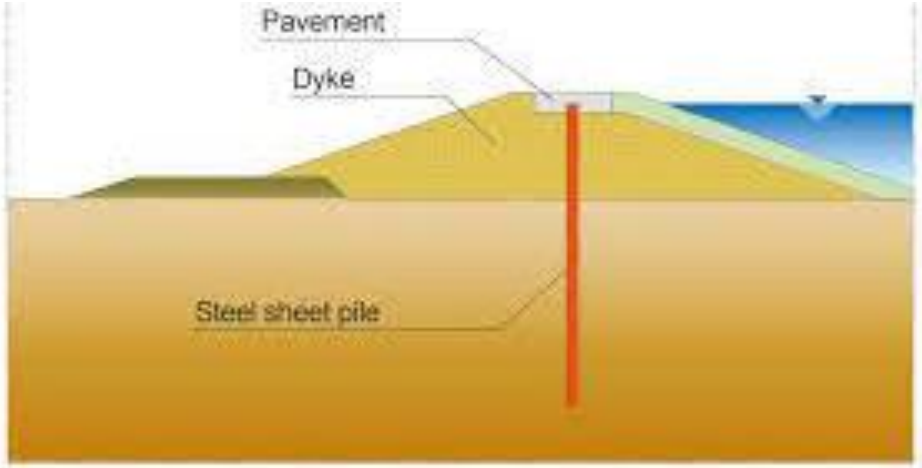
الفصل الثاني : الجدران الوتدية

2. 1 تعريف الجدران الوتدية

هي جدران مستمرة مؤلفة من صفائح وتدية مدقوقة شاقولياً بعضها إلى جانب البعض الآخر بواسطة آلات الدق (أو الغرز).

2. 2 استخدامات الجدران الوتدية

1- بناء و تدعيم أحواض التأسيس
2- تأمين كتامة حفر التأسيس الأخفض من منسوب المياه الجوفية
3- تستخدم كعنصر إنشائي: جدار رصيف ميناء – حائط لحماية ركائز الجسور النهرية من النحر – جدار كتامة تحت الهدارات لزيادة طول مسار التسرب و تخفيف الميل الهيدروليكي للمياه المتسربة



2. 3 أنواع الجدران الوتدية

1- الجدران الوتدية الخشبية: تستخدم عادة من أجل منشآت خفيفة مؤقتة حتى عمق 3m

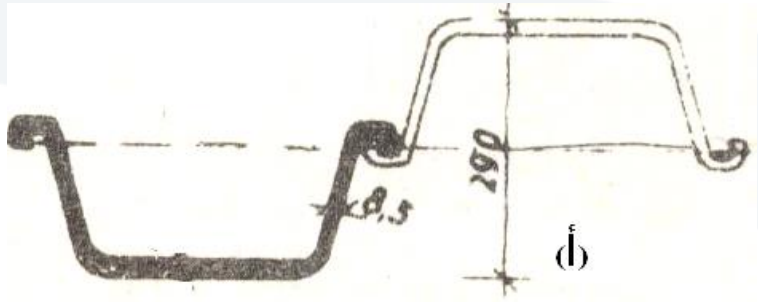
2- الجدران الوتدية البيتونية: السماكة 15-25cm تستطيع تحمل الإجهادات الناتجة خلال فترة الإنشاء و ما بعدها. تتميز بقدرتها الكبيرة على تحمل الدق.

3- الجدران الوتدية المعدنية: و هي الأكثر استخداماً السماكة بحدود 13mm – 10. يمكن دقها حتى عمق 30m و تتميز بأنها تعمر طويلاً (حتى 100 سنة في حالة المياه غير المالحة)، كما تتميز بخفة وزنها و إمكانية استخدامها أكثر من مرة.

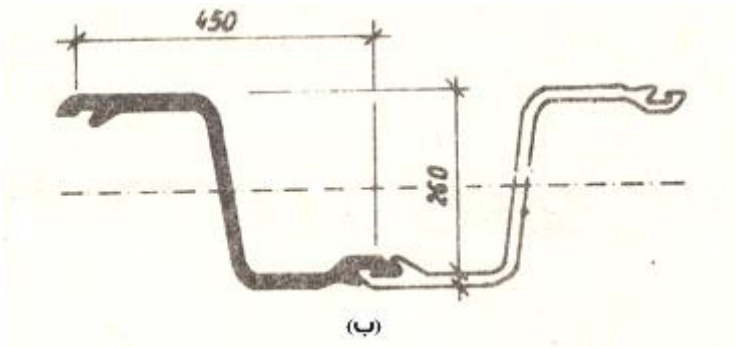
2. 4 أشكال الصفائح المعدنية

أ- صفائح بشكل **U** (صفائح لارسن) (الشكل -أ): لها نفس شكل القفل في الأطراف. ينفذ الجدار الوتدي منها بزلق قفل الصفيحة المعدنية ضمن قفل الصفيحة المجاورة بحيث توضع الصفائح بشكل متناوب بالنسبة لمحور الجدار الوتدي (صفيحة إلى يمين الجدار تليها صفيحة إلى يساره و هكذا) و بالتالي تكون جميع أقفال الصفائح الوتدية واقعة على محور الجدار الوتدي مما يؤدي إلى استمرارية متقطعة في الجدار بسبب الأقفال مما يضعف العزم المقاوم للجدار في الجزء الحر منه.

ب- صفائح بشكل Z(الشكل -ب): تكون الأقفال بعيدة عن محور الجدار و بالتالي تحسب بعزم مقاوم كامل لا يتعلق بطول الغرز ضمن التربة.



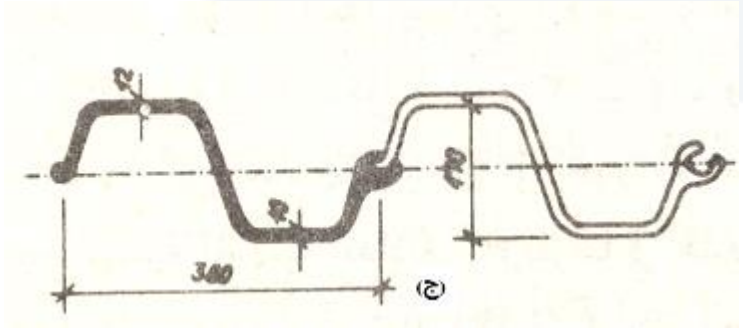
بشكل **U** (صفائح لارسن)



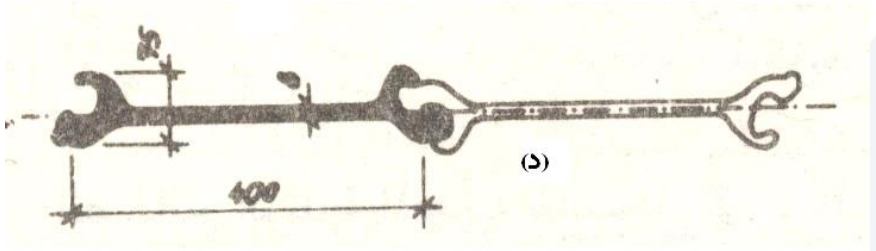
بشكل **Z**

ج- صفائح بشكل S(الشكل 2. 3-ج)

د- صفائح مستوية (الشكل 2. 3-د) : تتحمل قوى شد كبيرة و لا تتطاول، و لذلك يفضل استخدامها في الأحواض الأسطوانية



بشكل S



مستوية

2. 5 الحساب الستاتيكي للجدران الوتدية المعدنية الظفرية

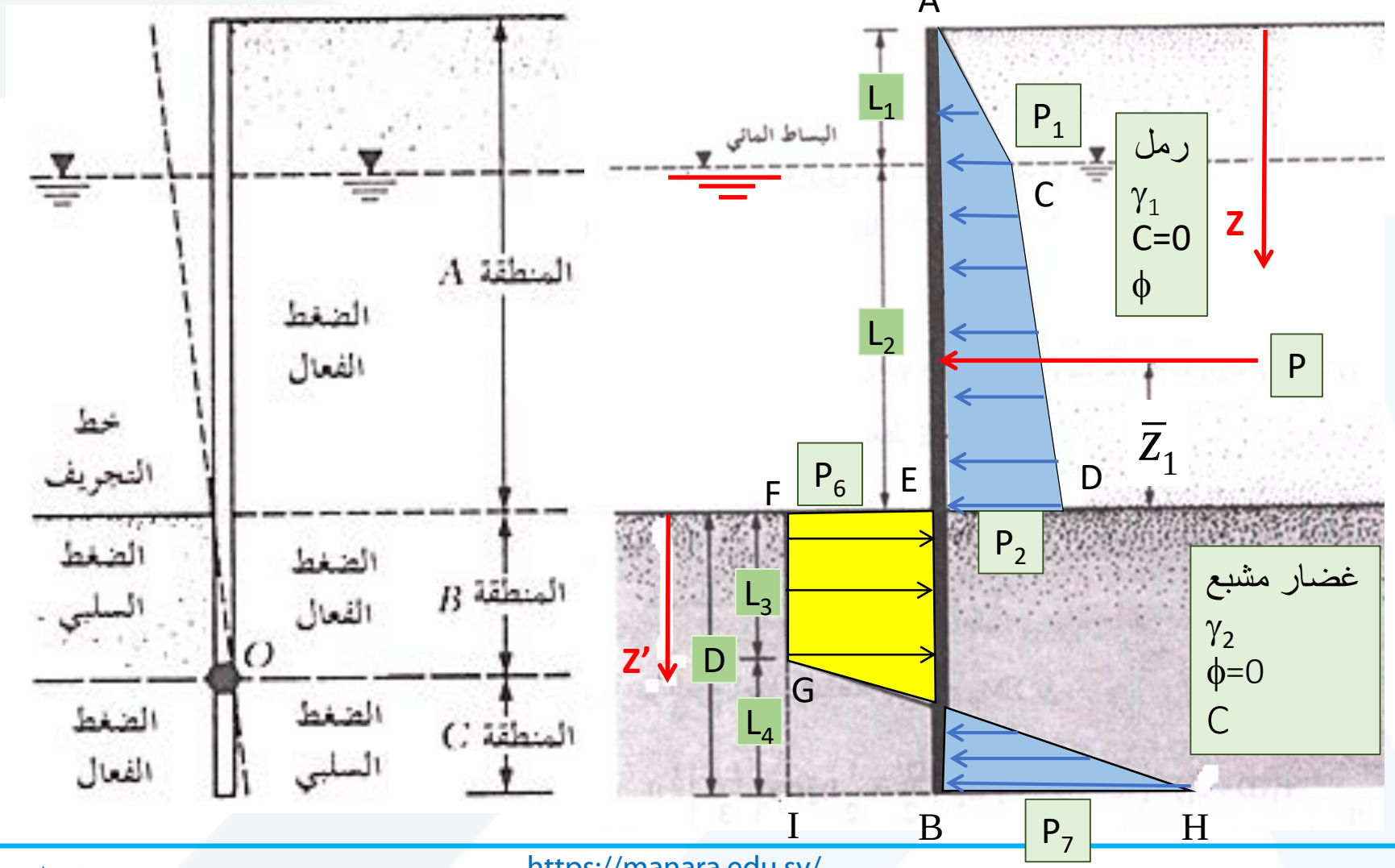
تستخدم الجدران الوتدية المعدنية الظفرية عادة للارتفاعات المتوسطة (6m ≤) فوق منسوب أرضية حوض التأسيس أو منسوب خط التجريف) و تأتي تسميتها بالظفرية من كون الصفائح الوتدية تعمل كجائز ظفري عريض فوق خط التجريف. تحسب هذه الجدران كجوائز موثوقة بشكل مرن في التربة و الجدار الوتدي لا يتشوه فقط في جزئه العلوي الظاهر و إنما يتشوه أيضاً ضمن التربة نفسها حيث يوجد المقطع المجهد إجهاداً أعظمياً.

من المفروض أن يتم حل الجائز الموثوق بشكل مرن بواسطة المعادلات التفاضلية لتشوهه و لكن نظراً لصعوبة ذلك فسنقبل بالافتراضات التقريبية التالية التي تسمح بحل الجدار كجائز مقرر ستاتيكياً و بالتالي استخدام معادلات التوازن الستاتيكي:

1- الجدار الوتدي لا يتشوه و إنما يدور فقط بنتيجة الضغط و كأنه عنصر صلب
2- دوران الجدار الوتدي يكون حول نقطة تقع ضمن التربة

دراسة الصفائح الوتدية الظفرية المغروزة في الغضار المشبع

بفرض وجود جدار وتدي يسند تربة رملية متجانسة أمام الجدار حتى منسوب حوض التأسيس، وتحتها تربة غضارية مشبعة وبفرض أن منسوب المياه الجوفية متساوي على جانبي الجدار وأن الجدار يدور حول نقطة O واقعة تحت منسوب أرضية حوض التأسيس(خط التجريف)


A
L1
البساط المائي
P1
C
رمل
γ1
C=0
ϕ
z
L2
P
Z̄1
D
E
F
P6
P2
L3
D
z'
G
L4
غضار مشبع
γ2
ϕ=0
C
I
B
P7
H
المنطقة A
الضغط الفعال
خط التجريف
الضغط السلبي
الضغط الفعال
المنطقة B
الضغط السلبي
الضغط الفعال
المنطقة C

حسب رانكين

طبقة الرمل:

$K_p=\tan^2(45+\phi/2)$ $K_a=\tan^2(45-\phi/2)$

$$P_1=\gamma_1.L_1.K_{a1}$$

$$P_2=(\gamma_1.L_1+\gamma_{1sub}.L_2)\,K_{a1}=q\,K_{a1}$$

طبقة الغضار المشبع : Ka = Kp = 1

1- من العمق Z=L حتى العمق $Z=L+L_3$

$$p_a=[q+\gamma_2(z-L)]K_{a2}-2C\sqrt{K_{a2}}=q+\gamma_2(z-L)-2C$$

$$p_p=\gamma_2(z-L)K_{p2}+2C\sqrt{K_{p2}}=\gamma_2(z-L)+2C$$

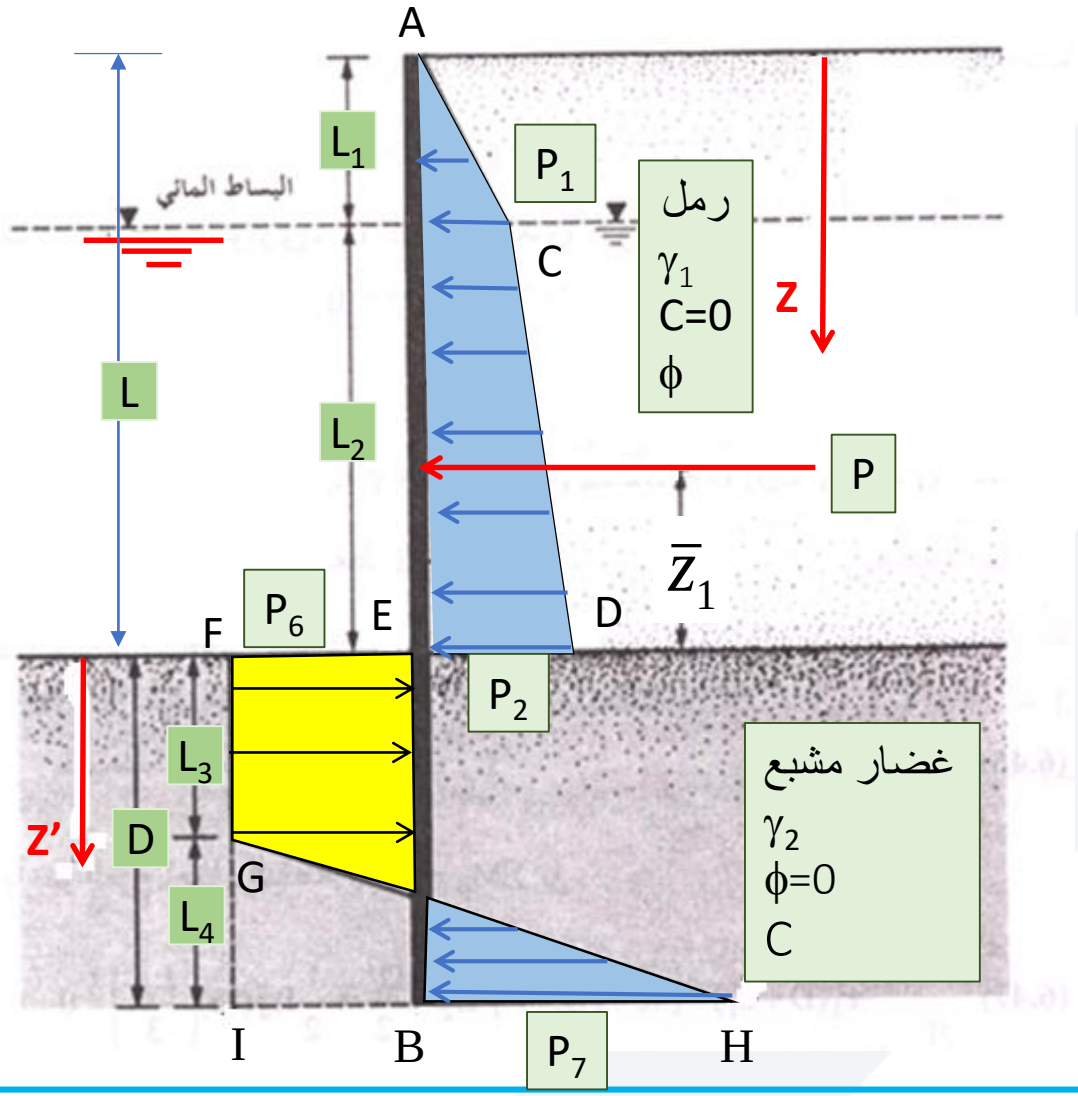
$$P_6=p_a-p_p=q-4C=-(4C-q)$$

2- عند العمق $Z=L+D=L+L_3+L_4$

$$p_p=[q+\gamma_2(z-L)]K_{p2}+2C\sqrt{K_{p2}}=q+\gamma_2(z-L)+2C$$

$$p_a=\gamma_2(z-L)K_{a2}-2C\sqrt{K_{a2}}=\gamma_2(z-L)-2C$$

$$P_7=p_p-p_a=4C+q$$



معادلات التوازن

1- معادلة إسقاط القوى الأفقية: $\Sigma F = 0$

$$A_{(ACDE)} - A_{(EFIB)} + A_{(GIH)} = 0$$

$$P - (4C-q).D + \tfrac{1}{2}.L_4(4C-q + 4C + q) = 0$$

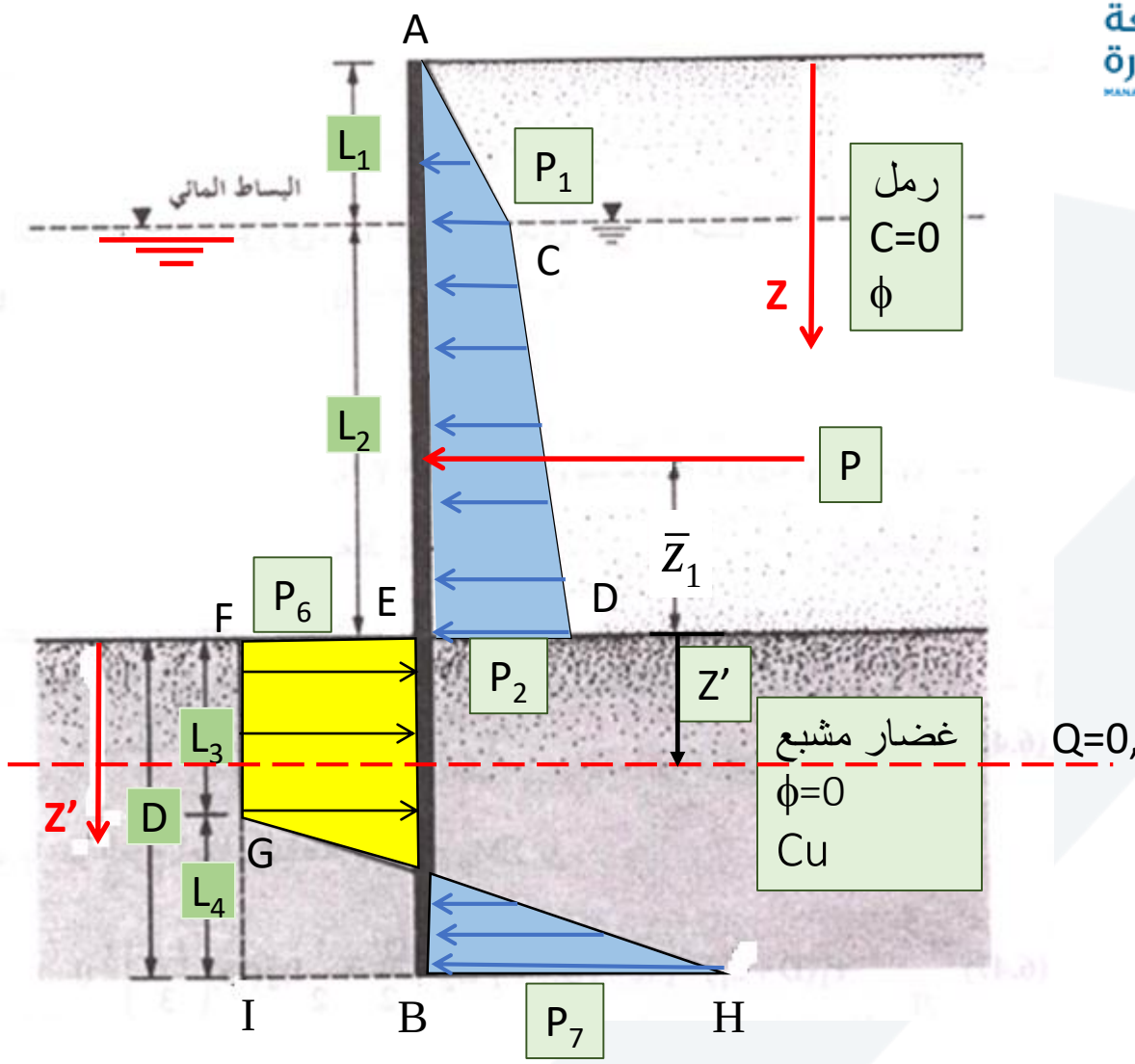
$$L_4 = \frac{D(4C-q)-P}{4C}$$

2- معادلة عزم حول B:

$$P(D+\overline{Z}_1) - (4C-q)\frac{D^2}{2} + \frac{1}{2}.L_4.(8C)(\frac{L_4}{3}) = 0$$

بالتعويض عن L_4 بقيمتها نحصل على معادلة من **الدرجة الثانية** بالنسبة لـ D . بحلها نحصل على D (العمق النظري لغرز الصفائح الوتدية ضمن الطبقة الغضارية)

ملاحظة: نحصل على عمق الغرز الفعلي بزيادة D بمقدار 50% (نأخذ 1.5D)



Q=0, M_{max}

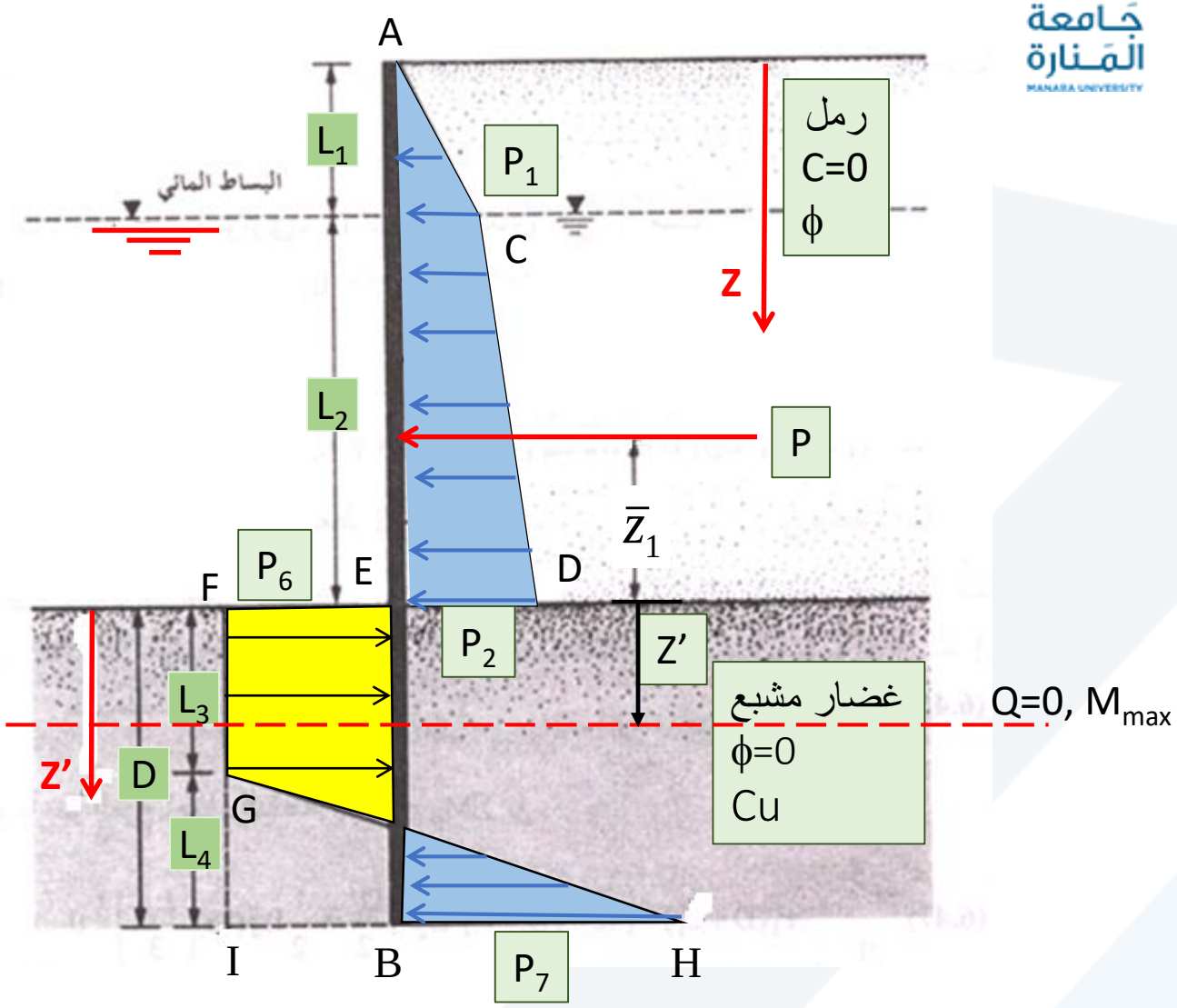
حساب العزم الأعظمي

العزم الأعظمي (القص عنده معدوم) سيقع بين النقطتين E و G.

$$Q=0 \Rightarrow P - P_6 . Z' = 0$$

$$\Rightarrow Z' = \frac{P}{P_6}$$

$$M_{max} = P(\overline{Z}_1 + Z') - P_6 . \frac{Z'^2}{2}$$



حالة وجود حمولة خلف الجدار الوتدي

يؤخذ تأثير الحمولة الخارجية خلف الجدار الوتدي بنفس الطريقة التي تم عرضها في الفصل الأول وسنذكر هنا فقط حالة حمولة موزعة بانتظام q_s ممتدة على مساحة واسعة خلف الجدار

تسبب الحمولة الخارجة ضغطاً جانبياً إضافياً P_{qs} على كامل ارتفاع الجدار الوتدي.
يحسب هذا الضغط بالعلاقة التالية :

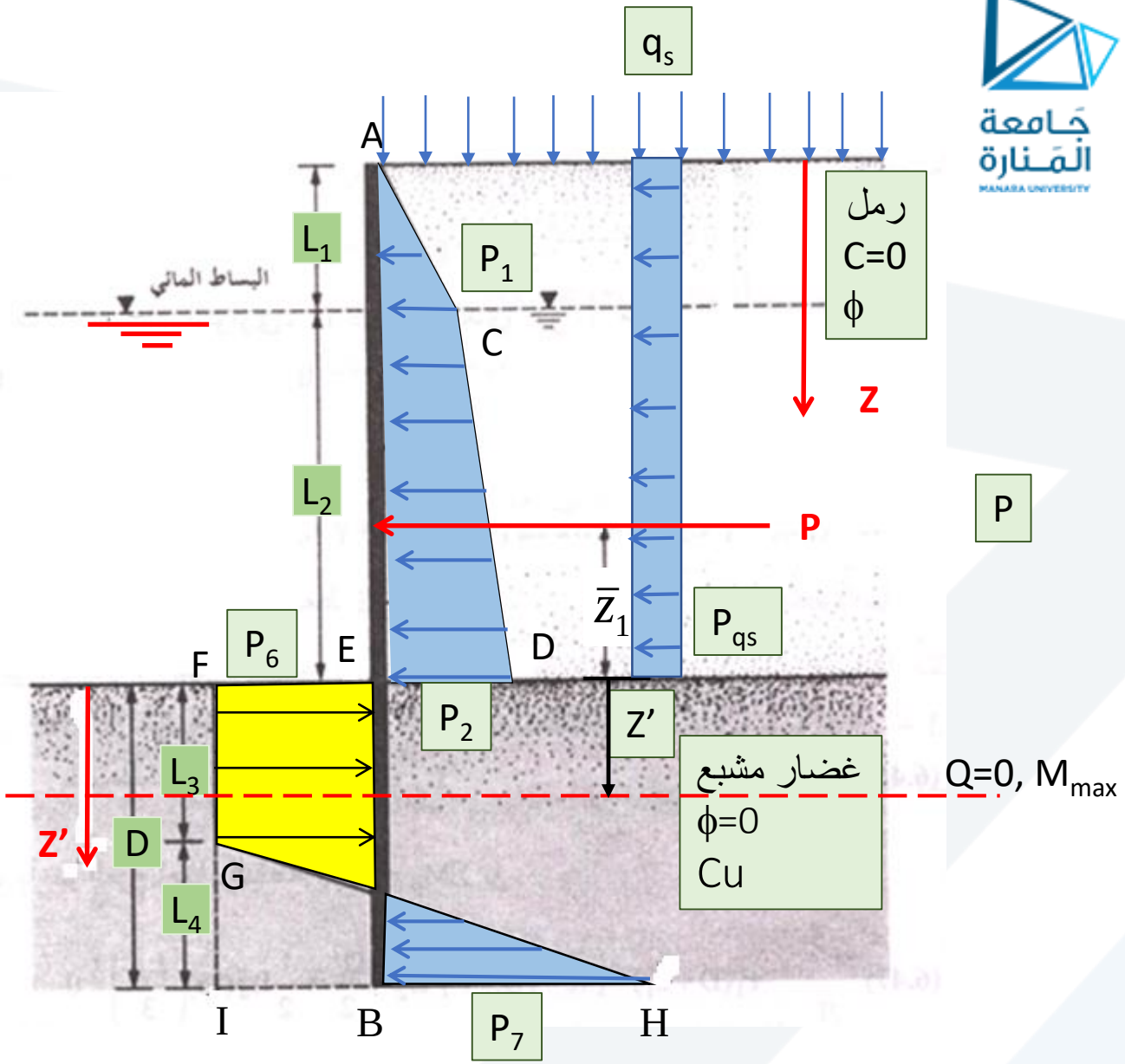
$$P_{qs} = q_s \cdot K_{a1}$$

تضاف محصلة P_{qs} إلى محصلة الضغط الجانبي P فوق خط التجريف:

أما تحت خط التجريف فيؤخذ أثر هذا الضغط عن طريق إضافة P_{qs} إلى الضغط الشاقولي qعند منسوب التجريف بحيث يصبح :

$$q = \gamma_1 . L_1 + \gamma_{1sub} . L_2 + q_s$$

وتصبح القوة P محصلة جميع الضغوط الجانبية على الجدار فوق منسوب التجريف، الناتجة عن التربة والحمولة الخارجية السطحية



دراسة الصفائح الوتدية الظفرية المغروزة في الغضار المشبع على كامل ارتفاع الصفيحة

$$Ka = Kp = 1$$

يسبب تماسك التربة تنشأ اجهادات شادة عند السطح وفي المنطقة القريبة منه، ويتم عادة إما فرض الاجهاد على السطح يساوي الصفر ويزداد هذا الاجهاد خطياً حتى قيمة الاجهاد المحسوب عند منسوب حوض التأسيس (خط التجريف) أو يتم إهمال هذه الاجهادات على كامل المنطقة المشدودة.

1- بفرض الاجهاد على السطح = 0

يتم في هذه الحالة فرض الاجهاد عند السطح يساوى الصفر ويزداد خطياً حتى قيمة الاجهاد المحسوبة عند منسوب حوض التأسيس

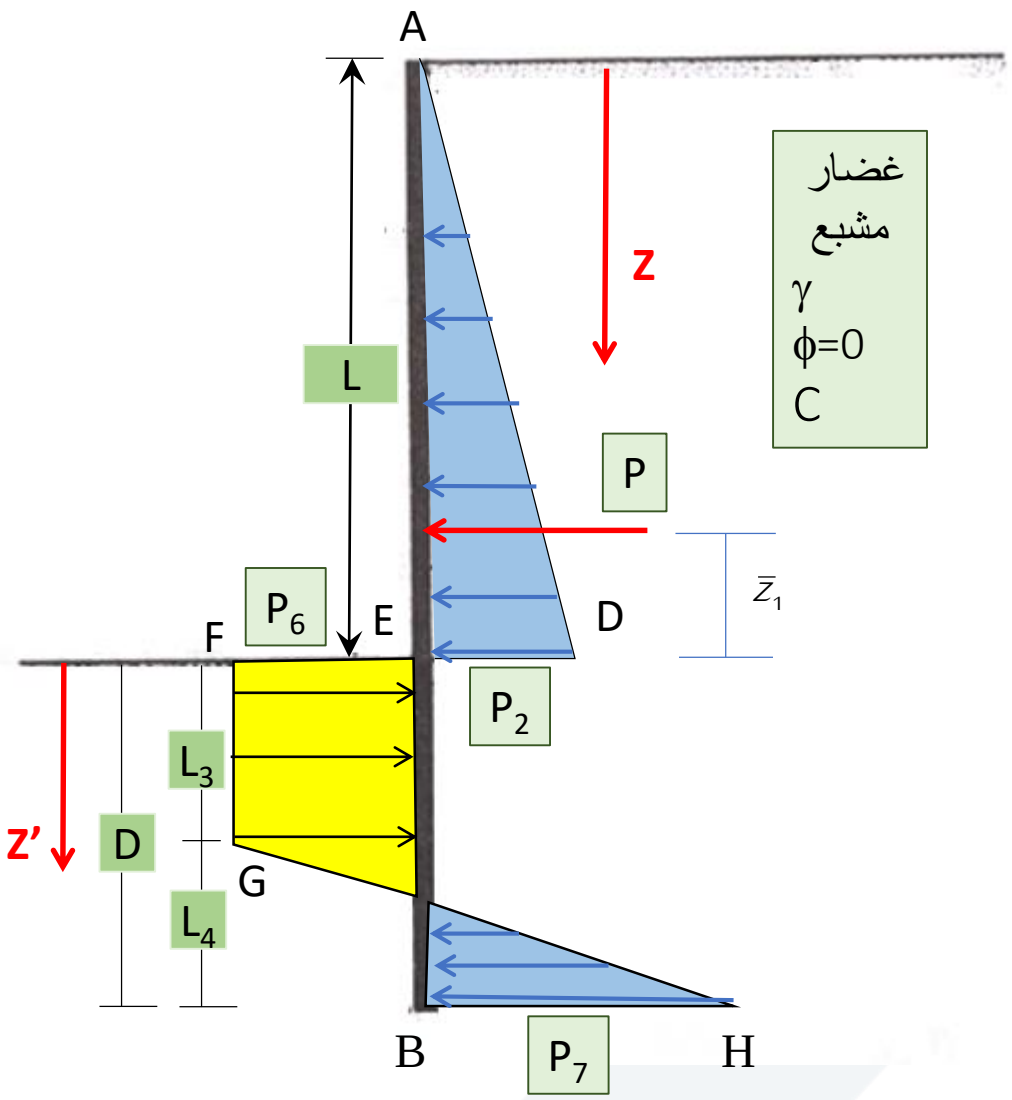
$$P_2 = \gamma.L - 2C_u = q - 2C_u$$

$$P_6 = 4C_u - q$$

$$P_7 = 4C_u + q$$

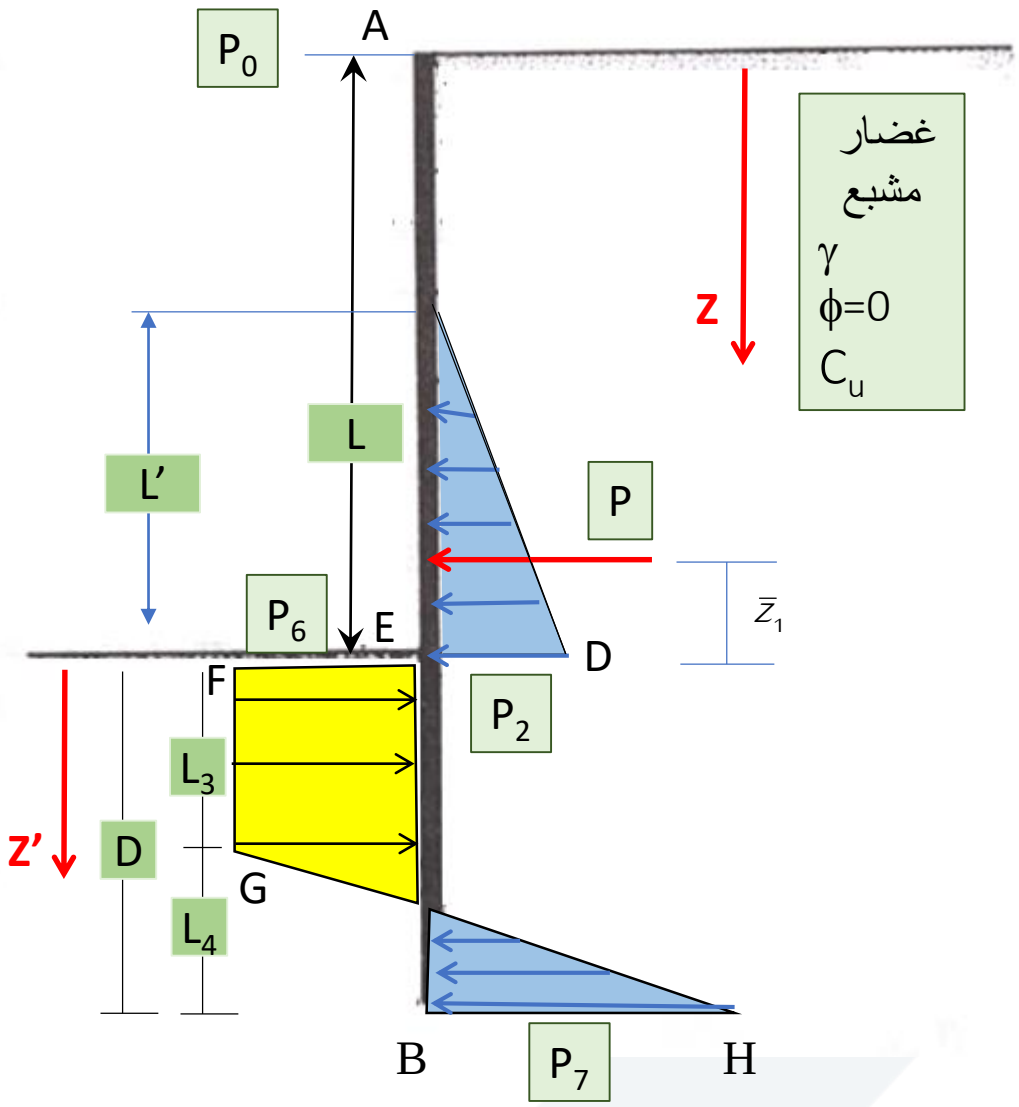
$$q = \gamma.L$$

$$\bar{Z}_1 = \frac{L}{3}$$



2- بإهمال الشد على كامل الطول L

يتم في هذه الحالة إهمال هذه الاجهادات على كامل المنطقة المشدودة واعتبارها غير محملة.



$Ka = Kp = 1$

$$p_2 = \gamma . L - 2C_u = q - 2C_u$$

$P_6 = 4C_u - q$

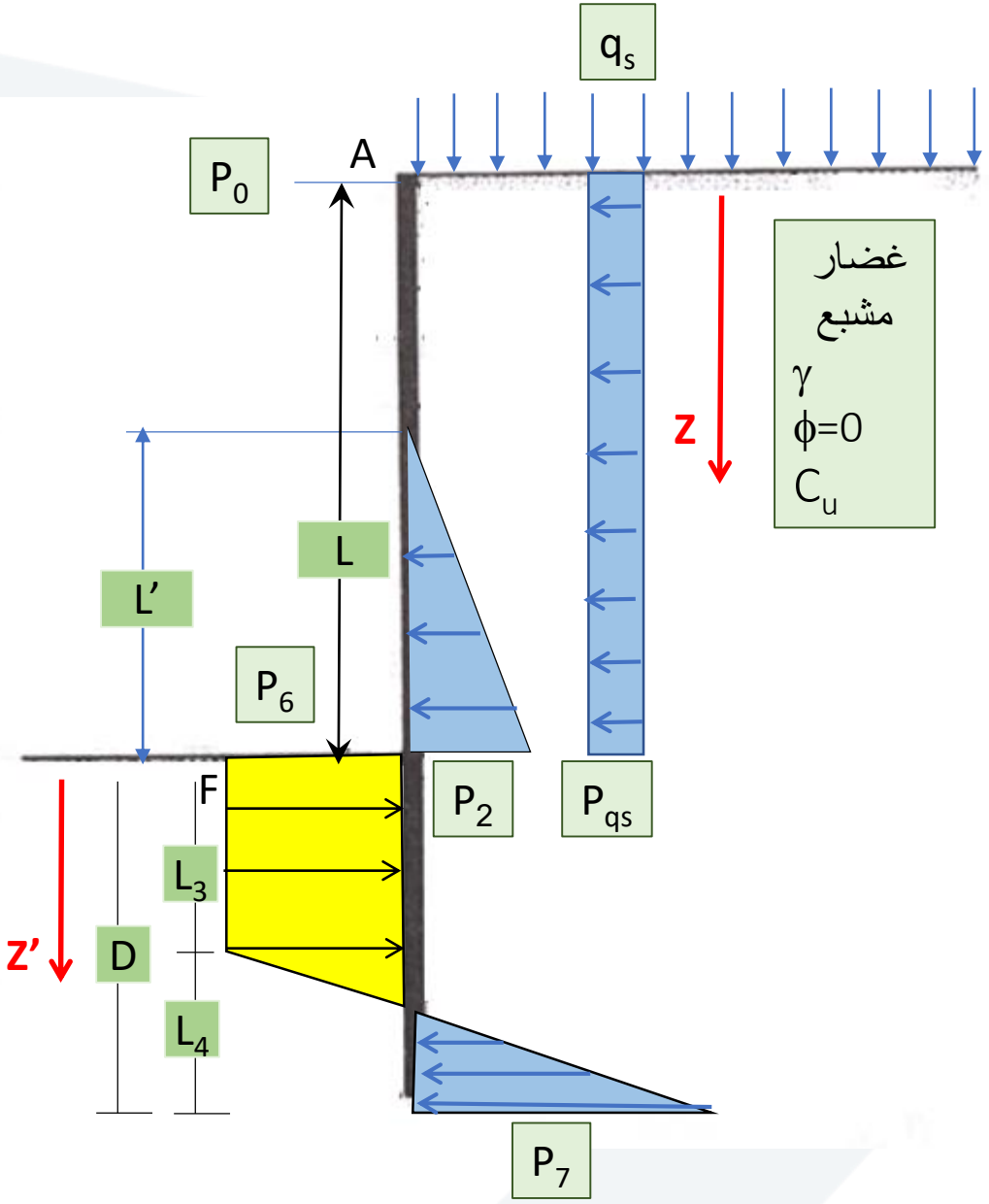
$q = \gamma . L$

$P_7 = 4C_u + q$

$$\bar{Z}_1 = \frac{L'}{3}$$

دراسة الصفائح الوتدية الظفرية المغروزة في الغضار المشبع على كامل ارتفاع الصفيحة مع حمولة على السطح

2- بإهمال الشد على كامل الطول L



$Ka = Kp = 1$

$p_0 = -2C_u$ تهمل

$p_{qs} = q_s . k_a = q_s$

$p_2 = \gamma . L - 2C_u = q - 2C_u$

$p_2 = P_1 + P_q$

$P_6 = 4C_u - q$

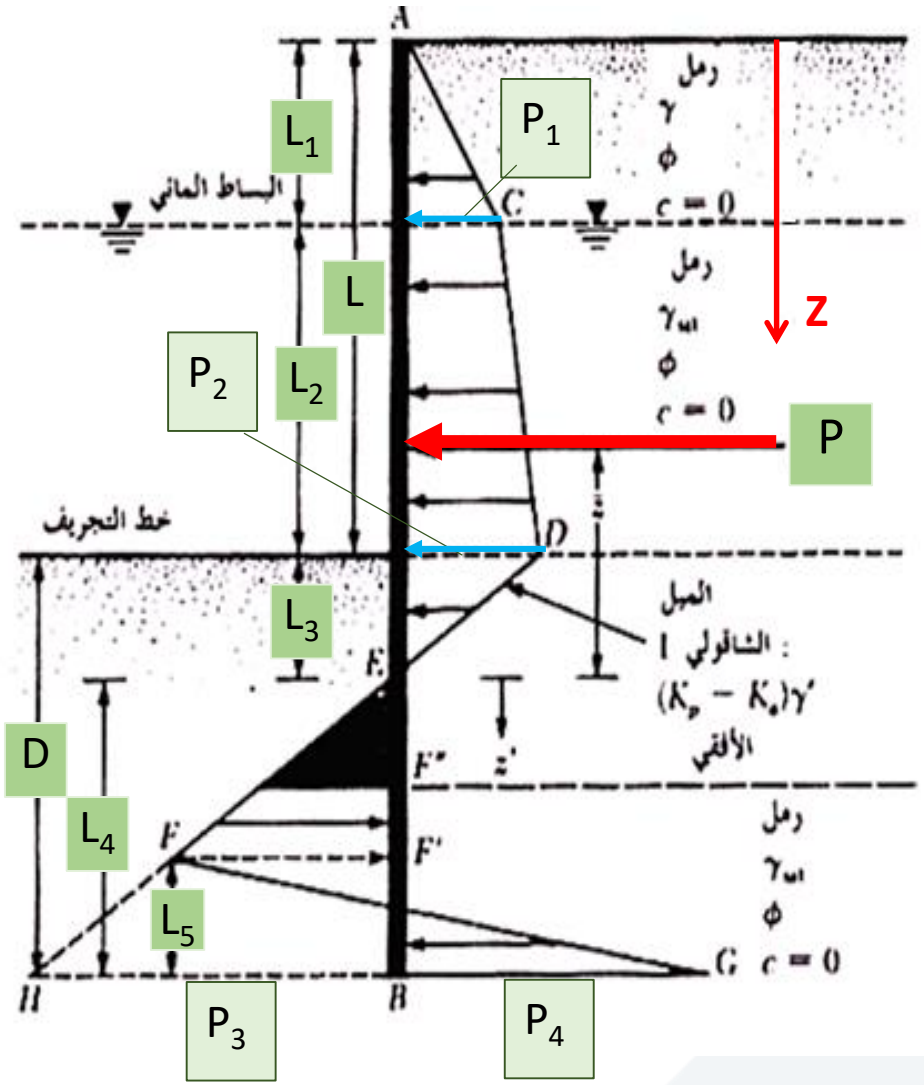
$q = \gamma . L + q_s$

$P_7 = 4C_u + q$

$q = \gamma . L$

دراسة الصفائح الوتدية الظفرية المغروزة في الرمل

حسب رانكين



$P_1 = \gamma . L_1 . K_a$: $K_a = \tan^2(45-\phi/2)$

$P_2 = (\gamma . L_1 + \gamma_{sub} . L_2)\ K_a = q\ K_a$

q الاجهاد الفعال الناتج عن وزن التربة الفعال فوق منسوب أرضية حوض التأسيس

For $L+D-L_5 \geq Z > L$

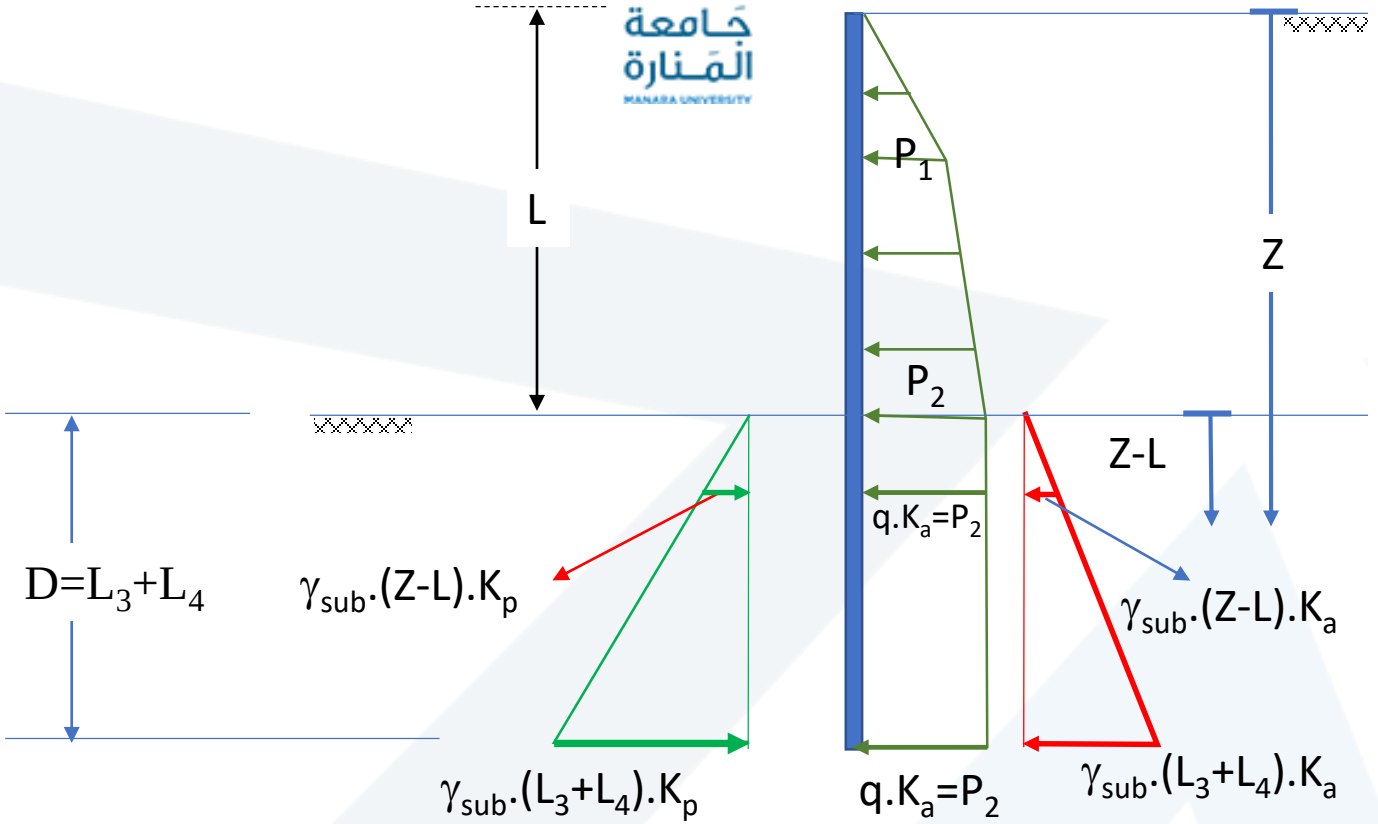
$P_a = [q + \gamma_{sub} . (Z - L)]\ K_a$

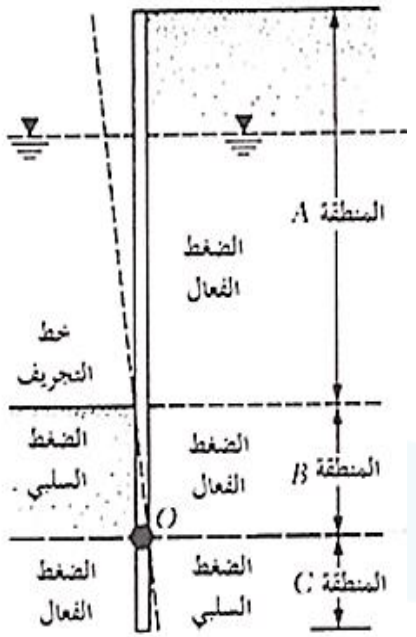
$P_P = \gamma_{sub} . (Z - L) . K_P$ $K_P = \tan^2(45+\phi/2)$

$P(z) = P_a - P_P = q\ K_a - \gamma_{sub} . (Z - L) . (K_P - K_a)$

For $Z = L + L_3$ ⇒ $P(z) = P_2 - \gamma_{sub} . L_3 . (K_P - K_a) = 0$ ⇒ $L_3 = \dfrac{P_2}{\gamma_{sub}(K_P - K_a)}$

حساب P3

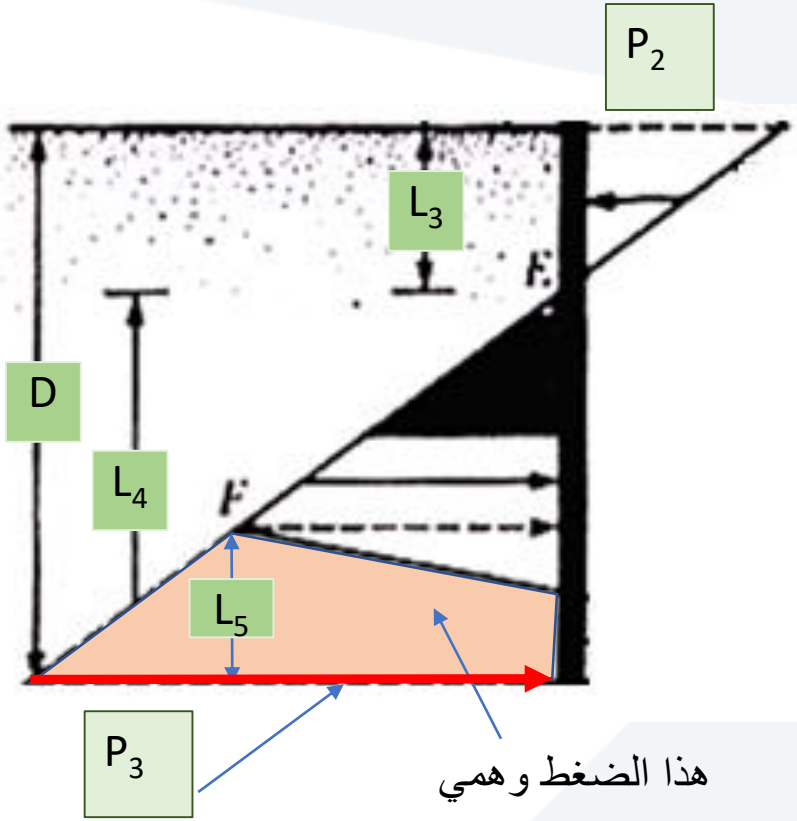




لو استمر توزع الضغط المعطى بالعلاقة السابقة حتى العمق Z= L+D يكون الضغط :

For Z= L+D ⇒ $P(z) = p_3 = P_2 - \gamma_{sub}.(L_3+L_4).(K_P - K_a) = \underbrace{P_2 - \gamma_{sub} . L_3 . (K_P - K_a)}_{=P(Z=L+L_3)=0} - \gamma_{sub} . L_4 . (K_P - K_a)$ ⇒ $P_3 = -\gamma_{sub} . L_4 . (K_P - K_a)$

طريقة ثانية لحساب P3



من تشابه المثلثات

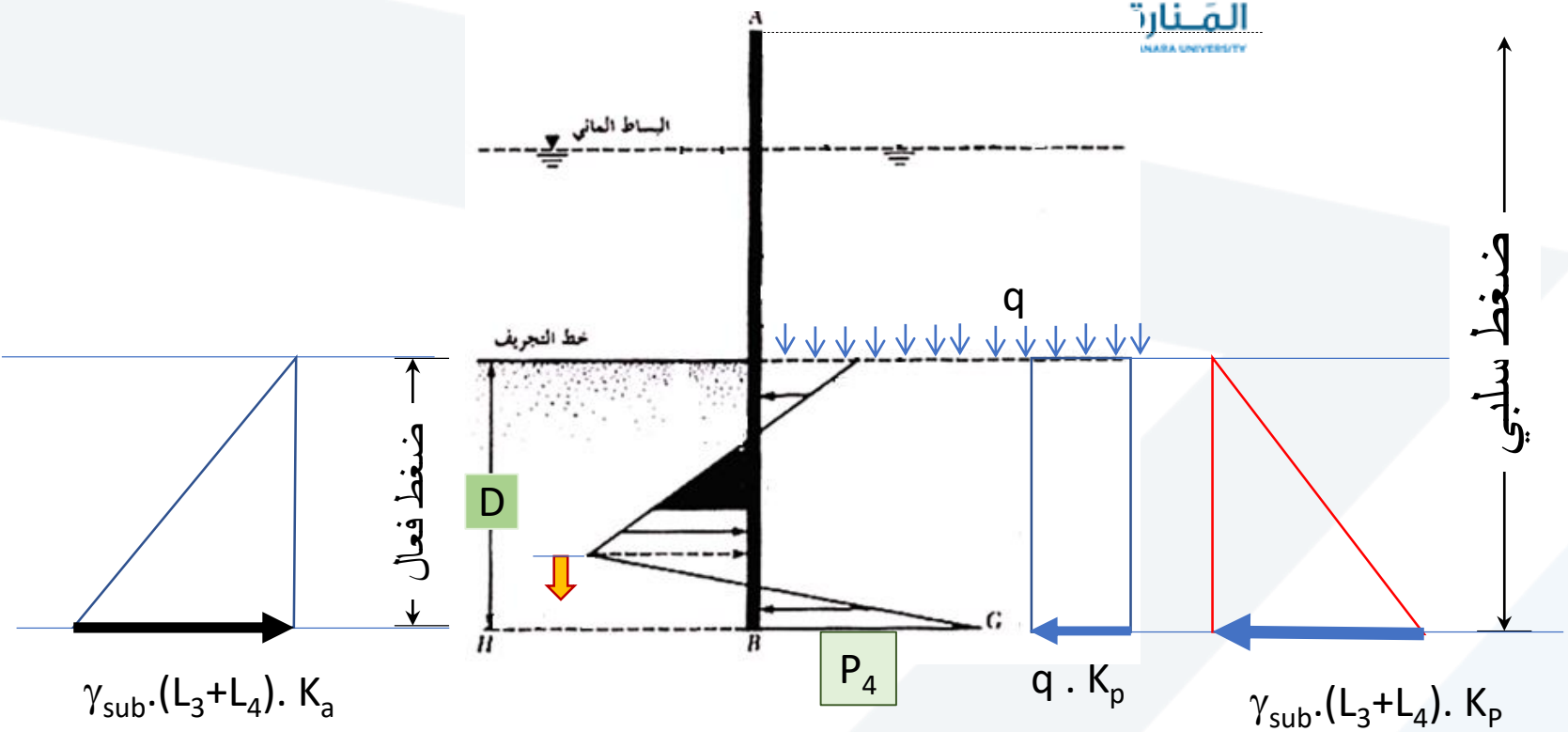
$$\frac{L_3}{L_3+L_4}=\frac{p_2}{p_2+p_3}\Rightarrow p_3=p_2\frac{L_4}{L_3}$$

$$but,\ \frac{P_2}{L_3}=\gamma_{sub}(K_P-K_a)\Rightarrow$$

$$p_3=\gamma_{sub}.L_4.(K_p-K_a)$$

ملاحظة : إن الضغط P_3 المحسوب أعلاه وهمي وغير مطبق على الصفيحة الوتدية وهو يستخدم فقط كوسيلة مساعدة عند حساب توازن قوى الضغط على الجدار

حساب P4



عند العمق $Z > L+D-L_5$ يكون :

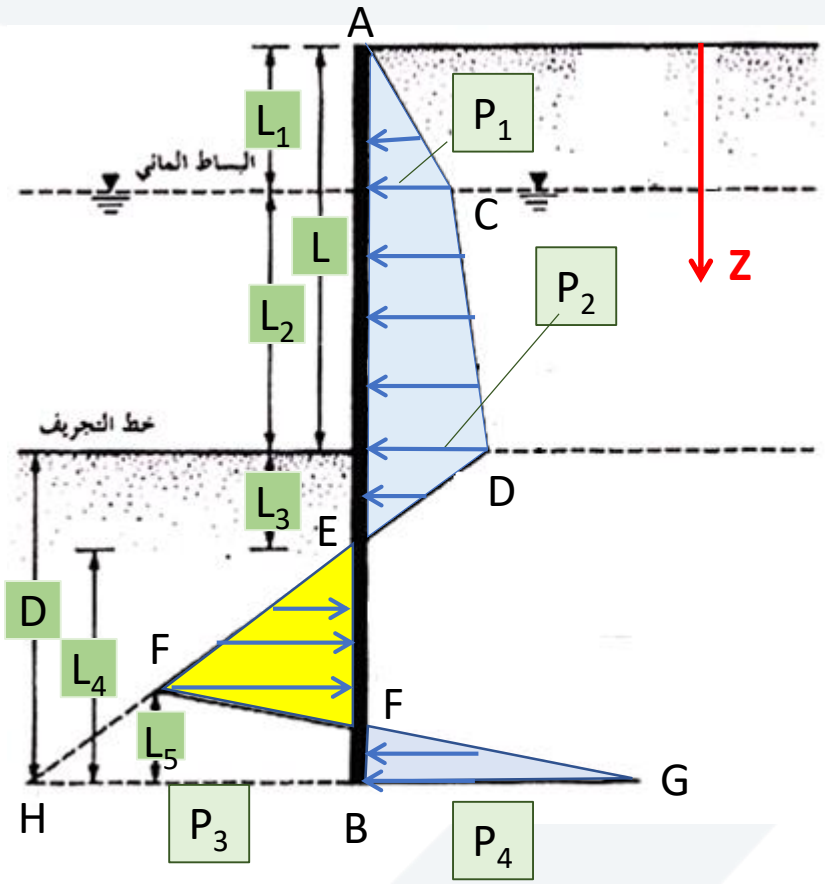
$$P(z) = q . k_p + \gamma_{sub}.(Z-L).(K_P - K_a)$$

حيث $q=(\gamma.L_1 + \gamma_{sub}.L_2)$

عند العمق $Z= L+D$ يكون لدينا:

$$P_4=q . K_p +\gamma_{sub}.(L_3+L_4).(K_P-K_a)=\underbrace{q . k_p +\gamma_{sub}. L_3.(K_P-K_a)}_{P_5} + \underbrace{\gamma_{sub}. L_4.(K_P-K_a)}_{P_3}$$

ملخص



$$P_1 = \gamma . L_1 . K_a$$

$$P_2 = (\gamma . L_1 + \gamma_{sub} . L_2)\, K_a = q\, K_a$$

$$P_3 = \gamma_{sub} . L_4 (K_P - K_a)$$

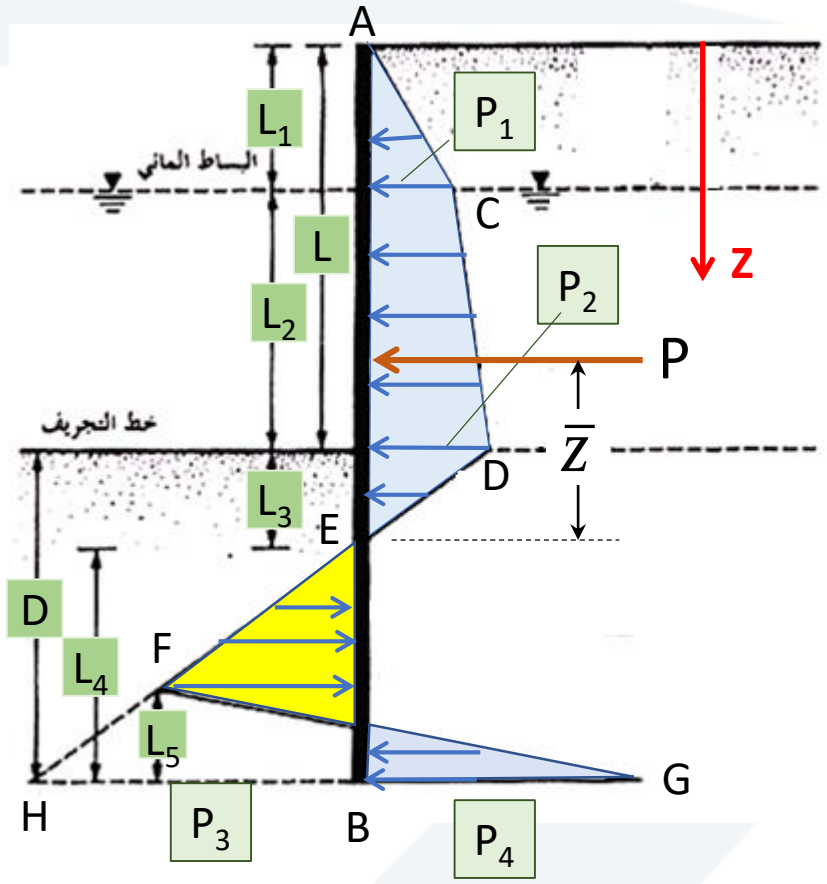
$$P_4 = \gamma_{sub} . L_4 (K_P - K_a) + q\, K_P + \gamma_{sub} . L_3 (K_P - K_a)$$

$$L_3 = \frac{P_2}{\gamma_{sub} (K_P - K_a)}$$

حساب طول غرز الصفيحة $D = L_3 + L_4$

1- معادلة اسقاط للقوى على المحور الأفقي $\Sigma Fx = 0$

2- معادلة عزم حول النقطة B $\Sigma MB = 0$



$$\Sigma Fx = 0 \Rightarrow A_{(ACDE)} - A_{(EFHB)} + A_{(FHBG)} = 0$$

$$\Rightarrow P - \tfrac{1}{2} P_3.L_4 + \tfrac{1}{2}(P_3 + P_4).L_5 = 0$$

$$\Rightarrow L_5 = \frac{P_3.L_4 - 2P}{P_3 + P_4}$$

$$\Sigma M_B = 0$$

$$\Rightarrow P(L_4 + \bar{Z}) - \frac{1}{2}P_3.L_4.\frac{L_4}{3} + \frac{1}{2}(P_3 + P_4).L_5.\frac{L_5}{3} = 0$$

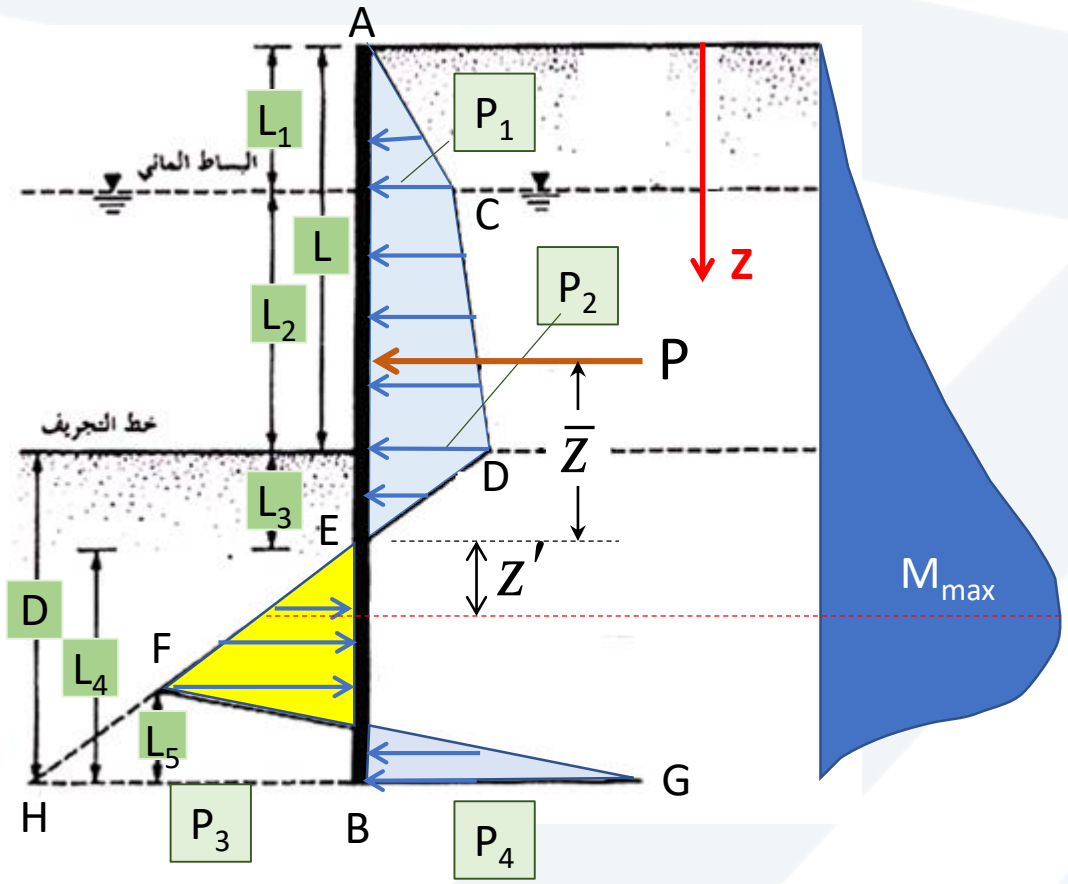
L4وهي معادلة من الدرجة الرابعة بالنسبة إلى

$D=L_3+L_4$ ومنها نحصل على L_4بالحل نحصل على

أي أن :30%للأمان نزيد طول الغرز الحسابي بمقدار ,

$$D_{eff} = 1.3\ D$$

حساب العزم الأعظمي في الصفيحة الوتدية



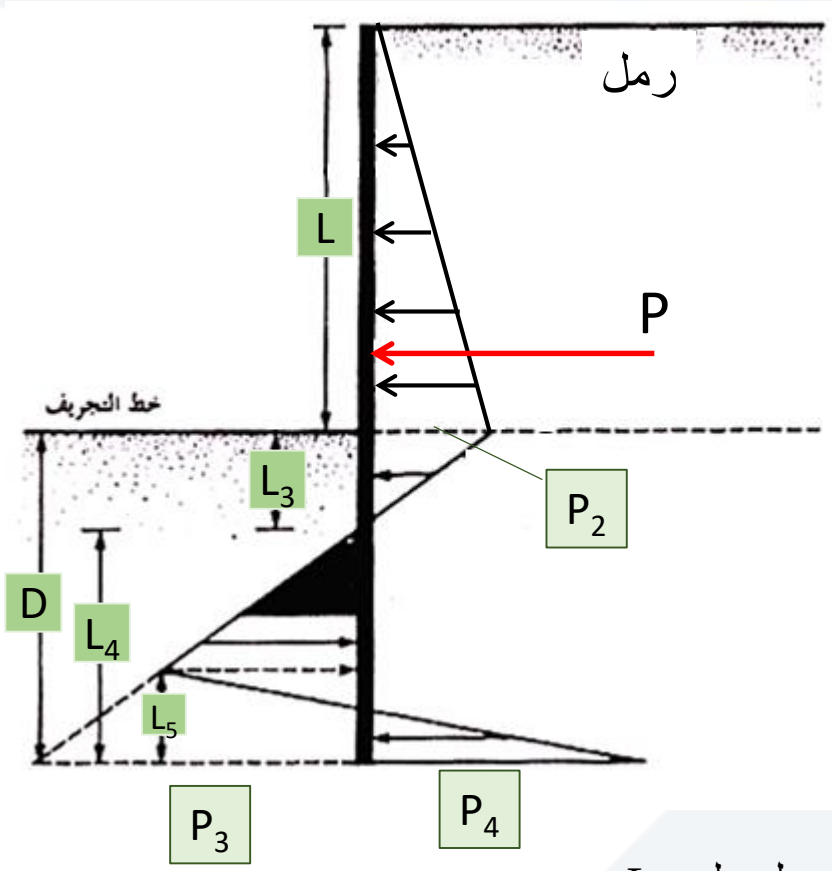
$$Q=0 \Rightarrow P-\frac{1}{2}.\gamma_{sub}.Z'(K_P-K_a).Z'=0$$

$$Z'=\sqrt{\frac{2P}{\gamma_{sub}.(K_P-K_a)}}$$

$$M_{max}=P(\bar{Z}+Z')-\frac{1}{2}.\gamma_{sub}.Z'^{2}(K_P-K_a).\frac{Z'}{3}$$

حالة خاصة :

حالة الصفائح الوتدية المدقوقة في الترب الرملية في حالة غياب المياه الجوفية



$$P_2 = \gamma . L . K_a$$

$$P_3 = \gamma . L_4 . (K_P - K_a)$$

$$P_4 = \gamma . L . K_P + \gamma . L_3 (K_P - K_a) + \gamma . L_4 (K_P - K_a)$$

$$L_3 = \frac{L . K_a}{(K_P - K_a)}$$

$$P = \frac{1}{2} P_2 . L + \frac{1}{2} P_2 . L_3$$

إيجاد L_5: تحسب L_5 من معادلة إسقاط للقوى باتجاه x نحصل على L_5 بدلالة L_4

إيجاد L_4: (و من ثم عمق الغرز $(D = L_3 + L_4)$

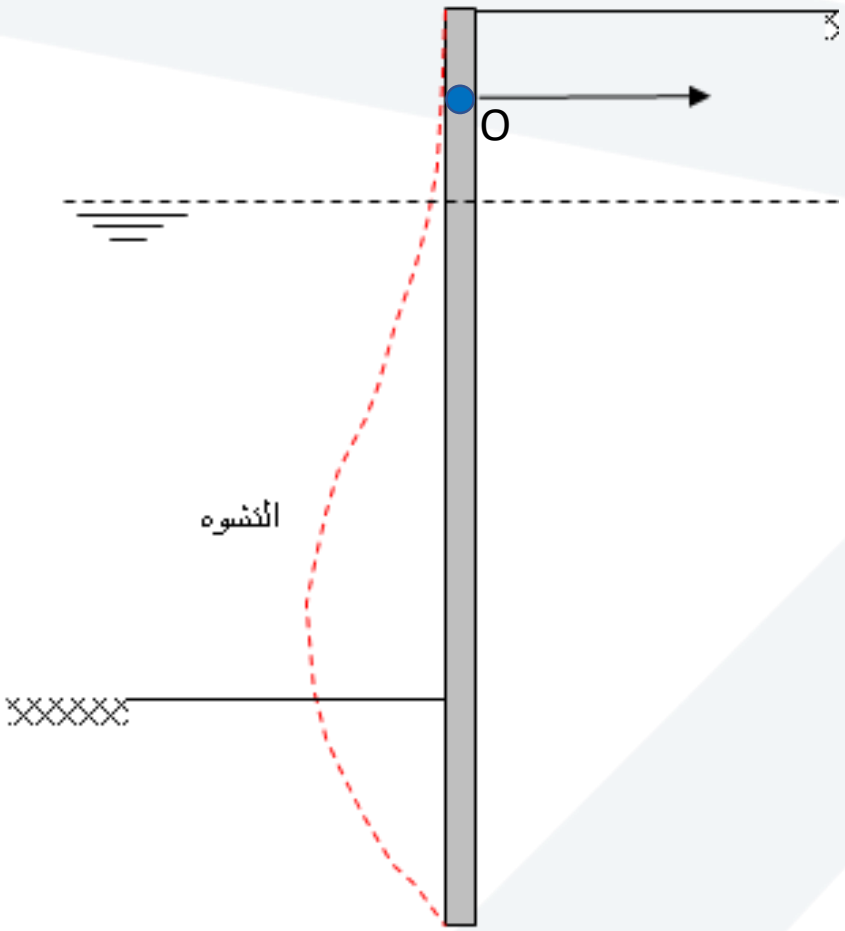
من معادلة عزوم حول B : $\Sigma M_B = 0$ $\Leftarrow$ نحصل على معادلة من **الدرجة الرابعة** بالنسبة لـ L_4 بحلها نحصل على L_4

6 .2 دراسة الجدران الوتدية المثبتة بواسطة الشدادات

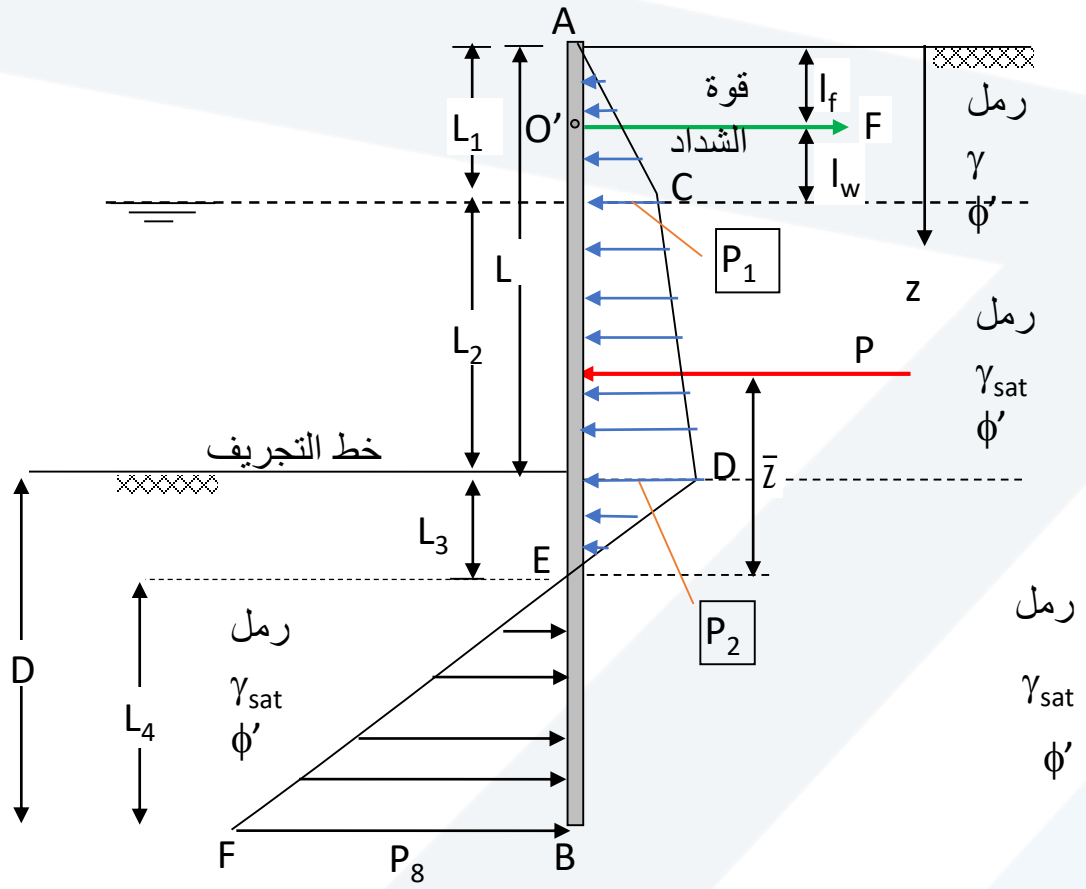
عندما يتجاوز ارتفاع الردم خلف جدار وتدي ظفري 6m يصبح من الضروري اقتصادياً تثبيته قرب نهايته العلوية باستخدام قضبان ربط أو تثبيت (شدادات) مما يسمح بالتقليل من عمق الغرز المطلوب للصفائح الوتدية و يقلل من مساحة المقطع العرضي و وزن الأوتاد الصفائحية اللازمة للإنشاء.

في هذه الحالة لا يحدث دوران للجدار حول نقطة تقع ضمن التربة وفي الجزء السفلي من الجدار الوتديكما رأينا في حالة الجدران الوتدية الظفرية و إنما يتم الدوران حول نقطة اتصال الشداد بالجدار الوتدي (النقطة O).

يمكن تمثيل تغيرات التشوه و العزم لجدار وتدي مثبت كما هو مبين بالشكل
من أجل التمكن من حل المسألة باعتبارها مسألة تشوهات مستوية نفترض أن الشداد مستمر في المستوي الموازي له وبحيث تحسب قوة الشداد على المتر الطولي.



دراسة الصفائح الوتدية المثبتة المغروزة في الرمل



$$P_1 = \gamma . L_1 . K_a$$

$$P_2 = (\gamma . L_1 + \gamma_{sub} . L_2)\, K_a = q\, K_a$$

$$L_3 = \frac{P_2}{\gamma_{sub}\,(K_P - K_a)}$$

$$P_8 = \gamma_{sub} . L_4\, (K_P - K_a)$$

تحديد عمق الغرز

معادلة عزم حول O´:

$$-P.(L_w+L_2+L_3-\bar{Z})+\frac{1}{2}P_8 L_4.(l_w+L_2+L_3+\frac{2}{3}L_4)=0$$

$$-P.(L_w+L_2+L_3-\bar{Z})+\frac{1}{2}\left[\gamma_{sub}(k_p-k_a)\right]L_4^2.(l_w+L_2+L_3+\frac{2}{3}L_4)=0$$

معادلة من الدرجة الثالثة بالنسبة لـ L_4 بحلها بطريقة التجريب نحصل على L_4

فيكون العمق النظري لغرز الصفائح الوتدية D من العلاقة:

$$D = L_3 + L_4$$

ملاحظة: نحصل على عمق الغرز الفعلي بزيادة D بمقدار 40% (نأخذ 1.4D)

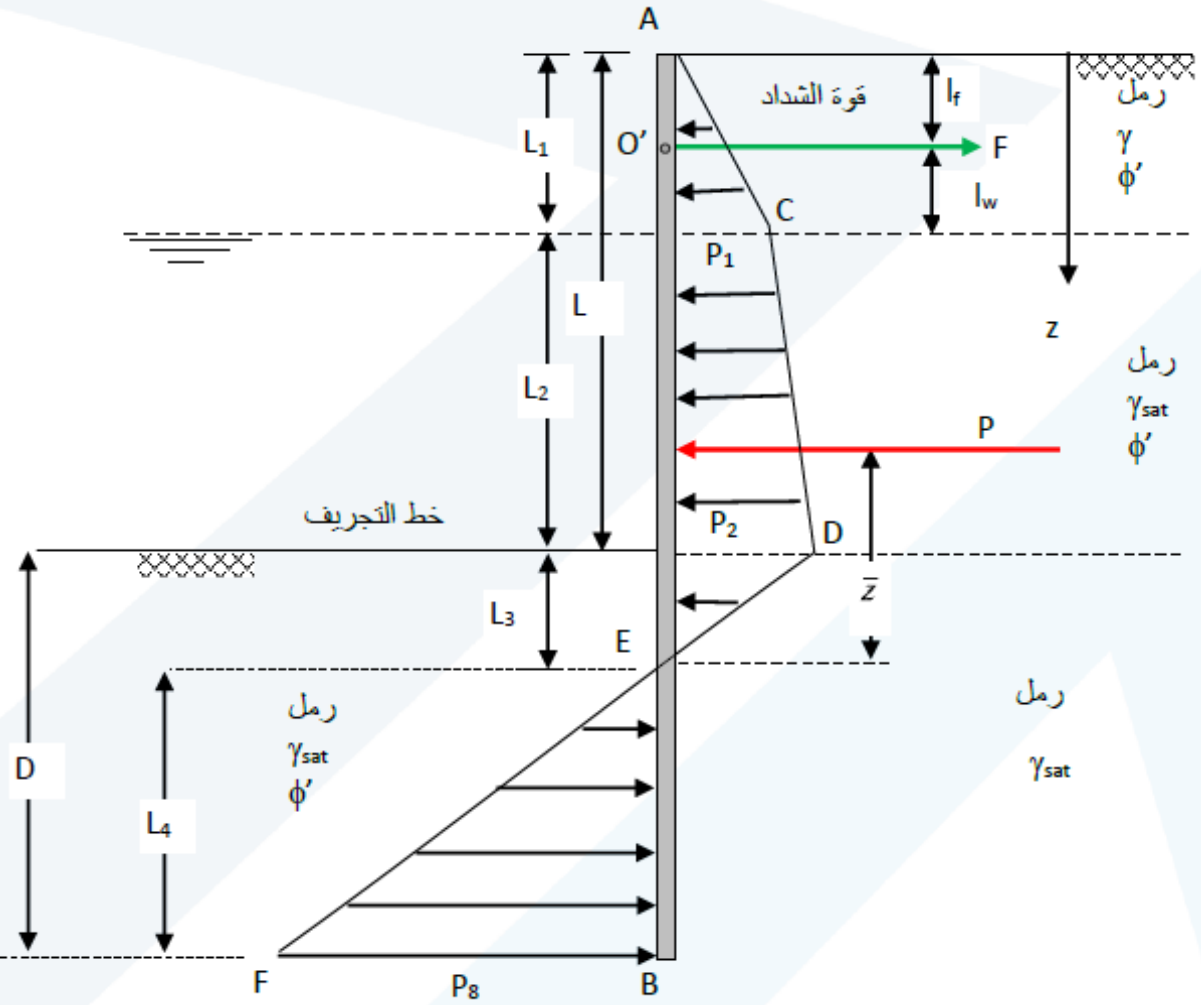
تحديد قوة الشداد

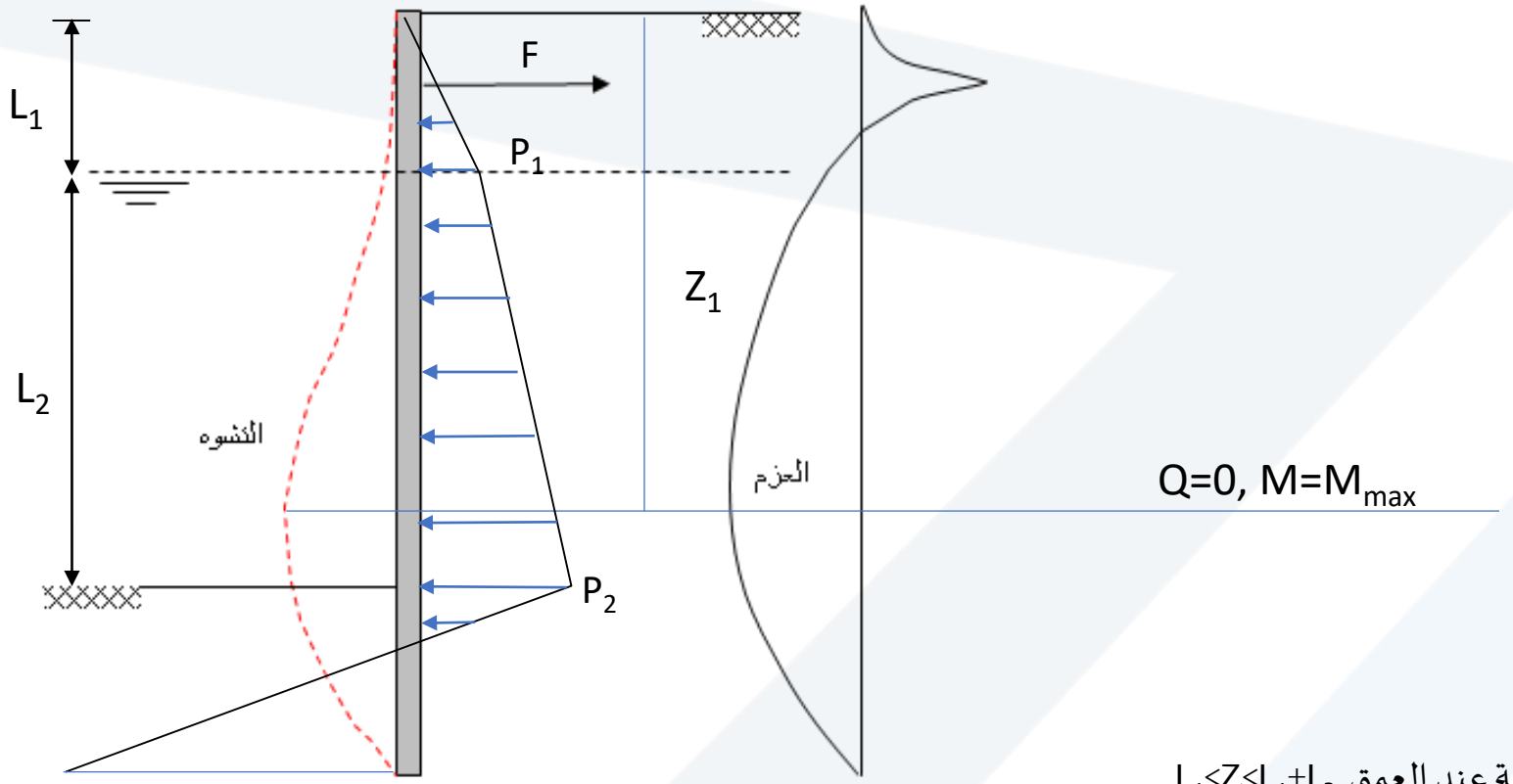
معادلة إسقاط القوى الأفقية: $\Sigma F = 0$

$$A_{(ACDE)} - A_{(EBF)} - F = 0$$

$$P - \tfrac{1}{2} P_8.L_4 - F = 0 \quad \Leftrightarrow P - \frac{1}{2}\gamma_{sub}(K_P - K_a)L_4^2 - F = 0$$

$$\Rightarrow F = P - \frac{1}{2}\left[\gamma_{sub}(K_P - K_a)\right]L_4^2$$





يحدث العزم الأعظمي النظري الذي ستتعرض له الصفيحة الوتدية عند العمق $L_1<Z<L_1+L_2$

$$Q=0\Rightarrow\frac{1}{2}P_1.L_1-F+P_1(Z_1-L_1)+\frac{1}{2}.K_a.\gamma_{sub}.(Z_1-L_1)^2=0\quad\Rightarrow Z_1$$

نحسب عزم الانعطاف الناتج عن القوى الضغوط الموجودة ضمن العمق Z_1