

تأثیر محفظه اپتیکی در کاهش نورهای سرگردان محموله اپتیکی فضایی

محمد اسد نژاد^۱، عبدالله اسلامی مجد^{۲*}، حسن حاج قاسم^۳

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۳- دانشیار دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۵/۰۷/۰۹، پذیرش: ۹۵/۱۰/۰۱)

چکیده

در این مقاله به شبیه‌سازی نورهای سرگردان در سامانه اپتیکی دوربین ماهواره سنجش از دور پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا نورهای سرگردان، منابع تولید و آثار مخرب آن‌ها بر کیفیت تصویر، مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهای مختلفی برای مقابله با این نورها ارائه شده است. در مرحله بعد تأثیر محفظه اپتیکی و پوشش‌های سطحی بر عملکرد نورهای سرگردان در دوربین ماهواره با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت طرح بهینه شامل مجموعه‌ای از روش‌های مختلف برای بهبود عملکرد دوربین، انتخاب شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با استفاده از این روش‌ها، نورهای سرگردان در محل آشکارساز، در زاویه‌های بزرگ به طور کامل حذف شده و در زاویه‌های نزدیک به میدان دید میزان نورهای سرگردان حداکثر تا ۱۰۰ هزار برابر تضعیف شده‌اند. همه این دستاوردها در شرایطی محقق شدند که هیچ‌گونه اختلالی در میدان دید دوربین به وجود نیامده است.

کلید واژه‌ها: نور سرگردان، دوربین ماهواره، ردیابی پرتو، سنجش از دور، کیفیت تصویر، محفظه اپتیکی

Effect of Optical Housing to Reduce Stray Light in Space Optical Payload

M. Asadnezhad, A. Eslami Majd*, H. HajGhasem

Maleke-ashtar University of Technology

(Received: 30/09/2016; Accepted: 21/12/2016)

Abstract

In this paper, stray lights in optical system of remote sensing satellite camera is simulated. For this purpose, stray lights, sources of production and their destructive effects on the image quality is studied. Moreover, mechanisms to deal with these unwanted lights are presented. Then, the effect of optical housing and surface coatings on the performance of stray light in satellite camera, has been studied by the results of the simulation. Finally an optimal design includes a set of different techniques for improving the performance of the considered camera was selected. Simulation results show that by this method, at large angles, stray lights can be completely eliminated whereas at angles near the FOV, stray lights intensities can be very much reduced namely up to 100000 times of their original intensity without almost no serious disturbance in the camera's field of view.

Keywords: Stray Light, Satellite Camera, Ray Tracing, Remote Sensing, Image Quality, Detector, Optical Housing.



شکل ۱. نورهای سرگردان حاصل از خورشید که به دلیل کوتاه بودن سپر اپتیکی، منجر به درخشندگی ایجاد شده در تصویر شده است [۹]

مفهوم نورهای سرگردان در سامانه‌های اپتیکی از سال ۱۹۲۰ تاکنون مورد تجزی و تحلیل قرار گرفته است [۲ و ۴]. از اواخر دهه ۱۹۸۰، انجمن بین‌المللی اپتیک و فوتونیک (SPIE)^۲، به طور یک سال در میان کنفرانس‌های بین‌المللی در زمینه نورهای سرگردان برگزار می‌کند [۲]. در سال ۱۷۴۱ لئونارد اویلر در یک جزوه آموزشی [۱۴ و ۱۵] با عنوان "موارد احتیاط در ساخت تلسکوپ رعایت شود" توصیه‌هایی را جهت مقابله با نورهای سرگردان در تلسکوپ ارائه نمود. در سال ۲۰۰۶ تأثیر نورهای سرگردان در دوربین ماهواره CIBERS بررسی و در نهایت یک سپر نوری جهت کاهش این اثرات به دوربین متصل شد [۱۳]. در سال ۲۰۱۱ تیمی متشکل از مجتمع فناوری اپتیک ماهواره و مجتمع رایانه و الکترونیک در کره جنوبی به تحلیل نورهای سرگردان در دوربین ماهواره KARI پرداختند [۱]. در سال‌های اخیر توجه به استفاده از پوشش‌های ضد بازتاب و جاذب فوق سیاه (ماده‌ای که تا حدود ۹۹٪ نور را جذب می‌کند) در مبحث نورهای سرگردان افزایش یافته است، به طور مثال در سال ۲۰۱۵ در رژیم اشغالگر اسرائیل تحقیقی روی استفاده از پوشش نانولوله‌های کربنی روی سطوح اپتیکی جهت کاهش نورهای سرگردان انجام گرفته است [۱۶]. با این وجود تاکنون در ایران فعالیتی در این زمینه انجام نشده است.

در این تحقیق تلاش شده تا خلاصه‌ای از نتایج مهم علمی ارائه شود، سپس این اصول و فرضیه‌های علمی در مهندسی سامانه اپتیکی دوربین ماهواره‌ای که در طیف مرئی از زمین تصویربرداری می‌کند، به کار گرفته شده و نورهای سرگردان در آن تا حد ممکن کاهش یابد. برای این منظور ابتدا اجزای اپتیکی دوربین مدل‌سازی شده و سپس به بررسی تأثیر محفظه اپتیکی در مقابله با نورهای سرگردان پرداخته شده است. بر این اساس دو نوع محفظه مناسب برای دوربین طراحی شده و از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در ادامه تأثیر خواص پراکندگی سطح و همچنین لایه‌نشانی پوشش‌های مختلف

۱. مقدمه

امروزه، با پیشرفت‌های فناوری فضایی، دوربین‌های ماهواره وارد فضای رقابتی‌تری شده‌اند که زمینه را برای بهبود هر چه بیشتر سامانه‌های سنجش از دور فضایی فراهم کرده است [۱]. در این میان، مقابله با نورهای سرگردان^۱ جهت بهبود کیفیت تصویر، امری اجتناب ناپذیر است. زیرا در طول تصویربرداری توسط دوربین ماهواره، ممکن است کیفیت تصویر به صورت ناگهانی توسط منابع نور سرگردان کاهش یابد. این نورهای سرگردان می‌توانند منجر به تضعیف (محو) سیگنال و کاهش رزولوشن پذیرایی شده و نتایج رادیومتری را دچار مشکل نمایند [۵-۱].

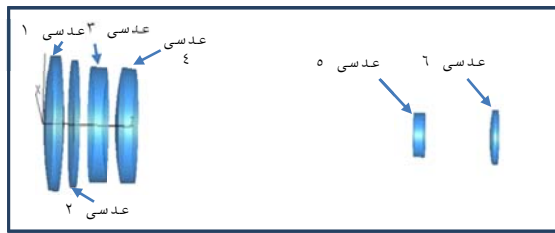
نورهای سرگردان، نورهای ناخواسته‌ای هستند که در محل آشکارساز در یک سامانه تصویربرداری دریافت شده و موجب کاهش کیفیت تصویر می‌شوند. این نورها که نامسجم و گسسته‌اند، از مسیر عبور معمولی پرتوهای نور به درون سامانه تصویربرداری پیروی نمی‌کنند [۹-۱] و از منابع متفاوتی تولید می‌شوند [۹-۱۳] که بسته به نوع سامانه و محدوده طیفی که در آن تصویربرداری می‌کند، هر کدام از آن‌ها می‌توانند اهمیت بیشتری پیدا کنند. به عنوان مثال در محدوده مرئی، نورهای سرگردانی که توسط منابع خارج از میدان دید تولید می‌شوند، اهمیت بیشتری دارند.

سامانه تصویربردار ماهواره‌ای، با توجه به دو عامل اصلی، ماهواره در معرض مقادیر متفاوتی از نورهای سرگردان قرار دارد. عامل اول مدار چرخش ماهواره به دور زمین است. ارتفاع مدار، شکل و نحوه چرخش ماهواره در مدار از جمله موارد مؤثر در میزان نورهای سرگردان دریافتی در سامانه است. دومین عامل مؤثر، سازوکار حرکتی ماهواره جهت نظارت از روی زمین است. برای ایجاد ارتباط با ماهواره از روی زمین و نظارت بر عملکرد آن لازم است تا ماهواره تحت موقعیت و یا حالت خاصی نسبت به زمین قرار گیرد. این سازوکار حرکتی ماهواره می‌تواند اجزای سامانه تصویربرداری را در معرض میزان متفاوتی از نورهای سرگردان قرار دهد. با توجه به اینکه در این مقاله هدف کاهش نورهای سرگردان محموله اپتیکی ماهواره در مدار LEO است، بنابراین موقعیت خورشید نسبت به دوربین در طول سال تقریباً از ۱۴ تا ۲۹/۱ درجه تغییر می‌کند [۱۳]. با این وجود، از زاویه ۱۴ درجه میزان نورهای مزاحم خورشیدی به شدت افزایش می‌یابد و باید در فرایند طراحی و تحلیل نورهای سرگردان این نکته مورد توجه قرار بگیرد.

نمونه‌ای از آثار مخرب نورهای سرگردان بر تصویر حاصل از یک دوربین فضایی در شکل (۱) نشان داده شده است.

² International Society for Optic & Photonic

¹ Stray light

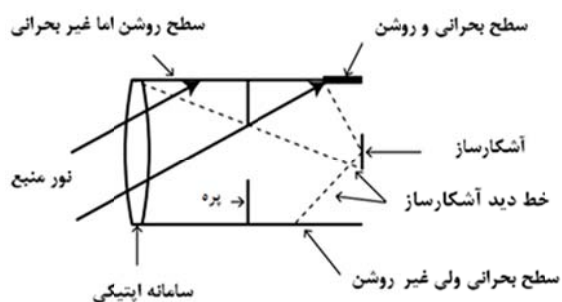


شکل ۲. مدل‌سازی اجزای اپتیکی در TracePro

۲-۲. طراحی و مدل‌سازی محفظه دوربین

منظور از محفظه اپتیکی در واقع ساختارهای غیر اپتیکی جهت نگهداری اجزای اپتیکی است. طراحی این ساختارها از آن جهت دارای اهمیت است که هر گونه پراکندگی از سطح آن‌ها، منجر به تولید نورهای سرگردان می‌شود. به علاوه، این ساختارها باید به نحوی طراحی شوند که تحمل تنش‌های حرارتی، فشار و شوک ناشی از لحظه پرتاب را داشته باشند. همچنین موقعیت قرارگیری اجزای اپتیکی درون محفظه باید با دقت بسیار زیادی طراحی شود. زیرا در غیر این صورت پس از نصب اجزای اپتیکی، فاصله و موقعیت آن‌ها نسبت به یکدیگر تغییر کرده و نتایج محاسبات را با مشکل مواجه می‌کند.

علاوه بر شکل هندسی محفظه اپتیکی، رفتار سطوح داخلی آن می‌تواند تأثیر زیادی در تولید و رسیدن نورهای سرگردان به آشکارساز داشته باشد. به همین دلیل معمولاً سطوح مختلف در یک سامانه اپتیکی مطابق شکل (۳) در قالب دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند [۹]. دسته اول سطوح بحرانی هستند. سطوح بحرانی به سطوحی گفته می‌شود که به طور مستقیم در معرض دید آشکارساز باشند. به عبارتی پرتوهای بازتاب شده از این سطوح بدون واسطه و به طور مستقیم می‌توانند به آشکارساز برسند. دسته دوم نیز سطوح روشن هستند که به طور مستقیم توسط منابع نور سرگردان خارجی روشن می‌شوند. هر گونه پراکندگی نور از این سطوح، در صورت رسیدن به آشکارساز به شدت منجر به افت کیفیت تصویر می‌شود. علاوه بر نحوه طراحی محفظه اپتیکی، روش دیگری که می‌تواند به جلوگیری از روشن شدن سطوح مختلف در محفظه کمک کند، طراحی سپرهای اپتومکانیکی است که در اینجا به آن پرداخته نمی‌شود.



شکل ۳. سطوح روشن و بحرانی [۹]

سطحی در سطوح اپتیکی و غیر اپتیکی در هر دو محفظه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن توسط شبیه‌سازی نرم‌افزاری مورد تحلیل قرار گرفته است. در واقع سعی شده است با طراحی دقیق و مناسب محفظه‌ها و استفاده از لایه نشانی‌های استاندارد، مفید و در دسترس با کمترین پیچیدگی، نورهای سرگردان را به اندازه کافی کاهش داد.

۲. فرایند تحلیل و کنترل نورهای سرگردان

یکی از بهترین روش‌های تحلیل نورهای سرگردان، استفاده از روش ردیابی پرتو^۱ به کمک نرم‌افزارهای تحلیل نور است. البته با ایجاد یک مدل ریاضی از عملکرد نورهای سرگردان در سامانه نیز می‌توان به تحلیل نورهای سرگردان پرداخت، اما تحلیل نورهای سرگردان در یک سامانه بسیار ساده، حتی با دقت بسیار کم نیز به معادلات پیچیده‌ای منتج می‌شود. بنابراین امروزه حتی جزئی‌ترین موارد مرتبط با نورهای سرگردان نیز در نرم‌افزارهای تحلیل نور انجام می‌شود [۹]. سه تا از بهترین نرم‌افزارهایی که در زمان نگارش این مقاله در دسترس هستند عبارتند از: FRED، TracePro و ASAP. در این مقاله کلیه محاسبات، مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار TracePro انجام شده است.

۲-۱. مدل‌سازی اجزای اپتیکی

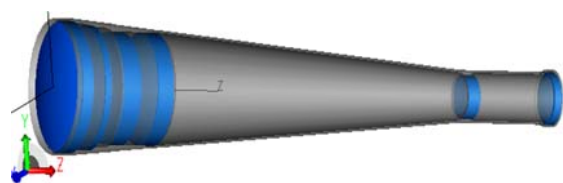
اولین اقدام در تحلیل نورهای سرگردان، مدل‌سازی سامانه اپتیکی در نرم‌افزار است. سامانه اپتیکی دوربین ماهواره مطابق جدول (۱) از ۶ عدسی تشکیل شده است که در ZEMAX طراحی شده‌اند. این عدسی‌ها مطابق شکل (۲) در نرم‌افزار TracePro مدل‌سازی شدند. سپس جنس مواد به‌کار رفته در ساخت آن‌ها به منظور تشخیص عبور، بازتاب و شکست، بر اساس ضخامت و طول موج در نرم‌افزار تعریف شد. با این کار نرم‌افزار می‌تواند میزان جذب، عبور و شکست نور را در برخورد با سطوح مختلف یا عبور از آن‌ها در زمان ردیابی پرتوها محاسبه کند.

جدول ۱. مشخصات اجزای اپتیکی دوربین ماهواره مورد استفاده

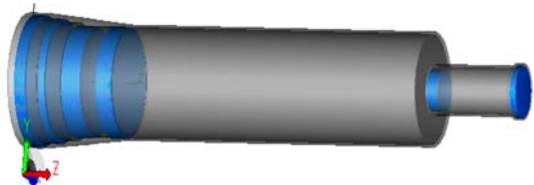
(R شعاع سطح است)

R_2 (mm)	R_1 (mm)	ماده	کاتالوگ	n_d
-۳۰۳/۱	۲۱۷/۶	LITHOTEC-CAF2	Schott	۱
-۱۲۰۵	۶۳۲/۳	TIF3	Schott	۲
۱۵۳/۴	-۲۲۹/۴	N-KZFS11	Schott	۳
۹۰۳	۱۵۱	N-SSK8	Schott	۴
۵۸/۷	-۱۸۱/۹	N-FK56	Schott	۵
-۲۸۸/۷	۷۹/۹	SK5	Schott	۶

^۱ Ray Tracing

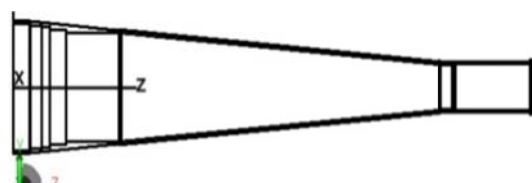


(الف) قرار گرفتن عدسی‌ها در مدل مخروطی

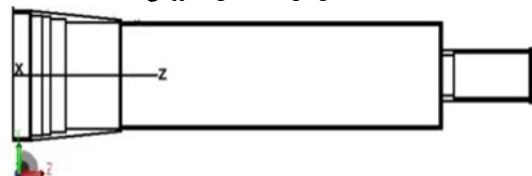


(ب) قرار گرفتن عدسی‌ها در مدل استوانه‌ای

شکل ۵. ترکیب مدل‌های اجزای اپتیکی و غیر اپتیکی



(الف) نمایش دوبعدی مدل مخروطی



(ب) نمایش دوبعدی مدل استوانه‌ای

شکل ۴. مدل‌های طراحی شده برای محفظه اپتیکی

۲-۴. مدل‌سازی رفتار سطوح اپتیکی و غیر اپتیکی بدون وجود پوشش‌های سطحی

جهت پیش‌بینی دقیق نحوه پراکندگی نور در برخورد با سطوح مختلف و تعیین میزان نورهای سرگردان تولید شده با توجه به ردیابی پرتو، باید مشخصات سطح را توسط نمایه‌سنج و یا تداخل‌سنج نور سفید اندازه‌گیری کرده و در قالب مدل‌های $BSDF^1$ برای سطوح مختلف مدل‌سازی کرد. برای این کار بسته به نوع نرم‌افزار از روش‌های هاروی و Abg استفاده می‌شود. در نرم‌افزار TracePro مدل‌سازی به روش Abg انجام می‌شود.

به طور کلی به دلیل اینکه قبل از ساخت سامانه اپتیکی امکان دسترسی به چنین اطلاعاتی از سطح وجود ندارد، از مدل‌های عمومی که برای این سطوح در دسترس هستند، استفاده می‌شود. بر این اساس در حالت اول فرض شده است که هیچ پوشش خاصی روی سطوح اپتیکی و غیر اپتیکی وجود ندارد و سطوح غیر اپتیکی ۹۰٪ از نور فرودی را به صورت پخش بازتاب می‌کنند. برای سنجش عملکرد نورهای سرگردان در سامانه، بهترین روش به ویژه در طیف مرئی، سنجش میزان PST^2 در محل آشکارساز و دیگر سطوح است. PST^3 برابر با نسبت برتابندگی^۳ نورهای سرگردان در محل مورد نظر، به برتابندگی نور در زاویه‌های مختلف نسبت به محور اپتیکی در دهانه ورودی سامانه است. PST مستقل از قدرت منبع نور، می‌تواند عملکرد سامانه را در مقابله با نورهای مزاحم نشان دهد، ولی هیچ‌گونه اطلاعاتی از نحوه توزیع شدت پرتوها به دست نمی‌دهد [۹، ۱۳ و ۱۷]. با توجه به آنچه گفته شد، لازم است برای محاسبه PST در زاویه‌های ۰ تا ۹۰ درجه به ردیابی پرتوها در سامانه پرداخته شود.

به طور کلی با در نظر گرفتن تمام موارد مرتبط با طراحی، از جمله داشتن کمترین سطوح روشن و بحرانی، محدودیت‌های حجمی و وزنی، داشتن حداکثر تحمل جهت مقابله با تنش‌های حرارتی، فشار و شوک ناشی از لحظه پرتاب، به راحتی قرار دادن اجزای اپتیکی درون محفظه هنگام مونتاژ و ... در نهایت دو مدل محفظه اپتیکی در TracePro طراحی شد. برای طراحی ابتدا لازم است تا یک مدل دو بعدی مطابق با شکل (۴)، در صفحه در نظر گرفته شود، سپس مطابق با آن، مدل سه بعدی پیاده‌سازی شود.

مدل مخروطی وزن و حجم کمتری دارد، اما به دلیل مخروطی بودن ساختار میانی، امکان ساخت کنترل‌کننده‌های نور مزاحم (پره‌های نوری) در آن وجود ندارد. ولی در مدل استوانه‌ای، فضای استوانه‌ای شکل، هر چند منجر به افزایش وزن و حجم سامانه می‌شود، اما امکان کنترل هر چه بیشتر نورهای سرگردان را با استفاده از پره‌های نوری فراهم می‌کند.

۲-۳. ترکیب اجزای اپتیکی و محفظه

برای تکمیل مدل و انجام ردیابی پرتوها به منظور تحلیل نورهای سرگردان، مدل‌های اجزای اپتیکی و غیر اپتیکی فوق، مطابق شکل (۵) در نرم‌افزار TracePro ترکیب شدند.

در زمان طراحی محفظه اپتیکی باید توجه شود که نحوه دسترسی به محل قرارگیری عدسی‌ها در محفظه، کمترین فاصله ممکن را با دهانه‌های ابتدایی و انتهایی داشته باشد. در غیر این صورت، فاصله زیاد میان دهانه و محل قرارگیری عدسی، خطای تنظیم عدسی‌ها در راستای محور اپتیکی را افزایش داده و مشکلات متعددی به وجود می‌آورد. به همین دلیل طراحی محفظه‌ها به نحوی انجام شد که عدسی‌های (۴-۱) از قسمت جلوی محفظه (سمت چپ) و عدسی‌های (۵ و ۶) نیز از انتها (سمت راست) درون محفظه قرار گیرند.

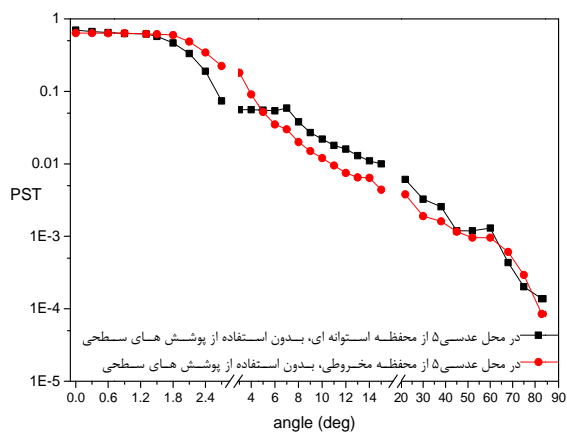
¹ Bidirectional Scattering Distribution Function

² Point Source Transmittance

³ Irradiance

دید، علاوه بر اینکه زمینه را برای تار شدن و کاهش تفکیک پذیری و در نهایت کاهش کیفیت تصویر فراهم می‌کند، به تولید بازتاب‌های ضعیف و یا در اصطلاح بازتاب‌های شبح مانند و ایجاد هاله در تصویر منجر می‌شود. این پرتوهای شبح مانند در صورت رسیدن به آشکارساز و کانونی شدن روی آن، اثرات مصنوعی و لکه‌های شبح مانند (هاله) را به وجود می‌آورند که کیفیت تصویر را کاهش می‌دهند. بهترین روش برای مقابله با کاهش کیفیت تصویر در اثر ایجاد این نوع از پرتوهای نور سرگردان، استفاده از لایه‌های پوششی ضد بازتاب در سطوح اپتیکی است. تعداد این لایه‌ها و کیفیت آن‌ها، به طور مستقیم بر تولید نورهای سرگردان داخلی و کیفیت تصویر تأثیرگذار خواهد بود. در بخش بعد تأثیر لایه‌های ضد بازتاب در مقابله با این اثرات بررسی شده است.

شکل (۸) نشان می‌دهد که در زاویه‌های بالاتر از یک درجه که محدوده میدان دید ناخواسته و نامطلوب به حساب می‌آید، به تدریج میزان PST کاهش می‌یابد و این کاهش با اندکی تفاوت در هر دو مدل از محفظه دیده می‌شود که بیانگر عملکرد صحیح محفظه‌های طراحی شده است. از طرف دیگر همان‌گونه که مشاهده می‌شود، از زاویه ۱ تا ۶ درجه، محفظه استوانه‌ای عملکرد بهتری را نشان می‌دهد، ولی در زاویه‌های بالاتر، محفظه مخروطی در مقابله با نورهای سرگردان عملکرد بهتری دارد.

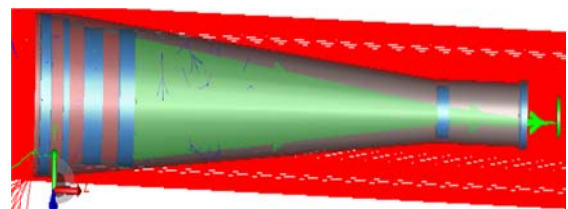


شکل ۸. نمودار PST محاسبه شده در محل عدسی (۵)

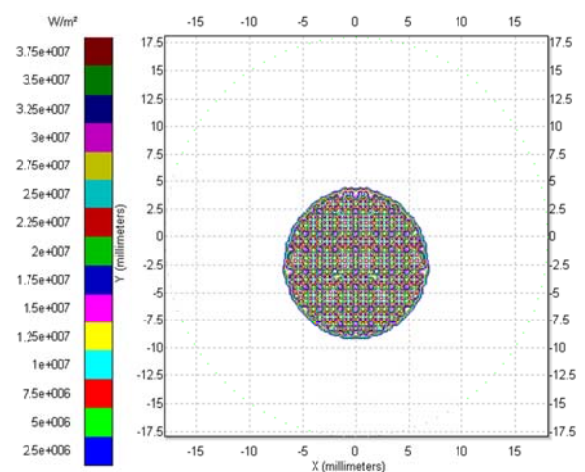
نمودار شکل (۹) نیز عملکرد هر دو محفظه را نسبت به PST محاسبه شده در محل آشکارساز نشان می‌دهد. در اینجا نیز همچون نمودار قبلی در زاویه‌های کمتر از یک درجه، PST تقریباً برابر با یک است و مقدار اختلاف موجود نیز به همان دلایلی است که قبلاً توضیح داده شد. اما ساختار در نظر گرفته شده در طراحی محفظه موجب شده تا PST در زاویه‌های خارج از میدان دید به طور قابل توجهی کاهش پیدا کند، که بیانگر تضعیف نورهای سرگردان در زاویه‌های خارج از میدان دید است.

ردیابی پرتوها به عنوان نمونه در زاویه ۰/۳ درجه از محور اپتیکی برای محفظه مخروطی در شکل (۶)، و نمودار برتابندگی حاصل از آن در محل عدسی (۵) در شکل (۷) نشان داده شده است. بر این اساس میزان نورهای سرگردان در زاویه‌های مختلف در قالب نمودار PST در محل عدسی (۵) و نیز در محل آشکارساز به ترتیب در شکل (۸) و شکل (۹) رسم شده است.

در شکل (۶)، خطوط قرمز رنگ پرتوهای تابیده شده در زاویه ۰/۳ درجه نسبت به محور اپتیکی هستند. خطوط سبز رنگ نیز پرتوهایی هستند که درون سامانه اپتیکی تا رسیدن به صفحه کانونی ردیابی شده‌اند. صفحه سبز رنگ در انتهای سمت راست سامانه نیز آشکارساز را نشان می‌دهد که پرتوهای درون سامانه به صورت فلشی سبز رنگ روی آن کانونی شده‌اند.



شکل ۶. ردیابی پرتوها در زاویه ۰/۳ درجه از محور اپتیکی



شکل ۷. نمودار برتابندگی در محل عدسی (۵)، در زاویه ۰/۳ درجه از محور اپتیکی دوربین

نمودار شکل (۸)، PST محاسبه شده در سطح عدسی (۵) را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، در نیم زاویه میدان دید سامانه (از صفر تا زاویه حدود یک درجه)، نسبت برتابندگی تقریباً برابر با یک است. این موضوع طبیعی است، زیرا این محدوده مربوط به میدان دید مطلوب است و این مقدار باید برابر با یک باشد. اما به دلیل عدم وجود پوشش‌های سطحی در سطوح اپتیکی، پرتوهای دریافت شده در این محدوده، هر چند به میزان اندک، تضعیف شده‌اند که این اصلاً مناسب نیست. زیرا این پرتوها شامل پرتوهای اصلی و مطلوب است و تضعیف پرتوها در میدان

در نمودار شکل (۱۴) برآورده کرد، سایر سطوح سیاه مورد بررسی قرار نگرفتند. اما ممکن است گاهی حتی در صورت استفاده از پوشش‌هایی با عملکرد بسیار بالا هم انتظارات برآورده نشوند. در این شرایط هم‌زمان با استفاده از مواد سیاه در سطوح غیر اپتیکی، از تله‌های نوری در سطح نیز استفاده شود. تله‌های نوری پستی و بلندی‌های نوک تیزی هستند که می‌توان آن‌ها را به وسیله سونش شیمیایی، سندپلاست و ... در سطح ایجاد کرد [۹].

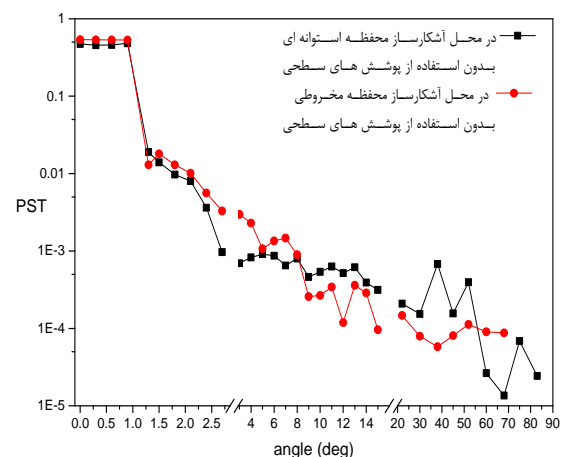
نوع دوم از پوشش‌های سطحی که در این دوربین برای بهبود عملکرد سامانه در سطوح اپتیکی (سطوح عدسی‌ها) مورد استفاده قرار گرفت، پوشش ضد بازتاب سه لایه از جنس مواد دی‌الکتریک است که نوع و ضخامت این لایه‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. این نوع از پوشش‌ها را می‌توان به صورت تخصصی توسط نرم‌افزارهایی مثل FilmStar [۱۸] یا Essential MacLeod [۱۹] در لایه‌های مختلف و ویژگی‌های متفاوت طراحی کرد.

جدول ۲. مشخصات پوشش ضد بازتاب سه لایه مورد استفاده

ترتیب لایه‌ها	جنس لایه	ضخامت
۱	MgF ₂	۰/۰۹۱۲
۲	ZrO ₂	۰/۱۲۵
۳	Al ₂ O ₃	۰/۰۷۶۹

برای استفاده از پوشش‌ها، پارامترهای نوع جنس پوشش، میزان ضخامت، جذب، بازتاب و عبوردهی آن و همچنین ترتیب قرارگیری لایه‌ها، به عنوان پارامترهای مؤثر، در نرم‌افزار وارد شد. برای درک تأثیر پوشش‌های ضد بازتاب در سطوح اپتیکی، رفتار سطح عدسی (۳) با جنس N-KZFS11، قبل و بعد از اعمال پوشش مورد نظر در محدوده زاویه‌های ۰ تا ۶۰ درجه محاسبه و به ترتیب در نمودارهای شکل (۱۰) و شکل (۱۱) نشان داده شده است. نمودار شکل (۱۰) در طول موج ۰/۵۶ میکرومتر در مرز میان هوا (در دمای ۲۵ درجه سلسیوس) و سطح عدسی (۳) محاسبه شده است. نمودار شکل (۱۱) نیز تحت همین شرایط ولی در مرز میان پوشش سه لایه ضد بازتاب نامبرده و هوا، در سطح عدسی (۳) محاسبه شده است. در این نمودارها، رنگ آبی، بیانگر میزان بازتابندگی سطح در زاویه‌های مختلف است. رنگ سبز نیز میزان عبوردهی پرتو توسط سطح به درون عدسی را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، قبل از اعمال پوشش ضد بازتاب، بازتابندگی سطح در محدوده زاویه‌های میدان دید دوربین و تا زاویه ۳۰ درجه، در حدود (۰/۰۵) است، در حالی که حالت مطلوب این است که بازتابندگی در سطح تقریباً برابر با صفر باشد. زیرا اگر قرار باشد تا پرتوها در عبور از سطح هر یک از عدسی‌ها به این میزان تضعیف شوند، در این صورت پرتوهای



شکل ۹. نمودار PST محاسبه شده در محل آشکارساز

در اینجا نیز تقریباً مشابه نمودار قبل، در زاویه‌های کمتر از حدود ۷ درجه، محفظه استوانه‌ای رفتار بهتری را از خود نشان می‌دهد، ولی در زاویه‌های بالاتر از ۷ درجه، محفظه مخروطی عملکرد بهتری دارد. نکته قابل توجه دیگر این است که همواره مقدار PST در محل آشکارساز از مقدار مشابه آن در محل عدسی (۵) کمتر است که صحت انجام محاسبات را نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن تمام موارد گفته شده در طراحی محفظه و با توجه به نمودار شکل (۹)، هر چند که نورهای سرگردان تا ۱۰۰ هزار برابر تضعیف شده‌اند، ولی بازهم مقدار آن‌ها در زاویه‌های نزدیک میدان دید تا حدودی زیاد است. علاوه بر این، نورهای سرگردان حتی در زاویه‌های بسیار بالا و در زاویه ۷۵ درجه نیز با اندکی تفاوت در هر دو مدل مشاهده می‌شوند که مناسب نیست. به همین دلیل در بخش بعد، تأثیر پوشش‌های سطحی در سطوح غیر اپتیکی و نیز تأثیر پوشش‌های ضد بازتاب در سطوح اپتیکی در مقابله با نورهای مزاحم بررسی شده است.

۳. نتایج و بحث

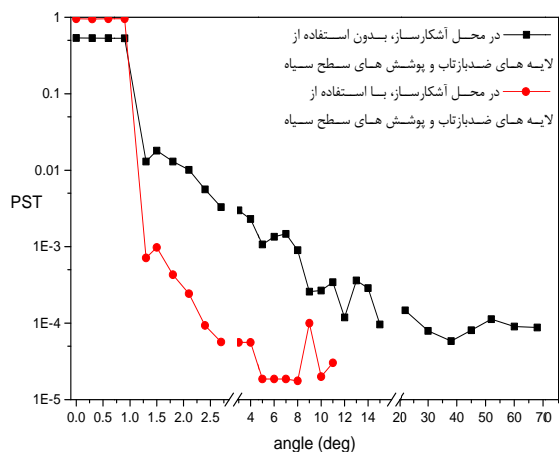
۳-۱. بررسی تأثیر پوشش‌های سطحی در کنترل نورهای سرگردان

به طور کلی منظور از پوشش‌های سطحی، استفاده از لایه‌های ضد بازتاب و سطوح سیاه به ترتیب در سطوح اپتیکی و غیر اپتیکی است. سیاه نمودن سطوح، مجموعه اقداماتی هستند که به منظور کاهش بازتابندگی و جذب حداکثری شدت پرتوهای فرودی روی سطح انجام می‌شود. در اینجا سطوح غیر اپتیکی با یک پوشش سیاه استاندارد که ۹۰٪ از توان پرتوهای فرودی را جذب کرده و مابقی را به صورت پخشی و نامنظم در همه جهت‌ها پراکنده می‌کند، پوشش داده شد. این پوشش، ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین نوع از سطح سیاه محسوب می‌شود، ولی چون همین پوشش ساده نیز انتظارات را بر اساس نتایج به دست آمده

۲-۳. نتایج حاصل از به‌کارگیری محفظه اپتیکی و پوشش‌های سطحی در مقابله با نورهای سرگردان

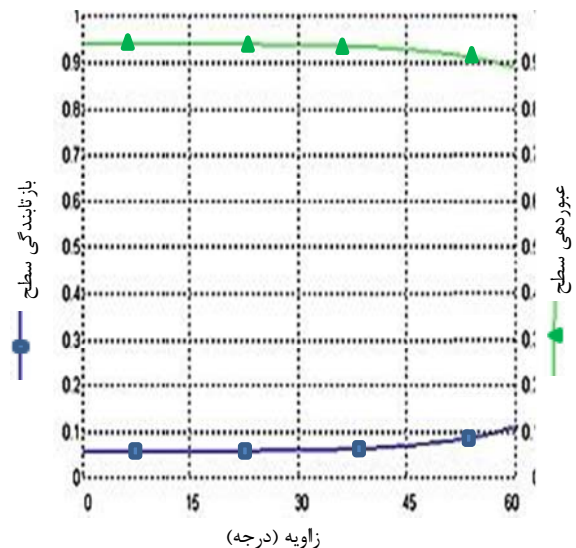
به منظور درک تأثیر کلیه اقداماتی که تاکنون در راستای مقابله با نورهای سرگردان در سامانه اپتیکی صورت گرفت، میزان این نورها در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. در حالت اول، از محفظه مخروطی استفاده شد. در این حالت تمام دیواره‌ها و سطوح غیر اپتیکی توسط پوشش سیاه با قابلیت جذب ۹۰٪ از توان پرتوهای فرودی و بازتاب پخشی پوشش داده شدند. علاوه بر این، تمام سطوح اپتیکی نیز با پوشش ضد بازتاب سه لایه که مشخصات آن در قسمت قبل مورد بررسی قرار گرفت، پوشانده شدند. بر این اساس میزان نورهای سرگردان در محل آشکارساز در محفظه مخروطی محاسبه شد که نتایج حاصل از آن در نمودار شکل (۱۲) نشان داده شده است. همچنین برای اینکه تأثیر پوشش‌های سطحی در سطوح اپتیکی و غیر اپتیکی در مقابله با نورهای سرگردان به خوبی مشخص شود، عملکرد سامانه در این حالت بدون استفاده از این پوشش‌ها نیز برای مقایسه در این شکل نشان داده شده است.

بر اساس آنچه که نمودار شکل (۱۲) نشان می‌دهد، تأثیر مثبت استفاده از پوشش‌های سطحی در سطوح اپتیکی و غیر اپتیکی به خوبی مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر پوشش‌های ضد بازتاب باعث شده تا PST (نمودار قرمز) در نیم میدان دید (زاویه تقریبی ۰ تا ۱ درجه) در محل آشکارساز تقریباً برابر با یک شود، در حالی که قبل از استفاده از آن‌ها (نمودار سیاه)، PST کمتر از یک است که این مقدار اختلاف در صورت عدم استفاده از پوشش‌های ضد بازتاب به نورهای سرگردان داخلی تبدیل می‌شود.

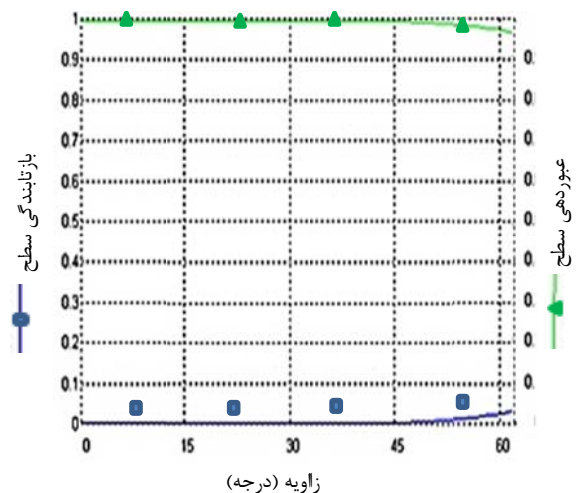


شکل ۱۲. مقایسه برتابندگی حاصل از نورهای سرگردان در محفظه مخروطی قبل و بعد از اعمال پوشش‌های سطحی

دریافتی در محل آشکارساز تضعیف شده و منجر به افت کیفیت تصویر می‌شوند. از طرف دیگر این میزان از بازتابندگی پرتوها در سطح هر یک از عدسی‌ها، منجر به تولید نورهای سرگردان و ایجاد بازتاب‌های شبح مانند می‌شوند که رسیدن آن‌ها به سطح آشکارساز، باز هم اثرات نامطلوبی را بر کیفیت تصویر به وجود می‌آورد. بنابراین هر چقدر کیفیت لایه‌های ضد بازتاب بیشتر باشد، علاوه بر کاهش میزان تضعیف پرتوها، میزان تولید نورهای سرگردان داخلی نیز کاهش می‌یابد. به این ترتیب پس از لایه‌نشانی پوشش ضد بازتاب مطابق شکل (۱۱)، بازتاب سطح تا حد بسیار زیادی کاهش یافته و تقریباً به صفر رسیده است و به دنبال آن عبوردهی سطح تقریباً به یک رسیده است. این امر تأثیر بسیار مفید لایه‌های ضد بازتاب در افزایش کیفیت تصویر و کاهش تولید نورهای سرگردان را به خوبی نمایش می‌دهد.



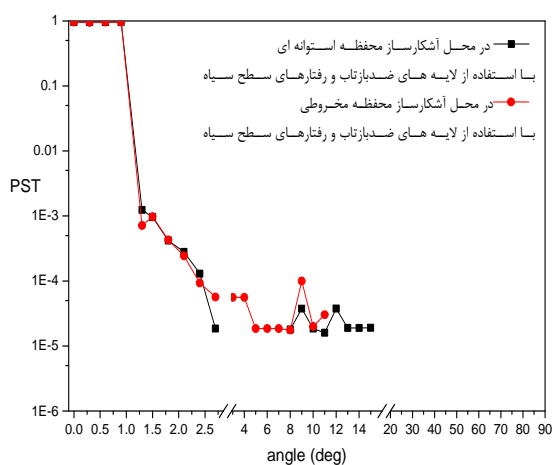
شکل ۱۰. رفتار سطح عدسی (۳)، قبل از اعمال پوشش ضد بازتاب



شکل ۱۱. رفتار سطح عدسی (۳)، پس از اعمال پوشش ضد بازتاب

۳-۳. انتخاب بهترین مدل

برای اینکه بهترین مدل از میان مدل‌های ایجاد شده انتخاب شود، عملکرد هر دو مدل استوانه‌ای و مخروطی پس از استفاده از پوشش‌های سطحی، در نمودار شکل (۱۴) مورد مقایسه قرار گرفت. همان‌گونه که نمودار شکل (۱۴) نشان می‌دهد، تا قبل از زاویه ۲/۵ درجه تقریباً هر دو مدل عملکرد مشابهی دارند. در زاویه‌های بالاتر از ۲/۵ درجه، در محفظه مخروطی، میدان دید ناخواسته به طور پیوسته تا ۱۱ درجه ادامه پیدا کرده است. این در حالی است که میدان دید ناخواسته در مدل استوانه‌ای در زاویه‌های بالاتر از ۲/۵ درجه مسدود شده، ولی در زاویه‌های ۸ تا ۱۵ درجه دوباره تشکیل شده و به موجب آن اثراتی از نورهای سرگردان در محل آشکارساز دریافت شده است. با این وجود در هر دو مدل، نورهای سرگردان در زاویه‌های دورتر از میدان دید تقریباً تا ۱۰۰ هزار برابر تضعیف شده‌اند. اما از آنجا که ساختار هندسی مدل استوانه‌ای، فضای مناسبی را برای طراحی دیگر ابزارهای کنترل کننده نورهای سرگردان، همچون پره‌های نوری، فراهم می‌کند، در صورت نیاز به کنترل بیشتر نورهای سرگردان، مدل استوانه‌ای می‌تواند انتخاب بهتری باشد.



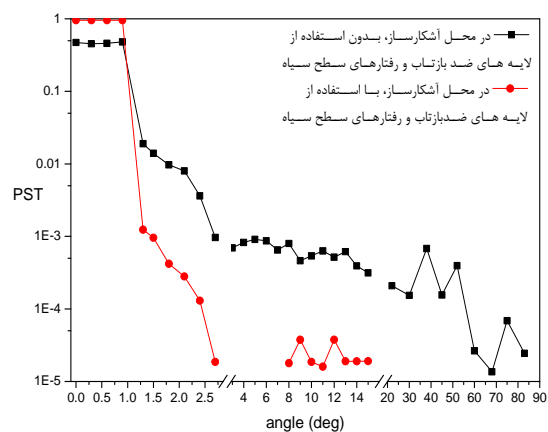
شکل ۱۴. مقایسه برتابندگی حاصل از نورهای سرگردان در محفظه مخروطی و استوانه‌ای پس از اعمال پوشش‌های سطحی

۴. نتیجه‌گیری

بعد از مدل‌سازی تمام اجزای اپتیکی و غیر اپتیکی در نرم‌افزار، عملکرد مدل‌ها در مقابله با نور سرگردان، با ردیابی آن‌ها در قالب نمودار PST، محاسبه شد و مشخص شد که در زاویه‌های نزدیک به میدان دید (زاویه‌های کمتر از ۷ درجه)، مدل استوانه‌ای از مدل مخروطی عملکرد بهتری دارد، ولی در زاویه‌های بزرگ‌تر، مدل مخروطی بهتر عمل می‌کند. به طور کلی نتایج به دست آمده نشان داد که اگر چه نورهای سرگردان در زاویه‌های دور از میدان دید حتی تا ۱۰ هزار برابر نیز تضعیف شده‌اند، ولی با وجود تمام

از طرف دیگر، رفتار سطح سیاه موجب شده تا در زاویه‌های خارج از میدان دید، PST به شدت کاهش یابد که این امر بیانگر تضعیف شدید نورهای سرگردان است. همچنین میدان دید نامطلوب آشکارساز در حالت قبل از استفاده از این پوشش‌ها در حدود ۷۵ درجه بوده که پس از آن به ۱۲ درجه کاهش پیدا کرده است. به عبارت دیگر میدان دید نامطلوب دوربین در حدود ۶۳ درجه کم شده که میزان قابل توجهی به حساب می‌آید. علاوه بر این، استفاده از این پوشش‌ها موجب شده تا از زاویه ۴ درجه به بعد، نورهای سرگردان تا حدود ۱۰۰ هزار برابر تضعیف شوند که این میزان، در خیلی از آشکارسازها کمتر از مقداری است که بتواند قابل تشخیص باشد.

در مرحله بعد، مقدار PST قبل و بعد از استفاده از پوشش‌های سطحی برای محفظه استوانه‌ای نیز محاسبه شد که نتایج حاصل از آن در شکل (۱۳) نشان داده شده است و در عین حال، با مقدار PST قبل از استفاده از پوشش‌های سطحی نیز مقایسه شده است. با توجه به نمودار شکل (۱۳)، می‌توان گفت که در اینجا نیز به دلیل وجود پوشش ضد بازتاب، پرتوهای مطلوب در نیم زاویه میدان دید کمتر تضعیف شده‌اند. از طرف دیگر، رفتار سطح سیاه موجب شده تا در زاویه‌های بالاتر از حدود ۱/۸ درجه، پرتوهای نور سرگردان بیشتر از ۱۰ هزار برابر تضعیف شوند. همچنین از زاویه ۲/۴ تا ۸ درجه، نورهای سرگردان در محل آشکارساز به طور کامل مسدود شده‌اند، ولی از زاویه ۸ تا ۱۵ درجه دوباره اثراتی از نورهای سرگردان در محل آشکارساز مشاهده می‌شود. در هر صورت نتایج نشان می‌دهد که پوشش‌های سطحی و کیفیت آن‌ها، می‌تواند تأثیر بسیار قابل توجهی بر عملکرد سامانه در مقابله با نورهای سرگردان داشته و کیفیت اطلاعات سنسجش از دور دریافتی را تا حد زیادی بهبود دهد.



شکل ۱۳. مقایسه برتابندگی حاصل از نورهای سرگردان در محفظه استوانه‌ای قبل و بعد از اعمال پوشش‌های سطحی

۵. مراجع

- [1] Park, J.; Won, K. J. "Stray Light Analysis of High Resolution Camera for a Low-Earth-Orbit Satellite"; J. Opt. Soc. Korea. 2011, 15, 52-55.
- [2] Shi, R.; Zhou, J.; Ji, Y.; Shen, W. "Stray Light Analysis and Baffle Design of Remote Sensing Camera for Microsatellite"; Proc. of SPIE. 2009, 7506.
- [3] Smith, W. "Modern Optical Engineering"; 4th Ed., McGraw-Hill, New York, 2008.
- [4] Qiang, H. "Analysis of Stray Light in Space Optical System"; Infrared 2006, 27, 26.
- [5] Park, J.; Jang, W. K.; Kim, S.; Jang, H. S.; Lee, S. "Optical Noise Removal in the Focal Plane of the Spaceborne Camera"; J. Optical Soc. Korea 2011, 15, 278-282.
- [6] Grabarnik, S. "Optical Design Method for Minimization of Ghost Stray Light Intensity"; Applied Optics 2015, 54, 3083-3089.
- [7] Kumar, M. S.; Narayanamurthy, C.; Kumar, A. K. "Design and Analysis of Optimum Baffle for a Cassegrain Telescope"; J. Optics 2015, 45, 180-185.
- [8] Montanaro, M.; Gerace, A.; Rohrbach, S. "Toward an Operational Stray Light Correction for the Landsat 8 Thermal Infrared Sensor"; Applied Optics 2015, 54, 3963-3978.
- [9] Eric, F. "Stray Light Analysis and Control"; 1st Ed., Bellingham, Washington USA, 2013.
- [10] Jun, C.; Zhi-Cheng, W.; Xiao-Jie, C. "Design of Compact, High-Resolution Optical System for Space and Analyze Stray Light"; Proc. of SPIE. 2002, 4927.
- [11] Freniere, E. R. "First-Order Design of Optical Baffles"; SPIE 1980, 257, 19-28.
- [12] Berg, V. D.; Franssen, L.; Coppens, J. "Ocular Media Clarity and Stray Light"; Encyclopedia of the Eye, Oxford: Academic Press, 2010, 3, 173-183.
- [13] Scaduto, L. C. N.; Carvalho, G.; Santos, F. "Baffle Design and Analysis of Straight in Multispectral Camera of a Brazilian Satellite"; XXIX ENFMC-Annals of Opt. 2006.
- [14] McGew, T. (Ed.) "Discussion of Euler's, Letters to a German Princess"; <http://homepages.Wmich.edu/mcgrew/euler.htm>.
- [15] Euler, L.; De Condorcet, N. "Letters of Euler to a German Princess, on Different Subjects in Physics and Philosophy"; Murray and Highley 1802, 2.
- [16] Suzanna, A.; Rina, C.; Shlomo, M. "Wet Deposition of Carbon Nanotube Black Coatings for Stray Light Reduction in Optical Systems"; Surf. Coat. Tech. 2015, 262, 21-25.
- [17] Pompea, S. M.; Pfisterer, R. N.; Morgan, J. S. "Stray Light Analysis of the Apache Point Observatory 3.5-meter Telescope System"; SPIE, Astronomical Telescopes and Instrumentation 2003, 128-138.
- [18] FTG Software Associates "FilmStar Software"; <http://ftgsoftware.com>.
- [19] Thin Film Center Inc. "Essential Macleod Software"; <http://thinfilmcenter.com>.

تمهیدات صورت گرفته در طراحی هر یک از مدل‌ها، باز هم نورهای سرگردان تا زاویه‌های بسیار دورتر از میدان دید و تا زاویه ۷۵ درجه نیز در محل آشکارساز دریافت شده‌اند که این مناسب نیست. برای کاهش این میدان دید ناخواسته و مسدود کردن نورهای سرگردان در زاویه‌های بزرگ، رفتار سطوح غیر اپتیکی از طریق لایه‌نشانی پوشش سیاه با قابلیت جذب ۹۰٪ از توان امواج فرودی و بازتاب پخشی اصلاح شد و بازتابندگی سطوح اپتیکی نیز با لایه‌نشانی لایه‌های ضد بازتاب تا حد زیادی کاهش داده شد، به طوری که میزان PST در زاویه صفر تا یک درجه که میدان دید سامانه است، برابر با یک شد، همچنین بر اساس نمودارهای شکل‌های (۱۲) و (۱۳) میزان نورهای سرگردان دریافت شده در محل آشکارساز در زاویه‌های بزرگ کاملاً حذف و PST در این زاویه‌ها صفر شد. میدان دید نامطلوب نیز در مدل مخروطی از ۷۵ درجه به ۱۱ درجه و در مدل استوانه‌ای از ۸۵ درجه به ۱۵ درجه کاهش یافت. همان‌طور که گفته شد، با توجه به ملاحظات مداری و سازوکار حرکتی ماهواره LEO، از زاویه ۱۴ درجه به بعد نورهای سرگردان افزایش می‌یابند، اما نمودارها نشان می‌دهند که با طراحی دقیق محفظه‌ها و انتخاب مناسب پوشش‌های سطحی، برتابندگی در زاویه ۱۴ درجه به بعد، صفر شده است. تمام این دست‌آوردها در شرایطی محقق شدند که کوچک‌ترین اختلال و انسدادی در عملکرد میدان دید مطلوب ایجاد نشد و این دقیقاً همان هدف مطلوب ما در این کار بود. همان‌طور که در مقدمه نیز بیان شد، از لایه‌نشانی نانولوله‌های کربنی چند لایه که یک نوع ماده فوق سیاه است، در سطوح غیر اپتیکی برای کاهش نورهای سرگردان استفاده شده است [۱۶]. اما از آنجایی که دستیابی به این ماده در حال حاضر در کشور حاصل نشده است، در این مقاله سعی بر آن شد تا با طراحی دو مدل محفظه مناسب و استفاده از یک پوشش سیاه برای سطوح غیر اپتیکی و پوشش ضد بازتاب سه لایه‌ای برای سطوح اپتیکی، میزان نورهای سرگردان را در زاویه‌های بزرگ کاملاً حذف و در زاویه‌های کوچک تا ۱۰۰ هزار برابر کاهش داد. بنابراین با این روش محدودیت دستیابی به پوشش نانولوله‌های کربنی برطرف شده است. در نهایت نمودار شکل (۱۴) نشان داد که هر چند هر دو مدل با اندکی اختلاف در میدان دید نامطلوب، عملکرد تقریباً مشابهی دارند؛ ولی به دلیل امکان استفاده از ابزارهای کنترل‌کننده دیگری همچون پره‌های نوری و سپرهای اپتومکانیکی برای مقابله با نورهای سرگردان، مدل استوانه‌ای نسبت به مدل مخروطی از مزیت‌های بیشتری برخوردار است. این در حالی است که به دلیل ساختار مخروطی شکل در مدل مخروطی، فضای مورد نیاز برای طراحی ساختارهایی مانند پره‌های نوری وجود ندارد.