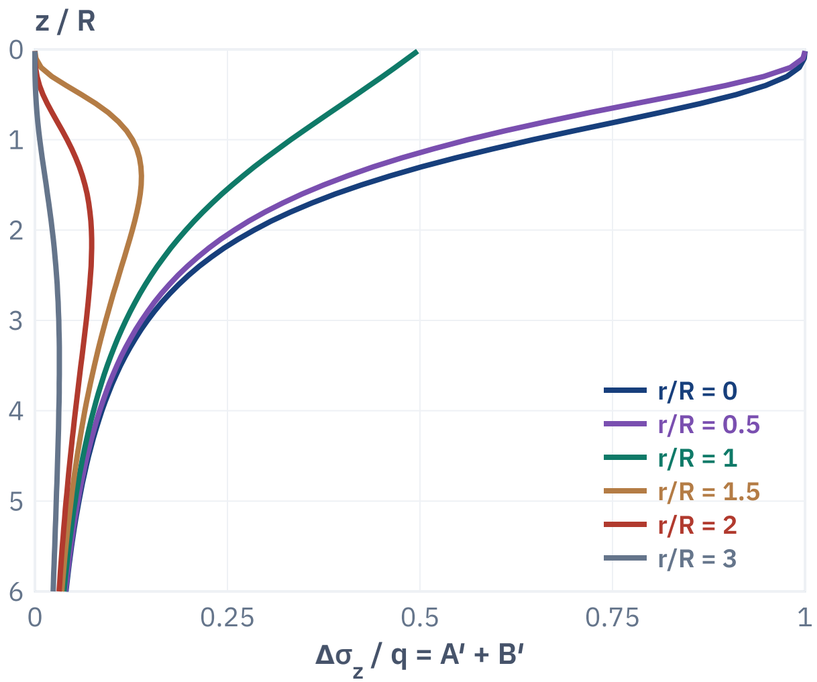
GeoTerva



شرائح محاضرات الجيوتكنيك · الإجهادات في التربة

الإجهاد تحت حمل دائري

المحاضرة: الإجهاد الرأسي تحت حمل دائري؛ تعبير مغلق على المحور، و A′ + B′ خارج المحور؛ أمثلة محلولة يدوياً.

على المحور · A′ + B′ · التكامل القطبي · خارج الحمل · دوائر متعددة

يستند إلى صفحة النظرية في GeoTerva · geoterva.com

ماذا سنتعلم في هذه المحاضرة؟

الزيادة في الإجهاد الرأسي تحت **مساحة دائرية** محملة بحمل منتظم التوزيع (خزان، صومعة، قاعدة دائرية): $\Delta\sigma_z$

على محور الدائرة التعبير المغلق: $\Delta\sigma_z = q\{1 - 1/[(R/z)^2 + 1]^{3/2}\}$

لامركزياً، وتحت الحافة وبجانبها: $\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$؛ ويعتمد $A' + B'$ على z/R وr/R فقط

إجراء تكامل Boussinesq **بالإحداثيات القطبية عند النقطة A**: تكامل ρ بصيغة مغلقة، وتكامل φ عددياً

أن الإجهاد خارج الحمل **يزداد أولاً ثم يتناقص**؛ وأن إجهادات عدة دوائر **تُجمع**

تسلسل المحاضرة

يعالج كل موضوع في **ثلاث خطوات**:

1 · **النظرية**: المعادلة ومبرراتها

2 · **المسألة**: المعطيات والمطلوب

3 · **الحل**: خطوة بخطوة، بالأرقام

المثال الدائري: $R = 3\ m$، $q = 100\ kN/m^2$؛ والنقطة A على بعد $r = 4.5\ m$ من محور الدائرة وعلى عمق $z = 3\ m$ (خارج منطقة الحمل).

مساحة دائرية محملة بحمل منتظم

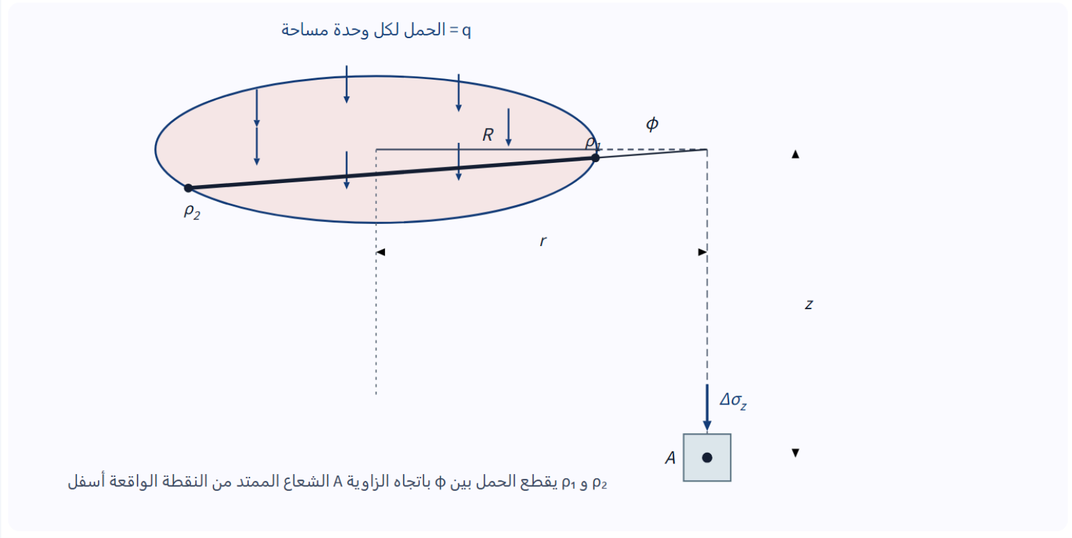
النظرية

مساحة دائرية مرنة نصف قطرها **R** تحمل ضغطاً منتظماً **q** (خزان، صومعة، أساس دائري)

التربة وسط شبه لانهائي **متجانس ومتماثل الخواص ومرن خطياً**؛ و $\Delta\sigma_z$ هي الزيادة الناتجة عن الحمل وحده

المسألة **متناظرة محورياً**: يعتمد الإجهاد على المسافة الأفقية **r** من المركز وعلى العمق **z** فقط، لا على الاتجاه

توجد **صيغة مغلقة** تحت المركز (r = 0)؛ أما خارج المحور، تحت الحافة وبجانبها، فقد حسب Ahlvin و Ulery (1962) التكامل ودونا قيمه في جداول بوصفها **A′ و B′**



أسفل مركز الدائرة: حل مغلق

النظرية

$$\Delta\sigma_z = q\left\{1 - \frac{1}{[(R/z)^2 + 1]^{3/2}}\right\}$$

عند السطح ($z \to 0$) يكون $\Delta\sigma_z = q$؛ و**يتناقص في اتجاه واحد** مع العمق ويؤول إلى الصفر عند الأعماق الكبيرة

يعتمد الإجهاد على نسبة **R/z** فقط: فعند نفس القيمة z/R تعطي الدائرة الكبيرة والدائرة الصغيرة القيمة نفسها لـ $\Delta\sigma_z/q$

عمق التأثير

z/R	$\Delta\sigma_z/q$
1.30	0.50
2.50	0.20
3.71	0.10
5.36	0.05

ينخفض الإجهاد عند عمق 3.7R إلى عُشر قيمته عند السطح فقط.

$\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$

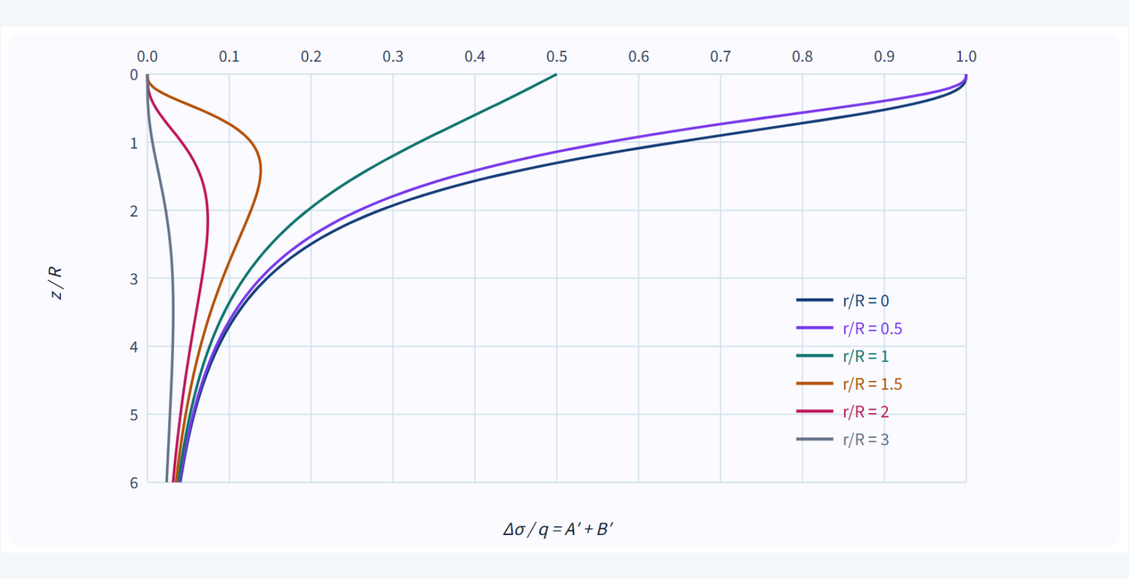
النظرية

$$\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$$

A′ و B′ جزءان يتوقفان على النسبتين **z/R** و **r/R**؛ وينشأ الجزءان من تجزئة التكامل، ولا يلزم لحساب $\Delta\sigma_z$ إلا **مجموعهما**

على المحور (r = 0) تؤول إلى صيغة مغلقة كاملة؛ و**تحت الحافة** (r/R = 1) تبدأ من 0.5 عند السطح

بجانب الحمل تبدأ القيمة من الصفر، وتزداد أولاً ثم تتناقص



التكامل القطبي حول النقطة

النظرية

لا يجرى استيفاء بين الجداول: إذ يكامل حل Boussinesq مباشرة على الدائرة في الإحداثيات القطبية **ρ, φ** التي مركزها النقطة الواقعة تحت النقطة A

في كل اتجاه φ يقطع الشعاع الدائرة المحملة بين **ρ_1** و **ρ_2** (وتكون $\rho_1 = 0$ إذا كانت A تحت الحمل)؛ وعنصر الحمل هو q ρ dρ dφ

$$d\sigma_z = \frac{3q}{2\pi}\,\frac{z^3\,\rho}{(\rho^2+z^2)^{5/2}}\,d\rho\,d\varphi$$

$$\int_{\rho_1}^{\rho_2}\frac{3z^3\rho\,d\rho}{(\rho^2+z^2)^{5/2}} = \frac{z^3}{(\rho_1^2+z^2)^{3/2}} - \frac{z^3}{(\rho_2^2+z^2)^{3/2}}$$

A′ + B والمجموع العددي

النظرية

$$A' + B' = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\frac{z^3}{(\rho_1^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{z^3}{(\rho_2^2 + z^2)^{3/2}} \right] d\varphi$$

$$\rho_{1,2} = -r \cos\varphi \mp \sqrt{R^2 - r^2 \sin^2\varphi}$$

الدالة المكاملة في تكامل φ المتبقي مستمرة، وتجمع عددياً على **2880 اتجاهاً**؛ وعند r = 0 تصبح $\rho_1 = 0$ و $\rho_2 = R$، وتعود العبارة إلى **الحل المغلق**

قيم A′ + B

z/R	r/R	A′ + B
1.0	1.0	0.33224
1.0	1.5	0.12664
2.0	0.4	0.26781
2.0	2.0	0.07334
0.5	0.8	0.64625
4.0	1.5	0.06487

التراكب

النظرية

تتحدد كل دائرة بقيمتي **q و R** الخاصتين بها وبمركزها على سطح الأرض (x_L, y_L) (حتى ثماني دوائر في الوحدة)

يمكن أن **تتلامس الدائرتان دون أن تتداخلا:** المسافة بين المركزين لا تقل عن $R_1 + R_2$

ولأن التربة مرنة يوجد إجهاد كل دائرة بـ **المسافة r الخاصة بها من النقطة A إلى مركز تلك الدائرة**، ثم تجمع الإجهادات

$$\Delta\sigma_z = \sum_k q_k \, (A' + B')_k \qquad r_k = \sqrt{(x - x_{L,k})^2 + (y - y_{L,k})^2}$$

المسألة

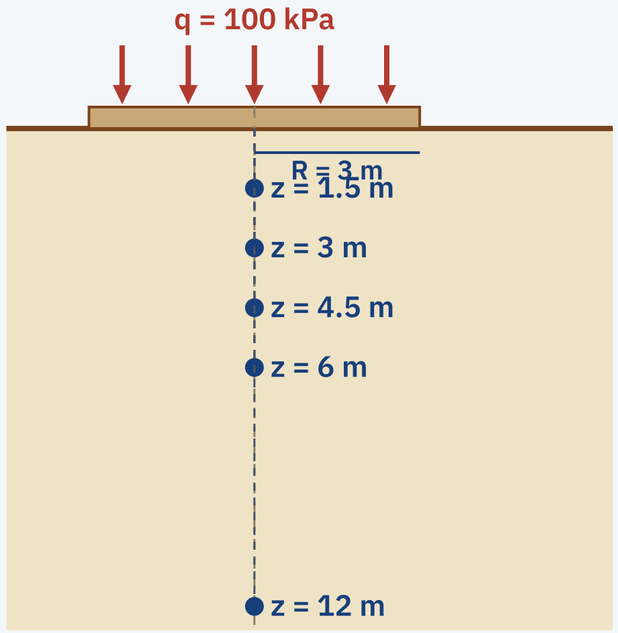
مثال

المعطيات

الدائرة	مرن، $R = 3$ m، $q = 100$ kN/m²
النقاط	على محور الدائرة ($r = 0$): $z = 1.5$؛ 3؛ 4.5؛ 6؛ 12 m

المطلوب

$\Delta\sigma_z$ بالتعبير المغلق (مفصلاً أولاً عند $z = 1.5$ m)، **$A' + B'$**؛ والعمق الذي يكون عنده $\Delta\sigma_z = 0.10\,q$.



الحل (1/3)

الحل

1 النسب

$$R/z = 3/1.5 = 2 \qquad (R/z)^2 + 1 = 4 + 1 = \mathbf{5}$$

2 الأس والقيمة المعكوسة

$$5^{3/2} = 11.1803 \qquad 1/11.1803 = 0.08944$$

3 الإجهاد الرأسي

$$\Delta\sigma_z = q\,(1 - 0.08944) = 100\,(0.91056) = \mathbf{91.06}\ \text{kPa}$$

عند العمق z = 1.5 m يكون **A′ + B′ = 0.91056** و**$\Delta\sigma_z$ = 91.06 kPa**: أي ينتقل 91.1% من حمل السطح.

الحل (2/3)

الحل

$\Delta\sigma_z$ (kPa)	$[\dots]^{3/2}/1 - 1$	$[\dots]^{3/2}$	$1 + (R/z)^2$	z/R	z (m)
91.06	0.91056	11.1803	5.000	0.50	1.5
64.64	0.64645	2.8284	2.000	1.00	3.0
42.40	0.42397	1.7360	1.444	1.50	4.5
28.45	0.28446	1.3975	1.250	2.00	6.0
8.69	0.08692	1.0952	1.062	4.00	12.0

على المحور يتناقص الإجهاد في اتجاه واحد: **91.1** → (z = 1.5 m → 12 m) **8.7 kPa**. وصف z = 1.5 m هو الحساب المحلول يدوياً؛ ويحصل على كل صف بالعبارة نفسها. عند z = 3 m يبلغ الإجهاد نحو 65% من الحمل على السطح، وعند z = 12 m يبلغ 9%.

الحل (3/3)

الحل

4 العمق الذي يكون عنده $\Delta\sigma_z = 0.10\,q$

$$\left[(R/z)^2+1\right]^{3/2} = 1/0.90 \;\Rightarrow\; (R/z)^2 = 1.0728 - 1 = 0.0728$$

$$z/R = 1/\sqrt{0.0728} = \mathbf{3.707} \;\Rightarrow\; z = 3\,(3.707) = \mathbf{11.12}\ \text{m}$$

العمق الذي يكون عنده $\Delta\sigma_z = 0.10\,q$ هو $(z/R = 3.707)$ **11.12 m**: وعند هذا العمق ينخفض الإجهاد على المحور إلى عُشر الحمل السطحي. أما نصف القيمة $(0.50\,q)$ فعند $z/R = 1.305$، أي عند 3.91 m.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

مثال

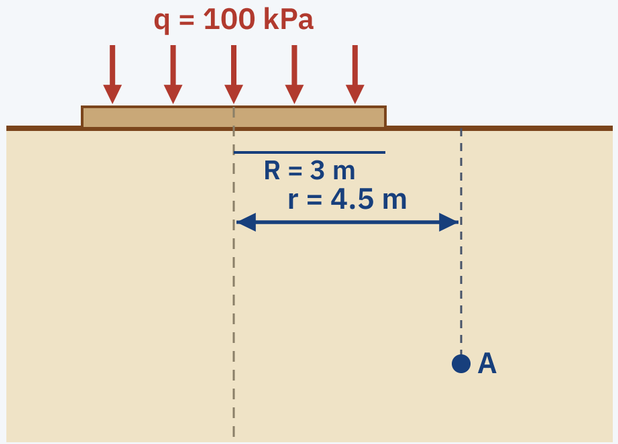
المسألة

المعطيات

الدائرة	مرن، $R = 3$ m، $q = 100$ kN/m²
النقطة A	على مسافة $r = 4.5$ m من المركز ($r/R = 1.5$)؛ خارج الحمل، و$z = 3$ m ($z/R = 1$)
الطريقة	التكامل القطبي: أولاً يدوياً، اتجاه $N = 36$؛ ثم اتجاهات الوحدة البالغة 2880 اتجاهاً

المطلوب

A′ + B′ و**$\Delta\sigma_z$**؛ تأثير عدد الاتجاهات على النتيجة.



الحل (1/3)

الحل

1 المسافات التي يقطع عندها الشعاع الدائرة

$$\rho_{1,2} = -r\cos\varphi \mp \sqrt{R^2 - r^2\sin^2\varphi} = -4.5\cos\varphi \mp \sqrt{9 - 20.25\sin^2\varphi}$$

2 في أي الاتجاهات يصطدم الشعاع بالدائرة؟

$$R^2 - r^2\sin^2\varphi \geq 0 \;\Rightarrow\; |\sin\varphi| \leq R/r = 0.6667 \quad \text{و} \quad \rho > 0 \;\Rightarrow\; \cos\varphi < 0$$

نظراً لأن A يقع خارج الدائرة، فإن الاتجاهات المتجهة نحو الدائرة فقط هي التي تسهم: **°138.19 < φ < °221.81**.

لا يصطدم الشعاع بالدائرة إلا في المدى **°138.19 < φ < °221.81**. وإذا أخذت **N = 36** اتجاهاً فإن φ_i = 5°، 15°، 25°، ...؛ ولا يقع في هذا المدى منها سوى **8** اتجاهات: 145°، 155°، 165°، 175° ونظائرها المتماثلة 185°، 195°، 205°، 215°.

الحل (2/3)

الحل

3 مساهمة شعاع واحد والمتوسط

$$F(\rho) = \frac{z^3}{(\rho^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{27}{(\rho^2 + 9)^{3/2}} \qquad g(\varphi) = F(\rho_1) - F(\rho_2)$$

$$A' + B' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} g(\varphi_i) \qquad \varphi_i = \left(i - \tfrac{1}{2}\right) \frac{360^\circ}{N}$$

$g = F(\rho_1) - F(\rho_2)$	$F(\rho_2)$	$F(\rho_1)$	ρ_2	ρ_1	$R^2 - r^2 \sin^2\varphi$	$\cos\varphi$	$(^\circ)\ \varphi$
0.4112	0.1240	0.5352	5.2152	2.1571	2.3380	0.8192−	145
0.5657	0.0765	0.6422	6.3986	1.7582	5.3832	0.9063−	155
0.6334	0.0587	0.6921	7.1114	1.5820	7.6435	0.9659−	165
0.6611	0.0520	0.7131	7.4571	1.5086	8.8462	0.9962−	175

الأشعة 185° و 195° و 205° و 215° هي نظائر متماثلة للأشعة 175° و 165° و 155° و 145°: وتعطي قيم g نفسها. g(145°) = 0.4112 و g(175°) = 0.6611.

الحل (3/3)

الحل

4 المجموع (N = 36)

$$\sum g = 2\,(0.4112 + 0.5657 + 0.6334 + 0.6611) = 4.5427$$

$$A' + B' \approx \frac{4.5427}{36} = 0.12619 \quad \Rightarrow \quad \Delta\sigma_z \approx 100\,(0.12619) = \mathbf{12.62}\ \text{kPa}$$

5 يتقارب الناتج كلما ازداد عدد الاتجاهات

N	6	12	24	36	72	180	720	2880
$\Delta\sigma_z$ (kPa)	16.856	10.556	13.200	12.619	12.541	12.688	12.667	12.664

تستخدم الوحدة **2880 اتجاهاً**: **$\Delta\sigma_z$ = 12.664 kPa**، **A′ + B′ = 0.12664**. والقيمة المجدولة للنقطة نفسها 0.12663؛ ويختلف عنها الناتج اليدوي عند استخدام 36 اتجاهاً (12.62) بنسبة 0.4% فقط.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

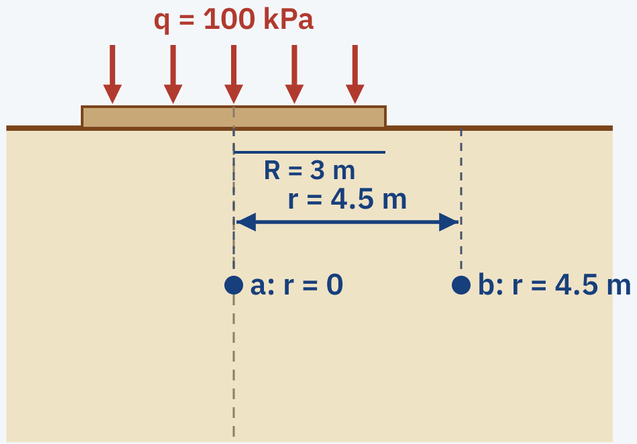
مثال

المعطيات

الدائرة	مرن، $R = 3$ m، $q = 100$ kN/m²
النقاط	(أ) المحور، $r = 0$؛ (ب) $r = 4.5$ m $(r/R = 1.5)$
الأعماق	$z = 1.5$; 3; 4.5; 6; 12 m

المطلوب

$\Delta\sigma_z$ على كلا الخطين؛ و**أكبر إجهاد** وعمقه على الخط (b).



الحل (1/3)

الحل

$\Delta\sigma_z$ (kPa) (b)	′A′ + B (b)	$\Delta\sigma_z$ (kPa) (a)	′A′ + B (a)	z/R	z (m)
6.04	0.06044	91.06	0.91056	0.50	1.5
12.66	0.12664	64.64	0.64645	1.00	3.0
13.79	0.13793	42.40	0.42397	1.50	4.5
12.65	0.12646	28.45	0.28446	2.00	6.0
6.49	0.06487	8.69	0.08692	4.00	12.0

المحور: 91.1 → 8.7 kPa، يتناقص في اتجاه واحد. **خارج الحمل (r = 4.5 m):** 6.49 → 13.79 → 6.04؛ **يزداد** أولاً ثم يتناقص: ينتشر الحمل جانبياً مع العمق.

كل صف هو قيمة ′A′ + B في الاتجاه 2880؛ وصف z = 3 m في العمود (b) هو نتيجة المثال 2.

الحل (2/3)

الحل

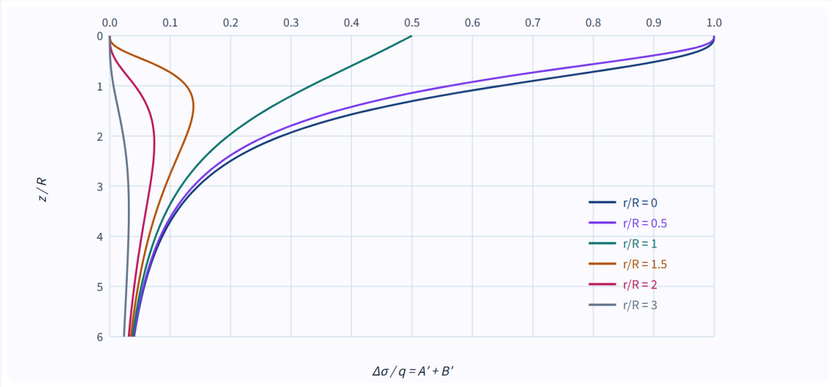
1 $A' + B$ على الخط $r/R = 1.5$، بدلالة العمق

z/R	z (m)	$A' + B$	$\Delta\sigma_z$ (kPa)
1.00	3.00	0.12664	**12.66**
1.20	3.60	0.13569	**13.57**
1.41	4.23	0.13833	**13.83**
1.60	4.80	0.13670	**13.67**
1.80	5.40	0.13238	**13.24**
2.00	6.00	0.12646	**12.65**

على الخط $r/R = 1.5$ يقع **أكبر إجهاد عند العمق** ($z/R = 1.41$) **$z \approx 4.23$ m** ويبلغ **13.83 kPa**: فخارج منطقة الحمل يبلغ الإجهاد قيمته العظمى على عمق معين ثم ينخفض.

الحل (3/3)

الحل



2 أقصى قيمة للخارج

r/R	أكبر قيمة للمقدار A′ + B′	العمق z/R
1.5	0.1383	1.41
2.0	0.0737	2.15
3.0	0.0317	3.48

كلما ابتعدت النقطة عن الدائرة صارت أكبر قيمة للإجهاد **أعمق وأصغر**: ففي r/R = 1.5 تكون z/R = 1.41، وفي r/R = 3 تكون z/R = 3.48.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

مثال

المعطيات

الجدول — قيم $A' + B'$: $z/R = 0.25$ ... 6؛ $r/R = 0$ ... 3

دائرة أخرى — $R = 5$ m، $q = 120$ kN/m²؛ النقطة $r = 7.5$ m، $z = 5$ m

المطلوب

جدول A′ + B′؛ في الدائرة الثانية $\Delta\sigma_z$ (من الجدول) وبالحساب المباشر.

الحل (1/2)

الحل

z/R \ r/R	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
0.25	0.9857	0.9658	0.4596	0.0142	0.0016	0.0001
0.50	0.9106	0.8396	0.4175	0.0604	0.0105	0.0010
1.00	0.6464	0.5622	0.3322	0.1266	0.0418	0.0062
1.50	0.4240	0.3750	0.2562	0.1379	0.0650	0.0146
2.00	0.2845	0.2589	0.1960	0.1265	0.0733	0.0225
3.00	0.1462	0.1384	0.1181	0.0919	0.0666	0.0309
4.00	0.0869	0.0840	0.0761	0.0649	0.0526	0.0311
6.00	0.0403	0.0396	0.0377	0.0349	0.0314	0.0236

عمود **r/R = 0** هو الحل المغلق؛ وعند **r/R = 1** تتجه القيمة إلى 0.5 عند الاقتراب من السطح (0.4596 عند z/R = 0.25)؛ وفي أعمدة **r/R ≥ 1.5** تزداد القيمة أولاً ثم تتناقص. وكل رقم في الجدول هو تكامل بعدد 2880 اتجاهاً.

الحل (2/2)

الحل

1 النسب

$$\frac{z}{R} = \frac{5}{5} = 1.0 \qquad \frac{r}{R} = \frac{7.5}{5} = 1.5$$

2 المعامل والإجهاد من الجدول

$$A' + B'\,(z/R = 1;\ r/R = 1.5) = 0.12664$$

$$\Delta\sigma_z = q\,(A' + B') = 120\,(0.12664) = \mathbf{15.20}\ \text{kPa}$$

تعتمد النسبة $\Delta\sigma_z/q$ على **z/R** و **r/R** فقط: ففي دائرة R = 5 m تعطي النسب نفسها معامل الدائرة R = 3 m في المثال 2 (**0.12664**)؛ ويتناسب الإجهاد مع q وحدها (15.20 kPa).

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

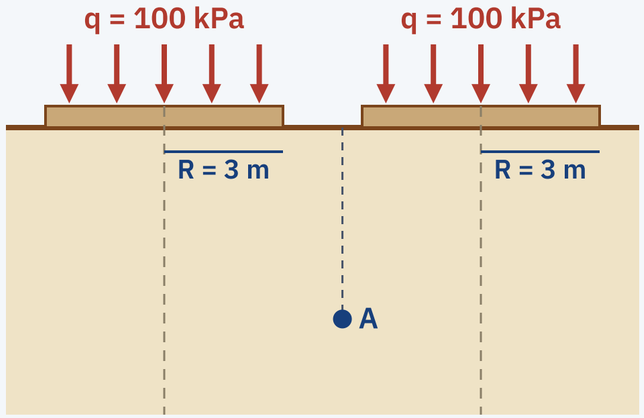
مثال

المعطيات

الدائرة 1	$R = 3$ m، $q = 100$ kN/m²، المركز $x = 0$
الدائرة 2	$R = 3$ m، $q = 100$ kN/m²، المركز $x = 8$ m
النقطة A	$x = 4.5$ m؛ $y = 0$، $z = 3$ m (أيضاً 1.5؛ 4.5؛ 6؛ 12 m)

المطلوب

$\Delta\sigma_z$ للدائرتين كل على حدة ومجتمعتين؛ مقطع عمودي مع العمق.



الحل (1/2)

الحل

1 التحقق من التداخل (الدوائر لا تتداخل؛ المسافة بينها 2 m) والمسافات

$$d = 8\ \text{m} \ \geq R_1 + R_2 = 6\ \text{m}$$

$$r_1 = 4.5\ \text{m}\ (r_1/R = 1.5) \qquad r_2 = 8 - 4.5 = 3.5\ \text{m}\ (r_2/R = 1.1667)$$

2 معامل التأثير والإجهاد لكل دائرة (z/R = 1)

$$A' + B'_{(1)} = 0.12664 \ \Rightarrow\ \Delta\sigma_{z(1)} = 100\,(0.12664) = 12.664\ \text{kPa}$$

$$A' + B'_{(2)} = 0.25049 \ \Rightarrow\ \Delta\sigma_{z(2)} = 100\,(0.25049) = 25.049\ \text{kPa}$$

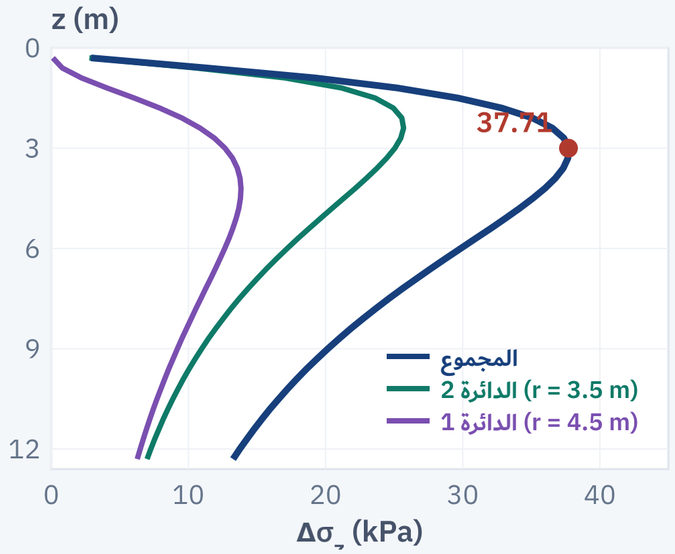
3 التراكب

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_{z(1)} + \Delta\sigma_{z(2)} = 12.664 + 25.049 = \mathbf{37.714}\ \text{kPa}$$

النقطة A أقرب إلى الدائرة الثانية (3.5 m و 4.5 m): فتعطي **الدائرة 2 نسبة 66% من المجموع**. والمجموع = $\Delta\sigma_z$ **37.71 kPa**؛ بينما كانت قيمة الدائرة الواحدة 12.66 kPa.

الحل (2/2)

الحل



الإجمالي	$\Delta\sigma_{z(2)}$	$\Delta\sigma_{z(1)}$	r_2/R = 1,167	r_1/R = 1.5	z/R	z (m)
29.65	23.61	6.04	0.23608	0.06044	0.50	1.5
37.71	25.05	12.66	0.25049	0.12664	1.00	3.0
35.12	21.32	13.79	0.21324	0.13793	1.50	4.5
29.85	17.20	12.65	0.17204	0.12646	2.00	6.0
13.75	7.26	6.49	0.07258	0.06487	4.00	12.0

يبلغ مجموع الإجهاد عند $z = 3$ m قيمة **37.71 kPa**؛ وتتناقص مساهمة الدائرة 2 مع العمق بينما تزداد مساهمة الدائرة 1 حتى 4.5 m. والنتيجة هي مجموع القيم المحسوبة بالمسافة r الخاصة بكل دائرة.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

المسألة

مثال

المعطيات

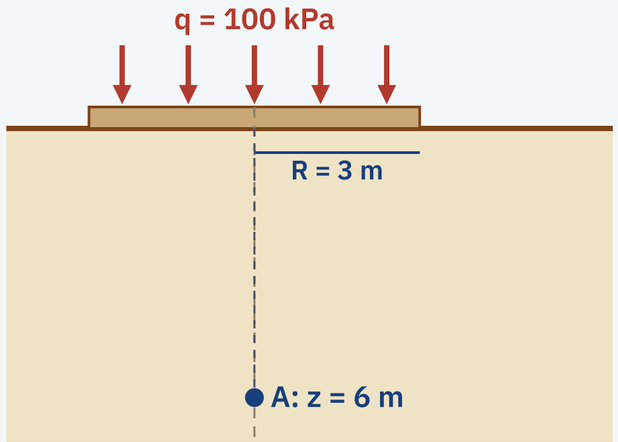
الدائرة — $R = 3$ m، $q = 100$ kN/m²؛ **الحمل الكلي** $Q = q\pi R^2 = 2827.4$ kN

حمل نقطي — **في مركز الدائرة نفسها** Q: $\Delta\sigma_z = Q\, I_1/z^2$، $I_1 = \frac{3}{2\pi}\left[(r/z)^2+1\right]^{-5/2}$

النقاط — **على المحور عند** $(r=0)$ **وعند** $r = 2R$؛ $z/R = 1$؛ 2؛ 3؛ 5؛ 10

المطلوب

نسبة الحلين؛ بعد أي عمق يكون تقريب الحمل المركز مقبولاً؟



الحل (1/2)

الحل

1 الحمل الكلي

$$Q = q\pi R^2 = 100\,\pi\,(3)^2 = \mathbf{2{,}827.4}\ \text{kN}$$

2 حمل نقطي (Boussinesq)، على المحور r = 0

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2}\,\frac{3}{2\pi} = \frac{2{,}827.4}{36}\,(0.4775) = \mathbf{37.50}\ \text{kPa}$$

3 دائرة (تعبير مغلق، z = 6 m)

$$\Delta\sigma_z = 100\left(1 - \frac{1}{(0.25+1)^{3/2}}\right) = \mathbf{28.45}\ \text{kPa}$$

عند العمق z = 2R يعطي تقريب الحمل النقطي إجهاداً أكبر **بمقدار 1.318 مرة** (31.8%): 28.4 kPa بدلاً من 37.5 kPa.

الحل (2/2)

الحل

r/R	z/R	الدائرة $\Delta\sigma_z$ (kPa)	حمل نقطي $\Delta\sigma_z$ (kPa)	حمل نقطي / دائري
0	1	64.645	150.000	**2.320**
0	2	28.446	37.500	**1.318**
0	3	14.619	16.667	**1.140**
0	5	5.713	6.000	**1.050**
0	10	1.481	1.500	**1.013**
2	1	4.181	2.683	**0.642**
2	2	7.334	6.629	**0.904**
2	3	6.663	6.647	**0.997**
2	5	4.048	4.140	**1.023**
2	10	1.346	1.360	**1.010**

على المحور عند $z/R = 1$ يبالغ الحمل النقطي في تقدير الإجهاد بمقدار **2.32 مرة**؛ وعند $z = 5R$ يبقى الفرق 5.0%، وعند $z = 10R$ يبقى 1.3%. وعند $r = 2R$ يكون التقريب **أقل من الحقيقة** قرب السطح (0.64)، أما عند $z \geq 3R$ فلا يتجاوز الفرق 3%.

تحقق من الحل في GeoTerva ↗

النقاط الرئيسية

على المحور: $\Delta\sigma_z = q\{1 - 1/[(R/z)^2 + 1]^{3/2}\}$؛ وعند $z = 1.5$ m تبلغ $(A' + B' = 0.91056)$ 91.06 kPa؛ والعمق الذي تكون عنده $\Delta\sigma_z = 0.10\,q$ هو (11.12 m) **3.71R**

نقطة عامة: $\Delta\sigma_z = q\,(A' + B')$؛ وتتوقف $A' + B'$ على z/R و r/R فقط. **مثال ($r = 4.5$ m؛ $z = 3$ m): $\Delta\sigma_z = 12.664$ kPa**، $A' + B' = 0.12664$

الحساب: تكامل Boussinesq عند النقطة A بالإحداثيات القطبية؛ ρ بصيغة مغلقة، و φ عددياً (2880 اتجاهاً). يدوياً بـ 36 اتجاهاً: 12.62 kPa

خارج الحمل $(r/R = 1.5)$ يزداد الإجهاد أولاً: أكبر قيمة 13.83 kPa عند $z \approx 4.23$ m؛ وتحت الحافة 0.5 q عند السطح

دائرتان: يحسب الإجهاد بالمسافة r الخاصة بكل دائرة ثم يجمع: 12.66 + 25.05 = 37.71 kPa. وتقريب **الحمل النقطي** خاطئ قرب الحمل (×1.32 عند $z = 2R$) ويصلح عند $z \geq 5R$

المراجع

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage Learning.

Ahlvin, R.G. and Ulery, H.H. (1962). Tabulated values for determining the complete pattern of stresses, strains, and deflections beneath a uniform circular load on a homogeneous half space. Highway Research Bulletin 342, 1–13.

ملاحظة

جميع الأمثلة العددية مولدة بمحرك الحساب الخاص بالوحدة؛ وتعطي الوحدة القيم نفسها. المثال الابتدائي في الوحدة: حمل دائري $R = 3\ m$ و $q = 100\ kN/m^2$ والنقطة A ($r = 4.5\ m$؛ $z = 3\ m$).

حسابات الجيوتكنيك عبر الإنترنت

من النظرية إلى التطبيق

أدخل الدوائر (q، R، المركز) والنقطة A والعمق في GeoTerva؛ وتعطي الوحدة معاً A′ + B′ وقيمة $\Delta\sigma_z$ ومنحنيات تساوي الإجهاد ومقطع العمق والحل خطوة بخطوة والتقرير.

افتح الوحدة ←

صفحة النظرية ←

افتح على الهاتف

لا تتطلب الوحدات التجريبية تسجيلاً.

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