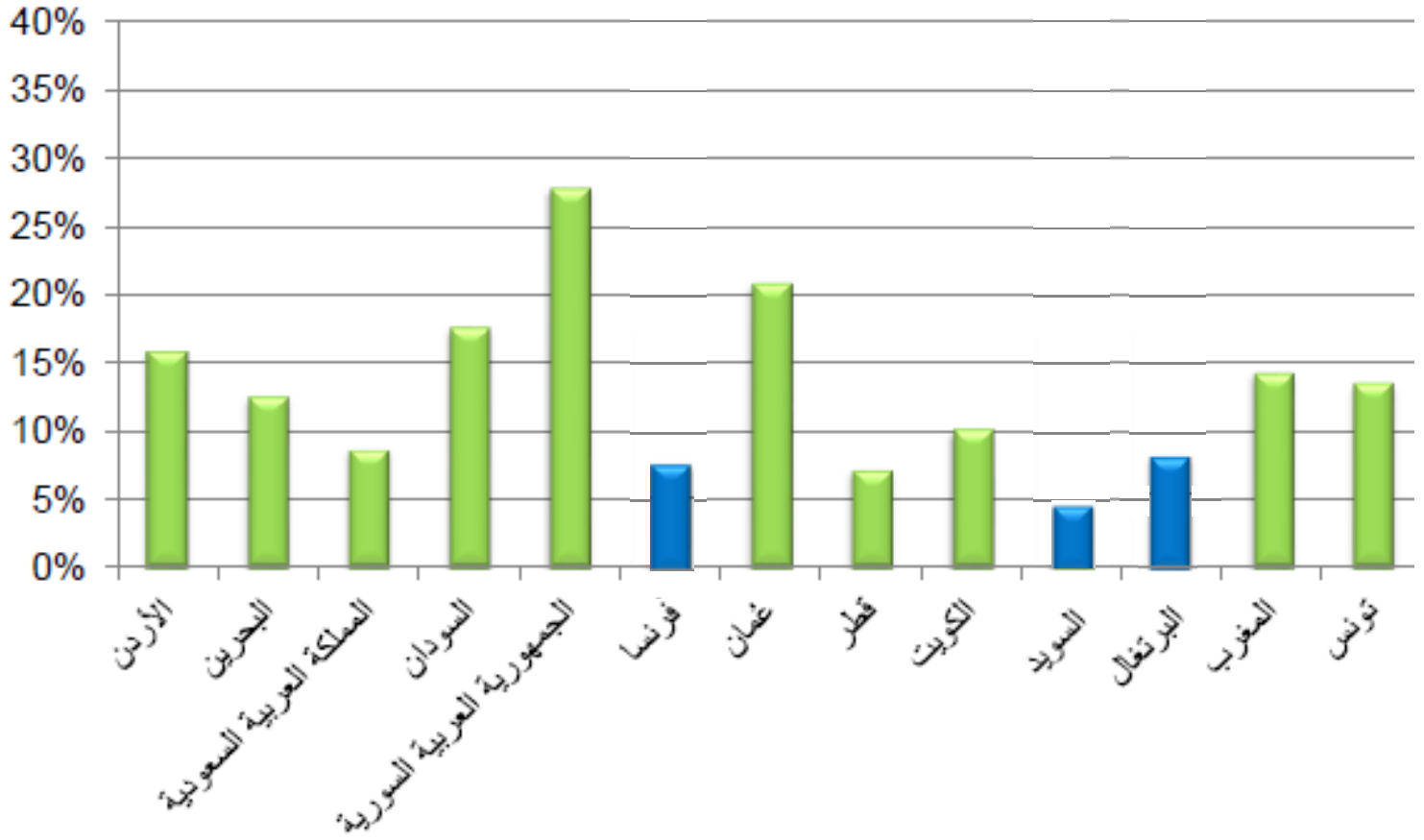
جامعة تشرين
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

تخفيض الفاقد الناتج عن الضياعات الحرارية في التجهيزات الكهربائية

الدكتور المهندس
محمد رسلان زهيرة
رئيس لجنة الطاقة في اتحاد المهندسين العرب

مقارنة نسبة الفاقد الفني للشبكة بين بعض الدول العربية والأوروبية



نلاحظ من الشكل أن قيمة الفاقد في الشبكة السورية مرتفعة جداً، ولا بد من اتخاذ اجراءات صارمة للحد منه.

يوجد العديد من الأسباب التي تسبب زيادة الفاقد، تمت دراستها بدقة باستثناء سبب أساسي لم تتم دراسته بالشكل المطلوب هو الفاقد الناتج عن الضياعات الحرارية في التجهيزات الكهربائية (نواقل، لوحات، محولات، كابلات).

تعد الحسابات الخاصة بالإجهادات والضياعات الحرارية الناجمة عن مرور التيار الكهربائي في نواقل التجهيزات الكهربائية من المسائل الصعبة بالنسبة للكثير من المهندسين نظراً لأنها تتطلب تعمقاً في قوانين الترموديناميك، وقوانين انتقال وتوزيع الحرارة في الأجزاء والمكونات المختلفة المدروسة، وقدرة على تحديد ماهية وطبيعة المنابع الحرارية المختلفة السائدة فيها، والتي غالباً من مهام مهندسي الميكانيك، كما تتطلب معرفة دقيقة بالأداء الكهربائي لهذه التجهيزات من جهة أخرى، والتي هي من مهام مهندسي الكهرباء.

ويتم تحديد توزيع درجات الحرارة في التجهيزات إما تجريبياً بإجراء قياسات ذات كلفة عالية او حسابياً بالاعتماد على الدارة الحرارية التي تشبه الدارة الكهربائية و تستخدم هذه الدارة لحساب توزيع الحرارة في الآلات الكهربائية و المحولات منذ ثلاثينات القرن الماضي، ومنذ السبعينات من القرن الماضي تم استخدام هذه الدارة في تصميم مقاطع نواقل التيار لتجهيزات نقل وتوزيع الطاقة.

مكونات الدارة الحرارية

تتكوّن هذه الدارة مما يلي:

1. منابع حرارية: وتشمل الضياعات المختلفة في الجهاز الكهربائي (الضياعات الناتجة عن مرور التيار في الناقل، الضياعات في نقاط الوصل والتثبيت، الضياعات في الغلاف ...الخ) بالإضافة الى المنبع الحراري الدائم والناتج عن أشعة الشمس، والأشعة الكونية الأخرى.
2. منابع التوتر الحراري: وتشمل النقاط التي تسود فيها درجة حرارة محددة، ودرجة حرارة الوسط الخارجي، ودرجة الحرارة المحددة للناقل.
3. مقاومات حرارية: حيث يعبر عن كل عملية انتقال حرارة (بالتوصيل أو بالحمل أو بالإشعاع) بمقاومة حرارية بالإضافة الى المقاومة الحرارية لوسائط التبريد في حال وجودها.
4. سعات حرارية: وتمثل تحويل الدارة الحرارية المستقرة الى دارة غير مستقرة وهذا يعني أن درجة الحرارة غير ثابتة وإنما تتغير لحظياً.

وتتعلق السعات الحرارية لعناصر التجهيزات الكهربائية (نواقل التيار، المادة العازلة، ...الخ) بالسعة الحرارية النوعية C وبكثافة المادة δ وحجمها V وذلك وفق العلاقة التالية:

$$C_W = C \cdot \delta \cdot V = C \cdot \delta \cdot A \cdot l$$

الاستطاعة الحرارية المكتسبة نتيجة الإشعاعات الشمسية والكونية:

تتعرض التجهيزات الكهربائية الموجودة في الهواء الطلق إلى الإشعاعات الشمسية والكونية، مما يُكسبها استطاعة حرارية تُمثَّل بمنبع حراري إضافي في الدارة الحرارية.

تتعلق الطاقة الحرارية التي تصل إلى الأرض بزاوية الإشعاع (ارتفاع الشمس في الأفق)، وعامل الامتصاص للجسم. والعاملان يتعلقان بنظافة الجو والرطوبة. وتوخذ الاستطاعة المكتسبة عندما تكون الشمس عمودية على السطح مساوية $1.3\ [KW.m^{-2}]$، واتجاه التيار الحراري في هذه الحالة من الخارج إلى داخل التجهيزات.

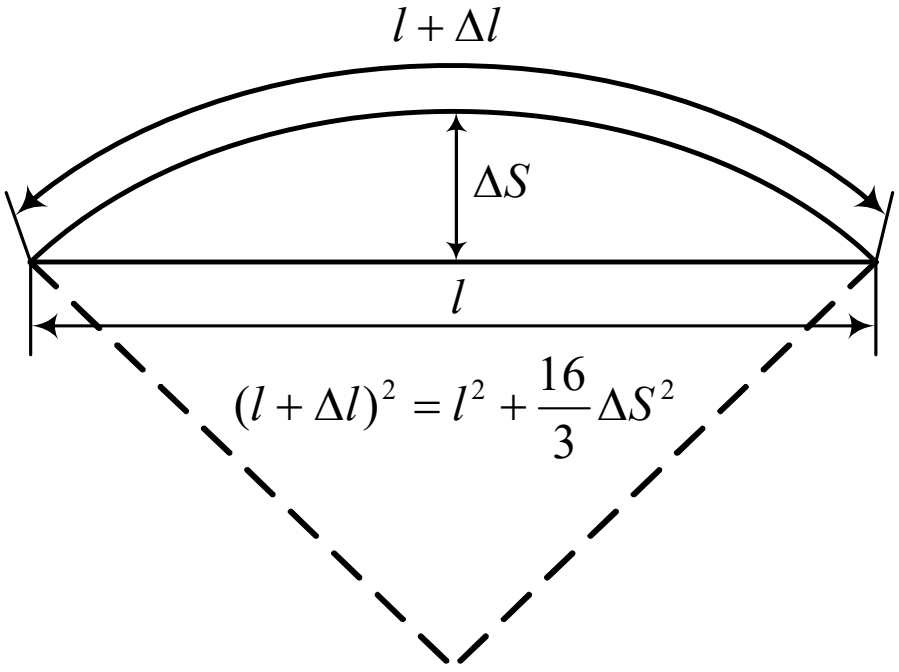
تخفيض الفاقد الناتج عن الضياعات الحرارية
في التجهيزات الكهربائية

1. الحسابات الحرارية في النواقل

تحدّد جميع المواصفات القياسية العالمية قيمة تيار الحمولة في النواقل الكهربائية من وجهة نظر الأثر الحراري لها، حيث تشترط هذه المواصفات أن تكون درجة حرارة جميع عناصر التجهيزات (نقاط التثبيت للناقل، الغلاف، المادة العازلة، ...الخ) عند سريان تيار الحمولة أقل من درجات الحرارة الحدية المحددة (المسموحة) في تلك المواصفات.

لذلك عند حساب تيار الحمولة المسموح بالنواقل يجب ان تكون كمية الحرارة المكتسبة نتيجة الضياعات المختلفة فيه تساوي كمية الحرارة المطروحة إلى الوسط الخارجي وزيادة تيار الحمولة عن التيار المسموح به يسبب:

- زيادة الضياعات وإمكانية حدوث حريق.
- تمدد النواقل. إذا كانت مثبتة من الطرفين لا يمكنها أن تتمدد، وسوف يحدث انحناء، وبالتالي ستقترب النواقل من بعضها أو من التجهيزات الأخرى مما قد يسبب حدوث حريق.



طريقة حساب ΔS عند حدوث انحناء في نواقل التيار نتيجة الإجهادات الترموحرارية.

- حدوث إجهادات ترمو كهربائية بسبب اختلاف عامل التمدد و التقلص للمواد الناقلة والعازلة المستخدمة في التجهيزات تؤدي إلى تشقق المادة العازلة أو حدوث انفراغات جزئية

1- الضياعات الحرارية في ناقل:

تعطى الضياعات الكهربائية P_{le} الناتجة عن مرور تيار كهربائي في ناقل متجانس بالعلاقة التالية:

$$P_{le} = k_{le} \cdot I_{le}^2 \cdot \frac{\rho_{20} \cdot l}{A_{le}} [1 + \alpha_t (\theta_{le} - 20)]$$

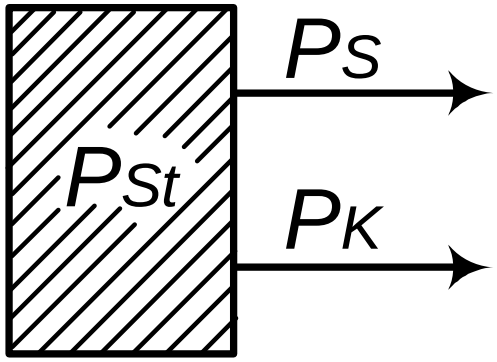
حيث:

I_{le} – التيار الذي يسري في الناقل.

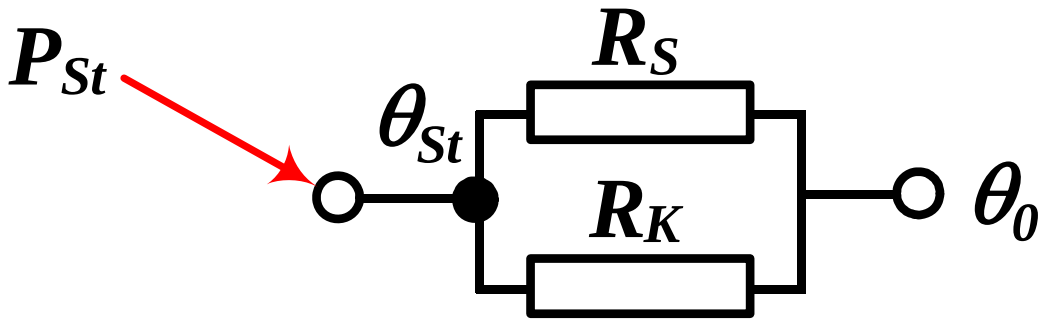
k_{le} – عامل تغير التيار، وهو يأخذ بالحسبان العلاقة بين زيادة مقاومة التيار المتناوب وشكل ناقل التيار.

✸ الناقل موجود في الهواء الطلق:

يبين الشكل التالي آلية انتقال الحرارة والدارة الحرارية لناقل موجود في الهواء الطلق :



آلية انتقال الحرارة



الدارة الحرارية.

الدارة الحرارية للناقل تحتوي على منبع حراري P_{St} ناتج عن مرور التيار في الناقل، ومقاومات حرارية R_S تعبر عن انتقال الحرارة بالإشعاع و R_K تعبر عن انتقال الحرارة بالحمل. وبالاستناد إلى قانون أوم الحراري:

$$\Delta\theta = \theta_{St} - \theta_0 = P \cdot \left(R_S \backslash\backslash R_K\right)$$

$$\Delta\theta = K \cdot I^2 \cdot \frac{\rho_{20}}{A}\left(1 + \alpha \cdot \Delta\theta\right)\right) \cdot \left(R_S \backslash\backslash R_K\right)$$

$$I = \sqrt{\frac{\left(\Delta\theta\right)}{K \cdot l \cdot \rho_{20} \cdot \left[1 + \alpha_T \cdot \left(\theta - 20\right)\right] \cdot R_{gas}}} \quad [A]$$

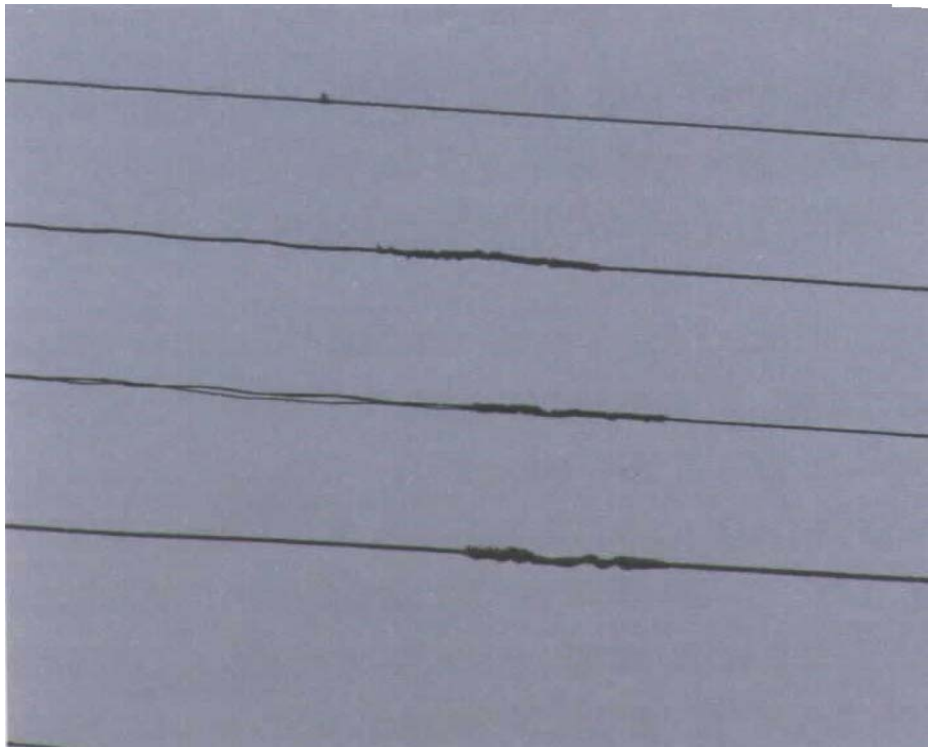
حيث:

K– ثابت يأخذ بعين الاعتبار العلاقة بين زيادة مقاومة التيار المتناوب وشكل ناقل التيار.

$R_{gas} = R_S \,//\, R_K$ - هي المقاومة الحرارية الكلية.

مثال: ناقل من الألمنيوم المطلي $A100mm \times 10mm$ ممدد في الهواء بشكل أفقي. درجة حرارة الناقل المسموحة $\theta_{st}=100^oC$ ودرجة حرارة الوسط الخارجي $\theta_o=40^oC$، تيار الحمولة المسموح هو $2250\ [A]$.

في حال كان الناقل مثبت من الطرفين تبلغ مقاومات التثبيت $0.86\ [\mu\Omega]$ وتيار الحمولة المسموح في الناقل $2050\ [A]$



في حال وجود وصلات في الناقل يجب أخذ مقاومة الوصل بالحسبان، على سبيل المثال: تم قياس مقاومة وصلة في ناقل شبكة توتر منخفض حيث بلغت قيمتها **14 μΩ**. من أجل تيار **1000 A** يكون الفاقد السنوي في هذه الوصلة **123 kWh** سنوياً. وإذا علمنا بأن الشبكة تحوي على عشرات الآلاف من نقاط الوصل نأخذ صورة كافية عن كمية الضياعات في هذه الوصلات.

✸ تصميم الأبعاد الاقتصادية للنواقل

يتم اختيار المقطع الاقتصادي لناقل التيار بحيث تكون الكلفة الكلية خلال فترة الاستثمار أقل ما يمكن.

الكلفة الكلية للناقل تساوي إلى:

الكلفة التأسيسية (ثمن المواد) + كلفة الضياعات.

1. الكلفة التأسيسية لنواقل التيار

تُصنع نواقل التيار المستخدمة في التجهيزات الكهربائية إما من الألمنيوم أو من النحاس المطلي أو غير المطلي، وتُعطى الكلفة الأولية للنواقل بالعلاقة :

$$G_S = M \cdot A \cdot l \cdot \gamma + K_L + K_S$$

حيث:

- M – سعر مادة الناقل لواحدة الوزن.
- A – مقطع الناقل.
- l – طول الناقل.
- γ – كثافة مادة الناقل.
- K_L – كلفة التصنيع والتركيب.
- K_S – كلفة الطلي.

2. كلفة الضياعات :

تُعطى كلفة الضياعات G_V التي تحدث في الناقل نتيجة مرور التيار بالعلاقة :

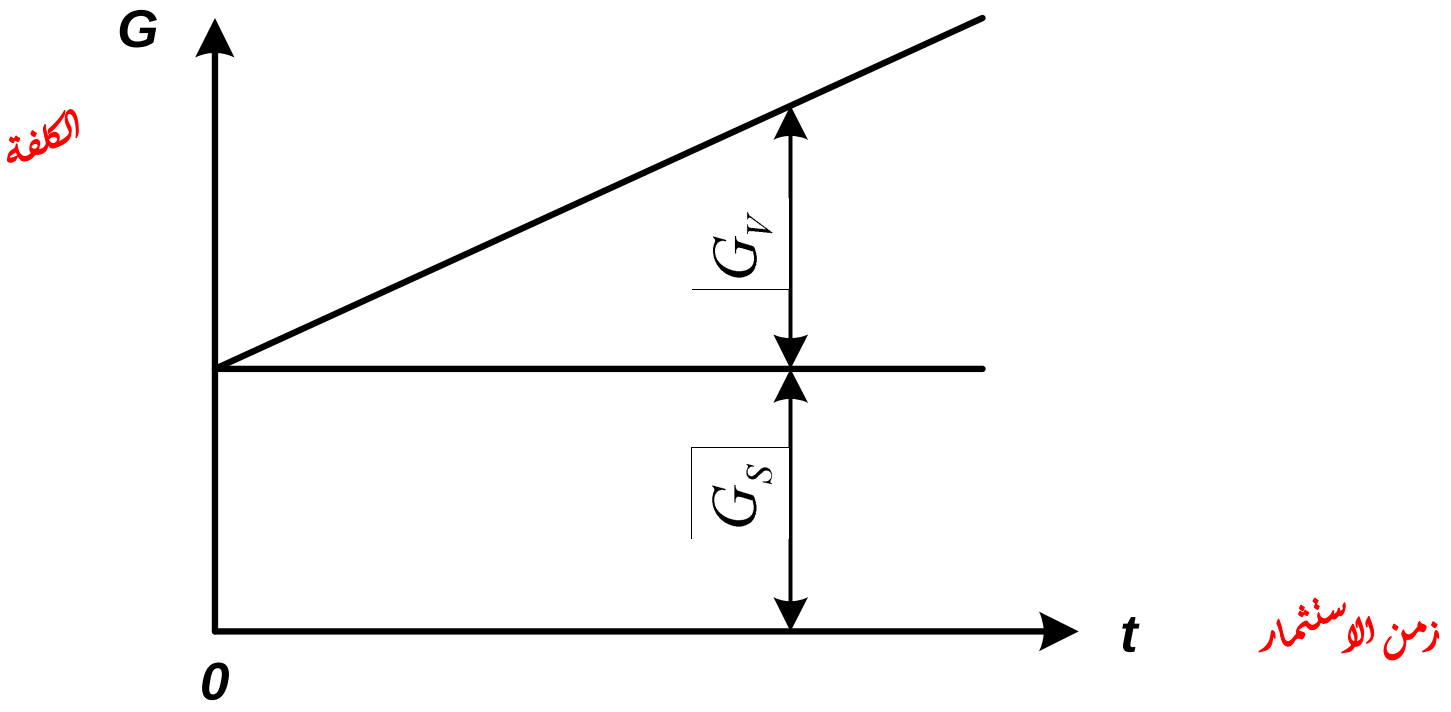
$$G_V = I^2 \cdot R_{20} \cdot k_{le} \cdot K_E \cdot t$$

حيث:

- I – تيار الحمولة .
- R_{20} – مقاومة الناقل للتيار المستمر .
- k_{le} – عامل تغير التيار للناقل .
- K_E – سعر واحدة الطاقة .
- t – زمن الاستثمار .

تقل قيمة الضياعات (كلفة الضياعات) في الناقل بزيادة مقطعه، ولكن تزداد الكلفة التأسيسية.

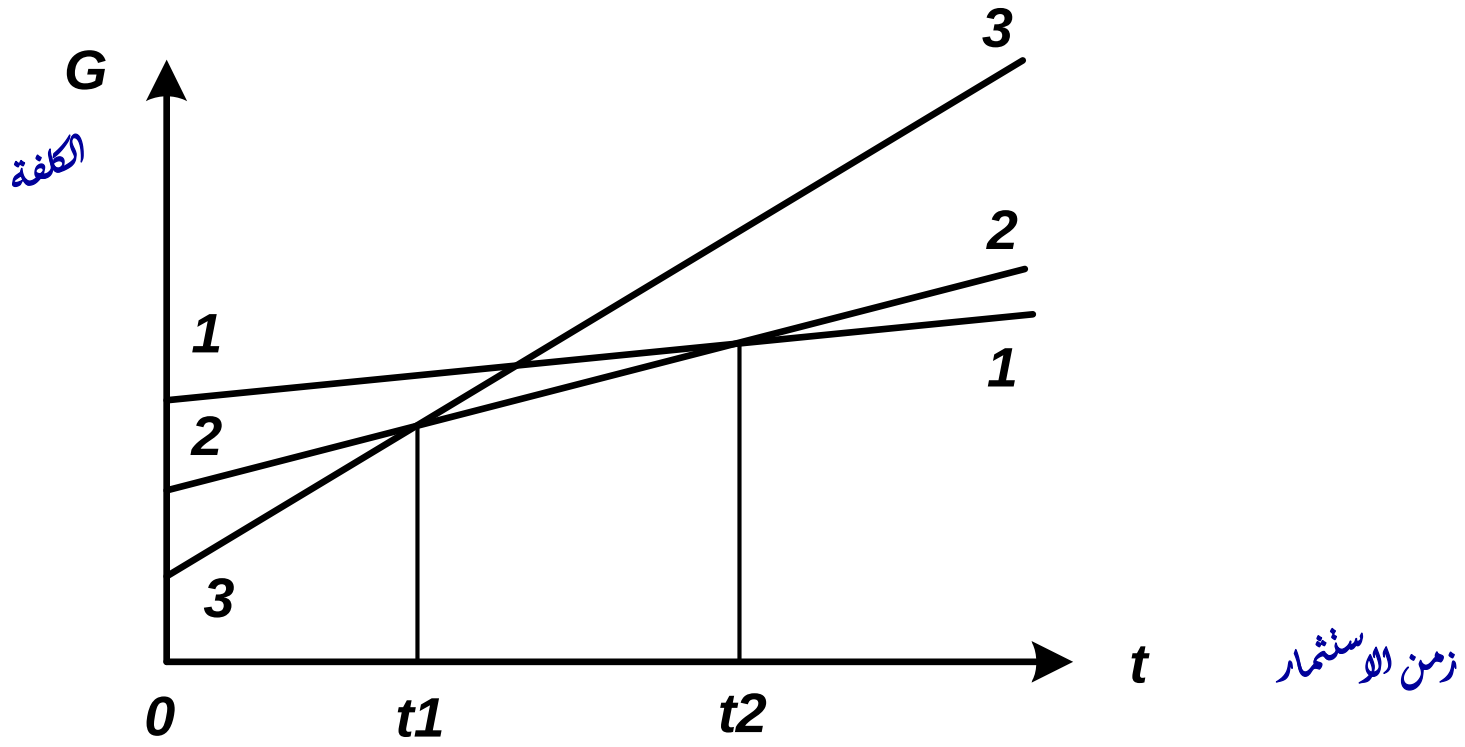
ويتم البحث عن المقطع الاقتصادي لناقل التيار بحيث تكون الكلفة الكلية ($G_S + G_V$) خلال فترة الاستثمار للمقطع المختار أقل من الكلفة الكلية للمقطع النظامي الأصغر والأكبر مباشرة من المقطع المختار.



العلاقة بين الكلفة وزمن الاستثمار من أجل تيار حمولة ثابت :

الكلفة في اللحظة $t = o$ تساوي كلفة التأسيس G_S فقط بعد ذلك يُضاف لها كلفة الضياعات، وبالتالي يمكننا مقارنة الكلفة الكلية لعدة نواقل من أجل قيمة ثابتة لتيار الحمولة كما في الشكل، حيث

$$A_1 > A_2 > A_3$$



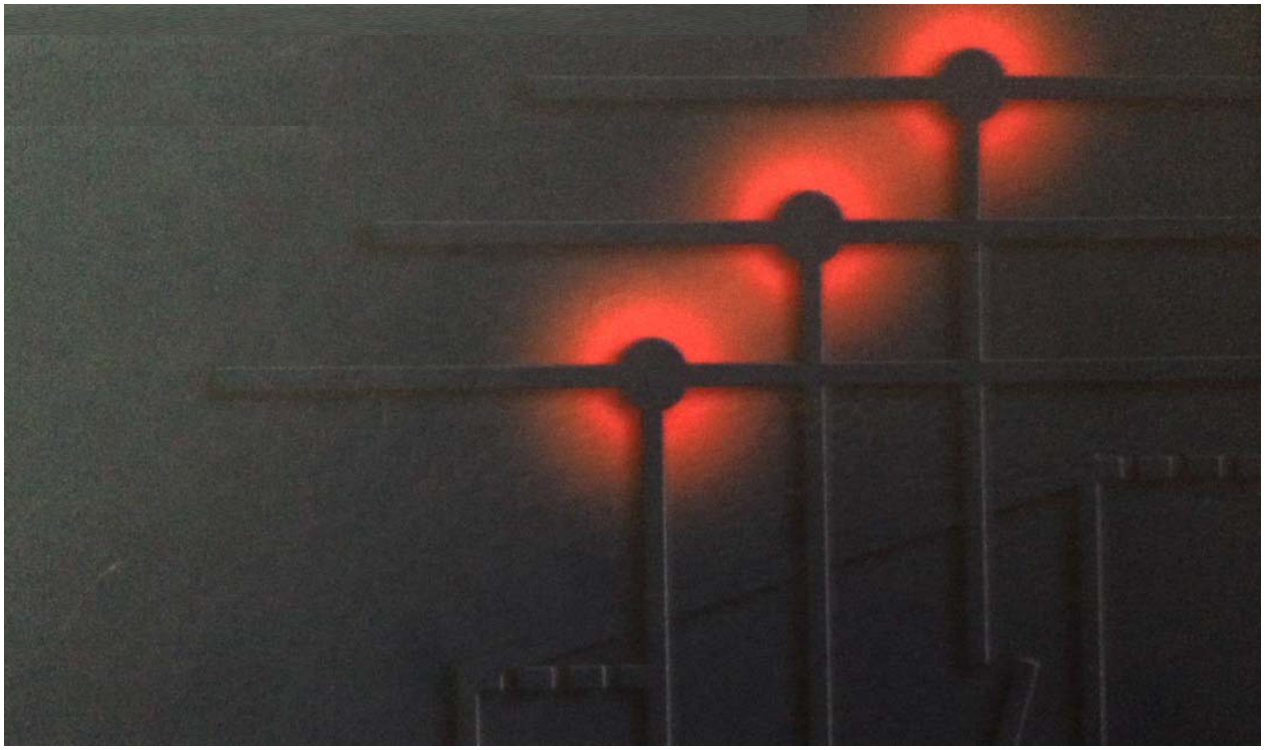
تحديد الفترة الزمنية للاستثمار الاقتصادي لنواقل التيار ذات مقاطع مختلفة (ثلاثة نواقل)

تخفيض الفاقد الناتج عن الضياعات الحرارية
في التجهيزات الكهربائية

2. الحسابات الحرارية في اللوحات

الضياعات في مقاومات نقاط الوصل و التثبيت في نواقل التيار :

يوجد في اللوحات الكهربائية بارات فرعية تُربط مع البارات الرئيسة. في حال عدم تحديد قيمة مقاومة الربط بدقة، وأخذها بالحسبان عند حساب الضياعات في النواقل نلاحظ تجمر في هذه النقاط يمكن أن تؤدي إلى نشوء حريق.



يمكن حساب الضياعات الحرارية التي تحدث فيها من العلاقة:

$$P_V = I_{le}^2 \cdot R_{V(20^\circ C)}[1 + \frac{2}{3}\alpha_T(\theta_V - 20^\circ C)]$$

حيث:

$R_{V(20\,^\circ C)}$ – مقاومة الوصل أو الاحتكاك عند الدرجة $20\ ^\circ C$.

θ_V – درجة الحرارة في نقاط الوصل أو الاحتكاك.

وتتعلق قيمة مقاومة الوصل أو الاحتكاك بعدة عوامل أهمها: مادة الناقل، قوة الترابط، الاتساخ على سطح الوصل، نعومة السطح، تيار الحمولة، زمن التحميل. وقيمة هذه المقاومة تتأرجح ضمن مجال كبير.

ويمكن تحديد قيمة مقاومة الوصل حسابياً بالعلاقة:

$$R_{V(20^oC)} = \frac{C_\rho}{(0.1 \cdot F / N)^m} \ [\Omega]$$

حيث:

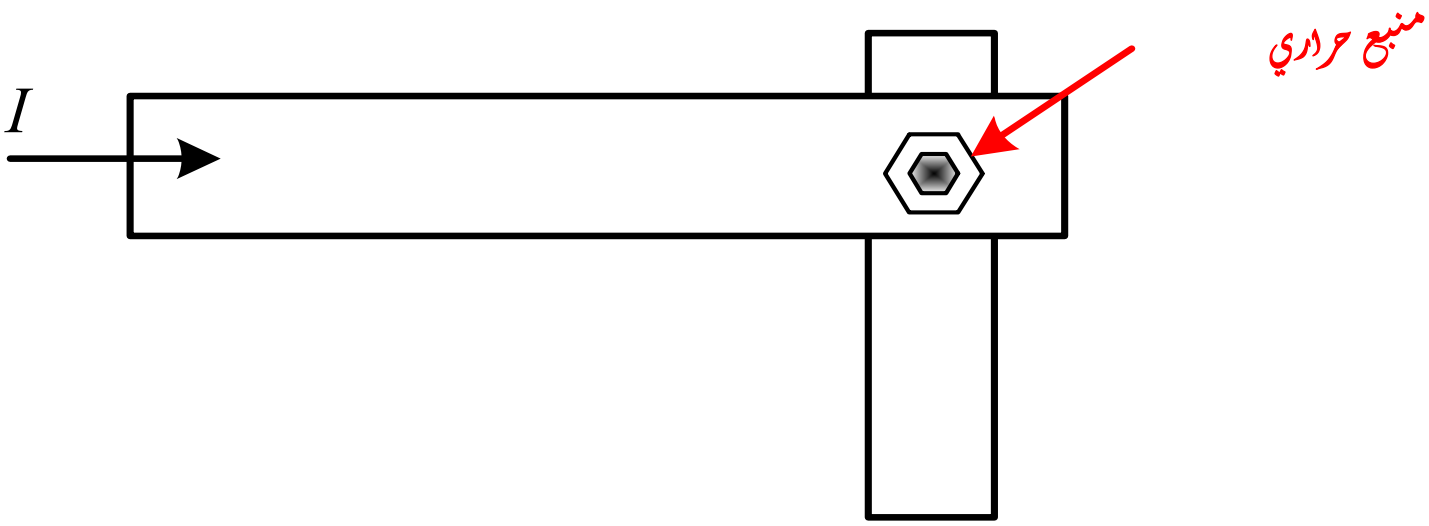
C_ρ – ثابت يتعلق بنوع النواقل التي سيتم وصلها مع بعضها، ويؤخذ من الجداول.

m – ثابت يتعلق بكيفية الوصل، وتؤخذ قيمته من الجداول.

F – قوة الارتباط بـ $[N]$ (نيوتن)، وتقاس تجريبياً.

عند تثبيت مكان البراغي يجب ان تتم مراعاة عدم وجود فراغات (استخدام ريش ثقب مناسبة). كذلك يجب ان يكون عامل التمدد للبراغي والنواقل متساوي حتى لا تحدث هذه الفراغات.

مثال: عند وصل نواقل من الألمنيوم مع بعضها بفرض قوة الربط $20\ [kN]$ (براغي $M12$) فإن قيمة المقاومة عند درجة الحرارة 20^oC تبلغ $0.4\ [\mu\Omega]$.



ويمكن ايضاً تحديد قيمة مقاومة الوصل $R_{V(20)}$ بالاعتماد على قياس قيمة التمدد الميكانيكي للبراغي بواسطة أجهزة قياس خاصة.

لا يمكن بزيادة قوة الارتباط فقط الوصول إلى قيمة صغيرة لمقاومة الوصل و التثبيت.

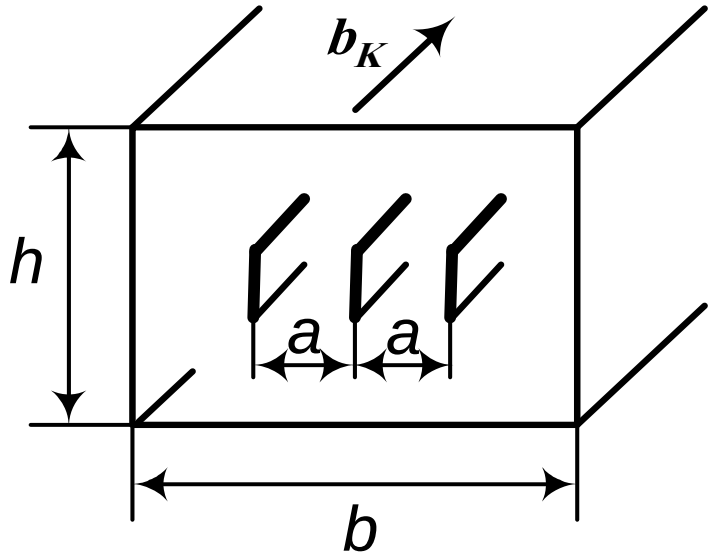
يجب أن تتم عملية الوصل بأيدي عاملة خبيرة، وبا ستخدام الأدوات المناسبة. ففي حال كان الثقب أوسع من البرغي بقليل فسوف تحدث انفراغات جزئية، ويقل سطح الارتباط، وبالتالي تزداد قيمة المقاومة بشكل كبير.

يسبب لمس منطقة الوصل بأيد متسخة بعد الانتهاء من عملية التركيب زيادة قيمة هذه المقاومة بشكل كبير (حوالي 100 ضعف من مقاومة نفس الطول لناقل متجانس)، لذلك يجب تنظيف منطقة الوصل بواسطة محاليل كيميائية و تشعيمها بشكل جيد. وبعدها يمنع لمسها باليد.

استناداً إلى ما سبق نلاحظ أن زيادة عدد الوصلات في ناقل التيار يسبب في زيادة المقاومة الكلية للناقل، وبالتالي زيادة الضياعات فيه. لذا فإن عدد نقاط الوصل في نواقل التيار يجب أن يكون قليلاً جداً، وأن توخذ قيمة المقاومة الكلية بعين الاعتبار عند حساب تيار الحمولة المسموح بمروره في الناقل.

2- الضياعات في الغلاف:

بالإضافة إلى الضياعات الحرارية في الناقل في نقاط الوصل تحدث ضياعات حرارية أيضاً في غلاف اللوحات الكهربائية ناتجة عن التيارات المتحرضة فيه، وتتعلق قيمة هذه التيارات بالبعد بين الناقل وغلاف اللوحة، وأبعاد الغلاف (h الارتفاع، b العرض، b_K سماكة الغلاف)، المسافة a بين النواقل، أبعاد الناقل والسماحية المغناطيسية النسبية لمادة الغلاف.



ثلاثة نواقل معدنية متوضعة ضمن غلاف واحد.

ويبين الجدول التالي أثر أبعاد اللوحة (ارتفاع اللوحة **h** والعرض **b** والمسافة **a** بين النواقل والمسافة بين ناقل التيار والغلاف) على الضياعات الحرارية في الغلاف عندما يسري في البارات تيار قدره **1000 A**.

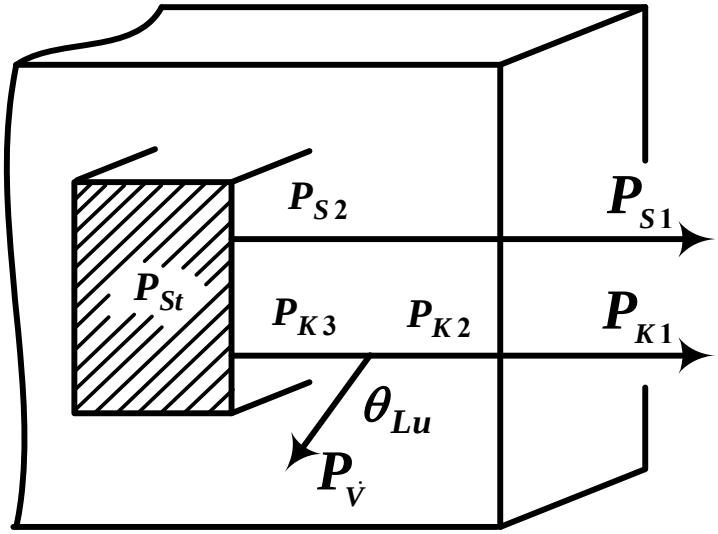
الحالة	الارتفاع h [mm]	العرض b [mm]	المسافة بين النواقل a [mm]	الفاقد [W/m2] عند تيار حمولة 1000 A	الفاقد [W/m2] عند تيار حمولة 1500 A	الفاقد [W/m2] عند تيار حمولة 2000 A
1	1000	1000	290	5	13	23
2	1000	1000	180	3	5	10
3	750	1000	290	10	20	35
4	750	1000	180	6	10	19
5	750	1000	105	2	5	8
6	750	750	180	5	13	23
7	750	750	105	3	5	10
8	500	750	180	10	20	35
9	500	750	105	4	10	18
10	500	500	105	5	13	23

نلاحظ من الجدول أن تغير الارتفاع والعرض عندما تكون المسافة بين البارات ثابتة يؤثر بشكل قليل على الضياعات التي تحدث في الغلاف بالمقارنة مع الضياعات الكبيرة التي تحدث في الغلاف عندما تكون المسافة بين الناقل والغلاف صغيرة (قارن بين الحالة **1** والحالة **5**) نجد أن فرق الضياعات يساوي **8 W/m²** عند تيار حمولة **1500 A**.

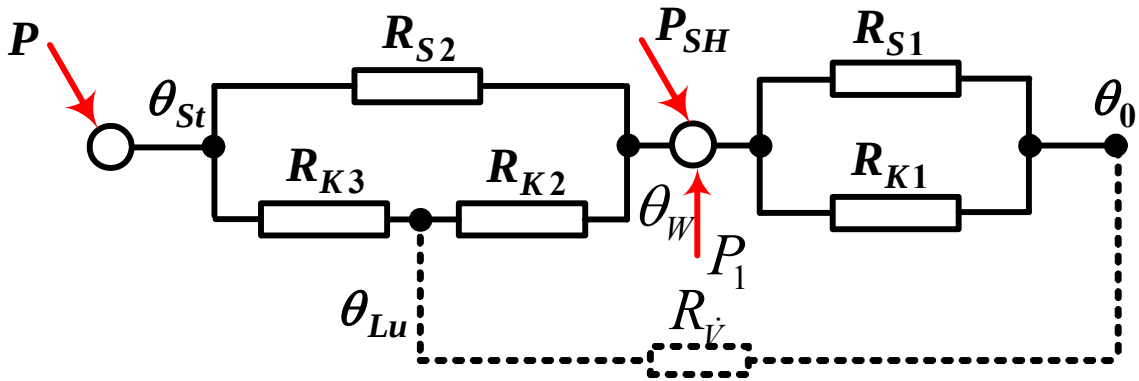
ملاحظة: الضياعات الكلية في الغلاف تساوي الضياعات الحرارية النوعية مضروبة بمساحة الغلاف.

✸ حساب تيار الحمولة للناقل الموجود ضمن اللوحة (غلاف معدني):

عند تمديد ناقل من الألمنيوم أبعاده **10×100 mm** في لوحة معدنية تصبح الدارة الحرارية كما يلي:



آلية انتقال الحرارة



الدارة الحرارية.

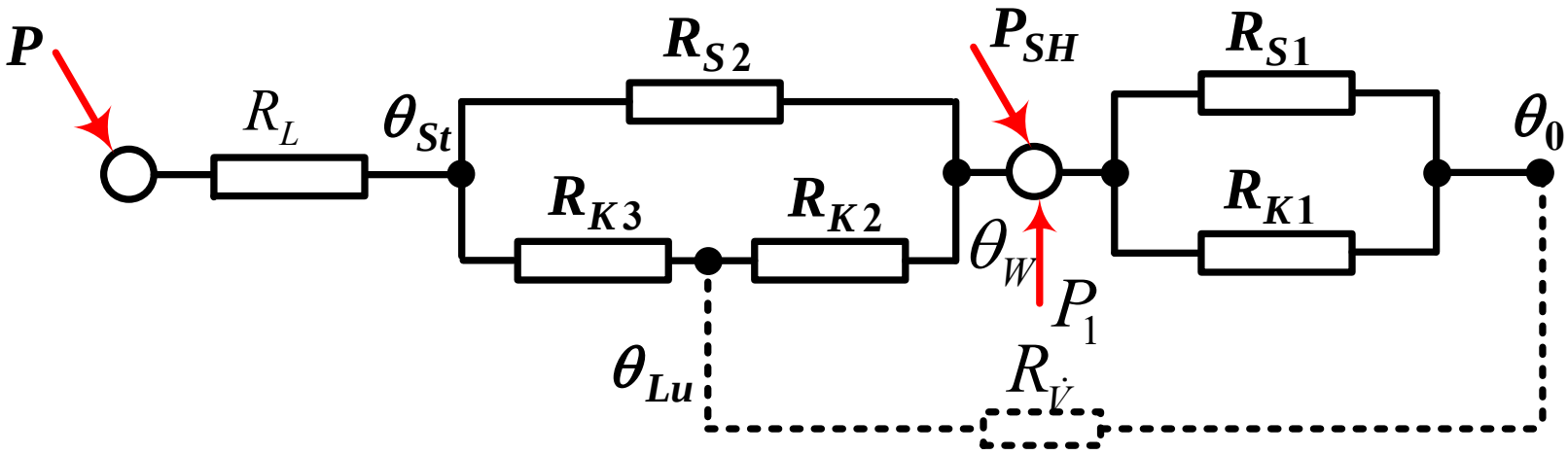
يُحسب تيار الحمولة من العلاقة:

$$I = \sqrt{\frac{(\Delta\theta)\cdot A}{K\cdot l\cdot \rho_{20}\cdot[1+\alpha_T\cdot(\theta-20)]\cdot R_{gas}}}$$

ويجب في هذه الحالة ألا تزيد قيمة هذا التيار عن **1690 A** بالمقارنة مع تيار حمولة قيمته **2250 A** عند تمديد الناقل في الهواء.

ملاحظة: عند وصل نواقل فرعية مع النواقل الأساسية أو عند تثبيت الناقل من الطرفين يجب اخذ مقاومات الوصل و التثبيت بالحسبان وإضافتها الى مقاومة الناقل الأومي.

إذا كان الناقل معزول بغلاف من مادة عازلة ضمن اللوحة تصبح الدارة المكافئة كما يلي:

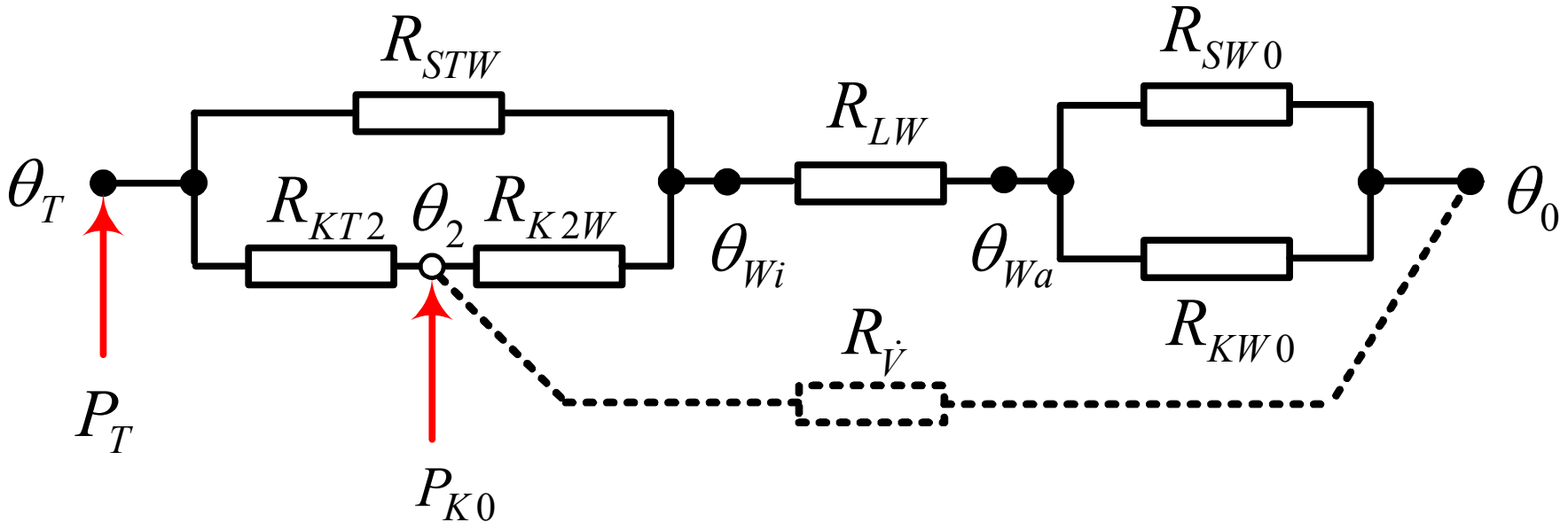


$$R_{gas} = R_L + R_{S2} //(R_{K3} + R_{K2}) + (R_{S1} // R_{K1})$$

في هذه الحالة تكون قيمة تيار الحمولة مساوية **1450 A**

✸ ملاحظات عامة :

❖ في حال تواجد اللوحات الكهربائية داخل المباني يجب أخذ ذلك بعين الاعتبار في الدارة الحرارية، حيث يُضاف إلى الدارة الحرارية مجموعة من المقاومات الحرارية.



الدارة الحرارية الإضافية للتجهيزات الموضوعة ضمن غرف .

✸ ملاحظات عامة :

❖ في حال زيادة درجة حرارة الهواء الداخلي (داخل الغرف التي تتواجد فيها اللوحات بسبب سوء التهوية) عن درجة الحرارة المسموحة للوسط الخارجي والمحددة في المواصفات القياسية العالمية (أو المعتمدة من قبل المصمم) سوف يفصل القاطع الحراري في هذه اللوحات، في هذه الحالة يجب تخفيض تيار الحمولة وحسابه على أساس ألا تتجاوز درجة الحرارة داخل الغرف درجة الحرارة المسموحة، أو يتم استخدام تهوية قسرية بواسطة مراوح تهوية بحسب حجم الهواء اللازم للتبريد، وبالتالي يزداد الاستهلاك الذاتي في اللوحات، ويزداد الفاقد.

✸ ملاحظات عامة:

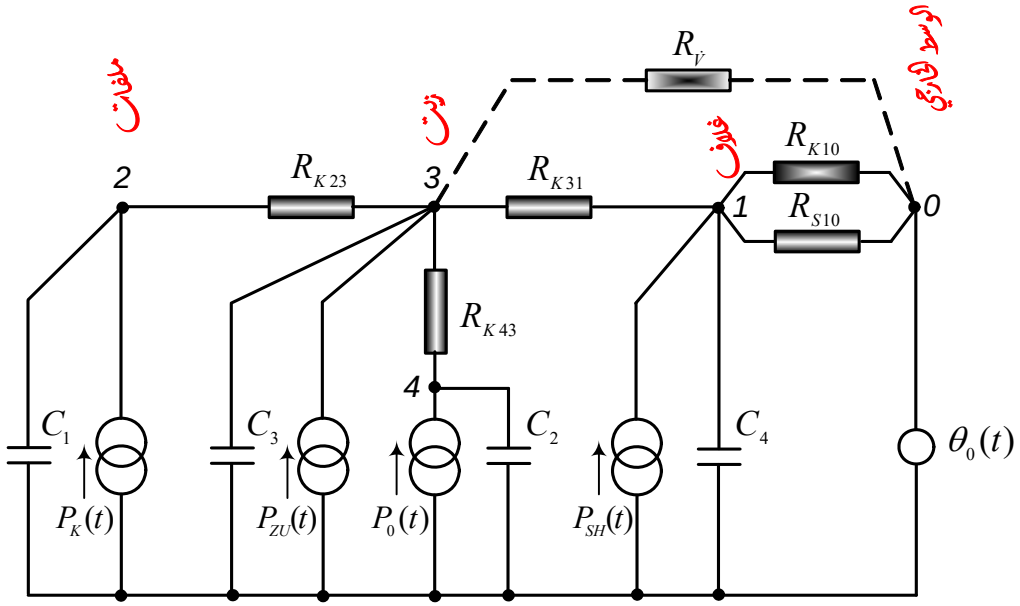
❖ في حال تغليف الجدار الداخلي للوحات بطبقة من البوليستر أو **PVC** الصعبة الاحتراق يجب إضافة مقاومة حرارية إلى الدارة الحرارية تعبر عن انتقال الحرارة بالتوصيل في هذه الطبقة.

❖ في حال تواجد اللوحات في الهواء الطلق يجب أخذ منبع حراري يمثل الحرارة المكتسبة من الشمس لجدران اللوحة شرق – جنوب – غرب – وسقف وتحمل الحرارة المكتسبة من الشمال والأسفل، في هذه الحالة يتم انتقال الحرارة بالتوصيل من أحد الجوانب إلى الجوانب الملصقة له.

تخفيض الفاقد الناتج عن الضياعات الحرارية
في التجهيزات الكهربائية

3. الحسابات الحرارية في المحولات

الدارة الحرارية للمحول:



تشمل الدارة الحرارية ما يلي :

❖ المنابع الحرارية في الدارة، وهي:

- ✓ الضياعات في الملفات $P_K(t)$.
- ✓ الضياعات الإضافية في الزيت $P_{Zu}(t)$.
- ✓ الضياعات على فراغ في النواة $P_o(t)$.
- ✓ منبع حراري $P_{SH}(t)$ إضافي يعبر عن الإشعاعات الشمسية والكونية .

❖ منابع التوتر، وهي:

- ✓ درجة حرارة الوسط الخارجي في النقطة **1**.

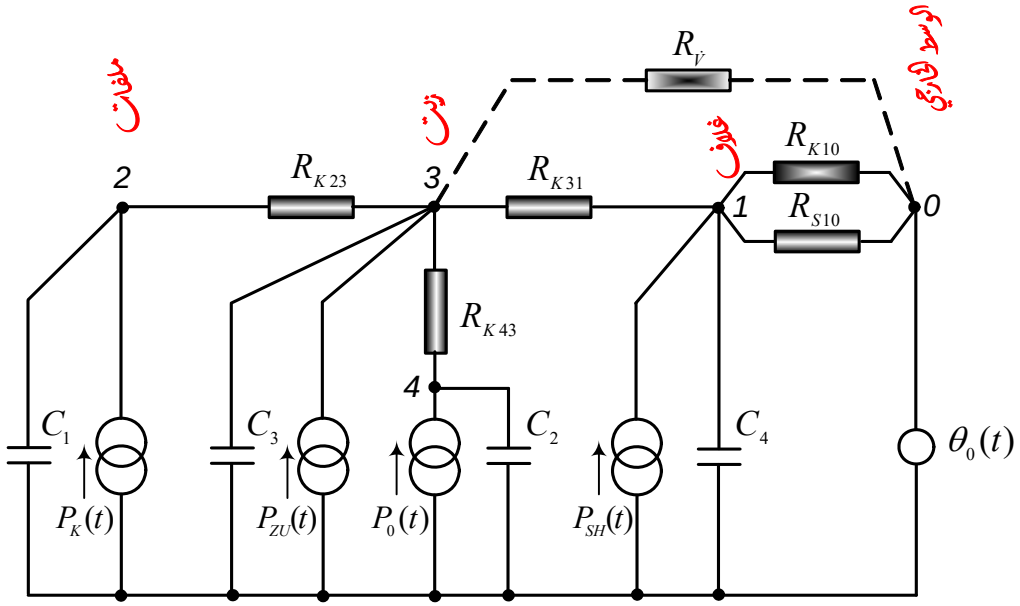
❖ المقاومات الحرارية، وهي:

- ✓ R_{S10} – مقاومة الإشعاع الحراري بين الغلاف والوسط الخارجي .
- ✓ R_{K10} – مقاومة الحَمل الحراري بين الغلاف والوسط الخارجي .
- ✓ R_{K31} – مقاومة تعبر عن انتقال الحرارة بالحَمل من الزيت الى الغلاف .
- ✓ R_{K43} – مقاومة تعبر عن انتقال الحرارة بالحَمل من النواة الى الزيت .
- ✓ R_{K23} – مقاومة تعبر عن انتقال الحرارة بالحَمل من الملفات الى الزيت.
- ✓ R_V – المقاومة الحرارية لوسائط التبريد في حال وجودها .

الدارة الحرارية للمحول:

كما تشمل الدارة الحرارية ما يلي :

❖ السعات الحرارية :



تتغير قيم المنابع الحرارية، والمقاومات الحرارية غير ثابتة مع تغير درجة الحرارة، لذلك يجب تحويل الدارة الخطية إلى دارة غير خطية بإضافة السعات الحرارية ، وهي:

- ✓ السعة الحرارية للملفات **C1** .
- ✓ السعة الحرارية للنواة **C2** .
- ✓ السعة الحرارية للزيت **C3** .
- ✓ السعة الحرارية للغلاف **C4** .

- المنبع الحراري P_K (الضياعات في الملفات) يتعلق بتيار الحمولة الذي يتغير مع الزمن خلال 24 ساعة ، كذلك يتعلق تيار الحمولة بالفصل السائد صيفاً أو شتاءً ، ويوخذ تيار الحمولة الأعظمي في شهر كانون الأول غالباً (الذروة الشتوية أكبر من الذروة الصيفية). كذلك تتعلق قيمة الضياعات P_K بنوعية النحاس المستخدم في الملفات.
- المنبع الحراري $P_{Zu(t)}$ (الضياعات الإضافية في الزيت) يتعلق بتيار الحمولة بنسبة 50 % وبالتوتر بنسبة 50 % أيضاً.
- المنبع الحراري $P_{o(t)}$ (الضياعات على فراغ في النواة) يتعلق بالتوتر، وتعطى هذه الضياعات في جداول من قبل الشركات الصانعة.
- المنبع الحراري P_{SH} (الضياع المعبر عن الإشعاعات الشمسية والكونية) يتعلق بالزمن خلال 24 ساعة، وبالفصل السائد صيفاً أو شتاءً.
- قيمة المقاومة الحرارية R_{K10} تتغير مع سرعة الريح حيث يتحول الحمل الحراري الحر إلى حمل قسري (عند سرعة رياح لا تقل عن 5 m/s). وتتعلق قيمة المقاومات R_{K10} , R_{S10} أيضاً بدرجة حرارة الوسط الخارجي (وبالتالي فهي متغيرة مع الزمن).
- درجة حرارة الوسط الخارجي تتعلق بالزمن، ليلاً نهاراً، صيفاً شتاءً.

من أجل الاستثمار الجيد لهذه المحولات في البلدان الحارة يجب الاتفاق بين المصمم و المستثمر على النقاط التالية :

- ✓ منحني تيار الحمولة اليومي (صيفاً وشتاءً) مبيناً عليه أوقات الذروة بالإضافة إلى درجة الحرارة العظمى وسرعة الريح العظمى و الصغرى ودرجة حرارة الوسط الخارجي وشدة الإشعاع الشمسي و جميع هذه المعلومات يجب أن يقدمها المستثمر.
- ✓ درجات الحرارة الحدية التي لا يجوز تجاوزها في أي عنصر من عناصر المحولة وبشكل خاص درجة الحرارة الحدية للملفات وللزيت، وهذه المعلومات يقدمها المصمم.
- ✓ أثر الشروط الجوية المحيطة (درجة حرارة الوسط الخارجي، سرعة الرياح، شدة الإشعاع الشمسي، ...الخ) على درجة حرارة النقاط الحرجة في المحولة، وهذه المعلومات يقدمها المصمم.
- ✓ يمكن - للمصمم و المستثمر - الاتفاق على الدارة الحرارية للمحولة وتحديد عناصرها وحساب قيمة تيار الحمولة المسموح به.

وفقاً للمواصفات الفنية للشركات الصانعة تتراوح القيمة المسموحة للضياعات الحديدية في محولات القدرة **66/20 kV** عند درجة الحرارة **75 oC** بين **14-20 kW** في حين تتراوح القيمة المسموحة للضياعات النحاسية لهذه المحولات عند نفس درجة الحرارة بين **105-120 kW**. وهي تشكل نسبة **0.5%** من قيمة الطاقة المعدّة للاستهلاك في المحول. أما بالنسبة لمحولات القدرة **20/0.4 kV** فتكون قيمة الضياعات الحديدية عند نفس درجة الحرارة السابقة أقل من **550 W** والنحاسية أقل من **2400 W**، أي ما يشكل **1%** من قيمة الطاقة المعدة للاستهلاك في المحولة.

في حين بيّنت القياسات التجريبية أن نسبة الضياع على محولات **66/20 kV** تبلغ حوالي **1%** وعلى محولات **20/0.4 kV** نسبة **2%** وهذا يتطلب دراسة الأسباب بصورة معمّقة كقياس درجة حرارة الملفات، والتي يجب ألا تتجاوز **75oC**.

ملاحظة: يجب الاعتماد قدر الإمكان على التبريد الطبيعي بالهواء مع الأخذ بالحسبان قياسات المحولات والمساحات المتوفرة لتركيبها. في حال وجود المحولة ضمن بناء يجب اخذ ذلك بالحسبان في الدارة الحرارية المكافئة للمحولة، ويجب أن لا تكون جدران المبنى من القرميد أو البلوك المفرغ ذي مقاومة التوصيل الحراري الكبيرة حتى لا نستخدم مراوح للتبريد، وبالتالي زيادة قيمة الاستهلاك الذاتي.

بينت دراسة تجريبية العلاقة بين الضياعات الكهربائية المتغيرة مع الزمن والتي يكون تيارها الحراري من داخل المحولة إلى الوسط الخارجي، وبين الشروط الجوية المحيطة والتي تتغير مع الزمن أيضاً وتيارها الحراري يكون من الخارج إلى الداخل بحيث تكون إحداهما صغيرة عندما تكون الأخرى كبيرة وبالعكس. وخلصت هذه الدراسة إلى ضرورة عدم تحميل المحولة بحمولتها الاسمية في البلدان الحارة خلال فترة الصيف حيث تكون درجة حرارة الوسط الخارجي وشدة الإشعاع الشمسي أكبر ما يمكن ، وتبلغ الحمولة المسموح بها في هذه الحالة **88 %** من الحمولة الاسمية فقط ، في حين يمكن تحميل المحولات الموجودة في الهواء الطلق بـ **130 %** من حمولتها الاسمية خلال فترة الشتاء حيث تكون شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الوسط الخارجي أصغر ما يمكن بالإضافة إلى أن سرعة الريح تكون كبيرة أيضاً مما يساعد في طرح كمية أكبر من حرارة الغلاف إلى الوسط الخارجي (المقاومة الحرارية R_{S10} تتحول من انتقال الحرارة بالحمل الحر إلى انتقال الحرارة بالحمل القسري) .

تخفيض الفاقد الناتج عن الضياعات الحرارية
في التجهيزات الكهربائية

4. الحسابات في الكابلات

تُغذّى الأحمال ذات الاستطاعات الكبيرة في شبكات التوزيع داخل المدن في المنشآت الصناعية غالباً بواسطة كابلات أرضية ذات تيار حمولة كبير.
والضياعات الكلية التي تحدث في الكابل نتيجة التيار تتعلق بمربع التيار وبمقاومة الناقل وأبعاد ومواصفات الكابل، بالإضافة إلى طريقة مد الكابلات وكيفية تأريض الغلاف المعدني للكابل يمكن أن تسبب بالإضافة إلى الفاقد الكبير في الطاقة حدوث إجهادات حرارية على المادة العازلة للكابل تؤدي إلى تقادمها وانهيارها خلال فترة قصيرة إذا لم يتم طرح الحرارة المكتسبة عبر غلاف الكابل إلى الوسط الخارجي، لذلك تشترط المواصفات القياسية العالمية عند تحديد قيمة تيار الحمولة المسموح به لهذه الكابلات أن تبقى درجات حرارة عناصر الكابل (الناقل، المادة العازلة، الغلاف المعدني) أصغر أو تساوي درجات الحرارة المسموحة لهذه العناصر.

وبما أن تيار الحمولة للكابل ثابت من أجل استطاعة محددة ، وتوتر التغذية وعامل الاستطاعة $Cos\ \varphi$ ثابتين أيضاً يتم تحقيق عملية التوازن الحراري بين كمية الحرارة المكتسبة وكمية الحرارة المطروحة بإحدى الطريقتين :

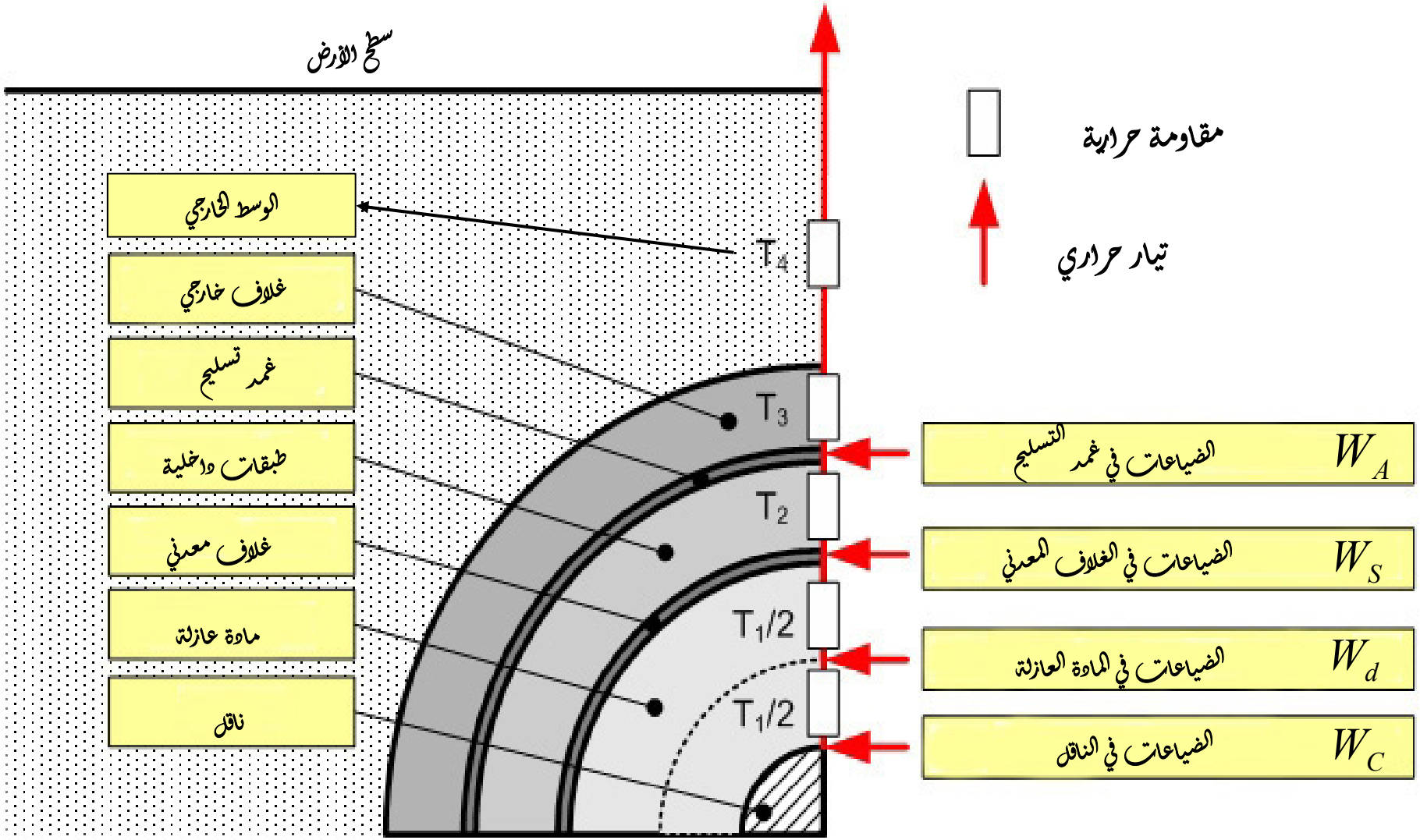
- تخفيض كمية الحرارة المكتسبة بزيادة مقطع ناقل الكابل، وهذا يتطلب زيادة كبيرة في الكلفة التأسيسية للكابل (ثمن الكابل). بالمقابل تقل قيمة الضياعات في الكابل ، أي تقل الكلفة الجارية (كلفة الضياعات) .
- زيادة كمية الحرارة المطروحة من الكابل إلى الوسط الخارجي عند مقطع ثابت لناقل الكابل بتحسين الناقلية الحرارية للتربة المغلفة للكابلات وزيادة سماكة هذه التربة فوق الكابل، وبالتالي ستزداد الكلفة التأسيسية بشكل طفيف جداً.

ولكن للأسف فإن الدراسات التي تقوم بها جهات عامة وخاصة في القطر غالباً لا تأخذ بالحسبان قيمة المقاومة الحرارية النوعية للتربة المغلفة للكابل عند حساب مقطع الناقل، حيث يتم تحديد مقطع الناقل من أجل تيار حمولة ثابت من جداول واردة في بعض المراجع التي يعتمد عليها أغلب الزملاء الدارسين، وهذه القيم محسوبة على ان المقاومة الحرارية النوعية للتربة المغلفة للكابل تبلغ **1.2 K^o.m/W**، (**IEC60287-1**)، ولكن هذه القيمة أصغر من المقاومة الحرارية النوعية لجميع أنواع الرمل المستخدم في تغليف الكابلات في بلدنا مما يسبب زيادة الفاقد في الكابل أو انهياره بعد فترة قليلة من الاستخدام.

يتم حساب تيار الحمولة في الكابلات وفق النظم العالمية **IEC** استناداً للدارة الحرارية للكابل:

الدارة الحرارية لكابل مفرد مطمور في التربة

$$W_C + W_d + W_S + W_A$$



ونحسب تيار الحمولة بدلالة الدارة الحرارية كما يلي:

$$\Delta\theta_L = \theta_{le} - \theta_0 = P \cdot \sum T$$

حيث: P - الضياعات في الناقل.

$\sum T$ - مجموع المقاومات التي يسري بها التيار الحراري الناتج عن الضياعات.

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

R_W - المقاومة الأومية للناقل.

أما مقطع الناقل بدلالة تيار الحمولة فيحسب من العلاقة:

$$A = \frac{(I^2 \cdot \rho \cdot l) \cdot [T_1 + (1+\lambda_1)T_2 + (1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4)]}{\Delta\theta - W_d(\frac{T_1}{2} + T_2 + T_3 + T_4)}$$

باعتبار I^2, T_1, T_2, T_3 ثوابت.

نلاحظ من العلاقة السابقة أن A تتناسب طرداً مع ρ ومع الضياعات في الغلاف T_4 والمقاومة الحرارية λ_2 المعدني والضياعات في الغمد المعدني λ_1 المعدني

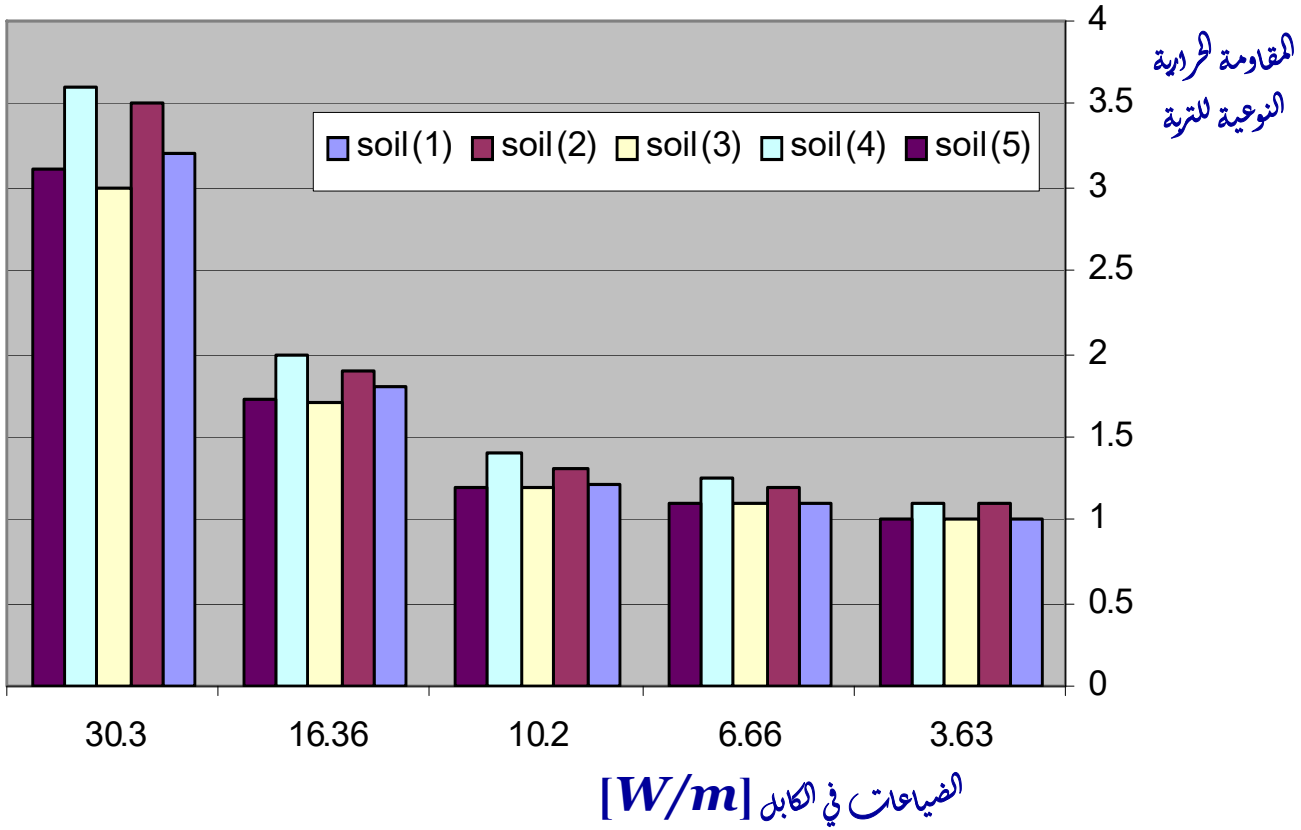
الخطوة الأولى التي يجب القيام بها عند حساب تيار الحمولة في الكابلات الأرضية هي تحديد قيمة المقاومة الحرارية النوعية للتربة المغلفة للكابل على طول مساره بأخذ عينات مختلفة منها على مسافات محددة.

وتتعلق المقاومة الحرارية النوعية للتربة بالخواص الفيزيائية والميكانيكية لهذه التربة وبقيمة الضياعات في الناقل.

وقد بيّنت نتائج دراسة تجريبية أجريت في مخابر جامعة تشرين لقياس المقاومة الحرارية لبعض انواع الرمل المستخدمة في تغليف الكابلات في بلدنا لها الخواص الفيزيائية والميكانيكية التالية:

- أنواع التربة المختبرة :
  1- تربة رملية (منطقة النبك قرب دمشق) **Soil (1)**؛
  2- تربة رملية بحرية (الشاطئ الجنوبي قرب اللاذقية) **Soil (2)**؛
  3- تربة رملية عدسية (إنتاج الكسارات قرب اللاذقية) **Soil (3)**؛
  4- تربة رملية نهرية (نهر الكبير الشمالي) **Soil (4)**؛
  5- تربة رملية نهرية (نهر مرقية قرب طرطوس) **Soil (5)**؛
  6- تربة محسنة مكونة من رمل عدسي بعد إضافة الغبار بنسبة **12 %**.

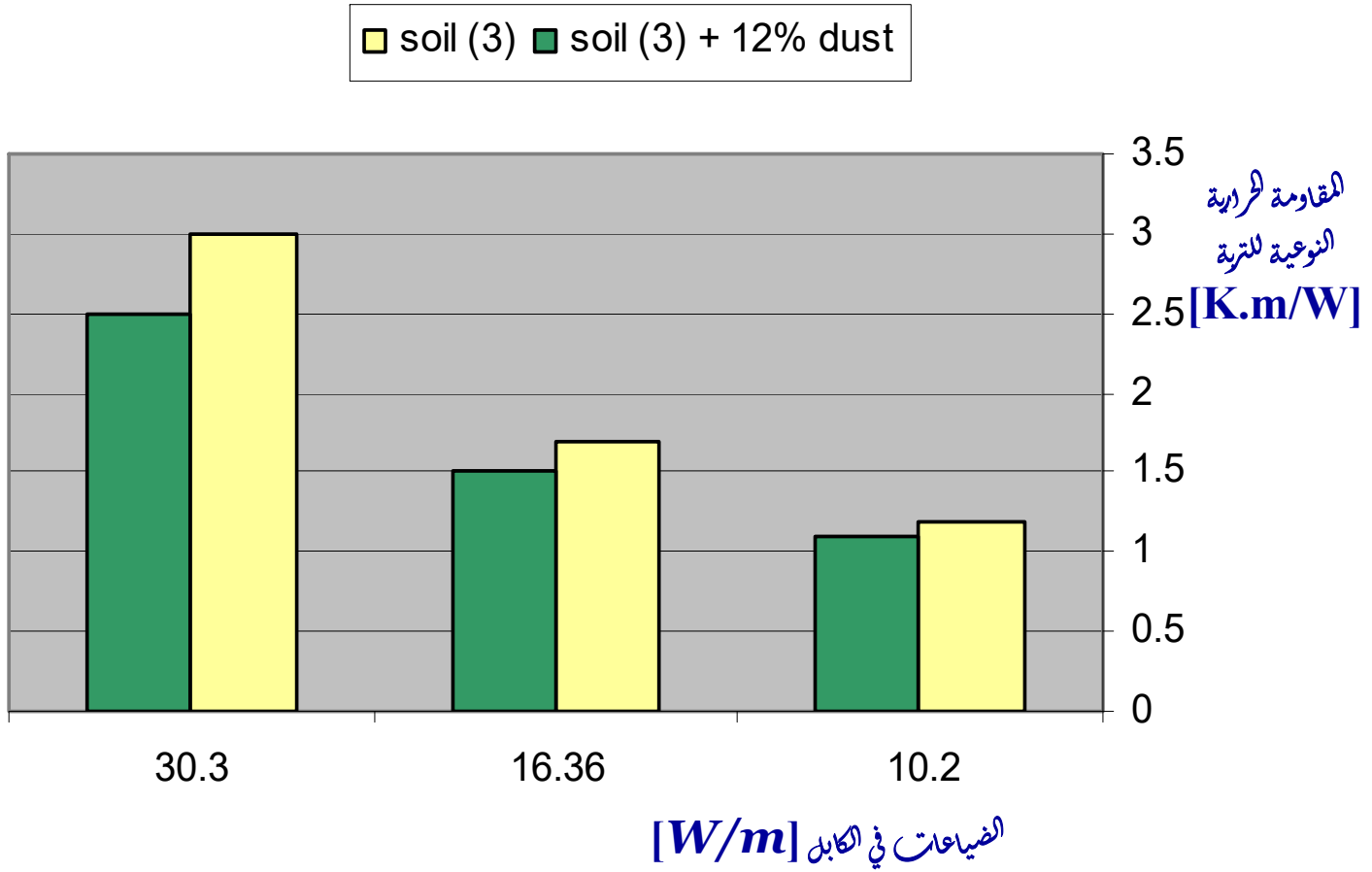
نوع التربة	قطر أكبر الحبيبات *mm*	بحص %	رمل %	الكثافة الجافة g/cm^3	نسبة الرطوبة %	الوزن النوعي	عدم التجانس الحبيبي *(u)*
رمل نبكي *Soil (1)*	9.25	14.4	85.35	1.450	9.1	2.67	5.3
رمل بحري *Soil (2)*	2.36	0.1	99.9	1.543	3.33	2.68	2.4
رمل عدسي *Soil (3)*	9.25	56.6	41.8	1.380	4.52	2.72	17.5
رمل نهري اللاذقية	4.75	2.8	95.7	1.062	8	2.7	4
رمل نهري طرطوس	19.1	43.52	56.48	1.430	7.5	2.71	8.5
تربة محسنة رمل عدسي + غبار	9.25	34.4	65.6	1.440	5.2	2.82	35



المقاومة الحرارية النوعية لعينات التربة المختبرة من أجل ضياعات مختلفة .

نلاحظ من الشكل أن المقاومة الحرارية النوعية للتربة تزداد بزيادة الضياعات في الكابل نتيجة هجرة الرطوبة من التربة المجاورة للكابل، وبالتالي عند حساب تيار الحمولة في الكابل يجب ألا تزيد قيمة الضياعات عن قيمة **6.6 w/m** حتى تكون قيمة المقاومة الحرارية النوعية للتربة (قريبة من القيمة الحدية) (وهذا يعني تيار حمولة صغير جداً بالمقارنة مع تيار الحمولة الوارد في الجداول المستخدمة)، في حال زيادة الضياعات عن هذه القيمة يجب استخدام عوامل التصحيح المناسبة.

عند إضافة 12% غبار صخري على عينة الرمل العدسي نلاحظ تحسن في المقاومة الحرارية النوعية للتربة، وعند قيمة ضياعات في الكابل حتى 10 W/m تبقى المقاومة الحرارية للتربة أقل من القيمة الحدية.



المقاومة الحرارية النوعية للتربة المحسنة .

عوامل التصحيح حسب المقاومة الحرارية النوعية للتربة

تسبب المقاومة الحرارية النوعية الكبيرة للتربة في قلة كمية الحرارة المطروحة من الكابل إلى الوسط الخارجي. 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 $^oC.m/W$	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

تستخدم طبقة من الرمل لتغليف الكابل في بلدنا سماكتها حوالي **30 cm**، ولكن الدراسات التجريبية بيّنت أن كلفة مد الكابلات عند تغليف الكابل بتربة ذات خواص حرارية محسّنة حتى سماكة **120 cm** فوق الكابل تزداد بمقدار **4 %** فقط (من الكلفة التأسيسية) مقابل زيادة مقدارها **14 %** في قيمة تيار الحمولة بدون أن تتجاوز درجات الحرارة في عناصر الكابل لدرجات الحرارة المسموحة (باعتبار أن التيار الحراري المطروح من غلاف الكابل سوف ينطلق إلى الأفق).

فعلى سبيل المثال: ليكن لدينا كابل توتر متوسط من النوع **N2XS2Y** بأبعاد مختلفة . الغلاف المعدني مؤرض من الجهتين ، الكابل له المواصفات المبينة في الجدول التالي ، وهذا النموذج هو من أكثر أنواع كابلات التوتر المتوسط استخداماً) .

مواصفات الكابل	النموذج الأول	النموذج الثاني
مقطع الناقل	120 mm²	240 mm²
قطر الناقل d_L	12.8 mm	18.4 mm
مقاومة الناقل للتيار المتناوب R_W في الدرجة $20\ ^\circ C$	0.28 Ω / Km	0.14 Ω / Km
سماكة الطبقة الناقلة الداخلية d_{f1}	0.6 mm	0.6 mm
سماكة المادة العازلة	5.5 mm	5.5 mm
قطر الكابل حتى السطح الخارجي للمادة العازلة d_1	25 mm	30.6 mm
قطر أسلاك الغلاف المعدني	0.9 mm	0.9 mm
مقطع الغلاف المعدني	25 mm²	25 mm²
القطر حتى السطح الخارجي للغلاف المعدني d_M	28.8 mm	34.4 mm
مقاومة الغلاف في الدرجة $R_M\ 20^\circ C$	0.691 Ω / Km	0.691 Ω / Km
سماكة الغلاف المانع للرطوبة	0.05 mm	0.05 mm
سماكة الغلاف الخارجي PVC	2.1 mm	2.1 mm
القطر الخارجي للكابل	33.1 mm	38.7 mm

مواصفات نماذج الكابلات المختبرة .

قيمة تيار الحمولة المسموح به لهذا النوع من الكابلات هو $I = 300\ A$ حسب الشروط النظامية، $\rho_{Th}=1.2\ K^o.m/W$ ،
وبالتالي تبلغ قيمة الضياعات في الناقل:

مقاومة الناقل للتيار المستمر عند درجة الحرارة 20^oC:

$$R'_{20} = 0.202\times10^{-3}[\Omega/m]$$

المقاومة الفعالة عند مد الكابلات بالقرب من بعضها البعض على شكل مثلث:

$$R'_W = R'_{20}\cdot(1+y_S+y_P)\cdot(1+\lambda_1+\lambda_2)$$

y_S — عامل الخاصة القشرية.

y_P — عامل الخاصة التقاربية.

$$R'_W = 0.280\times10^{-3}[\Omega/m]$$

$$P_L = I^2\cdot R = (300)^2\times0.280\times10^{-3}[\Omega/m]$$

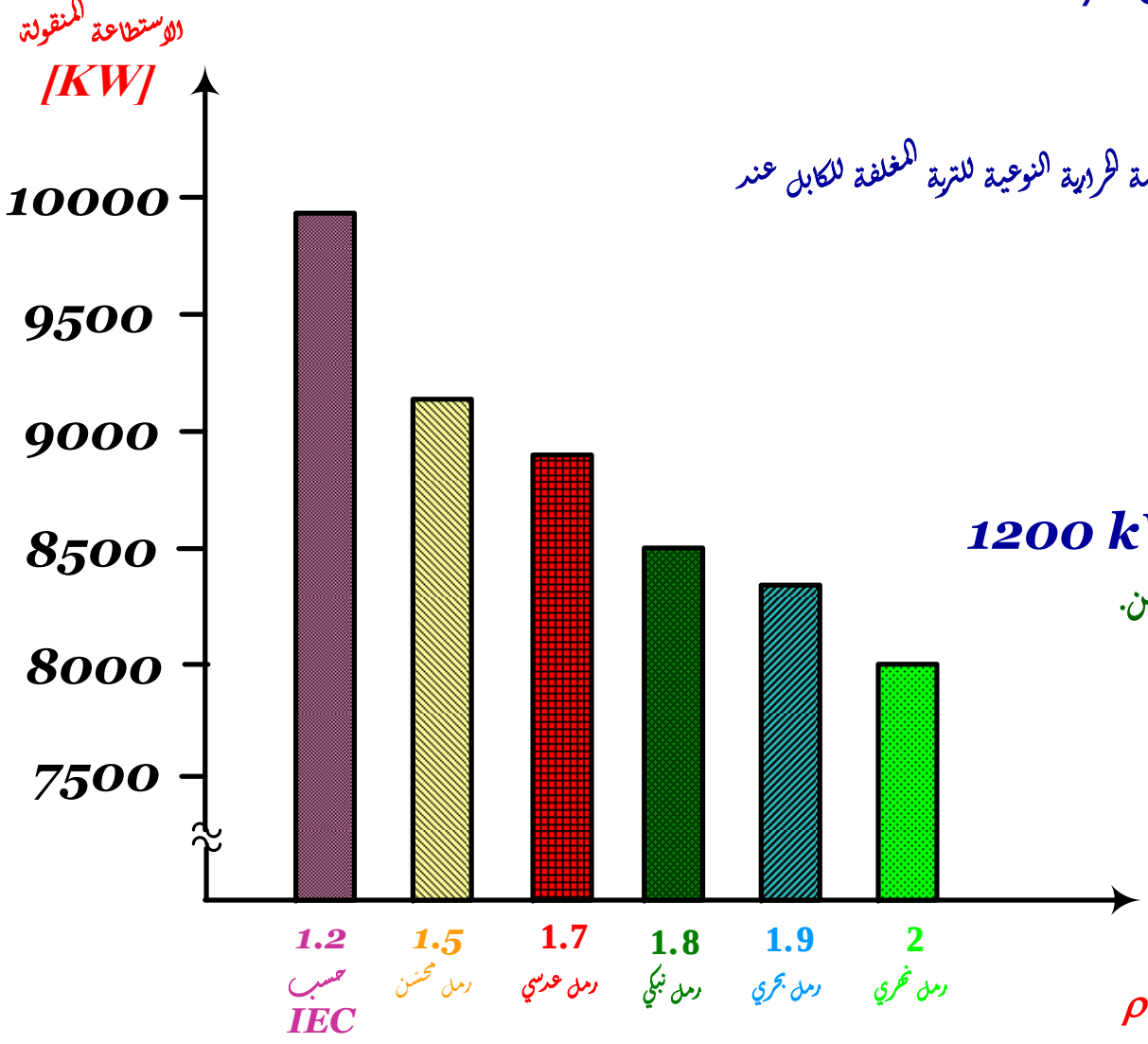
$$P_L = 25.2\ [w/m]$$

وحتى لا تتجاوز درجة الحرارة في عناصر الكابل درجة الحرارة الحدية. يجب أن تكون الضياعات في الكابل اقل من $10\ W/m$ في حال تغليف الكابل بتربة محسنة، أي أن تيار الحمولة للكابل يجب ألا يتجاوز $190\ A$ أما من أجل تيار حمولة مثلاً $240\ A$ أي الضياعات الكلية في الكابل $16\ W/m$ تتغير قيمة الاستطاعة المنقولة وفق المقاومات الحرارية النوعية لكل نوع من أنواع التربة المغلفة للكابل عند هذه الضياعات

العلاقة بين الاستطاعة المنقولة ونوع الترية المغلفة

لنظام كابلات ثلاثي الأطوار من النموذج **NA2XSY 1x120 RM/25 12/20 kV**.

بضرب تيار الحمولة المسموح بعامل التصحيح وفق المقاومة الحرارية النوعية للترية المغلفة للكابل عند قيمة الضياعات الكلية **16 W/m**.



نلاحظ من الشكل أن الاستطاعة المنقولة تقل بمقدار **1200 kW** عند تغليف الكابل برمل عدسي غير محسن.

أما عند نقل استطاعة ثابتة، يتم حساب الضياعات ودرجات الحرارة في عناصر الكابل بواسطة برنامج حاسوبي في ثلاث حالات:

1. الحالة الأولى: المقاومة الحرارية النوعية للتربة **1.2 °Km/W**، مقطع الناقل **120 mm²** (تربة محسّنة).
2. الحالة الثانية: بحساب مقطع الناقل اللازم لنقل تيار قدره **300 A** عند مقاومة حرارية نوعية للتربة المغلّفة تساوي **2.5 °Km/W** بدون أن تتجاوز درجات الحرارة لعناصر الكابل درجات الحرارة الحدية (مقطع الناقل في هذه الحالة يساوي **240 mm²**) الضياعات أقل من **10 W/m**، وقد بيّنت نتائج الدراسة التجريبية أن قيمة المقاومة الحرارية النوعية للرمل العدسي والرمل النبكي الأكثر استخداماً في تغليف الكابلات في بلدنا من أجل ضياعات في الناقل تساوي **30 W/m** تتراوح بين **2.5 – 3 °Km/W**.
3. الحالة الثالثة: المقاومة الحرارية النوعية للتربة **2.5 °Km/W**، مقطع الناقل **120 mm²**. وقد تم أخذ هذه الحالة بالحسبان لبيان القيمة الكبيرة للضياعات في الكابل بالإضافة الى الارتفاع الكبير في درجات حرارة عناصر الكابل عن القيم المسموحة، مما يفسّر مظاهر الانهيار الحراري للكابلات التي حدثت في بعض المنشآت العامة في القطر.

الحالة الثالثة $A=120\ mm^2$	الحالة الثانية $A=240\ mm^2$	الحالة الأولى $A=120\ mm^2$	
2.5	2.5	1.2	المقاومة الحرارية النوعية للتربة $[°Km/W]$
131	82.6	81.4	درجة حرارة الغلاف الخارجي للكابل $[°C]$
132.5	83.2	82.4	درجة حرارة الغلاف المعدني $[°C]$
143	85.9	90	درجة حرارة الناقل $[°C]$
0.0141	0.0496	0.0213	عامل الضياع في الغلاف المعدني λ
37.4	16.11	32.22	الضياعات في الناقل $P_L\ [W/m]$
0.523	0.8	0.686	الضياعات في الغلاف $\lambda \cdot P_L\ [W/m]$
37.9	16.91	32.9	مجموع الضياعات في كل طور $[W/m]$

عامل التحميل $m=1$، عمق الطمر $120\ cm$ ودرجة حرارة التربة $35\ °C$ تيار حمولة ثابت $300\ A$.

نتائج حساب درجات الحرارة والضياعات الحرارية
في النماذج السابقة للكابلات وذلك من أجل الحالات الثلاثة المذكورة .

نلاحظ من الجدول السابق أن استخدام الكابلات في الحالة الثالثة يسبب حدوث انهيار حراري للمادة العازلة خلال فترة استخدام قصيرة

☜ مقارنة الجدوى الاقتصادية في الكابلات الأرضية من أجل تيار حمولة ثابت :

يجب أن تتم المقارنة الاقتصادية للكابلات المطمورة وفق الحالتين الأولى والثانية .
الكلفة الكلية للكابلات الأرضية تشمل الكلفة الأولية (ثمن الكابل، أجور حفر الخندق، مد الكابل، ...الخ) والكلفة الجارية : وهي كلفة الضياعات والصيانة . فبفرض أن الفرق بين أجور الحفر والنقل ومد الكابلات قليلة ، وبالتالي يمكن اعتبارها ثابتة في الحالتين . بفرض أن سعر الكابل من النوع **N2XS2Y 12/20 kV** مقطعه **120 mm²** نصف سعر الكابل من نفس النوع ولكن بمقطع **240 mm²**. فإذا كان سعر المتر فرضاً من الكابل الأول **10000** ل.س ومن الثاني **20000** ل.س.

يكون ثمن الكابل ثلاثي الأطوار ذي المقطع $120\ mm^2$ ولمسافة $500\ m$ هو 1.5 مليون ليرة سورية، وثمن الكابل ذي المقطع $240\ mm^2$ هو 30 مليون ليرة سورية، يُضاف لكل متر طولي من نظام الكابلات مبلغ 500 ل.س كاجور حفر الخندق ونقل ومد وطمر الكابلات، وهذه القيمة ثابتة تقريباً في الحالتين.

الكلفة التأسيسية لنظام الكابلات وفق الحالة الأولى تساوي:

$$C1 = (500 \times 500) + 15000000 = 17500000\ S.P$$

يُضاف إلى القيمة السابقة $4\ \%$ من الكلفة الكلية عند طمر الكابل بترية محسّنة على عمق $120\ cm$، أي $700000\ S.P$، وبالتالي تصبح الكلفة التأسيسية الكلية :

$$C1 = 700000 + 17500000 = 18200000\ S.P$$

الكلفة التأسيسية لنظام الكابلات وفق الحالة الثانية تساوي

$$C2 = (500 \times 500) + 30000000 = 32500000\ S.P$$

وتُعطى كلفة الضياعات السنوية بالعلاقة :

$$K_V = P_L \times 3 \times l \times S_T \times h_V$$

حيث :

P_L- الضياعات في الطور الواحد .

l- طول الكابل .

S_T- كلفة الكيلوواط ساعي .

h_V- عدد ساعات العمل في العام ، وتُفرض ساعات العمل في العام 7000 ساعة لمعمل بثلاث ورديات .

من الجدول السابق نجد أن الضياعات السنوية في الحالة الأولى :

$$P_{1year} = 32.9 \times 3 \times 500 \times 7000 \times 10^{-3} = 345450 \quad [KWh]$$

ونفرض أن كلفة الكيلوواط الساعي هي (40 S.P) مثلاً، فإن كلفة الضياعات السنوية للحالة الأولى تبلغ :

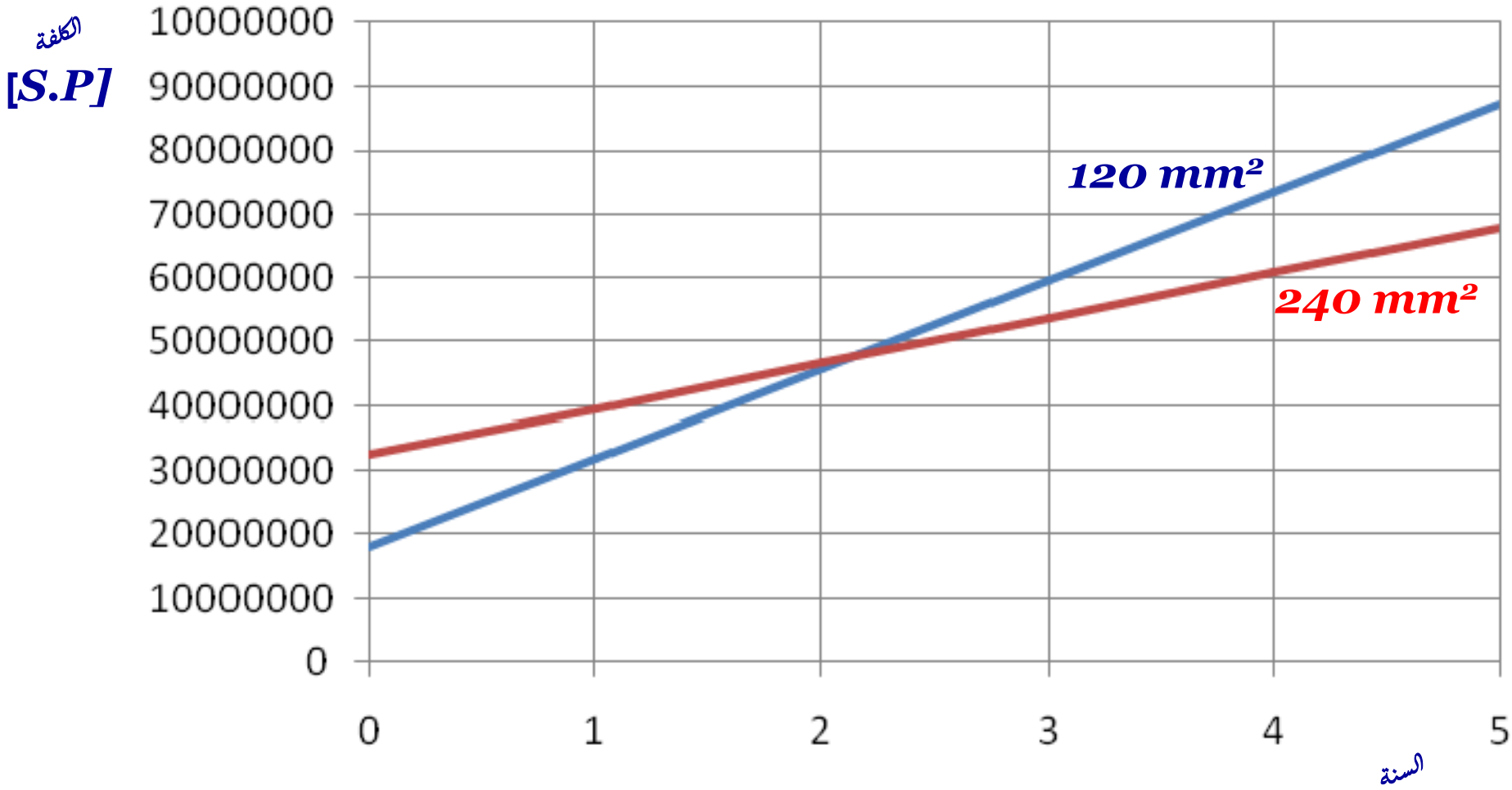
$$C_{1year(40)} = 345450 \times 40 = 13818000 \text{ S.P}$$

الضياعات السنوية في الحالة الثانية :

$$P_{2year} = 16.91 \times 3 \times 500 \times 7000 \times 10^{-3} = 177555 \quad [KWh]$$

كلفة الضياعات السنوية للحالة الثانية من أجل كلفة للكيلوواط الساعي مقدارها (40 S.P) :

$$C_{2year(0.6)} = 177555 \times 40 = 7102200 \text{ S.P}$$



العلاقة بين كلفة استثمار الكابل بدلالة سنوات الاستخدام
وذلك من أجل سعر 40 [S.P] للكيلوواط الساعي.

✸ملاحظات عامة:

يجب الأخذ بالحسبان أيضاً أن طريقة تأريض الغلاف المعدني للكابلات تلعب دوراً أساسياً في الفاقد

1- تبلغ نسبة الضياعات الإضافية في غلاف الكابلات حوالي **30%** وذلك عند تمديدها بجانب بعضها بتباعد بين الأطوار (الكابلات المفردة) قدره **70 mm** (المسافة التي تنصح بها **IEC**)، وتزداد هذه النسبة بزيادة مسافة التباعد بين الكابلات حتى تصبح أكبر من الضياعات في الناقل عند مسافة بين الأطوار حوالي **200 mm**. لذلك لا بد من تحديد المسافة بين الأطوار بدقة وعدم السماح بتجاوزها.

2- يمكن خفض الضياعات الإضافية عند تأريض الغلاف من الجهتين باتخاذ بعض الإجراءات (تصالب تأريض الأغلفة **Gross Bonding**) وخاصة في حالة الأطوال الكبيرة، أو تمديد الكابلات على شكل مثلثي مع ترك مسافة صغيرة بينها حتى لا تحدث إعاقة لعملية التبادل الحراري، ولكن حتى عند اتخاذ الإجراءات الآنفة الذكر فإن نسبة الضياعات تبلغ حوالي **12%** من ضياعات الناقل وهي نسبة كبيرة من أجل تيارات عالية وأطوال كبيرة.

3- تزداد الضياعات الإضافية بزيادة طول الكابلات بسبب زيادة مقاومة الناقل، وبالتالي زيادة الضياعات فيه. فعند مسافات قصيرة وتيارات حمولة صغيرة نسبياً يكون تأريض الغلاف من الجهتين سهل واقتصادي، أما عند المسافات الطويلة والتيارات العالية تصبح هذه الطريقة غير اقتصادية، وبالتالي يجب تحديد الأطوال التي يُسمح فيها بتأريض الكابلات من الجهتين. ومن أجل أطوال أكبر لا بد من اعتماد طرق أخرى كتأريض الغلاف المعدني من جهة واحدة مثلاً، وهذا يزيد كلفة التأسيس ويخفض كلفة الضياعات.

1 الخلاصة
Conclusion

يشكل الفاقد الحراري في التجهيزات الكهربائية أهم العوامل المتعلقة بزيادة الفاقد في الشبكة، بالإضافة الى إمكانية تسببه في حدوث الحرائق. وفي جميع الدراسات والأبحاث المتعلقة بتخفيض الفاقد في سورية لم تتم دراسة هذا العامل بشكل تفصيلي، ولم يتم توضيح آلية حسابه.
في هذا البحث تم الاعتماد على نظرية الدارة الحرارية المشابهة للدارة الكهربائية لتحديد تيار الحمولة و تخفيض الضياعات في النواقل.

✓ عند حساب تيار الحمولة في النواقل الممددة في الهواء الطلق يجب الأخذ بالحسبان مقاومات نقاط الوصل و التثبيت. و لتخفيض قيمة الفاقد يجب أن تكون النواقل خالية من الوصلات قدر الإمكان، وفي حال وجودها يجب ان تنفذ بشكل صحيح.
✓ يتعلق الفاقد في اللوحات الكهربائية ببعد النواقل عن غلاف اللوحة وتنفيذ نقاط الوصل بشكل جيد واستخدام الأدوات المناسبة في تصنيع اللوحة. ويجب وضع مواصفة قياسية سورية واضحة وصارمة في هذا المجال (أغلب الحرائق في اللوحات الكهربائية سببه عدم التنفيذ الصحيح للوحات).

2

الخلاصة
Conclusion

✓ يمكن تخفيض الفاقد في المحولات باستخدام نحاس نقي في الملفات، وعند وضع المحولات ضمن بناء يجب أخذ عملية التبادل الحراري بالحسبان (جدار البناء يجب أن يكون ناقلاً جيداً للحرارة وألا يكون من القرميد)، ويفضل ان يتم التبريد بالهواء الطبيعي لتجنب زيادة الاستهلاك الذاتي للمراوح، وعدم تعرض المحولة للإشعاع الشمسي لفترة طويلة (اتجاها الغرب والجنوب مغلقان).

✓ يتعلق الفاقد في الكابلات بمواصفات الكابل (المقاومة الفعلية للناقل) وطريقة ومكان مد الكابل وطريقة تأريض الغلاف المعدني له والمقاومة الحرارية للتربة المغلفة له. في شبكات التوزيع يجب تأريض الغلاف المعدني من الطرفين، ولكن يتم تمديد النواقل على شكل مثلثي، او يتم تبديل مكان الأغلفة المعدنية للأطوار في علب الوصل إذا كان طول الكابل كبير.

✓ يجب أن تكون التربة المغلفة للكابل ذات ناقلية حرارية جيدة، ويجب أن تكون على كامل ارتفاع خندق الكابل، في حال استخدام تيار الحمولة من الجدول، وبدون اخذ عملية التبادل الحراري للكابل بالحسبان يمكن حدوث حريق في الكابل، او تقادم في المادة العازلة.

C_ρ	معدن النواقل منطقة الوصل خفيفة
$(0.08 \dots 0.14)\times10^{-3}$	نحاس - نحاس
$(0.01 \dots 0.07)\times10^{-3}$	نحاس – نحاس مقصدر
0.01×10^{-3}	نحاس مقصدر – نحاس مقصدر
0.67×10^{-3}	نحاس أصفر – نحاس أصفر
0.38×10^{-3}	نحاس أصفر – نحاس
$(0.18 \dots 0.4)\times10^{-3}$	ألمنيوم – ألمنيوم
1.9×10^{-3}	ألمنيوم – نحاس أصفر
0.98×10^{-3}	ألمنيوم – نحاس
4.4×10^{-3}	ألمنيوم – حديد
7.6×10^{-3}	حديد – حديد
3×10^{-3}	حديد – نحاس أصفر
3×10^{-3}	حديد – نحاس
0.06×10^{-3}	حديد - فضة

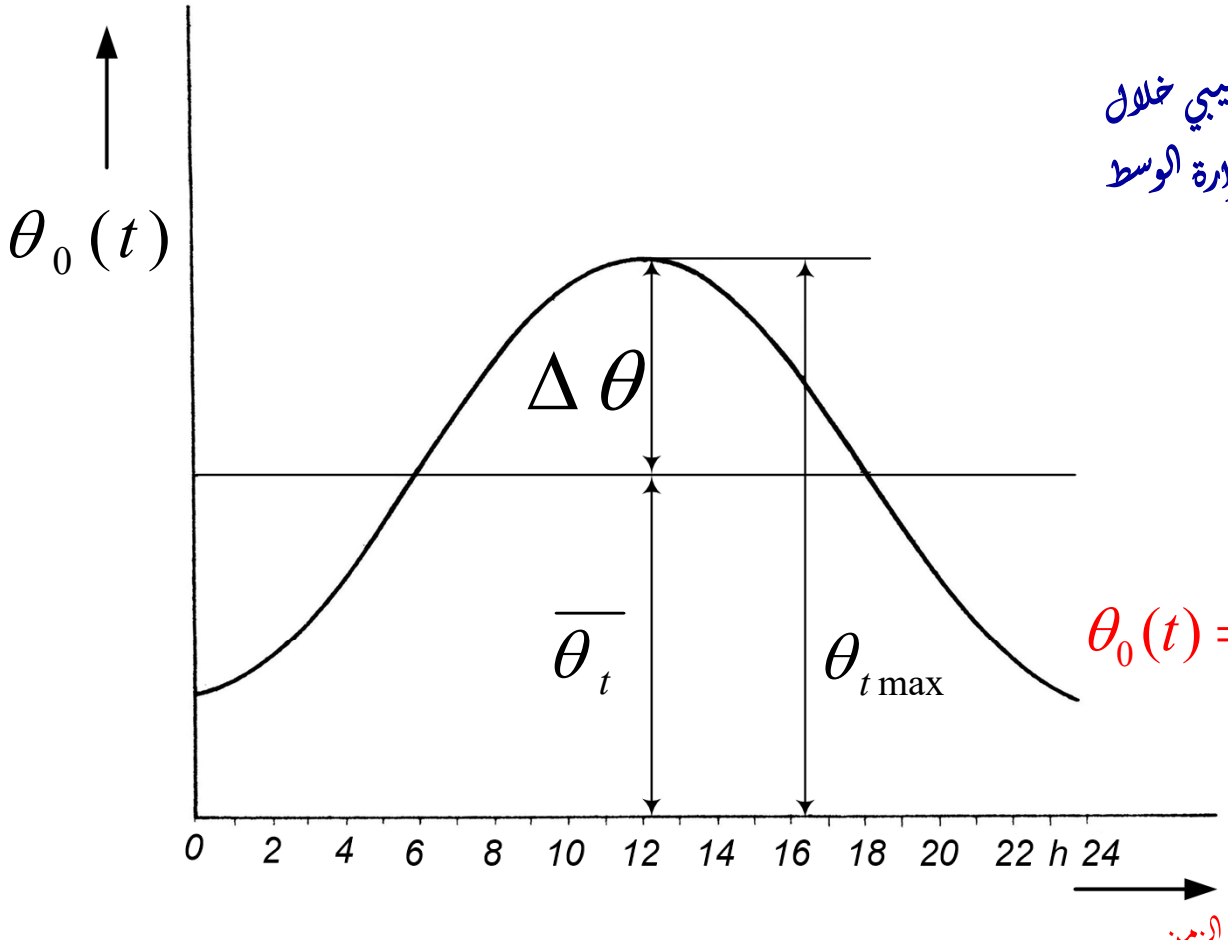
قيم الثابت C_ρ

شكل الاتصال	m
سطح مستوٍ – سطح مستوٍ	1
مدبب – سطح مستوٍ	0.5
كرة – سطح مستوٍ	0.5
كرة – كرة	0.5
بارات تيار مستطيلة	0.5 ... 0.7

قيم الثابت m

درجة حرارة الوسط الخارجي:

بما أن درجة حرارة الوسط الخارجي تتغير بشكل جيبي خلال **24** ساعة يتم تحديد القيمة الوسطى لدرجة حرارة الوسط الخارجي كما يلي:



$$\Delta\theta = \theta_{t\max} - \overline{\theta}_t$$

$$\theta_0(t) = (\overline{\theta}_t - \Delta\theta)\cos\frac{2\pi}{24h}(t - \Delta t)$$

Δt – الفرق الزمني بين ساعة حدوث درجة الحرارة العظمى $\theta_{t\ max}$ والساعة **12**.

وتتراوح درجة حرارة الوسط الخارجي أثناء الاختبار $10\ ℃ < \theta o < 40\ ℃$.

درجة حرارة الوسط الخارجي خلال **24** ساعة

$\overline{\theta}_t$ – درجة الحرارة الوسطية اليومية.

$\theta_{t\max}$ – درجة الحرارة العظمى اليومية.

الضياعات الحديدية	
الاستطاعة [kVA]	الفاقد [W]
25	100
50	200
100	300
200	500
400	800
630	1100
1000	1300

يتم الحد من هذا الفاقد عبر تصنيع القلب الحديدي من شرائح رقيقة من الحديد المطاوع السيليكوني معزولة عن بعضها للحد من التيارات الإعصارية.