با استفاده از قانون سینوس‌ها داریم:

$$\frac{W}{\sin (90 + \theta + \delta' - \beta + \phi')} = \frac{P_a}{\sin (\beta - \phi')} \quad (۱۳-۶۴)$$

یا

$$P_a = \frac{\sin (\beta - \phi')}{\sin (90 + \theta + \delta' - \beta + \phi')} W \quad (۱۳-۶۵)$$



شکل ۱۳-۲۲ فشار محرک Coulomb : (الف) گوه گسیختگی آزمایشی، و (ب) چند ضلعی نیرو.

معادله قبل را می توان به صورت زیر نوشت:

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{\cos(\theta - \beta) \cos(\theta - \alpha) \sin(\beta - \phi')}{\cos^2 \theta \sin(\beta - \alpha) \sin(90 + \theta + \delta' - \beta + \phi')} \right] \quad (۶۶-۱۳)$$

که در این جا: γ = وزن مخصوص خاکریز. مقادیر δ ، H ، θ ، α ، ϕ' و δ' ثابت اند و تنها β متغیر است. برای تعیین مقدار بحرانی β جهت حداکثر مقدار P_a داریم:

$$\frac{dP_a}{d\beta} = 0 \quad (۶۷-۱۳)$$

پس از حل معادله (۶۷-۱۳)، با جایگزین کردن رابطه β در معادله (۶۶-۱۳) می توان فشار خاک محرک Coulomb را به صورت زیر به دست آورد:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (۶۸-۱۳)$$

که در این جا K_a ضریب فشار خاک محرک Coulomb است و به صورت زیر بیان می شود:

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi' - \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\delta' + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta' + \phi') \sin(\phi' - \alpha)}{\cos(\delta' + \theta) \cos(\theta - \alpha)}} \right]^2} \quad (۶۹-۱۳)$$

توجه داشته باشید که در حالت $\alpha = 0^\circ$ ، $\theta = 0^\circ$ و $\delta' = 0^\circ$ ، ضریب فشار خاک محرک Coulomb برابر است با: $(1 - \sin \phi') / (1 + \sin \phi')$

فشار مقاوم Coulumb

در شکل ۱۳-۲۶ الف دیوار حایلی همراه با خاکریز شیبدار غیرچسبنده‌ای مشابه با شکل ۱۳-۲۲ الف نشان داده شده است. چندضلعی نیرو برای تعادل گوه خاک ABC در حالت مقاوم در شکل ۱۳-۲۶ ب نشان داده شده است. P_p نماد نیروی مقاوم است. دیگر نمادهای مورد استفاده همانند نمادهای حالت محرک اند (بخش ۱۳-۱۰). در روندی مشابه با روند دنبال شده در حالت محرک [معادله (۱۳-۶۸)] نتیجه می‌شود:

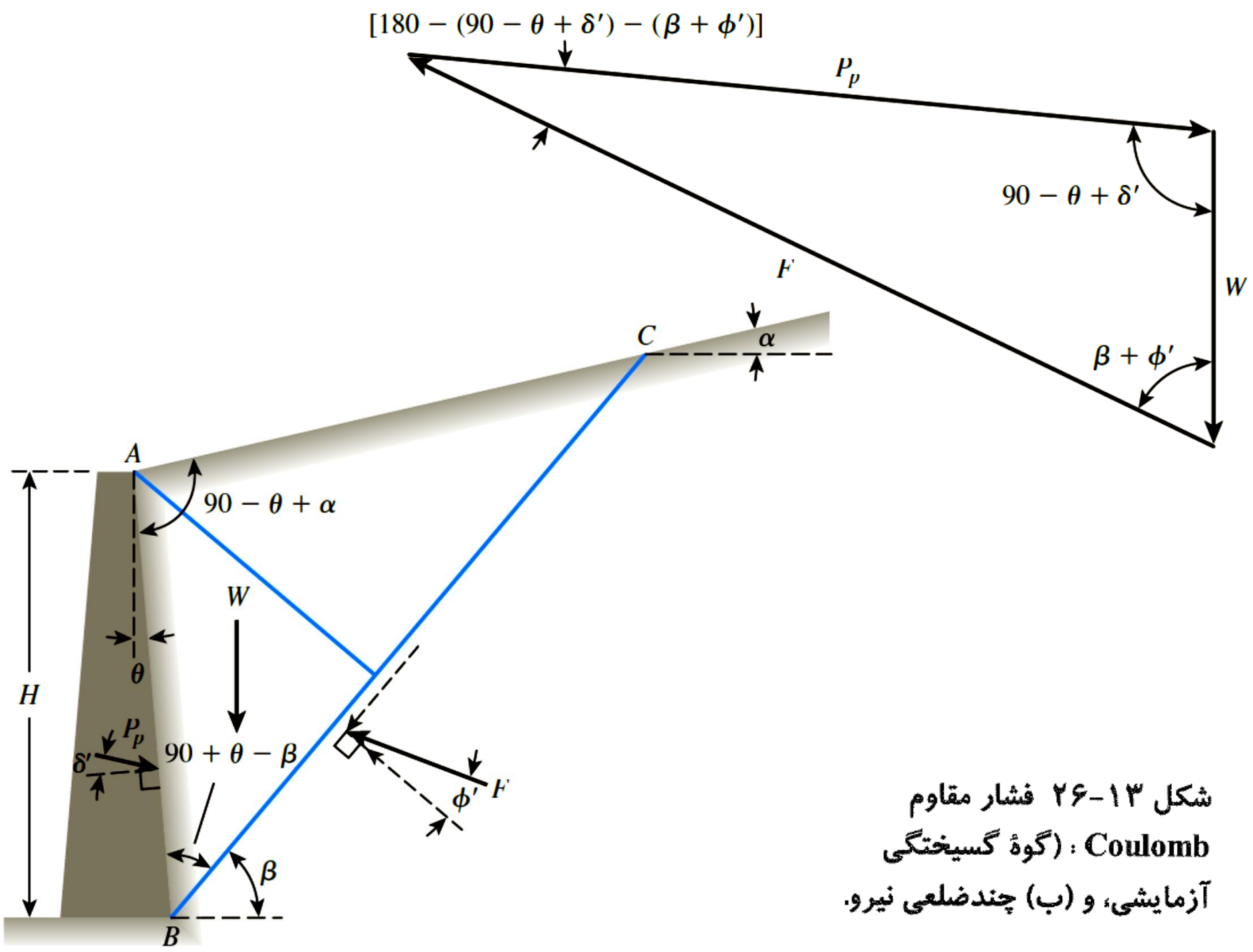
$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 \quad (13-70)$$

که در این جا: $K_p =$ ضریب فشار خاک مقاوم Coulomb، یا:

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi' + \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\delta' - \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi' + \delta') \sin(\phi' + \alpha)}{\cos(\delta' - \theta) \cos(\alpha - \theta)}} \right]^2} \quad (13-71)$$

برای دیوار بدون اصطکاک با سطح پشتی قائم همراه با خاکریزی از خاک دانه‌ای با سطح افقی (یعنی $\theta = 0^\circ$ ، $\alpha = 0^\circ$ و $\delta' = 0^\circ$)، از معادله (۱۳-۷۱) نتیجه می‌شود:

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$$



شکل ۱۳-۲۶ فشار مقاوم
 Coulomb : (گوه گسیختگی)
 آزمایشی، و (ب) چندضلعی نیرو.