GeoTerva

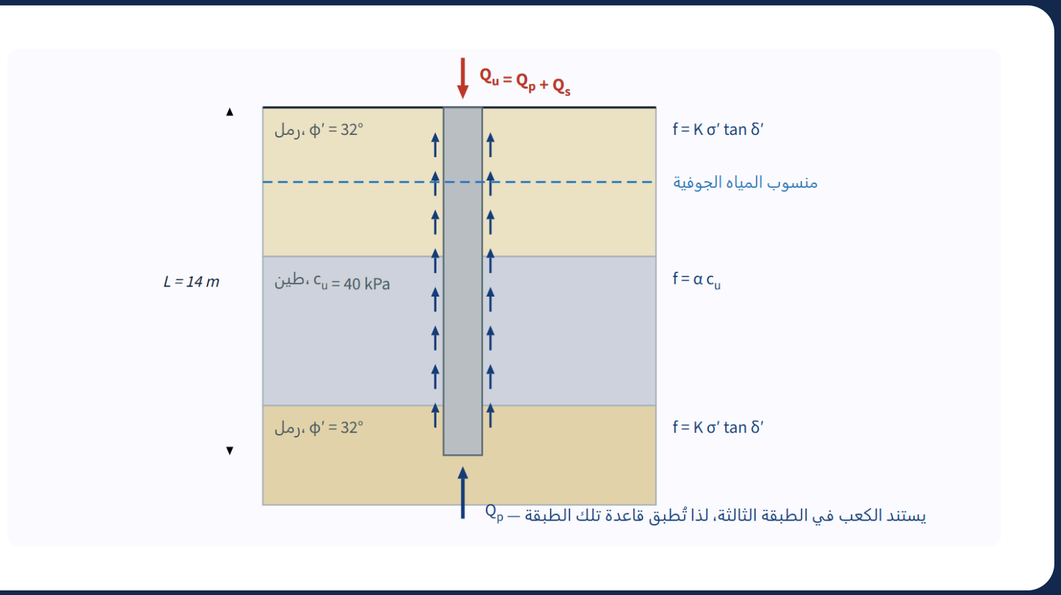
شرائح محاضرات الجيوتكنيك · الخوازيق

قدرة تحمل الخازوق في تربة طبقية

المحاضرة: قدرة تحمل الخازوق المار عبر طبقات الرمل والطين. أي قاعدة تنطبق وأين، وكيف يتراكم الإجهاد الفعال عبر الطبقات؛ مع مثال محلول لكل موضوع.

الحساب طبقة بطبقة | الطرف: طبقة الطرف | قواعد الرمل + الطين

الخازوق المحفور | أمثلة محلولة



يستند إلى صفحة النظرية في GeoTerva · geoterva.com

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

تجميع الإجهاد الفعال **طبقة بعد طبقة**؛ وملاحظة كيف تؤثر طبقة الطين في الرمل الواقع تحتها بوزنها، حتى وإن لم تمتد مقاومتها إلى الرمل

معرفة أن **مقاومة الإرتكاز** تعتمد فقط على الطبقة التي يقع فيها الطرف وتُحسب بقاعدة تلك الطبقة

تطبيق قاعدة K–δ **في طبقة الرمل** (العمق الحرج $L' = 15D$ يخص الخازوق بأكمله)، وقواعد α و λ و β **في طبقة الطين**

جمع مقاومة الجذع عبر الطبقات؛ وتفسير قفزات الاحتكاك عند الحدود الفاصلة بين الطبقات وأثر طول الخازوق

في الخازوق المحفور، استيعاب أن نافذة α^* وأن c_{ub} قد يكونان من عدة طبقات

تسلسل المحاضرة

يعالج كل موضوع في **ثلاث خطوات**:

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

2 · **المسألة**: المعطيات والمطلوب

3 · **الحل**: خطوة بخطوة، بالأرقام

تنفذ معظم الأمثلة على الخازوق نفسه: خازوق قطره 0.4 m وطوله 14 m يخترق قطاع تربة من رمل–طين–رمل.

تبنى هذه المحاضرة على محاضرتي **الخوازيق في الرمل** و **الخوازيق في الطين**: فقد درست القواعد هناك، ويبحث هنا في أيها ينطبق وأين.

تستجيب كل طبقة وفق قاعدتها الخاصة

النظرية

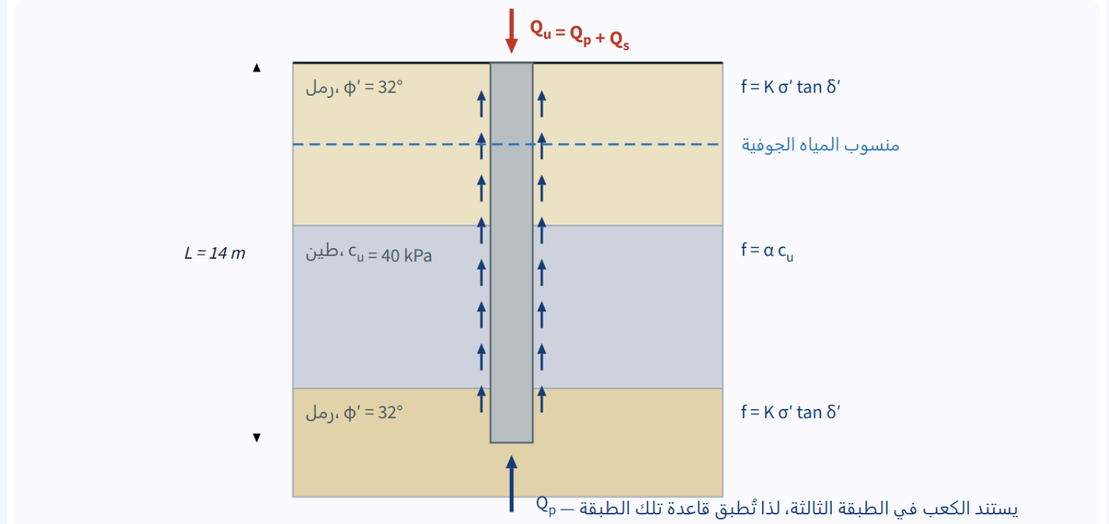
نادراً ما يخترق الخازوق تربة واحدة فقط. فالقطاع يتألف من **عدة طبقات**، تحدد كل منها بوصفها رملاً أو طيناً ويطبق عليها **حكم مادتها الخاصة**. وتتكون القدرة من جزأين كما في السابق، لكنها لم تعد تقرأ من صيغة واحدة، بل **تبنى جزءاً جزءاً**:

$$Q_u = Q_p + Q_s \qquad Q_{all} = \frac{Q_u}{FS}$$

لا توجد نظرية جديدة: قواعد الرمل تعود إلى وحدة الرمل، وقواعد الطين إلى وحدة الطين.

الجديد هو **نظام الحساب**: أي قاعدة تسري على أي جزء من الجذع، وكيف يتراكم الإجهاد الفعال من الطبقات العلوية.

تأتي مقاومة الإرتكاز من **طبقة واحدة**، بينما تأتي مقاومة الجذع من **مجموع جميع الطبقات**.



النظرية

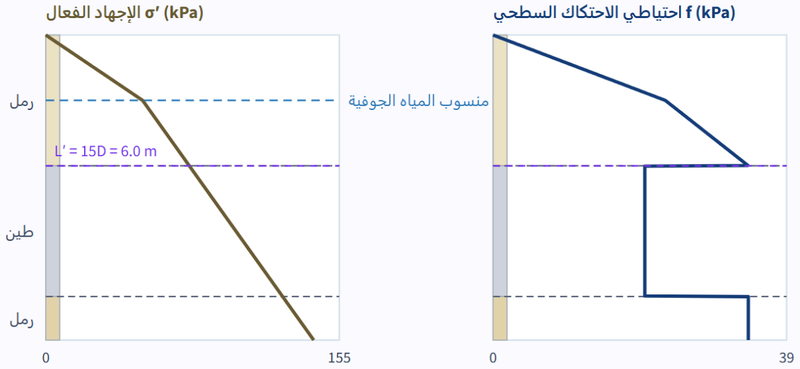
الإجهاد مستمر، والاحتكاك متدرج

الإجهاد الرأسي الفعال هو الرابط بين الطبقات: إذ يتراكم **وزن كل طبقة علوية**؛ ويُستخدم الوزن الحجمي الرطب فوق منسوب المياه الجوفية والوزن الحجمي المغمور تحته.

$$\sigma'(z) = \sum \gamma_i h_i \quad \text{(فوق منسوب المياه الجوفية)}$$
$$+ \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \quad \text{(تحت منسوب المياه الجوفية)}$$

لا تعطي طبقة الطين مقاومتها الخاصة للرمل؛ لكنها **بوزنها** تغيّر المقاومة التي يقدمها الرمل تحتها.

أما الاحتكاك فغير مستمر: عند حد الرمل–الطين **يتغير القانون نفسه** وقد يقفز احتكاك وحدة المساحة قفزة كبيرة. وهذه القفزة ليست خطأً في الحساب، بل هي **بصمة** القطاع الطبقي.



الإجهاد مستمر عبر الطبقات؛ ويتغير الاحتكاك بشكل مفاجئ عند كل حد فاعل، بسبب تغير القاعدة هناك.

المسألة

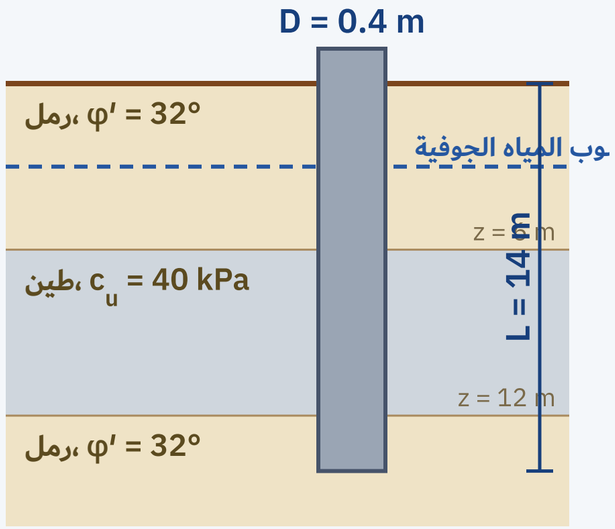
مثال

المعطيات

رمل 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
طين (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
رمل 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
الوزن الحجمي	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(ثلاث طبقات)**
المياه الجوفية	**على عمق 3.0 m**
الخازوق	**مدقوق، D = 0.4 m، L = 14 m**
الوزن الحجمي للماء	$\gamma_w = 9.81$ kN/m^3

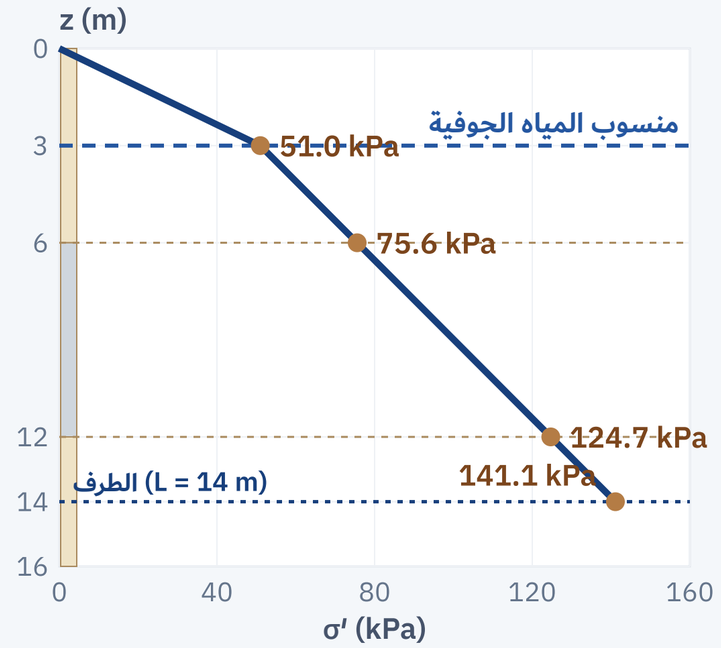
المطلوب

أوجد الإجهاد الرأسي الفعال عند الأعماق **3** و**6** و**12** و**14 m** (14 m = طرف الخازوق).



الحل (1/2)

الحل



1 حتى منسوب المياه الجوفية (3 m): الطبقة بأكملها رطبة، $\gamma = 17$

$$\sigma'(3) = 17(3) = \mathbf{51.0}\ \text{kPa}$$

2 6 m (حد الرمل–الطين): تحت منسوب المياه الجوفية $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 18 - 9.81$

$$\sigma'(6) = 51.0 + (18 - 9.81)(3) = \mathbf{75.6}\ \text{kPa}$$

3 12 m (الحد الفاصل بين الطين والرمل): قيمة γ_{sat} للطين أيضاً 18

$$\sigma'(12) = 75.6 + (18 - 9.81)(6) = \mathbf{124.7}\ \text{kPa}$$

4 14 m (طرف الخازوق)

$$\sigma'(14) = 124.7 + (18 - 9.81)(2) = \mathbf{141.1}\ \text{kPa}$$

الحل (2/2)

الحل

5 في كل قطعة، مساحة مخطط σ' (شبه المنحرف)؛ وستعطي هذه متوسط الإجهاد في حساب الجذع

$$A_{0-6} = \tfrac{1}{2}(0 + 51.0)(3) + \tfrac{1}{2}(51.0 + 75.6)(3) = 266.4$$

$$A_{6-12} = \tfrac{1}{2}(75.6 + 124.7)(6) = 600.8$$

$$A_{12-14} = \tfrac{1}{2}(124.7 + 141.1)(2) = 265.8$$

σ' متصل عبر الطبقات: فلا توجد قفزة عند حد الرمل–الطين؛ ولا يتغير الميل إلا عند منسوب المياه الجوفية وعندما تتغير γ'. وستستخدم هذه المساحات الثلاث في المثالين 4 و 5 بوصفها المتوسط $\bar{\sigma}'$.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

الإرتكاز يسأل طبقته فقط

النظرية

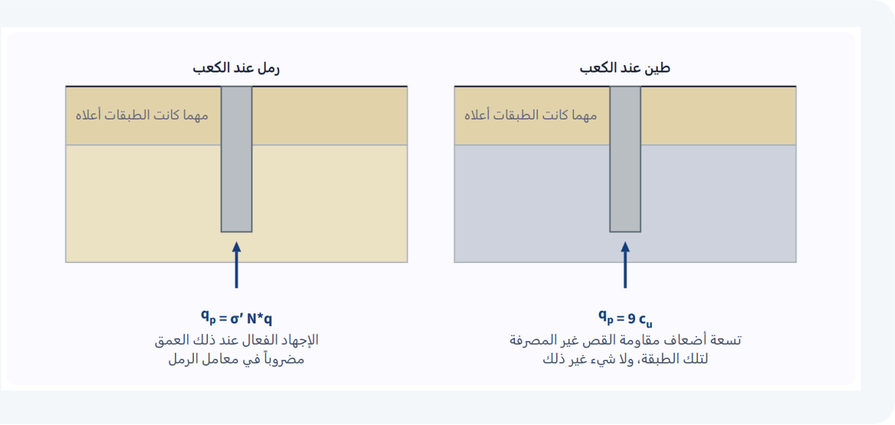
تعود مقاومة الإرتكاز إلى **طبقة واحدة:** الطبقة التي يقع فيها طرف الخازوق. وتحسب بحسب مادة تلك الطبقة؛ أما الطبقات العليا فلا تؤثر إلا عبر σ' (**في طرف رملي**)، و**لا تؤثر إطلاقاً في طرف طيني.**

رمل: $Q_p = A_p\, q'\, N_q^* \le A_p\, q_l, \quad q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi'$

طين: $Q_p = A_p\, c_u\, N_c^*, \quad N_c^* = 9$ (Meyerhof)

الخازوق الذي ينطبق طرفه على **حدّ تام** يُعتبر مستنداً إلى الطبقة **الواقعة أسفل** الحد.

Coyle–Castello علاقة **خاصة بالرمل**؛ ولا معنى لها عند طرف في الطين، وتبقى قاعدة الطين سارية حتى لو اختيرت.



عند طرف الرمل يكون σ' وN^*_q هما الحاكمان؛ وعند طرف الطين تُحدد فقط قيمة c_u لتلك الطبقة.

المسألة

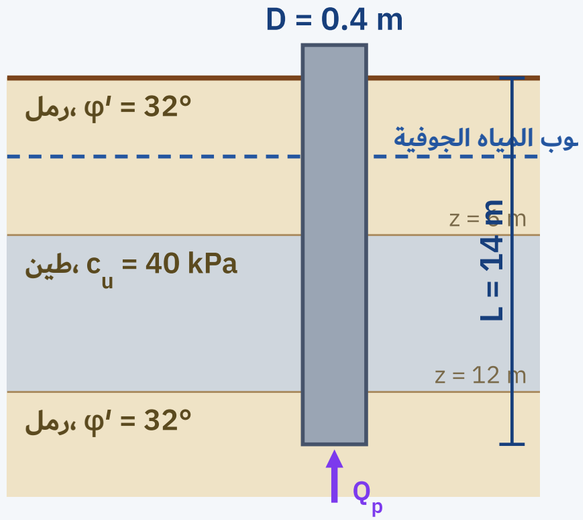
مثال

المعطيات

رمل 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
طين (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
رمل 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
الوزن الحجمي	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(ثلاث طبقات)**
المياه الجوفية	**على عمق 3.0 m**
الخازوق	**مدقوق، مقطع دائري، D = 0.4 m، L = 14 m**
طريقة الطرف	**Meyerhof**
الضغط الجوي	$p_a = 100$ kPa
الإجهاد الفعال عند الطرف	$q' = \sigma'(14) = 141.1$ kPa **(المثال 1)**

المطلوب

عيّن الطبقة التي يقع فيها الطرف، ثم أوجد **مقاومة الإرتكاز** Q_p.



الحل (1/2)

الحل

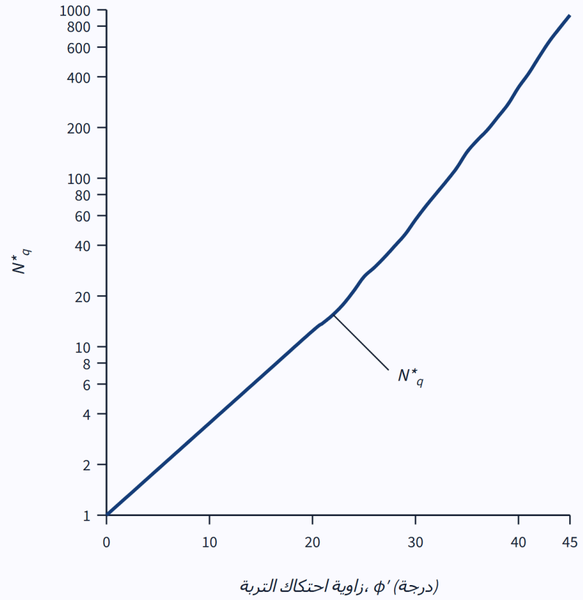
1 طبقة الطرف: L = 14 m، في الرمل الواقع بين 12–16 m → قاعدة الرمل (الطين العلوي لا يخص الطرف)

$$\varphi' = 32^\circ \qquad q' = \sigma'(14) = 141.1 \text{ kPa}$$

2 N^*_q من مخطط Meyerhof من أجل φ′ = 32°؛ ثم توضع القيمتان جنباً إلى جنب

$$N_q^* = 81$$
$$q' N_q^* = 141.1(81) = 11{,}428 \text{ kPa}$$
$$q_l = 0.5(100)(81)\tan 32^\circ = 2{,}531 \text{ kPa}$$

قيمة N^*_q من المخطط (على الجانب) تساوي 81؛ و $q'N^*_q$ = 11,428 kPa أكبر بكثير من القيمة الحدية q_l = 2,531 kPa: **الحد هو الحاكم**.



الحل (2/2)

الحل

3 مقاومة الإرتكاز لوحدة المساحة: الأصغر من القيمتين

$$q_p = \min(q' N_q^*;\ q_l) = \min(11{,}428;\ 2{,}531) = \mathbf{2{,}531}\ \text{kPa}$$

4 مساحة طرف الخازوق ومقاومة الإرتكاز

$$A_p = \frac{\pi (0.4)^2}{4} = 0.1257\ \text{m}^2 \qquad Q_p = A_p\, q_p = 0.1257(2{,}531) = \mathbf{318.0}\ \text{kN}$$

مقاومة الإرتكاز **318.0 kN**. ولأن طرف الخازوق في الرمل تسري صيغة الرمل؛ وبما أن الحد مفعل فإن قيمة σ′ لا تغير النتيجة في هذا المثال.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

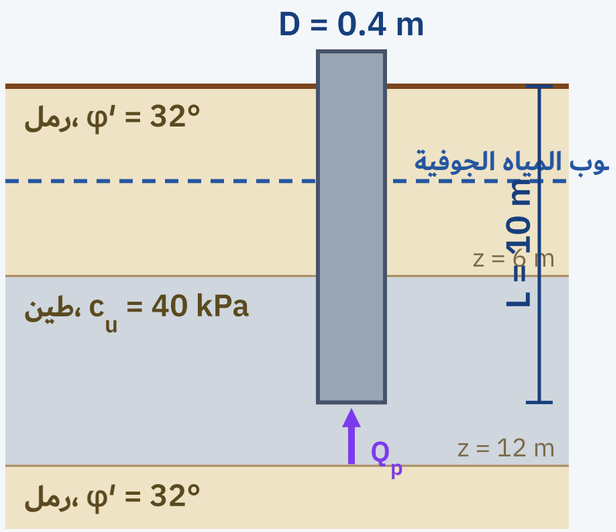
مثال

المعطيات

رمل 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
طين (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
رمل 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
الوزن الحجمي	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(ثلاث طبقات)**
المياه الجوفية	**على عمق 3.0 m**
الخازوق	**الخازوق نفسه، لكن L = 10 m**
طرق مقاومة الإرتكاز	**Meyerhof و Vesic**
الضغط الجوي	$p_a = 100$ kPa

المطلوب

إذا قُصّر الخازوق إلى 10 m، فحدد الطبقة التي تبقى فيها نهايته، ثم أوجد **مقاومة الإرتكاز** بطريقتين.



الحل

الحل

1 طبقة الطرف: L = 10 m، في الطين الواقع بين 6–12 m → قاعدة الطين (لم يعد الرمل وσ' يدخلان في الحساب)

$$c_u = 40 \text{ kPa} \qquad A_p = 0.1257 \text{ m}^2$$

2 Meyerhof: $N^*_c = 9$

$$q_p = 9\,c_u = 9(40) = 360 \text{ kPa} \qquad Q_p = 0.1257(360) = \mathbf{45.2} \text{ kN}$$

3 Vesic: $I_{rr} = I_r = 347(c_u/p_a) - 33$

$$I_{rr} = 347(0.4) - 33 = 105.8$$
$$N_c^* = \tfrac{4}{3}(\ln 105.8 + 1) + \tfrac{\pi}{2} + 1 = 10.12$$
$$q_p = 40(10.12) = 405 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; Q_p = 0.1257(405) = \mathbf{50.9} \text{ kN}$$

كانت Q_p = **318 kN** للخازوق الذي طرفه في الرمل؛ وعندما يبقى في الطين تصبح **45 – 51 kN**: أي نحو سبعها.
وإطالة الخازوق نفسه بمقدار 2 m لإدخال طرفه في الرمل ترفع مقاومة الإرتكاز دفعة واحدة.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

K–δ: العمق الحرج يخص الخازوق بأكمله

النظرية

في طبقة الرمل يقاوم الجذع بالاحتكاك ضد الإجهاد الفعال الأفقي. وتحمل كل طبقة رمل قيمتي K و δ′ **الخاصتين بها:**

$$f = K_i\,\sigma'\tan\delta_i' \;\; (z \le L') \qquad f = f_{z=L'} \;\; (z > L'),\;\; L' = 15D$$

إن L′ يخص **الخازوق بأكمله** وليس الطبقة: تحت L′ تُثبَّت قيمة σ′ عند قيمتها عند L′.

توفر طبقة رمل عميقة احتكاكاً وحدوياً **ثابتاً على امتداد الطبقة**، أياً كان موضع حدها.

الخيار: **Coyle–Castello**. تؤخذ K الخاصة بالطبقة (من المخطط)، و δ′ = 0.8φ، ومتوسط σ′ للطبقة؛ ولا يوجد عمق حرج، إذ يغني المتوسط عنه.

COYLE–CASTELLO (لكل طبقة)

$$f_i = K_i\,\bar{\sigma}_i'\tan(0.8\varphi_i')$$

$$Q_s = p\sum f_i\,\Delta L_i$$

في طريقة K–δ تؤخذ δ′ في الغالب ضمن المجال – 0.75φ′ 0.8φ′؛ وفي هذا العرض التقديمي سيعتمد **δ′ = 0.8φ′ =** **25.6°** و**K = 1.0**.

المسألة

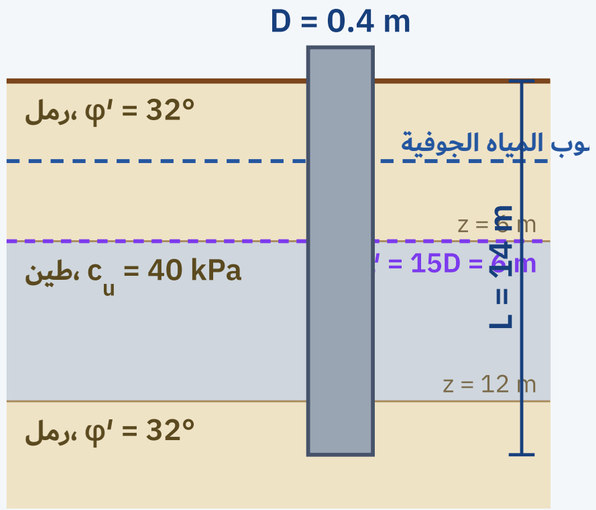
مثال

المعطيات

رمل 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
طين (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
رمل 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
الوزن الحجمي	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(ثلاث طبقات)**
المياه الجوفية	**على عمق 3.0 m**
الخازوق	**مدقوق، D = 0.4 m، L = 14 m**
المحيط	$p = \pi D = 1.257$ m
في طبقات الرمل	$K = 1.0,\ \delta' = 0.8\varphi' = 25.6^\circ$ **(أدخل هذه القيم في الوحدة؛ تُفتح الوحدة بالقيمتين K = 0.66 و δ′ = 24°)**

المطلوب

طبقات الرمل (0–6 m و12–14 m) أوجدوا مقاومة الجذع بطريقة K–δ. العمق الحرج L′ = 15D.



الحل (1/2)

الحل

1 العمق الحرج (قيمة واحدة للخازوق بأكمله)

$$L' = \min(15D;\ L) = \min(15(0.4);\ 14) = \mathbf{6}\ \text{m} \qquad \sigma'(L') = 75.6\ \text{kPa}\ \text{(مثال 1)}$$

2 الرمل 1 (0–6 m): الطبقة تقع كلياً ضمن L′، دون حد أقصى؛ متوسط σ′ = المساحة / السماكة

$$\bar{\sigma}'_1 = \frac{266.4}{6} = 44.4\ \text{kPa}$$

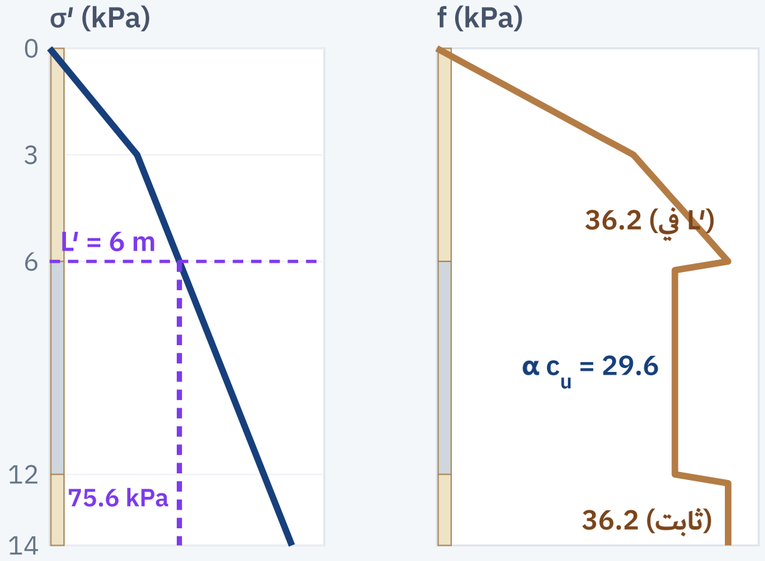
3 احتكاك ومقاومة الوحدة

$$f_1 = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}'_1 = 1.0(0.4791)(44.4) = 21.3\ \text{kPa}$$

$$Q_{s1} = p\, f_1 H = 1.2566(21.3)(6) = \mathbf{160.4}\ \text{kN}$$

الحل (2/2)

الحل



4 الرمل 2 (12–14 m): كله أسفل L′ ← تُثبَّت قيمة σ′ عند قيمتها في L′

$$\sigma' = \sigma'(L') = 75.6 \text{ kPa}$$

$$f_3 = 1.0(0.4791)(75.6) = \mathbf{36.2} \text{ kPa}$$

5 المقاومة (السماكة 14 − 12 = 2 m)

$$Q_{s3} = p\, f_3 H = 1.2566(36.2)(2) = \mathbf{91.0} \text{ kN}$$

لولا العمق الحرج لكانت قيم هذا المقطع σ′ = 132.9 kPa و f = 63.7 kPa و Q_{s3} = 160 kN. أما **سقف L′** فيُنقص **69 kN** من الجزء العميق من طبقة الرمل.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

في الطين أيضاً، تختار كل طبقة طريقتها الخاصة

النظرية

في طبقة الطين يقاوم الجذع **بالالتصاق** أو **بالإجهاد الفعال**؛ ويمكن استخدام طرق وحدة الطين الثلاث لكل طبقة:

$$\alpha:\ f = \alpha_i c_{u,i} \qquad \lambda:\ f_i = \lambda\,(\bar{\sigma}'_i + 2c_{u,i}),\ \lambda = \lambda(L)$$

$$\beta:\ \beta_i = (1-\sin\varphi'_{R,i})\tan\varphi'_{R,i}\sqrt{OCR_i},\quad f_i = \beta_i\bar{\sigma}'_i$$

α: لا يعتمد على العمق داخل الطبقة؛ فالاحتكاك ثابت على امتداد الطبقة (منتظم).

يعيد **λ و β** الإجهاد الفعال؛ ويشكلان **درجة** تبعاً للطبقات العلوية.

ملاحظة صادقة

صاغ Vijayvergiya و Focht المعامل λ بوصفه **متوسطا واحدا للطول المدفون كله**. أما تطبيقه على كل طبقة طينية على حدة في القطاع المتعدد الطبقات (λ على الطول L، وبالمتوسط σ′ وقيمة c_u لتلك الطبقة) فهو **امتداد للطريقة خاص بهذا البرنامج**؛ وتنص الوحدة على ذلك في كل موضع.

تدخل φ'_R و OCR **إدخالاً** ولا تقرأ من التربة بعلاقة ارتباط (تفتح الوحدة بالقيمتين 30° و 1).

المسألة

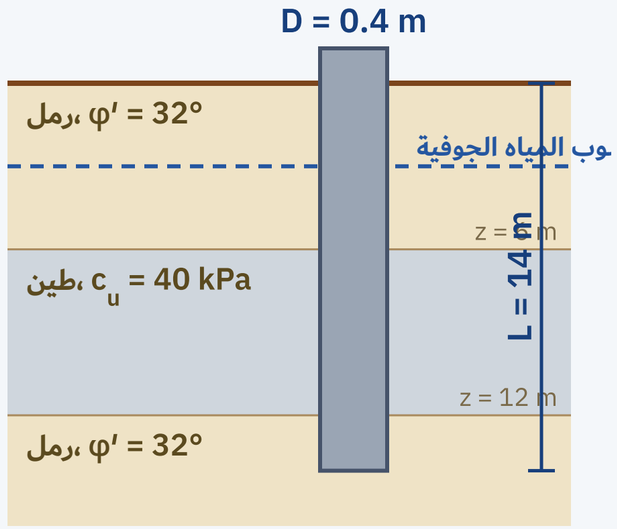
مثال

المعطيات

رمل 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
طين (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
رمل 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
الوزن الحجمي	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(ثلاث طبقات)**
المياه الجوفية	**على عمق 3.0 m**
الخازوق	**مدقوق، D = 0.4 m، L = 14 m، p = 1.257 m**
متوسط σ′ للطين	$\bar{\sigma}'_2 = A_{6-12}/6 = 100.1$ kPa **(المثال 1)**
من أجل β	$\varphi'_R = 30^\circ,\ OCR = 1$
من أجل α	$p_a = 100$ kPa، **α من الجدول**

المطلوب

أوجد مقاومة الجذع لطبقة الطين (6–12 m) بطرق **α و λ و β**.



الحل (1/2)

الحل

1 طريقة α: قيمة α من الجدول عند $c_u/p_a = 0.4$

$$\alpha = 0.74 \quad f = \alpha c_u = 0.74(40) = 29.6 \text{ kPa} \quad Q_s = 1.2566(29.6)(6) = \mathbf{223.2} \text{ kN}$$

2 طريقة λ: تؤخذ λ من الجدول بحسب **طول الخازوق** (L = 14 m) ($\lambda_{10} = 0.245$؛ $\lambda_{15} = 0.200$)

$$\lambda = 0.209$$

$$f = \lambda(\bar{\sigma}'_2 + 2c_u) = 0.209(100.1 + 2(40)) = 37.6 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(37.6)(6) = \mathbf{283.9} \text{ kN}$$

الحل (2/2)

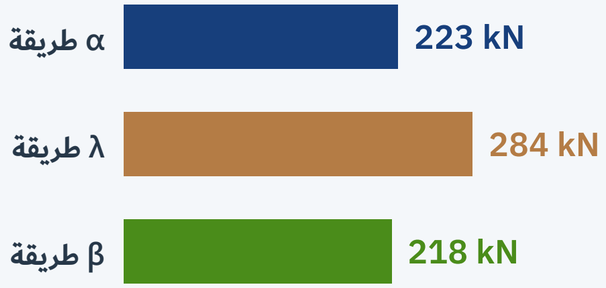
الحل

3 طريقة β: $\varphi'_R = 30°$، OCR = 1

$$\beta = (1 - \sin 30^\circ)\tan 30^\circ = 0.289$$

$$f = \beta \bar{\sigma}'_2 = 0.289(100.1) = 28.9 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(28.9)(6) = \mathbf{218.0} \text{ kN}$$



تعطي الطرائق الثلاث لطبقة الطين نفسها **223**، **284** و **218 kN**: قيمتا α و β متقاربتان، بينما λ أعلى بنحو 27%. ويعود الفرق إلى الفرضيات التي تستند إليها الطرائق؛ كما أن استخدام λ لكل طبقة امتداد إضافي.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النظرية

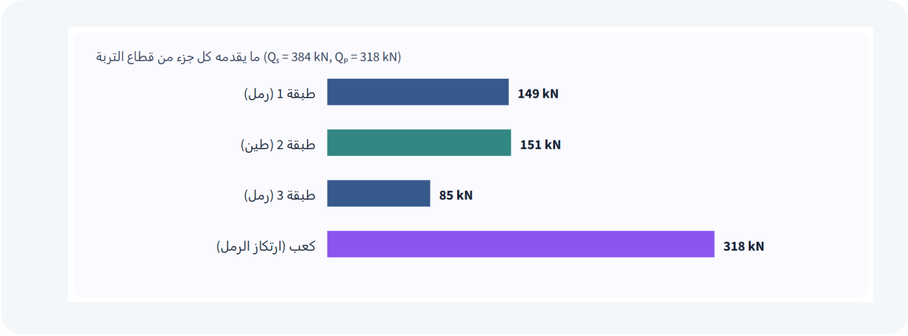
تكامل واحد: على طول الخازوق

مقاومة الجذع هي حاصل ضرب تكامل الاحتكاك على طول الخازوق في المحيط. ويجرى الحساب عددياً؛ ويمكن أن يقع الحد **في أي موضع**، ولا يتطلب الخازوق المنتهي في منتصف الطبقة حالة خاصة:

$$Q_s = p \int_0^L f(z)\,dz \;\approx\; p \sum f_i\,\Delta z_i$$

بهذا المنظور لا تعود الطبقية مشكلة بل تتحول إلى **سؤال تصميمي**: **أي جزء** من القطاع يحمل الخازوق؟

كيف تتغير القدرة إذا مُدّ الخازوق إلى ما بعد الحد التالي أو قُصّر؟



مساهمة كل جزء من أجزاء خازوق المثال (Q_s = 475 kN، Q_p = 318 kN).

المسألة

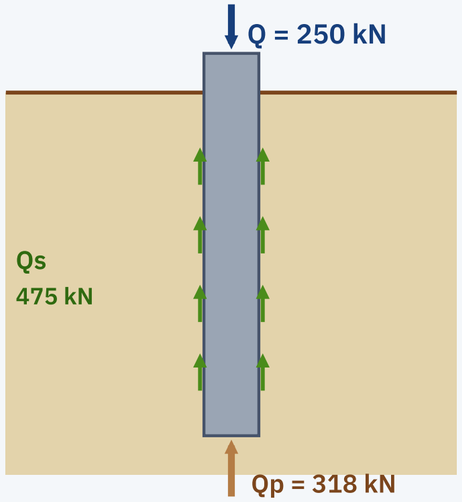
مثال

المعطيات

مقاومة الإرتكاز	$Q_p = 318.0$ kN (المثال 2)
رمل 1 (0–6 m)	$Q_{s1} = 160.4$ kN (المثال 4)
طين (6–12 m)	$Q_{s2} = 223.2$ kN (طريقة α، المثال 5)
رمل 2 (12–14 m)	$Q_{s3} = 91.0$ kN (المثال 4)
معامل الأمان	FS = 3
حمل التشغيل الواقع على الخازوق	Q = 250 kN

المطلوب

أوجد قدرة التحمل **القصوى** و**المسموح بها** للخازوق؛ هل حمل التشغيل كاف؟



الحل

الحل

1 مقاومة الجذع: مجموع الأجزاء

$$Q_s = 160.4 + 223.2 + 91.0 \approx \mathbf{474.5}\ \text{kN}$$

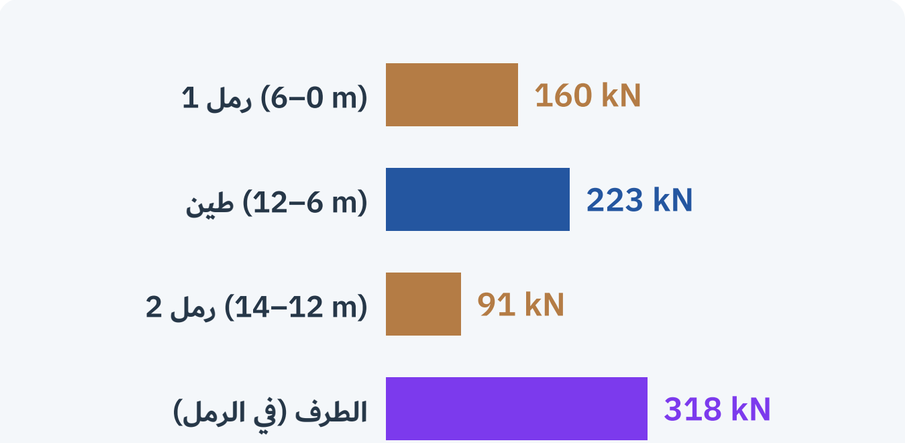
2 قدرة التحمل القصوى

$$Q_u = Q_p + Q_s = 318.0 + 474.5 = \mathbf{792.6}\ \text{kN}$$

3 قدرة التحمل المسموح بها والتحقق

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{792.6}{3} = \mathbf{264.2}\ \text{kN}$$

$$Q = 250 \le 264.2 \ \Rightarrow \ \text{كافٍ}$$



نسبة الاستخدام 0.95. تشكل طبقة الطين 43% فقط من طول الخازوق، لكنها تعطي 47% من مقاومة الجذع: فبعد العمق الحرج يتوقف الرمل عن اكتساب σ'، بينما يعطي الطين القيمة $\alpha\, c_u$ نفسها عند كل عمق.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

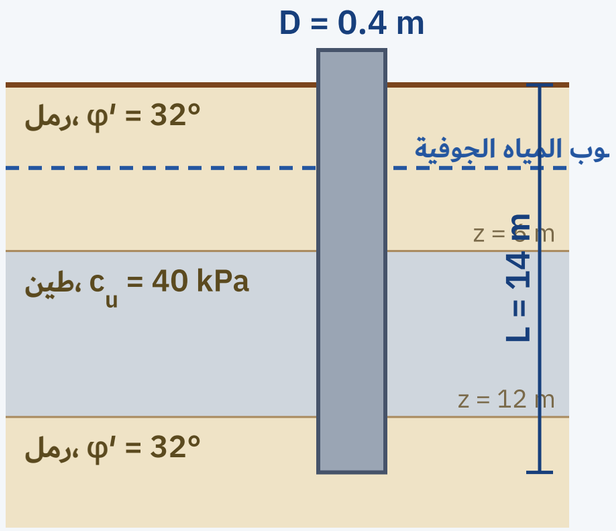
مثال

المعطيات

رمل 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
طين (6–12 m)	$c_u = 40$ kPa
رمل 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
الوزن الحجمي	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(ثلاث طبقات)**
المياه الجوفية	**على عمق 3.0 m**
الطرق	**مدقوق، D = 0.4 m؛ Meyerhof، α، K–δ**
الأطوال	**L = 10 و 12 و 14 و 16 m**
المعطيات	**المثال 2–6 من أجل L = 14 m**

المطلوب

كيف تتغير Q_u إذا كان طول الخازوق **10 و 12 و 16 m**؟ اشرح **سبب** التغير.



الحل (1/2)

الحل

1 L = 10 m: الإرتكاز في الطين (المثال 3)؛ مقطع الطين من 6 إلى 10 m فقط

$$Q_p = 45.2\ ; \quad Q_s = 160.4 + 148.8 = 309.2\ ; \quad Q_u = \mathbf{354.4}\ \text{kN}$$

2 L = 12 m: الطرف تماماً عند الحد ← **يرتكز على الرمل السفلي**؛ ولا يدخل الرمل 2 بعد في الجذع

$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 = 383.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{701.6}\ \text{kN}$$

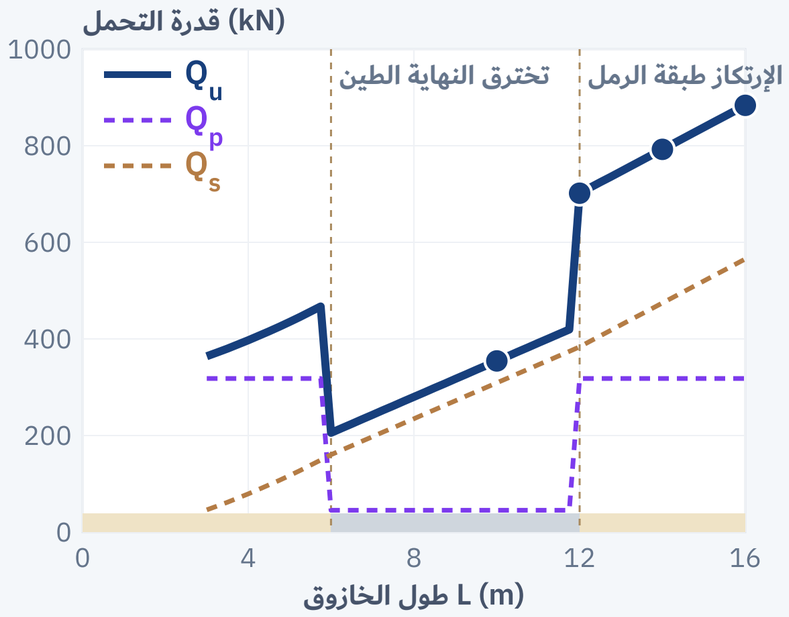
3 L = 16 m: تُضاف الرملة 2 إلى الجذع بسماكة أربعة أمتار (σ′ مقيّد: f ثابت)

$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 + 182.0 = 565.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{883.6}\ \text{kN}$$

الحل (2/2)

الحل

L (m)	طبقة الطرف	Q_p (kN)	Q_s (kN)	Q_u (kN)	Q_{all} (kN)
10	طين	45	309	**354**	118
12	رمل	318	384	**702**	234
14	رمل	318	475	**793**	264
16	رمل	318	566	**884**	295



10 m → 12 m: تزداد القدرة بمقدار (98%) **347 kN**: منها 273 kN **من دخول الطرف في الرمل.** وبعد 12 m يضيف كل متر نحو 45 kN فقط. وفي القطاع الطبقي فإن ما يحدد طول الخازوق هو **الطبقة التي ينتهي فيها الطرف.**

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

تسري قواعد الخازوق المحفور أيضاً على القطاع المختلط

النظرية

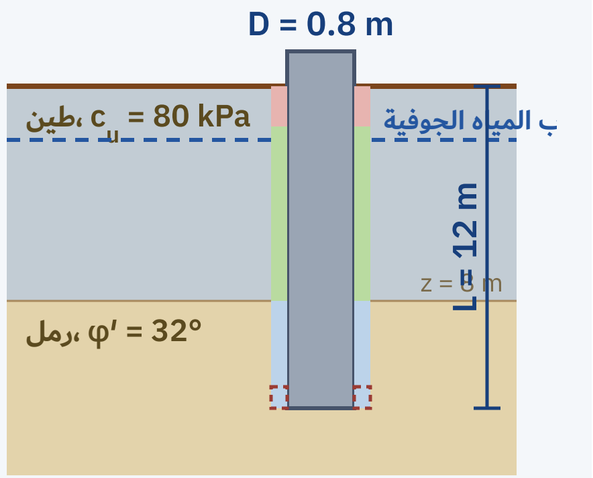
يحفر الثقب وتصب الخرسانة: فلا تزاح التربة، ويلين الطين على جدار الثقب، وقد يتراكم فتات الحفر تحت القاع. وفي القطاع المختلط يطبق كل نصف من الإجراء **في الموضع الذي يخصه**:

طبقات الطين (α): $\alpha^* = 0.55\ (c_u/p_a \le 1.5)$؛ و$\alpha^* = 0$ في **أعلى 1.5 m وفي أسفل 1D**. تخص النافذة **α وحدها** ولا تنتقل إلى λ و β.

طبقات الرمل تحتفظ بصيغتها الخاصة K–δ أو Coyle–Castello؛ وتكون K في حدود **$K_0 = 1 - \sin\varphi'$** لأن التربة لا تزاح عند الحفر.

إذا كان **طرف الخازوق** في الطين فتستخدم علاقة Reese–O'Neill: $q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b),\ 9c_{ub},\ 40p_a]$. وتمثل c_{ub} متوسط c_u على امتداد **$2D_b$** تحت الطرف؛ وإذا امتدت المنطقة عبر أكثر من طبقة فيكون المتوسط موزونا بالسماكة.

يجب أن تكون هذه المنطقة **طيناً بالكامل**: فإذا امتدت إلى الرمل، يتوقف البرنامج ويطلب اختيار Meyerhof أو Vesic.



الأحمر: α* = 0 (أعلى 1.5 m). الأخضر: α* = 0.55. الأزرق: K–δ في الرمل. الأحمر المتقطع: 1D في الأسفل، دون نافذة في الرمل.

المسألة

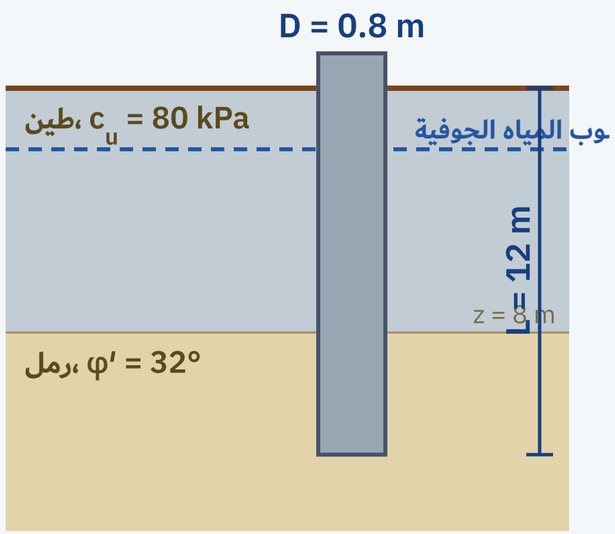
مثال

المعطيات

الخازوق	**خازوق محفور، مقطع دائري، D = 0.8 m، L = 12 m**
طين (0–8 m)	$c_u = 80$ kPa, $\gamma = \gamma_{sat} = 18$ kN/m^3
رمل (8–20 m)	$\varphi' = 32^\circ$, $\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3
المياه الجوفية	**على عمق 2.0 m**
للرمل	$K = K_0 = 0.47$, $\delta' = 0.75\varphi' = 24^\circ$
الطرف	**Meyerhof؛ FS = 3**

المطلوب

أوجد **مقاومة الإرتكاز** و**مقاومة الجذع** و**قدرة التحمل المسموح بها** للخازوق المحفور.



الحل (1/3)

الحل

1 طبقة الطين: α* والنافذة (تُستبعد 1.5 m العلوية و 1D = 0.8 m السفلية: 1.5 → 12 − 0.8 = 11.2 m)

$$\alpha^* = 0.55 \ (c_u/p_a = 0.8 \le 1.5) \qquad L_{eff} = 8 - 1.5 = \mathbf{6.5}\ \text{m}$$

2 احتكاك ومقاومة الوحدة

$$f = \alpha^* c_u = 0.55(80) = 44.0\ \text{kPa} \qquad Q_{s1} = \pi(0.8)(44.0)(6.5) = \mathbf{718.8}\ \text{kN}$$

الحل (2/3)

الحل

3 طبقة الرمل (8–12 m): قاعدة K–δ الخاصة بها؛ $L' = \min(15D;\, L) = \min(12;\, 12) = 12$ m، أي لا يوجد حد أقصى داخل الطبقة

$$\sigma'(8) = 85.1\ ;\ \sigma'(12) = 121.9\ \text{kPa} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{414.1}{4} = 103.5\ \text{kPa}$$

4 احتكاك ومقاومة الوحدة

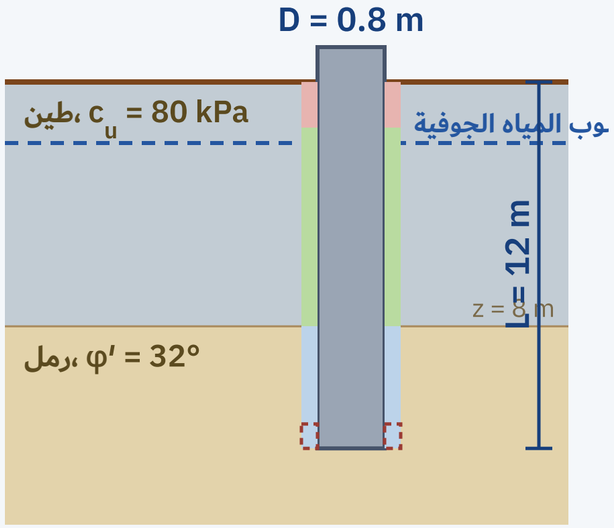
$$f = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}' = 0.47 \tan 24^\circ (103.5) = 21.7\ \text{kPa}$$

$$Q_{s2} = \pi(0.8)(21.7)(4) = \mathbf{217.8}\ \text{kN}$$

يقع **الجزء السفلي 1D** من نافذة α (11.2 – 12 m) ضمن طبقة الرمل؛ ولما كانت النافذة تخص α، فإن الرمل يحتفظ باحتكاكه على امتداد هذا الطول البالغ 0.8 m أيضاً.

الحل (3/3)

الحل



5 الطرف في الرمل ← قاعدة الرمل (Meyerhof)؛ لا تخفيض إضافي بسبب الحفر، وتستخدم قيمة φ′ المدخلة

$$q' = \sigma'(12) = 121.9 \text{ kPa} \qquad N_q^* = 81$$

$$q' N_q^* = 9{,}874 > q_l = 2{,}531 \text{ kPa} \Rightarrow q_p = 2{,}531 \text{ kPa}$$

$$Q_p = A_p q_p = 0.5027(2{,}531) = \mathbf{1{,}272} \text{ kN}$$

6 قدرة التحمل الكلية والمسموح بها

$$Q_s = 718.8 + 217.8 = \mathbf{936.6} \text{ kN}$$

$$Q_u = 1{,}272 + 937 = 2{,}209 \text{ kN}$$

$$Q_{all} = \frac{2{,}209}{3} = \mathbf{736} \text{ kN}$$

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

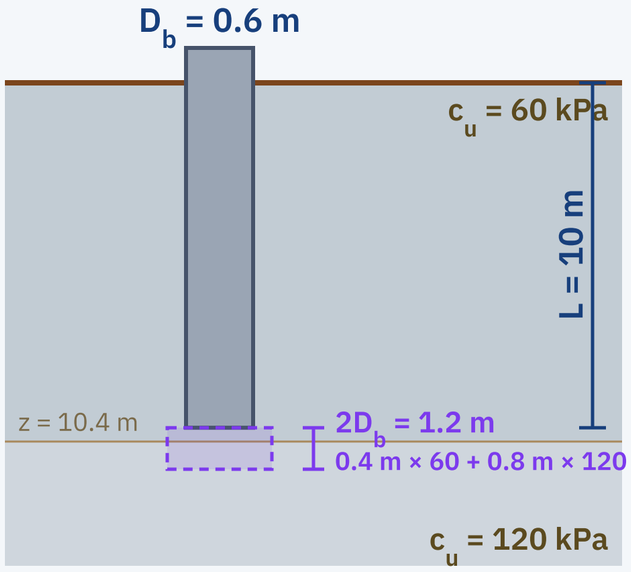
مثال

المعطيات

الخازوق	خازوق محفور، $D_b = D = 0.6$ m، $L = 10$ m
طين 1 (0–10.4 m)	$c_u = 60$ kPa
طين 2 (10.4–20 m)	$c_u = 120$ kPa
القاع	Reese–O'Neill؛ $p_a = 100$ kPa

المطلوب

أوجد c_{ub} في المنطقة $2D_b$ الواقعة تحت قاع الخازوق، وقيمتي q_p و Q_p.



الحل

الحل

1 المنطقة 10 → $2D_b$ = 11.2 m + 10؛ الحد عند 10.4 m: متوسط موزون بالسماكة

$$c_{ub} = \frac{60(0.4) + 120(0.8)}{1.2} = \mathbf{100}\ \text{kPa}$$

2 أصغر القيم الثلاث

$$6c_{ub}\left(1 + 0.2\,\frac{L}{D_b}\right) = 2{,}600\ ; \quad 9c_{ub} = 900\ ; \quad 40p_a = 4\,000 \ \Rightarrow \ q_p = \mathbf{900}\ \text{kPa}$$

3 مساحة القاعدة ومقاومة الإرتكاز

$$A_b = \frac{\pi(0.6)^2}{4} = 0.2827\ \text{m}^2 \qquad Q_p = 0.2827(900) = \mathbf{254.5}\ \text{kN}$$

لو أخذت قيمة c_u = 60 kPa عند الطرف وحدها لكانت Q_p = 152.7 kN: فالطين الصلب في الأسفل يعطي قيمة أكبر بنسبة **67%**.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

معامل أمان واحد، لكن عدم اليقين كبير

النظرية

قدرة التحمل القصوى هي مجموع المكونين؛ وتوجد القدرة المسموح بها بتطبيق **معامل أمان واحد على المجموع كله:**

$$Q_{all} = \frac{Q_p + Q_s}{FS}$$

لخازوق مفرد، القيمة المعتادة **FS = 2.5 – 4**.

الطرف الأعلى: حين يكون القطاع معروفاً **بعدد قليل من الجسات**. والقطاع الطبقي هو هذه الحالة تماماً: فبين الجسات تكون **الحدود أكثر المواضع عدم يقين**، وقد أظهر المثال أعلاه مقدار ما يغيره متر واحد في موضع الحد من القدرة.

موضوعان يتطلبان حسابين منفصلين

في القطاع المتعدد الطبقات، بمعزل عن حساب القدرة:

هبوط طبقة رخوة وتعلقها بالخازوق في صورة **احتكاك جذع سلبي**

الهبوط الذي تحدده الطبقة القابلة للانضغاط تحت الطرف

القواعد حسب الطبقة والتركيب

النظرية

الطبقة	الجذع (Q_s)	الطرف (Q_p): طبقة الطرف
رمل	$K–\delta$ (L′ = 15D، قيمة واحدة لكامل الخازوق) أو Coyle–Castello ($K \sigma' \tan 0.8\varphi'$)	$q'N^*_q \le q_l$ (Meyerhof), Vesic, Coyle–Castello
طين	$\alpha \cdot \lambda$ (لكل طبقة: الامتداد) · β	$9c_u$ (Meyerhof) · $N^*_c(I_{rr})$ (Vesic)
محفور، طين	$\alpha^* = 0.55$؛ أعلى 1.5 m وأسفل 1D = 0	Reese–O'Neill: متوسط $c_{ub} = 2D_b$
محفور، رمل	$K \approx K_0 = 1 - \sin\varphi$′؛ لا يتم تطبيق النافذة	$q'N^*_q$ (قيمة φ' المدخلة)

كل صف اختيار منفصل للطبقة المعنية؛ ويستخدم **في الخازوق نفسه** كل من قاعدة الرمل وقاعدة الطين.

النقاط الرئيسية

يتراكم الإجهاد الفعال **عبر الطبقات** وهو مستمر؛ أما الاحتكاك الوحدوي فإنه **يقفز عند الحدود**

يحسب **الطرف** وفق قاعدة الطبقة التي يقع فيها الطرف وحدها؛ والطرف الواقع على الحد الفاصل يعد مستقراً في الطبقة **السفلية**

الرمل: $f' = K\sigma'\tan\delta$ و**$L' = 15D$ تخص الخازوق كله** · **الطين**: λ، α (امتداد واحد لكل طبقة)، β

الجذع هو مجموع الطبقات: $Q_s = p\Sigma f_i \Delta z_i$؛ والذي يحدد الطول هو الطبقة التي ينتهي فيها طرف الخازوق

الخازوق المحفور: نافذة α^* مخصصة للطين/α فقط؛ وإذا كان طرف الخازوق في طين فتؤخذ c_{ub} على امتداد $2D_b$ (وقد تشمل عدة طبقات)

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$، $FS = 2.5 - 4$؛ وللأعمال الكبيرة **اختبار التحميل**

المراجع

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228.

Vesic, A.S. (1977). Design of Pile Foundations. NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. Wiley — قيم α في الجدول 2.

Coyle, H.M. and Castello, R.R. (1981). New design correlations for piles in sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(GT7), 965–986.

Vijayvergiya, V.N. and Focht, J.A. (1972). A new way to predict capacity of piles in clay. Offshore Technology Conference Paper 1718, Houston.

O’Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025 — the drilled-shaft α of a bored pile.

Reese, L.C. and O’Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA — المعادلة الأساسية للركيزة المحفورة في الطين.

Burland, J.B. (1973). Shaft friction of piles in clay — a simple fundamental approach. Ground Engineering, 6(3), 30–42.

Mansur, C.I. and Hunter, A.H. (1970). Pile tests, Arkansas River project. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1545–1582.

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, which brings these methods together in the form this page follows.

ملاحظة

أُخذت أشكال هذا العرض التقديمي من صفحة النظرية في GeoTerva؛ أما الأمثلة العددية جميعها فقد أُنتجت بقواعد الحساب والمكتبة الخاصة بالوحدة، وتعطي الوحدة القيم نفسها.

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

احسب الخازوق الوارد في هذا العرض خطوة بخطوة في GeoTerva: فالأرقام نفسها.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.

إذا رغبت في استخدامها في محاضراتك: info@geoterva.com