

کمینه نمودن نورهای سرگردان در دوربین ماهواره با استفاده از سپر و پره‌های اپتومکانیکی

محمد اسدنژاد^۱، دانشجوی دکتری؛ عبدالله اسلامی مجد^۲، استادیار؛ حسن حاج‌قاسم^۳، دانشیار

۱- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - masadnezhad@mut.ac.ir

۲- مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - a_eslamimajd@mut-es.ac.ir

۳- دانشکده علوم و فنون نوین - دانشگاه تهران - تهران - ایران - hajghassem@ut.ac.ir

چکیده: در این مقاله به بررسی تأثیر استفاده از سپر و پره‌های اپتومکانیکی جهت کنترل و کاهش نورهای سرگردان در یک دوربین ماهواره‌ای سنجش‌ازدور پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا سامانه اپتیکی در نرم‌افزار ZEMAX مدل‌سازی شده، سپس در نرم‌افزار TracePro دو مدل محفظه مخروطی و استوانه‌ای شکل برای آن طراحی شد. در مرحله بعد یک سپر اپتومکانیکی به طول ۱۰۰ میلی‌متر به همراه ۱۳ پره داخلی طراحی شد. طراحی به‌گونه‌ای انجام شده تا علاوه بر تأمین نیازمندی‌های سامانه، میدان دید حفظ شده و ابعاد سپر و تعداد پره‌ها کمینه باشند. استفاده از محفظه مناسب، سپر و پره‌ها باعث شد نورهای سرگردان در زوایای بزرگ کاملاً حذف شده و میدان دید نامطلوب در مدل مخروطی به ۹ درجه و در مدل استوانه‌ای به ۱۴ درجه کاهش یابد. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نورهای سرگردان باقی‌مانده حدود 10^{-5} برابر توان ورودی تضعیف شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: نور سرگردان، سپر، پره‌های اپتومکانیکی، دوربین ماهواره، کیفیت تصویر.

Minimize Stray Light with Use of Opto-mechanical Baffle and Vanes in Satellite Camera

M. Asadnezhad¹, PhD student; A. Eslami Majd², Assistant Professor; H. HajGhassem³, Associate Professor

1- Department of Electrical and Electronic Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Tehran, Iran, Email: masadnezhad@mut.ac.ir

2- Department of Electrical and Electronic Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Tehran, Iran, Email: a_eslamimajd@mut-es.ac.ir

3- Department of New Sciences & Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: hajghassem@ut.ac.ir

Abstract: In this paper the effect of baffle and opto-mechanical vanes to control and reduce stray lights in a satellite remote sensing camera is investigated. For this purpose, the optical system is modeled in ZEMAX software and then conical and cylindrical housing models were designed with TracePro software. In next step, an opto-mechanical baffle with length of 100 mm and 13 internal vanes is designed. The baffle is designed so that in addition to satisfying the requirements of the system, its dimensions and number of vanes were minimum and FOV is preserved. Using of suitable housing, baffle and vanes eliminated stray lights at great angles and undesirable field of view was received to 9 degrees in conical model and 14 degrees in cylindrical model. Also, simulation results show that residual stray lights attenuated up to 10^{-5} times of entrance power.

Keywords: Stray light, baffle, opto-mechanical vanes, satellite camera, image quality.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۶، ۱۳۹۵/۰۹/۳۰ و ۱۳۹۵/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱

نام نویسنده مسئول: عبدالله اسلامی مجد

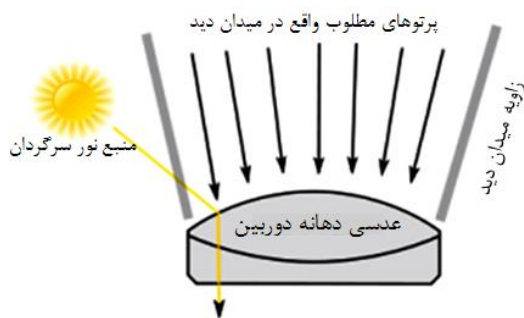
نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - لویزان - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک - دانشکده الکترونیک

۱- مقدمه

در نظر گرفت. از کارافتادگی چشم به دلیل چنین وضعیتی می‌تواند ناشی از انتشار نورهای هدف درخشان در یک زمینه تاریک باشد. ناتوانی ایجادشده در چشم به دلیل این تابش خیره‌کننده، نور سرگردان چشمی نامیده می‌شود.

• نوع سوم از نورهای سرگردان در دستگاه‌های اندازه‌گیری تکرنگ یا تک‌فرکانس مطرح می‌شود. در ابزارهای اندازه‌گیری اپتیکی، مانند طیف‌سنج‌های نوری که با نورهای تکرنگ کار می‌کنند، هر نوری که طول موجی متفاوت از مقدار مورد نظر داشته باشد، به عنوان نور سرگردان در سامانه تعریف می‌شود. میزان نورهای سرگردان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش کیفیت در چنین وسایلی به حساب می‌آید.

در این مقاله مطابق شکل ۱، هدف بررسی دسته اول از نورهای سرگردان وارد بر مجموعه اپتیکی سامانه تصویربردار ماهواره‌ای سنجش‌ازدور است.



شکل ۱: نمایش نوع اول از نورهای سرگردان وارد بر یک سامانه اپتیکی

زیرا در طول سنجش زمین، ممکن است کیفیت تصویر به صورت ناگهانی یا تصادفی توسط منابع روشنایی در زوایای نامناسب آسیب ببینند. با پیشرفت‌های اخیر فناوری فضایی، دوربین‌های الکترواپتیکی نیز وارد فضای رقابتی‌تری شده‌اند. بنابراین حذف نورهای سرگردان، یک فناوری کلیدی جهت رسیدن به کیفیت بهتر در سامانه‌های اپتیکی نصب‌شده روی ماهواره‌ها، به حساب می‌آید [۵]. اولین مرحله در فرایند مقابله با نورهای سرگردان، شناسایی راه‌های ورود آن‌ها به سامانه اپتیکی است. منشأ تولید نورهای سرگردان را می‌توان در قالب موارد زیر طبقه‌بندی کرد [۴، ۶، ۷ و ۱۱]:

۱. منبع مورد نظر در میدان دید سامانه تصویربرداری باشد، ولی به هر دلیلی پرتوهای آن از مسیرهای ناخواسته و غیرمعمول به سامانه اپتیکی وارد شوند و یا درخشندگی بیش‌تری نسبت به هدف داشته باشند.
۲. منبع خارج از میدان دید باشد، مانند تشعشعات حاصل از ماه، خورشید و ستاره‌ها.
۳. منبع داخل میدان دید، اما خارج از سامانه باشد، مانند پرتوهای که میان عدسی‌ها بازتاب پیدا می‌کنند.

نورهای سرگردان^۱، نورهای ناخواسته و مزاحمی هستند که در سامانه‌های مختلف، تعریف و مفهوم متفاوتی پیدا می‌کنند. نورهای سرگردان منجر به تضعیف (محو) سیگنال و کاهش رویت‌پذیری شده و نتایج رادیومتری را دچار مشکل می‌کنند [۷-۱]. مفهوم نورهای سرگردان در سامانه‌های اپتیکی از سال ۱۹۲۰ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و به خاطر اهمیتی که دارند، مطالعه آن‌ها تاکنون نیز ادامه یافته است [۲-۱]. در سال ۱۹۷۱، دو نفر بنام‌های هینیچ^۲ و جولیفه^۳، بر اساس فرآیند ردیابی پرتو، به بررسی اصول طراحی سپر و دندان‌های درون آن جهت کاهش نورهای سرگردان پرداختند [۸]. در حال حاضر به‌طور دوسالانه کنفرانس‌های بین‌المللی در زمینه اصلاح و بهبود نظریه نورهای سرگردان برگزار می‌شود [۱]. در سال ۲۰۰۶ مطالعاتی در مورد تأثیر نورهای سرگردان در سامانه‌های اپتیکی انجام شد و یک سپر نوری به دوربین ماهواره CBERS متصل شد [۸]. همچنین در سال ۲۰۰۹ مقاله‌ای با محوریت استفاده از سپر اپتومکانیکی جهت کاهش نورهای سرگردان در یک سامانه کاتادیوپتیک میکروماهواره سنجشی ارائه شده است [۱]. در سال ۲۰۱۱ نیز تیمی متشکل از متخصصان اپتیک، کامپیوتر و الکترونیک با توجه به مأموریت دوربین فضایی ماهواره KARI، به تحلیل نورهای سرگردان این سامانه پرداختند [۵]. آقای Eunsong Oh و دوستانش در سال ۲۰۱۲ با استفاده از روش ردیابی پرتو به تحلیل نورهای سرگردان در یک ماهواره سنجش‌ازدور پرداختند [۹]. در سال‌های اخیر توجه به استفاده از پوشش‌های ضدبازتاب و جذب فوق‌سیاه (ماده‌ای که تا حدود ۹۹٪ نور را جذب می‌کند) در مبحث نورهای سرگردان افزایش یافته است، به‌طور مثال در سال ۲۰۱۵ تحقیقی روی استفاده از پوشش نانولوله‌های کربنی روی سطوح اپتیکی جهت کاهش نورهای سرگردان انجام گرفته است [۱۰].

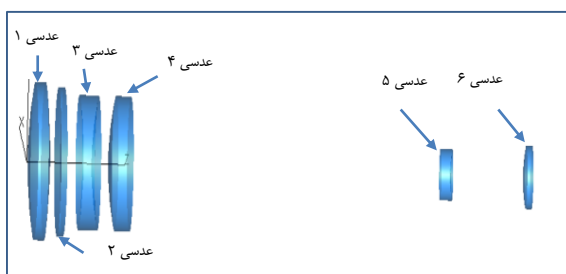
به‌طور کلی نورهای سرگردان را می‌توان به سه دسته طبقه‌بندی کرد [۶-۸]:

- نوع اول شامل نورهای سرگردان وارد بر مجموعه اپتیکی سامانه تصویربردار ماهواره‌ای است. در این سامانه‌ها، نورهای سرگردان اغلب نورهایی هستند که از خارج میدان دید^۴ وارد سامانه اپتیکی می‌شوند (شکل ۱). علاوه‌براین، سطوح و اجزای مختلف درون سامانه نیز می‌توانند در تولید نورهای سرگردان نقش زیادی داشته باشند.
- نوع دوم، نورهای سرگردان بصری یا چشمی^۵ (مربوط به چشم انسان) هستند. نور سرگردان چشمی، اثری ناخواسته و ناخوشایند از انتشار نور است که توسط چشم انسان دیده می‌شود. این نورها توسط ساختارهای داخلی چشم به وجود می‌آیند و عوامل خارجی در ایجاد آن نقشی ندارند. نورهای سرگردان چشمی را می‌توان به‌عنوان انتشار تشعشعات دیده‌شده از یک منبع نور درخشان در برابر پس‌زمینه‌ای تاریک، تجسم کرد. به‌عنوان مثال می‌توان ماشینی را که در شب، چراغ‌های جلوی آن مقابل دیدگان ما روشن است،

همان بدو ورود به سامانه، با بازتاب، کاملاً آن‌ها را به خارج از میدان دید هدایت کرده یا آن‌ها را با روش‌هایی مانند پراش، جذب سطحی و بازتاب‌های متوالی، قبل از رسیدن به آشکارساز، آن‌قدر تضعیف کرد که دیگر اثر مخربی روی کیفیت تصویر به وجود نیاورند [۶، ۱۴].

استفاده از پوشش‌های سطح سیاه و لایه‌های ضدبازتاب در سطوح مختلف و همچنین طراحی مناسب محفظه، سپرها^۸ و پره‌های^۹ اپتومکانیکی، از جمله متداول‌ترین راه‌های کاهش تأثیر نورهای سرگردان بر کیفیت تصویر است. در این مقاله صرفاً به طراحی سپر و پره‌ها و بررسی میزان تأثیرگذاری آن‌ها در مقابله با نورهای سرگردان در دوربین ماهواره طراحی شده مطابق شکل ۲، پرداخته شده است.

سامانه اپتیکی طراحی شده در این تحقیق، بر اساس جدول ۱، از ۶ عدسی تشکیل شده که در نرم‌افزار ZEMAX مدل‌سازی شده است. برای کاهش نورهای سرگردان در این سامانه به بررسی تأثیر محفظه اپتیکی و استفاده از سپر و پره‌های درون آن خواهیم پرداخت.



شکل ۲: مدل‌سازی اجزای اپتیکی دوربین ماهواره

جهت انتخاب و طراحی محفظه اپتیکی دو نکته مهم مدنظر قرار گرفت:

الف) محدودیت‌ها و قیدهای الزامی سیستمی میکروماهواره از قبیل جانمایی، حجم، جرم، شوک و تنش‌های مکانیکی لحظه پرتاب و ...
ب) بررسی تأثیر نوع ساختار محفظه و صحت‌سنجی تأثیر سپر در کاهش نورهای سرگردان با توجه به ساختار محفظه.

با توجه به موارد بالا ابتدا دو مدل محفظه اپتومکانیکی متفاوت در نرم‌افزار TracePro [۱۵] طراحی و اجزای اپتیکی دوربین ماهواره مطابق با شکل ۳، در آن‌ها تعبیه شد.

جهت بهبود عملکرد سامانه موردنظر، سطوح اپتیکی با لایه‌های دی‌الکتریک ضدبازتاب و سطوح غیراپتیکی با یک پوشش سیاه استاندارد بنام ۸-۳-۴۶۳ (که جزو پوشش‌های استاندارد تعریف شده است) که ۹۰ درصد از توان پرتوهای فرودی را جذب و مابقی را به صورت پخشی (در همه جهات و نامنظم) بازتاب می‌کند [۱۶]، پوشش داده شد. در این مقاله تأثیر استفاده از محفظه اپتیکی مناسب به همراه سپر و پره‌های درون آن در کاهش میزان نورهای سرگردان مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین صحت تأثیر سپر طراحی شده در هر دو محفظه تأیید شده است.

۴. منبع داخل سامانه اپتیکی باشد، مانند تشعشعات مادون قرمز ناشی از اجزای اپتیکی و مکانیکی داخل سامانه.

بسته به نوع سامانه و محدوده طیفی که سامانه در آن محدوده تصویربرداری می‌کند، هرکدام از انواع منابع فوق می‌توانند اهمیت بیشتری پیدا کنند. به‌عنوان مثال برای سامانه‌های اپتیکی مادون قرمز، نوع چهارم، اهمیت زیادی دارد، درحالی‌که در محدوده مرئی که در اینجا مدنظر است، نورهای سرگردان تولیدشده توسط منابع خارج از میدان دید، اهمیت بیشتری دارند.

به‌طورکلی اجزای اپتیکی سامانه تصویربردار ماهواره‌ای، با توجه به دو عامل اصلی، همواره در معرض مقادیر متفاوتی از نورهای سرگردان قرار دارند. عامل اول مدار چرخش ماهواره به دور زمین است. به‌عبارت‌دیگر 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. درواقع 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. سازوکار حرکتی ماهواره می‌تواند اجزای سامانه تصویربرداری را در معرض میزان متفاوتی از نورهای سرگردان قرار دهد. از آنجایی‌که 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 [۸]. باین‌وجود، از زاویه ۱۴ درجه، میزان نورهای سرگردان خورشیدی به شدت افزایش می‌یابد و باید در فرایند طراحی و تحلیل نورهای سرگردان این نکته موردتوجه قرار بگیرد.

نورهای سرگردان اثرات متفاوتی روی اجزای اپتیکی سامانه تصویربرداری به وجود آورده که درنهایت منجر به کاهش کیفیت داده‌های دریافت شده می‌شود. به‌طورکلی می‌توان این اثرات را در قالب موارد زیر خلاصه کرد [۸-۴، ۱۲ و ۱۳]:

- ایجاد محدودیت در محدوده دینامیکی سامانه. این اثر موجب می‌شود تا حداکثر تعداد فوتون‌هایی که توسط آشکارساز به الکترون تبدیل می‌شوند، کاهش یابد.
- کاهش میدان دید، توان تفکیک و نسبت سیگنال به نویز^۶.
- ایجاد اثرات شب‌مانند (هاله)^۷. این اثرات اغلب ناشی از پراکندگی نور از سطح و بازتاب‌های متوالی نور میان المان‌های اپتیکی شکستی (عبوری) است.
- تار شدن تصویر، تضعیف و یا حتی محو سیگنال.
- ایجاد اختلال در نتایج پرتوسنجی و محدود کردن توانایی تشخیص اجرام کم‌نور در اپتیک نجومی یا اخترشناسی.

۲- مقابله با نورهای سرگردان

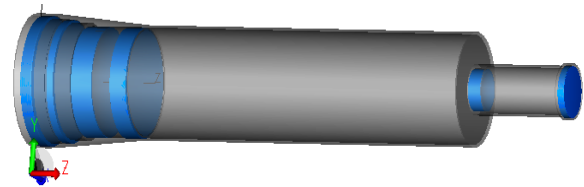
تأثیرپذیری تصویر از نورهای سرگردان، امری اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین لازم است نورهای سرگردان را کاهش داد. برای این کار باید مانع برخورد مستقیم نورهای سرگردان با المان‌های اپتیکی شد. یعنی باید در

منبع در آن عدسی را روشن می‌کند با (θ_{max}) نشان داده شده‌اند. θ_{min} و θ_{max} به صورت زیر تعریف می‌شود [۸، ۱۷]:

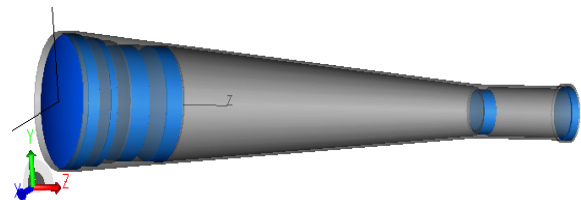
$$\theta_{min} = \tan^{-1}\left(\frac{D-d}{2L}\right) \quad (1)$$

$$\theta_{max} = \tan^{-1}\left(\frac{D+d}{2L}\right) \quad (2)$$

معمولاً تأثیر سپر در میزان دریافت نورهای سرگردان در سامانه اپتیکی با PST بیان می‌شود. PST برابر با نسبت برتابندگی نور در یک صفحه، به برتابندگی نور در زوایای مختلف نسبت به محور اپتیکی در دهانه ورودی سامانه اپتیکی است [۴، ۱۹]. PST تابع سایه نیز نامیده می‌شود، زیرا این تابع مشخص می‌کند که چه مقدار از یک صفحه توسط سپر سایه‌دار می‌شود. تابع سایه برای زوایایی از منبع که کم‌تر یا مساوی θ_{min} باشد، برابر با واحد است (یعنی بدون سایه). بنابراین طراحی سپر اغلب به نحوی انجام می‌شود که θ_{min} برابر با نصف میدان دید سامانه باشد، زیرا حاشیه امنی را به وجود می‌آورد تا از سایه‌افکنی در میدان دید مطلوب جلوگیری شود.



الف

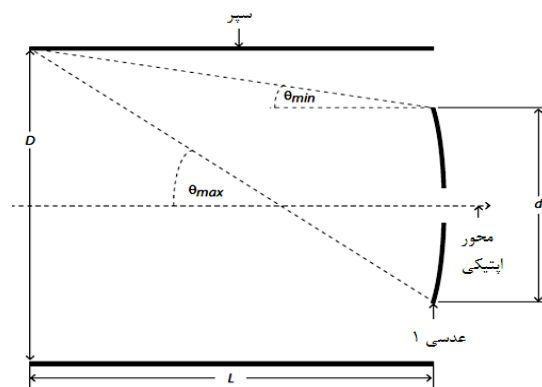


ب

شکل ۳: مدل‌های مختلف طراحی شده برای محفظه اپتیکی دوربین ماهواره. الف) محفظه استوانه‌ای به همراه المان‌های اپتیکی. ب) محفظه مخروطی به همراه المان‌های اپتیکی

جدول ۱: مشخصات اجزای اپتیکی مورداستفاده در دوربین ماهواره طراحی شده (R شعاع سطح است)

عدسی	کاتالوگ	ماده	R_1 (mm)	R_2 (mm)
۱	Schott	LITHOTEC-CAF2	۲۱۷/۶	-۳۰۲/۱
۲	Schott	TIF3	۶۳۲/۳	-۱۲۰/۵
۳	Schott	N-KZFS11	-۲۳۹/۴	۱۵۳/۴
۴	Schott	N-SSK8	۱۵۱	۹۰/۳
۵	Schott	N-FK56	-۱۸۱/۹	۵۸/۷
۶	Schott	SK5	۷۹/۹	-۳۸۸/۷



شکل ۴: ساختار سپر و پارامترهای مورد نیاز جهت طراحی آن [۴]

در سامانه‌هایی با میدان دید کوچک، انتخاب θ_{min} برابر نصف میدان دید، ممکن است منجر به طولانی‌تر شدن سپر اصلی شود. برای زوایایی از منبع نور سرگردان که بزرگ‌تر یا مساوی θ_{max} باشند، تابع سایه برابر با صفر است (یعنی سایه کامل) و سپر در صورت امکان باید به نحوی طراحی شود که θ_{max} برابر با زاویه محرومیت باشد؛ اما چنین حالتی ممکن است همواره امکان‌پذیر نباشد. باین حال، این اغلب بخشی از نیازمندی‌های نور سرگردان در سامانه بوده و حداقل زاویه‌ای را که در آن نیازمندی‌های سامانه در برابر نور سرگردان باید برآورده شود را تأمین می‌کند [۴، ۸].

با توجه به موارد فوق، جهت طراحی سپر مناسب، ابتدا باید تمام پارامترهای شکل ۴، از قبیل θ_{min} ، θ_{max} ، D ، d و L به خوبی تعریف شوند. در دوربین موردنظر، d برابر با ۱۱۰ میلی‌متر است. با توجه به میدان دید ۲ درجه‌ای دوربین، بهترین انتخاب برای θ_{min} تقریباً ۱ درجه است؛ اما انتخاب مقدار بهینه برای سه پارامتر θ_{max} ، D و L نیازمند مصالحه میان آن‌ها است.

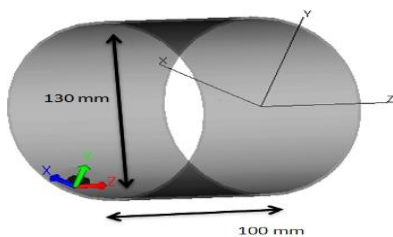
۲-۱- سپر و پره‌های اپتومکانیکی

سپر؛ قطعه اپتومکانیکی است که در دهانه ورودی سامانه نصب شده و وظیفه آن محافظت از سامانه اپتیکی در برابر نورهای سرگردان خارجی است. در واقع سپر به منظور مسدود کردن نور حاصل از منابع خارج از میدان دید، استفاده می‌شود و باید به نحوی طراحی شود که در میدان دید سایه‌افکنی نکند [۴، ۸، ۱۷ و ۱۸]. سپرها می‌توانند شکل و انواع مختلفی داشته باشند که بسته به نوع کاربری سامانه، هر کدام در جای خود کاربرد و اهمیت پیدا می‌کند. ساخت سپر ممکن است هزینه و وزن سامانه را افزایش دهد. پره‌ها یا دندانه‌ها نیز ساختارهایی درون سپر هستند که مانع از ایجاد پراکندگی می‌شوند.

طراحی سپر باید به گونه‌ای انجام شود تا با داشتن حداقل ابعاد و تعداد پره، بیش‌ترین بازدهی ممکن را داشته باشد. ساختار سپر و پارامترهای موردنیاز جهت طراحی آن، در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۴، پارامتر (D) قطر دهانه سپر، (L) طول آن و (d) قطر عدسی ۱ است. همچنین حداقل زاویه‌ای که در آن منبع خارج از میدان دید، عدسی را مستقیماً روشن نمی‌کند، با (θ_{min}) و حداکثر زاویه‌ای که

افزایش یافته است. برای حل این مشکل می‌توان از پره استفاده کرد و با اینکه با سطوح سیاهی که عملکرد بالایی در جذب نور دارند، تأثیر پرتوهای نامطلوب ورودی را کاهش داد.

از دیگر پارامترهای لازم برای طراحی سپر، قطر آن است. با توجه به قطر دهانه ورودی و محدودیت‌های سیستمی، حداکثر مقدار مجاز برای انتخاب قطر سپر، ۱۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. باین‌حال هرچقدر این مقدار بیش‌تر باشد، ارتفاع پره‌های درون سپر افزایش یافته و تأثیر سپر در بهبود عملکرد سامانه افزایش می‌یابد. از طرفی کاهش قطر سپر منجر به افزایش تعداد پره‌ها در سطح داخلی می‌شود که این افزایش خود عاملی جهت تولید نورهای سرگردان ناشی از پراش لبه پره‌ها است. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده، مدل سه‌بعدی سپر طراحی شده در نرم‌افزار TracePro در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: سپر استوانه‌ای طراحی شده در TracePro

جهت طراحی پره‌ها باید ارتفاع و فاصله آن‌ها از یکدیگر مشخص شود. بعضی از اصول طراحی پره‌ها درون سپر که بر اساس فرآیند ردیابی پرتو توسط هینیچ و جولیفه مطرح شدند، به شرح زیر است [۸]:

۱. هیچ مؤلفه اپتیکی نباید دیوارها و پرتوهای پراکنده شده از آن‌ها را مستقیماً ببیند. یعنی پرتوهای سرگردان قبل از رسیدن به اجزای اپتیکی (عدسی‌ها)، باید حداقل دو مرتبه از سطوح تاریک بازتاب داشته باشند. زیرا پرتوهای سرگردان با مرتبه بالاتر از دو نمی‌توانند تأثیر نامطلوبی در عملکرد سامانه به وجود آورند، خصوصاً اگر سطح دارای رفتار لامبرتی^{۱۱} و سیاه باشد.
۲. پرتو نور، قبل از رسیدن به عدسی‌ها، حداکثر تعداد بازتاب از سطوح سیاه درون محفظه سپر را داشته باشد.
۳. تعداد حداقلی از پره‌ها باید مستقیماً در معرض پرتوهای سرگردان قرار گیرد تا مانع عبور نورهای اضافی به سامانه اپتیکی شده و آن‌ها را پراکنده کند.
۴. تمام سطوح، مخصوصاً سطوحی که مستقیماً توسط عدسی‌ها دیده می‌شوند، باید با یک ماده سیاه پوشش داده شوند.

بنابراین می‌توان موقعیت (x) و ارتفاع پره‌ها (y) را با توجه به شکل ۴، با استفاده از روابط ۴ تا ۶ مشخص کرد [۸، ۱۷]:

$$x_{n+1} = (y_0 - y_{n+1}) \frac{L}{y_0 - a} \quad (4)$$

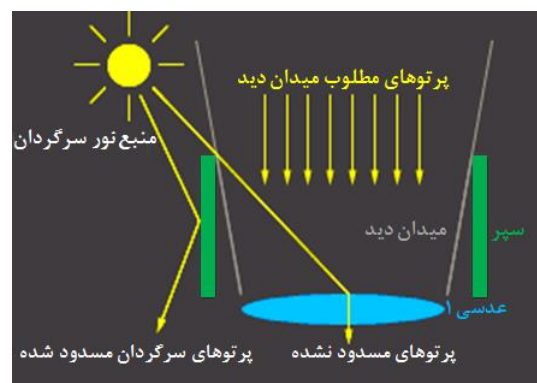
$$y_{n+1} = r - \frac{r+a}{1+z_n} \quad (5)$$

برای تعیین مقدار θ_{max} باید حداقل زاویه‌ای که دوربین می‌تواند در فضا نسبت به منبع نور سرگردان داشته باشد، مشخص شود. از آنجایی که دوربین ماهواره در مدار حرکتش به دور زمین در مدار LEO، در طول سال در زاویه‌ای در حدود ۱۴ تا ۲۹/۱ درجه نسبت به خورشید قرار می‌گیرد، بنابراین مقدار θ_{max} که همراه با حاشیه امنیت مناسب باشد، می‌تواند ۱۳ درجه باشد. با این انتخاب محور دوربین می‌تواند تا زاویه ۱۳ درجه به خورشید نزدیک شود و خورشید نمی‌تواند هیچ بخشی از عدسی شماره ۱ را مستقیماً روشن کند. بنابراین با قرار دادن مقادیر d ، θ_{min} و θ_{max} و حل معادلات روابط (۱) و (۲)، برای D و L به ترتیب مقادیر ۱۲۷/۹۹ و ۵۱۵/۴۳ میلی‌متر به دست می‌آیند. این مقادیر بهترین ابعاد را برای طراحی سامانه نشان می‌دهند، به طوری که این اطمینان را حاصل می‌کنند که به‌هیچ‌وجه عدسی ۱ مستقیماً توسط منابع نور سرگردان در زوایای بیش‌تر از ۱۳ درجه روشن نخواهد شد و درعین‌حال ابعاد سامانه حداقل مقدار ممکن را خواهد داشت.

از آنجایی که یکی از قیدهای سیستمی در میکروماهواره‌ها قید طولی است، بنابراین در این تحقیق نیز یکی از الزامات سامانه اپتیکی به همراه سپر، محدودیت طولی آن بود. از طرفی با توجه به اپتیک عبوری طراحی شده، حداکثر طول مجاز برای سپر نباید از ۱۰۰ میلی‌متر تجاوز کند. در نتیجه مقدار L باید کاهش یابد، یعنی به مقداری کم‌تر از یک پنجم طول اولیه برسد. بنابراین با حفظ مقادیر d برابر با ۱۱۰ میلی‌متر و θ_{min} برابر با ۱ درجه که غیرقابل تغییرند و با توجه به رابطه (۱)، مقدار D بهینه که بتواند محدودیت طول را نیز برآورده کند، به دست می‌آید:

$$D = (2L \tan \theta_{min}) + d \quad (3)$$

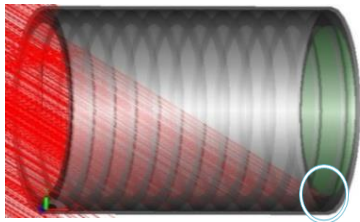
با جایگذاری سایر پارامترها D برابر با ۱۱۳ میلی‌متر می‌شود.



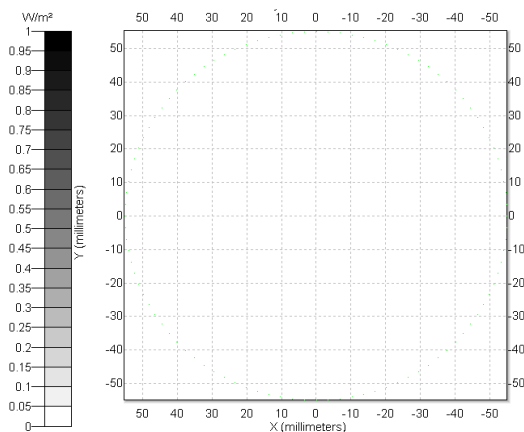
شکل ۵: تأثیر کاهش طول سپر بر ورود نورهای سرگردان به سامانه

با توجه به رابطه (۲) کاهش طول منجر به افزایش زاویه θ_{max} می‌شود، درحالی‌که با توجه به زاویه خورشید نسبت به دوربین ماهواره، θ_{max} نباید از ۱۴ درجه تجاوز کند، ولی به دلیل محدودیت طول مجبور به پذیرش زاویه ۴۸/۱۱ درجه برای θ_{max} شدیم. بنابراین خورشید در برخی از مواقع سال بخشی از دهانه ورودی دوربین (عدسی ۱) را به‌طور مستقیم روشن می‌کند (شکل ۵)، زیرا میدان دید ناخواسته تا حد زیادی

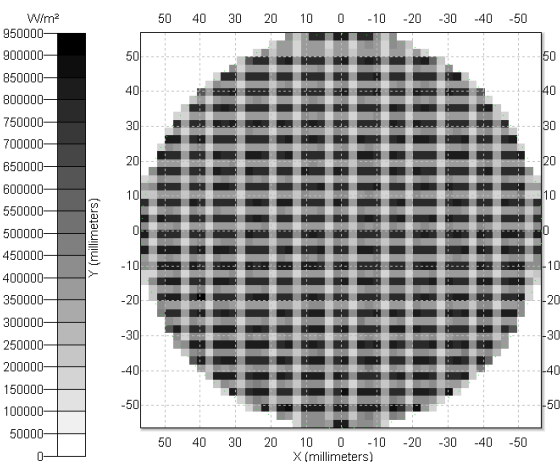
بود که در محاسبات به دنبال آن بودیم. این موضوع توسط نمودار برتابندگی در دهانه ورودی دوربین (شکل ۹) برای زوایای بیش تر از ۴۸/۱۱ درجه و مقایسه آن با برتابندگی در دو حالت دیگر (شکل ۱۰)، نیز نشان داده شده است (در شبیه‌سازی‌ها ضریب بازتابندگی تمام سطوح صفر در نظر گرفته شده تا فقط برتابندگی مستقیم پرتوهای سرگردان خارج از میدان دید نشان داده شود).
به منظور بررسی تأثیر استفاده از پره‌های درون سپر در مقابله با نورهای سرگردان، PST واقع در انتهای سپر، برای قبل و بعد از استفاده از پره‌ها، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۸: ردیابی دسته پرتوهای سرگردان خارج از میدان دید



شکل ۹: نمودار برتابندگی دریافتی در سطح دهانه ورودی دوربین (برتابندگی = صفر سایه کامل)



الف

$$z_n = 2a \left[r - y_0 + x_n \frac{y_0 - a}{L} \frac{y_0 + r}{y_0 + y_n} \right]^{-1} \quad (6)$$

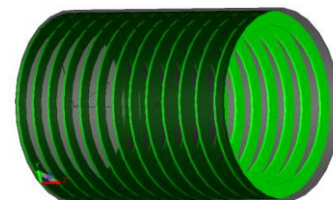
در روابط بالا x_n و $(r - y_n)$ به ترتیب موقعیت و ارتفاع پره n ام، r نیم قطر سپر، L طول سپر و a نیم قطر عدسی اول و y_0 شعاع دایره دربرگیرنده میدان دید در محل پره اول (دهانه دربرگیرنده اولین پره) می‌باشند. پره اول در دهانه سپر قرار می‌گیرد ($x_0=0$) و ارتفاع آن برابر $(r-y_0)$ است. با قرار دادن مقادیر اولیه در روابط بالا موقعیت و ارتفاع دیگر پره‌ها به دست می‌آید. مقادیر عددی محاسبه شده در جدول ۲ آورده شده است. تعداد پره‌ها تا زمانی قابل پذیرش است که $x_n < L$ باشد.

طبق جدول ۲، امکان استفاده از پره شماره ۱۳ وجود ندارد، زیرا موقعیت آن از طول سپر بیش تر شده است ($x_{13} > L$). بنابراین با احتساب پره شماره صفر، تعداد ۱۳ پره در سپر دوربین ماهواره به طول ۱۰۰ و قطر ۱۳۰ میلی‌متر، باید گنجانده شود. این کار در نرم‌افزار TracePro، مطابق شکل ۷، درون سپر مدل‌سازی شد.

جدول ۲: مقادیر عددی محاسبه شده برای موقعیت و ارتفاع پره‌ها

بر حسب میلی‌متر

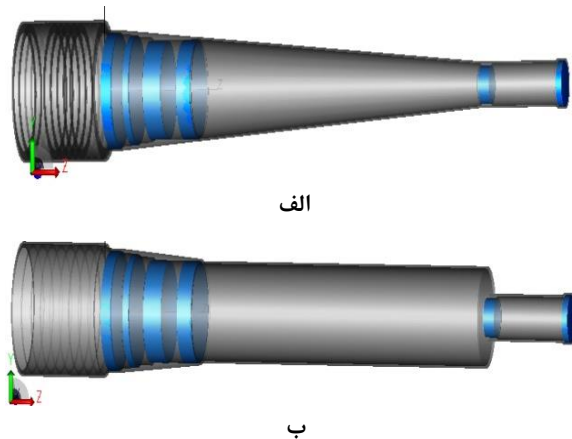
شماره پره	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶
X	۰	۷/۳۳	۱۴/۶۶	۲۱/۹۹	۲۹/۹۹	۳۷/۹۹	۴۵/۹۹
Y	۵۶/۵	۵۶/۳۹	۵۶/۲۸	۵۶/۱۷	۵۶/۰۵	۵۵/۹۳	۵۵/۸۱
شماره پره	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
X	۵۲/۹۹	۶۱/۹۹	۶۹/۹۹	۷۷/۹۹	۸۵/۹۹	۹۴/۶۵	۱۰۳/۳
Y	۵۵/۶۹	۵۵/۵۷	۵۵/۴۵	۵۵/۳۳	۵۵/۲۱	۵۵/۰۸	۵۴/۹۵



شکل ۷: سپر و پره‌های طراحی شده درون آن

همان‌طور که قبلاً بیان شد، محدودیت طول منجر شد تا θ_{max} برابر با ۴۸/۱۱ درجه شود. یعنی پرتوهای سرگردانی که تحت این زاویه و بیش تر از آن وارد دهانه سپر اپتیکی می‌شوند، نمی‌توانند دهانه ورودی دوربین (عدسی ۱) را مستقیماً روشن کنند و سپر تحت این زاویه سایه‌افکنی کامل خواهد داشت. بنابراین برتابندگی مستقیم در محل عدسی ۱ باید برابر با صفر باشد. صحت این موضوع مطابق با شکل ۸ توسط شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار نشان داده شده است.

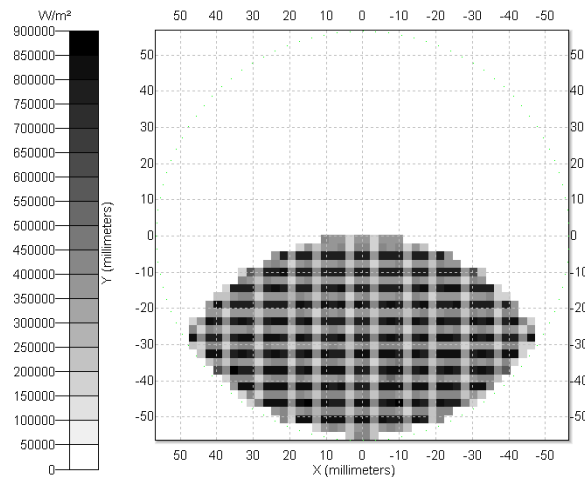
همان‌طور که مشاهده می‌شود، هیچ پرتویی (خطوط قرمز) تحت زاویه ۴۸/۱۱ درجه نتوانسته دهانه ورودی (ناحیه سبز رنگ) را به صورت مستقیم روشن کند. دایره کوچک مشخص شده در شکل ۸ نشان می‌دهد که تحت زاویه θ_{max} ، پرتوها حداکثر قادرند تا مرز جمع‌کننده نزدیک شوند، ولی هرگز نمی‌توانند آن را روشن کنند و این دقیقاً همان چیزی



الف

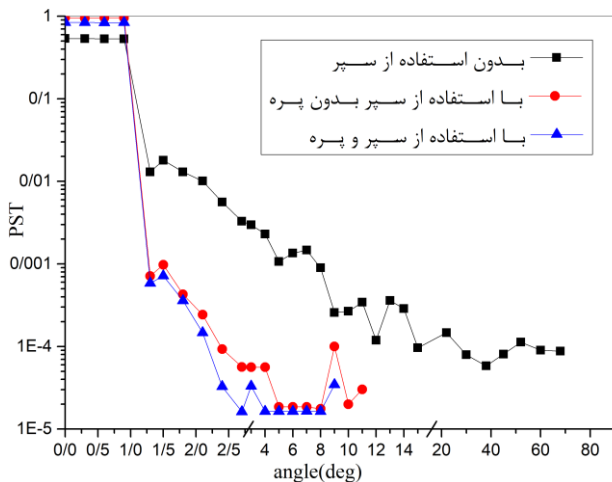
ب

شکل ۱۲: اتصال سپر و سامانه اپتیکی در مدل‌های مخروطی و استوانه‌ای. الف) اتصال سپر به مدل مخروطی. ب) اتصال سپر به مدل استوانه‌ای

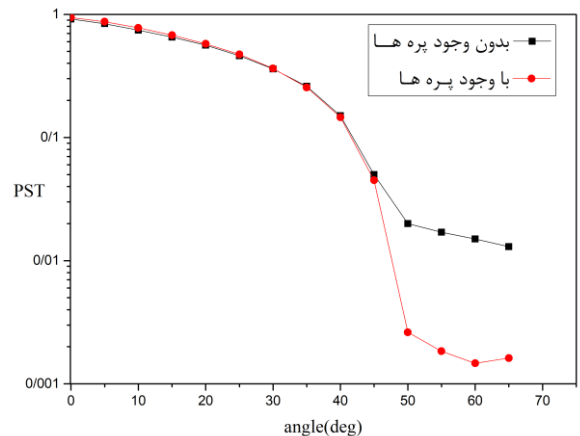


ب

شکل ۱۰: نمودار برتابندگی مستقیم دریافتی. الف) برتابندگی دریافتی در دهانه ورودی سپر. ب) برتابندگی دریافتی در دهانه ورودی دوربین تحت زاویه ۲۰ درجه



شکل ۱۳: مقایسه PST در محل آشکارساز در سه حالت مختلف برای مدل مخروطی



شکل ۱۱: مقایسه PST انتهای سپر در دو حالت با پره و بدون پره

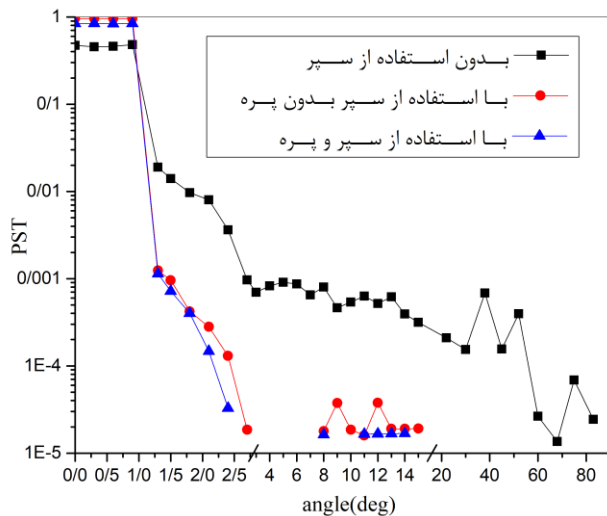
از نمودار شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با وجود سپر، PST در محدوده زوایای صفر تا یک درجه تقریباً برابر با واحد است، یعنی ساختارهایی که برای مقابله با نورهای سرگردان طراحی شده‌اند، میدان دید مطلوب را مسدود نکرده‌اند؛ درحالی‌که برای حالت بدون سپر این مقدار کم‌تر از یک است. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که در حالت بدون سپر برای محفظه مخروطی، گرچه نورهای سرگردان کاهش یافته‌اند، اما تا زاویه حدود ۷۰ درجه نیز در آشکارساز مشاهده می‌شوند. این در حالی است که با اضافه شدن سپر به سامانه، در زوایای بالاتر از یک درجه، PST خیلی کم‌تر از حالت بدون سپر شده است. به طوری که در حالت استفاده از سپر بدون پره، مقدار PST در زوایای بالاتر از ۱۱ درجه در محل آشکارساز کاملاً صفر شده است. همچنین وجود پره‌ها در سپر باعث شده که PST نسبت به حالت بدون پره کاهش یافته و مقدار آن از زاویه ۹ درجه به بعد صفر شود. وجود قله‌ها یا پیک‌های مختلف

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تا زاویه حدود ۴۵ درجه، سپر طراحی‌شده در هر دو حالت عملکرد یکسانی دارد. درحالی‌که در زوایای بیش‌تر از ۴۵ درجه، استفاده از پره‌ها باعث بهبود عملکرد سپر در مقابله با نورهای سرگردان شده است، به طوری که حدود ۱۰ برابر آن‌ها را کاهش داده است.

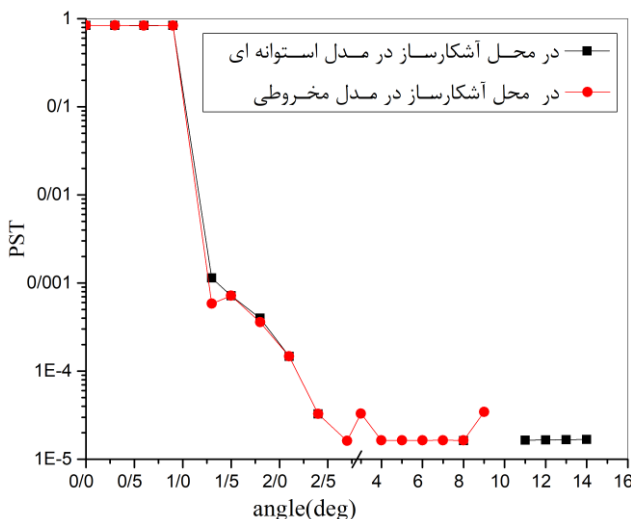
۲-۲- بررسی رفتار سپر در عملکرد سامانه اپتیکی

به‌منظور بررسی تأثیر سپر در کاهش نورهای سرگردان، در نرم‌افزار، سپر به هر دو مدل از سامانه اپتیکی (مطابق شکل ۱۲)، متصل شد. سپس PST سامانه در محل آشکارساز برای هر دو مدل محاسبه شد. نتایج حاصل از افزودن سپر، در نمودار شکل ۱۳ برای مدل مخروطی و در نمودار شکل ۱۴ برای مدل استوانه‌ای نشان داده شده است. در اینجا اهمیت انتخاب دو نوع ساختار محفظه بیش‌تر مشخص می‌شود، زیرا چنانچه سپر و پره‌های داخل آن به خوبی طراحی شده باشند، باید تأثیر عملکرد آن برای هر دو مدل به خوبی مشاهده شده و تقریباً یکسان باشد.

در این مدل میدان دید نامطلوب ۹ درجه است که یک حاشیه اطمینان ۵ درجه‌ای را به دست می‌دهد.



شکل ۱۴: مقایسه PST در محل آشکارساز در سه حالت مختلف برای مدل استوانه‌ای



شکل ۱۵: مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف طراحی شده برای سامانه اپتیکی برای مقابله با نورهای سرگردان

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای سامانه اپتیکی موردنظر پس از طراحی مناسب دو مدل محفظه در TracePro، تأثیر استفاده از محفظه مناسب، سپر و پره‌های درون آن در کاهش میزان نورهای سرگردان مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور سپری با ۱۳ پره توسط نرم‌افزار مدل‌سازی و طراحی شد. استفاده از پره‌ها، عملکرد سپر در مقابله با نورهای سرگردان را بهبود بخشید. نتایج نیز نشان می‌دهد در هر دو مدل محفظه، PST در محدوده زوایای صفر تا یک درجه تقریباً برابر با واحد است. یعنی ساختارهایی که برای مقابله با نورهای سرگردان طراحی شده‌اند، میدان دید مطلوب را مسدود نکرده‌اند؛ اما در زوایای بالاتر از یک درجه، PST به شدت کاهش

در نمودار به این دلیل است که در برخی از زوایا، بازتاب نور از سطوح، به آشکارساز رسیده و منجر به ایجاد قله شده است. همان‌طور که از شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود، به دلیل اهمیت نورهای سرگردان در زوایای نزدیک به میدان دید (زوایای کمتر از ۳ درجه)، داده‌های PST برای فواصل زوایای هر ۰/۲۵ درجه و برای زوایای بزرگ‌تر (۳ تا ۱۶ درجه) داده‌ها برای فواصل زوایای هر ۱ درجه و در نهایت برای زوایای خیلی دورتر از میدان دید، داده‌های PST برای فواصل زوایای هر ۱۰ درجه محاسبه شده‌اند.

همان‌طور که از شکل ۱۴ نیز مشاهده می‌شود، در حالت بدون استفاده از سپر در مدل استوانه‌ای، نورهای سرگردان تا زاویه حدود ۸۰ درجه نیز دریافت شده‌اند، در حالی که در حالت استفاده از سپر بدون پره نورهای سرگردان در بازه بین ۳ تا ۸ درجه و همچنین در زاویه بیش‌تر از ۱۵ درجه کاملاً حذف شده‌اند. در نهایت استفاده از سپر پره‌دار در این مدل باعث شده تا PST در زوایای ۲/۴ تا ۱۱ درجه و همچنین بیش‌تر از ۱۴ درجه کاملاً صفر شده و در زوایای باقی‌مانده نسبت به حالت سپر بدون پره کاهش محسوسی داشته باشد.

در نهایت برتابندگی حاصل از نورهای سرگردان در مدل‌های استوانه‌ای و مخروطی، پس از نصب سپر و پره‌های درون آن مطابق شکل ۱۵ مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نمودار شکل ۱۵ مشخص شد که هر دو مدل در محدوده زوایای کمتر از حدود یک درجه عملکرد کاملاً یکسانی دارند (یعنی عدم تضعیف و مسدودسازی نور در این محدوده). نمودار شکل ۱۵ نشان می‌دهد که ساختار محفظه‌ها، وجود سپر و پره‌ها باعث شده است که بعد از زاویه ۱۴ درجه در مدل استوانه‌ای و ۹ درجه در مدل مخروطی هیچ‌گونه نور سرگردانی در محل آشکارساز دریافت نشود. بنابراین در این زوایا نورهای سرگردان نمی‌توانند اثر مخربی روی کیفیت تصویر داشته باشند. از طرفی در مدل استوانه‌ای در محدوده ۲/۴ تا ۱۱ درجه، نورهای سرگردان کاملاً حذف شده و PST در این زوایا صفر شده است. همچنین در محدوده ۱۱ تا ۱۴ درجه در مدل استوانه‌ای و محدوده ۲/۵ تا ۹ درجه در مدل مخروطی میزان PST تا حدود 10^{-5} برابر مقدار اولیه کاهش یافته است؛ اما آنچه واضح است، این است که نورهای سرگردان در زوایای بالاتر از ۱۴ درجه، در هر دو مدل صفر شده‌اند. اهمیت این موضوع به این دلیل است که محدودیت در طول سپر منجر شده بود که زاویه دید نامطلوب تا ۴۸/۱۱ درجه افزایش یابد، اما با سازوکارها و اقداماتی که در طراحی کنترل‌کننده‌های میدان دید نامطلوب در نظر گرفته شد، این زاویه تا ۱۴ درجه کاهش یافت، به طوری که از این زاویه به بعد نورهای سرگردان به‌طور کامل در محل آشکارساز مسدود شدند. زاویه ۱۴ درجه به‌دست‌آمده برای میدان دید نامطلوب دارای اهمیت زیادی است، زیرا همان‌طور که گفتیم، در مدار LEO زاویه خورشید در طول سال نسبت به محور دوربین در حدود ۱۴ تا ۲۹/۱ درجه است، بنابراین دوربین می‌تواند بدون هیچ مشکلی به خورشید نزدیک شود. اما برای اینکه بتوان حاشیه اطمینان مناسبی را برای دوربین در نظر گرفت، می‌توان از مدل مخروطی استفاده کرد، زیرا

- [2] H. Qiang, "Analysis of stray light in space optical system," *Infrared*, vol. 27, no. 1, p. 26, 2006.
- [3] J. Park, W. K. Jang, S. Kim, H. S. Jang and S. Lee, "Optical noise removal in the focal plane of the spaceborne camera," *Journal of the Optical Society of Korea*, vol. 15, no. 3, pp. 278-282, 2011.
- [4] E. Fest, *Stray light analysis and control*, Bellingham, Washington US, 2013.
- [5] J. Park and W. K. Jang, "Stray light analysis of high resolution camera for a Low-Earth-Orbit satellite," *Journal of the Optical Society of Korea*, vol. 15, no. 1, pp. 52-55, 2011.
- [6] E. R. Freniere, "First-order design of optical baffles", in *Proceedings of SPIE conference: Radiation Scattering in Optical Systems*, Huntsville, US, vol. 257, pp. 19-28, 1980.
- [7] W. Smith, *Modern optical engineering*, 4th edition, McGraw-Hill, New York, US, 2008.
- [8] L. C. N. Scaduto, G. Carvalho and F. Santos, "Baffle design and analysis of stray light in multispectral camera of a brazilian satellite," *XXIX ENFMC-Annals of Optics*, 2006.
- [9] E. Oh, J. Hongb, S. W. Kimc, S. CHO and J. H. Ryu, "Stray light analysis of nearby slot source using integrated ray tracing technique," in *Proceedings of SPIE conference: Remote sensing*, Edinburgh, UK, vol. 8533, 85331R, 2012.
- [10] S. Azoubel, R. Cohen and SH. Magdassi, "Wet deposition of carbon nanotube black coatings for stray light reduction in optical systems," *Surface & Coatings Technology*, vol. 262, pp. 21-25, 2015.
- [11] V. d. Berg, L. Franssen and J. Coppens, "Ocular media clarity and stray light," *Encyclopedia of the Eye*, vol. 3, pp. 173-183, 2010.
- [12] S. Ning and Y. Zongmin, "The optimum design of the baffle of R-C system," *Optical Technique*, vol. 27, no. 2, 2003.
- [13] National Aeronautics and Space Administration, <http://www.nasa.gov/news>.
- [14] C. Jun, W. Zhi-Cheng and C. Xiao-Jie, "Design of compact, high-resolution optical System for space and Analyze stray light," in *Proceedings of SPIE conference: Optical Design and Testing*, Shanghai, China, vol. 4927, 2002.
- [15] TracePro Software, Lambda Research Corporation, <http://www.lambdaresearch.com>.
- [16] AkzoNobel Aerospace Coatings company, www.anac.com.
- [17] Y. S. Lee, Y. H. Kim, Y. Yi and J. Kim, "A baffle design for an airglow photometer on board the korea sounding rocket-III," *Journal of the Korean Astronomical Society*, vol. 33, pp. 165-172, 2000.
- [18] A. Romoli, L. Gambicorti, F. Simonettim and A. Zuccaro Marchi, "A star tracker insensitive to stray light generated by radiation sources close to the field of view," in *Proceedings of 7th International conference on Space Optics*, Toulouse, France, pp. 14-17, 2008.
- [19] S. M. Pompeaa, R. N. Pfisterer and J. S. Morgan, "A stray light analysis of the apache point observatory 3.5-Meter telescope System", in *Proceedings of SPIE conference: Astronomical Telescopes and Instrumentation*, vol. 4842, 2003

یافته است. از طرفی با اضافه نمودن سپر به سامانه، مقدار PST در زوایای بالاتر از یک درجه کم‌تر از حالت بدون سپر شده است. به‌خوبی مشاهده می‌شود که میزان نورهای سرگردان در زوایای بالاتر از ۱۴ درجه در هر دو مدل صفر شده است. بنابراین با سازوکارهای در نظر گرفته‌شده، زاویه دید نامطلوب (θ_{max})، از ۴۸/۱۱ درجه به ۱۴ درجه کاهش یافت، به‌طوری‌که از این زاویه به بعد نورهای سرگردان به‌طور کامل در محل آشکارساز مسدود شدند.

مقایسه بین دو مدل نشان می‌دهد که هر دو به‌خوبی میزان نورهای سرگردان را کاهش داده‌اند، با این تفاوت که در مدل مخروطی میدان دید نامطلوب تا ۹ درجه کاهش یافته، بنابراین حاشیه اطمینان ۵ درجه‌ای نسبت به مدل استوانه‌ای به دست می‌دهد. از طرفی در مدل استوانه‌ای اگرچه میدان دید نامطلوب تا ۱۴ درجه وجود دارد، ولی همان‌طور که از نمودارها مشاهده می‌شود، در بازه بین ۲/۴ تا ۱۱ درجه تقریباً هیچ نور سرگردانی به آشکارساز وارد نمی‌شود. همچنین ساخت مدل استوانه‌ای نسبت به مدل مخروطی راحت‌تر بوده و ساختار هندسی آن به‌گونه‌ای است که فضای مناسبی را برای طراحی دیگر ابزارهای کنترل‌کننده نورهای سرگردان، همچون پره‌های نوری درون محفظه، فراهم می‌کند. درحالی‌که به دلیل ساختار مخروطی شکل در مدل مخروطی، فضای موردنیاز برای طراحی چنین ابزارهایی وجود ندارد. بنابراین می‌توان گفت در صورت نیاز به کنترل و کاهش بیش‌تر نورهای سرگردان، مدل استوانه‌ای می‌تواند انتخاب بهتری باشد.

به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که اقدامات انجام‌شده در این مقاله منجر شد تا میدان دید نامطلوب به ۹ تا ۱۴ درجه، بسته به نوع مدل، کاهش یابد. علاوه‌براین پرتوهای میدان دید نامطلوب در محدوده زوایای ۹ تا ۱۴ درجه، تا حدود 10^{-5} برابر توان ورودی تضعیف شده‌اند. این مقدار کاهش قابل‌توجه بوده، به‌طوری‌که می‌توان از نورهای سرگردان باقی‌مانده صرف‌نظر کرد.

مراجع

- [1] R. Shi, J. Zhou, Y. Ji and W. Shen, "Stray light analysis and baffle design of remote sensing camera for microsatellite," in *Proceedings of International Conference on Optical Instruments and Technology*, Shanghai, China, vol. 7506, 75060T-1, 2009.

زیرنویس‌ها

^v Ghost

[^] Baffle

[^] Vane

^v Point Source Transmittance

[^] Lambertian

^v Stray Light

[^] Heinisch

[^] Jolliffe

[^] Field of Veiw

[^] Ocular Stray Light

[^] Signal-to-Noise Ratio (SNR)