جامعة حماة
كلية الهندسة المدنية
قسم الهندسة الجيوتكنيكية

هندسة الأساسات ٢

المحاضرة ٩:
بحث: الأوتاد

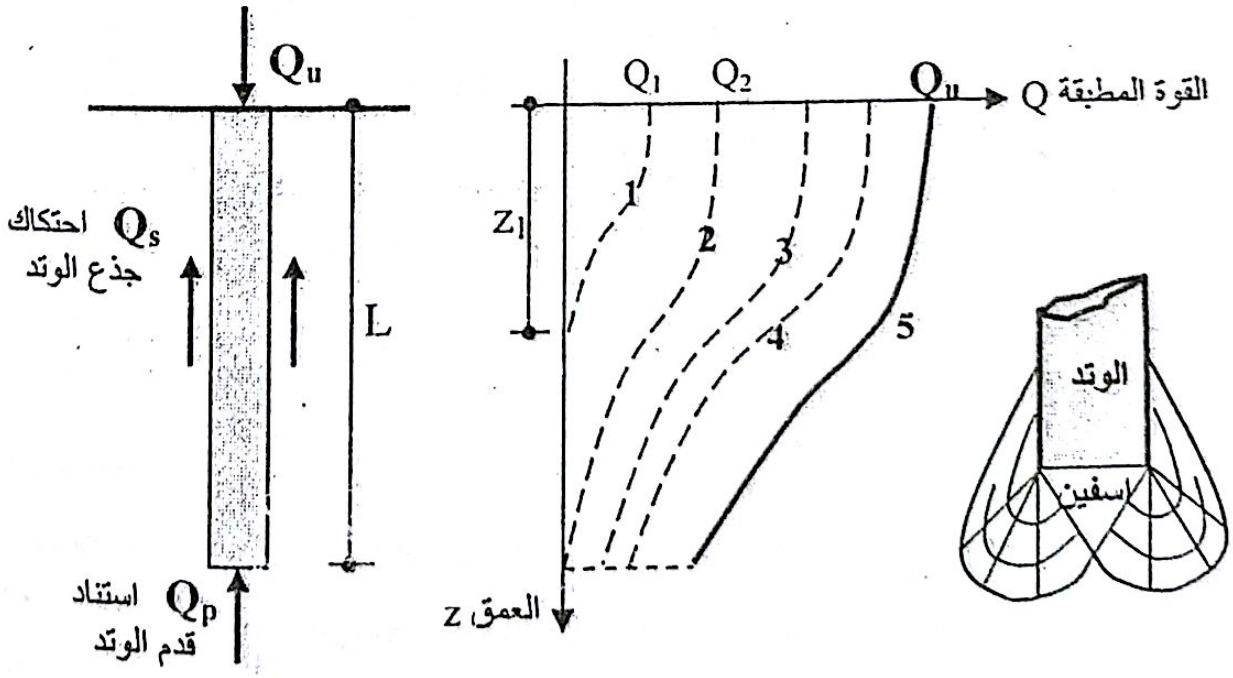
د. كنان زين العابدين

لطلاب السنة الرابعة

(منهاج الدفعة الأولى ٢٠١٩-٢٠٢٠)

4-7- قدرة تحمل الوتد المفرد

تصمم الاوتاد بحيث تتحمل كامل حمولة المنشأة التي تتوزع على جميع الاوتاد وفق مشاركة كل وتد في تلقي الحمولة ويقاوم الوتد المفرد قوة الضغط الحدية Q_u المطبقة عليه عن طريق احتكاك سطحه الجانبي بالتربة المحيطة به Q_s وعن طريق رد فعل التربة على سطح استناد قدمه Q_p أي ان الوتد يقوم بنقل هذه الحمولة الى التربة وفق آلية خاصة لاتزال حتى الآن معقدة وغير مفهومة بالكامل .



الشكل 33 : انتقال وتوزع الحمولة على طول الوتد

وجد بالتجربة انه عندما تطبق الحمولة على الوتد تدريجيا فان مقاومة الاحتكاك تستثار بالكامل عندما يبلغ الانتقال النسبي بين التربة والوتد 5- 10مم بغض النظر عن طول الوتد وقطره كما ان استثارة كامل مقاومة الاستناد تحدث حين يغوص راس الوتد في تربة الاستناد مسافة 0-25% من قطر الوتد فاذا طبقت حمولة تدريجية على الوتد تبدأ من الصفر وتنتهي بالقيمة الحدية أي (Q_u..... , Q_2 , Q_1 , 0) فان توزع الحمولة على طول الوتد سيكون وفق المنحنيات 1,2,3,4,5 من (الشكل 33) ففي المنحني 1 القوة Q_1 صغيرة ومخطط توزع القوة المحورية ينعدم عند العمق z_1 اي ان الاحتكاك بين الوتد والتربة سوف يتولد على هذا الجزء فقط من الوتد دون مشاركة باقي الوتد , واذا زدنا الحمولة الى Q_2 نجد ان مخطط توزع الحمولة المحورية (المنحني 2) ينعدم عند قدم الوتد أي ان طول الوتد بكامله يشارك في مقاومة القوة بالاحتكاك , واذا استمرت زيادة الحمولة المطبقة تبدأ القوة المحورية تأخذ قيمة معينة عند نهاية الوتد مما يدل على ان استناد الوتد بدأ يشارك في المقاومة (المنحني 3) , وتستمر زيادة الحمولات الى ان نصل الى الحمولة الحدية Q_u والتي عندها تكون المقاومة بالاحتكاك والمقاومة بالاستناد مستثارتين بالكامل .

عند تطبيق حمولة تفوق قدرة تحمل الوتد فان تربة الاستناد سوف تنهار بالثقب لان الوتد نفسه هو اساس مفرد عميق وسوف يتشكل اسفين من التربة القاسية اسفل الوتد (الشكل 33) وسيكون منحني العلاقة بين الهبوط والحمولة مشابها للمنحني الخاص بالاساس المفرد السطحي .

اما بالنسبة الى الاوتاد التي تتعرض الى قوى الشد فان ارتكاز الوتد على التربة يصبح غير ذي قيمة وتقاوم الاوتاد قوى الشد (السحب) المطبقة عليها بواسطة وزن الوتد نفسه اضافة الى الاحتكاك الذي يتولد بين سطحها الجانبي والتربة المحيطة.

4-7-1- حساب قوة تحمل الوتد المعرض الى الضغط:

تحسب قدرة التحمل الحدية Q_u للوتد كمجموع قوتين الاولى قوة المقاومة الحدية لارتكاز سطح قدم الوتد Q_p والثانية قوة المقاومة الحدية لاحتكاك السطح الجانبي للوتد مع التربة المحيطة Q_s :

$$Q_u = Q_p + Q_s \qquad (1)$$

ونحصل على الحمولة المسموحة للوتد Q_{all} بتقسيم الحمولة الحدية Q_u على عامل امان مناسب :

$$Q_{all} = Q_u / F.S. \qquad (2)$$

ويتراوح عامل الامان بين 2,5 و 4 بحسب درجة عدم التاكد من حساب الحمولة الحدية ولكن يؤخذ هذا العامل عموما مساوياً 3 – 4 من اجل الحمولات الدائمة الحية والميتة ومساويا الى 2,5 عندما تدخل الحمولات غير الدائمة كالرياح والصدمات ويساوي 2 عند ادخال تاثيرات الزلازل في الحساب.

اولاً) حساب قوة مقاومة الارتكاز الحدية Q_p :

ان قوة مقاومة الارتكاز الحدية Q_p هي عبارة عن قوة تساوي حاصل جداء سطح استناد الوتد A_p مع اجهاد رد فعل التربة الحدي على سطح الاستناد q_p . أي :

$$Q_p = q_p . A_p \qquad (3)$$

ويسمى اجهاد رد فعل التربة الحدي ايضا "**اجهاد مقاومة الارتكاز**" ويعطى بمعادلة تشبه في الشكل معادلة الاساسات السطحية:

$$q_p = \gamma . D . N_\gamma^* + q' . N_q^* + c . N_c^* \qquad (4)$$ **حيث :**

γ : الوزن الحجمي لتربة التاسيس ؛ c : تماسك تربة التاسيس ؛ D : قطر الوتد او بعده ؛ $N_\gamma^* ; N_q^* ; . N_c^*$: عوامل قدرة تحمل التربة ؛ q' : اجهاد التربة الفعال عند منسوب قدم الوتد .

ولكن باعتبار ان D صغير نسبيا بحيث يمكن اهمال الحد الاول فان العلاقة تصبح :

$$q_p = q' . N_q^* + c . N_c^* \qquad (5)$$ أي ان قوة مقاومة الارتكاز تساوي :

$$Q_p = A_p . q_p = A_p (q' . N_q^* + c . N_c^*) \qquad (6)$$

وتوجد طرق عديدة لحساب معاملات قدرة تحمل التربة في العلاقة السابقة سنتطرق الى بعضها فيما يلي :

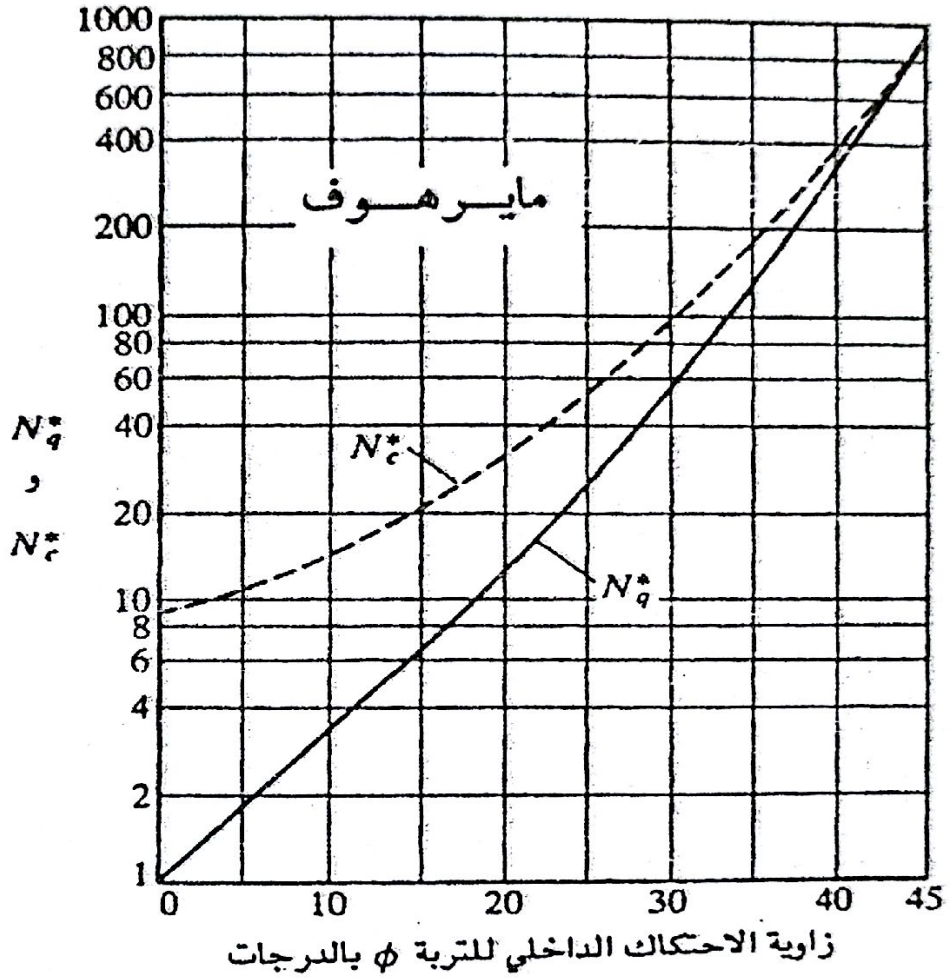
- **طريقة ماير هوف Meyerhof:**

يسمى العمق الذي يخترق فيه الوتد تربة الاستناد (الارتكاز) **بعمق الوثق** في التربة ومن المهم ملاحظة ان عمق الوثق هذا يساوي كامل طول الوتد المطمور اذا كان الوتد وتدا عائما بكامل طوله في تربة متجانسة .

تزداد قيمة q_p في الرمل مع مقدار العمق L_b الذي يوثق فيه الوتد في التربة الجيدة التحمل وتبلغ قيمتها القصوى عندما تكون النسبة بين عمق الوثق L_b وبعد الوتد D تساوي قيمة معينة تدعى النسبة الحرجة التي بعدها تبقى قيمة q_p ثابتة ولن تزيد مهما زاد عمق الوثق:

$$L_b / D = (L_b / D)_{cr} \qquad (7)$$

بحيث ان النسبة اذا زادت عن الحرجة يمكن استقراء القيم العظمى لعوامل قدرة التحمل N_q^* ; N_c^* من (الشكل 34) بدلالة زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة φ , اما اذا قلت النسبة عن النسبة الحرجة فان قيم العوامل تخفض بالتناسب , وقد تساهل مايرهوف (1976) في ذلك فاعتبر انه يكفي ان تكون النسبة مساوية الى $L_b / D = 0{,}5.(L_b / D)_{cr}$ حتى تؤخذ القيم العظمى من المنحنيات ونظرا الى ان اغلب الاوتاد عمليا تحقق هذه النسبة فان المنحنيات تنطبق على الاغلب على جميع الاوتاد.



الشكل 34 : عوامل قدرة تحمل الارتكاز بحسب مايرهوف

تتعلق النسبة الحرجة بزاوية الاحتكاك الداخلي للتربة φ ويتم تعيين قيمتها من المنحنيات وينبغي على الوتد ان يحقق دوما طول وثق في تربة التاسيس اكبر من الطول الحرج حتى يكون استخدام منحنيات مايرهوف صحيحاً .

في الحالات الخاصة عندما تكون الاوتاد في رمل معدوم التماسك تصبح العلاقة :

$$Q_p = A_p.q_p = A_p q'.N_q^* \qquad (8)$$

ويحدد مايرهوف ان Q_p لايجب ان تزيد عن قيمة معينة محددة بالمعادلة :

$$Q_p = A_p q'.N_q^* \le A_p.q_1 \qquad (9)$$

وتعتمد القيمة الدنيا

حيث q_1 مقدار يعطى بالعلاقة :

$$q_1 = 50 . N_q^* . \tan \varphi \qquad (10)$$ ؛ حيث φ زاوية الاحتكاك الداخلي في تربة الارتكاز

اقترح مايرهوف حساب اجهاد مقاومة الارتكاز الحدي لوتد مطمور بالكامل في تربة بحصية بالاعتماد على رقم تجربة الاختراق النظامية N قرب قدم الوتد (المجراة في المجال بين 10D فوق و 4D تحت قدم الوتد) من العلاقة :

$$q_p = 40 . N . L / D \leq 400 . N \qquad (11)$$

اما في تربة الغضار المشبع عديم الاحتكاك ($\varphi = 0$) فان :

$$Q_p = A_p . c_u . N_c^* = 9 . A_p . c_u \qquad (12)$$

حيث c_u : هو التماسك غير المصرف للتربة ؛ $N_c^* = 9$ عندما $\varphi = 0$ (طبقا للمنحنيات).

في الحالات العامة للتربة التي فيها ($\varphi \neq 0; c \neq 0$) تحسب قدرة التحمل من العلاقة (6).

• طريقة فيسيك Vesic:

اعطى فيسيك (1977) طريقة لحساب قدرة تحمل الوتد على الاستناد من العلاقة التالية اعتمادا على قيمة الاجهاد الفعال :

$$Q_p = A_p q_p = A_p (\sigma'_o N_\sigma^* + c . N_c^*) \qquad (13)$$

حيث:

σ'_o : الاجهاد الوسطي الفعال عند منسوب قدم الوتد ويعطى بالعلاقة :

$$\sigma'_o = (\frac{1 + 2k_o}{3}) . q' \qquad (14)$$

k_o : معامل دفع التربة الساكن ويساوي : $k_o = 1 - \sin \varphi$

N_c^* ؛ N_σ^* : عوامل قدرة التحمل وتحسب كما يلي :

$$N_\sigma^* = \frac{3 N_q^*}{(1 + 2 k_o)} \quad ؛ \quad N_c^* = (N_q^* - 1) \cot \varphi \qquad (15)$$

ان قرينة القساوة المخفضة للتربة I_{rr} تعطى بالعلاقة المعروفة في ميكانيك التربة :

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta}$$ حيث Ir دليل صلابة التربة ويساوي :

$$I_r = \frac{E}{2(1 + \mu_s)(c + q' \tan \varphi)}$$

وΔ : هو التشوه الحجمي الوسطي للتربة في منطقة قدم الوتد , وE_s وμ_s عوامل مرونة التربة .

يمكن تحديد قيم I_r من تجربة التشديد والثلاثي المحاور ويمكن استخدام الجدول التقريبي التالي :

نوع التربة	رمل	غضار وسيلت مصرف	غضار (غير مصرف)
قيمة I_r	150 – 70	100 – 50	200 –100

افترض فيسيك ان العلاقة بين ثوابت قدرة التحمل وبين I_{rr} هي علاقة تابعية $N^*_{\sigma.c} = f(I_{rr})$ وذلك بحسب تغير زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة وتستخرج قيم ثوابت قدرة التحمل بدلالة I_{rr} و φ من (الجدول 1) .

	فيسيك Vesić				
ϕ	I_{rr}= 10	50	100	200	500
0°	N^*_σ= 1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	N^*_c = 6.97	9.12	10.04	10.97	12.19
5°	1.79	2.12	2.28	2.46	2.71
	8.99	12.82	14.69	16.69	19.59
10°	3.04	4.17	4.78	5.48	6.57
	11.55	17.99	21.46	25.43	31.59
20°	7.85	13.57	17.17	21.73	29.67
	18.83	34.53	44.44	56.97	78.78
30	18.34	37.50	51.02	69.43	104.33
	30.03	63.21	86.64	118.53	178.98
35	27.36	59.82	83.78	117.34	183.16
	37.65	84.00	118.22	166.15	260.15
40	40.47	93.70	134.53	193.13	311.50
	47.04	110.48	159.13	228.97	370.04
45	59.66	145.11	212.79	312.04	517.60
	53.66	144.11	211.79	311.04	516.60

الجدول 1 : عوامل قدرة التحمل بطريقة فيسيك

في الحالة غير المصرفة ($\varphi = 0$) تصبح العلاقة : $N^*_c = 4/3(\ln I_{rr} + 1) + \pi/2 + 1$

• طريقة جانبو Janbu:

افترض Janbu (1976) ان الانهيار تحت الوتد يحصل وفق الشكل المبين على (الجدول 2) وبناء على ذلك استنبط المعادلة التالية لحساب قيمة قوة مقاومة الارتكاز الحدية Q_p :

$$(16) \qquad Q_p = A_p (q' N_q^* + c.N_c^*)$$

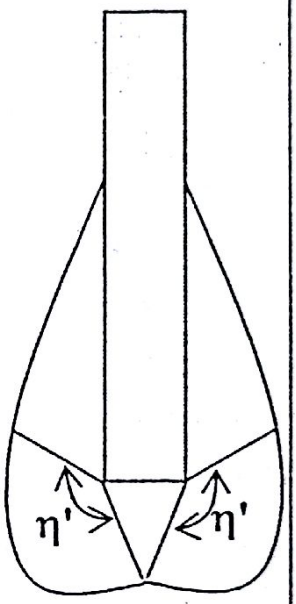
حيث ان عوامل قدرة تحمل التربة تحسب كما يلي :

$$(17) \qquad N_q^* = (\tan\varphi + \sqrt{(1+\tan^2\varphi)})^2 . e^{2\eta' \tan\varphi}$$
$$N_c^* = (N_q^* - 1)\cot\varphi$$

الزاوية η' مبية على الشكل المرافق (للجدول 2) وهي تؤخذ مساوية الى 70^o للترب الغضارية و 105^o للترب الرملية المتراصة ,و يمكن قراءة قيم عوامل قدرة التحمل من (الجدول 2) بدلالة زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة.

الجدول 2 : عوامل قدرة التحمل بطريقة جانبو Janbu

درجة ϕ	درجة η'	75	90	105
0	N_q^*	1	1	1
	N_c^*	5,74	5,74	5,74
5	N_q^*	1,5	1,57	1,64
	N_c^*	5,69	6,49	7,33
10	N_q^*	2,25	2,47	2,71
	N_c^*	7,11	8,34	9,7
20	N_q^*	5,29	6,4	7,74
	N_c^*	11,78	14,83	18,53
30	N_q^*	13,6	18,4	24,9
	N_c^*	21,82	30,14	41,39
35	N_q^*	23,08	33,3	48,04
	N_c^*	31,53	46,12	67,18
40	N_q^*	41,37	64,2	99,61
	N_c^*	48,11	75,31	117,52
45	N_q^*	79,9	134,87	227,68
	N_c^*	78,9	133,87	226,68



ثانياً) حساب قوة مقاومة الاحتكاك الحدية Q_s :

بما ان الوتد يخترق طبقات عديدة للتربة لذلك تحسب مقاومة الاحتكاك للوتد الناتجة عن احتكاك السطح الجانبي للوتد بالتربة المحيطة به كمجموع لقوى الاحتكاك في جميع الطبقات التي يكون الوتد على تماس معها وفق العلاقة التالية:

$$(18) \qquad Q_s = \sum_{i=1}^{n} p_i . L_i . f_i$$

حيث : i : رقم الطبقة ؛ n : عدد الطبقات ؛ p : محيط مقطع الوتد ؛ L_i : سماكة الطبقة

f : اجهاد الاحتكاك الواحدي الحدي بين التربة وسطح الوتد الجانبي.

يتلخص حل المسألة في حساب قيمة **f** التي تتعلق قيمتها عموما بنوع التربة وتوجد العديد من الطرق التقريبية لحسابها :

- ***حساب قيمة f في التربة الرملية :***

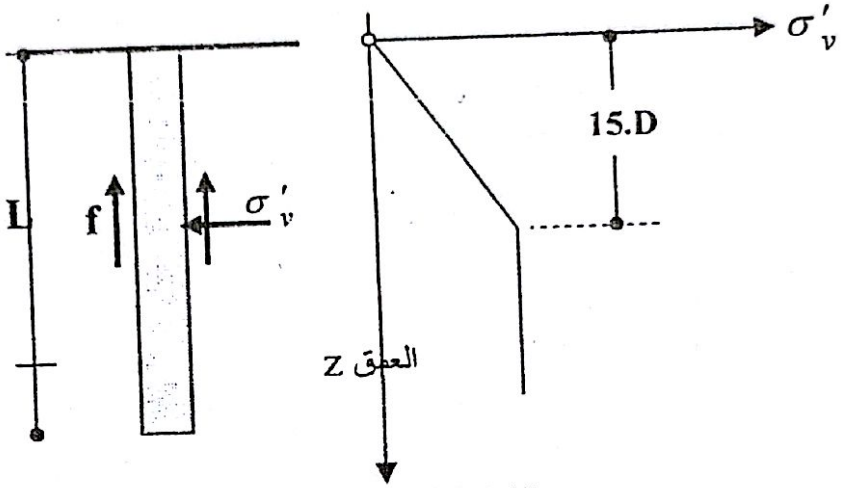
يعبر عن قيمة اجهاد الاحتكاك الواحدي بالعلاقة :

$$f = k.\sigma'_v.\tan\delta \qquad (19)$$

حيث k : معامل دفع التربة .

σ'_v : الاجهاد الشاقولي الفعال عند العمق المعتبر.

δ : زاوية الاحتكاك بين مادة الوتد والتربة .



الشكل 35 : قيمة f في الرمل

تتغير قيمة k مع العمق حيث تساوي الى معامل الدفع الجانبي المعاكس k_p في مستوى راس الوتد وتكون مساوية الى معامل الدفع اثناء الراحة k_o في منسوب قدم الوتد وتعتمد قيمة k على طبيعة الوتد ووضعه وازاحته في التربة وينصح باعتماد قيم الجدول التالية في العلاقة السابقة :

نوع الوتد	قيمة k	
	القيمة الصغرى	القيمة العظمى
وتد محفور	$k = k_o = 1 - \sin\varphi$	
وتد مدقوق قليل الازاحة	k_o	$1,4\ k_o$
وتد مدقوق عالي الازاحة	k_o	$1,8\ k_o$
وتد مدقوق عالي الازاحة	يمكن حساب قيمة k بمعادلة Bohsan: $k.\tan\delta = 0,18 + 0,0065.D_r$ D_r : الكثافة النسبية للتربة	

ويعتبر الاجهاد الشاقولي الفعال σ'_v متزايداً الى اقصى حد له عند العمق **(15.D)** الذي يدعى بالعمق الحرج ويصبح بعد ذلك ثابتا حسب (الشكل 35) , وهذا يعني ان الاحتكاك يستنفذ بكامله على عمق **15.D** ضمن الطبقة المدروسة .

يتعلق العمق الحرج بزاوية احتكاك التربة والكثافة النسبية وقابلية ارتصاص التربة.

اما الزاوية δ فتؤخذ بين (50–80%) من قيمة φ .

يمكن بحسب مايرهوف حساب اجهاد الاحتكاك الواحدي **الوسطي** $\mathbf{f_{av}}$ للاوتاد المدقوقة كبيرة الازاحة بدلالة رقم مقاومة الاختراق النظامية $\overline{N}$ الوسطية :

$$f_{av} = 2.\overline{N} \qquad [kN / m^2] \tag{20}$$

وللاوتاد المدقوقة قليلة الازاحة من العلاقة :

$$f_{av} = \overline{N} \qquad [kN / m^2] \tag{21}$$

- ***حساب قيمة f في التربة الغضارية :***

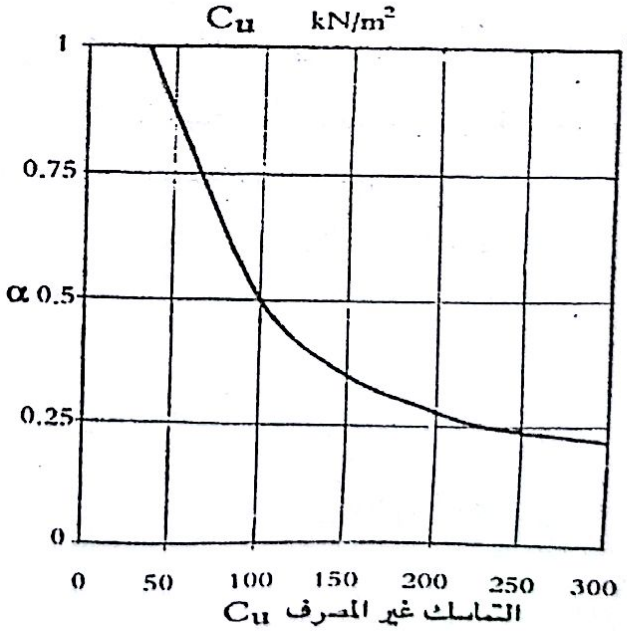
توجد عدة طرق لحساب قيمة f في الترب الغضارية :

1. **طريقة α :** تعين قيمة f في هذه الطريقة بالمعادلة التالية:

$$f = \alpha . c_u \tag{22}$$

حيث α : عامل تلاصق مادة الوتد بالتربة ؛ c_u :التماسك غير المصرف ($\varphi = 0$).

يحصل على قيم α من (الشكل 36) بدلالة cu , وبحسب الشكل فان قيمة α تساوي تقريبا 1 من اجل الغضار المشدد طبيعيا الذي فيه $c_u \le 50 kN / m^2$.



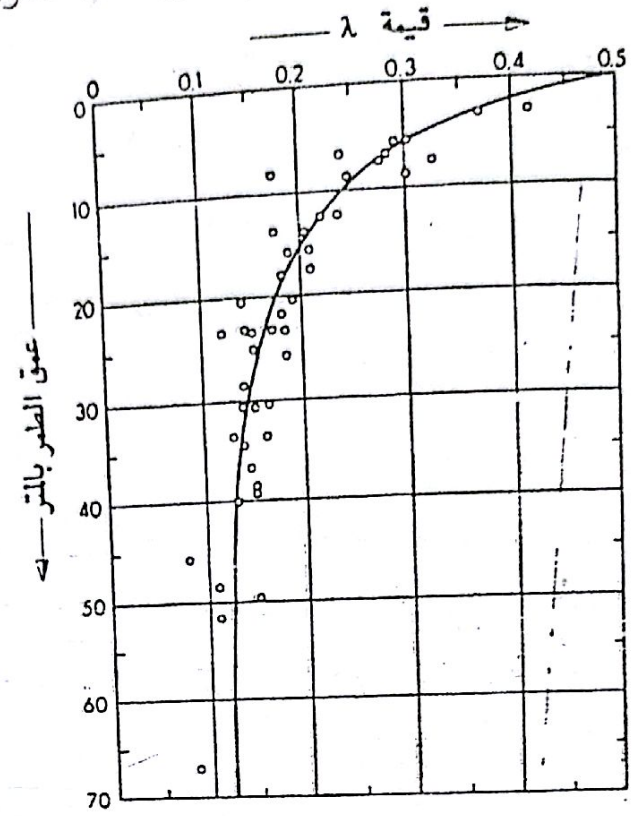
الشكل 36 : منحني حساب α

2. **طريقة λ :** اقترح فوشت Focht هذه الطريقة عام 1972 وافترض ان الانزياح الحاصل في التربة هو بتاثير الدفع المعاكس الذي يطبقة الوتد المدقوق على التربة واقترح المعادلة التالية لحساب اجهاد الاحتكاك الواحدي الوسطي f_{av} :

$$f_{av} = \lambda (\overline{\sigma_v'} + 2 c_u) \tag{23}$$

حيث λ : تتناسب مع طول الوتد المطمور ويحصل عليها من (الشكل 37).

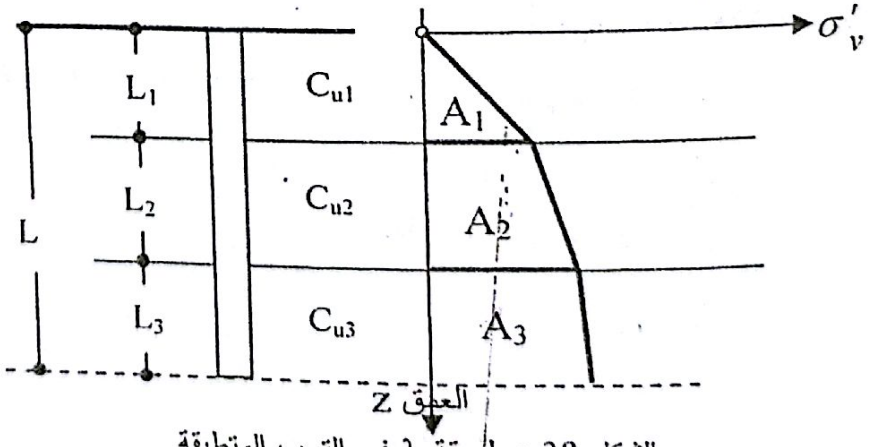
$\overline{\sigma}'_v$: الاجهاد الشاقولي الفعال الوسطي على كامل الطول المطمور.



الشكل 37 : منحني حساب λ

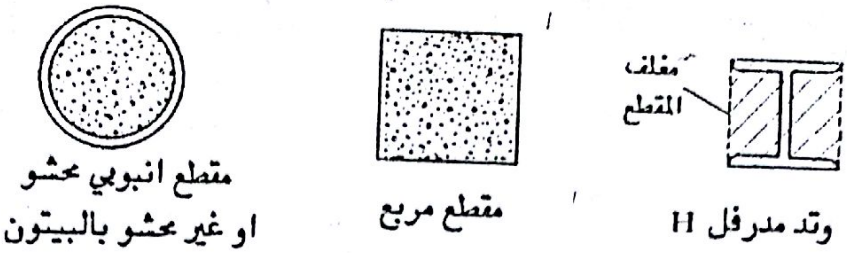
اذا اخترق الوتد الذي طوله L تربة مؤلفة من عدة طبقات من ترب متشابهة سماكاتها $L_1, L_2, ... L_n$ تحسب قيمة c_u **الوسطية** بالمعادلة : $\overline{c}_u = (c_{u1}.L_1 + c_{u2}L_2 + ...)/L$

كما يحسب الاجهاد الوسطي بالمعادلة: $\overline{\sigma}'_v = (A_1 + A_2 + A_3 + ..)/L$ حيث $A_1, A_2, ...$ هي مساحات مخطط الاجهاد وفق (الشكل 38).



الشكل 38 : طريقة λ في الترب المتطبقة

ملاحظة : عند حساب سطح المقطع العرضي A_p للوتد ومحيط مقطعه p فان مقاومة التربة تؤخذ بالاعتبار لذلك يعتبر المقطع المطلوب للوتد هو المقطع المغلف له بغض النظر ان كان المقطع مفرغاً أو مصمتا اوانبوبيا محشوا بالتربة او البيتون .(شكل 39) :



الشكل 39 : المقطع المعتبر في الحساب

3. <u>طريقة β :</u> تنطلق هذه الطريقة من فكرة ان الاوتاد عندما تدق في التربة يزداد الضغط المائي المسامي حول الوتد ويصل الى (4-6) مرات من c_u في الغضار المشدد طبيعيا وان هذا الضغط يتلاشى بالتدريج بعد فترة زمنية معينة لذلك يمكن تحديد f اعتمادا على الاجهاد الفعال الغضار المعاد تشكيله remolded أي انه عند أي عمق فان f تساوي :

$$f = \beta . \sigma'_v \qquad (24)$$

حيث σ'_v الاجهاد الفعال الشاقولي الوسطي عند العمق المطلوب كما ان β تساوي:

$$\beta = k . \tan \varphi_R \qquad (25)$$

حيث k معامل دفع التربة و φ_R زاوية الاحتكاك المصرفة للغضار المعاد تشكيله.

يمكن ان ناخذ قيمة k مساوية الى معامل دفع التربة اثناء السكون من العلاقات التالية:

$$k = 1 - \sin \varphi_R \qquad (26)$$ (للغضار المشدد طبيعيا).

و

$$k = (1 - \sin \varphi_R).\sqrt{OCR} \qquad (27)$$ (للغضار فوق المشدد).

حيث OCR هي النسبة فوق المشددة.

<u>4-7-2- حساب قوة تحمل الاوتاد المرتكزة على الصخر</u>

بما ان مقاومة الاحتكاك للوتد لاتستثار الا بعد ان يهبط الوتد بمقدار معين قادر على توليد احتكاك بينه وبين التربة فان الاوتاد المستندة على الصخر القاسي تعتبر عموما غير هابطة ولذلك يمكن اهمال مقاومة الاحتكاك في حساب قدرة التحمل وتحسب المقاومة فقط على الارتكاز:

$$q_p = q_u (. N_\varphi + 1) \qquad (28)$$

حيث : q_u : مقاومة الضغط غير المحصور ، و $N_\varphi = \tan^2 (45 + \frac{\varphi}{2})$

φ : زاوية الاحتكاك الداخلي .

تحدد مقاومة الضغط الحر غير المحصور مخبريا على العينات الصخرية الماخوذة من الموقع , ومن المعلوم ان العينة كلما زاد قطرها فان قيمة q_u تصبح اقل بحيث تثبت هذه القيمة عند قطر يساوي 1,0م , وبما ان قطر العينات لايتجاوز عادة 20% من 1,0م ونظرا لصعوبة الحصول على عينات بقطر 1,0م لذلك تقسم القيمة المحصول عليها مخبريا على 5 (أو تضرب بـ 0,2) للحصول على القيمة التصميمية الصحيحة:

$$q_u^{\text{التصميمية}} = 0,2 \times (q_u^{\text{المخبرية}}) \qquad (29)$$

وتحسب قوة التحمل المسموحة للوتد المستند على الصخر بتقسيم قوة التحمل الحدية على عامل امان مناسب لايقل عن 3:

$$Q_{all} = \frac{A_p[q_u(.N_\varphi + 1)]}{FS} \qquad (30)$$