

طراحی، پیاده‌سازی و اعتبارسنجی آزمایشگاه تست و کالیبراسیون حسگرهای خورشیدی

سید محمد مهدی دهقان^۱، مراد مومنی^۱، محمد چرخگرد^۲

۱ استادیار، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران، smmd@mut.ac.ir

۲ محقق، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۰۵

چکیده

این مقاله به ارائه طرح، پیاده‌سازی و اعتبارسنجی آزمایشگاه تست و کالیبراسیون حسگر خورشیدی می‌پردازد. در این آزمایشگاه مشخصه‌های توان، طیف، یکنواختی، زاویه ظاهری و توازی پرتوهای خورشیدی، همچنین حرکات وضعی حسگر خورشیدی نسبت به خورشید با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌شوند و بدین‌وسیله امکان تست و کالیبراسیون حسگر خورشیدی در مانورهای مختلف وضعیت فراهم می‌آید. تأمین این امکان مستلزم کالیبره کردن میز سه درجه آزادی شبیه‌ساز حرکات وضعی و شبیه‌ساز خورشیدی نسبت به یکدیگر است که با موازی شدن پرتوهای خورشید و محور اپتیکی حسگر خورشیدی؛ یعنی بردار نرمال سطح آن فراهم می‌شود. این مقاله علاوه بر ارائه طرح آزمایشگاه و ملاحظات راه‌اندازی آن، به طراحی و تشریح تست‌هایی که برای ارزیابی مشخصه‌های اصلی شبیه‌ساز، به‌ویژه توازی پرتوهای تولید شده و هم‌محور بودن پرتو خورشیدی و محور حسگر انجام گرفته است، می‌پردازد و برای تکمیل این روند یک حسگر خورشیدی مرجع کالیبره شده را در یک مانور وضعیت مورد ارزیابی قرار می‌دهد. نتایج حاصل نشان‌دهنده دقت کافی شبیه‌ساز برای تست و کالیبراسیون حسگرهای خورشیدی آنالوگ است.

واژگان کلیدی

ماهواره، تعیین وضعیت، شبیه‌ساز خورشیدی، حسگر خورشیدی، کالیبراسیون حسگر، طرح مفهومی و تفضیلی

۱. مقدمه

زیرسیستم و یا در برخی حالات منجر به شکست مأموریت گردد؛ آزمون‌های زمینی گوناگونی برای تست این سیستم‌ها در محیطی امن و با صرف هزینه‌های بسیار کمتر طراحی شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. حسگر خورشیدی یکی از اجزای اساسی زیرسیستم تعیین و کنترل وضعیت اکثر ماهواره‌هاست و باید قبل از نصب و

زیر سیستم تعیین و کنترل وضعیت ماهواره از جمله اساسی‌ترین و حساس‌ترین زیرسیستم‌های یک ماهواره است. با توجه به هزینه بالای صرف‌شده در ساخت ماهواره‌ها و توجه به این مطلب که هرگونه خطا در الگوریتم‌ها یا عملکرد سخت‌افزارهای زیر سیستم تعیین و کنترل وضعیت ماهواره می‌تواند منجر به ناکارآمدی

راه‌اندازی، آزمایش شده و از عملکرد صحیح آن اطمینان حاصل شود. علاوه بر این حسگرهای تولیدی باید کالیبره شده و در صورت نیاز جدول تنظیم آنها استخراج گردد [۱].

برای این منظور نیاز است پرتوهای خورشید در آزمایشگاه شبیه‌سازی شده و مقابل یک میز دو یا سه درجه آزادی در اتاق تاریک قرار گیرد تا بدین‌وسیله بتوان حسگر را در معرض مانورهای مختلف قرار داد. به چنین ساختاری آزمایشگاه تست و کالیبراسیون حسگر خورشیدی اطلاق می‌شود. چون ساختار و روند بهره‌برداری از میز شبیه‌ساز حرکت شناخته شده است [۱]، این مقاله بیشتر به تشریح شبیه‌ساز خورشیدی می‌پردازد. در توسعه شبیه‌ساز خورشیدی باید پارامترهای اساسی پرتوهای خورشید شبیه‌سازی شود. برای این منظور روش‌های مختلفی به‌کار گرفته شده است [۱] که بعضی یا همه خصوصیات پرتوهای خورشید را شبیه‌سازی می‌نمایند. برحسب اینکه چه تعداد از خصوصیات پرتوهای خورشید، با چه دقتی شبیه‌سازی می‌شود، همچنین با توجه به دقت شبیه‌سازی حرکات وضعی حسگر نسبت به شبیه‌ساز خورشید، کلاس‌های متنوعی از شبیه‌سازهای خورشیدی برای آزمایش حسگر و الگوریتم‌های تعیین وضعیت [۱] یا برای کالیبراسیون حسگر توسعه یافته‌اند.

مشخصه‌های مهم شبیه‌سازی پرتوهای خورشید شامل توان، توازی، طیف، یکنواختی و زاویه دید ظاهری می‌باشد. در ادامه، در کنار معرفی شبیه‌سازهای موجود، نقاط قوت و ضعف آنها بر اساس این مشخصه‌ها بررسی می‌گردد. آموزشگاه مهندسی هوانوردی و مکانیک جمهوری کره از یک لامپ هالوژن و یک رفلکتور ساده جهت ساخت شبیه‌ساز استفاده کرده است [۱]. این شبیه‌ساز توانایی برآورده‌نمودن تقریبی حداکثر سه مشخصه از پنج مشخصه مورد نیاز یعنی توان، طیف و توازی پرتوها را داراست؛ لکن دو مشخصه دیگر یعنی یکنواختی پرتوها و زاویه دید ظاهری در این نمونه قطعاً قابل تحصیل نمی‌باشند. یکی دیگر از این شبیه‌سازها توسط دانشگاه مهندسی تورنتو ساخته شده است [۲]. در این پژوهش نیز تنها از یک لامپ زنون در مقابل یک رفلکتور کوچک استفاده شده است و در بهترین حالت می‌تواند در حد شبیه‌ساز قبل عمل نماید. در نمونه بعدی، که ساخت مرکز تحقیقاتی ناسا-الین می‌باشد، به‌جای شبیه‌سازی پرتوهای خورشید از یک بیم لیزری استفاده شده است [۳]. این نمونه شبیه‌ساز به‌خاطر سهولت دسترسی و توان مصرفی کم به‌کار گرفته شده است. در این نمونه،

پرتوها دارای توانی در حدود ۲۸ درصد توان پرتوهای خورشید بوده و طیف مربوطه نیز تنها بخشی از طیف خورشید را پوشش می‌دهد. در مقابل، این پرتوها دارای توازی قابل قبولی بوده و با تنظیم فاصله از حسگر می‌توان زاویه ظاهری را نیز بازسازی کرد [۳]. شبیه‌ساز خورشیدی دیگر، که توسط دانشگاه پلی‌تکنیک هاربرگ هامبورگ استفاده شده است، ساخت شرکت اپتیکال انرژی^۱ است [۴]. این شبیه‌ساز سه مشخصه توان، طیف و توازی پرتوهای خورشید را شبیه‌سازی می‌نماید. علاوه بر این یکنواختی نسبتاً خوبی نیز دارد [۴]. یکی از کامل‌ترین شبیه‌سازهای خورشیدی، شبیه‌سازی است که در آزمایشگاه تست و کالیبراسیون حسگر خورشیدی دانشگاه ناپل توسعه یافته است [۵]. اطلاعات کافی از مشخصات دقتی این شبیه‌ساز، روند کالیبراسیون شبیه‌ساز و اعتبارسنجی دقت سیستم ارائه نشده است. از آنچه در دسترس است این‌گونه برآورد می‌شود که این آزمایشگاه قابلیت شبیه‌سازی تمامی خصوصیات پرتوهای خورشیدی را دارد؛ بنابراین از آن می‌توان برای آزمایش حسگر خورشیدی، الگوریتم تعیین وضعیت و کالیبراسیون حسگر خورشیدی استفاده کرد. تنها اشکال این سیستم عدم توانایی در شبیه‌سازی توان معادل پرتوهای خورشید است که سبب عدم امکان تست و کالیبراسیون حسگرهای آنالوگ می‌گردد.

در گذشته، مجتمع دانشگاهی هوافضا در دانشگاه صنعتی مالک اشتر آزمایشگاهی را برای تست حسگرهای خورشیدی توسعه داده است [۶]. این آزمایشگاه قابلیت شبیه‌سازی پرتوهای خورشید و ارزیابی الگوریتم‌های مختلف تعیین وضعیت را دارد. با توجه به محدودیت‌ها و دقت این آزمایشگاه، امکان کالیبراسیون و همچنین آزمایش حسگرهای خورشیدی با دقت کمتر از یک‌ونیم درجه وجود نداشته است [۷].

این مقاله به ارائه طرح، پیاده‌سازی و ارزیابی آزمایشگاه جدیدی می‌پردازد که محدودیت‌های آزمایشگاه قبلی را برطرف کرده و قابلیت تست و کالیبراسیون حسگرهای خورشیدی با دقت‌های بالاتر را نیز فراهم می‌نماید. در ادامه، ابتدا طرح شبیه‌ساز دقیق خورشیدی و مشخصات مطلوب هر یک از اجزای آن ارائه می‌گردد. سپس ملاحظات پیاده‌سازی، راه‌اندازی و تنظیم هر یک از اجزای شبیه‌ساز بیان می‌شود. در بخش بعد، الگوریتم جدیدی برای تنظیم و کالیبراسیون توام میز، شبیه‌ساز حرکت وضعی و منبع نور تحت عنوان کالیبراسیون محوری حسگر و شبیه‌ساز منبع

سیستم، الزاماتی از قبیل توانایی تحمل توان پرتو ورودی، تأمین توان مورد نیاز بلوک بعدی در خروجی کره، انتخاب ابعاد پورت ورودی متناسب با اینترفیس‌های (فیبرهای) انتقال و جز این‌ها را به کره تحمیل می‌نماید. محدودیت نمونه‌های موجود در بازار و در دسترس نیز انتخاب گزینه مناسب را پیچیده و دشوار می‌نماید. تمامی اجزا دارای قیود مشابهی می‌باشند. بر این اساس، طراحی و انتخاب المان‌های شبیه‌ساز، از بلوکی آغاز می‌گردد که دارای حداقل تنوع بوده یا دسترسی به آن با مشکل مواجه باشد. عدم وجود پاسخ و به بن‌بست رسیدن در مسیر طراحی و انتخاب اجزا، منجر به تعویض گزینه‌ها و مسیر طراحی خواهد شد.

۲-۱. مشخصات مطلوب منبع نوری

برای تولید پرتوهایی با مشخصات ذکر شده، ابتدا باید منبع نور مناسب را انتخاب نمود. منبع دارای اجزایی از قبیل لامپ، عدسی موازی‌ساز، منعکس‌کننده عقبی، تنظیم‌کننده عقبی و جز این‌ها می‌باشد. در این پژوهش با توجه به پیچیدگی‌های انتخاب و یکپارچگی این اجزا، یک منبع نوری یکپارچه مطابق با شکل ۲ انتخاب و استفاده شده است. برای انتخاب یک منبع باید موارد زیر در نظر گرفته شود:

۱. انتخاب نوع لامپ مورد نیاز (قوسی یا هالوژن)
۲. انتخاب عدسی موازی‌ساز اپتیکی (جنس و عدد مربوطه)
۳. نیاز / عدم نیاز به منعکس‌کننده عقبی
۴. اجزای دیگر از قبیل تغذیه و اینترفیس‌ها جهت ساخت یک منبع کامل

بررسی این موارد به‌همراه شناخت دقیق کاربرد منبع، منجر به تهیه منبع مدل ۶۶۹۲۵ متعلق به شرکت نیوپورت^۲ شده است [۸]. منبع دارای لامپ قوسی و محدوده توانی معادل ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ وات می‌باشد. این منبع در مقایسه با سایر منابع، دارای توان بالا و پرتو خروجی پهن و تا حدود زیادی موازی بوده و قابلیت راه‌اندازی با لامپ‌های هالوژن یا زنون با توان‌هایی از ۴۵۰ تا ۱۰۰۰ وات را داراست. همچنین این منبع دارای قابلیت تنظیم بالا و ریبیل نوری اندک است. لامپ مورد استفاده نیز از نوع زنون قوسی می‌باشد. دلیل اول برای انتخاب لامپ قوسی این است که دارای طیفی از ماورای بنفش تا مادون قرمز است که در مقایسه با لامپ‌های هالوژن با طیف مادون قرمز، به طیف نور خورشید نزدیکتر است. از سوی دیگر لامپ‌های هالوژن دارای فیلمان بوده و طول آنها از

نور پیشنهاد می‌شود. در پایان نیز برای تست یکپارچه سیستم و کسب اطمینان از تحقق مشخصات عملکردی مطلوب شبیه‌ساز، یک حسگر خورشیدی مرجع کالیبره شده در یک مانور وضعیت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲. طراحی شبیه‌ساز دقیق خورشیدی

همان‌گونه که ذکر شد، پارامترهای مهم شبیه‌سازی خورشید شامل توان پرتوهای تولیدی، توازی پرتوها، طیف پرتوها، یکنواختی پرتوها و زاویه دید ظاهری پرتوها می‌باشند. پرتوهای خورشیدی دارای طیفی در محدوده ۲۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر و در محل ماهواره دارای توان ۱۳۵۷ وات بر متر مربع می‌باشند. همچنین چون پرتوهای خورشید از بینهایت دور می‌آیند در تمام نقاط یکنواخت و موازی فرض می‌شوند و ناظر فرضی از روی زمین یا محل ماهواره‌ها خورشید را با زاویه دید ظاهری ۰/۵۳ درجه می‌بیند. شبیه‌ساز خورشیدی پیشنهادی که از خانواده شبیه‌ساز مرجع [۵] است، دارای زیرسیستم‌هایی است که در شکل ۱ دیده می‌شوند. این ساختار شامل یک منبع نوری است که طیف و توان مورد نظر را تولید کند. برای یکنواختی پرتو تولیدی از کره یکنواخت‌ساز استفاده می‌شود. قبل از ورود پرتو به کره و به‌منظور جلوگیری از خسارت به کره از یک فیلتر آبی استفاده می‌شود. فیلتر آبی طیف محدوده مادون قرمز را حذف می‌کند. نور خروجی کره یکنواخت‌کننده از واگرایی زیادی برخوردار است، بنابراین از یک عدسی موازی‌ساز در حد فاصل منبع نور و حسگر استفاده می‌شود. محل و مشخصات این عدسی چنان تعیین می‌گردد که زاویه ظاهری خورشید شبیه‌سازی گردد.

برای ساخت چنین سیستمی ابتدا باید زیرسیستم‌های آن طراحی و انتخاب شوند. برای انتخاب اجزا نیز باید ابتدا مشخصه‌های مورد نیاز آنها متناسب با وظیفه مربوطه هر المان به تنهایی و در ارتباط متقابل با دیگر اجزا معین گردد. به‌عنوان نمونه، برای انتخاب کره یکنواخت‌ساز باید نمونه انتخابی قادر باشد انتظارات مورد نیاز از چنین زیرسیستمی را برآورده نموده و قابل مونتاژ با دیگر اجزای شبیه‌ساز باشد. به‌عبارت دیگر، کره به‌عنوان یک المان مستقل باید قادر باشد در خروجی خود پرتوهایی یکنواخت تحویل دهد. مقدار یکنواختی مورد انتظار، معین‌کننده جنس کره، جنس پوشش داخلی کره، ابعاد کره و جز این‌ها خواهد بود. از سوی دیگر، رعایت اصول یکپارچگی با بخش‌های دیگر

طول قوس لامپ‌های قوسی بزرگتر است که موجب عدم یکنواختی بیشتر در پرتو تولیدی می‌گردد. گفتنی است برای نزدیکی طیف تولیدی به طیف خورشید، لامپ انتخابی دارای درجه نوری ۶۰۰۰ کلومین می‌باشد [۸].

۲-۲. مشخصات مطلوب فیلتر آبی (مایع)

چون حسگرهای خورشیدی نسبت به پرتوهای مادون قرمز حساس نیستند و از طرفی این پرتوها به علت تولید حرارت زیاد ممکن است موجب خسارت در بعضی از اجزا مانند کره شوند؛ این پرتوها توسط یک فیلتر آبی حذف می‌شوند. فیلتر آبی انتخابی از جنس استیل بوده و چرخش آب در جداره آن موجب خنک نگه‌داشتن آن می‌گردد. برای این منظور از فیلتر مدل ۶۲۲۷ متعلق به شرکت نیوپورت استفاده شده است. قطر این فیلتر نیز متناسب با قطر دهانه خروجی منبع برابر با سه اینچ انتخاب شده است. فیلتر از دو پنجره از جنس فیوز سیلیکا تشکیل شده است که موجب حذف پرتوهای مضر می‌شوند [۸].

۲-۳. مشخصات مطلوب فایبر باندل

برای اتصال خروجی فیلتر آبی به کره به دلیل توان بالای منبع، بهتر است از یک دسته فیبر نوری استفاده شود. بدین منظور فایبر باندلی استفاده می‌شود که از یک طرف به خروجی فیلتر و از طرف دیگر به ورودی کره متصل می‌گردد. در شبیه‌ساز ساخته شده به دلیل در دسترس نبودن فیبر با مشخصات یادشده، از یک مبدل ساده برای اتصال فیلتر آبی به کره یکنواخت‌ساز استفاده شده است.

۲-۴. مشخصات کره یکنواخت‌کننده

انتخاب کره باید با این پیش‌فرض که یک منبع ۱۰۰۰ وات از طریق یک فیلتر آبی و یک واسط ساده به آن متصل می‌گردد، انجام شود. برای تعیین مشخصات کره باید محدودیت یا تحمل پوشش‌های مختلف در برابر حداکثر توان ورودی لحاظ گردد. کمترین تحمل توان ورودی مربوط به پوشش سولفات باریم با حداکثر تحمل ۱/۵ وات بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. با انتخاب این پوشش و فرض اینکه نیمی از ۱۰۰۰ وات توان تولیدی توسط منبع به کره برسد، قطر کره حداقل باید حدود ۱۰ سانتی‌متر باشد. بنابراین مشخصات نمونه‌های موجود در بازار، تمامی کره‌های دارای قطر ۴ اینچ (یا بیشتر) امکان استفاده را دارا هستند. توضیح

بیشتر اینکه استفاده از فیلتر آبی جهت حذف طیف مادون قرمز موجب حذف نیمی از کل باند پرتو تولیدی می‌گردد. به عبارت دیگر، مطابق طیف لامپ زنون ۱۰۰۰ وات، حدود ۴۰ درصد توان مربوط به ناحیه بالای ۱۲۰۰ میکرومتر است. از سوی دیگر، واسطه‌های مورد استفاده و حتی خود منبع نور نیز دارای افت می‌باشند. بنابراین تضعیف ۵۰ درصدی در نور تولیدشده در حد فاصل رسیدن به کره منطقی به نظر می‌رسد. علاوه بر قطر کره، ضروری است قطر پورت‌ها نیز معین گردد. محل پورت‌ها روی کره مشخص و مطابق استاندارد می‌باشد و تعداد دو پورت نیز برای تامین نیاز پروژه کافی است. در مرجع [۹] ذکر شده است که برای حفظ خواص اساسی کره از جمله حداکثر یکنواختی، مساحت پورت‌ها می‌تواند حداکثر پنج درصد مساحت داخلی کره باشد. لذا با فرض وجود دو پورت روی کره‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر، قطر پورت‌ها باید حداکثر ۱/۵۶ سانتی‌متر باشد. گفتنی است کره‌های موجود در بازار حداقل سه پورت دارند؛ بنابراین در کاربرد مورد نظر این مقاله، پورت سوم با درپوش مسدود می‌گردد. بر اساس توضیحات فوق، کره‌ای با قطر ۴ اینچ، با دو پورت به قطر نیم اینچ و پوشش سولفات باریم و یا پوشش‌های مقاوم‌تر مورد نیاز است. بر این اساس و با توجه به محدودیت در محصولات موجود در بازار، کره مدل ۷۰۶۶۹ شرکت نیوپورت انتخاب شد [۸]. چون پورت‌های این کره دارای قطر یک اینچ می‌باشد، از کوچک‌ساز پورت برای رسیدن به قطر مورد نظر استفاده شده است.

۲-۵. محاسبه فاصله کره تا عدسی موازی‌ساز انتهایی

فاصله پورت خروجی کره تا عدسی موازی‌ساز باید به گونه‌ای انتخاب شود که با لحاظ اندازه پورت خروجی، زاویه ظاهری ۰/۵ درجه گردد. مطابق شکل ۱، با توجه به رابطه موجود بین نصف زاویه ظاهری و شعاع تقریباً ۶/۵ سانتی‌متری پورت خروجی کره، فاصله کره تا عدسی موازی‌ساز از رابطه ۱ محاسبه خواهد شد.

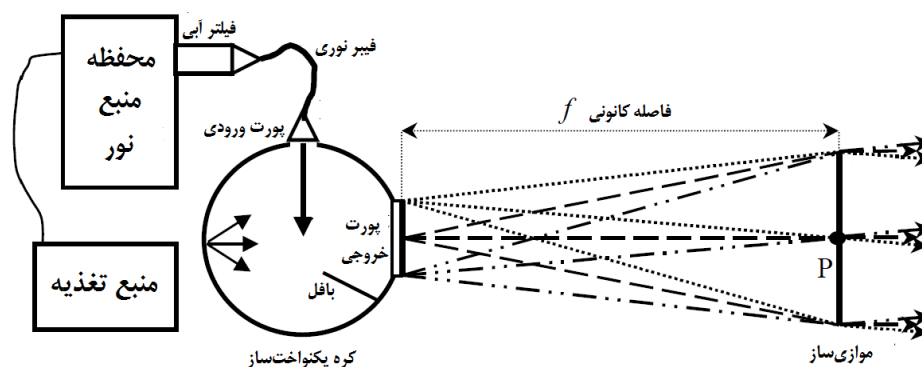
$$\tan. 25^\circ = \frac{6.5}{x} \Rightarrow x = 1489 \approx 1500mm \quad (1)$$

۲-۶. مشخصات عدسی موازی‌ساز انتهایی

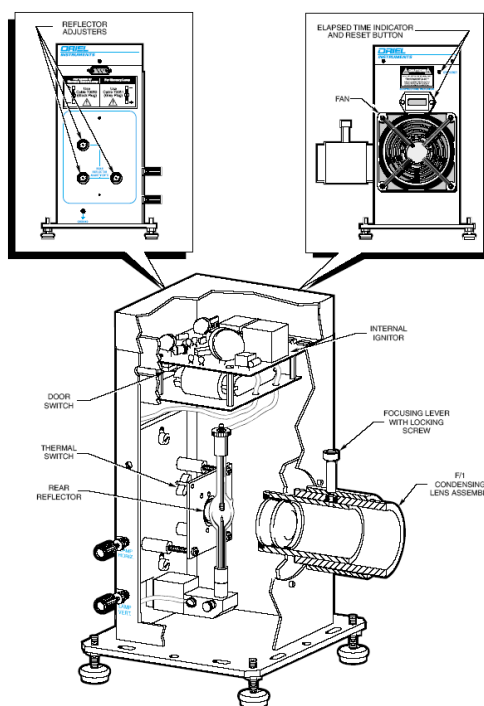
همان‌گونه که گفته شد در حد فاصل کره یکنواخت‌کننده و حسگر از یک عدسی استفاده می‌شود تا پرتوهای خروجی کره به صورت موازی در آیند. چون در محاسبات بخش قبلی فاصله عدسی تا کره ۱۵۰ سانتی‌متر فرض شده است، عدسی انتخابی باید دارای

مورد نظر این آزمایشگاه را عبور دهد. بعد از بررسی‌های فراوان عدسی مدل LB4293 ساخت شرکت تورلیز^۳ انتخاب شد [۱۰].

فاصله کانونی معادل این فاصله باشد. علاوه بر این عدسی مورد نظر باید محدوده فرکانسی فعالیت حسگرهای خورشیدی مختلف



شکل ۱. طرح مفهومی شبیه‌ساز خورشیدی



شکل ۲. نمایی از منبع نوری به کار رفته [۸]

می‌شود. پس از این مرحله شبیه‌ساز کامل آماده کالیبراسیون یکپارچه خواهد بود.

۲-۷. خلاصه مشخصات المان‌های اصلی شبیه‌ساز
با توجه به بخش‌های قبل، خلاصه مشخصات المان‌های اصلی شبیه‌ساز خورشید در جدول ۱ ذکر شده است.

۳-۱. تأمین شرایط محیطی تست

از جمله الزامات آزمون حسگرهای خورشیدی، شبیه‌سازی فضای عملکردی ماهواره است. حسگر خورشیدی در محیط عملکردی خود تنها در مقابل خورشید قرار می‌گیرد و هیچ‌گونه منبع نوری مهم دیگری وجود ندارد. به عبارت دیگر، نور حاصل از منابع نوری دیگر مانند ماه، زمین و سایر اجرام آسمانی به‌عنوان اغتشاش

۳. روند راه‌اندازی و تنظیم سیستم

قبل از انجام آزمایش‌های مربوط به حسگر خورشیدی باید تنظیمات و شرایط اولیه مورد نیاز را تأمین کرد تا بر اساس آن بتوان از صحت شرایط شبیه‌سازی اطمینان حاصل نمود. در ادامه، نحوه تأمین شرایط محیطی تست و تنظیم اجزای شبیه‌ساز بیان

محسوب شده و برای حذف یا کمینه‌کردن آثار آنها راه‌کارهای مناسبی در نظر گرفته می‌شود. برای شبیه‌سازی این شرایط از اتاق تاریک استفاده می‌شود (شکل ۳). در اتاق تاریک سطح داخلی دیوارها و سقف از پوششی مشکی رنگ و کدر که امکان بازتاب نور را حداقل می‌کند، پوشانده شده است و در هنگام تست نیز کلیه منابع نوری داخل اتاق به غیر از شبیه‌ساز خورشید خاموش می‌شوند [۱۱].

۲-۳. تنظیمات میز اپتیکی

میز اپتیکی دارای سطحی مسطح است و سوراخ‌های رزوه‌دار روی آن تعبیه شده تا بتوان اجزای مختلف را با استفاده از پیچ‌هایی با اندازه استاندارد به آن متصل نمود. این میز دارای چهار پایه با قابلیت تغییر ارتفاع در حدود ۱ تا ۲ سانتی‌متر است که برای تراز کردن سطح میز استفاده می‌شود. این میز در محل مناسبی در آزمایشگاه قرار داده می‌شود و سپس سطح میز با استفاده از تراز دیجیتال با دقت یک دهم درجه و با استفاده از پایه‌های مذکور تراز می‌شود [۷].

۳-۳. تنظیمات میز سه‌درجه آزادی

میز سه درجه آزادی در واقع همان مجموعه جهت‌دهی حسگر خورشیدی است که از سه موتور تشکیل شده و در شکل ۴ نشان داده شده است. در این مجموعه از دو موتور پله‌ای برای مانور سمت و بلندی (زوایای α و β) استفاده شده است و موتور سوم نیز برای ایجاد حرکت چرخشی حول محور عمود بر سطح حسگر خورشیدی بکار گرفته شده است. دو موتور اول که برای ایجاد زوایای α و β (زوایای تعیین‌کننده وضعیت بردار عمود بر سطح حسگر نسبت به راستای تابش خورشید) استفاده می‌شوند، دارای دقت 0.015 درجه یا 54 درجه قوسی^۴ در هر گام حرکت هستند. موتور سوم نیز دارای دقت 0.6 درجه در هر گام است و بیشتر به‌منظور بررسی و تحلیل خطای حاصل از چرخش ماهواره یا حسگر خورشیدی حول بردار عمود بر سطح حسگر استفاده می‌شود. موتورها و قطعات رابط مندرج در شکل ۴ از محصولات شرکت استند^۵ انتخاب شده است. پایه این مجموعه به میز اپتیکی متصل شده و اجزای مربوطه روی هم مونتاژ می‌شوند. برای اطمینان از دقت نصب، از تراز دیجیتال با دقت یک‌دهم درجه استفاده می‌شود [۷].

۳-۴. تنظیمات شبیه‌ساز خورشید

شبیه‌ساز خورشید به‌گونه‌ای روی میز اپتیکی قرار می‌گیرد که دریچه خروجی آن مقابل حسگر خورشیدی نصب‌شده روی میز سه درجه آزادی قرار داشته باشد. تنظیم جایگاه، وضعیت و ارتفاع شبیه‌ساز روی میز اپتیکی باید طوری باشد که اولاً مرکز هندسی دریچه خروجی کره، با دقت کمتر از یک سانتی‌متر، مقابل مرکز هندسی دهانه ورودی حسگر خورشیدی باشد؛ زیرا پرتوهای تابشی شبیه‌ساز در محدوده کوچکی حدود یک سانتی‌متر مربع یکنواخت هستند. ثانیاً راستای پرتو خروجی شبیه‌ساز در راستای بردار عمود بر سطح حسگر خورشیدی باشد. تنظیم مراکز هندسی خروجی شبیه‌ساز و دهانه ورودی حسگر با یکدیگر، به‌وسیله تنظیم محل نصب، وضعیت و ارتفاع شبیه‌ساز به‌کمک تجهیزات اندازه‌گیری مانند خط‌کش، کولیس و گونیای موجود در آزمایشگاه با دقت یک میلی‌متر قابل تأمین است [۱۱]. گفتنی است تنظیم راستای پرتو یا کالیبراسیون محوری حسگر و شبیه‌ساز، با دقت مطلوب قدری پیچیده بوده و در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود. پس از تنظیم جایگاه و ارتفاع شبیه‌ساز، بایستی آن را با استفاده از پیچ به میز اپتیکی متصل نمود که امکان تغییر وضعیت را نداشته باشد. پس از نصب شبیه‌ساز خورشید، باید با استفاده از پیچ‌های تنظیم تعبیه‌شده در سمت جانبی شبیه‌ساز، موقعیت لامپ شبیه‌ساز را تنظیم نمود. برای تنظیم موقعیت لامپ باید درب جانبی شبیه‌ساز را برداشته و با پیچ‌های یادشده موقعیت عمودی و افقی لامپ را طوری تنظیم کرد که حباب آن در مرکز لنز خروجی شبیه‌ساز قرار گیرد. البته باید در نظر داشت که در هنگام تنظیم لنز خروجی، لبه‌های کناری نگه‌دارنده لنز به حباب لامپ برخورد نکند. همچنین با استفاده از پیچ‌های تنظیم آیینه بازتابنده پشت لامپ، باید تصویر لامپ در هنگام مشاهده از خروجی شبیه‌ساز، در کنار حباب لامپ قرار گیرد. شکل ۵ منبع نور، فیلتر آبی و کره یکنواخت‌کننده متصل به آن را پس از تنظیم و نصب روی میز اپتیکی نشان می‌دهد.

۳-۵. تنظیم واگرایی پرتوهای شبیه‌ساز

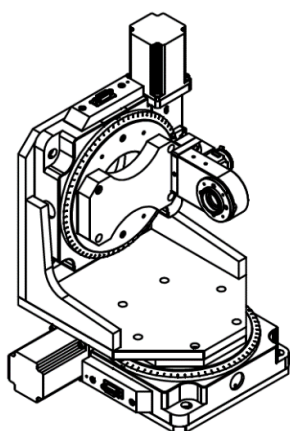
برای تنظیم واگرایی یا همگرایی خروجی شبیه‌ساز باید آن را روشن نموده و با استفاده از عقب و جلو بردن لنز خروجی شبیه‌ساز، واگرایی پرتوهای خروجی را تنظیم کرد. برای اندازه‌گیری واگرایی از تفلونی مسطح و مدرج به شکل مربع به

و به فاصله‌های یک سانتی‌متر، دایره‌هایی هم مرکز نقش شده است که برای اندازه‌گیری قطر محدوده تابشی خروجی شبیه‌ساز استفاده می‌شود.

قطر حدود ۱ متر استفاده می‌شود. تفلون یاد شده در مرکز دارای دریچه‌ای مربع شکل به ابعاد ۱۰ در ۱۰ سانتی‌متر مربع است که به‌منظور کالیبراسیون محوری حسگر و شبیه‌ساز استفاده می‌شود و در بخش بعدی تشریح می‌گردد. برای مدرج‌کردن تفلون، از مرکز

جدول ۱. مشخصات المان‌های شبیه‌ساز خورشیدی

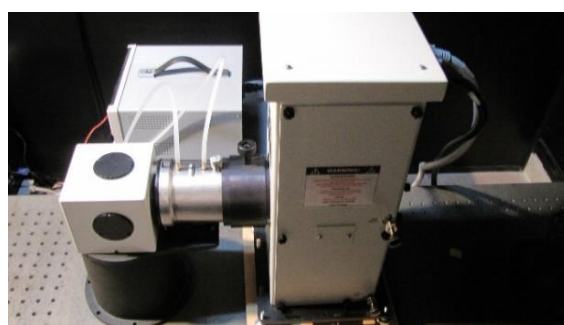
لامپ قوسی		کره یکنواخت‌ساز		عدسی موازی‌ساز	
۱۰۰۰ وات	توان	۱۰۱/۶ میلی‌متر	قطر کره	۵۰/۸ میلی‌متر	قطر
۳۰۰۰ Lumens	فلوی تابشی	۲۵/۴ میلی‌متر	قطر دهانه ورودی	۱۵۰۰ میلی‌متر	فاصله کانونی
۱۰۰۰ ساعت	طول عمر	۱۳/۷ میلی‌متر	قطر دهانه خروجی	۱/۵۱۶۷	ضریب انکسار
		۰/۹۷۷۷۲	ضریب انعکاس		ضخامت مرکزی
۳۸ میلی‌متر	قطر حباب	۲۲/۹۸۱۵	ضریب کره	۶/۴ میلی‌متر	



شکل ۴. مدل سه‌بعدی از میز سه درجه آزادی ساخت شرکت استندا برای تغییر زوایای حسگر خورشیدی



شکل ۳. نمای بیرونی اتاق تاریک



شکل ۵. منبع نور، فیلتر آبی و کره یکنواخت‌کننده

صفحه تفلنی از شبیه‌ساز یکسان باشد، واگرایی شبیه‌ساز صفر خواهد بود. در شبیه‌ساز توسعه یافته این قطر در حدود ۱۳ سانتی‌متر است. برای اندازه‌گیری واگرایی، تفلون به اندازه ۵۵ سانتی‌متر در جهت دور شدن از شبیه‌ساز جابه‌جا شده است. قطر محدوده تابشی در این هنگام حدود ۱۵ سانتی‌متر شده است. با استفاده از دو قطر اندازه‌گیری شده برای محدوده تابش، فاصله ۵۵

برای اندازه‌گیری توازی پرتوهای شبیه‌ساز، ابتدا شبیه‌ساز روشن شده و تفلون مذکور به‌صورت عمود بر میز نوری و در فاصله حدود یک متری خروجی شبیه‌ساز به‌گونه‌ای که مرکز تفلون بر مرکز هندسی خروجی شبیه‌ساز منطبق باشد، قرار می‌گیرد. در این شرایط و با استفاده از دایره‌های مدرج، قطر محدوده تابش شبیه‌ساز اندازه گرفته می‌شود. چنانچه این قطر در فواصل مختلف

سانتی‌متری و روابط مثلثاتی، واگرایی پرتوهای خروجی تقریباً یک درجه می‌باشد. این واگرایی در دو راستای افقی و عمودی تقریباً یکسان است. واگرایی یک درجه در مقایسه با شبیه‌ساز خورشیدی ارائه‌شده توسط شرکت اپتیکال انرژری که برای کالیبراسیون حسگر خورشیدی ساخت این شرکت عرضه شده و در آزمایشگاه مجتمع هوافضا نیز موجود است [۶]، بسیار بهتر است. بر اساس اطلاعات ارائه‌شده توسط شرکت اپتیکال انرژری، شبیه‌ساز عرضه شده دارای $3/5$ درجه واگرایی در راستای عمودی و $0/7$ درجه واگرایی در جهت افقی است [۴]. گفتنی است واگرایی یک درجه با توجه به واگرایی شبیه‌ساز شرکت اپتیکال انرژری برای کاربرد مورد نظر این مقاله مناسب به نظر می‌رسد.

۴. کالیبراسیون محوری حسگر و شبیه‌ساز منبع نور

منظور از کالیبراسیون محوری، همان‌گونه که در بخش‌های پیش نیز اشاره شد، قرار گرفتن راستای پرتو تابشی خروجی شبیه‌ساز در راستای بردار عمود بر دهانه ورودی حسگر خورشیدی است. برای رسیدن به دقت بهتر از $\pm 0/3$ درجه در حسگر خورشیدی، مراحل زیر برای کالیبراسیون محوری پیشنهاد می‌گردد.

۴-۱. مرحله اول: تنظیم راستای پرتو تابشی با بردار عمود بر حسگر

در این روش از یک صفحه درجه‌دار مانند تفلون مدرج یاد شده در بخش پیشین استفاده می‌شود. چنانچه درجه در محل مناسب قرار گرفته باشد، نور بازتاب شده از حسگر دوباره از درجه تعبیه‌شده عبور خواهد نمود. بنابراین ابتدا صفحه تفلونی به صورت عمود روی میز نوری در مقابل شبیه‌ساز قرار داده می‌شود. مرکز هندسی درجه به ابعاد اولیه ده در ده سانتی‌متر مربع باید در مقابل مرکز هندسی دهانه خروجی شبیه‌ساز قرار گیرد. گفتنی است ابعاد این درجه در ابتدا بزرگ در نظر گرفته شده تا امکان تنظیم چشمی توسط کاربر وجود داشته باشد. این ابعاد در ادامه برای تنظیم دقیق‌تر کاهش خواهد یافت. پس از تنظیم اولیه، بایستی ابعاد درجه تا حدود یک در یک سانتی‌متر مربع کاهش یابد تا به اندازه تقریبی شیشه نصب‌شده روی درجه ورودی حسگر خورشیدی برسد. از این درجه برای تنظیم دقیق‌تر استفاده می‌شود. برای این منظور بهتر است مربعی از جنس تفلون به ابعاد ده در ده سانتی‌متر مربع که دارای درجه‌ای در مرکز به ابعاد یک

در یک سانتی‌متر مربع است، تهیه کرده و داخل درجه صفحه تفلونی مدرج قرار داد. در این صورت وقتی شبیه‌ساز روشن است، بخشی از پرتو تابشی شبیه‌ساز می‌تواند از درجه تفلون عبور کند و به سطح دهانه حسگر خورشیدی بتابد. چون در سطح دهانه ورودی حسگر خورشیدی شیشه قرار داده شده است، پرتو تابیده، بازتابیده شده و اگر بردار عمود بر دهانه حسگر، در راستای پرتو تابیده شده نباشد، نور بازتاب شده روی سطح تفلون مدرج قابل رویت خواهد بود. چنانچه لکه نوری روی صفحه تفلونی مشاهده شود، با حرکت دو موتور اول و دوم می‌توان راستای حسگر را به‌گونه‌ای تنظیم کرد که نور بازتابیده از درجه تفلون خارج شود. گفتنی است با توجه به فاصله یک متری صفحه تفلون و شیشه ورودی حسگر خورشیدی و ابعاد یک سانتی‌متری درجه، دقت تنظیم راستای پرتو تابشی با بردار عمود بر حسگر حدود $0/6$ درجه است که برای آزمایش حسگرهایی با دقت حداکثر $\pm 0/3$ درجه مناسب است.

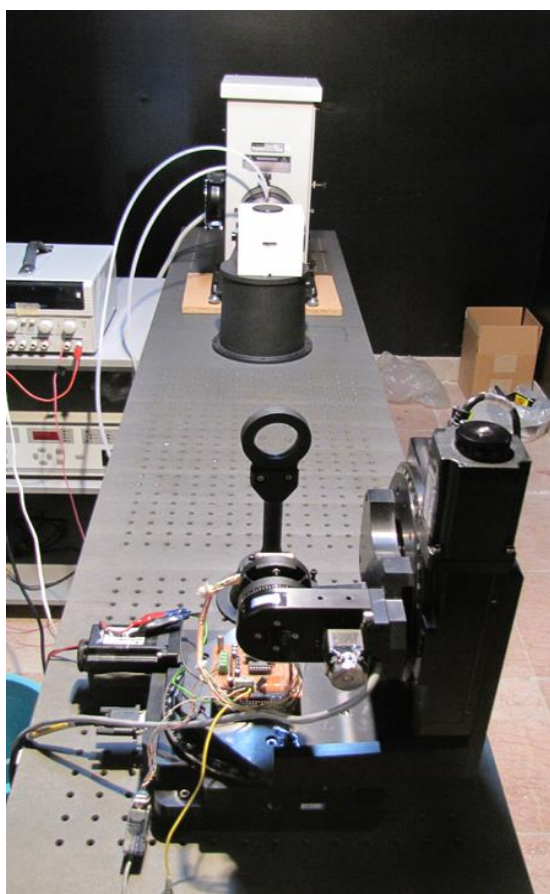
۴-۲. مرحله دوم: بررسی دقت نصب حسگر به میز سه درجه آزادی

برای این منظور، پس از انجام مرحله اول، حسگر خورشیدی حول محور خود دوران داده می‌شود. این دوران با استفاده از موتور سوم که عامل ایجاد چرخش محوری است انجام می‌گیرد. هنگام چرخش محوری حسگر، نباید نور بازتاب‌شده روی صفحه تفلون مدرج تغییر جای بدهد. اگر نور بازتابی روی صفحه در هنگام چرخش محوری حسگر خورشیدی تغییر مکان بدهد به این معنا است که دقت نصب حسگر به میز سه درجه آزادی مناسب نیست. در این صورت، نصب دقیق حسگر خورشیدی به میز سه درجه آزادی با استفاده از تراز دیجیتال با دقت $0/1$ درجه و طبق توضیح مرحله سوم تکرار می‌گردد.

۴-۳. مرحله سوم: نصب دقیق حسگر روی میز

برای این منظور می‌توان از تعدادی واشر در بین حسگر و موتور سوم بهره برد. پس از نصب دقیق حسگر، دو مرحله اول دوباره تکرار می‌شوند. مراحل سه‌گانه فوق تا جایی تکرار می‌شوند که نور بازتاب‌شده روی صفحه تفلون مدرج، در هنگام چرخش محوری حسگر خورشیدی تغییر جای ندهد. در این صورت می‌توان مطمئن بود که دقت تنظیم محوری و نصب، بهتر از $0/6$ درجه است.

ساخت شرکت تی.ان.او. به عنوان حسگر مرجع مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از برنامه طراحی شده در لب ویو برای کنترل موتورها و داده برداری، حسگر خورشیدی در گستره $\pm 35^\circ$ درجه حول محورهای سمت و بلندی (زوایای α و β) و با گام‌های ۵ درجه‌ای مقابل شبیه‌ساز خورشیدی دوران کرده و خروجی حسگر نمونه برداری و ثبت می‌شود [۱۲]. شکل‌های ۷ و ۸، نتایج اجرای الگوریتم محاسبه زوایای α و β را که در برگه اطلاعاتی همراه حسگر موجود است، از روی خروجی‌های حسگر خورشیدی نشان می‌دهد. تصویر بالایی شکل ۷، زاویه α مرجع که از طریق موتورها محقق شده است را با زاویه α محاسبه شده توسط الگوریتم از روی خروجی‌های حسگر مقایسه می‌نماید. تصویر پایینی نیز، مقایسه مشابه را در خصوص زاویه β نشان می‌دهد.



شکل ۶. نمای درونی آزمایشگاه تست و کالیبراسیون حسگر خورشیدی

شکل ۸ خطا؛ یعنی اختلاف بین زوایای مرجع و زوایای محاسبه شده از روی حسگر خورشیدی را مطابق با شکل ۷ نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، خطای خروجی حسگر بدون جدول کالیبراسیون در ناحیه $\pm 1/5^\circ$ درجه قرار دارد. به صورت

۴-۴. مرحله چهارم: تنظیم مرکز هندسی درجه ورودی

حسگر بر محور چرخش موتور سوم میز سه درجه آزادی

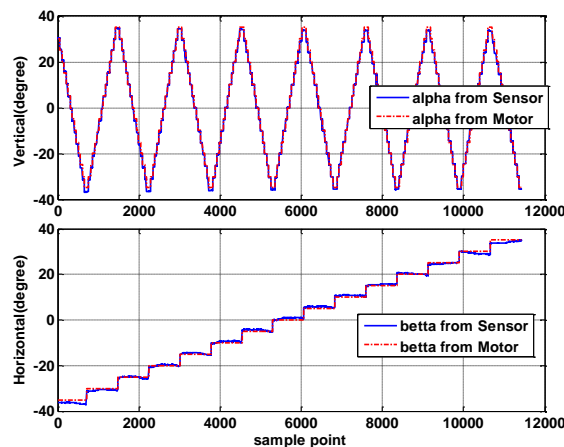
پس از انجام مراحل سه‌گانه فوق، برای بررسی هم‌مرکز بودن محور چرخش حسگر (محور چرخش موتور سوم) و مرکز هندسی دهانه خروجی حسگر خورشیدی، به یکی از دو موتور اول میز سه درجه آزادی کمی انحراف داده می‌شود. در این صورت نور بازتابیده روی صفحه نفولن مدرج قابل رؤیت خواهد بود و به عبارت دیگر از درجه صفحه تفلنی عبور نخواهد کرد. در این حالت، هنگام چرخش حسگر خورشیدی حول محور چرخش موتور سوم، نور بازتاب شده یک مسیر دایروی را روی صفحه خواهد پیمود. اگر مرکز مسیر دایروی پیموده شده با نور بازتابی، بر مرکز درجه تعبیه شده در صفحه مدرج منطبق باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مرکز هندسی درجه ورودی حسگر بر مرکز چرخش میز سه درجه آزادی (نقطه تلاقی سه محور دوران سه موتور میز سه درجه آزادی) منطبق است. در غیر این صورت باید رابط نصب حسگر با موتور سوم با دقت بیشتری طراحی، ساخته و نصب شود. همچنین باید دوباره عمل نصب و تنظیمات نصب موتور دوم روی موتور اول و همچنین موتور سوم روی موتور دوم با تراز دیجیتال با دقت بالاتر از $0/1^\circ$ درجه تکرار شود. مراحل چهارگانه فوق تا جایی تکرار می‌شود که مرکز هندسی درجه ورودی حسگر بر مرکز چرخش میز سه درجه آزادی منطبق گردد. با انجام این مراحل می‌توان اطمینان حاصل نمود که مجموعه تنظیم شده دارای دقت مناسب برای آزمایش بر روی حسگرهای خورشیدی تا دقت $\pm 0/3^\circ$ درجه می‌باشد. باید در نظر داشت که انجام روند کالیبراسیون فوق مستلزم صرف وقت و هزینه به‌ویژه در هنگام تکرار طراحی و ساخت رابط نصب حسگر به موتور سوم می‌باشد.

۵. نتایج آزمایش و اعتبارسنجی عملکرد شبیه‌ساز

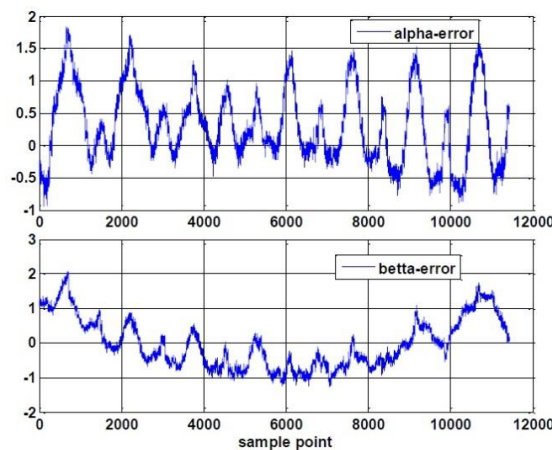
شبیه‌ساز خورشیدی توسعه یافته در این مقاله، که برای تست و کالیبراسیون حسگرهای خورشیدی به کار گرفته می‌شود، در شکل ۶ نمایش داده شده است. برای اطمینان از صحت عملکرد این شبیه‌ساز می‌توان دقت تعیین وضعیت توسط حسگر مرجع را بررسی نمود. این حسگر توسط سازنده کالیبره شده و دقت مطلوب آن تضمین شده است. چنانچه تعیین وضعیت توسط این حسگر از دقت مورد نظر برخوردار باشد می‌توان از صحت کالیبراسیون شبیه‌ساز اطمینان حاصل کرد. برای این منظور حسگر خورشیدی

۹، زاویه α مرجع که از طریق موتورهای محقق شده است و زاویه α محاسبه‌شده از روی خروجی‌های حسگر را بر اساس جدول کالیبراسیون نشان می‌دهد. تصویر پایینی نیز، زاویه β مرجع که از طریق موتورهای محقق شده است و زاویه β محاسبه‌شده با الگوریتم از روی خروجی‌های حسگر را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ نیز خطاهای تخمین زوایای α و β با استفاده از جدول کالیبراسیون را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود بیش از ۹۹ درصد داده‌های مربوط به خطای زوایای α و β در محدوده ± 0.5 درجه قرار دارند که با مشخصات حسگر مطابقت دارد [۱۲].

آمارای حدود ۹۹ درصد داده‌های مربوط به خطای زاویه α در تصویر بالایی شکل ۸ در بازه $\pm 1/5$ قرار دارد. همچنین حدود ۹۷/۷ درصد داده‌های مربوط به خطای زاویه β در تصویر پایینی شکل ۸ در بازه $\pm 1/5$ قرار دارد که با اطلاعات ارائه‌شده در کاتالوگ حسگر مطابقت دارد. در ادامه آزمایش دیگری در شرایط حرکتی همانند آزمایش اول و با استفاده از جدول کالیبراسیون ارائه‌شده توسط سازنده حسگر خورشیدی انجام گردید. شکل‌های ۹ و ۱۰ نتایج پیاده‌سازی الگوریتم محاسبه زوایای خروجی حسگر را بر اساس جدول کالیبراسیون نشان می‌دهد. تصویر بالایی شکل



شکل ۷. مقایسه زوایای مرجع و زوایای محاسبه‌شده از روی خروجی‌های حسگر خورشیدی مرجع در صورت عدم استفاده از جدول کالیبراسیون

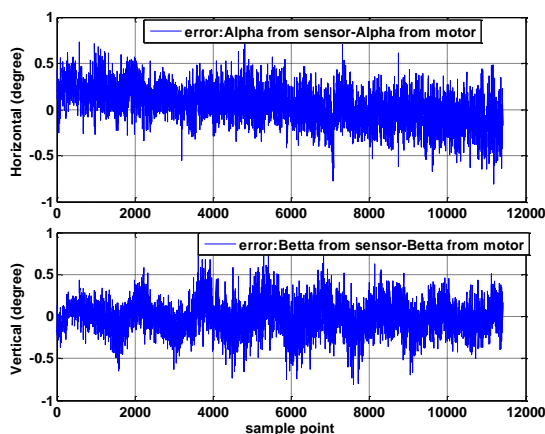


شکل ۸. تصویر بالا: خطای تعیین زاویه سمت توسط حسگر مرجع مطابق با تصویر بالای شکل ۷
تصویر پایین: خطای تعیین زاویه بلندی توسط حسگر مرجع مطابق با تصویر پایین شکل ۷

۲۵۰۰ نانومتر و یکنواختی در محدوده حسگر بهتر از ۹۰ درصد می‌باشد. گفتنی است چنانچه از کره یکنواخت‌کننده استفاده شود با توجه به واگرایی نور خروجی کره، رسیدن به توان پرتوهای خورشید در فاصله مورد نظر غیرممکن می‌باشد. چنانچه کره حذف شود از یکنواختی نور کاسته شده اما توان مورد نظر تأمین می‌شود.

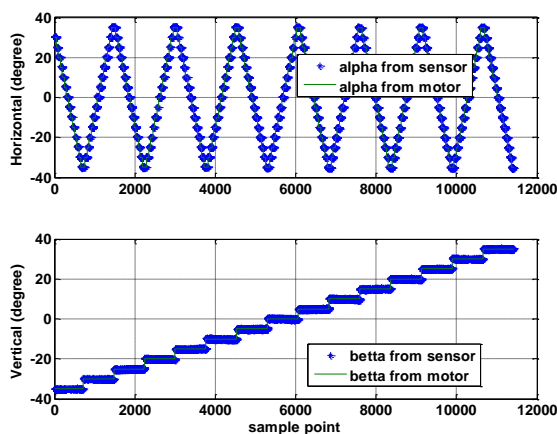
در جدول ۲ شبیه‌ساز تشریح‌شده با نمونه‌های معرفی‌شده در بخش مقدمه مقایسه شده‌اند. در مجموع، شبیه‌ساز دانشگاه صنعتی مالک اشتر توانسته است مشخصات بیشتری از نور خورشید را شبیه‌سازی نماید. در این شبیه‌ساز، زاویه ظاهری 0.5 درجه، واگرایی پرتوها کمتر از یک درجه، طیف پرتوها در محدوده 200 تا

مربع است. سایر مشخصات براساس روندی که در طول مقاله توضیح داده شده است، اندازه‌گیری شده است. جدول ۲ خلاصه اطلاعات ارائه شده در مقدمه مقاله حاضر برای معرفی هر یک از شبیه‌سازها می‌باشد و مشخصات دقیق‌تری در مراجع مربوطه موجود نیست. گفتنی است بخشی از این مشخصات به صراحت در مراجع بیان نشده است و از تحلیل ساختار و اجزای انتخاب شده برای شبیه‌ساز استخراج شده است.



شکل ۱۰. خطای تعیین زاویه سمت توسط حسگر مرجع مطابق با تصویر بالای شکل ۹ (تصویر بالا)؛ خطای تعیین زاویه بلندی توسط حسگر مرجع مطابق با تصویر پایین شکل ۹ (تصویر پایین)

باید توجه داشت که عدم شبیه‌سازی توان پرتوهای خورشید در محل نصب حسگر، بر عملکرد حسگرهای دیجیتال تأثیری ندارد. همچنین در نمونه‌های زیادی از حسگرهای خورشیدی آنالوگ نیز با توجه به تفاضلی بودن الگوریتم تعیین وضعیت، عدم تولید توان معادل خورشید در محل حسگر بر عملکرد حسگر مؤثر نمی‌باشد. توان این شبیه‌ساز بدون حضور کره یکنواخت‌کننده توسط هلیومتر اندازه‌گیری شده و در فاصله یک متر بیش از ۱۳۵۷ وات بر متر



شکل ۹. مقایسه زوایای مرجع و زوایای محاسبه شده از روی خروجی‌های حسگر خورشیدی مرجع در صورت استفاده از جدول کالیبراسیون حسگر خورشیدی

جدول ۲. مشخصات شبیه‌سازهای خورشیدی

شبه‌ساز	زاویه ظاهری	واگرایی پرتوها	طیف تولیدی	توان تولیدی (وات بر متر مربع)	یکنواختی پرتو
آموزشگاه مهندسی هوانوردی و مکانیک کره	متفاوت از خورشید	وابسته به رفلکتور	طیف خورشید	۱۳۵۷	ندارد
دانشگاه مهندسی تورنتو	متفاوت از خورشید	وابسته به رفلکتور	طیف خورشید	۱۳۵۷	ندارد
مرکز تحقیقاتی ناسا - الین	۰/۵ درجه	ناچیز	طیف ایزر	۲۷۰	۸۰
دانشگاه هاربرگ هامبورگ	متفاوت از خورشید	بزرگتر یا مساوی با ۱/۷ درجه [*]	طیف خورشید	۱۳۵۷	ندارد
مجتمع دانشگاهی هوافضا	۰/۵ درجه	کوچکتر یا مساوی با ۱ درجه	طیف خورشید	۱۳۵۷ ^{**}	۹۰

^{*} واگرایی پرتوها در شبیه‌ساز دانشگاه هاربرگ هامبورگ در یک راستا ۱/۷ درجه و در راستای دیگر ۳ درجه می‌باشد [۴]
^{**} طبق توضیحات فوق، چنانچه کره یکنواخت‌کننده در مسیر نور تولیدی بکار گرفته شود، با توجه به واگرایی نور خروجی کره، رسیدن به توان پرتوهای خورشید در فاصله مورد نظر غیر ممکن می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله علاوه بر ارائه طرح تفصیلی شبیه‌ساز خورشید و نحوه تنظیم هر یک از اجزای آن، الگوریتمی برای تنظیم و کالیبراسیون توام میز، شبیه‌ساز حرکت وضعی و منبع نور تحت عنوان کالیبراسیون محوری حسگر و شبیه‌ساز پیشنهاد شد. برای اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی و اثبات صحت عملکرد شبیه‌ساز توسعه یافته، دقت تعیین وضعیت توسط یک حسگر خورشیدی

مرجع در یک مانور طولانی مدت مورد بررسی قرار گرفت. دقت تعیین وضعیت توسط این حسگر نشان‌دهنده توانایی شبیه‌ساز برای تست و کالیبراسیون حسگرهای خورشیدی با دقت ۰/۵ درجه می‌باشد. گفتنی است این شبیه‌ساز توانایی شبیه‌سازی طیف، زاویه ظاهری، توازی و یکنواختی پرتوهای خورشید را دارا بوده و در زمره بهترین شبیه‌سازهای خورشید محسوب می‌شود. اثبات

ساخت ابزارهایی برای اندازه‌گیری دقیق‌تر میزان توازی و یکنواختی پرتوهای شبیه‌ساز می‌باشد.

قدردانی

بدین‌وسیله از ریاست محترم و کارشناسان عزیز دفتر امور فضایی وابسته به مؤسسه آموزشی و تحقیقاتی صنایع دفاعی برای تأمین اعتبار مورد نیاز راه‌اندازی این آزمایشگاه، ارزیابی‌های دوره‌ای و ارائه نقطه‌نظرات فنی کمال تشکر به عمل آمده و از اینکه به دلائل حفاظتی از اعلام اسامی افراد خودداری شده است، عذرخواهی می‌شود.

قابلیت شبیه‌ساز در تست و کالیبراسیون حسگرهای خورشیدی با دقت بیشتر مستلزم وجود حسگر مرجع دقیق‌تر می‌باشد. از سوی دیگر هر چند با توجه به مشخصات شبیه‌ساز و آزمون‌های انجام گرفته می‌توان از امکان تست حسگرهای خورشیدی اطمینان داشت، لکن ارزیابی یک حسگر دیجیتال می‌تواند توانایی شبیه‌ساز را در این‌خصوص نیز اثبات نماید. این موارد از جمله فعالیت‌هایی است که به‌دلیل عدم دسترسی به حسگرهای مناسب در آینده دنبال خواهند شد. افزایش دقت سیستم می‌تواند با ارتقای بعضی بلوک‌ها از قبیل بهبود عدسی موازی‌ساز و افزایش دقت میز سه درجه آزادی نیز دنبال گردد. از فعالیت‌های مهم آتی، طراحی و

۷. مأخذ

- [1] Y. K. Chang, M. Y. Yun, B. H. Lee, A new modeling and validation of two-axis miniature fine sun sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 134, No. 2, pp. 357-365, 2007.
- [2] J. Enright, D. Sinclair, Algorithm enhancements for the SS-411 digital sun sensor, 2007.
- [3] I. Shafer, C. Powell, J. Stanton, D. Grieneisen, CubeSat Solar Sensor Final Report, Olin-NASA Research Group, [online], <http://ece.olin.edu/nasa/projects/2008/sos/files/SOSReport.Pdf>, 2008 (Accessed 12 April 2011).
- [4] I. Maqsood, T. Akram, Development of a low cost sun sensor using quadphotodiode, In Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2010 IEEE/ION, pp. 639-644, IEEE, 2010.
- [5] G. Rufino, M. Grassi, A. Perrotta, Development and Validation of a Modern CMOS Digital Sun Sensor at UniNa, In Proceedings of the 6th International Conference on Dynamics and Control of Systems and Structures in Space, pp. 427-436, 2004.
- [6] A. H. Tavakkoli, M. Yazdani, Y. Koolivand, M. Shahravi, M. Momeni, S. M. M. Dehghan, Designing and Evaluation of an Experimental Attitude Determination system Using Sun Sensor and Magnetometer, *Journal of Spacecraft Science and Technology*, Vol. 5, No. 4, pp. 69-78, 1391. (in Persian)
- [7] M. Momeni, M. Charkhgard, S.M.M. Dehghan, A. Abdollahi, Designing, Implementation and Installation of Sun Simulator and 3DoF Motion Simulator in order to sun sensor test and calibration, Internal report of Aerospace Research complexity, Malek-Ashtar University of Technology, 1393. (in Persian)
- [8] www.Newport.com (accessed dec 20, 2018).
- [9] www.labsphere.com (accessed dec 20, 2018).
- [10] www.ThorLabs.com (accessed dec 20, 2018).
- [11] M. Momeni, M. Charkhgard, Instruction Manual for Installation and Test of Sun Sensor in Dark Room, Internal report of Aerospace Research complexity, Malek-Ashtar University of Technology, 1394. (in Persian)
- [12] M. Momeni, M. Charkhgard, Designing and Development of a Sun Sensor and its Calibration Table, 13th Iranian Aerospace Conference, Tehran, 1392. (in Persian)

پی‌نوشت

1. Optical Energy
2. Newport
3. Thorlabs
4. Arcsec
5. Standa