



ISSN: 1608-9391
e-ISSN: 2664-2786

Received:24/6/2020
Accepted:19/8/2020

تأثير سمك وجه القطب على خواص التمغنط في العدسة المغناطيسية احادية القطب

سارة أكرم سلطان

قسم الفيزياء/ كلية العلوم/ جامعة تكريت

E-mail: Shalashasl90@gmail.com

عبدالله ادريس مصطفى

قسم الفيزياء/ كلية العلوم/ جامعة الموصل

E-mail: abdullaed@yahoo.com

عبد السميع فوزي عبد العزيز

قسم الفيزياء/ كلية العلوم/ جامعة تكريت

E-mail: Abdulsamee_fawzi@tu.edu.iq

الملخص

تم وضع تصميم مبتكر لعدسة مغناطيسية احادية القطب بحيث يمكن تغيير سمك وجه القطب بدون التأثير على المعالم الهندسية الأخرى للعدسة وذلك لأجل إجراء دراسة ممنهجة لتطوير منطقة رأس القطب المهمة في تحسين أداء العدسات المغناطيسية احادية القطب والحصول على كثافة فيض مغناطيسي عالي الشدة ونطاق عرض ضيق. وتم إجراء دراسة لكل تصميم تتضمن حساب المجال المغناطيسي المحوري ودراسة التمغنط للعدسة بواسطة طريقة العناصر المتناهية وذلك باستخدام برنامج (EOD)، وتم في هذه الدراسة مقارنة المجالات المغناطيسية للعدسات عند قيم تهييج منخفضة ومتوسطة وعالية فضلاً عن دراسة تأثير تمغنط الدرع الحديدي لكل حالة للحصول على أفضل تصميم لرأس القطب المقترح في هذه الدراسة. وجد ان أفضل خواص تمغنط واعلى قيمة للفيض المغناطيسي واقل قيمة لعرض نطاق شدة المجال المغناطيسي المحوري كانت عند قيمة سمك وجه القطب تساوي (0.5 mm). وتم ايضا دراسة تأثير كل من المجال المغناطيسي للدائرة الحديدية والمجال المغناطيسي للملف على المجال المغناطيسي الكلي الناتج من العدسة المغناطيسية احادية القطب المصممة.

الكلمات الدالة: بصريات الجسيمات المشحونة، العدسة المغناطيسية، برنامج EOD، توزيع كثافة الفيض المغناطيسي.

المقدمة

البصريات الإلكترونية هي فرع الفيزياء الذي يتعامل مع مشكلة حركة الجسيمات المشحونة في المجال الكهرومغناطيسي عن طريق انحراف وتركيز الحزم الإلكترونية والأيونات لإنتاج الصور. وكذلك تشمل الكشف عن الخصائص الفيزيائية والبصرية للحزم الإلكترونية تحت تأثير المجالات الكهربائية والمغناطيسية (E.Plies, 1994). بحيث تمكننا من فهم مسارات الجسيمات المشحونة ومعالجتها. ويتم تحقيق هذه المفاهيم من خلال دراسة تأثير المجالات المغناطيسية والكهربائية على الجسيمات المشحونة التي تؤثر بقوة مغناطيسية وكهربائية على حركة الجسيم المشحون. غالبًا ما تستخدم الأنظمة البصرية لتركيز وتوجيه حزم الجسيمات المشحونة. ولهذه الحزم العديد من التطبيقات مثل المجهر الإلكتروني، ترسب الشعاع الأيوني، وصهر الشعاع الإلكتروني (Ernst Ruska, 1987) (EBM).

تعتمد البصريات الإلكترونية على اكتشافين أساسيين تم إجراؤهما في عام 1925 بواسطة de Broglie وفي عام 1927 بواسطة Busch. افترض دي برولي على ان حركة الجسيمات يرافقها طول موجي لهذه الجسيمات المتحركة (Harald, 2008). تتأثر الجسيمات المشحونة مثل الإلكترونات والبروتونات بالمجال المغناطيسي وتتحرف عن مسارها بسببه. ويعتمد مقدار انحراف الإلكترون عن مساره على شدة واتجاه المجال المغناطيسي المؤثر عليه، وعلى سرعة الإلكترونات المتجهة. وتستغل العدسة المغناطيسية حقيقة أن الإلكترون له صفات جسيمية وكذلك موجية مثل الأشعة الكهرومغناطيسية وأشعة الضوء. وبحساب شدة المجال المغناطيسي المحوري يمكن توجيه شعاع الإلكترونات وتركيزه في بؤرة معينة عن طريق العدسات المغناطيسية. وتستغل هذه الظاهرة في العديد من التطبيقات مثل المجهر الإلكتروني وفي صمام أنبوبة الأشعة الكاثودية (Donald, 2011).

ان أفضل العدسات المغناطيسية الإلكترونية هي التي تعطي اعلى قيمة للمجال المغناطيسي المحوري وأضيق عرض نطاق له (Hawkes, 1972).

تم دراسة تأثير الشكل الهندسي للأقطاب في العدسات المغناطيسية الشبئية المركبة من قبل (Abd- 2006) (Hujazie, 2010) و (Al Khashab and Al-Abdullah, 2006a) وفي السنوات الأخيرة أجريت تجارب نظرية وعملية من قبل (Al- Jumayli, 2010) على عدسات مغناطيسية أحادية القطب عند تهيجات معينة بملفات ذات مقطع عرضي مستطيل الشكل ومصممة للطاقت الواطئة. وتمت دراسة تأثير التمغنط على أداء العدسة المغناطيسية أحادية القطب باستخدام أشكال مختلفة للملف (Al-Khashab and Abdullah, 2006b).

في هذا البحث تم تصميم عدسة مغناطيسية أحادية القطب حيث تم تغيير سمك وجه القطب (يرمز له (t)) للقيم (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5) ملم. وجد أن اعلى قيمة للمجال المغناطيسي المحوري وأقل عرض نطاق وأفضل تمغنط للدائرة الحديدية للعدسة المغناطيسية أحادية القطب المصممة عندما يكون سمك وجه القطب (0.5) ملم. وتم ايضا دراسة تأثير كل من سمك وجه القطب على المجال المغناطيسي للدائرة الحديدية (Iron circuit) والمجال المغناطيسي للملف (Coil) على المجال المغناطيسي الكلي للعدسة المصممة. وان أفضل خواص تمغنط وجدت عندما كان سمك وجه القطب يساوي (0.5 mm).

الجانب النظري

بصورة عامة، تتكون العدسة المغناطيسية بصورتها البسيطة من ملف دائري يتكون من سلك نحاسي معزول كهربائيا فعند مرور تيار كهربائي مستمر مقداره (I) في ملف يحتوي على عدد من اللفات (N) فانه يولد مجالا مغناطيسيا متناظرا محوريا على امتداد محوره (B_z) (Khursheed, A. 2010) وهذا المجال يعمل على حرف الالكترونات المارة خلاله ويغير مسارها نحو المحور البصري حسب قانون امبير (Hawkes and Kasper, 1989) :

$$\int_{-\infty}^{\infty} B_z dz = \mu_0 NI \quad \dots (1)$$

اذ ان (μ_0) تمثل نفاذية الفراغ وتساوي $(4\pi \times 10^7 \text{ H/m})$ ، (NI) تمثل تهيح العدسة (Lens Excitation) بوحدات (A-t).

ان العدسات المغناطيسية احادية القطب تولد مجالا مغناطيسيا محوريا يتبع الدالة الأسية ويتم التعبير عنه نظريا بالنموذج التالي (Marai and Mulvey, 1974):

$$B_z = B_{\max} \exp(-\ln 2/ HW) Z \quad \dots (2)$$

حيث ان B_z هو المجال المغناطيسي الناتج من العدسة المغناطيسية احادية القطب، B_{\max} هي اعلى قيمة يصلها المجال المغناطيسي، Z يمثل المحور البصري للعدسة و HW هو عرض نطاق المجال المحوري عند منطقة النصف ويمثل المسافة المحورية بين النقطتين التي تكون عندها كثافة الفيض المغناطيسي نصف قيمتها العظمى $(B_z = 1/2 B_{\max})$ لجميع توزيعات المجال.

ولغرض الحصول على مجال مغناطيسي شديد محصور في منطقة صغيرة تدعى بالفجوة الهوائية (ويرمز لها (D)) ويحاط الملف بغلاف من الحديد المطاوع حيث يتم تجميع الفيض المغناطيسي عند المنطقة الضيقة للقطب المغناطيسي (Egerton, 2005). ان كثافة المجال المغناطيسي (B_z) يتم ايجادها في برنامج EOD نسبة الى خطوط الشبك الافقية (Horezintal mesh line) B_{z1} بالاعتماد على الجهد الاتجاهي نسبة الى خطوط الشبك الافقية A_1 باستخدام العلاقة التالية (Lencová, 1999):

$$B_{z1} = 2A_1 / r_1 \quad \dots (3)$$

حيث ان B_{z1} كثافة الفيض المغناطيسي نسبة للشبك الأفقي و r_1 موقع خطوط الشبك الافقية، ويمكن ايجادها نسبة الى خطوط الشبك العمودية (B_{z2}) بالاعتماد على الجهد الاتجاهي نسبة الى خطوط الشبك العمودية A_2 باستخدام العلاقة التالية (Lencová, 1999):

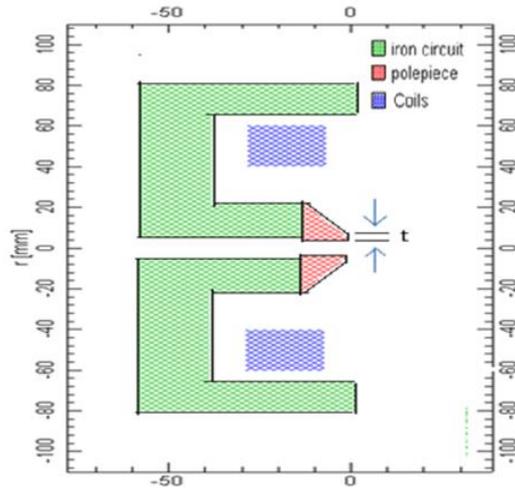
$$B_{z2} = \frac{2(A_1 r_2^3 - A_2 r_1^3)}{r_1 r_2 (r_2^2 - r_1^2)} \quad \dots (4)$$

حيث ان B_{z2} كثافة الفيض المغناطيسي نسبة للشبك العمودي و r_2 موقع خطوط الشبك العمودية.

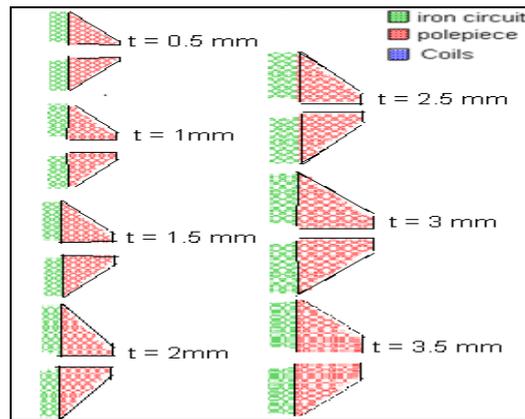
تصميم العدسة المغناطيسية

تم تصميم عدسة مغناطيسية احادية القطب لغرض دراسة تأثير سمك وجه القطب على خواص التماغنط لها كما موضح في الشكل (1) والذي يبين مقطعا عرضيا لتصميم العدسة المغناطيسية احادية القطب. والقطب على شكل مخروط مقطوع الوجه (truncated cone polepiece) ذي نصف قطر داخلي مقداره (7 mm) ونصف قطر خارجي مقداره (10 mm) ولوح حديدي حلقي خلفي ذي نصف قطر خارجي مقداره (80 mm) ونصف قطر داخلي مقداره (10 mm) وبسمك (20 mm). الاسطوانة الحديدية

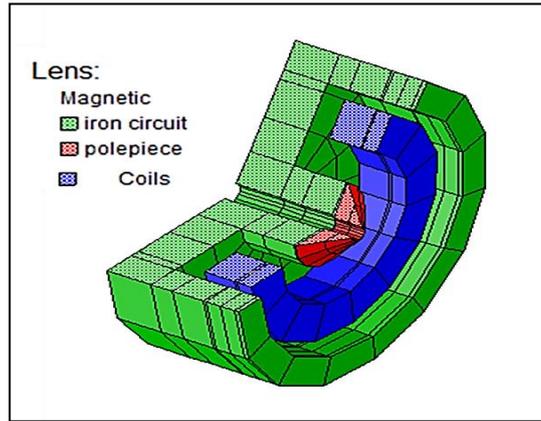
الخارجية بطول (40 mm) وبسمك (10 mm)، وتم تهيج هذه العدسة بملف ابعاد مقطعه العرضي (20 × 22 mm) عدد لفاته (500) لفة. ولغرض دراسة تأثير سمك وجه القطب على خواص التمثغظ لهذا التصميم تم اختيار سبع قيم مختلفة من سمك وجه القطب (t) هي (t=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 & 3.5 mm)، كما مبين في الشكل (2)، حيث يوضح هذا الشكل مقطعا لشكل القطب عند تغيير قيم سمكه. تم تشغيل العدسة بإثارة الملف عند قيم تهيج مختلفة (NI= 1, 5, 10, 20, 25 & 50 kA-t). الشكل (3) يوضح شكلا ثلاثي الابعاد للعدسة المغناطيسية احادية القطب المصممة في هذا البحث عند ادخال بياناتها الهندسية الى برنامج (EOD).



الشكل 1: يوضح مقطع عرضي للعدسة المغناطيسية احادية القطب المقترحة



الشكل 2: يوضح مقطع لشكل القطب عند تغيير قيم سمك وجه القطب (t)

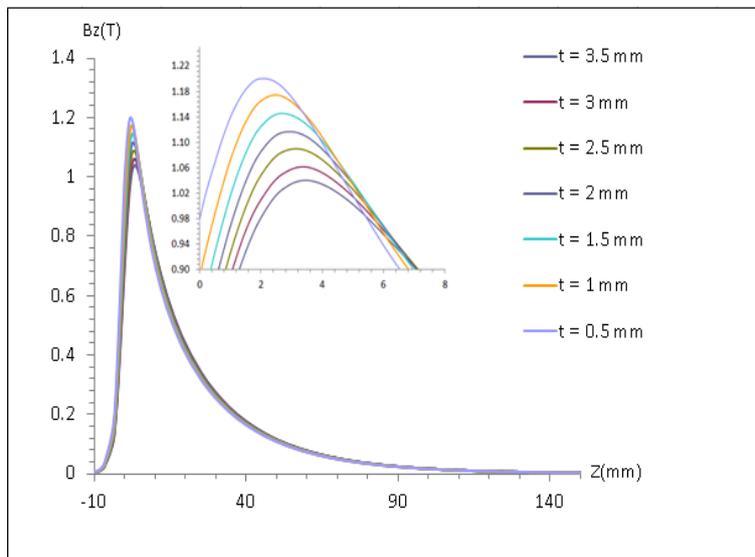


الشكل 3: رسم ثلاثي الأبعاد لتصميم العدسة المغناطيسية احادية القطب.

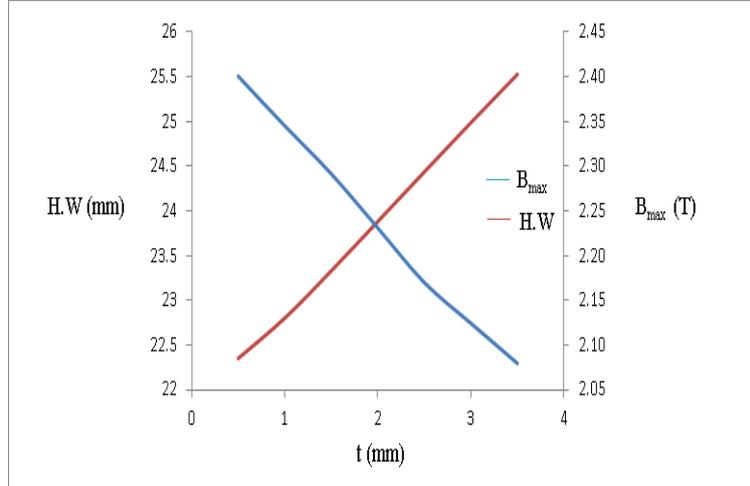
النتائج والمناقشة

1- حساب توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المحوري (B_z) للعدسة المغناطيسية

من أجل دراسة خواص التمتعظ للعدسة المغناطيسية احادية القطب المصممة في الشكل (1)، تم احتساب توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المحوري (B_z) باستخدام برنامج (EOD) الذي يعتمد على طريقة العناصر المتناهية (FEM) (Lencova and Zlamal, 2008). اجريت الحسابات عند قيم ثابتة لتهديج العدسة ($NI=25 \text{ kA-t}$) وقيم متغيرة من سمك وجه القطب ($t=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 \text{ \& } 3.5 \text{ mm}$). الشكل (4) يوضح تغير كثافة الفيض المغناطيسي المحوري (B_z) للعدسة احادية القطب المصممة عند قيم متغيرة لسمك وجه القطب ونلاحظ ان التصميم الذي يكون عنده سمك القطب ($t=0.5 \text{ mm}$) قد حقق اعلى قيمة للمجال المغناطيسي المحوري ($B_{\text{max}} = 1.2 \text{ T}$). الشكل (5) يوضح تغير كل من القيمة العظمى للمجال المغناطيسي المحوري وعرض منتصف القمة للمجال (HW) كدالة لسمك وجه القطب ونلاحظ من الشكل ان تقليل سمك وجه القطب ينتج عنه زيادة في القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي المحوري (B_z) ونقصان في قيم عرض نصف المجال (HW) ويفسر ذلك على ان تقليل سمك وجه القطب (t) يؤدي الى تقليل المساحة التي ينتشر بها المجال المغناطيسي خلال قطب العدسة مما يزيد من قيمة المجال المغناطيسي المتمركز في الفجوة الهوائية.



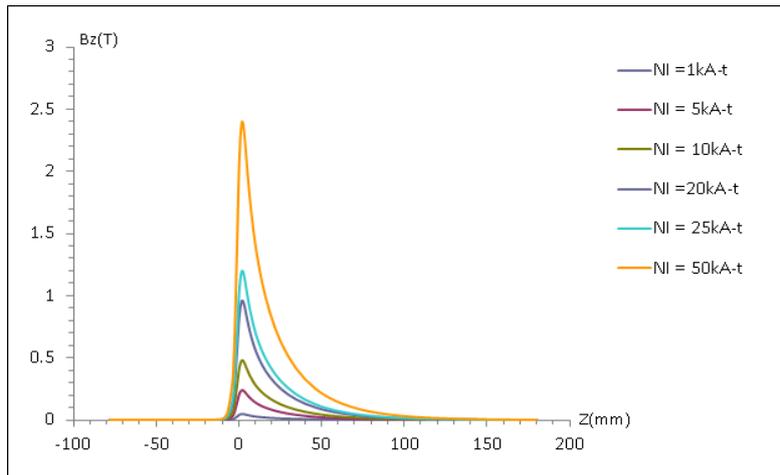
الشكل 4: توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المحوري (B_z) دالة على المسافة (Z) للعدسة المصممة عند تهديج ثابت ($NI=25 \text{ kA-t}$) عند قيم متغيرة من سمك وجه القطب ($t=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 \text{ mm}$).



الشكل 5: تغير القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي (B_{max}) وعرض نصف المجال (HW) مع سمك وجه القطب (t).

2- تأثير التهيج على الاداء البصري للعدسة

لأجل دراسة تأثير التهيج على الاداء البصري للعدسة المصممة عند أفضل قيمة سمك لوجه القطب ($t=0.5$ mm) الذي حقق خواصا جيدة بالمقارنة مع قيم السمك الأخرى تم اختيار قيم مختلفة لمقدار التهيجات ($NI = (1, 5, 10, 20, 25, 50)$ kA-t] والشكل (6) يوضح توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المحوري (B_z) دالة على المسافة (Z) للعدسة المصممة عند التهيجات [$NI = (1, 5, 10, 20, 25, 50)$ kA-t] عند قيمة سمك وجه قطب ثابتة ($t=0.5$ mm) اذ نلاحظ أن قيمة (B_{max}) تزداد بشكل خطي بزيادة التهيج (NI) مع ثبوت نصف عرض النطاق (HW).



الشكل 6: توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المحوري (B_z) دالة على المسافة (Z) للعدسة عند التهيجات [$NI = (1, 5, 10, 20, 25, 50)$ kA-t] وعند قيمة سمك وجه قطب ثابتة ($t=0.5$ mm).

3- تأثير المجال المغناطيسي للدائرة الحديدية والمجال المغناطيسي للملف على المجال المغناطيسي الناتج من العدسة المغناطيسية احادية القطب

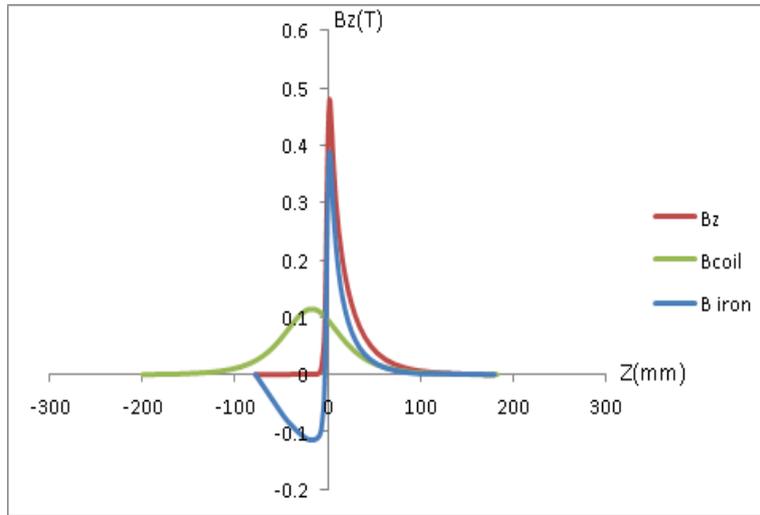
تم حساب المجال المغناطيسي للدائرة الحديدية (B_z iron) والمجال المغناطيسي للملف (B_z coil) من المعادلة

:(Cleaver, 1978)

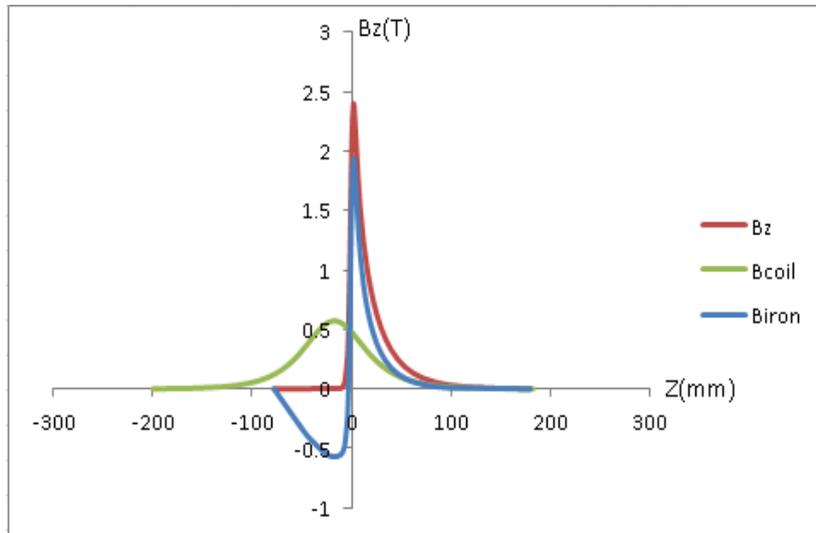
$$B_z = B_{iron} + B_{coil} \quad \dots (5)$$

حيث ان B_{coil} هي كثافة الفيض المغناطيسي المحوري الناتج من الملف نتيجة امرار تيار فيه و B_{Fe} هو الفيض المغناطيسي الذي يشارك فيه الحديد لقيمة المجال المغناطيسي المحوري الكلي B_z . يتبين من المعادلة (5) أنه بمجرد تشبع الحديد، يجب أن تأتي أي زيادة أخرى في كثافة الفيض المغناطيسي من الملف. يقدم الملف المثار (عن طريق امرار تيار فيه) مساهمة لا تذكر في القيمة العظمى لتوزيع المجال المغناطيسي المحوري للعدسة، والتي يتم المشاركة في اغلبها عن طريق الدائرة الحديدية.

يبين الشكل (7) والشكل (8) تأثير كل من المجال المغناطيسي للدائرة الحديدية والمجال المغناطيسي للملف على المجال المغناطيسي الناتج من العدسة المغناطيسية احادية القطب عند سمك وجه قطب ($t = 0.5\text{mm}$) وعند قيم تهيج ثابتة ويلاحظ من الشكل (7) عند التهيجات القليلة يكون الحديد غير مشبع لذلك تكون مساهمة الملف مهمة، بينما يلاحظ في الشكل (8) عند التهيجات العالية يصل الحديد الى حد الأشباع وتكون مساهمة الملف مهمة. والتغير في الشكلين الناتج من القيم السالبة لـ (B_{Fe}) هو بسبب ان الدائرة الحديدية تقوم بامتصاص المجال المغناطيسي المحوري الناتج من الملف في هذا الموقع من قيم (Z) وتضيفه الى المجال المغناطيسي الكلي للعدسة (B_z).



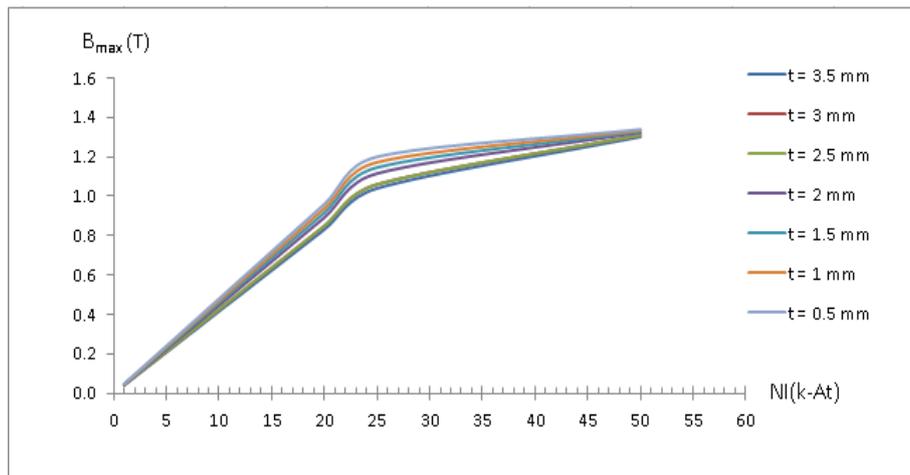
الشكل 7: تأثير كل من المجال المغناطيسي الناتج من الدائرة الحديدية (B_{iron}) والملف (B_{coil}) على المجال المغناطيسي الكلي (B_z) للعدسة المصممة عند تهيج ثابت (10 kA-t).



الشكل 8: تأثير كل من المجال المغناطيسي الناتج من الدائرة الحديدية (B_{iron}) والملف (B_{coil}) على المجال المغناطيسي الكلي (B_z) للعدسة المصممة عند تهيج ثابت (50 kA-t).

4- كثافة الفيض المغناطيسي لمنحني التشبع

من أجل تصميم عدسة كفاءة، يجب أن تولد العدسة الإلكترونية المغناطيسية أعلى ذروة كثافة فيض مغناطيسي محوري ممكنة تتوافق مع أصغر نصف عرض لتوزيع كثافة الفيض المغناطيسي المحوري. تكون كثافة الفيض المغناطيسي الكلي (B_z) دالة لكثافة الفيض المغناطيسي الناتج من الملف والفيض المغناطيسي الناتج من الحديد. كما في المعادلة (4). تعتمد قيمة كثافة فيض التشبع على النفاذية المغناطيسية للمواد؛ على سبيل المثال بالنسبة للحديد المطاوع (soft iron) يختلف من 1.8 إلى 2 تسلا بينما 2.37 تسلا للـ (permendur) (Cleaver,1978). الشكل (9) يوضع مقارنة بين منحنيات التشبع للقيم العظمى للمجال المغناطيسي المحوري كدالة لتهييج العدسة حيث يلاحظ من الشكل أن رأس القطب له تأثير واضح على التمتع عند التهيجات من (25-50 kA-t) وبعد قيمة التهييج (50 kA-t) فإن رأس القطب لا يؤثر على التمتع لأن المشاركة تكون أغلبها من الملف.



الشكل 9: مقارنة بين منحنيات التشبع المتمثلة بالقيم العظمى للمجال المغناطيسي المحوري (B_{max}) كدالة لتهييج العدسة عند قيم (NI = [1, 5, 10, 20, 25, 50] kA-t).

الاستنتاجات

تبين من خلال هذه الدراسة أن سمك وجه القطب له تأثير كبير على المجال المغناطيسي الناتج من العدسة المغناطيسية احادية القطب، حيث ان المجال المغناطيسي وخواص التمتع تتمايز بشكل ملحوظ كلما قل سمك وجه القطب، وان اداء العدسة المغناطيسية وتمغنتها يعطيان نتائج أفضل كلما قلت قيمة سمك وجه القطب.

المصادر

- Al-Khashab, M.A.; Al-Abdullah, A.E. (2006). The magnetization of the single polepiece magnetic electron lens using different coil models. *Raf. J. Sci.*, **17**(2), 37- 46.
- Al-Jumayli, F.A. (2010). Design and fabrication a chroma corrected objective compound lens for low beam energies for scanning electron microscope. Ph.D. Thesis, The University of Mosul, Iraq (in Arabic).
- Al-Khashab, M.; Al-Abdullah, A.E. (2006). The effect of the snout shape geometry of the polpiece on the objective lens parameters. *Dirasat Pure Sci.*, **33**(1), 28-33.
- Cleaver, J.R.A. (1978). The effect of the snout shape geometry of the polpiece on the objective lens parameters. *Optik*, **49**, 413 – 431.
- Donald, H. M. (2011). "Fundamental Formulas of Physics", 2nd ed., New York, Vol. 1, 153 p.

- Egerton, R.F. (2005). "Physical Principles of Electron Microscopy an Introduction to TEM SEM, and AEM". Springer Science, Business Media, Inc. Ch. 2, 42 p.
- Ernst, R. (1987). The development of the electron microscope and of electron microscopy. In: *Rev. Mod. Phys.* **59** (1987), 627–638. doi: 10. 1103/RevModPhys.59.627.
- Harald, H.R. (2008). "Geometrical Charged-Particle Optics". Springer-Verlag, Berlin.
- Hawkes, P. W. (1972). "Electron Optics and Electron Microscopy". Taylor and Francis Ltd., London, Ch. 2, pp. 27-44.
- Hawkes, P.W.; Kasper, E. (1989). "Principles of Electron Optics". Vol.1, Academic Press: London.
- Hujaze, N. S. (2006). Design of a compound lens (magnetic-electrostatic) for low voltage scanning electron microscopy. Ph. D. Thesis, The University of Mosul, Iraq
- Khursheed, A. (2010). "Scanning Electron Microscope Optics and Spectrometer". World Scientific Publishing. Co. Pte. Ltd, Ch.1, 9 p.
- Lencová, B. (1999). Accurate computation of magnetic lenses with FOFEM. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **427**(1), 329-337.
- Lencová, B.; Zlámál, J. (2008). A new program for the design of electron microscopes. *Sci. Direct*, **1**, 315-324.
- Marai, F.Z.; Mulvey, T. (1974). "Electron Microscopy". Proc. 8th Int. Conf. Microscopy, 1, 130 p.
- Mulvey, T. (1984). "Magnatic Electron Lens 2, Electron Optical Systems". SEM. Inc., Chicago, pp.15-27.
- Plies, E. (1994). "Electron Optics of Low-Voltage Electron Beam Testing and Inspection". part I: Simulation Tools, Academic Press.

Effect of Pole Face Thickness on Magnetization of the Single-pole Magnetic Lens

Sarah A. Sultan

Department of Physics/ College of Science/ University of Tikrit

Abdullah I. Mustafa

Department of Physics/ College of Science/ University of Mosul

Abdulsamee F. Abdel Azeez

Department of Physics/ College of Science/ University of Tikrit

ABSTRACT

An innovative design of a polepiece magnetic lens has been introduced so that the thickness of the pole face can be changed without affecting the other geometrical parameters of the lens, for a systematic study to develop the important region of the pole face to improve the performance of single polepiece magnetic lenses and to get a high intensity magnetic overflow and a narrow half width. A study was conducted for each design that includes calculating the axial magnetic field and studying the magnetization of the lens by means of the finite element method using the (EOD) program to get the best design for the polepiece proposed in this study, it was found that the best magnetic properties and the highest value of magnetic flux and the lowest value of the axial magnetic field strength half-width were at the value of the pole face thickness equal to (0.5 mm). The effect of the magnetic circuit iron and the magnetic field of the coil on the total magnetic field produced from the designed polepiece magnetic lens was also studied.

Keywords: Charge-Particle Optics; EOD Program; magnetic lens; magnetic flux density distribution.