الفصل الثامن
الحمولات الخارجية على الأنابيب

1-8 مقدمة:

يتطلب التصميم الانشائي للأنبوب أن تكون قوة تحمل الأنبوب (حمل التهشيم) مقسوماً على معامل أمان مناسب يساوي أو يزيد على الأحمال الواقعة عليه ممثلة بوزن التربة وأية أحمال حية أخرى (الحمل الآمن)

ويشمل هذا الفصل طريقة حساب الأحمال الناتجة من التربة والأحمال الخارجية الحية والميتة على الأنابيب الصلبة والمرنة.

2-8- تصنيف الأنابيب:

1-2-8 الأنابيب الصلبة (Rigid Pipes) :

وهذه النوعية من الأنابيب تمتاز بمقاومة عالية لأحمال التهشيم وتشمل الآتي:

- أنابيب الفخار.
- أنابيب الخرسانة العادية.
- أنابيب الخرسانة المسلحة.
- أنابيب الخرسانة مسبقة الاجهاد.
- أنابيب الاسبستوس الأسمنتي.
- أنابيب الفونت.

2-2-8 الأنابيب المرنة (Flesible Pipes):

وهذه النوعية من الأنابيب لها قابلية للانبعاج تحت تأثير الأحمال الخارجية. وتتحمل الأنابيب هذه الأحمال عن طريق مقاومتها بالإضافة إلى رد فعل التربة الجانبي من تحرك جوانب الأنبوب جهة التربة وتشمل الآتي:

- أنابيب البوليستر المسلح بألياف الزجاج (GRP).
- أنابيب البلاستيكية البلاستيك (UPVC & PVC).
- أنابيب حديد الصب.

3-2-8 الأنابيب شبه الصلبة (Semi Rigid Pipes):

- وهي الأنابيب التي تسلك سلوك الأنابيب الصلبة في الأقطار الصغيرة وسلوك الأنابيب المرنة في الأقطار الكبيرة وهي:
- أنابيب الفونت المرن (Ductile Cast Iron)

وفيما يلي تعريف للمصطلحات الهامة:

1) الأحمال الخارجية للأنبوب:

وهي عبارة عن وزن التربة فوق الأنبوب بالإضافة إلى أي أحمال حية واقعة عليه.

2) حمل التهشيم: (Crushing strength):

ويتم معرفته من نتائج الاختبار في المعمل ووحداته كجم/م الطولي لكل نوع أنبوب.

3) معامل الأمان: (Factor of Safety):

وهو رقم أكبر من الواحد الصحيح والغرض منه استنتاج الحمل الآمن للأنبوب.

4) معامل التحميل: (Loading Factor):

هو النسبة بين اقصى أحمال خارجية على الأنبوب في الطبيعة والحمل الآمن.

$$\text{معامل التحميل} = \frac{\text{أقصى أحمال خارجية على الأنبوب في الطبيعة}}{\text{الحمل الآمن}}$$

5) الحمل الآمن: (Safe Load):

هو حمل التهشيم مقسوم على معامل أمان طبقاً للمواصفات القياسية لنوع الأنبوب.

$$\text{الحمل الآمن} = \frac{\text{حمل التهشيم}}{\text{معامل الأمان}}$$

فيكون:

$$\text{الحمل الآمن المطلوب للأنبوب} = \frac{\text{أقصى أحمال خارجية على الأنبوب في الطبيعة}}{\text{معامل التحميل}}$$

3-8 الأحمال ومقاومة الأنابيب Load and Supporting Strength

يمكن حساب مقاومة الأنابيب للأحمال الخارجية بإتباع الخطوات التالية:

1- حساب الحمل الناتج عن تربة الردم فوق الأنبوب (Earth load).

2- حساب الحمل الحي (Live load).

3- حساب معامل الحمل (Load factor).

4- تطبيق معامل الأمان (Factor of safety).

5- حساب مقاومة الأنبوب (Pipe strength).

1-3-8 الحمل الناتج عن مادة الردم Determination of Earth Load

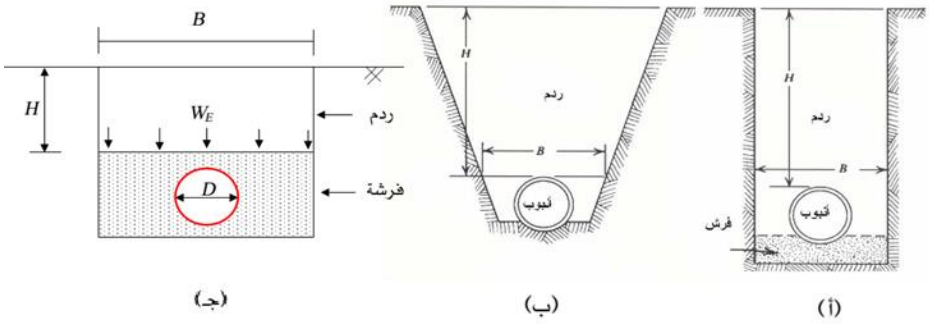
يمكن حساب الحمل الناتج عن مادة الردم في حالة أنبوب مدفون في خندق الشكل (1-8) وتتوقف طريقة الحساب حسب نوع الأنبوب باستخدام العلاقة الآتية:

- حالة الأنابيب الصلبة:

$$W_E = C_d \gamma_s B^2$$

- حالة الأنابيب المرنة:

$$W_E = C_d \gamma_s B D$$



الشكل (8-1) الحمل الناتج عن مادة الردم

حيث:

W_E : الحمل الذي يتعرض له الأنبوب لكل وحدة طول منه.

γ_s : الوزن النوعي الخاص بتربة الردم، والجدول (8-1) يعطي قيم γ_s لبعض أنواع التربة المستخدمة في ردم الأنابيب.

B: عرض الخندق، ويمكن أن يستنتج من العلاقة: $B=1.5\ D + 300$.

D: قطر الأنبوب.

C_d : معامل يتعلق بعمق الخندق.

الجدول (8-1) الوزن النوعي لبعض أنواع تربة الردم

نوع التربة	الوزن النوعي Kg/m^3
رمل جاف (Dry sand)	1600
رمل عادي (Ordinary Sand)	1840
رمل مبلل (Wet Sand)	1920
رمل رطب (Damp Sand)	1920
طين مشبع (Saturated clay)	2080
تربة سطحية مشبعة (Saturated topsoil)	1840
تربة سطحية ورمل رطب (Sand and damp topsoil)	1600

ويمكن الحصول على المعامل C_d من الشكل (8-2) أو حسابه باستخدام العلاقة:

$$K = \frac{\sqrt{\mu^2+1}-\mu}{\sqrt{\mu^2+1}+\mu} = \frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi} \qquad C_d = \frac{1-e^{-2\,k\,\mu'\,H/B}}{2\,K\,\mu'}$$

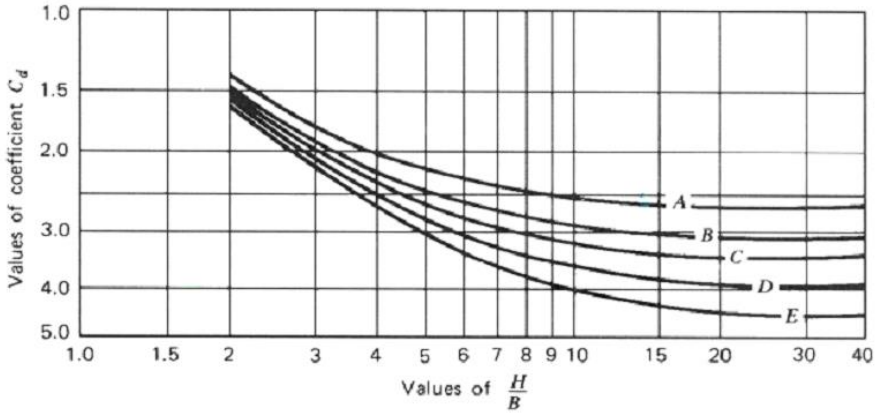
حيث: H: عمق الردم فوق الأنبوب.

K: معامل رانكن ويمثل النسبة بين الضغطين الداخلي (Active internal pressure) والرأسي (Vertical Pressure)

μ': معامل الاحتكاك بين مادة الردم وجوانب الخندق.

μ: معامل الاحتكاك لمادة الردم.

φ: زاوية الاحتكاك الداخلي لمادة الردم.



الشكل (8-1) استنتاج قيم المعامل C_d

ويعطي الجدول (8-2) قيم $K\,u'$ لأغلب أنواع التربة المستخدمة في الردم.

الجدول (8-2) قيم $K\,u'$ لأغلب أنواع التربة

نوع التربة	أقصى قيم $K\,u'$
تربة غير متماسكة (Cohesionless granular soil)	0.192
رمل وبحص (Sand and gravel)	0.165
تربة سطحية مشبعة (Saturated topsoil)	0.150
طين (Saturated clay)	0.130
طين مشبع (Saturated clay)	0.110

تطبيق:

احسب الحمل الذي يتعرض له أنبوب صلب موضوع في خندق مردوم بتربة طينية مبللة، علماً أن:

- قطر الأنبوب =600 mm
- عمق الخندق =3.60 m
- عرض الخندق= 1.20 m

الحل: الحمل لكل متر طولي من الأنبوب الصلب W_E:

$$W_E = C_d W B^2$$

حيث: $$C_d = \frac{1-e^{-2\,k\,u'\,H/B}}{2\,K\,u'}$$

من الجدول (8-1) نجد:

$$W = 1920\ kg/m^3$$

من الجدول (8-2) نجد:

$$K\,u' = 0.11$$

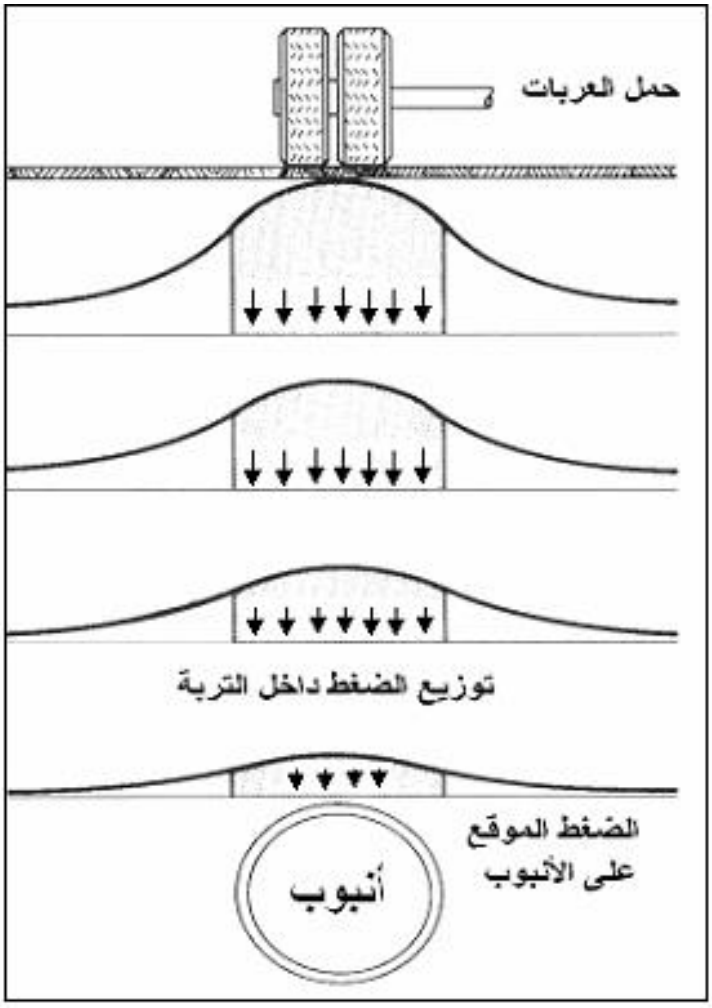
فيكون:

$$C_d = \frac{1-e^{-2\,(0.11)\ 3/1.2}}{2\,(0.11)} = 2.2$$

وتكون الحمولة الناتجة عن الردم: $W_E = 2.2\times(1920)\times(1.2)^2 = 6082\ kg/m$

2-3-8 الأحمال الحية الواقعة على الأنابيب Applied Live Load on Pipes:

وتشمل أحمال المباني القريبة من خط الأنابيب والأحمال المرورية وغيرها، وتؤثر هذه الأحمال بشكل كبير على الخطوط القريبة من سطح الأرض كما هو مبين في الشكل (3-8).



الشكل(3-8) تأثير أحمال المرور على الأنابيب المدفونة

ويمكن حساب نسبة الحمل التي تصل إلى خط الأنابيب باستخدام الجدولين(3-8) و(4-8).

الجدول (8-3) نسبة الأحمال السطحية (الطويلة) التي تصل إلى الأنابيب

نسبة العمق إلى العرض	رمل وتربة سطحية	تربة سطحية مشبعة	تربة طينية رطبة	تربة طينية مشبعة
0.0	1.0	1.00	1.00	1.00
0.5	0.85	0.86	0.88	0.89
1.0	0.72	0.75	0.77	0.80
1.5	0.61	0.64	0.67	0.72
2.0	0.52	0.55	0.59	0.64
3.0	0.37	0.41	0.45	0.51
4.0	0.27	0.31	0.35	0.41
5.0	0.19	0.23	0.27	0.33
6.0	0.14	0.17	0.20	0.26
8.0	0.07	0.09	0.12	0.17
10.0	0.04	0.05	0.07	0.11

الجدول (8-4) نسبة الأحمال السطحية (القصيرة) التي تصل إلى الأنابيب

نسبة العمق إلى العرض	رمل وتربة سطحية	تربة سطحية مشبعة	تربة طينية رطبة	تربة طينية مشبعة
0.0	1.00	1.00	1.00	1.00
0.5	0.77	0.78	0.79	0.81
1.0	0.59	0.61	0.63	0.66
1.5	0.46	0.48	0.51	0.54
2.0	0.35	0.38	0.40	0.44
2.5	0.27	0.29	0.32	0.35
3.0	0.21	0.23	0.25	0.29
4.0	0.12	0.14	0.16	0.19
5.0	0.07	0.09	0.10	0.13
6.0	0.04	0.05	0.06	0.08
8.0	0.04	0.02	0.03	0.04
10.0	0.01	0.01	0.01	0.02

3-3-8 معامل الحمل Load Factor:

يحسب معامل الحمل باستخدام العلاقة الآتية:

$$L_f = \frac{[W_E + W_L]}{W_B}$$

حيث:

L_f : معامل الحمل

W_L : الحمل الخارجي الذي يتعرض له الأنبوب

W_B : قدرة التحمل للثلاث حافات (Three-edge bearing strength).

4-3-8 تطبيق معامل الأمان factor of Safety:

عند تحديد مقاومة الأنابيب للأحمال الخارجية فإن معامل الأمان F_S يحدد بالقيم التالية:

- أنابيب الخرسانة المسلحة: $F_S = 1$
- أنابيب أخرى غير الخرسانة المسلحة: $F_S = 1.25 - 1.5$

4-8- قدرة التحمل اللازمة للمواسير Required Bearing Stringth for Pipes:

تحسب قدرة تحمل الأنابيب باستخدام العلاقة التالية:

$$W_B = \left(\frac{W_E}{L_f} + \frac{W_L}{1.5} \right) F_s$$

حيث:

W_B : قدرة التحمل للثلاث حافات (Three-edge bearing strength)

W_L : الحمل الخارجي الذي يتعرض له الأنبوب.

ويمكن استعمال الجداول من (8-5) إلى (8-8) لتصميم أنابيب الصرف الصحي المصنوعة من الفخار والخرسانة حسب المواصفات الأمريكية (ASTM).

جدول (8-5) أدنى مقاومة تكسير لأنابيب الفخار طبقاً للمواصفات الأمريكية

Minimum crushin strength of clay pipe (ASTM)

Nominal size (mm)	Extra strength clay pipe, Kgf/linear (m)	Standard strength clay pipe, Kgf/linear (m)
100	2980	1790
150	2980	1790
200	3270	2080
250	3570	2380
380	4320	2980
460	4910	3270
530	5730	3570
610	6550	3870
690	6990	4170
760	7440	4910
840	8190	5360
915	8930	5960

جدول (8-6) متطلبات الأبعاد والخواص الفيزيائية لأنابيب الخرسانة غير المسلحة طبقاً للمواصفات الأمريكية

Physical and dimensional requirements for non-reinforced concrete pipes (ASTM)

Internal diam., (mm)	Class 1		Class 2		Class 3	
	Minimum Thickness Of wall, (mm)	Minimum Strength, kN/linear m, (mm)	Minimum Thickness Of wall, (mm)	Minimum Strength, kN/linear m, three-edge bearing	Minimum Thickness Of wall, (mm)	Minimum Strength, kN/linear m, three-edge bearing
100	15.9	21.9	19.0	29.2	22.2	35.0
150	15.9	21.9	19.0	29.2	25.4	35.0
200	19.0	21.9	22.2	29.2	28.6	35.0
250	22.2	23.3	25.4	29.2	31.8	35.0
310	25.4	26.3	34.9	32.8	44.5	37.9
380	31.8	29.2	41.3	37.9	47.6	42.2
460	38.1	32.1	50.8	43.8	57.2	48.1
530	44.5	35.0	57.2	48.1	69.9	56.2
610	54.0	37.9	76.2	52.5	95.3	64.2

جدول (8-7) مقاومة الأحمال لأنابيب الخرسانة المسلحة طبقاً للمواصفات الأمريكية

Supporting strength of concrete pipe

	Standard strength Concrete sewer pipe, C14 Safety factor = 1.5				Extra strength Concrete sewer pipe, C14 Safety factor = 1.5			
Bedding class	D	C	B	A	D	C	B	A
Load factor	1.1	1.5	1.9	3.0	1.1	1.5	1.9	3.0
Internal diameter of pipe, (mm)	Supporting strength, (kN/m)							
150	11.68	16.06	20.44	32.12	21.90	29.20	36.50	58.40
200	13.14	18.98	23.36	37.96	21.90	29.20	36.50	58.40
250	14.60	20.44	26.28	40.88	21.90	29.20	36.50	58.40
310	16.06	21.90	27.74	43.80	23.36	32.12	40.88	65.70
380	17.52	24.82	32.12	51.10	29.20	40.88	51.10	80.30
460	20.44	29.20	36.50	58.40	35.04	48.18	61.32	96.36
530	23.36	32.12	40.88	64.24	40.88	55.48	71.54	113.88
610	42.82	35.04	43.80	70.08	42.34	58.40	74.46	116.80

جدول (8-8) الأحمال التصميمية لأنابيب الخرسانة المسلحة طبقاً للمواصفات الأمريكية

Design loads for reinforced concrete pipe (ASTM)

Design load, (N/m per mm diameter)		
Class	To produce a 0.25 mm crack	Ultimate
I	38.3	57.4
II	47.9	71.8
III	64.6	95.8
IV	95.8	144.0
V	144.0	180.0

5-8 الحمولة الهيدروستاتيكية:

في حال وجود مياه جوفية تصل لمنسوب محور الأنبوب يعطى الضغط المطبق بالعلاقة:

$$P_w = 9.81\ \gamma_w\ H_g$$

حيث:

P_w : الضغط الهيدروستاتيكي المطبق.

γ_w : الوزن النوعي للماء.

H_g : ارتفاع منسوب الماء فوق محور الأنبوب.

6-8 حساب الأحمال الخارجية الحية W_L :

يعطى الحمل الحي على الأنبوب الناتج عن مرور السيارات

$$W_L = \frac{P\ I_f}{L_1 \times L_2}$$

حيث:

P : حمل الدولاب ويقدر 72570 N.

I_f : عامل الصدم.

ويقدر بـ 1.1 من أجل $0.614\,m < H \le 0.9\,m$

ويقدر بـ 1.0 من أجل $H > 0.9\,m$

L_1 : عرض الحمل الموازي لاتجاه الحركة.

$$L_1 = 0.253 + 1.75\,H$$

L_2 : عرض الحمل عمودياً على اتجاه الحركة.

من أجل $0.6\,\text{m} < H < 0.76\,\text{m}$

$$L_2 = 0.51 + 1.75\,H$$

من أجل $H \geq 0.76\,\text{m}$

$$L_2 = \frac{13.31 + 1.75\,H}{8}$$

7-8 التحقق من عمق الردم المسموح:

يجب ألا تزيد الحمولات المطبقة على الأنبوب عن رتبة الحمولة المسموحة للأنبوب

$$\left(W_E + W_L\right) \leq W_G$$

حيث:

W_E : الحمولة الميتة.

W_L : الحمولة الحية.

W_G : الحمولة التي يتحملها الأنبوب.

8-8 التحقق من الانحراف:

يجب ألا تؤدي الأحمال الخارجية (الحية والميتة) إلى نشوء انحراف شاقولي طويل الأمد يزيد عن 5% أو الحد المسموح به للأنابيب أيهما أقل.

$$\frac{\Delta y}{D} \leq 5\%$$

حيث:

Δy : الانحراف الشاقولي المتوقع أو المحسوب.

D : قطر الأنبوب.

يمكن حساب $\frac{\Delta y}{D}$ من العلاقة:

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{\left(D_L\, W_C + W_L\right) K_X}{0.149\, P_S + 0.061\, E'}$$

أو من العلاقة:

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{(D_L\, W_C + W_L)\, K_X}{8\, S + 0.061\, E'}$$

حيث:

$P_S = \frac{1}{0.149}\frac{EI}{r^3}$ صلابة الانبوب وفق ASTM و AWWA

$S = \frac{EI}{D^3}$ صلابة الانبوب وفق BS 5480 و ISO

وبالتالي:

$$0.49\, P_S = \frac{EI}{r^3} = 8\frac{EI}{D^3} = 8\, S$$

حيث:

D_L: عامل تأخر الانحراف (بدون أبعاد) وهو يأخذ بعين الاعتبار تصلب التربة مع الزمن.

$D_L = 2$ من أجل الطمر غير العميق مع رص متوسط أو شديد للتربة.

$D_L = 1.5$ تربة طمر مع رص خفيف.

γ_S: الوزن النوعي للتربة.

K_S: عامل الانحراف ويتعلق بتأثير التربة على أساس الأنبوب.

$K_S = 0.083$: من أجل قاعدة منتظمة الشكل أسفل الأنبوب.

$K_S = 0.1$: من أجل ردم مباشر.

E: عامل المرونة لمادة الأنبوب.

E': عامل مرونة رد فعل التربة.

I: عزم عطالة المقطع العرضي.

تطبيق:

يتم ردم أنبوب صرف صحي صلب قطره D=600mm وصلابته S=5000 بتربة وزنها النوعي $\gamma_s = 2080 N/m^3$ والمطلوب: حساب الانحراف الناتج عن الحمولات الخارجية (الحية والميتة) من أجل أعماق ردم H(m) تتراوح من 1m إلى 15m بتزايد 1m واستنتاج عمق الردم الاعظمي المسموح به.

إذا علمت:

$K\mu' = 0.11$ $Ks = 0.13$

$I_f = 1$ $D_L = 1.5$

$P = 72570\ N$ $E' = 151800$

الحل:

نرتب الحسابات في الجدول الآتي:

dy/d	wL	L2	L1	wc	Cd	B	H
0.060	19246.03	1.88	2.003	2280.56	0.76	1.2	1
0.041	9202.39	2.10	3.753	4179.11	1.40	1.2	2
0.038	5684.20	2.32	5.503	5759.64	1.92	1.2	3
0.038	3941.12	2.54	7.253	7075.41	2.36	1.2	4
0.040	2923.17	2.76	9.003	8170.77	2.73	1.2	5
0.042	2267.56	2.98	10.753	9082.66	3.03	1.2	6
0.044	1816.65	3.20	12.503	9841.79	3.29	1.2	7
0.045	1491.49	3.41	14.253	10473.76	3.50	1.2	8
0.047	1248.39	3.63	16.003	10999.87	3.67	1.2	9
0.048	1061.41	3.85	17.753	11437.86	3.82	1.2	10
0.049	914.24	4.07	19.503	11802.47	3.94	1.2	11
0.050	796.17	4.29	21.253	12106.01	4.04	1.2	12
0.051	699.90	4.51	23.003	12358.70	4.13	1.2	13
0.051	620.32	4.73	24.753	12569.07	4.20	1.2	14
0.052	553.73	4.95	26.503	12744.20	4.25	1.2	15

ويكون عمق الردم المسموح به 12 m