

صناعة النوابض الفولاذية باستخدام الطاقة الحرارية للحقول الكهرومغناطيسية

د. جهاد بدور*

د. عدنان علي**

(تاريخ الإيداع 21 / 7 / 2011. قُبل للنشر في 12 / 12 / 2011)

□ ملخص □

تشغل النوابض دوراً مهماً في الكثير من أنواع الآلات والتجهيزات الميكانيكية والكهربائية وفي مختلف نواحي الحياة العملية. لتصنيع النوابض من الأسلاك الفولاذية بشكلها اللولبي لا بد من تسخينها، حيث استخدمت طرق تسخين يصدر عنها ملوثات كثيرة كالدخان، النفايات، والضجيج، لها أثرها السلبي في البيئة وصحة الإنسان. لذلك كان لابد من استخدام طريقة حديثة للتسخين، وهي الطاقة الحرارية للحقول الكهرومغناطيسية التي لا ينتج عنها أي دخان أو نفايات، وبالتالي يتم المحافظة على بيئة نظيفة مما ينعكس إيجاباً على الإنسان. لتوليد هذه الحقول الكهرومغناطيسية تم تصميم ملف ذي شكل خاص غايته تمرير التيار الكهربائي اللازم لهذا الغرض ثم معرفة كيفية توزيع الحقل بغية تحديد المنطقة التي يكون فيها التسخين منتظماً ومعرفة تأثير زاوية ميلان الملف على انتظام التسخين.

الكلمات المفتاحية: صناعة النوابض، الحقول الكهرومغناطيسية.

* أستاذ مساعد في قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Using Thermal Power of Electromagnetic Fields For Manufacturing Steel Springs

Dr. Jihad Baddour*
Dr. Adnan Ali**

(Received 21 / 7 / 2011. Accepted 12 / 12 / 2011)

□ ABSTRACT □

Springs play an important role in all types of mechanical and electrical machines and equipment as well in all aspects of practical life. In order to manufacture springs, steel wires have to be heated. Many heating methods are used to produce different types of pollution such as smoke and noise. These polluted products have negative effects on the environment and human health. For this reason, there is a need for a new heating method like the thermal power of electromagnetic field that does not have any polluting waste. It maintains a clean environment positively reflecting on humans. For generating these electromagnetic fields, a special form of coil has been designed; its main purpose is to pass the proper electrical current, checking how the field is distributed for determining the area of uniform heating and examining the effect of the coil tilting angle on heating uniformity.

Keyword: spring manufacturing, electromagnetic field.

* Associate Professor, Department of Mechanical Power, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Associate Professor, Department of Electrical Power, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تسمى طريقة استخدام طاقة الحقول الكهرومغناطيسية الحرارية لتسخين الأسلاك المعدنية بالطريقة التحريضية، وفيها يتشابك الحقل الكهرومغناطيسي مع تلك الأسلاك وتتعرض فيها تيارات دوامية عالية الشدة تؤدي إلى زيادة الضياعات الحرارية فيها وبالتالي تتم عملية التسخين.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى استعمال ملف ذي شكل خاص لتمرير التيار الكهربائي للحصول على حقل كهرومغناطيسي لتسخين الأسلاك المعدنية تحريضياً، ثم تمثيل الظواهر الكهروحرارية، والحصول على تسخين متجانس لكل الأسلاك، وتحديد قيمة زاوية ميلان الملف التي يكون عندها التسخين متجانساً، وتحديد مركبات تؤثر الحقل الكهرومغناطيسي والجهد الكهربائي في كل نقطة واقعة ضمن الملف، وإعداد خوارزمية تساعد في إجراء الحسابات اللازمة.

طرائق البحث ومواده:

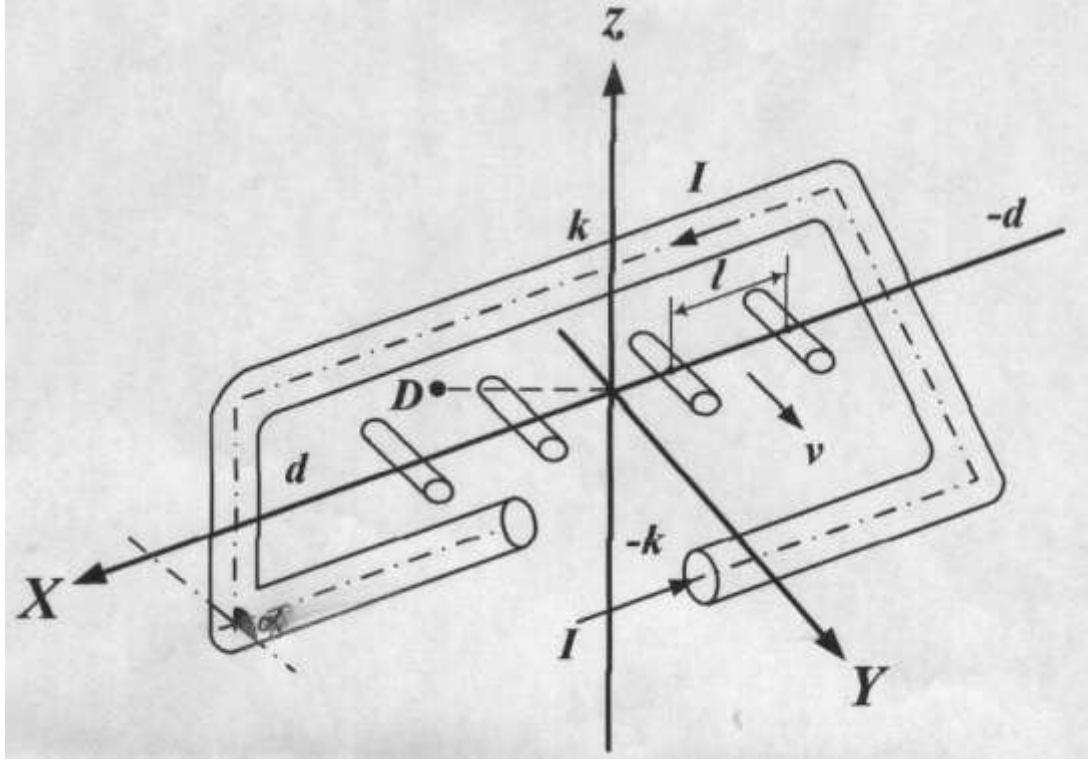
أنجز هذا البحث اعتماداً على أبحاث ومراجع نشرت في المجالات التالية:

- نظرية التسخين التحريضي لمختلف أنواع المعادن.
- الأفران التحريضية على شكل حوالة وشكل قناة.
- الآلات التحريضية الخطية.

اعتماداً على ما سبق سنقوم بوضع النموذج الرياضي لتمثيل الظواهر الكهروحرارية الناتجة عن مرور تيار كهربائي في ملف ذي شكل خاص للحصول على حقل كهرومغناطيسي يعمل على تسخين الأسلاك الفولاذية من أجل تصنيع النوابض الفولاذية، واعتماداً على هذا النموذج سنقوم بوضع برنامج حاسوبي باستخدام لغة الفورتران.

التحليل الرياضي:

يتألف الحقل الكهرومغناطيسي من مركبتين: المركبة الأولى هي شدة الحقل الكهرومغناطيسي H وهي الدور الأساسي في عملية تسخين المعادن تحريضياً، والمركبة الثانية هي شدة الحقل الكهربائي E ولها الدور الأساسي في عملية تسخين أشباه النواقل. إن عملية تسخين الأسلاك المعدنية تحريضياً موضحة في الشكل (1).



الشكل (1) ملف خاص لتسخين الأسلاك المعدنية تحريضاً.

بفرض أن الأسلاك المعدنية المراد تسخينها تتحرك بسرعة خطية v باتجاه المحور y نجد أن المعادلات التفاضلية التي تشرح انتشار الحقل الكهرومغناطيسي في تلك الأسلاك هي معادلات دالامبير [1,2]:

$$\nabla^2 H = \frac{\mu\mu_0}{\rho} \left[\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \times (v \times H) \right] \quad (1)$$

أما مركبة شدة الحقل الكهربائي:

$$\nabla \times H = \frac{1}{\rho} [E + \mu\mu_0(v \times H)] = \frac{1}{\rho} E_n \quad (2)$$

$$E_n = E + \mu\mu_0(v \times H) \quad (3)$$

$$\mu = 1 + 150 \left[1 - \left(\frac{T_k}{T_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

حيث:

$-v$ [m/s] السرعة التي تتحرك فيها الأسلاك المراد تصنيع النوابض منها ضمن الملف الذي يمر فيه التيار.

$-\rho$ [Ω.m] المقاومة النوعية لمعدن الأسلاك.

$-\mu$ [H/m] السماحية المغناطيسية لمعدن الأسلاك.

$-\mu$ [H/m] السماحية المغناطيسية للهواء.

E_n [v] مركبة توتر الحقل الكهربائي داخل كل سلك.

T_0 [°C] درجة حرارة الهواء.

T_k [°C] درجة حرارة نقطة كيري التي يفقد عندها الفولاذ صفاته المغناطيسية.

أما كثافة التيار المار في الملف فتساوي دوران شدة الحقل المغناطيسي:

$$J = \text{rot } H = \frac{1}{\rho} [E + \mu\mu_0(v \times H)] \quad (5)$$

من العلاقتين (1) و (5) ودالة ببسيلا نتوصل إلى معرفة كيفية انتشار موجة الحقل الكهرومغناطيسي وكثافة التيار في الأسلاك:

$$J_1 = \frac{1}{\rho} E = \frac{1+i}{c} \frac{N_1(k) H_1}{N_0(k)} \quad (6)$$

حيث:

H_1 - شدة الحقل المغناطيسي الداخلية المتفقة مع اتجاه حركة الأسلاك.

J_1 - كثافة التيار المتحرض في الأسلاك.

$N_0(k)$ - دالة ببسيلا الصفرية.

$N_1(k)$ - دالة ببسيلا ذات الدرجة الأولى.

c - سماكة الطبقة السطحية للسلك.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\pi f \rho \mu}}$$

$$k = \sqrt{\frac{1+i}{c}}$$

حيث: f - هو التردد.

شدة الحقل المغناطيسي باتجاه المحور y وهو نفس اتجاه حركة الأسلاك.

$$H_y = \frac{N_0(k)}{N_1(k)} H_1 \quad (7)$$

يمكن استخدام دالة ببسيلا بشكلها التقريبي عندما يتم التسخين بالترددات العالية، بحيث تكون $C < a$:

$$J_1 = \frac{i-1}{c} \sqrt{\frac{a}{r}} e^{-K^2(a-r)} H_1 \quad (8)$$

$$H_y = \sqrt{\frac{a}{r}} e^{-K^2(a-r)} H_1 \quad (9)$$

حيث:

a - نصف قطر السلك.

r - نصف قطر النقطة المدروسة الواقعة داخل الملف.

إن حاصل جداء السماحية المغناطيسية بشدة الحقل المغناطيسي يساوي إلى دوران الجهد المغناطيسي U_M وتعطى بالعلاقة:

$$\text{rot} U_M = \mu \cdot H \quad (10)$$

وبالتالي نحصل على مركبة شدة الحقل المغناطيسي باتجاه المحور y :

$$H_y = \frac{4v \cos \theta}{r N_0(k)} N_1(k) \cdot H_2 \quad (11)$$

حيث:

H_2 - توتر الحقل المغناطيسي العمودي على اتجاه حركة الأسلاك.

θ - الزاوية بين H_2 واتجاه الحقل المتسرب داخل السلك.

تتسرب الموجة المغناطيسية لمسافة معينة داخل معدن السلك، تسمى هذه المسافة بعمق تسرب الموجة وتعطى بالعلاقة التالية:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (12)$$

عند إجراء الدراسة الحرارية نجد أن شعاع بيوتنغ يلعب دوراً أساسياً في عملية التسخين، وهو حاصل الجداء الخارجي لشعاع شدة الحقل الكهربائي بمرافق شدة الحقل المغناطيسي:

$$S_n = [E.H^*] \quad (13)$$

H^* - مرافق شدة الحقل المغناطيسي.

تحتسب كمية الحرارة المفروزة في واحدة الطول من السلك المراد تسخينه تحريضياً بالعلاقة [3,4]:

$$Q = \frac{\pi a \rho}{c} \left\{ H_1^2 + 2H_2^2 \left[1 + \frac{cv\mu\mu_0}{\rho} + \left(\frac{cv\mu\mu_0}{\rho} \right)^2 \right] \right\} \quad (14)$$

إن درجة حرارة السلك المتحرك باتجاه المحور y ضمن الحقل المغناطيسي هي:

$$t_y = T_0 + \exp\left(\frac{-2a\pi\gamma}{vc_p} y\right) \cdot \int_{-L}^{+L} \frac{Q}{vc_p} \exp\left(\frac{2\pi a\gamma}{vc_p} y\right) dl \quad (15)$$

c_p [J/kg] - السعة الحرارية لوأحدة الطول من السلك.

γ [W/m².s] - عامل التبادل الحراري مع الهواء.

T_0 [°C] - درجة حرارة الهواء.

سندرس قسماً من الملف الموضح في الشكل (1) بطول dl والذي يحوي عدداً من اللفات بمقدار $M dl$. في النقطة المدروسة $D(x,y,z)$ التي توجد داخل الملف نلاحظ أن الجهد الكهربائي A يلعب دوراً مهماً في عملية التسخين:

$$U_M = \frac{\mu_0 I M dy}{2\pi} \sum_{i=1}^n \int_{-d_i}^{d_i} \frac{dR_i}{r} \quad (16)$$

وتكون مركبات الجهد الكهربائي:

$$\begin{aligned} U_{Mx} &= \frac{\mu_0 I M}{2\pi} \left[\ln \frac{x(d)+u(d,k)}{x(d)+u(d,-k)} - \ln \frac{x(-d)+u(-d,k)}{x(-d)+u(-d,-k)} \right] \\ U_{My} &= \frac{\mu_0 I M}{2\pi} \left[\ln \frac{z(k)+u(d,k)}{z(k)+u(-d,k)} - \ln \frac{z(-k)+u(d,-k)}{z(-k)+u(-d,-k)} \right] \cos \alpha \\ U_{Mz} &= \frac{\mu_0 I M}{2\pi} \left[\ln \frac{z(k)+u(d,k)}{z(k)+u(-d,k)} - \ln \frac{z(-k)+u(d,-k)}{z(-k)+u(-d,-k)} \right] \sin \alpha \end{aligned}$$

حيث:

$-M$ عدد اللفات في واحدة الطول من الملف.

$-r$ نصف قطر النقطة المدروسة.

$-dR_i$ شعاع نصف القطر للقسم المدروس من الملف.

من العلاقة (10) نجد كل مركبات شدة الحقل المغناطيسي في النقطة المدروسة $D(x,y,z)$:

$$H_x = \frac{IM}{2\pi} \ln \left\{ \frac{[z(k)+u(d,k)][z(-k)+u(d,-k)] \times \sqrt{[x^2(d)+z^2(-k)][x^2(d)+z^2(k)]}}{[z(k)+u(-d,k)][z(-k)+u(-d,-k)] \times \sqrt{[x^2(-d)+z^2(-k)][x^2(-d)+z^2(k)]}} \right\} \quad (17)$$

$$H_y = \frac{IM}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \theta \quad (18)$$

حيث:

$$\theta = \sum_{\eta=\pm d, \tau=\pm l, \theta=\pm k} \tan^{-1} \left| \frac{y(\tau) \sqrt{x^2(\eta)+y^2(\tau)+z^2(\theta)}}{x(\eta) \cdot z(\theta)} \right|$$

$$H_z = \frac{IM}{2\pi} \ln \left\{ \frac{[x(d)+u(d,k)][x(-d)+u(-d,k)] \times \sqrt{[z^2(k)+x^2(-d)][z^2(-k)+x^2(d)]}}{[x(d)+u(d,-k)][x(-d)+u(-d,k)]} \right\} + \theta \sin \alpha \quad (19)$$

حيث:

$$\begin{aligned} U(-d, k) &= \sqrt{x^2(-d) + y^2 + z^2(k)} \\ U(d, k) &= \sqrt{x^2(d) + y^2 + z^2(k)} \end{aligned}$$

$$U(d, -k) = \sqrt{x^2(d) + y^2 + z^2(-k)}$$

لحل هذه العلاقات يجب أن نأخذ بالاعتبار ما يلي:

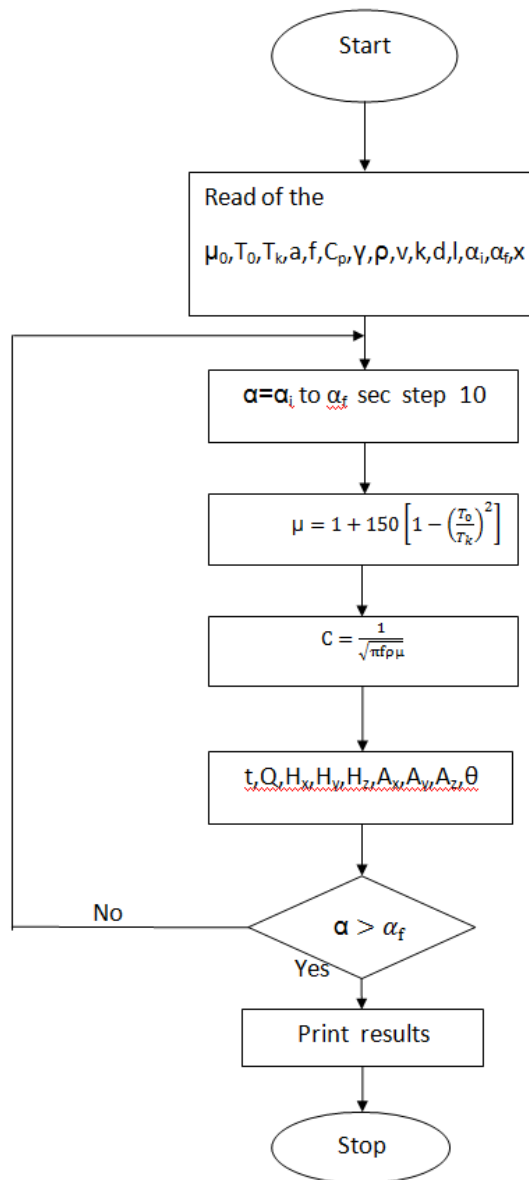
نحصل على $x(d)$ و $x(-d)$ من $X = x_1 - x$ عندما $x_1 = d$ ، $x_1 = -d$

نحصل على $y(l)$ و $y(-l)$ من $Y = y_1 - y$ عندما $y_1 = l$ ، $y_1 = -l$

نحصل على $z(k)$ و $z(-k)$ من $Z = z_1 - z$ عندما $z_1 = k$ ، $z_1 = -k$

النتائج والمناقشة:

تم وفقاً للمعادلات السابقة وضع برنامج حاسوبي باستخدام لغة الفورتران للحصول على الحسابات المتعلقة بتسخين الأسلاك الفولاذية التي تصنع منها النوابض، وذلك استناداً للخوارزمية المبينة بالشكل (2).

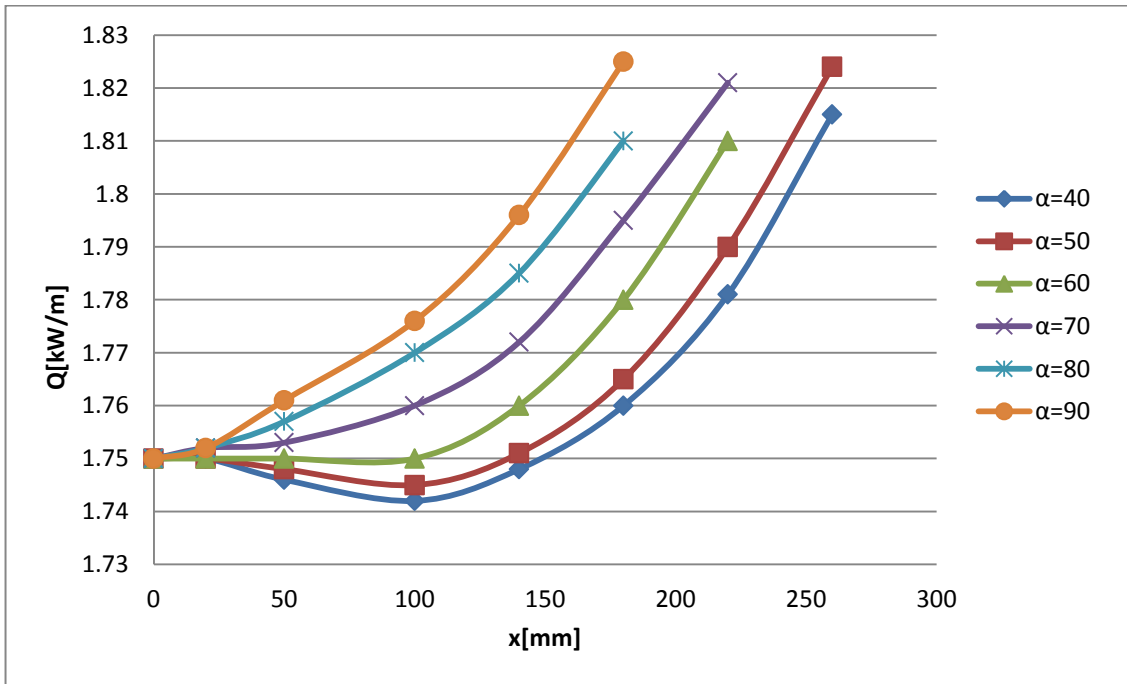


الشكل (2) خوارزمية الحسابات الحرارية للأسلاك الفولاذية المستخدمة في صناعة النوابض

لكي يعمل الملف بشكل طبيعي يوصل إلى منبع تغذية يؤمن له التيار اللازم عند التردد $f=0.44\text{MHz}$.
يتم تشغيل البرنامج بأخذ المعطيات التالية:

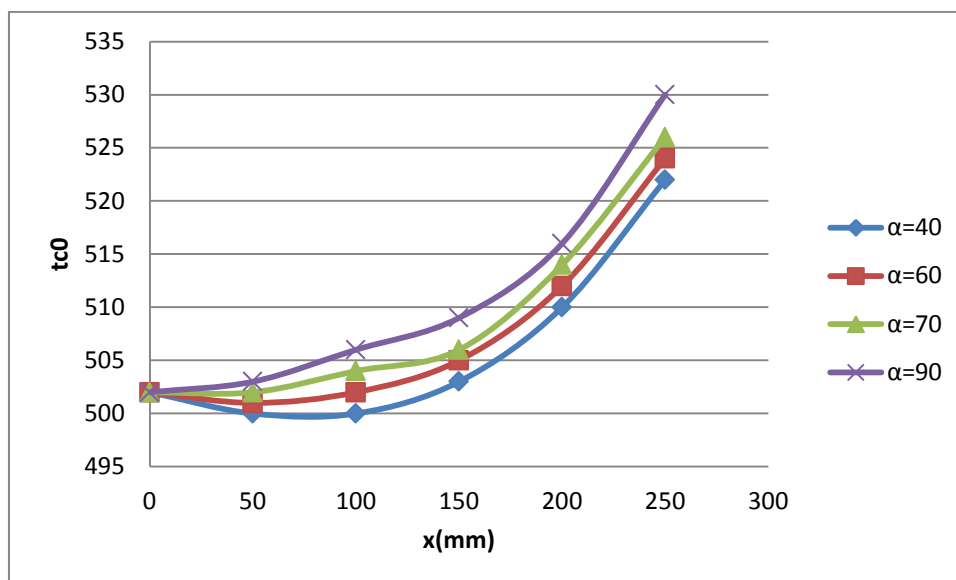
- زاوية ميلان الملف الابتدائية $\alpha_i = 40^\circ$ ، زاوية ميلان الملف النهائية $\alpha_f = 90^\circ$.
- السماحية المغناطيسية للهواء $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
- درجة حرارة الهواء $T_0 = 20^\circ \text{C}$ ، درجة حرارة نقطة كيوري $T_k = 770^\circ \text{C}$.
- السعة الحرارية لواحدة الطول من السلك $C_p = 1,42 \cdot 10^6 \text{J/kg}$.
- المقاومة النوعية للفولاذ $\rho = 2 \cdot 10^{-7} \Omega \text{m}$.
- عامل التبادل الحراري مع الهواء $\gamma = 100 \omega / \text{m}^2 \cdot \text{s}$.
- سرعة الأسلاك ضمن الملف $v = 0.5 \text{m/s}$.
- المسافة بين الأسلاك $L = 25 \text{mm}$ ، قطر السلك 1mm ، ارتفاع الملف $2b = 2k = 40 \text{mm}$ ، عرض الملف $2d = 260 \text{mm}$ ، طول الملف $2l = 500 \text{mm}$ ، عدد لفات الملف في متر واحد $M = 100$.

وفقاً للمعطيات السابقة قمنا بتحديد العلاقة بين كمية الحرارة المفروزة في كل سلك مع الإحداثيات X وزاوية ميلان الملف α . وبين الشكل (3) هذه العلاقة، ويتضح من هذا الشكل أن التسخين يكون أكثر تجانساً وانتظاماً في منتصف الملف أي عند المسافة $X = 100 \text{mm}$ ، وزاوية ميلان $\alpha = 60^\circ$.



الشكل (3) علاقة كمية الحرارة بالإحداثيات x وزاوية الميلان.

كما قمنا بالاستناد إلى البرنامج الحاسوبي بتحديد علاقة درجة حرارة كل سلك مع الإحداثيات X عند قيم مختلفة لزاوية الميلان α وذلك عند $I \cdot M = 1,75 \cdot 10^4 \text{A/m}$ وبين الشكل (4) هذه العلاقة. يتضح من هذا الشكل أن التسخين يكون منتظماً عند المسافة $X = 100 \text{mm}$ ، وزاوية ميلان $\alpha = 60^\circ$. في تلك المنطقة نلاحظ أن درجة الحرارة ثابتة تقريباً.



الشكل (4) علاقة درجة الحرارة بزاوية الميلان.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1. اعتماداً على ما سبق وللحصول على منطقة تسخين منتظمة يصنع الملف بزاوية ميلان $\alpha=60^\circ$ ، بحيث يتم وضع الأسلاك في المنطقة الوسطى، أي عند المسافة $X=100\text{mm}$. فقد أظهرت النتائج الحاسوبية أن التسخين عند زوايا ميلان أخرى يعد أقل انتظاماً.
2. نلاحظ أن درجات الحرارة ترتفع على الأطراف وبالتالي قد يؤثر هذا في عملية التسخين ويعود ذلك لتأثير عوامل النهاية والبداية بسبب الأمواج المغناطيسية الواردة والمنعكسة.

التوصيات:

تعد طريقة التسخين المقترحة في بحثنا صديقة للبيئة، لذلك يوصى باستخدامها لتسخين الأسلاك التي تصنع منها النوابض خاصةً عندما تكون زاوية ميلان الملف $\alpha=60^\circ$.

المراجع:

- 1- TAKASHI, T. *Thermal and magnetic field analysis of induction heating problems*. Journal of Materials Processing Technology, Japan, No.161, 2005, 193-198.
- 2- ANNETLE, M. *Induction of novel thermoses pensive Ferro fluids*. Journal of Magnetic, Germany, No.289, 2005, 5-8.
- 3- CARO, L. *Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a liner induction motor*. Journal of Energy Conversion and Management 51 (2010) 1407-1411.
- 4- SAMBOV, V. LARIGUE, B. *Theoretical and experimental study of heat transfer through a vertical partitioned enclosure application to the optimization of the thermal resistance*. J. Applied thermal Engineering, vol. 28, 2008, 488-498.