------ مجلة علوم الرافدين، المجلد 24، العدد 1، ص 98-107، 2013------

تقليص البعد البؤري المسقطي في العدسات الكهرومغناطيسية ثنائية الفجوة الهوائية

مروة ثامر محمود الشماع
قسم الفيزياء
كلية العلوم
جامعة الموصل

(تاريخ الاستلام 14/ 5 /2012 ؛ تاريخ القبول 10 /9 / 2012)

الملخص

صمِمت عدسة كهرومغناطيسية مسقطية ثنائية الفجوة الهوائية بأربعة أقطاب متماثلة وملف منفـرد. إذ تم تقليص البعد البؤري المسقطي للعدسة إلى الحد الأدنى والذي يحصل عنده أعظم تكبير وتحليل وذلك بتقليل كلٍ من عرض الفجوة الهوائية وقطر الفتحة المحورية. ثم قُسِم الملف المنفرد إلى ملفين متساويين بالمـساحة وعدد اللفات وتبين أن الخواص المسقطية كانت متماثلة بالمقارنة مع العدسة المتكونة مـن ملـف واحـد أو ملفين. فضلاً عن ذلك تمت معالجة معاملي التشوهين ألشعاعي والحلزوني عند القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي باستخدام عدسة ثنائية الفجوة الهوائية وبجعل التيار المار في الملفين باتجـاهين متعاكـسين ممـا سيؤدي إلى حصول هذه العدسة على أفضل صورة متكونة.

الكلمات الدالة: عدسات مغناطيسية ثنائية الفجوة الهوائية، قطر الفتحة المحورية، انعـدام دوران الـصورة، القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي.

Minimization of the Projector Focal Length of the Double Air Gap Electromagnetic Lenses

Marwa Th. Al-Shamma
Department of Physics
Collage of Science
University of Mosul

ABSTRACT

An electromagnetic projector lens of double air gap with identical four poles and single coil has been designed. The projector focal length has been minimized to its lowest value, in order to obtain higher magnification and resolution by reducing the air gap width and the axial bore diameter. The single coil was divided in to two coils of equal area

and number of turns. It was found that the projector lens properties for the single coil in comparison with that of the double coils were identical. Moreover, the radial and spiral distortions were reduced at the minimum value of the projector focal length when the lens of double air gap was used and the direction of the current was reversed, which led to attaining this lens the best image formation.

Keywords: Double air gap magnetic lenses, axial bore diameter, rotation free image, minimum value of the projector focal length.

المقدمة

الوظيفة الأساسية للعدسة المغناطيسية المسقطية هي تكبير الصورة التي تكونها العدسة الشيئية وإسقاطها على شاشة المجهر الالكتروني، ولكن غالبا ما يصاحب عمل هذا النوع من العدسات حـدوث تـشويه فـي الصورة المتكونة على شاشة المجهر الالكتروني، وأهم هذه التشويهات هما التشوهان ألشعاعي والحلزونـي. ولأجل الحصول على صور ذات جودة عالية يجب إلغاء هذه العيوب أو تقليصها، وقد تبين من خلال نـشر العديد من البحوث في هذا المجال انه لا يمكن إلغاء التشوهين ألشعاعي والحلزوني في آن واحـد باسـتخدام العدسة المنفـردة، لـذلك لجـأ البـاحثون إلـى اسـتخدام عدسـة مـسقطية مزدوجـة بطرائـق عديـدة (Juma and Mulvey, 1978).

لقد أُستخِدمت العديد من الطرائق للتخلص من هذه التشويهات التي تعاني منها تلك العدسات ونـشرت الكثير من البحوث حول هذا الموضوع. حيث قام Stabenow عام 1935 بتهييج ملفين خاليين مـن الحديـد وغير متساويين في عدد اللفات ولكن صافي (عدد الأمبير – لفة) في كلتا العدستين متساو ومتعـاكس، وقـد أخفقت هذه المحاولات بسب تداخل المجالين المغناطيسيين عند التهيجات العالية. كذلك وجد العالم Hillier في عام 1946 طريقة لتصحيح التشويه الشعاعي وذلك باستخدام عدسة مزدوجة إلا انه لم يـتم الـتخلص مـن التشويه الحلزوني كلياً (Al-Hilly, 1982). كما قام كلٌ من (Juma and Mulvey) في عام 1978 بدراسـة دوران الصورة في العدسات الكهرومغناطيسية المزدوجة. وفي عام 1981 اسـتطاع (Tsuno and Harada) بتقليص معامل التشويه الشعاعي والحلزوني من خلال استخدام عدسة ثلاثية الأقطاب.

ودرس زيـوغ التـشويهات فـي العدسـة المغناطيـسية المزدوجـة مـن قبـل (Nakasuji, 1997). وفي عام 2002 تقدم الباحث Al- Shummary بدراسة حول التشويهات في العدسات المسقطية في المجهر الالكتروني النفاذ.

كما تم دراسة نظام الدوران الحر بالتفصيل من قبل (Alamir, 2003)، كذلك وجد أن معامل التشويه الحلزوني للمجال الكروي ضرورياً لدراسة العدسة المسقطية أحادية القطب وذلك باستخدامه طرائق رياضية لحل هذه المعضلة (Alamir, 2004).

كما قام (Al- Khashab and Ahmed, 2005) بتصميم عدسة مسقطية مزدوجة ذات زاوية قطب مثلى، فضلاً عن قيام (Arabo,2005) بتصميم عدسة مسقطية مزدوجة على شكل مقطع مخروط ناقص.

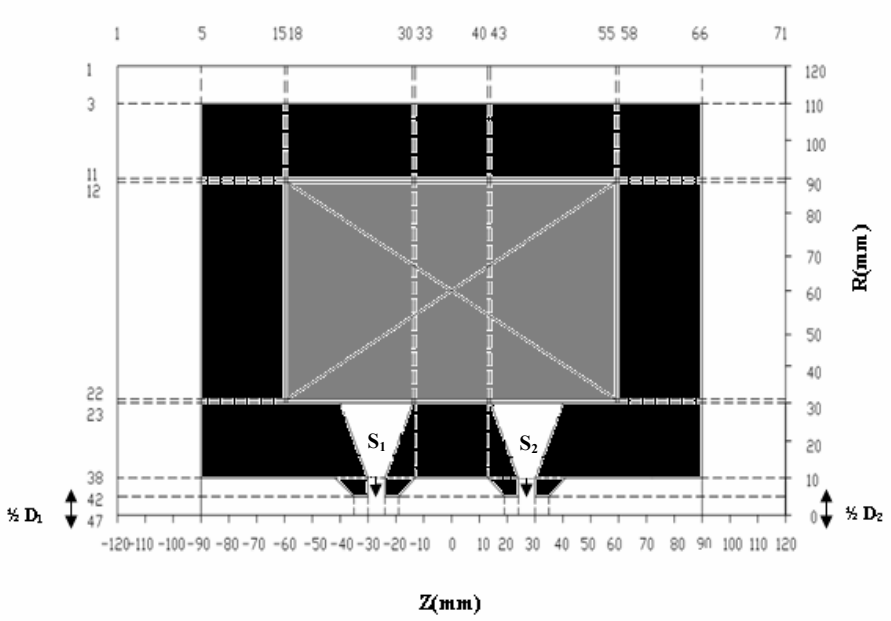
كذلك في عام 2009 تقدم Alamir بدراسة حول معالجة معامل التشويه ألشعاعي والحلزوني للعدسات المغناطيسية، وفي عام 2010 قام Al- Khashab وآخرون بتصميم عدسة مسقطية ثلاثية الأقطاب متناظرة خالية من الدوران.

يهدف البحث إلى تصميم عدسة كهرومغناطيسية مسقطية ثنائية الفجوة الهوائية (Double Air Gap) متكونة من أربعة أقطاب متماثلة وملف منفرد، ودراسة تأثير عرض الفجوة الهوائية (S) على الخواص المسقطية عند سقوط الحزمة الالكترونية باتجاه المحور البصري، ودراسة تأثير قطر الفتحة المحورية (D) للعدسة على تلك الخواص. كذلك سوف يتم تجزئة الملف المنفرد إلى ملفين متساويين بالمساحة وعدد اللفات وإمرار التيار في هذين الملفين باتجاه واحد وكذلك باتجاهين متعاكسين ودراسة مدى تأثير هذا التغيير على سلوك الفيض المغناطيسي وعلى الخواص المسقطية للعدسة في كلتا الحالتين.

تصميم العدسة الكهرومغناطيسية ثنائية الفجوة الهوائية

تم تصميم عدسة كهرومغناطيسية ثنائية الفجوة الهوائية (Double Air Gap) متكونة من أربعة أقطاب متماثلة وملف منفرد ذي مقطع مستطيلي (Solenoid) مساحة مقطعه العرضي ($6844\ mm^2$) يستخدم لتهييج العدسة، وتحاط الأقطاب والملف بشبكة مغناطيسية (Magnetic Circuit) مصنوعة من نفس مادة القطب (Soft Iron) وذات سمك مناسب لمنع تسرب الفيض المغناطيسي (Arabo, 2005) وتمتلك هذه العدسة زاوية قطب مقدارها ($ß = 63^0$) وهي زاوية القطب المثلى (Al- Khashab and Ahmed, 2004)، وتخترق العدسة فتحة محورية دائرية ذات قطر (D) حيث ان ($D=D_1=D_2= 10\ mm$) وتفصل أقطاب العدسة الأربعة بعضهم عن البعض فجوة هوائية (S) بحيث ($S=S_1=S_2= 6\ mm$) وأطلق على هذه العدسة (L_1). الشكل (1) يوضح المخطط والأبعاد الهندسية وتوزيع خطوط المشبك الخشن (Coarse Mesh) على نصف أبعاد العدسة.

تم احتساب توزيع الفيض المغناطيسي المحوري (B_z) للعدسة (L_1) عند سقوط الحزمة الالكترونية باتجاه المحور البصري باختيار تهيج ثابت ($NI= 2000\ A\text{-}t$) عند قيم مختلفة للفجوتين الهوائيتين ($S=S_1=S_2= (2,4,6)\ mm$). بحيث تكون قيمة قطر الفتحة المحورية ($D=D_1=D_2=10\ mm$) ثابتة باستخدام برنامج AMAG الذي أعده (Lencovà, 1986). ويتميز هذا البرنامج بامتلاكه دقة عالية ويعمل على معالجة ظاهرة التشبع المغناطيسي، اذ يقوم البرنامج باحتساب كثافة الفيض المغناطيسي في العدسات المشبعة وتتم العملية بصورة تدريجية حيث تجري الحسابات للعدسة المشبعة بسلسلة من التهيجات، فنتائج التهيج السابق تستعمل بوصفها نقطة انطلاق للتهيج اللاحق ذي القيمة الأعلى وهكذا يتم معالجة التشبع المغناطيسي بصورة تدريجية (Tsuno, 1997). كما طُور هذا البرنامج فيما بعد من قبل (Al- Khashab and Ahmed, 2005).

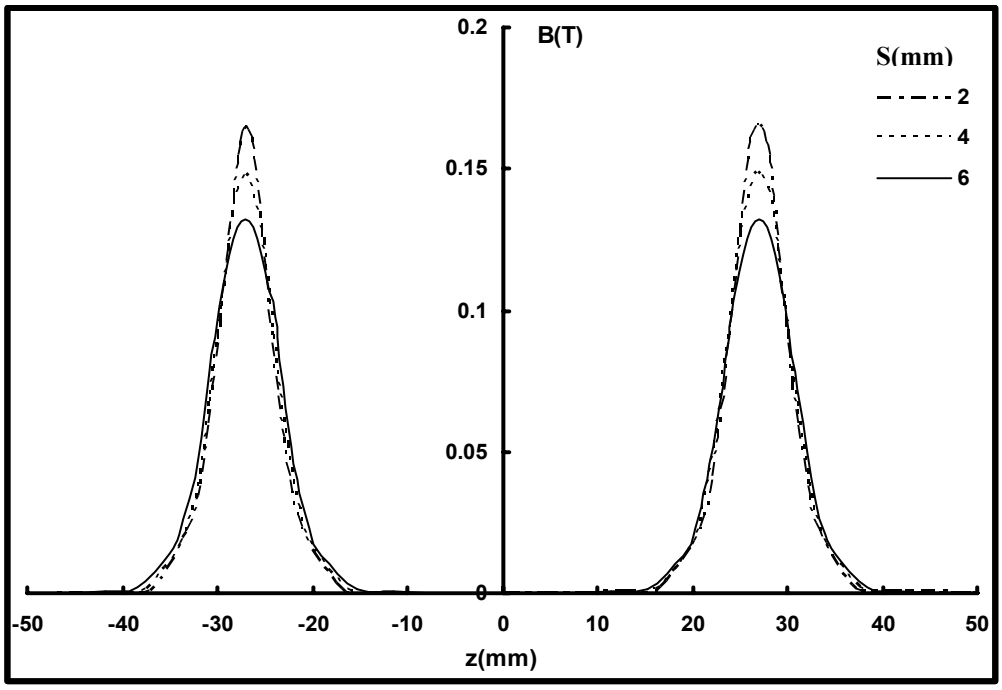


الشكل 1 : المخطط والأبعاد الهندسية وتوزيع خطوط المشـــبك الخشن (Coarse Mesh) على نصف أبعاد العدسة الكهرومغناطيسية المسقطية ثنائية الفجوة الهوائية L_1.

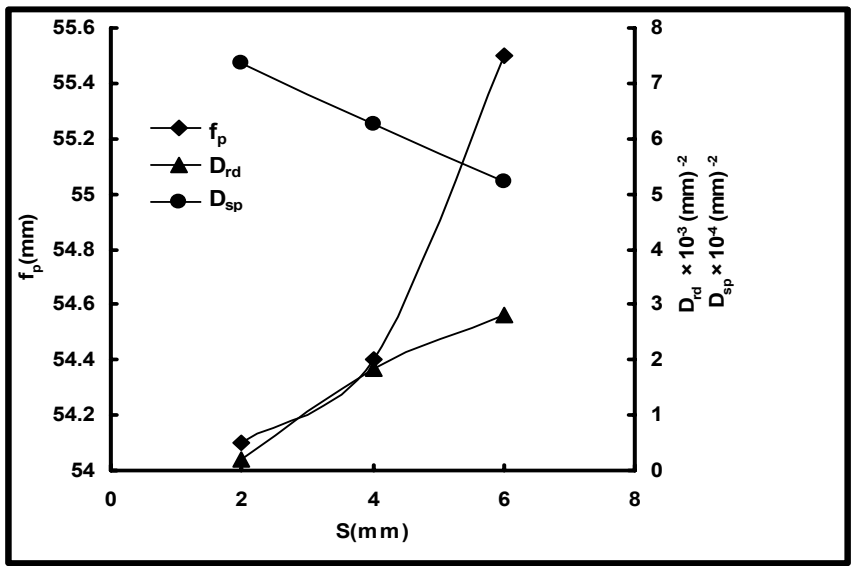
ويعتمد هذا البرنامج على طريقة العناصر المحددة (FEM)، واعتمد هذا التحليل على تقـسيم النـصف العلوي للعدسة (L_1) إلى مناطق ذات أشكال رباعية باستخدام خطوط المشبكات الخـشنة (Coarse Meshes) ثم يتم تقسيم هذه المشبكات إلى تقسيمات أخرى ثانوية أدق تسمى (Fine Meshes) ويقوم البرنـامج بتقـسيم المـشبكات تلقائيـاً مـع مراعـاة أن يكـون توزيـع كثافـة خطـوط المـشبكات بتركيـز اكبـر (Tahir and Mulvey,1991) في منطقتي الفجوتين الهوائيتين والأقطاب وهذا التوزيـع يعتمـد بالدرجـة الأولى على دقة الباحث المصمم للعدسة (Podbrdsky and Krivanek,1988). ويتضح من الـشكل (2) أن القيم المختلفة لـ (S) ذات تأثير واضح على القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي (B_{max}) وعندما كانت ($S=S_1=S_2=2mm$) فقد تحققت أعلى قيمة لـ(B) وأقل عرض نصفي(H .W) (Half Width). وتبين أيضا أن قمة (B_{max}) تقع تماماً في مركزي الفجوتين للعدسة وذلك لتناظر المجال المغناطيسي فيهما، ثم يبدأ هـذا المجال بالنقصان والاضمحلال باتجاه ما يسمى بـ نير العدسة والحدود الخارجية لها. وان المسافة الفاصـلة بين قمتي المجالين المغناطيسيين لهذه العدسة تساوي (54mm).

كمـا تـم احتـساب الخـواص المـسقطية للعدسـة (L_1) باسـتخدام برنـامج (Projector) (Marai, 1977) والمتمثلة بالبعد البـؤري المـسقطي (Projector Focal Length) ومعـاملات التـشويه (Distortion Parameters) والتي تشمل التشوهين الشعاعي والحلزوني (Radial and Spiral Distortions) كما هو موضح في الشكل (3).

ومن الجدير بالذكر أن التقليص من التشويه الحلزوني في العدسة المسقطية أكثر صعوبة من تقليل التشويه الشعاعي (Marai and Mulvey, 1977)، كما أن العدسة المسقطية تُشغل عند القيمة الصغرى لبعدها البؤري المسقطي (Riecke, 1985).

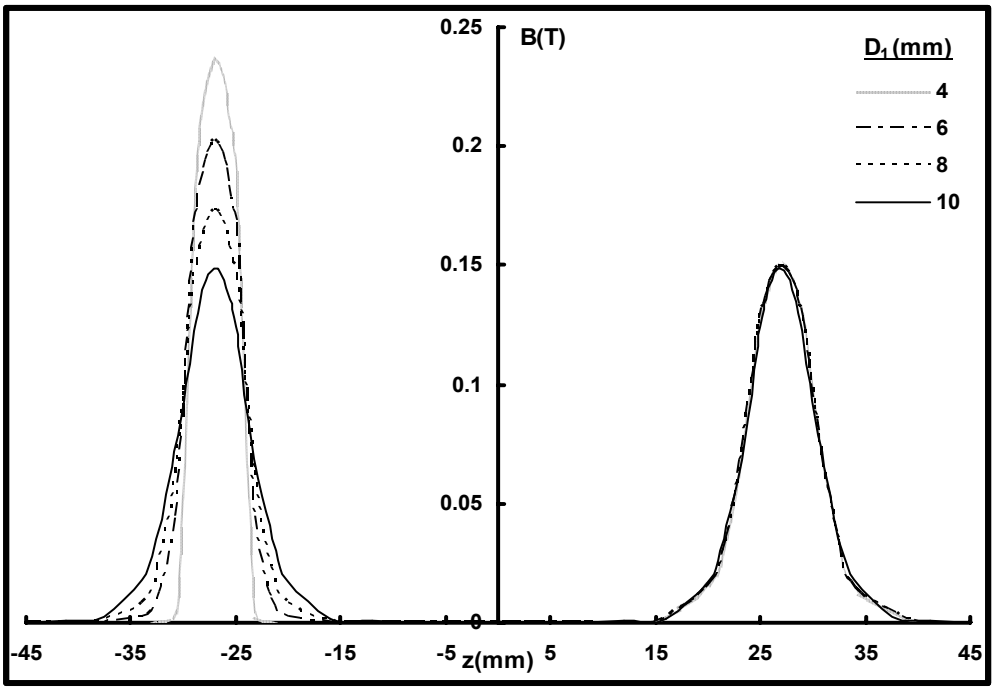


الشكل 2 : توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المحوري للعدسة (L_1) وبثبوت كلٍ من التهيج (NI= 2000 A-t) وقطر الفتحة المحورية (D= 10 mm) ولقيم مختلفة من عرض الفجوة الهوائية (S).

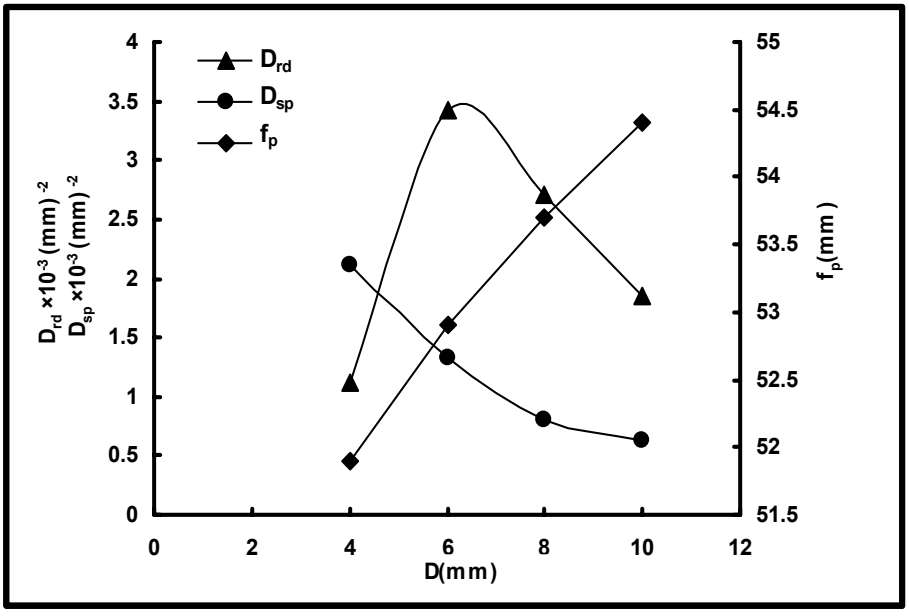


الشكل 3: تغير الخواص المسقطية (f_p, D_{rd}, D_{sp}) للعدسة (L_1) عند القيمة الصغرى لبعدها البؤري المسقطي كدالة لعرض الفجوة الهوائية (S) عند ثبوت كلٍ من التهيج(NI= 2000 A-t) وقطر العدسة (D= 10 mm).

كذلك تم تغيير قطر الفتحة المحورية الأولى (D_1) للعدسة (L_1) إذ اختيرت القـيم (D_1=(4,6,8) mm) مع بقاء كل من القيم (D_2= 10 mm) و(S_1= S_2= 4 mm)، ووجد توزيع الفيض المغناطيسي لها عند تهـيج ثابت (NI = 2000 A- t)، ويتضح من الشكل (4) انه بتقليل (D_1) أن قمة الفيض (B_{max}) تزداد مـع بقـاء العرض النصفي (H.W) ثابت تقريباً وقد حصلت العدسة على اقل بعد بؤري عند (D_1= 4 mm). وحـسبت خواصها المسقطية وكما هو موضح في الشكل (5) حيث نلاحظ انه بتناقص قيمة (D) أدى إلى انخفاض في قيم التشوهات المسقطية.

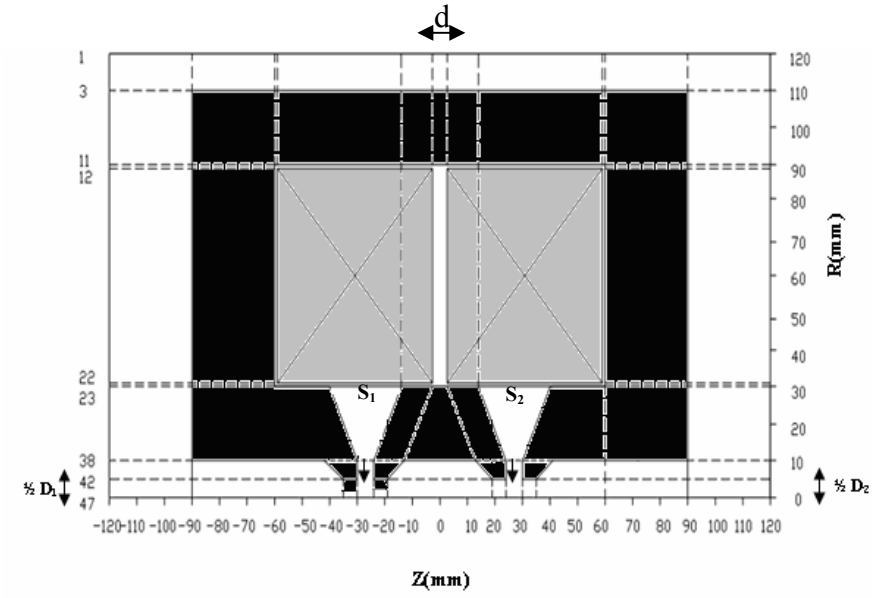


الشكل 4 : توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المحوري للعدسة (L_1) وبثبوت كلٍ من التهيج (NI= 2000 A-t) وعرض الفجوة الهوائية (S= 4 mm) ولقيم مختلفة من قطر الفتحة المحورية (D_1).



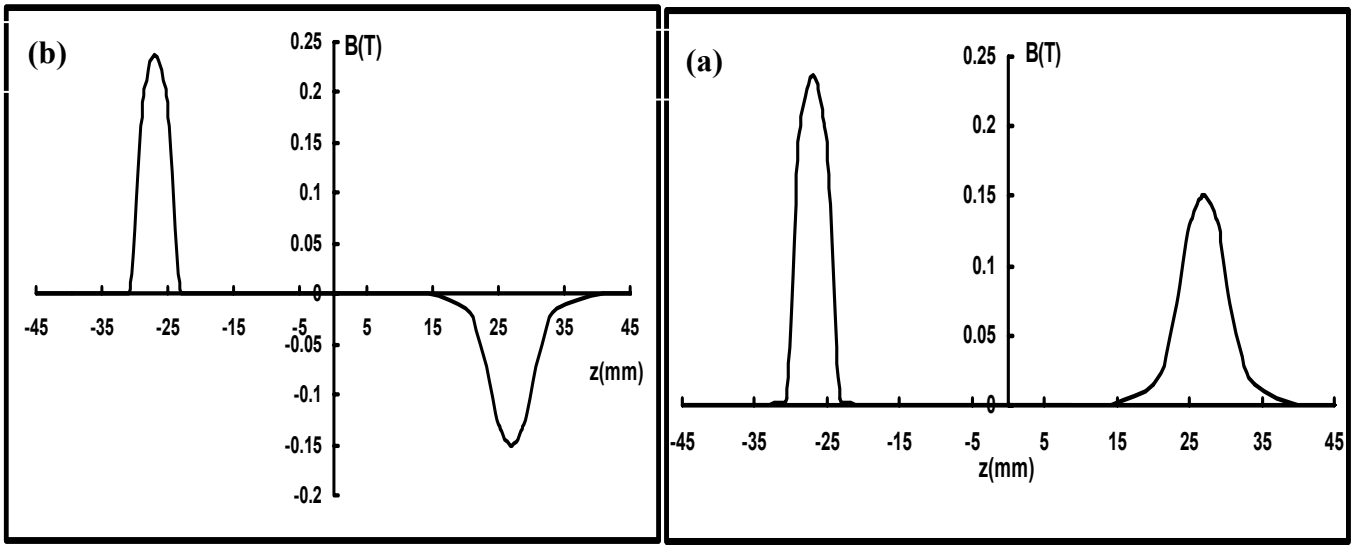
الشكل 5 : تغير الخواص المسقطية (f_p, D_{rd}, D_{sp}) للعدسة (L_1) عند القيمة الصغرى لبعدها البؤري المسقطي كدالة لقطر الفتحة المحورية (D_1) وبثبوت كلٍ من التهيج (NI= 2000 A-t) وعرض الفجوة الهوائية (S= 4 mm).

كذلك تم تجزئة الملف المنفرد في العدسة (L_1) إلى ملفين متساويين بالمساحة والتهيج وكانت المسافة الفاصلة بين الملفين ($d = 4$ mm) مع الاحتفاظ بجميع الأبعاد الهندسية وتوزيع خطوط المشبكات الخشنة والناعمة ثابتة والذي أُستخدم في العدسة (L_1) وأطلق على هذه العدسة (L_2) والمبينة في الشكل (6). وتم احتساب كثافة الفيض المغناطيسي لهذه العدسة عند ($NI = 2000$ A-t) وثبوت القيم ($S_1 = S_2 = 4$ mm)، ($D_1 = 4$ mm) و ($D_2 = 10$ mm) عند سقوط الحزمة الالكترونية باتجاه المحور البصري، بحيث يكون اتجاه التيار في الملفين باتجاه واحد أي أن ($NI_1 = NI_2$) كما في الشكل (7a) وتم أيضا إيجاد الخواص المسقطية والموضحة في الشكل (8a)، تبين أن توزيع كثافة الفيض المغناطيسي للعدسة (L_2) سلوكاً مماثلاً للعدسة (L_1) لاحظ الشكل (4) كذلك لم نجد تحسناً في التشويه الحلزوني بل أنه يزداد بازدياد قيمة التهيج.

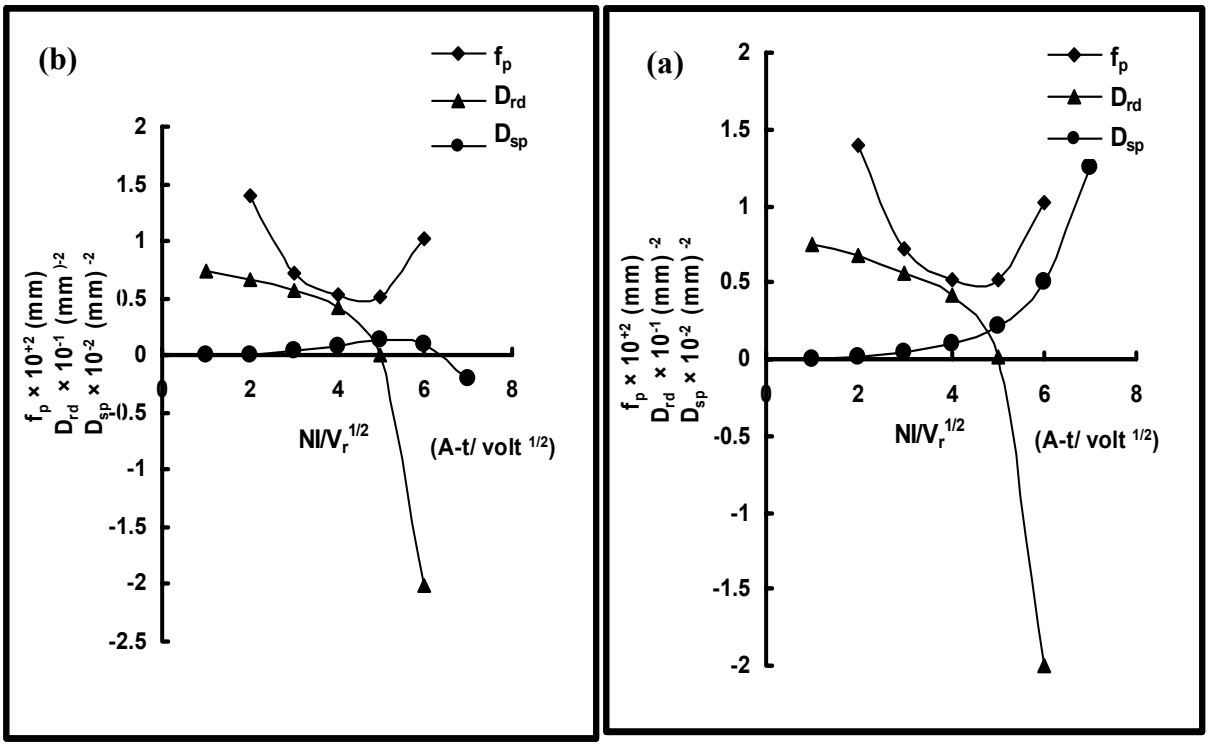


الشكل 6: المخطط و الأبعاد الهندسية وتوزيع خطوط المشـــبك الخشن (Coarse Mesh) على نصف أبعاد العدسة الكهرومغناطيسية المسقطية ثنائية الفجوة الهوائية L_2 .

وكذلك تم احتساب توزيع كثافة الفيض المغناطيسي للعدسة (L_2) عند عكس اتجاه التيار في الملف الثاني بحيث يكون ($NI_1 = -NI_2$) عند القيمة ذاتها من التهيج وكما هو موضح في الشكل(7b) نلاحظ أن الجزء الثاني للفيض المغناطيسي اتجه نحو الاسفل وعند احتساب الخواص المسقطية للعدسة (L_2) وجد أن معامل التشويه الحلزوني قد تناقص بشكل واضح كما مبين في الشكل (8b) وان أفضل نتائج تم الحصول عليها عند القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي هي (f_p=52 mm)، (D_{rd}= zero) و ($D_{sp} = 1.42 \times 10^{-3}$ mm^{-2}) عند ($NI/V_r^{1/2} = 5$ A-t/ volt$^{1/2}$).



الشكل 7: توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المحوري للعدسة (L_2) عند قيمة تهيج ثابتة (NI= 2000 A-t) بعرض فجوة هوائيـة (S = 4 mm) وبقطر فتحة محورية (D_1=4 mm, D_2=10 mm) (a): في حالة كون التيار باتجاه واحد. (b): في حالة كون التيـار باتجاهين متعاكسين.



الشكل 8 : تغير كلاً من البعد البؤري المسقطي f_p، معامل التشويه الشعاعي D_{rd} ومعامل التشويه الحلزوني D_{sp} للعدسة (L_2) كدالة لمعلم التهيج ($NI/V_r^{1/2}$)عند قيمة تهيج ثابتة (NI= 2000 A-t) بعرض فجوة هوائية (S = 4 mm) وبقطر فتحة محورية (D_1=4 mm, D_2=10 mm)
(a) : في حالة كون التيار باتجاه واحد. (b): في حالة كون التيار باتجاهين متعاكسين.

الاستنتاجات

وجد أن القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي تزداد بازدياد كلٍ من عرض الفجوة الهوائية وقطـر الفتحة المحورية.

1- لُوحظ أن الخواص المسقطية للعدسة كانت متماثلة في حالة كون العدسة متكونة من ملف واحدا (L_1) او ملفين (L_2) مع ابقاء مقدار التهيج ثابت في كلا العدستين.

2- أوضحت النتائج التي تم الحصول عليها أن الخواص المسقطية في العدسة (L_2) عند إمرار التيار في الملفين باتجاهين متعاكسين قد تفوقت بشكل كبير على مثيلاتها عند إمرار التيار باتجاه واحد.

3- تم تقليص معامل التشويه الشعاعي والحلزوني عند القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي باستخدام العدسة ثنائية الفجوة الهوائية وباستخدام الملفين المتعاكسين بالاتجاه مما يبين جلياً حصول هذه العدسة علـى أفضل صورة متكونة.

المصادر

Al-amir, A.S.A. (2003). On the rotation – free and distortion – free systems. *J. Optik,* 114 (**11**), 509-513.

Al-amir, A.S.A. (2004). Spiral distortion of magnetic lenses with field of the form B(z) αz^{-n} , n= 2,3,4. *J. Optik,* 115 (**2**), 1- 4.

Al-amir, A.S.A (2009). Radial and spiral distortion of magnetic lenses with fields of the from B(z) α z^n . *J. Optik,* 120, 984-986.

Al-Hilly, S. (1982). " The correction of spiral distortion in the transmission electron microscope ", PhD. Thesis, The University of Aston in Birmingham, UK.

Al-khashab, M.; Ahmad, A. (2004). Some approaches to the projector lens polepiece geometry and their effect on magnetic flux lines. *J. Dirasat, Pure Sci.*,31(**1**), 22-29.

Al-Khashab, M.; Ahmad A., (2005). Designing a doublet lens of optimized polepiece angle, *J. Dirasat Bure Sci*., 32(**2**) , 182-188.

Al-Khshab, M.A.; Al-Abdullah, A.E.; Arabo, Z.T. (2010). A rotation free image of triple polepice projector lens design. *J. Raf. Sci.*, 21 (**2**), 57-64.

Al-Shummary, B.A.N. (2002). A study of distortion – for the projector lenses in the transmission electron microscope. M.Sc. Thesis, Babylon University, Iraq (in Arabic).

Arabo, Z.T.A (2005). " Design a rotation – free projector doublet magnetic lens for electron microscope". M.Sc. Thesis, The University of Mosul, Iraq (in Arabic).

Juma, S. M.; Mulvey, T. (1978). Miniature-rotation free-magnetic electron lenses for the electon microscope . *J. Phys. E.: Sci., Instrum .,* 11, 759- 764.

Lencovà, B. (1986). Program AMAG for Computation of vector potential in rotationally symmetric magnetic electron lenses by the finite element method, *J. Inst. Sci. Instrum. Czech. Acad. Brno Czechoslovakia*, 1-58.

Marai, F.Z.; Mulvey , T. (1977). Developments in Electron Microscopy and Analysic. ed. D.L. Misell . *Inst. Phys. Conf. Sev*. (**36**), 35.

Nakasuji, M. (1997). Distortion a berration in a symmetiric magnetic doublet for an electron beam projection systems . *J. Vac. Sci, Technol. B*. 15(**5**), 1833-1883.

Podbrdsky, S.; Krivanek, O.L. (1988). A universal mesh for calculating the properties of highly saturated magnetic electron lenses by the finite element method, *J. Optik*, 79, 177-182.

Riecke, W.D. (1985). " Magnetic Electron Lenses ". Electron optical system, SEM Inc. AMF O Hara (Chicago), 1-14.

Tahir, K. ; Mulvey, T. (1991). Latent errors in the calculation of the fields of magnetic electron lenses by FEM , *J. Inst. Phys. Conf. Ser*., (119), Sec.12, 531- 534.

Tsuno, K.; Harada, Y. (1981). Minmisation of radial and spiral distrotion in electron microscopy through the use of triple pole – piece lens , *J. Phys. E – Sci. Instrum.*, 14, 313-320.

Tsuno, K. (1997). "Magnetic Lenses for Electron Microscopy ". Handbook of charged particle optics , ed. J., Oraloff, 143-175.