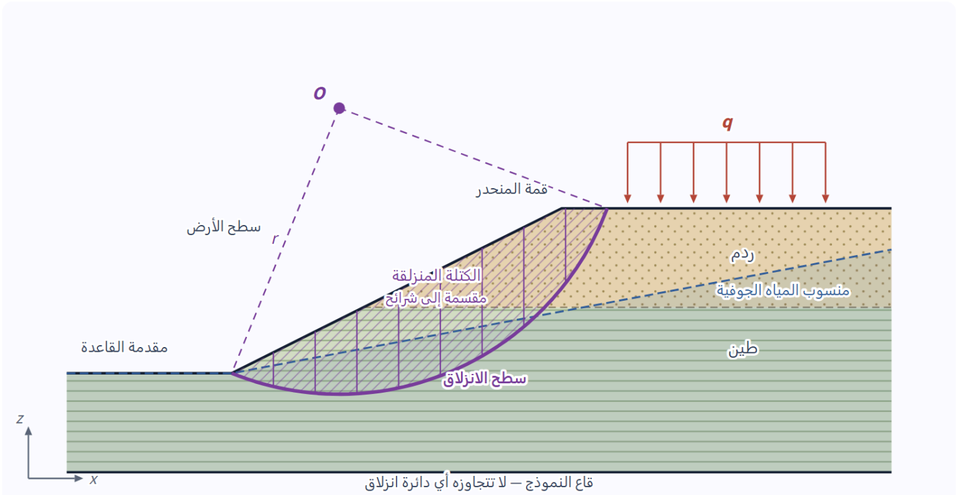
شرائح محاضرات الجيوتكنيك · استقرار المنحدرات

استقرار المنحدرات: التوازن الحدي (الشرائح)

المحاضرة: طريقة الشرائح في الاتزان الحدي؛ حل يدوي مفصل لدائرة انزلاق واحدة ولشريحة واحدة، والشرائح المتبقية والموضوعات في جداول.

طريقة الشرائح · العادية · Bishop · Spencer · الدائرة الحرجة

الماء · الحمل · الزلزال · الشق · التسليح · Hoek–Brown



يستند إلى صفحة النظرية في GeoTerva · geoterva.com

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

فكرة **الاتزان الحدي**: الكتلة الواقعة فوق سطح الانزلاق جسم صلب تعبأ فيه المقاومة بالنسبة نفسها؛ **FS = المقاومة / الإجهاد اللازم**

تقسيم الكتلة إلى **شرائح**: وزن كل شريحة W، وميل القاعدة α، وطول القاعدة L، وقوة الماء U

حل **الطرق الثلاث** (العادية/Fellenius، و Bishop المبسطة، و Spencer) بالتفصيل على دائرة انزلاق واحدة وعلى **شريحة واحدة**

كيف يتكرر الحساب نفسه في **الشرائح الـ 32 المتبقية** وجداول النتائج؛ والبحث عن دائرة الانزلاق الحرجة

تأثيرات الماء والحمل والزلزال وشق الشد والتسليح (المسامير والمراسي والشبكات الجيوتقنية) والصخر (Hoek–Brown)

تسلسل المحاضرة

أولاً **النظرية**، ثم **الحل اليدوي** بدائرة واحدة وشريحة واحدة:

1 · **النظرية**: FS، الشريحة، ثلاث طرق

2 · **المسألة**: دائرة واحدة، شريحة واحدة

3 · **الحل**: الشريحة 22 يدوياً؛ والبقية **بالجدول**

النموذج: منحدر 2:1 ارتفاعه 10 m؛ في الأعلى ردم ($\gamma = 18$، $c' = 5$، $\varphi' = 30°$)، وفي الأسفل طين ($\gamma = 17.5$، $c' = 20$، $\varphi' = 18°$)؛ بلا ماء أو حمل أو زلزال. والقوى لكل متر من المقطع (kN/m).

النظرية

مصّرف، غير مصّرف، متزايد مع العمق

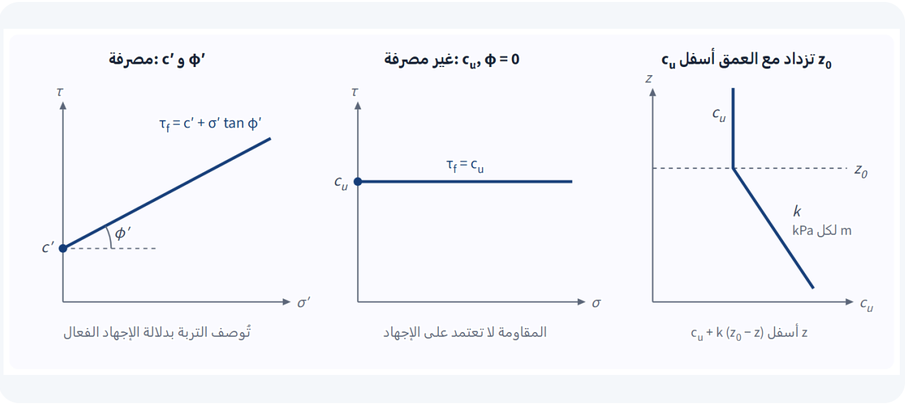
تعطى مقاومة القص للتربة **المصّرفة** بمغلف Mohr–Coulomb بدلالة الإجهاد الفعال $\sigma' = \sigma - u$، وتعرّف بالمعاملين c' و φ'.

في الطين المشبع المحمل بأسرع مما يسمح به التصريف تكون المقاومة هي **مقاومة القص غير المصرفة** c_u المستقلة عن الإجهاد العمودي، وتؤخذ $\varphi = 0$؛ وفي كثير من أنواع الطين الطبيعي تزداد c_u خطياً مع العمق.

تقرأ مقاومة الشريحة عند منسوب منتصف قاعدتها؛ ولمعيار الصخر خصوصيته ويعالج على حدة، واختيار الحالة المصّرفة أو غير المصّرفة يعود إلى المهندس ويشكل الفرضية الأولى للتحليل.

(مصّرف) $\tau_f = c' + \sigma' \tan\varphi' \qquad \sigma' = \sigma - u$

(غير مصّرف) $\tau_f = c_u \ (\varphi = 0) \qquad c_u(z) = c_u + k\,(z_0 - z) \ \ (z < z_0)$



المقاومة / الإجهاد المطلوب؛ العزم حول مركز الدائرة

النظرية

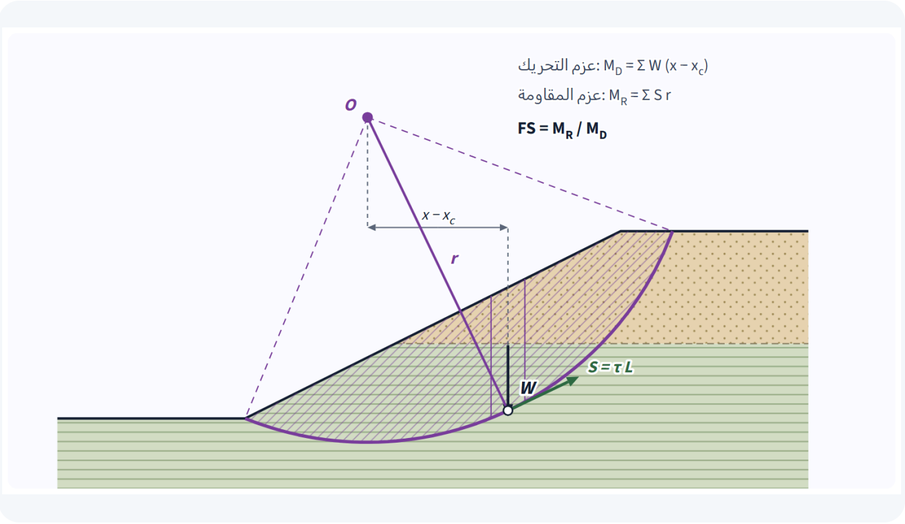
معامل الأمان (FS) هو نسبة مقاومة القص المتاحة في التربة إلى إجهاد القص اللازم للتوازن، ويفترض أن له القيمة نفسها عند كل نقطة على طول سطح الانزلاق.

في السطح الدائري يكون التوازن الحاكم هو توازن العزوم حول المركز O؛ وبقسمة العزوم على نصف القطر تكتب النسبة بالصيغة FS = ΣR / ΣD، وكلا المجموعين بوحدة kN/m.

تختلف الطرق الثلاث في كيفية إيجاد القوة العمودية الفعالة (N′) المؤثرة على قاعدة كل شريحة: فتحصل عليها طريقة الشرائح البسيطة من الوزن وحده، وطريقة Bishop من الاتزان الرأسي، وطريقة Spencer من اتزان القوى واتزان العزوم معاً.

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

$$FS = \frac{M_R}{M_D} = \frac{\sum R}{\sum D} \qquad R = cL + N' \tan\varphi' \qquad D = \frac{M_D}{r}$$



الهندسة، والوزن، وقوى القاعدة

النظرية

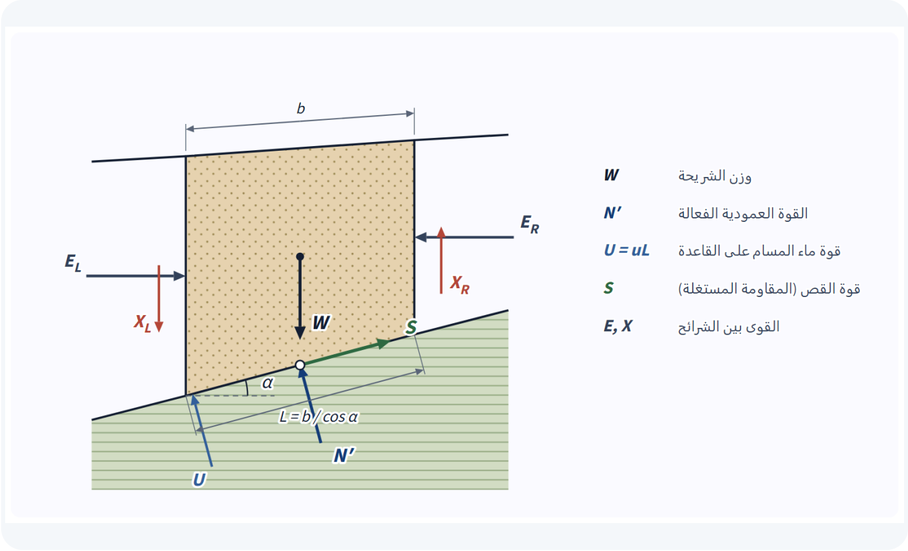
تقسم الكتلة بين سطح الانزلاق وسطح الأرض إلى شرائح بخطوط رأسية وفق عدد الشرائح أو أقصى عرض للشريحة.

كل نقطة تقاطع مهمة داخل الكتلة هي حد إلزامي بين الشرائح؛ وبذلك تمر قاعدة كل شريحة عبر تربة واحدة فقط وتحمل كل شريحة نوعاً واحداً من الأحمال.

عند المحور الرأسي المار بمنتصف الشريحة تؤخذ زاوية ميل القاعدة α موجبة في جهة قمة المنحدر بالنسبة إلى المركز، وسالبة في جهة قدم المنحدر.

القوة العمودية الفعالة N′ = N − U؛ وتدل N′ السالبة على أن قاعدة الشريحة في حالة شد، وتثبت N′ عند الصفر في طريقة الشرائح البسيطة وطريقة Bishop.

$$\sin\alpha = \frac{x_m - x_c}{r} \qquad L = \frac{b}{\cos\alpha} \qquad W = \sum_i b\, h_i\, \gamma_i \qquad N' = N - U\ ,\ U = uL$$



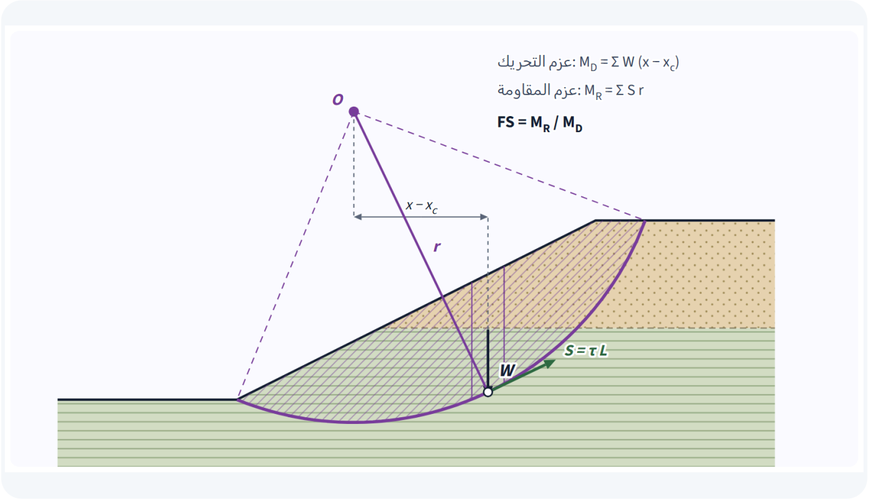
النظرية

لا توجد قوى بين الشرائح

في طريقة **Fellenius** (السويدية) تهمل القوى بين الشرائح كلياً، وتكون كل شريحة متزنة في الاتجاه العمودي على قاعدتها فقط.

يعطي هذا التوازن القوة العمودية من الوزن والأحمال؛ ويحصل على معامل الأمان من نسبة العزوم، ويؤول في التربة المتجانسة إلى العلاقة FS = Σ [c b / cos α + W cos α tan φ] / Σ W sin α.

الطريقة بسيطة ومستقرة وتقع في الجانب الآمن؛ ويزداد خطؤها مع عمق الدائرة وضغط ماء المسام، وقد تعطي في الدائرة العميقة نتيجة أقل بكثير من الطريقتين الأخريين.



$$N' = W\cos\alpha - uL \qquad R = cL + N'\tan\varphi' \qquad D = W\sin\alpha$$

$$FS = \frac{\sum R}{\sum D} = \frac{\sum [cL + (W\cos\alpha - uL)\tan\varphi']}{\sum W\sin\alpha}$$

النظرية

الاتزان الرأسي لكل شريحة؛ حل تكراري

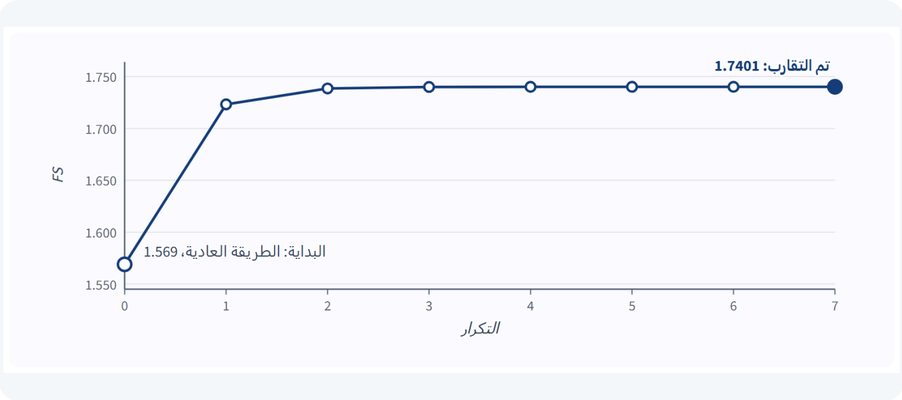
في طريقة Bishop المبسطة تهمل قوى القص بين الشرائح، لكن يتحقق التوازن الرأسي لكل شريحة، وتؤخذ قوة القص عند القاعدة مساوية للمقاومة المعبأة.

لما كان FS يظهر في طرفي المعادلة، تحل المعادلة بالتقريبات المتتالية بدءاً من قيمة طريقة الشرائح العادية؛ وتكفي بضع خطوات.

تثبت قيمة **N′** السالبة عند الصفر، ولا يسمح بانخفاض قيمة $\mathbf{m_\alpha}$ عن 0.2؛ وتبرز أهمية هذا التقييد في منطقة قدم المنحدر للدوائر العميقة.

$$N' = \frac{W - uL\cos\alpha - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha} \qquad m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS}$$

$$FS = \frac{\sum\left[cL + N'\tan\varphi'\right]}{\sum D}$$



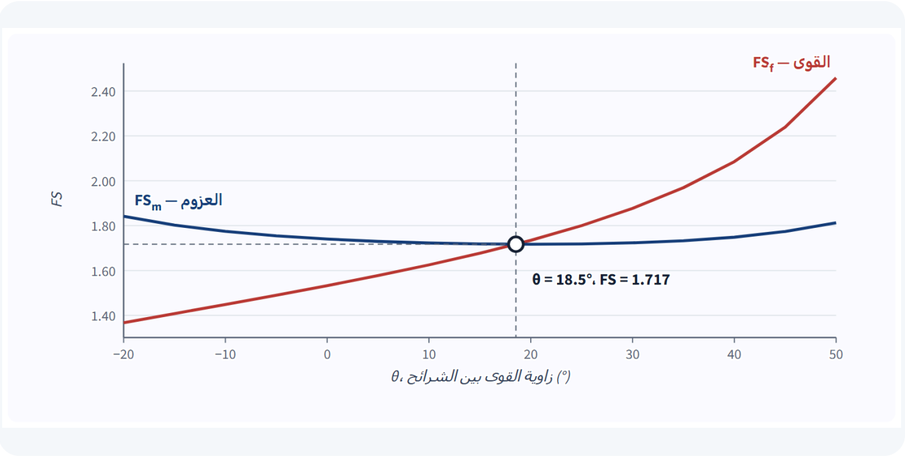
اتزان القوى والعزوم؛ القوى بين الشرائح المتوازية

النظرية

تحقق طريقة **Spencer** توازن القوى وتوازن العزوم معا؛ والقوى بين الشرائح متوازية فيما بينها، وقوة القص تساوي نسبة ثابتة من القوة العمودية.

لما كان الوجهان الجانبيان عند طرفي الكتلة حرين، فإن ΣΔE = 0 تعطي توازن القوى، ويحصل على معامل الأمان FS_f لكل زاوية θ.

تعطي العزوم حول مركز الدائرة قيمة ثانية: $FS_m = \Sigma[c\,L + N'\tan\varphi] / \Sigma\,D$؛ ويتقاطع المنحنيان $FS_f(\theta)$ و $FS_m(\theta)$ عند زاوية واحدة، وهذا هو الحل.



$$X = E\tan\theta \qquad \Delta E = \frac{cL + \tan\varphi'\,(W\cos\alpha - U) - FS\,W\sin\alpha}{FS(\cos\alpha + \tan\theta\sin\alpha) - \tan\varphi'(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha)}$$

$$N' = W\cos\alpha - U + \Delta E\,(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) \qquad \sum \Delta E = 0 \;\Rightarrow\; FS_f(\theta)$$

النظرية

ما يوفره وما يهمله

الطريقة	القوة بين الشرائح	اتزان القوى	اتزان العزوم	السطح	FS (الدائرة نفسها)
الطريقة العادية (Fellenius)	لا يوجد	القوة العمودية على القاعدة فقط	✓	دائرة	**1.569**
Bishop المبسطة	عمودي فقط (دون قص)	رأسي لكل شريحة	✓	دائرة	**1.740**
Spencer	متوازيان: $X = E \tan\theta$	أفقي + رأسي	✓	كل سطح	**1.717**

طريقة الشرائح البسيطة هي الطريقة الافتراضية التي يمكن التحقق منها بالحساب اليدوي وهي متحفظة؛ ونتيجتها هي الأدنى بين الطرق الثلاث.

طريقة Bishop هي الاختيار المعتاد للأسطح الدائرية؛ ولا تختلف نتيجتها على سطح دائري عن نتيجة طريقة Spencer إلا بنسبة قليلة (بضعة في المئة).

تحقق طريقة Spencer التوازن الكامل وتستخدم للسطوح غير الدائرية؛ وهي الطريقة الأعلى كلفة حسابية، ولا يوجد لها حل لبعض الدوائر.

المسألة

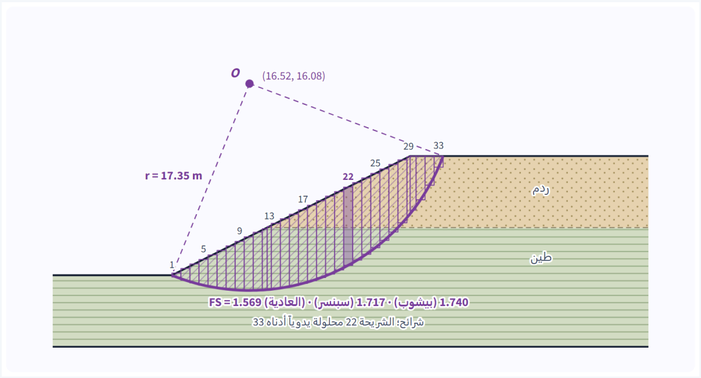
مثال

المعطيات

المقطع	سطح الأرض $(0;0)$–$(10;0)$–$(30;10)$–$(50;10)$ m؛ القاع $z=-6$ m؛ ردم فوق المنسوب $z=4$ m وطين تحته
التربة	ردم $\gamma=18$ kN/m³، $c'=5$ kPa، $\varphi'=30^\circ$؛ طين $\gamma=17.5$ kN/m³، $c'=20$ kPa، $\varphi'=18^\circ$؛ لا ماء ولا حمل ولا زلزال
دائرة الانزلاق	المركز $x_c=16.52$ m، $z_c=16.08$ m؛ نصف القطر $r=17.35$ m (دائرة الانزلاق الحرجة، انظر ما تم إيجاده في البحث)

المطلوب

النقطتان x_a وx_b اللتان تقطع عندهما الدائرة التربة، وأدنى نقطة فيها، و**التشريح**.



الحل

الحل

1 تقاطع الدائرة مع سطح الأرض: $(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2$

$$x_a = x_c - \sqrt{r^2 - (z_a - z_c)^2} = 16.518 - \sqrt{301.08 - (0 - 16.080)^2} = \mathbf{10.00}\ \text{m} \quad (z_a = 0)$$

$$x_b = x_c + \sqrt{r^2 - (z_b - z_c)^2} = 16.518 + \sqrt{301.08 - (10 - 16.080)^2} = \mathbf{32.77}\ \text{m} \quad (z_b = 10)$$

2 أدنى نقطة والتقسيم إلى شرائح

$$z_{min} = z_c - r = 16.080 - 17.352 = -1.27\ \text{m} \ \ (> -6\ \text{m})$$

$$b = \frac{x_b - x_a}{30} = \frac{22.771}{30} = 0.759\ \text{m} \ \Rightarrow\ 30 \text{ شريحة}$$

تقطع الدائرة الكتلة بين x = 10.00 (القدم) و 32.77 m (القمة)؛ وتقسم الحواف عند x = 10 و 18 و 30 m ثلاث شرائح أخرى: **33 شريحة**.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

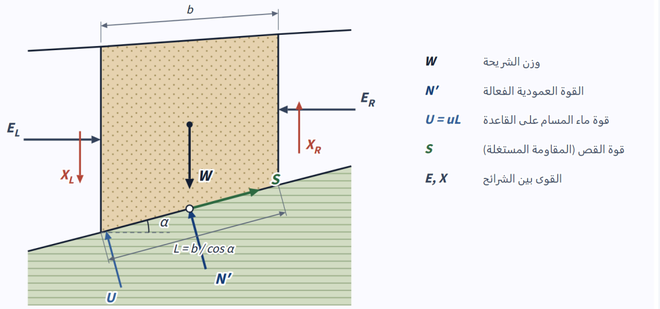
مثال

المعطيات

الشريحة	**الشريحة 22 من الدائرة في المثال 1: نقطة منتصفها** $x_m = 24.800$ **m**، **وعرضها** $b = 0.759$ **m**
التربة	**ردم** $\gamma = 18$ **kN/m³** $(z > 4$ **m)**؛ **طين** $\gamma = 17.5$ **kN/m³**، $c' = 20$ **kPa**، $\varphi' = 18°$ **(القاعدة في الطين)**؛ $u = 0$

المطلوب

قيم **α** و**L** و**W** للشريحة؛ و**N′** و**R** و**D** (الطريقة العادية).



W	وزن الشريحة
N′	القوة العمودية الفعالة
U = uL	قوة ماء المسام على القاعدة
S	قوة القص (المقاومة المستغلة)
E, X	القوى بين الشرائح

الحل (1/2)

الحل

1 ميل القاعدة وطولها

$$\sin\alpha = \frac{x_m - x_c}{r} = \frac{24.800 - 16.518}{17.352} = 0.4773 \;\Rightarrow\; \alpha = \mathbf{28.51}^\circ,\ \cos\alpha = 0.8787$$

$$L = \frac{b}{\cos\alpha} = \frac{0.759}{0.8787} = \mathbf{0.864}\ \text{m}$$

2 ارتفاع العمود ووزنه (الردم + الطين)

$$z_{surface} = \frac{x_m - 10}{2} = 7.3998\ \text{m};\quad z_{base} = z_c - r\cos\alpha = 0.8327\ \text{m}$$

$$h_1 = 7.3998 - 4 = 3.3998\ \text{m}\ (\text{الردم});\quad h_2 = 4 - 0.8327 = 3.1673\ \text{m}\ (\text{طين})$$

$$W = b\,(h_1\gamma_1 + h_2\gamma_2) = 0.7590(3.3998\cdot 18 + 3.1673\cdot 17.5) = \mathbf{88.52}\ \text{kN/m}$$

الشريحة 22 هي **أثقل شريحة** (W = 88.52 kN/m)؛ وقاعدتها مائلة بزاوية 28.5° وتبقى في الطين (c′ = 20 kPa، φ′ = 18°).

الحل (2/2)

الحل

3 القوة العمودية والمقاومة (u = 0)

$$N' = W\cos\alpha = 88.52 \times 0.8787 = \mathbf{77.79}\ \text{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = 20(0.864) + 77.79(0.3249) = 17.27 + 25.27 = \mathbf{42.55}\ \text{kN/m}$$

4 الأثر المسبب للحركة

$$D = W\sin\alpha = 88.52 \times 0.4773 = \mathbf{42.25}\ \text{kN/m}$$

الشريحة 22: **D = 42.25** kN/m، **R = 42.55** kN/m. تحسب قيمتا R و D لكل شريحة **بالخطوات الثلاث نفسها**؛ ومعامل الأمان هو نسبة مجموعيهما: **FS = ΣR/ΣD** (الجدول في الصفحات التالية).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

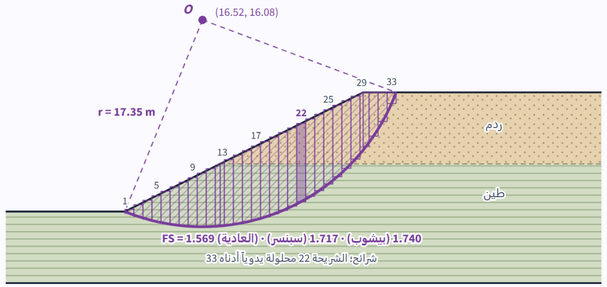
مثال

المعطيات

الشرائح	**الدائرة في المثال 1، 33 شريحة؛ تُحل كل شريحة بالخطوات الثلاث في المثال 2**
الطريقة	**الطريقة العادية (Fellenius): دون قوى بين الشرائح**

المطلوب

جدول جميع الشرائح: **W, N′, R, D** ومجاميعها؛ **FS = ΣR / ΣD**.



الحل (1/3)

الحل

D (kN/m)	R (kN/m)	N′ (kN/m)	(°) ′φ	c′ (kPa)	W (kN/m)	L (m)	(°) α	b (m)	x_m (m)	No
0.00–	0.03	0.00	18	20	0.00	0.001	22.1–	0.001	10.00	1
1.59–	17.57	4.20	18	20	4.49	0.810	20.7–	0.758	10.38	2
4.06–	20.01	12.43	18	20	13.08	0.798	18.1–	0.759	11.14	3
5.63–	22.37	20.39	18	20	21.15	0.787	15.4–	0.759	11.90	4
6.40–	24.67	28.02	18	20	28.74	0.779	12.9–	0.759	12.66	5
6.41–	26.89	35.27	18	20	35.84	0.771	10.3–	0.759	13.41	6
5.74–	29.00	42.10	18	20	42.49	0.766	7.8–	0.759	14.17	7
4.45–	30.99	48.47	18	20	48.68	0.762	5.2–	0.759	14.93	8
2.59–	32.86	54.36	18	20	54.42	0.760	2.7–	0.759	15.69	9
0.23–	34.59	59.72	18	20	59.72	0.759	0.2–	0.759	16.45	10
2.57	36.16	64.53	18	20	64.58	0.760	2.3	0.759	17.21	11
2.71	20.19	36.75	18	20	36.85	0.412	4.2	0.411	17.79	12
3.07	17.39	32.01	18	20	32.15	0.349	5.5	0.348	18.17	13
9.31	38.87	72.51	18	20	73.11	0.765	7.3	0.759	18.73	14
13.13	39.98	75.64	18	20	76.77	0.770	9.9	0.759	19.49	15
17.18	40.92	78.11	18	20	79.97	0.777	12.4	0.759	20.25	16
21.38	41.67	79.89	18	20	82.70	0.786	15.0	0.759	21.00	17

الحل (2/3)

الحل

D (kN/m)	R (kN/m)	N′ (kN/m)	(°) ′φ	c′ (kPa)	W (kN/m)	L (m)	(°) α	b (m)	x_m (m)	No
25.68	42.23	80.97	18	20	84.94	0.796	17.6	0.759	21.76	18
29.99	42.60	81.32	18	20	86.67	0.809	20.2	0.759	22.52	19
34.25	42.77	80.91	18	20	87.86	0.824	22.9	0.759	23.28	20
38.37	42.76	79.74	18	20	88.49	0.842	25.7	0.759	24.04	21
42.25	**42.55**	**77.79**	**18**	**20**	**88.52**	**0.864**	**28.5**	**0.759**	**24.80**	**22**
45.80	42.16	75.02	18	20	87.89	0.889	31.4	0.759	25.56	23
48.89	41.60	71.43	18	20	86.56	0.920	34.4	0.759	26.32	24
51.38	40.90	67.00	18	20	84.44	0.956	37.5	0.759	27.08	25
53.11	40.08	61.72	18	20	81.43	1.001	40.7	0.759	27.84	26
53.83	39.17	55.53	18	20	77.34	1.056	44.1	0.758	28.59	27
53.33	33.65	48.51	30	5	72.09	1.129	47.7	0.760	29.35	28
18.25	10.84	15.15	30	5	23.72	0.418	50.3	0.267	29.87	29
31.76	18.20	24.55	30	5	40.15	0.805	52.3	0.492	30.25	30
41.46	23.01	28.16	30	5	50.12	1.351	55.8	0.759	30.87	31
29.09	17.20	16.41	30	5	33.40	1.545	60.6	0.759	31.63	32
11.64	12.36	5.14	30	5	12.72	1.878	66.2	0.759	32.39	33
641.34	**1,006.25**	**1,613.77**			**1,841.11**					**Σ**

الحل (3/3)

الحل

1 المجاميع ومعامل الأمان

$$\sum R = 1{,}006.25 \text{ kN/m} \qquad \sum D = 641.34 \text{ kN/m} \qquad \sum W = 1{,}841.1 \text{ kN/m}$$

$$FS = \frac{\sum R}{\sum D} = \frac{1{,}006.25}{641.34} = \mathbf{1.569}$$

بالنسبة إلى هذه الدائرة تعطي الطريقة العادية **FS = 1.569**. وفي الشرائح الواقعة جهة المقدمة (α < 0) يميل قاع الشريحة عكس اتجاه الانزلاق: فتكون D سالبة وتخفض ΣD. الشريحة 22 هي الصف 22 من الجدول وتتفق مع القيم المحسوبة يدوياً.

ΣR/ΣD: نسبة التأثيرات **المقاومة** إلى التأثيرات المسببة للحركة؛ إذا كان FS > 1 فلا يُتوقع حدوث انزلاق على طول هذه الدائرة.

تعطي الطريقة العادية أدنى قيمة؛ وتكون Bishop و Spencer أعلى على الدائرة نفسها (في الأمثلة اللاحقة).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

مثال

المعطيات

الشريحة والدائرة

الشريحة 22 في المثال 2 والدائرة في المثال 1؛ القيمة الأولية $FS_0 = 1.569$ في المثال 3

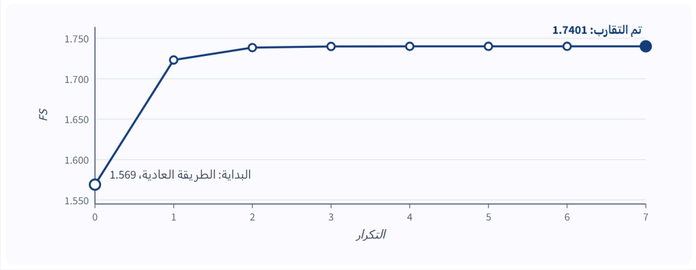
الطريقة

$$m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha\tan\varphi'}{FS} \quad ,N' = \frac{W - cL\sin\alpha/FS}{m_\alpha}$$

(u = 0)

المطلوب

للشريحة 22: $\mathbf{m_\alpha}$ و $\mathbf{N'}$ و **R**؛ و**التكرار** و **FS** للدائرة بأكملها.



الحل (1/4)

الحل

1 التكرار الأول (FS_0 = قيمة الطريقة العادية = 1.5690)

$$m_\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha \tan\varphi'}{FS_0} = 0.8787 + \frac{0.4773(0.3249)}{1.5690} = 0.9776$$

$$N' = \frac{W - cL\sin\alpha/FS_0}{m_\alpha} = \frac{88.52 - 20(0.864)(0.4773)/1.5690}{0.9776} = 85.17 \text{ kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 85.17(0.3249) = 44.95 \text{ kN/m}$$

الحل (2/4)

الحل

2 بالقيمة المتقاربة (FS = 1.7401)

$$m_\alpha = 0.8787 + \frac{0.4773(0.3249)}{1.7401} = \mathbf{0.9679}$$

$$N' = \frac{88.52 - 20(0.864)(0.4773)/1.7401}{0.9679} = \mathbf{86.56}\ \text{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = 20(0.864) + 86.56(0.3249) = \mathbf{45.40}\ \text{kN/m} \qquad D = 42.25\ \text{kN/m}$$

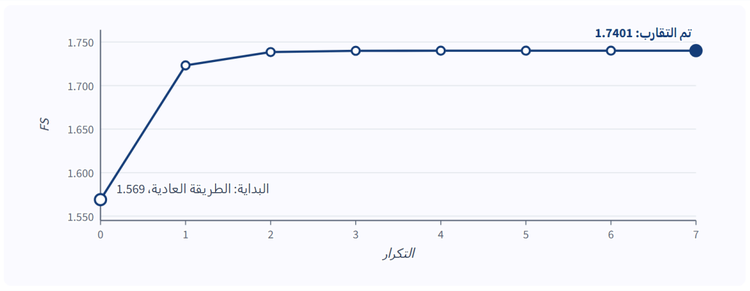
تزداد القوة العمودية للشريحة 22 من 77.79 في الطريقة العادية إلى **86.56** kN/m (التوازن الرأسي بين الشرائح)؛ والمقاومة 42.55 → **45.40** kN/m. وتتكرر الخطوات نفسها على 33 شريحة.

الحل (3/4)

الحل

2 في كل تكرار يعاد حساب ΣR، ومن ثم $FS_{k+1} = \Sigma R_k / \Sigma D$

التكرار k	FS_k	الفرق
0 (عادي)	1.5690	
1	1.7232	0.1542
2	1.7385	0.0153
3	1.7399	0.0014
4	1.7401	0.0001
5	1.7401	0.0000
6	1.7401	0.0000
7	**1.7401**	0.0000



في 7 تكرارات **FS = 1.740**؛ ΣR = 1,115.97 و ΣD = 641.34 kN/m.
وهي أعلى بنسبة 10.9% من الطريقة العادية (1.569).

الحل (4/4)

الحل

No	(°) α	W	m_α	′N	R
1	22.1–	0.00	0.8566	0.01	0.03
2	20.7–	4.49	0.8693	8.95	19.11
3	18.1–	13.08	0.8928	17.83	21.76
4	15.4–	21.15	0.9141	25.78	24.12
5	12.9–	28.74	0.9333	32.92	26.27
6	10.3–	35.84	0.9505	39.38	28.22
7	7.8–	42.49	0.9656	45.23	30.02
8	5.2–	48.68	0.9788	50.55	31.67
9	2.7–	54.42	0.9900	55.39	33.20
10	0.2–	59.72	0.9993	59.80	34.61
11	2.3	64.58	1.0066	63.81	35.93
12	4.2	36.85	1.0110	36.10	19.98
13	5.5	32.15	1.0133	31.35	17.18
14	7.3	73.11	1.0156	70.88	38.34
15	9.9	76.77	1.0172	73.99	39.45
16	12.4	79.97	1.0168	76.77	40.49
17	15.0	82.70	1.0143	79.24	41.46

No	(°) α	W	m_α	′N	R
18	17.6	84.94	0.9097	81.39	42.37
19	20.2	86.67	1.0028	83.22	43.22
20	22.9	87.86	0.9937	84.71	44.01
21	25.7	88.49	0.9821	85.83	44.74
22	**28.5**	**88.52**	**0.9679**	**86.56**	**45.40**
23	31.4	87.89	0.9508	86.84	46.00
24	34.4	86.56	0.9307	86.59	46.53
25	37.5	84.44	0.9072	85.70	46.98
26	40.7	81.43	0.8798	84.02	47.33
27	44.1	77.34	0.8480	81.24	47.52
28	47.7	72.09	0.9183	75.89	49.46
29	50.3	23.72	0.8941	25.50	16.81
30	52.3	40.15	0.8741	43.83	29.33
31	55.8	50.12	0.8363	56.09	39.14
32	60.6	33.40	0.7803	37.85	29.58
33	66.2	12.72	0.7076	11.00	15.74
Σ		**1,841.11**			**1,115.97**

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

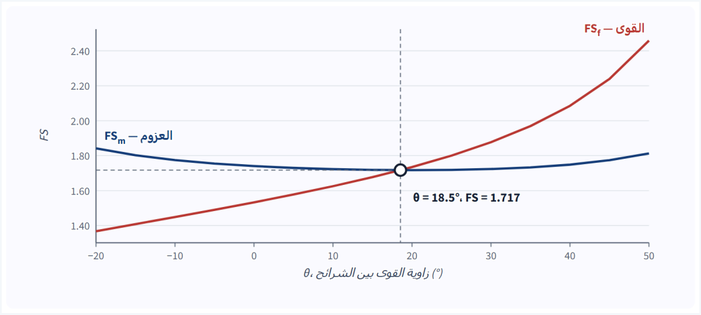
مثال

المعطيات

الشريحة والدائرة	**الشريحة 22 في المثال 2، والدائرة في المثال 1؛ القوى بين الشرائح متوازية،** $X = E\tan\theta$
زاوية الحل	$\theta = 18.54^\circ$ **(الزاوية التي يتقاطع عندها المنحنيان أدناه)،** $FS = 1.717$

المطلوب

بالنسبة للشريحة 22: **ΔE** و**N′** و**R** و**E** و**X**؛ منحنيات θ–FS والدائرة كاملة.



الحل (1/4)

الحل

1 فرق القوة العمودية للشريحة (ΔE (θ = 18.54°، tan θ = 0.3354، FS = 1.717

$$\text{هامش} = cL + \tan\varphi' \, W\cos\alpha - FS\, W\sin\alpha = 17.275 + 25.274 - 72.542 = -29.99$$

$$\text{المقام}_1 = FS(\cos\alpha + \tan\theta\sin\alpha) = 1.7837$$

$$\text{المقام}_2 = -\tan\varphi'(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) = 0.0593$$

$$\Delta E = \frac{\text{هامش}}{\text{المقام} + {}_1\text{المقام}_2} = \frac{-29.99}{1.8430} = \mathbf{-16.27}\ \text{kN/m}$$

الحل (2/4)

الحل

2 القوة العمودية والمقاومة والقوى بين الشرائح

$$N' = W\cos\alpha + \Delta E(\tan\theta\cos\alpha - \sin\alpha) = 77.786 + (-16.27)(-0.1826) = \mathbf{80.76}\ \text{kN/m}$$

$$R = cL + N'\tan\varphi' = \mathbf{43.51}\ \text{kN/m}$$

$$E_{foot} = 254.69\ \text{kN/m} \quad \Rightarrow \quad E_{top} = E_{foot} + \Delta E = 238.41\ \text{kN/m}$$

$$X_{foot} = E\tan\theta = \mathbf{85.42}$$

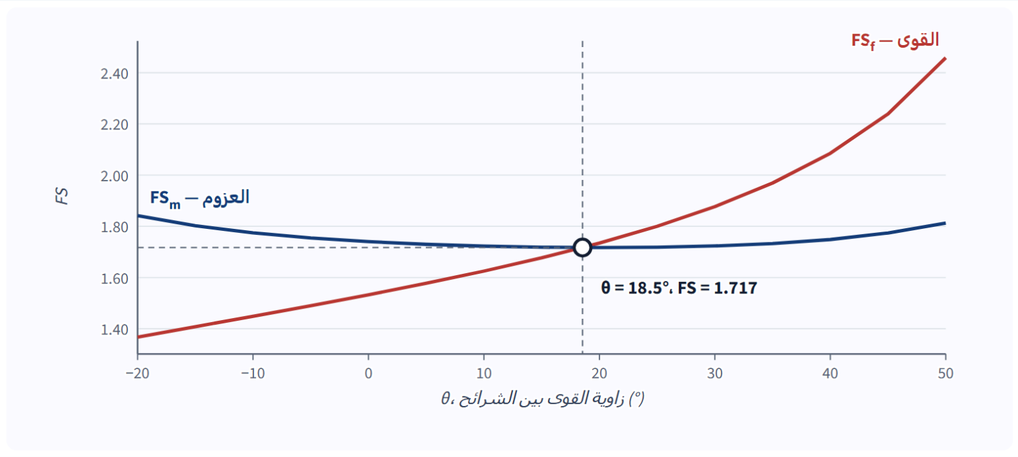
في طريقة Spencer تبلغ القوة الناظمية للشريحة 22 ما قيمته **80.76** kN/m (77.79 في الطريقة العادية و 86.56 في طريقة Bishop)؛ وتؤثر قوة بين الشرائح مقدارها E = 254.69 kN/m باتجاه قدم المنحدر.

الحل (3/4)

الحل

3 FS_f ($\Sigma\Delta E = 0$) و FS_m (العزوم) لكل θ؛ ونقطة التقاطع هي الحل

θ (°)	FS_m (عزم)	FS_f (قوة)
20-	1.842	1.367
15-	1.802	1.408
10-	1.774	1.449
5-	1.755	1.490
0	1.740	1.533
5	1.730	1.577
10	1.723	1.625
15	1.718	1.677
20	1.717	1.735
25	1.718	1.800
30	1.723	1.877
35	1.733	1.969
40	1.748	2.085
45	1.774	2.239
50	1.812	2.458
18.54	**1.717**	**1.717**



الحل (4/4)

الحل

No	ΔE	E (القدم)	N′	R
1	0.02	0.00–	0.02	0.03
2	17.12	0.02	15.62	21.28
3	21.59	17.14	26.01	24.42
4	24.46	38.73	34.81	27.06
5	26.08	63.19	42.35	29.33
6	26.67	89.27	48.84	31.30
7	26.41	115.94	54.44	33.01
8	25.43	142.35	59.29	34.51
9	23.87	167.78	63.49	35.83
10	21.80	191.65	67.12	36.99
11	19.32	213.45	70.24	38.01
12	9.30	232.78	39.17	20.97
13	7.19	242.08	33.72	17.95
14	13.38	249.26	75.26	39.76
15	10.03	262.64	77.24	40.50
16	6.48	272.67	78.84	41.16
17	2.77	279.15	80.07	41.73
18	1.03–	281.92	80.95	42.23
19	4.89–	280.89	81.47	42.65
20	8.75–	276.01	81.62	43.01
21	12.57–	267.25	81.39	43.29
22	**16.27–**	**254.69**	**80.76**	**43.51**
23	19.80–	238.41	79.67	43.67
24	23.06–	218.61	78.07	43.76
25	25.94–	195.55	75.88	43.79
26	28.29–	169.61	72.98	43.74
27	29.89–	141.32	69.14	43.59
28	30.84–	111.42	64.36	42.80
29	11.02–	80.59	21.27	14.37
30	19.70–	69.57	36.10	24.87
31	26.62–	49.87	45.17	32.83
32	18.69–	23.25	29.61	24.82
33	4.56–	4.56	8.70	14.41
Σ	0.00			**1,101.18**

θ = 18.54°; ΣR = 1,101.18, ΣD = 641.34 → **FS = 1.717**. E_{max} = 281.9 kN/m.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

الوزن، ضغط ماء المسام، الماء في المنحدر

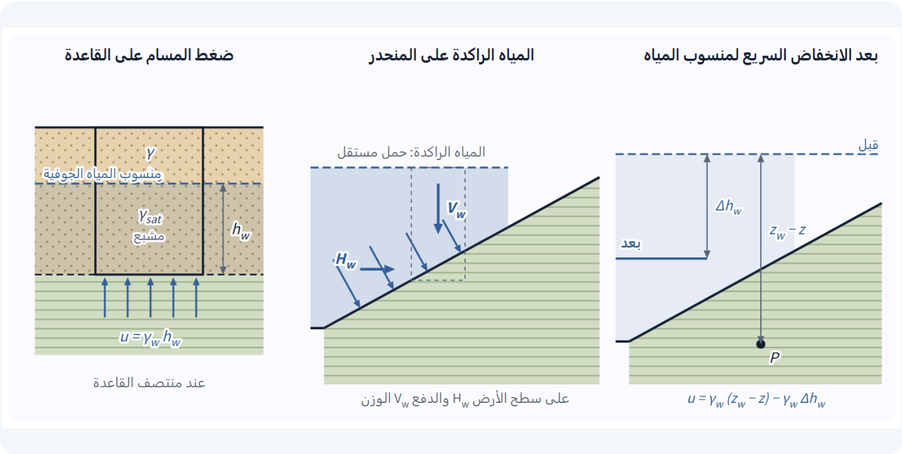
يدخل الماء في التحليل من ثلاث طرق: وزن التربة المشبعة، وضغط ماء المسام عند قاعدة كل شريحة الذي يخفض المقاومة، وكحمل قائم بذاته حيثما يوجد الماء فوق المنحدر.

يكون ضغط ماء المسام هيدروستاتيكياً تحت خط المياه الجوفية؛ ولأن التسرب لا يحلل، فإن منسوب المياه الجوفية المائل يمثل تقريباً لشبكة الجريان، ولا يستخدم الوزن الحجمي المغمور في أي حال.

عندما يكون ضغط ماء المسام معلوماً كنسبة من حمل الغطاء الترابي تُسند إلى التربة نسبة r_u؛ وتنطبق هذه الحالة على ردم في مرحلة التنفيذ أو على ردم فوق طين لين.

لما كان الماء أمام المنحدر قابلاً للتصريف، فإنه عند انخفاضه السريع يزول الإسناد الذي يوفره، ويبقى ضغط ماء المسام محتفظاً بقيمته، ويكون معامل الأمان هو أدنى قيمة له بعد انخفاض منسوب الماء مباشرة.

$$u = \gamma_w h_w \qquad u = r_u \frac{W}{b} \qquad H_w = \frac{\gamma_w}{2}\left[(z_w - z_L)^2 - (z_w - z_R)^2\right]$$



المسألة

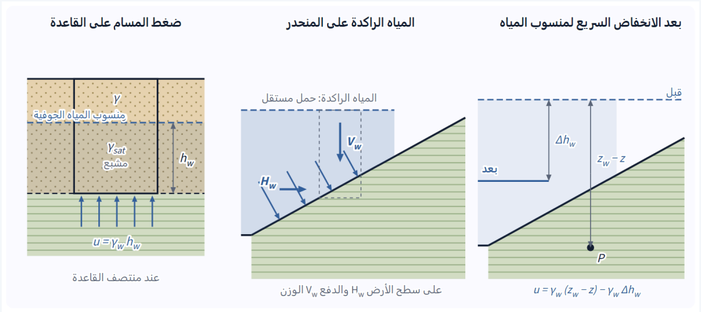
مثال

المعطيات

خط الماء	$(0;\,0)$–$(20;\,2.5)$–$(50;\,7)$ m، هيدروستاتيكي؛ $\gamma_w = 9.81$ kN/m³؛ الأوزان الحجمية المشبعة: الردم 20 والطين 19.5 kN/m³
الشريحة	الدائرة نفسها؛ الشريحة عند $x_m = 24.800$ m (مع وجود الماء تكون الشريحة رقم 24 وليست رقم 33)

المطلوب

في الشريحة: z_w, h_w, u, U؛ وقيم W, N', R, D الجديدة؛ و **FS** للدائرة بأكملها.



الحل (1/2)

الحل

1 ارتفاع الماء وضغط ماء المسام

$$z_w = 2.5 + \frac{24.800 - 20}{30}(4.5) = 3.2199 \text{ m}$$

$$h_w = z_w - z_{base} = 3.2199 - 0.8327 = \mathbf{2.3872} \text{ m}$$

$$u = \gamma_w h_w = 9.81(2.3872) = \mathbf{23.42} \text{ kPa} \qquad U = uL = 23.42(0.864) = \mathbf{20.23} \text{ kN/m}$$

2 الوزن: رطب فوق الماء ومشبع تحته

$$W = b\left[h_1\gamma_1 + h_{dry}\gamma_{moist} + h_w\gamma_{sat}\right]$$

$$W = 0.7590[3.3998(18) + 0.7801(17.5) + 2.3872(19.5)] = \mathbf{92.14} \text{ kN/m}$$

الماء يرفع الوزن من 88.52 kN/m في الحالة الجافة إلى **92.14** kN/m، كما يولد قوة ماء **U = 20.23** kN/m عند القاعدة.

الحل (2/2)

الحل

3 قوة العمودية الفعالة، المقاومة، التأثير المسبب للحركة (الشريحة 22)

$$N' = W\cos\alpha - U = 92.14(0.8787) - 20.23 = \mathbf{60.74}\ \text{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 60.74(0.3249) = \mathbf{37.01}\ \text{kN/m} \qquad D = W\sin\alpha = \mathbf{43.98}\ \text{kN/m}$$

4 الدائرة الكاملة (36 شريحة، على الدائرة نفسها) والمقارنة بالحالة الجافة

الطريقة	ΣU	ΣR	ΣD	FS (المياه)	FS (جاف)
عادي	476.94	879.96	655.41	**1.343**	1.569
Bishop	476.94	981.07	655.41	**1.497**	1.740
Spencer	476.94	970.22	655.41	**1.480**	1.717

للدائرة نفسها يخفض الماء FS من 1.569 إلى **1.343** (الطريقة العادية)؛ وإذا أعيد البحث عن الدائرة الحرجة مع خط الماء فإنها تصبح أقل عمقاً وتكون **1.255 / 1.568 / 1.564** (العادية / Spencer / Bishop).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

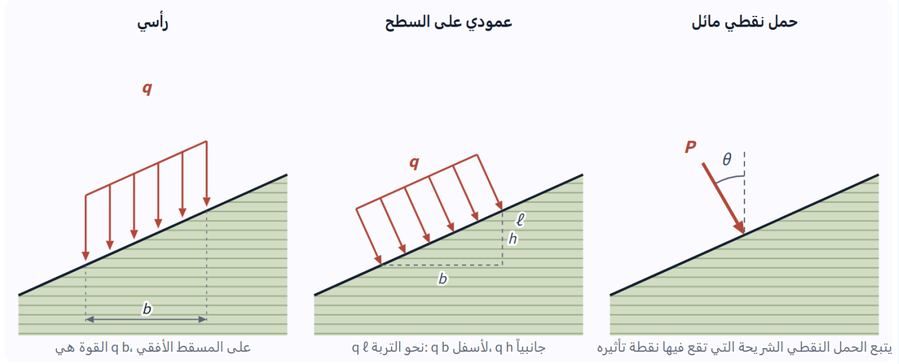
حمل شريطي وحمل نقطي؛ رأسي، عمودي، مائل

يؤخذ الحمل الشريطي المؤثر رأسياً أو مائلاً على مسقطه الأفقي، وتبلغ القوة المؤثرة على الجزء الذي عرضه الأفقي b القيمة q b.

يؤخذ الحمل المؤثر عمودياً على السطح على طول السطح؛ فالقوة المؤثرة على جزء طوله ℓ هي q ℓ، ومركبتها الرأسية q b ومركبتها الأفقية q h.

تحمل كل شريحة الجزء من الحمل الواقع بين حافتيها موزعا بحسب العرض الأفقي، وينسب الحمل النقطي إلى الشريحة التي تتضمن نقطة تأثيره.

$$F = q\,b \qquad F_n = q\,\ell \;\Rightarrow\; F_z = q\,b,\; F_x = q\,h \qquad P_x = P\sin\theta,\; P_z = P\cos\theta$$



النظرية

قوى العطالة عند مركز ثقل الشريحة

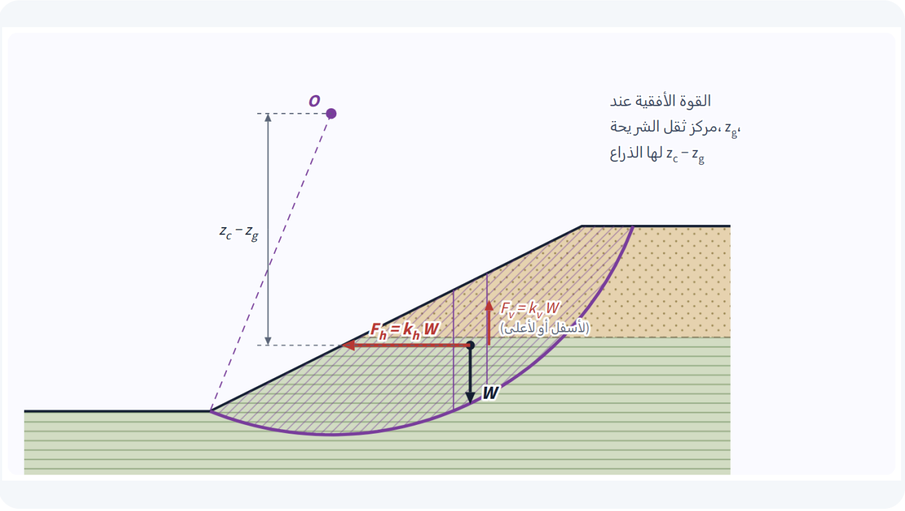
في النهج **شبه الاستاتيكي** يمثل الاهتزاز الزلزالي بتسارع ثابت يطبق على الكتلة المنزلقة ويعبر عنه بنسبة من g.

في كل شريحة تطبق قوى القصور الذاتي لكتلة التربة (W_{soil}) عند مركز الثقل (z_g) الذي يحدد من الجزأين الرطب والمشبع من التربة داخل الشريحة، لأن الماء المتراكم فوق الشريحة لا يحمل هذه القوة.

في خيار الحالة الحرجة تُجرَّب الاتجاهان الأفقيان والاتجاهان الرأسيان جميعاً ويؤخذ أدنى معامل أمان أساساً؛ وتُدخل المعاملات من المستخدم، ويُبلغ عن FS الاستاتيكي و**شبه الاستاتيكي** معاً.

$$F_h = k_h W_{soil} \qquad F_v = k_v W_{soil}$$

$$N = (W + F_v)\cos\alpha \mp F_h \sin\alpha \qquad D = (W + F_v)\sin\alpha + F_h \frac{z_c - z_g}{r}$$



المسألة

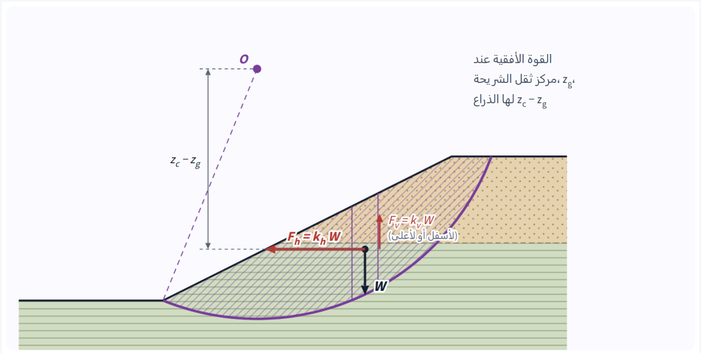
مثال

المعطيات

الزلزال	$k_h = 0.15$، $k_v = 0$؛ **القوة الأفقية باتجاه قدم المنحدر (الاتجاه الحرج)**
الشريحة والدائرة	**الشريحة 22 والدائرة في المثال 2؛ يلزم مركز الثقل من أجل ذراع العزم z_g**

المطلوب

في الشريحة 22: **F_h, N', R, D**؛ وللدائرة كاملة **$FS_{earthquake}$** بثلاث طرق.



الحل (1/2)

الحل

1 قوة القصور الذاتي وذراع العزم

$$F_h = k_h W = 0.15(88.52) = \mathbf{13.28}\ \text{kN/m}$$

$$z_g = \sum W_i z_{g,i} / W = (46.45(5.700) + 42.07(2.416))/88.52 = 4.139\ \text{m}$$

$$\text{ذراع العزم} = (z_c - z_g)/r = (16.080 - 4.139)/17.352 = 0.6882$$

2 القوة العمودية، المقاومة، التأثير المسبب للانزلاق

$$N' = W\cos\alpha - F_h \sin\alpha = 77.79 - 6.34 = \mathbf{71.45}\ \text{kN/m}$$

$$R = 20(0.864) + 71.45(0.3249) = \mathbf{40.49}\ \text{kN/m}$$

$$D = W\sin\alpha + F_h\,\frac{z_c - z_g}{r} = 42.25 + 13.28(0.6882) = \mathbf{51.39}\ \text{kN/m}$$

يتغير التأثير المسبب للحركة 42.25 → **51.39** kN/m (+22%)، وتتغير المقاومة 42.55 → **40.49** kN/m:
فتقلل القوة الأفقية القوة العمودية وتضيف عزم انزلاق.

الحل (2/2)

الحل

3 ثلاث طرائق على الدائرة نفسها ($k_h = 0.15$، $k_v = 0$)

الطريقة	ΣR	ΣD	FS (استاتيكي)	FS (الزلزال)
عادي	967.97	840.48	1.569	**1.152**
Bishop	1,083.01	840.48	1.740	**1.289**
Spencer	1,069.09	840.48	1.717	**1.272**

تخفض $k_h = 0.15$ قيمة FS بنحو 27% (من القيمة العادية 1.569 → **1.152**). وفي حالة التأثير الزلزالي تتغير الدائرة الحرجة أيضاً: ففي النموذج المعروض في الصفحة ($k_h = 0.15$ و $k_v = 0.05$ والاتجاهات الحرجة) تصبح نتيجة البحث 1.138 / 1.265 / 1.250.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

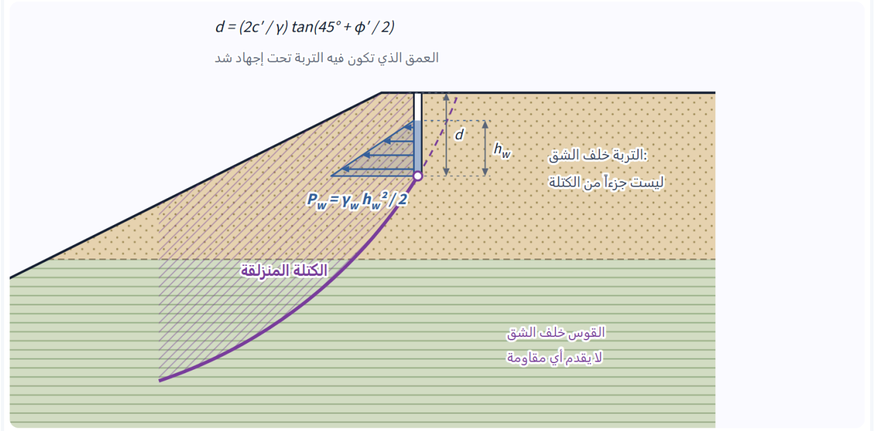
النظرية

الماء في الشق وفي العمق

يحسب عمق شق الشد بالعلاقة $d = 2c'/\gamma \cdot \tan(45° + \varphi'/2)$؛ وفي الحالة غير المصرفة يصبح هذا العمق $2c_u/\gamma$.

عندما يكون الشق فعالاً ينتهي سطح الانزلاق عند النقطة التي يساوي عندها عمق الكتلة المنزلقة عمق الشق؛ ولا تدخل التربة الواقعة خلف الشق في الكتلة المنزلقة، ولا يتحمل الجزء من القوس الواقع داخل الشق أي مقاومة.

يؤثر الماء المتجمع في شق الشد حتى الارتفاع h_w بضغط تحدده القوة الهيدروستاتيكية؛ والشق المملوء بالماء يخفض معامل الأمان، وهذه الحالة أكثر عرضة للإغفال.



$$d = \frac{2c'}{\gamma}\tan\left(45° + \frac{\varphi'}{2}\right) \qquad d = \frac{2c_u}{\gamma}$$

$$P_w = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} \qquad z_f = z_{base} + \frac{h_w}{3} \qquad D_{crack} = \frac{P_w\,(z_c - z_f)}{r}$$

المسألة

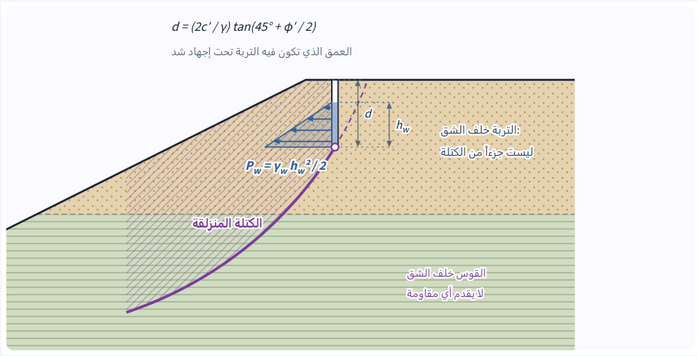
مثال

المعطيات

الشق	في الأعلى شق رأسي على عمق $d = 2$ m (القيمة الابتدائية للنموذج)؛ حالتان: جاف وممتلئ بالماء ($h_w = 2$ m)
الدائرة	الدائرة في المثال 1؛ وتنتهي عند قاع الشق

المطلوب

موضع الشق **x**؛ و **P_w** و **z_f** و **D_{crack}**؛ و **FS** بثلاث طرق.



الحل (1/2)

الحل

1 موضع الشق: ينتهي حيث تصل الدائرة إلى المنسوب z = 10 − 2 = 8 m

$$x = x_c + \sqrt{r^2 - (8 - z_c)^2} = 16.518 + \sqrt{301.08 - (8 - 16.080)^2} = \mathbf{31.87}\ \text{m}$$

2 الماء في الشق (h_w = 2 m): القوة والعزم

$$P_w = \frac{\gamma_w h_w^2}{2} = \frac{9.81(2)^2}{2} = \mathbf{19.62}\ \text{kN/m} \qquad z_f = 8 + \frac{2}{3} = 8.667\ \text{m}$$

$$D_{crack} = \frac{P_w(z_c - z_f)}{r} = \frac{19.62(16.080 - 8.667)}{17.352} = \mathbf{8.38}\ \text{kN/m}$$

يبلغ عمق Rankine في الردم 0.96 m وفي الطين 3.15 m؛ وتأخذ الوحدة عمق الشق بالقيمة التي يدخلها المهندس (2 m هنا). ويضيف الشق المملوء بالماء **8.38** kN/m إلى ΣD.

الحل (2/2)

الحل

3 دون شقوق، وشق جاف، وشق مملوء بالماء (الدائرة نفسها؛ 34 شريحة في الشق)

الطريقة	FS بدون شق	ΣR	ΣD (جاف)	معامل الأمان FS للشق الجاف	ΣD (ماء)	FS شق مملوء
عادي	1.569	991.18	625.52	**1.585**	633.91	**1.564**
Bishop	1.740	1,096.39	625.52	**1.753**	633.91	**1.727**
Spencer	1.717	1,083.00	625.52	**1.731**	633.91	**1.702**

الشق الجاف يغير FS تغييراً طفيفاً جداً (إذ تزول الكتلة المسببة للحركة في الأعلى والمقاومة على القوس معاً: 1.569 → 1.585)؛ أما **الشق المملوء بالماء** فيخفضه (1.564). والماء في الشق هو أكثر الحالات إغفالاً.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

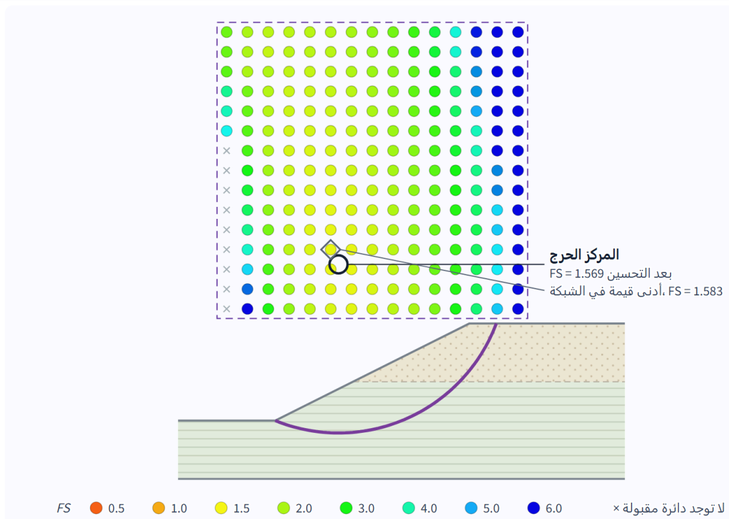
شبكة المراكز، أنصاف الأقطار، التنقيح

يجرى البحث عن الدائرة الحرجة على شبكة مراكز من $n_x \times n_z$ نقطة توضع فوق المنحدر، وتجرب عند كل مركز مجموعة أنصاف أقطار متساوية التباعد.

تُقسَّم كل دائرة إلى شرائح وتُحل، ويُحفظ أدنى معامل أمان يُعثر عليه لكل مركز مع نصف القطر المقابل له؛ وفي النموذج المحلول جُرّبت 4650 دائرة بشبكة مراكز 15 × 15 و 12 نصف قطر.

$$FS(x_c, z_c) = \min_j FS(x_c, z_c, r_j) \qquad FS_{crit} = \min_{x_c, z_c} FS(x_c, z_c)$$

نموذج محلول	القيمة
الشبكة ($n_x \times n_z$ × نصف القطر)	15 × 15 × 12
الدائرة التجريبية / الدائرة المقبولة	3,487 / 4,650
أدنى قيمة في الشبكة	FS = 1.583
بعد التنعيم	**FS = 1.569**
الدائرة الحرجة	x_c = 16.52, z_c = 16.08, r = 17.35 m



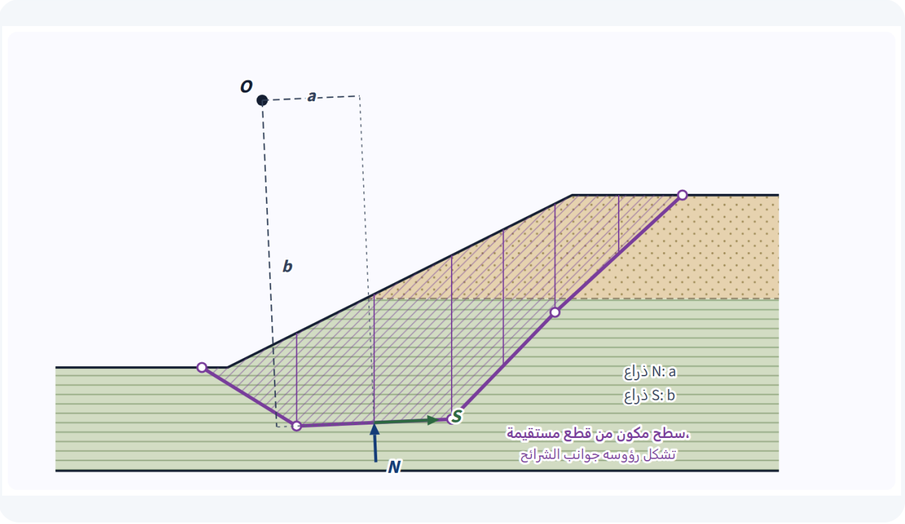
خط منكسر، Spencer فقط

النظرية

السطح غير الدائري سطح مضلّع يقع طرفاه على سطح الأرض، وقد يتبع طبقة ضعيفة بإسفينات تنحدر من قمة المنحدر ثم ترتفع نحو قدم المنحدر.

تكتب معادلة العزم على سطح انزلاق خطي متعدد حول نقطة O تختار فوق قدم الكتلة؛ وذراع القوة N هو a وذراع القوة S هو b.

يبحث عن السطح ذي أقل معامل أمان بوصفه خطاً منكسراً من n قطعة؛ ولا يحتفظ بالحركة إلا إذا بقي السطح مقبولاً، ويمنع قيد التحدب الميل نحو الأسطح المتعرجة.



$$a = (X - X_O)\cos\alpha - (z - z_O)\sin\alpha \qquad b = (X - X_O)\sin\alpha + (z - z_O)\cos\alpha$$

$$\sum [Na + Sb] - \sum V(X - X_O) - \sum A(z_A - z_O) + M_{reinforcement} + M_{crack} = 0$$

النظرية

مساهمة العنصر المنفعل والعنصر الفعال في FS

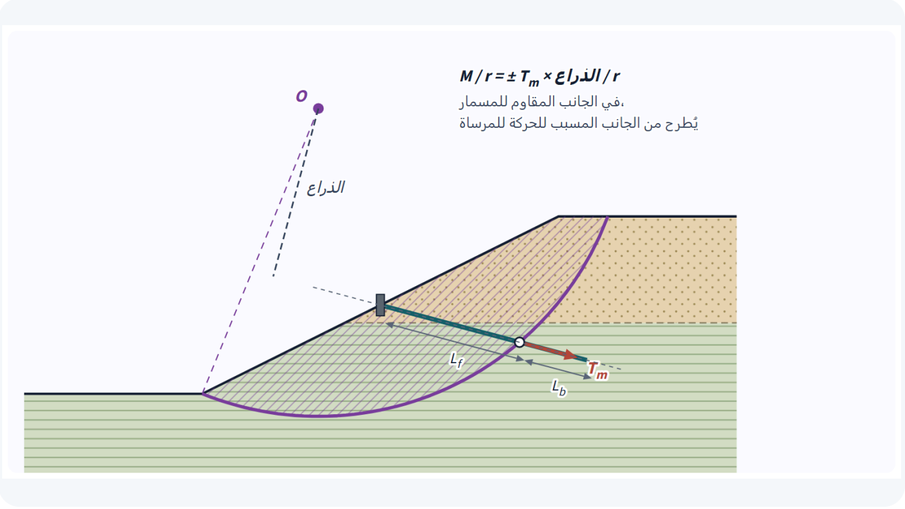
عنصر التسليح خط يقطع سطح الانزلاق؛ ويرمز بالرمز L_f إلى الطول الواقع أمام سطح الانزلاق حتى النقطة التي يقطع عندها القوس، وبالرمز L_b إلى طول التماسك خلف هذه النقطة.

يضاف عزم العنصر السلبي (المسمار، الشبكة الجيوتقنية) إلى الجانب المقاوم؛ ولما كان العنصر النشط (المرساة) يحمل حمله قبل الحركة فإن عزمه يطرح من الجانب المسبب للحركة.

لنفس القوة، يزيد عنصر نشط معامل الأمان أكثر من عنصر سلبي؛ وتؤخذ القوة نفسها في الحالتين الاستاتيكية وشبه الاستاتيكية.

$$\frac{M}{r} = \pm \frac{(x_P - x_c)F_z - (z_P - z_c)F_x}{r}$$

$$FS = \frac{\sum R + \sum M_{passive}/r}{\sum D - \sum M_{active}/r}$$



النظرية

أصغر القيم الثلاث

قوة الشد في مسمار التربة $T = \min[T_t, q_u \pi D_h L_b, q_u \pi D_h L_f + T_h]$ وهي أصغر القيم الثلاث.

مسمار التربة عنصر سلبي: يبدأ عمله كلما تحركت الكتلة، وتعبر عن قوة المسمار مقسومة على التباعد Sh بالعلاقة $T_m = T/S_h$.

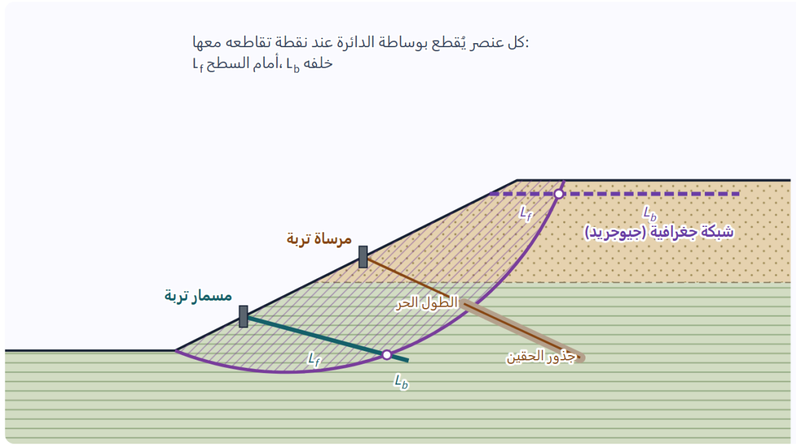
المسمار الذي يقع رأسه خارج الدائرة أو يقع طرفه داخل الكتلة لا يحمل قوة بالنسبة إلى تلك الدائرة.

لا يتولد تماسك في الطول الحر؛ ويمسك جذر المرساة بها، وقوة المرساة المنقولة عبر قطعها لدائرة انزلاق هي أصغر القيم الثلاث: **$T = \min[P, T_t, q_u \pi D_h L_b]$**.

المرساة عنصر نشط: فالحمل موجود في وتر الشد قبل أن تتحرك الكتلة، وفي معادلات Spencer تُعدّ المرساة قوة معطاة؛ ولا تُقسم هناك على قيمة **FS**.

مسمار: $T = \min\left[T_t,\ q_u \pi D_h L_b,\ q_u \pi D_h L_f + T_h\right] \qquad T_m = \dfrac{T}{S_h}$

المرساة: $T = \min\left[P,\ T_t,\ q_u \pi D_h L_b\right] \qquad T_m = \dfrac{T}{S_h}$



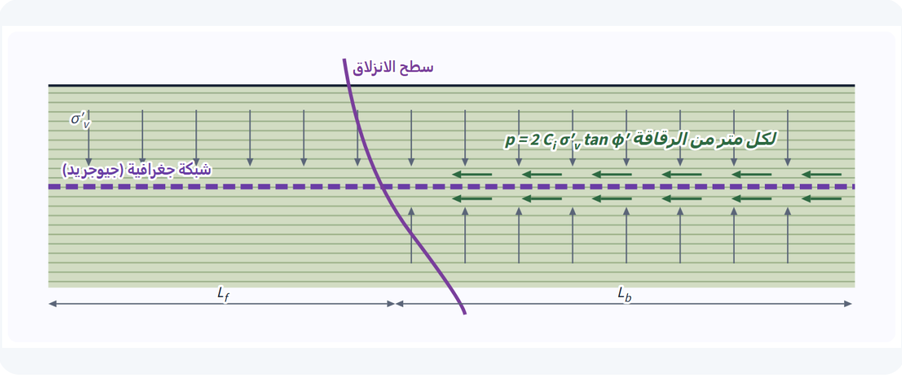
مقاومة التصميم، الانقلاع، الوصلة

النظرية

يعرف الجيوجريد بطوله L، ومقاومة التصميم طويلة الأمد لكل متر من المقطع T_d، ومعامل التفاعل بين التربة والجيوجريد C_i، ومقاومة الربط T_c عند ربطه بكسوة الواجهة.

تنشأ مقاومة الانقلاع لكل متر طولي من الاحتكاك على الوجهين تحت إجهاد الغطاء الفعال σ'_v؛ والجيوغريد عنصر منفعل ويؤثر في مستوى الصفيحة.

يحصل على σ'_v من وزن التربة فوق اللوح — بالوزن الحجمي المشبع أسفل منسوب المياه الجوفية — مطروحاً منه ضغط ماء المسام؛ ولا تؤخذ أحمال السطح في الحساب بقصد البقاء في جانب الأمان.



$$p = 2\,C_i\,\sigma'_v\,\tan\varphi' \qquad T_m = \min\left[T_d,\ \int_{L_b} p\,dl,\ \int_{L_f} p\,dl + T_c\right]$$

المسألة

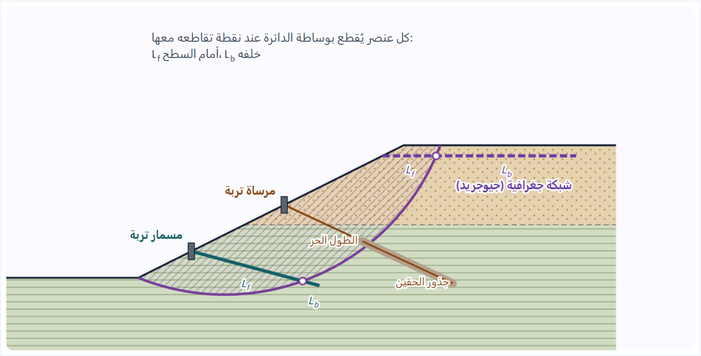
مثال

المعطيات

المسامير	أربعة مسامير، رؤوسها عند $x = 14, 18, 22, 26$ m (عند السطح)، مائلة 15° عن الأفقي؛ $L = 14$ m، $T_t = 250$ kN، $q_u = 120$ kPa، $D_h = 120$ mm، $S_h = 1.5$ m
الدائرة	الدائرة التي وجدها البحث في النموذج المثبت بالمسامير: المركز $(18.29;\ 13.90)$، $r = 18.18$ m

المطلوب

لكل مسمار تربة L_f, L_b وT وT_m؛ وإسهام العزم؛ وFS.



الحل (1/2)

الحل

1 مقاومة التماسك (لوحة الطول) والمسمار N3

$$q_u \pi D_h = 120\pi(0.120) = \mathbf{45.239}\ \text{kN/m}$$

$$L_f = 11.282\ \text{m},\ L_b = 2.718\ \text{m} \qquad P(32.90;\ 3.08)$$

$$T = \min[250,\ 45.239(2.718) = 122.94,\ 45.239(11.282) = 510.4] = \mathbf{122.94}\ \text{kN}$$

$$T_m = \frac{T}{S_h} = \frac{122.94}{1.5} = \mathbf{81.96}\ \text{kN/m}$$

2 عزم القوة حول مركز الدائرة

$$F_x = T_m \cos 15^\circ = 79.17,\quad F_z = -T_m \sin 15^\circ = -21.21\ \text{kN/m}$$

$$\frac{M}{r} = \frac{(x_P - x_c)F_z - (z_P - z_c)F_x}{r} = \frac{(14.606)(-21.21) - (-10.822)(79.17)}{18.178} = \mathbf{30.09}\ \text{kN/m}$$

يحمل المسمار N3 حملًا مقداره **81.96** kN/m يثبّت به الكتلة؛ ويضيف عزمه 30.09 kN/m إلى ΣR (عنصر منفعل).

الحل (2/2)

الحل

3 قوى المسامير الأربعة (الطريقة نفسها)

المسمار	L_f (m)	L_b (m)	T (kN)	الحاكم	T_m (kN/m)	M/r (kN/m)
N1	–	–	0	الطرف داخل الكتلة: لا يحمل أي حمل	0	0
N2	13.13	0.87	39.32	الانقلاع في الخلف	26.21	13.90
N3	11.28	2.72	122.94	الانقلاع في الخلف	81.96	30.09
N4	8.82	5.18	234.18	الانقلاع في الخلف	156.12	31.82

4 النموذج المثبت بمسامير التربة: FS على الدائرة التي وجدها البحث

الطريقة	دون مسامير (الحفر الابتدائي)	مدعّم بالمسامير
عادي	1.569	**1.753**
Bishop	1.740	**2.018**
Spencer	1.717	**2.031**

تزيد المسامير معامل الأمان FS بنحو 12% (الطريقة العادية 1.569 → 1.753؛ Bishop 1.740 → 2.018).

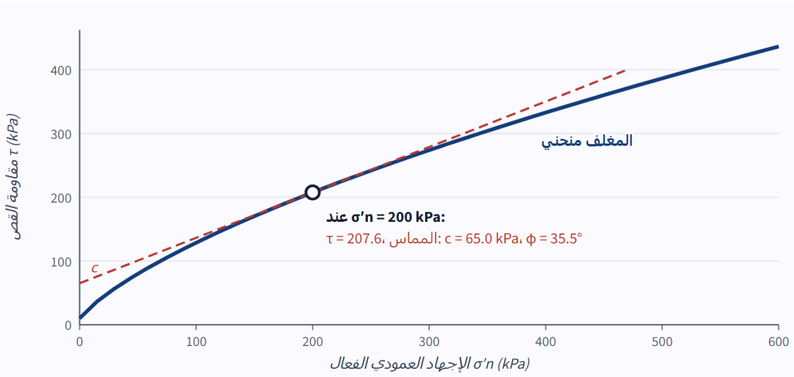
تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المغلف المنحني للمقاومة والمماس له عند قاعدة كل شريحة

النظرية

في معيار Hoek–Brown المعمم تعرف الكتلة الصخرية بالمقادير σ_{ci} و GSI و m_i و D؛ وتؤخذ D = 0 للكتلة غير المضطربة، و D = 1 في حالة التفجير المكثف أو الارتخاء.

ولأن مقاومة القص عند قاعدة الشريحة تتوقف على الإجهاد العمودي، يحول المغلف المنحني إلى المستوى τ–σ'_n بعلاقات Balmer؛ ويعطي المماس قيمتي ci و φi عند القاعدة.



$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}\left(m_b\frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

$$m_b = m_i\, e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \qquad s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \qquad a = \frac{1}{2} + \frac{e^{-GSI/15} - e^{-20/3}}{6}$$

$$d = \frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} \qquad \sin\varphi_i = \frac{d-1}{d+1} \qquad c_i = \tau - \sigma'_n \tan\varphi_i$$

المسألة

مثال

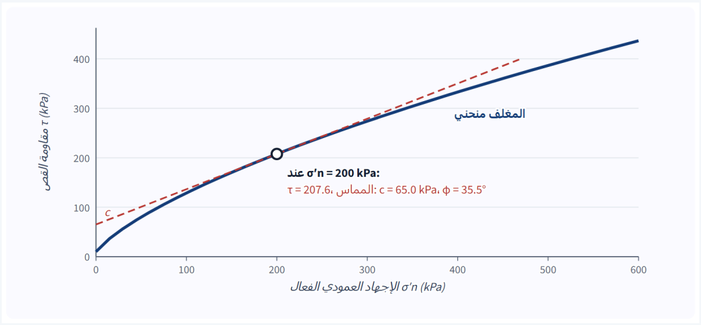
المعطيات

كتلة صخرية — $D = 0$,$m_i = 8$,$GSI = 30$,$\sigma_{ci} = 5$ **MPa**

القاع — $\sigma'_n = 200$ **kPa الإجهاد العمودي الفعال**

المطلوب

m_b, s, a؛ عند هذا الإجهاد τ وφ_i وc_i.



الحل (1/2)

الحل

1 ثوابت كتلة الصخر

$$m_b = 8\,e^{(30-100)/28} = 0.6567 \qquad s = e^{(30-100)/9} = 0.000419$$

$$a = 0.5 + \frac{e^{-2} - e^{-20/3}}{6} = 0.5223$$

2 عند σ'_n = 200 kPa يكون σ'_3 = 93.05 kPa (يحسب بالتكرار)

$$d = 1 + a\,m_b \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a-1} = 3.767$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a} = 602.9 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}\,\frac{d-1}{d+1} = 200.0 \text{ kPa} \ \checkmark$$

الحل (2/2)

الحل

3 مقاومة القص ومعاملات Mohr–Coulomb المكافئة

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3')\frac{\sqrt{d}}{d+1} = \mathbf{207.6}\ \text{kPa}$$

$$\varphi_i = \arcsin\frac{d-1}{d+1} = \mathbf{35.48^\circ} \qquad c_i = \tau - \sigma_n' \tan\varphi_i = 207.6 - 200(0.7128) = \mathbf{65.0}\ \text{kPa}$$

عند هذه القاعدة يسلك الصخر كما في Mohr–Coulomb بالقيمتين (τ = 207.6 kPa)؛ وعندما يتغير الإجهاد تتغير هاتان القيمتان أيضاً: فكل شريحة تستخدم c و φ الخاصين بها.

c_i = 65.0 kPa، φ_i = 35.5°

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

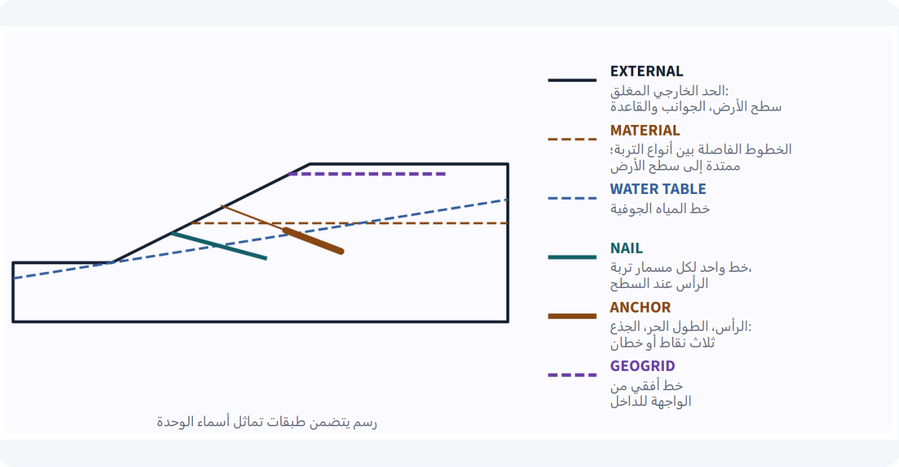
القراءة حسب أسماء الطبقات

النظرية

تقرأ أسماء طبقات مقطع DXF دون اعتبار لحالة الأحرف الكبيرة والصغيرة والمسافات والشرطات القصيرة والشرطات السفلية؛ و**EXTERNAL** يعطي سطح الأرض والجانبين والقاعدة بوصفها خطاً متعدد المقاطع مغلقاً واحداً.

MATERIAL هي الخطوط الفاصلة بين أنواع التربة؛ ويمد الخط الذي ينتهي داخل المقطع على امتداد سطح الأرض، وتسند تربة مستقلة إلى كل منطقة بين حدين.

WATER TABLE هو خط المياه الجوفية؛ و **NAIL** و **ANCHOR** و **GEOGRID** عناصر تسليح، وتُدخل في تبويب «النموذج» الأوزان الحجمية والمقاومة والسعة والحمل والزلزال غير الظاهرة في الرسم.



رسم يتضمن طبقات تمثل أسماء الوحدة

المقطع نفسه، خمسة نماذج، ثلاث طرق

النموذج (يضاف عنصر ويعاد البحث عن الدائرة)	المركز (x_c؛ z_c)	r (m)	الشريحة	عادي	Bishop	Spencer
النموذج الابتدائي (استاتيكي)	16.52; 16.08	17.35	33	**1.569**	**1.740**	**1.717**
+ منسوب المياه الجوفية المرتفع باتجاه داخل المنحدر	17.12; 11.45	16.85	36	**1.255**	**1.568**	**1.564**
+ حمل شريطي 20 kPa، x = 25 – 32 m	16.25; 15.44	16.66	35	**1.400**	**1.585**	**1.556**
+ زلزال، kv 0.05، kh 0.15 (حرج)	16.72; 17.45	18.70	34	**1.138**	**1.265**	**1.250**
+ أربعة مسامير تربة، طول كل منها 14 m	18.29; 13.90	18.18	34	**1.753**	**2.018**	**2.031**



الطريقة العادية هي الأدنى دائماً؛ وتقترب Bishop و Spencer إحداهما من الأخرى (والفرق للدائرة بضعة بالمئة).

يخفض الماء والزلزال معامل الأمان FS أكثر من غيرهما (1.255 و 1.138 بالطريقة العادية)؛ وتزيد أربعة مسامير معامل الأمان إلى 1.753. ومع المسامير تتجاوز نتيجتا Bishop و Spencer القيمة 2.0.

ما يفترضه النموذج وما لا يتناوله

يفترض النموذج حالة انفعال مستو: متراً واحداً من منحدر لانهائي الطول، ومقاومة واحدة في كل اتجاه (باستثناء معيار الصخر المتماثل الخواص)، وكتلة تربة جاسئة حتى بدء الحركة.

بالنسبة إلى **الماء** يُستخدم إما الضغط الهيدروستاتيكي تحت خط معيّن أو النسبة r_u من حمل الغطاء؛ ولا يُجرى تحليل للتسرب، وعند الهبوط السريع لمنسوب الماء يُفترض $\bar{B} = 1$ أي هبوط لحظي.

بالنسبة إلى **الشرائح** تؤخذ جميع الكميات عند الخط الرأسي المار بمنتصف الشريحة، وتثبت القوة العمودية الفعالة السالبة عند الصفر؛ ويعالج الزلزال بمعاملات شبه استاتيكية، وتهمل قصورية المياه المتجمعة على السطح.

تفترض طريقة **Spencer** أن القوى بين الشرائح متوازية فيما بينها وبزاوية واحدة للكتلة كلها؛ ويتحقق توازن العزوم في الطرق الثلاث جميعها، بينما لا يتحقق توازن القوى إلا في طريقة Spencer.

يجد البحث السطح ذا أقل معامل أمان بالقرب من الأسطح الأولية؛ ولم يثبت أنه الأقل بين جميع الأسطح.

ما لا يفعله

التأثيرات ثلاثية الأبعاد (طرف الانزلاق، عرض المنحدر)

التشوه، الانهيار التدريجي، التلين الانفعالي

التسرب والانضمام: ضغط ماء المسام معطى وليس محسوباً

التحليل الديناميكي (Newmark): الحساب شبه الاستاتيكي هو تحقق

الحكم: يعطى FS؛ ويحدد المهندس والمواصفات القيمة الكافية

النقاط الرئيسية

FS = ΣR/ΣD؛ $R = cL + N' \tan\varphi$ و $D = W \sin\alpha$ (العزم حول مركز الدائرة). وتختلف الطرق الثلاث في كيفية إيجاد **N′** فقط

الشريحة 22 (مثال): $W = 88.52$، $L = 0.864$، $\alpha = 28.51°$ ← الطريقة العادية $D = 42.25$، $R = 42.55$، $N' = 77.79$؛ طريقة Bishop $N' = 86.56$، $R = 45.40$؛ طريقة Spencer $N' = 80.76$، $R = 43.51$ kN/m

الدائرة نفسها: **1.569 (العادية) · 1.740 (Bishop) · 1.717 (Spencer)**؛ وقد عثر على الدائرة الحرجة باختبار 4650 دائرة على شبكة 15 × 12

الماء: يخفض $u = \gamma_w h_w$ قيمة N′؛ **الزلزال:** تخفض F_h القوة العمودية وتضيف عزماً؛ **الماء في الشق** يضيف إلى ΣD عزم P_w

التسليح: يؤخذ التسليح المنفعل (المسامير، الجيوجريد) في جانب المقاومة، والفعال (المرساة) يطرح من الجانب المسبب للانزلاق؛ **Hoek–Brown:** القيمتان المماستان c_i و φ_i عند قاعدة كل شريحة

المراجع

.Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. Transactions of the 2nd Congress on Large Dams, Washington, 4, 445–463

.Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, 5(1), 7–17

.Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. Géotechnique, 17(1), 11–26

.Morgenstern, N.R. and Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. Géotechnique, 15(1), 79–93

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

Terzaghi, K. (1950). Mechanism of landslides. In Application of Geology to Engineering Practice (Berkey Volume), Geological Society of .America, 83–123

.Rankine, W.J.M. (1857). On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 147, 9–27

Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). Hoek–Brown failure criterion — 2002 edition. Proceedings of the 5th North American .Rock Mechanics Symposium, Toronto, 1, 267–273

.Balmer, G. (1952). A general analytical solution for Mohr's envelope. Proceedings ASTM, 52, 1260–1271

Lazarte, C.A., Robinson, H., Gómez, J.E., Baxter, A., Cadden, A. and Berg, R. (2015). Soil Nail Walls — Reference Manual. Geotechnical .Engineering Circular No. 7, FHWA-NHI-14-007

Sabatini, P.J., Pass, D.G. and Bachus, R.C. (1999). Ground Anchors and Anchored Systems. Geotechnical Engineering Circular No. 4, FHWA-IF- .99-015

Berg, R.R., Christopher, B.R. and Samtani, N.C. (2009). Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil .Slopes. Geotechnical Engineering Circular No. 11, FHWA-NHI-10-024

ملاحظة

جميع الأمثلة العددية مستخرجة بمكتبات الحساب الخاصة بالوحدة؛ وتعطي الوحدة القيم نفسها. والنموذج المحلول في صفحة الوحدة هو هذا المقطع أيضاً (منحدر 2:1 بارتفاع 10 m، طين فوق ردم).

GeoTerva

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

ارسم مقطعك الخاص أو استورده من ملف DXF؛ وأدخل التربة والماء والأحمال والزلزال والتسليح. تبحث الوحدة عن الدائرة الحرجة، وتعطي معاملات الأمان للطرق الثلاث وجداول الشرائح والحل خطوة بخطوة والتقرير.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.