دراسة زيغ التشويه في العدسات المغناطيسية المزدوجة

طالب محسن عباس
كلية التربية للعلوم الصرفة – جامعة بابل
Talb_76@yahoo.com

سارة معين شهاب
كلية التربية للعلوم الصرفة – جامعة بابل

الخلاصة

إجريت دراسة نظرية حاسوبية في هذا البحث لزيغ التشويه في العدسات المغناطيسية عندما تستخدم كعدسات مسقطية في المجهر الالكتروني النفاذ. في هذا الدراسة استخدامت طريقة الاجراء التوليفي باستخدام الماتلاب وذلك عن طريق دالة رياضية تحليلية لتمثيل المجال المغناطيسي المحوري لعدسة مغناطيسية مسقطية مزدوجة للحصول على اقطاب مغناطيسية تعطي صوراً خالية من التشويه والدوران.

الكلمات المفتاحية: البصريات الالكترونية ،العدسة الالكترونية ،العدسة المغناطيسية المزدوجة.

Abstract

In this work, a computational theoretical investigation has been introduced to study the distortion aberration in magnetic lenses when it use as projector lens in transmission electron microscope. In this study the synthesis procedure method has been used by using the analytical mathematical function to represent axial magnetic field for doublet projector magnetic lens to obtaining the magnetic polepeices with rotation and distortion free.

Key ward: electron optics, electron lens, doublet magnetic lens

1.المقدمة

تعد العدسة المغناطيسية المسقطية من أهم عدسات المجهر الالكتروني النفاذ بعد العدسة الشيئية اذ تقوم بتكبير الصورة التي تكونها العدسة الشيئية وتسقطها على شاشة المجهر الالكتروني. لكن هذه العدسة تعاني من عيوب تحدث تشويها في الصورة المتكونة فيها لكنها لا تؤثر على قدرة تحليل المجهر[Williams, 2004] . إن من أهم العيوب التي تظهر على الصورة عند تشغيل هذه العدسة فضلا عن دورانها حول المحور البصري هما التشويه الشعاعي (radial distortion) والتشويه الحلزوني (spiral distortion) . ويعد التشويه الحلزوني من العيوب الخاصة بالعدسات المغناطيسية بسبب دوران الصورة بشكل غير متساو على امتداد نصف قطر الفتحة المحورية للعدسة ويزداد بشكل طردي مع تهيج العدسة، وبما ان العدسة المسقطية تعمل عند القيمة الصغرى لبعدها البؤري للحصول على أعظم تكبير للصورة فان التشويه الحلزوني سيكون عالياً عند هذه التهيجات، ولأجل تحسين جودة الصورة النهائية يجب العمل على إلغاء أو تقليص هذا التشويه ، ومن بين الطرائق التي استخدمت في تقليص التشويه الحلزوني هو استخدام العدسة المسقطية المزدوجة (double lens) ولكي تكون الصورة التي تكونها العدسة المزدوجة خالية من الدوران يجب ان يكون التهيج في العدستين متساويا ومتعاكسا أي $(NI)_1=-(NI)_2$ [Juma,1975] . ولتحقيق هذا الشرط فان عدد لفات الملف في العدسة الأولى يساوي ذلك في العدسة الثانية (أي $N_1=N_2$)، وان التيار المستمر I_1 المار خلال لفات الملف في العدسة الأولى يساوي التيار I_2 المار في العدسة الثانية ولكن باتجاه معاكس (أي $I_1= -I_2$).

كانت اولى المحاولات للتخلص من دوران الصورة هي تجربة Stabenow في عام 1935 اذ قام بتهيج ملفين خاليين من الحديد وغير متساويين في عدد اللفات ولكن صافي عدد الامبير .لفه في كلا العدستين متساوٍ ومتعاكس، وهذه الحالة لم تنجح بسبب تداخل المجالين المغناطيسيين عند التهيجات العالية. في عام 1940 قام Backer and Wallraff بدراسة الزيوغ في العدسات الخالية من الحديد (iron-free lenses) وذات صور عديمة الدوران لكنهما واجها مشاكل في عملية ترصيف العدسات على امتداد المحور البصري

في عام 1946 تمكن Hillier ولأول مرة من الحصول على صوره عديمة الدوران والتشويه في آن واحد وذلك باستخدام العدسة المزدوجة ، حيث وضعت العدسة الثانية في بؤرة العدسة الأولى وتم تشغيل العدستين بصورة متعاكسة، فتمكن الباحث من الحصول على صورة عديمة الدوران والتشويه الشعاعي، ولكن التشويه الحلزوني بقى ملازماً لعمل هذه العدسة. بعد ذلك صممت منظومة اسقاط (projector system) تتكون من عدستين مسقطيتين، حيث تعمل العدسة الثانية على تكوين تشويهاً وسادياً (punchsion) تصحح التشويه البرميلي (barriel) الذي تسببه العدسة الاولى [Kgnaston and Mulvey, 1963] ، وباستخدام منظومة مشابهه ولكن عدساتها احادية القطب تمكن عدد من الباحثين من تصحيح التشويه الشعاعي والحصول على تشويه حلزوني قيمته 3% [Lamberkis et.al, 1977].وباتباع اسلوب مشابه للسابقين تمكن كل من [Marai, 1977] و[Al-Shwaikh, 1979] من بناء منظومة تعطي صوراً عديمة الدوران والتشويه الشعاعي وبتشويه حلزوني قليل جداً باستخدام ما يعرف بالعدسة المصححة (corrector lens). وفي عام (1981) تمكن الباحثان Al-Hilly و Mulvey سويةً من تصحيح التشويهين الشعاعي والحلزوني في آن واحد ولكنهما لم يتمكنا من التخلص من دوران الصورة.

في الحقيقة يمكن اعتبار العام 1981 بأنه التاريخ الذي قدمت فيه أول محاولة جدية للتخلص من التشويه الشعاعي والحلزوني في صورة عديمة الدوران، حيث صمم الباحثان [Tsuno and Harada, 1981 a:b] عدسة مزدوجة ثلاثية القطب ذات فتحات محورية غير متساوية تعطي في منطقة الدوران الاولى صوراً عديمة الدوران والتشويه الشعاعي وبتشويه حلزوني نسبته 0.07 %. تبع ذلك [العبيدي،1991] الذي تمكن من الحصول على صور عديمة الدوران والتشويه الشعاعي والحلزوني في منطقة الدوران الأولى فقط باستخدام عدسة مغناطيسية مزدوجة تتكون من عدستين مغناطيسيتين ثنائية القطب الاسطواني. بعد ذلك قدمت دراسات عديدة مستخدمة أسلوب مشابه لما جاء في الدراسة الأخيرة ولكن العدستين إحداهما ثنائية القطب والأخرى أحادية القطب كالاسطواني [السعدي، 1996] ، الكروي [زين العابدين، 1997] ، المخروطي بوجه مستو، [الشمري، 2002] وبأقطاب متنوعة [السعدي وآخرون، 2009] ، بحيث تمكنوا من الحصول على عدسات مسقطية مزدوجة خالية من الدوران والتشويه في منطقتي الدوران الأولى والثانية.

من الملاحظ أن جميع هذه الدراسات كانت تتبع أسلوب التحليل في الامثلية ولم يستخدم أي منها أسلوب التوليف. في الواقع ظهرت في الآونة الأخيرة دراسات حديثة تناولت موضوع تصميم عدسات مسقطية مزدوجة عديمة التشويه والدوران باستخدام طريقة التوليف وذلك باقتراح بعض الدوال الرياضية المحورية التي تمثل المجال المغناطيسي[العمشاني,2006]،[الواسطي,2013] والجهد المغناطيسي العددي[Al-duodi,2010].

2.الأنموذج الرياضي

تم في هذا البحث استخدام دالة رياضية تحليلية كدالة هدف لتمثيل المجال المغناطيسي المحوري لعدسة مغناطيسية والشكل الرياضي لها هو :

$$B(z)=\frac{1.318(\frac{\mu_o NI}{D})}{\cosh(2.636\frac{z}{D})^2}.....(1)$$

يلاحظ من العلاقة أعلاه إن هذا الانموذج يمثل توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المحوري لعدسة منفردة ثنائية القطب متناظرة ، وهو دالة لقطر الفتحة المحورية (D) وتهيج العدسة (NI) اللذان يمثلان متغيرات أمثلية يمكن منهما تغير شكل المجال و(z) تمثل طول المحور البصري للعدسة. استخدامت هذه الدالة للحصول على مجال مغناطيسي محوري لعدسة مزدوجة بحيث قسّم المحور البصري الى منطقتين، المنطقة الأولى تمثل القيم السالبة للمحور البصري (مجال العدسة المنفردة الأولى) والمنطقة الثانية تمثل القيم الموجبة (مجال العدسة المنفردة الثانية) بحيث تعمل كل منطقة بمعزل عن الأخرى. بعبارة أخرى مثلت دالة الهدف لقيم z السالبة عند قيم D_1 وNI_1 في حين استخدم قيم D_2 وNI_2 لقيم z الموجبة. في الحقيقة هذا الوضع يتيح إمكانية تغير خواص العدسة المزدوجة او أدائها التشغيلي عن طريق تغير المتغيرات الهندسية او الفيزيائية لإحدى عدساتها المنفردة فقط.

بعد تحديد قيم متغيرات الامثلية المبينة بالمعادلة (1) للمجال المغناطيسي المزدوج حسب توزيع الجهد المغناطيسي العددي المحوري(V_z) للعدسة وذلك باستخدام للعلاقة الآتية[الجبوري،1999] :

$$V(z)=-\frac{1}{\mu_o}\int_{z_s}^{z_f}B(z)dz.....(2)$$

اذ تمثل z_s وz_f النقاط المحورية لبداية ونهاية المجال المغناطيسي على التوالي. وبعد حساب المشتقة الاولى والثانية للجهد المغناطيسي العددي(V'_z) (V_z'') تحليلياً أعيد بناء الاقطاب المغناطيسية للعدسة المزدوجة وذلك باستخدام العلاقة الاتية :[Szilagyi, 1984]

$$R_p(z)=2\left[\frac{V(z)-V_p}{V''(z)}\right]^{\frac{1}{2}}.....(3)$$

حيث ان $R_p(z)$ هو الارتفاع القطري لقطب العدسة على امتداد المحور و V_p هو الجهد المغناطيسي العددي عند القطب والذي يساوي (NI/2) اذا كانت العدسة متناظرة .

ان المعادلة التي تصف حركة الالكترون في مجال مغناطيسي تدعى معادلة الاشعة المحورية (paraxial rays equation) والتي تعطى بالعلاقة : [Szilagyi,1988]

$$r''+(\frac{e}{8mV_r})B_z^2 r=0.....(4)$$

حيث يمثل r مسار الالكترون داخل المجال المغناطيسي وV_r فولتية التعجيل المصححة نسبياً. وبحل معادلة الشعاع المحوري عددياً باستخدام طريقة (Runge-Kutta) للرتبة الرابعة حسب مسار الالكترون داخل العدسة المغناطيسية عند الشروط الابتدائية (r =1 ، r'=0).

واخيراً تم حسب معاملات التشويه الشعاعي (D_r) والحلزوني (D_s) عددياً وذلك باستخدام تقنية (Simpson's rule) : [El-Kareh and El-Kareh, 1970]

$$D_r = \left(\frac{\eta}{128V_r}\right)\int_{z_s}^{z_f}\left(\frac{3\eta}{V_r}B_z{}^2(z)+8B^2(z)\right)r_\alpha r_\gamma^3 - \text{.....(5)}$$
$$4B_z{}^2(z)(r_\gamma'^2 r_\alpha r_\gamma + r_\gamma' r_\alpha^2 r_\alpha')\,dz$$

$$D_s = \int_{z_s}^{z_f}\left[\frac{3}{128}\left(\frac{\eta}{V_r}\right)^{3/2} r_\alpha^2 B_z^3 + \frac{1}{16}\left(\frac{\eta}{V_r}\right)^{1/2} r_\alpha'^2 B_z\right]dz\text{.....(6)}$$

اذ ان r_α , r_γ حلول معادلة الأشعة المحورية.

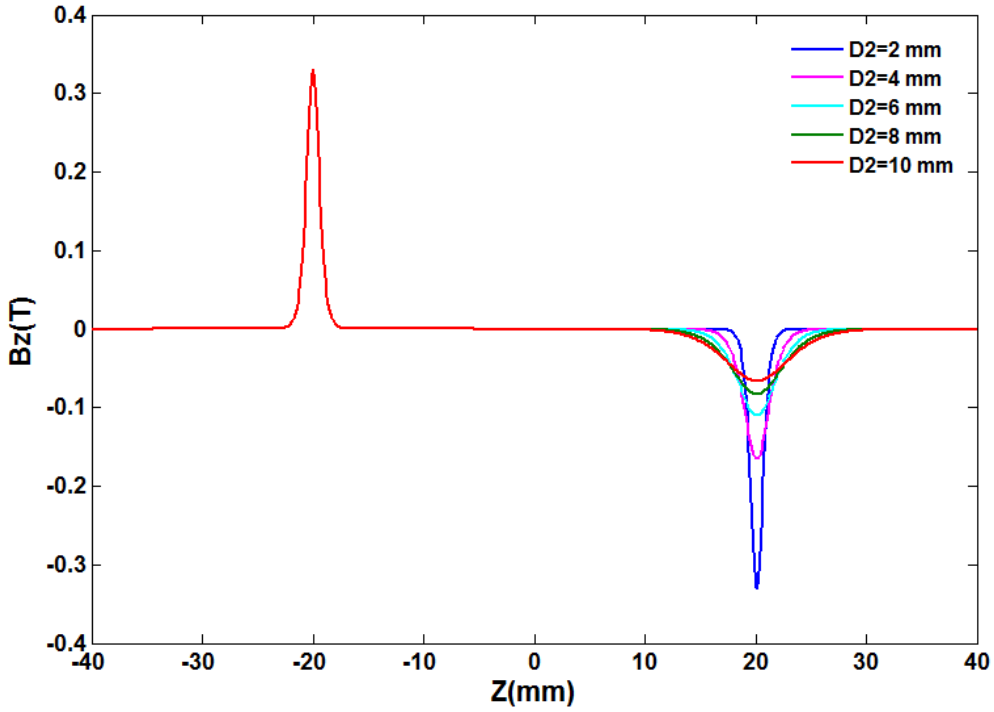
3.النتائج والمناقشة

تم تثبت المعلمات الهندسية والفيزيائية للعدسة المنفردة الاولى عند القيم D_1=2mm ، NI_1=400A.t (العدسة في الجزء السالب من المحور البصري) , اما العدسة المنفردة الثانية (العدسة في الجزء الموجب من المحور البصري) أختير قيم لقطر الفتحة المحورية (D_2=2,4,6,8,10mm) بثبوت قيمة NI_2=-400A.t حيث ان الإشارة السالبة تعني ان تهيج العدسة الثانية معاكس لتهيج العدسة الأولى للحصول على صورة خالية من الدوران . يبين الشكل (1) توزيعات كثافة الفيض المغناطيسي المحوري B_z للعدسة المزدوجة العديمة الدوران ويلاحظ من الشكل تغير مجال العدسة الثانية تبعا لتغير قطر الفتحة المحورية، فضلا عن ذلك يبين الشكل بأن المسافة الفاصلة بين مركزي العدستان المنفردتين (الاولى والثانية) ثابت عند 40mm وهي قيمة البعد البؤري للعدسة المنفردة الاولى والثانية وكذلك المزدوجة عندما تكون العدستان متماثلتين.

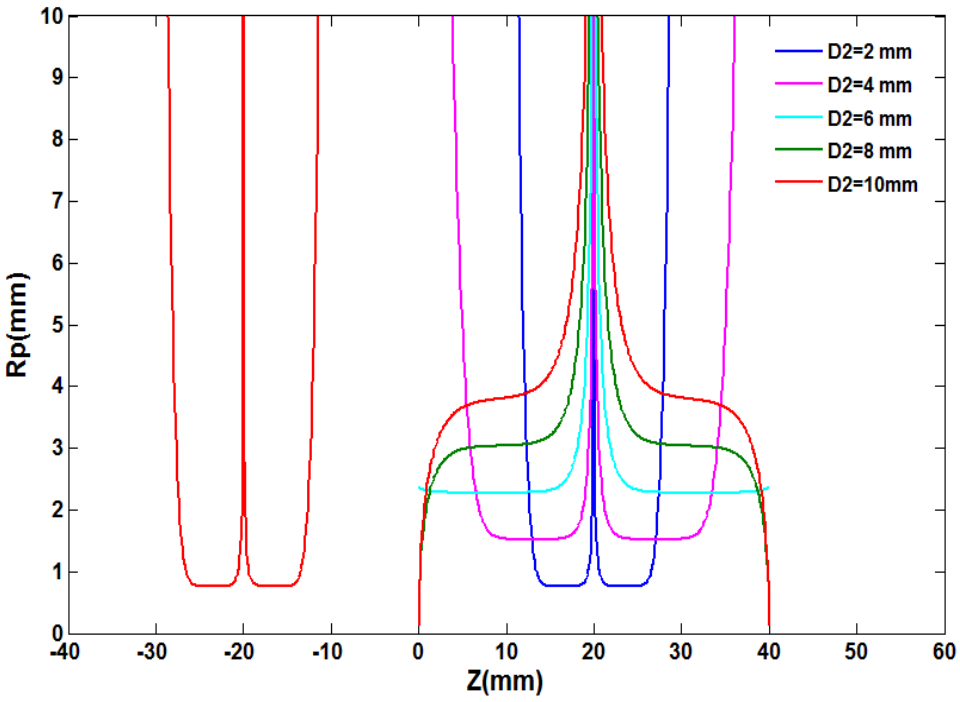
استخدامت المجالات المغناطسية المبينة بالشكل (1) للإعادة بناء الاقطاب المغناطيسية المزدوجة حيث يبين الشكل (2) النصف العلوي للأقطاب المغناطيسية القادرة على توليد المجالات المغناطيسية للعدسة المزدوجة ، ويلاحظ من الشكل ان اقطاب العدسة الاولى ثابتة لا تتغير بسبب ثبوت مجالها المغناطيسي اما العدسة الثانية فتمتلك اشكال تختلف تبعا لاختلاف مجالها المغناطيسي بسبب اختلاف قيم قطر الفتحة المحورية D_2 . ان اهم مايميز العدسة المزدوجة (doublet lens) عن نظيرتها العدسة المنفردة (single lens) هو امتلاك منحنيات الخواص البؤرية المسقطية (F_p،D_r،D_s) دورانين (two loop) عند نفس فترة اعلومة التهيج $NI/V_r^{½}$ يسمى الدوران الاول عادة بمنطقة التكبير الاولى (first magnification region) ويسمى الدوران الثاني بمنطقة التكبير الثانية (second magnification region) في هذا البحث تم التعامل مع كل دوران بشكل منفرد على اعتبار ان كل منهما يمثل نمطا تشغيليا (operation mode) مستقلا.

تتميز العدسات المسقطية بأنها تعمل عند اقل قيمة لبعدها البؤري المسقطي للحصول على اعظم تكبير حيث يعّرف البعد البؤري المسقطي بأنه مقلوب انحدار مسار الحزمة الالكترونية بعد اختراقها مجال العدسة. يبين الشكل (3) منحنيات البعد البؤري المسقطي Fp كدالة لاعلومة التهيج $NI/V_r^{½}$ عند منطقة الدوران الأول $0.01 \le NI/SQRT(V_r) \le 4.5$ ولكل قيمة من قيم D_2 المنتخبة ، ويلاحظ من الشكل ان لكل منحنى قيمة صغرى في منطقة الدوران الاولى $(Fp)_{min1}$ وتقل بزيادة قيم D_2 لاحظ الجدول (1)، وإن سبب ذلك يعود الى

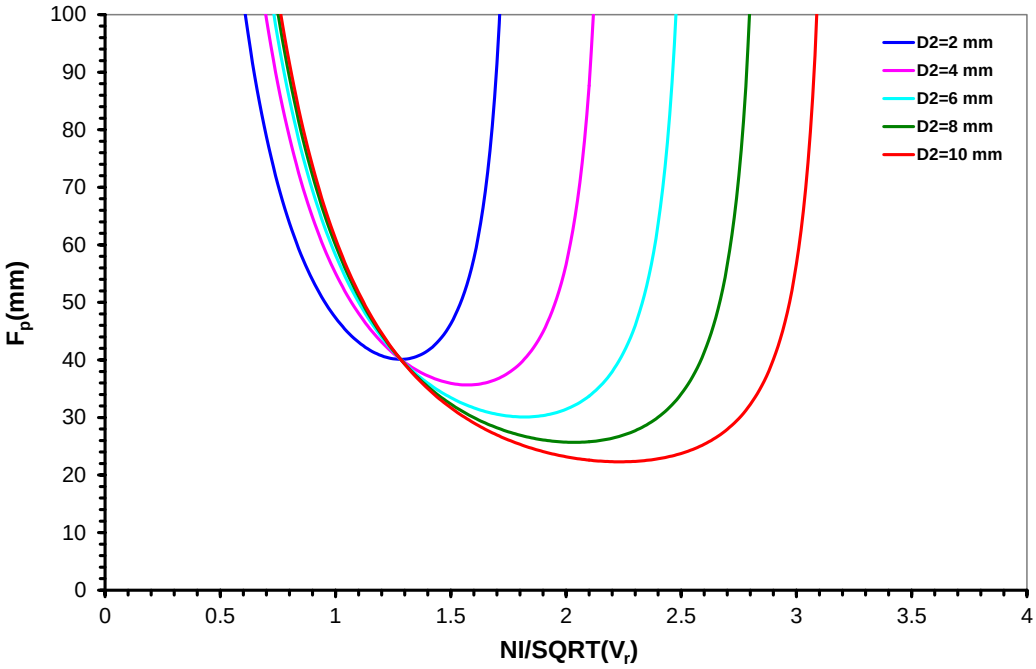
النقصان في قيمة فولتية التعجيل V_r لان NI ثابتة عند القيمة 400 A.t كشرط تشغيلي.ويلاحظ من الجدول(1) أن القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي في منطقة الدوران الاولى $(Fp)_{min1}$ عند قيمة D_2=2 mm تكون مساوية للمسافة الفاصلة بين قمتي مجالي العدسة المزدوجة أي عندما تكون العدستان المكونتان للعدسة المزدوجة متطابقتين في الشكل الهندسي.



شكل رقم(1): توزيعات كثافة الفيض المغناطيسي المحوري للعدسة المزدوجة عديمة الدوران ولقيم مختلفة لقطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الثانية(D2) بثبوت قطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الاولى (D1=2 mm) .



شكل رقم(2): مقطع عرضي للنصف العلوي للأقطاب المغناطيسية للعدسة المزدوجة عديمة الدوران ولقيم مختلفة لقطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الثانية(D_2) بثبوت قطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الاولى D_1=2mm .



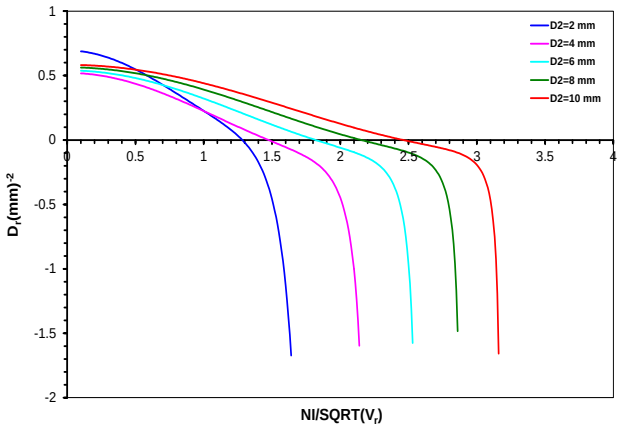
شكل رقم(3): منحنيات البعد البؤري المسقطي F_p كدالة لاعلومة التهيج $NI/SQRT(V_r)$ في منطقة الدوران الاولى ولقيم مختلفة لقطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الثانية(D_2) بثبوت قطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الاولى D_1=2mm .

رسمت منحنيات معامل التشويه الشعاعي D_r كدالة لاعلومة التهيج $NI/V_r^{½}$ في منطقة الدوران الاول ولكل توزيع B_z وكما هو مبين في الشكل (4) . ويلاحظ من الشكل أن لكل منحنى قيمة صفرية (D_r=0) تحدث عند قيم مختلفة لاعلومة التهيج الشعاعي بزيادة قطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الثانية D_2 ويلاحظ ايضاً ان معامل التشويه الشعاعي يتلاشى عند اعلومة التهيج نفسها التي تعطي القيمة الصغرى للبعد البؤري المسقطي عندما تكون العدستان متطابقتين وكذلك عند قيمة D_2=6 mm عندما تكون العدستان غير متطابقتين لاحظ الجدول (1).

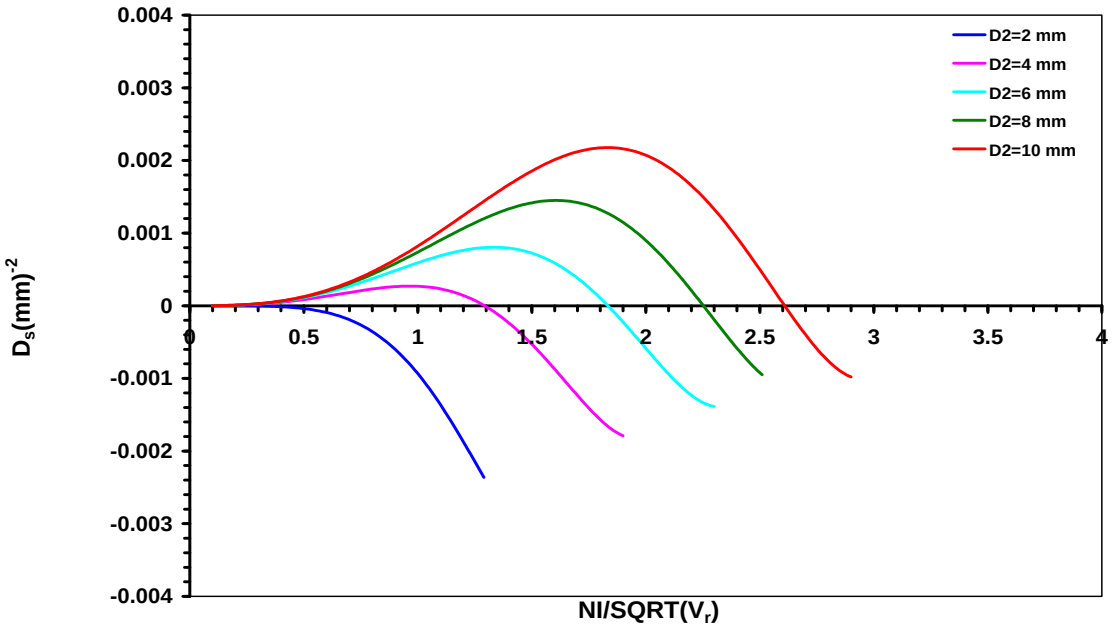
يبين الشكل (5) منحنيات معامل التشويه الحلزوني D_s في منطقة الدوران الأول كدالة لاعلومة التهيج لكل توزيع B_z ولقيم D_2 المختارة ، و يلاحظ أن لكل منحنى قيمة صفرية لمعامل التشويه الحلزوني D_s تقع عند اعلومات تهيج مختلفة، كذلك يلاحظ أيضا إن زيادة قيم D_2 تؤدي الى الحصول على معامل تشويه حلزوني صفري عند اعلومة التهيج نفسها التي نحصل منها على تشويه شعاعي صفري واقل قيمة للبعد البؤري المسقطي للعدسة المزدوجة وهي عند قيمة D_2=6 mm لاحظ الجدول (1).

مما سبق يلاحظ بانه يمكن الحصول على اقطاب مغناطيسية لعدسات مزدوجة تعطي صوراً عديمة الدوران والتشويه الشعاعي والحلزوني عند اعلومة التهيج نفسها التي تعطي اقل قيمة للبعد البؤري المسقطي(اعظم تكبير) في منطقة الدوران الاولى وحسب الانموذج الرياضي المقترح في هذه الدراسة وذلك عند القيم الاتية:

D_1=2 mm, D_2=6 mm, NI1 =-NI2 =400 A.t



شكل رقم(4): منحنيات التشويه الشعاعي D_r كدالة لاعلومة التهيج $NI/SQRT(V_r)$ في منطقة الدوران الاولى ولقيم مختلفة لقطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الثانية(D_2) بثبوت قطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الاولى D_1=2mm .



شكل رقم(5): منحنيات التشويه الحلزوني Ds كدالة لاعلومة التهيج $NI/SQRT(V_r)$ في منطقة الدوران الاولى ولقيم مختلفة لقطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الثانية (D2) بثبوت قطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الاولى D1=2mm .

الجدول (1): الخواص المسقطية للعدسة المغناطيسية المزدوجة في منطقة الدوران الأول ولقيم مختلفة لقطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الثانية (D_2) بثبوت قطر الفتحة المحورية للعدسة المنفردة الاولى D_1=2mm .

		$NI/V_r^{(1/2)}$		
D_2 (mm)	$(F_p)_{min1}$	$(F_p)_{min1}$	$D_r=0$	$D_s=0$
2	40.10	1.28	1.28	0.2
4	35.56	1.57	1.49	1.3
6	30.08	1.82	1.82	1.82
8	25.68	2.04	2.15	2.26
10	22.30	2.23	2.45	2.61

4.الاستنتاجات

إن أهم ما يمكن استنتاجه من هذه الدراسة يمكن إجماله بالنقاط آلاتية :

1. إمكانية استخدام دوال رياضية تحليلية لتمثيل المجال المغناطيسي المحوري للعدسات المغناطيسية المزدوجة العديمة الدوران والتشويه كدالة هدف في تقنية التوليف وبكفاءة عالية .
2. الحصول على اقطاب مغناطيسية مزدوجة متطابقة بالشكل الهندسي خالية من الدوران وعديمة التشويه الشعاعي عند اعلومة التهيج نفسها التي نحصل عندها على اقل قيمة للبعد البؤري المسقطي (اعظم تكبير) وبتشويه حلزوني ذات قيمة قليلة.
3. الحصول على اقطاب مغناطيسية مزدوجة غير متطابقة بالشكل الهندسي خالية من الدوران وعديمة التشويه الشعاعي والحلزوني عند اعلومة التهيج نفسها التي نحصل عندها على اقل قيمة للبعد البؤري المسقطي (اعظم تكبير)، وبالتالي الحصول على صورة مكبرة وخالية من الدوران والتشويه.

المصادر

زين العبدين ، فاتن شكور، (1997)، "عدسة مسقطية ثلاثية بأقطاب كروية وذات صور عديمة التشويه والدوران" ، رسالة ماجستير/ كلية التربية / الجامعة المستنصرية.

السعدي، عبد عون كاظم ، (1996)، " حسابات عن خواص العدسات المغناطيسية المزدوجة للمجهر الالكتروني النفاذ"، أطروحة دكتوراه/ كلية العلوم/ الجامعة المستنصرية.

السعدي عبد عون كاظم، الشمري بان علي، الشافعي طالب محسن، السعدي سعدي رحيم ،(2009)، "تصميم عدسة الكترونية عديمة التشويه والدوران"، مجلة جامعة بابل للعلوم التطبيقية، المجلد (17)، العدد (1)، 72-78 .

الشمري، بان علي ناصر،(2002)، "دراسة التشويه للعدسات المسقطية في المجهر الإلكتروني النفاذ"، رسالة ماجستير/كلية العلوم/ جامعة بابل. .

العبيدي، حسن نوري عبد الوهاب، (1991)، " تصميم العدسات الكهرومغناطيسية" ، رسالة ماجستير/ كلية العلوم/ الجامعة المستنصرية.

العمشاني، محسن صلبوخ، (2006)، " دراسة تحليلية لزيوغ العدسة المغناطيسية المسقطية" ، أطروحة دكتوراه/ كلية العلوم/ الجامعة المستنصرية.

الواسطي، هبة كامل جعفر،2013، " اعادة بناء اقطاب العدسات المغناطيسية المزدوجة عديمة الدوران والتشويه بطريقة التصميم العكسي باستخدام نماذج المجال المغناطيسي " ، رسالة ماجستير / كلية التربية للعلوم الصرفة/ جامعة بابل.

Al-duodi, E. H. (2010), *"Design of Electron Magnetic Lenses with Aid of a Modified Mathematical Field Formula*", Ph.D. Thesis, University of Al-Mustansiriyah, Baghdad, Iraq.

Al-Shwaikh, A., (1979), "*Magnetic Electron Lenses Based on the Uniformly Magnetized Ellipsoid"*, Ph.D. thesis, University of Aston in Birmingham, England.

El-Kareh, A. B. and El-Kareh, J. C. J, (1970), "*Electron Beams Lenses and Optics*", vol. 1 and 2, (Academic Press: New York and London).

Hawkes, P. W. (1982)., "Magnetic Electron Lenses"., (Springer-Verlag).

Hillier, J. (1946), "*A study of Distortion in Electron Microscope Projection Lenses*"., J. Appl. Phys. 17, 411-419.

Juma, S. M. (1975), *"Rotation Free Magnetic Electron Lenses*", Ph.D. Thesis, University of Aston, Birmingham, England, UK.

Kynaston D. and Mulvey T., (1963), "*The correction of distortion in the electron microscope*", J. Appl. Phys., 14, 199-206.

Marai, F. Z., (1977), "*Electron-optical Properties of Signal Pole Magnetic Electron Lenses*"., Ph.D. Thesis, Univ. of Aston, Birmingham, England, UK.

Szilagyi, M., (1984). "*Reconstruction of Electrodes and Polepieces from Optimized Axial Field Distributions of Electron and Ion Optical Systems*". Appl. Phys. Lett., 45, 499-501.

Szilagyi, M. (1988), "*Electron and Ion Optics*", (Plenum Press: New York).

Tsuno, K. and Harada Y. (1981a), "*Minimization of Radial and Spiral Distortion in Electron Microscopy through the Use of a Triple Polepiece Lens*" J. Phys. E:Sci. Instrum., 14,313-319

Tsuno, K. and Harada Y. (1981b),"*Elimination of Spiral Distortion Electron in Microscopy using an Asymmetrical Triple Polepiece Lens*", J. Phys. E:Sci. Instrum., 14,955-960

Williams, D. B. (2004),"*Transmission Electron Microscope*", Plenum Press.