جَامعة المَنارة
MANARA UNIVERSITY

الفصل الأول: الاجهادات والتشوهات المرنة في التربة

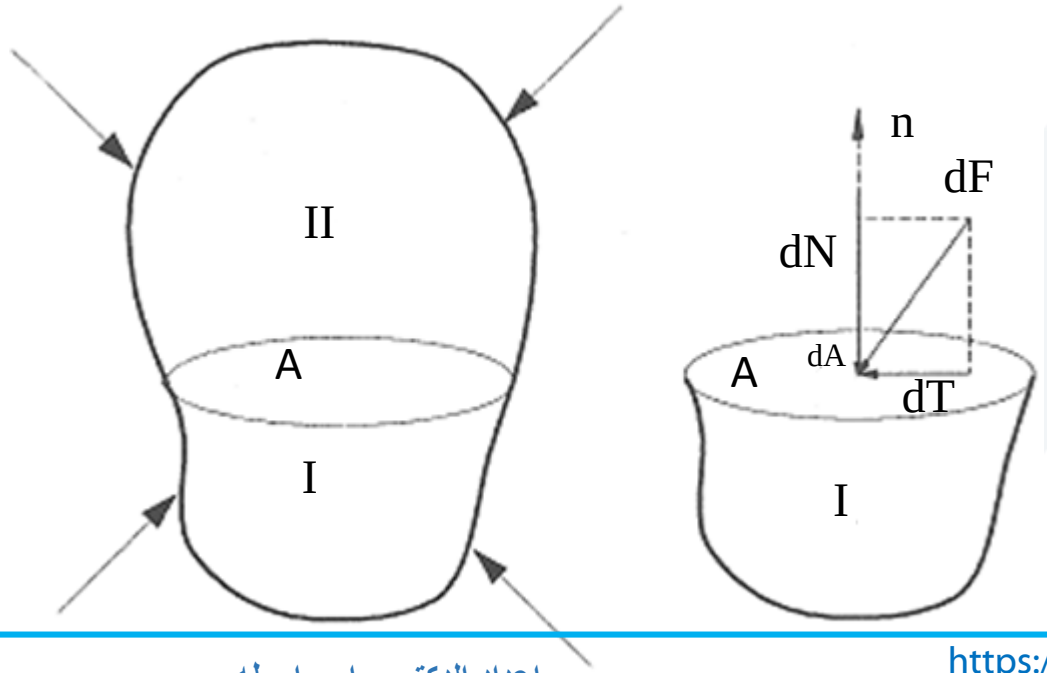
1 .2 تعاريف

الهدف الأساسي لهذا الفصل هو تحديد الاجهادات في أية نقطة من وسط التربة، الناتجة عن الوزن الذاتي وعن الحمولات الخارجية المطبقة على التربة

مفهوم الاجهاد (stress concept) :

$$\sigma_n = \lim_{dA\to 0} \frac{dN}{dA} \qquad \tau_x = \lim_{dA\to 0} \frac{dT_x}{dA}$$

$$\tau = \lim_{dA\to 0} \frac{dT}{dA} \qquad \tau_y = \lim_{dA\to 0} \frac{dT_y}{dA}$$



الاجهادات الرئيسية (Principle stresses):

في أية نقطة من وسط مستمر معرضة للاجهادات هناك ثلاثة مستويات متعامدة تكون فيها الاجهادات المماسية معدومة, تدعى هذه المستويات بالمستويات الرئيسية للاجهادات, وتدعى الاجهادات الناظمية على تلك المستويات بالاجهادات الرئيسية σ_1 و σ_2 و σ_3 .

σ_1الاجهاد الرئيسي الأعظمي و σ_3 الاجهاد الرئيسي الأصغري

جَامعة المَنارة
MANARA UNIVERSITY

الاجهاد الكلي (Total stress) σ :

هو الاجهاد المنقول بواسطة جزيئات التربة والسائل والغاز الموجودين في فراغات التربة.

الاجهاد الفعال (Effective stress) σ' :

هو الاجهاد المنقول بواسطة جزيئات التربة الصلبة.

الاجهاد الوسطي (Mean stress) P:

هو متوسط الاجهادات المؤثرة على الجسم, أو متوسط الاجهادات في ثلاثة اتجاهات متعامدة متجاورة.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$$

الاجهاد الديفياتوري (Deviatoric stress) q :

يعبر الاجهاد الديفياتوري عن الاجهاد القاص المؤثر على الجسم ويعطى بالعلاقة :

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

ضغط ماء المسامات (Pore water pressure) u :

هو ضغط الماء المحجوز في مسامات التربة

وسط متماثل الخواص (Isotropic) : يعني أن خواص المادة متماثلة في جميع الاتجاهات كما أنها تحت تأثير تشوه ما تخضع المادة لنفس الاجهادات مهما كان اتجاه تطبيق هذا التشوه.

وسط متباين الخواص (Anisotropic) : يعني أن خواص المادة غير متساوية في الاتجاهات المختلفة و/أو أن الاجهادات المتولدة نتيجة تطبيق تشوه ما على المادة تتعلق باتجاه تطبيق التشوه.

مادة مرنة (Elastic material) : هي المادة التي تعود إلى وضعها الأصلي عند نزع الحمولة عنها.

مادة مرنة خطياً (Linear elastic material) : هي المادة التي تعود إلى وضعها الأصلي عند نزع الحمولة عنها, وتكون العلاقة بين الاجهادات والتشوهات خطية.

مفهوم التشوه (Strain concept)

الانتقالات متناهية الصغر $\partial w, \partial v, \partial u$

في الاتجاهات x و y و z

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

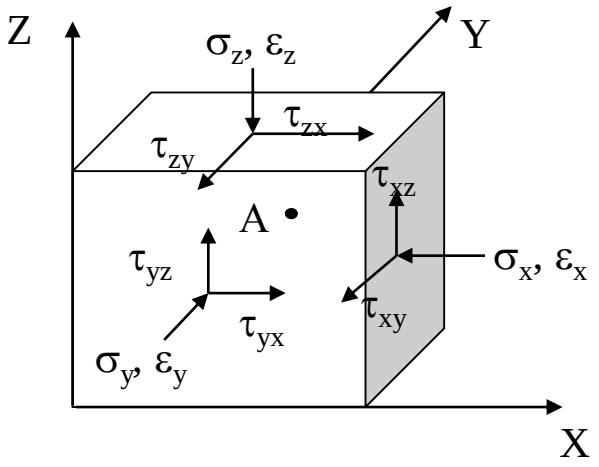
$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$$

5. 3 قانون هوك

5. 3. 1 الحالة العامة للاجهادات

في حالة **الترب المرنة خطياً ومتماثلة الخواص** ترتبط الاجهادات بالتشوهات وفق قانون هوك الذي يعطى في الحالة العامة للاجهادات بالشكل التالي :



$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix}$$

5. 3. 2 حالة الاجهادات الرئيسية

إذا كانت المحاور 1 و 2 و3 محاور رئيسية وكانت الاجهادات الناظمية وفق هذه المحاور ($\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$) رئيسية فإن قانون هوك يختصر إلى التالي :

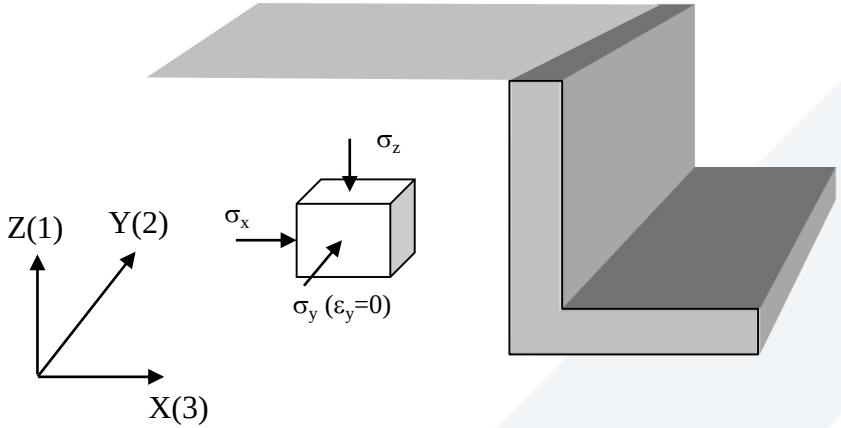
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix}$$

5. 4 حالات التشوهات المستوية والتناظر المحوري (Plane strain and axial symmetric conditions)

5. 4. 1 حالة التشوهات المستوية (plane strain condition)

يكون التشوه في أحد الاتجاهات معدوماً, وتكون جميع المقاطع العمودية على هذا الاتجاه متماثلة من ناحية الشكل والحمولات.

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} \approx 0$$



$$\varepsilon_2 = 0 \Rightarrow \quad \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ 0 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{E}\begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} \Rightarrow 0 = \begin{bmatrix} -\nu & 1 & -\nu \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \sigma_2 = \nu(\sigma_1 + \sigma_3)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ 0 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{E}\begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \nu\sigma_1 + \nu\sigma_3 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{E}\begin{bmatrix} 1-\nu^2 & -\nu(1+\nu) \\ -\nu(1+\nu) & 1-\nu^2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \frac{1+\nu}{E}\begin{bmatrix} 1-\nu & -\nu \\ -\nu & 1-\nu \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix}$$

5. 4. 2 حالة التناظر المحوري (Axisymetric condition)

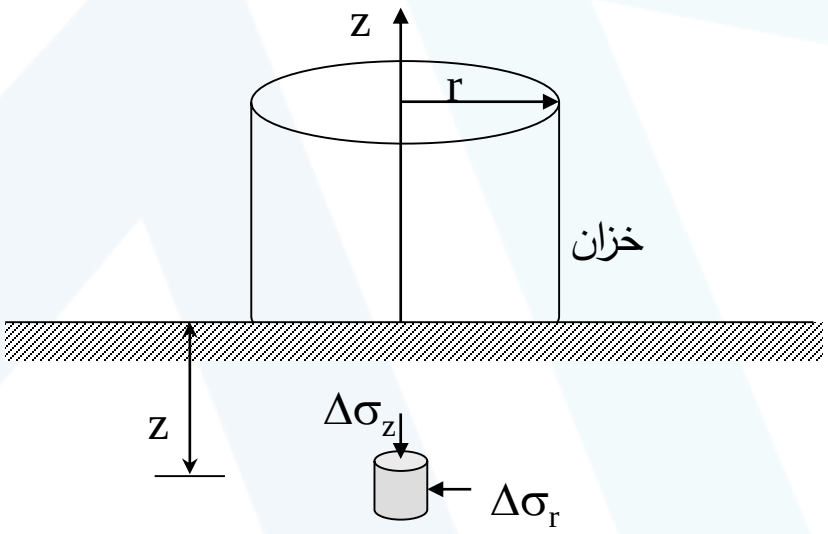
يكون أحد المحاور محور تناظر و الاجهادات والتشوهات متساوية وفق المحورين المتعامدين على محور التناظر. إذا كان (1) محور تناظر تكون($\varepsilon_2=\varepsilon_3$ $\sigma_2 = \sigma_3$).

$$\begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\end{Bmatrix}=\frac{1}{E}\begin{bmatrix}1 & -\nu & -\nu\\ -\nu & 1 & -\nu\\ -\nu & -\nu & 1\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\end{Bmatrix} \qquad \begin{matrix}\varepsilon_2=\varepsilon_3\\ and\\ \sigma_2=\sigma_3\end{matrix} \qquad \Rightarrow \qquad \begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_3\end{Bmatrix}=\frac{1}{E}\begin{bmatrix}1 & -2\nu\\ -\nu & 1-\nu\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_3\end{Bmatrix}$$

الاجهاد الوسطي $$p=\frac{\sigma_1+2\sigma_3}{3} \qquad p'=p-u=\frac{\sigma_1'+2\sigma_3'}{3}$$

الدفياتور $$q=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}$$

$$\sigma_2=\sigma_3 \Rightarrow \quad q=q'=\sigma_1-\sigma_3=\sigma_1'-\sigma_3'$$



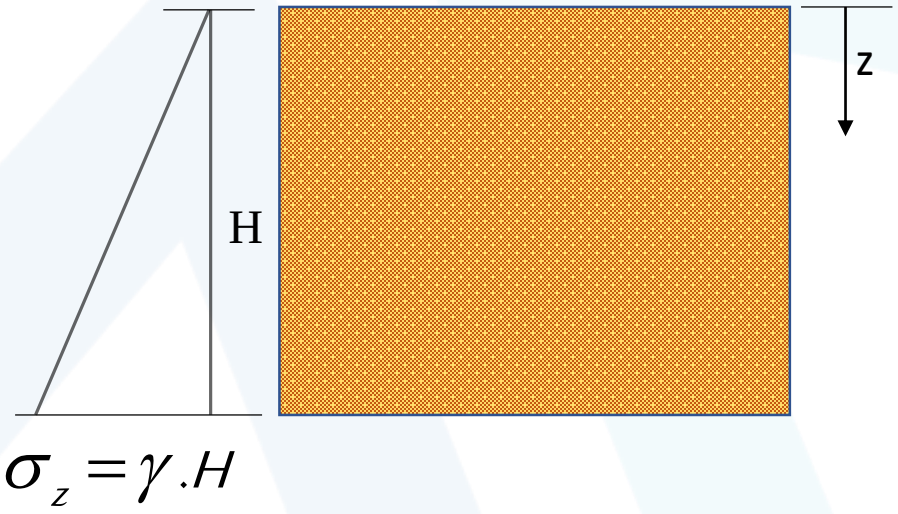
5. 5 توزع الاجهادات في التربة

5. 5. 1 الاجهادات الشاقولية الناتجة عن وزن التربة (الاجهادات الأولية)

حالة عدم وجود مياه

أ- الاجهاد الشاقولي

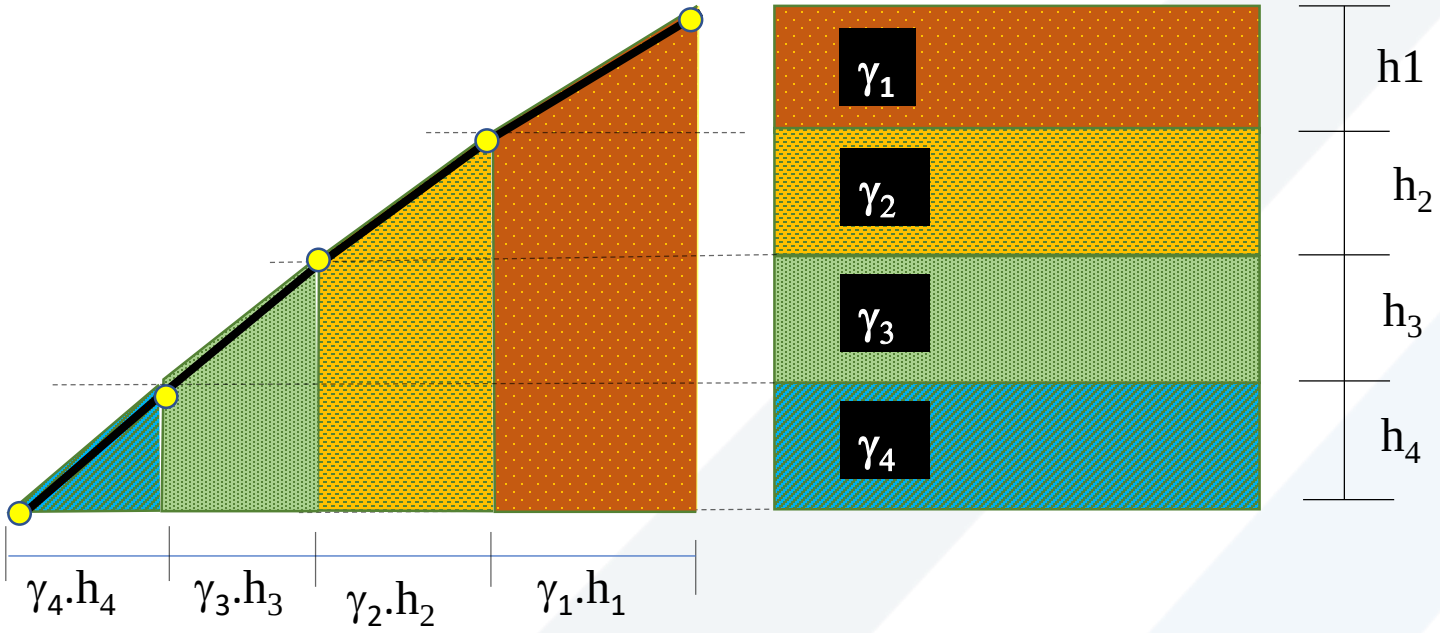
$$\sigma_z = \gamma . z$$



$$\sigma_z = \gamma . H$$

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i . z_i$$

i رقم طبقة التربة
n عدد طبقات التربة



جَـامعة المَـنارة
MANARA UNIVERSITY

الاجهاد الشاقولي الكلي

حالة وجود مياه والغطاء المائي في حالة توازن هيدروستاتيكي (لا يوجد جريان للمياه ضمن التربة)

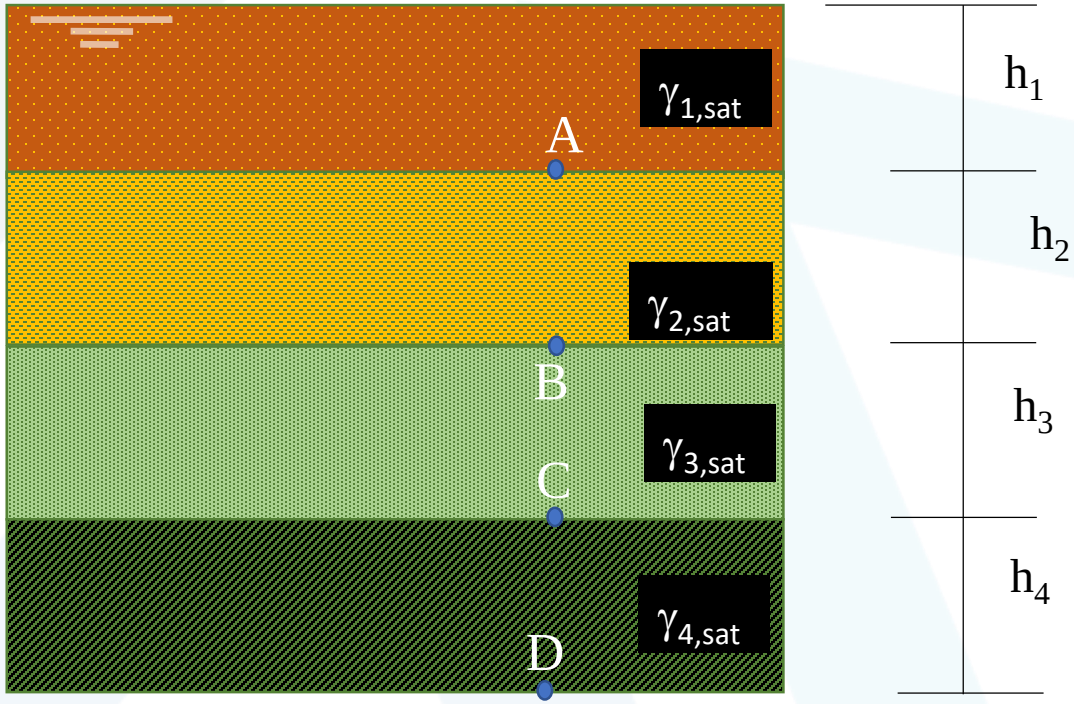
1- حالة منسوب الماء عند سطح الأرض

$$\sigma_{z,A} = \gamma_{1,sat} . h_1$$

$$\sigma_{z,B} = \sigma_{z,A} + \gamma_{2,sat} . h_2$$

$$\sigma_{z,C} = \sigma_{z,B} + \gamma_{3,sat} . h_3$$

$$\sigma_{z,D} = \sigma_{z,C} + \gamma_{4,sat} . h_4$$



ضغط الماء

$$u_A = \gamma_w . h_1$$

$$u_B = \gamma_w . (h_1 + h_2)$$

$$u_C = \gamma_w . (h_1 + h_2 + h_3)$$

$$u_B = \gamma_w . (h_1 + h_2 + h_3 + h_4)$$

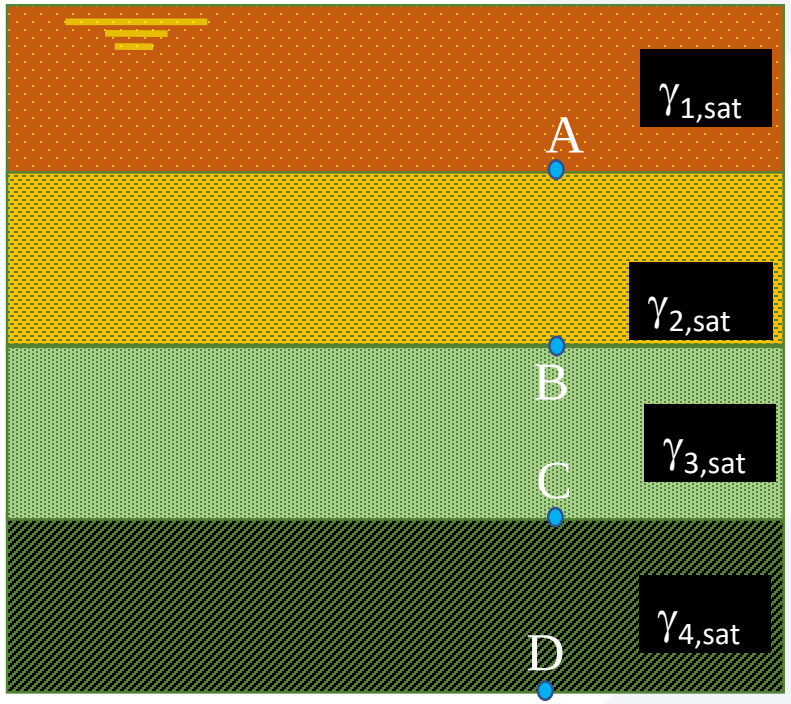
الاجهاد الشاقولي الفعال

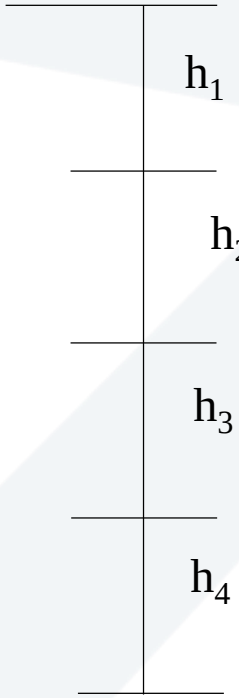
$$\sigma' = \sigma - u$$

يحسب بالعلاقة

الاجهاد الشاقولي الفعال

كما يمكن حساب الاجهاد الشاقولي الفعال باستخدام الوزن الحجمي المغمور للتربة كما يلي :





$$\sigma'_i = \sum \gamma_{i,sub} \cdot h_i$$

$$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

$$\sigma'_{z,A} = \gamma_{1,sub} \cdot h_1$$

$$\sigma'_{z,B} = \sigma'_{z,A} + \gamma_{2,sub} \cdot h_2$$

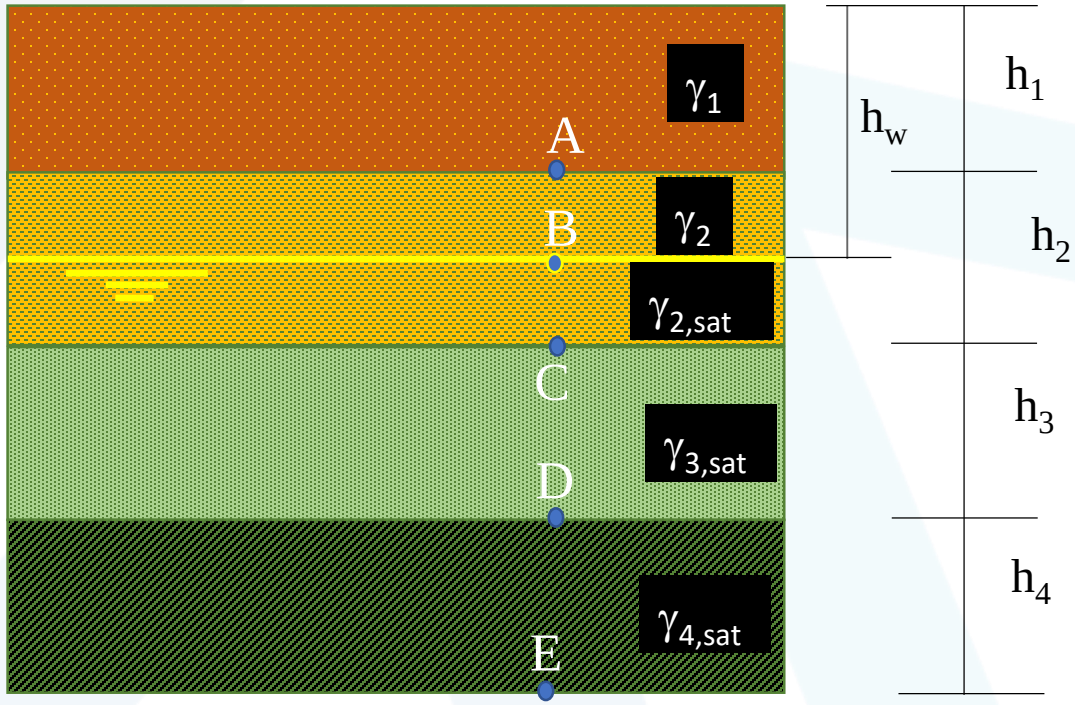
$$\sigma'_{z,C} = \sigma'_{z,B} + \gamma_{3,sub} \cdot h_3$$

$$\sigma'_{z,D} = \sigma'_{z,C} + \gamma_{4,sub} \cdot h_4$$

2- حالة منسوب الماء على عمق h_w عند سطح الأرض

في أية نقطة فوق منسوب المياه، يكون الاجهاد الشاقولي الكلي مساوياً للاجهاد الشاقولي الفعال، أما تحت منسوب المياه فيكون الاجهاد الفعال أصغر من الكلي ويعطي بالعلاقة :

$$\sigma' = \sigma - u$$



الاجهاد الشاقولي الكلي

$$\sigma_{z,A} = \gamma_1 . h_1 \qquad \sigma_{z,B} = \gamma_1 . h_1 + \gamma_2 (h_w - h_1)$$

$$\sigma_{z,C} = \sigma_{z,B} + \gamma_{2,sat} . (h_1 + h_2 - h_w)$$

$$\sigma_{z,D} = \sigma_{z,C} + \gamma_{3,sat} . h_3$$

$$\sigma_{z,E} = \sigma_{z,D} + \gamma_{4,sat} . h_4$$

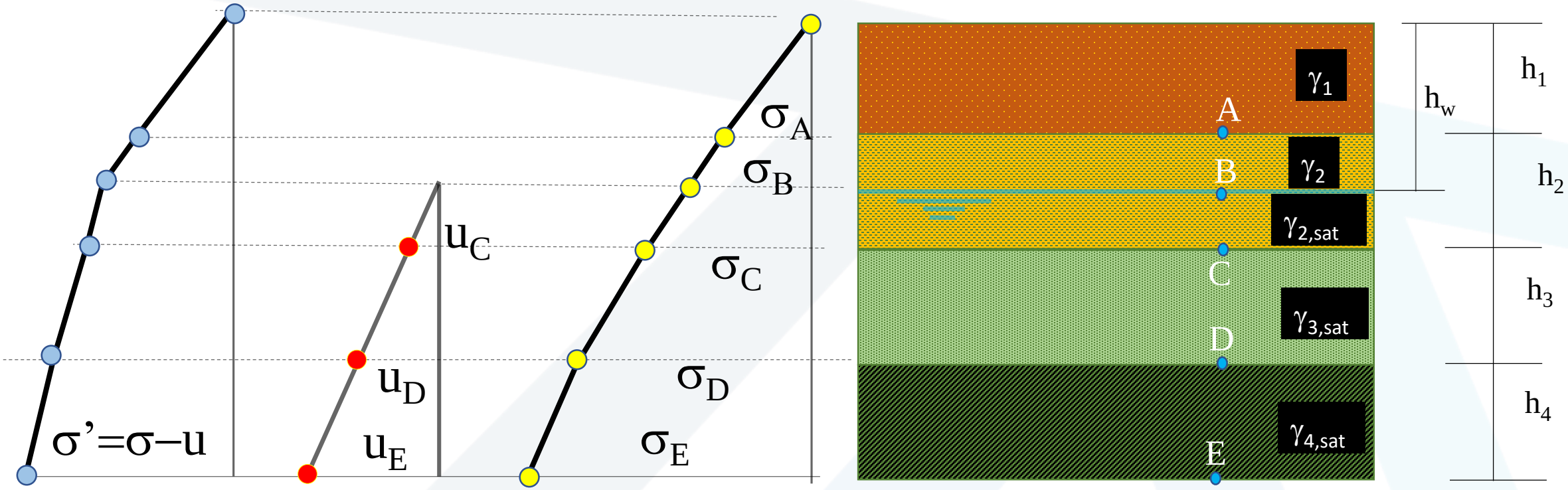
ضغط الماء

$$u_{z,B} = 0 \qquad u_{z,C} = \gamma_w (h_1 + h_2 - h_w)$$

$$u_{z,D} = u_{z,C} + \gamma_w . h_3 \qquad u_{z,E} = u_{z,D} + \gamma_w . h_4$$

الاجهاد الشاقولي الفعال

يحسب بالعلاقة $\sigma' = \sigma - u$

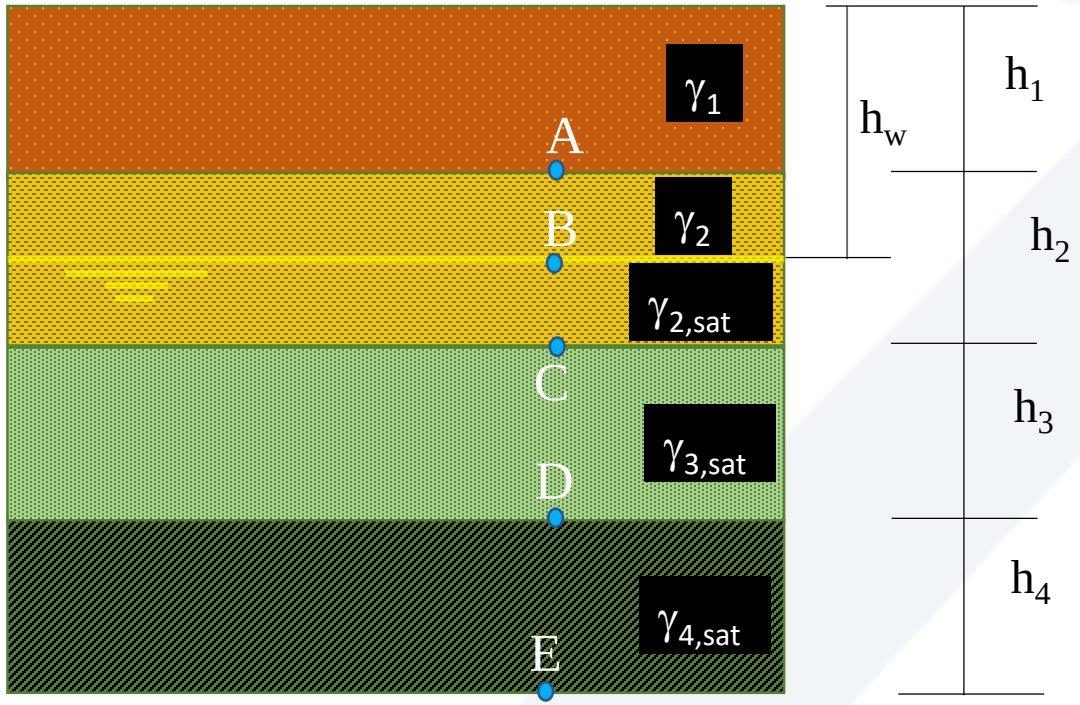

σ'=σ−u
u_C
u_D
u_E
σ_A
σ_B
σ_C
σ_D
σ_E
γ1
γ2
γ2,sat
γ3,sat
γ4,sat
A
B
C
D
E
h_w
h1
h2
h3
h4

كما يمكن حساب الاجهاد الشاقولي الفعال في أية نقطة باستخدام الوزن الحجمي الطبيعي للتربة γ فوق منسوب المياه، والوزن الحجمي المغمور γ_{sub} للتربة تحت منسوب المياه كما يلي :

$$\sigma'_Z = \sum_{i=1}^{m} \gamma_i . h_i + \sum_{j=m+1}^{n} \gamma_{sub} . h_j$$

m عدد طبقات التربة فوق منسوب المياه

(n-m)عدد طبقات التربة تحت منسوب المياه



$$\sigma' = \sigma = 0$$

$$\sigma'_{z,A} = \gamma_1 . h_1$$

$$\sigma'_{z,B} = \sigma'_{z,A} + \gamma_2 . (h_w - h_1)$$

$$\sigma'_{z,C} = \sigma'_{z,B} + \gamma_{2,sub} . (h_1 + h_2 - h_w)$$

$$\sigma'_{z,D} = \sigma'_{z,C} + \gamma_{3,sub} . h_3$$

$$\sigma'_{z,E} = \sigma'_{z,D} + \gamma_{4,sub} . h_4$$

5. 5. 2 الاجهادات الأفقية الناتجة عن وزن التربة (الاجهادات الأولية)

$$\sigma'_h = K_{0,i} \cdot \sigma'_z$$

$K_{0,i}$ عامل دفع التربة الأفقي في حالة السكون للطبقة i

$$K_{0,i} = \frac{\nu_i}{1-\nu_i}$$

OR $$K_{0,i} = 1-\sin\phi'_i$$

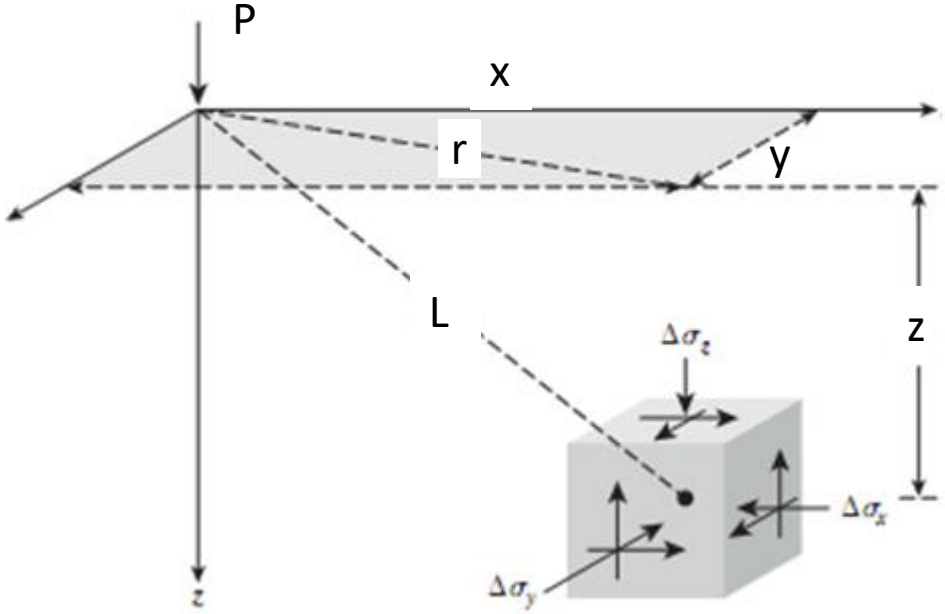
ν_i عامل بواسون لطبقة التربة i

ϕ'_i زاوية الاحتكاك الفعالة لطبقة التربة i

5. 6 الاجهادات الناتجة عن الحمولات الخارجية

5. 6. 1 الاجهادات الناتجة عن قوة مركزة (حل بوسينيسك Boussinesq's solution)

التربة متجانسة ومتماثلة الخواص وسلوكها مرن خطياً والأساس مرن.



الاجهاد الشاقولي في نقطة تبعد (x, y, z) عن نقطة تطبيق القوة P:

$$\Delta\sigma_z = \frac{3P}{2\pi}\frac{z^3}{L^5}$$

الاجهاد تحت نقطة تطبيق القوة P

For r = 0

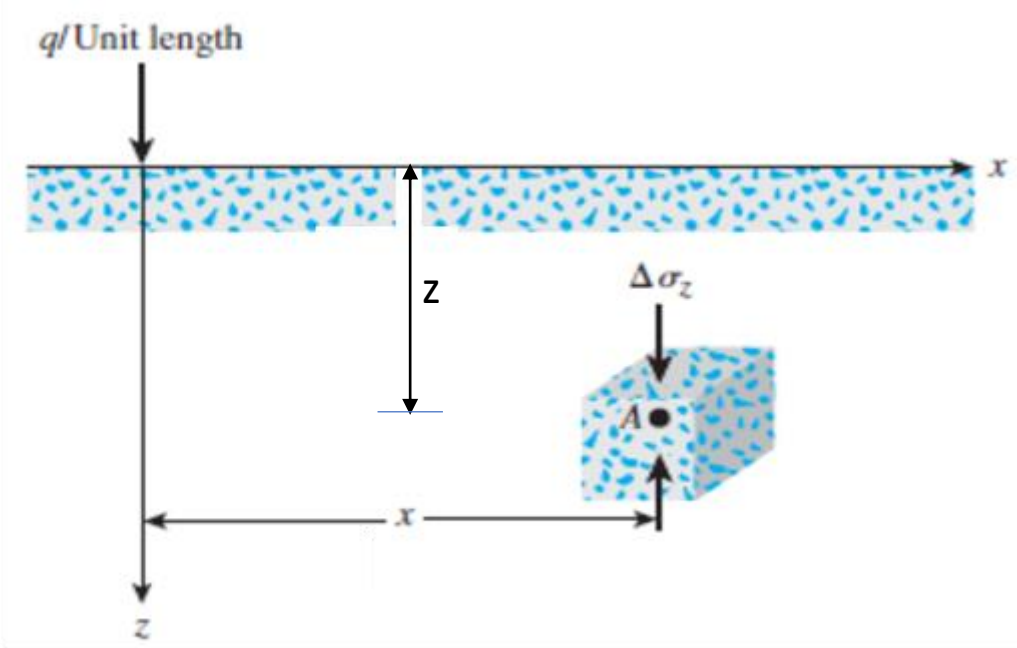
$$\Delta\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2}$$

where $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

$$L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{r^2 + z^2}$$

5. 6. 2 الاجهادات الناتجة حمولة شريطية خطية (حالة تشوهات مستوية)

حمولة شاقولية مرنة خطية لا متناهية الطول، شدتها q على واحدة الطول



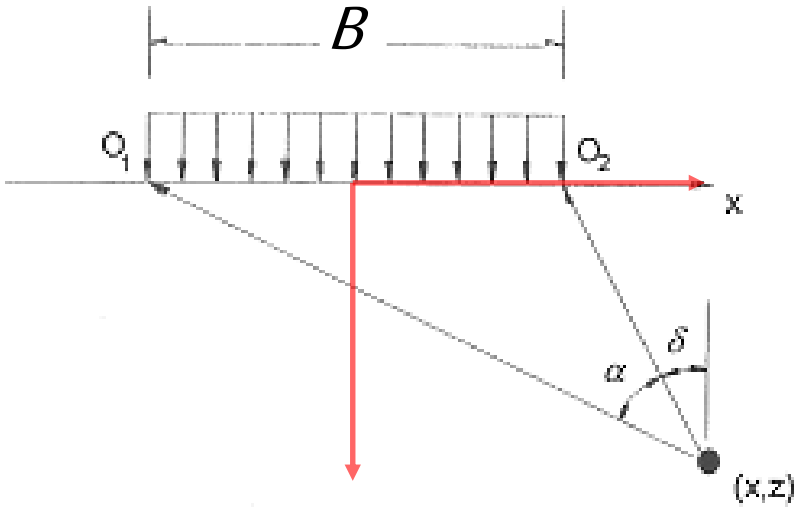
$$\Delta\sigma_z = \frac{2qz^3}{\pi(x^2+z^2)^2}$$

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi}\left[\alpha + \sin\alpha\cos(\alpha+2\delta)\right]$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{q}{\pi}\left[\alpha - \sin\alpha\cos(\alpha+2\delta)\right]$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{2q}{\pi}\nu\alpha$$

$$\Delta\tau_{xz} = \frac{q}{\pi}\sin\alpha\sin(\alpha+2\delta)$$



5. 6. 3 الاجهادات الناتجة عن حمولة شريطية مستطيلة (حالة تشوهات مستوية)

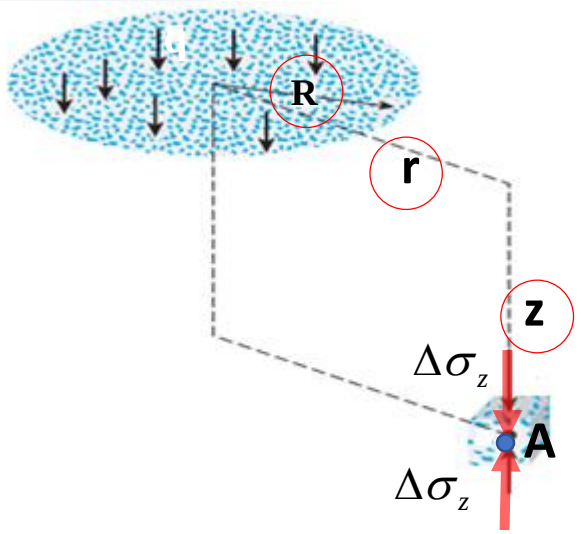
$$\Delta\sigma_z = \alpha . q$$

$$\Delta\sigma_x = \beta . q$$

$$\Delta\tau_{xz} = \gamma . q$$

z / B	x / B					
	0.0	0.25	0.5	1	1.5	2
0.00	1.00	1.00	0.50	0	0	0
0.25	0.96	0.90	0.50	0.02	0	0
0.50	0.82	0.74	0.48	0.08	0.02	0
0.75	0.67	0.61	0.45	0.15	0.04	0.02
1.00	0.55	0.51	0.41	0.19	0.07	0.03
1.50	0.40	0.38	0.33	0.21	0.13	0.07
2.00	0.31	0.31	0.28	0.17	0.13	0.10
3.00	0.21	0.21	0.20	0.14	0.12	0.10
5.00	0.13	0.13	0.12	0.10	0.10	-

تغير α مع z/B و x/B لحالة شريطية مرنة مستطيلة شدتها q



5. 6. 4 الاجهادات الناتجة عن حمولة شاقولية دائرية

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

$$A' = f(r/R, z/R) \quad B' = g(r/R, z/R)$$

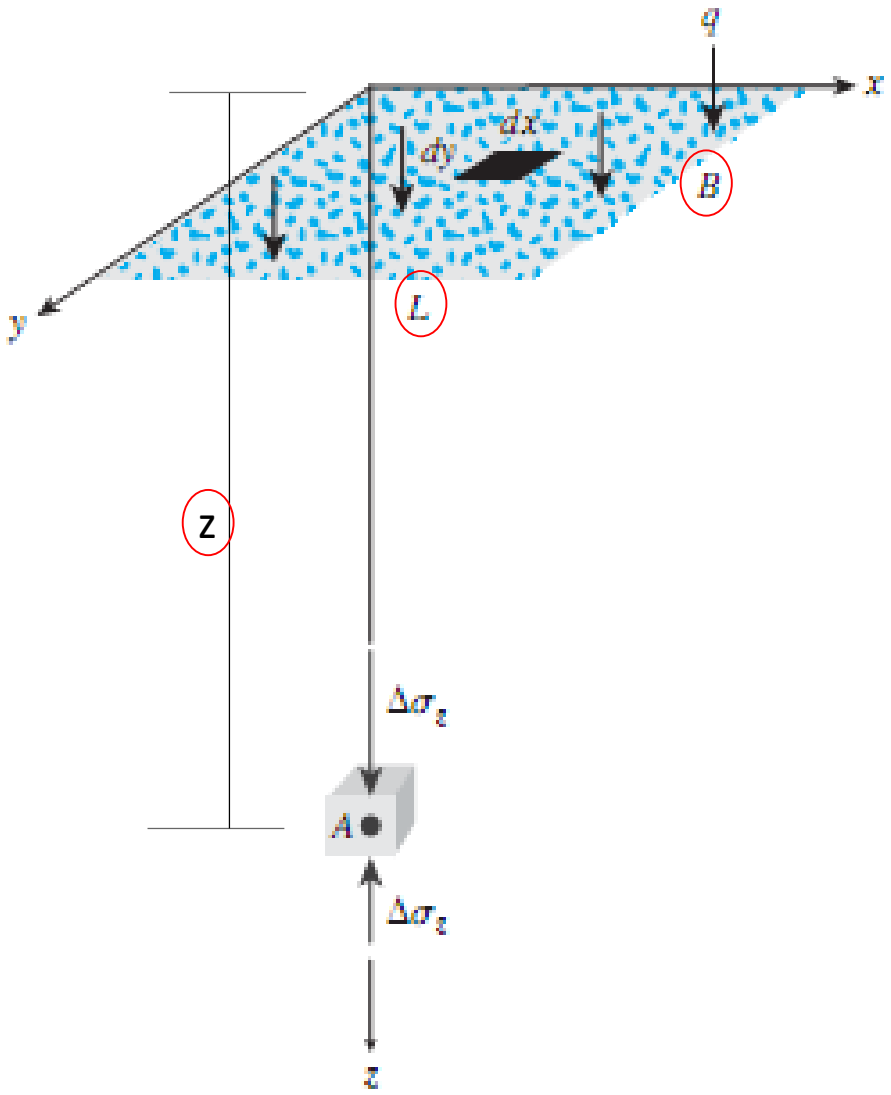
z/R \ r/R	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0	0	0
0.1	0.90050	0.89748	0.88679	0.86126	0.78797	0.43015	0.09645	0.02787	0.00856
0.2	0.80388	0.79824	0.77884	0.73483	0.63014	0.38269	0.15433	0.05251	0.01680
0.3	0.71265	0.70518	0.68316	0.62690	0.52081	0.34375	0.17964	0.07199	0.02440
0.4	0.62861	0.62015	0.59241	0.53767	0.44329	0.31048	0.18709	0.08593	0.03118
0.5	0.55279	0.54403	0.51622	0.46448	0.38390	0.28156	0.18556	0.09499	0.03701
0.6	0.48550	0.47691	0.45078	0.40427	0.33676	0.25588	0.17952	0.10010	
0.7	0.42654	0.41874	0.39491	0.35428	0.29833	0.21727	0.17124	0.10228	0.04558
0.8	0.37531	0.36832	0.34729	0.31243	0.26581	0.21297	0.16206	0.10236	
0.9	0.33104	0.32492	0.30669	0.27707	0.23832	0.19488	0.15253	0.10094	
1	0.29289	0.28763	0.27005	0.24697	0.21468	0.17868	0.14329	0.09849	0.05185
1.2	0.23178	0.22795	0.21662	0.19890	0.17626	0.15101	0.12570	0.09192	0.05260
1.5	0.16795	0.16552	0.15877	0.14804	0.13436	0.11892	0.10296	0.08048	0.05116
2	0.10557	0.10453	0.10140	0.09647	0.09011	0.08269	0.07471	0.06275	0.04496
2.5	0.07152	0.07098	0.06947	0.06698	0.06373	0.05974	0.05555	0.04880	0.03787
3	0.05132	0.05101	0.05022	0.04886	0.04707	0.04487	0.04241	0.03839	0.03150
4	0.02986	0.02976	0.02907	0.02802	0.02832	0.02749	0.02651	0.02490	0.02193
5	0.01942	0.01938				0.01835			0.01573

قيم A‘ بدلالة z/R و r/R لحالة حمولة دائرية مرنة موزعة بانتظام شدتها q

جَـامعة
المَـنارة

قيم B‘ بدلالة z/R و r/R لحالة حمولة دائرية مرنة موزعة بانتظام شدتها q

z/R \ r/R	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.09852	0.10140	0.11138	0.13424	0.18796	0.05388	−0.07899	−0.02672	−0.00845
0.2	0.18857	0.19306	0.20772	0.23524	0.25983	0.08513	−0.07759	−0.04448	−0.01593
0.3	0.26362	0.26787	0.28018	0.29483	0.27257	0.10757	−0.04316	−0.04999	−0.02166
0.4	0.32016	0.32259	0.32748	0.32273	0.26925	0.12404	−0.00766	−0.04535	−0.02522
0.5	0.35777	0.35752	0.35323	0.33106	0.26236	0.13591	0.02165	−0.03455	−0.02651
0.6	0.37831	0.37531	0.36308	0.32822	0.25411	0.14440	0.04457	−0.02101	
0.7	0.38487	0.37962	0.36072	0.31929	0.24638	0.14986	0.06209	−0.00702	−0.02329
0.8	0.38091	0.37408	0.35133	0.30699	0.23779	0.15292	0.07530	0.00614	
0.9	0.36962	0.36275	0.33734	0.29299	0.22891	0.15404	0.08507	0.01795	
1	0.35355	0.34553	0.32075	0.27819	0.21978	0.15355	0.09210	0.02814	−0.01005
1.2	0.31485	0.30730	0.28481	0.24836	0.20113	0.14915	0.10002	0.04378	0.00023
1.5	0.25602	0.25025	0.23338	0.20694	0.17368	0.13732	0.10193	0.05745	0.01385
2	0.17889	0.18144	0.16644	0.15198	0.13375	0.11331	0.09254	0.06371	0.02836
2.5	0.12807	0.12633	0.12126	0.11327	0.10298	0.09130	0.07869	0.06022	0.03429
3	0.09487	0.09394	0.09099	0.08635	0.08033	0.07325	0.06551	0.05354	0.03511
4	0.05707	0.05666	0.05562	0.05383	0.05145	0.04773	0.04532	0.03995	0.03066
5	0.03772	0.03760				0.03384			0.02474
6	0.02666					0.02468			0.01968
7	0.01980					0.01868			0.01577
8	0.01526					0.01459			0.01279
9	0.01212					0.01170			0.01054
10								0.00924	0.00879



5. 6. 5 الاجهادات الناتجة عن حمولة شاقولية مستطيلة محدودة المساحة

الاجهادات تحت زاوية حمولة شاقولية مستطيلة محدودة المساحة

$$\Delta\sigma_z = I_3 . q$$

$$I_3 = f(m = B/z, \quad n = L/z)$$

جَامعة المَنارة
MANARA UNIVERSITY

$m = B / z$

$n = L / z$

n	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.1	0.0047	0.0092	0.0132	0.0168	0.0198	0.0222	0.0242	0.0258	0.0270	0.0279
0.2	0.0092	0.0179	0.0259	0.0328	0.0387	0.0435	0.0474	0.0504	0.0528	0.0547
0.3	0.0132	0.0259	0.0374	0.0474	0.0559	0.0629	0.0686	0.0731	0.0766	0.0794
0.4	0.0168	0.0328	0.0474	0.0602	0.0711	0.0801	0.0873	0.0931	0.0977	0.1013
0.5	0.0198	0.0387	0.0559	0.0711	0.0840	0.0947	0.1034	0.1104	0.1158	0.1202
0.6	0.0222	0.0435	0.0629	0.0801	0.0947	0.1069	0.1168	0.1247	0.1311	0.1361
0.7	0.0242	0.0474	0.0686	0.0873	0.1034	0.1169	0.1277	0.1365	0.1436	0.1491
0.8	0.0258	0.0504	0.0731	0.0931	0.1104	0.1247	0.1365	0.1461	0.1537	0.1598
0.9	0.0270	0.0528	0.0766	0.0977	0.1158	0.1311	0.1436	0.1537	0.1619	0.1684
1.0	0.0279	0.0547	0.0794	0.1013	0.1202	0.1361	0.1491	0.1598	0.1684	0.1752
1.2	0.0293	0.0573	0.0832	0.1063	0.1263	0.1431	0.1570	0.1684	0.1777	0.1851
1.4	0.0301	0.0589	0.0856	0.1094	0.1300	0.1475	0.1620	0.1739	0.1836	0.1914
1.6	0.0306	0.0599	0.0871	0.1114	0.1324	0.1503	0.1652	0.1774	0.1874	0.1955
1.8	0.0309	0.0606	0.0880	0.1126	0.1340	0.1521	0.1672	0.1797	0.1899	0.1981
2.0	0.0311	0.0610	0.0887	0.1134	0.1350	0.1533	0.1686	0.1812	0.1915	0.1999
2.5	0.0314	0.0616	0.0895	0.1145	0.1363	0.1548	0.1704	0.1832	0.1938	0.2024
3.0	0.0315	0.0618	0.0898	0.1150	0.1368	0.1555	0.1711	0.1841	0.1947	0.2034
4.0	0.0316	0.0619	0.0901	0.1153	0.1372	0.1560	0.1717	0.1847	0.1954	0.2042
5.0	0.0316	0.0620	0.0901	0.1154	0.1374	0.1561	0.1719	0.1849	0.1956	0.2044
6.0	0.0316	0.0620	0.0902	0.1154	0.1374	0.1562	0.1719	0.1850	0.1957	0.2045

قيم I_3 بدلالة m و n

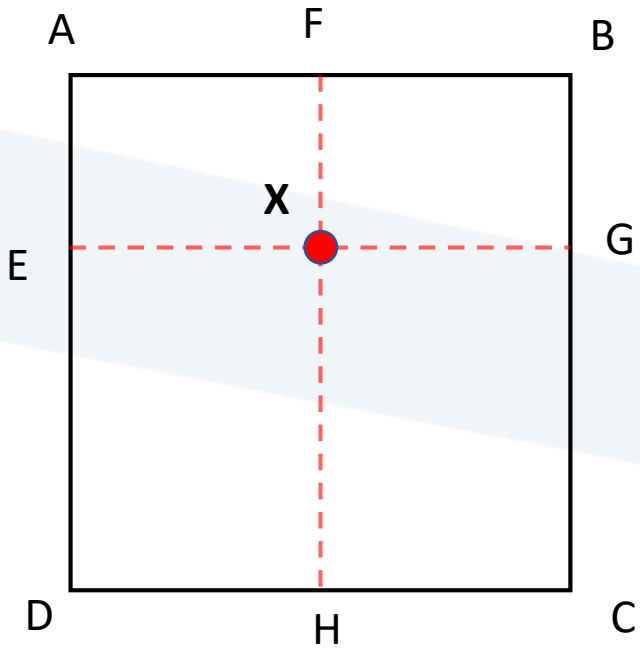
جَامعة المَنارة
MANARA UNIVERSITY

$$m = B / z$$

$$n = L / z$$

n	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
0.1	0.0293	0.0301	0.0306	0.0309	0.0311	0.0314	0.0315	0.0316	0.0316	0.0316
0.2	0.0573	0.0589	0.0599	0.0606	0.0610	0.0616	0.0618	0.0619	0.0620	0.0620
0.3	0.0832	0.0856	0.0871	0.0880	0.0887	0.0895	0.0898	0.0901	0.0901	0.0902
0.4	0.1063	0.1094	0.1114	0.1126	0.1134	0.1145	0.1150	0.1153	0.1154	0.1154
0.5	0.1263	0.1300	0.1324	0.1340	0.1350	0.1363	0.1368	0.1372	0.1374	0.1374
0.6	0.1431	0.1475	0.1503	0.1521	0.1533	0.1548	0.1555	0.1560	0.1561	0.1562
0.7	0.1570	0.1620	0.1652	0.1672	0.1686	0.1704	0.1711	0.1717	0.1719	0.1719
0.8	0.1684	0.1739	0.1774	0.1797	0.1812	0.1832	0.1841	0.1847	0.1849	0.1850
0.9	0.1777	0.1836	0.1874	0.1899	0.1915	0.1938	0.1947	0.1954	0.1956	0.1957
1.0	0.1851	0.1914	0.1955	0.1981	0.1999	0.2024	0.2034	0.2042	0.2044	0.2045
1.2	0.1958	0.2028	0.2073	0.2103	0.2124	0.2151	0.2163	0.2172	0.2175	0.2176
1.4	0.2028	0.2102	0.2151	0.2184	0.2206	0.2236	0.2250	0.2260	0.2263	0.2264
1.6	0.2073	0.2151	0.2203	0.2237	0.2261	0.2294	0.2309	0.2320	0.2323	0.2325
1.8	0.2103	0.2183	0.2237	0.2274	0.2299	0.2333	0.2350	0.2362	0.2366	0.2367
2.0	0.2124	0.2206	0.2261	0.2299	0.2325	0.2361	0.2378	0.2391	0.2395	0.2397
2.5	0.2151	0.2236	0.2294	0.2333	0.2361	0.2401	0.2420	0.2434	0.2439	0.2441
3.0	0.2163	0.2250	0.2309	0.2350	0.2378	0.2420	0.2439	0.2455	0.2461	0.2463
4.0	0.2172	0.2260	0.2320	0.2362	0.2391	0.2434	0.2455	0.2472	0.2479	0.2481
5.0	0.2175	0.2263	0.2324	0.2366	0.2395	0.2439	0.2460	0.2479	0.2486	0.2489
6.0	0.2176	0.2264	0.2325	0.2367	0.2397	0.2441	0.2463	0.2482	0.2489	0.2492

قيم I_3 بدلالة m و n

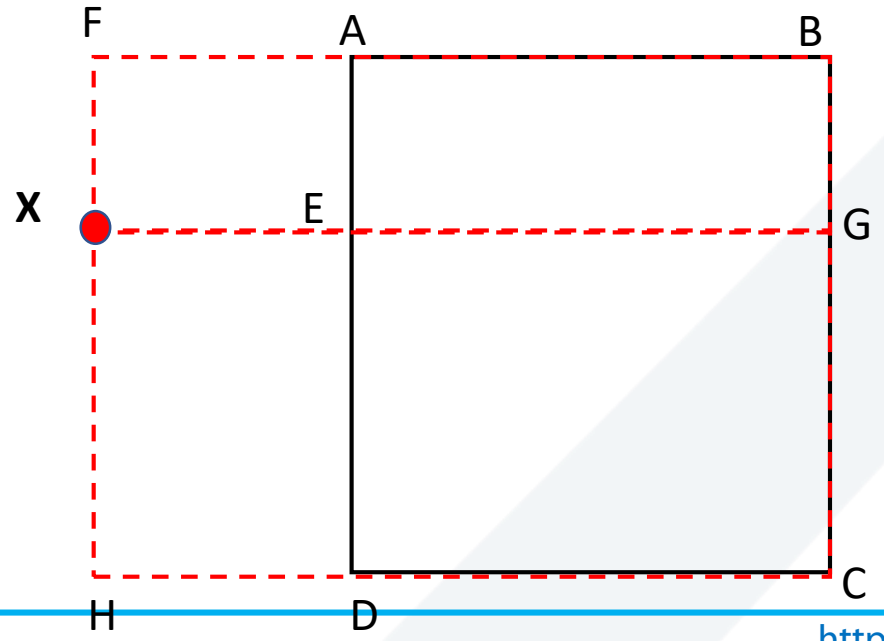


حساب الاجهادات في نقطة لا تقع تحت زاوية الحمولة

يمكن حساب الاجهادات تحت أية نقطة غير واقعة تحت إحدى زوايا المستطيل باستخدام مبدأ تنضد الآثار. لنعتبر الحمولة الشاقولية المستطيلة الموزعة بانتظام ABCD , من أجل حساب الاجهاد الشاقولي على عمق z تحت النقطة X فإنه يمكن تمييز حالتين:

أ- حالة وقوع النقطة X تحت الحمولة وضمن حدودها (الشكل): يتم في هذه الحالة تقسيم الحمولة ABCD إلى أربع حمولات مستطيلة جزئية FAEX , FBGX , GCHX و HDEX . يحسب الاجهاد الشاقولي تحت النقطة X كالتالي :

$$\Delta\sigma_{z(ABCD)} = \Delta\sigma_{z(FAEX)} + \Delta\sigma_{z(FBGX)} + \Delta\sigma_{z(GCHX)} + \Delta\sigma_{z(HDEX)}$$

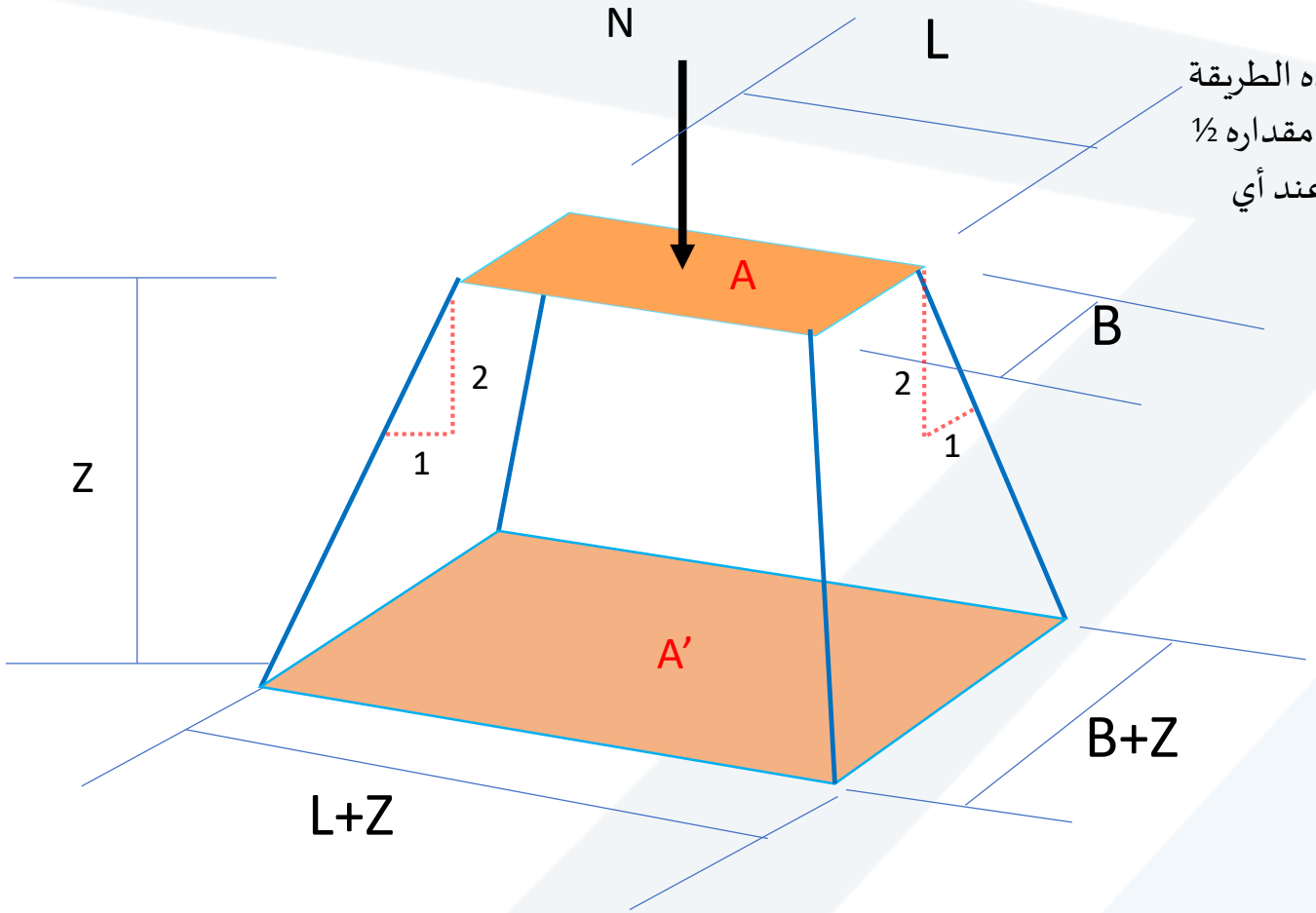


حالة وقوع النقطة خارج مجال الحمولة

وفي حالة وقوع النقطة X تحت الحمولة وخارج حدودها (الشكل): يتم في هذه الحالة حساب الاجهاد الشاقولي تحت النقطة X كالتالي :

$$\Delta\sigma_{z(ABCD)} = \Delta\sigma_{z(FBGX)} + \Delta\sigma_{z(GCHX)} - \Delta\sigma_{z(FAEX)} - \Delta\sigma_{z(EDHX)}$$

5. 7 الطريقة المبسطة (طريقة 2:1) لحساب الاجهادات الشاقولية الناتجة عن الحمولات الخارجية

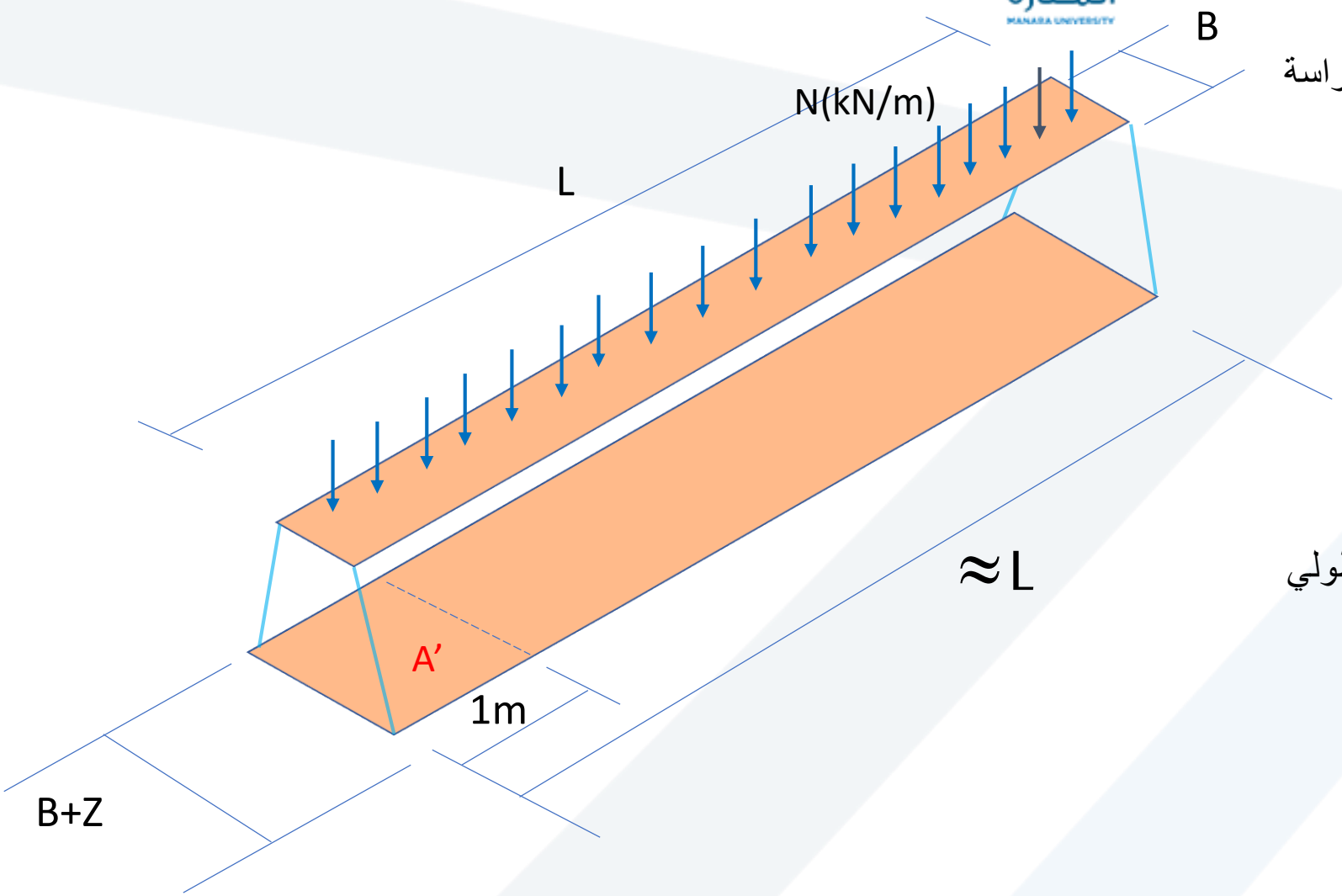


يمكن حساب توزع الاجهادات في التربة بطريقة مبسطة تدعى "طريقة 2:1" . ترتكز هذه الطريقة على فرضية أن السطح الذي تؤثر عليه الحمولة يزداد بشكل منتظم مع العمق بميل مقداره ½ (1 أفقي إلى 2 شاقولي)، وتفترض أن الحمولة تمثل أساساً صلباً (الهبوطات متساوية عند أي منسوب تحت الأساس)

أ- حالة أساس منفرد مستطيل :

$$\sigma_{z,p} = \frac{N}{A'} = \frac{N}{(B+z)(L+z)}$$

ب- حالة أساس مستمر:



بسبب تساوي الاجهادات على كامل طول الأساس فإنه يكفي دراسة متر واحد من طول الأساس

$$\sigma_{z,p} = \frac{N}{A'} = \frac{N}{(B+z)}$$

N حمولة المتر الطولي من الأساس وتعطى بالكيلونيوتن/متر طولي