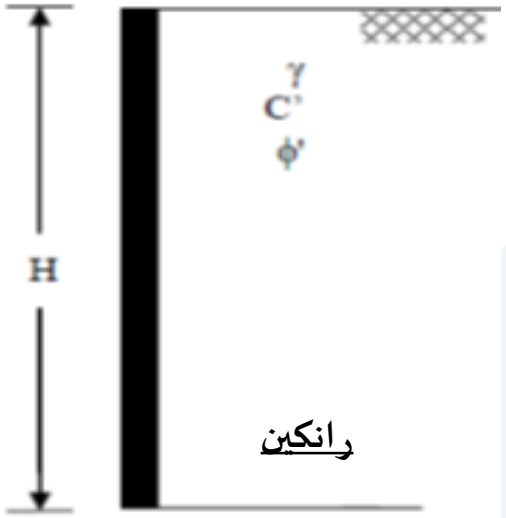
# ضغط التربة على المنشآت الساندة

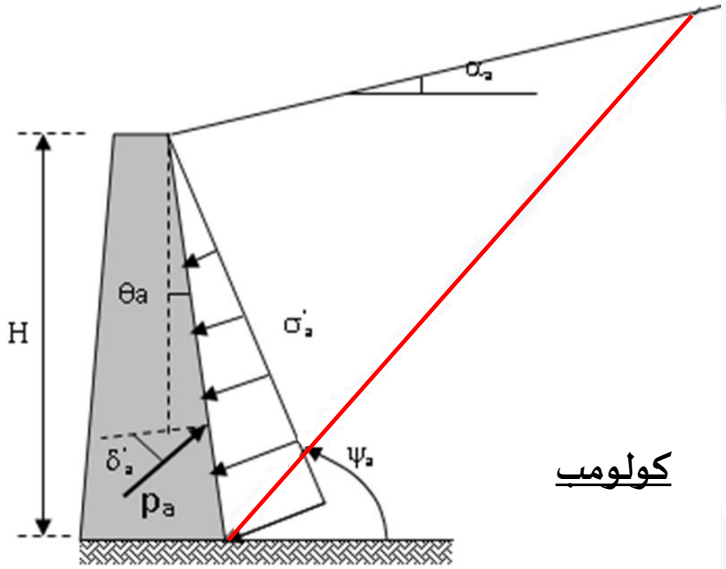
## 1. 1 نظريات ضغط التربة على الجدران الساندة

**كولومب** (C.Coulomb) عام /1776/ ، حيث افترض أن أسطح الجدار يمكن أن تكون ملساء أو خشنة وأن التربة تنهار على شكل موشور صلب يميل عن الأفق بزاوية $\psi$، وقام بتحديد ميل مستوي الانهيار $\psi$ والدفع الجانبي للتربة مستخدماً نظرية كولومب للانهيار للربط بين الاجهادات الناظمية والمماسية على مستوي الانهيار.

**رانكين** (Rankine)(1857) باقتراح طريقة مبسطة لحساب ضغط التربة الجانبي، معتبراً أن أسطح الجدار ملساء (الاحتكاك معدوم بين التربة و الجدار) والتربة تتلدن نتيجة لقوى الدفع الجانبي، وقد أوجد الدفع الجانبي للتربة اعتمادا على نظرية كولومب للانهيار.

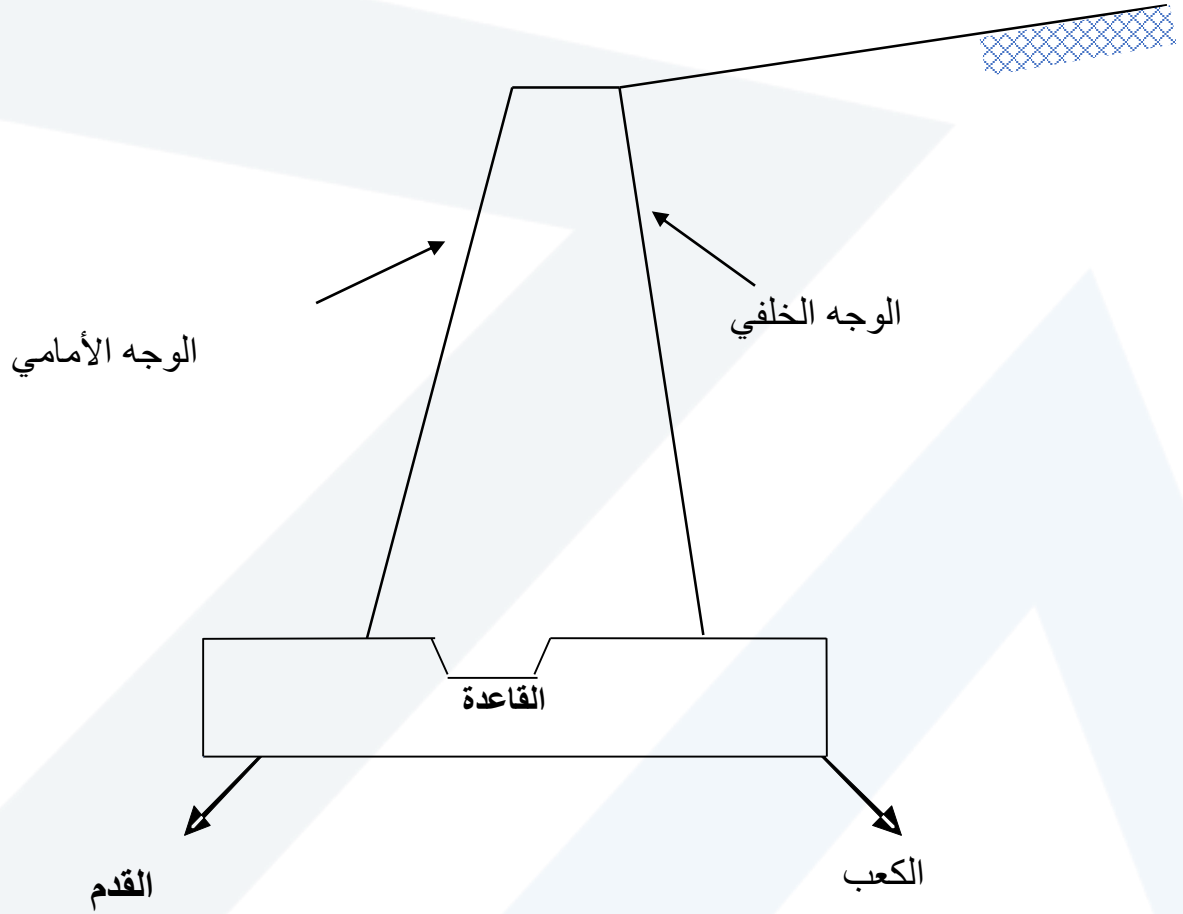


رانكين



كولومب

## 1. 2 الجدران الاستنادية

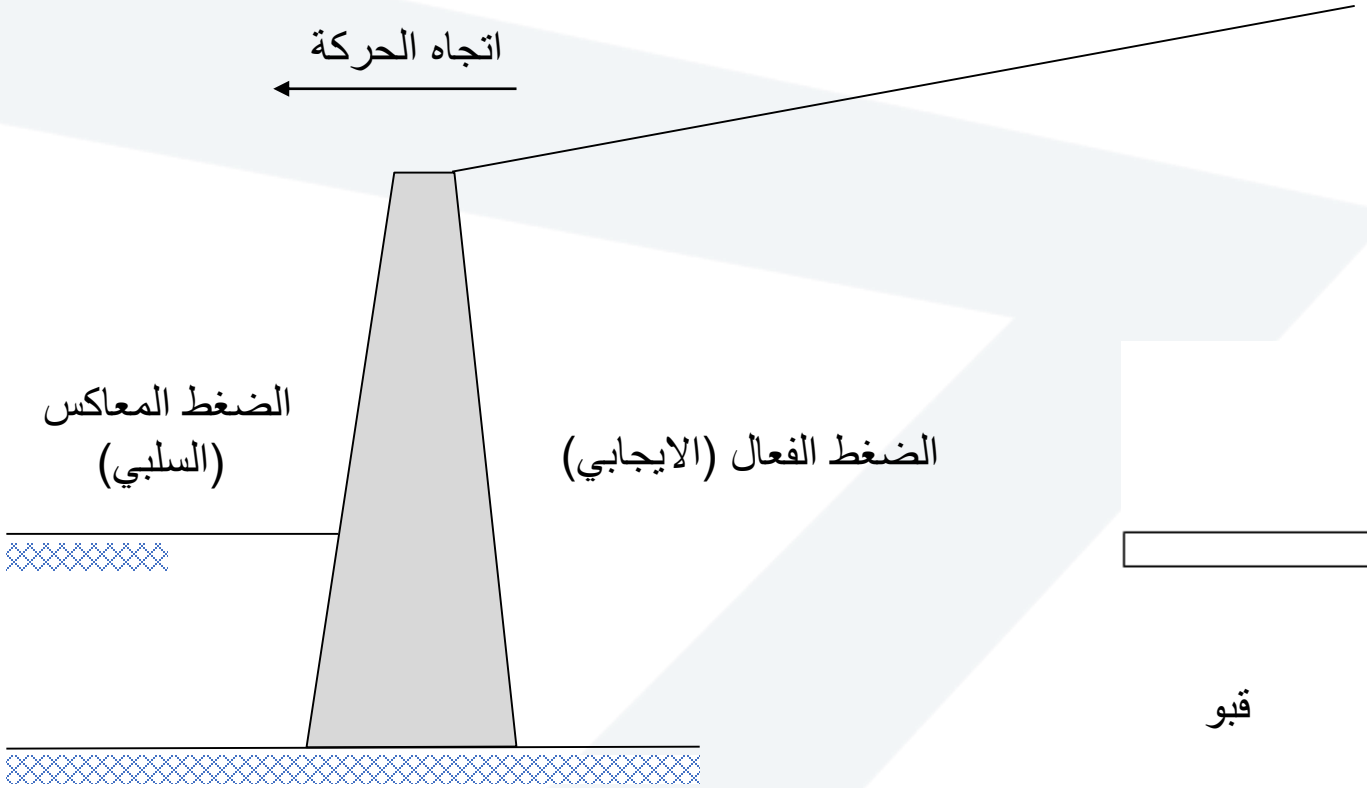


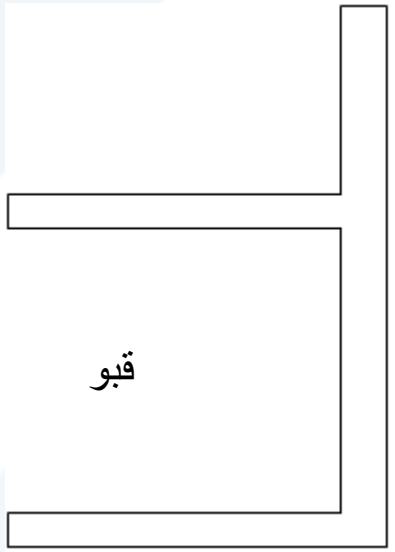
## 1. 3 أنواع ضغوط التربة على الجدران الساندة

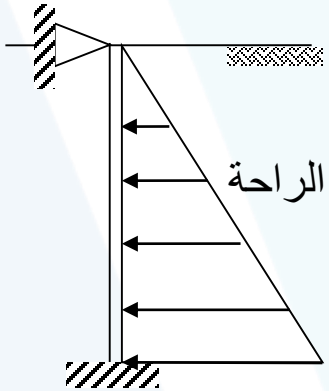
الضغط الفعال (الايجابي)

الضغط المعاكس (السلبي)

الضغط في وضع الراحة (السكون)




للترب المفككة

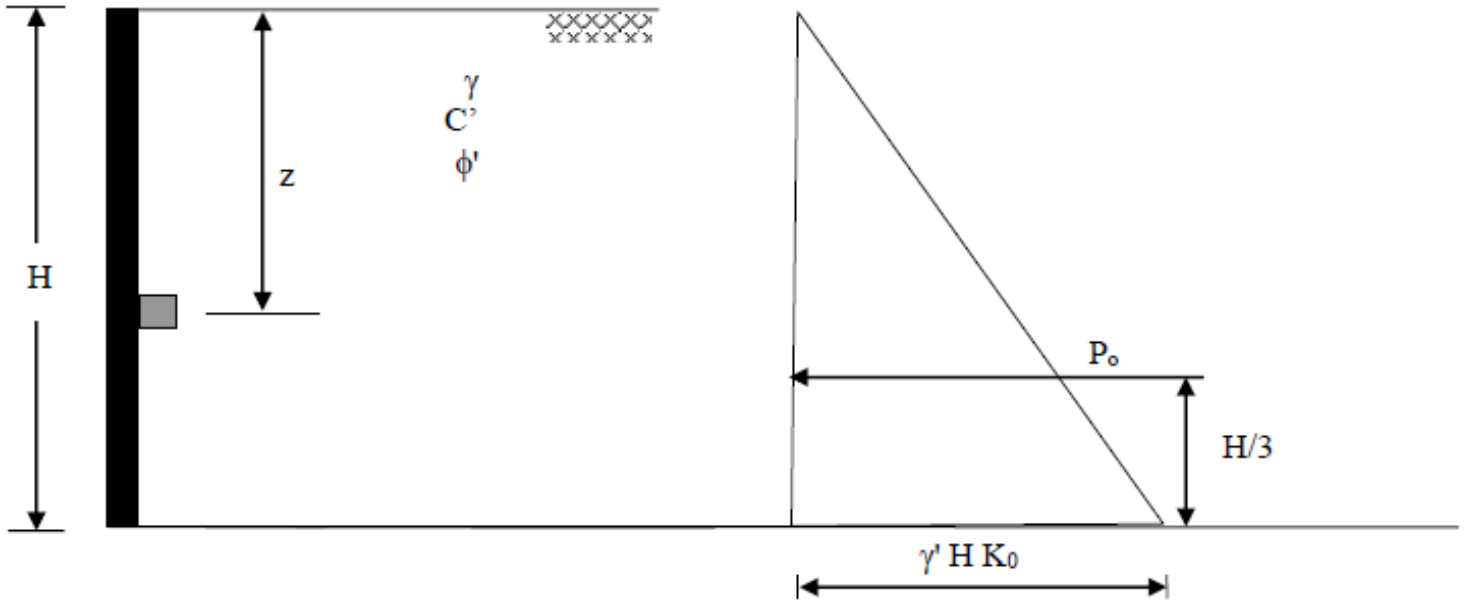
$$\sigma'_{0,a,p} = \sigma'_{v} . K_{0,a,p} = \gamma' . Z . K_{0,a,p}$$

السكون — الفعال — السلبي

السكون — الفعال — السلبي

$$\sigma'_a < \sigma'_0 < \sigma'_p$$

## 1. 4 ضغط التربة في وضع الراحة




$$\sigma'_v = \gamma' . Z$$

$$\sigma'_0 = \sigma'_v . K_0 = \gamma' . Z . K_0$$

$$\sigma'_0 = \sigma'_v . K_0 = \gamma' . Z . K_0$$

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$$

$$K_0 = 1 - \sin\phi'$$

لحساب ضغط التربة الفعال (أو المعاكس) نلجأ عادة إلى استخدام إحدى النظريتين الأساسيتين لدفع التربة الجانبي ( نظرية رانكين و نظرية كولومب ).

## 1. 5 نظرية رانكين (RANKINE' S THEORY)

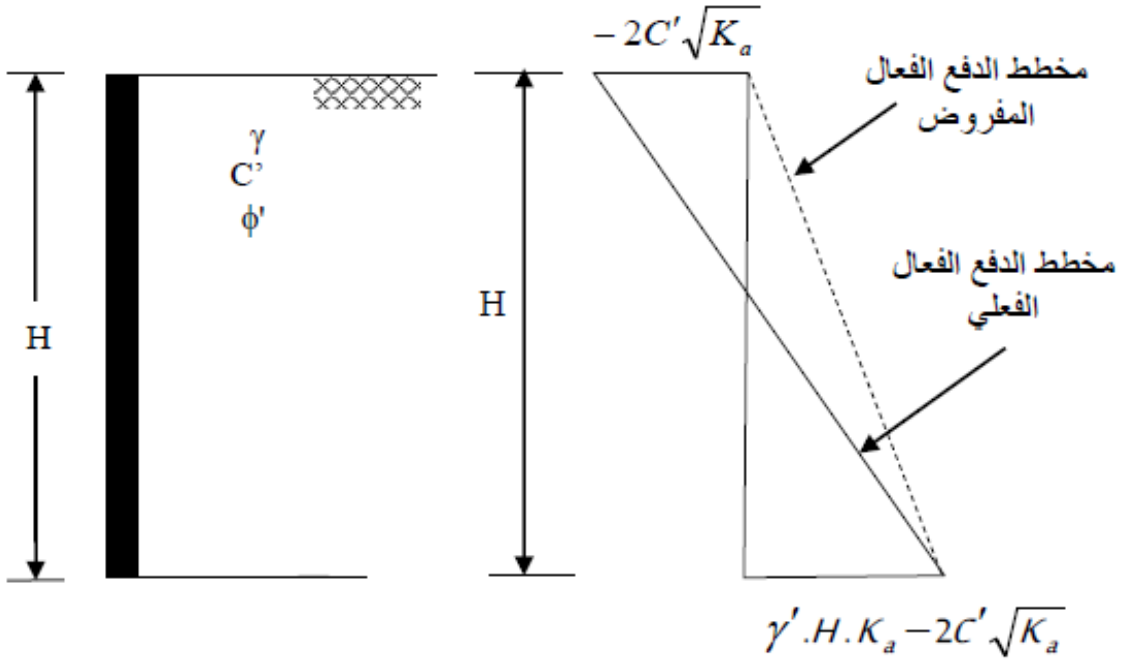
درس رانكين حالة جدار أوجهه شاقولية وملساء (أهمل الاحتكاك بين أوجه الجدار والتربة) وسطح التربة أفقي وهذا أدى إلى تبسيط المعادلات .

### 1. 5. 1 دفع التربة الفعال ( الإيجابي ) لرانكين (Rankine)

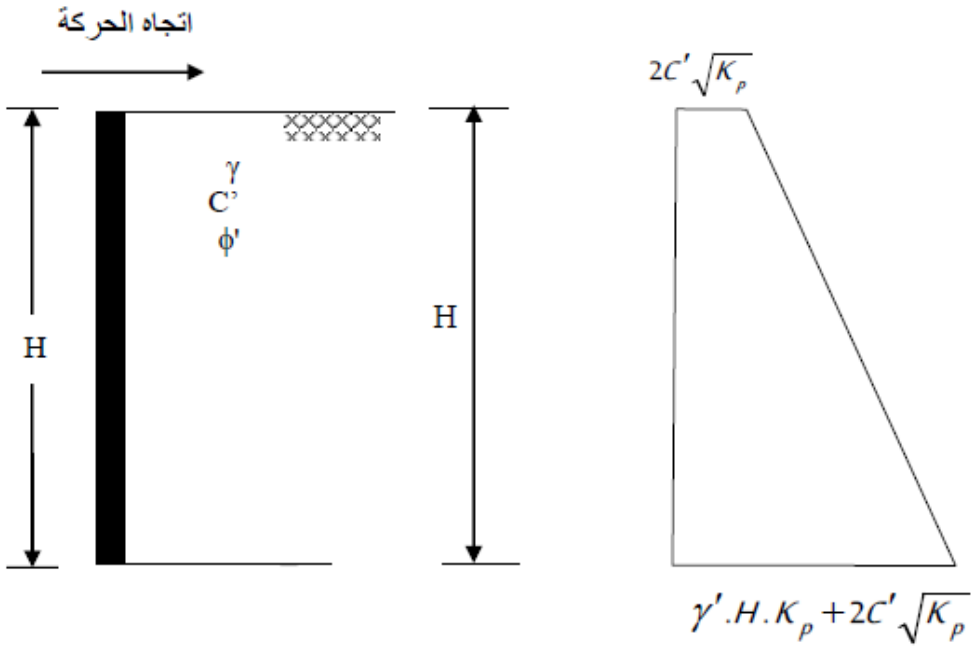
$$\sigma'_a = \gamma' Z K_a - 2C' \sqrt{K_a}$$

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

$$P'_a = \frac{1}{2}\gamma' H^2 K_a - C' H \sqrt{K_a}$$



## 1. 2 .5 دفع التربة السلبي (المعاكس) لرانكين



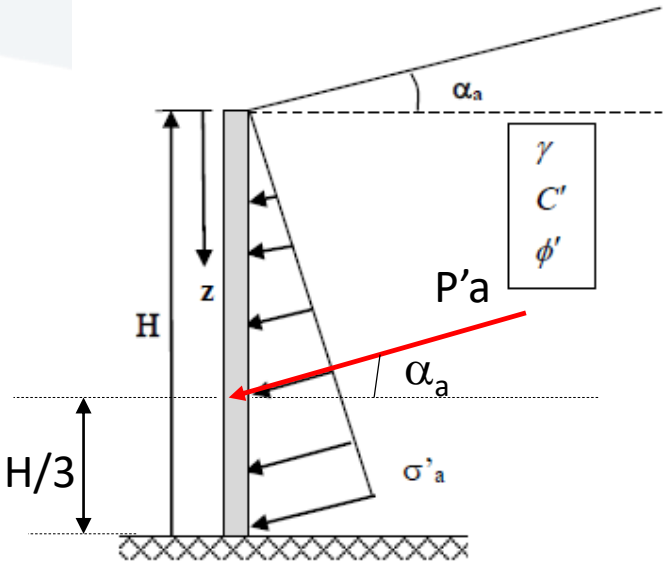

$$\sigma'_p=\gamma' Z K_p+2C'\sqrt{K_p}$$

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

$$P'_p=\frac{1}{2}\gamma' H^2 K_p+2C' H\sqrt{K_p}$$

| نوع التربة | انتقال الجدار من أجل الضغط السلبي، | انتقال الجدار من أجل الضغط الفعال |
|---|---|---|
| رمل متراص | 0.01H | 0.001H |
| رمل متوسط الارتصاص | 0.02H | 0.002H |
| رمل مخلخل | 0.04H | 0.004H |
| سيلت متراص | 0.02H | 0.002H |
| غضار قاسي | 0.1H | 0.01H |
| غضار رخو (طري) | 0.05H | 0.004 |

## 1. 5. 3 تعميم نظرية رانكين لحالتي الضغط الفعال والسلبي




الضغط الفعال

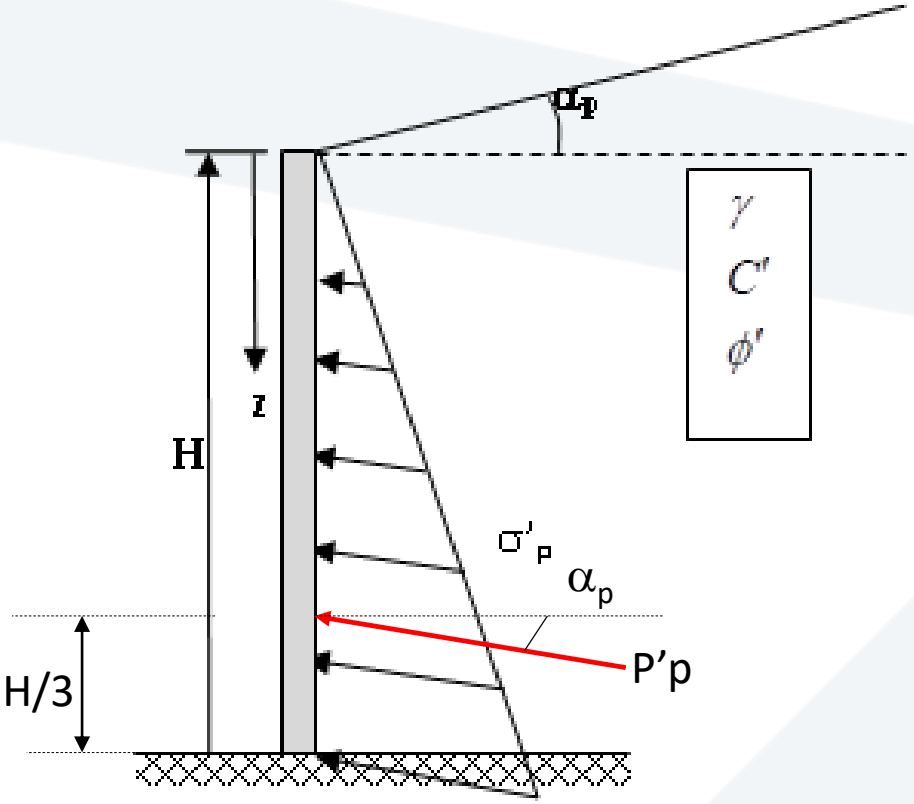
في حالة الترب المفككة

$$\sigma'_a = \gamma' z K_a$$

$$K_a = \cos\alpha_a \frac{\cos\alpha_a - \sqrt{\cos^2\alpha_a - \cos^2\phi'}}{\cos\alpha_a + \sqrt{\cos^2\alpha_a - \cos^2\phi'}}$$

$$P'_a = \frac{1}{2}\gamma' . H^2 . K_a$$

في حالة الترب المفككة

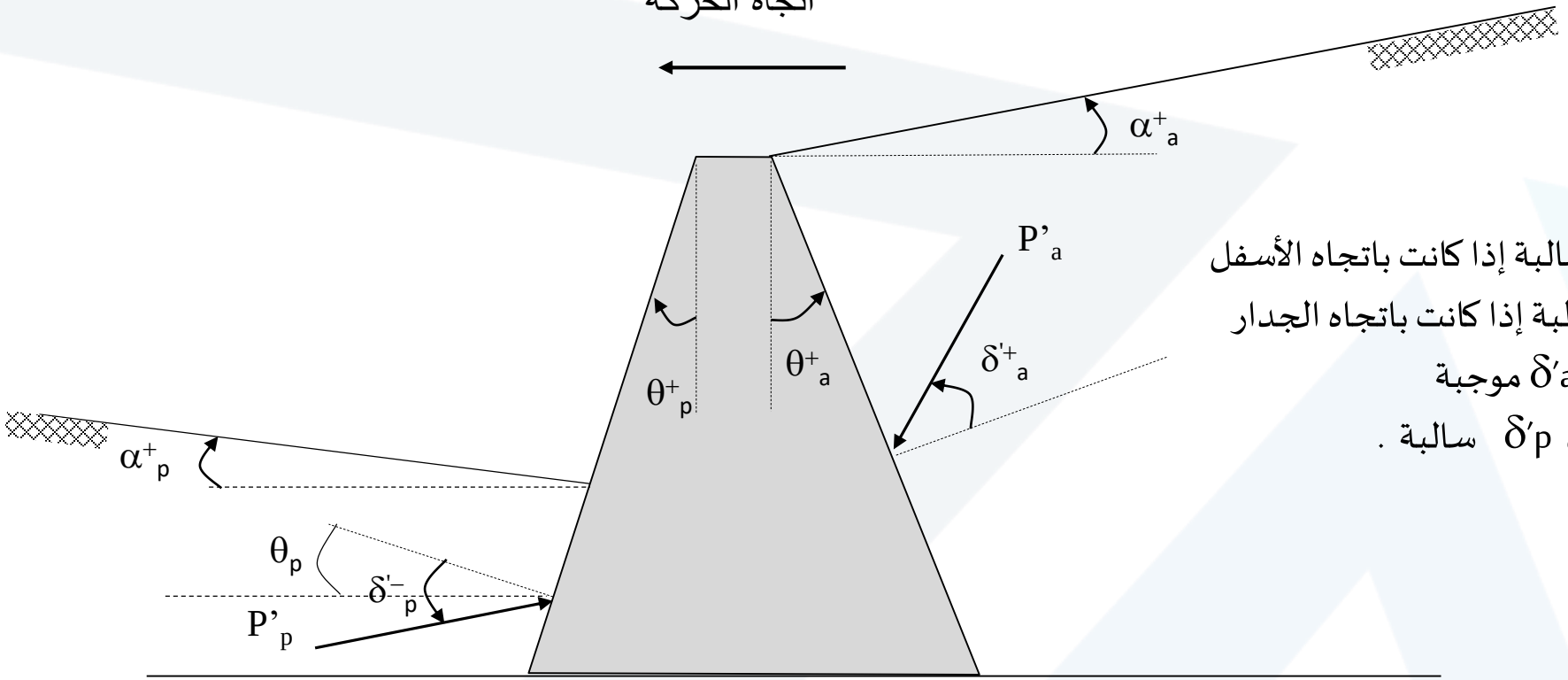



$$\sigma'_p = \gamma' z K_p$$

$$K_p = \cos\alpha_p \frac{\cos\alpha_p + \sqrt{\cos^2\alpha_p - \cos^2\phi'}}{\cos\alpha_p - \sqrt{\cos^2\alpha_p - \cos^2\phi'}}$$

$$P'_p = \frac{1}{2}\gamma' . H^2 . K_p$$

## اصطلاح الإشارات

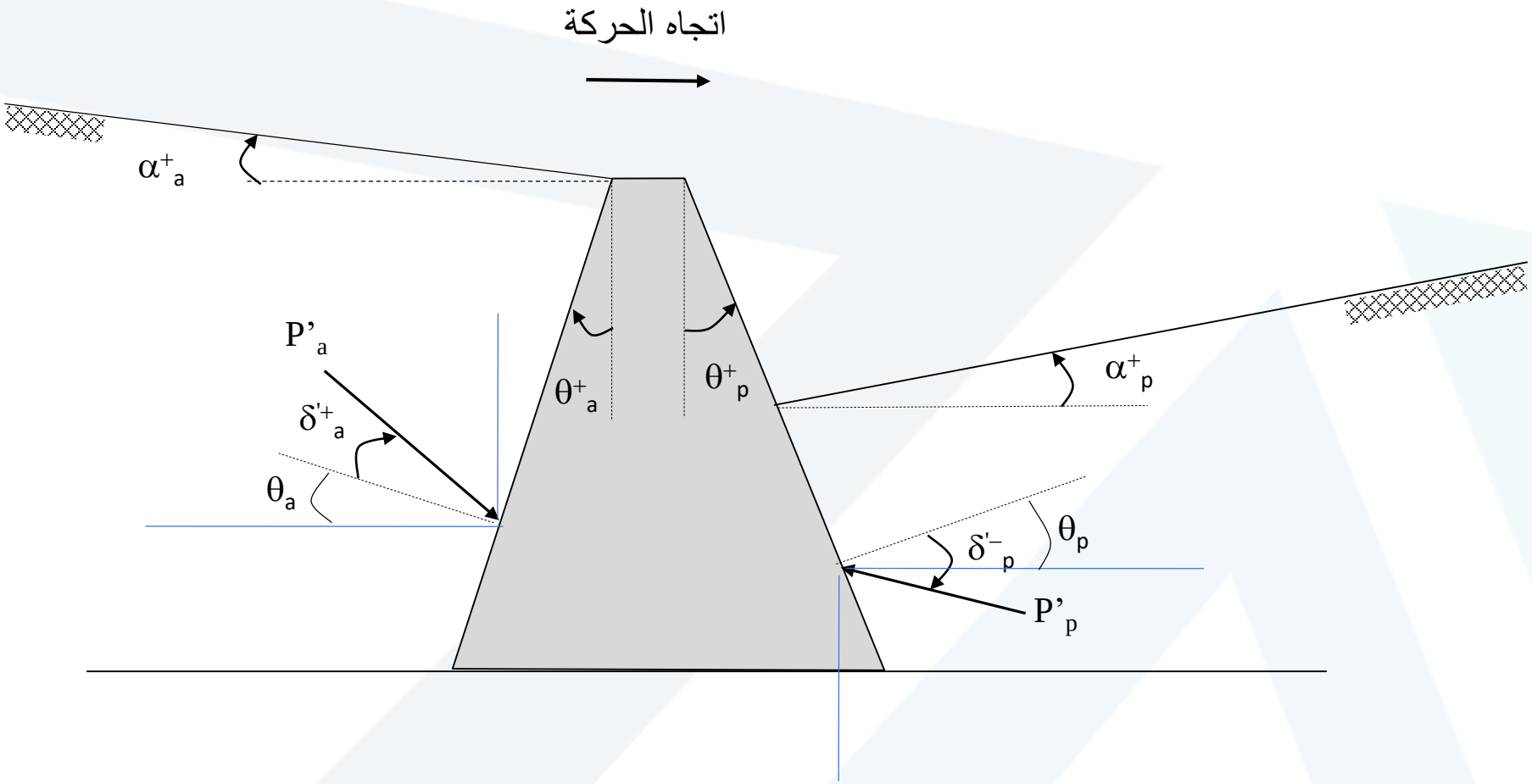



$\alpha$ موجبة إذا كانت باتجاه الأعلى وسالبة إذا كانت باتجاه الأسفل

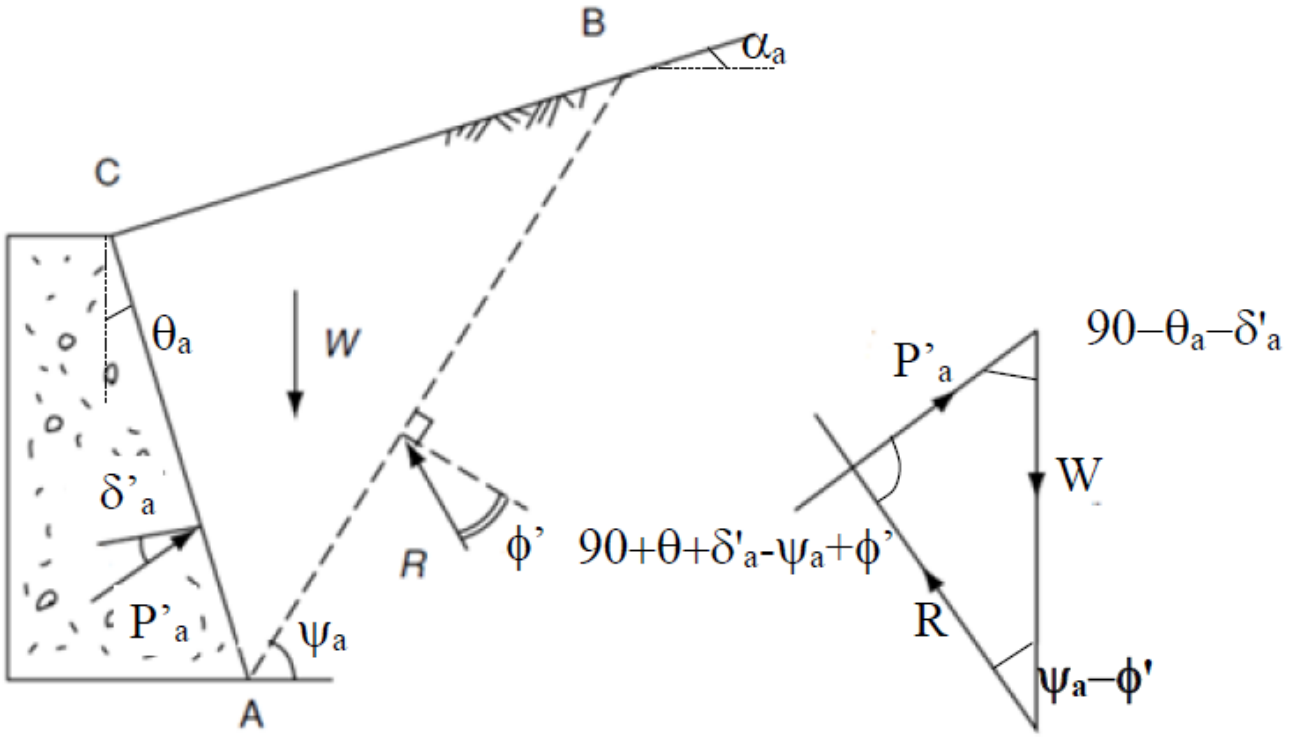
$\theta$ موجبة إذا كانت باتجاه التربة وسالبة إذا كانت باتجاه الجدار

$\delta'$ : في حالة الضغط الفعال تكون $\delta'a$ موجبة

و في حالة الضغط السالب تكون $\delta'p$ سالبة .


اتجاه الحركة
$\alpha^+_a$
$P'_a$
$\delta'^+_a$
$\theta_a$
$\theta^+_a$
$\theta^+_p$
$\alpha^+_p$
$\delta'^-_p$
$\theta_p$
$P'_p$

## الضغط الفعال

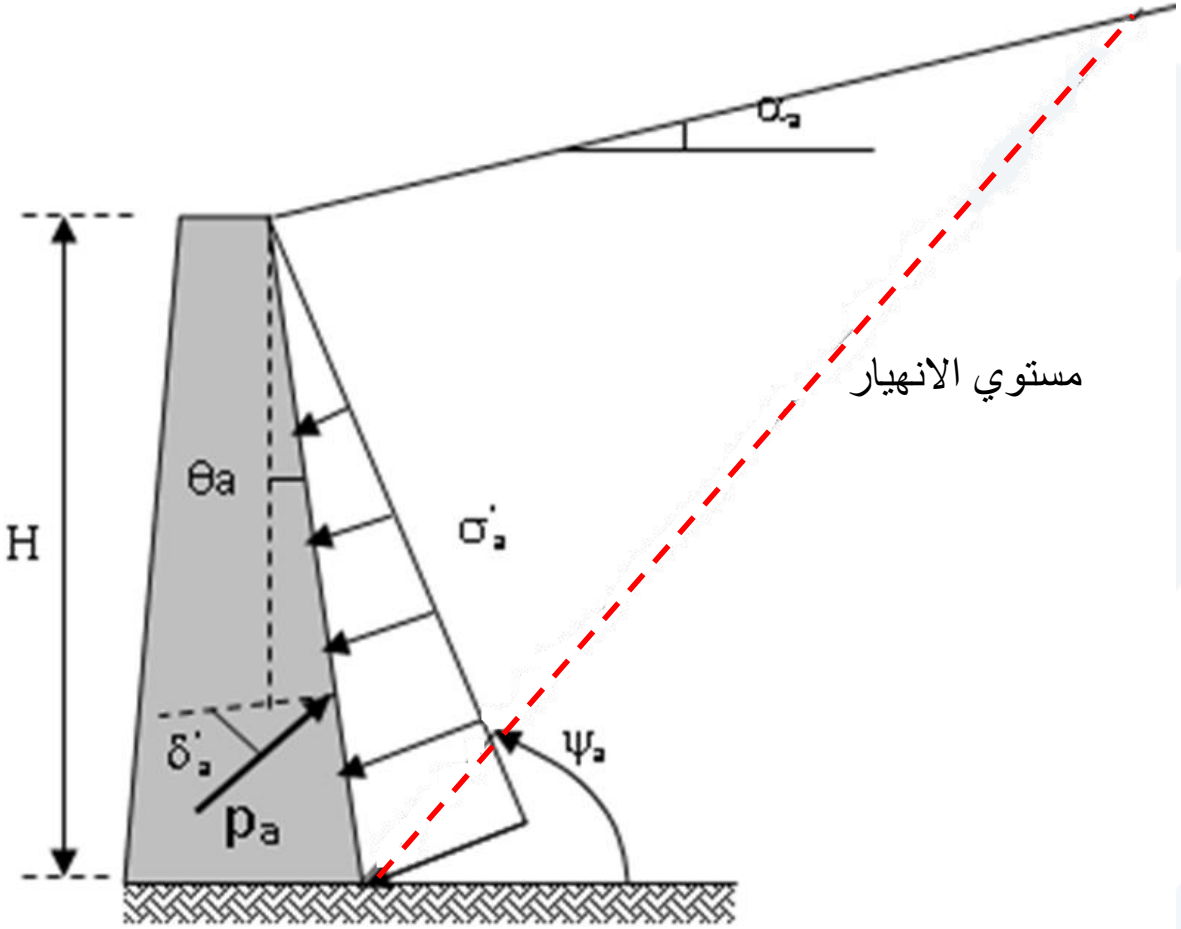



$$\frac{P'_a}{\sin(\psi_a-\phi')}=\frac{W}{\sin(90+\theta+\delta'_a-\psi_a+\phi')}$$

بفرض تغير خطي للدفع الجانبي مع العمق، يمكن كتابة :

$$\sigma'_a=\gamma' H K_a$$

$$P'a=\frac{1}{2}\gamma' H^2 K_a$$

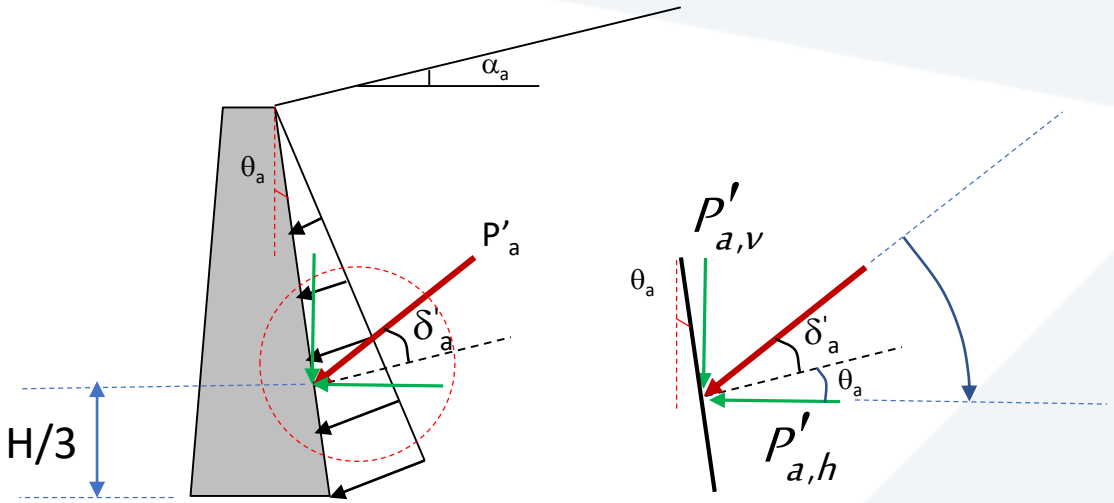



$$K_a = \frac{\cos^2(\phi' - \theta_a)}{\cos^2\theta_a \cos(\delta'_a + \theta_a)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta'_a + \phi')\sin(\phi' - \alpha_a)}{\cos(\delta'_a + \theta_a)\cos(\theta_a - \alpha_a)}}\right]^2}$$

$$K_a = f(\phi', \theta_a, \delta'_a, \alpha_a)$$

يميل مستوي الانهيار عن الأفق بالزاوية $\psi_a$ التي تعطى بالعلاقة التالية :

$$\psi_a = \phi' + \tan^{-1}\left[\frac{\cos(\phi' - \theta_a)}{\sin(\phi' - \theta_a) + \sqrt{\frac{\sin(\phi' + \delta'_a)\cos(\theta_a - \alpha_a)}{\sin(\phi' - \alpha_a)\cos(\theta_a + \delta'_a)}}}\right]$$



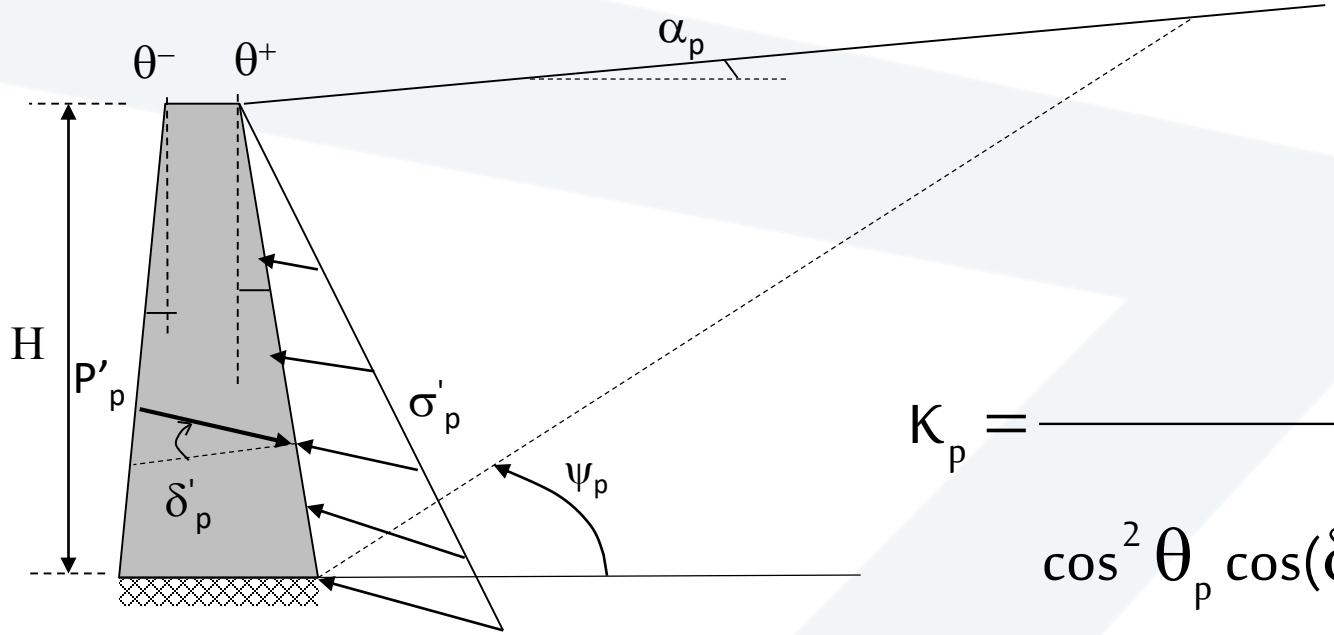

$$P'_a = \frac{1}{2}\gamma' H^2 K_a$$

$$P'_{a,h} = P'_a \cdot \cos(\delta'_a + \theta_a) = \frac{1}{2}\gamma' H^2 K_{a,h}$$

$$P'_{a,v} = P'_a \cdot \sin(\delta'_a + \theta_a)$$

متجهة نحو الأسفل

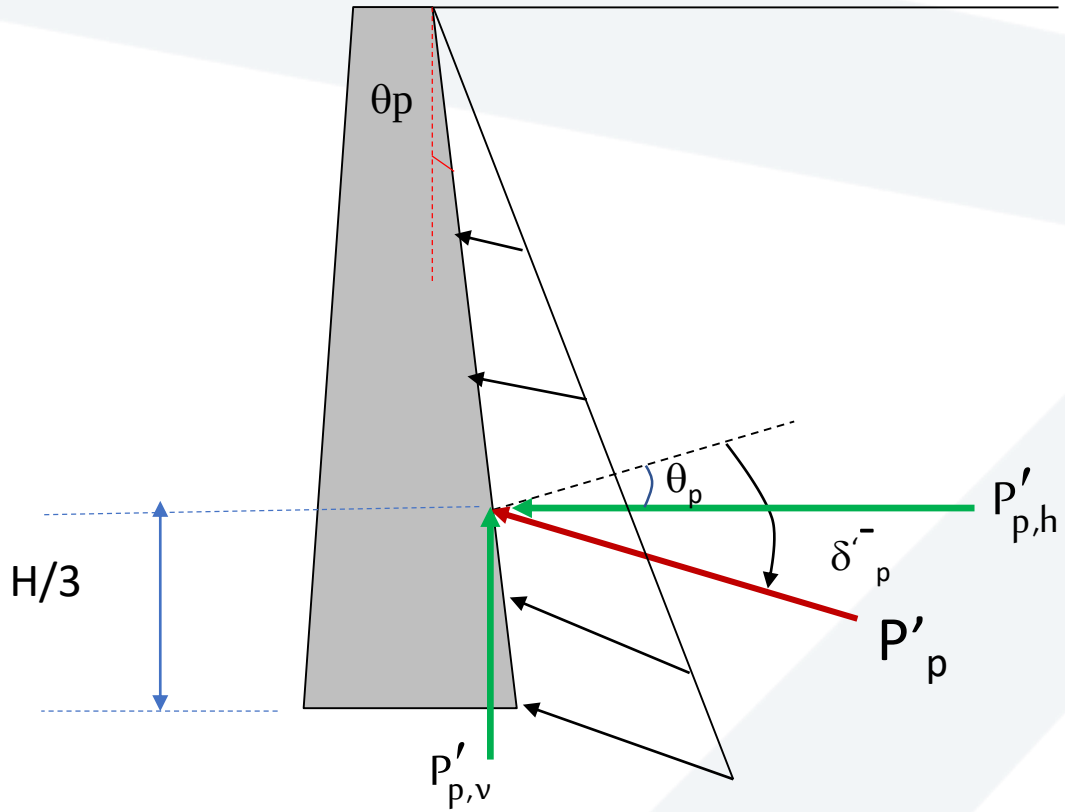
## الضغط السلبي (المعاكس)




$$\sigma'_{p,z} = \gamma' z K_p$$

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi' + \theta_p)}{\cos^2\theta_p \cos(\delta'_p - \theta_p)\left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi' + \delta'_p)\sin(\phi' + \alpha_p)}{\cos(\delta'_p - \theta_p)\cos(\alpha_p - \theta_p)}}\right]^2}$$

$$K_p = g(\phi', \theta_p, \delta'_p, \alpha_p)$$



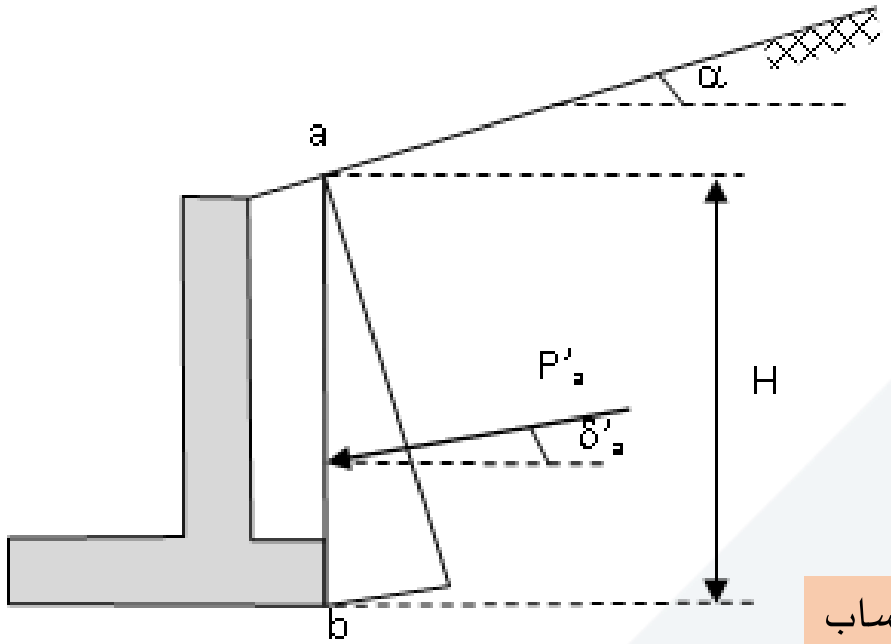

$$P'_p = \frac{1}{2}\gamma' H^2 K_p$$

$$P'_{p,h} = P'_p \cdot \cos(\delta'_p + \theta_p) = P'_p \cdot \cos\left(|\delta'_p| - |\theta_p|\right)$$

$$P'_{p,\nu} = P'_p \cdot \sin\left(|\delta'_p| - |\theta_p|\right)$$ متجهة نحو الأعلى

## حالة الترب المتماسكة

### الضغط الفعال




$$\sigma'_a = \gamma' H K_a - C' K_{a,c}$$

$$K_{a,c} = \frac{2\cos\phi' \cos(\theta_a - \alpha_a)}{\cos\theta_a \left[1+\sin(\phi' + \delta'_a - \alpha_a)\right]}$$

ملاحظة: فقط في حالة $\alpha = \theta = \delta' = 0$ يكون:

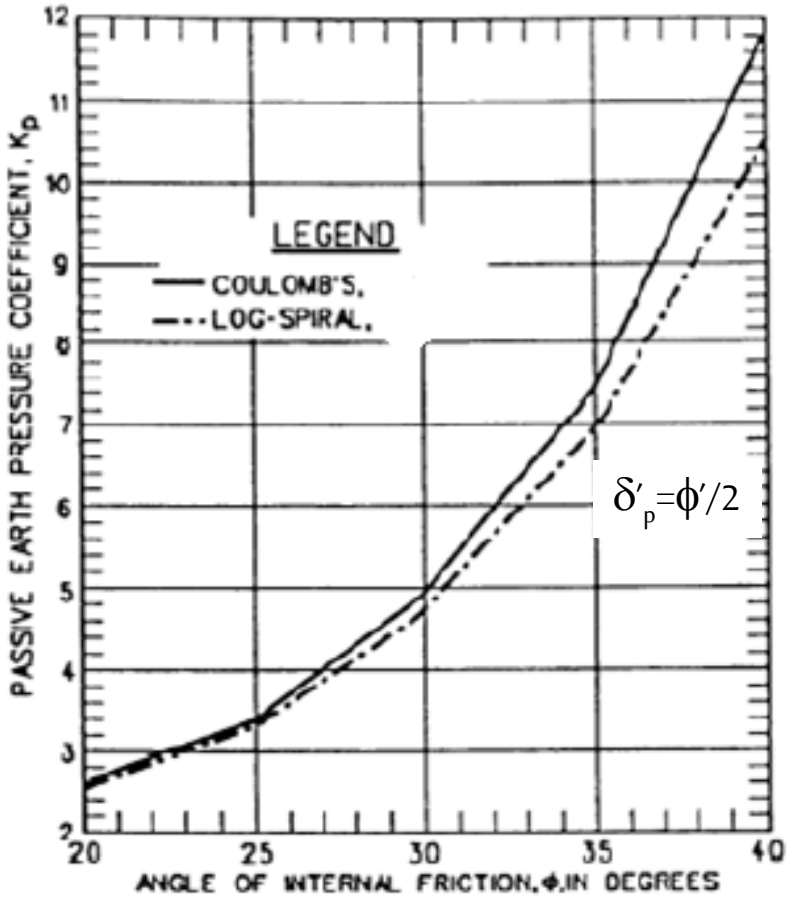
$$\sigma'_a = \gamma' H K_a - 2C' \sqrt{K_a}$$

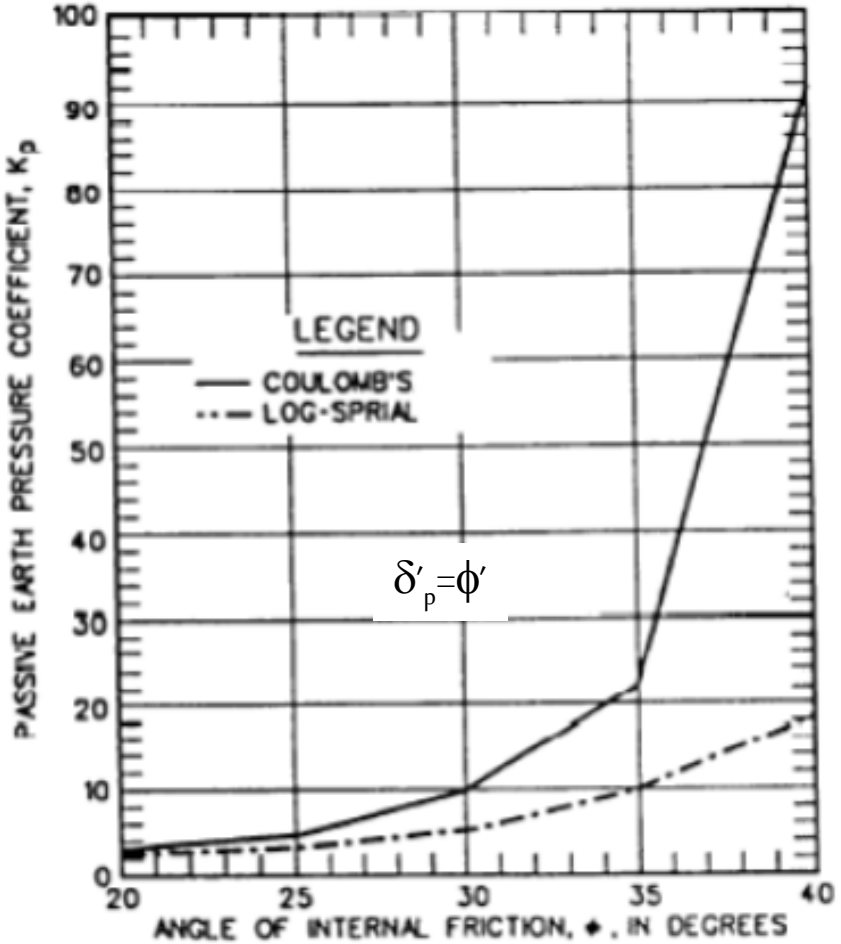
**ملاحظة:** في حالة الجدران المسلحة تبرز القاعدة عن الجذع بالقدم والكعب، ويعتبر الارتفاع H المستخدم في حساب محصلة الضغط الفعال مساوياً للارتفاع من منسوب أسفل القاعدة حتى سطح الأرض في نهاية كعب الجدار

## الضغط السلبي (المعاكس)

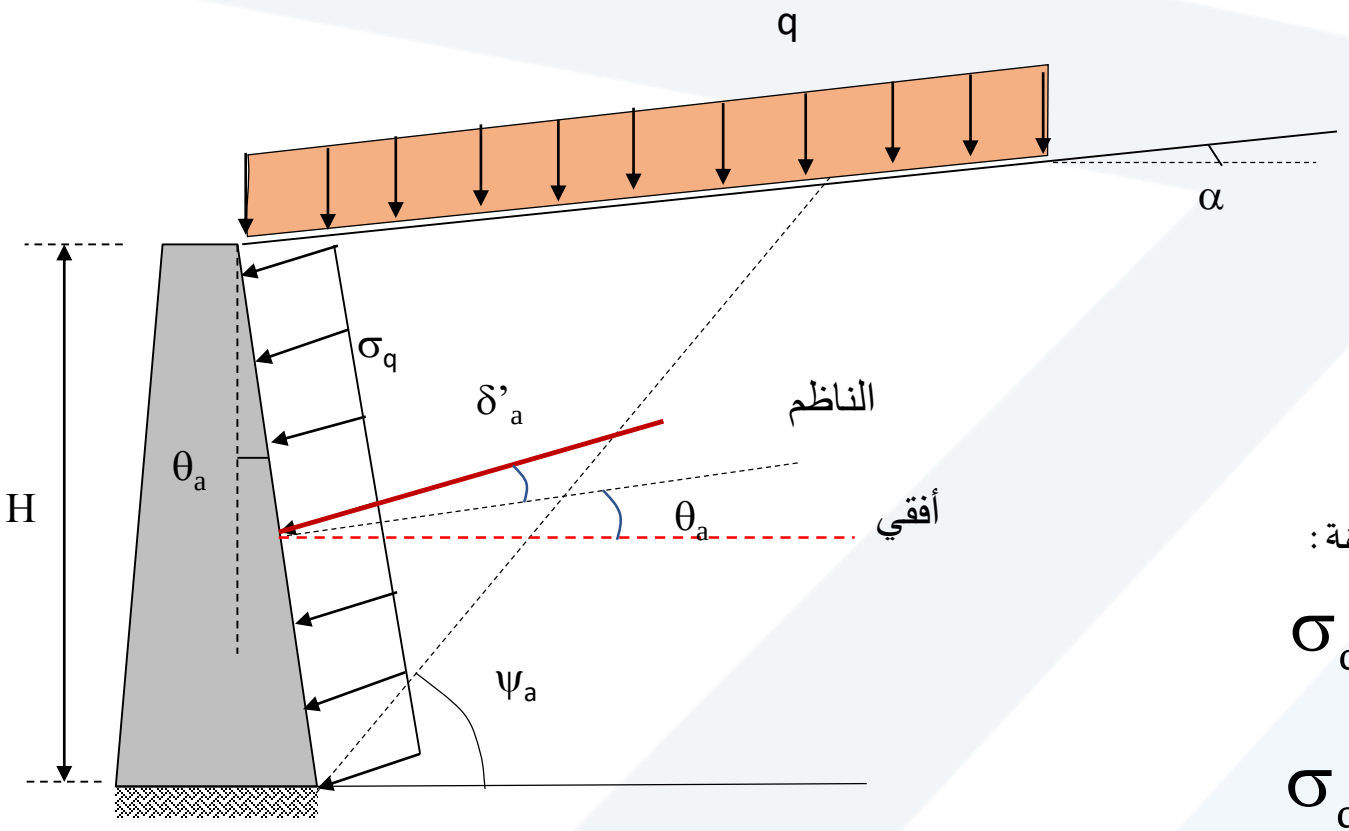
$$\sigma'_{p,z} = \gamma' z K_p + C' K_{p,c}$$

$$K_{p,c} = \frac{2\cos(\phi')\cos(\theta_p - \alpha_p)}{\cos(\theta_p)\left[1+\sin(\phi' - \delta'_p - \theta_p + \alpha_p)\right]}$$


PASSIVE EARTH PRESSURE COEFFICIENT, $K_p$
LEGEND
COULOMB'S,
LOG-SPIRAL,
$\delta'_p=\phi'/2$
ANGLE OF WTERNAL FRICTION, $\phi$, IN DEGREES


PASSIVE EARTH PRESSURE COEFFICIENT, $K_p$
LEGEND
COULOMB'S
LOG-SPRIAL
$\delta'_p=\phi'$
ANGLE OF INTERNAL FRICTION, $\phi$, IN DEGREES

## حالة وجود حمولة خارجية خلف الجدار




**1-حالة حمولة موزعة بانتظام ملاصقة للجدار وممتدة على مساحة كبيرة**

$$\sigma_q = q \cdot \frac{\cos\theta \cdot \cos(\alpha)}{\cos(\theta - \alpha)} \cdot K_a$$

$$\sigma_{q,h} = \sigma_q \cdot \cos(\delta'_a + \theta_a)$$

في حال $\alpha=0$ و $\theta a=0$(الوجه الخلفي للجدار شاقولي)، تصبح العلاقات السابقة :

$$\sigma_q = q \cdot K_a$$

$$\sigma_{q,h} = \sigma_q \cdot \cos \delta'_a$$

يبين الشكل مخطط الضغط الجانبي بحسب الكود الألماني ( DIN4085:2007)

يمكن تقريب هذا الضغط إلى ضغط موزع بانتظام $q_m$ يحسب بالعلاقة التالية :

$$q_m = \frac{P_{a,q}}{H_2 - H_1}$$

وتكون المركبة الأفقية لهذا الضغط $q_{m,h}$

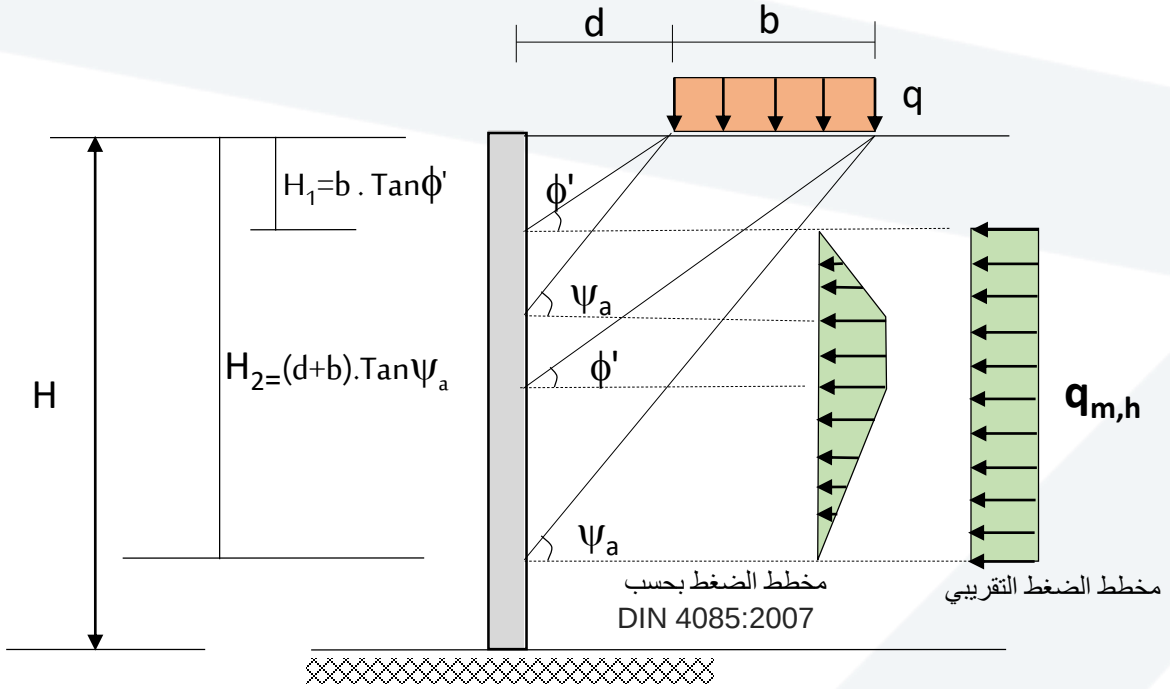
$$q_{m,h} = q_m . \cos(\delta'_a + \theta_a)$$

$$\Rightarrow P_{a,q} = (q.b).\frac{\sin(\psi_a - \phi')}{\cos(\psi - \phi' - \delta'_a - \theta_a)} = q.b.k_{a,q}$$

$$k_{a,q} = \frac{\sin(\psi_a - \phi')}{\cos(\psi - \phi' - \delta'_a - \theta_a)}$$

محصلة الدفع الجانبي مائل بزاوية $(\delta'_a+\theta_a)$

$$q_m = \frac{q.b}{H_2 - H_1}.\frac{\sin(\psi_a - \phi').\cos(\delta'_a + \theta_a)}{\cos(\psi - \phi' - \delta'_a - \theta_a)}$$



## قوى الدفع الفعال على الجدار مع قوى الزلازل

طريقة مونونوبي-أوكابة (Mononobe-Okabe).

1-بفرض كتلة التربة المنزلقة تخضع لتسارع أفقي ثابت ($a_h=k_h . g$) وتسارع شاقولي ثابت - ($a_v=k_v . g$) مطبقان في مركز ثقل كتلة التربة المنزلقة

2- بفرض اتجاه $a_v$ الموجب نحو الأسفل واتجاه $a_h$ الموجب بعيداً عن الجدار

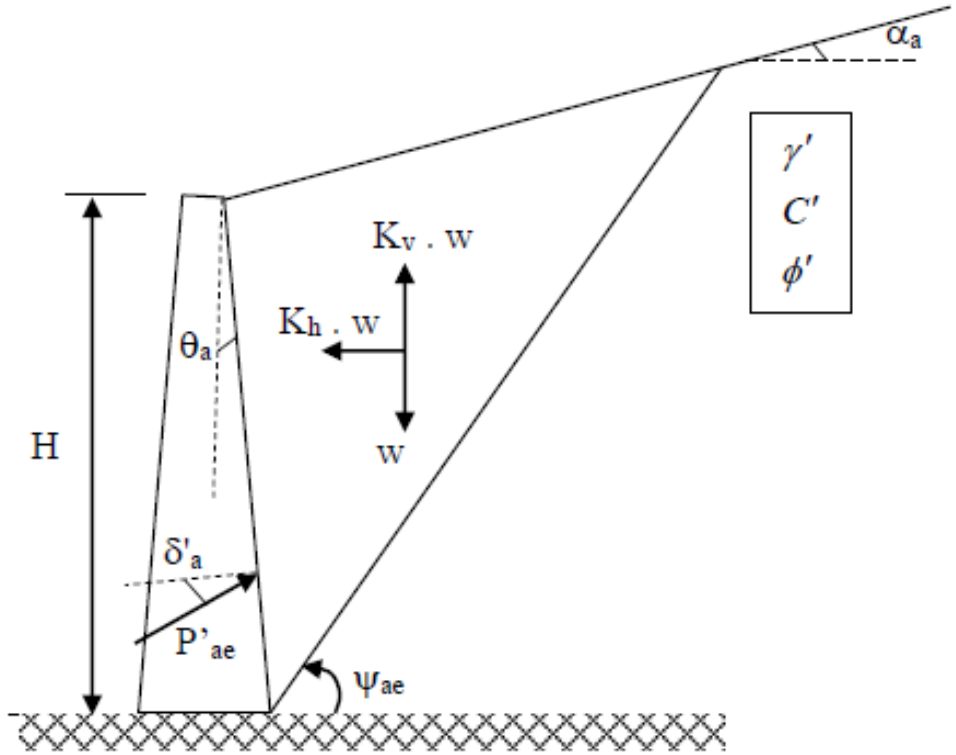
2- تؤثر قوى العطالة في الاتجاهات المعاكسة لاتجاهات التسارعات المطبقة من الحركة الزلزالية. من أجل التسارعات الموجبة، تكون قوى العطالة معاكسة لهذه الاتجاهات كما هو مبين في الشكل، فقوة العطالة الشاقولية ( $k_v.W$) تتجه نحو الأعلى وقوة العطالة الأفقية ($k_h.W$) تتجه باتجاه الجدار، حيث.

$K_h$ ثابت التسارع الأفقي و $K_v$ ثابت التسارع الشاقولي (كلاهما نسبة من عامل زلزالية المنطقة Z)

W وزن التربة ضمن موشور الانزلاق

$$a_h = k_h . g \Rightarrow F_h = m.a_h = m.g.k_h = k_h . W$$

$$a_v = k_v . g \Rightarrow F_v = m.a_v = m.g.k_v = k_v . W$$



في الكود الهندي(IS : 1893 - 1984)، تعتمد العلاقة التالية لحساب $k_h$ :

$$k_h = \frac{1}{2} Z \frac{I}{R} \frac{S_a}{g}$$

I معامل أهمية المنشأة (I=1)

Z عامل زلزالية المنطقة (مثال : اللاذقية Z=0.3 و طرطوس Z=0.25)

R معامل السلوك اللامرن. من أجل الجدران غير المسلحة (الصلبة)، تؤخذ عادة R=1.5

Sa/g معامل التسارع الطيفي. تعتبر الجدران صلبة ولذلك يعتبر الدور يساوي الصفر ومعامل التسارع الطيفي (Sa/g=1)

بالتبديل في العلاقة السابقة نحصل علي :

$$k_h = \frac{1}{2} Z \frac{1}{1.5} * 1 = \frac{Z}{3}$$

أي أنه من أجل جدار استنادي غير مسلح يكون عامل التسارع الأفقي kh=Z/3 ، وفي حالة الجدران المسلحة يكون عامل التسارع الأفقي أصغر من ذلك.

في الكود الأمريكي (AASHTO)، تعتمد العلاقات التالية لحساب $k_h$ :

حالة الجدران الصلبة (كالجدران الثقلية خيث الانتقال Ux=0) :

$$k_h = (1.45 - Z)\ Z$$

حالة الجدران المرنة (كالجدران المسلحة) :

$$k_h = 0.74\ Z \left( Z\ .\ \frac{(25.4mm)}{U_x} \right)^{0.25}$$

## حالة الترب المفككة

**1. قوة الدفع الكلية الفعالة**

$$P'_{ae} = \frac{1}{2}\gamma' H^2 (1-k_v) K_{ae}$$

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi' - \overline{\beta} - \theta)}{\cos\overline{\beta}\cos^2\theta\cos(\delta'_a + \overline{\beta} + \theta)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\delta'_a+\phi')\sin(\phi'-\overline{\beta}-\alpha)}{\cos(\delta'_a+\overline{\beta}+\theta)\cos(\alpha-\theta)}}\right]^2}$$

$\overline{\beta}$ زاوية ميل محصلة قوى المؤثرة موشور التربة خلف الجدار

$$\overline{\beta} = \tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1\pm k_v}\right)$$

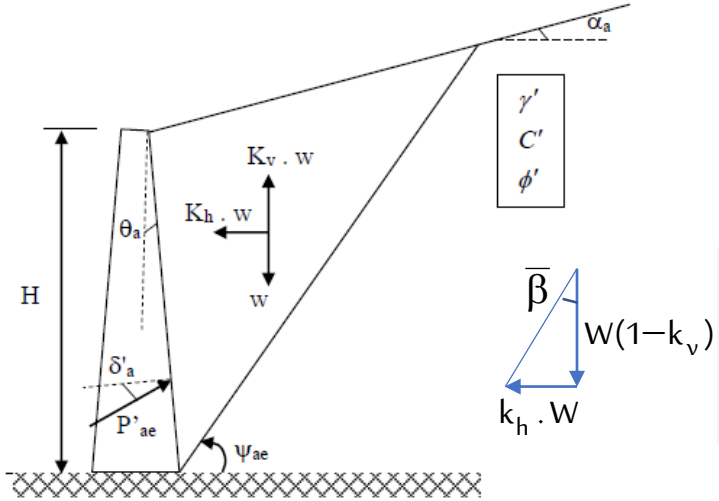
عادة يتم اعتبار $K_v=0$ وذلك لأن ذروتي التسارعات (الأفقية والشاقولية) لا تحصلان في وقت واحد

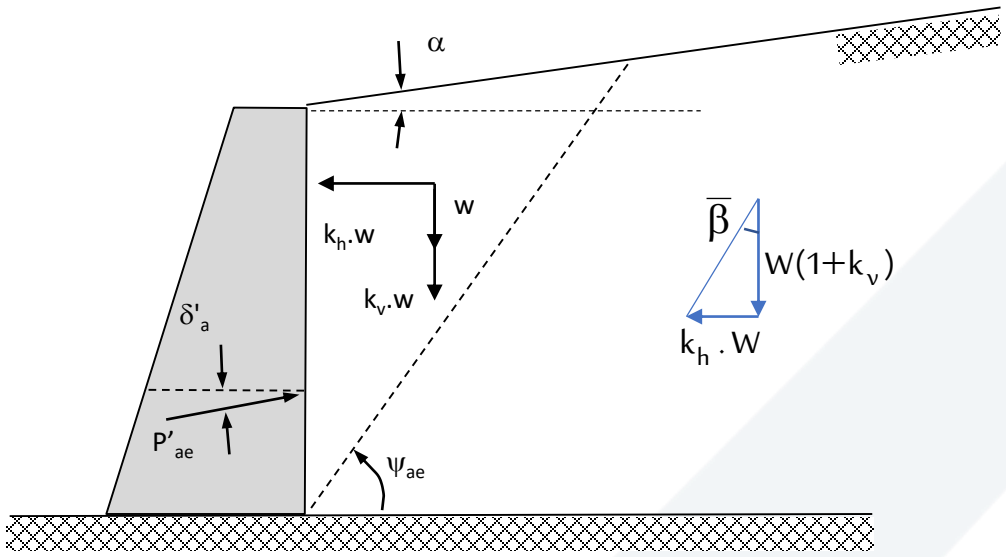
عندما يكون التسارع الشاقولي **باتجاه الأسفل**، تكون قوة العطالة kv.W باتجاه الأعلى (عكس اتجاه W)، تعطى $\overline{\beta}$ العلاقة السابقة :

$$\overline{\beta} = \tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1-k_v}\right)$$

عندما يكون التسارع الشاقولي **باتجاه الأعلى**، تكون قوة العطالة kv.W باتجاه الأسفل (باتجاه W) وتصبح العلاقة السابقة :

$$\overline{\beta} = \tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1+k_v}\right)$$



$$\psi_{ae} = \phi' - \overline{\beta} + \tan^{-1}\left[\frac{-\tan(\phi' - \overline{\beta} - \alpha_a) + c_{1ae}}{c_{2ae}}\right]$$

$$c_{1ae} = \sqrt{\left[\tan(\phi' - \overline{\beta} - \alpha_a)\right]\left[\tan(\phi' - \overline{\beta} - \alpha_a) + \cot(\phi' - \overline{\beta} - \theta_a)\right]\left[1 + \tan(\delta'_a + \overline{\beta} + \theta_a)\cot(\phi' - \overline{\beta} - \theta_a)\right]}$$

$$c_{2ae} = 1 + \left[\tan(\delta'_a + \overline{\beta} + \theta_a)\right]\left[\tan(\phi' - \overline{\beta} - \alpha_a) + \cot(\phi' - \overline{\beta} - \theta_a)\right]$$

حدود التسارع الأفقي

$$\overline{\beta} \le \phi' - \alpha_a \Rightarrow k_{h,max} = (1 - k_v)\tan(\phi' - \alpha_a)$$

موقع قوة الدفع الفعال $P'_{ae}$ على الوجه الخلفي للجدار

$$P'_{ae} = P'_{ae} + \Delta P'_{ae}$$

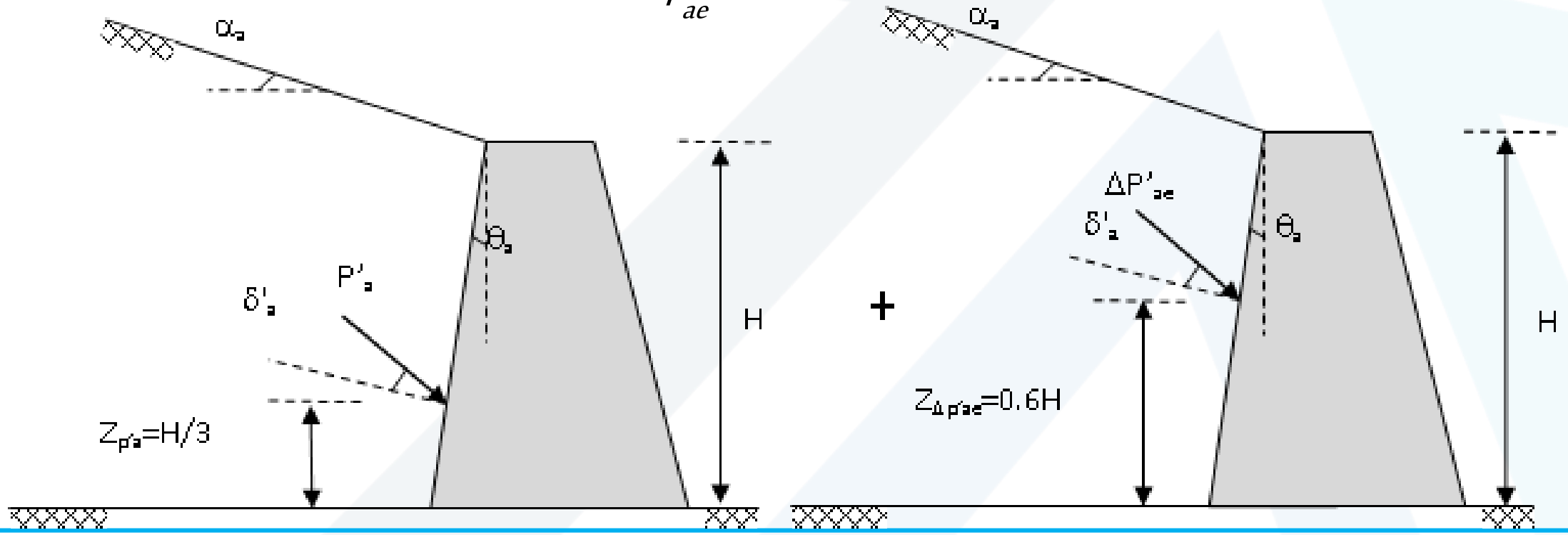
$$\Delta P'_{ae} = P'_{ae} - P'_a$$

$P'_a$ تؤثر على مسافة H/3 من أسفل الجدار

فرض أن $\Delta P'_{ae}$ تؤثر على مسافة 0.6H من أسفل الجدار

حساب نقطة تطبيق المحصلة $P'_{ae}$ من العلاقة التالية:

$$Z_{P'_{ae}} = \frac{\Delta P'_{ae} \cdot (0.6H) + P'_a \cdot \frac{H}{3}}{P'_{ae}}$$

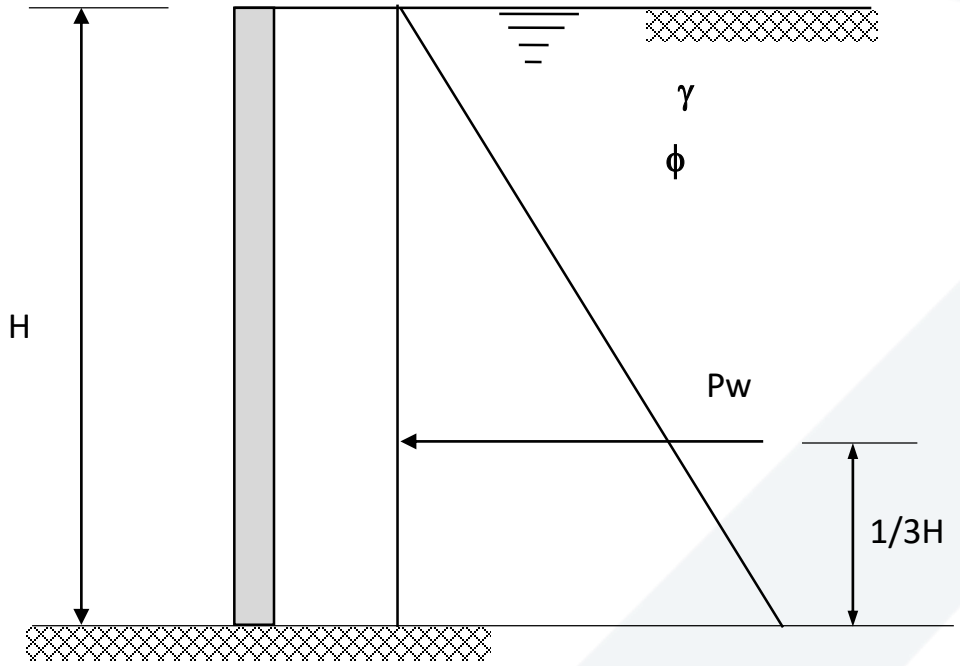


## حالة وجود مياه خلف الجدار

يؤثر على الجدار دفع التربة الكلي Pae إضافة إلى الدفع الناتج عن الماء وهو مكون من دفع ستاتيكي ودفع ديناميكي.

يحسب دفع الماء على الجدار بطريقة تقريبية كما يلي :

### أ-ضغط الماء الهيدروستاتيكي




بفرض منسوب الماء عند سطح الأرض، يكون ضغط الماء أسفل الجدار :

$$\sigma_w = \gamma_w . H$$

وتكون محصلة ضغط الماء الهيدروستاتيكي

$$P_w = \frac{1}{2}\gamma_w H^2$$

## ب-الأثر الديناميكي للماء

Matsuzawa Ishibaski, and Kawamura (1985)

فرضية 1 : الماء نتيجة للاهتزاز يبقى محصوراً خلف الجدار، و اقترح تعديل $k_h$ عن طريق ضربها بالنسبة $\gamma/\gamma_{sub}$ وبالتالي نستطيع كتابة :

$$k_{h,w} = \frac{\gamma}{\gamma_{sub}} k_h \qquad \overline{\beta} = Tan^{-1}\left(\frac{k_{h,w}}{1-k_v}\right)$$

فرضية 2 : نتيجة للاهزازات يمكن للماء أن يكون حر الحركة خلف الجدار ، و اقترح تعديل kh عن طريق ضربها بالنسبة $\frac{G_s}{G_s - 1}$

(Gs تمثل الوزن النوعي للتربة) ، وبالتالي نستطيع كتابة :

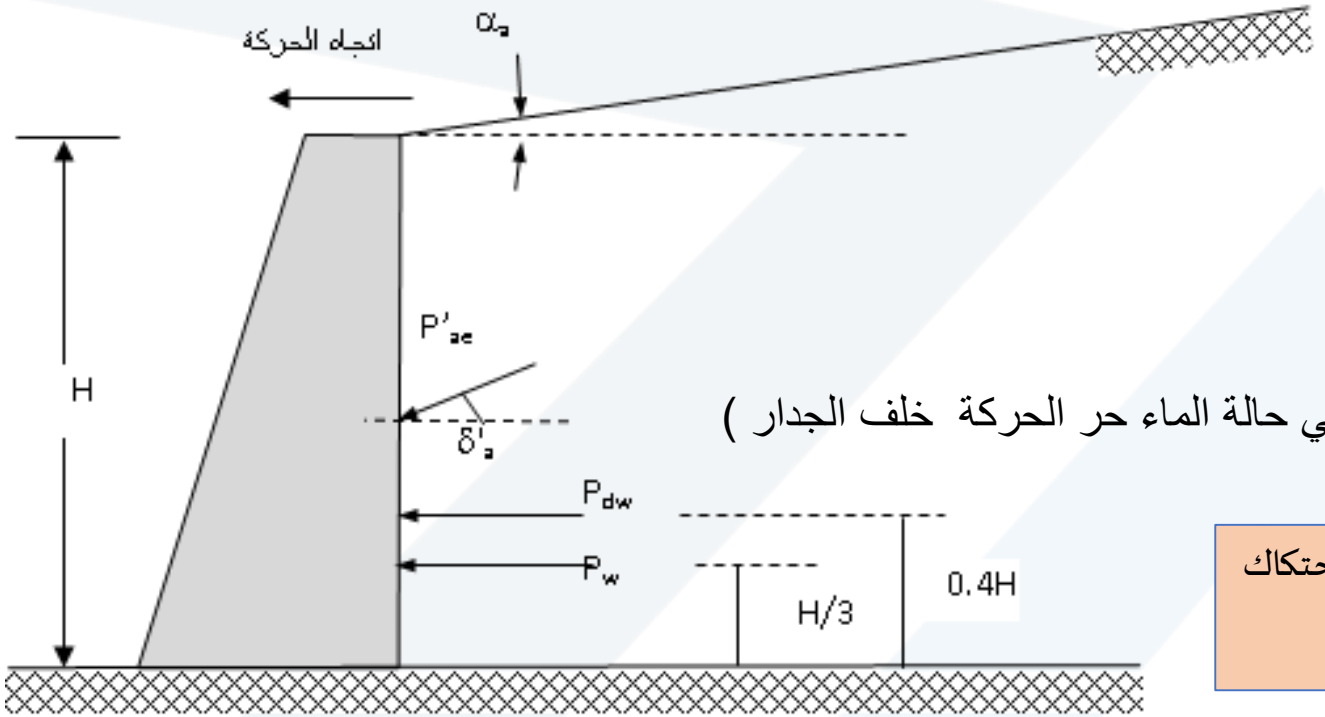
$$k_{h,w} = \frac{G_s}{G_s - 1} k_h \qquad \overline{\beta} = Tan^{-1}\left(\frac{k_{h,w}}{1-k_v}\right)$$

يمكن حساب محصلة ضغط الماء الهيدروديناميكي $P_{wd}$ بالعلاقة التقريبية التالية :

$$P_{wd} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H^2$$

وهذه القوة تؤثر على ارتفاع 0.4H من قاعدة الجدار

القوى المؤثرة على الجدار (حالة تربة+ماء+زلازل)




1-ضغط التربة الكلي $P'_{ae}$

2- ضغط الماء الهيدروستاتيكي $P_w$

3- ضغط الماء الهيدروديناميكي $P_{dw}$ (فقط في حالة الماء حر الحركة خلف الجدار )

ملاحظة: نتيجة لوجود الماء يتم تخفيض زاوية الاحتكاك بين التربة والجدار $\delta'$ إلى النصف

حمولة سطحية q ممتدة على مساحة كبيرة

$$p_{a,q} = q.H\frac{\cos\theta}{\cos(\theta-\alpha)}K_{ae}$$

كما يحسب الضغط الجانبي السلبي الناتج عن هذه الحمولة بالعلاقة التالية :

$$p_{p,q} = q.H\frac{\cos\theta}{\cos(\theta-\alpha)}K_{pe}$$

وتقع نقطة تطبيق محصلة قوة الدفع الناتجة عن الحمولة الخارجية على بعد (0.66H) من قاعدة الجدار