

بررسی توانمندی آینه‌ی منجین در به کارگیری به جای سطوح غیر کروی در سامانه‌های

اپتیکی بازتابی

مهدی بهرامی، حمیدرضا فلاح

گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه اصفهان

چکیده - سامانه‌های بازتابی غیر کروی همچون سامانه‌ی کسگرین توانایی خوبی در کاهش ابیراهی‌ها برای میدان‌های دید کوچک دارند اما ایراد آنها غیر کروی بودن اجزایشان است که ساخت، آزمون اپتیکی و به خط کردن دقیق آنها را مشکل می‌سازد. در این مقاله با معرفی آینه‌ی منجین و توانمندی اپتیکی آن در کاهش ابیراهی‌ها، کارایی این عنصر اپتیکی در جایگزین شدن به جای اجزاء غیر کروی در طراحی یک نمونه سامانه‌ی کاتادیوپتریک کسگرین بررسی می‌شود.

کلید واژه - طراحی اپتیکی، آینه‌ی منجین، سامانه‌ی کاتادیوپتریک، منحنی برخورد پرتو، تابع انتقال مدوله شدگی.

کد PACS - 220.0220

Investigation of ability of Mangin mirror to replace aspheric surfaces in reflective optical systems

Mehdi Bahrami, Hamid Reza Fallah

Physics Department, Faculty of Science, University of Isfahan

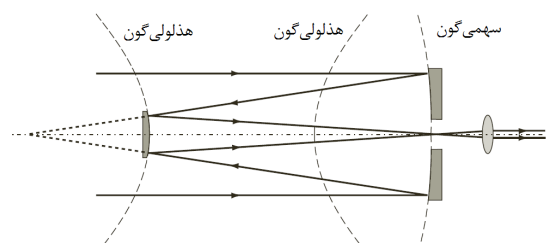
Abstract- Aspheric reflective optical systems such as Cassegrain telescope have good ability for reducing aberration in small fields. But their aspheric surfaces make them difficult for fabrication, testing and fine alignment. In this paper, Mangin mirror is presented and it's abilities in replacing aspheric surfaces are investigated by designing a typical catadioptric Cassegrain system.

Keywords: Optical design, Mangin mirror, Catadioptric system, Ray fan, MTF.

PACS No: 220.0220

۱- مقدمه

اجزاء اپتیکی بازتابی نسبت به اجزاء شکستی ابیراهی کمتری ایجاد می‌کنند. برای مثال می‌توان نشان داد ابیراهی کروی یک عدسی در حالت بهینه شعاع انحنای تقریباً هشت برابر آینهی مقعری با توان مشابه است [1 و 2]. از میان سامانه‌های بازتابی طراحی تلسکوپ کسگرین (Cassegrain Telescope) از اهمیت خاصی برخوردار است (شکل ۱). این سامانه به علت استفاده از یک آینهی سهموی مقعر و یک آینهی هذلولی محدب و درجات آزادی بیشتر در طراحی که از متغیر بودن ثابت مخروطی آینهی هذلولی ناشی می‌شود می‌تواند انحنای میدان و اکثر ابیراهی‌ها را برای میدان‌های دید کوچک کاهش دهد. اما آنچه نقطه ضعف اصلی این سامانه است مشکل بودن ساخت، آزمون اپتیکی و به خط کردن دقیق اجزاء غیر کروی است. آنچه در این مقاله در پی آن هستیم معرفی توانمندی بالای آینهی منجین (Mangin) به عنوان ساده ترین عنصر اپتیکی کاتادیوپتریک (بازتابی-شکستی) است که امکان طراحی سامانه‌های تمام کروی با کیفیت تصویری بهتر از سامانه‌های بازتابی غیر کروی را به دست می‌دهد.

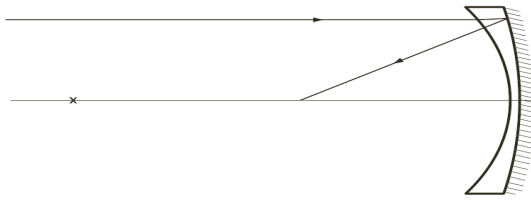


شکل ۱: تلسکوپ کسگرین [2].

۲- آینهی منجین

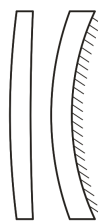
آینه منجین در سال ۱۸۷۶ توسط منجین (A. Mangin) برای استفاده در افکنشگر نور افکن اختراع شد. این عنصر اپتیکی در واقع یک آینهی مقعر است که یک عدسی هلالی به آن چسبانده شده باشد (شکل ۲). عدسی اضافه شده می‌تواند ابیراهی کما و کروی ناشی از آینهی مقعر را تصحیح کند. می‌توان نشان داد این سامانهی تمام کروی برای جسمی در بی نهایت به خوبی یک آینهی سهموی عمل می‌کند [2]. در مورد تصحیح ابیراهی کما نیز هرچه اختلاف ضریب شکست اجزاء (در اینجا آینه و عدسی

چسبیده به آن) بیشتر باشد می‌توان جملهی S_{II} که متناظر با ابیراهی کما در ضرایب سیدل (Seidel) است را کوچکتر نمود [1].



شکل ۲: آینهی منجین کلاسیک [2].

در این مقاله دو تغییر در آینهی منجین کلاسیک وارد می‌کنیم. با وجود مزیت‌های مورد اشاره، این عنصر بر عکس آینه که نافام (Achromat) است، ابیراهی رنگی ایجاد می‌کند. این ابیراهی را می‌توان به روش رایج در طراحی اپتیکی یعنی استفاده از دو شیشه با اختلاف ضریب شکست کم و تفاوت عدد آبهی بزرگ جبران کرد و به عنصری افام (Achromat) دست یافت [1]. تغییر دوم اعمال شده، استفاده از آینهی محدب به جای آینهی مقعر در آینهی منجین کلاسیک است. شکل ۳ و جدول ۱، طرح و داده‌های یک دوتایی منجین محدب را نشان می‌دهد که با هدف تشکیل تصویر مجازی افام و بدون ابیراهی کروی از جسمی واقع در بی نهایت، بهینه شده است. در این مقاله برای طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های ارائه شده، نرم‌افزار طراحی اپتیکی ZEMAX به کار گرفته شده است.



شکل ۳: دوتایی افام منجین محدب.

#	Curvature (mm)	Thickness (mm)	Glass
1	0.008558406	3	PSK3
2	0.003006667	3	
3	0.023249855	3	LF5
4	0.028386474		MIRROR

جدول ۱: داده‌های دوتایی افام منجین محدب بدون ابیراهی کروی مرتبه‌ی سوم برای جسم در بی نهایت.

۳- سامانه‌ی کاتادیوپتريک کسگرين

در این قسمت با طراحی یک سامانه‌ی کاتادیوپتريک نشان داده می‌شود می‌توان با استفاده از دوتایی‌های منجین (که تمام سطوح آنها کروی‌اند) به جای آینه‌های سامانه‌ی کسگرين، به کیفیت تصویر قابل قیاس با سامانه‌های غیر کروی دست یافت.

۳-۱- نمای کلی طراحی

یکی از روش‌های طراحی اپتیکي اضافه کردن اجزاء به ترتیب رسیدن پرتو و بهینه کردن متغیرها پس از اضافه شدن هر جزء جدید و سپس اضافه کردن جزء بعدی و تکرار این روند است. اما این روش در اینجا مناسب نیست چرا که سومین عنصر که پرتو به آن می‌رسد در واقع همان عدسی ورودی سامانه است. بنابراین بایست تمام سطوح منجین مقعری که به جای آینه‌ی سهموی کسگرين استفاده می‌شود را همزمان بهینه کرد. برای افام سازی نیز دو دیدگاه مطرح است: افام بودن کل سامانه بدون افام بودن هر قسمت از آن و یا افام بودن مجزای هر قسمت از سامانه. دیدگاه اول در کاربردهای دیدگانی کم هزینه رایج است اما موجب تولید ابیراهی رنگی منطقه‌ای خواهد شد [3]. بنابراین از دیدگاه دوم پیروی می‌کنیم. در این مقاله برای افام سازی دوتایی منجین مقعر از دو شیشه‌ی رایج BK7 و SF2 که هم از نظر اختلاف کافی عدد آبه و هم از نظر قیمت مناسب‌اند استفاده شده است [4]. همانگونه که در مقدمه اشاره شد شیشه‌ی با ضریب شکست بالاتر برای عدسی چسبیده به آینه مناسب‌تر است بنابراین شیشه‌ی SF2 برای این عنصر انتخاب شده و شیشه‌ی BK7 در عدسی جدا از آینه استفاده می‌شود.

در نهایت بایست اشاره کرد اساس داده‌های اولیه برای سامانه، همخوانی با سامانه‌ی کسگريني با شعاع انحنای ۱۲۰- میلیمتر برای آینه‌ها و فاصله‌ی ۳۰ میلیمتر بین آنهاست که فاصله‌ی کانونی موثر ۱۲۰ میلیمتر را به دست می‌دهد.

۳-۲- روند طراحی

۱. فرض می‌شود جسم در بی نهایت قرار دارد، دهانه‌ی ورودی سامانه ۵۰ میلیمتر تعیین شده که روی آینه‌ی مقعر قرار دارد و برای محاسبات افام سازی از طول

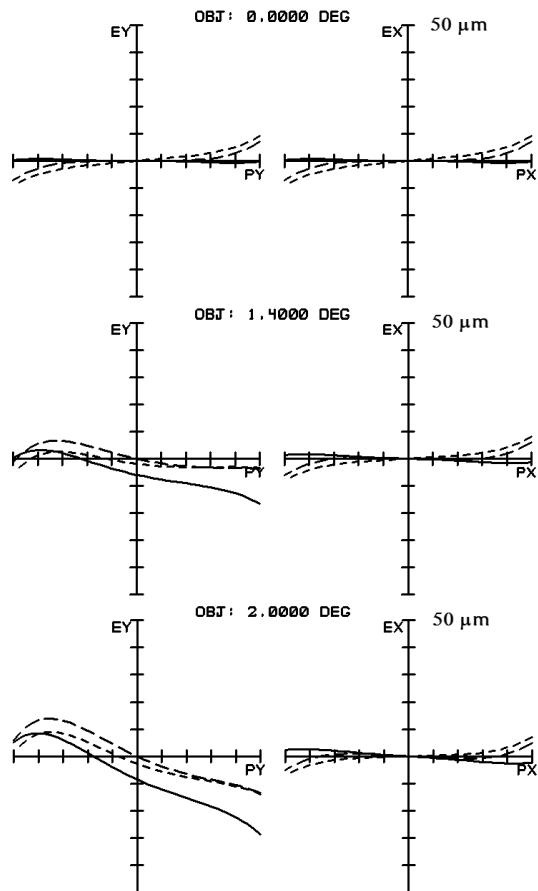
موج‌های F ، d و C که طول موج‌های استاندارد برای ناحیه مرئی هستند استفاده می‌شود. در ابتدا مبنای محاسبات روی افام بودن و فاصله‌ی کانونی موثر ۷۰ میلیمتر برای آینه‌ی منجین مقعر قرار می‌گیرد.

۲. در فرآیند کاستن ابیراهی‌ها تنها ابیراهی رنگی محوری و ابیراهی کروی برای این قسمت سامانه بررسی می‌شود و ابیراهی‌های غیر محوری پس از افزوده شدن قسمت دوم سامانه برای تمام آن بهینه می‌شود چرا که تقارن در کاهش آنها اهمیت اساسی دارد و بهینه بودن قسمت‌های مجزای سامانه برای این ابیراهی‌ها در نهایت مفید نخواهد بود. در بهینه سازی این قسمت تنها به کاستن ابیراهی کروی مرتبه سوم بسنده نمی‌شود و تمام مرتبه‌های ابیراهی کروی به کمینه‌ی ممکن کاهش داده می‌شود. این کار با کمینه کردن اندازه‌ی لکه تصویر برای میدان دید صفر درجه صورت می‌گیرد. در این قسمت تمام شعاع‌ها و ضخامت‌ها به جز فاصله‌ی BK7 که بین دو عدسی SF2 قرار دارد متغیر خواهند بود. علت تمایز این فاصله نقش نهایی آن در کاهش ابیراهی کماست. محاسبات برای کاستن ابیراهی کروی و رنگی تمایل به صفر کردن این فاصله دارند اما در نهایت این کاهش مشکل ساز می‌گردد بنابراین جز برای بهینه سازی نهایی متغیر نخواهد بود. برای آنکه تضمین شود در فرآیند بهینه سازی ضخامت منطقی برای شیشه‌ها و لبه‌ی آنها به دست می‌آید قیود این مساله با وزن (Weight) ۲ وارد محاسبات می‌گردد. علت استفاده از وزن بیشتر از این حقیقت ناشی می‌شود که اختلاف ۱ میلیمتری فاصله کانونی از ۷۰ میلیمتر در این قسمت قابل قبول است اما منفی شدن ضخامت مرکز یا لبه‌ی عدسی حتی به میزان ۰/۱ میلیمتر به معنای غیر قابل استفاده بودن عدسی است.

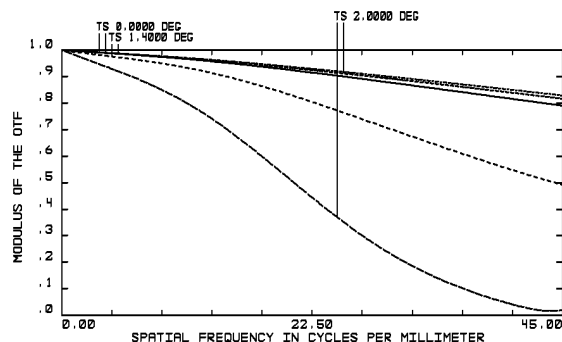
۳. در این قسمت دوتایی منجین محدب را در ۳۰ میلیمتری قسمت اول وارد می‌کنیم و با برداشتن امکان تغییر برای قسمت اول سامانه، تنها داده‌های قسمت دوم را مطابق با روند قسمت اول و با تغییر فاصله کانونی مورد نظر به ۱۲۰ میلیمتر و انتخاب فاصله کانونی پشتی ۶۰ میلیمتر بهینه می‌کنیم.

۴. با اضافه کردن میدان‌های ۱/۴ و ۲ درجه ابیراهی‌های غیر محوری وارد محاسبات خواهند شد. علت انتخاب

در پایان این قسمت باید اشاره کرد ایراد اصلی سامانه‌های بازتابی وجود مانع مرکزی است که به علت سد نور توسط پشت آینه‌ی ثانوی (یا آشکارساز) اجتناب ناپذیر است. اضافه کردن این مانع به سامانه موجب پراش نور و در نتیجه افت نمودار MTF می‌گردد. این افت در شکل ۸ برای MTF میدان ۲ درجه‌ی مماسی نمایش داده شده است.



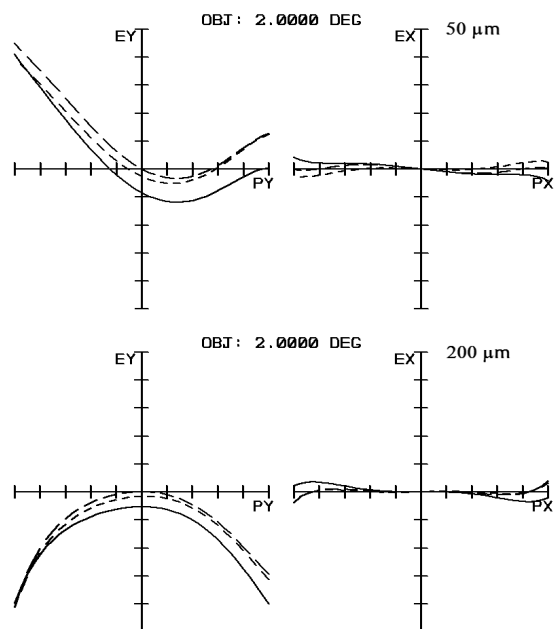
شکل ۵: نمودارهای نهایی منحنی برخورد.



شکل ۶: نمودار MTF.

میدان $1/4$ ، نسبت برابر مساحتی است که توسط میدان $1/4$ تا $1/4$ درجه روی جسم پوشش می‌دهند و موجب یکنواختی بهینه سازی برای تمام میدان دید می‌گردد [5]. برای بهبود ابیراهی‌های غیر محوری با متغیر کردن تمام ضخامت‌ها و شعاع‌های کل سامانه از کمینه کردن لکه‌ی تصویر برای کل میدان دید استفاده می‌شود. این کار تمام مراتب ابیراهی‌های غیر محوری را کاهش می‌دهد و کاستی کاهش ابیراهی‌های مرتبه‌ی سوم بدون بررسی مراتب بالاتر را ندارد.

۵. آستیگماتیسم ابیراهی اصلی آزار دهنده‌ی چنین سامانه‌هایی است. می‌توان برای کاهش آستیگماتیسمی که تا این قسمت از طراحی باقی مانده محاسباتی بر اساس کمینه کردن جمله‌ی S_{III} در ابیراهی‌های سیدل انجام داد اما این کاهش کمای سامانه را به طرز غیر قابل قبولی افزایش می‌دهد (شکل ۴). در عوض اعمال کاهش انحنای میدان پیکانی با وزن ۱، موجب بهبود نمودارهای منحنی پرتو و MTF می‌گردد. نمودارهای نهایی منحنی‌های پرتو، MTF و طرح نهایی سامانه در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ و اطلاعات عددی آن در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۴: (بالا) اختلاف شیب زیاد منحنی پرتوهای مماسی و پیکانی که نشانگر آستیگماتیسم زیاد سامانه است. (پایین) کاهش آستیگماتیسم و افزایش غیرقابل قبول کمای سامانه. (مقیاس در پایین چهار برابر شده است).

۴- نتیجه‌گیری

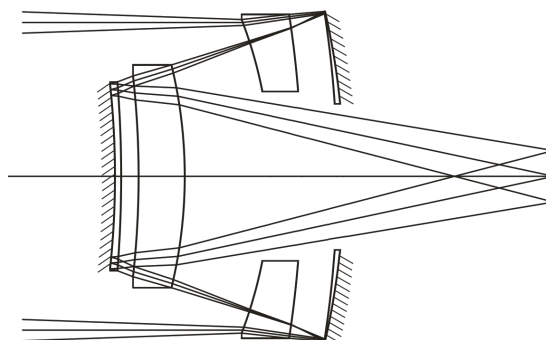
همانگونه که از نمودارهای شکل‌های ۵ و ۸ مشخص است آینه‌ی منجین توانمندی خوبی در طراحی سامانه‌های با کیفیت تصویر مناسب دارد. از مقایسه‌ی داده‌های فوق با نمودارهای نمونه‌ی تمام بازتابی سامانه‌ی کسگرین واضح است که جایگزینی آینه‌ی تمام کروی منجین به جای اجزاء غیر کروی این سامانه موجب افزایش کیفیت تصویر آن می‌شود [6]. بنابراین می‌توان با استفاده از آینه‌ی منجین علاوه بر دوری از مشکلات ساخت، آزمون اپتیکی و به خط کردن دقیق آینه‌های غیر کروی، کیفیت تصویر سامانه را نیز بهبود بخشید.

سپاسگزاری

مؤلفین از تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان و گروه پژوهشی اپتیک کوانتومی برای حمایت از این مقاله قدردانی می‌نمایند.

مراجع

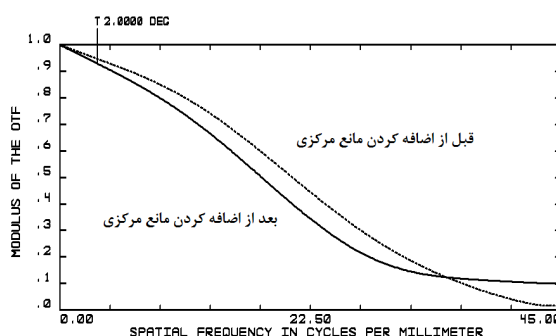
- [1] Kingslake, Rudolf, *Lens design fundamentals*, Academic press, 1978.
- [2] Wilson, R. N., *Reflecting Telescope Optics I, Second Edition*, Springer, 2004.
- [3] Smith, Warren J., *Modern lens design*, McGraw- Hill, 1990.
- [4] Smith, Warren J., *Modern Optical Engineering, Second Edition*, McGraw- Hill, 1992.
- [5] Geary, Joseph M., *Introduction to lens design with practical ZEMAX examples*, Willmann-Bell, 2002.
- [6] Wilson, R. N., *Reflecting Telescope Optics I, Second Edition*, p.99, Springer, 2004.



شکل ۷: طرح نهایی سامانه.

#	Curvature (mm)	Thickness (mm)	Glass
0	0	infinity	
1	-0.014103614	5.0000512	BK7
2	-0.005816533	5.7876297	
3	-0.005782993	1.0590984	SF2
4	-0.008333186		MIRROR
5	-0.008333186	-1.0590984	SF2
6	-0.005782993	-5.7876297	
7	-0.005816533	-5.0000512	BK7
8	-0.014103614	-13.981168	
9	-0.013010559	-7.5000003	BK7
10	-0.006801515	-2.8339835	
11	-0.005213221	-1.0043749	SF2
12	-0.007099115		MIRROR
13	-0.007099115	1.0043749	SF2
14	-0.005213221	2.8339835	
15	-0.006801515	7.5000003	BK7
16	-0.013010559	60.000109	
17	0		

جدول ۲: اطلاعات عددی سامانه.



شکل ۸: افت نمودار MTF بعد از اضافه کردن مانع مرکزی به سامانه.