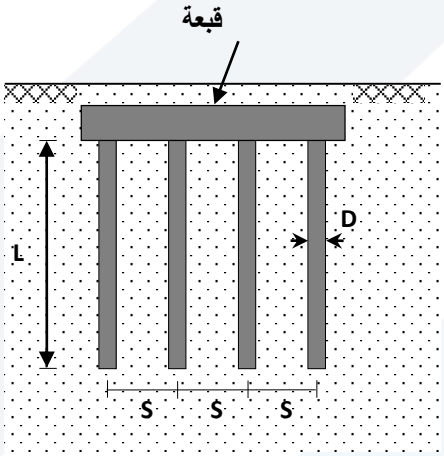
الفصل السابع : الأوتاد

7. 1 مقدمة

يعرف الوتد بأنه الجزء من المنشأ المستخدم لتحمل ونقل حمولات المنشأ إلى تربة قادرة على تحملها, متوضعة على عمق ما من سطح التربة, متجاوزة بذلك طبقة التربة السطحية منخفضة التحمل.

يتكون **الأساس الوتدي** من حصيرة (قبعة) صلبة مع مجموعة من الأوتاد طولها L وقطرها D, متباعدة عن بعضها بمسافة t تدعى تباعد الأوتاد, وموصولة بالقبعة التي تقوم بنقل الحمولات وتوزيعها على الأوتاد حسب توضعها وحسب لامركزية القوة المنقولة إلى القبعة (الشكل 7. 1).



الشكل 7. 1 : الأساس الوتدي

7. 2 دواعي استخدام الأوتاد

يمكن تلخيص أهم الحالات التي تستدعي استخدام الأوتاد بالتالي :

1-عندما تكون التربة السطحية ضعيفة ولاتملك قدرة تحمل مناسبة : إذا أظهرت التحريات الجيوتكنيكية أن التربة السطحية غير مستقرة أو ضعيفة أو أن هبوطها المتوقع غير مقبول وسماكتها كبيرة بحيث لا ينفع استبدال وتحسين تربة الموقع، فإن الأساسات الوتدية قد تكون الحل المناسب (الشكل 7. 2 – أ).

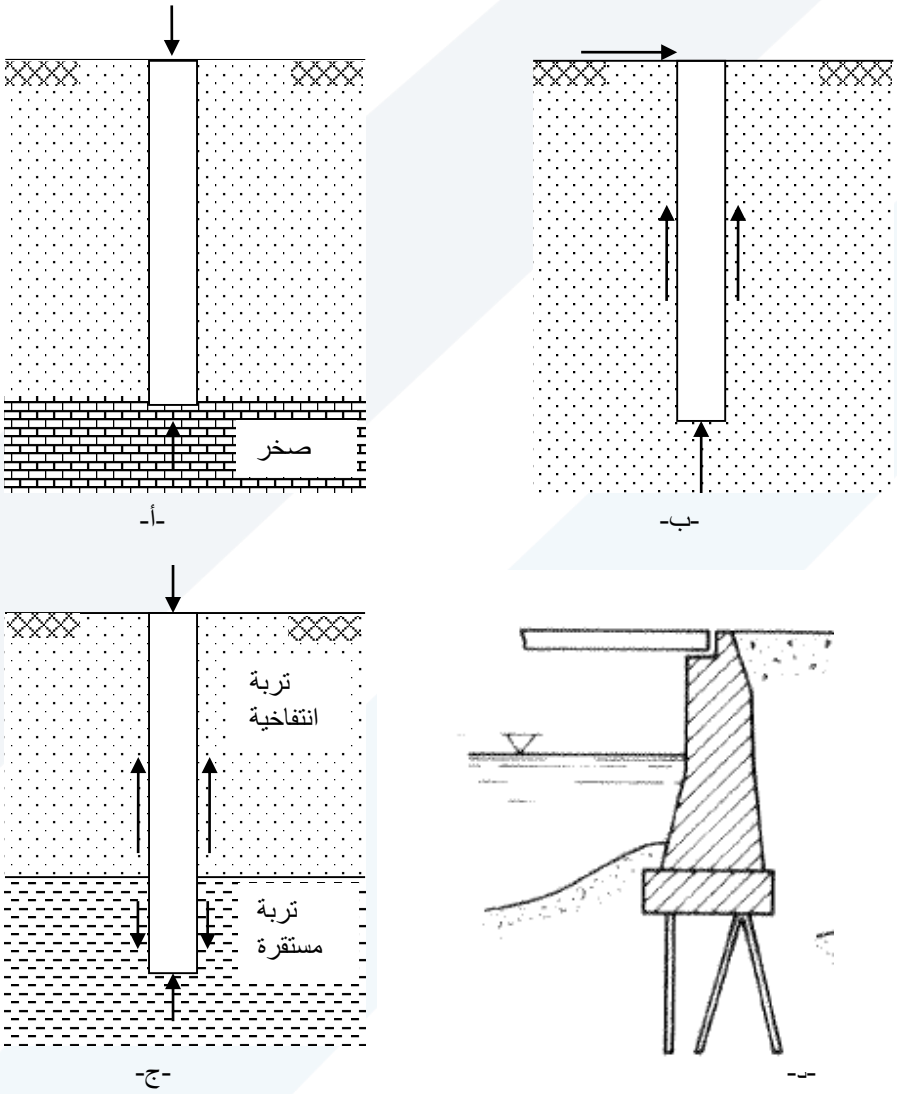
2-عندما يكون تنفيذ الأساسات السطحية صعباً وخاصة عندما يكون التأسيس ضمن المياه العميقة والغزيرة.

3- إذا تعرض المنشأ لحمولات أفقية كبيرة : كحالة الأبنية العالية المعرضة لقوى الزلازل, أو المنشآت البحرية المعرضة للأمواج العالية (كالأرصفة البحرية مثلاً) فإن الأساسات الوتدية يمكنها مقاومة تلك القوى من خلال مقاومتها للانعطاف (الشكل 7. 2 – ب).

4- في الحالات التي يمكن أن يتعرض فيها المنشأ أو أساساته لقوى رفع كبيرة كحالة كون تربة التأسيس عالية الانتفاخ ولأعماق كبيرة, أو حالة المنشآت الخفيفة متعددة الأقبية المشيدة على ترب يمكن أن تتعرض لارتفاع كبير في منسوب المياه الجوفية, مما قد يولد قوى رفع تفوق الحمولات الثابتة للمنشأ (الشكل 7. 2 – ج).

5- يمكن أن تستخدم الأساسات الوتدية كأساسات لركائز الجسور عندما يكون هناك خطورة من تعرية تربة التأسيس, كحالة وقوع تلك الركائز ضمن مجرى مائي مثلاً (الشكل 7. 2 – د).

6- حالة المنشآت الثقيلة : قد تكون الاجهادات الناتجة عن المنشأ كبيرة ولا تكفي قدرة تحمل التربة القريبة من السطح من أجل تحملها مما قد يستدعي استخدام الأساسات الوتدية.



الشكل 7. 2: حالات استخدام الأساسات الوتدية

3.7 تصنيف الأوتاد

يمكن تصنيف الأوتاد وفق عوامل كثيرة نذكر منها :

1- طريقة نقل الحمولات إلى التربة
2- طريقة التنفيذ
3- تأثير طريقة تنفيذ الأوتاد على التربة المحيطة

9. 3. 1 تصنيف الأوتاد وفق طريقة نقل الحمولات إلى التربة : تصنف الأوتاد بحسب طريقة نقل الحمولات إلى التربة إلى :

أ- أوتاد ارتكاز

ب- أوتاد احتكاك

ج- أوتاد احتكاك وارتكاز

أوتاد الارتكاز :

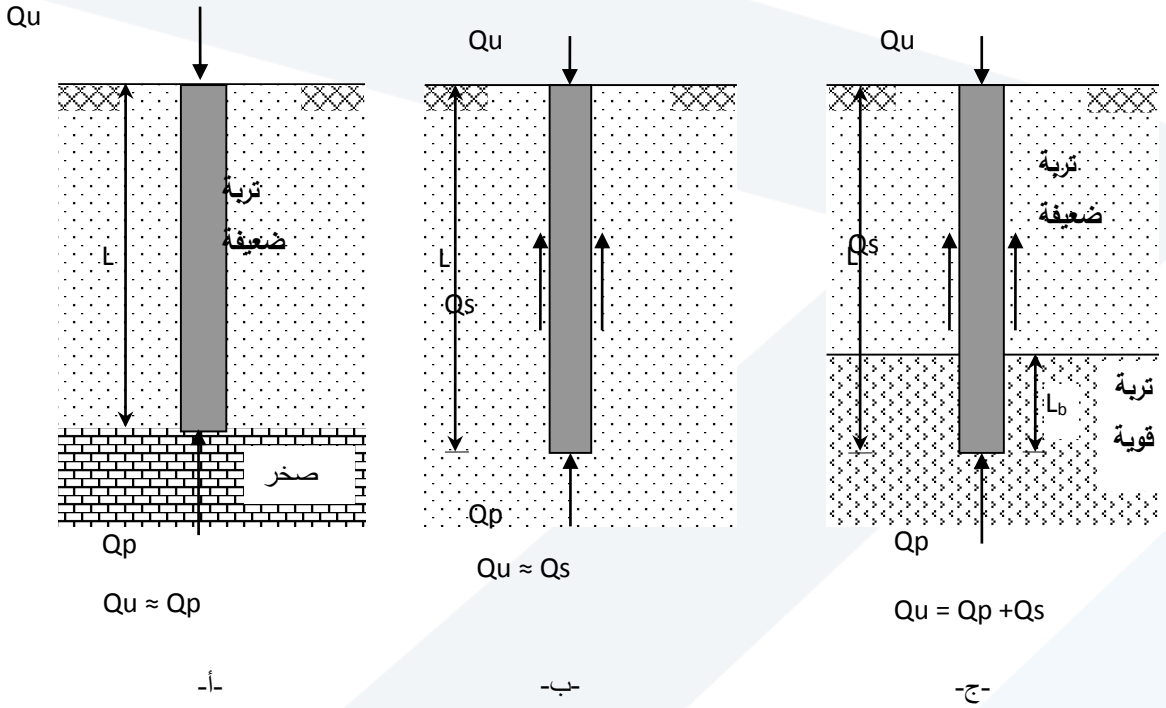
تنقل تلك الأوتاد الحمولات إلى تربة صلبة متوضعة على عمق لابأس به تحت قاعدة المنشأ. تحصل تلك الأوتاد على معظم مقاومتها من مقاومة الغرز للتربة أسفل الوتد (الشكل 7. 3 -أ), ويسلك الوتد سلوك الأعمدة ويصمم بنفس الطريقة.

أوتاد الاحتكاك :

في هذا النوع من الأوتاد, يحصل الوتد على مقاومته بشكل أساسي من التلاصق والاحتكاك بين الوتد والتربة المحيطة على كامل ارتفاع الوتد (الشكل 7. 3 - ب), ويستخدم هذا النوع من الأوتاد عندما تكون الطبقة جيدة التحمل عميقة جداً أو غير موجودة.

أوتاد الارتكاز والاحتكاك :

في الحالات التي تكون فيها التربة العميقة ليست عالية الصلابة كحالة الغضار القاسي مثلاً. في تلك الحالة, يتم غرز الوتد لعمق كاف في تلك الطبقة, كما يتم مقاومة جزء من الحمولات عن طريق الاحتكاك والتلاصق بين الوتد والتربة المتوضعة فوق تلك الطبقة (الشكل 7. 3 - ج), ويمكن تشكيل ما يشبه المخروط (أو الجرس) أسفل الوتد, وهذا يكسب الوتد مقاومة عالية على الشد (الرفع).



الشكل 7. 3 : تصنيف الأوتاد حسب طريقة نقل الحمولات إلى التربة

7. 3. 2 تصنيف الأوتاد وفق طريقة التنفيذ: تصنف الأوتاد بحسب طريقة التنفيذ إلى :

أ- أوتاد مدقوقة

ب- أوتاد محفورة (أو مصبوبة بالمكان)

<u>الأوتاد المدقوقة أو المغروزة :</u> هذا النوع من الأوتاد مسبق الصنع وقد يكون مسبق الاجهاد أيضاً, يغرز في التربة عن طريق الدق أو الاهتزاز, وهو سهل وسريع التنفيذ ويصل الوتد إلى مقاومته التصميمة بعد فترة قصيرة من دقه, وهو <u>مناسب جداً في الترب الرملية المخلخلة حيث تؤدي عملية الدق إلى رص وتحسين التربة المحيطة بالوتد.</u>

<u>الأوتاد المحفورة (أو المصبوبة بالمكان):</u>

ينفذ هذا النوع من الأوتاد عن طريق حفر ثقب (بئر) في التربة مكان الوتد ثم تنفيذ الوتد مكان هذا الثقب. يكون هذا النوع من الأوتاد من البيتون المسلح, حيث يصب البيتون في الثقب المنفذ بعد تنظيفه . يتطلب في بعض الأحيان حماية جدران البئر من التهدم و منع اختلاط التربة المحيطة بالوتد البيتون عن طريق استخدام أنبوب فولاذي مفرغ تدعى بالقميص يغرز مكان الثقب ثم يصب البيتون ضمنه (كحالة الترب الرملية) ثم يسحب القميص. <u>يعتبر الغضار القاسي مناسباً جداً لهذا النوع من الأوتاد نظراً لعدم الحاجة لحماية جدران البئر.</u>

7. 3. 3 تصنيف الأوتاد وفقاً لتأثير طريقة تنفيذ الأوتاد على التربة المحيطة :

تصنف الأوتاد حسب تأثير طريقة تنفيذ الأوتاد على التربة المحيطة إلى :

أ- أوتاد انتقال (الأوتاد المدقوقة)

ب- أوتاد عدم انتقال (الأوتاد المصبوبة بالمكان)

أوتاد انتقال :

أثناد دق الأوتاد في الغضار يحصل إزاحة كبيرة للتربة المحيطة بالوتد لمسافة تساوي تقريباً ضعف قطر الوتد ويغير من مواصفاتها, كما يؤدي إلى زيادة كبيرة لضغط الماء المسامي في تلك المنطقة. بعد فترة من الزمن يتم تبدد هذه الزيادة في الضغط وتستعيد التربة مقاومتها الأولية. أما في الرمل المخلخل فيؤدي دق الأوتاد إلى ارتصاص الرمل حول الوتد وهذا يؤدي إلى زيادة مقاومة الوتد. أما عندما يكون الرمل عالي التراص فإن الإزاحة الناتجة عن دق الوتد سوف تؤدي إلى انخفاض كثافة الرمل ونقصان زاوية احتكاكه وذلك بسبب ظاهرة التوسع للرمل عالي التراص.

أوتاد عدم انتقال :

إن تنفيذ الأوتاد المصبوبة في المكان لا يسبب إزاحة للتربة المحيطة في الوتد وإنما تنخفض مقاومة هذه التربة بسبب تفريغ الاجهادات الناتج عن البئر المنفذ مكان الوتد, كما أن التربة تصبح أكثر طراوة إذا تم استخدام الماء في عملية الحفر, لذلك ينصح باختصار الزمن الفاصل بين حفر البئر وصب الوتد قدر الامكان.

7. 4 تحديد تحمل الوتد

تعطى مقاومة الوتد الحدية بمجموع مقاومة الارتكاز لأسفل الوتد Q_p ومقاومة الاحتكاك لجوانب الوتد Q_s, ويمكننا كتابة : $Q_u = Q_p + Q_s$. أما المقاومة المسموحة فيتم الحصول عليها باستخدام عامل أمان تتراوح قيمته (3 – 1.5). **في جميع الأحوال يجب ألا تزيد المقاومة المسموحة للوتد عن قدرة التحمل لعمود قطره D وطوله L** .

مقاومة الاحتكاك لجوانب الوتد :

تعطى مقاومة الاحتكاك لجوانب الوتد بالعلاقة :

$$Q_s = \int_0^L P.q_s\, dz = q_s.P.L = q_s.A_s \qquad (1.7)$$

حيث :

P محيط مقطع الوتد

L طول الوتد

A_s المساحة الجانبية للوتد $A_s=P.L$

q_s مقاومة القص الواحدية على سطح التماس تربة – وتد، ويمكن كتابة qs بالشكل :

$$q_s = C_s + \sigma'_n Tan\delta \qquad (2.7)$$

حيث :

σ'_n الاجهاد الناظمي (الأفقي) الفعال على الوتد عند العمق المحسوب

δ زاوية الاحتكاك على سطح التماس تربة – وتد

C_s تماسك التربة مع الوتد على سطح التماس

كما يمكن كتابة :

$$\sigma'_n = K.\sigma'_v \qquad (3.7)$$

σ'_v الاجهاد الشاقولي الفعال عند العمق المحسوب

K عامل الدفع الجانبي للتربة

وبالتالي، تصبح علاقة q_s على الشكل التالي :

$$q_s = C_s + K.\sigma'_v .Tan\delta \qquad (4.7)$$

في الحالة العامة، عندما يكون الوتد مغروزاً ضـــمن عدة طبقات (i طبقة) ذات مقاومات قص متباينة ($q_{s,i}$)، يمكن كتابة مقاومة الاحتكاك لجوانب الوتد بالشكل :

$$Q_s = \sum q_{s,i}.A_s \qquad (5.7)$$

مقاومة الارتكاز للوتد :

يمكن حساب قدرة تحمل الارتكاز أسفل الوتد باستخدام علاقات قدرة تحمل التربة للأساسات السطحية. بإهمال تأثير عرض الأساس (لأن قطر الوتد صغير) فإنه يمكن كتابة علاقة قدرة تحمل التربة تحت الوتد بالشكل :

$$Q_p = (C_p . N_c + \sigma'_v . N_q) A_p \qquad (6.7)$$

حيث :

C_p تماسك التربة تحت أسفل الوتد

σ'_v الاجهاد الشاقولي الفعال عند منسوب أسفل الوتد

N_q, N_c عوامل قدرة التحمل للتربة تحت الوتد

7. 4. 1 قدرة تحمل الوتد في الترب الرملية :

كما تم ذكره آنفاً فإن مقاومة الوتد تتكون من مقاومة الاحتكاك لجوانب الوتد ومقاومة الارتكاز. سيتم فيما يلي استعراض أهم الطرق المستخدمة لحساب هاتين المقاومتين.

7. 4. 1. 1 مقاومة الاحتكاك لجوانب الوتد في الترب الرملية :

من العلاقة السابقة، تكون مقاومة القص الواحدية على سطح التماس تربة – وتد في الترب الرملية :

$$q_s = K . \sigma'_v \ . \ Tan\,\delta \qquad (7.7)$$

هناك العديد من العلاقات التي تسمح بحساب مقاومة القص الواحدية q_s على سطح التماس تربة – وتد، نذكر منها :

علاقة مايرهوف (1976)

في عام 1976 اقترح مايرهوف العلاقة التالية لحساب مقاومة القص الواحدية على سطح التماس تربة – وتد :

$$q_s = \beta . \sigma'_v \qquad (8.7)$$

σ'_v الاجهاد الناظمي الفعال عند منسوب منتصف الوتد

β ثابت يتعلق بزاوية الاحتكاك الفعالة للتربة الرملية وبنوع الوتد، ويأخذ القيم التالية :

نوع الأوتاد	أوتاد مدقوقة			أوتاد محفورة		
زاوية الاحتكاك للتربة ϕ	28	35	37	33	35	37
قيمة β	0.44	0.75	1.2	0.1	0.2	0.35

الجدول 7. 1 : قيم الثابت β بحسب مايرهوف (1976)

كما اقترح مايرهوف العلاقات التالية لحساب مقاومة القص الواحدية وذلك اعتماداً على نتائج تجربة الـ SPT :

للرمل الخشن $q_s = 2.08\ N$ (9.7)

للرمل متوسط الخشونة $q_s = 1.92\ N$ (10.7)

للرمل الناعم $q_s = 1.77\ N$ (11.7)

N تمثل القيمة الوسطية لرقم الـ SPT على كامل طول الوتد ضمن الطبقة الرملية

ملاحظة: بحسب مايرهوف فإن q_s يجب ألا تتجاوز 100kPa

علاقة NAVFAC DM 7.2

تعطى مقاومة القص الواحدية على سطح التماس تربة – وتد في الترب الرملية بالعلاقة التالية :

$$q_s = K.\sigma'_v\ .\ Tan\delta \qquad (12.7)$$

تعطى قيم الزاوية ⍰ بالجدول التالي :

نوع الوتد	⍰
أوتاد معدنية	20°
أوتاد خشبية	3/4⍰
أوتاد بيتونية	3/4⍰

الجدول 7. 2 : قيم الزاوية δ بحسب NAVFAC DM 7.2

ويعطى معامل دفع التربة K بالجدول التالي :

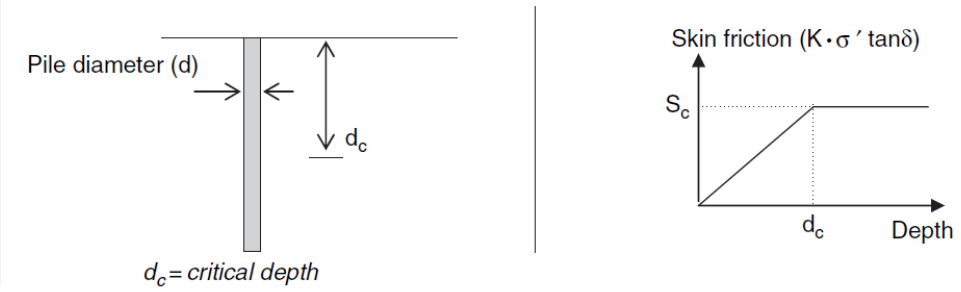
نوع الوتد	K (وتد تحت تأثير قوى ضاغطة)	K (وتد تحت تأثير قوى شادة)
وتد مدقوق H	0.5 – 1.0	0.3 – 0.5
وتد مدقوق (دائري أو مربع)	1.0 – 1.5	0.6 – 1.0
وتد محفور (قطره أقل من 24 انش)	0.7	0.4

الجدول 7. 3 : قيم معامل دفع التربة K بحسب NAVFAC DM 7.2

العمق الحرج للاحتكاك الجانبي في الترب الرملية

يزداد الاجهاد الشاقولي σ'_v مع العمق ويزداد معه اجهاد الاحتكاك الجانبي q_s، وهذا الازدياد لا يستمر حتى اللانهاية، وإنما يثبت بعد عمق معين يدعى بالعمق الحرج dc (الشكل 7. 4). يتعلق العمق الحرج في الرمل بكثافة الرمل وفيما يلي قيم هذا العمق بحسب حالة الرمل.

- الرمل الخلخل : dc=10d (d تمثل قطر الوتد أو عرضه)
- الرمل متوسط التراص : dc= 15d
- الرمل المتراص : dc=20d



الشكل 7. 4 : العمق الحرج للاحتكاك الجانبي في الترب الرملية

7. 4. 1. 2 مقاومة الارتكاز للوتد في الترب الرملية :

يتوفر العديد من الطرق لحساب قدرة تحمل الارتكاز للوتد في الترب الرملية، نذكر منها :

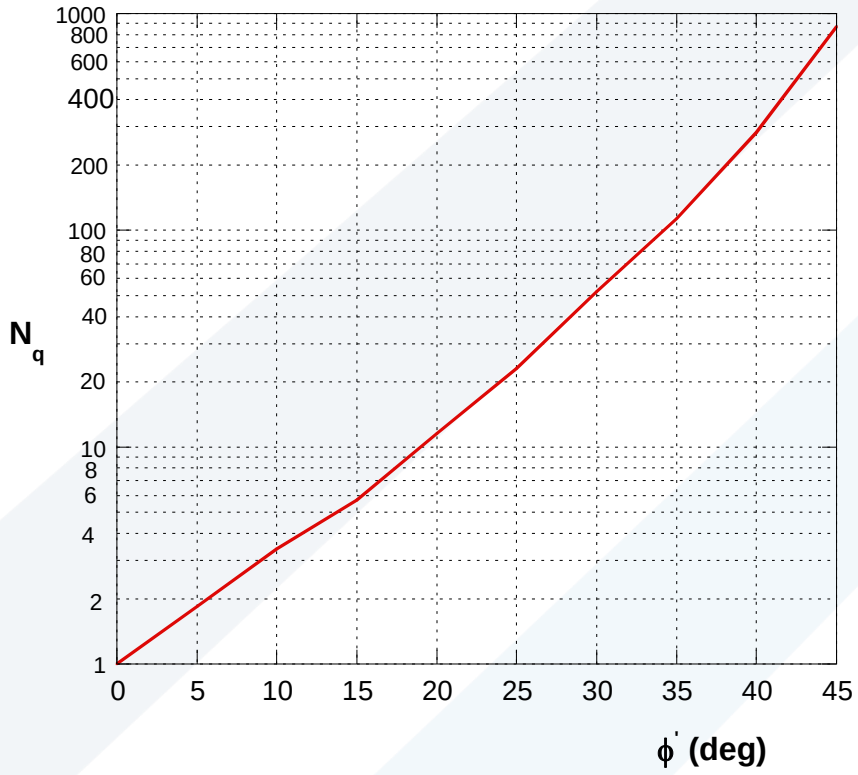
- **طريقة مايرهوف**

بحسب مايرهوف، تعطى قدرة تحمل الرتكاز الواحدية بالعلاقة التالية :

$$q_p = \sigma'_v . N_q \qquad (13.7)$$

σ'_v الاجهاد الشاقولي الفعال عند منسوب ارتكاز الوتد (أسفل الوتد)

Nq عامل قدرة التحمل الذي يحسب من الشكل التالي :



الشكل 7. 5 : تغير القيم الأعظمية لـ N_q مع زاوية احتكاك التربة

وبحسب مايروف, يجب ألا تزيد قدرة تحمل أسفل الوتد في الرمل عن قدرة التحمل الحرجة المحددة بالعلاقة :

$$q_{pcr} = 50 N_q \, Tan\phi' \qquad (14.7)$$

حيث ϕ' زاوية الاحتكاك المصرفة للرمل أسفل الوتد

كما اقترح مايرهوف العلاقات التالية لحساب قدرة تحمل الارتكاز الواحدية للأوتاد المدقوقة اعتماداً على نتائج تجربة الـ SPT :

- للرمل الخشن $$q_p = 43.1\, C_N \,.\, N \,.\, \frac{D}{B} \qquad (15.7)$$
- للرمل متوسط الخشونة $$q_p = 38.3\, C_N \,.\, N \,.\, \frac{D}{B} \qquad (16.7)$$
- للرمل الناعم $$q_p = 33.5\, C_N \,.\, N \,.\, \frac{D}{B} \qquad (17.7)$$
- C_N عامل تصحيح عمق التجربة، ويعطى بالعلاقة التالية :

$$C_N = 0.77 \log_{10} \frac{2000}{\sigma'_v} \leq 2 \qquad (18.7)$$

حيث D العمق من الوتد المدقوق داخل الرمل

B عرض أو قطر الوتد

ملاحظة: بحسب مايرهوف فإن q_p يجب ألا تتجاوز 400N للرمل ($q_p \leq 400N$) و 300N للسيلت ($q_p \leq 300N$)

- **<u>طريقة API 1984 (المركز الأمريكي للبترول)</u>**

$$q_p = \sigma'_v \,.\, N_q \qquad (19.7)$$

q_p قدرة تحمل الارتكاز الواحدية للوتد

σ'_v الاجهاد الشاقولي الفعال عند منسوب أسفل الوتد (الارتكاز)، ويجب ألا يتجاوز هذا الاجهاد 240kPa

Nq عامل قدرة التحمل، ويأخذ القيم التالية :

حالة الرمل	Nq
مخلخل	8-12
متوسط التراص	12-40
متراص	>40

الجدول 7. 4 : قيم معامل معامل قدرة التحمل Nq بحسب API 1984 (المركز الأمريكي للبترول)

يبين الجدول التالي العلاقة بين درجة تراص الرمل ورقم الـ SPT وزاوية الاحتكاك للرمل الناعم ومتوسط الخشونة والخشن

نوع التربة	رقم SPT N	حالة التربة	الوزن الحجمي (kN/m³)	زاوية الاحتكاك	الكثافة النسبية
رمل ناعم	مخلخل جداً	1-2	11-14	26-28	0-0.15
	مخلخل	3-6	14-17	28-30	0.15-0.35
	متوسط التراص	7-15	17-20	30-33	0.35-0.65
	متراص	16-30	20-22	33-38	0.65-0.85
	شديد التراص	>30	>22	>38	>0.85
رمل متوسط الخشونة	مخلخل جداً	2-3	11-14	27-30	0-0.15
	مخلخل	4-7	14-17	30-32	0.15-0.35
	متوسط التراص	8-20	17-20	32-36	0.35-0.65
	متراص	21-40	20-22	36-42	0.65-0.85
	شديد التراص	>40	>22	>42	>0.85
رمل خشن	مخلخل جداً	3-5	11-14	28-30	0-0.15
	مخلخل	6-9	14-17	30-33	0.15-0.35
	متوسط التراص	10-25	17-20	33-40	0.35-0.65
	متراص	26-45	20-22	40-50	0.65-0.85
	شديد التراص	>45	>22	>50	>0.85

الجدول 7. 5 : العلاقة بين درجة تراص الرمل ورقم الـــ SPT وزاوية الاحتكاك للرمل الناعم ومتوسط الخشونة والخشن بحسب API 1984 (المركز الأمريكي للبترول)

-علاقة Martin et al. (1987)

$$q_p = C.N \quad [MN/m^2] \qquad (20.7)$$

N رقم الـ SPT عند منسوب أسفل الوتد (الارتكاز) (ضربة/قدم)

C=0.45 في حالة الرمل الصافي

C=0.35 في حالة الرمل السيلتي

-علاقة NAVFAC DM 7.2

$$q_p = \sigma'_v . N_q \qquad (21.7)$$

σ'_v الاجهاد الشاقولي الفعال عند منسوب أسفل الوتد (الارتكاز)

يعطى عامل قدرة التحمل بالجدول التالي :

زاوية الاحتكاك ϕ	26	28	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Nq (أوتاد مدقوقة)	10	15	21	24	29	35	42	50	62	77	86	120	145
Nq (أوتاد محفورة)	5	8	10	12	14	17	21	25	30	38	43	60	72

الجدول 7. 6 : قيم معامل قدرة التحمل Nq بحسب API 1984 (المركز الأمريكي للبترول)

العمق الحرج لمقاومة الارتكاز للأوتاد في الترب الرملية

ترتبط مقاومة الارتكاز للوتد بالاجهاد الشاقولي σ'_v ولكنها لا تزداد مع العمق حتى اللانهاية. بسبب نقص المعلومات الخاصة بهذا الموضوع فإنه يتم عادة استخدام نفس العمق الخاص بالاحتكاك الجانبي للأوتاد.

7. 4. 2 قدرة تحمل الوتد في الترب الغضارية :

من أجل حساب قدرة تحمل الوتد في الترب الغضارية، تم استخدام علاقة معدلة لترزاكي والتي تكتب على الشكل التالي :

$$Q = Q_p + Q_s = 9C_p . A_p + \alpha . C_s . A_s \qquad (22.7)$$

C_s تماسك التربة على جوانب الوتد

C_p تماسك تربة الارتكاز عند منسوب أسفل الوتد

A_s المساحة الجانبية للوتد

A_p مساحة مقطع الوتد

α ثابت يدعى عامل التلاصق

7. 4. 2. 1 مقاومة الاحتكاك لجوانب الوتد في الترب الغضارية :

هناك ثلاث طرق مشـهورة لحسـاب قدرة تحمل الاحتكاك الحدية للأوتاد المدقوقة في الغضـار, تتلخص تلك الطرق بالتالي :

أ-طرق تعتمد على مقاومة القص غير المصرفة للغضار

في هذه الطرق تعطى مقاومة الاحتكاك الواحدية بالعلاقة :

$$q_s = \alpha . C_u \qquad (23.7)$$

حيث :

C_u التماسك غير المصرف للغضار المحيط بالوتد

1-حالة الأوتادالمدقوقة

- **طريقة API 1984 (المركز الأمريكي للبترول)**

تعطى قيمة α بحسب التماسك غير المصرف للتربة المحيطة بالوتد كالتالي :

$$\alpha = 1.0 \text{ for clays with } C_u < 25\,\text{kN/m}^2$$
$$\alpha = 0.5 \text{ for clays with } C_u > 70\,\text{kN/m}^2$$

C_u=(25-70)kN/m^2 تؤخذ قيمة α بالتوسط الخطي

-طريقة NAVFAC DM 7.2

تعطى قيمة α بحسب التماسك غير المصرف للتربة المحيطة بالوتد كالتالي :

Table 5.1 α vs cohesion

Pile Type	Soil Consistency	Cohesion Range (kN/m^2)	α
Timber and concrete piles	Very soft	0–12	0–1.0
	Soft	12–24	1.0–0.96
	Medium stiff	24–48	0.96–0.75
	Stiff	48–96	0.75–0.48
	Very stiff	96–192	0.48–0.33
Steel piles	Very soft	0–12	0.0–1.0
	Soft	12–24	1.0–0.92
	Medium stiff	24–48	0.92–0.70
	Stiff	48–96	0.70–0.36
	Very stiff	96–192	0.36–0.19

Source: NAVFAC DM 7.2

الجدول 7. 7 : قيم المعامل α بدلالة تماسك التربة بحسب NAVFAC DM 7.2

ملاحظة : إن طريقتي API و NAVFAC لا تأخذان بعين الاعتبار تأثير الاجهادات الفعالة في التربة

ب- طرق تعتمد على الاجهادات الفعالة

يرى البعض أنه يجب استخدام الاجهادات الفعالة في حساب قدرة تحمل الاحتكاك للأوتاد في الترب الغضارية وذلك لأن زيادة ضغط الماء المسامي الناتجة عن حمولة الوتد تحصل في منطقة ضيقة حول الوتد, وهذه الزيادة في الضغط المسامي يمكن أن تتبدد بسرعة إما بواسطة الشقوق المتواجدة في التربة أو بواسطة بيتون الأوتاد الذي يمكن أن يكون أكثر نفاذية من التربة المحيطة.

- **طريقة Burland (1973)**

تعطى مقاومة الاحتكاك الواحدية بالعلاقة :

$$q_s = \beta . \sigma'_v$$
$$\beta = K . Tan\delta' \qquad (24.7)$$

حيث :

تؤخذ عادة زاوية الاحتكاك δ' مساوية لزاوية الاحتكاك الداخلي الفعالة للغضار المشكل مخبرياً

ϕ'_R (لأنه عند تنفيذ الأوتاد تتخرب بنية الغضار وخاصة في حالة الأوتاد المدقوقة).

K عامل ضغط التربة الجانبي, وغالباً يعتبر مساوياً لضغط التربة الجانبي في وضع الراحة, ويمكن استخدام العلاقات التالية لحساب K :

- الغضار المشدد طبيعياً : $K = 1 - \sin\phi'_R$

- الغضار مسبق التشديد : $K = (1 - \sin\phi'_R)\sqrt{OCR}$

تصبح العلاقة 7. 24 :

- للغضار المشدد طبيعياً :

$$q_s = (1 - \sin\phi'_R)\,\sigma'_v\,Tan\phi'_R \qquad (25.7)$$

- للغضار مسبق التشديد :

$$q_s = (1 - \sin\phi'_R)\sqrt{OCR}\;\sigma'_v\,Tan\phi'_R \qquad (26.7)$$

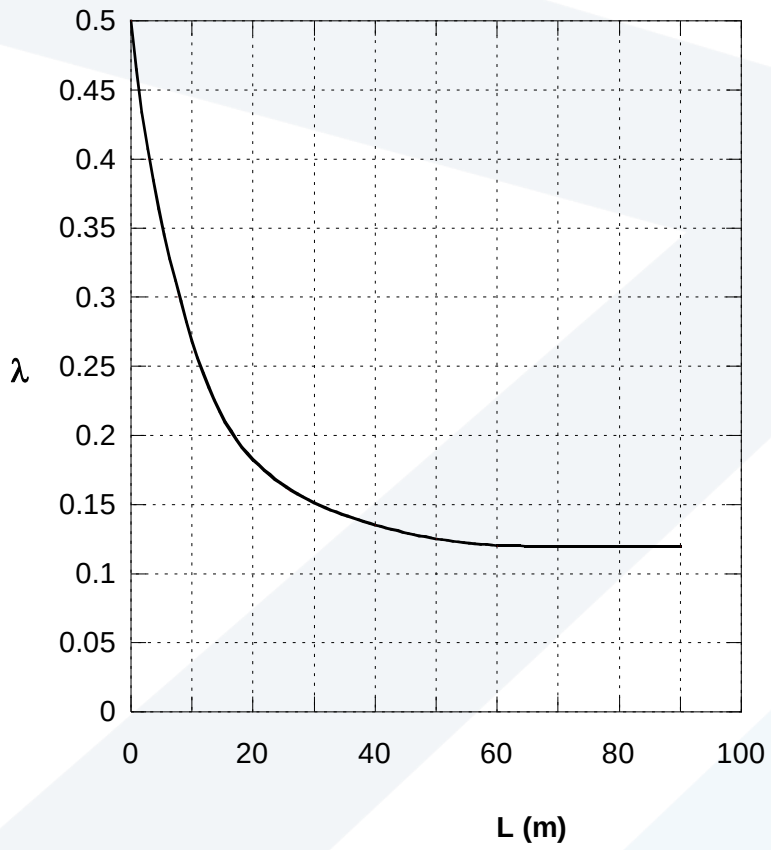
ج- طرق تعتمد على التماسك غير المصرف وعلى الاجهادات الفعالة

مقاومة الاحتكاك الواحدية وفق هذه الطريقة بالعلاقة :

$$q_s = \lambda(\sigma'_v + 2C_u) \qquad (27.7)$$

حيث λ عامل يتعلق بطول الوتد, حيث تتناقص قيمته مع زيادة طول الوتد, وتتراوح قيمته الوسطية (0.25 – 0.15).

تعطى قيم α حسب طول الوتد بالشكل 7. 6 .



الشكل 6 .7 : تغير λ مع طول الوتد

- **طريقة Kolk and Van der Velde (1996)**

تعطى مقاومة القص الواحدية بالعلاقة :

$$q_{ult} = \alpha . C_u \qquad (28.7)$$

عامل يتعلق بنسبة مقاومة القص غير المصرفة Su إلى الاجهاد الفعال(C_u/σ') وتعطى قيمها بالجدول التالي :

C_u/σ'	S_u/σ'	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
	α	0.95	0.77	0.7	0.65	0.62	0.60	0.56	0.55	0.53	0.52	0.50	0.49	0.48
C_u/σ'	S_u/σ'	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3.0	4.0
	α	0.47	0.42	0.41	0.41	0.42	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40	0.4	0.39	0.39

Source: Kolk and Van der Velde (1996)

-حساب قدرة تحمل الاحتكاك لجوانب الوتد المحفور في الترب الغضارية

في حالة الأوتاد المحفورة، يمكن اتباع نفس خطوات الحساب لحالة الأوتاد المدقوقة مع تخفيض قيمة مقاومة القص غير المصرفة للغضار. السؤال المطروح ما هو مقدارتخفيض مقاومة القص غير المصرفة للغضار ؟

بشكل عام، إن تخفيض مقاومة القص غير المصرفة المقاسة مخبرياً بمقدار 30% يعتبر منطقياً لحساب تحمل الأوتاد المحفورة في الغضار.

7. 4. 2. 2 مقاومة الارتكاز في الترب الغضارية

تعطى قدرة تحمل الارتكاز في الترب الغضارية بالعلاقة :

$$Q_p = 9C_p . A_p \qquad (29.7)$$

حيث تمثل Cp تماسك التربة عند منسوب أسفل الوتد

ويمكن حساب مقاومة الارتكاز للأوتاد المحفورة في الغضار اعتماداً على Shioi and Fukui 1982 والتي تعطى بالعلاقة التالية :

$$q_p = C . N \ [MN/m^2]$$

C ثابت C=0.15

رقم الـ SPT عند منسوب ارتكاز الوتد (أسفل الوتد)

7. 4. 3 تحمل الأوتاد المستندة على الصخر

يمكن أن تحسب قدرة تحمل الارتكاز الحدية للأوتاد المستندة على الصخر بالعلاقة :

$$q_p = q_{u,c}(N_\phi + 1) \qquad (30.7)$$

حيث :

N_ϕ عامل قدرة التحمل, تحسب قيمته بالعلاقة : $N_\phi = Tan^2(45 + \frac{\phi'}{2})$

ϕ' زاوية الاحتكاك المصرفة للصخر

$q_{u,c}$ مقاومة الضغط الحر للصخر. إذا تم تحديدها مخبرياً فإن مقاومة الضغط الحر الحقلية أصغر من مقاومة الضغط الحر المخبرية بـ (4 – 5) مرات, لذلك يجب تخفيض $q_{u,L}$ المخبرية بتقسيمها على 5, أي :

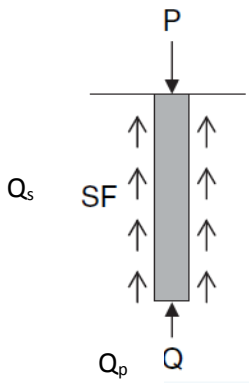
$$q_{u,c} = \frac{q_{u,L}}{5} \qquad (31.7)$$

$q_{u,c}$ مقاومة الضغط الحر الحقلية التصميمية

$q_{u,L}$ مقاومة الضغط الحر المخبرية

5.7 توزع قوى الاحتكاك وقوى الارتكاز

بشكل عام، يتم الافتراض بأن قوى الاحتكاك Qs وقوى الارتكاز Qp تنشأ بشكل متزامن (الشكل 7. 7). في الحقيقة، هذه الفرضية غير دقيقة حيث أنه عند تحميل الوتد، تتحول في البداية كامل حمولة الوتد إلى قوى احتكاك وتكون قوى الارتكاز مهملة. عند زيادة الحمولة تبدأ قوى الارتكاز بالظهور ولكن بمقدار أقل بكثير من قوى الاحتكاك، ولا تبدأ قوى الارتكاز بالزيادة بشكل كبير إلا بعد تشكل كامل قوى الاحتكاك. يبين المثال التالي توزع قوى الاحتكاك وقوى الارتكاز.



الشكل 7. 7 : قوى الاحتكاك وقوى الارتكاز للوتد

لنفترض بأن قدرة تحمل الاحتكاك الحدية للوتد المبين بالشكل 7. 8 هي 600kN وقدرة تحمل الارتكاز هي 400kN ، أي أن قدرة التحمل الحدية الكلية تساوي 1000kN

لنفرض أن عامل الأمان يساوي 3، وبالتالي فقدرة التحمل التصميمية للوتد هي 1000/3=333kN

تم تسجيل منحني الحمولة-الهبوط للوتد وهو مبين في الشكل التالي :

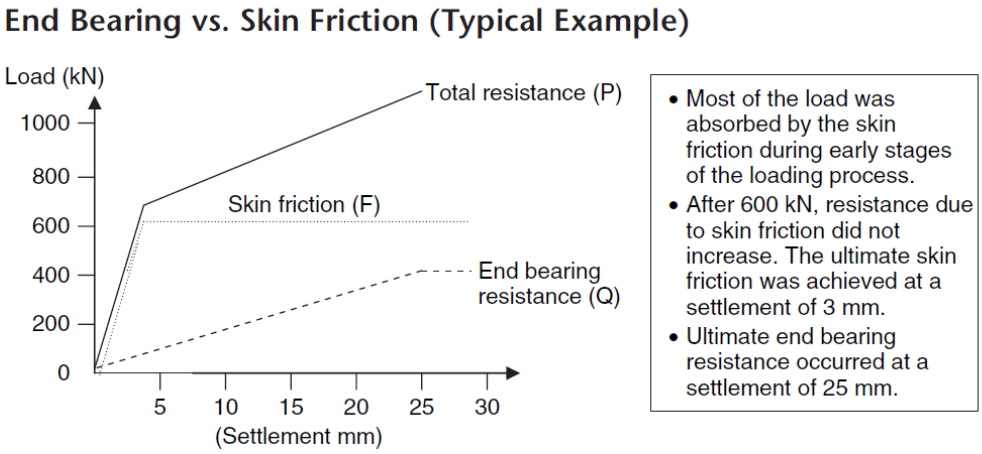
بحسب هذا الشكل فإنه عندما تكون الحمولة 400kN فإن الهبوط يساوي تقريباً 2mm، وتكون حمولة الاحتكاك حوالي 390kN وحمولة الارتكاز 10kN فقط.

وعندما أصبحت الحمولة 615kN كانت حمولة الاحتكاك 600kN وحمولة الارتكاز 15kN فقط والهبوط 3mm

عندما زادت الحمولة عن 615kN توقفت حمولة الاحتكاك عن الزيادة وتحولت كامل الزيادة إلى حمولة ارتكاز.

بشكل عام، يصل الوتد إلى حمولته الحدية للاحتكاك عند هبوط صغير، بينما لا يصل إلى حمولة الارتكاز الحدية إلا عند هبوط كبير وقد كان في هذه المثال مساوياً لـ 15mm.

معظم المصممين لا يعيرون الكثير من الاهتمام إلى توزع حمولة الوتد بين حمولة احتكاك وحمولة ارتكاز وإنما يقسمون الحمولة الحدية على نفس عامل الأمان. في هذا المثال، إذا كان عامل الأمان 3 فإن الحمولة التصميمية للوتد تساوي 333kN ، وعند هذه الحمولة تكون حمولة الارتكاز معدومة وكامل الحمولة تنتقل للتربة بالاحتكاك.



الشكل 7. 8 : توزع قوى الاحتكاك وقوى الارتكاز للوتد بدلالة هبوط الوتد

7. 6 : هبوط الوتد المنفرد

يمكن اعتبار هبوط الوتد المنفرد نتيجة للحمولة التشغيلية Qw مكوناً من مجموع المركبات الثلاث التالية:

1- الهبوط الناتج عن التشوه المحوري للوتد:

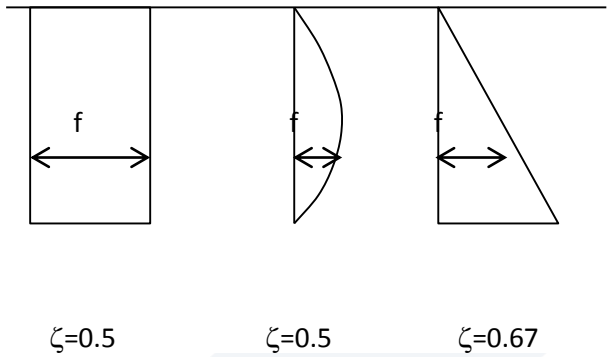
يعطى هذا الهبوط بعلاقة VESIC التالية:

$$S_1 = \frac{(Q_p + \zeta Q_s)L}{A_p E_p} \qquad (32.7)$$

Q_p الحمولة المنقولة بواسطة الارتكاز

Q_s الحمولة المنقولة بواسطة الاحتكاك

ζ عامل يتعلق بتوزع مقاومة الاحتكاك الواحدية على طول جذع الوتد, ففي حالة التوزع المنتظم أو بشـــكل قطع مكافئ تكون قيمة هذا العامل 0.5, أما في حالة التوزع المثلثي فتكون قيمته 0.67 (الشكل 7. 9).



الشكل 7. 9 : قيم ζ حسب توزع مقاومة الاحتكاك الواحدية على طول جذع الوتد

2- الهبوط نتيجة للحمولة المنقولة بالارتكاز:

يمكن حساب هذا الهبوط بالعلاقة التالية:

$$S_2 = \frac{q_p . D}{E_s}(1-\nu_s^2) I_p \qquad (33.7)$$

D عرض (أو قطر الوتد)

q_p اجهاد الارتكاز $q_p = \frac{Q_p}{A_p}$

E_s معامل يونغ للتربة

ν_s معامل بواسون للتربة

I_p عامل التأثير (يمكن أن يعتبر مساوياً لـ I_w المستخدمة لحساب الهبوط الآني للتربة والمعطى بالجدول التالي :

شكل الأساس				
دائري	مربع	مستطيل		
		L/B=2	L/B=5	L/B=10
0.79	0.884	1.208	1.66	2.0

الجدول 7. 8 : قيم عامل التأثير I_p

اقترح فيسيك (1977) علاقة تجريبية لحساب S_2 تكتب على الشكل التالي:

$$S_2 = \frac{Q_p . C_p}{D . q_p} \qquad (34.7)$$

Cp عامل تجريبي يتعلق بالتربة وبطريقة تنفيذ الوتد, تعطى قيم هذا العامل بالجدول التالي:

التربة	وتد مدقوق	وتد مصبوب بالمكان
رمل (مخلخل أو متراص)	0.02-0.04	0.09-0.18
غضار (رخو أو قاسي)	0.02-0.03	0.03-0.06
سيلت (مخلخل أو متراص)	0.03-0.05	0.09-0.12

الجدول 9 .7 : قيم العمل Cp بدلالة التربة وطريقة تنفيذ الوتد

3- الهبوط نتيجة للحمولة المنقولة بالاحتكاك (على جوانب الوتد):

يمكن حساب هذا الهبوط بالعلاقة التالية:

$$S_3 = \frac{Q_s}{P\,L}\frac{D}{E_s}(1-\nu_s^2)\,I_s \qquad (35.7)$$

$$I_s = 2 + 0.35\sqrt{\frac{L}{D}}$$

اقترح فيسيك علاقة بسيطة مشابهة للعلاقة السابقة كالتالي:

$$S_3 = \frac{Q_s\,C_s}{L\,q_p} \qquad (36.7)$$

$$C_s = \left(0.93 + 0.16\sqrt{\frac{L}{D}}\right)C_p$$

مثال

وتد بيتوني دائري طوله L=21m و قطره d=0.356m ، مدقوق ضـــمن تربة رملية . قدرة التحمل التشـــغيلية للوتد= 502kN منها 350kN تحمل احتكاك والباقي تحمل ارتكاز. إذا علمت أن :

$$E_p = 21*10^6 kN/m^2,\ E_s = 25*10^3 kN/m^2,\ \nu_s = 0.35$$

يطلب حساب هبوط الوتد

الحل

$$S_1 = \frac{(Q_p + \zeta Q_s)L}{A_p E_p}$$

$$Q_p = 502 - 350 = 152\ kN$$

بفرض توزع اجهاد الاحتكاك خطي، يكون ζ=0.67

$$S_1 = \frac{(152 + 0.67*350)*21}{\frac{\pi*0.356^2}{4}*21*10^6} = 0.0039m = 3.9mm$$

$$S_2 = \frac{q_p.D}{E_s}(1-\nu_s^2)I_p$$

$$q_p = \frac{152}{\frac{\pi*0.356^2}{4}} = 1527\ kN/m^2$$

$$S_2 = \frac{1527*0.356}{25*10^3}(1-0.35^2)*0.79 = 0.015m = 15mm$$

$$S_3 = \frac{Q_s}{PL}\frac{D}{E_s}(1-\nu_s^2)I_s$$

$$I_s = 2 + 0.35\sqrt{\frac{L}{D}} = 2 + 0.35\sqrt{\frac{21}{0.356}} = 4.69$$

$$S_3 = \frac{350}{\pi*0.356*21}.\frac{0.356}{25*10^3}(1-0.35^2)*4.69 = 0.00087m = 0.87mm$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = 3.9 + 15 + 0.87 = 19.77mm$$

باستخدام علاقة فيسيك لحساب S3، يكون لدينا :

$$S_3 = \frac{Q_s C_s}{L\ q_p} \qquad (9.24)$$

$$C_s = \left(0.93 + 0.16\sqrt{\frac{L}{D}}\right)C_p$$

$$C_s = \left(0.93 + 0.16\sqrt{\frac{21}{0.356}}\right) * 0.03 = 0.064$$

$$S_3 = \frac{350 * 0.064}{21 * 1527} = 0.0007m = 0.7mm$$

7.7 : العوامل المؤثرة على الهبوط

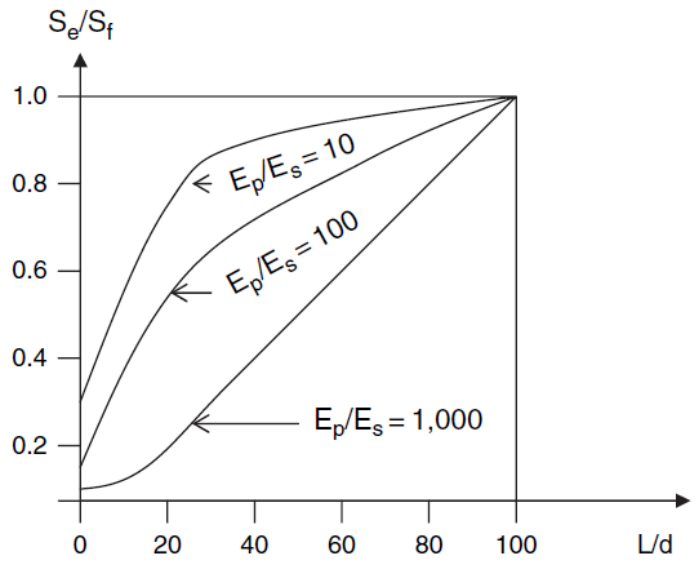
تؤثر على هبوط الأوتاد مجموعة من العوامل، أهمها :

- النسبة L/d، حيث L و d تمثلان بالترتيب طول الوتد وقطره
- النسبة Ep/Es، Ep تمثل معامل يونغ للوتد وEs معامل يونغ للتربة

يبين الشكل التالي نسبة هبوط وتد الارتكاز Se إلى هبوط وتد الاحتكاك Sf بالعلاقة مع النسبتين L/d و Ep/Es . نلاحظ من هذا الشكل ما يلي :

1-بزيادة النسبة L/d ينخفض هبوط وتد الاحتكاك وتزداد نسبة هبوط وتد الارتكاز إلى وتد الاحتكاك، أي يقل الفارق بين هبوط وتد الارتكاز وهبوط وتد الاحتكاك.

2-بتخفيض Es (زيادة النسبة Ep/Es) يزداد هبوط وتد الاحتكاك وتقل نسبة هبوط وتد الارتكاز إلى وتد الاحتكاك، أي يزداد الفارق بين هبوط وتد الارتكاز وهبوط وتد الاحتكاك.



الشكل 7. 10 : منحني هبوط الوتد بحسب (Poulos, H. G, 1989)

مثال

وتد ارتكاز طوله 10m وقطره 0.3m. نسبة Ep/Es تساوي 100. إذا كانت طبقة الارتكاز غير موجودة وصمم الوتد كوتد احتكاك فاحسب الزيادة الناتجة في هبوط الوتد.

الحل

L/d=30 و Ep/Es=100

من الشكل السابق، Se/Sf=0.62 ⟵ Sf=1.61Se

أي أن هبوط وتد الاحتكاك أكبر بـ 61% من هبوط وتد الارتكاز

بالإضافة إلى ذلك يمكن ملاحظة ما يلي :

-عندما تزداد النسبة فإن الفرق بين الهبوطين ينقص يصبح مهملاً عندما تكون النسبة L/d كبيرة جداً. معنى ذلك أنه في الأوتاد الطويلة ليس من الضروري إيصال هذه الأوتاد إلى طبقة الارتكاز

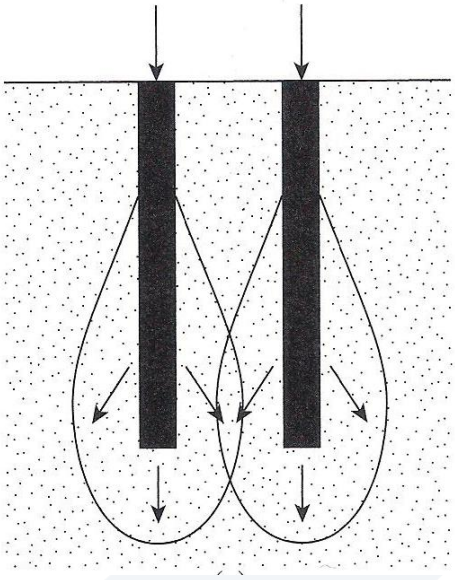
-عندما تزداد نسبة فإن الفرق بين هبوط وتد الاحتكاك وهبوط وتد الارتكاز ينخفض

مناقشة

لو كانت نسبة Ep/Es=1000 بدلاً من 100 ، كانت نسبة هبوط وتد الاحتكلك إلى هبوط وتد الارتكاز Se/Sf=0.3، أي أن S_f=1.33Se، هذا يعني أن هبوط وتد الاحتكاك يزيد من ثلاثة أضعاف عن وتد الارتكاز وبالتالي فإن الوصول إلى طبقة الارتكاز في هذه الحالة يصبح مهماً أكثر بكثير من حالة Ep/Es=100

7. 8 : مجموعة الأوتاد

تتواجد الأوتاد عادة ضمن مجموعة على شكل صفوف بالاتجاهين, تبعد عن بعضها مسافة S تدعى تباعد الأوتاد. إن تجاور الأوتاد يجعل من الضروري عدم تجاهل العمل المشترك لهذه الأوتاد خاصة عندما تتقارب الأوتاد من بعضها, حيث تتراكب الاجهادات المنقولة من الأوتاد إلى التربة وتتقاطع بصلات اجهاد الأوتاد المنفردة المتجاورة (الشكل 7. 11). لذلك فمن الضروري أثناء التصميم أن تدرس الأوتاد كمجموعة من حيث قدرة تحملها وهبوطها وعدم دراستها كأوتاد منفردة. إن زيادة تباعد الأوتاد يخفض مقدار العمل المشترك بحيث ينتفي تقريباً عند تجاوز بعد معين (حوالي 6 مرات قطر البعد).



الشكل 7. 11: تداخل بصلات الاجهاد للأوتاد المنفردة في حالة مجموعة الأوتاد

7. 8. 1 اختيار نوع الوتد وطوله وتباعد الأوتاد

يتعلق اختيار نوع الوتد بشكل أساسي بتربة الموقع وبموقع المشروع فالأوتاد المدقوقة تناسب الترب الغضارية والسيلتية الرخوة والرمل المخلخل, في المناطق التي لا تحتوي على أبنية مجاورة وذلك نظراً للأضرار التي قد تصيب تلك الأبنية نتيجة للاهتزازات الناتجة عن عملية الدق. أما الأوتاد المحفورة فتناسب الترب الغضارية القاسية والترب الحاوية على كتل صخرية ويمكن استخدامها في جميع المناطق.

يتم اختيار تباعد الأوتاد بحيث نقلل قدر الامكان من تراكب بصلات اجهاد الأوتاد المنفردة شرط بقاء أبعاد الوتد وطوله ضمن الحدود المعقولة والاقتصادية.

تحدد الكودات التباعدات الأصغرية للأوتاد حيث ينصح الكود النرويجي بأن لا يقل تباعد الأوتاد عن القيم التالية:

طول الوتد	أوتاد احتكاك في الرمل	أوتاد احتكاك في الغضار	أوتاد ارتكاز
<12m	3D	4D	3D
(12-24)m	4D	5D	4D
>24m	5D	6D	5D

الجدول 7. 10 : التباعدات الأصغرية للأوتاد بحسب الكود النرويجي

أما الكود البريطاني فينصح بأن لا يقل تباعد الأوتاد عن القيم التالية:

نوع الأوتاد	التباعد الأصغري
أوتاد احتكاك	محيط الوتد
أوتاد ارتكاز	5D

الجدول 7. 11: التباعدات الأصغرية للأوتاد بحسب الكود البريطاني

<u>وينص الكود الهندي على ما يلي:</u>

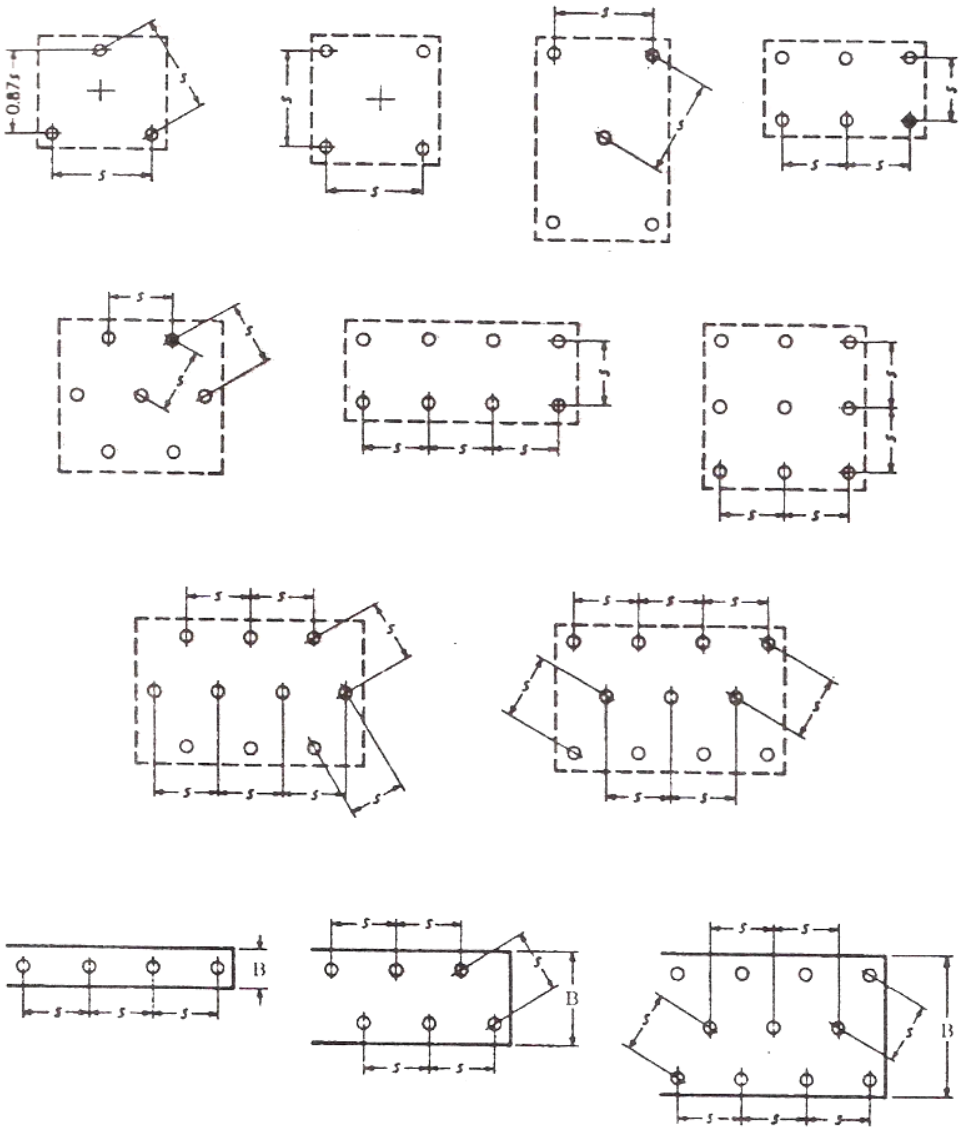
- في حال ارتكاز الأوتاد على قاعدة صلبة جداً (معظم التحمل ناتج عن الارتكاز) يكون التباعد الأصغري للأوتاد 2.5D
- في حال أوتاد الاحتكاك (معظم التحمل ناتج عن الاحتكاك على جوانب الوتد), يجب أن يكون تباعد الأوتاد كبيراً بحيث يؤمن الوتد المقاومة المحسوبة, ويجب أن لا يقل تباعد الأوتاد في هذه الحالة عن 3D.
- في حال الرمل المخلخل أو الردميات يمكن استخدام تباعدات أقل من حالة الرمل المتراص حيث أنه أثناء دق الأوتاد يحصل تراص للتربة المحيطة بالأوتاد. التباعد الأصغري في هذه الحالة هو 2D.

ترتب الأوتاد تحت المنشأ على شكل شبكة منتظمة أو شطرنجية بصفوف طولية وعرضية (الشكل 7. 12), ويتم اختيار عدد الأوتاد اللازم لمقاومة حمولة المنشأ بحيث يكون تحمل مجموع الأوتاد كاف لمقاومة هذه الحمولة.

وينص الكود الأمريكي (IBC) على أنه يجب أن لا يقل تباعد الأوتاد عن :

2d للوتد الدائري

3/4 القطر للأوتد المستطيل



الشكل 7. 12: توزع الأوتاد تحت المنشآت

7. 8. 2 فعالية مجموعة الأوتاد

إن تداخل بصلات الاجهاد للوتد المنفرد للأوتاد ضمن مجموعة سوف يخفض من قدرة تحمل الوتد المنفرد, لذلك لا بد من من تحديد ما يسمى فعالية المجموعة التي تعرف بأنها النسبة بين قدرة التحمل الحدية لمجموعة الأوتاد $Q_{u,g}$ وبين مجموع قدرات التحمل الحدية لكل أوتاد المجموعة حين تعمل بشكل منفرد $\sum Q_{ui}$

$$\eta = \frac{Q_{u,g}}{\sum Q_u} \qquad (37.7)$$

حيث:

η يمثل عامل الفعالية

Q_u قدرة تحمل الوتد المنفرد

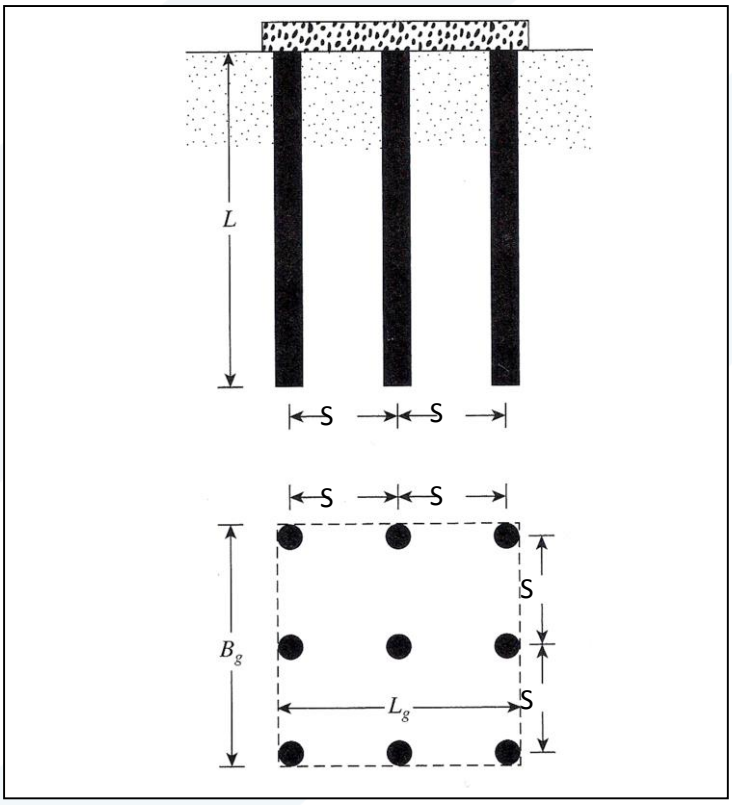
$Q_{u,g}$ قدرة تحمل المجموعة

وتكون قدرة تحمل الوتد ضمن المجموعة $Q_{u,p} = \eta . Q_u$

وتكون قدرة تحمل المجموعة $Q_{u,g} = n_p . Q_{u,p}$

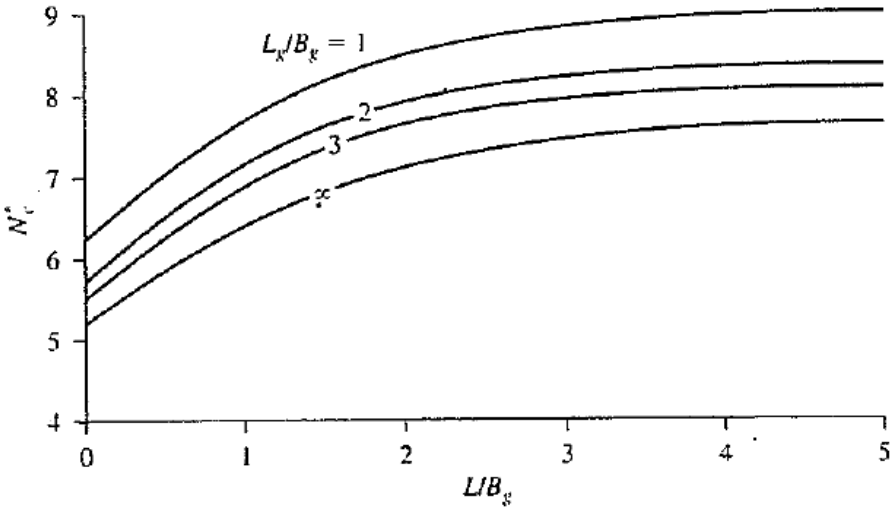
n_p عدد الأوتاد ضمن المجموعة

لحساب قدرة الحدية لمجموعة الأوتاد $Q_{u,g}$ يتم الاستعاضة عن مجموعة الأوتاد بوتد وهمي بديل مقطعه Lg*Bg وطوله يساوي طول الوتد المنفرد (الشكل 7. 13). تحسب قدرة تحمل الوتد البديل بنفس طريقة حساب قدرة تحمل الوتد المنفرد مع مراعاة أبعاد المقطع الجديد بالإضافة إلى قيمة عامل قدرة تحمل التربة Nc الذي يتعلق بنسبة الأبعاد الأفقية للوتد البديل (Lg/Bg) وكذلك بطول الوتد L، ويمكن أن يحسب من الشكل 7. 14 :



الشكل 7. 13: حساب قدرة تحمل مجموعة الأوتاد

Nc



الشكل 7. 14: قيمة عامل قدرة تحمل التربة Nc لمجموعة أوتاد

تحسب $Q_{u,g}$ بالعلاقة التالية:

$$Q_{u,g} = A_{p,g}.q_p + P_g\,.\,L.q_s \qquad (38.7)$$

حيث:

P_g محيط الوتد البديل $P_g=2(L_g+B_g)$

$A_{p,g}$ مقطع الوتد البديل $A_{p,g}=L_g*B_g$

بفرض n_L و n_B عدد صفوف الأوتاد بالاتجاهين الطولي والعرضي, يكون:

$$L_g = (n_L - 1)S + D$$
$$B_g = (n_B - 1)S + D$$
$$A_{p,g} = Lg.\,B_g = (n_L - 1)(n_B - 1)S^2 + (n_L + n_B - 2)D.S + D^2$$

بالتبديل في العلاقة 7. 38 نحصل على:

$$Q_{u,g} = \left[(n_L - 1)(n_B - 1)S^2 + (n_L + n_B - 2)D.S + D^2\right]q_p + \left[2(n_L + n_B - 2)S + 4D\right]L.q_s$$ مـلـا

قدرة التحمل الحدية لمجموع الأوتاد المنفردة فتساوي:

$$\sum Q_u = n(A_p.q_p + P.L.q_s) = (n_L.n_B)(A_p.q_p + P.L.q_s)$$

وتكون فعالية الأوتاد:

$$\eta = \frac{\left[(n_L - 1)(n_B - 1)S^2 + (n_L + n_B - 2)D.S + D^2\right]q_p + \left[2(n_L + n_B - 2)S + 4D\right]L.q_s}{(n_L.n_B)(A_p.q_p + P.L.q_s)} \qquad (39.7)$$

ملاحظة:

- الأوتاد التي تعتمد بشكل أساسي على مقاومة الارتكاز في قدرة تحملها قد لا تتأثر ببقية الأوتاد ضمن المجموعة

-الأوتاد التي ترتكز ضمن صخر عالي المقاومة لا تتأثر مقاومتها بمقاومة الاحتكاك ويمكن اعتبار عامل فعاليتها η=1

تحدد الكودات عادة عامل فعالية المجموعة بحسب نوع التربة وتباعد الأوتاد. على سبيل المثال, يعطى عامل فعالية الأوتاد بحسب الـ AASHTO كما يلي:

تباعد الأوتاد	فعالية المجموعة
3d	0.67
4d	0.78
5d	0.89
6d أو أكثر	1.0

الجدول 9.7 : عامل فعالية المجموعة في الترب الغضارية

تباعد الأوتاد	فعالية المجموعة
3d	0.67
4d	0.74
5d	0.80
6d	0.87
7d	0.93
8d أو أكثر	1.0

الجدول 7. 10: عامل فعالية المجموعة في الترب الرملية

9 .7 : تصميم مجموعة الأوتاد

في الترب المفككة، يتم الحصول على قدرة تحمل مجموعة الأوتاد عن طريق استخدام عامل الفعالية للوتد ضمن المجموعة η. يمكن كتابة قدرة تحمل مجموعة الأوتاد بالتالي :

قدرة تحمل مجموعة الأوتاد = عامل فعالية الوتد*قدرة تحمل الوتد المنفرد*عدد الأوتاد ضمن المجموعة

في الترب المتماسكة، يمكن أن تعمل مجموعة الأوتاد ككتلة واحدة تضم كافة أوتاد المجموعة وإذا حصل الانهيار تنهار هذه الكتلة بالكامل، لذلك تعتبر قدرة تحمل مجموعة الأوتاد في هذه الحالة القيمة الصغرى بين قدرة التحمل المحسوبة باستخدام عامل فعالية المجموعة وبين قدرة التحمل المحسوبة اعتماداً على انهيار الأوتاد ككتلة واحدة .

ملاحظة : في الترب المفككة لا يمكن أن تحصل آلية الانهيار لمجموعة الأوتاد ككتلة واحدة ولذلك تحسب قدرة تحمل مجموعة الأعمدة اعتماداً على عامل فعالية المجموعة فقط.

مثال

مجموعة مكونة من 4 أوتاد قطر 30cm للوتد وطول 10m وبتباعد 120cm بين محوري كل وتدين متجاورين بالاتجاهين، مدقوقة ضمن تربة غضارية وزنها الحجمي γ=18kN/m3 وتماسكه غير المصرف Cu=60kN/m2 كما هو مبين في الشكل التالي. احسب قدرة تحمل المجموعة.

الحل

1-حساب تحمل المجموعة اعتمادا على عامل الفعالية للمجموعة :

حساب قدرة تحمل الوتد المنفرد :

$Q_u=C_u .N_c . Ap+\alpha C_u . As$

$\sigma'_{v0,midpoint}=5*18=90kN/m^3$

$\alpha=0.61 \leftarrow C_u/\sigma'_{v0}=60/90=0.67$

$Nc=9 \leftarrow Lg/Bg=1, L/B_g=10/1.5=6.67$

$Qu=9*60*\pi*0.3^2/4+0.61*60*\pi*0.3*10=383kN$

بحسب الـ AASHTO ومن أجل تباعد S=4d في الترب الغضارية، يكون عامل الفعالية 0.78

قدرة تحمل المجموعة = 383*4*0.78=1195 kN

2-حساب تحمل المجموعة اعتمادا على آلية انهيار المجموعة ككتلة واحدة :

Lg=Bg=1.2+0.3=1.5m

Qu=9*60*1.5*1.5+0.61*60*4*1.5*10 =3411kN

نلاحظ أن قدرة التحمل المحسوبة اعتماداً على عامل الفعالية للمجموعة هو الأصغر وبالتالي فقدرة تحمل مجموعة الأوتاد $Q_{u,g}$=1195 kN

7. 10 : هبوط مجموعة الأوتاد

7. 10. 1 الهبوط المرن

أعطى فيسيك العلاقة المبسطة التالية لحساب الهبوط المرن لمجموعة الأوتاد:

$$S_{g,e} = \sqrt{\frac{B_g}{d}}\, S_e \qquad (40.7)$$

حيث S_e تمثل الهبوط المرن للوتد المنفرد

d قطر الوتد

كما اقترح مايروف العلاقة التالية لحساب الهبوط المرن لمجموعة الأوتاد اعتماداً على نتائج تجربة الـ S.P.T:

$$S_{g,e} = \frac{0.96q\sqrt{B_g.I}}{N_{60}} \qquad (41.7)$$

حيث:

$$q = \frac{Q_g}{L_g.B_g} \qquad (kN/m^2) \qquad (42.7)$$

L_g و B_g طول وعرض مقطع مجموعة الأوتاد بالمتر

N_{60} متوسط رقم الاختراق ضمن منطقة الهبوط (عمق حوالي B_g تحت أسفل الوتد)

I عامل تأثير $((I = 1 - \frac{L}{8B_g}) \geq 0.5$

L طول الجزء المطمور من الوتد

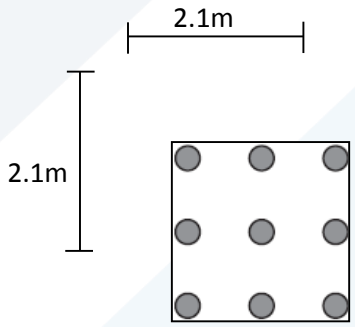
كما يمكن حساب S_e اعتماداً على نتائج تجربة الاختراق بالمخروط بالعلاقة التالية:

$$S_{g,e} = \frac{q.B_g.I}{2q_c} \qquad (43.7)$$

حيث q_c مقاومة الاختراق الوسطية ضمن منطقة الهبوط

مثال

مجموعة مكونة من 3*3 وتد بقطر 30cm للوتد، محملة بحمولة شاقولية مقدارها 2700kN. بفرض أن الحمولة موزعة بانتظام على كافة الأوتاد وبفرض أن هبوط الوتد المنفرد تحت تأثير حمولة 300kN هو 2.5cm . احسب هبوط مجموعة الأوتاد.



الحل

باستخدام علاقة فيسيك

$$S_{g,e} = \sqrt{\frac{B_g}{d}}\, S_e = \sqrt{\frac{2.1}{0.3}} * 0.025 = 0.066m = 6.6cm$$

نلاحظ أن هبوط المجموعة أكبر بكثير من هبوط الوتد المنفرد رغم أن حمولة الوتد في المجموعة هي نفس حمولة الوتد المنفرد.

7. 10. 2 الهبوط طويل الأمد للأوتاد في الترب الغضارية المشبعة

يمكن للأوتاد أن تخضع لهبوط التشديد في الترب الغضارية المشبعة. يتم حساب هبوط التشديد باستخدام الفرضيات المبسطة التالية :

1-مجموعة الأوتاد تشكل جسماً صلباً حتى عمق يساوي ثلثي طول الوتد

2-يستخدم الاجهاد الفعال في منتصف الطبقة الغضارية لحساب الهبوط

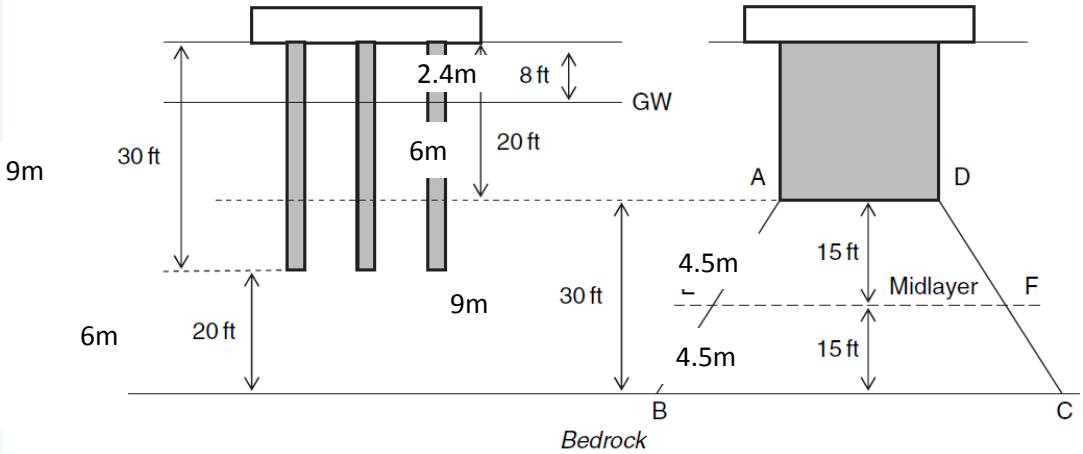
3-معادلة التشديد

$$S = \frac{C_c}{1+e_0} H_0 \log \frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma}{\sigma'_{vo}} \qquad (43.7)$$

مثال

مجموعة أوتاد مكونة من 3*3 وتد بقطر 30cm وطول 9m للوتد. أبعاد المجموعة الأفقية 3m*3m ومحملة بحمولة شاقولية مقدارها 1600kN. الأوتاد منفذة ضمن تربة غضارية وزنها الحجمي γ_{sat}=18.9kN/m3 وخواصها هي كالتالي :

- قرينة الانضغاط Cc=0.3
- عامل المسامية الأولي : e_0=1.1
- عمق السرير الصخري تحت أسفل الأوتاد بـ 6m
- منسوب المياه يقع على عمق 2.4m



الحل

حساب الاجهاد الفعال في منتصف الطبقة الغضارية :

$$\sigma_{v0} = 18.9 * 2.4 + (18.9 - 9.8) * 8.1 = 119.07 \frac{kN}{m^2}$$

حساب الاجهاد الناتج عن حمولة الأوتاد في منتصف الطبقة الغضارية :

$$\Delta\sigma = \frac{1600}{(3 + 4.5)^2} = 28.44\ kN/m^2$$

حساب الهبوط :

$$S = \frac{0.3}{1 + 1.1} 9\ log \frac{119.07 + 28.44}{119.07} = 0.12m = 12cm$$

7. 11 توزيع الحمولة على أوتاد المجموعة

يبين الشكل 7. 15 مجموعة أوتاد تنقل حمولة عمود مكونة من قوة شاقولية V وعزم انعطاف M.

باستخدام الطريقة الستاتيكية المبسطة يمكن حساب الحمولة المنقولة إلى كل وتد بالعلاقة التالية:

$$Q_v = \frac{V}{n} \pm \frac{M_x . y}{\sum y^2} \pm \frac{M_y . x}{\sum x^2} \qquad (44.7)$$

حيث :

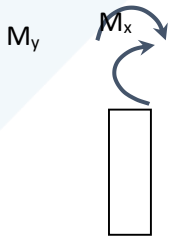
n عدد الأوتاد

x بعد مركز كل وتد عن المحور y المار من مركز ثقل القبعة

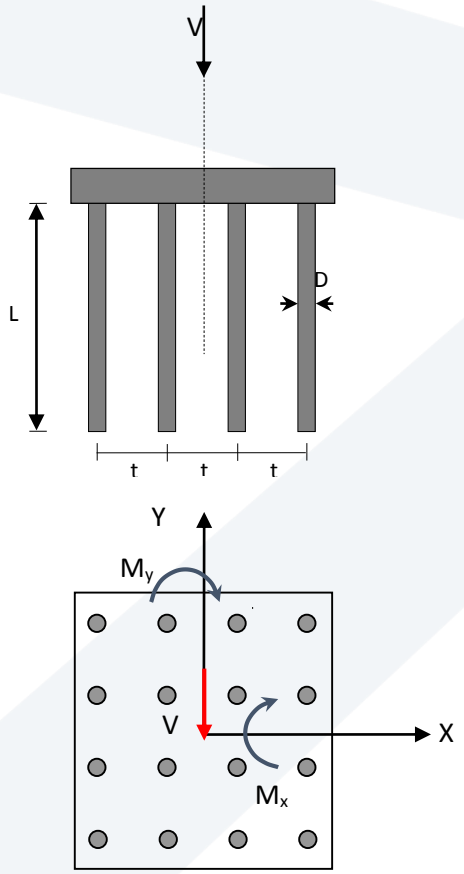
y بعد مركز كل وتد عن المحور x المار من مركز ثقل القبعة

يجب دوماً أن يتحقق الشرط :

$Q_v \leq Q_a$



Qa قدرة تحمل الوتد المسموحة ضمن المجموعة



الشكل 7. 15 : توزيع الحمولات على أوتاد المجموعة

7. 12 تصميم قبعة الأوتاد

يمكن تلخيص خطوات تصميم قبعة الأوتاد بالتالي :

1- فرض نوع الوتد. في أغلب الأحيان, الأوتاد المحفورة أكثر اقتصادية من بقية الأوتاد

2- حساب قدرة تحمل الوتد الحدية والمسموحة

3- فرض تباعد الأوتاد

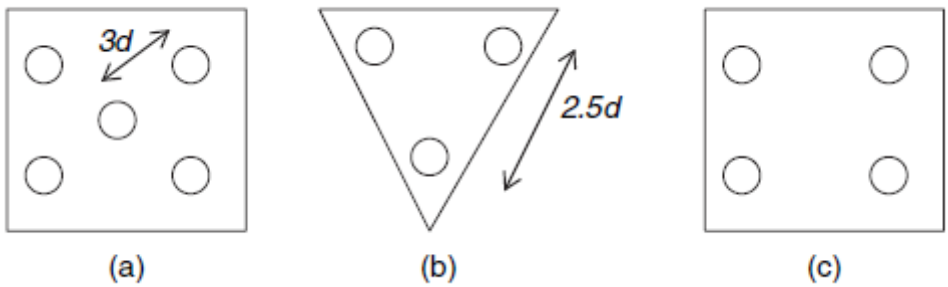
4- تحديد عدد الأوتاد اللازمة

5- فرض توزيع للأوتاد ضمن المجموعة وتحديد أبعاد القبعة (الشكل 7. 16)

6- حساب عزوم الانعطاف للقبعة بالاتجاهين (حول أوجه العمود)

7- التحقق من الثقب المباشر والقص عند أوجه العمود والشد القطري على بعد h/2 من أوجه العمود

8- حساب تسليح القبعة والتحقق من التلاحم



الشكل 7. 16 : توزيع للأوتاد ضمن المجموعة

مثال

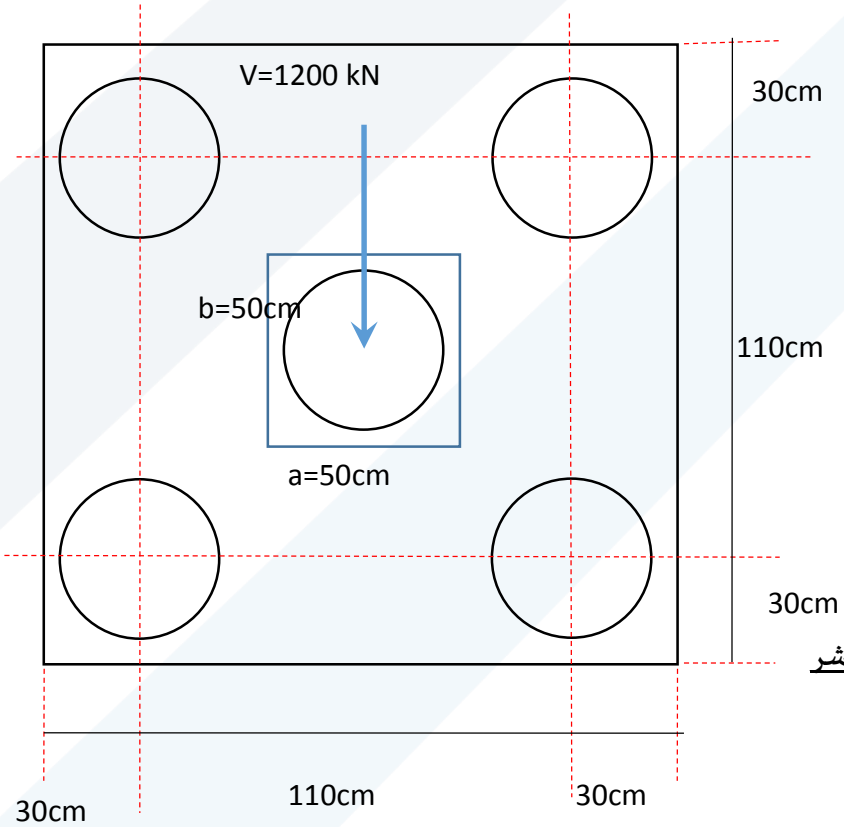
عمود أبعاده 50cm*50cm ينقل حمولة شاقولية مركزية مقدارها 1200kN, يستند على مجموعة مكونة من 5 أوتاد متماثلة قطر كل منها D=40cm مبينة بالشكل. يطلب تصميم قبعة الوتد علماً بأن :

$$\bar{\sigma}_s = 180\ MPa$$
$$\bar{\sigma}'_c = 6\ MPa$$

ثقب مباشر $\bar{\tau} = 1000\ kN/m^2$

قص $\bar{\tau} = 600\ kN/m^2$

تلاحم $\bar{\tau} = 1500\ kN/m^2$



الحل

الحمولة المنقولة إلى الوتد

$$Q_v = \frac{V}{n} = \frac{1200}{5} = 240\ kN$$

حساب الارتفاع من شرط الثقب المباشر

$$\tau = \frac{Q}{2(a+b)h} \Rightarrow h_{\min} = \frac{Q}{2(a+b)\bar{\tau}}$$

$$Q = 4*Q_v = 4*240 = 960\ kN$$

$$h_{\min} = \frac{960}{4*0.5*1000} = 0.48m$$

حساب الارتفاع من شرط العزم

$$M = 2*240*0.3 = 144\ kN.m$$

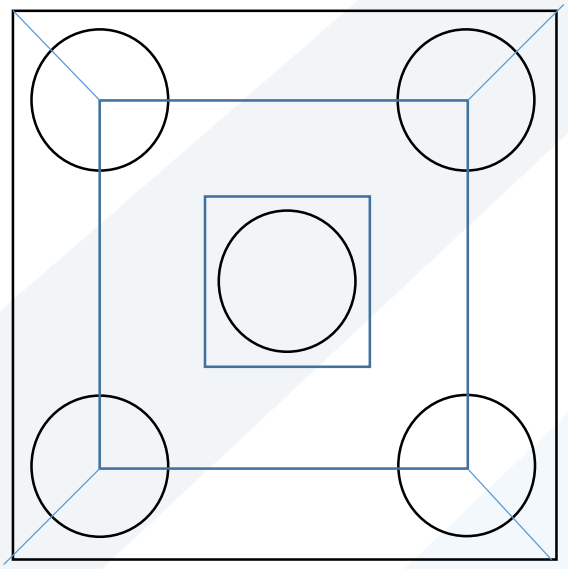
$$h \geq \gamma_h \sqrt{\frac{M}{\bar{\sigma}_c' * B}} = 2.5*\sqrt{\frac{144}{6000*1.7}} = 0.3m$$

حساب الارتفاع من شرط القص عند وجه العمود

$$\tau = \frac{Q}{0.85*B*h} \Rightarrow h \geq \frac{Q}{0.85*B*\bar{\tau}}$$

$$Q = 2*240 = 480\ kN$$

$$h \geq \frac{480}{0.85*1.7*600} = 0.55m$$



نفرض h=60cm

التحقق من الشد القطري(على بعد h/2 من أوجه العمود)

$$\tau = \frac{Q}{0.85*(a+h)*h}$$

$$Q = \frac{1}{3}(240*2) = 160\ kN$$

$$\tau = \frac{160}{0.85*(0.5+0.6)*0.6} = 285\ kN/m^2 < \bar{\tau}$$

تسليح القبعة

$$A_s = \frac{M}{0.87*\bar{\sigma}_s*h} = \frac{144}{0.87*180000*0.6} = 1.5.10^{-3} m^2 = 15\ cm^2$$

$$A_{s,\min} = 0.002*B*h = 0.002*170*60 = 20.4\ cm^2 > A_s$$

$$\Rightarrow A_s = A_{s,\min} = 20.4\ cm^2 \Rightarrow 9\phi 18mm/1.7m$$

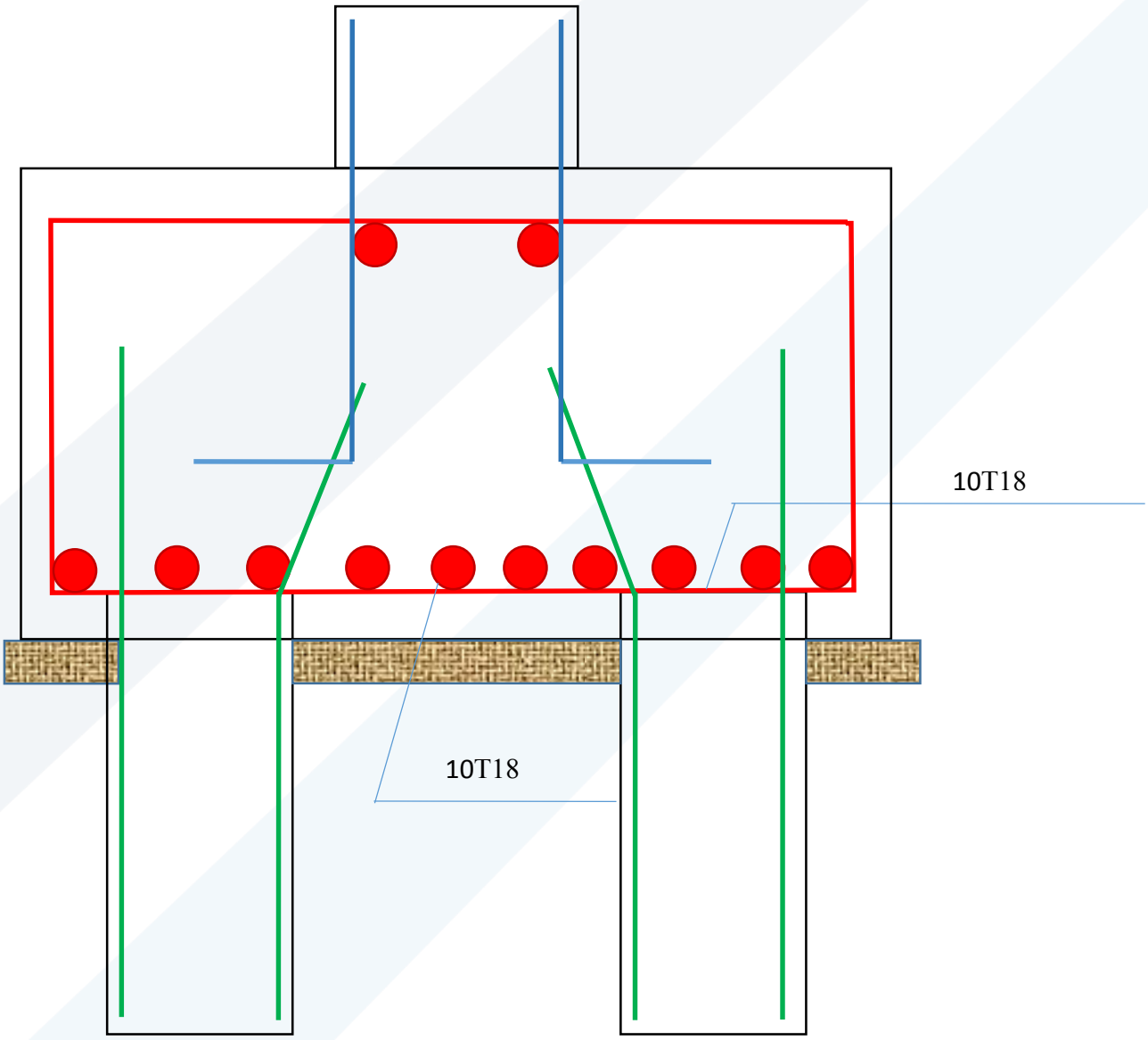
التحقق من التلاحم

$$\tau = \frac{Q}{0.85*h*\sum\phi} = \frac{480}{0.85*0.6*(9*\pi*0.018)} = 1849\,kN/m^2 > \bar{\tau}$$

الفارق كبير لذلك نزيد الارتفاع. بفرض h=0.75m

$$\Rightarrow A_s = A_{s,\min} = 0.002*75*170 = 25.5\,cm^2 \Rightarrow 10\phi 18mm/1.7m$$

$$\tau = \frac{480}{0.85*0.75*(10*\pi*0.018)} = 1331\,kN/m^2 < \bar{\tau}$$



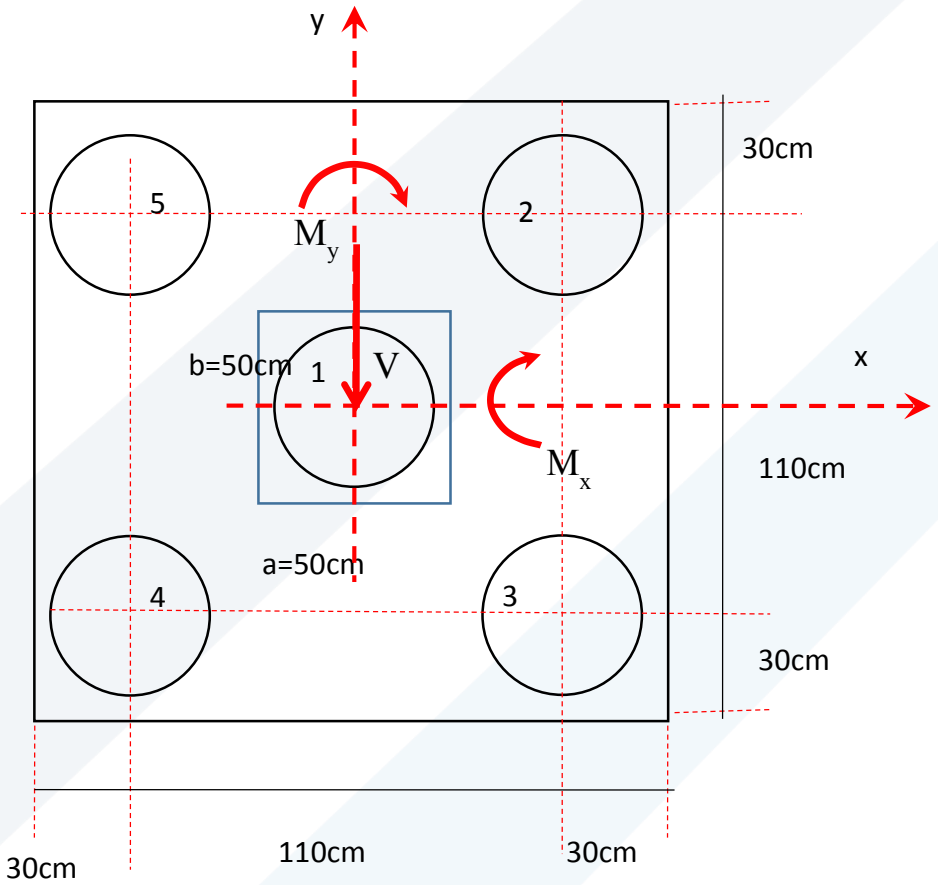
مثال

نفس المسألة السابقة ولكن مع وجود عزوم انعطاف بالاتجاهين $M_x = M_y = 240\ kN.m$

الحل

$$M_x = M_y = 1200 * 0.2 = 240\ kN.m$$

$$Q_v = \frac{V}{n} \pm \frac{M_x . y}{\sum y^2} \pm \frac{M_y . x}{\sum x^2}$$



المجموع	$M_y \cdot x / \sum x^2$	$M_x \cdot y / \sum y^2$	V/n	y^2i	X^2i	Yi	Xi	الوتد
240	0	0	240	0	0	0	0	1
458.2	109.1	109.1	240	0.3025	0.3025	0.55	0.55	2
240	109.1	-109.1	240	0.3025	0.3025	-0.55	0.55	3
21.8	-109.1	-109.1	240	0.3025	0.3025	-0.55	-0.55	4
240	-109.1	109.1	240	0.3025	0.3025	0.55	-0.55	5

Σ=1200 kN