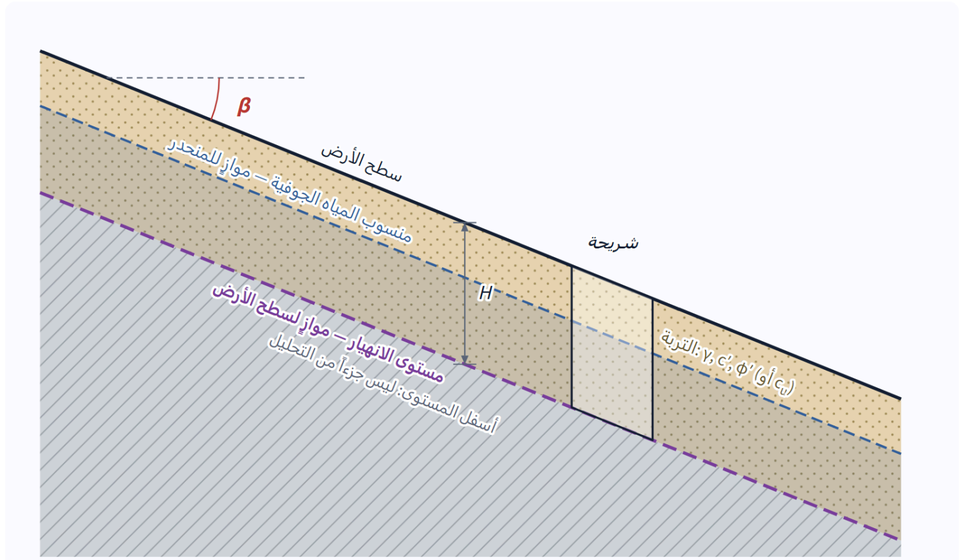


شرائح محاضرات الجيوتكنيك · استقرار المنحدرات

استقرار المنحدر غير المحدود

المحاضرة: نموذج المنحدر غير المحدود (سطح الانزلاق موازٍ للسطح)؛ الإجهادات، ومعامل الأمان، والطين غير المصرف، والماء، ومعامل الخضوع تحت الحمل الزلزالي، والعمق الحرج، والزاوية اللازمة؛ مع مثال محلول لكل موضوع.

المنحدر غير المحدود · مقاومة القص ومعامل الأمان FS · الماء · الزلزال · العمق الحرج · الزاوية المطلوبة · قابل للحل يدوياً

يستند إلى صفحة النظرية في GeoTerva · geoterva.com

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

سبب استخدام نموذج **المنحدر غير المحدود** في الانزلاقات السطحية: طبقة تربة رقيقة تنزلق على مستوى يوازي السطح

الإجهادات على مستوٍ ناتجة عن **شريط** واحد ($\sigma = \sigma_v \cos^2\beta$، $\tau = \sigma_v \sin\beta\cos\beta$) والعلاقة **$\tau/\sigma = \tan\beta$**

معامل الأمان بحسب **Mohr–Coulomb**: $FS = c'/(\gamma H \cos^2\beta \tan\beta) + \tan\varphi'/\tan\beta$؛ العمق الحرج H_{cr}، والعمق المطلوب H_{req}، والزاوية المطلوبة β_{req}

الطين غير المصّرف (c_u و $\varphi = 0$) وأثر **الماء**: منسوب الماء (تسرب موازٍ للمنحدر)، ونسبة ضغط ماء المسام r_u

معامل الأمان في **الزلزال شبه الاستاتيكي**، و **معامل الخضوع k_y** (التسارع الأفقي الذي تبدأ عنده الكتلة بالانزلاق)

تسلسل المحاضرة

يعالج كل موضوع في **ثلاث خطوات**:

1 · **النظرية**: ما القاعدة، ولماذا هي كذلك؟

2 · **المسألة**: المعطيات والمطلوب

3 · **الحل**: خطوة بخطوة، بالأرقام

المنحدر المثال: $\beta = 15°$، ومستوى الانزلاق على عمق رأسي 6 m؛ التربة $\gamma = 17.8$ kN/m³ (مشبعة 19.5)، $\varphi' = 20°$، $c' = 10$ kPa؛ ولا يوجد ضغط ماء مسام في البداية. والإجهادات محسوبة لوحدة المساحة من المستوى الموازي للسطح.

شريحة من الكتلة

النظرية

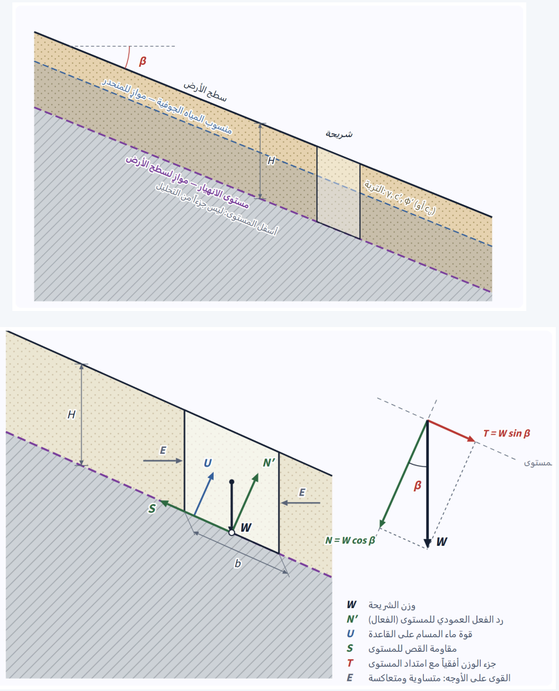
كثير من انزلاقات المنحدرات سطحية: تنزلق طبقة رقيقة من التربة على سطح موازٍ لسطح المنحدر على عمق بضعة أمتار؛ والمنحدر من الطول بحيث لا تكاد نهايتاه تؤثران (منحدر قطع أو ردم بعد فترة رطبة، أو منحدر طيني طبيعي). و**المنحدر غير المحدود** هو النموذج الموضوع لهذه الحالة: فكل موضع من مستوي الانزلاق في الحالة نفسها، ولذلك تمثل شريحة واحدة من الكتلة الكتلة كلها، ولا يتطلب توازنها سوى بضعة أسطر.

الشريحة: طولها b على امتداد مستوى الانزلاق وعرضها 1 m على امتداد المنحدر؛ ويقع المستوى على عمق رأسي H أسفل السطح؛ والوجهان الجانبيان رأسيان و**يلغي أحدهما الآخر** (المنحدر لانهائي الطول والتربة واحدة في كل موضع).

$$W = \gamma H b \cos\beta \qquad N = W\cos\beta \quad T = W\sin\beta$$

$$\sigma = \frac{N}{b} = \sigma_v \cos^2\beta \qquad \tau = \frac{T}{b} = \sigma_v \sin\beta\cos\beta \qquad \frac{\tau}{\sigma} = \tan\beta$$

في الشريحة التي حذفت وجوهها الجانبية تميل الإجهادات المؤثرة على المستوى بقدر زاوية المنحدر: τ/σ = tan β. وإذا وجد فوق المستوى وزنان حجميان (منسوب الماء) فإن $\sigma_v = \gamma(H - h_w) + \gamma_{sat} h_w$؛ وتبقى المعادلات نفسها.



المسألة

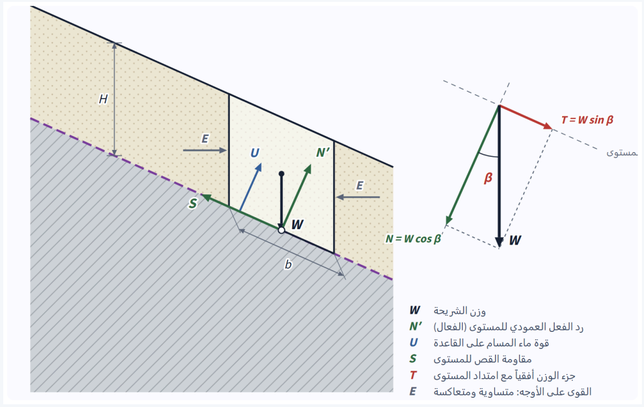
مثال

المعطيات

المنحدر	**مستوى الانزلاق رأسي على عمق** $H = 6$ **m**؛ $\beta = 15^\circ$
التربة	$\gamma = 17.8$ **kN/m³**؛ **لا يوجد ضغط لماء المسام**

المطلوب

الإجهاد الرأسي σ_v، والإجهاد العمودي على المستوى σ وإجهاد القص τ.



الحل

الحل

1 الإجهاد الرأسي

$$\sigma_v = \gamma H = 17.8 \times 6 = \mathbf{106.80}\ \text{kPa}$$

2 الإجهاد العمودي والإجهاد المماسي على المستوى

$$\sigma = \sigma_v \cos^2\beta = 106.80 \times 0.93301 = \mathbf{99.65}\ \text{kPa}$$

$$\tau = \sigma_v \sin\beta\cos\beta = 106.80 \times 0.25000 = \mathbf{26.70}\ \text{kPa} \qquad \frac{\tau}{\sigma} = 0.2679 = \tan 15^\circ\ \checkmark$$

تؤثر على وحدة المساحة من المستوي إجهاد ناظمي **σ = 99.65 kPa** وإجهاد قص مماسي **τ = 26.70 kPa**؛ والنسبة τ/σ = 0.2679 = tan 15°، أي أن الإجهاد يميل بقدر ميل المنحدر.

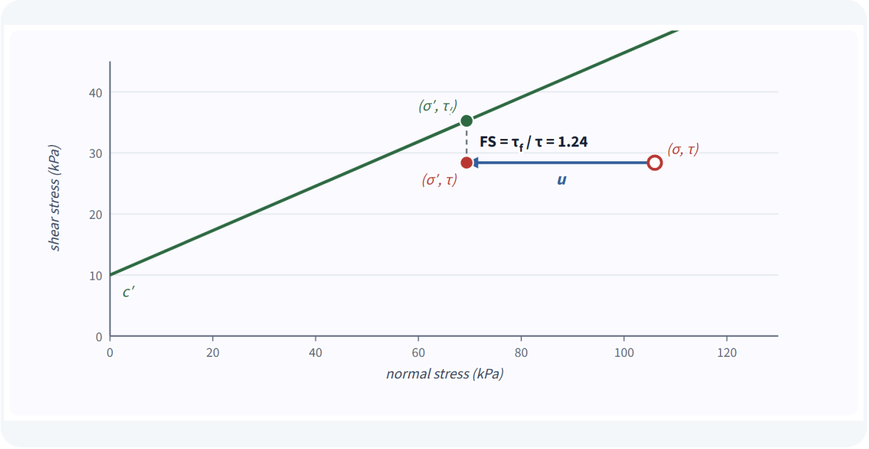
تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

Mohr–Coulomb، الحل المغلق، العمق الحرج

تحمل التربة الواقعة على المستوي مقاومة القص τ_f: وهي في التحليل المصرف مقاومة Mohr–Coulomb المعتمدة على الإجهاد الناظمي الفعال ($\sigma' = \sigma - u$). ومعامل الأمان هو نسبة المقاومة إلى الإجهاد: يخفض كل من التماسك والاحتكاك بالمعامل نفسه حتى يصبح الشريط في حالة اتزان حدي:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan\varphi' \qquad FS = \frac{\tau_f}{\tau} \qquad \sigma' = \sigma - u$$



عند انعدام ضغط ماء المسام يكون $\sigma' = \sigma$، ويُستنتج **حل مغلق** من الإجهادات:

$$FS = \frac{c'}{\gamma H \cos^2\beta \, \tan\beta} + \frac{\tan\varphi'}{\tan\beta}$$

تربة غير متماسكة ($c' = 0$): $FS = \tan\varphi'/\tan\beta$؛ وإذا كان ميل المنحدر أقل من φ' فهو آمن عند كل عمق.

التربة المتماسكة: يمسك التماسك المستوى القريب من السطح (FS كبير)، وكلما زاد العمق انخفض FS حتى يؤول إلى الاحتكاك وحده.

إذا كان $\beta > \varphi'$ وجد **عمق حرج** يكون عنده $FS = 1$ و **عمق مطلوب** يكون عنده $FS = FS_{req}$؛ وفي التربة غير المتماسكة β_{req}: $\tan\beta_{req} = \tan\varphi'/FS_{req}$:

$$H_{cr} = \frac{c'}{\gamma \cos^2\beta(\tan\beta - \tan\varphi')} \qquad H_{req} = \frac{c'}{\gamma \cos^2\beta \, (FS_{req}\tan\beta - \tan\varphi')}$$

المسألة

مثال

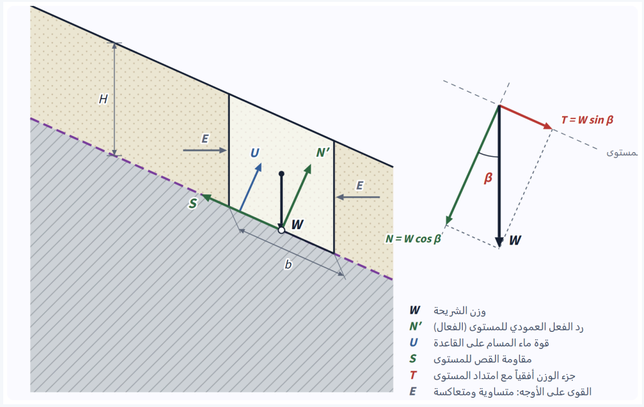
المعطيات

المنحدر والتربة

مثال 1: $\beta = 15^\circ$، $H = 6$ m، $\gamma = 17.8$ kN/m³؛
$c' = 10$ kPa، $\varphi' = 20^\circ$؛ **لا يوجد ضغط ماء المسام**

المطلوب

قيمتا τ_f و**FS** للمستوى؛ والتحقق بواسطة الحل المغلق.



الحل

الحل

1 المقاومة ومعامل الأمان (بالإجهادات في المثال 1)

$$\tau_f = c' + \sigma \tan\varphi' = 10 + 99.65 \times 0.36397 = \mathbf{46.27}\ \text{kPa}$$

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{46.27}{26.70} = \mathbf{1.733}$$

2 الحل التحليلي المغلق (تحقق)

$$FS = \frac{10}{17.8(6)(0.93301)(0.26795)} + \frac{0.36397}{0.26795} = 0.3745 + 1.3584 = \mathbf{1.7329}$$

معامل الأمان **1.733**. حد التماسك 0.3745، وحد الاحتكاك 1.3584 = tan 20°/tan 15°: ويعطي المجموع الرقم نفسه. ولأن المنحدر (15°) أقل ميلاً من زاوية الاحتكاك (20°) فإن الاحتكاك وحده يحفظ الاستقرار؛ ويضيف التماسك هامشاً.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

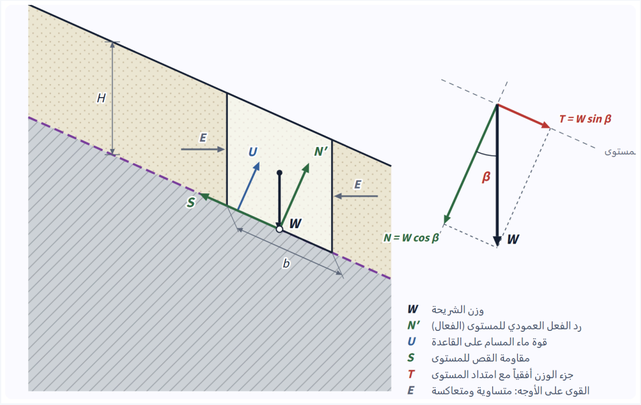
مثال

المعطيات

التربة	**التربة في المثال 2 ($c' = 10$ kPa، $\varphi' = 20^\circ$، $\gamma = 17.8$ kN/m³)**
المطلوب	**معامل الأمان المطلوب $FS_{req} = 2.0$؛ وكذلك العمق الحرج لمنحدر أكثر انحداراً $\beta = 25^\circ$**

المطلوب

H_{req} ($\beta = 15°$)؛ **β_{req}** ($H = 6$ m)؛ **H_{cr}** عند $\beta = 25°$.



الحل

الحل

1 العمق المطلوب ($FS_{req} = 2$؛ $\beta = 15°$)

$$H_{req} = \frac{c'}{\gamma \cos^2\beta (FS_{req}\tan\beta - \tan\varphi')} = \frac{10}{17.8(0.93301)(2(0.26795) - 0.36397)} = \mathbf{3.50}\ \text{m}$$

2 الزاوية المطلوبة ($H = 6$ m): جذر المعادلة $FS(\beta) = 2$؛ العمق الحرج ($\beta = 25°$)

$$FS(\beta) = \frac{10}{106.8\cos^2\beta\tan\beta} + \frac{0.36397}{\tan\beta} = 2 \;\Rightarrow\; \beta_{req} = \mathbf{13.02}^\circ$$

$$H_{cr}(25^\circ) = \frac{10}{17.8(0.8214)(0.4663 - 0.3640)} = \mathbf{6.68}\ \text{m}$$

عند FS = 2 يمكن أن يقع المستوي على عمق أقصاه **3.50 m**؛ وعند 6 m يجب ألا يزيد ميل المنحدر على **13.0°** لتحقيق معامل الأمان نفسه. ولأن $\beta = 25° > \varphi'$ يوجد عمق حرج ينخفض عنده FS إلى 1: **6.68 m**. أما في المنحدر القائم ($\varphi' > \beta$) فلا يوجد عمق حرج.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

الإجهاد الكلي: c_u و $\varphi = 0$

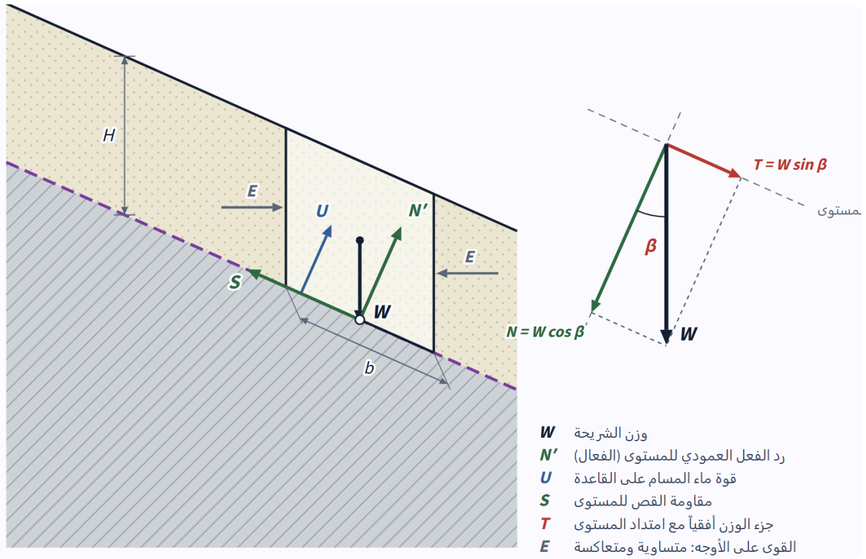
يحل الطين المشبع عند تحميله أو حفره بسرعة لا تسمح بالتصريف (الحالة قصيرة الأمد للحفر في الطين الرخو) في **الإجهاد الكلي** باستخدام c_u و $\varphi = 0$. ولا تعتمد المقاومة على الإجهاد العمودي؛ ولا يدخل ضغط ماء المسام:

$$FS = \frac{c_u}{\tau} = \frac{c_u}{\gamma H \sin\beta \cos\beta} = \frac{2c_u}{\gamma H \sin 2\beta}$$

$\tau = (\gamma H/2)\sin 2\beta$ تكون أكبر ما يمكن عند منحدر بزاوية 45°؛ ومعامل الأمان FS **يتناسب عكسياً** مع العمق: المستوى الذي يكون عمقه ضعف العمق الآخر يكون معامل أمانه نصفه.

الطين المستقر في الحالة غير المصرفة على المدى القصير قد لا يبقى مستقراً بعد التصريف: فالتحليل على المدى الطويل **تحليل مصرَّف** يعتمد على ضغوط ماء المسام الناجمة عن المياه الجوفية وعلى قيم c' و φ' المصرفة.

$H_{cr} = c_u/(\gamma \sin\beta \cos\beta)$; $H_{req} = c_u/(FS_{req}\, \gamma \sin\beta \cos\beta)$; $\sin 2\beta_{req} = 2c_u/(FS_{req}\, \gamma H)$.



المسألة

مثال

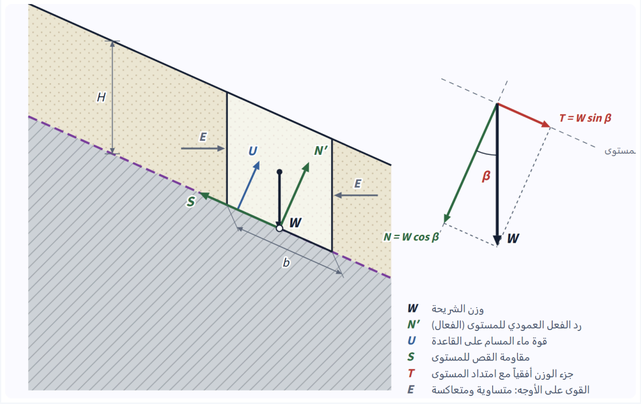
المعطيات

المنحدر: $\beta = 15^\circ$، $H = 6$ m، $\gamma = 17.8$ kN/m³؛ طين غير مصّرف ($\varphi = 0$) $c_u = 40$ kPa

المطلوب: $FS_{req} = 2.0$

المطلوب

.FS, H_{cr}, H_{req}, β_{req}



الحل

الحل

1 معامل الأمان والعمق الحرج

$$FS = \frac{c_u}{\gamma H \sin\beta \cos\beta} = \frac{40}{17.8(6)(0.2500)} = \frac{40}{26.70} = \mathbf{1.498}$$

$$H_{cr} = \frac{c_u}{\gamma \sin\beta \cos\beta} = \frac{40}{17.8(0.2500)} = \mathbf{8.99}\ \text{m}$$

2 العمق والزاوية المطلوبان ($FS_{req} = 2$)

$$H_{req} = \frac{c_u}{FS_{req}\,\gamma \sin\beta \cos\beta} = \frac{8.99}{2} = \mathbf{4.49}\ \text{m}$$

$$\sin 2\beta_{req} = \frac{2c_u}{FS_{req}\gamma H} = \frac{80}{2(106.8)} = 0.3745 \Rightarrow \beta_{req} = \mathbf{11.00}^\circ$$

مع $c_u = 40$ kPa يكون **FS = 1.50** (و 1.73 في الحالة المصّرفة). وعند FS = 2 يبلغ ميل المنحدر **°11.0** كحد أقصى؛ $H_{cr} = 8.99$ m.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

تسرب موازٍ للمنحدر؛ نسبة ضغط ماء المسام r_u

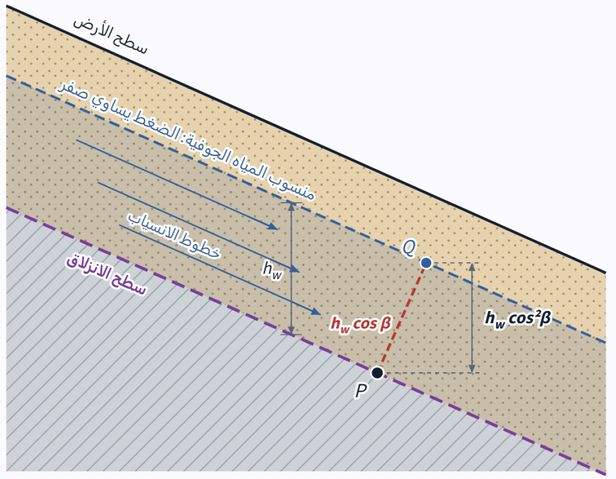
ينتزع الماء المقاومة بخفضه الإجهاد الفعال بمقدار ضغط ماء المسام u. إذا كان منسوب المياه الجوفية على عمق z_w تحت السطح (رأسياً) فإن للتربة التي فوقه وزناً حجمياً γ وللتي تحته γ_{sat}؛ ويكون ارتفاع الماء فوق المستوي $h_w = H - z_w$. وإذا جرى الماء موازياً للسطح فإن خط تساوي الجهد المار بالنقطة P عمودي على المنحدر؛ ويكون ارتفاع الضغط $h_w\cos^2\beta$:

$$u = \gamma_w h_w \cos^2\beta \qquad \sigma' = \sigma - u \qquad FS = \frac{c' + \sigma' \tan\varphi'}{\tau}$$

المياه على السطح: $FS = \dfrac{c'}{\gamma_{sat} H \cos^2\beta \tan\beta} + \dfrac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \dfrac{\tan\varphi'}{\tan\beta}$ $\quad r_u = \dfrac{u}{\gamma H}$: $FS = \dfrac{c'}{\gamma H \cos^2\beta \tan\beta} + \left(1 - \dfrac{r_u}{\cos^2\beta}\right) \dfrac{\tan\varphi'}{\tan\beta}$

في التربة غير المتماسكة عندما يكون الماء عند السطح FS = (γ′/γsat) tan φ′/tan β: ولما كانت γ′/γsat ≈ ½ فإن منحدر الرمل الذي يثبت في الحالة الجافة عند ميل قريب من φ′ يتطلب عند وجود التسرب منحدراً ينخفض ظل زاويته إلى النصف.

إذا كان ضغط ماء المسام آتياً من مقياس الضغط (البيزومتر) أو من شبكة الجريان فيعطى بنسبته إلى وزن التربة r_u. وإذا نتج σ′ ≤ 0 (أي يرفع الماء التربة عن المستوى) يصفر الاحتكاك ولا يبقى سوى التماسك ويذكر ذلك.



على خط تساوي الجهد
الضاغط متساوي PQ
عند P وعند Q.

الضغط يساوي صفر عند Q،
لذلك فإن ضاغط الضغط عند P
إلى Q هو الارتفاع من:

$u / \gamma_w = h_w \cos^2\beta$

المسألة

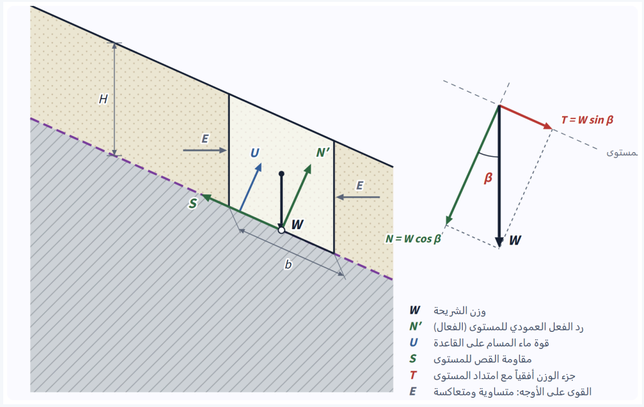
مثال

المعطيات

المنحدر والتربة	**منحدر المثال 2؛** $\gamma = 17.8$ **(جاف)،** $\gamma_{sat} = 19.5$ **kN/m³**
حالات الماء	**(أ) منسوب المياه الجوفية عند** $z_w = 2$ **m، تسرب موازٍ للمنحدر؛ (ب) الماء عند السطح** $(z_w = 0)$**؛ (ج)** $r_u = 0.25$

المطلوب

في كل حالة **u** و**σ′** و**τ_f** و**FS**؛ مع المقارنة بمعامل الأمان في الحالة الجافة FS.



الحل (1/2)

الحل

1 (a) منسوب المياه الجوفية عند 2 m: $h_w = 6 - 2 = 4$ m

$$\sigma_v = 17.8(2) + 19.5(4) = 113.6 \text{ kPa}$$

$$\sigma = \sigma_v \cos^2\beta = 105.99 \text{ kPa} \quad \tau = \sigma_v \sin\beta\cos\beta = 28.40 \text{ kPa}$$

$$u = \gamma_w h_w \cos^2\beta = 9.81(4)(0.9330) = 36.61 \text{ kPa} \quad \sigma' = \sigma - u = 69.38 \text{ kPa}$$

$$FS = \frac{10 + 69.38(0.36397)}{28.40} = \frac{35.25}{28.40} = \mathbf{1.241}$$

عندما يكون منسوب المياه الجوفية عند 2 m ينخفض FS من 1.73 للحالة الجافة إلى **1.24**: فالماء يزيد وزن التربة (σ_V) وضغط ماء المسام (36.6 kPa) معاً.

الحل (2/2)

الحل

2 خلاصة حالات الماء الثلاث (المعادلات نفسها)

الحالة	σ_v (kPa)	σ (kPa)	τ (kPa)	u (kPa)	σ' (kPa)	τ_f (kPa)	FS
جاف	106.8	99.65	26.70	0.00	99.65	46.27	**1.733**
z_w = 2 m (a)	113.6	105.99	28.40	36.61	69.38	35.25	**1.241**
(ب) الماء عند السطح	117.0	109.16	29.25	54.92	54.25	29.74	**1.017**
r_u = 0.25 (c)	106.8	99.65	26.70	26.70	72.95	36.55	**1.369**

عندما يكون الماء على السطح تكون **1.02** = FS، أي عند الحد تقريباً؛ وعند r_u = 0.25 تكون **1.37**. والمنحدر الآمن بسهولة في الحالة الجافة لا هامش له إطلاقاً في الحالة المبتلة: وتعرض الوحدة إلى جانب النتيجة قيمتي FS في الحالة الجافة وفي حالة الماء على السطح معاً.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

القوة الأفقية والرأسية؛ معامل الخضوع k_y

يستعاض عن الاهتزاز بتسارع ثابت (كسر من g) يطبق على الكتلة الواقعة فوق المستوى. وتحمل الشريحة، إضافة إلى وزنها W، قوة أفقية k_hW نحو أسفل المنحدر، وقوة رأسية k_vW إلى أعلى أو إلى أسفل؛ و k_h و k_v معاملان يحددهما المهندس (ولا تأخذهما الوحدة من أي مدونة). لوحدة المساحة $W/A = \sigma_v \cos\beta$:

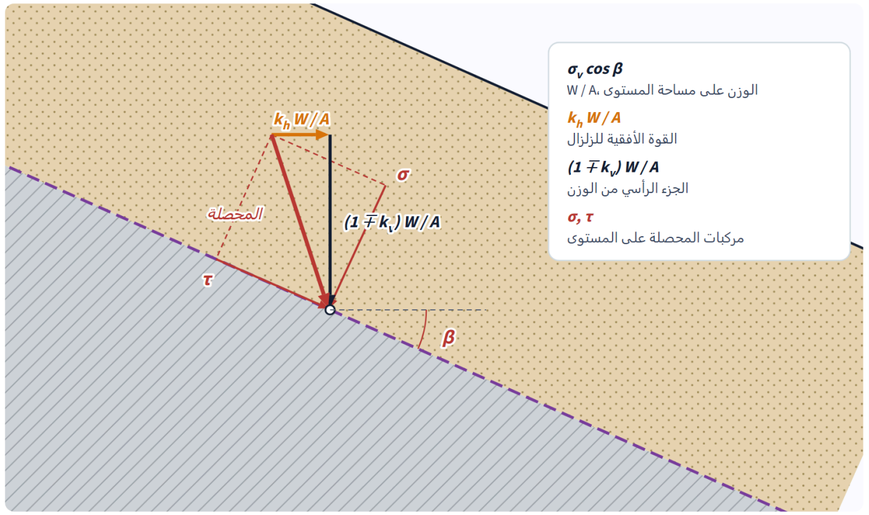
$$\sigma = \sigma_v \cos\beta\,[(1 \mp k_v)\cos\beta - k_h \sin\beta] \qquad \tau = \sigma_v \cos\beta\,[(1 \mp k_v)\sin\beta + k_h \cos\beta]$$

ضغط ماء المسام هو القيمة الاستاتيكية (دون إضافة أثر الاهتزاز): $\sigma' = \sigma - u$؛ $FS_{eq} = \tau_f/\tau$ بقيمتي σ و τ الجديدتين. وتخفض القوة الأفقية الإجهاد العمودي وتزيد إجهاد القص.

يجرب اتجاها القوة الرأسية كلاهما، ويعتمد الاتجاه الذي يعطي **أدنى قيمة لمعامل الأمان FS**: وهو في التربة الاحتكاكية عادة الاتجاه إلى الأعلى (إذ يخفف الكتلة ويقلل الإجهاد الناظمي)؛ أما في الطين في التحليل بالإجهادات الكلية فهو الاتجاه إلى الأسفل الذي يزيد إجهاد القص، لأن c_u لا تعتمد على الإجهاد الناظمي.

معامل الخضوع k_y: المعامل الأفقي الذي يجعل $FS_{eq} = 1$. في الحالة الجافة غير المتماسكة، مع $k_v = 0$: $k_y = \tan(\varphi' - \beta)$؛ وفي الحالات الأخرى يوجد بزيادة k_h من الصفر. والاهتزاز الذي لا يتجاوز $k_y g$ لا يحرك الكتلة؛ أما الذي يتجاوزه فيحركها (ومقدار ما تتحرك هو موضوع تحليل الكتلة المنزلقة ولا تتضمنه الوحدة).

$$k_y = \frac{\tan\varphi' - \tan\beta}{1 + \tan\varphi'\tan\beta} = \tan(\varphi' - \beta)$$



المسألة

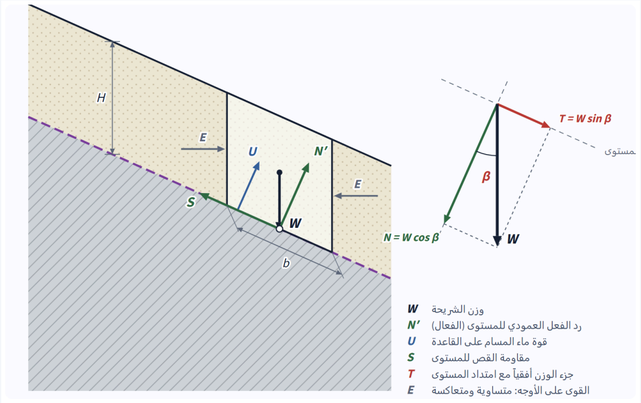
مثال

المعطيات

المنحدر والتربة	**المنحدر الجاف في المثال 2 (kPa** $c' = 10$، $\varphi' = 20^\circ$، $\beta = 15^\circ$، $H = 6$ **m)**
الزلزال	$k_h = 0.15$، $k_v = 0.05$ **(يتم اختبار اتجاهين)؛ وكذلك للرمل الجاف** $\varphi' = 32^\circ$، $\beta = 25^\circ$

المطلوب

σ و**τ** و**FS_{eq}** (الاتجاه الحرج)؛ جدول $FS(k_h)$ و**k_y**؛ وقيمة k_y في الرمل الجاف.



الحل (1/2)

الحل

1 الاتجاه الحرج: القوة الرأسية إلى الأعلى (قيمة k_v = +0.05 تعمل على التخفيف)

$$\sigma = \sigma_v \cos\beta\,[0.95\cos\beta - 0.15\sin\beta] = 103.16\,[0.8788] = 90.66 \text{ kPa}$$

$$\tau = \sigma_v \cos\beta\,[0.95\sin\beta + 0.15\cos\beta] = 103.16\,[0.3908] = 40.31 \text{ kPa}$$

$$FS_{eq} = \frac{10 + 90.66(0.36397)}{40.31} = \frac{43.00}{40.31} = \mathbf{1.067} \qquad (\text{أدناه: } k_v\ 1.085)$$

القوة الرأسية إلى الأعلى هي الحاكمة: **1.067** = FS_{eq} (1.085 في الاتجاه إلى الأسفل).

الحل (2/2)

الحل

2 $FS(k_h)$ ومعامل الخضوع (حيث $FS = 1$)

FS_{eq}	τ_f (kPa)	τ (kPa)	σ (kPa)	k_h
1.753	44.45	25.36	94.66	0.00
1.449	43.97	30.35	93.33	0.05
1.231	43.48	35.33	91.99	0.10
1.067	43.00	40.31	90.66	0.15
1.000	42.76	42.76	90.00	0.1746
0.939	42.51	45.29	89.32	0.20

يخفض الزلزال FS من 1.73 إلى **1.07** (القوة الرأسية الصاعدة هي الحاكمة). **$k_y = 0.175$**: إذا تجاوزتها k_h بدأت الكتلة بالانزلاق. وفي الرمل الجاف ($\beta = 25°$، $\varphi' = 32°$) تكون $k_y = \tan 7° = 0.1228$.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

FS; H_{req}, β_{req}, H_{cr}

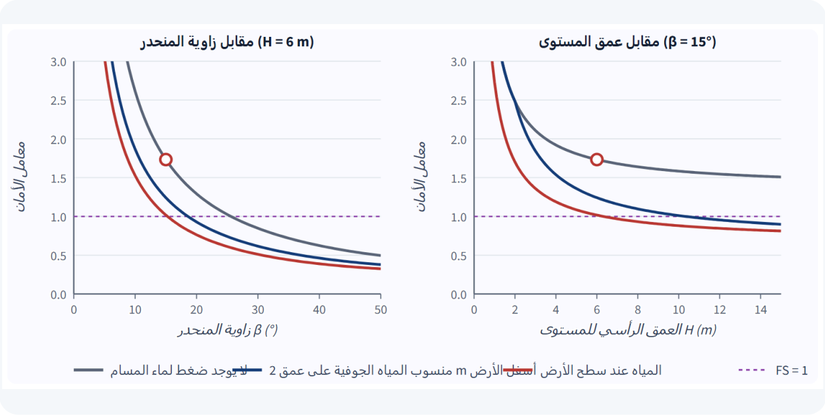
معامل الأمان FS بدلالة الميل: ينخفض FS بانتظام مع β؛ ويبيّن تباعد المنحنيات مقدار ما يستهلكه الماء من هامش الأمان؛ والزاوية التي يقطع عندها المنحنى FS_{req} هي β_{req}.

FS مقابل العمق: ينخفض منحنى التربة المتماسكة من قيمة كبيرة عند السطح إلى القيمة التي يحددها الاحتكاك؛ والموضع الذي يقطع فيه FS = 1 هو العمق الحرج. ويترك منسوب المياه الجوفية أثراً عند العمق الذي يصل عنده الماء إلى المستوى لأول مرة؛ وفوقه يتبع المنحنى الجاف.

معامل الأمان FS بدلالة الماء: يزداد كلما ازداد عمق منسوب المياه، وينخفض كلما كبرت r_u؛ ويبيّن مدى اعتماد المنحدر المصرَّف على ضغط ماء المسام الذي يصعب تحديده.

في الحالة الزلزالية يحمل كل رسم بياني خطا ثانيا (برتقالي اللون)؛ ويعطي الرسم البياني الخامس (FS مقابل k_h) قيمة k_y عند النقطة التي يتقاطع عندها مع FS = 1.

إلى جانب FS ومقارنته بالقيمة المطلوبة، يعطي تبويب النتائج ما يلي: **H_{req}** (أول عمق ينخفض عنده FS إلى FS_{req}؛ وإذا لم ينخفض فـ«لا يوجد حد»)، و**β_{req}** (أشد زاوية يظل عندها FS_{req} محققاً عند زيادة الزاوية انطلاقاً من الزاوية المسطحة)، و**H_{cr}**، وحالتا الماء الحديتان (دون ضغط ماء المسام / ماء عند السطح)، وعند الزلزال FS_{eq} وk_y.



المسألة

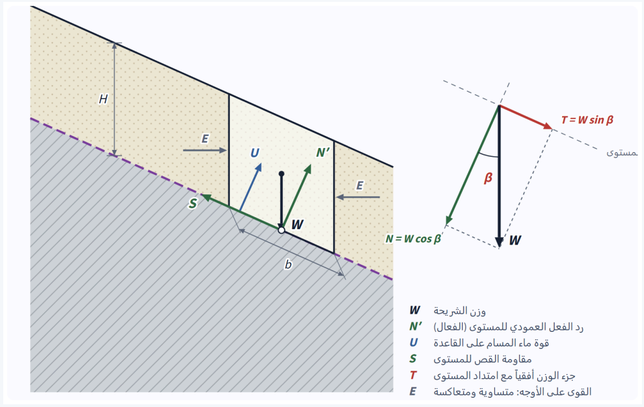
مثال

المعطيات

التربة	**تربة المثال 2 (kPa** $c' = 10$، $\varphi' = 20^\circ$، $\gamma = 17.8$، $\gamma_{sat} = 19.5$ **kN/m³)**
الجدول	**قيم FS من أجل** $\beta = 10,\ 15,\ 20,\ 25,\ 30^\circ$ **و** $H = 2,\ 4,\ 6,\ 8$ **m في حالتي الجفاف ومنسوب المياه الجوفية عند** $z_w = 2$ **m (بالحل المغلق)**

المطلوب

جدول $FS_{dry}(\beta, H)$؛ لمنسوب الماء الجوفي عند H = 6 m؛ بعد أي زاوية يصبح FS < 1؟



الحل

الحل

1 $FS = c'/(\gamma H \cos^2\beta \tan\beta) + \tan\varphi'/\tan\beta$ (جاف)؛ وفي حالة منسوب الماء من الإجهادات (بالخط الغامق: $FS < 1$)

β (°)	$H = 2$ m	$H = 4$ m	$H = 6$ m	$H = 8$ m	$H = 6$، منسوب الماء $z_w = 2$ m
10	3.707	2.885	2.612	2.475	1.866
15	2.482	1.920	1.733	1.639	1.241
20	1.874	1.437	1.291	1.219	**0.928**
25	1.514	1.147	1.025	**0.964**	**0.741**
30	1.279	**0.955**	**0.847**	**0.793**	**0.616**

يتناقص FS بانتظام مع الزاوية ويتناقص مع العمق (بسبب مساهمة التماسك). ومن $\beta = 20°$ و $H = 8$ m يقترب حتى المنحدر الجاف من الحد؛ أما منسوب المياه الجوفية عند $z_w = 2$ m مع $H = 6$ m فيخفض FS إلى ما **دون 1** ابتداء من 20° (0.62 عند 30°). ولذلك يبحث عن β_{req} و H_{req}.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

ما يفترضه النموذج

النموذج: منحدر غير محدود: سطح الأرض مستوٍ، وسطح الانزلاق موازٍ له على عمق رأسي H؛ ولا يؤثر طرفا الكتلة؛ والحالة واحدة في كل موضع؛ مسألة ثنائية الأبعاد، بطول 1 m على امتداد المنحدر.

التربة: تربة واحدة فوق المستوي (بمقاومة ووزن حجمي معطيين)؛ ولا يتضمن هذا النموذج الطبقات، ولا التربة المتغيرة على طول المنحدر أو مع العمق، ولا المقاومة المتزايدة مع العمق؛ وفي حالة تماس مستوي الانزلاق مع طبقة ضعيفة يمكن استخدام خصائص تلك الطبقة، أو وحدة استقرار المنحدرات.

الماء: منسوب مياه يجري موازياً للمنحدر ($u = \gamma_w h_w \cos^2\beta$) أو r_u؛ ولا يحسب ضغط ماء المسام من الأمطار أو من النفاذية. **المقاومة:** Mohr–Coulomb بدلالة الإجهاد الفعال أو c_u؛ وإذا كان $\sigma' \le 0$ فالاحتكاك صفر. ولا تؤخذ في الحسبان المقاومة المتبقية ولا الانهيار التدريجي ولا أثر الجذور.

الزلزال: شبه استاتيكي فقط؛ ولا يضيف الاهتزاز ضغط ماء مسام؛ ولا يجرى تحليل التضخيم والمدة وضغط ماء المسام المتبقي في التربة المشبعة المفككة والإزاحة الدائمة؛ والمعاملات من اختيار المهندس.

غير مشمولة: الحمل الإضافي، وشق الشد، والتسليح، وجدار القدم. وقيمة FS هي قيمة مستو واحد على عمق واحد؛ ولا يبحث عن مستو أضعف غير مواز للسطح. وإذا كان المنحدر قصيرا قياسا إلى العمق، أو تغيرت التربة/المياه على طول المنحدر، أصبحت الأطراف مهمة: وفي هذه الحالة تستخدم وحدة استقرار المنحدرات.

النقاط الرئيسية

شريطي: $\tau/\sigma = \tan\beta$، $\tau = \sigma_v \sin\beta\cos\beta$، $\sigma = \sigma_v \cos^2\beta$ (في المثال $\tau = 26.70$ kPa، $\sigma = 99.65$)

FS $= (c' + \sigma' \tan\varphi')/\tau = c'/(\gamma H \cos^2\beta \tan\beta) + \tan\varphi'/\tan\beta =$ **1.733**؛ $\beta_{req} = 13.0°$ ($FS_{req} = 2$)، $H_{req} = 3.50$ m؛ وإذا كان $\beta > \varphi'$ فإن H_{cr}

طين غير مصّرف: $FS = c_u/(\gamma H \sin\beta\cos\beta) = 1.50$؛ يتناسب عكسياً مع العمق

الماء: $u = \gamma_w h_w \cos^2\beta$؛ $1.02 \rightarrow 1.24$ ($z_w = 2$ m) $\rightarrow$ FS 1.73 (عند السطح)؛ $r_u = 0.25 \rightarrow 1.37$

الزلزال: $k_h W$ أفقية و $k_v W$ رأسية؛ ويؤخذ الاتجاه الحرج (نحو الأعلى)؛ FS من 1.73 $\rightarrow$ 1.07؛ **$k_y = 0.175$**؛ وفي التربة الجافة غير المتماسكة $\tan(\varphi' - \beta)$

الحد: مستوى واحد ومنحدر غير محدود؛ وإذا كانت الأطراف أو الطبقات مهمة تستخدم وحدة استقرار المنحدرات (الشرائح)

المراجع

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage Learning, Boston. Chapter 15, Slope Stability: the infinite slope in Sections 15.2–15.4.

Skempton, A.W. and DeLory, F.A. (1957). Stability of natural slopes in London Clay. Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, 2, 378–381.

Bishop, A.W. and Morgenstern, N.R. (1960). Stability coefficients for earth slopes. Géotechnique, 10(4), 129–150.

Duncan, J.M., Wright, S.G. and Brandon, T.L. (2014). Soil Strength and Slope Stability, 2nd ed. Wiley, Hoboken.

Newmark, N.M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. Géotechnique, 15(2), 139–160.

ملاحظة

جميع الأمثلة العددية مستخرجة بمحرك الحساب الخاص بالوحدة؛ وتعطي الوحدة القيم نفسها. والمثال المحلول في صفحة الوحدة هو هذا المنحدر أيضاً (β = 15°، H = 6 m، γ = 17.8، c′ = 10 kPa، φ′ = 20°).

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

أدخل زاوية المنحدر الخاص بك وعمق المستوي ومقاومة التربة (في الحالة المصرفة أو غير المصرفة) ومنسوب المياه والمعاملات الزلزالية في GeoTerva؛ وتقدم الوحدة معا الإجهادات ومعامل الأمان والعمق الحرج والعمق المطلوب والزاوية المطلوبة ومعامل الخضوع والرسوم البيانية.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.