

تحليل الحقول الكهرطيسية في الآلات الكهربية الساكنة

الدكتور محمد موسى*

الدكتور عزت حسن**

صفاء الأحمد***

(تاريخ الإبداع 18 / 12 / 2013. قُبل للنشر في 16 / 1 / 2014)

□ ملخص □

يتناول هذا البحث توزيع الحقل المغناطيسي في آلة كهربية ساكنة من خلال محاكاتها باستخدام تقنية العناصر المنتهية في بيئة الماتلاب. تم تنفيذ القياسات المخبرية كشرط أولية للبحث لإتمام النمذجة والمحاكاة حاسوبياً. قدمت الدراسة صورة متكاملة لتوزيع الحقل المغناطيسي ثنائي الأبعاد في جميع أجزاء الآلة وبنيتها الداخلية وذلك من خلال توزيع كثافة الفيض المغناطيسي وشعاع الكمون المغناطيسي وشدة الحقل وتوزيع كثافة الحقل.

الكلمات المفتاحية: طريقة العناصر المنتهية، الحقول الكهرطيسية، الآلات الكهربية الساكنة.

*أستاذ - كلية الهندسة الكهربية والميكانيكية -جامعة دمشق- دمشق - سورية.

**أستاذ - كلية الهندسة الكهربية والميكانيكية -جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

***طالبة دكتوراه - كلية الهندسة الكهربية والميكانيكية -جامعة دمشق- دمشق - سورية.

Analyzing Electromagnetic Fields in Static Electrical Machines

Dr. MohamadMoussa*

Dr. Izzat Hassan**

Safaa Al Ahmad***

(Received 18 / 12 / 2013. Accepted 26 / 1 / 2013)

□ABSTRACT□

This paper deals with the distribution of magnetic fields in static machines. The magnetic field analysis was done for 2D structures by the simulation method using MATLAB/PDE, verifying the experimental results obtained. The distribution of the magnetic flux density, magnetic vector potential, field intensity, and current density are obtained in all parts of the machine.

Keywords: The Finite Element Method(FEM), Electromagnetic Fields, Static Electrical Machines.

*Professor, Electrical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

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

***Postgraduate Student, Electrical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

مقدمة:

تستند جميع النظم والتجهيزات الكهربائية والإلكترونية والآلات الكهربائية في مبدأ عملها وأدائها على الحقول الكهرومغناطيسية، لذا فإن لهذه الحقول وتوزعها وتحليلها ومتابعتها أهمية كبيرة في تحقيق التصميم والأداء الأمثل لكل التطبيقات الهندسية المشار إليها .

انطلاقاً من أهمية دراسة الحقول الكهرومغناطيسية في تحديد صورتها المتكاملة من خلال النمذجة والمحاكاة، فإنه لابد من إجراء القياسات الأساسية، التي تشكل الشروط الأولية لتنفيذ الدراسة . ساهم التطور في التقنيات الحسابية التقريبية للحقول الكهرومغناطيسية وفي مجال الحواسيب ذات الإمكانيات العالية في المعالجة والسعة ، إلى وضع نماذج تحاكي الأجهزة في بناها وأدائها . تستخدم طريقة العناصر المنتهية كإحدى التقنيات الحسابية الأساسية في التصميم الهندسي بشكل عام ، وفي دراسة الحقول الكهرومغناطيسية بشكل خاص ، وتعطي صورة لتوزعها في الأجزاء المختلفة للألة وحتى على المستوى الدقيق . لا يمكن الوصول إلى البنى الداخلية في الكثير من التقنيات الكهربائية والمغناطيسية مثل الآلات ونظم الميكاترونكس والآلات المكروية وغيرها ، إضافة إلى أن بعض هذه التطبيقات لا تسمح طبيعتها بالوصول إلى بناها .

انطلاقاً مما تمت الإشارة إليها تبرز أهمية التقنيات الكهرومغناطيسية الحسابية في المتابعة الدقيقة من خلال النمذجة والمحاكاة للحقول الكهرومغناطيسية وتوفير قاعدة بيانات متكاملة لتقييم التصميم والأداء وإجراء التعديلات المطلوبة في كل مرحلة من مراحل التصميم والتشغيل واختبار النماذج للوصول إلى الاستثمار الأمثل للتجهيزات والآلات والنظم المختلفة ضمن الشروط الفنية والاقتصادية التي تحقق ذلك .

تعتمد التقنيات الحسابية على حل المعادلات التفاضلية للحقول الكهرومغناطيسية انطلاقاً من معادلات ماكسويل ، وتعد طريقة العناصر المنتهية الأنسب للتطبيقات الهندسية ذات البنى غير المنتظمة وغير المنتظمة والمعقدة ، وهذا ما يميزها عن طريقة الفرق المتناهي التي تصلح للبنى المنتظمة .

يهدف هذا البحث لنمذجة ومحاكاة الحقول الكهرومغناطيسية في الآلات الكهربائية الساكنة والمتحركة اعتماداً على طريقة العناصر المنتهية ، وسيتم تطبيقها على المحولات الكهربائية ، التي تشكل مكوناً أساسياً في نظم القدرة الكهربائية انطلاقاً من محطات التوليد والتحويل لنقل القدرة وحتى نظم توزيع الطاقة الكهربائية .

تمت الدراسة لنموذج محولة كهربائية في بيئة ماتلاب باستخدام PDE مع إجراء القياسات الأولية الأساسية مخبرياً والتي تشكل الشروط الأولية للدراسة .

أهمية البحث وأهدافه:

تساعد التقنيات الحسابية للحقول الكهرومغناطيسية في النماذج التي تحاكي النظم والتجهيزات والآلات الكهربائية في الحصول على صورة فعالة لتوزعها وتحديداتها في الأجزاء المختلفة للمنظومة أو الآلة المدروسة . وتساعد دراسة وتحليل الحقول الكهرومغناطيسية بالحصول على قاعدة بيانات تشكل أساساً للتقييم وتحديد بارامترات الأداء المختلفة في الآلة باستخدام طريقة العناصر المنتهية والبرمجيات المناسبة في هذا المجال ، ويشكل ذلك هدفاً لهذا البحث مع الإشارة إلى الاختبارات التي أجريت للحصول على الشروط الأولية للدراسة .

طرائق البحث ومواده:

تستند الظواهر الكهرومغناطيسية في النظم الكهربائية على معادلات ماكسويل كأساس لأدبي دراسة في الحالة الساكنة والمتحركة للنظام . ويوجد صعوبة في الحل المباشر لمعادلات ماكسويل مباشرة لذلك تستخدم التتابع الكهرومغناطيسية للحصول على معادلات الحقل، من خلال شعاع الكون المغناطيسي، الذي يتطابق بالاتجاه مع شعاع كثافة التيار ويكون لهما مركبة واحدة باتجاه المحور Z مع توزع للحقل المغناطيسي في المستوي X-Y المتعامد مع شعاع الكون المغناطيسي.

يرتبط شعاع الكون المغناطيسي بشعاع كثافة التدفق المغناطيسي بالعلاقة: [1,2,3,4]

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1)$$

تستنتج المعادلات الموجية الكهرومغناطيسية بأخذ دوران معادلتين دوران الحقلين الكهربائي والمغناطيسي لماكسويل وإصلاحها ومعالجتها ، وفق العلاقة:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \nabla \times \mathbf{J} \quad (3)$$

حيث:

A - شعاع الكون المغناطيسي. E - شدة الحقل الكهربائي (V/m). J - كثافة تيار الناقلية.

B - كثافة التدفق المغناطيسي (T). H - شدة الحقل المغناطيسي (A/m). $\nabla \times$ الدوران.

σ - الناقلية الكهربائية (S/m). ε - النفاذية الكهربائية (F/m). μ - النفاذية المغناطيسية (H/m)

تمثل المعادلات الموجية الكهرومغناطيسية معادلات تفاضلية من الدرجة الثانية ، وتشكل نظاماً مركباً ومعقداً يصعب إيجاد حلولها المباشرة ، وتعتبر عن انتشار كميات الحقل فراغياً وزمنياً. يساعد شعاع الكون المغناطيسي في إيجاد الحلول المناسبة من خلال استخدام التتابع الكهرومغناطيسي لتحديد التوزيع الفراغي للحقلين الكهربائي والمغناطيسي، حيث يمكن كتابة العلاقة :

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (4)$$

يحتاج حل هذه المعادلة إلى معرفة تفرق شعاع الكون المغناطيسي $\nabla \cdot \mathbf{A}$ للحقول الديناميكية المتغيرة زمنياً (في الزمن)، وذلك من خلال شرط لورانس :

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \varepsilon \mu \frac{\partial V}{\partial t} \quad (5)$$

حيث V الكون السلمي.

يمكن إهمال التغيرات الزمنية لبارامترات الحقل باعتبارها بطيئة جداً وطول موجتها كبير ومع الأخذ بالحسبان أن

$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \mu \mathbf{H}$ ، وأن شدة الحقل الكهربائي في الكهرومغناطيسية $\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ ، وبالتالي يتم

الحصول على العلاقة التالية :

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (6)$$

يتم إيجاد حل المعادلة (6) مع الأخذ بالاعتبار الشروط الحدية للمسألة المدروسة من خلال تطبيق شروط نيومان

، وDirichlet ، وذلك باستخدام طريقة العناصر المنتهية لدراسة الحقول .

تستند شروط ديركليه على قياس وتحديد شعاع الكمون المغناطيسي على الحدود الفاصلة $A = A_0$ ، ويؤخذ بقيمة صفرية في اغلب الاحيان لتأمين عدم تجاوز السيالة المغناطيسية في الالة للحدود الفاصلة ، وبالتالي الحصول على الحلول الحقيقية . و تحدد شروط نيومان المركبة الناظرية لشعاع الكمون المغناطيسي على طول السطح البيني

$$\frac{\partial A}{\partial t} = 0 [2,7,9]. \text{ بحيث}$$

يعتبر تحديد الحقول الكهرومغناطيسية ذو أهمية كبيرة في مجال تصميم الآلات والأجهزة الكهربائية ، ويتم ذلك بحل معادلات الحقل المغناطيسي (معادلات ماكسويل) ، وهناك العديد من الطرائق العددية لتحويل هذه المعادلات التفاضلية الجزئية لماكسويل إلى جملة جديدة من المعادلات الجبرية ، حيث يتم إيجاد قيم المجاهيل المختلفة وبنقاط مختلفة في عقد الشبكة بعد تشكيلها .

استخدمت طريقة العناصر المنتهية في حل مسائل الهندسة الإنشائية، وفي خمسينات القرن الماضي درست مواضيع انتقال الحرارة وجريان السوائل. وفي عام 1970 نشر بحث بعنوان " حل مسألة الحقل المغناطيسي عند الإشباع بطريقة العناصر المنتهية" من قبل سيلفستر وتشاري ، حيث قدم هذا البحث آفاقاً واسعة في مجال الكهرومغناطيسية ، بصياغة مناسبة لهذه الطريقة لمعالجة المسائل الكهرومغناطيسية اللاخطية ذات البنى الهندسية المعقدة على غرار الآلات الكهربائية بمختلف أنواعها .

يتم بطريقة العناصر المنتهية تجزئة المجال (domain) الأصلي لمسألة الحقل (field problem) إلى عدد من المناطق الجزئية أو العناصر المحدودة (العناصر المتناهية في الصغر) ويكون التوزيع الكموني ضمن كل عنصر محددًا بشكل تقريبي بواسطة كثير الحدود أو التابع التجريبي ، ليتم بعد ذلك الحصول على الحل العددي للمسألة في ضوء بعض التوابع المثلى . [5,6,8]

يتم إتباع خطوات الحل باستخدام طريقة العناصر المنتهية وفق التالي :

- تجزئة مجال المسألة إلى مجموعة من المجالات الجزئية تدعى العناصر المنتهية.
- ربط التوزيع الكموني ضمن كل عنصر منتهي بواسطة كثير حدود أو تابع تجريبي.
- تجميع العناصر في منطقة الحل.
- وفي النهاية يتم حل جملة المعادلات الخطية الناتجة للكمون.

يمكن استخدام أشكال متعددة للعناصر المنتهية كالمثلث والمربع والأشكال المنحنية . ويتم اختيار شكل العناصر المنتهية على ضوء الشكل الهندسي للموضوع المدروس (للألة أو بعض أجزائها) ومرتبة التوليد لكثير الحدود . ويتم التجزئة بطريقة لا تسمح للعنصر المفرد أن يشتمل على نوعين من المعاملات في الوقت ذاته (يمتاز بنفس القيم الكهربائية والمغناطيسية في كل نقطة منه) . تشكل مجموعة العناصر المنتهية شبكة الحل، ويكون حجم وتوجه العناصر فيها غير مقيد ، حيث يمكن للمستخدم التحكم بحجم هذه العناصر، ويستخدم العنصر المثلثي في أغلب المسائل لما تتميز به من الخاصية الخطية .

تستخدم عدة تقنيات تقريبية لحل المعادلة التفاضلية بطريقة FEM من أهمها:

- طريقة المغيرات variational method

- طريقة الأمثال المتبقية weighted residuals

إن أهم ما يميز طريقة العناصر المنتهية بأنها قابلة للتطبيق في المسائل بحدود غير منتظمة على خلاف الطرائق الأخرى، إضافة إلى الدقة العالية التي تتمتع بها ، كما أن معظم برمجيات التحليل العددي المتاحة حالياً تعتمد

على طريقة العناصر المنتهية ، إضافة إلى انه عند استخدام طريقة العناصر المنتهية يؤخذ بعين الاعتبار الشكل الهندسي للألة والخواص المختلفة للمواد المغناطيسية المختلفة إضافة إلى ظاهرة الإشباع المغناطيسي والتيارات الإعصارية وغيرها .

أصبح استخدام طريقة العناصر المنتهية لحل المسائل الكهرومغناطيسية اليوم أمراً ممكناً بفضل توفر البرمجيات الحديثة ذات الإمكانيات الكبيرة في التعامل مع مختلف المسائل الهندسية العامة. وقد ساهمت عوامل رئيسية بتطوير هذه النظم في مجال تطور التقنيات الحاسوبية وبرمجيات التمثيل البياني . [5,8]

تدرس الحقول الكهرومغناطيسية ذات الترددات المنخفضة بواسطة المعادلات التفاضلية المعروفة بمعادلة لابلاس ، فإذا كان تابع المتغيرات يمثل تابعاً خطياً وفق العلاقة:

$$u_a(x, y) = u(x, y) + ag(x, y) \quad (7)$$

حيث أن: $g(x, y) -$ تابع اختياري يحقق الشروط الحدية $g(c) = 0$

باعتبار أن الطرف الثاني من المعادلة (6) يساوي الصفر نحصل على المعادلة :

$$\frac{\partial^2 A}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial Y^2} = 0 \quad (8)$$

فتكون الطاقة الكهرومغناطيسية :

$$W_e = \frac{\mu}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_i \left(\int_D \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j ds \right) A_j \quad (9)$$

حيث: α_i هي توابع الشكل وفقاً لطريقة العناصر المنتهية، W_e الطاقة لكل وحدة طول ناتجة عن عنصر مثلثي e . بفرض أن الجزء الواقع ضمن القوسين يتمثل بالعلاقة :

$$c_{ij}^{(e)} = \int \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j ds \quad (10)$$

تأخذ المعادلة (9) عندئذ الصيغة التالية :

$$W_e = \frac{\mu}{2} [A]^T [C^{(e)}] [A] \quad (11)$$

حيث :

$$[A] = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

منقول المصفوفة $[A]$:

$$[A]^T = [A_1 \quad A_2 \quad A_3]$$

$$[C^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_{11}^e & C_{12}^e & C_{13}^e \\ C_{21}^e & C_{22}^e & C_{23}^e \\ C_{31}^e & C_{32}^e & C_{33}^e \end{bmatrix}$$

وتسمى هذه المصفوفة $[C^{(e)}]$ بمصفوفة معاملات العنصر (Element coefficient matrix). ويتجمع

العناصر في منطقة الحل :

$$W = \sum_{e=1}^n W_e = \frac{\mu}{2} [A]^T [c] [A] \quad (12)$$

حيث : $[A]$ مصفوفة الكمونات في العقد

$$[A] = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix}$$

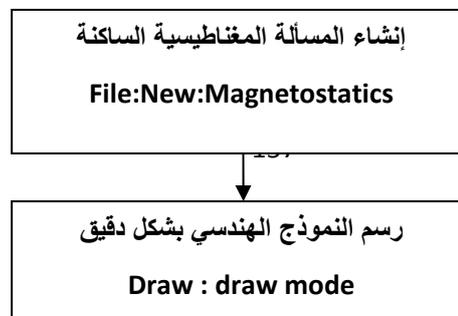
و $[A]^T$ منقول المصفوفة $[A]$ و $[c]$ مصفوفة الامثال العامة (*global coefficient matrix*) وهي تجميع لمصفوفة معاملات العناصر الجزئية. [6,8]
 يتم الحصول على جملة لمعادلات الكمون استناداً إلى ما سبق وذلك بمساواة المشتق الجزئي للتابع المركب للقدرة بالنسبة لكمونات العقد للصففر ، فيكون :

$$\frac{\partial W(A)}{\partial A_i} = 0 \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

أو وفق المصفوفات :

$$[C][A] = [T] \quad (13)$$

تستخدم طريقة العناصر المنتهية لدراسة الحقول الجيبية من علاقة شعاع الكمون المغناطيسي $A = A_z$ ، والتي تسمح بحساب قيم كثافة الفيض المغناطيسي من العلاقة التي تربطهما $B = \nabla \times A$.
 يتم حل المعادلة (6) باستخدام برنامج MATLAB/PDE وفق المخطط الانسيابي التالي:



الشكل (1) المخطط الانسيابي لدراسة الحقول في الآلة

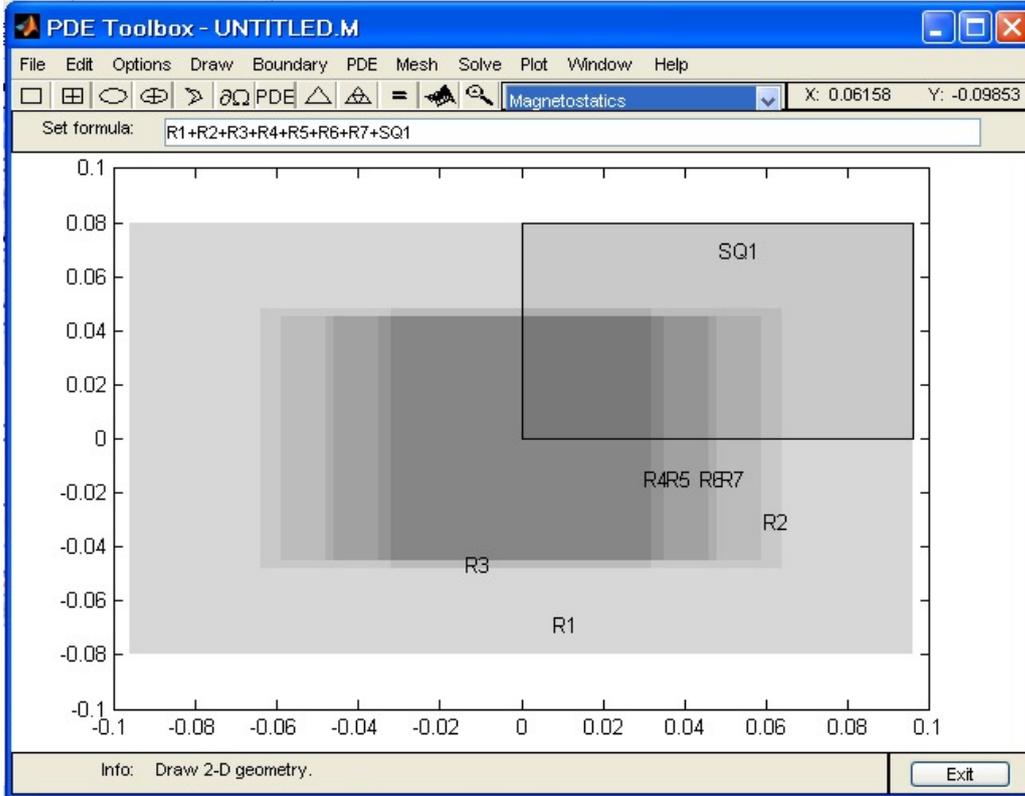
لتحقيق عملية النمذجة والمحاكاة والحصول على الشروط الأولية للدراسة ، أجريت تجارب عملية في مخبر الحقول الكهرومغناطيسية بجامعة دمشق باستخدام نظام قياس دقيق متضمناً مبدلة هول Hall الحساسة على آلة كهربائية ساكنة (محولة) وبأبعاد هندسية محددة ، وكانت النتائج كالتالي : النفاذية المغناطيسية ضمن المجال -3000 7000 هنري / المتر ، وكثافة التيار الكهربائي 0.06 أمبير/الميليمتر مربع، وعند قياس الحقول المغناطيسية خارج التدرج تبين أن الحقل المغناطيسي منخفض جداً، لذلك اعتبرنا شعاع الكون المغناطيسي خارج التدرج يشكل مقداراً مرجعياً صفرياً (القيمة الصفرية) .

وبمراعاة هذه القيم الأولية يمكن تحقيق النمذجة و المحاكاة وفقاً للمخطط الانسيابي للحل الشكل (1) حيث يتم بدايةً إنشاء النموذج الهندسي للآلة المدروسة، ويؤخذ المجال $[-0.1, 0.1]$ على المحاور x, y ويدرس الحقل وفق

المغناطيسي الساكن magnetostatic ، بإدخال الأوامر التالية من خلال نافذة MATLAB :

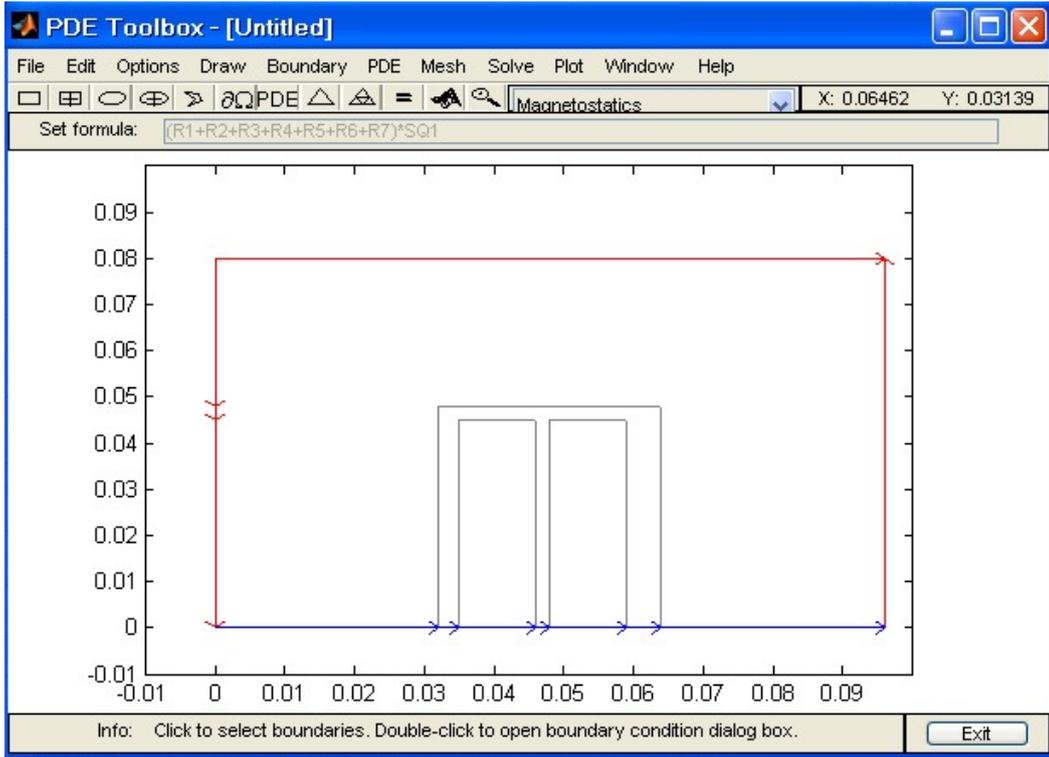
```
pderect ([-0.096 0.096 -0.08 0.08], 'R1')
pderect ([-0.064 0.064 -0.048 0.048], 'R2')
pderect ([-0.032 0.032 -0.048 0.048], 'R3')
pderect ([-0.035 0.035 -0.045 0.045], 'R4')
pderect ([-0.046 0.046 -0.045 0.045], 'R5')
pderect ([-0.048 0.048 -0.045 0.045], 'R6')
```

pdirect([-0.059 0.059 -0.045 0.045], 'R7')
 pdirect([0 0.096 0 0.08], 'SQ1')



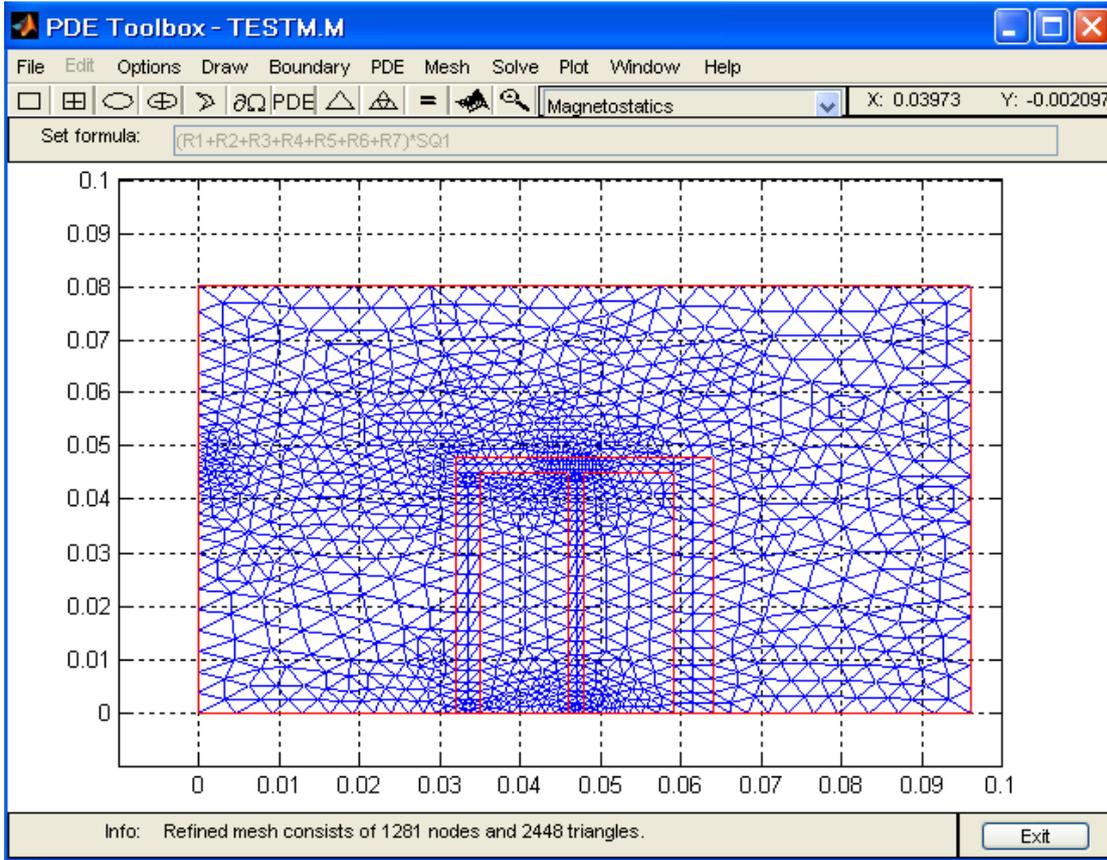
الشكل (2) النموذج الهندسي للمحولة

يتم تخفيض حجم العمل والحسابات بتقسيم النموذج إلى أربع أقسام متناظرة ، وبالتالي يكفي دراسة جزء واحد والتصميم وفق ما يلي $(R1+R2+R3+R4+R5+R6+R7)*SQ1$.
 يتكون النموذج الهندسي للمحولة من أربعة مناطق فرعية والمتمثلة بالقلب الحديدي و الملف الأولي والملف الثانوي و الثغرة الهوائية، وذلك لأحد أرباع الآلة المتناظرة. تتطلب الدراسة تحديداً للمناطق المذكورة بشكل منفصل وفقاً للشروط الحدية ، حيث يتم تطبيق شروط ديركلييه على الحدود الخارجية ومحور التناظر الشاقولي ، باختيار الأمر specify boundary condition من قائمة Boundary. ثم يتم تطبيق شروط نيومان على محور التناظر الأفقي للنموذج من الشروط الحدية بصورة مشابهة. نحصل وفقاً لمجالات الآلة والشروط الحدية لنيومان وديركلييه على نموذج الآلة المبين على الشكل (3).



الشكل(3) نموذج الآلة المدروس وفقاً للشروط الحدية

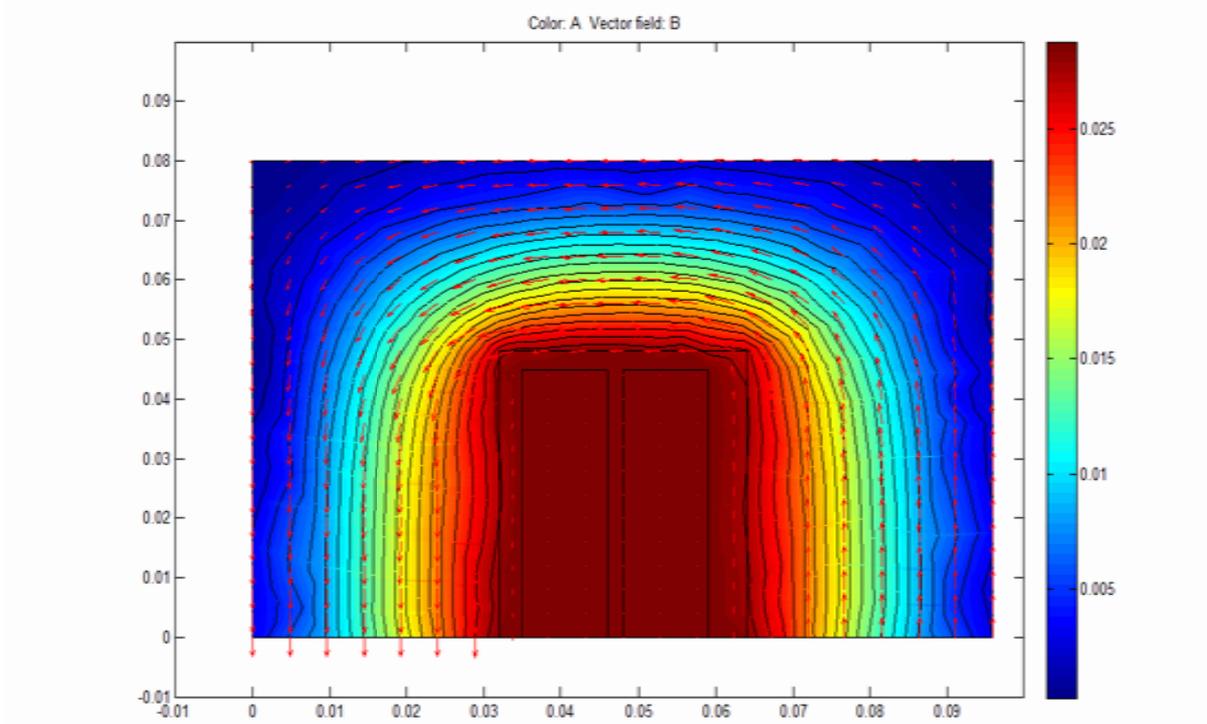
- يتم إدخال البارامترات المميزة لكل منطقة فرعية والمتمثلة بالنفاذية المغناطيسية μ ، وكثافة التيار J عبر نوافذ البرنامج من قائمة PDE ، ويتم أيضا إدخال البارامترات لكل المناطق الفرعية الأخرى كلاً على حدة وفق مايلي :
- القلب الحديدي : $\mu = 5000$
 - الثغرة الهوائية : $\mu = 1$
 - الملفات : يتم إدخال قيم كثافة التيار $J_1 = 0.06A/mm^2$ ونفاذية مغناطيسية مساوية الواحد .
- يتم الانتقال بعد ذلك لبناء شبكة الحسابات للنموذج المدروس الممثل للآلة من خلال قائمة الحل Mesh ، أي تشكيل شبكة العناصر المنتهية ب 1281 عقدة و 2448 مثلث وفقاً للشكل(4):



الشكل (4) شبكة الحل لنموذج الآلة المدروسة

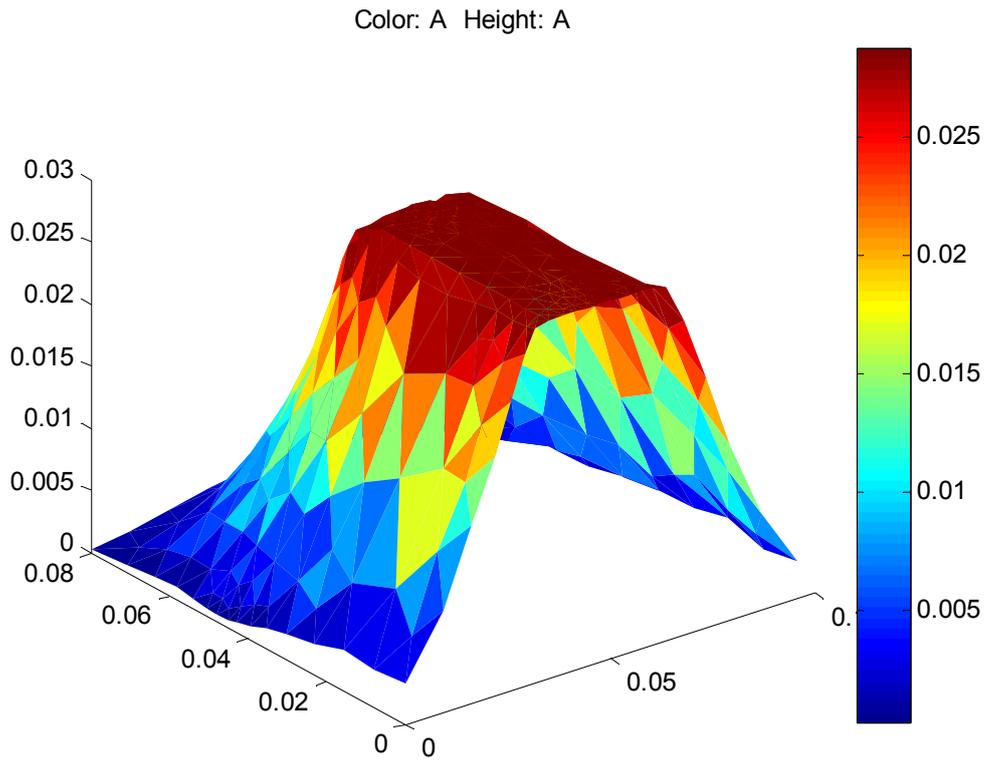
النتائج والمناقشة:

أصبحت المسألة جاهزة للحل بعد تنفيذ الإجراءات السابقة ليتم إعطاء الأمر للبرنامج ببدء الحسابات. تجدر الإشارة إلى أن الزمن اللازم للحل يتعلق بحجم المسألة وحجم العناصر المنتهية المستخدمة في شبكة الحل. يبين على الشكل (4) النموذج المدروس والذي بوساطته نحصل على نتائج الحسابات تبعاً باستخدام البرنامج الذي يعطي صورة متكاملة لتوزيع الحقل المغناطيسي مع إمكانية تحديد بارامترات هذا الحقل في أي نقطة من شبكة الحل. ويبين الشكل (5) خطوط توزيع الكمون المغناطيسي، وتوزيع كثافة الفيض المغناطيسي على شكل أسهم.

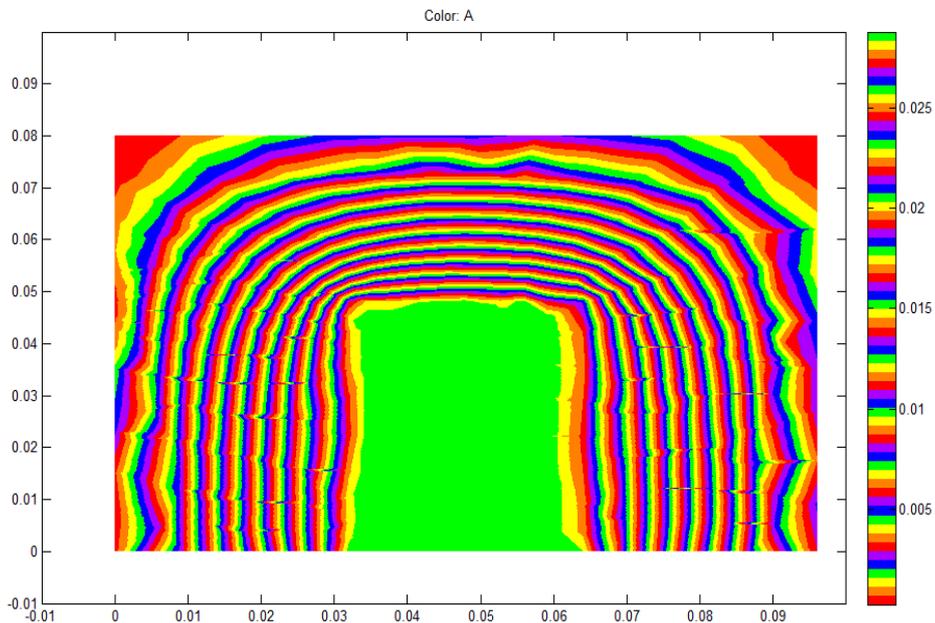


الشكل (5) خطوط توزيع الكمون المغناطيسي و كثافة الفيض المغناطيسي .

يتضح من الشكل (5) وجود كثافة عالية لتوزيع الكمون حول الزوايا القائمة لنافذة النواة المغناطيسية، وبالتالي فإن كثافة الفيض المغناطيسي تأخذ قيم عالية حول تلك الزوايا، بعبارة أخرى فإن لخطوط التحريض المغناطيسي (B) كثافة أعظمية حول الزوايا القائمة للنافذة الشكل (5).
 يتيح البرنامج إظهار النتائج بأشكال مختلفة من خطوط أو أسهم أو تقنية الإظهار اللوني تبعاً للقيم كما هو واضح في الشكلين (6) و (7) .

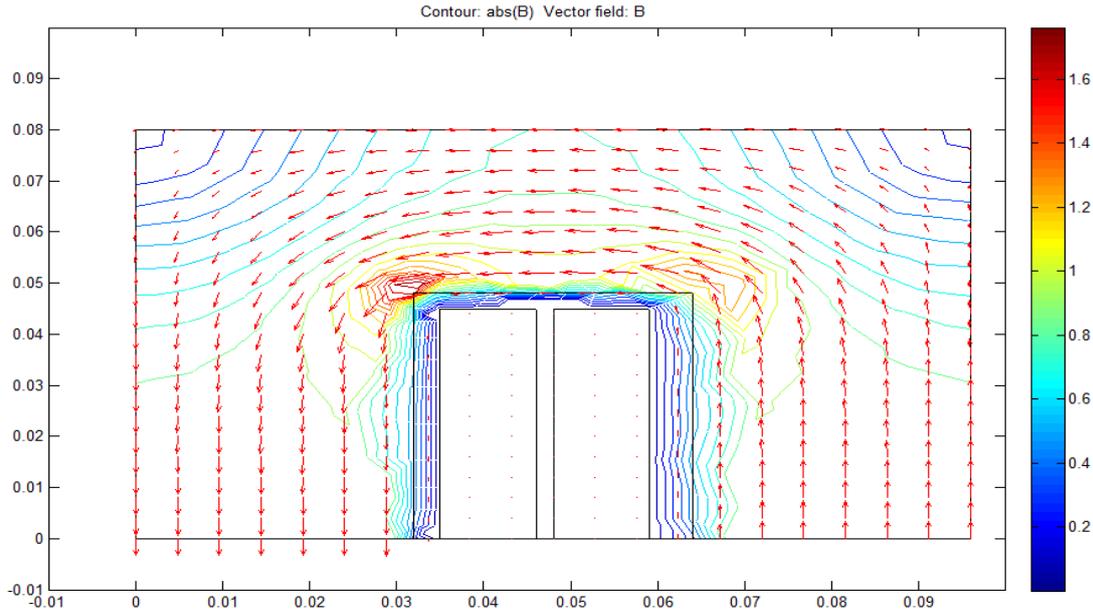


الشكل (6) التوزيع الفراغي لشعاع الكمون المغناطيسي



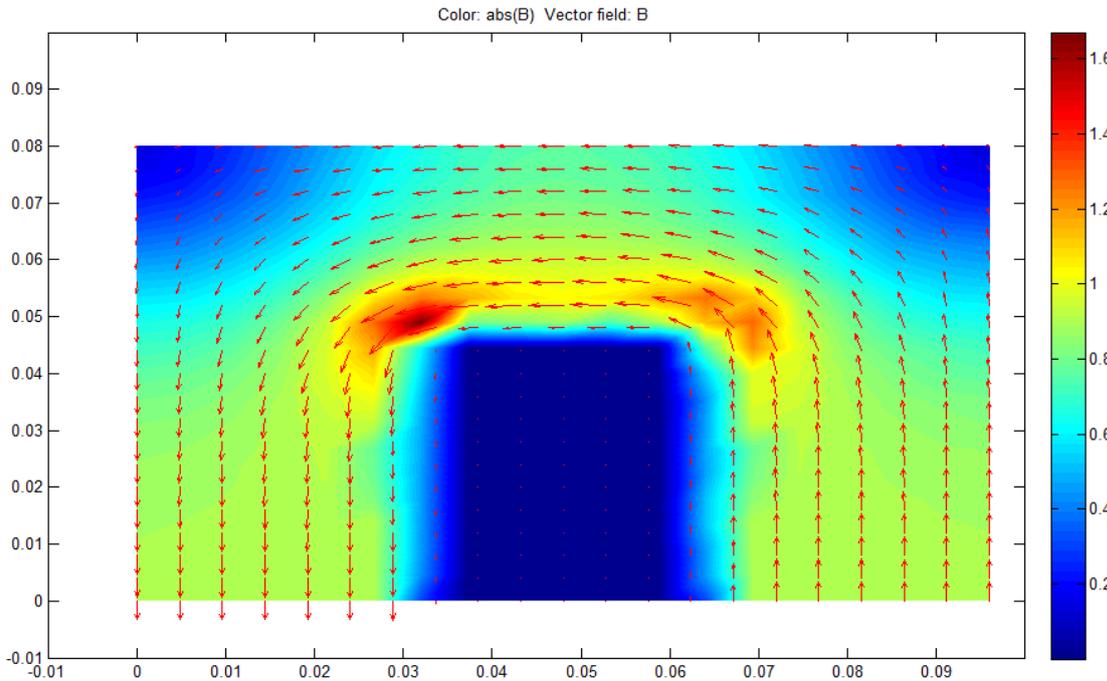
الشكل (7) التوزيع بالقيم اللونية لشعاع الكمون المغناطيسي

ويمكننا الحصول على صورة كاملة لخطوط توزيع كثافة الفيض المغناطيسي على شكل أسهم كما هو مبين في الشكل (8)، ويتضح من ذلك أن قيمها عند الزوايا الداخلية $B_1 = \dots 1.6 \dots$ و عند الزوايا الخارجية المقابلة لها تساوي $B_2 = 0.3$ ، من الواضح الفرق بين قيمتي B_1 و B_2 .



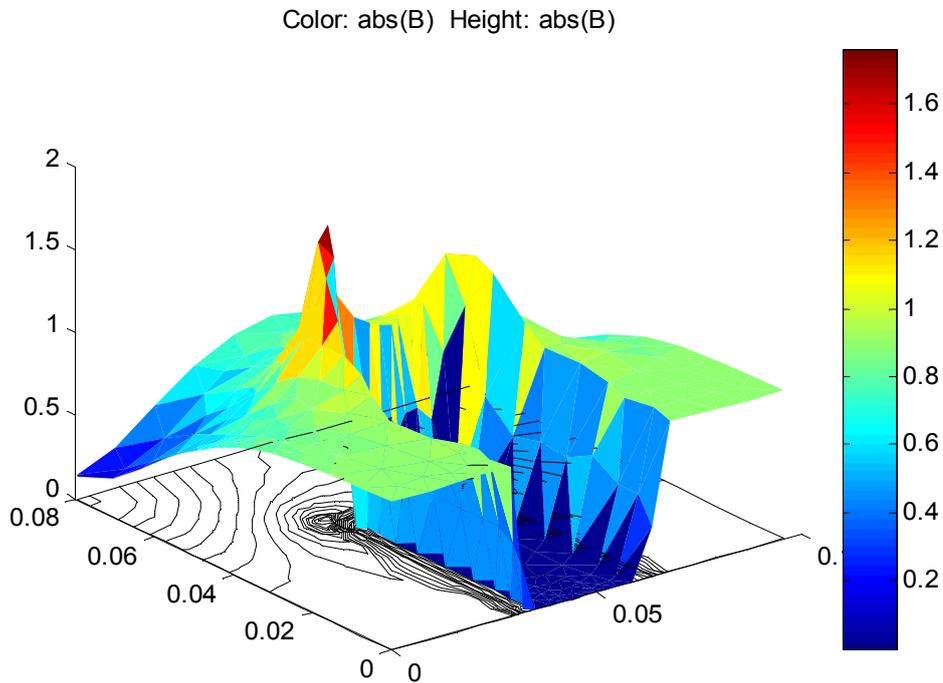
الشكل (8) توزيع كثافة الفيض المغناطيسي في الآلة

ويمكن التعبير عن الخصائص السابقة بطريقة التمييز اللوني عن طريق Color لكثافة الفيض المغناطيسي Magnetic Flux density، أو أن يعتمد سلم التقويم على التدرج اللوني المضاف إلى تدرجات مجال القياس كما يتضح في الشكل (9) ويؤكد الشكل (9) النتيجة المشار إليها أنفاً حول قيم B العالية في الزوايا الداخلية وقيمها المنخفضة عند الزوايا الخارجية .



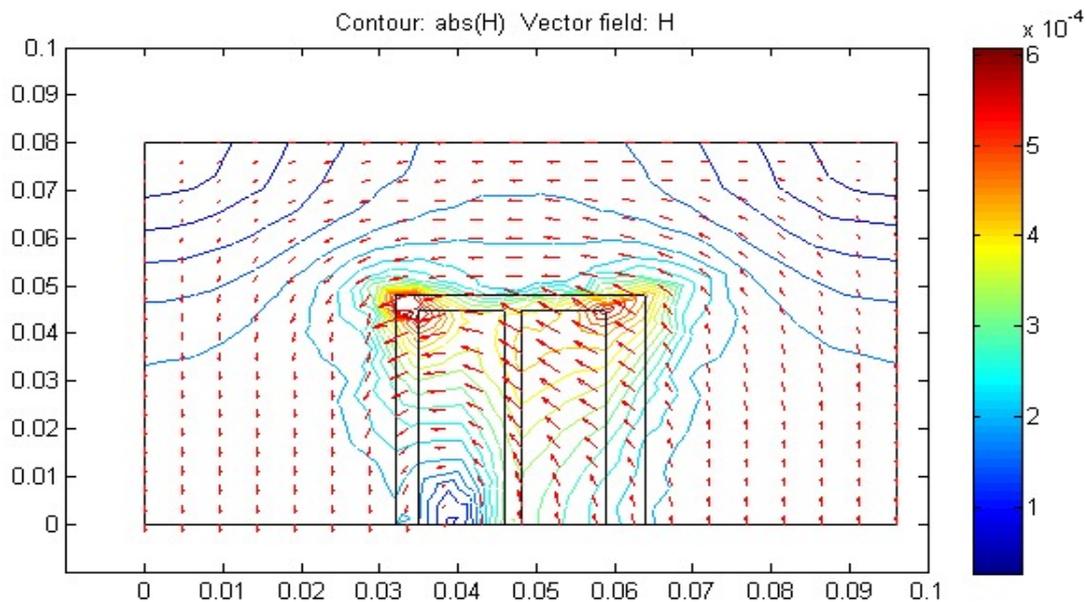
الشكل (9) يبين التمييز اللوني لكثافة الفيض المغناطيسي .

يتيح البرنامج الحسابي تحديد التوزيع الفراغي لكثافة الفيض المغناطيسي باستخدام POLT (3D) كما هو مبين في الشكل (10).

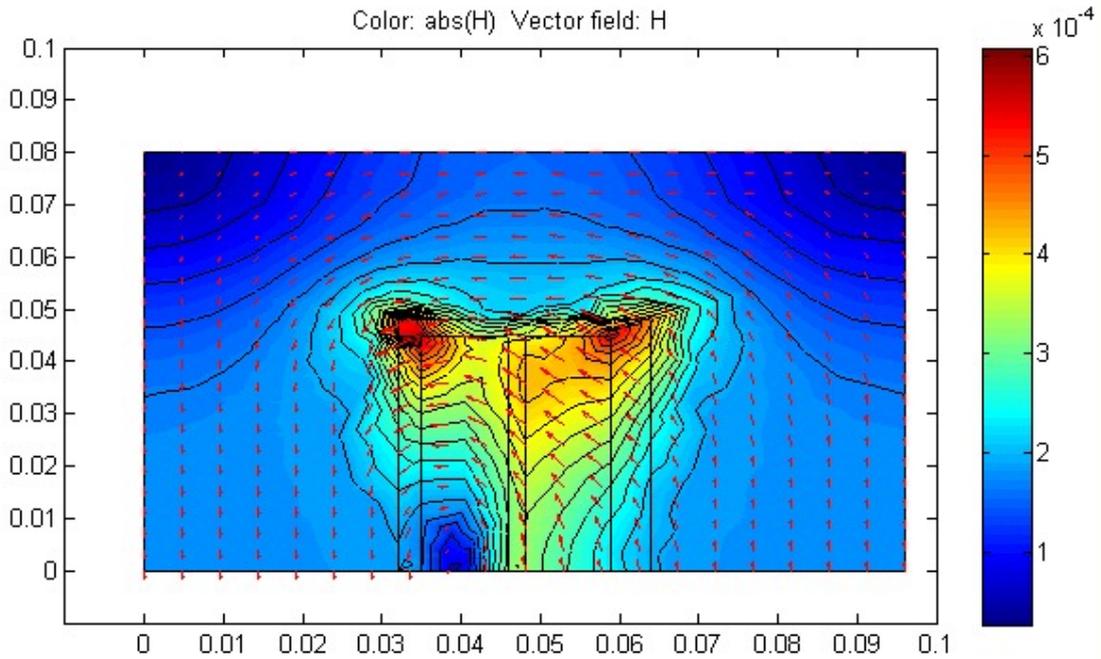


الشكل (10) التوزيع الفراغي كثافة الفيض المغناطيسي .

يتضح من الشكل الفراغي (10) زيادة كثافة التدفق المغناطيسي B إلى قيم الذروة ، والتي تظهر وفق تقنية التمييز اللوني، حيث يشير اللون الأحمر إلى هذه القيمة والمقابلة لقيم ما قبل التشبع المغناطيسي . يمكننا الحصول على شدة الحقل المغناطيسي Magnetic Field في كل نقاط المحولة ومعرفة نقاط توزيعه الأعظمية بإتباع الخطوات السابقة كما في الشكل (11).



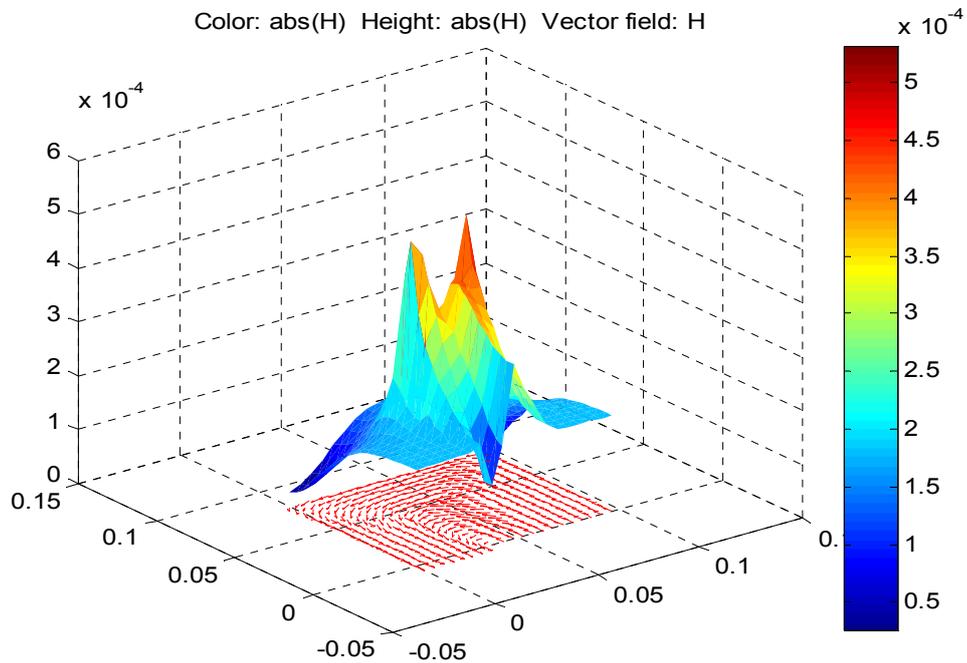
الشكل (11) توزيع شدة الحقل المغناطيسي في الآلة



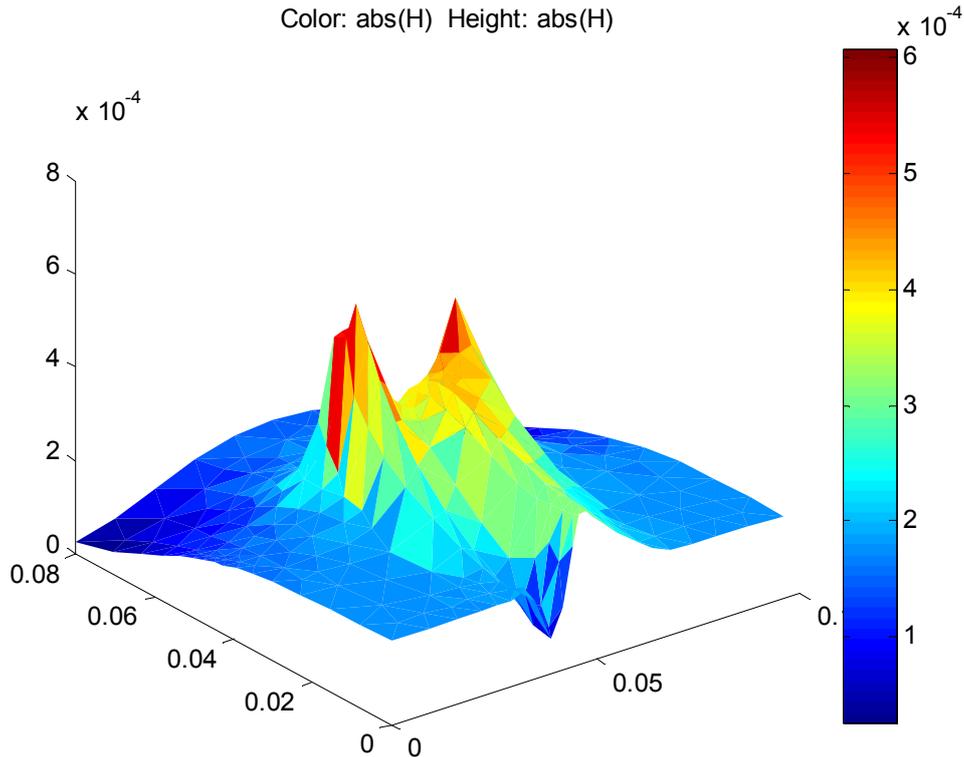
الشكل (12) إظهار توزيع شدة الحقل المغناطيسي بالتميز اللوني

يبين الشكلين (11) و(12) توزيع شدة الحقل المغناطيسي في المحولة في كل المجالات ، حيث تجدر الإشارة إلى وضوح أماكن تركيزها وخاصة عند الزوايا كما تمت الإشارة آنفاً .

ويمكن إظهار التوزيع الفراغي لشدة الحقل المغناطيسي كما في الشكلين (13) و(14).



الشكل (13) التوزيع الفراغي لشدة الحقل المغناطيسي



الشكل (14) الشكل الفراغي لشدة الحقل المغناطيسي

يتضح من الشكلين الفراغيين (13) و(14) زيادة شدة الحقل المغناطيسي H إلى قيم الذروة وتشكل منبعاً أساسياً لزيادة الحقل المغناطيسي والتي لم تصل بعد إلى قيم التشبع المغناطيسي .

الاستنتاجات والتوصيات:

- تقدم تقنيات النمذجة والمحاكاة إمكانيات تمثيل الآلات والنظم الكهربائية والإلكترونية ، مع الإشارة إلى ضرورة توفر الشروط الأولية والتي يتم الحصول عليها مخبرياً .
- تسمح الطرائق الحسابية التقريبية بمحاكاة الحقول الكهرومغناطيسية الساكنة والمتغيرة مع الزمن وبدقة عالية ، مع إمكانية تحليل محدداتها ومعاملاتها فراغياً وزمنياً .
- تتيح هذه الدراسة إمكانية الوصول إلى البنى الداخلية للآلة المدروسة ومتابعة تأثيرات خواصها على الحقول الكهرومغناطيسية .
- تقدم النمذجة والمحاكاة استناداً إلى التقنيات الحسابية التقريبية إمكانية الملاحظة الزمنية لمعاملات الحقول ومحددات الآلة الكهربائية وانعكاسها على خصائص الأداء لها .
- يلاحظ تشابه كبير في شكل توزيع شدة الحقل المغناطيسي والتحريض المغناطيسي في الأشكال. وهذا يؤكد صحة النتائج الحاصلة بالبرنامج كون هناك تناسب بين B و $H(B = \mu H)$.

المراجع:

- 1-Moussa M., Dureii F., *Electromagnetic fields theory* , Damascus university, 1996
- 2-Elmoudi A., *Evaluation Of Power System Harmonic Effects On Transformer*, Helsinki University of Technology, 2006.
- 3-SADIKU, M.N , *Elements of Electromagnetic*, University Oxford, 2005, p765
- 4-Fleisch D., *A student's Guide to Maxwell's Equations* , Cambridge University ,2008.
- 5-ABUSAIF A., *Design of Electrical Machines* , Damascus university, 2006, p404
- 6-RAO, N., *Elements Of Engineering Electromagnetics*, 1st.ed., Cambridge press , Newdelhi, 2002 ,p432.
- 7-SADIKU, M.N , *Numerical techniques in Electromagnetics*, 2nd .ed., CRC press , New York , 2001 ,p750.
- 8-PEDRO, J., SADOWISKI, N, and BASTOS, A., *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*, 1st.ed., Marcel Dekker , Brazil, 2003 ,p497.
- 9-Help of(MATLAB/PDE) , The Math Works, Inc, 2