تأثير عرض الفجوة الهوائية في خواص العدسات الكهرومغناطيسية ثنائية القطب الكروي المتناظرة غير المشبعة

حسين صالح حسن
كلية التربية- ابن الهيثم، جامعة بغداد

الخلاصة

إن أفضل تصميم للعدسات الكهرومغناطيسية ثنائية القطب الكروي المتناظرة غير المشبعة يتطلب خواصا" بؤرية جيدة، وفي بحثنا الحالي درس تأثير عرض الفجوة الهوائية (S) في صفات العدسة المسقطية ولاسيما القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي $(F_p)_{\min}$ وخواص منحني توزيع المجال المغناطيسي المحوري :القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي (B_m)وعرض النصف الكلي لمنحني توزيع المجال المغناطيسي (W)، اذ كلما كانت $(F_p)_{\min}$ صغيرة عند قيم (S) واطئة كان التكبير أعلى ما يمكن وهو مؤشر جودة تصميم العدسة المستخدمة في المجهر الالكتروني النافذ (TEM).

المقدمة

تتكون العدسات الكهرومغناطيسية من ملف يحمل تيارا مستمرا ومحاطا" بحديد لزيادة المجال المغناطيسي ومنع تسرب المجال إلى خارج العدسة، اذ يعمل المجال المغناطيسي على تبئير الحزمة الالكترونية المعجلة وتكوين صورة للعينة.

وتتركز البحوث على تحسين عمل العدسات فمثلا يتم تقليص زيوغ العدسات الشيئية (Objective Lens) لأنها تعمل على تكوين أول صورة للعينة، بينما يتم تقليص التشويه في العدسات المسقطية (Projector Lens) لأنها تعمل على تكبير الصورة.

ومن العيوب التي تشوه الصور في العدسات المسقطية هو البعد البؤري للعدسة المسقطية (Projector Focal Length) اذ إن العدسة المسقطية تعمل بصورة عامة عند القيمة الصغرى لبعدها البؤري لكي تعطي أعظم تكبير، علما أن قيم البعد البؤري لا تعتمد على اتجاه دخول الحزمة الالكترونية لكنها تعتمد على ميل الحزمة الالكترونية بعد خروجها من المجال المغناطيسي للعدسة.

ان الهدف من البحث هو دراسة حاسوبية لعدسات ثنائية القطب المتناظرة غير المشبعة للحصول على افضل صفات بصرية للعدسات وتصنيعها مع توافر المواد والامكانيات لاستعمالها في المجهر الالكتروني : الماسح ، النافذ والماسح النافذ .

العدسة الكهرومغناطيسية ثنائية القطب

تتكون العدسة ثنائية القطب من دائرة حديدية وقطعتي قطب متناظرة محوريا مصنوعة من الحديد المطاوع أو نوع آخر من الحديد وتحتوي داخلها ملف عدد لفاته كثيرة (N) ذو سلك نحاسي معزول يمر فيه تيارا مستمرا (I) يؤدي إلى توليد مجال مغناطيسي محوري بين القطبين داخل الفجوة الهوائية (Air Gap) الصغيرة التي عرضها (S) وتفصل بين القطبين الحديديين، كما توجد فتحات دائرية صغيرة في كلا القطبين (قطر فتحة القطب الأول D_1 وقطر فتحة القطب الثاني D_2) تكون متحدتي المركز للسماح بمرور الحزمة الالكترونية. ويمكن أن تكون العدسة ثنائية القطب عدسة متناظرة (Symmetrical Lens) عندما يكون قطر فتحة القطبين متساوية ($D_1=D_2=D$) والمجال المغناطيسي المحوري للعدسة متناظر مع المستوي الوسطي للفجوة الهوائية، وأعظم قيمة للمجال B_m تتكون في منتصف الفجوة (المستخدمة في الدراسة الحالية)، كما يمكن أن تكون العدسة ثنائية القطب عدسة لا متناظرة (Unsymmetrical Lens) عندما لا تتساوى أقطار فتحتي القطبين ($D_1 \neq D_2$).

تصميم العدسة

إن العدسة المغناطيسية ثنائية القطب الكروي التي تم صممت في دراستنا الحالية غير مشبعة مغناطيسيا وفيها قطبان من الحديد المطاوع بشكل نصف كرة متساويتا القطر

(30mm)، بينما توضع الملفات على بعد (1mm) عن رأس سطح كل قطب وعن محيط العدسة المكون من مادة حديدية التمغنط ، كما في الشكل (1) الذي يمثل مقطعا عرضيا لنصف العدسة ثنائية القطب الكروي المتناظرة .

إن قطر فتحة القطب الأول (D_1) مساوية لقطر فتحة القطب الثاني (D_2) وتساوي ($D_1=D_2=D=2$ mm) وبسبب تساوي قطري فتحة القطبين ستكون العدسة ثنائية القطب عدسة متناظرة ويكون المجال المغناطيسي المتكون نتيجة لمرور تيار مستمر (I) في ملفات العدسة متناظرا أيضا، بينما أخذت قيم متغيرة لعرض الفجوة الهوائية بين الأقطاب الحديدية ($S=2,4,6,8,10,12$ mm) وذلك لدراسة تأثيرها في توزيع كثافة الفيض المغناطيسي (W, B_m) وغيرها من العوامل منها القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي التي تؤثر في تكبير العدسة والوصول إلى أفضل تصميم لتلك العدسة.

لقد استخدمت في الحسابات طريقة عددية لأجراء هذا التصميم تسمى طريقة العناصر المتناهية التي اقترحها (2) في مجال البصريات الالكترونية لأول مرة. كما استخدم تهيج ثابت (NI= 4000 A.turn) وهو ضمن المنطقة الخطية قبل الوصول إلى حالة التشبع المغناطيسي، بمعنى أن لكثافة الفيض في اي مكان من العدسة علاقة خطية بالتهيج.

إن الملف المستخدم هو عبارة عن ملفين متماثلين بطول (42 mm) وعرض (14mm) وبذلك تكون مساحة الملفين (A) هي:

$$A = 42 \times 14 \times 2(coils) = 1176 \quad mm^2 = 11.76 \quad cm^2$$

ويكون تهيج العدسة (σ) هو مساويا لـ :

$$\sigma = \frac{NI}{A} = \frac{4000}{1176} = 3.4013 \frac{A.turn}{mm^2} = 340.13 \frac{A.turn}{cm^2}$$

ولأن العدسة متناظرة ($D_1=D_2=D$) فأنه سيتم تمثيل المتغيرات بيانيا كما هي وليست كمتغيرات نسبية بدلالة القطر (D). فمثلا تستخدم (S) أو(Z_m) بدلا من ($\frac{S}{D}$)أو($\frac{Z_m}{D}$) بالترتيب.

القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي (B_m):

تقل القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي (B_m) بزيادة عرض الفجوة الهوائية بين الأقطاب الحديدية (S) عند ثبوت قطر فتحة القطب (D) [3] وهذا ما يوضحه الشكل (2) المرسوم بين (B_m) , (S).

في حالة عدم التشبع المغناطيسي فأن أعظم قيمة للفيض المغناطيسي (B_m) تعطى بالمعادلة الآتية:(4)

$$B_m = \frac{\mu_o NI}{L} \qquad .....[1]$$

اذ μ_o النفوذية المغناطيسية في الفراغ وتساوي ($4\pi \times 10^{-7} H/m$) و L هو العامل الهندسي للعدسة مقاس بالمتر ويعطى بالمعادلة: [1]

$$L = (S^2 + 0.45D^2)^{1/2} \qquad .....[2]$$

لذلك فأن العلاقة بين (B_m) و ($\frac{1}{L}$) علاقة خط مستقيم ميله يساوي:

$$\mu_o NI = 4\pi \times 10^{-7} \times 4000 = 5.02 \times 10^{-3} tesla.m \qquad .....[3]$$

وهذا ما يوضحه الشكل (3) المرسوم بين (B_m) و ($\frac{1}{L}$) لقيم مختلفة من عرض الفجوة الهوائية (S) ومنه نجد الميل:

$$slope = 4.88 \times 10^{-3} tesla.m \qquad .....[4]$$

وهو ما يساوي تقريبا القيمة النظرية ($5.02 \times 10^{-3} tesla.m$) الموجودة في المعادلة [3].

موقع قمة كثافة الفيض المغناطيسي (Z_m)

في حالة العدسة المتناظرة بفجوة (S) وقطر فتحة القطب (D) يصبح موقع القمة النسبي $\frac{Z_m}{D} = \frac{1}{2}\frac{S}{D}$ [5] ، ولأن ($D_1=D_2=D$) في الدراسة الحالية فهذا يعني أن:

$$Z_m = \frac{1}{2}S = 0.5S \text{ or } \frac{Z_m}{S} = 0.5 \qquad .....[5]$$

وبذلك يكون موقع قمة كثافة الفيض المغناطيسي Z_m مساويا لنصف عرض الفجوة الهوائية وهو عامل مهم في تصميم العدسة الشيئية للمجهر الالكتروني وموقع العينة (5).

إن المعادلة [5] يمكن تحقيقها من خلال الشكل (4) المرسوم بين (Z_m),(S) وفيه يتضح إن (Z_m) تزداد بزيادة (S) وهي علاقة خطية وميل الخط المستقيم فيها يساوي:

$$slope = 0.5 \quad \text{.....[6]}$$

نلاحظ أن القيمة الناتجة (0.5) في المعادلة [6] تساوي القيمة النظرية (0.5) الموجودة في المعادلة [5].

عرض النصف الكلي لمنحني توزيع المجال المغناطيسي (W)

يقاس عرض النصف الكلي (W) لمنحني توزيع المجال المغناطيسي من النقطة التي تكون فيها كثافة الفيض المغناطيسي ($B_{\frac{1}{2}} = \frac{B_m}{2}$)، كما إن لعرض النصف (W) علاقة طردية خطية بالثابت الهندسي (L) للعدسة كما في المعادلة (6):

$$W = 0.97\left(S^2 + 0.45D^2\right)^{1/2} = 0.97L \quad \text{.....[7]}$$

وتشير المعادلة [7] أن التناسب طردي بين كل من (W)،(S)وهذا واضح في الشكل (5) و (L),(S) وهو واضح في الشكل (6)، و (W),(L) ويوضحه الشكل (7) المرسوم بين (W),(L) ولقيم مختلفة من عرض الفجوة الهوائية (S) ويكون خط مستقيم ميله:

$$slope = 0.987 \quad \text{.....[8]}$$

نلاحظ أن القيمة الناتجة (0.987) في المعادلة [8] تساوي تقريبا القيمة النظرية (0.97) الموجودة في المعادلة [7].

القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي $(F_p)_{\min}$

لجميع العدسات ثنائية القطب المتناظرة فأن القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي $(F_p)_{\min}$ لها علاقة بالثابت الهندسي (L) للعدسة وحسب المعادلة: (4)

$$(F_p)_{\min} = 0.5(S^2 + 0.45D^2)^{1/2} = 0.5L \quad \text{.....[9]}$$

وبالتعويض بالمعادلة [7] يمكن استنتاج العلاقة بين $(F_p)_{\min}$ و(W) كما في المعادلة الآتية:

$(F_p)_{\min} = 0.5154W$ .....[10]

عند ثبوت قطر فتحة القطب (D) أو متوسط قطر الفتحة (D_m) حيث ($D_m = \frac{D_1 + D_2}{2}$) فأن القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي $(F_p)_{\min}$ تزداد مع زيادة عرض الفجوة الهوائية (S) وهذا ما يوضحه الشكل (8) المرسوم بين $(F_p)_{\min}$ و (S)، حيث نستنتج من ذلك إن استخدام عرض فجوة صغير يعطي اقل قيمة لـ $(F_p)_{\min}$ وبالتالي يمكن الحصول منها على أعظم تكبير (7).

الشكل (9) يوضح العلاقة بين $(F_p)_{\min}$ و (L) بقيم مختلفة لعرض الفجوة (S) وهي علاقة خطية وبإيجاد الميل نجد أن:

$Slope = 0.51$ .....[11]

نلاحظ أن القيمة الناتجة (0.51) في المعادلة [11] تساوي تقريبا القيمة النظرية (0.5) الموجودة في المعادلة [9].

أما الشكل (10) فيوضح العلاقة بين $(F_p)_{\min}$ و (W) ولقيم مختلفة من عرض الفجوة الهوائية S المستخدمة وهي علاقة خطية طردية وميل الخط يساوي:

$Slope = 0.52$ .....[12]

نلاحظ أن القيمة الناتجة (0.52) في المعادلة [12] تساوي تقريبا القيمة النظرية (0.5154) الموجودة في المعادلة [10].

في العدسات المتناظرة ($D_1=D_2=D=2R$) ،اذ R هي نصف قطر الفتحة المحورية للقطب الكروي.وأخذت في الدراسة الحالية (R=1mm) لأن (D=2mm) وكذلك تكون النسبة ($\frac{(F_p)_{\min}}{R} = 1.23$) في حالة عرض الفجوة الهوائية (S=2mm) وهي قريبة من النسبة 1.18 التي أوجدها [8] باستخدام أقطاب مستوية الوجه، وعند زيادة عرض الفجوة (S) فأن قيمة النسبة أعلاه تزداد وهذا ما موجود في الدراسة الحالية فعند (S=2,4,6,8,10,12 mm) تكون النسبة ($\frac{(F_p)_{\min}}{R} = 1.23,2.19,3.15,4.26,5.24,6.21$) بالترتيب .

إن الفرق البسيط في قيم الميل الناتجة من الأشكال في الدراسة الحالية بالمقارنة مع المعاملات الموجودة في المعادلات النظرية راجع لدقة الحسابات والتصميم المفترض.

الاستنتاج

1- إن اصغر بعد بؤري مسقطي يمكن الحصول عليه عندما يكون عرض الفجوة الهوائية اصغر ما يمكن.

2- إن عرض الفجوة الهوائية بين قطبي العدسة يؤثر في شكل توزيع المجال المغناطيسي بحيث تقل القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي ويزداد عرض النصف الكلي لمنحني توزيع المجال مع زيادة عرض الفجوة الهوائية.

3- إن الثابت الهندسي للعدسة وعرض النصف الكلي لمنحني توزيع المجال المغناطيسي يؤثر في القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي فالمفضل أن يكون الثابت الهندسي وعرض النصف ذو قيم واطئة للحصول على اصغر بعد بؤري مسقطي ومن ثم أعلى قيمة تكبير.

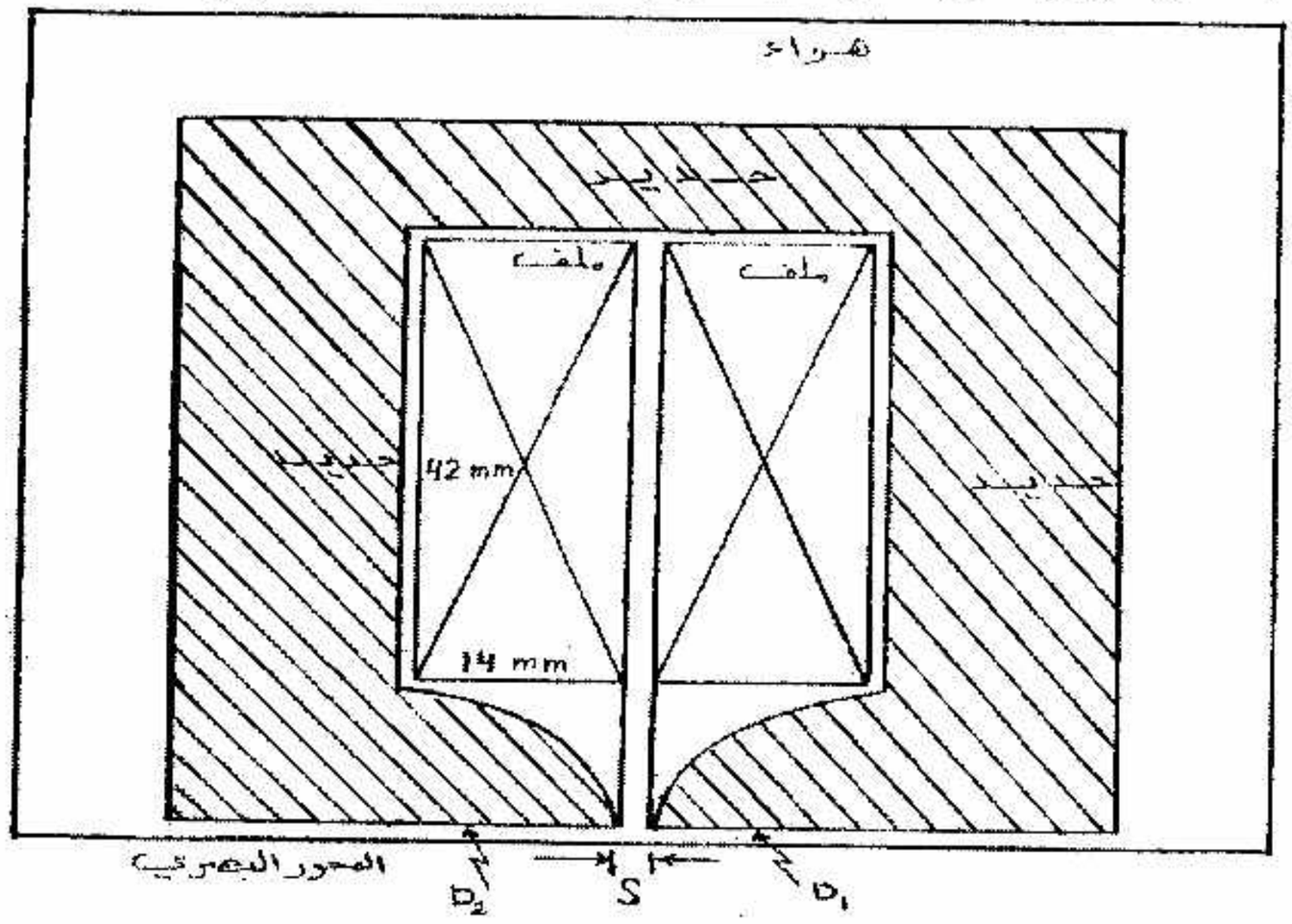
4-تحقيق المعادلات النظرية رقم [1،5،7،9،10] والاقتراب بالقيم المحسوبة من المعاملات الموجودة نظريا.

5-يمكن اقتراح دراسة تعاد فيها الدراسة الحالية باستخدام قطر فتحة القطبين(D) بقيمة (1 mm) أو (0.5 mm) وملاحظة تحسن الخواص البؤرية للعدسة، كما يمكن استخدام قيم مختلفة لعرض الفجوة الهوائية أدنى من القيم التي استخدمت في الدراسة الحالية (S<2 mm) لملاحظة الفرق ومدى تحسن العدسة الجديدة.

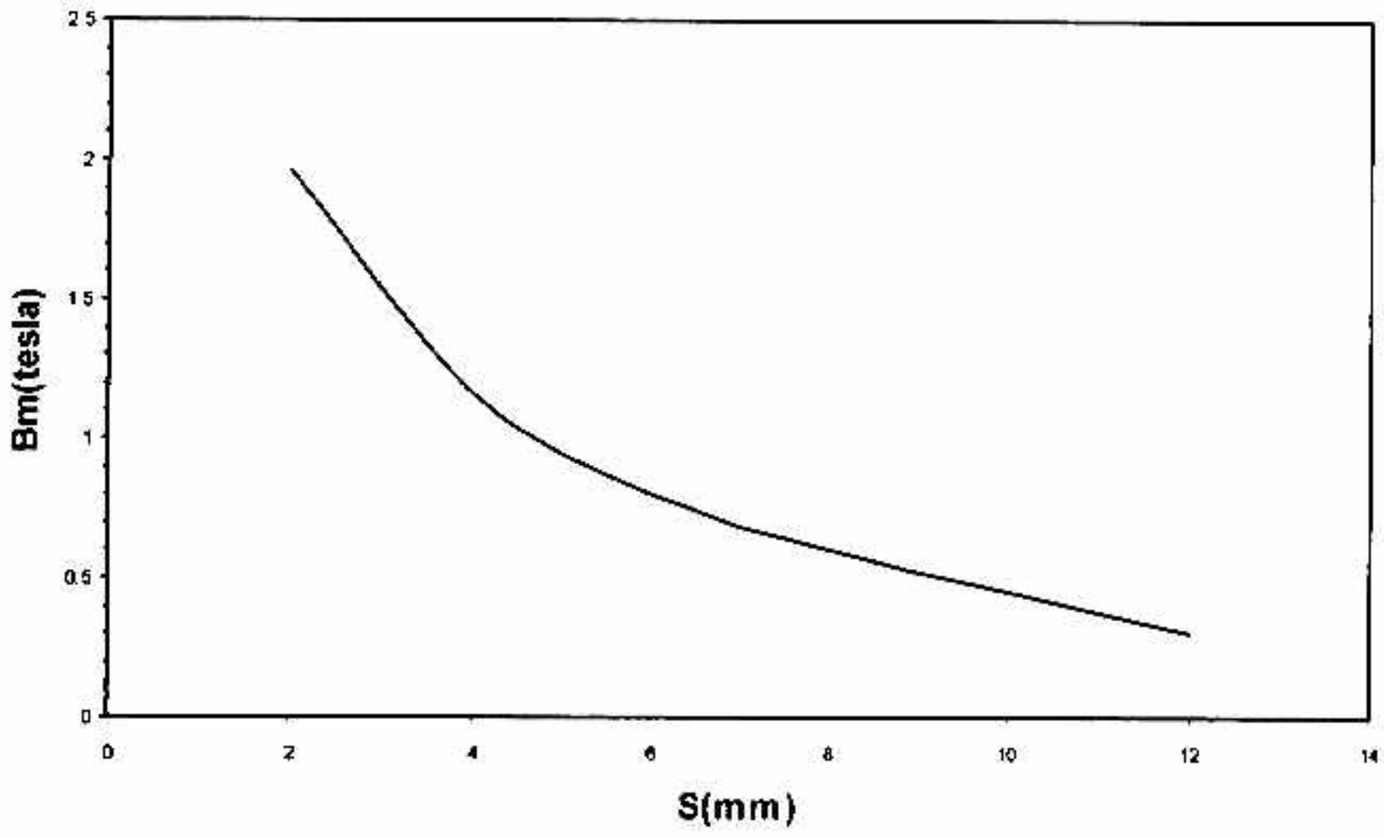
المصادر

1.حسن، حسين صالح . (1989) حسابات عن تصميم العدسات الالكترونية المغناطيسية الأحادية القطب المشبعة . رسالة ماجستير – كلية التربية – الجامعة المستنصرية.

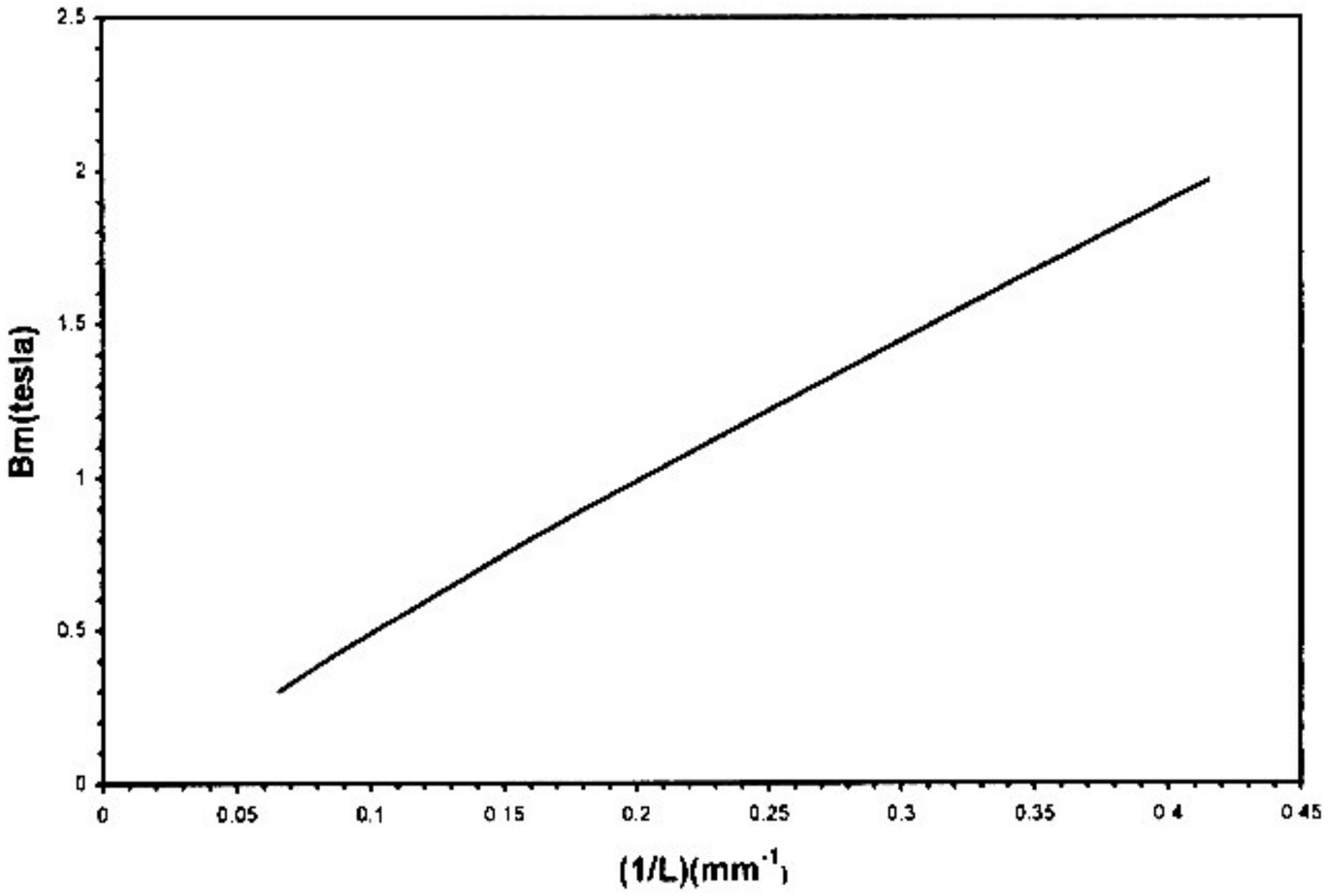
2. Munro, E.(1973). Ed. P. W. Hawkes(London: Academic pp.163-357.
3. Liebmann, G.(1955). Proc. Phys. Soc., B68, 679-681.
4. Dugas, J. Durandeau, P.and Fert, C.(1961). Rev.Opt. 40, 277-305
5. Juma, S. M. and Yahya, A. A. (1984).J.Phys. E:Sci .Instrum.،17، 401-403.
6. Durandeau, P. and Fert, C. (1957). Rev. Opt. 36, 205-234.
7. Juma, S.M. and Yahya, A.A. (1986). J Phys.E: Sci. Instrum., 19, 614-624.
8. Liebmann,G. (1952). Proc. Phys. Soc., B65,94-108



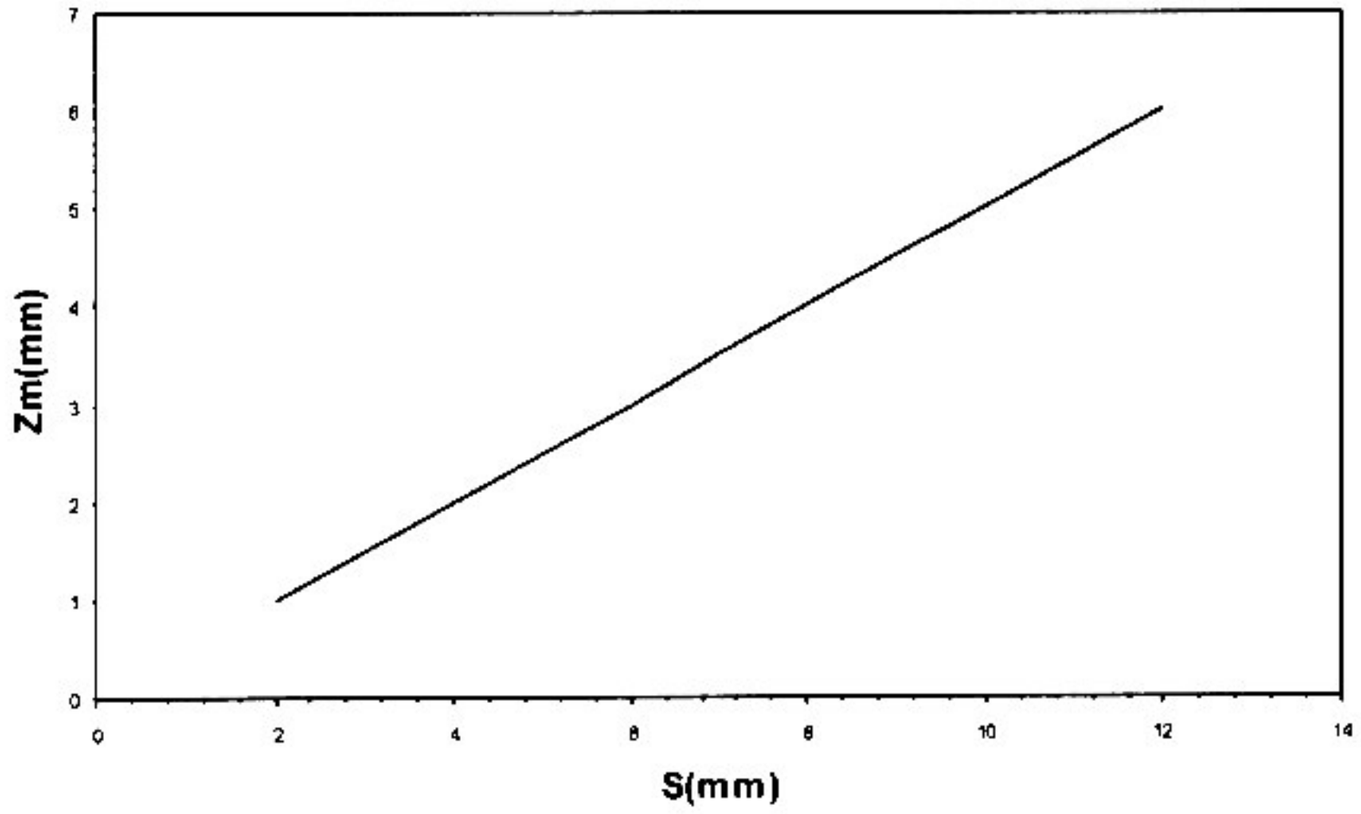
شكل: (1) مقطع عرضي لنصف العدسة ثنائية القطب الكروي المتناظرة



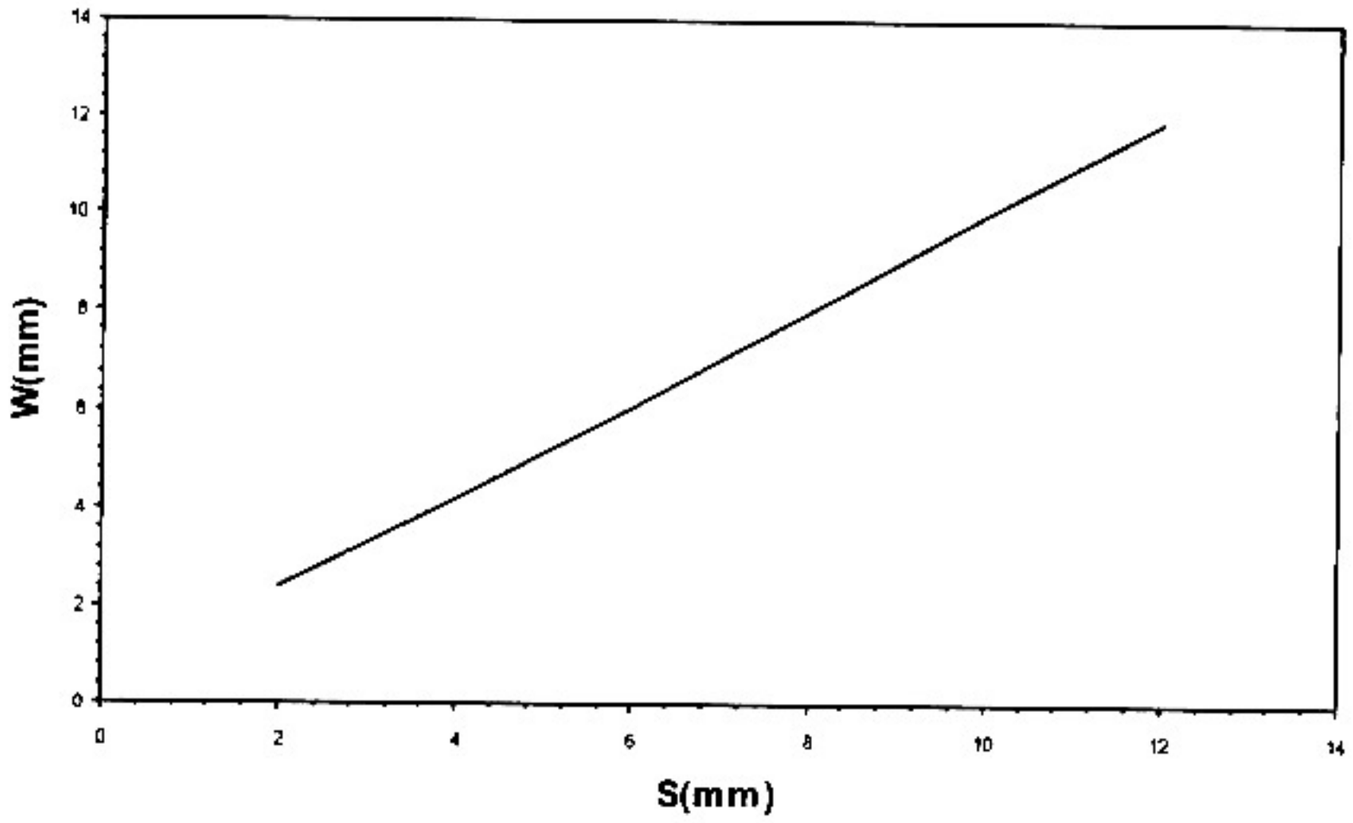
شكل: (2) تغير القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي المحوري (B_m) مع عـرض الفجوة الهوائية (S)



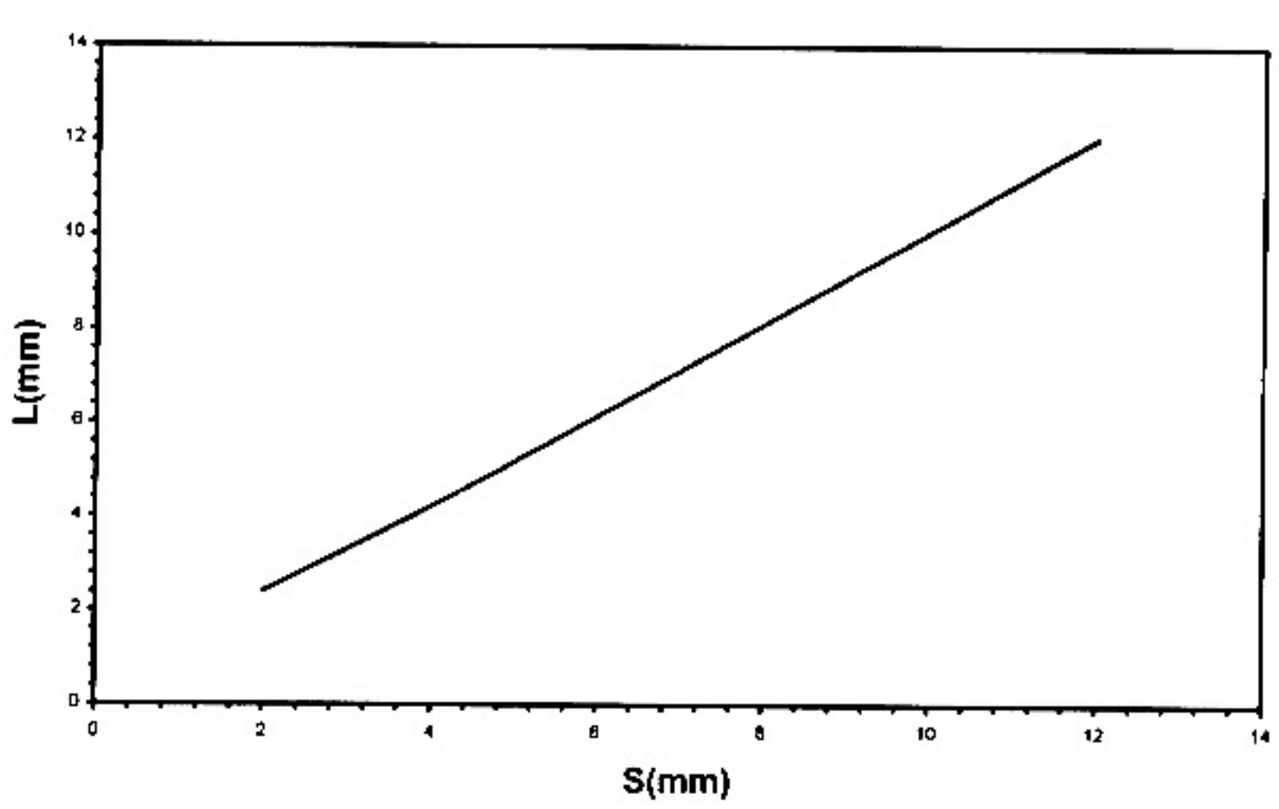
شكل: (3) تغير القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي المحوري (B_m) مع مقلوب الثابت الهندسي (1/L) لقيم مختلفة من عرض الفجوة الهوائية (S)



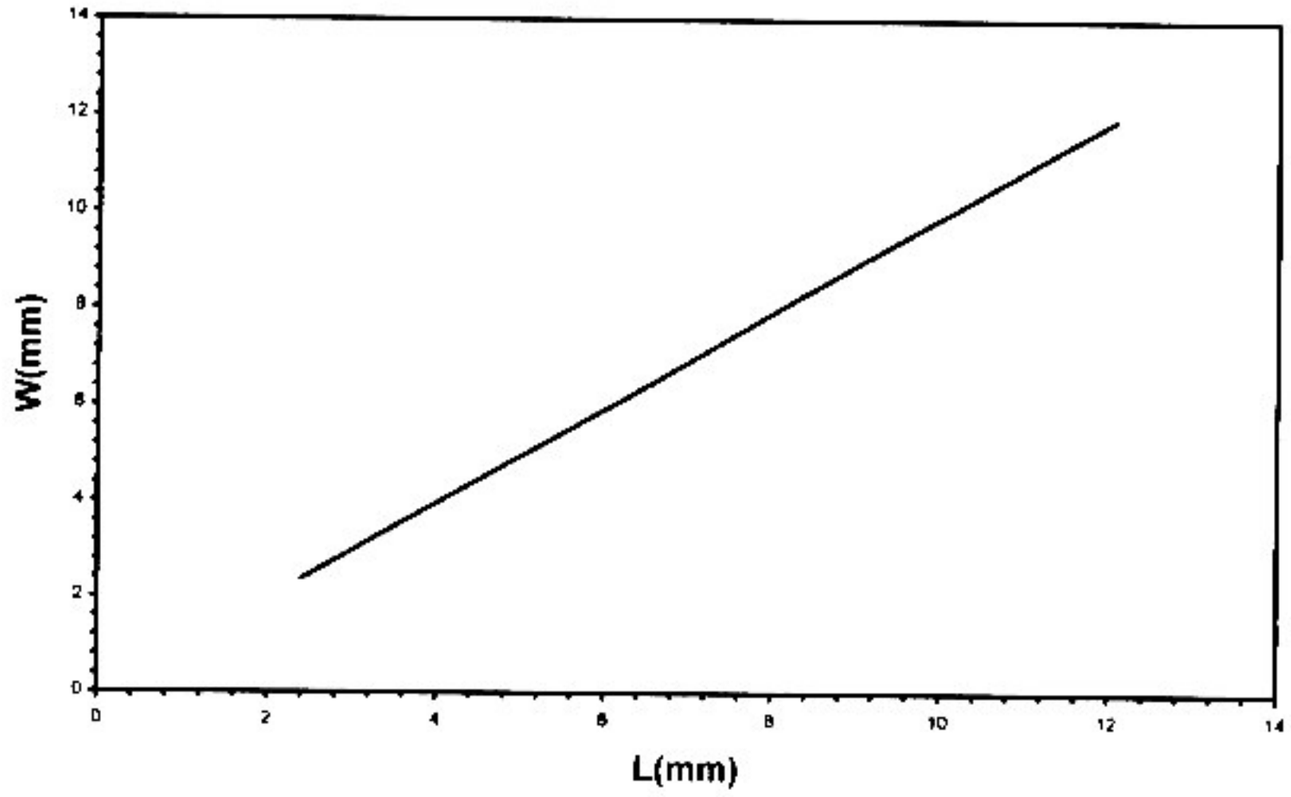
شكل: (4) تغير موقع قمة كثافة الفيض المغناطيسي المحوري (Z_m) مع عرض الفجوة الهوائية (S)



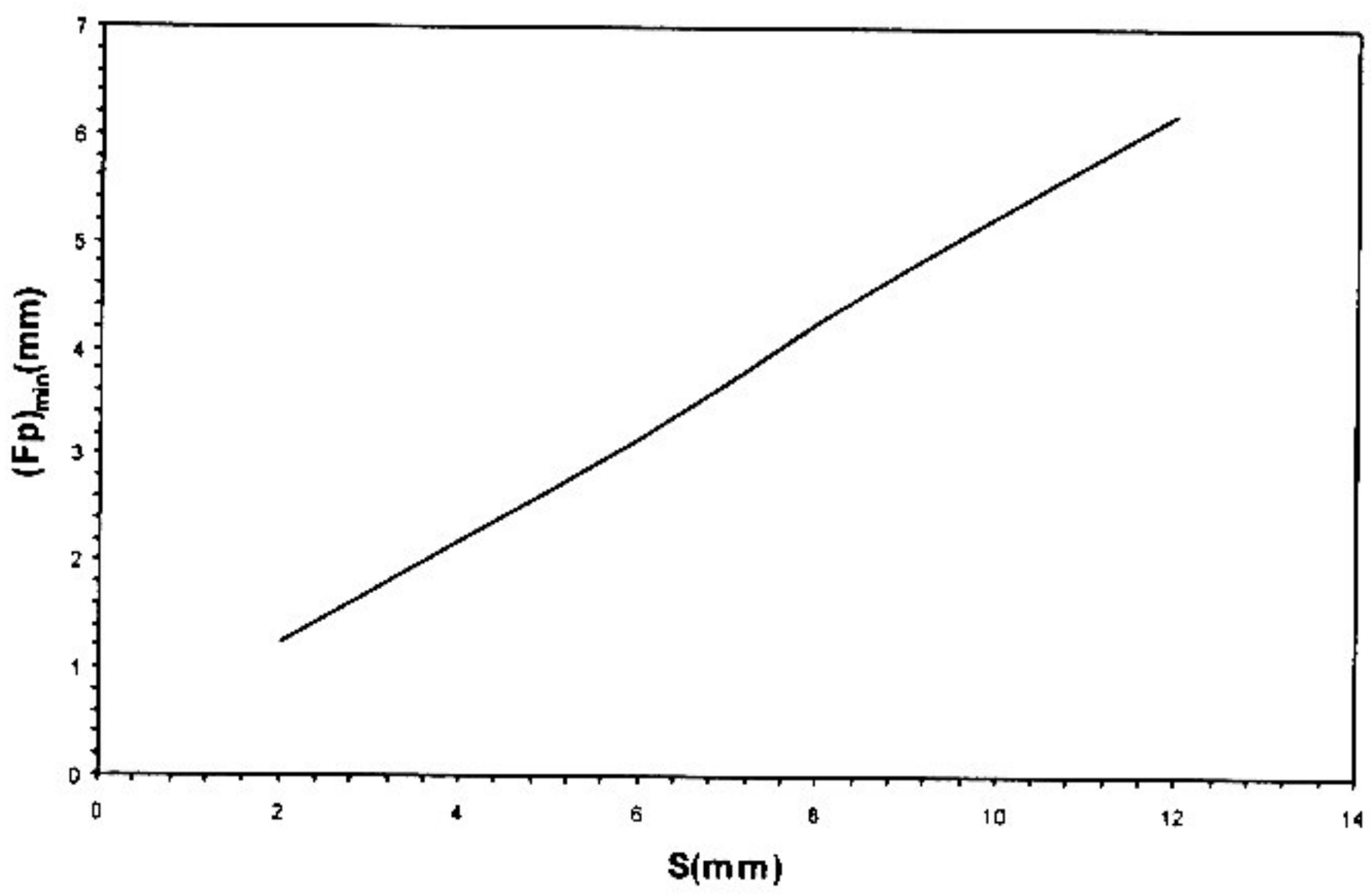
شكل: (5) تغير عرض النصف الكلي (W) لمنحني توزيع المجال المغناطيسي مع عرض الفجوة الهوائية (S)



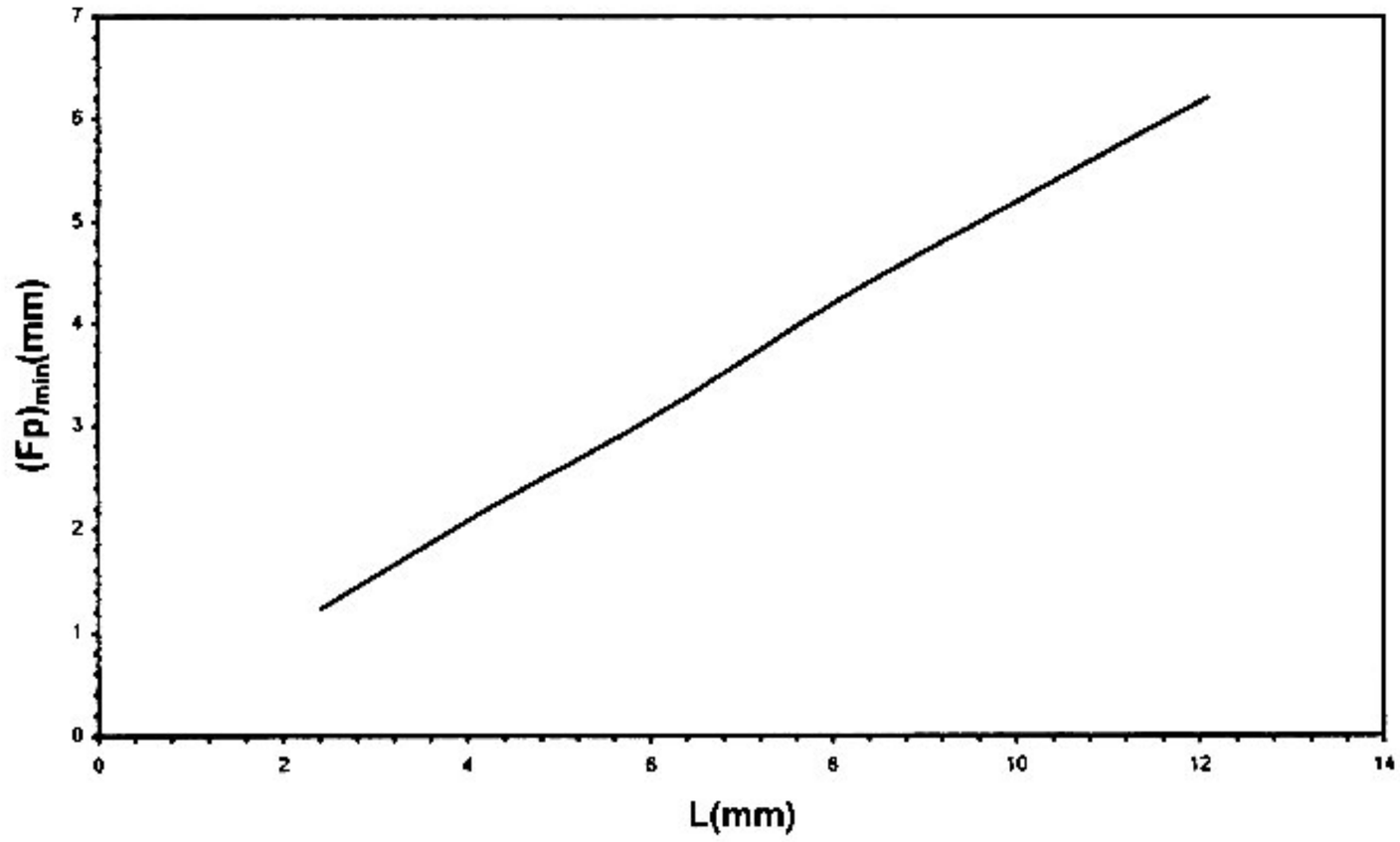
شكل: (6) تغير الثابت الهندسي (L) للعدسة مع عرض الفجوة الهوائية (S)



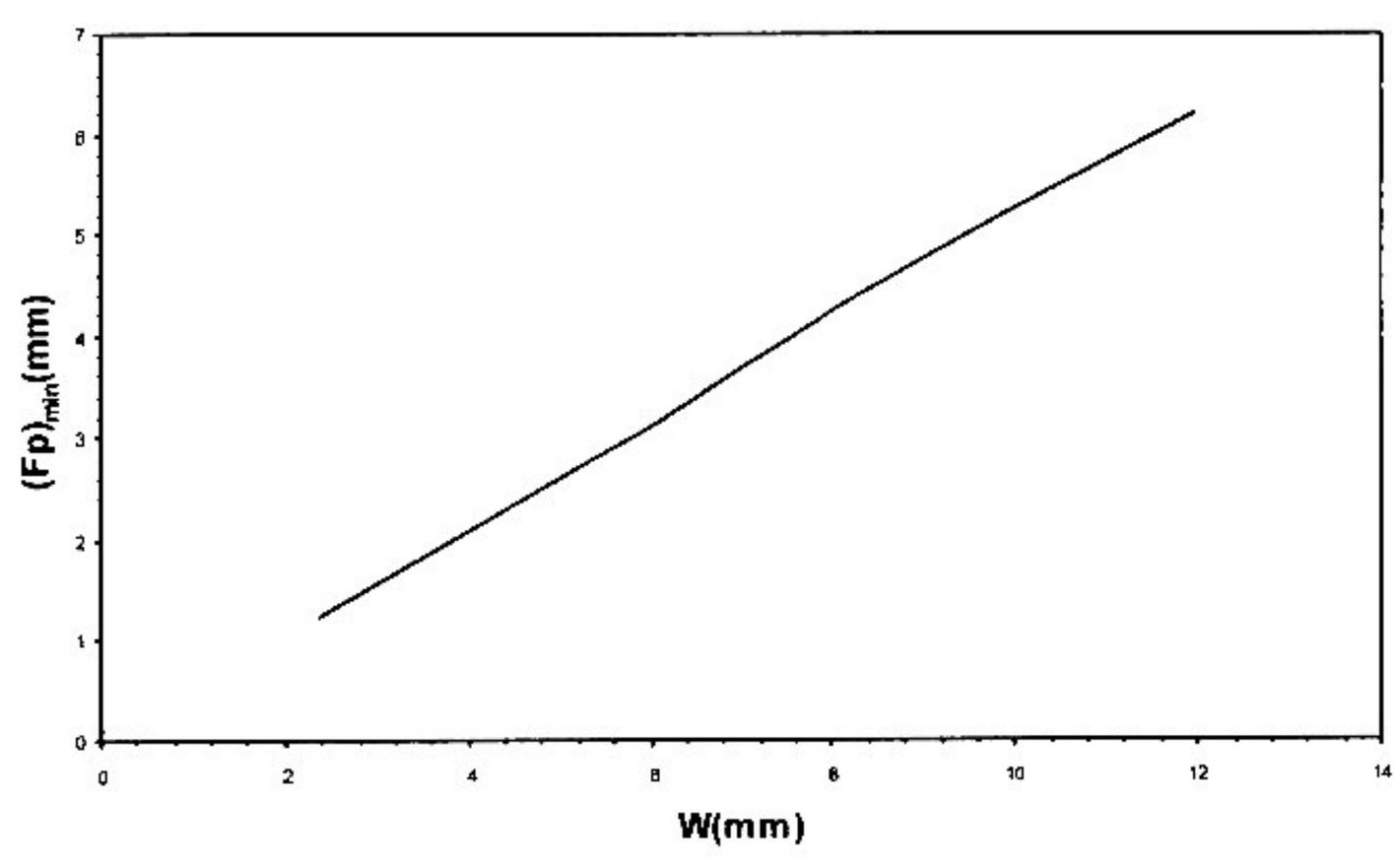
شكل: (7) تغير عرض النصف الكلي (W) لمنحني توزيع المجال المغناطيسي مع الثابت الهندسي (L) للعدسة لقيم مختلفة من عرض الفجوة الهوائية (S)



شكل :(8) تغير القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي $(F_p)_{min}$ مع عرض الفجوة الهوائية (S)



شكل: (9) تغير القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي $(F_p)_{\min}$ مع الثابت الهندسي (L) للعدسة لقيم مختلفة من عرض الفجوة الهوائية (S)



شكل: (10) تغير القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي $(F_p)_{\min}$ مع عرض النصف الكلي (W) لمنحني توزيع المجال المغناطيسي لقيم مختلفة من عرض الفجوة الهوائية (S)

Air Gap Effect on the Properties of Unsaturated Symmitrical Double Polepiece Lenses

H. S. Hasan
College of Education, Ibn-Al Haitham, University of Baghdad.

Abstract

The preferable design for unsaturated symmetrical spherical double-pole piece electron lens required good focal properties, and in this present study investigate effect of air gap wide (S) on the properties of the projector lens specialized the minimum projector focal length $(F_p)_{min}$ and the properties of the axial magnetic field distribution:(the maximum value of magnetic flux density B_m and total half width of magnetic field curve W) , and at lowest values of $(F_p)_{min}$ at low values of (S) will be obtained high magnification and there is an importance indicator for preferable lens design which is used in transmission electron microscope (TEM).