تصميم الشكل الهندسي للذراع الحديدي في العدسة الكهرومغناطيسية المكثفة-الشيئية

منى عبد الكريم الخشاب ثامر جمعة الخالدي

قسم الفيزياء / كلية العلوم / جامعة الموصل

(أُستلم 2013/ 10 /24 ؛ قُبِلَ 2014 / 1 / 20)

الملخص

إن تحسين تركيب القطب الرئيسي والشكل الهندسي للذراع الحديدي في العدسة المغناطيسية ثنائية القطب اللامتناظرة والتي تعمل بوصفها عدسة مكثفة-شيئية أدى إلى إمكانية تصميم عدسات المجهر الالكتروني بقدرات تحليل عالية جداً. تناول البحث في ثلاث مراحل تصميم عدسة بخواص فضلى من خلال تصميم شكل هندسي أمثل للذراع الحديدي الذي يحقق أعلى ذروة فيض للمجال المغناطيسي وأقل معامل زيج كروي عندما تعمل العدسة بفولتية التشغيل المصححة نسبياً ($V_r=200$ kV) وتهيج ثابت ($NI=10.5$ kA-t). في المرحلة الأولى تمت دراسة سمك الذراع الحديدي في العدسة، وفي المرحلة الثانية وضع تخلصر في الذراع الحديدي وتمت دراسة تأثيره في الخواص البصرية للعدسة، أما المرحلة الثالثة فاقترحت على دراسة تأثير بعد موقع التخلصر عن المحور البصري على أداء العدسة. وتم احتساب توزيع كثافة المجال المغناطيسي، ومسارات خطوط الفيض المغناطيسي في تركيب العدسة، وخواصها البؤرية للمراحل الثلاث لتشخيص العيوب وتحسين الشكل الهندسي للذراع الحديدي والأداء البصري، وتم اختيار القيم المثلى للخواص البؤرية الشيئية للعدسة المقترحة. ووجد ان معامل البعد البؤري يتناسب تناسباً عكسياً مع السمك وان أفضل عمق للتخلصر يساوي ($dp_w=13$ mm) فضلاً عن موقعه ($h=35$ mm) الذي اعطى افضل قدرة تحليل للعدسة ($\delta=0.2$ nm). وقد تمت مقارنة النتائج للبحث الحالي مع نظيراتها من البحوث المنشورة ووجد أنها تتفق تماماً.

الكلمات الدالة: العدسة الكهرومغناطيسية المكثفة-الشيئية، قدرة تحليل العدسة الكهرومغناطيسية، تصميم العدسة الكهرومغناطيسية ثنائية القطب اللامتناظرة.

The Design of the Iron Shroud Geometrical Shape in the Condenser-Objective Electromagnetic Lens

Muna A. Al-Khashab

Thamer J. Al-Khaldey

Department of Physics / College of Science/ University of Mosul

ABSTRACT

The optimization of the main polepiece structure and the geometrical shape of iron shroud in the asymmetric double polepiece magnetic lens for the condenser-objective mode led to the possibility of the higher resolution lens design for the electron microscope.

This work is handled by three steps, the designed lens having optimum properties through the construction of a fine geometrical shape of the iron shroud which results the highest flux density peak of the magnetic field with a lowest spherical aberration coefficient, at ($V_r=200$ kV) and excitation of ($NI=10.5$ kA-t). In the first step the thickness of the iron shroud was studied whereas the optical properties of the lens were studied, by putting west point in the iron shroud in the second step. Moreover, the effect of the height of the west point position on the optical performance was

studied in the third step. The Calculation has been made for the axial magnetic field distribution, the magnetic flux lines trajectories and the optical properties to limit the defects in the lens and consequently improve the geometrical shape of the iron shroud. It was found that the focal length inversely proportional to the thickness of the iron shroud and the best depth for the west point equals ($dp_w=13$ mm), beside that the west point position was ($h=35$ mm) which gave the best resolving power ($\delta=0.2$ nm).

The obtained results of the preferred properties in the present work have been compared with those of the published results, and it was found that both results are in a good agreement with each other.

Keywords: The condenser-objective electromagnetic lens, the higher resolution electromagnetic lens, asymmetric double polepiece electromagnetic lens design.

المقدمة

إن أفضل تصميم للعدسة الكهرومغناطيسية ذات معاملات الزيوغ الواطئة يعتبر ذو أهمية كبيرة (Al-Khashab and Ahmed, 2011) في مختلف مجالات البصريات الالكترونية. لذلك فقد أجريت دراسات حول تقليل معاملات الزيوغ إلى أوطى ما يمكن من خلال تغيير الشكل الهندسي للعدسات للحصول على أفضل الخواص البصرية. إذ أن العدسة الكهرومغناطيسية التي تمتلك أعلى ذروة فيض بأقل عرض نصفي للمجال المغناطيسي تنتج زيوغاً واطئاً (Mulvey, 1982). وقد حاول الباحثون تحقيق أفضل تركيب هندسي للقطب مع أبعاد هندسية مناسبة للعدسات الكهرومغناطيسية الثنائية القطب بأنواعها المختلفة، المتناظرة التي قام بها (Cleaver, 1980) واللامتناظرة التي أجراها (Wenxiong, 1988). وتمت دراسة العدسات الأحادية القطب اللامتناظرة من قبل (Al-Khashab and Abbas, 1991) لنفس الهدف.

ومع تطور تقنيات النانو أصبح من المهم تحسين قدرة التحليل (Resolving power) لعدسات المجهر الالكتروني وفق المعايير النانوية، ويتم ذلك بتقليل الزيوغ إلى أدنى حد ممكن في العدسة الشبئية (Li et al., 2009)، وتُبنى العدسة المكثفة-الشبئية بطريقة (Riecke) لإشباع القطب بالفيز المغناطيسي وتوليد أعلى ذروة كثافة فيض مغناطيسي في مركز العدسة (Mulvey, 1986)، إذ تختلف العدسة المكثفة-الشبئية عن العدسة الشبئية التقليدية بوضع النموذج في منتصف الفجوة الهوائية (S) حيث تعترض الجهة الأمامية العليا للنموذج المجال الأمامي (Pre-field) وتعمل كعدسة مكثفة، أما الجهة الخلفية السفلى للنموذج فتعترض الجزء الخلفي للمجال (Post-field) المار في العدسة وتعمل كعدسة شبئية (Ray, 2005). أي أن مركز العدسة يكون منتصف الفجوة الهوائية وبذلك فإن الجزء الواقع أمام النموذج يعمل كمنظومة إضاءة، والجزء الواقع خلف النموذج يعمل كمنظومة تصوير (Tsuno and Harada, 1983)، وللعدسة المكثفة-الشبئية أهمية كبيرة في كلا المنظومتين سواء الإضاءة منها أو التصوير (Krivanek et al., 2008). حيث يتعرض النموذج إلى مجال عالي جداً في العدسة المكثفة-الشبئية، لذلك يتأثر موقع النموذج (Wenxiong, 1988) بالمجال ضمن الفجوة الهوائية، وله اثر كبير في توليد الزيوغ (Tsuno and Smith, 1986). كما أن تيار المجس الالكتروني وقطره النانوي (Electron probe)

(diameter 1 nm) يعد من أهم العوامل في دراسة الخواص البصرية للجانب الأمامي (المكثف) للعدسة المكثفة-الشبئية (1986 Yanaka). في حين أن دراسة الخواص البصرية للجانب الخلفي (الشبئي) يكون مهماً عند استخدام العدسة محلاً عالياً للقدرة (Bleeker and Kruit, 1990). وعند تصميم العدسة المكثفة-الشبئية فإن هنالك أموراً مهمة يجب أخذها بنظر الاعتبار، كشكل وحجم الملفات والقدرة على تبريدها (Mulvey, 1982) بالإضافة إلى الحفاظ على استقرارية مقدار التهييج العالي فيها، أعلى من واحد أمبير لكل مليمتري مربع (Podbrdsky, 1986).

يتضمن البحث الحالي تصميم شكل هندسي للذراع الحديدي للعدسة المكثفة-الشيئية ودراسة خواصها البؤرية الشيئية للحصول على أفضل شكل هندسي للذراع الحديدي بحيث يحقق أقل زيوغ وأعلى قدرة تحليل ممكنة للعدسة في حالة تشغيلها بفولتية تعجيل مصححة نسبياً مقدارها ($V_r = 200 \text{ kV}$) وتهيج ثابت يساوي ($NI = 10.5 \text{ kA-t}$) عند شرط التكبير غير المحدود (Infinite magnification condition).

تصميم العدسة الكهرومغناطيسية المكثفة-الشيئية ثنائية القطب اللامتناظرة

إن تصميم العدسات الكهرومغناطيسية يتطلب تحديد أفضل تركيب هندسي للقطب وشروط التشغيل المرافقة لها (فولتية التشغيل، ومقدار التهيج، ونمط التشغيل، والخواص البؤرية المطلوبة)، فضلاً عن الشكل والحجم المناسبين للملف (Al- , 2013, Khashab and Al-Hialely).

إن التقنية المميزة والمستخدمة في تصميم العدسات الكهرومغناطيسية هي طريقة العناصر المتناهية (Finite Element Method, Tsuno and Smith, 1986) التي استخدمها (Munro, 1975)، ومن ثم (Lencova', 1986) التي تعتمد صيغة التجزئة. إذ يتم تقسيم العنصر الواحد إلى أجزاء صغيرة جداً بشكل مشبكات (Meshes)، إضافة إلى طرائق الحساب النظري والتحليل العددي.

لقد عُمد في البحث الجاري إلى تصميم عدسات ثنائية القطب لا متناظرة والتي تتشابه في جميع معالماتها وأبعادها وأشكالها الهندسية باستثناء الذراع الحديدي الذي يتغير شكله الهندسي مع تغيير العدسة المقترحة لتعمل عند فولتية التشغيل المصححة نسبياً ($V_r = 200 \text{ kV}$) والتهيج الثابت ($NI = 10.5 \text{ kA-t}$) بنمط العدسة المكثفة-الشيئية، التي لا تحتاج إلى قيم تهيج عالية جداً. حيث أن شكل القطب الأول (First polepiece) يكون مخروطياً ناقصاً، ارتفاع وجه القطب فيه ($b_1 = 4 \text{ mm}$) وزاوية ارتفاعه ($\beta_1 = 54^\circ$) كما أن زاوية فتحته المحورية ($\alpha_1 = 10^\circ$) وطوله المحوري ($l_{b1} = 8 \text{ mm}$) ونصف قطره ($r_1 = 2 \text{ mm}$). أما القطب الثاني (Second polepiece) فيكون ملتصقاً مع الذراع الحديدي بطول محوري ($l_{b2} = 8 \text{ mm}$) كما أن زاوية ارتفاعه يساوي ($\beta_2 = 28^\circ$) وزاويته المحورية ($\alpha_2 = 15^\circ$). أما نصف قطره فيكون ($r_2 = 2.5 \text{ mm}$). ويفصل القطبين فجوة هوائية تساوي ($S = 4 \text{ mm}$)، وبذلك فإن النسبة (S/D) الهندسية (Geometrical ratio) -الباعية (Murad, 1998) - تبقى ثابتة ($S/D = 0.89$) وهي قيمة متوافقة مع المعايير المحددة في تصميم العدسات الثنائية القطب (Mulvey, 1982). حيث أن معدل قطر العدسة يساوي $[D = (D_1 + D_2)/2]$ ، (Lenz, 1928). وتمتلك العدسة ملفين: الملف الأول على شكل مستطيل، ومساحة مقطعه العرضي ($A_1 = 500 \text{ mm}^2$). والملف الثاني ذو شكل رباعي أضلاعه غير متساوية بالطول تتقاطع بزوايا مختلفة، ومساحة مقطعه العرضي يساوي ($A_2 = 1000 \text{ mm}^2$). وقيمة التهيج الكلي للعدسة تساوي ($NI = 10.5 \text{ kA-t}$) أي بكثافة تيار ($\sigma = 7 \text{ A-t/mm}^2$) لكلا الملفين. ويكون سمك الصفيحة الخلفية (Back plate) للعدسة ثابتاً ($W_{bp} = 20 \text{ mm}$) وسمك الجزء الجانبي للدائرة المغناطيسية يساوي (10 mm). أما الذراع الحديدي فينوسطه تخفض (W_{dp}) يتغير مقدار عمقه (dp_w) من عدسة إلى أخرى حسب التصميم المطلوب، كما هو موضح في الشكل (1).

يتألف البحث من جزئين: الجزء الأول يختص بدراسة تغيير سمك الذراع الحديدي وأهمية تأثيره في الخواص البؤرية الشبئية وسمات العدسات المصممة. أما الجزء الثاني، فيهتم بتغيير الشكل الهندسي للذراع الحديدي وتأثيره على الخواص البؤرية والأداء البصري للعدسات من خلال استحداث تخفض يتوسط الجهة الداخلية للذراع الحديدي المقابل لقطب العدسة الأول، كما هو مبين في الشكل (1) أعلاه. وهذا المقترح سيتم استقصاؤه ضمن هذا البحث لأول مرة في مجال البصريات الالكترونية. فقد تمت دراسة أفضل عمق للتخصر عند تحديد سمك طرفي الذراع الحديدي للعدسة والموقع المناسب له، مع أمثلية الخواص البؤرية المترافقة عند فولتية التشغيل المطلوبة ($V_r = 200 \text{ kV}$) للعدسة المكثفة-الشبئية عند شرط التكبير اللامحدود. وتمت معايرة جميع النتائج عند هذه الفولتية باستخدام المعادلة التالية:

$$n = (V_r / V_{\text{original}})^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

حيث أن V_r فولتية التعجيل المصححة نسبياً (فولتية التشغيل) المطلوبة لمعايرة الخواص البصرية عندها وتساوي (200 kV). و(V_{original}) الفولتية التطبيقية (الأصلية) المصححة نسبياً التي تعطي الخواص البؤرية وتكون عندها كثافة المجال المغناطيسي بأعلى ذروتها في مركز العدسة ($Z=0.0$) منتصف الفجوة الهوائية. و n يمثل معامل المعايرة.

الجزء الأول: تأثير سمك الذراع الحديدي (W) على الخواص البصرية الشئية للعدسات المكثفة-الشئية

تم في هذا الجزء من البحث اختيار ثلاث قيم مختلفة لسمك الذراع الحديدي (W) وهي ($W_2=10$ and $W_3=15$ mm) ($W_1=5$ mm) لتشكل العدسات المتماثلة في أبعادها الهندسية والمختلفة في سمك ذراعها الحديدي (L_{w1} , and L_{w3}) على التوالي، واستخدم برنامج AMAG (Lencova', 1986) لدراسة توزيع كثافة المجال المغناطيسي لهذه العدسات عند تهييج ثابت ($NI=10.5$ kA-t). ويبين الشكل (2) ان العدسة L_{w3} الاكثر سمكاً تمتلك اعلى قيمة لذروة الفيض المغناطيسي واكثر انتظاماً للمجال من بقية العدسات وتتوسط الذروة منطقة الفجوة الهوائية فيها.

وتم احتساب مسارات خطوط الفيض المغناطيسي في تركيب العدسات أعلاه باستخدام برنامج FLUX (1998) Murad , كما هو موضح في الشكل (3)، حيث نلاحظ ان مسار خطوط الفيض المغناطيسي للعدسة L_{w3} في الشكل (3c) اكثر انتظاماً وتقارباً الى الفجوة الهوائية التي يتوسطها ($Z=0.0$) النموذج المطلوب دراسة خواصه، بالمقارنة مع العدستين L_{w1} و L_{w2} اللتين يكون فيهما مسارات خطوط الفيض اكثر انحناءً وابتعاداً عن الفجوة الهوائية، كما هو مبين في (3b,3a) من الشكل (3). وبشكل عام فان هذه الخطوط نجدها منتظمة ومتوازية لبعضها البعض وتسقط عمودياً على سطح القطب المائل وتقترب من وجه بروز القطب لتكون أكثر انتظاماً وتقارباً. كذلك نلاحظ أن خطوط الفيض للعدسة ذات السمك الأكبر تقترب أكثر إلى المحور البصري، كما في الشكل (3d) الذي يظهر جزءاً مكبراً لمسارات خطوط الفيض المغناطيسي للعدسات الثلاث.

الشكل 2: توزيع كثافة المجال المغناطيسي للعدسات الكهرومغناطيسية الثلاث المختلفة في سمك ذراعها الحديدي عند التهييج الثابت ($NI=10.5$ kA-t).

الشكل 3: مسارات خطوط الفيض المغناطيسي في تركيب العدسات الكهرومغناطيسية المختلفة في سمك ذراعها الحديدي عند تهيج ثابت (NI=10.5 kA-t)، للسمك (w): a:- w= 5 ، b:- w= 10 mm and c:- w=15 mm و d - جزء مكبر من مقطع الذراع الحديدي للعدسات الثلاث.

كما تم احتساب الخواص البؤرية الشبئية (معامل الزيغ الكروي C_s ، معامل الزيغ اللوني C_c ومعامل البعد البؤري f_o) لهذه العدسات باستخدام برنامج M21 (Munro, 1975). وأجريت معايرة النتائج عند الفولتية التشغيلية المصححة نسبياً ($V_f=200$ kV) والتهيج الثابت (NI=10.5 kA-t)، وبمقارنة الخواص البؤرية الشبئية المبينة في الشكل (4)، نلاحظ أن معامل الزيغ الكروي يزداد زيادة نسبية ضئيلة بازدياد سمك الذراع الحديدي، في حين أن معامل الزيغ اللوني يتناقص مع ازدياد سمك الذراع الحديدي، كما ونلاحظ أيضاً أن معامل البعد البؤري يتناقص بشكل واضح بازدياد سمك الذراع الحديدي، بينما تتحسن قدرة التحليل بتقليل السمك.

الشكل 4: تغير الخواص البؤرية الشبئية مع تغيير سمك الذراع الحديدي في العدسات الكهرومغناطيسية عند التهيج الثابت (NI=10.5 kA-t).

وبين الجدول رقم (1) مقارنة الخواص البؤرية الشبئية فضلا عن كثافة الفيض المغناطيسي لهذه العدسات عند فولتية التعجيل المصححة نسبيا ($V_r=200$ kV) بثبوت التهييج ($NI=10.5$ kA-t) وموقع الجسم عند ($Z = -0.04$) بناءً على اختيار نمط التشغيل للعدسة (المكثفة-الشبئية). كما ويوضح الجدول أن القيم النسبية لمعاملتي الزيغين الكروي واللوني إلى البعد البؤري (C_s/f_o و C_c/f_o) على التوالي أظهرت أفضلية اختيار السمك الأقل للذراع الحديدي وقد أحرزت العدسة (L_{w1}) قيم نسبياً أقل لمعاملتي الزيغين الكروي واللوني وقدرة تحليل أفضل بالمقارنة مع العدستين (L_{w2} و L_{w3}) بينما نلاحظ أن العدسة (L_{w3}) تتميز بالذروة العالية لكثافة الفيض المغناطيسي وهبوط في قيمتي معاملي الزيغ اللوني والبعد البؤري مقارنة مع (L_{w1}).

الجدول 1: مقارنة الخواص البؤرية الشبئية للعدسات الكهرومغناطيسية المختلفة في سمك ذراعها الحديدي عند فولتية تعجيل ($V_r= 200$ kV) والتهييج الثابت (10.5 kA-t) وموقع الجسم عند منتصف الفجوة الهوائية ($Z = -0.04$) بنمط العدسة المكثفة-الشبئية.

W(mm)	f_o (mm)	C_s (mm)	C_c (mm)	C_s/f_o	C_c/f_o	B_z (Tesla)	δ (nm)
5	3.146	0.960	1.937	0.305	0.615	1.344	0.266
10	2.767	0.971	1.788	0.351	0.646	1.384	0.266
15	2.227	0.985	1.515	0.442	0.680	1.650	0.267

ومن الجدير بالذكر انه سوف يتم اختيار البعد البؤري ($f_o=2$ mm) بناءً على الشروط التطبيقية للتشغيل بنمط العدسة المكثفة-الشبئية، وفي ضوء نتائج الجدول أعلاه الذي يبين أن معامل البعد البؤري يتناقص مع ازدياد السمك، فقد تم اقتراح وضع تخصر في الذراع الحديدي للعدسة يجمع بين السمتين (قلة الزيوغ، وقصر البعد البؤري).

الجزء الثاني: تأثير تخصر الذراع الحديدي (W_{dp}) على الخواص البؤرية الشبئية للعدسات المكثفة-الشبئية.

في هذا الجزء من البحث ولغرض الحصول على سمات جيدة للعدسات والتي تتضمن السمة الأمثل عند كل سمك من القيم المدروسة في الجزء الأول مجتمعة، فقد تم إحداث تخصر في الجانب الداخلي للذراع الحديدي باتجاه وجه القطب الرئيسي بعمق محدد، وأفترض أن يكون أفضل موقع له في منتصف الذراع الحديدي بحيث يتناظر السمك على جانبي التخصر، فعندما يكون سمك التخصر ($W_{dp}=5$ mm) فان سمك طرفي الذراع الحديدي يساوي ($W=15$ mm).

وتم احتساب توزيع كثافة المجال المغناطيسي لعمق التخصر عند القيم المختارة من نقاط العمق {mm} $\{dp_w=(10,13,15)\}$ - أي ابتعاد نقطة التخصر عن منتصف الفجوة الهوائية - فوجد أن العمق المناسب للتخصر يكون عند النقطة ($dp_w=13$ mm) ويعادل ($w_{dp}=7$ mm) من سمك الذراع الحديدي عند نقطة التخصر المحددة كما هو موضح في الشكل (5). حيث نلاحظ ارتفاعاً لتوزيع كثافة المجال المغناطيسي عند النقطة ($dp_w=13$ mm) بينما نجد انخفاضها عند النقطة ($dp_w=15$ mm)، ونلاحظ عند احتساب مسارات خطوط الفيض المغناطيسي حدوث تسرب لخطوط الفيض خارج تركيب العدسة عند هذه النقطة من عمق التخصر، كما هو مبين في الشكل (6).

الشكل 5: توزيع كثافة المجال المغناطيسي للعدسات الكهرومغناطيسية مع تغيير عمق التخصر في ذراعها الحديدي عند التهيج الثابت (NI=10.5 kA-t).

الشكل 6 : مسارات خطوط الفيض المغناطيسي في تركيب العدسات الكهرومغناطيسية والمختلفة في عمق التخصر في ذراعها الحديدي عند التهيج الثابت (NI=10.5 kA-t) لنقاط العمق (dp_w):
 a:- dp_w= 10 mm ، b:- dp_w= 13 mm and c:- dp_w= 15 mm ، d- جزء مكبر من مقطع الذراع الحديدي للعدسات الثلاث.

وعند احتساب الخواص البؤرية الشبئية لعمق التخصر عند القيم المختلفة من نقاط العمق {11,12,13,14,15} mm ،
 أي ابتعاد نقطة التخصر عن مركز العدسة- وجد أن أفضل الخواص البؤرية لعمق التخصر تحققت عند النقطة (dp_w=10 mm)، والشكل (7) يبين هذه الخواص البصرية البؤرية الشبئية لعمق التخصر في الذراع الحديدي لهذه العدسات، حيث نلاحظ أن أوطئ قيمة لمعامل الزيغ الكروي يكون عند النقطة (dp_w=13 mm) كما هو واضح في الشكل (7a)، وإن معامل

الزيغ اللوني يترافق مع البعد البؤري في الزيادة بازدياد عمق التخصر كما في الشكل (7b و 7c) ولكن عند النقطة ($dp_w=13$ mm) يكون لهما قيمة منخفضة. ونلاحظ أيضاً أن لقدرة التحليل تحسناً واضحاً عند النقطة أعلاه مقارنة بالنقاط الأخرى لعمق التخصر، كما هو موضح في الشكل (7d).

الشكل 7: تغير الخواص البصرية البؤرية a) -الزيغ الكروي ، b) -الزيغ اللوني، c- البعد البؤري ، d- قدرة التحليل) للعدسات الكهرومغناطيسية المختلفة في عمق التخصر في ذراعها الحديدي عند التهيج الثابت ($NI=10.5$ kA-t).

ويتبين مما سبق أن القيمة الفضلى لعمق التخصر تكون عند النقطة ($dp_w=13$ mm)، لذلك سوف يتم اعتمادها في الخطوات اللاحقة من هذا البحث. حيث سيتم دراسة أزاخ ارتفاع موقع التخصر على استقامة الذراع الحديدي - أي بعده عن المحور البصري - .

تم اختيار نقاط الارتفاع لموقع التخصر (h) - أي بعده عن المحور البصري - ، حيث أن $\{h=(30,35,40)\text{mm}\}$ كدالة على أفضلية تحديد الشكل الهندسي الأمثل للذراع الحديدي عند الفولتية التشغيلية ($V_r=200\text{kV}$) والتهيج الثابت ($NI=10.5$ kA-t). فلتحديد أمثلية الأداء البصري للعدسات المذكورة أعلاه، فقد تم احتساب توزيع كثافة المجال المغناطيسي لهذه العدسات. حيث نلاحظ في الشكل (8) أن قيم توزيع كثافة المجال المغناطيسي المتولدة عن تهيج الملف ($NI=10.5$ kA-t) تتغير بتغيير موقع ارتفاع نقطة التخصر، ومقدار ذروة المجال المغناطيسي للعدسة تتأثر بالشكل الهندسي للذراع الحديدي فضلاً عن سمكه. إذ نلاحظ أن كثافة الفيض لهذه العدسات تزداد مع ازدياد الارتفاع بشكل نسبي، وأن العدسة (h35) تتميز بقيمة وسطية لذروة المجال المغناطيسي بثبوت عمق التخصر عند النقطة ($dp=13$ mm).

الشكل 8: توزيع كثافة المجال المغناطيسي للعدسات الكهرومغناطيسية بدلالة ارتفاع موقع نقطة التخصر في الذراع الحديدي عند التهيج الثابت ($NI=10.5 \text{ kA-t}$).

كما تم احتساب مسارات خطوط الفيض المغناطيسي في تركيب العدسات أعلاه عند ثبوت التهيج ($NI=10.5 \text{ kA-t}$)، ويبين الشكل (9) تغير مسارات خطوط الفيض في تركيب الذراع الحديدي بتغيير ارتفاع موقع التخصر حيث نلاحظ تقارب خطوط الفيض وانتظامها عند الفجوة الهوائية للعدسات والتمايز النسبي بين العدسات الثلاث. ووجد عند احتساب الخواص البؤرية الشبكية، المبينة في الشكل (10) أن معامل الزيغ الكروي يكون في أوطأ قيمة له ($C_s=0.9593 \text{ mm}$) عند الارتفاع ($h=35 \text{ mm}$) كما هو واضح في الشكل (10a)، في حين أن معاملي الزيغ اللوني والبعد البؤري يتناقصان بشكل مستمر بازدياد ارتفاع موقع نقطة التخصر، كما في الشكل (10b، 10c) مع وجود انحناء لهما عند الارتفاع ($h=35 \text{ mm}$) لموقع نقطة التخصر في الذراع الحديدي للعدسات المذكورة.

الشكل 9 : مسارات خطوط الفيض المغناطيسي في تركيب العدسات الكهرومغناطيسية والمختلفة في ارتفاع موقع نقطة عمق التخصر في ذراعها الحديدي عند التهيج الثابت ($NI=10.5 \text{ kA-t}$). للارتفاع (h): (a:- $h=30 \text{ mm}$ ، b:- $h=35 \text{ mm}$ ، c:- $h=40 \text{ mm}$) و-d جزء مكبر من مقطع الذراع الحديدي للعدسات الثلاث.

وبتطبيق المعايير عند فولتية التعجيل المصححة نسبياً ($V_r=200$ kV) والتهيج الثابت ($NI=10.5$ kA-t) وشرط التكبير اللامحدود (Munro, 1975) ووضع النموذج عند مركز الفجوة الهوائية (S) للعدسة الكهرومغناطيسية قبل وصول المجال المغناطيسي إلى أعلى ذروته، تم إيجاد قدرة التحليل للعدسات (Mulvey, 1982) من المعادلة التالية:

$$\delta = 0.71(C_s \lambda^3)^{1/4} \quad \text{.. in (nm)} \quad \text{.....(2)}$$

حيث λ الطول الموجي المرافق لفولتية التشغيل بوحدة النانومتر ويحتسب من العلاقة التالية:

$$\lambda = (1.5 / V_r)^{1/2} \quad \text{.. in (nm)} \quad \text{.....(3)}$$

فوجد أن القيمة المثلى لقدرة تحليل العدسات المذكورة تكون عند نقطة الارتفاع ($h=35$ mm) وتساوي ($\delta=0.26$ nm) والموضحة في الشكل (10d).

كما إن الشكل (10) يبين أن التخصر المقترح يجعل الخواص البصرية للعدسة المصممة قريبة جداً لتحقيق هدف البحث في تصميم العدسة وتصنيعها وفق الشروط التطبيقية والمختبرية والمحددة بالقيم ($V_r=200$ kV، $f_o=2$ mm، $C_s=1$ mm) وقدرة تحليل $\delta=0.2$ nm.

الشكل 10: تغير الخواص البصرية البصرية (a) - معامل الزيغ الكروي، (b) - معامل الزيغ اللوني، (c) - معامل البعد البؤري، (d) - قدرة التحليل) للعدسات الكهرومغناطيسية بتغيير ارتفاع موقع نقطة عمق التخصر في ذراعها الحديدي عند التهيج الثابت ($NI=10.5$ kA-t).

ومما تجدر الإشارة إليها أن العدسة ذات الخواص المتوافقة مع الشروط المختبرية والتصنيعية المطلوبة ضمن هدف البحث الحالي عند مقارنتها مع نظيراتها عند نفس الشروط التشغيلية، هي التي تمتلك أقل معامل زيغ كروي عندما يكون موقع ذروة الفيض المغناطيسي للعدسة الكهرومغناطيسية في منتصف الفجوة الهوائية ويكون موقع النموذج قريباً جداً منه في اتجاه القطب

الأول (القطب الرئيسي). بذلك يتم تحديد الشكل الأمثل للذراع الحديدي عندما تكون الخواص البصرية في أفضل قيمتها وتكون قريبة من القيم المعروفة عالمياً، والموضحة في الجدول (2) الذي يبين مقارنة بين الخواص البصرية الشبئية للعدسة المصممة مع نظيراتها للبحوث المنشورة في دراسات سابقة. حيث نلاحظ تحسناً في قيمة قدرة التحليل للعدسة المصممة في البحث الحالي وكذلك الخواص البصرية الشبئية مقارنة مع العدسات الأخرى للدراسات السابقة. كما ويتبين أن للفجوة الهوائية تأثير واضح في معامل الزيوغ الكروي والبعد البؤري للعدسة عند تهيج ثابت وفولتية تعجيل محددة.

الجدول 2: مقارنة الخواص البصرية المثلى للعدسة الكهرومغناطيسية المصممة في البحث الجاري عند فولتية التشغيل (200 kV) مع نظيراتها للبحوث المنشورة بدراسات سابقة فضلاً عن قيم الفجوة الهوائية (S) وتهيج العدسة (NI).

Lens	S(mm)	NI(kA-t)	C _s (mm)	f _o (mm)	δ(nm)
Present work	4	10.5	0.95	2.2	0.26
Li et al. , 2009	6	9.976	1.38	1.8	0.29
Tsuno and Harada, 1983	3	10.9	0.83	2.4	0.25

الاستنتاجات

إن لسلك الذراع الحديدي أهمية كبيرة في تحديد الخواص البصرية للعدسة الكهرومغناطيسية لذا يتوجب على المصمم الاهتمام بتحديد شكلها حسب الغرض المطلوب من تصميم العدسة، إذ أن معامل البعد البؤري للعدسة المطلوبة يتناسب تناسباً عكسياً مع مقدار سمك الذراع الحديدي للعدسة.

عند وضع تخطيط في الذراع الحديدي للعدسة الكهرومغناطيسية نلاحظ تحسناً طفيفاً لقدرة التحليل للعدسة مع زيادة عمق التخصر إلى حد معين، مبيناً أن هناك قيمة فضلى لسلك الذراع الحديدي لكل قيمة من قيم الخواص البصرية المطلوبة، وإن مقدار عمق التخصر وكذلك ارتفاعه (موقع بعده عن المحور البصري) ذو تأثير طفيف في الخواص البصرية للعدسة لكنه عامل مهم في تحديد الشكل الهندسي للذراع الحديدي وبالتالي في تحديد الشكل الهندسي للعدسة الكهرومغناطيسية، سيّما عند دراسة مسارات خطوط الفيض المغناطيسي في تركيب العدسة لما لها من دور في تحديد عيوب العدسة المصممة لمعرفة مدى تسرب الفيض المغناطيسي الناتج عن تغطى الأقطاب الحديدية فيها بسبب التهيج العالي للعدسة، وتأثير هذا التسرب المغناطيسي على مسارات الحزمة الالكترونية. وبالتالي وجد أن هنالك حالة مثلى للشكل الهندسي للذراع الحديدي والتي توفر الخواص المطلوبة لتحقيق الغرض التطبيقي من العدسة المصممة.

المصادر

- Al-Khashab, M.A.; Abbas, I.K. (1991). Optimized polepiece shape for single polepiece magnetic electron lenses, *Modelling, Simulation and Control*, A.AMSE Press, **35**(3), 1-9.
- Al-Khashab, M.A.; Ahmad, A.A. (2011). The effect of magnetic lens structure insulation on its optical performance. *Dirasat Pure Science*, **38**(2), 161-168.
- Al-Khashab, M.A.; Al-Hiale, R.W. (2013). The effect of the geometrical shape and position of the coil on the optical performance for asymmetrical magnetic lens. *Raf. J. Sci.*, **24**(2), 100-109.
- Bleeker, A.J.; Kruit, P. (1990). Condenser objective lens with asymmetric polepieces to facilitate the extraction of secondary and Auger electron. *Rev. Sci. Instrum.* **61**(12), 350-356.

- Cleaver, J.A.R. (1980). The choice of polepiece shape and lens operating mode for magnetic objective lenses with saturated polepiece. *Optik*, **57**, 9-34.
- Krivanek, O.L.; Corbin, G.J.; DELLby, N.; Elston, B.F.; Keyse, R.J.; Murfit, M.F.; Own, C.S.; Szilagy, Z.S.; Woodruff, J.W. (2008). An electron microscope for the aberration –corrected era. *Ultramicroscopy*, **108**(3), 179-195.
- Lencova', B. (1986). Program AMAG for computation of vector potential in rotationally symmetric electron lenses by the finite element method. *Inst. Sci. Instru.*, Czech. Acad. Brno, (Czech), 1-58.
- Lenz, F. (1982). "Properties of Electron Lenses, in Magnetic Electron lenses". ed. P.W. Hawkes, Springer -Verlary, Bertin, pp.119-161.
- Li, Wen-ping; Wu, Jain; Zhou Zhen; Gui, Li-Jaing; Han, Li. (2009). Practical integrated design of a condenser-objective lens for Transmission Electron Microscope. *J. Physics*, Conference Series, **188**(2009), 012045
- Mulvey, T. (1982). "Magnetic Electron Lens Properties". ed. P.W. Hawkes, Berlin, Springer, Ch.5, pp. 359-412.
- Mulvey, T. (1986). Unconventional lens design and columns. *Proc. XIth Int.Cong.*, on Electron Microscopy, Kyoto. 239-242.
- Munro, E. (1975). "A Set Of Computer Program for Calculating the Properties of Electron Lenses". Cambridge University, Eng. Dep., Report CHED/ B- ELECT/TR-45, pp.13-100
- Murad, W.M. (1998). Design of iron-free magnetic electron lenses. M.Sc. Thesis, University of Mosul, Iraq (in Arabic).
- Podbrdsky, J. (1986). High current density magnetic electron lenses in modern electron microscope. *Scan. Electr. Microscope /III*, (887-896).
- Ray, F.E. (2005). "Physical Principles of Electron Microscope". University of Alberta, Canada, Springer Science + Business Media, Inc. U.S.A., Ch.3, 57 p.
- Tsuno, K.; Smith, K.C.A. (1986). Optimization of objective lens shape for high resolution electron microscopes. *Proc. XIth Int. Cong.*, on Electron Microscopy, Kyoto. 295-296
- Tsuno, K.; Harada, Y. (1983). Design procedure for a high resolution electron microscope objective lens. *J. Electron Microsc.*, **32**(4), 289-298.
- Wenxiong, C. (1988). The effect of polepiece saturation on the electron optical properties of asymmetrical condenser-objective lenses. *Scanning Microscope*, **2**(3), 1283-1292.
- Yanak, T. (1986). Strongly-excited CTEM/STEM objective lens. *Proc. XIth Int. Cong.*, on Electron Microscopy, Kyoto. 243, Ed -245.