

## دراسة حاسوبية لتمغنت حديد العدسة الالكترونية المسقطية ثنائية القطب المزدوجة عديمة الدوران

د. حسين صالح حسن

كلية الطب / جامعة النهريين

### الملخص /

تتكون العدسة الكهرومغناطيسية المسقطية ثنائية القطب المزدوجة من عدستين متماثلتين ثنائيتي القطب موضوعتان الواحدة خلف الأخرى ، وان تركيب صفيحتيهما الخلفيتين تشكل الصفيحة المركزية للعدسة ثنائية القطب المزدوجة . ويدرس تمغنتها باستعمال برامج حسابية تحت شروط عمليات مختلفة باستخدام الحاسوب ، حيث تحسب المجالات المغناطيسية باستعمال طريقة العناصر المتناهية (Finite Element Method) وان تأثير سمك الصفيحة المركزية يعتمد على طريقة عمل العدسة ثنائية القطب المزدوجة ، كما ان الاختيار الصحيح لصفيحة الحديد المركزية مهم جدا عندما تعمل بأسلوب التهيجات المتعكسة في عدستها للحصول على أفضل خواص بؤرية وتجنب التشعب المغناطيسي وتقليل أي تسرب للفيض المغناطيسي عند المناطق الحرجة .

### المقدمة /

العدسة الكهرومغناطيسية ثنائية القطب (1) أو الثلاثية القطب (2) تتكون من عدسات كهرومغناطيسية تركيب الواحدة خلف الأخرى . وان الصفيحتين الخلفيتين المكونة للعدستين تشكل الصفيحة المركزية للعدسة ثنائية القطب المزدوجة . إن العدستين يمكن أن تكونا متماثلتين أو مختلفتين هندسيا كعدسة ثنائية القطب (3) أو كعدسة أحادية القطب (4) .

إن العدسة ثنائية القطب هي الأكثر شيوعا واستعمالا في المجاهر الالكترونية التجارية ، لذلك فان العدسات ثنائية القطب المزدوجة المفترضة في البحث الحالي تكون متماثلة هندسيا ، وان ملفات العدسة تكون لها نفس العدد من الأمبير – لفة (NI) التي تولد المجال المغناطيسي المحوري ، حيث (N) هي عدد لفات الملف لكل عدسة و (I) هو التيار المستمر المار خلال الملف .

أول محاولة للحصول على صور عديمة الدوران والتشويه في آن واحد باستخدام العدسة المزدوجة كانت من قبل (Hillier) عام 1946 وكانت أول دراسة نظرية وعملية حول هذا النوع من العدسات المغناطيسية المسقطية تلك التي ظهرت في مجموعة بحوث قام بها (Juma and Mulvey) في الأعوام 1974 ، 1975 ، 1978 .

من أهم خواص العدسة المزدوجة هي إمكانية الحصول من خلالها على صور عديمة الدوران (rotation free) وذلك من خلال تهيج إحدى العدستين بشكل معاكس للعدسة الثانية<sup>(5)</sup>. كما أن العدسة المزدوجة يمكن أن تعطي صوراً عديمة التشويه أشعاعي (distortion-free images) في نقطتي التكبير الأولى ( $M_1$ ) والثانية ( $M_2$ ) ضمن الدوران الأول والثاني (first and second loops) إذا تم وضع العدسة الثانية في بؤرة العدسة الأولى<sup>(6)</sup>، وذلك يعني أن للعدسات المزدوجة ميزتين تشغيليتين مهمتين جداً عند استخدامها كعدسات مسقطية .

إن موضوع تمغنط حديد العدسة ثنائية القطب المسقطية لم يبحث كثيراً فيما سبق ، حيث ظهرت أهميته في المجاهر عالية الفولتية ، وإن البحث الحالي يتعلق بشكل رئيس بتمغنط أجزاء حديدية مختلفة من العدسة ثنائية القطب المسقطية ، حيث يحسب المجال المغناطيسي باستخدام برنامج حسابي خاص .

### الجانب النظري /

إحدى الصفات المميزة للعدسات الكهرومغناطيسية هي دوران الصورة حول محورها البصري مثل الصورة المتكونة من مرور حزمة الكترونية خلال المجال المغناطيسي للعدسة ، ولأن عدستي القطب الثنائي المزدوجة متماثلة فإن كل عدسة تقوم بتدوير صورة الحزمة الالكترونية بزواوية ( $\square$ ) وتعطى بالعلاقة الآتية :

$$\square = \frac{e\mu_0^2}{8m} \cdot \frac{NI}{V_r^{1/2}} = 0.1863 \left( \frac{NI}{V_r^{1/2}} \right) \dots\dots\dots [1]$$

حيث أن : (e/m) نسبة الشحنة إلى كتلة الإلكترون (الشحنة النوعية للإلكترون) ( $\mu_0$ ) النفاذية المغناطيسية في الفراغ وتساوي  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m . ( $V_r$ ) الفولتية المعجلة المصححة نسبياً وتقاس بالفولت وتساوي  $V_r = V(1 + 0.978 \times 10^{-6} v)$  .

المعادلة [1] تبين إن اتجاه الدوران يعتمد على اتجاه التيار في الملف ، لذلك فإنه عندما تمر التيارات في العدستين ثنائيتي القطب باتجاهين متعاكسين تنتج صوراً عديمة الدوران . وتعمل العدسات ثنائية القطب عديمة الدوران كعدسات مسقطية<sup>(1)</sup> في المجهر الإلكتروني النفاذ (TEM) . إن البعد البؤري والتكبير لكل عدسة أو للتركيب المكون للعدسة ثنائية القطب المزدوجة كوحدة واحدة لا يؤثر على اتجاه دوران صورة الحزمة الالكترونية لأن البعد البؤري والتكبير يعتمدون على مربع التيار .

تتكون هذه العدسات من ملف دائري كبير محاط بدائرة حديدية كبيرة في محورها قطبان من مادة حديدية التمكن ذات نفاذية عالية تفصل بينهما فجوة هوائية عرضها (S) وتخرق هذه الأقطاب فتحة محورية قطرها (D) على امتداد طول محور العدسة فينحصر في الفجوة الهوائية بين القطبين المجال المغناطيسي المتولد من مرور تيار كهربائي مستمر في الملف . ولأن العدسة متناظرة سيكون شكل المجال

المحصور في الفجوة الهوائية متناظرا وتقع القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي ( $B_m$ ) في منتصف الفجوة الهوائية ( $S$ ) بين القطبين .  
الشكل (1) يوضح مقطع عرضي لعدسة مصغرة ثنائية القطب مزدوجة تعمل ب ( $100 \text{ KV}$ ) <sup>(1)</sup> وان صفائح الحديد العليا والمركزية والسفلى لها فتحة قطرها ( $D=2\text{mm}$ ) على امتداد المحور البصري تسمح بمرور الحزمة الالكترونية المعجلة من خلالها . والعدستين المتماثلتين لهما نفس عرض الفجوة الهوائية ( $S=3 \text{ mm}$ ) تفصل بين قطعتي القطب لكل عدسة .

تم افتراض العدسة الثنائية في البحث الحالي كعدسة اختبار، حيث بقيت جميع أبعادها ثابتة كما هي ما عدا سمك الصفائح الثلاثة أعلاه ، ووضع سمك كل صفيحة بشكل متغير لكي يتم حساب التمغنط عبر مدى واسع من قيم السمك ( $T$ ) والتهدج ( $NI$ ) ، علما بان المجال المغناطيسي في كل فجوة هوائية يتكون بواسطة التهدج ( $NI$ ) في كل عدسة .

إن المجال المغناطيسي الكلي ( $B_z$ ) المتولد في الفجوة الهوائية بين القطبين هو مجموع المجالات الناتجة عن تمغنط الحديد ( $B_{Fe}$ ) ومرور التيار المستمر في الملفات ( $B_c$ ) أي أن :

$$B_z = B_{Fe} + B_c \quad \dots\dots\dots(2)$$

مع ملاحظة أن ( $B_c$ ) اصغر دائما من ( $B_{Fe}$ ) . كما إن هناك طرق مختلفة لإيجاد كثافة الفيض المغناطيسي منها من يقاس بواسطة مسبار هول (Hall-probe) ، أو أن يحسب بطريقة العناصر المتناهية (Finite Element Method) المستخدمة في هذا البحث . وكلما يكبر قطر فتحة القطب ( $D$ ) فإن مجالا مغناطيسيا أكبر يخترقه ويؤدي إلى انخفاض قمة المجال لكي تبقى المساحة تحت منحنى توزيع المجال المغناطيسي ثابتة ، وكذلك تقل القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي ( $B_m$ ) بزيادة عرض الفجوة الهوائية بين الأقطاب الحديدية ( $S$ ) .<sup>(7)</sup>

إن كثافة الفيض المغناطيسي ( $B$ ) عند أي نقطة من نقاط صفائح الحديد هي محصلة المركبات المحورية ( $B_z$ ) والقطرية ( $B_r$ ) للمجال المغناطيسي . أي أن :

$$B = (B_z^2 + B_r^2)^{1/2} \quad \dots\dots\dots[3]$$

إن المنظومة التي تولد مجالا متناظرا حول المحور ( $Z$ ) مثل العدسة الخالية من الحديد والعدسة ثنائية القطب المتناظرة تكون فيها قيمة المركبة القطرية للمجال ( $B_r$ ) صفرا عند ( $Z=0$ ) وعلى هذا الأساس فإن المركبة ( $B_z$ ) تصل قيمتها العظمى ( $B_m$ ) عند هذه النقطة وتتناقص إلى الصفر في كلا الاتجاهين حول مستوى التناظر . وكذلك تكون المركبة ( $B_r$ ) صفرا في المناطق البعيدة عن نقطة الأصل كما في الشكل (2) .<sup>(8)</sup>

عند تثبيت عرض الفجوة الهوائية ( $S$ ) وقطر فتحة القطب ( $D$ ) ودراسة تأثير المتغير الفيزيائي ( $NI$ ) على الخواص البصرية لمجالات التصوير فإن المساحة تحت منحنى توزيع كثافة الفيض المغناطيسي تزداد بزيادة التهدج ( $NI$ ) لكن عرض النصف

الكلي لمنحني التوزيع (W) يبقى ثابتاً بسبب ثبوت (S) و (D) ، حيث أن ثبات (W) يؤدي إلى استقرار خواص المجال المغناطيسي التصويري عند قيمة محددة (9) . إذا تم تشغيل العدسة الثنائية المزدوجة بحيث أن التهييج  $(NI)_1$  في العدسة الأولى يكون مساوياً وبنفس الاتجاه للتهييج  $(NI)_2$  في العدسة الثانية فإن قيم الفيض المغناطيسي للعدستين ستكون معاكسة الواحدة للأخرى عند الصفيحة المركزية لكل قيم التهييجات المستعملة ، أي أن :  $(NI)_1 = + (NI)_2$  . ومن ناحية أخرى فإذا كانت التهييجات  $(NI)_1$  و  $(NI)_2$  متساوية ومتعاكسة فيما بينها فهذا يعني أن :  $(NI)_1 = - (NI)_2$  وان الفيض المغناطيسي الناتج عن إحدى العدستين سيضاف إلى الفيض الناتج عن العدسة الأخرى عند منطقة الصفيحة المركزية ، وبذلك تكون زاوية دوران الصورة في كل من العدستين كما يأتي :

$$\square_1 = + K(NI) \quad , \quad \square_2 = - K(NI) \quad \dots\dots\dots [4]$$

لذلك فإن زاوية الدوران النهائية ( $\square$ ) تساوي :

$$\square = \square_1 + \square_2 = 0 \quad \dots\dots\dots [5]$$

وهكذا فإن تمغنط الحديد ينشأ عن أساليب متعددة من التشغيل ويصبح سمك الصفيحة عامل هندسي مهم لتجنب التسرب في الفيض المغناطيسي والتشبع المغناطيسي للحديد (8) .

### النتائج والمناقشة /

عند أي نقطة في الدائرة المغناطيسية فإن كثافة الفيض المغناطيسي تتأثر بعاملين هما التهييج (NI) ومساحة المقطع العرضي أي سمك الحديد (T) عند تلك النقطة . الشكل (1) يوضح مستوى التناظر في المحور الأفقي والعمودي وهذا يعني إن العدسة الثنائية مكونة من أربعة أجزاء متماثلة لذلك فإن تمغنط نصف الصفيحة العلوي أو السفلي هو مشابه تماماً للنصف الأخر . لقد تم دراسة تمغنط الصفيحة المركزية عند سمك ثابت (T=10 mm) وسمك الصفائح العليا أو السفلى عند (T=3 mm) بحيث إن تمغنطهم كان دالة للتهييج (NI) في ربع واحد من العدسة الثنائية كما موضح في الشكل (3) حيث يبين زيادة كثافة الفيض المغناطيسي عند ثلاثة مواقع مختلفة بزيادة التهييج (NI) ، ويظهر الانحراف عن الحالة الخطية (بداية المنحني) عند تهييج بحدود (NI=20000 A.t) وهو تقريبا التهييج المطلوب لكي تعمل العدسة كعدسة مسقطية في المجهر الإلكتروني النفاذ (TEM) ذو (1 MV) . لذلك فإن اختيار سمك الصفائح العليا والسفلى عند قيمة (T=3 mm) لا يؤشر حالة حرجة جدا .

الشكل (3) يشير إلى أن التمغنط في المنطقة التي تربط بين الصفيحة وقطعة القطب هو الأكثر تأثيراً والأفضل افتراضاً في تصميم تلك الصفائح ، وتوضح الحسابات بأنه مع بقاء التهييج (NI) ثابتاً فإن كثافة الفيض المغناطيسي (B) في تلك المنطقة تتناقص افتراضياً كدالة لزيادة قيم سمك الصفيحة (T) . لذلك فإن تسرب الفيض والتشبع المغناطيسي لصفائح الحديد ليست مشاكل صعبة ويمكن التغلب عليها

عند التشغيل بفولتية عالية سواء كانت التيارات في العدستين بنفس الاتجاه أو الواحد عكس الآخر .

لقد تم دراسة تمغنط الصفيحة المركزية في ثلاثة مناطق مختلفة ، وأوضحت الحسابات بان أعلى كثافة فيض تظهر عند منطقة اتصال قطعة القطب مع الصفيحة المركزية ، وهكذا فان تمغنط الحديد في هذه المنطقة هو الأكثر أهمية والمأخوذ بنظر الاعتبار ، وفي مناطق أخرى غير الصفيحة المركزية فان كثافة الفيض المغناطيسي ليست مهمة جدا . والشكل (4) يوضح مثالا لتغير كثافة الفيض المغناطيسي في الصفيحة المركزية بسمك ثابت ( $T=10 \text{ mm}$ ) مع زيادة التهييج ( $NI$ ) . وعند قيم سمك اقل من ( $T=10 \text{ mm}$ ) فان التشبع المغناطيسي للحديد يصبح حرجا في المنطقة المشار إليها أعلاه وعند التهيجات التي تحتاج دراسة مجهرية عالية الفولتية .

الشكل (5) يوضح التغير في كثافة الفيض المغناطيسي ( $B$ ) مع سمك الصفيحة المركزية ( $T$ ) عند تهييج ثابت ( $NI=16000 \text{ A.t}$ ) ، ويتضح من الشكل (5) بان كثافة الفيض المغناطيسي ( $B$ ) تتناقص باستمرار مع زيادة السمك ( $T$ ) ، علما بأنه من غير المفضل أن يكون سمك الصفيحة المركزية اقل من ( $T=10 \text{ mm}$ ) .

إن البحث عند المنطقة الحرجة موضح في الشكل (6) وفيه تتغير كثافة الفيض المغناطيسي على امتداد سمك ( $10 \text{ mm}$ ) للصفيحة المركزية عند قيم متغيرة للتهييج ( $NI$ ) ، حيث تم حساب كثافة الفيض المغناطيسي على امتداد خط موازي للمحور البصري استنادا إلى مركز الفجوة الهوائية لإحدى العدستين ، وكانت المسافة من مركز الفجوة الهوائية إلى نقطة الاتصال بين القطب والصفيحة المركزية هي ( $7 \text{ mm}$ ) . كما يتضح من الشكل (6) بان قيم كثافة الفيض المغناطيسي عند نقاط مختلفة على امتداد سمك ( $10 \text{ mm}$ ) من الصفيحة المركزية تقترب من أدنى قيمة لها ويكون موقعها عند المستوى الأوسط للعدسة ثنائية القطب المزدوجة (أي وسط الصفيحة المركزية عند قيمة سمك  $12 \text{ mm}$ ) ، وهذه النقطة هي الأبعد عن الملف المجهز بالتيار وبأدنى قيمة للمجال المغناطيسي . ولهذا السمك النوعي ( $10 \text{ mm}$ ) فان الحسابات تشير إلى وجود مشاكل في تسرب الفيض المغناطيسي وتشبع الحديد والتي تظهر عند تهيجات بحدود ( $NI=20000 \text{ A.t}$ ) وعند فولتية تشغيل ( $1 \text{ MV}$ ) . لذلك فان تمغنط الحديد عند تلك النقاط الحرجة يجب أن يؤخذ بنظر الاعتبار في اختيار السمك الصحيح لتهيجات تشغيل نوعي معين .

## الاستنتاجات /

1 – مع بقاء التهييج ( $NI$ ) ثابتا فان كثافة الفيض المغناطيسي للمناطق الثلاثة : المنطقة C (البعيدة عن الصفيحة المركزية) ، المنطقة B و المنطقة A (منطقة اتصال قطعة القطب مع الصفيحة المركزية) تتناقص مع زيادة سمك الصفيحة ، لذلك فان اختيار سمك الصفائح العليا والسفلى ( $3 \text{ mm}$ ) ليس بمؤشر حرج جدا . كما إن أعلى كثافة

فيض مغناطيسي تظهر عند منطقة اتصال قطعة القطب مع الصفيحة المركزية ( المنطقة A ) وهذا يثبت أن تمغنت الحديد في هذه المنطقة هو الأكثر أهمية من باقي المناطق .

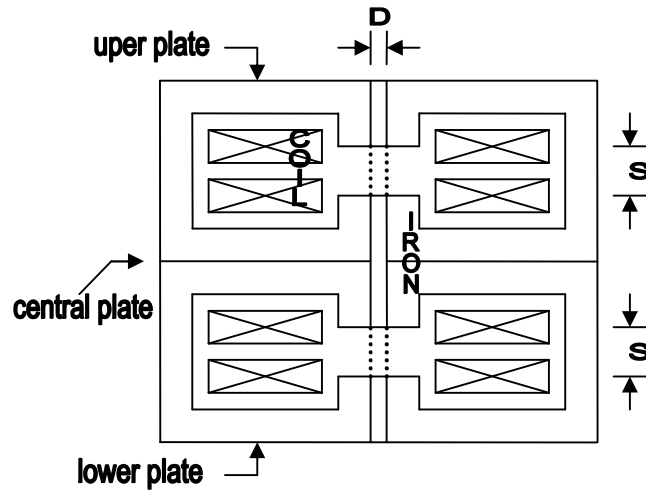
2 – عند قيم سمك للصفيحة المركزية اقل من (10 mm) فان التشبع المغناطيسي للحديد يصبح حرجا عند التهيجات التي تحتاج دراسة مجهرية عالية الفولتية ، لذلك فانه من غير المفضل أن يكون سمك الصفيحة المركزية اقل من (10 mm) ، وهكذا فان سمك الصفيحة المركزية عامل هندسي مهم عندما تستخدم العدسات ثنائية القطب كعدسات مسقطية عديمة الدوران في المجاهر الالكترونية النفاذة (TEM) عالية الفولتية حيث تتطلب تهيج عالي للعدسة .

3- مشاكل تسرب الفيض المغناطيسي وتشبع الحديد تظهر عند تهيجات بحدود (20000 A.t) وعند فولتية تشغيل (1 MV) ، حيث تكون أدنى قيمة لكثافة الفيض المغناطيسي في وسط الصفيحة المركزية عند المنطقة الأبعد عن الملف المجهز بالتيار .

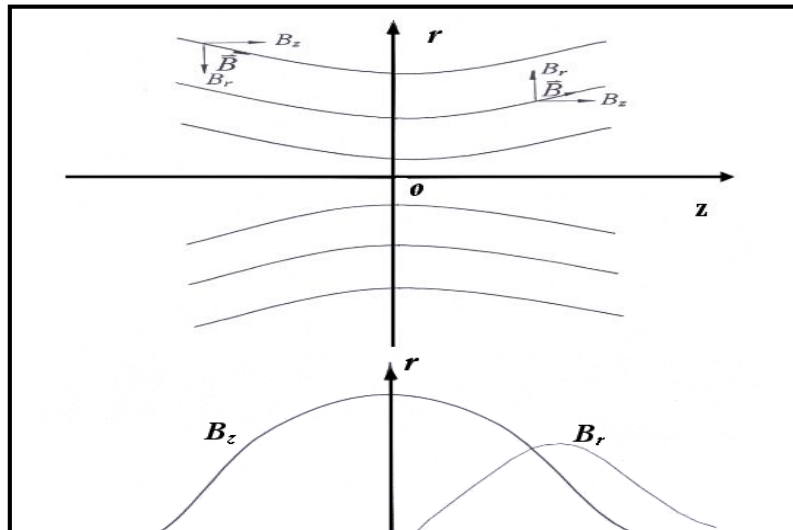
#### References /

- 1- Juma , S. M. and Mulvey , T. , " Miniature Rotation Free Magnetic Electron Lenses for Electron Microscope " , J. Phys. E: Sci. Instrum. , II, (pp. 759-764) , (1978) .
- 2- Tsuno , K. , and Harada , Y. , " Minimization of Spiral Distortion in Electron Microscope Through the use of a Triple-Pole Piece Lens " , J. Phys. E: Sci. Instrum. , 14 , (pp. 313-319) , (1981a) .
- 3- Juma , S. M. and Mulvey , T. , " New Rotation Free Magnetic Electron Lenses " , Vol. 1 , ed. J.V. Sanders and D. J. Good Child (Australian Academy of Science , Canberra) , (pp.134-135) , (1974) .
- 4- Juma , S. M. and Mulvey , T. , " A new Experimental Electron Microscope with a Rotation – Free Projector System " , Developments in Electron Microscope and Analysis . ed. J.A. Venables (New York : Academic ) , (pp.45-48) , (1976) .

- 5- Juma , S. M. , " Rotation Free Magnetic Electron Lenses " , Ph. D. Thesis , University of Aston, Birmingham, England, UK. , (1975).
- 6- Hillier , J. , " A Study of Distortion in Electron Microscope Projector Lenses " , J. Appl. Phys. 17 , (pp. 411-419) ,(1946).
- 7 - ياسين ، محمد جواد . " دراسة حاسوبية لعدسة الكترونية لا تقليدية ذات مجالين مغناطيسيين متعاكسين " ، رسالة ماجستير - كلية التربية الجامعة المستنصرية ، (1994) .
- 8- العمشاني ، محسن صلبوخ ارهيف . " دراسة تحليلية لزيوغ العدسة المغناطيسية المسطوية " ، رسالة دكتوراه - كلية العلوم - الجامعة المستنصرية ، (2006) .
- 9- Al-Obaidi , H. N. , " A New Analytical Mathematical Model for Approximating the Magnetic Filed of Symmetrical Lenses" , J. of Education. college, Al-Mustansriyah University, 3 , (pp.35-46) , (1999) .

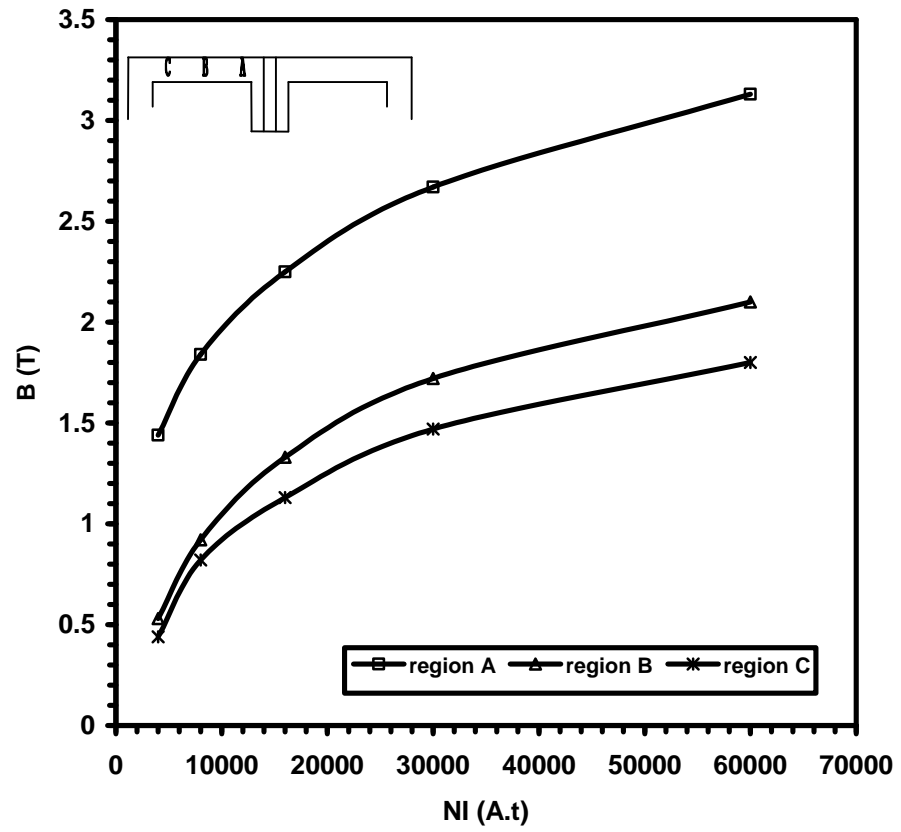


الشكل (1) مقطع عرضي للعدسة ثنائية القطب المزدوجة

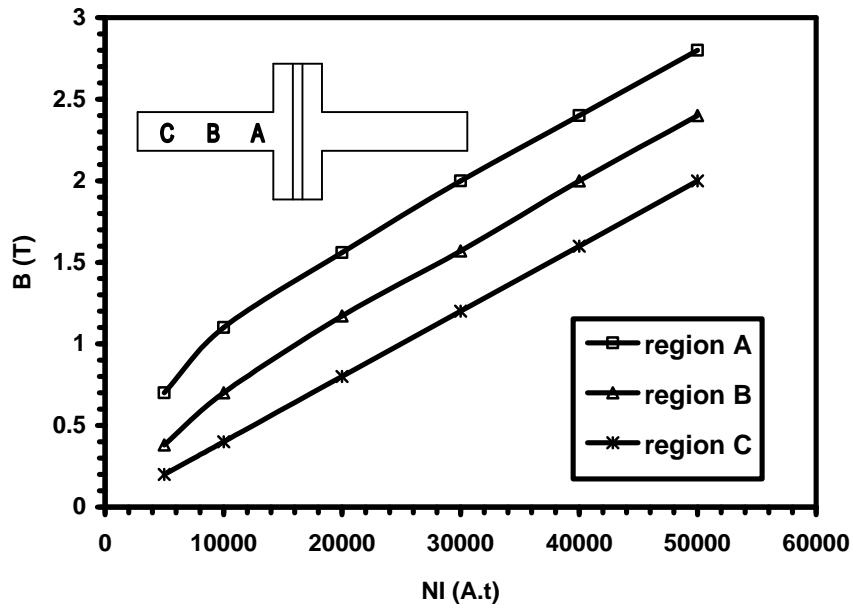


الشكل (2) يمثل المجال المتناظر محورياً في مستوى

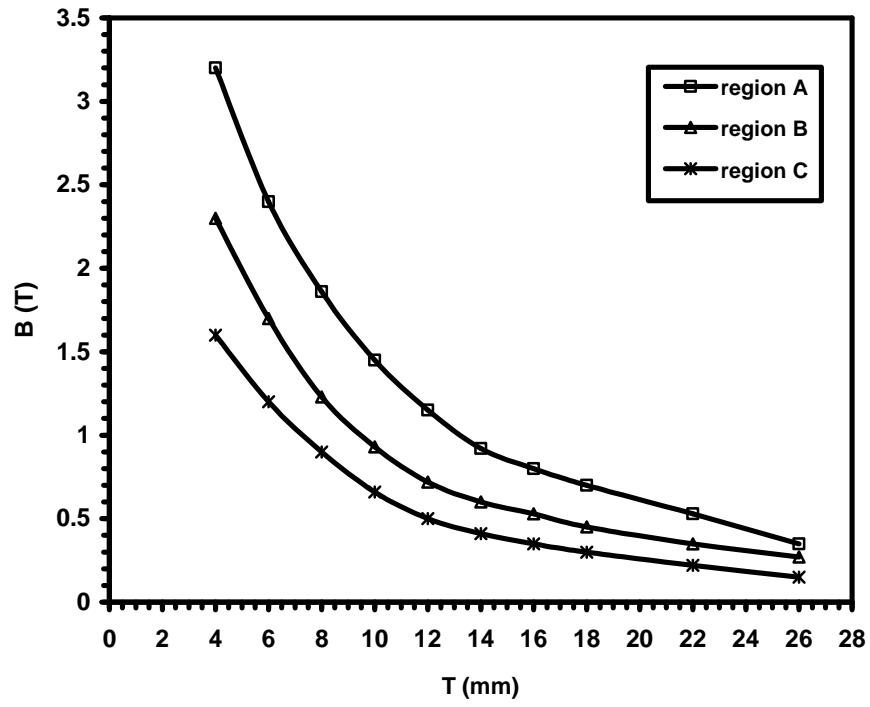




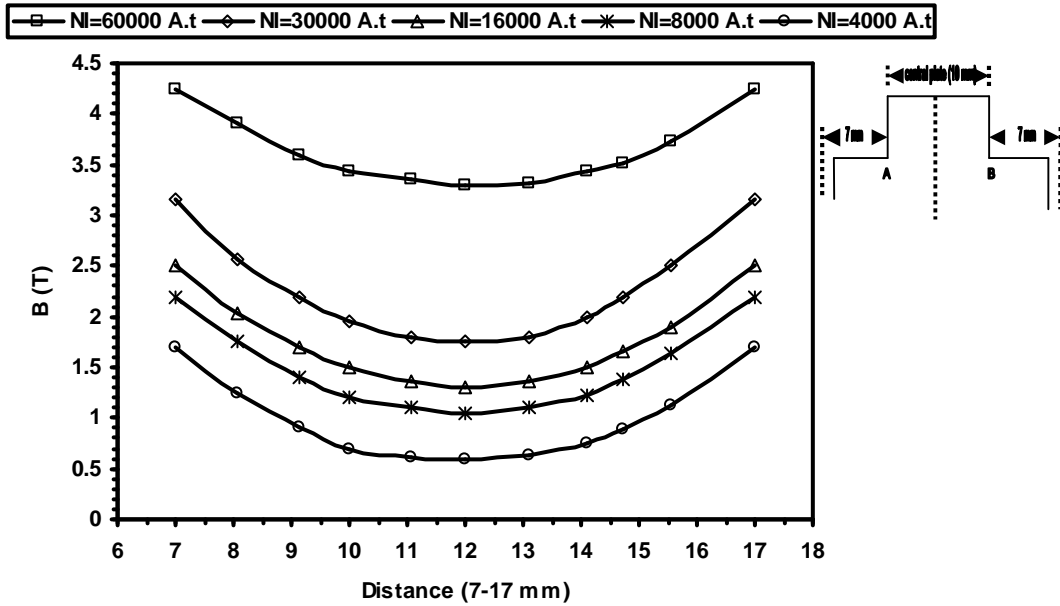
الشكل (3) : تغير كثافة الفيض المغناطيسي (B) كدالة للتهيج (NI) في ثلاثة مناطق من الصفيحة العليا (أو السفلى) للعدسة عند سمك ثابت (3 mm) .



الشكل (4) : تغير كثافة الفيض المغناطيسي (B) كدالة للتهيج (NI) في ثلاثة مناطق من الصفيحة المركزية للعدسة عند سمك ثابت (10 mm) .



الشكل (5) : تغير كثافة الفيض المغناطيسي (B) كدالة لسمك الصفيحة المركزية (T) للعدسة في ثلاثة مناطق مختلفة عند تهييج ثابت (NI=16000 A.t).



الشكل (6) : تغير كثافة الفيض المغناطيسي (B) كدالة للمسافة (Distance) على امتداد سمك (10 mm) للصفحة المركزية عند قيم متغيرة للتثيغ (NI).

#### COMPUTATIONAL STUDY FOR IRON MAGNITIZATION IN ROTATION – FREE PROJECTOR DOUBLET ELECTRON LENS

Hussain S. Hasan

Department of Physics , College of Medicine ,  
AL-Nahrain University

#### ABSTRACT /

The doublet projector electron lens consists of tow identical double pole piece lenses combined back to back . The combination of this tow back plates formed the central plate of the doublet electron lens . The magnetization of the central , upper and lower iron plates of this lens has been investigated by using some computational programs in computer . The distribution of axial magnetic flux density has been computed by using the finite element method . The effect of central plate thickness is depend on the function of operation of the doublet lens . The true select of the central plate is very important when operating by inverse excitations in it's lenses to obtained the better focal properties avoid the magnetic saturation and decreasing any flux leakage at critical regions .