

تأثير الشكل الهندسي للأقطاب للعدسات المغناطيسية الشبيئية اللامتناظرة على الخواص البصرية في المجهر الإلكتروني الماسح SEM

نضال سعدي عبد حجازي
شعبة العلوم الأساسية
كلية الزراعة والغابات/ جامعة الموصل

محمد عبدالله حسين
قسم المكننة والمعدات الزراعية
كلية الزراعة / الحويجة/ جامعة كركوك

الملخص

تم في هذا البحث ، الحصول على تصميم كفوء لعدسة مغناطيسية أحادية القطب لامتناظرة تستخدم كعدسة شبيئية في منظومة الإضاءة للمجهر الماسح ، تمتلك خصائص بصرية جيدة متمثلة ببعد بؤري قصير ومسافة تشغيل قليلة وزيوغ كروية ولونية واطئة ، فضلا عن قطر دقيق للحزمة الالكترونية الساقطة على النموذج . وتم ذلك باختيار أربعة نماذج من العدسات المغناطيسية المتباينة في التصميم من حيث الشكل الهندسي للقطب والدائرة الحديدية ، والمتساوية في مساحة الملف . وتم إيجاد خواصها البصرية عند تهيجات وفولطيات تشغيل مختلفة باستخدام برامج تعتمد على طريقة العناصر المتناهية ، ليتسنى لنا معرفة واختيار العدسة الأفضل . وجد إن الشكل الهندسي للقطب والدائرة الحديدية يلعبان دورا هاما في تحديد الخواص الجيدة للعدسة ، وتم اختيار النموذج OL1 الذي حقق أفضل النتائج بالمقارنة مع بقية العدسات .
الكلمات الدالة : عدسة شبيئية أحادية القطب ، الأداء البصري ، الشكل الهندسي للأقطاب .

ABSTRACT

In this research , an efficient design of an asymmetric single pole magnetic lens used as an objective lens in illumination system for the SEM . possess good optical properties represented by short focal length , small working distance and low spherical and chromatic aberrations , as well as a fine electron beam diameter incident on the surface of the sample . It has been selected four models of magnetic lenses having different design of the pole shape and the magnetic circuit, but having the same areas of the coil . has been finding optical properties by using program depend on the (FEM) at different excitations and beam voltage . In order to knows and choose the best lens. It is found that the geometric pole shape and the magnetic circuit plays an important role in determining the good properties of the lens . We choose OL1 lens which, achieved the best results compared with the rest of the lenses .

Key words : single pole objective lens , optical performance , the geometry of the poles

المقدمة

تتعدد الحزمة - Multi-Beam Scanning Ele

tron Microscope أي إن النموذج يستلم عدد كبير من الحزم الالكترونية وتم الحصول على قطر للمجس بحدود (1.2 nm) عند (Gheidari & Kruit, 2011).

الغرض من البحث الحالي هو الحصول على تصميم كفوء لعدسة مغناطيسية شبيئية تمتلك أفضل الخصائص البصرية الملائمة لاستعمالها في المجهر الالكتروني الماسح SEM. متمثلة ببعد بؤري قصير ومعاملات زيوغ واطئة فضلا عن قطر دقيق للحزمة الالكترونية الساقطة على سطح النموذج المراد فحصه .

الأساس النظري

إذا تأملنا بصريات المرتبة الأولى فقط فإن قطر المجس الالكتروني الساقط على سطح النموذج سيتغير كدالة لقطر المصدر الالكتروني عند القاذف فقط . اما عمليا فإن عملية التبئير للحزمة الأولية على سطح النموذج تكون محددة بالأنواع المختلفة لزيغ العدسات الشبيئية أ والذي يحدد بدوره مقدار التحليل في أجهزة . ان اهم الزيوغ التي تعانيتها العدسة الشبيئية هو الزيغ الكروي أ الزيغ اللوني والحيود لذلك تم الاعتماد على هذه الزيوغ كأساس في الحكم على أفضلية هذه العدسات .

يعد قطر المجس النهائي أو المؤثر من اهم المعلمات التي تحدد اداء المجهر الماسح . الذي يعتمد بدوره على عدة عوامل منها معلمات تخص الحزمة مثل (اللمعان أ طاقة الحزمة المعجلة وطاقة التعريض عند القاذف)

كان للتطور التكنولوجي والإمكانيات الحديثة للأجهزة الالكترونية البصرية الأثر الكبير في تطوير تصميم العدسات وتحسين الأداء البصري للأجهزة الالكترونية بشكل عام والمجهر الالكتروني بشكل خاص . وبالتالي الحصول على قدرة تحليل عالية تتحدد بالخواص البصرية للعدسة الشبيئية . (Hawkes, 1972) شهد عقد التسعينيات طفرات مميزة في تحسين أداء المجاهر الالكترونية إذ تم الحصول على مجاهر الكترونية ذات قدرات تحليلية عالية عن طريق تقليل الزيوغ التي تعاني منها العدسة الشبيئية في منظومة التصوير بالمجهر الالكتروني . إذ تم بناء مجهر يعمل بفولطية تعجيل تتراوح ما بين (2.5 - 3.5) MV في جامعة اوساكا في اليابان (Takaoka et al.,1997) . وقد صممت العدسة المغناطيسية بأشكال هندسية مختلفة ووجد أن أقطاب العدسة الشبيئية ذات تأثير كبير على تقليل الزيغ الكروي واللوني (Al-Obaidy, 1996) . كما تم دراسة تأثير الشكل الهندسي للأقطاب للعدسة الشبيئية المركبة من قبل (Abd-Hujazie, 2006) و (Al-Khashab & Al-Abdullah, 2006) . وفي السنوات الأخيرة أجريت تجارب نظرية وعملية من قبل (Al-Jumayli, 2010) على عدسات مغناطيسية أحادية القطب ومتهيجة بملفات ذات مقطع عرضي مستطيل الشكل ومصممة للطاقات الواطئة . وقد تم تطوير وتصميم منظومة بصرية لمجهر الكتروني ماسح

ومعلمات تخص نظام العدسات مثل (معامل الزيج الكروي واللوني) ومعلمات تخص وضعية وضبط الجهاز للتطبيق المطلوب والتي تضم (تيار المجس وزاوية الفتحة) فضلا عن البعد البؤري للعدسة.

إن معظم العاملين في أجهزة (SEM) يقومون أولا بتحديد حجم الفتحات والتيار المار في منظومة العدسات المكثفة لغرض الحصول على اقل قيمة لتيار الحزمة الالكترونية الساقطة على سطح النموذج والذي يعرف بتيار العتبة ويساوي تقريبا (1 pA). لأنه اقل من هذه القيمة نحصل على ضوضاء بدلا من صورة. فمثلا عند قيمة معينة ل () فان قطر المجس الحقيقي المؤثر للحزمة الساقطة على سطح النموذج يكون ناتج من القطر الهندسي للحزمة المبترة على سطح النموذج مضافا اليه ما يصاحبها من تعريض بسبب تأثيرات الزيوغ كالزيغ الكروي واللوني والحيود ويعطى بالمعادلة (Reimer & Kohl, 2008)

$$d_p^2 = d_o^2 + d_s^2 + d_c^2 + d_d^2 \quad (1)$$

وبالتعويض عن d_o, d_s, d_c, d_d من المعادلات

$$d_o^2 = 4i_p / \beta \pi^2 \alpha_p^2 \quad (2)$$

$$d_s = 0.5 C_s \alpha_p^3 \quad (3)$$

$$d_c = C_c \frac{\Delta E}{E} \alpha_p \quad (4)$$

$$d_d = \frac{0.61\lambda}{\alpha_p} \quad (5)$$

نحصل على

$$d_p^2 = (C_o^2 + (0.61\lambda)^2) \alpha_p^{-2} + \frac{1}{4} C_s^2 \alpha_p^6 + C_c^2 \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 \alpha_p^2 \quad (6)$$

حيث أن (C_o) ثابت يعتمد على نوع القاذف المستخدم ويساوي

$$C_o^2 = \frac{4I_p}{\pi^2 \beta} \quad (7)$$

ففي القاذفات الحرارية من نوع التنكستن قيمة الثابت (C_o) اكبر من قيمة 0.61λ بحدود مرتين إلى ثلاث مرات وإذا كان الجهد المعجل للحزمة اكبر من 2 فان تأثيري الزيغ اللوني والحيود يصبح مهملا في المعادلة (6). ومنها نستطيع حساب القيمة المثالية لزاوية الفتحة للقاذف الحراري من خلال اشتقاق المعادلة (6) بالنسبة ل ومساواتها للصفر فنحصل على (Reimer & Kohl, 2008)

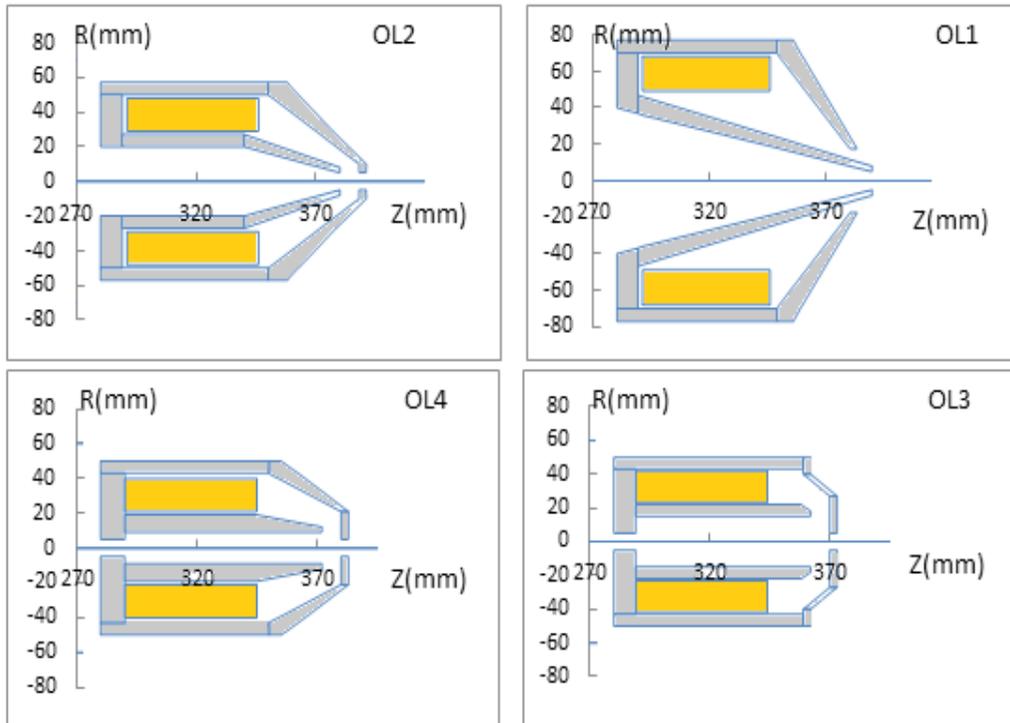
$$\alpha_{opt} = \left(\frac{4}{3}\right)^{1/8} \left(\frac{C_o}{C_s}\right)^{1/4} \quad (8)$$

وبالتعويض عن قيمة α_{opt} بالمعادلة (٥) نحصل على أقل قطر للمجس $d_{p min}$ وبالصيغة التالية:

$$d_{p min} = \left(\frac{4}{3}\right)^{3/8} (C_o^3 C_s)^{1/4} \quad (9)$$

التصميم والتحليل النظري للعدسات المغناطيسية الشبيئية في المجهر الماسح

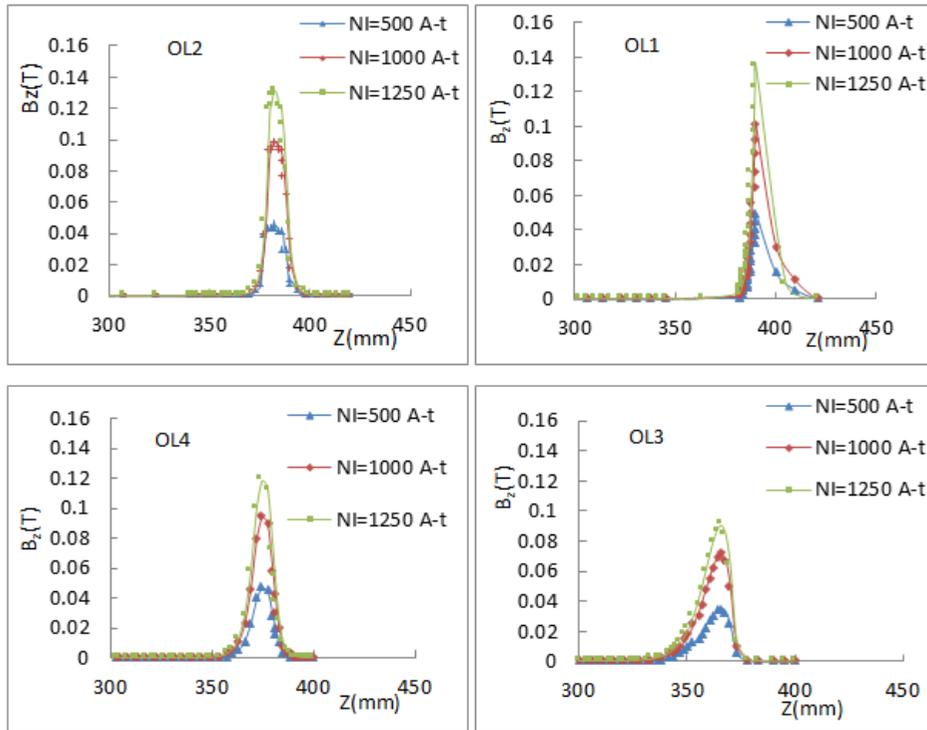
لغرض الحصول على التصميم الكفوء في أجهزة أتم استخدام إحدى طرق التحليل العددي وهي طريقة العناصر المتناهية للوصول إلى التصميم الأمثل للعدسات الشبيئية في قابليتها على تجميع وتبئير الحزمة الالكترونية على سطح النموذج المراد فحصه . لغرض دراسة تأثير الشكل الهندسي للأقطاب والدائرة الحديدية على خواصها الشبيئية أ تم اختيار أربع نماذج من العدسات اللامتناظرة طول كل نموذج يساوي (93،111،110 و 103) ملم وعرضه (100،114،154 و 100) ملم وقطر الفتحة الداخلية D تساوي (10،10،10 و 10) ملم وعرض الفجوة بين أقطاب العدسة تساوي (8،8،5 و 8) ملم وتتهيج هذه العدسات بملفات متساوية المساحة ($A=1045 \text{ mm}^2$) ويرمز لهذه العدسات بالرموز و على الترتيب . الشكل (1) يبين نماذج العدسات الأربع قيد البحث .



شكل (١) مخطط بالأبعاد للعدسات المغناطيسية الشبيئية للنماذج LO_1 ، LO_2 ، LO_3 و LO_4

إن طريقة التصميم باستخدام تتضمن احتساب توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المحوري للعدسات الأربع قيد الدراسة عند التهييجات (1250NI=500,1000 A-t), باستخدام برنامج الذي يعتمد على طريقة (Lencov>a) (1986), وكما مبين بالشكل (2).

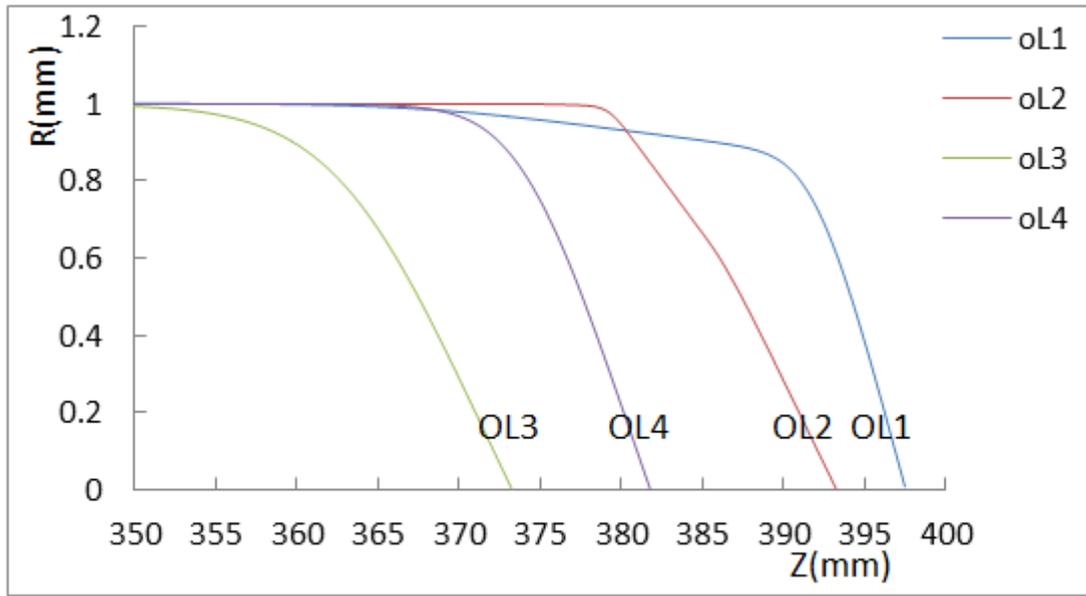
يلاحظ من الشكل أن توزيع الفيض المغناطيسي يمتلك قيمة عظمى عند المنطقة القريبة من الأقطاب . الجدول (1) يوضح النتائج بصورة مفصلة عن مواقع وقيم كثافة الفيض المغناطيسي العظمى للنماذج الأربعة قيد البحث وعند التهييج =1000 A-t . من خلال الجدول وجد إن العدسة تمتلك أعلى قيمة ل بالمقارنة مع بقية العدسات عند نفس التهييج، وهذا بدوره سوف يعطي للعدسة خواص بؤرية جيدة . (Mulvey, 1982) أن هذه النتائج والتحليلات توظف للحصول على مسار الحزمة الالكترونية داخل العدسات الأربعة وذلك باستخدام البرنامج الذي اعده Munro عام 1975 عند التكبير الصفري أحيث يتم حساب ذلك من خلال حل معادلة الشعاع المحوري باستخدام طريقة رنج - كنا من المرتبة الرابعة كما مبين في الشكل (3) . يتضح من الشكل مواقع انكسار الحزمة Z_p وتقاطعها مع المحور البصري Z_i . من خلال الشكل تمكنا تخمين البعد البؤري f (وهو) لمسافة من نقطة انكسار الحزمة إلى نقطة تقاطعها مع المحور البصري) للعدسات الأربع وتم ترتيب النتائج في الجدول (2).



شكل (2) توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المحوري B_z للعدسات الأربعة

الجدول (1) ملخص التحليلات الكهرومغناطيسية للعدسات الأربعة عند التهيج ($A-t=1000$)

رمز العدسة	موقع القمة	(B_{max} (T
OL1	٣٩٠	٠,١٠١
OL2	٣٨٢,٩	٠,٠٩٨
OL3	٣٦٦	٠,٠٧١
OL4	٣٧٤,٦	٠,٠٩٣



شكل (3) تغير مسار الحزمة الالكترونية كدالة للمحور البصري (Z) عند التكبير الصفري للعدسات المغناطيسية و عند قيمة ثابتة لكل من ($kV=1000 A-t=10$)

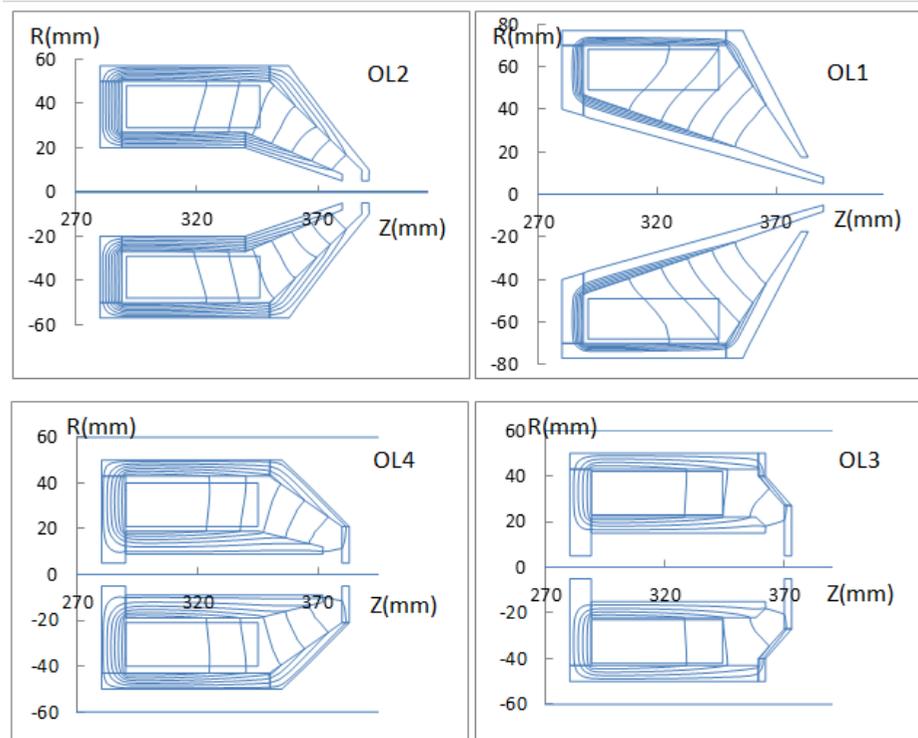
من خلال الجدول يتبين بان العدسة تمتلك اقل بعد بؤري عند نفس الظروف من حيث $NI=1000A-t$ و $Vr=10 kV$ بالمقارنة مع بقية العدسات . هذا بدوره سيعطي للعدسة إمكانية تبئير أقوى من نظيراتها وبالتالي زيوغ اقل مما هو عليه في باقي العدسات (Podbrdsky ,1986) .

جدول (2) ملخص لتحليلات مسار الحزمة الالكترونية داخل العدسات و (عند قيمة ثابتة لكل من $10=$

. $kV = 1000$ A-t

رمز العدسة	موقع انكسار الحزمة Z_p (mm)	موقع تقاطع الحزمة Z_i (mm)	البعد البؤري f (mm)
OL1	391.05	397.51	6.46
OL2	381.70	393.24	11.54
OL3	361.99	373.26	11.27
OL4	373.60	381.77	8.17

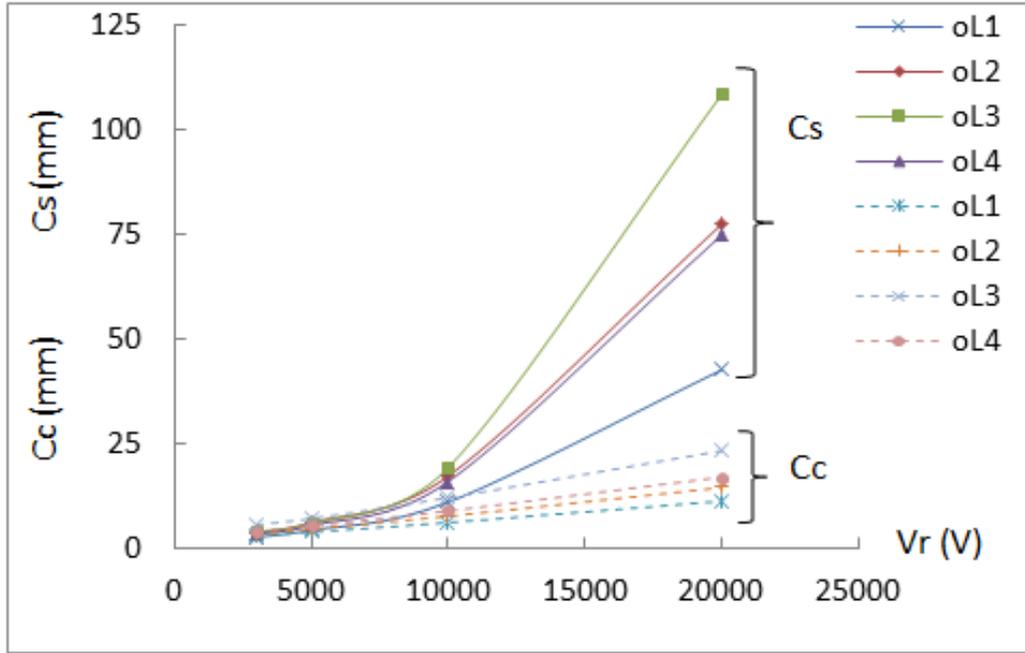
وتم استخدام برنامج (Flux) لرسم توزيع مسار خطوط الفيض المغناطيسي المعدل من قبل الباحث (Murad, 1998) لمعرفة التسرب المغناطيسي الحاصل في تركيبها أفضلًا عن معرفة الأداء البصري لكل جزء فيها. يظهر من الشكل (4) مسار خطوط الفيض المغناطيسي داخل تركيب العدسات المغناطيسية الأربع حيث تتركز هذه الخطوط بكثافة عالية في المناطق التي لها فيض مغناطيسي عالي و اقل كثافة أو متباعدة في المناطق ذات الفيض المغناطيسي الواطئ.



شكل (4) مسار خطوط الفيض المغناطيسي للعدسات الشئية OL1، OL2، OL3، OL4 و

النتائج والمناقشة

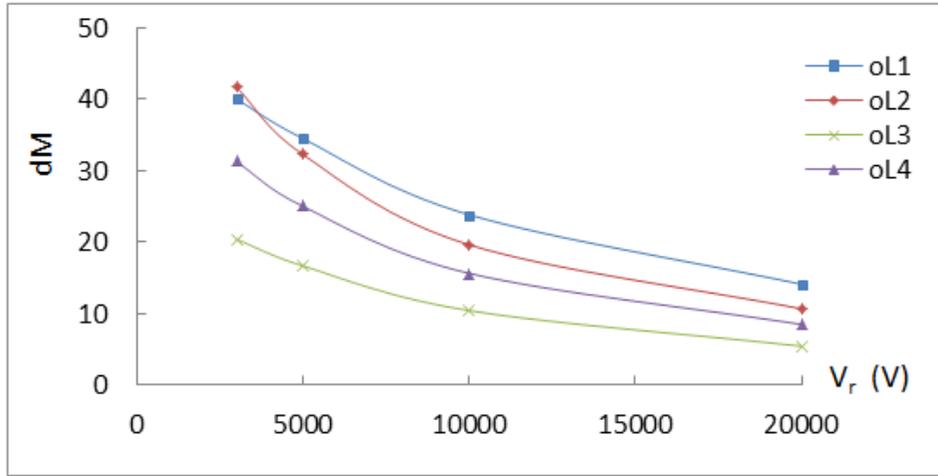
لغرض حساب الخواص البصرية الشيئية للتصاميم الأربعة المبينة بالشكل (1) تم استخدام برنامج (M21) لحساب معاملي الزيغ الكروي Cs واللوني Cc، فضلا عن عدد مرات التصغير dM في الحزمة الالكترونية وقطر المجس المؤثر dp الساقط على سطح النموذج. الشكل (5) يوضح العلاقة بين Cs و Cc كدالة للجهد المعجل Vr للعدسات المغناطيسية الشيئية OL1، OL2، OL3، OL4 عند تهييج ثابت NI=808 A-t أو عند قيمة ثابتة لعامل التهييج $(NI/V_{(r)})=8.08 \text{ A-t} / V^{(1/2)}$ ولكن عند W.D مختلفة. نلاحظ من الشكل (5) إن العدسة OL1 تمتلك اقل قيمة لمعاملي الزيغ الكروي واللوني عند نفس الجهد مقارنة ببقية العدسات الأخرى وكذلك الحال مع بقية الجهود المعجلة المستخدمة الأخرى .



شكل (5) تغير معاملي الزيغ الكروي (Cs) واللوني (Cc) كدالة للجهد المعجل (Vr) للعدسات الشيئية OL1، OL2، OL3، OL4 عند تهييج ثابت (NI=808 A-t) و W.D مختلفة

كما تم استخدام برنامج (M21) وتشغيله بالتكبير الواطئ ليتسنى لنا معرفة عدد مرات التصغير dM الحاصل في قطر الحزمة الالكترونية كدالة للجهد المعجل Vr وعند W.D مختلفة أيضا كما مبين بالشكل (6) . يلاحظ

من الشكل أن مقدار التصغير يقل مع زيادة الجهد المعجل عند $W.D$ مختلفة، بسبب زيادة معاملي الزيغ الكروي واللوني المبين بالشكل (5) السابق. ويلاحظ من الشكل (6) أن العدسة OL1 حققت اقل نقصان في عدد مرات التصغير عند كل قيمة معينة للجهد المعجل ومسافة الاشتغال مقارنة بالعدسات الأخرى. ومقدار التصغير في هذه العدسة يتراوح من 14-40 مرة عند الجهود 3-20 (kV) على الترتيب.



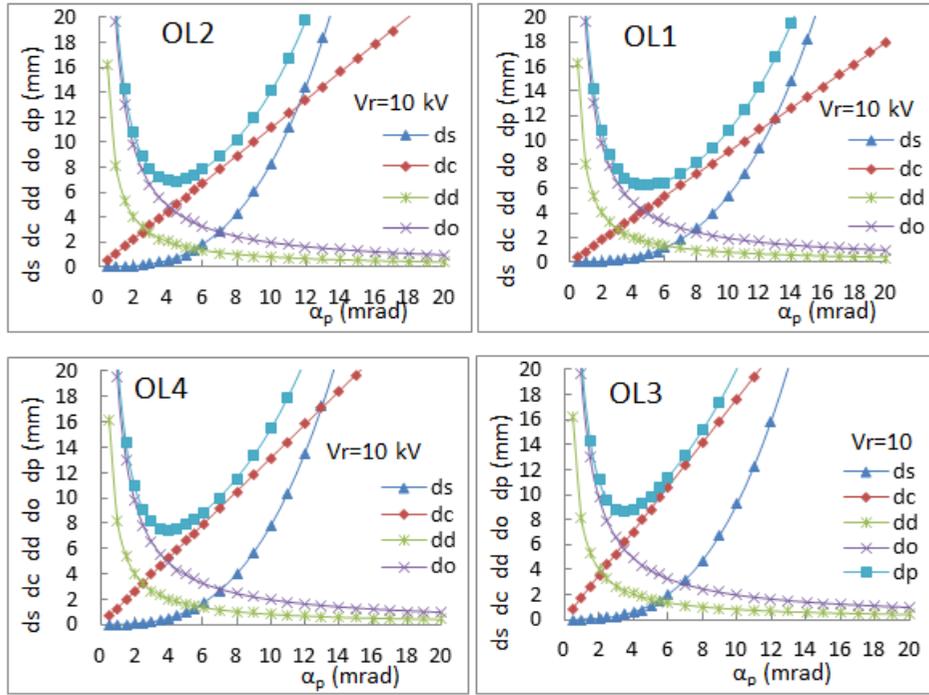
شكل (6) تغير عدد مرات التصغير dM في قطر الحزمة الالكترونية كدالة للجهد المعجل (V_r) للعدسات المغناطيسية الشبيئية OL1، OL2، OL3، و OL4

يقترن الأداء البصري للعدسات الشبيئية المستخدمة في المجهر الماسح بقابليتها على تكوين مجس الكتروني دقيق، ومن ثم تبثه على سطح النموذج المراد فحصه. ويعد قطر المجس النهائي المؤثر d_p من اهم المعلمات التي تحدد قابلية المجهر على التحليل، والذي يعتمد بدوره على عدة معلمات تتعلق بالخواص البؤرية للعدسات الشبيئية مثل البعد البؤري ومعاملي الزيغ الكروي واللوني والتي تم حسابها في الفقرات السابقة لبحثنا.

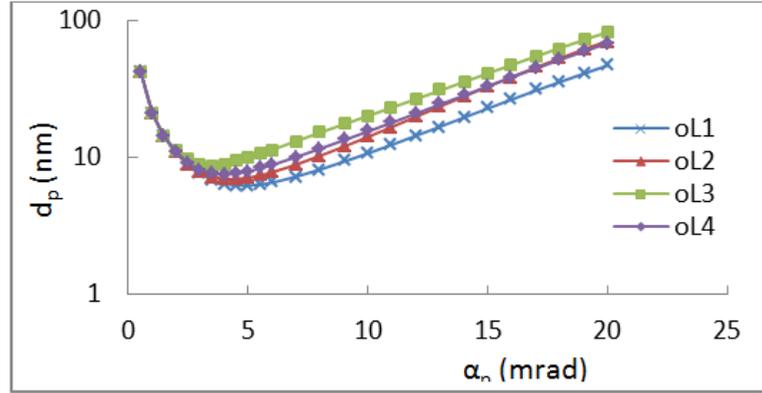
تم حساب القطر الكلي المؤثر dp للحزمة الالكترونية الساقطة على سطح النموذج، وما يصاحبها من تعريض بفعل مساهمات الزيغ الكروي، اللوني والحيود التي تعاني منها العدسة الشبيئية كدالة لزاوية الفتحة ap للتصاميم الأربعة قيد البحث، وذلك باستخدام المعادلة (6) عند قيمة ثابتة لعامل التهيج $NI/V(r)=8.08 A-t$ / وكما مبين بالشكل (7)

يوضح الشكل (7) مساهمات الزيوغ الكروية واللونية والحيود وكذلك الحدود النظرية للقطر الهندسي للمجس d_o والمعطى بالمعادلة (2) والذي لا يمكن الوصول إليه بسبب الزيوغ في العدسة الشيئية . يلاحظ من الشكل نفسه ان مساهمات الزيغ الكروي واللوني تقل مع نقصان α_p في حين مساهمة زيغ الحيود تزداد مع نقصان (α_p) وعليه لا بد من وجود قيمة مثالية لزاوية الفتحة تدعى α_{opt} عندها يحصل حالة توازن بين الزيوغ الثلاثة وبالتالي نحصل على اقل قيمة لقطر المجس d_{pmin} كما مبين بالمعادلتين (8) و(9) على الترتيب .

الشكل (8) يبين العلاقة بين قطر المجس النهائي المؤثر d_p كدالة لزاوية الفتحة α_p للتصاميم الاربع عند قيمة ثابتة لعامل التهيج $((NI/V(r))=8.08 A-t / V(1/2))$. واضح من الشكل أن التصميم OL1 يمتلك اقل قيمة لقطر الحزمة وبالتالي اقل قيم للزيوغ الثلاثة مقارنة بالتصاميم الأخرى . من الشكل (8) نستطيع إيجاد قيم α_{opt} التي تقابل d_{pmin} للتصاميم الاربع والمبينة بالجدول (3).



شكل (7) تغير الزيوغ (d_s, d_c, d_d)، وقطر المجس النهائي المؤثر (d_p) والقطر الهندسي d_o كدالة لزاوية الفتحة (α_p) للعدسات المغناطيسية الشيئية OL1، OL2، OL3، OL4 عند $((NI/V(r))=8.08 A-t / V(1/2))$

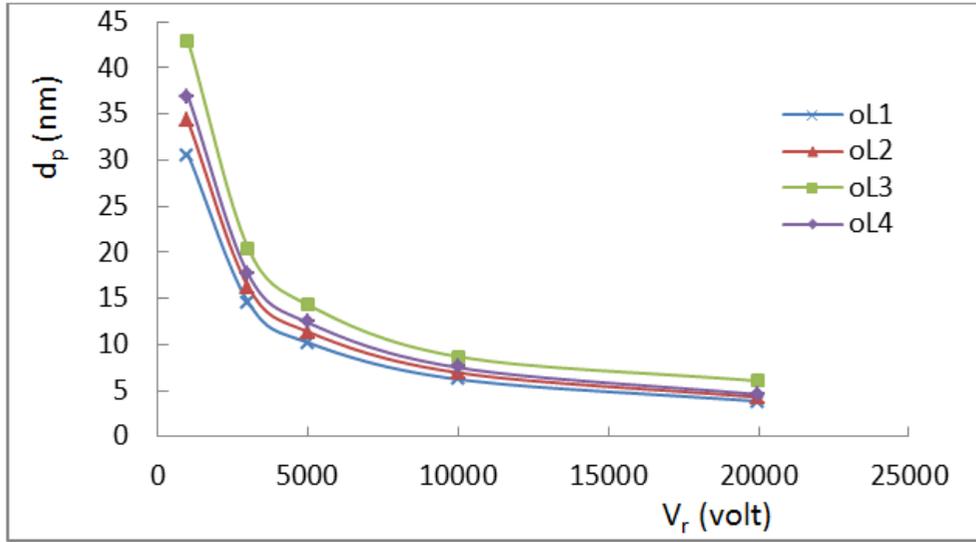


شكل (8) تغير قطر المجس النهائي المؤثر (d_p) كدالة لزاوية الفتحة (α_p) للعدسات المغناطيسية الشبيئية OL3، OL2، OL1 و OL4 عند قيمة ثابتة لعامل التهيج $(NI/V(r)=8.08 A-t / V(1/2))$

جدول (3) يوضح قيم α_{opt} التي تقابل d_{pmin} للتصاميم الاربع عند $(NI/V(r)=8.08 A-t / V(1/2))$

رمز العدسة		
OL1	5	6.22
OL2	4.5	6.93
OL3	3.5	8.67
OL4	4	7.49

كما تم إيجاد العلاقة بين اقل قيمة لقطر المجس الالكتروني d_{pmin} والذي يساوي التحليل Resolution للجهاز δ كدالة للجهد المعجل للحزمة الالكترونية عند قيم ثابتة ل α_{opt} للتصاميم السابقة باستعمال المعادلة (9) أخذين بنظر الاعتبار تغير قيم كل من λ و β كدالة للجهد المعجل Vr كما مبين بالشكل (9). واضح من الشكل أن التصميم OL1 حصل على اقل قيمة ل d_{pmin} اي على اعلى تحليل Resolution عند جميع الجهود المعجلة للحزمة الالكترونية مقارنة مع العدسات الأخرى. وإن مقدار التحليل يتراوح من (3.8 - 14.6) nm عند الجهود المعجلة (20-3) kV على الترتيب.



شكل (9) يوضح العلاقة بين $d_{p\min}$ او التحليل للجهاز كدالة للجهد المعجل V_r للعدسات OL3
OL4، OL2، OL1

يمكننا تلخيص النتائج التي حصلنا عليها من الدراسات السابقة والتي أجريت على العدسات المغناطيسية الشيئية OL1، OL2، OL3، و OL4 بالجدول (4) حيث يظهر الجدول إن العدسة OL1 وهي عدسة أحادية القطب (Snorkel) من النوع Radial gap lens حققت أفضل النتائج بسبب امتلاكها اقل القيم للبعد البؤري و قطر الحزمة والذي يقابل أعلى قيمة للتحليل . وحققت أعلى قيمة لعدد مرات التصغير في قطر الحزمة الالكترونية وأمتلك اقل قيمة لمعاملي الزيغ الكروي واللوني عند قيمة ثابتة لعامل التهيج $NI/V_r = 8.08 \text{ A-t} / V^{1/2}$. ومن الجدير بالذكر إن الأداء البصري لمنظومة الإضاءة في المجهر المساح يعتمد على قابليتها على تكوين مجس الكروني دقيق وتبثره على سطح النموذج والذي يتوقف بدوره على الأداء البصري لمنظومة العدسات المكثفة المزدوجة (Al-Hujaze & Mohamed , 2013) والخواص البصرية للعدسة الشيئية المستخدمة في هذه المنظومة .

جدول (4) ملخص لنتائج الدراسات السابقة للتصاميم الأربعة عند $(NI/V_r = 8.08 \text{ A-t} / V^{1/2})$

رمز العدسة	f (mm)	$d_{p\min}$ (nm)	dM	C_s (mm)	C_c (mm)
OL1	7.98	٦.٢٢	23.8	10.90	6.03
OL2	9	٦.٩٣	19.6	17.16	٧.٥٤
OL3	14.72	٨.٦٧	10.4	19.15	11.98
OL4	10.69	٧.٤٩	15.6	١٥.٨٣	8.81

وبمقارنة نتائج الخواص البؤرية للبحث الحالي مع البحوث المنشورة وجد أن العدسة OL1 قد حققت اقل قيم للزيغ الكروي واللوني والبعد البؤري عند تهيج ثابت NI=808 A-t وجهد معجل ثابت $V_p=10$ kV لاحظ الجدول (5).

الجدول (5) مقارنة الخواص البؤرية الشينية للعدسة المثلى OL1 مع نتائج البحوث المنشورة .

البحوث المنشورة (Ref.)	(Fo(mm)	(Cs(mm)	(Cc(mm)	(V _p (Volt)	(NI(A-t)
(Radial gap) البحث الحالي (OL1)	7.98	10.9	6.03	10000	880
((Al-Khashab &Hujazie,2010) (Axail gap	17.76	32.28	14.91	3965	500
(Kim et al , 2010) pinhole lens	11.8	-	-	15000	1171

إن معاملي الزيغ الكروي واللوني يزداد مع زيادة الجهد المعجل مما يؤثر ذلك سلباً على عدد مرات التصغير من قبل النظام فقد تراوح مقدار التصغير من (14-40) مرة عند نفس المدى للجهود المعجلة السابقة .

المصادر

- * 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. A. and Hujazie, N. S., (2010),» Design of objective magnetic and electrostatic lenses for low beam energies «, Dirasat , Pure Sciences, Vol. 37, No. 2, PP. 85-95 .
- * Al-Obaidy,K.(1996),”Design of the high resolution lens for the electron microscope “ .M.Sc.Thesis, The University of Mosul, Iraq (in Arabic) .
- * Gheidari. A. M. and Kruit, P., (2011),

الاستنتاجات

تبين من خلال التحليلات السابقة أن الشكل الهندسي للأقطاب والدائرة الحديدية لعبت دوراً كبيراً في تغير الخواص البصرية للعدسات الشيئية المستخدمة في منظومة الإضاءة في المجهر الماسح . وتبين من خلال الدراسة بأن القطر النهائي المؤثر للمجس الإلكتروني (dp) يعد من أهم المعلمات التي تحدد الأداء البصري للمجهر الماسح والذي يعتمد بدوره على عدة معلمات مثل البعد البؤري ومعاملي الزيغ الكروي واللوني، فضلاً عن زاوية الفتحة المثالية للعدسة الشيئية التي يحصل عنده حالة التوازن بين الزيوغ الثلاث والتي تعطينا اقل قيمة لقطر المجس والذي يساوي التحليل للجهاز .

وقد تبين من خلال الدراسة إن العدسة OL1 الأحادية القطب من النوع Radial gap قد تفوقت بأدائها البصري عن جميع العدسات الأخرى كما أحرزت هذه العدسة قدرة تحليل تتراوح من 3.8-14.6 nm (عند المدى للجهود المعجلة للحزمة من 3-30 kV) على الترتيب عند مسافات اشتغال ثابتة . ووجد

- W. Hawkes, Ed., Springer-Verlag, Berlin, pp. 359-420.
- * Munro, E.,(1975),”A set of computer programs for calculating the properties of electron lenses”, Cambridge University, Eng., Dept., Report CUED/B-ELECT/TR 45.
- * Murad, W. M.,(1998), “Design of iron-free magnetic electron lenses”, M. Sc. Thesis, The University of Mosul, Iraq (in Arabic).
- * Podbrdsky, J., (1986), “High current density magnetic electron lenses in modern electron microscopes “, Journal of scanning electron microscopy 3 , pp. 887-896 .
- * Reimer, L., and Kohl, H.,(2008),”Transmission Electron Microscopy: Physics of Image Formation “, 5th edition Springer Science +Business Media, LLC.
- * Takaoka , A., Ura, K., Morai, H. , Katsuta, T. Matsui, I. and Hayashi, S.,(1997),”Development of a new 3 MV ultra- high voltage electron microscope at Osaka University “,Journal of Electron PP447-456.
- “Electron optics of multi-beam scanning electron microscope “, Nuclear Instruments and Methods in physics Research A: Vol. 645, No. 1, pp. 60-67 .
- * Hawkes, P. W., (1972), “Electron Optics and Electron Microscopy”, Taylor and Francis Ltd., London .
- * Hujaze , N. S. (2006),”Design of a compound lens (magnetic-electrostatic)for low voltage scanning electron microscopy”. Ph. D. Thesis ,T he University of Mosul ,Iraq.
- * Hujazie, N. S. and Mohamed ,A.H.,(2013),”Optical performance of the double condenser magnetic lens system in a SEM “,Raf.J.Sci. to be publish .
- * Kim, D. H., Park, K., Park, M. J., Jung, H., and Jang, D. Y.,(2010),” Numerical analysis for verifying the performance of lens system in a scanning electron microscope “, Optik-, Vol. 121, No. 4, PP. 330–338.
- * Lencová, B. (1986), “Program AMAG for computation of vector potential in rotationally symmetric magnetic electron lenses by FEM ”, Inst. Sci. Instrum., Czech. Acad. Sci., Brno, Czechoslovakia, pp. 1-58.
- * Mulvey, T.,(1982),”Unconventional lens design”, in Magnetic Electron Lenses, P.