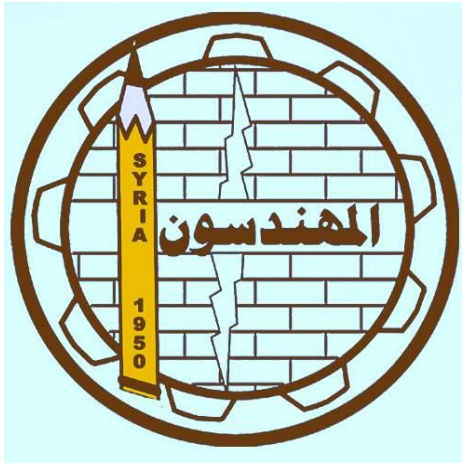


الجمهورية العربية السورية
نقابة المهندسين السوريين

حساب تيار الحمولة في الكابلات الكهربائية

الدكتور المهندس
محمد رسلان زهيرة
أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية جامعة تشرين
رئيس لجنة الطاقة المركزية

مقدمة

عند حساب تيار الحمولة في الكابلات يلجأ أغلب المهندسين إلى استخدام جداول موجودة في المراجع تعطي تيار الحمولة بدلالة مقطع الناقل بدون الأخذ بالحسبان أن القيم الواردة في هذه الجداول محسوبة في شروط محددة (قيمة المقاومة الحرارية النوعية للتربة، مكان مد الكابل، كيفية تأريض الغلاف المعدني للكابل...الخ)، وهذه الشروط لا تنطبق غالباً على الشروط الفعلية مما يؤدي إلى حدوث إجهادات على الكابلات تسبب في تلفها أو تقادمها.

كذلك لا تأخذ أغلب هذه المراجع حالات مد الكابل في ظروف خاصة، مثلاً تشكل طبقة جافة حول الكابل المطمور في التربة، أو حساب تيار الحمولة للكابلات الممددة في أقنية أرضية أو في أنابيب بلاستيكية، وفي الواقع لاحظنا حدوث أعطال كبيرة جداً على الكابلات (الممددة في هذه الظروف) مثل حدوث حريق نتيجة ارتفاع درجة حرارة الكابلات في الأقنية أو انهيار الكابلات خلال فترة أشهر.

نقاط الدراسة:

-مقدمة.
-حساب تيار الحمولة في الكابلات الممددة في الارض أو في الهواء.
-حساب تيار الحمولة في الكابلات الممددة في أقنية.
-حساب تيار الحمولة في الكابلات الممددة في أنابيب بلاستيكية ضمن الأرض.
-الخلاصة.

المواصفات العالمية في مجال الكابلات

عدة أجزاء-IEC 60287: حساب تيار الحمولة في الكابلات

IEC 60228: نواقل الكابلات

IEC 60502-1: عناصر كابلات التوتر المنخفض

IEC 60502-2: عناصر كابلات التوتر المتوسط

IEC 60540: اختبارات العازلية

اختبارات الكابلات: IEC 60840 X_LPE حتى U_m=170 kV

IEC 62067 X_LPE حتى U_m=550 kV

حساب تيار الحمولة في الكابلات الكهربائية

يجب ألا تزيد درجة الحرارة عن الدرجة المسموحة في عناصر الكابل في حالة العمل الطبيعي.

يجب ألا تزيد قيمة تيار القصر عن القيمة المسموحة:

$$I_{Th} < I_{Thz}$$

يجب ألا يتجاوز هبوط التوتر القيمة المسموحة له.

تتعلق درجة الحرارة المسموحة في حالة العمل الطبيعي بـ:

-نوع المادة العازلة،

- الضياعات، وتتعلق بـ:

مقاومة الناقل، كيفية تأريض الغلاف المعدني للكابل، كيفية تمديد الكابلات.

-درجة حرارة الوسط الخارجي ، – مكان تمديد الكابلات (هواء، أرض، قناة ، أنبوب).

-تجاور الكابلات، – إعاقة انتشار الحرارة ، –تسخين خارجي، –التردد،
–كيفية تأريض النقطة النجمية.

حساب تيار الحمولة في الكابلات الكهربائية

يجب ألا تزيد درجة الحرارة عن الدرجة المسموحة في عناصر الكابل في حالة العمل الطبيعي.

يجب ألا تزيد قيمة تيار القصر عن القيمة المسموحة:

$$I_{Th} < I_{Thz}$$

يجب ألا يتجاوز هبوط التوتر القيمة المسموحة له.

تتعلق درجة الحرارة المسموحة في حالة القصر بـ:

- توتر العمل. – استطاعة القطع. –زمن القطع.
- مكان القصر (قريب أم بعيد عن المولد) .
- القوى الديناميكية الناتجة عن القصر. – كيفية تثبيت الكابل.
- نوع الحمل (صناعي أو منزلي).

حساب تيار الحمولة في الكابلات الكهربائية

يجب ألا تزيد درجة الحرارة عن الدرجة المسموحة في عناصر الكابل في حالة العمل الطبيعي.

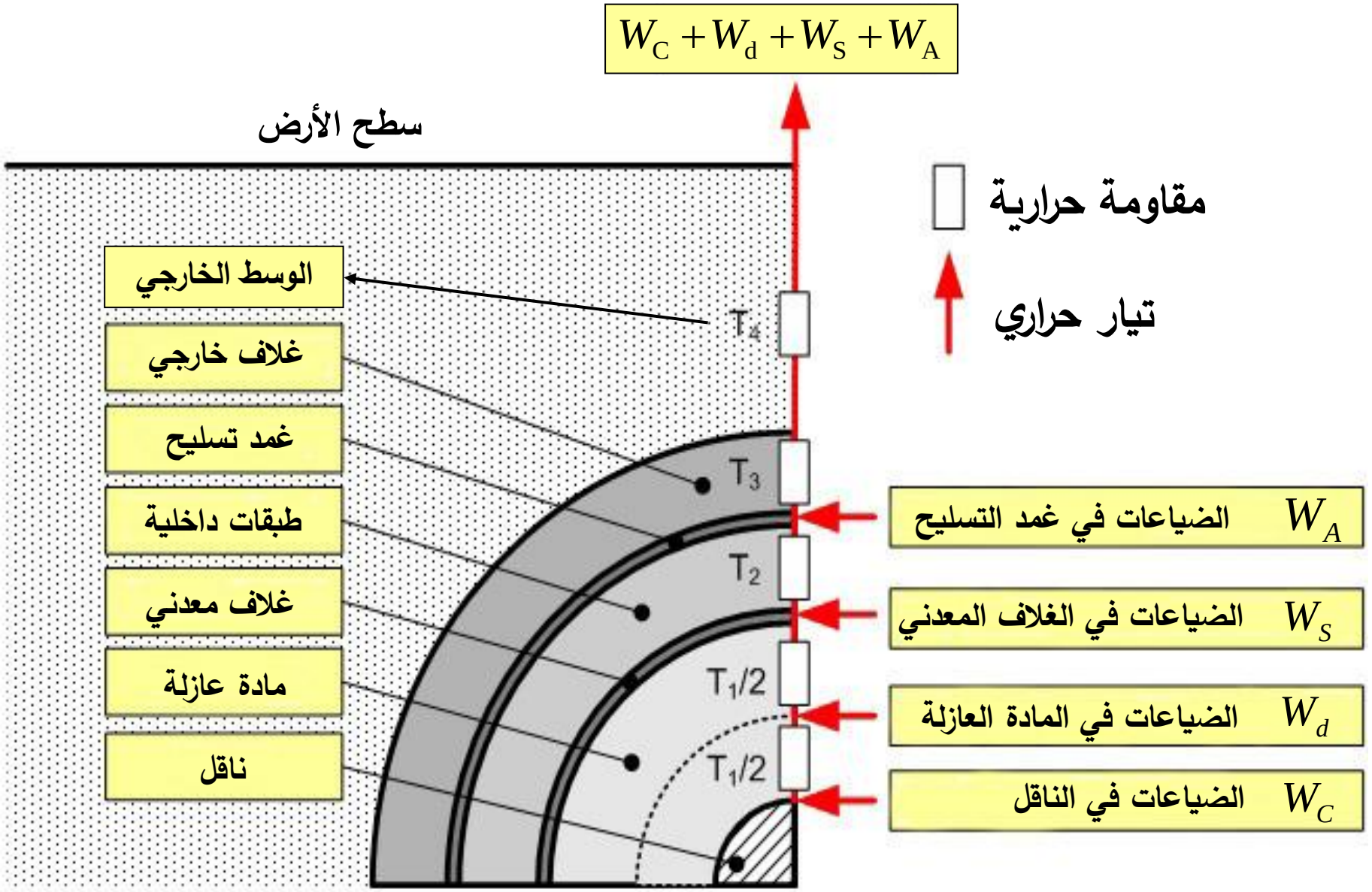
يجب ألا تزيد قيمة تيار القصر عن القيمة المسموحة:

$$I_{Th} < I_{Thz}$$

يجب ألا يتجاوز هبوط التوتر القيمة المسموحة له.

- المقاومة الأومية .
- التحريضية والسعة.
- الطول.

حساب تيار الحمولة في الكابلات الممددة في الأرض



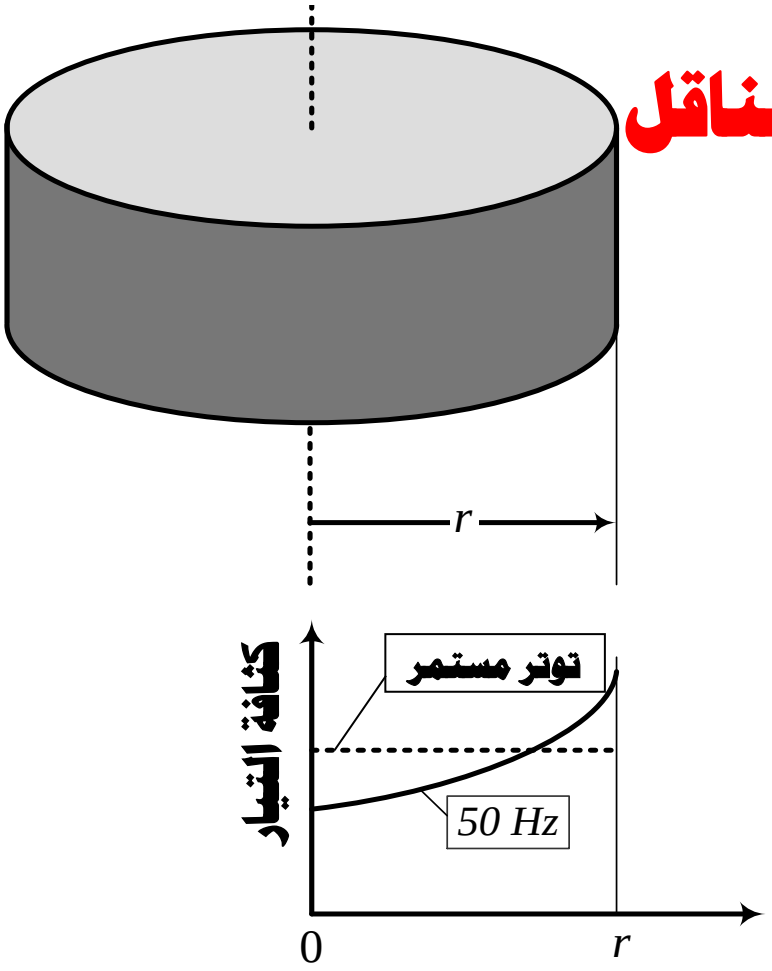
$$\vartheta_c = \vartheta_0 + W_c \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) + W_d \cdot \left(\frac{T_1}{2} + T_2 + T_3 + T_4\right) + W_s \cdot (T_2 + T_3 + T_4) + W_A \cdot (T_3 + T_4)$$

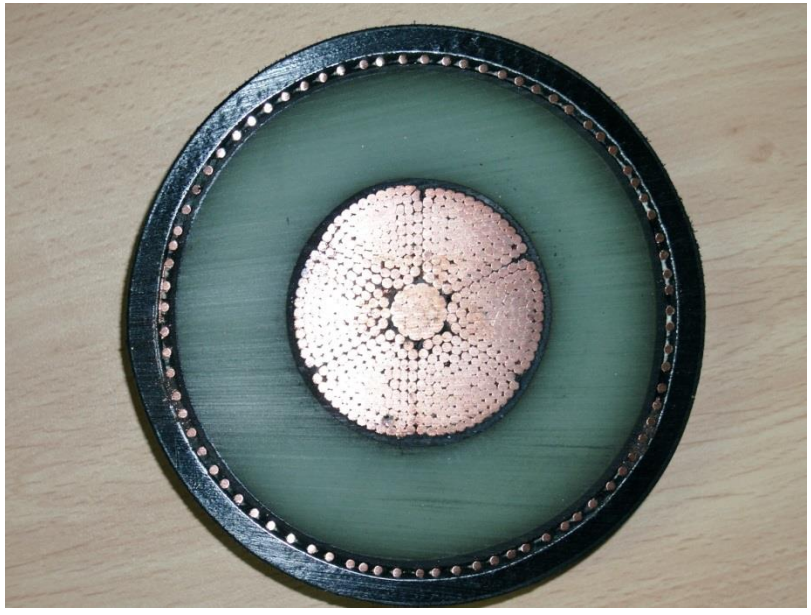
استناداً لما سبق يتم حساب تيار الحمولة وفق العلاقة التالية:

$$\Rightarrow I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d\left(\frac{T_1}{2} + T_2 + T_3 + T_4\right)}{R_W\left[\left(T_1 + (1+\lambda_1)T_2\right) + (1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4)\right]}}$$

نلاحظ أن تيار الحمولة يتناسب عكساً مع المقاومة الأومية للناقل ومع الضياعات في الغلاف المعدني وغمد التسليح. أيضاً يتناسب تيار الحمولة عكساً مع المقاومة الحرارية للتربة T_4.

لتخفيض قيمة المقاومة الأومية للناقل يفضل استخدام النحاس النقي، وعند المقاطع الكبيرة للنواقل يفضا استخدام نواقل *Milliken* للتخلص من الظاهرة القشرية

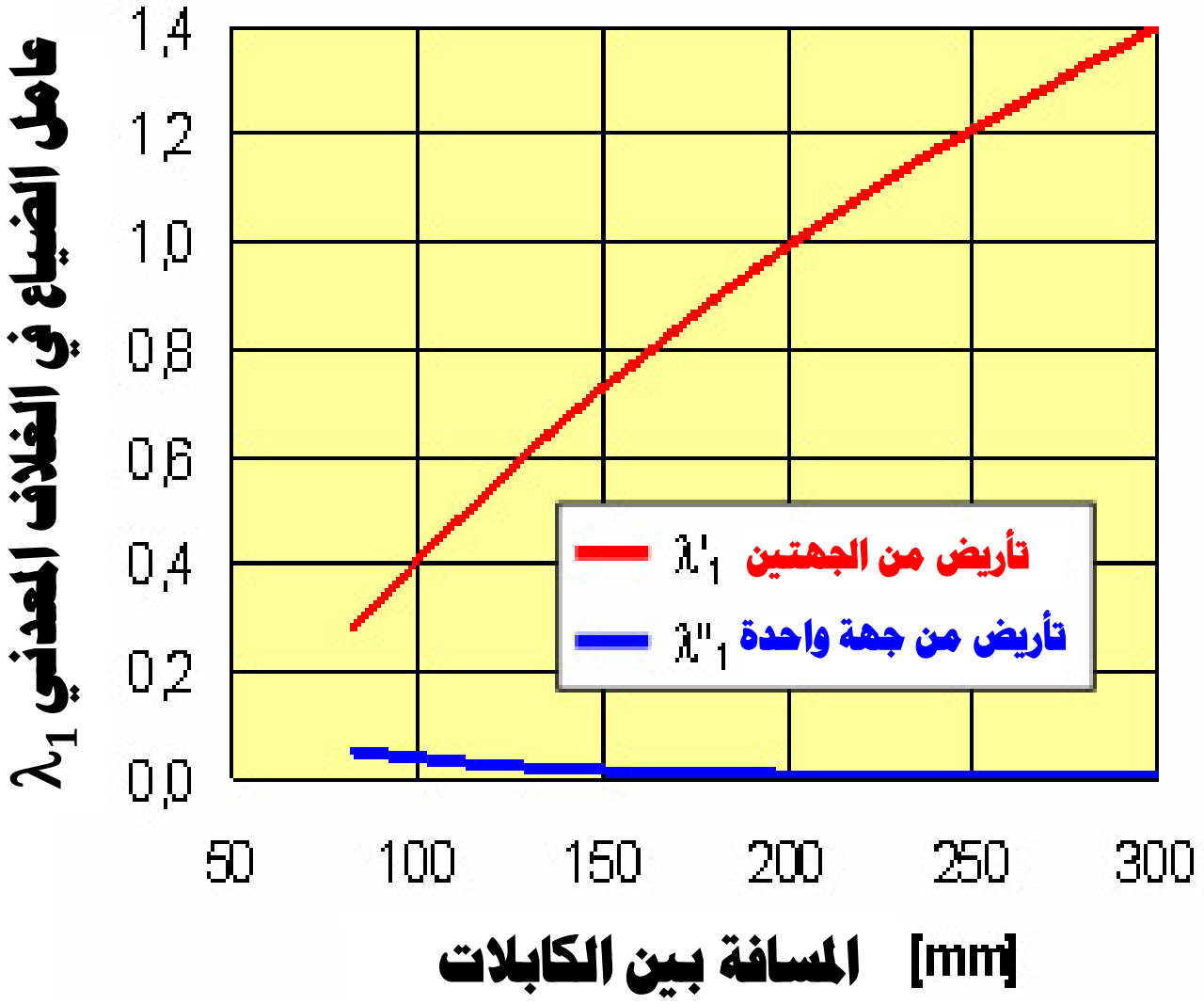




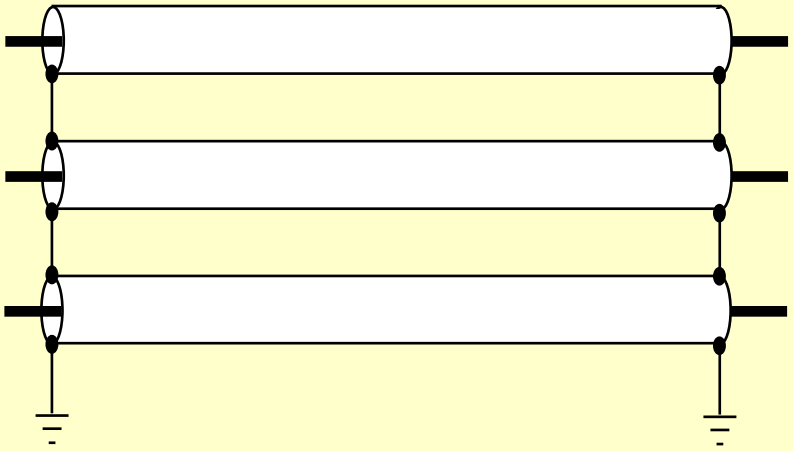
نواقل *Milliken*

تفصل القطاعات عن بعضها البعض بورق فحمي قليل الناقلية، وبالتالي عملياً لا توجد تيارات بين القطاعات. في نواقل *Milliken* المثالية يعزل كل سلك بمفرده.

الضياعات في الغلاف المعدني وفي غمد التسليح وعلاقتها بطريقة تأريض الغلاف



حالات تأريض الغلاف المعدني للكابلات المفردة



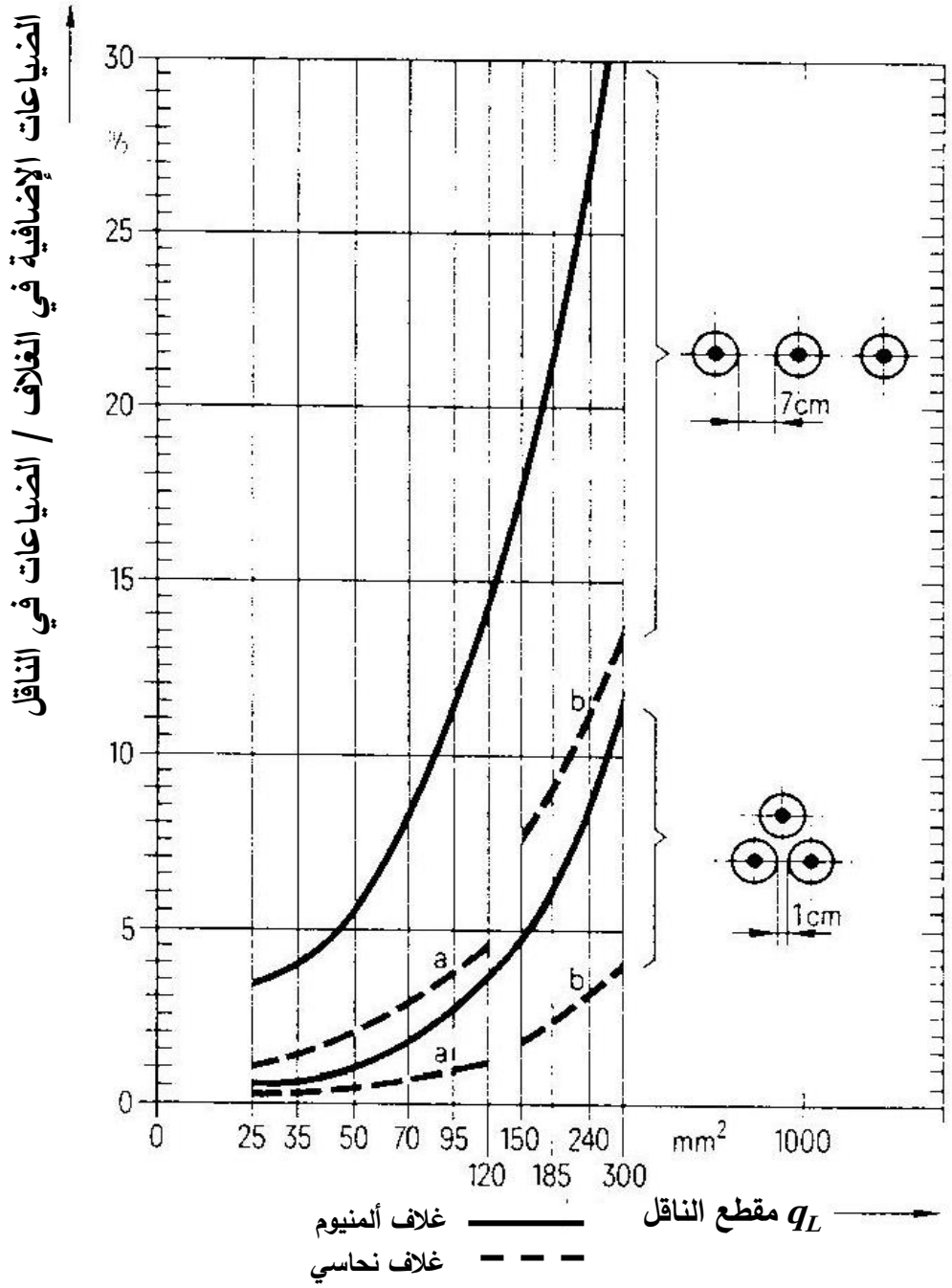
تأريض الغلاف من الجهتين

المحاسن ...

* لا يوجد توتر تماس في نهاية الكابل.
* بسيط وكلفة قليلة.

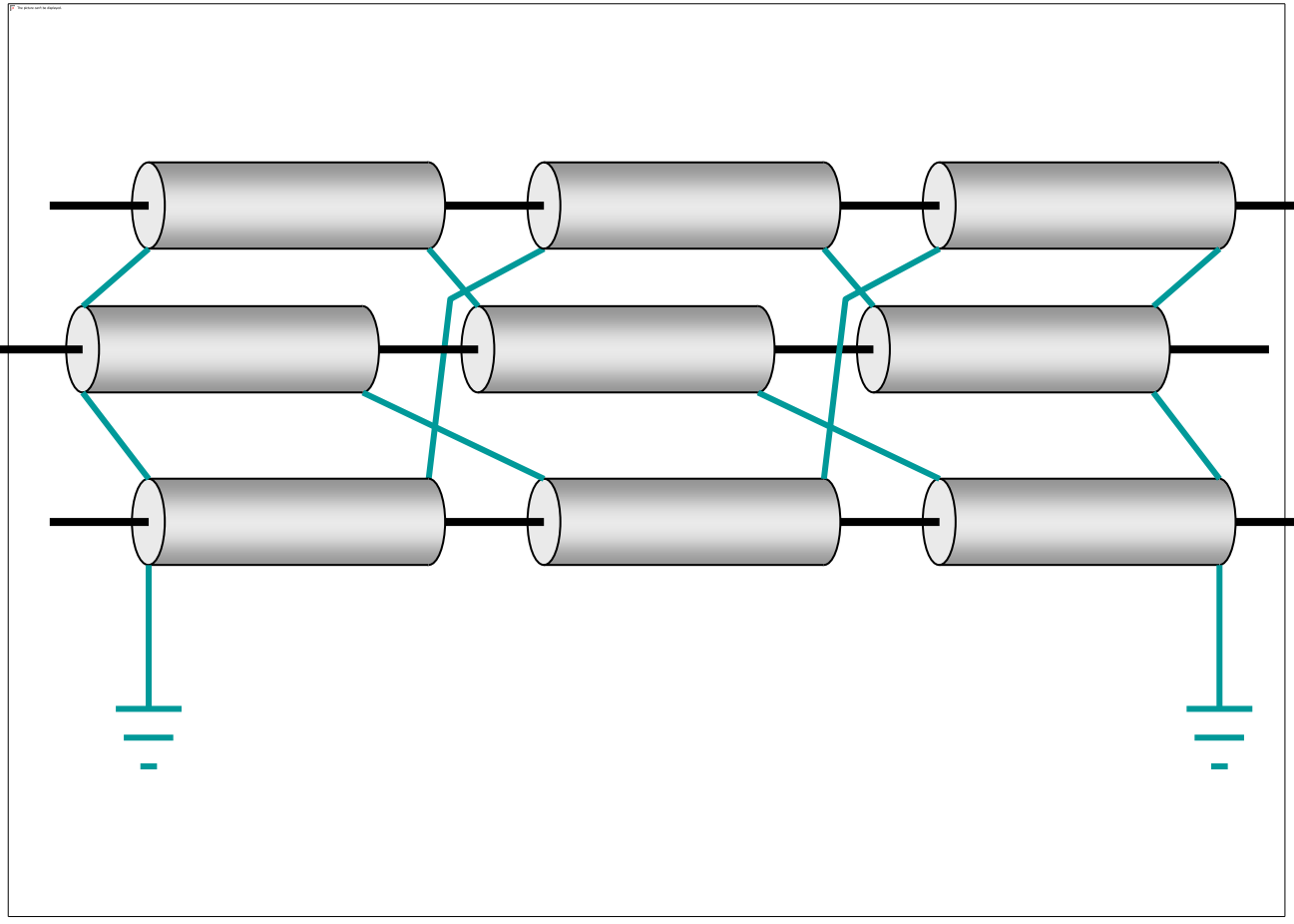
المساوئ ...

* تيارات دائرية في الغلاف.
* ضياعات إضافية في الغلاف وبالتالي تيار حمولة أقل.
* تقليل قيمة عامل تخفيض الغلاف المعدني للتشويش الخارجي.

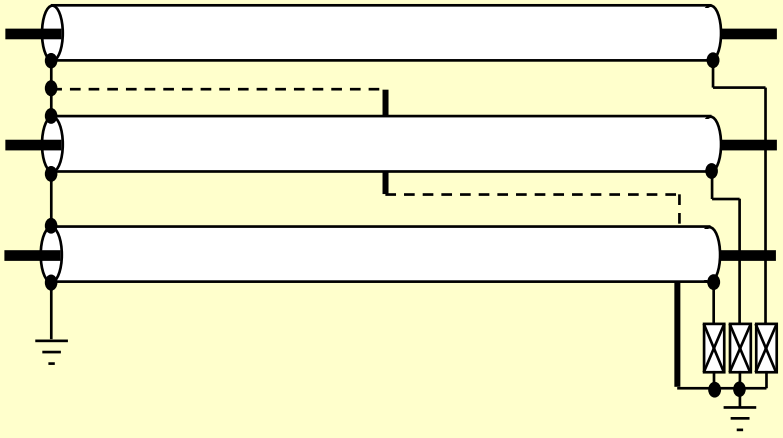


لتخفيض الضياع في حال تأريض الغلاف المعدني من الجهتين تمدد الكابلات بجانب بعضها البعض بمسافة لا تزيد عن *70 mm* أو على شكل مثلث مع ترك مسافة *1 cm* للتهوية

في حال كانت المسافة طويلة، وللتخفيض من قيمة مقاومة الغلاف يتم استخدام التأريض التصالبي بين الأطوار كما هو الحال في أطوار الشبكة. (يتم التبديل في علب الوصل)



تأريض الغلاف من جهة واحدة



يستخدم في حالة الأطوال الكبيرة.

المحاسن ...

* لا تتشكل حلقات مغلقة.
* لا تسري تيارات دائرية في الغلاف.
* ضياعات قليلة في الغلاف وبالتالي تيار حمولة كبير.

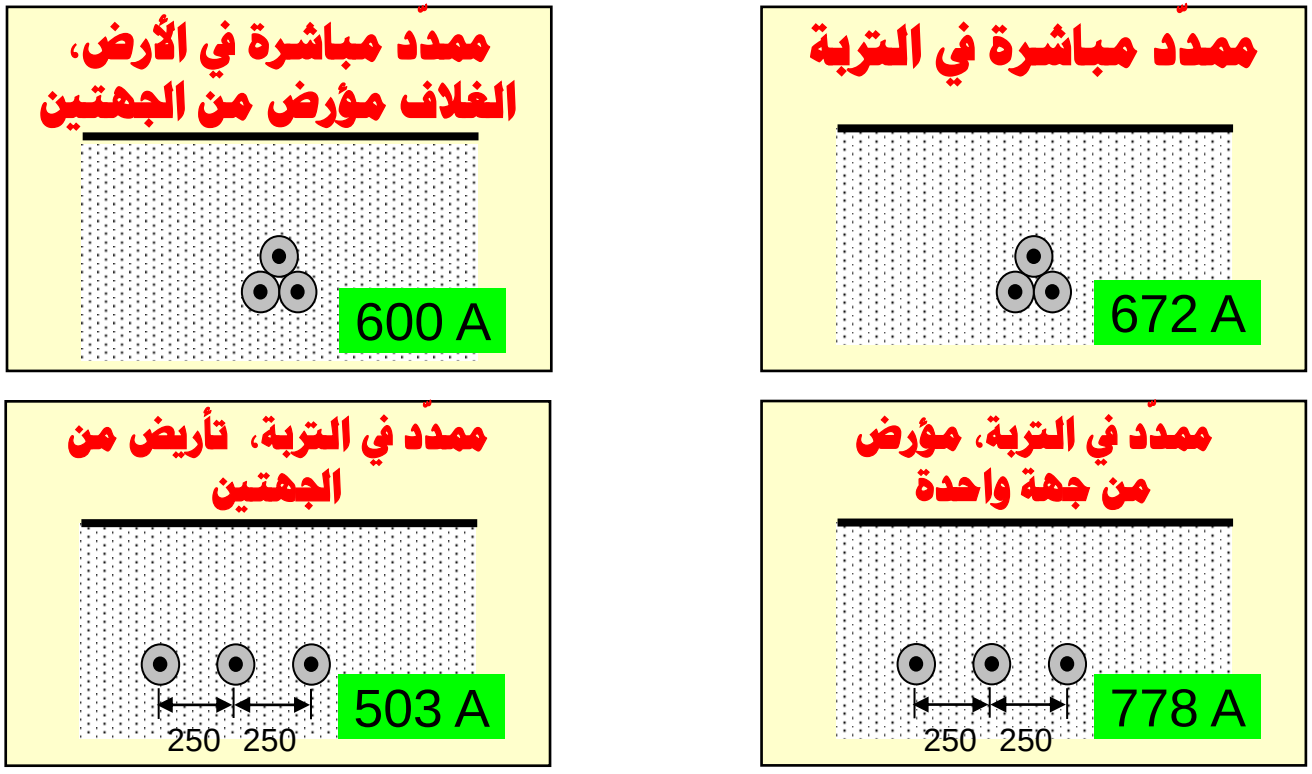
المساوئ ...

* تتحرض توترات كبيرة في نهاية الغلاف المفتوحة.
* لا بد من استخدام مفرغات توتر في نهاية الغلاف غير المؤرض.
* تمديد ناقل تأريض إضافي.
* كلفة كبيرة.

مثال:

تحميل الكابل نموذج *2XS(FL)2Y 1x630RM/50 64/110 kV*

من أجل تأريض للغلاف من جهة واحدة أو من جهتين.



درجة حرارة التربة *20°C*، المقاومة النوعية الحرارية

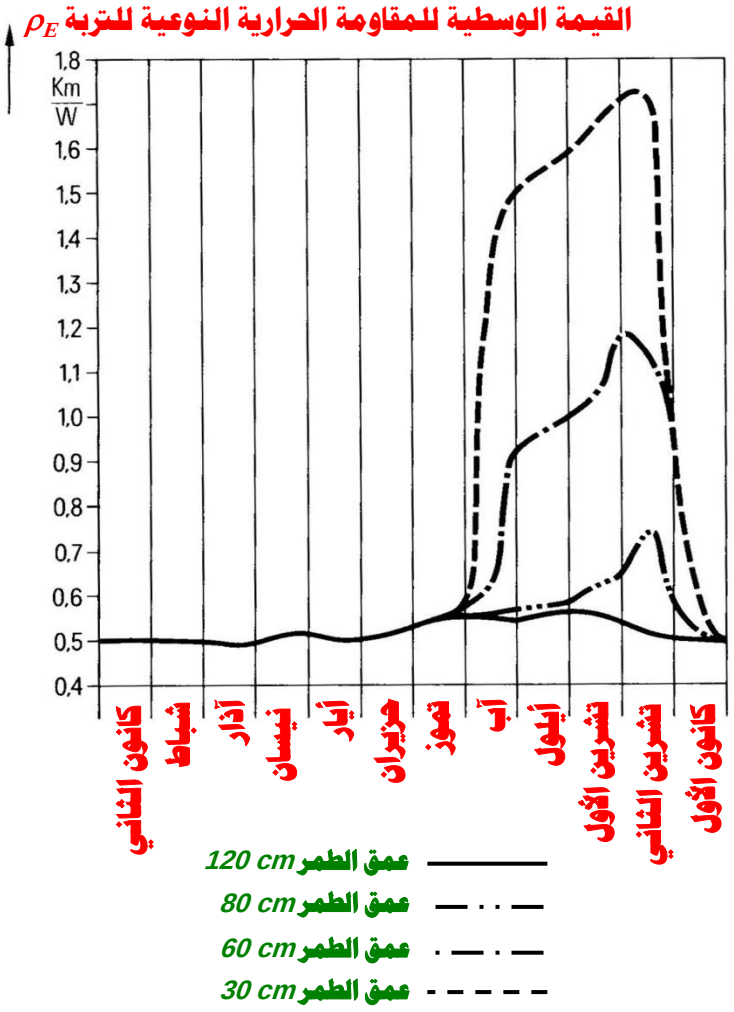
للتربة *1.0/2.5 km/W*، عمق الطمر *1200 mm*.

حساب تيار الحمولة عند تمديد كابل في التربة بظروف مختلفة عن IEC 60287-1

تحدد المواصفة القياسية IEC 60287-1 عمق الطمر للكابلات في التربة بين 80 cm و 120 cm.
عند طمر الكابل على عمق أقل من 80 cm فإن الظروف الجوية (شدة الإشعاع الشمسي، المطر، ...) تؤثر على المقاومة الحرارية النوعية للتربة، حيث بينت الدراسات أن قيمة المقاومة الحرارية النوعية للتربة تختلف بين الصيف والشتاء، وتكون قيمة هذا الإختلاف كبيرة كلما قل عمق الطمر.

العلاقة بين عمق الطمر والمقاومة الحرارية للتربة

عمق طمر قليل (أقل من 80 cm)



العلاقة بين المقاومة الحرارية للتربة وعمق طمر الكابلات خلال أشهر العام .

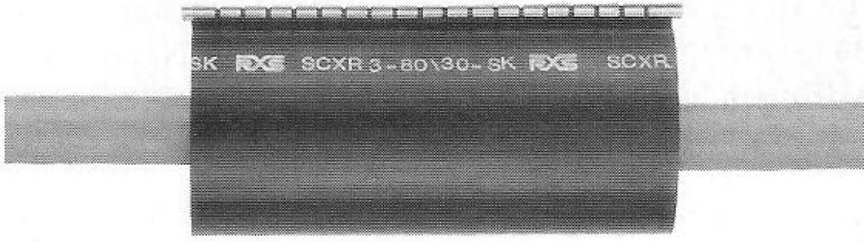
نلاحظ من الشكل أن المقاومة الحرارية للتربة تزداد كلما قل عمق الطمر، وبالتالي تيار الحمولة يقل.

ويمكن عند مد الكابلات المفردة تمديد وطمر كل ناقل بمفرده، أو تمديد الأطوار الثلاثة من ثلاث بكرات بنفس الوقت، ويفضّل ذلك عند توفر مساحة كبيرة في موقع العمل. ويتعلق عرض خندق الطمر للكابلات الأرضية بعمق الطمر وفق الجدول التالي:

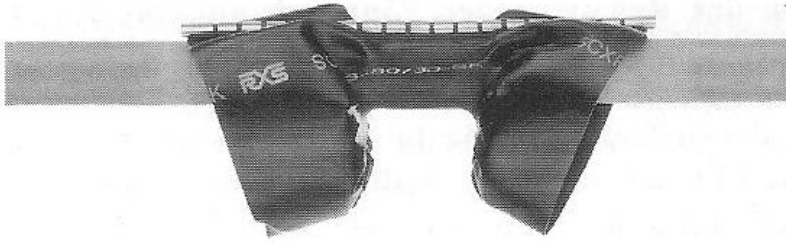
عمق الخندق	< 0.7 m	(0.7-0.9) m	(0.9-1) m	1-1.25 m
عرض الخندق	0.3 m	0.4 m	0.5 m	0.6 m

ترميم خدش على الغلاف الخارجي.

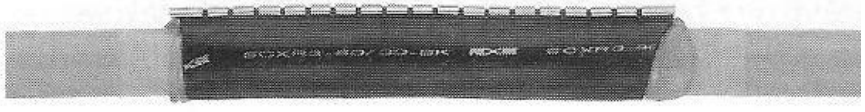
a) تخرش الغلاف



b) إدخال الوصل

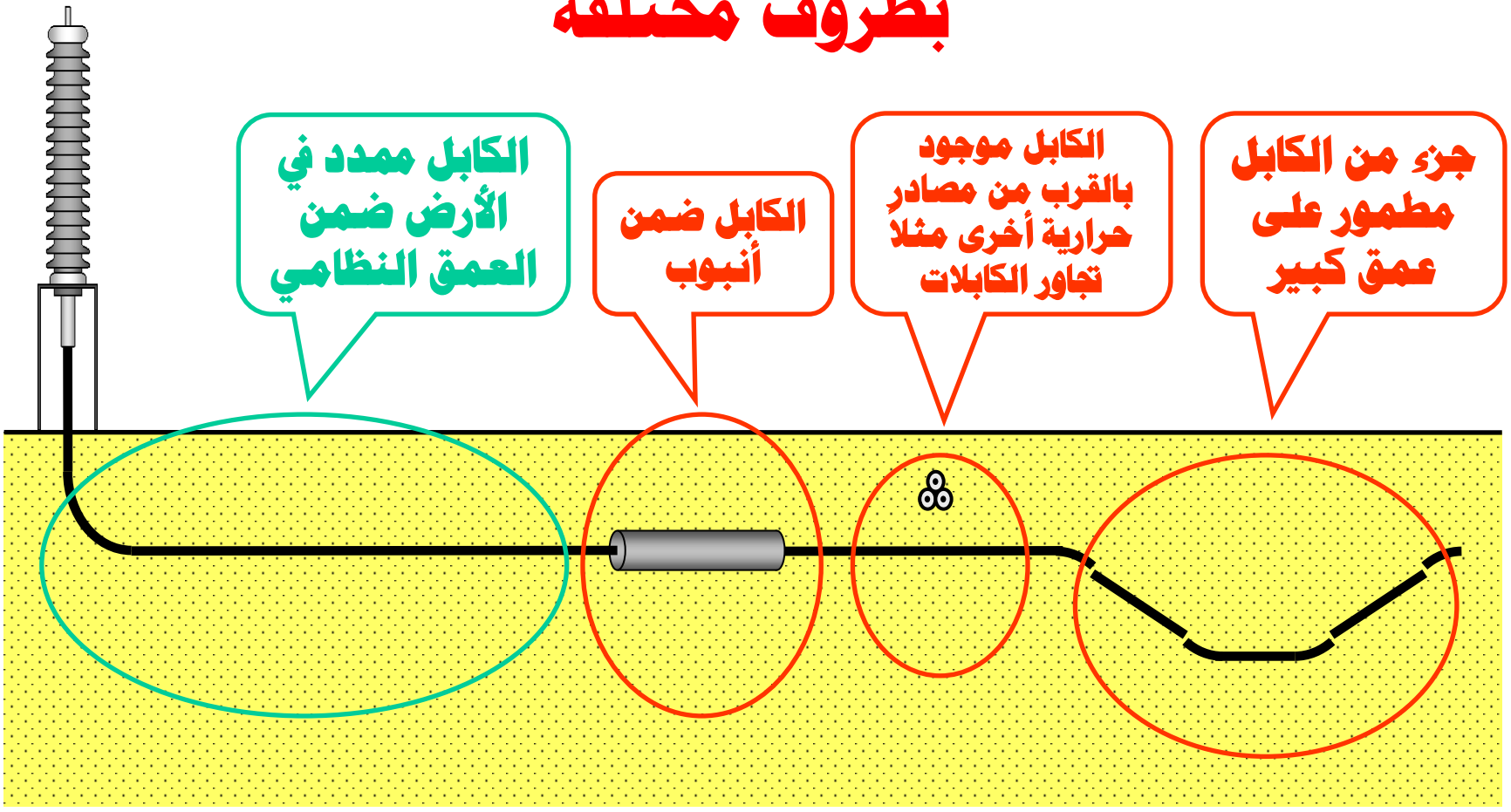


c) لصق الوصلة



d) وضع علامة على الوصلة

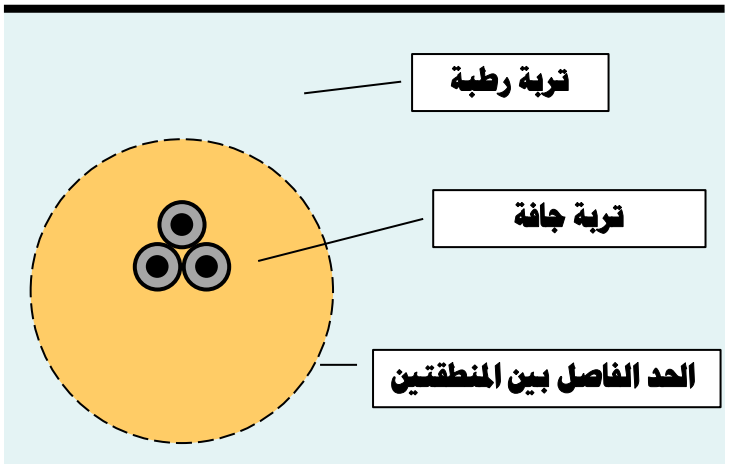
حساب تيار الحمولة عند تمديد كابل في التربة بظروف مختلفة

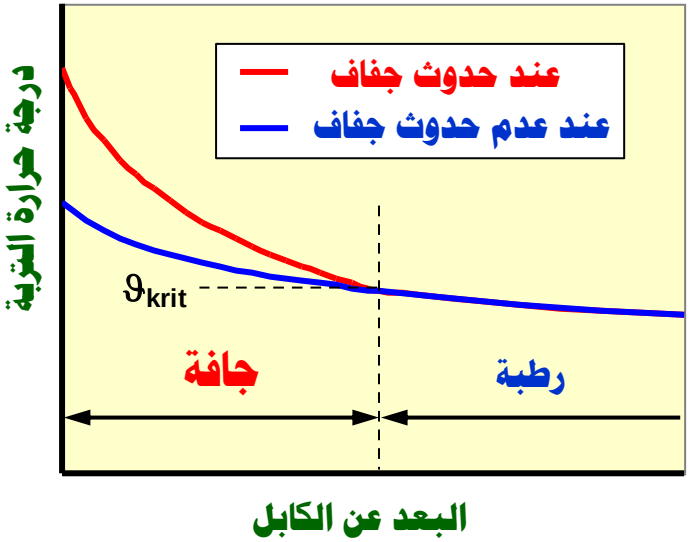


من مبدأ السلسلة: قوة السلسلة من قوة أضعف حلقة فيها.

يتحدد تيار الحمولة الكلي المسموح من الاجهادات الحرارية في المنطقة الأضعف

خفض قيمة تيار الحمولة نتيجة تشكل منطقة جافة حول الكابل





❖ يمكن حدوث جفاف للتربة عندما تزيد درجة حرارة الغلاف الخارجي للكابل عن درجة حرارة محددة، حسب نوع التربة (غالباً *40° C*)، في حين أن درجة حرارة الغلاف الخارجي للكابلات لمعزولة بـ *XLPE* يمكن أن تصل إلى *75 °C* بعامل تحميل يساوي *1* في الحسابات العادية، وبالتالي توجد خطورة كبيرة لحدوث المنطقة الجافة.

❖ التربة الجافة لها مقاومة حرارية نوعية أكبر من التربة الرطبة.

❖ القيم المفروضة للحسابات في *VDE 0276* هي:

(*1.0 km/W* للأرض الرطبة) و (*2.5 km/W* للأرض الجافة)

ملاحظة: القيمة المفروضة للتربة الرطبة في *VDE* أقل منها في *IEC* لذلك نرى اختلاف في جداول تيار الحمولة بدلالة المقطع.

❖ ارتفاع درجة حرارة الكابل عند نفس الضياعات ⟵ يجب خفض تيار الحمولة.

النتيجة:

❖ عند حساب تيار الحمولة يجب أخذ تشكل المنطقة الجافة بالحسبان.

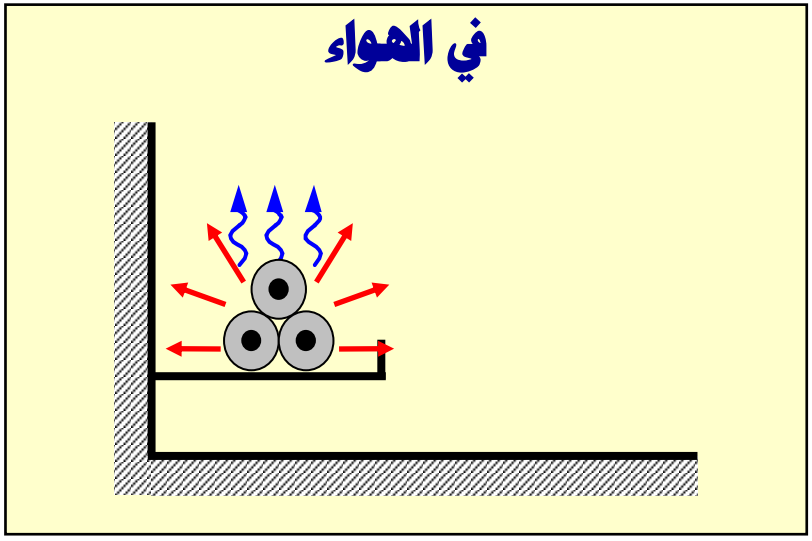
❖ لتحاشي تشكل المنطقة الجافة حول الكابل نستخدم تربة ردم (من تربة محسنة) تدرجها الحبيبي جيد، أو اسمنت ورمل بنسبة *1/30*.

عوامل تصحيح تيار الحمولة حسب المقاومة الحرارية النوعية للتربة

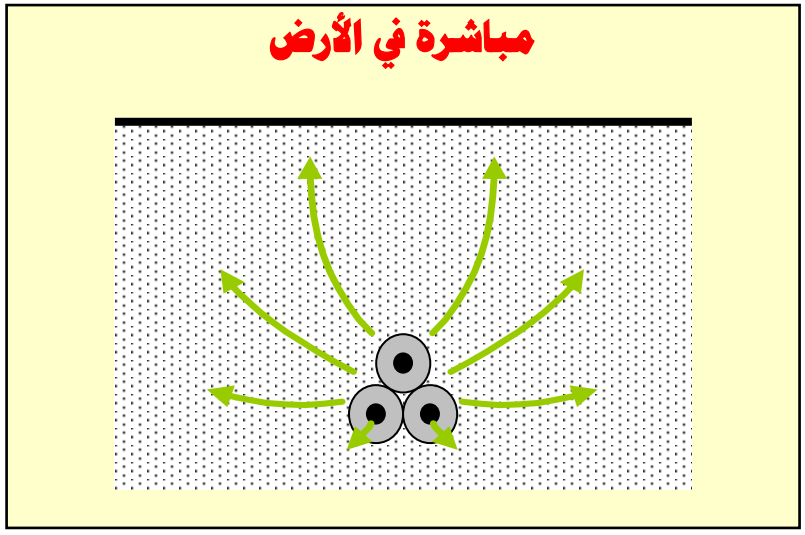
تسبب المقاومة الحرارية النوعية للتربة في قلة كمية الحرارة المطروحة من الكابل إلى الوسط الخارجي. وتحدد المواصفة القياسية الدولية *IEC 60287* هذه المقاومة بـ *1.2 °C.m/W* ويبين الجدول التالي عامل إعادة التقييم حسب قيمة المقاومة الحرارية النوعية في حال كون التربة حول الكابل متجانسة، وعدم تشكل طبقات جافة حول الكابل:

المقاومة الحرارية النوعية °C.m/W	0.8	0.9	1	1.2	1.5	2	2.5
معامل إعادة التصحيح	1.17	1.12	1.07	1	0.91	0.8	0.73

حساب تيار الحمولة في الكابلات الهوائية



انتقال الحرارة **بالحمل والإشعاع**



انتقال الحرارة **بالحمل**

نلاحظ من الشكل أن طرح الحرارة من الكابل إلى الوسط الخارجي يتم في الكابلات الهوائية بالحمل والإشعاع مقارنة مع طرح الحرارة بالحمل فقط في الكابلات الممددة في الأرض. لذلك يكون تيار الحمولة للكابلات الممددة في الهواء أكبر منها في الكابلات الممدة في الأرض.

العوامل المؤثرة على انتقال الحرارة في الكابلات الهوائية

ضغط الهواء: تقل كمية الحرارة المنتقلة بالحَمل كلما انخفض ضغط الهواء الخارجي. ويمكن إهمال أثر ضغط الهواء على تيار الحمولة، أو يكون هذا الأثر قليلاً عند تمديد الكابلات حتى ارتفاع لا يزيد عن $2000\ m$ عن سطح البحر.

درجة حرارة الوسط الخارجي: تتغير المقاومة الحرارية للهواء بشكل طفيف عندما تزداد درجة حرارة الوسط الخارجي، وتكون درجة حرارة الناقل ثابتة. وبشكل عامل يعطى عامل تصحيح تيار الحمولة وفق درجة حرارة الوسط الخارجي بالعلاقة :

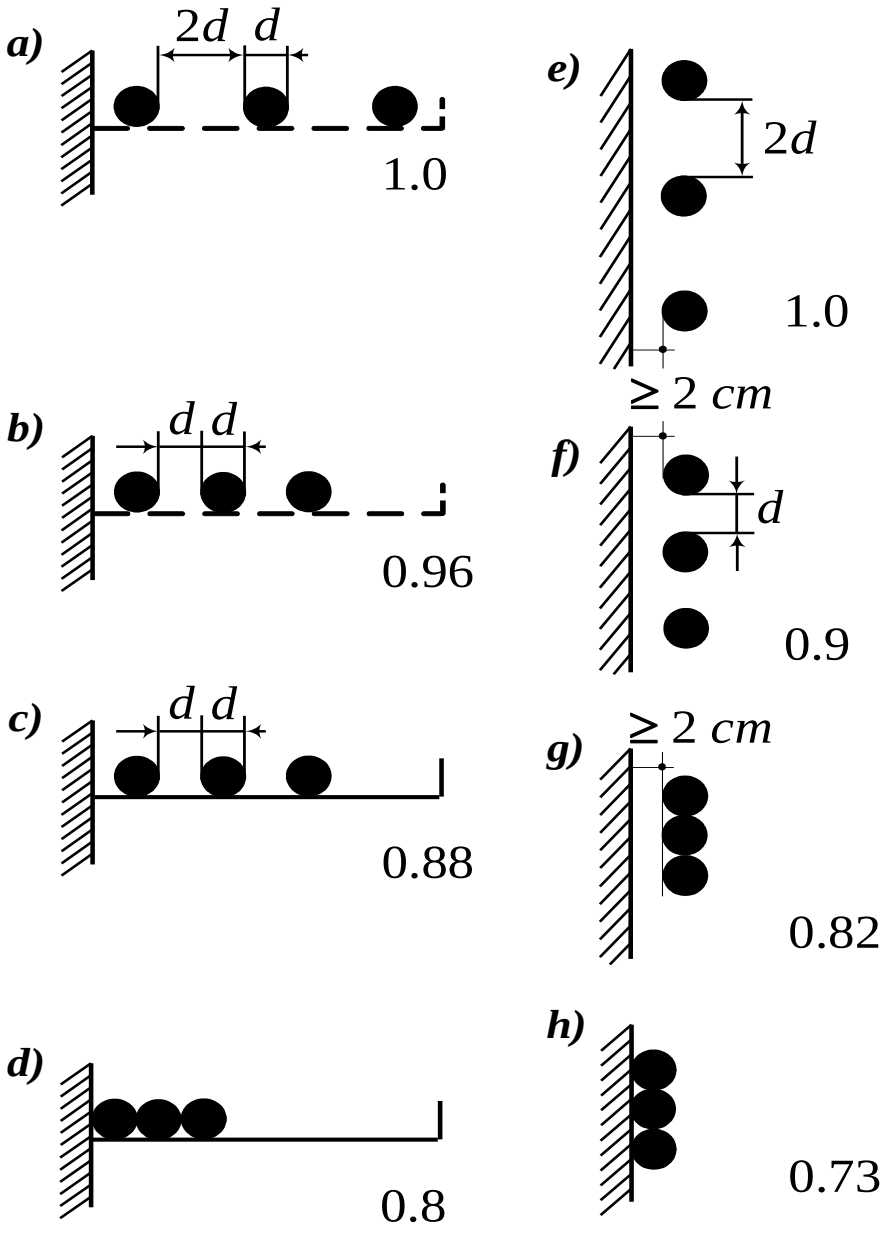
$$f = \sqrt{\frac{\theta_{le} - \theta_0}{\theta_{le} - 30^{\circ}C}}$$

شدة الإشعاع الشمسي : تسبب أشعة الشمس الساقطة على كابل ممدد في الهواء الطلق إلى زيادة سخونته بالمقدار:

$$\Delta\theta_S = \alpha_0 \cdot d \cdot E \cdot R_4$$

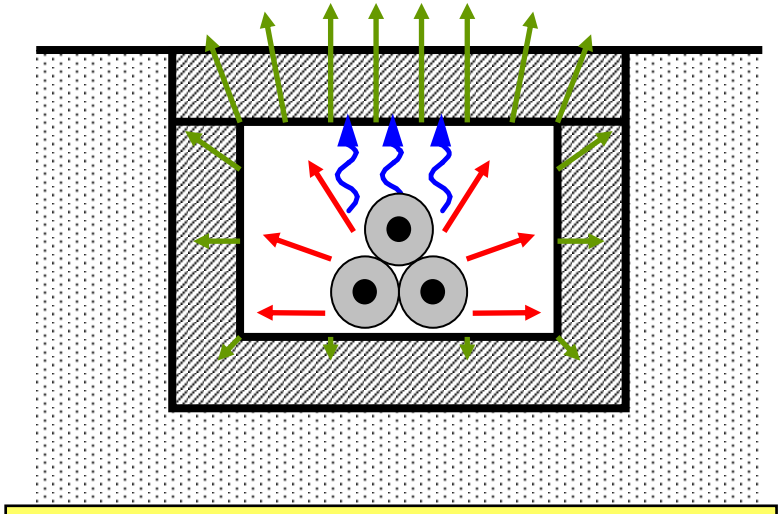
α_o – عامل الامتصاص لمادة الغلاف الخارجي، d – قطر الناقل، E – شدة الإشعاع الشمسي، وفي حال كانت القيمة غير معروفة تؤخذ $E = 1\ K.W/m$، R_4- المقاومة الحرارية للهواء مع أخذ عوامل الإعاقة بعين الاعتبار.

طريقة تمديد الكابلات على حوامل معدنية مهواة أو غير مهواة



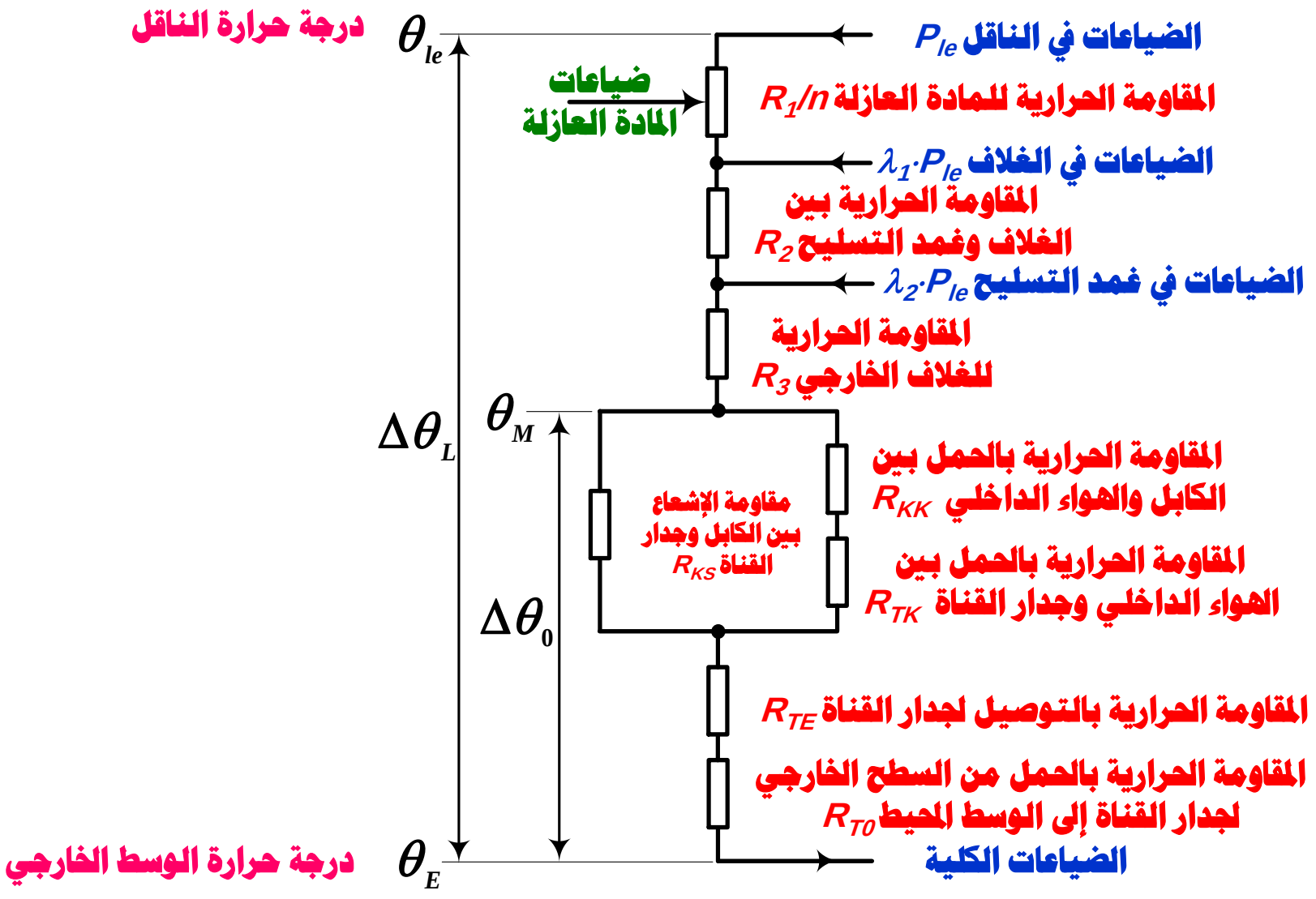
حساب تيار الحمولة في كابل ممدد ضمن قناة

- ❖ انتقال حرارة بالحمل بين غلاف الكابل والهواء داخل القناة.
- ❖ انتقال حرارة بالحمل بين الهواء داخل القناة وغلاف القناة.
- ❖ انتقال حرارة بالإشعاع من غلاف الكابل إلى غلاف القناة.



آلية انتقال الحرارة
في كابل ممدد ضمن قناة

الدارة الحرارية لكابل ممدد ضمن قناة (القناة غير مهواة) .



المقاومة الحرارية بالحمل بين الكابل والهواء الداخلي R_{KK}:

وهي قيمة صغيرة بالمقارنة مع المقاومة R_{TK}
وبالتالي يمكن إهمالها في الحالات التالية:

- من أجل كابل مفرد $d < 45\ mm$.
- من أجل كابل ثلاثي $d < 90\ mm$.
- عندما يكون محيط القناة $2(b_T + h_T) < 1\ m$.

المقاومة الحرارية بالحمل بين الهواء الداخلي وجدار القناة R_{TK} :

تعطى بالعلاقة :

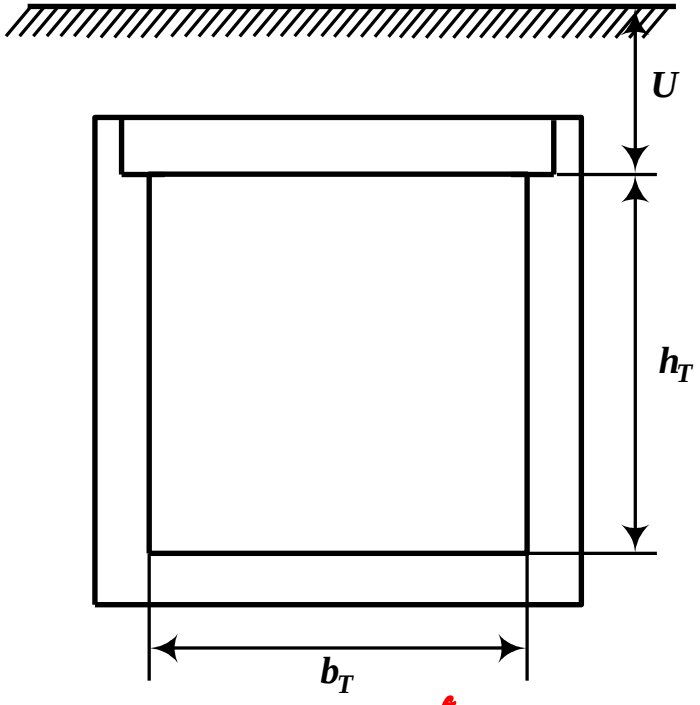
$$R_{TK} = \frac{1}{2(b_T + h_T)\cdot \alpha_i} \left[\frac{K \cdot m}{W}\right]$$

حيث :

b_T و h_T - أبعاد القناة.

$-\alpha_i$ عامل انتقال الحرارة بالحمل (القيمة الوسطى للجدران وللغطاء وأرضية القناة)، وتعطى قيمته حسب /DIN 4701/ مساوية

$\alpha_i = 7.7\ W/K.m^2$.



$-h_T$ ارتفاع القناة، $[m]$.

$-b_T$ عرض القناة، $[m]$.

$-u$ سماكة الغطاء، $[m]$.

قناة أرضية بغطاء .

مقاومة الإشعاع الحراري بين سطح الكابل والجدار الداخلي للقناة R_{KS}:

بما أن جدار القناة أكبر بكثير من سطح الكابل يمكن اعتبار انتقال الحرارة هذا كحالة انتقال الحرارة لكابل ممدد في الهواء، وبالتالي يمكن اعتبار عامل الإصدار $\varepsilon_0 = 0.95$، وتعطى قيمة هذه المقاومة بالعلاقة :

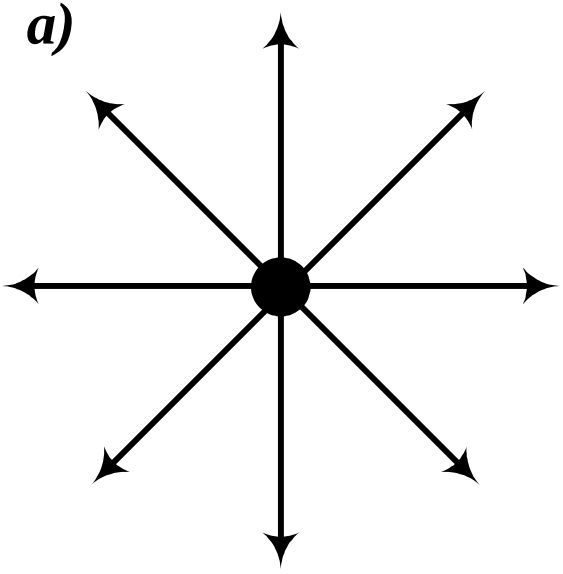
$$R_{KS} = \frac{1}{\pi \cdot d \cdot f_S \cdot \alpha_S}$$

حيث :

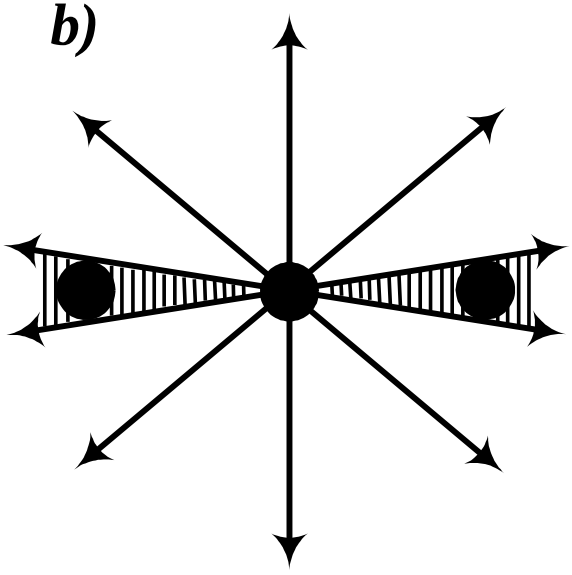
d – قطر الكابل.

f_S – عامل تصحيح انتقال الحرارة بالإشعاع، يؤخذ من الشكل التالي.

α_S – عامل انتقال الحرارة بالإشعاع.



$f_s = 1$

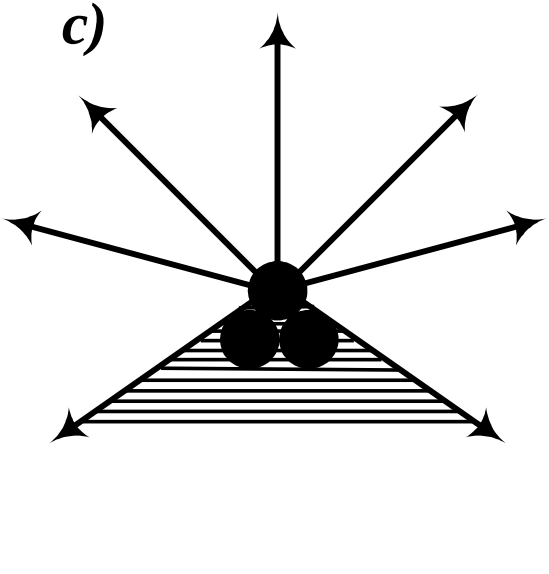


للكابل الخارجي

$$f_s = 1 - arc\ \tan(d/2a)/180^\circ$$

للكابل الأوسط

$$f_s = 1 - 2arc\ \tan(d/2a)/180^\circ$$



$f_s = 2/3$

انتقال الحرارة بالإشعاع

يعطى عامل انتقال الحرارة بالإشعاع α_s بالعلاقة:

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon_0 \cdot C_s \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\theta_1 - \theta_2}$$

حيث :

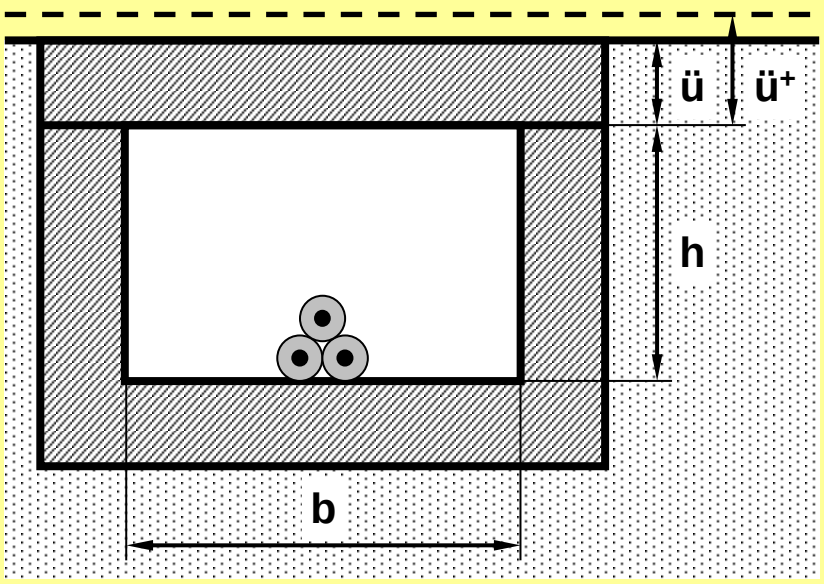
- θ_1 ، θ_2 – درجة الحرارة للكابل وجدار القناة.
- C_s – عامل إصدار الجسم الأسود، يساوي: $C_s = 5.77 \ \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
- T_1 ، T_2 – درجتا الحرارة المطلقتين للكابل وجدار القناة.

حساب المقاومة الحرارية للقناة

وتشمل المقاومة الحرارية بالتوصيل لجدار القناة، وتتعلق قيمتها بأبعاد القناة والمقاومة النوعية للتربة المحيطة. ولسهولة الحساب تؤخذ قيمة المقاومة النوعية لمواد البناء المستخدمة في القناة مساوية لـ ρ_E . للمحافظة على قيمة هذه المقاومة ثابتة على طول مسار الكابل يجب أن تكون سماكة جدار القناة ثابتة $\pm 10\%$ على طول القناة.

بالإضافة إلى قيمة مقاومة الحمل من جدار القناة الخارجي إلى الوسط المحيط R_{TO}.

حساب المقاومة الحرارية للقناة



$$T_{Kan} = R_{TE} + R_{TO} = \frac{\rho_E}{\frac{4}{\pi}\cdot\left\{1+\ln\left[\frac{\frac{h}{ü^+}+1}{\sqrt{2}}+\sqrt{\left(\frac{\frac{h}{ü^+}+1}{\sqrt{2}}\right)^2-\frac{1}{2}}\right]\right\}+\frac{b}{ü^+}}$$

لسهولة الحساب يتم اعتبار المقاومة الحرارية من سطح الغلاف إلى الوسط المحيط طبقة وهمية سماكتها δ والمقاومة الحرارية لها ρ_E:

$$\delta = \frac{1}{\alpha_a \cdot \rho_E} \quad , \quad \alpha_a = 20\frac{W}{K\cdot m^2}$$

وبالتالي تمت زيادة سماكة غلاف القناة بهذه القيمة.

$$ü^+ = ü + \frac{1}{\alpha_a \cdot \rho_E}$$

Ü - سماكة الغطاء

ü⁺ - الأبعاد الوهمية لسطح التبادل الحراري لغطاء القناة.

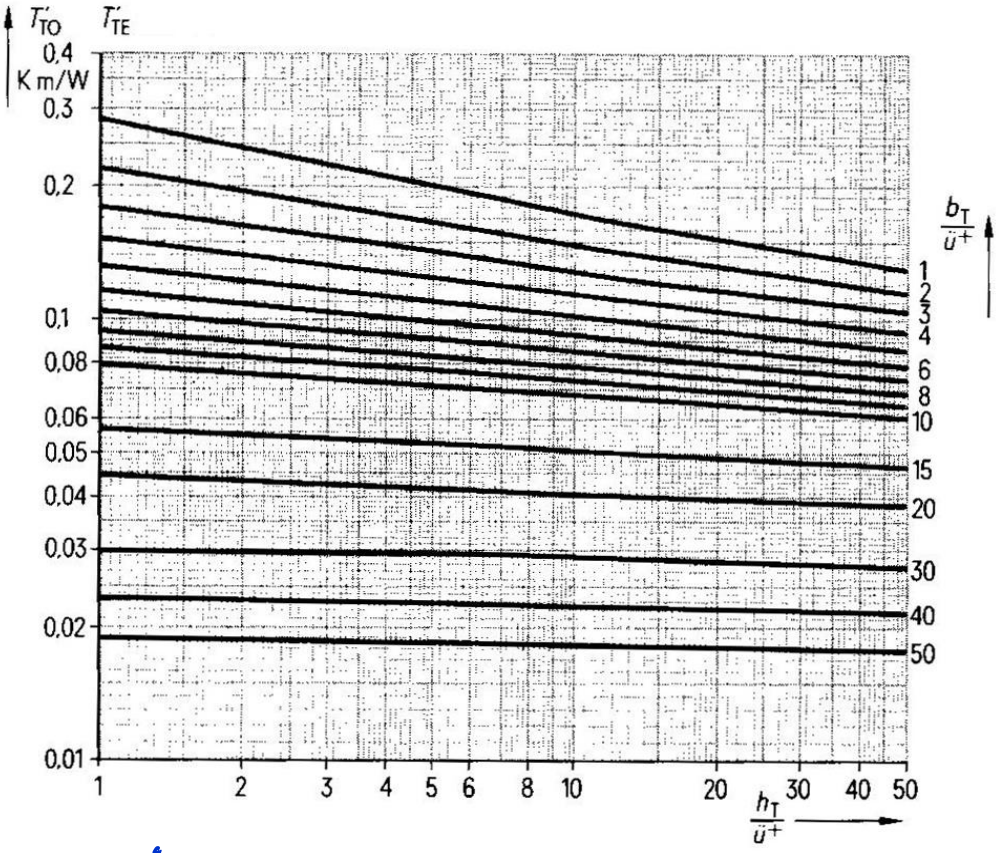
α_a - عامل التمدد الحراري لسطح الأرض.

ρ_E - المقاومة الحرارية النوعية للتربة.

b, h - ارتفاع القناة وعرضها الداخلي.

حساب قيمة المقاومة الحرارية للقناة من أجل مقاومة حرارية نوعية ρ_E=1 K.m/W

المقاومة الحرارية R_{TE} و R_{TO}



المقاومات الحرارية R_{TE} و R_{TO} للكابل وعلاقتها بأبعاد القناة

(b_T , h_T , u+) من أجل ρ_E = 1 K.m/W .

ومن أجل قيم مختلفة للمقاومة الحرارية النوعية للتربة يتم ضرب القيمة المأخوذة للمقاومة الحرارية من هذه المنحنيات بالعامل:

$$\frac{\rho_E}{1K \cdot m/W}$$

حساب تيار الحمولة في قناة غير مهواة حسب VDE

الخطوات:

1. تحديد مقطع الناقل بشكل أولي (أكبر من 30 % إلى 50 %) من مقطع ناقل لكابل ممدد في الهواء.
2. حساب الضياعات الكلية للكابلات الممددة في القناة عند تيار الحمولة المطلوب، والمجموع يعطي الضياعات في القناة.
3. حساب درجة حرارة الهواء داخل القناة بالأخذ بالحسبان الضياعات الكلية والعوامل الأخرى التي تسبب زيادة درجة حرارة القناة.
4. حساب تيار الحمولة حسب VDE (الكابل ممدد في الهواء)بأخذ عوامل التجاور وارتفاع درجة حرارة الهواء داخل القناة بالحسبان.
5. نكرر الحسابات مرة ثانية إذا كان مقطع الناقل غير كافٍ.

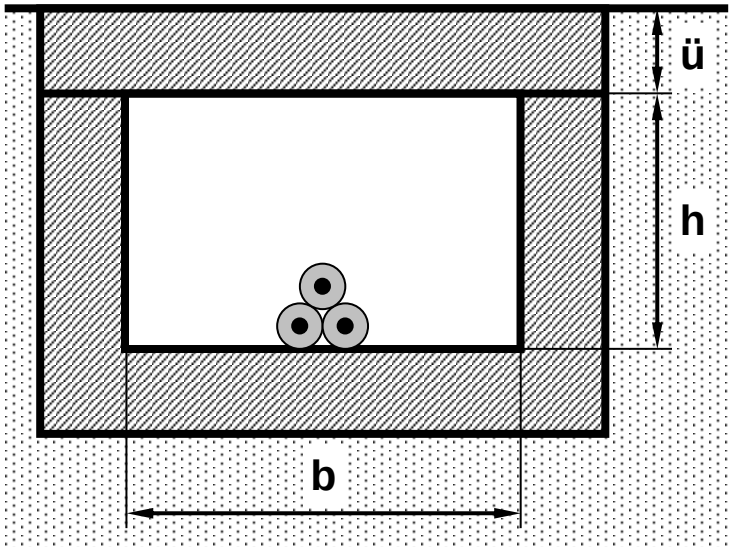
المطلوب تحديده:

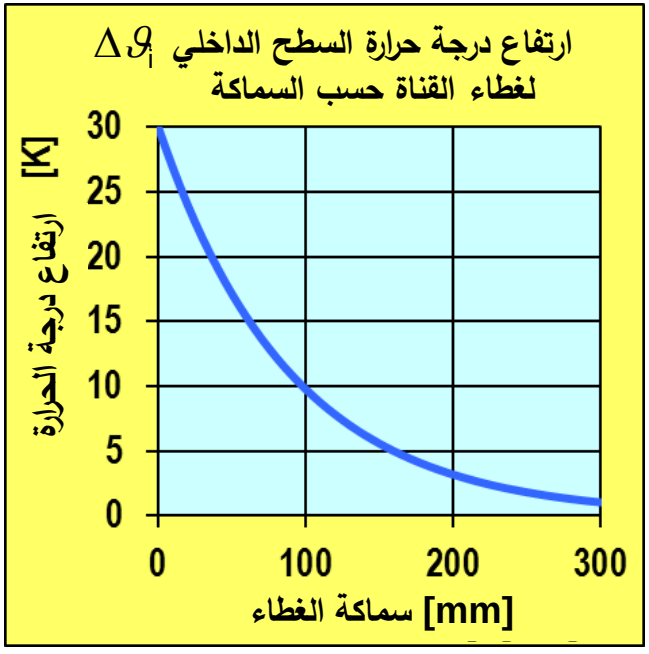
- تيار الحمولة – مقاومة الناقل – ضياعات العازلية للكابلات الممددة في القناة.
- حساب المقاومة الحرارية للقناة حسب أبعاد القناة، والمقاومة الحرارية النوعية للأرض المحيطة.
- درجة حرارة الهواء داخل القناة بدون أخذ الضياعات الناتجة عن الكابلات بالحسبان .

حساب درجة حرارة القناة دون اخذ الضياعات بالحسبان

في حال عدم أخذ الضياعات الناتجة عن الكابلات بالحسبان (عدم تحميل الكابلات) درجة حرارة الهواء داخل القناة تتعلق بدرجة حرارة التربة المحيطة θ_E، (درجة حرارة جدران القناة وأرضيتها تساوي درجة حرارة التربة المحيطة في منتصف عمق القناة، وهذه القيمة تتغير مع الزمن لذلك تؤخذ أعلى قيمة متوقعة). ودرجة حرارة سطح الغطاء الداخلي للقناة، تكون أكبر من درجة حرارة الجدران والأرضية بسبب الطاقة الحرارية المكتسبة من أشعة الشمس، والتي بدورها تتعلق بسماكة الغطاء، وتعطى درجة حرارة الهواء داخل القناة بالعلاقة:

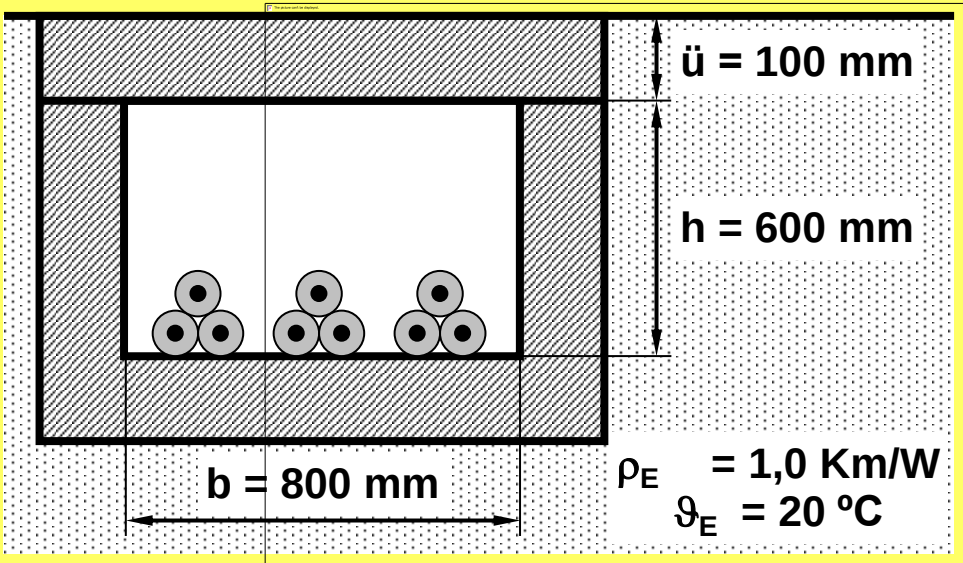
$$\vartheta_{KE} = \vartheta_E + \frac{\Delta\vartheta_i}{2\left(\frac{h}{b}+1\right)}$$





- ϑ_{KE} - درجة حرارة الهواء داخل القناة بدون أخذ الضياعات بالحسبان.
- ϑ_E - درجة حرارة التربة المحيطة بدون أخذ الضياعات بالحسبان.
- $\Delta\vartheta_i$ - ارتفاع درجة حرارة السطح الداخلي لغطاء القناة نتيجة أشعة الشمس ودرجة حرارة الوسط الخارجي (أشهر الصيف). حسب المنحني البياني
- b , h - عرض وارتفاع القناة.

مثال: حساب تيار الحمولة لكابلات ضمن قناة



المشكلة المطروحة:

- ثلاث انظمة كابلات ضمن خندق.
- نوع الكابل: *N2XS2Y* – التوتر *20 kV*.
- تيار الحمولة: *600* A ، لكل نظام عامل التحميل (*m=1*).
- الكابلات ممددة بشكل مثلث على أرض القناة.

المطلوب:

كيفية حساب مقطع الناقل المطلوب؟

- يبلغ عامل التجاور حسب *VDE* لثلاث أنظمة ممددة في الهواء (على سطح الأرض) $f_H = 0.94$.
- عند تمديد هذه الأنظمة في الهواء يكون المقطع *300 mm²* كافٍ ($I_Z = 724\,A \times 0.94 = 681\,A$).
- تم استخدام كابل نوع *N2XS2Y* ، مقطع الناقل *400 mm²* (*12/20 kV*) (مقطع الناقل أكبر بـ *30%* - *50%*).
- مقاومة الناقل عند درجة الحرارة *90°C*: $R'_W = 0.0683\,\Omega/km$ (حساب أو من الجدول).
- الضياعات في كل نظام من أجل تيار حمولة *600 A*: $W'_{1sys} = 3 \times 600^2\,A^2 \times 0.0683\,\Omega/km = 73.8\,W/m$
- الضياعات الكلية في القناة: $W'_{Kan} = 3 \times 73.8\,W/m = 221.3\,W/m$

المقاومة الحرارية للقناة: $T_{Kan}' = 0.1101\ Km/W \quad ü^{+} = 150\ mm$

درجة حرارة الهواء داخل القناة دون أخذ الضياعات بالحسبان.

$$\vartheta_{KE} = 20\,°C + \frac{10\ K}{2 \cdot \left(\frac{600\ mm}{800\ mm} + 1\right)} = 22{,}9\,°C \qquad (\text{mit } \Delta\vartheta_i = 10\ K)$$

درجة حرارة الهواء داخل القناة مع أخذ الضياعات بالحسبان:

$$\vartheta_K = 22{,}9\ ºC + 221{,}3\ W/m \cdot 0{,}1101\ Km/W = 47{,}3\ ºC$$

عامل أثر درجة الحرارة:

$f_\vartheta = 0{,}85$ (VDE: 45 ºC ⇨ 0,87; 50 ºC ⇨ 0,82)

اختبار المقطع المختار:

الكابل ممدد في الهواء :

$I_r = 829\ A$ - N2XS2Y 1x400 RM/35 12/20 kV

$I_z = 829\ A \cdot 0{,}94 \cdot 0{,}85 = \underline{662\ A} > 600\ A$

مقطع الناقل المقترح مناسب

ملاحظة :

تيار الحمولة للكابلات الممدة في القناة أقل من 662 A حيث تصبح درجة حرارة الهواء في القناة أكبر عند تيار حمولة أكبر من 600 A، وبالتالي عامل درجة الحرارة يكون أصغر.

ولد الكابلات داخل قناة نتبع الخطوات التالية :

- نقوم بتحديد قطر كل كابل على حده بشكل تقريبي ، ويكون هذا القطر أكبر بـ 30 % إلى 50 % من قطر الكابل الممدد في الهواء من أجل نفس الحمولة . ومن أجل تيارات كبيرة نستخدم عدة كابلات .

- نضع تصميماً أولياً للقناة نبين عليه الارتفاع والعرض وعدد حوامل الكابلات وكيفية المد .

- المسافة بين رفوف الكابلات في القناة يجب ألا تقل عن 300 mm حتى نستطيع مد الكابلات بشكل مريح. وكذلك فإن المسافة بين الكابل وجدار القناة يجب ألا تقل عن 2d (d قطر الكابل) .

- بشكل عام يجب أن يكون $I_b < I_r . f_H . f_\theta$ ، حيث:

I_r- تيار الحمولة التصميمي. f_H- عامل التجاور. f_θ- عامل درجة الحرارة.

عند عدم تحقق هذه العلاقة يجب زيادة مقطع النواقل للكابلات أو زيادة أبعاد القناة، وإذا كان ذلك غير ممكن يجب تهوية القناة قسرياً.

حساب تيار الحمولة عند مد الكابل في قناة مهواة:

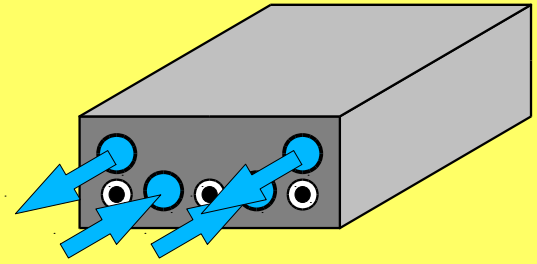
عندما يكون طرح الحرارة عبر الغلاف الخارجي للكابلات الممددة في قناة إلى الوسط المحيط قليلة (انتقال الحرارة بالحمل الحر) سترتفع درجة حرارة النواقل والأغلفة الخارجية للكابلات إلى قيمة أكبر من درجة الحرارة المسموحة، وبالتالي لا بد من استخدام وسائط تبريد (هواء-ماء) للانتقال من طرح الحرارة بالحمل الحر إلى طرحها بالحمل القسري (كمية الحرارة المطروحة أكبر).

في حال عدم وجود إمكانية أخرى لخفض درجة حرارة الكابلات داخل القناة مثل زيادة أبعاد القناة، أو تخفيض عدد الكابلات في القناة.

طرق التبريد المتبعة

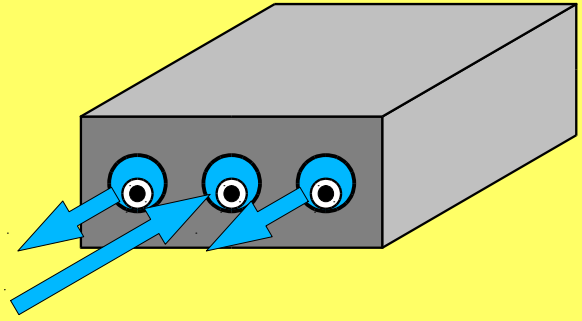
المبدأ: طرح درجة الحرارة المكتسبة في وسائط التبريد

التبريد بالماء بشكل غير مباشر



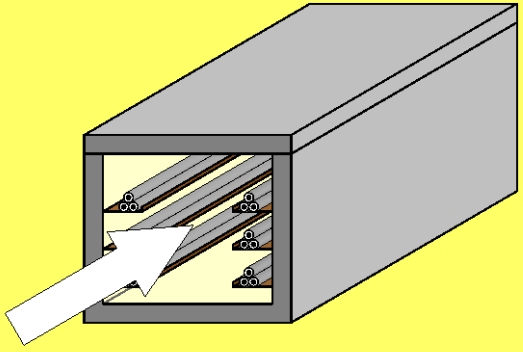
- أكثر كلفة من التبريد بالهواء.
- فعالة.
- يوجد فصل بين الكابل ووسيلة التبريد.

التبريد بالماء بشكل مباشر



- أكثر كلفة من التبريد بالهواء.
- فعالة جداً.
- لا يوجد فصل بين الكابل ووسيلة التبريد.

تهوية قسرية



- سهلة التنفيذ.
- اقل فعالية من التبريد بالماء.

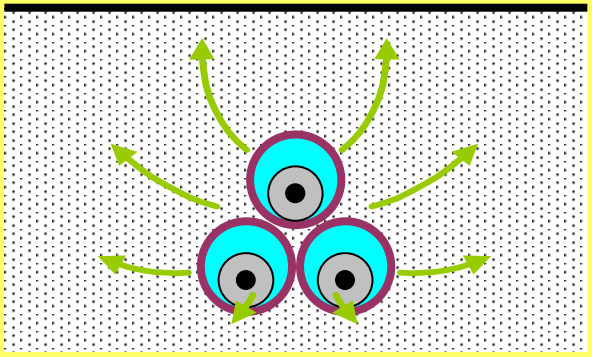
تعطى سرعة الهواء في القناة بنسبة حجم هواء التبريد إلى مقطع القناة:

$$v = \frac{Q}{A}\ [m/s]$$

وللتخلص من صوت هواء التبريد داخل القناة (صفير الهواء) يجب ألا تزيد سرعته عن $5\ m/s$.

حساب تيار الحمولة عند تمديد الكابلات ضمن أنابيب في التربة

ضمن أنبوب في الأرض

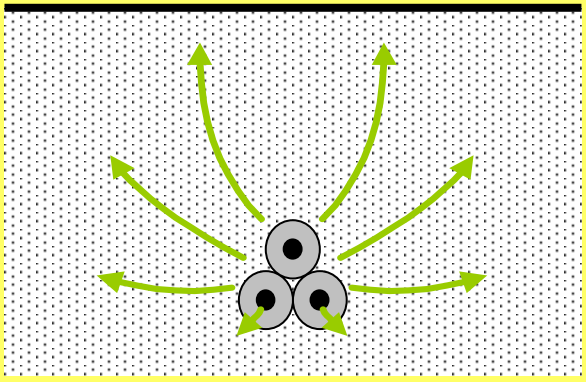


$$T_4 = T_{Spalt} + T_{Rohr} + T_{Erde}$$

يتم طرح الحرارة من الكابل إلى الوسط الخارجي

- انتقال الحرارة بالحمل من جدار الأنبوب إلى الوسط الخارجي.
- انتقال الحرارة بالتوصيل لجدار الأنبوب.
- انتقال الحرارة بالحمل في التربة المحيطة بالكابل إلى الوسط الخارجي

مباشرة في الأرض

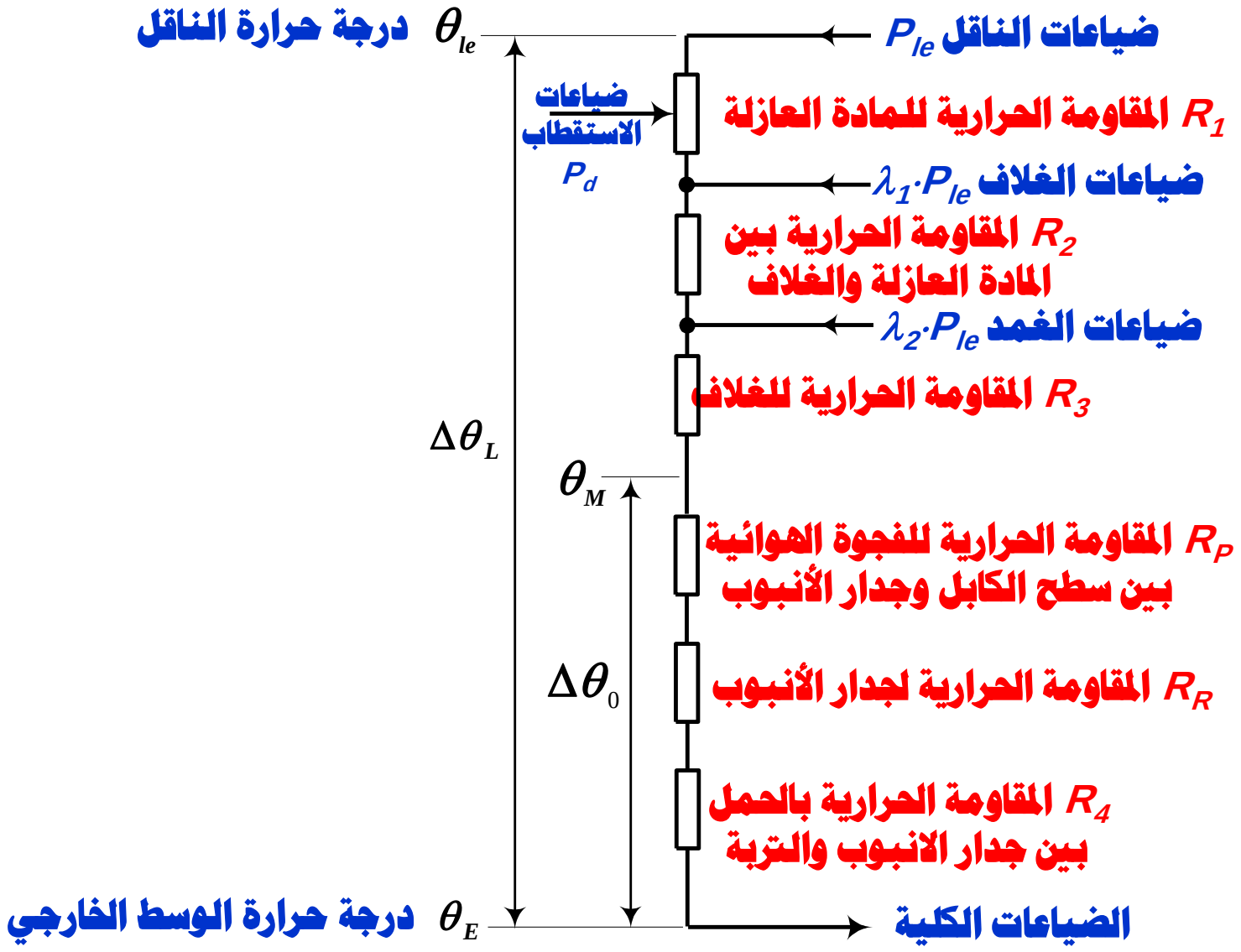


$$T_4 = T_{Erde}$$

مقاومة انتقال الحرارة من الكابل

إلى سطح الأرض عبر التربة المحيطة بالحمل

حساب تيار الحمولة لكابل ممدد ضمن أنبوب



المقاومة الحرارية للفجوة الهوائية بين سطح الكابل وجدار الأنبوب

تعطى بشيء من التبسيط بالعلاقة :

$$R_P = \frac{A}{1 + 100 + (B + C \cdot \theta_m) \cdot d_E}$$

حيث : d_E – القطر المكافئ بـ $[m]$ ، ويعطى بدلالة القطر d .

عدد الكابلات ضمن الأنبوب	d_E
1	$d_E = d$
2	$d_E = 1.65\ d$
3	$d_E = 2.15\ d$
4	$d_E = 2.5\ d$

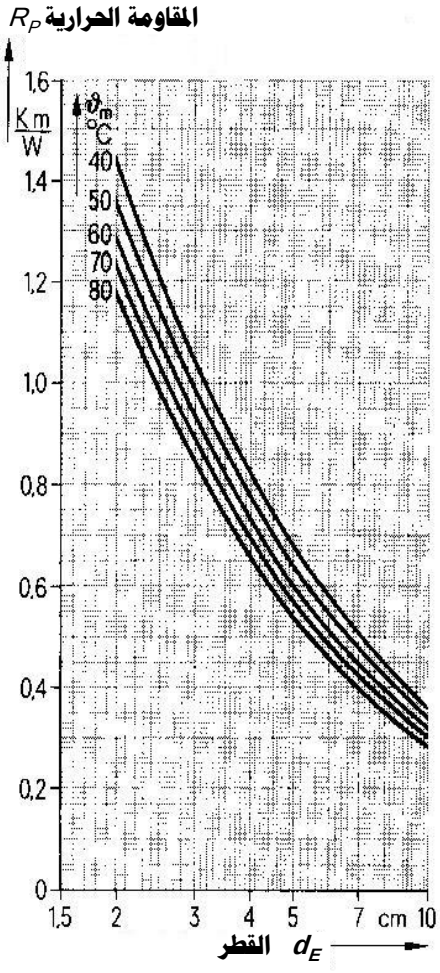
القطر المكافئ للكابل بدلالة عدد الكابلات في الأنبوب، وقطر الكابل .

θ_m – درجة الحرارة الوسطية للفجوة الهوائية.

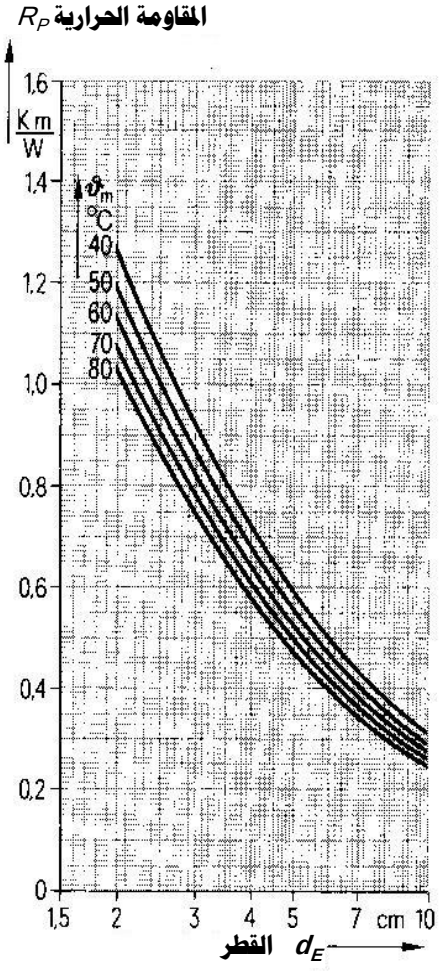
تؤخذ الثوابت A , B , C من الجدول التالي:

نوع الكابل	A	B	C
كابل ضمن أنبوب معدني	5.2	1.4	0.0110
كابل ضمن أنبوب من الفيبر :			
– في الهواء	5.2	0.83	0.0063
– في الأرض	5.2	0.91	0.0095
كابل ضمن أنبوب من إسمنت الإسبستس :			
– في الهواء	5.2	1.1	0.0110
– في الأرض	5.2	1.2	0.0055
كابل ضمن أنبوب من الفخار	1.87	0.46	0.0036
كابل مضغوط بالغاز ضمن أنبوب معدني (14 بار)	0.95	0.00	0.0021
كابل معزول بالزيت المضغوط ضمن أنبوب معدني	0.26	0.28	0.0026

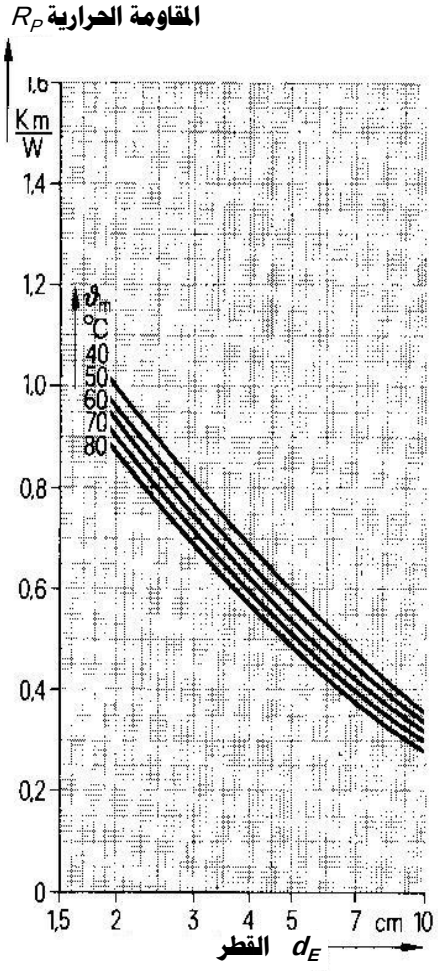
ويمكن حساب المقاومة الحرارية للفجوة الهوائية من الشكل



a) أنبوب من مادة بلاستيكية في الإسمنت أو في الأرض.



b) أنبوب من الإسبست في الإسمنت أو في الأرض .



c) أنبوب من الفخّار أو البورسلان.

المقاومة الحرارية لجدار الأنبوب R_R

تتعلق بمادة الأنبوب وبقطره d_R وسماكته s_R، وتعطى بالعلاقة:

$$R_R = \frac{\rho_R}{2\pi} \ln \frac{1}{1 - \frac{2\delta_R}{d_R}}$$

حيث :

ρ_R – المقاومة الحرارية النوعية لمادة الأنبوب بـ $[K.m/W]$.

δ_R – سماكة جدار الأنبوب.

d_R – القطر الخارجي للأنبوب.

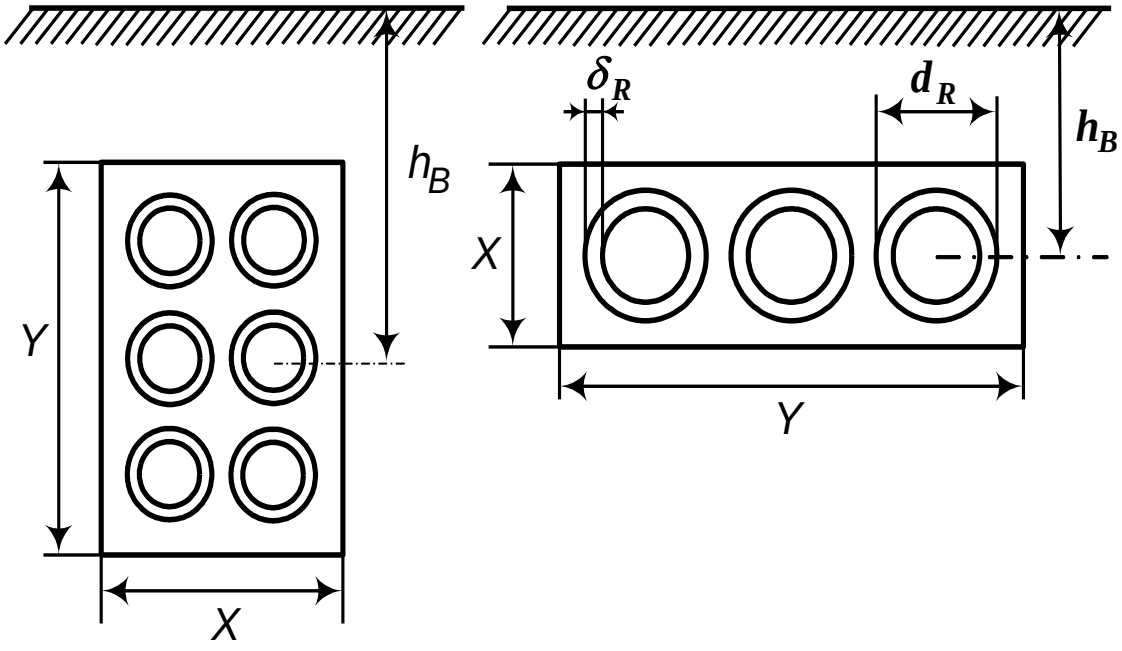
ويعطى تيار الحمولة بالعلاقة :

$$I_Z = \left[\frac{\theta_{le} - \theta_E - P_d \left[R_{Kd} + n_R \cdot (R_P + R_R + R'_X) + \Delta R'_X \right] + \left[\frac{\rho_X}{\rho_E} - 1 \right] \cdot \Delta\theta_X}{n \cdot R_W \cdot \left[R_{Ki} + n_R \cdot (R_P + R_R + R'_{XY}) + \Delta R'_{XY} \right]} \right]^{1/2}$$

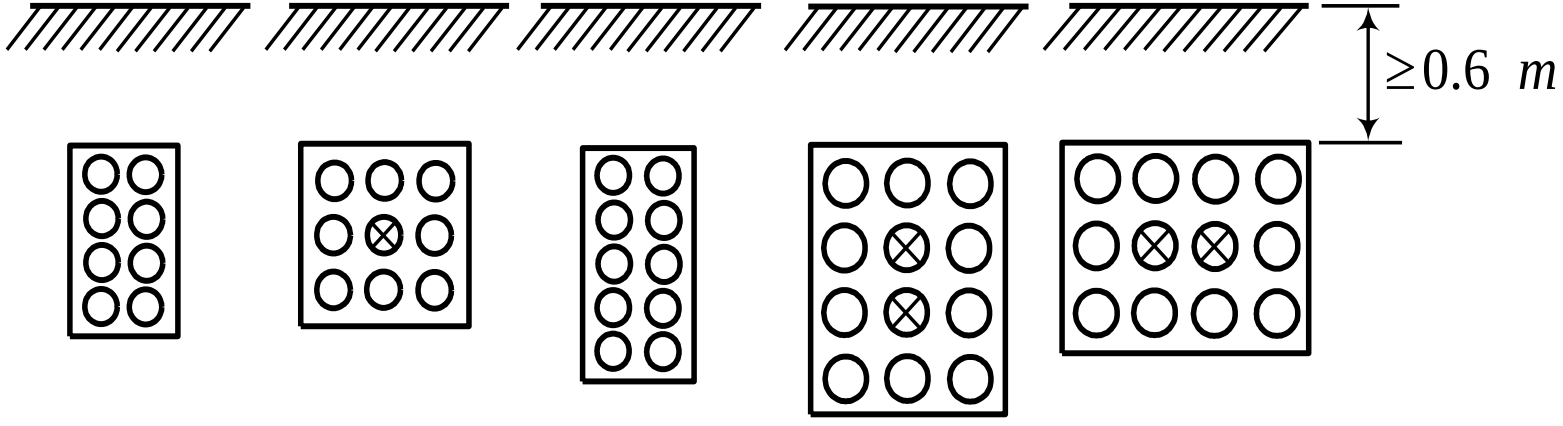
حيث :

- R_{Kd} – المقاومة الحرارية لطبقات الكابل.
- n_R – عدد الكابلات في الأنبوب .
- n – عدد الأطوار في الكابل الواحد .
- R'_X – المقاومة الحرارية للتربة الجافة ρ_X عند عامل تحميل دائم $(m=1)$ لكابل ثلاثي، وعامل تحميل متغير لثلاث كابلات مفردة $(m\neq1)$.
- $\Delta R'_X$ و $\Delta R'_{XY}$ – زيادة المقاومات الحرارية عند حمل دائم أوحمل متغير والتي تأخذ بالحسبان عامل التجاور .
- R_W – المقاومة الأومية للناقل.
- ρ_X – المقاومة الحرارية النوعية للتربة الجافة.
- ρ_E – المقاومة الحرارية النوعية للتربة.
- $\Delta\theta_X$ – فرق درجة الحرارة بين التربة الجافة والتربة الرطبة.

في المنشآت الصناعية الكبيرة غالباً ما تمدد الكابلات ضمن أنابيب مطمورة في التربة على عمق 60 cm، كما في الشكل، وتترك مسافة كافية بين الأنابيب لتتغلغل بينها التربة المغلفة للكابل، والتي تكون عادية أو محسنة، وبالتالي تبقى المقاومة الحرارية النوعية للتربة ثابتة، والمقدار $(\frac{\rho_X}{\rho_E} - 1) \cdot \Delta\theta_X$ في العلاقة السابقة يساوي الصفر.



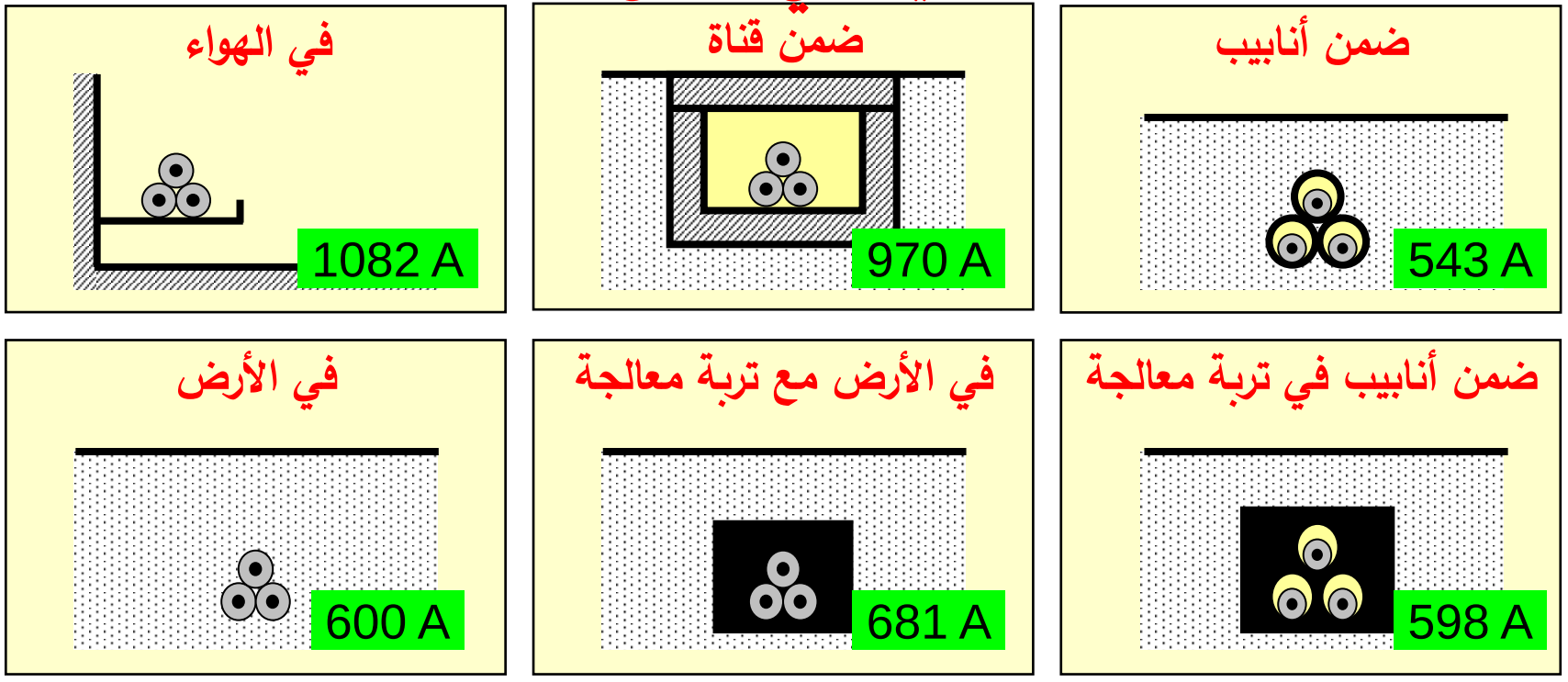
في حال وجود عدة أنابيب بجانب بعضها البعض فإن كابلات الطاقة يجب أن تمدد في الأنابيب الخارجية فقط، كما في الشكل، لأن التبادل الحراري في الكابلات الممددة في الأنابيب الداخلية سيئ جداً. وفي حال تمديد كابلات الطاقة وكابلات القيادة في مجموعة الأنابيب يفضل أن تمدد كابلات الطاقة في الأعلى كي لا تؤثر الحرارة المطروحة من كابلات الطاقة على كابلات القيادة.



⊗ غير مناسب

تحميل الكابل نموذج 2XS(FL)2Y 1x630RM/50 64/110 kV

عند تمديده في أماكن مختلفة.



تمديد الكابل على شكل مثلث، الغلاف مؤرض من الجهتين: درجة حرارة الهواء الخارجي 30°C، درجة حرارة التربة 20°C، المقاومة النوعية الحرارية للتربة 1.2/2.5 km/W، المقاومة النوعية للتربة المعالجة 1.2 km/W.
الأنبوب من PVC قطره 150 mm وسماكة جداره 5 mm، عمق الطمر 1200 mm، أبعاد القناة 1600×600×150 mm.

تصميم تيار الحمولة ومقطع الناقل على تيار القصر

يسبب تيار القصر نوعين من الإجهادات على كابلات الطاقة الكهربائية:

- **إجهادات حرارية** تسبب في تسخين عناصر الكابل المختلفة (ناقل، غلاف،...الخ).
- **إجهادات ميكانيكية** ناتجة عن قوى الحقل الكهرطيسي المختلفة بين نواقل التيار.

لذلك عند تحديد مقطع الناقل في كابلات الجهد العالي لا بد من أخذ هذه العوامل بالحسبان.

في الكابلات الثلاثية الأطوار تكون الإجهادات حرارية، أما في الكابلات الأحادية فتكون ميكانيكية.

أثر الإجهادات الحرارية:

تحدد أبعاد الناقل والغلاف بأخذ الإجهادات الحرارية الناتجة عن القصر بالحسبان وذلك بعد حساب تيار القصر، ويكون مقطع الناقل كاف من أجل تيار قصر I_{th} وزمن قصر t_K عندما يتحقق الشَرط:

$$I_{th} \leq I_{thZ} \qquad (1)$$

حيث:

I_{thZ} – تيار القصر المسموح.

I_{th} – تيار القصر الفعال.

يعطى تيار القصر المسموح بالعلاقة:

$$I_{thz} = A \cdot J_{th} \cdot \sqrt{\frac{t_{Kr}}{t_K}}$$

حيث:

- A – **مقطع الناقل بـ** mm^2.
- J_{th} – **كثافة التيار بـ** A/mm^2، **وتتعلق بنوع الكابل، وبدرجة حرارة الناقل لحظة القصر، وتؤخذ من الجداول.**
- t_{Kr} – **زمن القصر التصميمي، ويؤخذ** $1\ sec$.
- t_K – **زمن فصل القاطع.**

ويحسب مقطع الناقل وفقاً للعلاقة التالية:

$$I_{th} \le I_{thz}$$

$$I_{th} \le A \cdot J_{thr} \cdot \sqrt{\frac{t_{Kr}}{t_K}}$$

$$A \ge \frac{I_{th}}{J_{thr}} \cdot \sqrt{\frac{t_K}{t_{Kr}}}$$

مثال:

من أجل تيار قصر يبلغ $45.4\ kA$ وزمن القصر $0.6\ sec$ لكابل ناقله من النحاس. كثافة التيار المسموح عند درجة حرارة عمل $70\ ^oC$ هي $115\ A/mm^2$، أي:

$$A \geq \frac{45.4 \times 10^3}{115} \cdot \sqrt{\frac{0.6}{1}} = 305.8\ \ mm^2$$

نختار الناقل بمقطع $400\ mm^2$

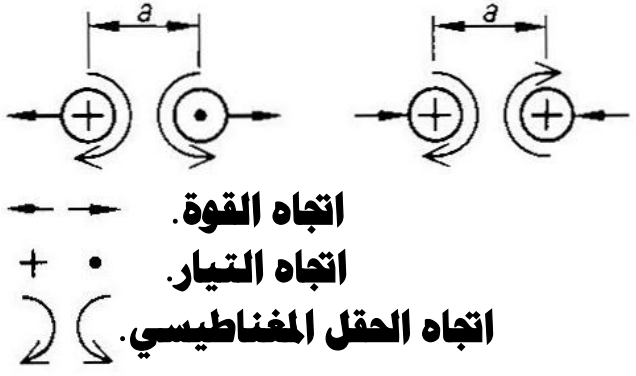
عند خفض درجة حرارة العمل إلى $65\ ^oC$ تصبح كثافة التيار $119\ A/mm^2$:

$$A \geq \frac{45.4 \times 10^3}{119} \cdot \sqrt{\frac{0.6}{1}} = 295.5\ \ mm^2$$

نختار الناقل بمقطع $300\ mm^2$

الأثر الديناميكي لتيار القصر:

عند سريان تيار في نواقل متوازية يحدث بينها قوى ميكانيكية عبارة عن قوى تباعد إذا كان اتجاه التيارات متعاكسة وقوى تجاذب إذا كانت التيارات بنفس الاتجاه، وقوى التباعد تسبب تباعد الكابلات الأحادية عن بعضها البعض، أو تباعد الغلاف المعدني عن الناقل. أما قوى التجاذب فتسبب قوى ضغط من الناقل والغلاف المعدني على المادة العازلة. وتتناسب هذه القوى الصدمية طرداً مع مربع قيمة تيار القصر الأولي I_S وعكساً مع البعد بين مركزي الناقلين a (في النواقل الدائرية نفرض أن التيار يسري في مركز الناقل كمنبع خطي) حسب العلاقة:



$$F_S = \frac{\mu_0 \cdot I_S^2}{2\pi \cdot a}$$

I_S – تيار القصر الصدمي، حيث:

$$I_S = \chi \cdot I_a$$

x ثابت يساوي 1.8 وزمن القصر الصدمي 0.01 sec.

اختيار مقطع الناقل وفق هبوط التوتر المسموح:

في كابلات التوتر المنخفض يجب التأكد من أن المقطع المختار يحقق هبوط التوتر المسموح به كذلك يجب أخذ هذا الأمر بالحسبان في كابلات التوتر المتوسط، وخاصة من أجل أطوال كبيرة نتيجة الممانعة التحريضية X_L للناقل بالإضافة إلى هبوط التوتر الناتج عن تيار الشحن السعوي I_C والذي لا يمكن إهماله في كابلات التوتر المتوسط وخاصة في الكابلات المعزولة بـ PVC أو عند الأطوال الكبيرة لهذه الكابلات أو في كابلات التوتر العالي، في حين يمكن إهمال التوتر نتيجة التيار السعوي من أجل أطوال قصيرة.

يعطى هبوط التوتر من أجل أطوال قصيرة بالعلاقة التالية:

$$\Delta u = \sqrt{3} \cdot I_b \cdot l \cdot (R'_W \cdot \cos\varphi + X'_L \cdot \sin\varphi)$$

حيث:

- Δu – **هبوط التوتر المسموح، ويعطى كنسبة مئوية من التوتر الاسمي** U_N :

$$\Delta u = \frac{\Delta u}{U_N} \cdot 100\%$$

- I_b – **تيار الحمولة.**
- l – **طول الناقل.**
- R'_W – **المقاومة الأومية للناقل عن درجة حرارة العمل.**
- X'_W – **الممانعة التحريضية للناقل وتتعلق بمقطع الناقل.**

(يمكن إهمال هذه الممانعة في النواقل التي يقل مقطعها عن $16\ mm^2$ **بالمقارنة مع المقاومة الأومية)**

- $\cos\varphi$ – **عامل الاستطاعة للحمل.**

$$\frac{\Delta u}{\sqrt{3} \cdot I_b \cdot l} \geq (R'_W \cdot \cos\varphi + X'_L \cdot \sin\varphi)$$

اختيار مقطع الناقل وفق الكلفة السنوية:

تعطى الكلفة السنوية لاستخدام الكابل وفق العلاقة التالية:

$$k = k_d + k_v$$

حيث:

- k – **الكلفة السنوية لاستخدام الكابل.**
- k_d – **الكلفة التأسيسية السنوية (باعتبار أن عمر الكابل يتراوح بين 30 و 40 عام)، مضاف لها كلفة الصيانة والمراقبة السنوية.**
- k_v – **كلفة الضياعات السنوية.**

تعطى الكلفة التأسيسية السنوية بالعلاقة التالية:

تعطى الكلفة التأسيسية السنوية بالعلاقة التالية:

$$k_d = \frac{k_a \cdot (T + T_R)}{100}$$

حيث:

- k_a – **الكلفة التأسيسية الكلية (ثمن المواد وأجور النقل والمد ...الخ).**
- T – **النسبة المئوية المتوجب دفعها سنوياً لاسترداد المبلغ والفائدة، وهي تتعلق بزمن الاستخدام، وتعطى بالعلاقة:**
- T_R – **الكلفة السنوية للمراقبة والصيانة، وتؤخذ غالباً بين** *0.5 %* **و** *1 %*.

وتزداد هذه الكلفة بزيادة مقطع الناقل.

الكلفة السنوية للضياعات:

بإهمال الضياعات في المادة العازلة تعطى الكلفة السنوية لنظام كابلات مكون من N كابل بالعلاقة:

$$k_v = N \cdot l \cdot k_a \cdot P_i \cdot T_v \cdot 10^{-3}$$

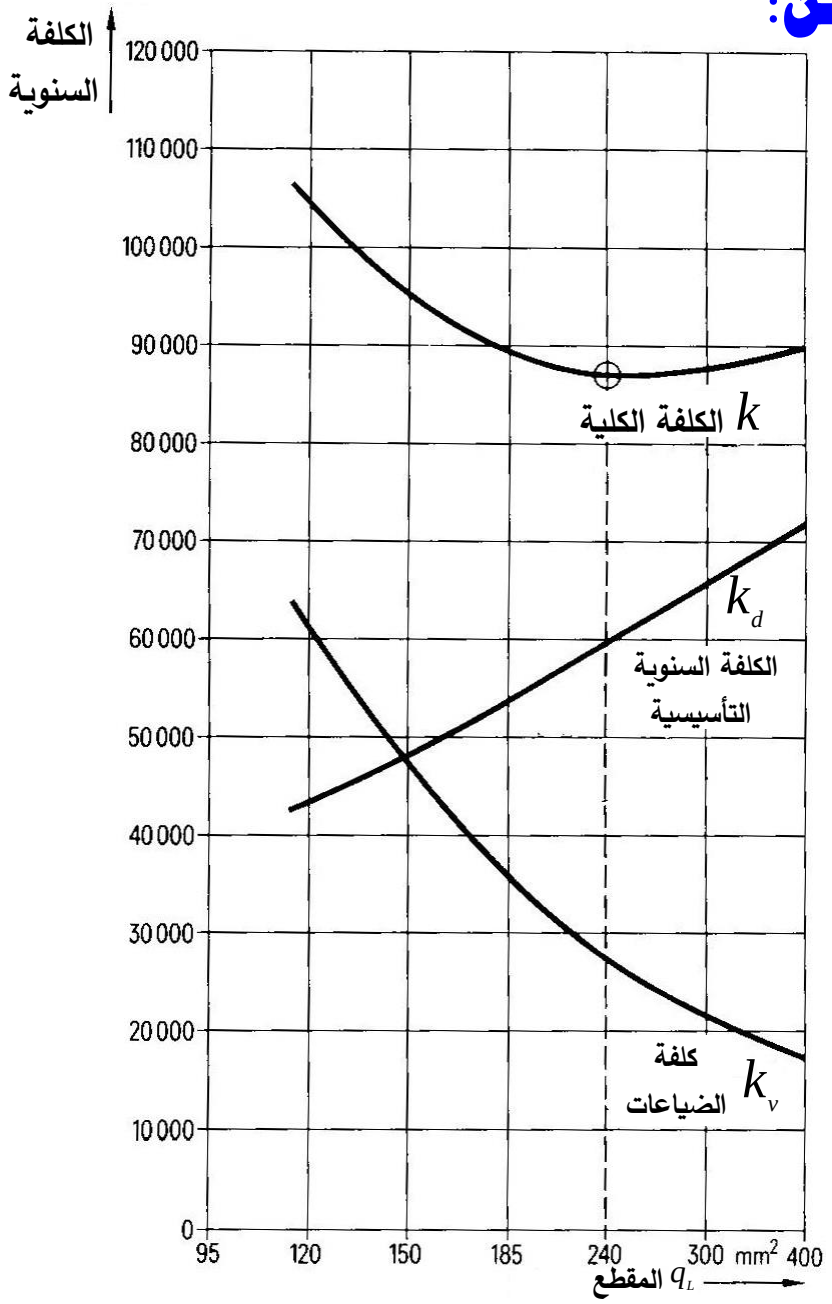
حيث:

- N – **عدد الكابلات.**
- l – **طول الكابل بـ m.**
- k_a – **ثمن الكيلواط ساعي.**
- P_i – **الضياعات في الناقل بـ $Watt$ وتنخفض هذه القيمة بزيادة مقطع الناقل.**
- T_v – **ساعات الضياع في العام، وتتعلق بعامل التحميل (القيمة الوسطى للحمل اليومي على القيمة العظمى)، وبنوع الحمل، وتؤخذ من الجدول التالي:**

نوع الحمل	عامل التحميل: $m = \frac{\text{القيمة الوسطية}}{\text{القيمة العظمى}}$	عدد ساعات الضياعات في العام
منزلي	0.7 0.85	3000 4300
صناعي	0.85 1.0	4700 6300

وتتكرر هذه الحسابات من أجل مقاطع مختلفة.

يبين الشكل التالي كيفية اختيار المقطع الاقتصادي لناقل بحيث تكون الكلفة السنوية الكلية أقل ما يمكن:



العلاقة بين الكلفة ومقطع الناقل.

الخلاصة

تبين مما سبق أهمية الدراسة الصحيحة لحساب تيار الحمولة للكابلات عند تمديدها في جميع الحالات (تربة عادية، تربة جافة، قناة،...الخ) وعدم الاعتماد على القيم الواردة في الجداول والمحسوبة بشروط محددة غالباً لا تنطبق على الكابلات الممددة في معظم الحالات، مما يسبب حدوث إجهادات تؤدي إلى تقادم الكابلات بسرعة أو حدوث حرائق نتيجة ارتفاع درجة حرارة الكابل إلى قيم كبيرة.