



اندازه‌گیری خطای شیب سطحی زیر لایه آینه خورشیدی شلجمی با روبش اپتیکی و بررسی کیفی تاثیر آن بر کیفیت تمرکز نور

هادی برزویی^{۱*}، محمد ابراهیم فولادوند^۲ و سبحان شریفی^۲

۱. گروه علوم مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

۲. گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان

پست الکترونیکی: h.borzouei@hsu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱)

چکیده

گرداور (کلکتور) خورشیدی یک ابزار اپتیکی برای تبدیل انرژی تابشی خورشید به انرژی گرمایی است. مشخصه‌یابی گرداور بخش مهمی از فرایند پیش‌ساخت است. برینه‌ای (قطاعی) از یک زیرلایه شلجمی گون از جنس فایبر گلاس تقویت شده به مساحت $0/8$ متر مربع با روش قالب‌گیری ساخته شد. نمایه سه‌بعدی سطح زیرلایه به روش روبش (اسکن) اپتیکی اندازه‌گیری شد. در روبش اپتیکی ابری از نقاط سطح قطعه همراه با مختصات سه بعدی نقاط آن داده می‌شود. با داشتن این مختصات رویه‌ای شلجمی به فاصله کانونی 3000 میلی‌متر به ابر نقاط برازش داده شد. زیرلایه ساخته شده از فایبرگلاس با قطعه طراحی شده، $1/2$ میلی‌متر (خطای ریشه میانگین مربعی) عمقی (عمودی) اختلاف داشت. با اندازه‌گیری انحراف بردار عمود بر سطح رویه نسبت به سطح نامی (طراحی شده) شیب انحراف سطحی رویه ساخته شده اندازه‌گیری شد. خطای شیب سطح بر حسب انحراف زاویه‌ای نسبت به سطح نامی مقدار $15/7 \pm$ میلی‌رادیان به دست آمد. با کمک داده‌های سه‌بعدی روبشی، رخواه شدت نور در کانون با روش مونت کارلو در محیط نرم افزار زیماکس شبیه‌سازی شد. در ادامه بر روی زیر لایه فایبرگلاس، یک رویه بازتابنده آینه‌ای چسبانیده شد تا نور خورشید را متمرکز کند. سپس توزیع دمایی در کانون آینه با دوربین گرمانگار اندازه‌گیری شد. بیشینه دمای 140 درجه سانتی‌گراد در رخواه دمایی اندازه‌گیری شده با گرمانگار ثبت شد.

واژه‌های کلیدی: انرژی گرما خورشیدی، متمرکز کننده شلجمی، آینه خورشیدی، خطای سطح، روبش اپتیکی، شبیه‌سازی اپتیکی،

دوربین گرمانگار

۱. مقدمه

این انرژی گرمایی نیاز به گرداورنده‌هایی داریم تا نور خورشید را در یک ناحیه کوچک متمرکز کنند. با تعبیه کردن یک دریافت کننده در محل تمرکز نور خورشید می‌توان گرمای پرشدت کانونی شده را توسط شاره جاذب گرما جذب کرده و

همانگونه که می‌دانیم طیف نور خورشید شامل گستره بزرگی از طیف امواج الکترومغناطیسی است و بخش زیادی از آن در گستره طول موج مرئی و گرمایی قرار دارد. برای به‌کارگیری

آینه‌های تلسکوپ از نسبت ضخامت به مساحت بسیار پایینی برخوردار هستند و هرگونه عیب و ناراستی در زیره و بستره نگهدارنده آینه، سبب ایجاد اعوجاج و انحراف در بازتاب نور توسط آینه خواهد شد. از این رو اندازه‌گیری خطای سطح زیره بازتابنده خورشیدی در مرحله ساخت، معیاری از کیفیت ساخت آینه ایجاد می‌کند. در این نوع از گرداورها، ماده یا پوشش بازتابگر روی یک زیر لایه نگهدارنده سخت که همان هندسه بازتابگر آینه‌ای را دارد چسبانیده می‌شود. این زیر لایه نگهدارنده باید خطای سطحی کمی داشته باشد در غیر این صورت، بازتابگری که روی آن چسبانیده شده خطای سطح زیر لایه را به خود می‌گیرد. خطای ناشی از کیفیت ساخت زیر لایه در نهایت بر فرایند تمرکز نور اثر منفی می‌گذارد [۷].

در این مقاله به بررسی اندازه‌گیری خطای سطح سازه، در زیر لایه بازتابگر سهموی خورشیدی می‌پردازیم. از روش روبش اپتیکی به صورت غیر تماسی استفاده شده و ابر نقاط سطح رویه اندازه‌گیری شده است. قبل از آن که فرایند ساخت سطح آینه‌ای را پیش بگیریم از ابر نقاط اندازه‌گیری شده توسط روش اپتیکی و روش‌های محاسباتی صریح و روش محاسباتی مونت کارلو استفاده شده و لکه شدت خورشید در کانون آینه را محاسبه و بازسازی کرده ایم. بدین ترتیب، اثر خطای سازه زیر لایه در رخواره نهایی محاسبه و همچنین توسط شبیه‌سازی بازسازی شده است. بعد از آن که سازه زیر لایه از جنس فایبرگلاس ساخته شد، لایه‌ای آینه‌ای بر روی آن چسبانده می‌شود. سپس، نمایه رخواره شدت نور خورشید به صورت میدانی توسط دوربین حرارتی اندازه‌گیری شده و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شده است.

۲. هندسه بازتابگر سهمی گون

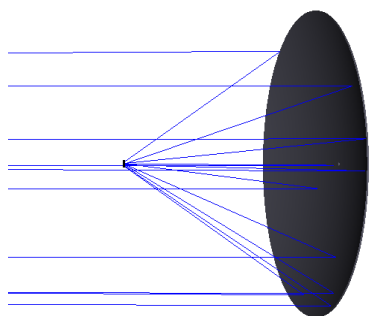
از هندسه می‌دانیم که یک سطح سهمی گون، پرتوهای نوری همسو تابیده شده با محور خود را در نقطه‌ای به نام کانون متمرکز می‌کند. در شکل ۲ هندسه یک خم سهمی رسم شده است. سطح سهمی گون از دوران این خم به گرد محور سهمی (محور Z) پدید می‌آید. یک خم سهمی بر اساس تعریف، مکان



شکل ۱. آینه متمرکز کننده دیش اروپایی در مرکز پژوهشی پی‌اس‌ای (اسپانیا) با دو محور ردیابی سمتی و فرازی (ارتفاعی) [۵].

سپس با ترابرد این شاره داغ، گرمای نهفته در آن را در مکانی که می‌خواهیم، به مصرف برسانیم. این روش، گرمای متمرکز خورشیدی نام دارد [۱]. گرداورهای خورشیدی بر این پایه ساخته می‌شوند که یک سطح سهموی یا کروی پرتوهای نوری تابیده شده همسو با محور خود را در نقطه‌ای به نام کانون گرد آورند [۲]. یکی از مهم‌ترین گرداورهای خورشیدی آینه سهموی است که می‌تواند با کمک دو موتور مکانیکی، خورشید را در آسمان به [۲ و ۳]. شکل ۱ آینه سهموی خورشیدی را نشان می‌دهد که در ناحیه کانونی آن یک موتور استرلینگ قرار گرفته است. در پژوهشی نیز از اجاق خورشیدی برای پخت استفاده شده است. در این کاربرد، آینه‌های چند پارچه برای ایجاد سطح سهمی گون به کارگیری شده‌اند. چند پارچه بودن آینه سبب کاهش قدرت تمرکز نور خورشید در کانون می‌شود و در مقابل، این مزیت را دارد که طراحی و ساخت آن آسان است [۴].

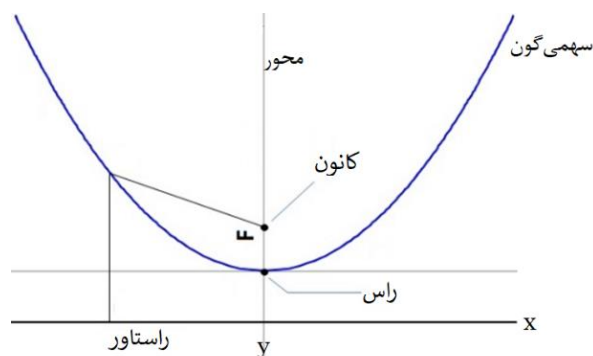
طراحی و تولید سطوح آینه‌ای بزرگ و یک‌پارچه با کمترین عیب اپتیکی، پایه و اساس متمرکز کننده‌های خورشیدی است [۶]. هر چه آینه یک متمرکز کننده خورشیدی از قطعات کمتری ساخته شده و خطای ساخت کمتری داشته باشد عملکرد بهتری در متمرکز کردن نور دارد و می‌تواند دماهای بالاتری در کانون خود ایجاد کند. آینه‌های متمرکز کننده‌های خورشیدی برخلاف



شکل ۳. شبیه‌سازی بازتابنده آینه‌ای سهوی در محیط اپتیکی زیماکس. قطر دهانه آینه ۴۰۰۰ متر و فاصله کانونی آینه ۳۰۰۰ متر است. پرتوهایی که همسو با محور مکانیکی آینه تابیده شده در کانون آینه متمرکز شده‌اند. یک آشکارساز ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر مربع در کانون آینه قرار دارد.

خورشید به اندازه ۵ میلی‌رادیان واگرایی دارد که سبب می‌شود همه پرتوهایی که از خورشید به ما می‌رسند کاملاً موازی نباشند و اندکی واگرایی داشته باشند. اگر سطح آینه بازتابگر کاملاً آرمانی ساخته شود به علت واگرایی اندک ناشی از قرص ظاهری خورشید لکه ایجاد شده در کانون آینه پهن شدگی خواهد داشت. اثر پهن شدگی ناشی از واگرایی ذاتی نور خورشید در شکل ۴ آمده است. مشخص است که توزیع انرژی تابشی متمرکز شده در لکه کانونی یکنواخت نیست. مرکز آن بیشترین شدت را دارد و با دور شدن از مرکز لکه، شدت نور افت می‌کند.

اثر پهن شدگی لکه کانونی ناشی از واگرایی ذاتی نور خورشید در محیط زیماکس شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی فقط واگرایی ناشی از قرص خورشید وارد شده است و سطوح اپتیکی کاملاً بدون عیب فرض شده‌اند. اگر واگرایی ناشی از قرص ظاهری خورشید نادیده گرفته شود و یک دسته پرتو موازی به سطح سهمی بتابد به صورت آرمانی در یک نقطه هندسی جمع خواهند شد و هیچ پهن شدگی ایجاد نمی‌کنند. از دیدگاه نظری، شدت نور در این نقطه بی‌نهایت خواهد بود. اما وقتی واگرایی ظاهری خورشید را در نظر می‌گیریم با دسته پرتوهایی مواجه می‌شویم که با زاویه‌های مختلف به سطح سهمی برخورد می‌کنند. واگرایی نور خورشید



شکل ۲. هندسه یک خم سهمی شامل رأس، راستاور و کانون.

هندسی نقاطی است که فاصله آنها از یک نقطه (کانون سهمی) و یک خط راست (راستاور) برابر است. رأس سهمی نقطه‌ای از سهمی است که فاصله آن تا خط راستاور کمینه است. معادله تحلیلی سهمی به صورت زیر است:

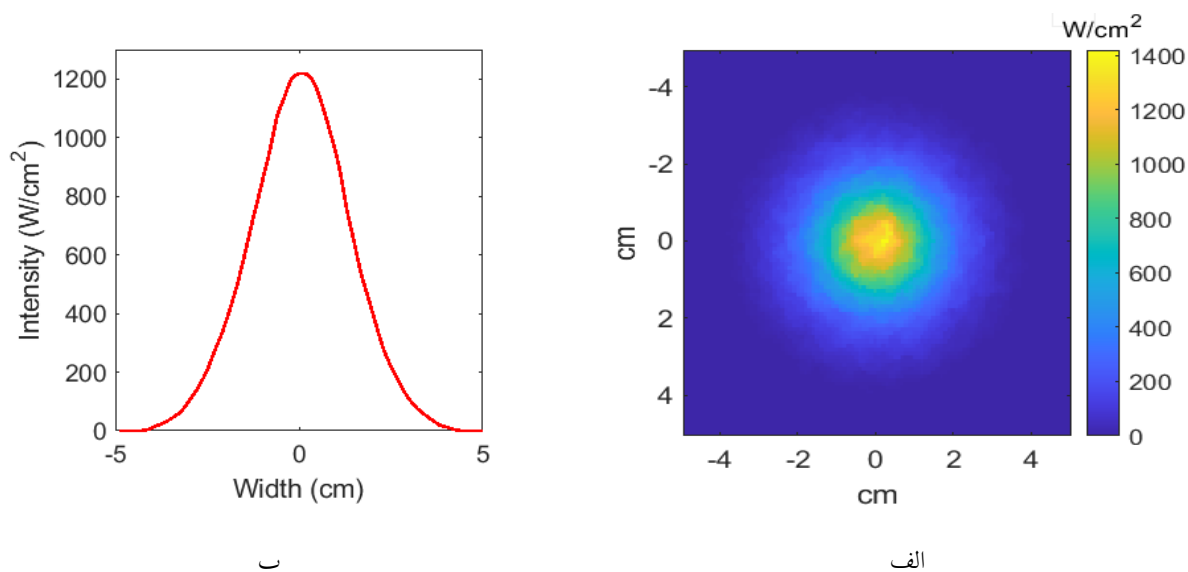
$$y = \frac{x^2}{4F}, \quad (1)$$

که y محور عمودی، x محور افقی و F ، کانون سهمی است. کانون هندسی سهمی همان مرکز اپتیکی سهمی است از این رو، از مقدار هندسی کانون سهمی به جای فاصله کانونی آینه استفاده می‌کنیم.

به کمک معادله (۱)، سطح یک سهمی را شبیه‌سازی کرده و در محیط نرم‌افزاری اپتیکی زیماکس^۱ وارد می‌کنیم. در این شبیه‌سازی، قطر دهانه آینه ۴ متر و فاصله کانونی آینه ۳ متر گرفته شد که مربوط به طرح پژوهشی کوره خورشیدی ایران است. این شبیه‌سازی در شکل ۳ رسم شده است. در این شکل، دسته نورهای موازی با محور مکانیکی آینه سهموی از سمت چپ به راست تابانیده شده و بر اثر بازتاب در کانون متمرکز می‌شوند. از یک آشکارساز مجازی ۱۰ کیلو پیکسل به ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر برای ثبت اثر شدت استفاده شد.

در بازتابنده سهمی‌گون، پرتوهای نور فرودی که هم‌راستا با محور سهمی هستند از کانون آن می‌گذرند و در یک نقطه هندسی متمرکز می‌شوند. اما، در مطالعه‌های مربوط به انرژی خورشیدی، واگرایی نور خورشید را نیز باید در نظر گرفت. نور

۱. Zemax



شکل ۴. (الف) شبیه‌سازی ناحیه تمرکز نور خورشید در کانون آینه که بر روی یک صفحه دریافت کننده آلومینیومی زیر متمرکز شده است، (ب) رخواره شدت تابش در لکه کانونی و توزیع شبه گوسی انرژی تابشی متمرکز شده است.

۳. اندازه‌گیری خطای سطح زیر لایه آینه سهمی گون

توسط روبش اپتیکی

به دلیل بزرگی قطعه، آینه سهمی را نمی‌توان یک‌پارچه ساخت و به طور معمول، آن را به صورت چند برینه (قطاع) ای می‌سازند. شکل ۱، یک آینه سهمی با شانزده برینه (قطاع) را نشان می‌دهد. روش رایج برای ساخت برینه‌ها قالب‌گیری است. برینه‌ها بیشتر از جنس فایبرگلاس هستند و سطح بازتابگر روی برینه چسبانیده می‌شود. بازتابگر می‌تواند آینه شیشه‌ای یا آینه فلزی باشد [۷]. سطوح شیشه‌ای مقاومت محیطی خوبی در مقابل خش شدن دارند و سطوح فلزی مقاومت مکانیکی خوبی دارند. از دید بازتابندگی، آینه شیشه‌ای نقره‌اندود بیشترین ضریب بازتاب را دارد (۹۰-۹۲ درصد) و یکی از بهترین انتخاب‌ها است. ضریب بازتاب آینه‌های فلزی کمتر از آینه شیشه‌ای است ولی ماندگاری آنها در شرایط محیطی بیشتر است [۷]. آینه سهمی مورد بررسی در این مقاله (مربوط به پروژه کوره خورشیدی ایران) قطر دهانه چهار متر دارد و با دوازده برینه فایبرگلاسی با زاویه رأس ۳۰ درجه ساخته می‌شود. پیش از ساختن قالب نهایی برینه‌ها، باید سطح برینه از نظر هندسی بررسی شود. بدین ترتیب، کیفیت ساخت زیر لایه فایبر

هر چند اندک، سبب می‌شود که نور در یک نقطه هندسی متمرکز نشده و یک لکه کانونی ایجاد شود. در شبیه‌سازی که با نرم‌افزار زیماکس انجام شده است، در اثر واگرایی ناشی از قرص خورشید، در کانون این سهمی گون لکه‌ای به قطر تقریبی ۸ سانتی‌متر ایجاد شده است. لکه‌ای که در سمت راست از شکل ۴ رسم شده، فقط پهن‌شدگی ناشی از قطر ظاهری خورشید را برای یک سطح سهمی گون آرمانی و بدون عیب نشان می‌دهد. هرگونه خطایی که در هنگام ساخت اتفاق بیفتد، سبب انحراف سطح اپتیکی از حالت آرمانی شده و باعث بزرگ‌تر شدن یا واپیچیده شدن لکه کانونی یا غیر دایروی بودن آن می‌شود. در گردآورنده خورشیدی، سطح آینه ساخته شده به علت خطاهایی که در ساخت وجود دارد یک سطح سهمی آرمانی نیست. هر قسمت از آینه که از سهمی انحراف داشته باشد سبب بازتاب نور به خارج از کانون آینه می‌شود.

خطاهای ساخت به همراه واگرایی ذاتی ناشی از نور خورشید سبب پهن‌تر شدن لکه کانونی می‌شود. در قسمت بعد، با استفاده از نتایج اندازه‌گیری مشخصات سطح، توزیع شدت در کانون آینه به روش مونت‌کارلو در محیط زیماکس شبیه‌سازی شده است.



ب



الف

شکل ۵. (الف) نمای روبرو و (ب) نمای پشت از قطعه آزمایشی با جنس فایبر گلاس. شبکه بندی پشت برای استواری و صلب کردن قطعه ایجاد شده است.

میکرومتر است [۹]. پیش از انجام روبش، سطح قطعه را با شماری از برجسب‌های کوچک نشان گذاری می‌کنند تا دستگاه اندازه‌گیری بتواند محور مختصات مناسب را پیدا کرده و مختصات ابر نقاط را ثبت کند. در شکل ۶، روش اندازه‌گیری روبش اپتیکی و نشان‌گذاری قطعه نمایش داده شده است. با داشتن نقاط بسیار زیاد اندازه‌گیری شده در این آزمایش می‌توان خطای ساخت ابعادی قطعه را نیز به دست آورد.

اندازه‌گیری سه بعدی جسم توسط روش اپتیکی بیان شده در بخش قبل انجام شده و ابر نقاط سطح قطعه فایبرگلاس اندازه‌گیری می‌شود. برای بررسی انحراف ابر نقاط به دست آمده از حالت آرمانی مورد انتظار، از روش برازش رویه سهموی استفاده می‌شود و یک رویه سهموی بر داده‌های ابر نقاط قطعه برازش داده می‌شود. برای این کار نخست باید شکل مناسبی برای رویه برازشی در نظر گرفته شود. ما در این کار، تابع درجه دوم رویه سهموی زیر را برای برازش به کار بردیم:

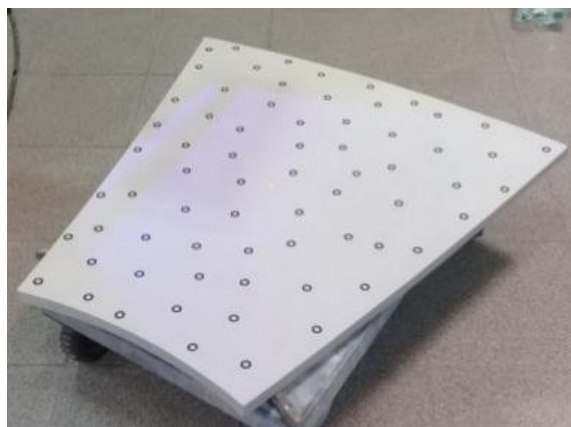
$$g(x, y) = z_0 + \frac{1}{4F} \left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right], \quad (2)$$

که g تابع رویه برازشی، F فاصله کانونی رویه برازشی و x_0, y_0, z_0 مشخصه‌های برازشی هستند. اندازه مشخصه‌های x_0, y_0, z_0 به پیکربندی قطعه هنگام تصویر برداری بستگی دارد و از نتایج بهترین برازش رویه (۲) به ابر نقاط به دست می‌آیند.

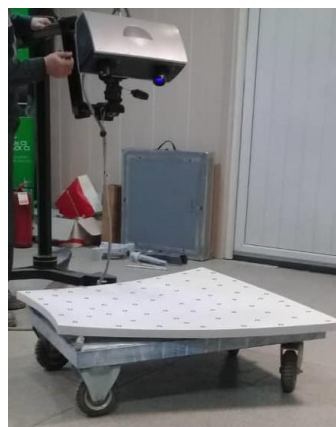
گلاسی آنها پیش از چسبیده شدن آینه‌ها روی زیر لایه آزموده می‌شود. در این نوشته، اندازه‌گیری خطای ساخت یک قطعه آزمایشی که یک برینه آینه سهمی است گزارش می‌شود. قطعه آزمایشی نیمه بالایی از یک برینه و مساحت آن یک شانزدهم مساحت آینه کامل است. با روش قالب سازی، قطعه آزمایشی از جنس فایبرگلاس ساخته شد. در شکل ۵ قطعه فایبرگلاسی از دو نمای روبرو و پشت نمایش داده شده است.

برای اطمینان از درستی خمیدگی سطح قطعه آزمایشی، آزمون‌هایی وجود دارد [۷ و ۸]. یکی از این آزمون‌ها، روبش اپتیکی است که یک نوع آزمون غیرتماسی است. در این روش، سطح برینه توسط ال‌ای‌دی آبی‌رنگ به صورت ساخت یافته نوردهی شده و به طور هم‌زمان، توسط دو دوربین با اختلاف منظر از قطعه عکس می‌گیرند [۹]. ابر نقاط سطح جسم توسط الگوریتم‌های مثلث سازی محاسبه می‌شوند و مشخصات مکانی نقاط در سه بعد اندازه‌گیری می‌شوند. با کمک این روش، مختصات شمار بسیار زیادی از نقاط سطح قطعه (ابر نقاط) ثبت می‌شود. ابر نقاط به دست آمده با مختصات نقاط متناظر فایل سه بعدی طراحی که قطعه از روی آن ساخته شده مقایسه می‌شوند تا خطای ساخت به دست آید. در این اندازه‌گیری دستگاه روبش سه بعدی مدل کومت ال‌تری‌دی^۱ را برای یافتن ابر نقاط به کار بردیم. دقت اندازه‌گیری این دستگاه ۵۰

۱. Comet L3D

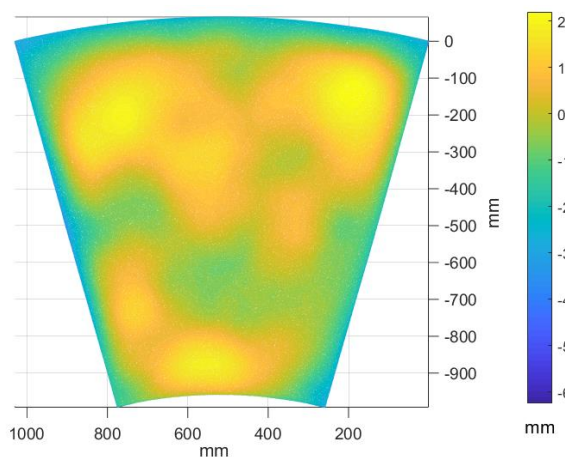


ب

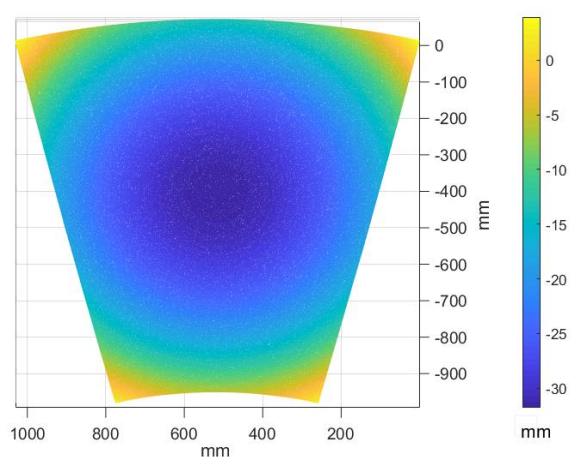


الف

شکل ۶. الف) دستگاه اندازه‌گیری اپتیکی قطعه آزمایشی فایبرگلاس و (ب) برچسب‌گذاری برای انجام روبش اپتیکی و محوریابی.



ب



الف

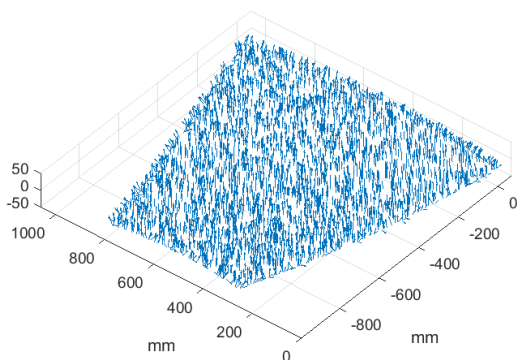
شکل ۷. الف) ابر نقاط اندازه‌گیری شده توسط دستگاه روبش اپتیکی و (ب) اختلاف میان برازش رویه سهمی با ابر نقاط روبش اپتیکی.

اختلاف (مولفه z) در نقاط گوناگون رویه در شکل ۷. ب نشان داده شده است. رویه فایبرگلاس تقریباً ۳۵ میلی‌متر ژرفا دارد و هنگامی که رویه سهمی آرمانی به آن برازش می‌شود در برخی نقاط اختلاف بین نقاط اندازه‌گیری شده و نقاط آرمانی به اندازه ± 2 میلی‌متر می‌رسد. یک معیار مهم در برآورد کمی خطای ساخت سطح قطعه، محاسبه ریشه میانگین مربعی خطا است که به صورت جذر میانگین مربعی اختلاف عمودی مولفه z نقاط اسمی z_{nom} و واقعی z_{act} تعریف می‌شود. اندازه این خطا از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (z_{i,nom} - z_{i,act})^2}, \quad (3)$$

شمار ابر نقاط به دست آمده از روبش اپتیکی در حدود سیصد و سی هزار نقطه بود. برنامه برازش رویه به ابر نقاط در محیط متلب^۱ نوشته شد. برای برازش رویه در کمترین حالت به ۵ نقطه نیاز داریم که البته تعداد نقاط موجود خیلی بیشتر از این کمترین مقدار است.

شکل ۷. الف ابر نقاط اندازه‌گیری شده است که اختلاف رنگ‌بندی، عمق ۳۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد و ۷. ب اختلاف میان مولفه z ابر نقاط با متناظر آنها در رویه سهمی برازشی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که می‌بینید زیره ساخته شده از جنس فایبرگلاس با رویه آرمانی طراحی شده اختلاف دارد که این



شکل ۸. رخواره بردارهای نرمال سطح زیر لایه آینه سهمی. به هر شش نقطه که نزدیک‌ترین همسایگی را دارند یک صفحه برازش شده و بردار عمود بر آن صفحه را به عنوان بردار نرمال سطح قطعه می‌گیریم.

در روش اول از زاویه‌های محاسبه شده میانگین گرفته می‌شود:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i, \quad (6)$$

در روش دوم، میانگین‌گیری بر روی کسینوس زاویه انجام می‌شود:

$$\bar{\theta} = \cos^{-1} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos^2(\theta_i)}, \quad (7)$$

نتایج محاسبه خطای شیب سطح زیرلایه در جدول ۱ آمده است. این محاسبه نشان می‌دهد که تمام نقاط رویه سطح برینه ساخته شده، به طور متوسط در بازه ± 12 میلی‌رادیان (یا $\pm 15/7$ میلی‌رادیان با الگوریتم دوم) نسبت به حالت آرمانی تغییرات زاویه‌ای دارند. انحراف از حالت آرمانی در رویه ساخته شده سبب می‌شود که در هنگام تابش نور به سطح برینه نیز این انحراف اتفاق بیفتند و پرتوهای نور به جای بازتاب شدن در کانون آینه در مکان‌های دیگری بازتاب شوند. اگر دو برابر انحراف معیار را برای بیشینه واگرایی پرتوهای بازتاب شده از سطح آینه در نظر بگیریم، برای این آینه با فاصله کانونی ۳۰۰۰ میلی‌متر، بیشینه انحراف معیار واگرایی سبب می‌شود که حاصل ضرب انحراف معیار واگرایی در فاصله کانونی آینه، لکه‌ای به قطر تقریبی ۱۸/۹ سانتی‌متر ایجاد شود که با توزیع شدت رسم شده در شکل ۱۰ همخوانی دارد. از این‌رو، نتیجه می‌شود که

که در آن N شمار نقاط برازشی و i شماره نقطه است. ریشه میانگین مربعی اختلاف بین نقاط رویه سطح ساخته شده و سطح آرمانی ۱/۲۱۲ میلی‌متر محاسبه شده است. این خطای ناشی از ساخت زیرلایه فایبرگلاس، هنگامی که روی آن آینه چسبانیده شود به خطای اپتیکی بازتابی (خطای شیب) می‌انجامد. خطای شیب، اختلاف آماری راستای عمود بر سطح آرمانی با راستای عمود بر سطح اندازه‌گیری شده از نقاط واقعی را نشان می‌دهد. هر چه خطای سطحی کمتر باشد خطای شیب نیز کمتر است. یکی از روش‌های اندازه‌گیری خطای اپتیکی یک آینه متمرکز کننده، اندازه‌گیری انحراف بردار نرمال عمود بر سطح واقعی نسبت به بردار نرمال سطح آرمانی است و به آن خطای شیب سطح می‌گویند. خطای شیب سطح زیر لایه را می‌توان با داشتن داده‌های اندازه‌گیری اپتیکی به دست آورد. برای محاسبه بردار نرمال، به هر شش نقطه از ابر نقاط که نزدیک‌ترین همسایگی را داشته باشند یک صفحه برازش شده و بردار عمود بر این صفحه به عنوان بردار نرمال گرفته می‌شود. بردار نرمال سطح آرمانی با گرفتن گرادیان از معادله رویه برازشی و بهنجار کردن آن به دست می‌آید:

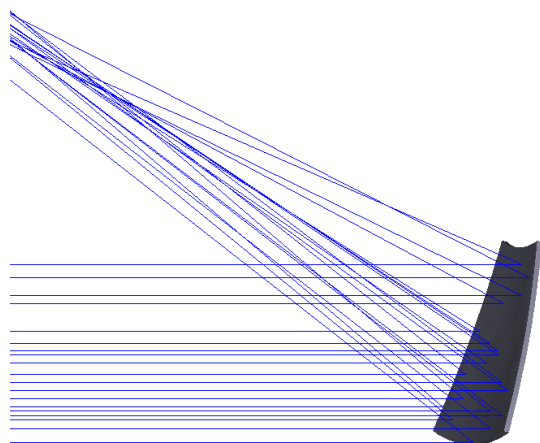
$$\nabla g(x, y) = \frac{\partial g}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial g}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial g}{\partial z} \hat{k}, \quad (4)$$

توجه داشته باشیم، شبکه ابر نقاط اپتیکی اندازه‌گیری شده نامنظم است. در کنارهای قطعه که سطح اندکی خم شده است دیده می‌شود که بردار عمود بر سطح به همراه گرد شدن لبه، چرخیده است. شکل ۸ رخواره بردارهای نرمال سطح قطعه را نشان می‌دهد.

برای به دست آوردن خطای شیب سطحی در هر نقطه، بردار نرمال به دست آمده از داده‌های ابر نقاط با بردار نرمال متناظر آن از سطح آرمانی، که از بهنجارش بردار رابطه (۴) به دست می‌آیند، مقایسه شده و زاویه میان آنها به دست می‌آید.

$$\theta_i = \cos^{-1} [\vec{n}_{act}(i) \cdot \vec{n}_{nom}(i)], \quad (5)$$

برای محاسبه خطای شیب که میانگین این زاویه است، از دو الگوریتم استفاده می‌کنیم.



شکل ۹. چیدمان آزمون برینه آینه‌ای در محیط زیماکس. نورهای همسو از سمت چپ به راست با خط‌های آبی رنگ کشیده شده‌اند. دسته پرتوهای تابیده شده به برینه بازتابیده شده و پس از بازتاب به سطح آشکارساز که در بالا-چپ قرار دارد می‌رسند.

قرار داده می‌شود که گویی قرار است با دیگر برینه‌هایی که فعلاً وجود ندارند یک آینه شلجمی گون کامل را بسازد.

با توجه به این که زیر لایه برینه ساخته شده نسبت به سازه اصلی که طراحی شده، مقداری انحراف و ایراد ساخت دارد انتظار داریم لکه کانونی مساحت بیشتری را شامل شود. در واقع خطای ساخت سطحی اندازه لکه کانونی را نه تنها بزرگتر می‌کند بلکه آن را دستخوش اعوجاج کرده و از حالت متقارن خارج می‌کند. یک آشکارساز ده کیلو پیکسل به مساحت ۶۰ در ۶۰ سانتی‌متر مربع در محل کانون قرار داده شد. تعداد یک میلیون باریکه نوری برای رهگیری پرتو به کار رفت. در شکل ۱۰ نمودار رنگی توزیع شدت لکه کانونی کشیده شده است. این لکه، مساحت یک دایره تقریبی به قطر ۲۰ سانتی‌متر را روشن کرده است. در حالت آرمانی و بدون خطای ساخت سطحی، نتایج شبیه سازی قطر لکه کانونی را ۸ سانتی‌متر می‌دهد. خطاهای ساخت سطحی سبب تغییر مسیر پرتوهای نور شده و اندازه لکه در کانون را بزرگتر کرده و از حالت دایره خارج می‌کند.

برای مقایسه، توزیع شدت شبیه‌سازی شده یک برینه بازتابنده آرمانی نیز در شکل ۱۰ کشیده شده است. همانطور که دیده می‌شود، توزیع شدت در کانون آینه از حالت آرمانی خارج شده

جدول ۱. خطای شیب سطحی زیر لایه آینه سهمی.

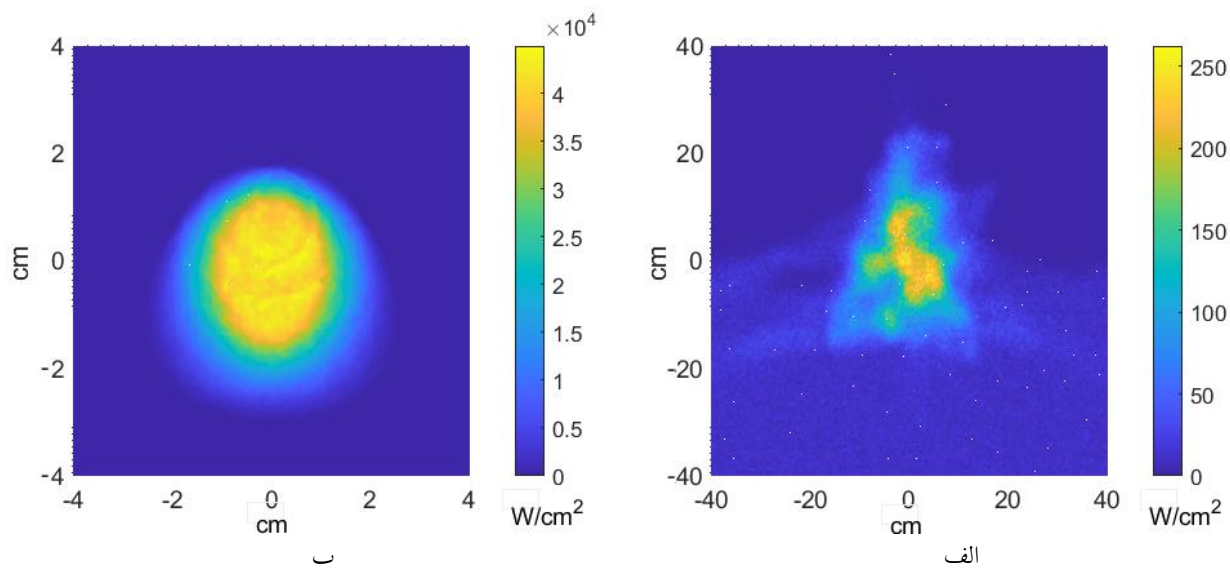
روش میانگین‌گیری اول	روش میانگین‌گیری دوم
۱۲ میلی‌رادیان	۱۵/۷ میلی‌رادیان

انحراف معیار خطای شیب به دست آمده از الگوریتم دوم با نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو و نتایج میدانی همخوانی بهتری دارد و از آن به عنوان معیار مناسب برای سنجش خطای شیب سطحی استفاده می‌شود.

۴. ارتباط خطای سطح زیر لایه با توزیع شدت نور

لکه کانونی

آنچه اهمیت دارد رابطه میان خطای سطح زیر لایه با تمرکز نور توسط آن است. برای این کار دو روش را به کار بردیم. در روش نخست فرض می‌کنیم روی زیر لایه یک لایه بازتابنده نور لایه نشانی شود. سپس با کمک نرم‌افزار اپتیکی تمرکز نور، این برینه را شبیه‌سازی می‌کنیم تا توزیع شدت نور در ناحیه کانونی به دست آید. در روش دوم یک آینه نازک روی زیر لایه چسبانیم و در یک آزمایش میدانی، توزیع شدت نور در ناحیه کانونی را اندازه‌گیری کردیم. در این بخش روش نخست را شرح می‌دهیم. داده‌های اندازه‌گیری انجام شده توسط روبش اپتیکی با پسوند استی‌ال^۱ ذخیره می‌شوند. این روش فشرده‌سازی و ذخیره یکی از بهترین گزینه‌ها برای اجسامی است که اندازه مشخصات رویه آنها مهم است. در اندازه‌گیری‌های اپتیکی مانند همین روش نور ساخت یافته، رویه جسم با روش اپتیکی اندازه‌گیری می‌شود. در محیط نرم افزاری زیماکس امکان فراخوانی این پسوند وجود دارد و محیط نرم‌افزاری زیماکس جسم را به عنوان یک رویه با تمام جزئیات می‌شناسد. در محیط زیماکس نوع جسم را آینه تعریف می‌کنیم تا تمام نورهایی که به سطح رویه آن می‌رسد بازتاب شوند. شکل ۹ چیدمان آزمون برای برینه آینه‌ای در محیط زیماکس را نمایش می‌دهد. برینه آینه‌ای در قسمتی از فضای شبیه‌سازی



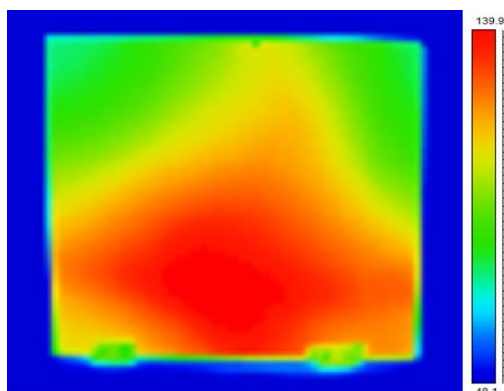
شکل ۱۰. (الف) بازسازی لکه کانونی شده توسط برینه آینه‌ای در محیط نرم‌افزاری زیماکس از روی داده‌های روبش اپتیکی. شبیه‌سازی با روش مونت‌کارلو و با یک میلیون پرتو انجام شده است و (ب) توزیع شدت شبیه‌سازی شده در کانون آینه توسط نور بازتاب شده از یک قطاع آرمانی.

مشکی مات رنگ شد. با تیره کردن صفحه فلزی، جذب گرمایی این صفحه به بالای ۹۰ درصد می‌رسد که برای آزمون گرمایی مناسب است. پیش از انجام اندازه‌گیری، لازم است دمای محیط و دمای اولیه صفحه هدف اندازه‌گیری شوند. با متمرکز شدن پرتوهای خورشید روی صفحه جذب، دمای سطح آن افزایش پیدا می‌کند و این افزایش دما تا جایی ادامه پیدا می‌کند که نرخ انرژی تابشی رسیده به آن با نرخ هدر رفت انرژی برابر شود. با ثابت شدن دمای سطح صفحه و رسیدن به حالت پایا، با کمک دوربین گرماسنجی از آن عکس گرفته شده و دماسنجی می‌شود. این اندازه‌گیری تا جایی که دمای سطح هدف ثابت شود ادامه پیدا می‌کند. آزمایش را در تاریخ ۱۲ تیر ۱۳۹۹ در دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام دادیم. در شکل ۱۱، تصویر چیدمان آزمایش و رخواره دمایی گرفته شده از صفحه هدف آهنی را می‌بینید. دما در بیشترین نقطه، ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. توزیع شدت نور در ناحیه کانونی متناسب با توزیع دمایی روی صفحه جذب است. همان گونه که می‌بینید لکه کانونی ابعادی حدود ۲۰ سانتی‌متر است و از حالت تقارن نیز بیرون آمده است.

و ناحیه بزرگ‌تری را شامل شده است. مساحت بزرگ‌تر سبب کاهش شدت تابشی در ناحیه کانونی شده و توزیع شدت نیز از تقارن خارج شده است. زبری‌های ریز روی سطح، بر اساس پدیده پراکندگی سبب روشن شدن پس زمینه در شکل سمت راست شده است.

۵. اندازه‌گیری میدانی

در روش دوم برای بررسی اثر خطای ساخت سطحی برینه در تمرکز نور، روی برینه فایبر گلاس یک لایه آینه شیشه‌ای نازک چسبانیدیم. ضخامت آینه یک میلی‌متر بود و نرم‌پذیری مناسب برای گرفتن شکل خمش سطحی برینه داشت. برای اندازه‌گیری و کیفیت تمرکز برینه بازتابنده از دوربین گرمانگاری کمک گرفتیم. برینه به گونه‌ای بازتابنده شده که پرتوهای خورشید رسیده به سطح آن در نقطه کانونی متمرکز شوند. برینه روبروی خورشید قرار می‌گیرد و سپس یک صفحه سیاه رنگ فلزی به عنوان جذب نور در ناحیه کانونی آن گذاشته می‌شود. صفحه هدف از جنس آهن با هندسه مستطیلی به طول ضلع ۲۵ در ۳۵ سانتی‌متر مربع و ضخامت یک میلی‌متر انتخاب و با افشانه



ب



الف

شکل ۱. الف) چیدمان آزمایش دماسنجی و ب) یک تصویر گرمایی گرفته شده با دوربین گرمانگار از صفحه هدف آهنی.

۶. بحث و نتیجه گیری

در این گزارش، خطاهای ساخت و شیب زیر لایه فایبرگلاس آئینه شلجمی خورشیدی توسط روبش (اسکن) اپتیکی اندازه گیری و نشان داده شد اختلاف زیادی میان طراحی آینه و زیره ساخته شده وجود دارد. برینه (قطاع) ای از متمرکز کننده از جنس فایبرگلاس ساخته شد و کیفیت سطح آن توسط روبش اپتیکی مورد آزمون قرار گرفت. خطاهای ساخت زیر لایه آینه شلجمی خورشیدی اندازه گیری شد و خطای شیب زیر لایه فایبرگلاس آئینه شلجمی خورشیدی به دست آمد. اندازه گیری انحراف زاویه ای شیب سطح نشان می دهد که پرتوهای تابیده شده به برینه به طور آماری به اندازه ± 12 میلی رادیان ($\pm 15/7$ میلی رادیان در الگوریتم دوم) با راستای آرمانی خود اختلاف دارند و از آن راستا منحرف می شوند. همچنین با روش مونت کارلو و بهره گیری از داده های روبش اپتیکی، شبیه سازی متمرکز نور انجام شد. این شبیه سازی در محیط نرم افزاری اپتیکی زیماکس انجام شده و متمرکز نور توسط آینه شبیه سازی شد. در این شبیه سازی اثر انحراف راستای پرتوهای اپتیکی در کانون آینه بررسی شد. لکه کانونی بازسازی شده از برینه، دایره ای تقریبی به قطر 20 سانتی متر پدید می آورد. شبیه سازی متمرکز نور با برینه آرمانی (بدون خطای سطحی) انجام شد. اندازه لکه کانونی برینه آرمانی کوچک تر از لکه مربوطه برینه واقعی بود. از این مقایسه به صورت کیفی رابطه میان خطای سطح و توزیع شدت لکه کانونی آشکار شد. همچنین یک اندازه گیری میدانی

متمرکز نور با چسبانیدن یک لایه آئینه نازک روی برینه با دوربین گرمانگار انجام شد و پس از ایجاد پایداری دمایی، بیشینه دمای میانگین 140 درجه سانتی گراد بر روی صفحه آهنی سیاه شده جاذب در ناحیه کانونی به دست آمد. نتایج به دست آمده از دوربین گرمانگار نیز لکه شدت در کانون را دایره ای تقریبی به قطر 20 سانتی متر که تقارن خود را به دلیل خطای سطحی از دست داده بود ثبت کرد. با این روش نیاز ارتباط کیفی تأثیر خطای سطح در متمرکز نور در کانون به دست آمد. نتیجه مهم دیگر این است که کیفیت متمرکز نور برینه خوب نیست و عدد خطای سطحی (بر حسب میلی رادیان) معیاری کمی از ضعف بودن کیفیت ساخت برینه داد که می تواند برای پژوهشگران سودمند باشد. در واقع می توان بدون این که دست به آزمایش میدانی پر هزینه زد کیفیت متمرکز برینه را با روش اپتیکی و تحلیل داده های آن تخمین زد.

سپاس گذاری

از آقای دکتر مارکو مونتکی و خانم دکتر میکلا لانکی از مؤسسه انیا ایتالیا در رم برای راهنمایی های ارزنده تشکر می کنیم. همچنین از آقای دکتر هادیان از دانشکده مواد دانشگاه تهران برای ساخت قطعه و نیز آقای مهندس بابازاده از شرکت تکتا برای طراحی آن قدردانی می شود. نتایج این نوشته مربوط به طرح کوره خورشیدی ایران مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران کشور به شماره 97001386 است.

مراجع

1. M Günther, *EnerMENA, DLR*, **14**, 04 (2016) chapter 6.
2. J Coventry and C Andraka, *Solar Energy*, **152** (2017) 140.
3. A Ghorbani, *et al.*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **35** (2014) 73.
4. A Hafez, *et al.*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **67** (2017) 1019.
5. K Lovegrove, G Burgess, and J Pye, *Solar energy* **85**, 4 (2011) 620.
6. M El Ydrissi, H Ghennioui, and A Farid, *Renewable Energy* **161** (2020) 293.
7. C A Arancibia-Bulnes, *et al.*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **69** (2017) 673.
8. J Xiao, *et al.*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**, 5 (2012) 2539.
9. C Bernal, *et al.*, *Procedia Engineering*, **63** (2013) 591.