------مجلة علوم الرافدين، المجلد 24، العدد 6، ص134-146، 2013------

تأثير زاوية القطب على الخواص البصرية للعدسة الكهروستاتيكية المغمورة

رنا وليد الحيالي
قسم الفيزياء
كلية العلوم
جامعة الموصل

(تاريخ الاستلام 10 / 4 / 2013 ؛ تاريخ القبول 27 / 5 / 2013)

الملخص

تم تصميم نموذجين من العدسات الكهروستاتيكية المغمورة ثنائية القطب ذات قيم متساوية مـن أقطـار وأسماك أقطابها وتختلف في المسافة بين قطبيها للجزئين العلوي والسفلي. ويشمل كل نموذج عدستين طبقـاً لموقع القطب الذي تتغير فيه قيمة زاوية القطب. ودرس تأثير تغيير زاوية قطب منفرد لكل عدسة من هـذه العدسات الأربعة على خواصها البصرية عند نسبة جهد ثابتة. واختيرت أفضل زاوية قطب التي حققت أوطأ معاملات زيوغ كروية ولونية لكل من العدسات الأربعة لمقارنة الخواص البصرية في حالة التكبير الصفري لهذه العدسات عند نسب جهود مختلفة، ووجد في النموذجين أن العدستين E1 و E2 أفضل من كلا العدستين E3 و E4، وتبين ان العدسة E3 هي الفضلى للنموذجين والتي حققت أوطأ قيم للتغير النسبي لكلا الـزيغين الكروي واللوني نسبة إلى البعد البؤري. وتمت مقارنة نتائج الخواص البصرية للعدسـات الكهروسـتاتيكية للبحث الجاري مع نظيراتها للبحوث المنشورة، ووجد أن هنالك تحسناً واضحاً في الأداء البصري للعدسـات المقترحة.

الكلمات الدالة: العدسات الكهروستاتيكية، العدسات المغمورة، العدسات الثنائية القطب، زاوية القطب.

Effect of the Electrode Angle on the Optical Properties of Electrostatic Immersion Lens

Rana W. Al-Hialey
Department of Physics
College of Science
University of Mosul

ABSTRACT

Two models of an electrostatic immersion lenses of double electrodes have been designed of equal diameter and pole thickness, at different distances between their electrodes for the upper and lower parts. Each model includes two lenses according to its electrode angle that varied. The effect of the variation of the single electrode angle was studied for each lens on the optical properties at a constant voltage ratio. An optimum electrode angle has been chosen for the lenses one with a lowest spherical and chromatic aberration coefficients in order to compared its optical properties at different voltages ratio at zero magnification condition. It was found that the lenses E1and E3 are better than E2 and E4 in the two models. Moreover, it was found that E3 has an optimum optical performance within the two models. The results of the optical properties of the electrostatic lenses in the present work have been compared with those of the published results. A great improvement in the optical performance of the considered lenses has been found.

Keywords: Electrostatic lenses, immersion lenses, double electrodes lenses, electrode angle.

المقدمة

العدسـة الكهروسـتاتيكية عبارة عن مجموعة من الأقطاب مرتبة محوريا ويسـلط على كـل منهـا جهداً كهربائياً مختلفاً مما يؤدي إلى توليد مجال كهروستاتيكي متناظر محورياً لـه خـصائص التـصوير. والعدسات الكهروسـتاتيكية أصبحت رائـجة الاسـتخدام في العـديد من الأجـهزة العـلمية التـي تحتوي على شاشة لصغر حجمها وسهولة تصنيعها، وذلك بتعجيل أو تبئير أو إحراف الحزمـة الأيونيـة أو الالكترونية وغالباً ما تستخدم العدسات الكهروستاتيكية في العـديد من منظومـات الأجهـزة الالكترونيـة للتحكم في مسـار انطلاق الجسيمات المشـحونة بطاقـات واتـجاهـات مختلفة، منـها المجاهر الالكترونيـة بشـكل عام والمطيـاف الالكترونـي (Electron Spectrometer) بـشكل خـاص (Sise *et al.*, 2004)، لذلك فان الخواص البصرية للعدسـات الكهروستاتيكية ما زالت تستهوي العـديد من البـاحثين نظريـاً وعمـلياً فـي تـصـنيع المـصدر الالكترونـي أي قاذفـة الالـكترونات (Al-Khashab and Al-Abdullah, 2012)، (Al-Khashab and Al-Abdullah, 2013) و (Al-Khashab and Al-Abdullah, 2013)، أو يـتم تركيبـها مع عدسة مغناطيسـية لتكّون عدسـة مركبـة في المـجهر الالـكتروني الماسـح (SEM) الـذي يعمـل بفولتيـة واطئـة وتـسـمى Gemini (Abd-Hujazie, 2006) و (Al-Khashab and Ahmed, 2012).

إن العدسات الكهروستاتيكية ثنائية الأقطـاب المغمـورة (Two-element electrostatic immersion lenses) تستخدم لإبطاء الحزمة الالكترونية القادمة من قاذفة الالكترونات وذلك للحفاظ على النمـوذج مـن التلف عندما تسقط عليـه حزمة الكترونية ذات طاقات عاليـة (Shemesh, 2005) فضلاً عـن زيـادة الحسـاسـية وقدرة التحليل. ويسـتخدم احد القطبين لإبطاء الـحزمـة قبل دخولها إلى المطيـاف، بينما القطب الأخر لتعجيـل الالـكـترونات عـند خروجها من المطيـاف لزيادة كفـاءة التجمـع علـى الهدف (Mulvey and Wallington, 1973).

لقد أجريت العديد من الدراسات لتحليل خواص العدسات الكهروستاتيكية، ففي عـام 1969 قـام Read بدراسة الخواص البصرية للعدسات الكهروستاتيكية المغمورة ثنائية الأقطاب (Read, 1969) واستند في ذلك إلى استخدام طريقة المربعات الصغرى (Least-squares collocation method) لاحتساب توزيـع الجهـد المحوري على امتداد المحور البصري، ثم حسبت الخواص البصرية لتلك العدسات كالبعد البـؤري الـشيئي والمستوي الأساسي ومعامل الزيغ الكروي لمدى واسع من قيم الجهود المسلطة على الأقطاب.

وفي عام 1987 استخدم Szilagyi وآخرون الطريقة العكسية لتصميم العدسات الكهروسـتاتيكية وذلـك بإيجاد توزيع الجهد المحوري الذي يحقق خصائص بصرية جيدة، ثـم الحـصول علـى الـشكل الهندسـي للأقـطاب, وشـملت الدراسـة خـ ـواص العدسـ ـات الكهروسـ ـتاتيكية المغمـورة ثنائيـة الأقطـاب (Szilagyi *et al.*, 1987) وقام Jackson عام 1997 بتطوير برنامج حاسوبي لاحتـساب توزيـع المجـال الكهربائي لأي جهاز كهروستاتيكي متناظر محورياً بالاعتماد علـى طريقـة العناصـر المتناهيـة (FEM) واحتساب مسار الالكترونات داخل العدسة وإيجاد الخواص البصرية الالكترونيـة (Jackson, 1997). كمـا أجـريت العـديد من الدراسـات لتصميـم العدسـات الكـهروسـتاتيكية، حيث قـام كـلٍ مـنِ Al-Shamma و Al-Jumayli بتصـميم ودراسـة العدسـات الكهروستاتيكية المغمورة ثنائية القطب والمتعددة الأقطاب المتناظرة واللامتناظرة (Al-Shamma, 2007) و (Al-Jumayli, 2010).

يتضمن البحث الجاري تصميم نموذجين من العدسات الكهروستاتيكية المغمورة ثنائية الأقطاب تمتلـك قيم متساوية من أقطار وأسماك الأقطاب وتختلف في المسافة بين القطبين. وتضمن كل نموذج نـوعين مـن العدسات الكهروستاتيكية، النوع الأول يكون قطبها الداخلي (Inner) ثابتاً والقطب الخارجي (Outer) متغيراً، والنوع الثاني يكون قطبها الخارجي ثابتاً والداخلي متغيراً. وقد شملت الدراسة نقطتـين أساسـيتين أولهمـا استقصاء تأثير زاوية القطب على الأداء البصري للعدسات الكهروستاتيكية، وثانيهما إيجاد أفضل نسبة جهـد للعدسة المثلى التي تحقق اقل معاملات زيوغ كروية ولونية.

التصميم الهندسي والنتائج

إن المجالات الكهروستاتيكية تكون إما مستقرة مع الزمن أو متغيرة مع الزمن والمجالات المطبقة فـي معظم الأجهزة البصرية الالكترونية أو الآيونية تكون ساكنة، وكذلك فان المجالات ذات التغير البطيء يمكن اعتبارها مجالات شبه ساكنة تقريبا (Quasistatic approximation) كما هو الحال في منظومات الانحراف الكهربائية والمغناطيسية المستخدمة في الأجهزة الالكترونية (Hawkes and Kasper, 1996). عند تـصميم المنظومات البصرية الخاصة بالجسيمات المشحونة من المهم معرفة توزيع كلٍ مـن المجـالين الكهربـائي والمغناطيسي، ولاحتساب توزيع الجهد المحوري على امتداد المحور البصري تستخدم معادلة لابلاس العامة التي تتمثل بالعلاقة الآتية:

$$\nabla^2 V = 0 \qquad \ldots\ldots\ldots(1)$$

إن معظم العدسات الالكترونية تنشأ من مجالات متماثلـة دورانيـاً لـذلك يـستخدم نظـام الإحـداثيات الاسـطوانية (r,θ,z) لهذه المجالات وبما أنها متناظرة دورانياً لذلك تهمـل زاويـة الـدوران (θ) ويصبح الجهد V(r,z). ولقد اعتمدت طريقة العناصر المتناهية للمرتبة الأولى (First order finite element method) لحل هذه المعادلة التفاضلية. واستخدمت من قبل Munro في مجال البصريات الالكترونيـة لأول مرة عام 1975، كما وظفت في دراسة خـواص العدسـات الكهروسـتاتيكية والمنظومـات المغناطيـسية والكهروستاتيكية التي تستخدم لانحراف الحزمة الالكترونيـة (Magnetic and electrostatic deflectors)، (Lencová, 2002).

إن معادلة الشعاع المحوري تصف مسار الجسيمات المشحونة في المجـال الكهروسـتاتيكي المتماثـل دورانياً، والأشعة المحورية هي الأشعة التي تكون قريبة للمحور البصري (Z) والتي تصنع زاوية صـغيرة جدا مع المحور البصري ويمكن كتابة معادلة الشعاع المحوري بالشكل الأتي (Hawkes, 1972):

$$r''(Z) + \frac{V'}{2V} r'(Z) + \frac{V''}{4V} r = 0 \qquad \ldots\ldots\ldots(2)$$

وتمثل V' , V'' المشتقة الأولى والثانية للجهد على الترتيب, r ارتفاع مسار الحزمـة الالكترونيـة عـن المحور البصري و r' ميـل مسـار الحزمة. ويـتم حـل المـعادلـة أعـلاه باسـتـخدام طريقـة (رنج - كتا) من المـرتبة الرابـعة (Fourth order Range – Kutte method). ويتم احتـساب معـاملي الزيغين الكروي(C_{so}) واللوني (C_{co}) في جانب الجـسم باسـتخدام العلاقتـين (3) و(4) علـى التـوالي (Szilagyi and Szep, 1987):

$$C_{so} = \frac{1}{16 V_o^{1/2} r'^4_o} \int_{z_o}^{z_i} \left\{ \left[\frac{5}{4}\left(\frac{V''}{V}\right)^2 + \frac{5}{24}\left(\frac{V'}{V}\right)^4 \right] r^3 + \frac{14}{3}\left(\frac{V'}{V}\right)^4 r' r^3 - \frac{3}{2}\left(\frac{V'}{V}\right)^2 r'^2 r^2 \right\} V^{\frac{1}{2}} dz \qquad \ldots\ldots(3)$$

$$C_{co} = \frac{V_o^{1/2}}{r'^2_o} \int_{z_o}^{z_i} \left(\frac{V'}{2V} r' r + \frac{V''}{4V} r^2 \right) V^{\frac{-1}{2}} dz \qquad \ldots\ldots(4)$$

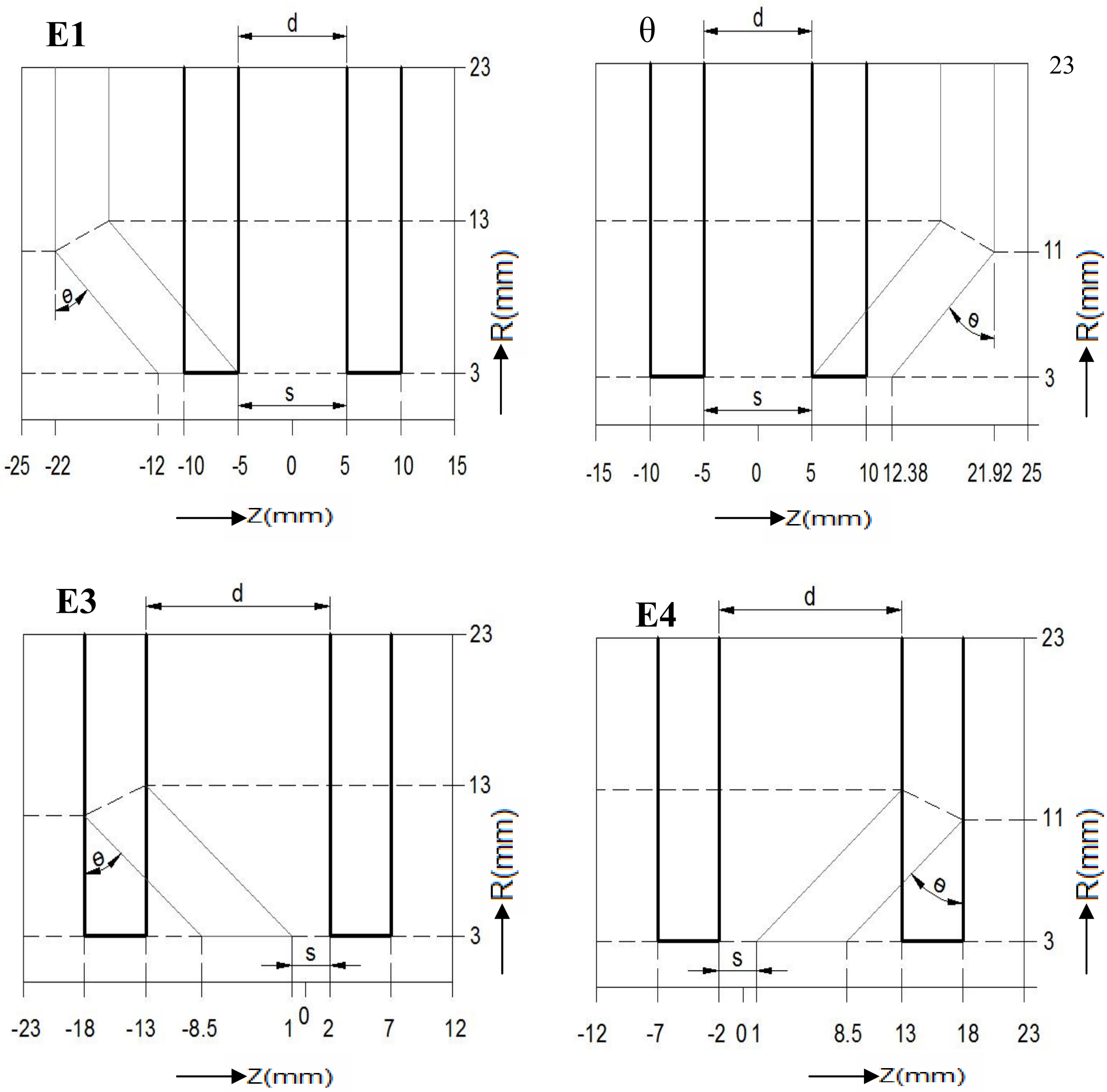
Z_o هو مستوي الجسم و V_o يمثل الجهد في مستوي الجسم.

إن معاملي الزيغين الكروي (C_{si}) واللونـــي (C_{ci}) يعبـر عنهما في جـــانب الـصـورة بالعلاقتيـــن الســـــابقتين باستبدال $V_o^{1/2}$ و r'^4_o بـــ $V_i^{1/2}$ و r'^4_i علـى التـوالي. وقـد استخدمت قاعدة سمبسون (Simpson's rule) لإيجاد قيم التكاملات.

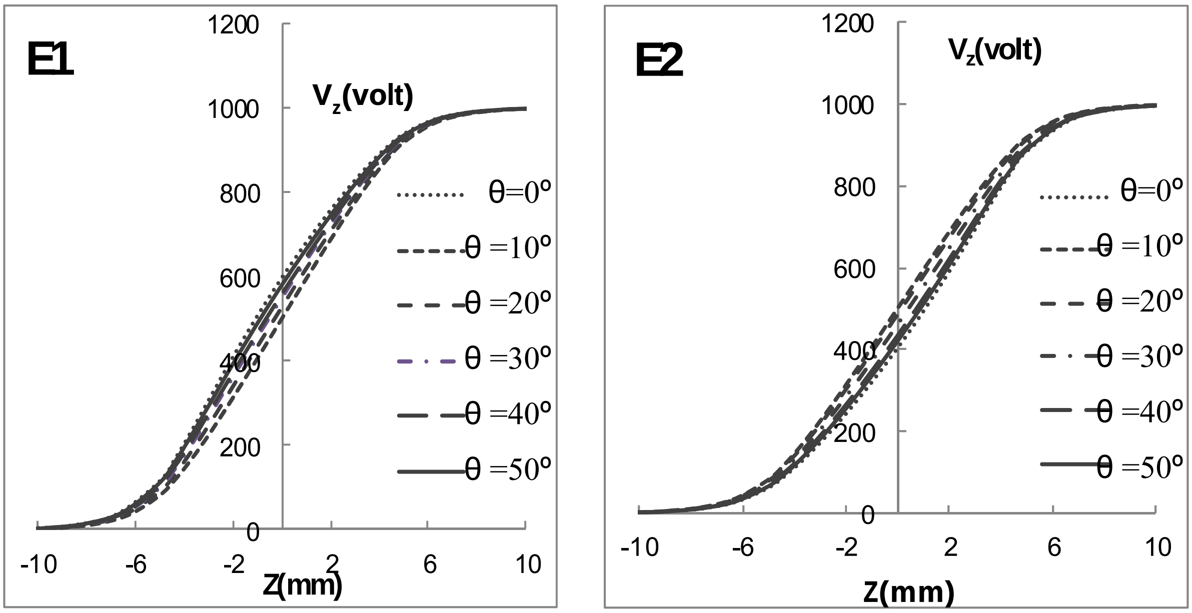
لأجل دراسة تأثير زاوية القطب على الأداء البصري للعدسة الكهروستاتيكية المغمورة ثنائية الأقطاب، تم اقتراح نموذجين مختلفين من العدسات تضمن كل منهما تصميمين، ويبين الـشكل (1) توزيـع خطـوط

المشبكات (Meshes) على النصف العلوي للعدسات الكهروستاتيكية الأربعة المقترحة، وسـميت (E1, E2, E3 & E4) على التوالي. والتي تكون متساوية في قطر فتحاتها المحورية (D=3 mm) واسـماك أقطابهـا (t=5 mm) وتختلف في المسافة بين قطبيها في جزئها العلوي d أو السفلي s. ففي العدستين E1 و E2 تكون المسافة بين قطبيها (s=10 mm) لجميع قيم زوايا أقطابها المقترحة[(θ=(0º, 10º, 20º, 30º, 40º, 50º)] . أما العدستين E3 و E4 فتكون المسافة بين قطبيها (d=15 mm) عند القيم المثبتة لزوايا أقطابها.

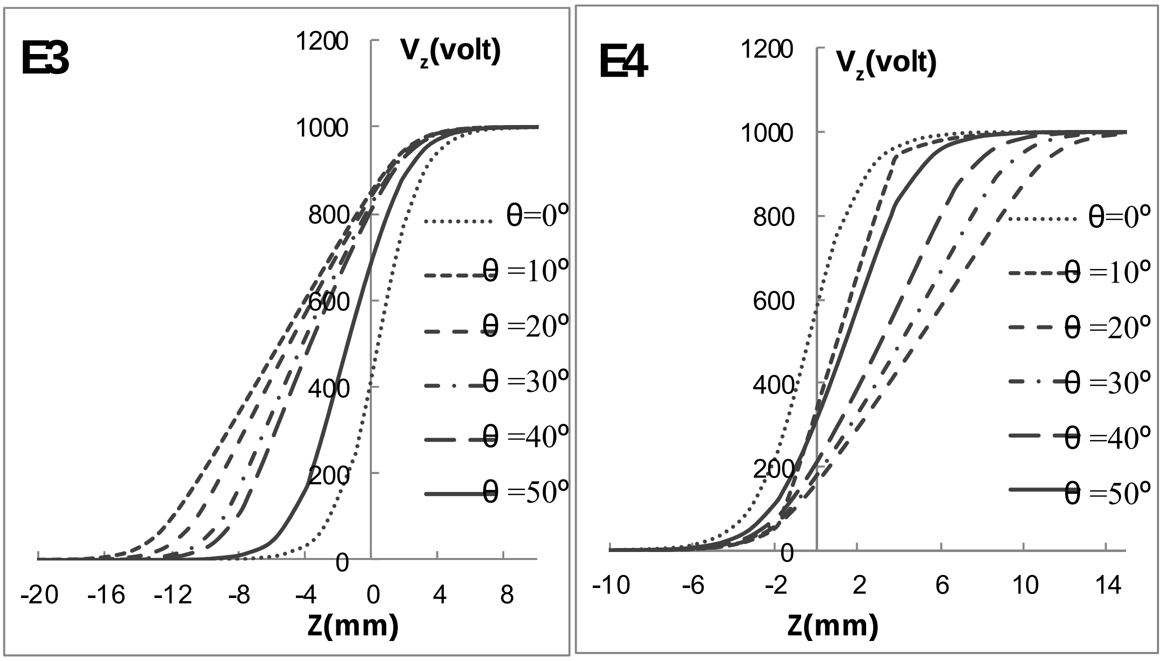
تم احتساب توزيع الجهد المحوري للعدسات الأنفة الذكر باستخدام المعادلة (1) وبمـساعدة البرنـامج (E11) الذي أعده Munro عام 1975 (Munro, 1975) وقد تم تطويره وإجراء بعض التعديلات البرمجيـة عليه من قبل (Abd-Hujazi, 2006) لكي يتسنى تشغيله على الحاسبات الالكترونية الحديثة. ويبين الشكل(2) توزيع الجهد المحوري على امتداد المحور البـصري للعدسـات المـذكورة أعـلاه، حيـث سـلط جهـد (V=0.0 volt) على قطبها الخارجي وكان الجهد المسلط على قطبها الداخلي مقداره (V=1000 volt) بحيث يكون الجهد المسلط على القطبين ثابتاً، وهذا يعني إن المجال الكهربائي يساوي صفراً عند النهـايتين، لـذلك فان الجسيمات المشحونة تتحرك بخطوط مستقيمة خارج العدسة لعدم وجود قوة تؤثر فيهـا. ونلاحـظ مـن الـشكل(2a) إن المنطقـة الممتـدة مـن (Z=-10 mm) إلـى (Z=-1 mm) تـدعى منطقـة التجميـع (Convergent region)، حيث المركبة الطولية للمجال الكهربائي (E_z) تقلل من سرعة الالكترونـات ممـا يزيد من قدرة التجميع (Convergent power) وهذا التأثير يستمر فترة طويلة. أما المنطقة المحصورة بـين (Z=2 mm) و (Z=10 mm) فهي تدعى منطقة التباعد أو اللاتجميـع (Divergent region)، وفـي هـذه المنطقة تعمل المركبة الطولية للمجال الكهربائي (E_z)على تعـجيل حركـة الالـكترونات بـانطلاق أسـرع مما كانت عليـه مقارنة مع المنطقـة الأولـى، لـذلك فان تأثير التبـاعـد يستمر فترة اقصر. وبذلك تعد العدسة بصفتها منظومة كاملة, عدسة لامة لان التجميع فيها يفوق تأثير اللا تجميـع (Grivet, 1972). وان تزايـد الجـهد للعدسـتين E2 و E1 كـان بطيئـاً وبـصـورة تدريجيـة عنـد القـيم الكـبيرة لـزوايـا القطـب المثبتـة قيـد الدراسـة، وهـذا بـدوره يـؤثـر في معـامـلات الزيـوغ الكـرويـّة واللـونيـة (Lencová, 1997)، أما الشكل (2b) فيوضح أن العدستين E3 و E4 قد تبادلت بين صفة العدسة المقعرة واللامـة عنـد زوايـا القطب المقترحة. كما تم احتساب خطوط تساوي الجهد في تركيب العدسات المقترحـة باسـتخدام برنـامج (E31) الذي وضع من قبل Munro عام 1975. الشكل (3) يوضح خطوط تساوي الجهـد داخـل تركيـب العدسات المقترحة عند قيمة ثابتة لكل من زاوية القطب ونسبة الجهد (θ=50º) و(V_i/V_o=50) على التوالي.



الشكل1: المخطط و الأبعاد الهندسية مع توزيع خطوط المشبكات لنماذج العدسات الكهروستاتيكية المغمورة ثنائية الأقطاب (E1, E2, E3 & E4).



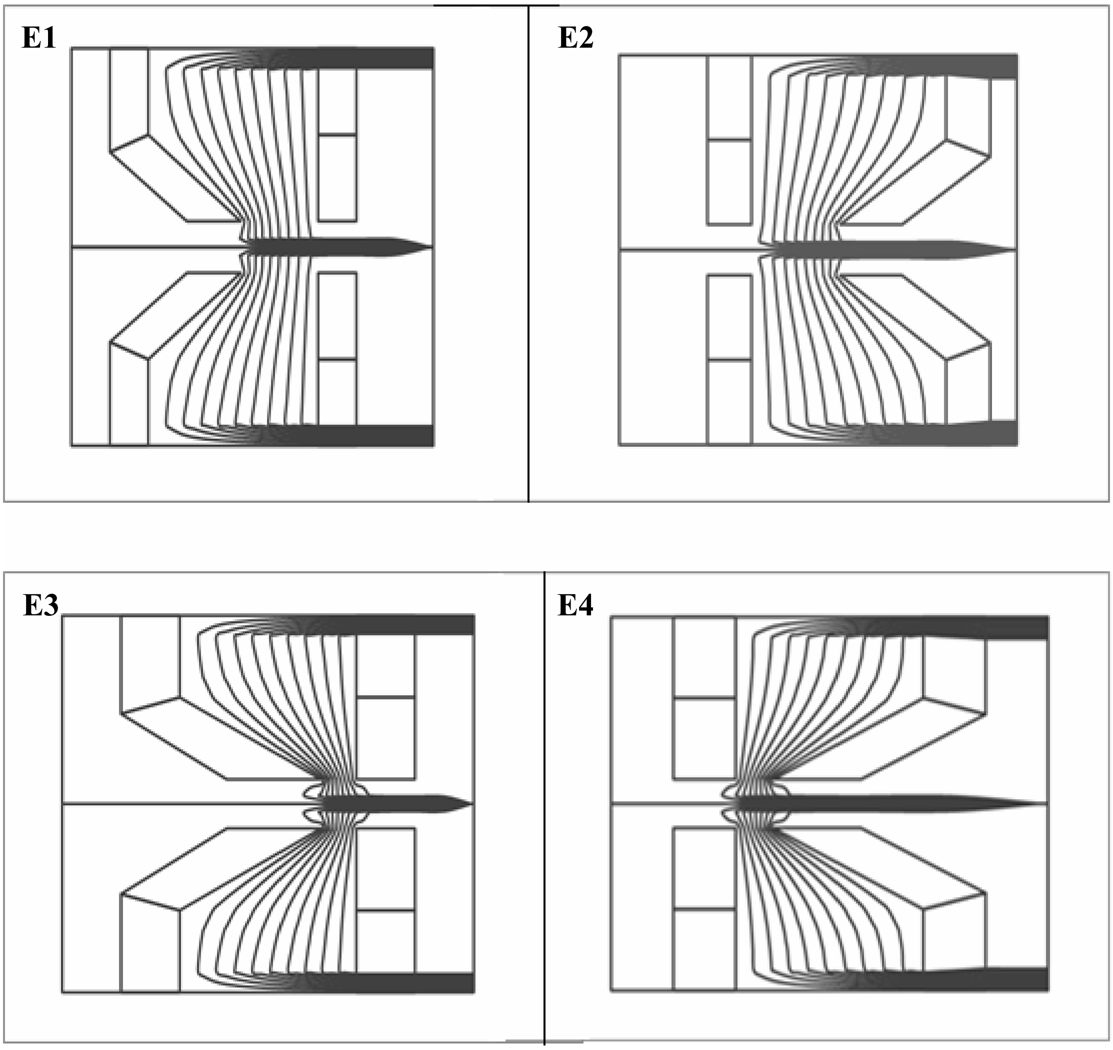
(a)



(b)

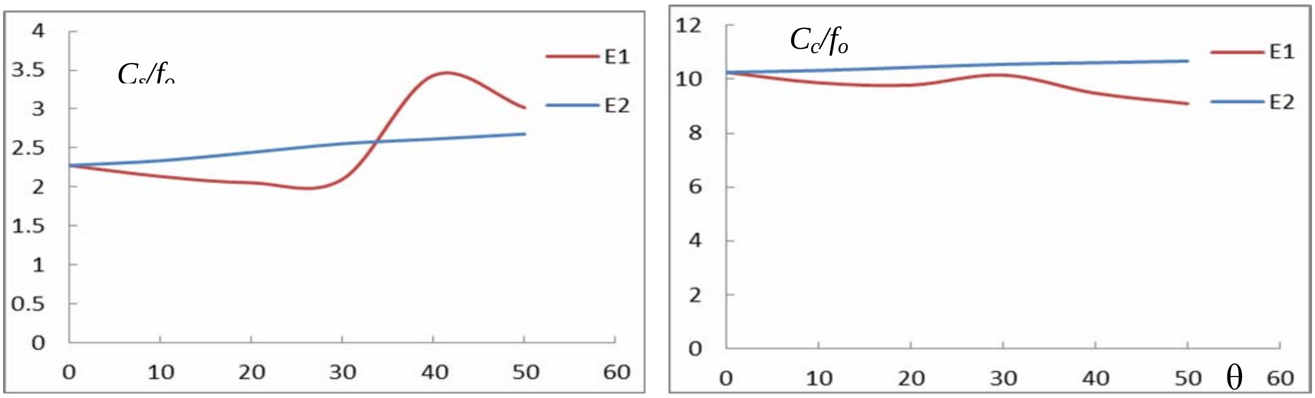
الشكل 2: توزيع الجهد الكهربائي للعدسات الكهروستاتيكية المغمورة ثنائية الأقطاب (E1, E2, E3 & E4) عند قيم زوايا القطب المقترحة.

حيث نلاحظ ان خطوط تساوي الجهد كانت متوازية وتأخذ الشكل الهندسـي للأقطاب، وكلمـا اقتربت هـذه الخطوط باتجاه المـحور البصري تحسنت الخواص البصرية. حيث كانت خطوط تساوي الجهد للعدسة E3 أكثر اقترابا نحو المحور البصري من باقي العدسات قيد الدراسة. فضلا عن ذلك احتسبت الخواص البصرية لهذه العدسات باستخدام العلاقتين (3) و (4) والشكلين (4a ,4b) يوضحان التغير النسبي للـ زيغين الكـروي واللوني إلى البعد البؤري عند قيم مختلفة من زوايا القطب وبثبـوت نـسبة الجهـد (V_i/V_o=50) للعدسـتين E2,E1 والعدستين E4, E3 على التوالي.

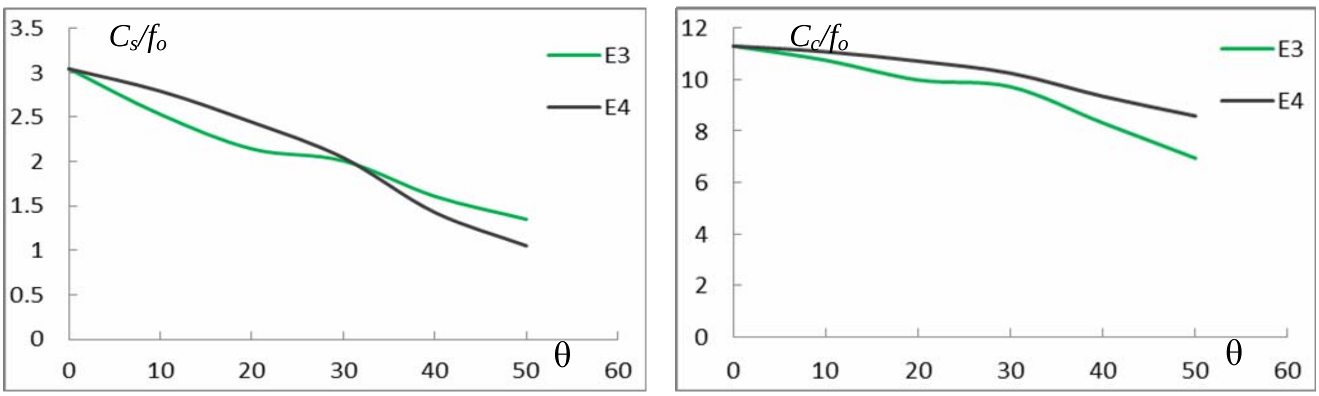


الشكل 3: خطوط تساوي الجهد للعدسات الكهروستاتيكية المغمورة ثنائية الاقطاب (E1, E2, E3 & E4) بثبوت كل من زاوية القطب ونسبة الجهد (θ=50°) و (V_i/V_o=50) على التوالي.

ففي الشكل (4a) نلاحظ ان (C_s/f_o) تزداد ببطء بازدياد قيم θ للعدسة E2، أما العدسة E1 فتقـل فيهـا هذه النسبة إلى حد معين عند (θ=30°) وبعدها تأخذ بالازدياد ثم تعود تنخفض لتصبح اقل مـا يمكـن عنـد (θ=50°)، أما التغير النسبي (C_c/f_o) يكون ثابت تقريباً لجميع الزوايا المستخدمة للعدسة E2، أما في العدسة E1 فتقل هذه النسبة إلى أن تصل حد معين عند (θ=20°) ثم تزداد حتى تصل قيمة التغير النسبي للعدسة E2 عند (θ=30°) وبعدها تقل أيضا وتصبح اقل ما يمكن عند (θ=50°)، أما الشكل (4b) يبين أن (C_s/f_o) تقـل بازدياد قيم θ وقد حصلت العدسة E4 على اقل قيمة للتغيير النسبي عند زاويـة القطـب (θ=50°) مقارنـة بالعدسة E3، أما التغير النسبي (C_c/f_o) فقد حصلت العدسة E3 على اقل قيمة للتغيير النسبي عند جميع قـيم الزاوية المستخدمة مقارنة بالعدسة E4 وبالتالي كانت العدسة E3 هي المثلى لأنها حققت أفضل أداء بـصري عند جميع زوايا القطب المستخدمة بالمقارنة مع بقية العدسات قيد الدراسة.



(a)

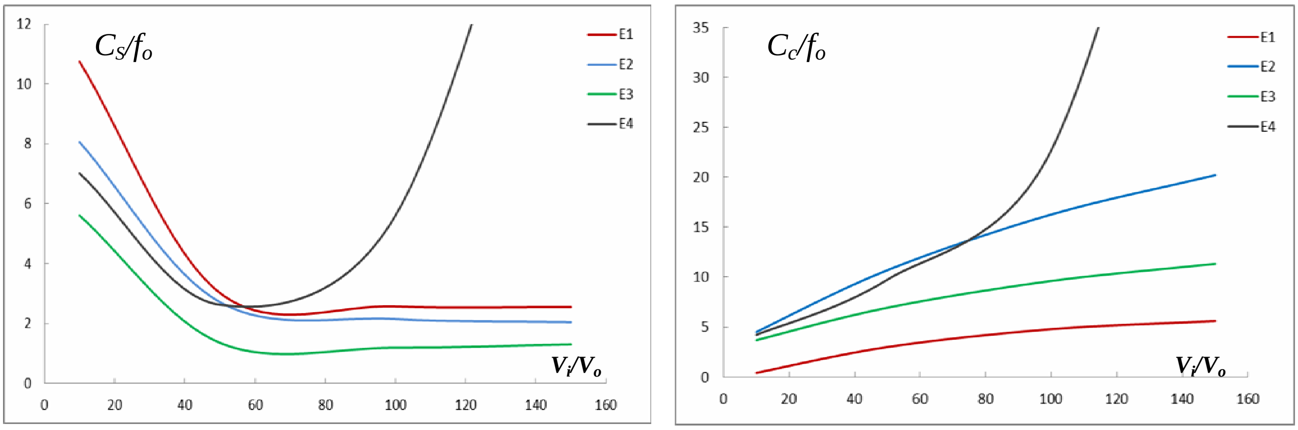


(b)

الشكل 4: التغير النسبي لزيغين الكروي واللوني الى البعـد البـؤري (C_s/f_o) و (C_c/f_o) علـى التـوالي للعدسات الكهروستاتيكية المقترحة بدلالة زوايا القطب عند ثبوت (V_i/V_o=50).

الشكل (5) يوضح التغير النسبي للزيغين الكروي واللوني إلى البعد البؤري بدلالة زاوية القطب (θ=50°) عند قيم مختلفة لنسب الجهود المسلطة (V_i/V_o) للعدسات الكهروستاتيكية المقترحة، نلاحظ ان (C_s/f_o) تقل بازدياد نسب الجهود المسلطة على أقطاب كل عدسة وتستقر تقريباً لمدى واسع لنسب الجهود من (V_i/V_o=50) إلى (V_i/V_o=150) ما عدا العدسة E2 حيث يزداد فيها التغير النسبي المذكور أعلاه عند هذه القيم من نسب الجهود، لذلك تعد العدسة E3 وهي الأفضل من بين العدسات المثبتة. أما التغير النسبي (C_c/f_o) فانه يزداد بازدياد نسب الجهود المسلطة لجميع العدسات، كذلك كانت العدسة E2 الوحيدة التي يزداد فيها هذا التغير النسبي زيادة كبيرة مع ازدياد نسب الجهود وبالتالي نلاحظ أن E1 هي أفضل من كافة العدسات في هذا التغير النسبي ولكنها قريبة من نتائج العدسة E3.

إن القيم المثلى لخواص العدسات تتبادل تبعا لزوايا أقطابها ومواقعها بالإضافة إلى نسب الجهود المسلطة على أقطابها لذلك من الضروري أن تقارن خواصها عند زوايا القطب المقترحة وبنسبة جهد ثابتة (V_i/V_o=50) كما هو موضح في الجدول(1)، حيث نلاحظ أن العدسة E3 هي الفضلى من بين تلك العدسات.



الشكل5: التغير النسبي للزيغين الكروي واللوني الى البعد البؤري (C_s/f_o) و (C_c/f_o) على التوالي للعدسات الكهروستاتيكية المقترحة بدلالة (V_i/V_o=50) عند ثبوت زاوية القطب (θ=50°).

الجدول 1: مقارنة الخواص البصرية للعدسات الكهروستاتيكية المغمورة ثنائيـة الأقطـاب (E1, E2, E3& E4) عند ثبوت (V_i/V_o=50) ولزوايا قطب مقترحة في حالة التكبير الصفري.

θ \ Lens	E1(V_i/V_o=50)		E2(V_i/V_o=50)		E3 (V_i/V_o=50)		E4(V_i/V_o=50)	
	(C_s/f_o)	(C_c/f_o)	(C_s/f_o)	(C_c/f_o)	(C_s/f_o)	(C_c/f_o)	(C_s/f_o)	(C_c/f_o)
0°	2.279	10.256	2.278	10.254	3.044	11.309	3.044	11.309
10°	2.137	9.869	2.338	10.323	2.532	10.755	2.793	11.087
20°	2.055	9.780	2.445	10.437	2.144	9.989	2.445	10.724
30°	2.099	10.155	2.556	10.552	2.009	9.724	2.044	10.253
40°	3.432	9.481	2.616	10.610	1.610	8.318	1.429	9.350
50°	3.018	9.092	2.680	10.670	1.352	6.948	1.054	8.591

ومما تجدر الإشارة إليه أن العدسة (E3) احرزت افضل خواص بصرية عند زاوية القطـب (θ=50°) ولمدى واسع من نسب الجهود المسلطة من (V_i/V_o=50) إلى (V_i/V_o=150) كما هو مبين في الجدول(2).

تمت مقارنة نتائج العدسات الكهروستاتيكية المغمورة ثنائية الأقطاب للدراسة الحاليـة مـع نظيراتهـا للبحوث المنشورة حديثاً، وتم اختيار العدسـة المغمورة ثنائيـة الأقطاب E3 المثلى التـي حققـت أفـضل خواص بؤرية بصرية لزاويـة القطب (θ=50°) عند نسـبة جهـد مختـارة (V_i/V_o=10) فـي حالـة التكبيـر الصفـري، لتنسـجم مع نسـبـة الـجهد الـمعطاة للبـحوث المـنـشـورة، وتـمت مقارنتـهـا مـع نتـائج دراسـات الباحثيـن (Munro, 1975)، (Al-Meshhdany, 2002) و (Al-Shamma, 2007) كما هو موضح في الجدول (3)، وتبيـن أن هنالـك تحـسناً واضـحاً لقـيم معاملات الزيوغ الكروية واللونية للدراسة الحالية تفوق نظيراتها للدراسات السابقة.

الجدول 2: مقارنة الخواص البصرية للعدسات الكهروستاتيكية المغمورة ثنائية الأقطاب (E1,E2,E3&E4) عند زاوية قطب ثابتة (θ=50°) ولنسب جهود مختارة في حالة التكبير الصفري.

(V_i/V_o) \ Lens	E1 (θ=50°)		E2 (θ=50°)		E3 (θ=50°)		E4 (θ=50°)	
	(C_s/f_o)	(C_c/f_o)	(C_s/f_o)	(C_c/f_o)	(C_s/f_o)	(C_c/f_o)	(C_s/f_o)	(C_c/f_o)
10	10.747	0.423	8.059	4.517	5.606	3.700	7.014	4.232
50	3.018	3.012	2.710	10.709	1.352	6.948	2.625	9.756
100	2.571	4.798	2.148	16.272	1.192	9.623	5.604	22.700
150	2.547	5.612	2.046	20.204	1.302	11.334	22.577	75.926

الجدول 3: مقارنة الخواص البصرية للعدسة الكهروستاتيكية المغمورة ثنائية الأقطاب للدراسة الحالية مـع نظيراتها للدراسات السابقة عند نسبة جهد ثابتة (V_i/V_o=10) في حالة التكبير الصفري.

البحوث المنشورة (Ref.)	(C_s/f_o)	(C_c/f_o)
(البحث الحالي Lens E3)	5.606	3.700
(Munro, 1975)	11.81	4.82
(Al-Meshhdany, 2002)	23.6	7.3
(Al-Shamma, 2007)	4.85	4.20

الاستنتاجات

1. إن لزاوية القطب تأثيراً كبيراً على توزيع الجهد المحوري للعدسات الكهروسـتاتيكية المغمـورة ثنائيـة الأقطاب وهذا بدوره يؤثر في معاملات الزيوغ الكروية واللونية بشكل عام، وتبين أن أفضل زاوية قطب لكل عدسة (θ=50°).
2. إن لموقع القطب الذي تتغير فيه زاوية قطبه، تأثيراً واضحاً على الخواص البصرية فـي حالـة التكبيـر الصفري حيث نلاحظ أن معاملات الزيوغ الكروية واللونية تكون اقل في العدستين اللتين تتغير فيهما زاويـة قطبها الخارج (E1, E3) مما عليه في العدستين اللتين تتغير فيهما زاوية قطبها الداخل (E2, E4).
3. في حالة التكبير الصفري وجد ان معامل الزيغ الكروي يقل ومعامل الزيغ اللوني يزداد بازديـاد نـسبة الجهود المسلطة على قطبيها.

المصادر

Abd-Hujaze, N.S. (2006). Design of a compound lens (magnetic-electrostatic) for low voltage scanning electron microscopy. Ph. D. Thesis, University of Mosul, Iraq.

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, University of Mosul, Iraq.

Al-Khashab, M.A.; Ahmed, A.A. (2012). The influence of electrode angle on the minimization of the aberration coefficients of the two electrodes electrostatic immersion lens. *Jordan J. Physics,* **5**(2), 67-75.

Al-Khashab, M.A.; Al-Abdullah, A.E. (2012). The confront electrodes faces curvature effect on the electron gun performance. *Raf. J. Sci.,* **23**(2), 138-147.

Al-Khashab, M.A.; Al-Abdullah, A.E. (2013). The effect of bore diameters in two electrodes electrostatic immersion lens design. *Raf. J. Sci.,* **24**(2), 82-91.

Al-Khashab, M.A.; Al-Abdullah, A.E. (2013). Effect of the electrode bore angle on the two-electrode electrostatic immersion lens design. *Jordan J. Physics,* To be published.

Al-Meshhdany, I.A. (2002). Theoretical design of electron gun lenses using numerical methods. M. Sc. Thesis, University of Baghdad, Iraq.

Al-Shamma, M.T. (2007). Design of the electrostatic lenses with multi-electrodes. M. Sc. Thesis, The University of Mosul, Iraq.

Grivet, P. (1972). "Electron Optics". Part(1), Translated by Hawkes, P. W., Pergamon Press. Oxford, 2nd English Edition.

Hawkes, P.W. (1972). " Electron Optics and Electron Microscopy". Taylor and Francis, Ltd., London.

Hawkes, P.W.; Kasper, E. (1996). "Principles of Electron Optics". Academic Press, London.

Jackson, A. (1997). Development of software for the computation of the properties of electrostatic electro-optical devices via both the direct ray tracing and paraxial approximation techniques. Final year project dissertation.

Lencová, B. (1997). Electrostatic lenses. Handbook of charged particle optics. *Ed., J.*, Orloff, CRC Press LLC, 177-221.

Lencovà, B. (2002). Accuracy of electrostatic lens computations with FOFEM. *Ultra Microscopy*, **39**, 263-270.

Mulvey, T.; Wallington, M.J. (1973). Electron lenses. *Reports on Progress in Physics*, **36**(4), 349-416.

Munro, E. (1975). A set of computer program for calculating the properties of electron lenses. Cambridge Univ., Eng., Report CUED/B-ELECT/TR 45, pp.13-100.

Read, F.H. (1969). Accurate calculation of double aperture electrostatic lenses. *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, **2**(2), 165-169.

Sise, O., Uju, M. ; Dogan, M. (2004). Multi element Cylindrical electrostatic lens systems for focusing and controlling charged particles. Web site www.electrostatic lenses + pdf.

Shemesh, D. (2005). "Scanning Electron Microscope Having Multiple Detectors and a Method for Multiple Detector Based Imaging", U. S. Patent, No. WO 2005/017511 AI, Applied materials Inc., P. O. Box 450, Santa Clara, CA 95052(US).

Szilagyi, M.; Szep, J. (1987). A systematic analysis of symmetric three-electrode electrostatic lenses. *IEEE. Trans. Electron. Devices,* ED-**34**(12), 2634-2642.

Szilagyi, M.; Szep, J.; Lugois, E. (1987). Systematic analysis of two-electrode electrostatic lenses. *IEEE. Trans. Electron. Devices,* ED-**34**(8), 1848-1858.