

بررسی اثر تابشی دُز یونیزان کل بر عملکرد لیزر محموله لیدار هواشناسی (فضایی):

طراحی سیستمی ماهواره سنجش از دور در مدار LEO

مسعود خوش‌سیما^{۱*}، رضا امجدی‌فرد^۲، ساسان زمانی‌مقدم^۳ و سجاد غضنفری‌نیا^۳

۱. استادیار، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

۲. مربی، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

۳. پژوهشگر، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۵/۸/۱، پذیرش نهایی: ۹۵/۱۱/۵)

چکیده

تابش‌های محیط فضا بر عملکرد و طول عمر قطعات اپتیکی و الکترونیکی محموله ماهواره‌ها تأثیرگذار است. در این پژوهش، اثر آسیب تابشی دُز یونیزان کل بر عملکرد زیرسیستم لیزر محموله لیداریک ماهواره، در مدار ۵۰۰ کیلومتری، با مأموریت سه‌ساله، شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی‌های تابشی بر روی دو قسمت محیط بهره و پمپ با استفاده از برنامه‌نویسی C++ در جعبه ابزار GEANT4 انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد دُز تابشی دریافت‌شده در قسمت محیط بهره، در حالت بدون محافظ، برابر با ۱۹۵۱ rad است و این در حالی است که دُز القایی با در نظر گرفتن شیلد آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر به حدود ۲۷۵ rad برای محیط بهره و حدود ۶۲۳ rad برای پمپ لیزر کاهش می‌یابد. همچنین براساس محاسبات، با در نظر گرفتن مدت زمان مأموریت و مساحت جانبی، حجم حساس به تابش تعداد ذرات برخوردکننده برابر با 7×10^{12} خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد اثر تابشی دُز یونیزان کل بر بخش لیزر باعث افزایش ۱۵ درصدی جریان آستانه و کاهش توان اپتیکی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تابش‌های فضایی، دُز یونیزان کل، لیزر، لیدار، محیط بهره.

۱. مقدمه

بالا، مدت و کیفیت مأموریت را در فضا افزایش دهند. بنابر استانداردهای فضایی اروپا (ECSS) و آمریکا (NASA, AIAA) یکی از عوامل موثر بر کاهش عملکرد سامانه‌های فضایی آسیب‌های تابشی محیط فضا است (استاندارد فضایی اروپا (ECSS-Q-ST-60-15C)). مطابق با آمار مرکز اطلاعات ژئوفیزیک آمریکا در سال‌های ۱۹۷۴ تا ۱۹۹۹ بیش از ۴۵۰۰ مورد نقص عملکرد و خرابی تجهیزات ماهواره‌ها ناشی از تأثیرات تابش فضایی بوده است (گروپن، ۲۰۱۰). محیط فضا شامل انواع تابش‌های فضایی است که شدیداً بر عملکرد و طول عمر زیر سیستم لیزر ماهواره‌های دارای محموله‌های لیدار تأثیرگذار است. محموله لیدار از دو بخش اصلی اپتیکی لیزر و تلسکوپ تشکیل شده است و مهم‌ترین تأثیر تابش‌های فضایی بر عملکرد تجهیزات و قطعات اپتیکی و الکترونیکی محموله لیدار، خصوصاً بخش لیزر، می‌باشد

ماهواره‌های دارای محموله لیدار (LIDAR Light Detecting And Ranging) (سنجش از دور فعال) با مأموریت‌هایی مختلف نظیر مطالعه و اندازه‌گیری نمایه‌های قائم و پارامترهای جوئی، پایش گرد و غبار، هواویزها، رطوبت و بخار آب، اندازه‌گیری عمق لایه مرزی جو و دریاها، نقشه‌برداری و توپوگرافی، در مدار قرار می‌گیرند (افضل، ۲۰۰۶). محموله‌های لیدار معمولاً بر روی سکوی (Platform) زمینی، هوایی و فضایی نصب می‌شوند. مزیت استفاده از سکوی فضایی لیدار، برخلاف اندازه‌گیری‌های زمینی و هوایی، نبود محدودیت جغرافیایی برای بررسی و اندازه‌گیری است و همچنین با پوششی جهانی در هر بازه زمانی داده‌های جمع‌آوری شده به‌روزرسانی می‌شود. از سویی هزینه‌های زیاد طراحی، ساخت، نگهداری و استفاده از سطح فناوری پیشرفته، باعث شده است تا در روند طراحی و

تابش‌های فضایی نیز احتمالاً بر بازده و عملکرد ماهواره‌های دارای محموله‌ی لیدار، به دلیل داشتن تجهیزات اپتیکی و قطعات الکترونیکی، تأثیرگذار خواهد بود. به‌عنوان نمونه، شار تابشی نوترون‌ها و پروتون‌ها باعث کاهش توان خروجی دیودهای ساطع‌کننده نور می‌شود. همچنین این شارهای ذرات در فضا، افزایش جریان آستانه و کاهش بازده کوانتومی در لیزرهای دیودی و افزایش جریان نشتی در دیودهای نوری را سبب خواهد شد. آثار ناشی از تابش‌های در فوتودیودها به‌صورت کاهش جریان نوری و افزایش جریان تاریک نیز ظاهر می‌شود.

بررسی تاریخی کاربرد لیزر در صنایع فضایی نشان می‌دهد که اولین لیزر با فناوری حالت جامد در سال ۱۹۶۲ ساخته شد. نخستین لیزر نئودیمیم در سال ۱۹۶۴ در آزمایشگاه بل، کمی پس از اختراع لیزر یاقوتی توسعه پیدا کرد و تا به امروز در صنایع مختلف کاربردهای بسیاری داشته است. در سال ۱۹۶۸، اولین لیزر Nd:YAG (Neodimium: Yttrium Aluminum Garnet) پمپ‌شده با دیود لیزری عرضه شد. در ادامه اولین دیودهای لیزری در سال ۱۹۹۱ با کاربری فضایی ساخته شد. از آن زمان تاکنون، پروژه‌های متعدد فضایی با بهره‌گیری از قطعات اپتیکی و فناوری لیزر انجام گرفته یا در حال انجام و تعریف است. در سال ۱۹۹۴ اولین پروژه فضایی لیدار موسوم به لایت (LITE) بر روی شاتل ناسا تعریف و عملیاتی شد. هرچند در پروژه‌های آپولو در دهه هفتاد نیز اندازه‌گیری‌های ارتفاع‌سنجی از سطح ماه انجام گرفته بود. از آن به بعد پروژه‌های ماهواره‌ای دارای محموله لیدار نظیر پروژه‌های فضایی مولا (MOLA) با مأموریت ارتفاع‌سنجی از سطح مریخ، گلاس (GLAS) با مأموریت بررسی توپوگرافی سطح زمین، مشاهده زمین-۱ (EO-1) با مأموریت بررسی جو زمین و پروژه کالیپسو (CALIPSO) با مأموریت بررسی ساختار تابشی ابرها و هواویزها تعریف و عملیاتی شده‌اند. بررسی داده‌های به‌دست‌آمده از مأموریت این ماهواره‌ها نشان می‌دهد که تنش‌های تابشی بر ساختار زیرسیستم لیزر و لیزر دیودی

بخشی از محموله و مسائل مرتبط با شیلدینگ از جمله عوامل شکست یا کاهش کارایی پیش‌بینی‌شده مأموریت ماهواره‌ها بوده است. از این رو، بررسی ملاحظات و رعایت الزامات عملکردی آن‌ها دارای اهمیت است. با توجه به جستجوهای انجام‌گرفته، در ارتباط با پژوهش حاضر، فعالیتی در داخل کشور انجام نگرفته است. همچنین در مراکز پژوهشی فضایی آمریکا و اروپا نیز این تحقیقات به‌عنوان پروژه‌هایی با سطح پایین آمادگی فناوری (Technology Readiness Level) معرفی می‌شوند. در خصوص تأثیر تابش‌های فضایی بر بخش لیزر محموله‌های لیدار ماهواره سنجشی، پژوهش‌هایی انجام گرفته است (آلان جانسون، ۲۰۰۳؛ ژو و همکاران، ۱۹۹۵؛ رونر و همکاران، ۲۰۱۵؛ مایر و همکاران، ۲۰۱۵ و گیل و همکاران، ۱۹۹۷). آلان جانسون در سال ۲۰۰۳ تأثیر تابش‌های فضایی را در محیط آزمایشگاهی بر لیزرهای حالت جامد گالیم آرسناید و InP مطالعه کرد. بیشتر بودن تغییر در جریان آستانه در لیزرهای InP در مقایسه با لیزرهای InGaAs از مهم‌ترین نتایج این پژوهش است. در پژوهش‌های ژو و همکاران در سال ۱۹۹۵ که بر روی لیزرهای Nd:YAG و Nd:YLF، با استفاده از پرتوهای چشمه تابش گاما و پروتون و با محدوده انرژی بین ۳۰ MeV و ۵۰ MeV برای پروتون‌ها، انجام گرفت، نتیجه به صورتی بود که در سطح ۱۰۰ Krad تابش طول موج ارسالی توسط لیزر به 0.15 cm^{-1} محدود شد. همچنین نتایج نشان داد که لیزر Nd:YAG از Nd:YLF در برابر تابش‌های مقاوم‌تر است. در سال ۲۰۱۵، رونر و همکاران بر روی پارامترهای لیزر، در دو حالت بایاس‌شده و بایاس‌نشده، پژوهشی صورت دادند. نتیجه این آزمایش‌ها نشان داد که لیزرها در حالت بایاس‌نشده بیشتر از حالت بایاس‌شده آسیب می‌بینند و انحراف از مقدار طول موج نورخروجی نیز بررسی شد. مایر و همکاران در سال ۲۰۱۵ با قرار دادن لیزر کوانتومی در معرض تابش‌های پروتون و گاما با بررسی تغییرات در جریان آستانه و تغییرات در بازده شیب به این نتیجه

رسیدند که لیزرهای کوانتومی دارای مقاومت تابشی زیادی در برابر تابش‌های گاما هستند. پژوهش‌های گیل و همکاران (۱۹۹۷) در CERN انجام گرفت و نتایج قابل توجهی را عرضه کرد. با قرار گرفتن لیزرهای InGaAsP و فوتودیودهای InGaAs در معرض 10^{15} نوترون با انرژی ۶ MeV و 4×10^{14} پروتون با انرژی ۲۴ GeV تغییرات چشمگیری مشاهده نشد اما پس از آن جریان دیودی با شیبی بسیار زیاد کاهش یافت. آسیب ناشی از گاما بعد از ۱۰۰ KGy در مقایسه با آسیب‌های تابشی ناشی از هادرون‌ها بسیار ناچیز بوده است.

هدف این پژوهش که بخشی از طراحی پروژه محموله لیدار فضایی است، شبیه‌سازی و بررسی یکی از اثرهای تابش‌های محیطی فضا، آسیب دُز یونیزان کل، بر بخش لیزر محموله لیدار است. این محموله قرار است بر روی یک ماهواره نصب شود و از سال ۲۰۱۶ برای مدت سه سال مأموریت خود را در مدار ۵۰۰ تا ۵۵۰ کیلومتری آغاز کند. در این ارتفاع عوامل تابشی زیادی وجود دارند که می‌توانند به حجم‌های حساس محموله ماهواره آسیب برسانند. از جمله این عوامل تابشی، می‌توان به الکترون‌ها و پروتون‌های موجود در کمربند ون‌آلن و همچنین پرتوهای کیهانی و خورشیدی اشاره کرد.

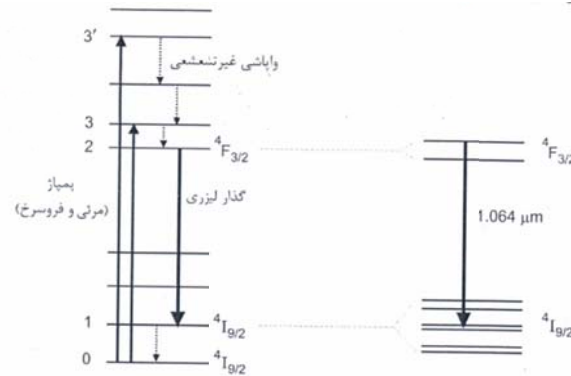
۲. مبانی نظری و روش کار

۲-۱. مبانی فیزیکی لیزرهای فضایی: لیزر حالت جامد بخش لیزر در یک محموله لیدار از سه جزء اصلی تشکیل شده است. این اجزا عبارتند از محیط بهره، که در آن نور لیزر تقویت می‌شود، آینه‌ها، که در آن پرتوهای نور منعکس می‌شوند و پمپاژ نوری، که تغذیه انرژی لیزر بوسیله آن انجام می‌شود. در هر لیزر حالت جامد محیط بهره و پمپاژ نوری دیودی، همواره در معرض تابش و تحت تأثیر آسیب‌های وابسته به آن

قرار دارند.

نور ضمن انتشار در بین آینه‌های کاواک، محیط بهره، Nd:YAG، تقویت می‌شود. تقویت در یک سامانه لیزر به وسیله گسیل القایی رخ می‌دهد. گسیل القایی یکی از سه فرایند اصلی است که در آن اتم می‌تواند یک گذار (انتقال) نوری بین دو سطح انرژی ایجاد کند. تقویت نوری وقتی حاصل می‌شود که جمعیت الکترون‌های تراز بالایی (N_1) بزرگ‌تر از جمعیت الکترون‌های تراز پایینی (N_2) شود (وضعیتی که وارونگی جمعیت نامیده می‌شود)؛ ضریب بهره در محیط ثابتی با سطح مقطع نوری مشخص با اختلاف جمعیت دو تراز متناسب است. انرژی ترازهای پایینی یون نئودیوم (Nd^{3+}) در شکل ۱ نشان داده شده است. در اصل، گذار لیزری می‌تواند بین هر جفت تراز رخ دهد، اما وارونگی جمعیت تنها زمانی به دست می‌آید که تراز بالاتر لیزر طول عمر بیشتری داشته باشد. طول عمر بیشتر ترازهای $F_{3/2}^*$ به نسبت کوتاه است زیرا آسودگی غیرتابشی موثری به پایین‌ترین تراز بعدی صورت می‌گیرد. شکاف باند بین $F_{3/2}^*$ در پایین‌ترین تراز بعدی آن خیلی بزرگ است و از این رو احتمال واپاشی غیرتابشی کم است؛ بنابراین به‌طور منطقی طول عمر $F_{3/2}^*$ طولانی است و آن را به انتخابی مناسب برای تراز بالایی لیزر تبدیل می‌کند.

مهم‌ترین گذار لیزر در Nd^{3+} از $F_{3/2}^*$ (تراز ۲ بالاتر لیزر) به $I_{11/2}^*$ (تراز ۲ بالاتر لیزر) به $I_{11/2}^*$ (تراز یک پایین‌تر لیزر) است. از آنجایی که در شکل ۱ تراز پایین‌تر لیزر حالت پایه نیست، این وضعیت موجب ایجاد یک سیستم چهار تراز می‌شود. رسیدن به وارونگی جمعیت در یک سیستم چهار تراز بسیار آسان‌تر از به‌دست آوردن آن در سیستم سه تراز است زیرا در سیستم چهار تراز نیازی نیست که نصف یون‌ها از حالت پایه خارج شوند.



شکل ۱. (سمت چپ) سطوح انرژی در Nd^{3+} گذار لیزری از تراز نامتعادل ${}^4F_{3/2}$ به حالت برانگیخته ${}^4I_{11/2}$ یک سیستم چهار سطحی ایجاد می‌کند. خطوط پر و نقطه نقطه به ترتیب نشان‌دهنده گذارهای تابشی و غیرتابشی هستند. (سمت راست) هر سطح شامل تعدادی زیر سطح انرژی است و گذار لیزر بین یک جفت خاص از زیرسطوح رخ می‌دهد (علیایی و قهرمانی راد، ۱۳۹۴).

در کاواک لیزر تعریف می‌شود. لیزر حالت جامد نئودیمیم پُرکاربردترین لیزر در صنایع فضایی (محموله‌های فضایی) است. محیط بهره در لیزرهای حالت جامد شامل عایق دی‌الکتریک با ناخالصی یون Nd^{3+} است. گذارهای نوری در این لیزر در ناحیه‌های مرئی و فرورسرخ نزدیک است. ترازهای انرژی آن به خوبی تفکیک شده هستند و تنها وابستگی کمی به یون ناخالص شده دارند. این عدم حساسیت انرژی گذار به یون از یک اثر حفاظتی که منحصر به خاک کمیاب است، ناشی می‌شود. در لیزری با ترکیب Nd^{3+} و $Y_3Al_5O_{12}$ (ایتریم آلومینیوم گارنت (Yttrium Aluminum Garnet)) ترکیب میزبان-یون به صورت Nd:YAG، گذار لیزر در 1064nm که در ناحیه فرورسرخ نزدیک است، رخ می‌دهد. گذار در لیزر مذکور به این دلیل در طول موج 1064nm رخ می‌دهد که این گذار بیشترین سطح مقطع گسیل را دارد. وقتی تولید لیزر روی این گذار آغاز می‌شود، بهره لیزر در بالای مقدار آستانه باقی می‌ماند و روی گذارهای دیگر در حالت زیر آستانه (با فرض پهن‌شدگی همگن) خواهد بود.

۲-۲. لیزر دیودی (بمپاژ نوری)

همان‌طور که ذکر شد محیط بهره در واقع ماده بین آینه‌های کاواک است و نور را که بین آینه‌ها منتشر می‌شود، تقویت می‌کند. در طراحی لیزر محموله لیدار،

با این فرض بررسی تخصصی‌تر آغاز می‌شود، در حالت کلی بازترکیب تراز به تراز (باند به باند) با انتشار فوتون همراه است. در شرایط عادی در شرایط آستانه، برای مکانیزم گسیل پرتو از لیزر فرض می‌شود که بازترکیب غیرتابشی، نزدیک به ناحیه آستانه، قابل چشم‌پوشی است، اما این فرض برای لیزر بعد از پرتودهی نقض می‌شود زیرا با برخورد ذرات و به دام افتادن آن‌ها افزایش قابل ملاحظه‌ای در بازترکیب غیرتابشی ایجاد می‌شود. شرایط آستانه در یک لیزر حالت جامد، به افزایش نرخ بازترکیب تابشی بستگی دارد؛ مشروط به اینکه نسبت فوتون‌های ناشی از بازترکیب تابشی برای انتشار القایی در تبدیل به فرآیند بازترکیب به سطح شدت آستانه تعریف شده برسند. فوتون‌های تولید شده توسط بازترکیب تابشی خودبه‌خودی دارای جهت‌های تصادفی است و در نتیجه، تنها، بخش اندکی از تمام فوتون‌ها در فرآیند انتشار القایی شرکت می‌کنند. بهره در ساختار لیزر به مشخصات لیزر و ساختار فیزیکی آن بستگی دارد. شرایط کلی برای عملکرد لیزر برای محیط بهره (کاواک) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma G_{th} = \alpha_i + \alpha_m = \frac{1}{v_g \tau_p} \quad (1)$$

در رابطه ۱، Γ فاکتور محدودیت مد، G_{th} شرط بهره آستانه، α_i اتلاف اپتیکی داخلی در کاواک، α_m اتلاف موثر در دو آینه، v_g سرعت گروه، τ_p نرخ میرایی فوتون

برخی ذرات پرنرژی ناشی از بادهای خورشیدی و برخی ذرات کیهانی پس از رسیدن به جو زمین، در دام میدان‌های مغناطیسی زمین گرفتار می‌شوند و شروع به گردش به دور زمین می‌کنند. کمرندهای ون‌آلن از ارتفاع حدود ۱۰۰۰ Km تا ۶۵۰۰۰ Km گسترش یافته‌اند. این کمرندها، اکثراً از الکترون‌هایی با انرژی چند مگاالکترون ولت (MeV) و پروتون‌هایی با انرژی چند صد مگاالکترون ولت (MeV) تشکیل شده‌اند. ذرات پرنرژی کیهانی، یون‌هایی پرنرژی هستند که از خارج از منظومه شمسی وارد آن می‌شوند (هوگتون، ۲۰۰۲). این پرتوها، شامل ۸۵ درصد پروتون، ۱۴ درصد آلفا و ۱ درصد یون‌های سنگین هستند. مهم‌ترین آسیب‌هایی که بر اساس نوع مکانیزم به لیزرها و قطعات اپتیکی حالت جامد وارد می‌شود، آسیب دُز یونیزان کل (Total ionizing dose) و آسیب جابه‌جایی (Displacement damage) است. آسیب دُز یونیزان کل در نتیجه گذر ذرات باردار و اندرکنش کولنی با ماده به وجود می‌آید. آسیب جابه‌جایی در نتیجه برخورد ذرات در حال عبور با اتم‌های ماده به وجود می‌آید (فیفر، ۲۰۰۴).

۲-۳-۱. آسیب دُز یونیزان کل

اثرات دُز یونیزان کل به دو عامل مهم بستگی دارد؛ اولین عامل در قطعات نیمه‌رسانا تولید زوج‌های الکترون-حفره داخل لایه‌های دی‌الکتریک (برای مثال اکسیدها) است و دومین عامل محل به دام افتادن بارها (داخل یا نزدیک مرزهای نواحی مختلف) است. این آسیب می‌تواند به از دست رفتن تدریجی عملکرد و خرابی احتمالی آن منجر شود. شیفت ولتاژ آستانه، کاهش در جریان کاری (درایو) و سرعت سوئیچینگ، افزایش جریان نشتی در قطعات ماسفت و جریان نشتی سطحی و نویز، از نمونه اثرات این آسیب می‌باشد. برای ترانزیستورهای دوقطبی، کاهش تدریجی β_{FE} ، جریان نشتی، به وجود آمدن ولتاژ آفست، تغییرات جریان آفست، جریان بایاس و کاهش تدریجی بهره در قطعات آنالوگ قابل ذکر است. از دیگر اثرات

بازخوردی که توسط آینه‌ها برای نوسان لیزر ایجاد می‌شود نیازمند یک کمرینه توان پمپاژ برای تولید نور لیزر است که توان پمپاژ آستانه نام دارد؛ این توان خروجی لیزر به نوعی وابسته به همین توان اولیه است. با توجه به اینکه مقداری به‌عنوان آستانه برای پمپاژ وجود دارد، در بالای شرط آستانه، شدت نور لیزر به‌طور خطی با توان پمپاژ افزایش می‌یابد. توان خروجی لیزر در محموله لیدار با محیط بهره که وظیفه تقویت نور را دارد و قسمت پمپاژ نور که انرژی لیزر را تأمین می‌کند، متناسب است. مطابق با استاندارد آژانس فضایی اروپا تابش‌های بر عملکرد لیزر نظیر توان خروجی و مقدار جریان آستانه تأثیرگذار است. منبع پمپاژ نور در لیزر می‌تواند یک لامپ با شدت بالا (پمپاژ لامپی) یا یک لیزر دیگر (پمپاژ لیزر) باشد. لیزر Nd^{3+} با یک لیزر دیودی پمپاژ می‌شود. بروز اختلالات ناشی از تابش‌های، در لیزرهای حالت جامد، باعث ایجاد نقصان در مراکز بازترکیب در هر تراز (باند) می‌شود. این نقص‌ها نرخ‌های بازترکیب غیرتابشی در نیمه‌رسانا را افزایش می‌دهند و الکترون‌های خارج‌شده را به دام می‌اندازد. تولید مراکز بازترکیب غیرتابشی، طول عمر حامل را کاهش می‌دهد و فرآیند تابشی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اثر شبکه با مراکز بازترکیب غیرتابشی افزایش می‌یابد که نتیجه آن کاهش توان خروجی دیود لیزری است. برای ثابت‌بودن توان خروجی دیود لیزری، جریان بالاتری می‌بایست تزریق شود که این امر جریان آستانه دیود لیزری را افزایش می‌دهد. قابلیت تحرک نیز توسط آسیب جابه‌جایی کاهش می‌یابد ولی در برابر آسیب به طول عمر حامل‌های اقلیت اهمیت کمتری دارد.

۲-۳. آسیب‌های تابشی محیط فضا

مهم‌ترین تابش‌های فضایی عبارت‌اند از تابش‌های حاصل از فعالیت‌های دوره‌ای خورشیدی، پرتوهای کیهانی کهکشانی، کمرندهای ون‌آلن. خورشید همواره یک جریان پلاسمای خنثی را که عمدتاً از پروتون‌ها و الکترون‌ها تشکیل شده است در محیط فضا گسیل می‌کند.

۳. تعریف مواد و مشخصات اتمی مربوط به آن‌ها: تک تک قطعات از مواد خاصی تشکیل شده است. در جعبه‌ابزار GEANT4 باید تک تک اتم‌های سازنده مولکول‌های هر کدام از آن مواد را تعریف کرد.

۴. اندازه حجم حساس (ابعاد لیزر): در جعبه ابزار GEANT4 باید مشخص شود که در کدام حجم می‌خواهیم کمیت مورد نظر را اندازه‌گیری کنیم. به همین منظور یک ناحیه تعریف می‌شود تا برنامه، به صورت تصادفی، یک نقطه از نقاط موجود در ناحیه‌ای که قطعه در آن وجود دارد را انتخاب کند و ذره پس از پرتاب دقیقاً به هدف برخورد کند.

۵. فیزیک مناسب برای اندازه‌گیری: در جعبه ابزار GEANT4، اندرکنش‌هایی که رخ می‌دهد باید به‌عنوان فیزیک مورد نیاز در شبیه‌سازی تعریف شود. این جعبه‌ابزار، مجموعه‌هایی از فیزیک‌های از پیش تعریف شده را نیز به صورت فایل آماده تعریف کرده است.

۶. محل قرارگیری اولیه ذره برای پرتاب: برای در نظر گرفتن شبیه‌سازی در کوتاه‌ترین مدت زمان ممکن که منطبق با واقعیت باشد، یک قابلیت وجود دارد که با قراردادن حجم حساس تحت استرس، عمر قطعه را می‌توان به دست آورد. به همین منظور یک بردار جهت بین قطعه و محل قرارگیری اولیه ذره تعریف می‌شود تا مدت شبیه‌سازی، بدون از دست رفتن دقت، به کمترین زمان ممکن برسد.

۷. هندسه: در جعبه‌ابزار GEANT4، هندسه مورد نظر را می‌توان با تمام جزئیات با استفاده از اشکال ریاضی ترسیم کرد. هندسه استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است. از آنجایی که میزان ضخامت حفاظ در نتایج تأثیر مستقیم دارد، در تمام این شبیه‌سازی‌ها، هر کدام از دیواره‌های محافظ دارای ضخامت ۲ میلی‌متر هستند.

این آسیب می‌تواند شیفیت فرکانسی در کریستال‌ها، افت مکانیکی و تغییرات در مشخصات دی‌الکتریک در سطوح پلیمری خارجی را نیز نام برد. بسیاری از قطعات الکترونیکی تنها به دُز یونیزان کل حساس هستند ولی فیبرهای نوری وابستگی‌های دیگری از جمله نرخ دُز وارد شده، دما در زمان قرار گرفتن در معرض تابش و طول موج عملکردی هم دارند (استاندارد فضایی اروپا، سری مهندسی، ۲۰۱۲).

۳. شبیه‌سازی و روش کار

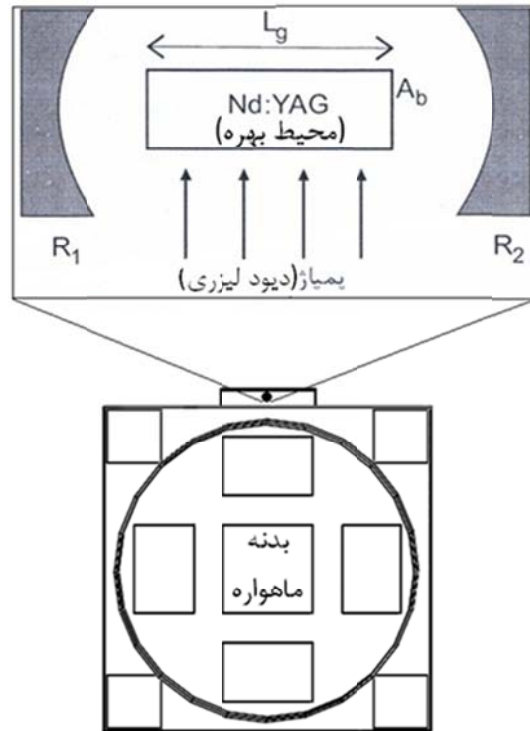
روشی که توسط شبیه‌سازهای تابشی در نظر گرفته می‌شود، روش مونت‌کارلو است که با وارد کردن اطلاعات توسط کاربر مدل تعریف و اجرایی می‌شود. در جعبه‌ابزار GEANT4، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C++ پارامترهای ورودی به مدل تزریق می‌شود. طبق استاندارد مرجع فضایی اروپا (۲۰۱۰)، دُز یونیزان کل با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود (استاندارد فضایی اروپا، سری مهندسی، ۲۰۱۲).

$$D = \frac{1}{\rho} \int_{E_1}^{E_2} \psi(E) \frac{dE}{dx}(E) dE \quad (2)$$

پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی دُز یونیزان کل شامل موارد زیر است:

۱. شار و فراوانی درصدی آن‌ها: شار و فراوانی درصدی این ذرات از برنامه OMERE استخراج شده است. مهم‌ترین عوامل تابشی ذره‌ای در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتر، الکترون‌ها و پروتون‌ها هستند.

۲. تعداد و انرژی ذرات: داده‌های ورودی در شبیه‌سازی، تعداد ذراتی که به هدف برخورد می‌کنند و همچنین میانگین شار ذرات برخوردکننده به هدف را شامل می‌شوند که با استفاده از نرم‌افزار OMERE محاسبه شده است. سپس با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C++ در جعبه‌ابزار GEANT4 وارد می‌شود.



شکل ۲. مقطعی از ماهواره (نمایی از تلسکوپ و لیزر محموله لیدار) نشان داده شده است و محل قرار گرفتن لیزر در آن مشخص شده است. در این شکل R1 و R2 آیینه‌های موجود در لیزر هستند. در قسمت بزرگنمایی شده، حجم حساس لیزر Nd:YAG و پمپاژ نوری (لیزر دیودی) نشان داده شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده در GEANT4 براساس این هندسه انجام شده است. شبیه‌سازی‌ها در GEANT4 براساس این هندسه انجام گرفته است.

ظرفیت دریافت مقادیر بیشتری از دُز را نیز دارند.

۴. نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در دو وضعیت متفاوت، بدون در نظر گرفتن شیلد و با در نظر گرفتن شیلد، ارائه شده است. بازه انرژی ذرات برای پروتون‌های کمربند داخلی ون‌آلن از حدود انرژی 0.1 MeV تا 300 MeV و برای الکترون‌های موجود در ارتفاع 500 کیلومتر، بین 0.04 MeV تا $6/5 \text{ MeV}$ است. مطابق با استاندارد فضایی اروپا در مدار LEO (Low Earth Orbit) با مأموریت بیش از 5 سال، حداقل مقدار تابش‌های حدود 5 Krad خواهد بود که بیشتر این مقدار در هنگام عبور از ناحیه (South Atlantic Anomaly) SAA دریافت خواهد شد. در بعضی موارد و در صورتی که سخت‌افزار محافظت نشود، تابش‌های می‌تواند تا سطح Mrad نیز برسد. این مقدار دُز براساس نوع مدار، مأموریت و میزان شیلدینگ و مدت زمان مأموریت متغیر خواهد بود. اگرچه طبق استانداردهای نظامی قطعات

۴-۱. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام گرفته بدون در نظر

گرفتن شیلد

در شبیه‌سازی‌هایی که با استفاده از جعبه ابزار GEANT4 انجام می‌شود، در صورتی که هیچ‌گونه محافظی بر روی قسمت‌های مختلف لیزر قرار نگیرد، مقدار دُز رسیده به محیط بهره 1951 rad خواهد بود. برای کاهش آسیب ناشی از این مقدار دُز به حجم حساس، از محافظ آلومینیومی استفاده می‌شود تا قیود و الزامات مأموریت در نظر گرفته شود و با بیشترین بازده، مأموریت با سطح بالاتری از قابلیت اطمینان انجام گیرد. به دلیل اینکه شبیه‌سازی‌ها نشان داد که بدون استفاده از محافظ (شیلد) مقدار دُز زیادی به محیط بهره وارد شده است و مطابق با استانداردهای معتبر انجام مأموریت با این شرایط غیرممکن است، از بررسی‌های تشعشی برای لیزر دیودی

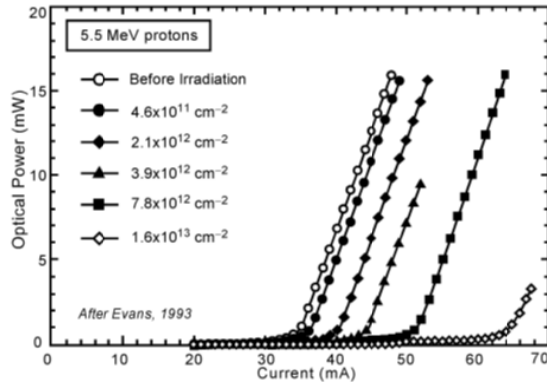
پیمی بدون در نظر گرفتن محافظ صرف نظر شده است. در ادامه به بررسی شبیه‌سازی اثر دُز یونیزان کل بر محیط‌های بهره و دیود لیزری پیمی پرداخته خواهد شد.

۴-۲. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام گرفته با در نظر گرفتن

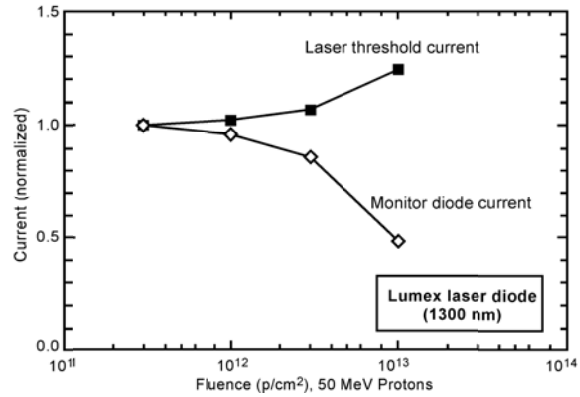
شیلد

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده میزان دُز تابشی دریافت شده در قسمت محیط بهره برابر با 1951 rad برآورد شد که این میزان دُز مطابق با نتایج پژوهش‌های جانسون و تنسو (۲۰۰۴)، تا حدودی باعث افزایش جریان آستانه و کاهش توان خروجی در لیزر می‌شود. برای کاهش دُز دریافتی، از محافظ با ضخامت ۲ میلی‌متر (ضخامت استاندارد) برای محموله ماهواره استفاده شده است. در صورتی که بیش از این ضخامت شیلد استفاده شود، الزامات جرمی ماهواره رعایت نشده است. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط جعبه ابزار GEANT4 دُز به دست آمده حدود 275 rad در محیط بهره و حدود 623 rad در پمپ دیودی است. در تمام شبیه‌سازی‌ها، با توجه به مدت زمان مأموریت و تعداد ذرات برخوردکننده به هدف که به ارتفاع و زاویه انحراف وابسته است، تعداد ذرات برخوردکننده به هدف محاسبه می‌شود. از آنجایی که شبیه‌سازی و مدل‌سازی شار کل طی مأموریت، نیازمند حجم پردازش زیادی است، شار کل ذرات را با بهره‌گیری از روش پیشنهادی ناسا محاسبه می‌کنیم. با توجه به اینکه شار عبوری در هر سانتی‌متر مربع در هر ثانیه در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتر ۳۰۰۰ ذره محاسبه شده است، اگر تمام ثانیه‌های موجود در طول مدت سه سال را در این شار عبوری ضرب کنیم، نتیجه محاسبه عددی حدود ۳۰۰ میلیارد خواهد بود که با گزارش فنی مرکز فضایی گودارد ناسا (Goddard Space Flight Center) مطابق است (اوت، ۲۰۰۶). شار پرتوهای کیهانی در بیشترین مقدار به ۴ ذره بر سانتی‌متر مربع در هر ثانیه می‌رسد (اسپون، ۲۰۱۴)؛ بنابراین با توجه به نحوه احتساب ذرات،

در مدت زمان مأموریت، ۴۰۰ میلیون ذره به هر سانتی‌متر از حجم حساس تعریف شده برخورد خواهد کرد. برای به دست آمدن تعداد ذرات بر کل مساحت، باید مقدار دُز را در مساحت جانبی قطعه ضرب کنیم. در شبیه‌سازی، با توجه به اینکه مساحت جانبی محیط بهره برابر با $22/7$ سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شده است، تعداد ذرات برخوردکننده برابر با 7×10^{12} ذره محاسبه شده است. مطابق با نتایج (اوت، ۲۰۰۶) تعداد 10^{11} پروتون با انرژی 60 MeV حدوداً 1 krad دُز القا می‌کند که این مقدار دُز عملکرد قطعات الکترونیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو محیط فضا که سرشار از عوامل و ذرات تابشی با انرژی‌های متفاوت است، می‌تواند عملکرد محموله لیزری لیدار را تحت تأثیر قرار دهد. لازم به ذکر است که تمام دیواره‌های طراحی شده به‌عنوان محافظ دارای ضخامت ۲ میلی‌متر هستند. در شبیه‌سازی‌هایی که به‌عنوان نتایج این پژوهش ارائه خواهد شد، به علت اینکه تابش‌های بر روی تمام عناصر سیستم لیزر تأثیر می‌گذارد، شبیه‌سازی‌ها برای هر دو قسمت محیط بهره و دیود لیزری تکرار شده است. با توجه به اینکه در مدارهای نزدیک زمین، پروتون‌ها تأثیرگذارترین ذرات حساب می‌شوند و بازه انرژی الکترون‌ها محدود است، پروتون بیشترین تأثیر را بر قطعات خواهد داشت. از طرفی با توجه به اینکه در تمام پژوهش‌های مشابه، شبیه‌سازی‌ها به‌صورت تک انرژی براساس شار زمانی انجام گرفته است و در این پژوهش شرایط واقعی و با طیف گسترده از ذرات در نظر گرفته شده است، باید از نتایج پروتون‌هایی که بیشترین آسیب را در قطعه القا می‌کنند آسیب را برآورد کرد. لازم به ذکر است؛ به علت تک انرژی بودن شبیه‌سازی‌ها در پژوهش‌هایی که برای تأیید صحت نتایج استفاده می‌شود، تفاوت نتایج به دلیل تفاوت در انرژی ذرات و سطح مقطع آن‌ها در شرایط مختلف است؛ بنابراین باید به‌صورت تقریبی بازه‌ای را که بیشترین درصد ذرات در آن قرار دارند مورد توجه قرار داد.



(ب)



(الف)

شکل ۳. الف) نمودار جریان آستانه لیزر برحسب شار زمانی پروتون‌های ۵۰ MeV (جانسون، ۲۰۰۳) ب) اثر آسیب پروتونی بر توان اپتیکی دیود لیزری برحسب جریان.

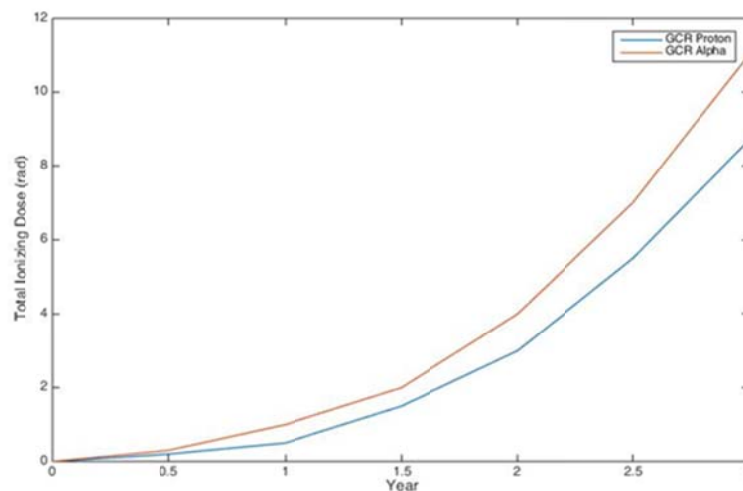
جریان آستانه افزایش می‌یابد و برای رسیدن به توان اپتیکی مورد نظر، جریان بیشتر و به دنبال آن توان بیشتری به محموله تحمیل خواهد شد. در خصوص بررسی تغییرات توان لیزر، با استفاده از الگوی آزمایش جانسون، می‌توان با استفاده از دو پارامتر تعداد ذراتی که به حجم حساس برخورد خواهند کرد و تغییرات جریان آستانه، را محاسبه کرد. از اینرو، با ترسیم نمودار جریان و توان شرایطی حدی لیزر مشخص می‌شود.

۳-۴. تغییرات شار ذرات برای محیط بهره (Nd:YAG) تغییرات شبیه‌سازی شده شار ذرات برای محیط بهره در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است که در آن محور افقی نشان‌دهنده زمان برحسب سال و محور عمودی نمودار دُز القایی برحسب rad است. در شکل ۴-الف محور عمودی نشان‌دهنده دُز القایی توسط پرتوهای کیهانی در محیط بهره است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین دُز یونیزان ناشی از شار ذرات کیهانی در محیط بهره، به ترتیب ۹ rad و ۱۱ rad برای پروتون‌ها و ذرات آلفا شبیه‌سازی شده است که در پایان سال سوم مأموریت رخ خواهد داد. بیشترین شیب افزایش دُز از سال دوم مأموریت ایجاد خواهد شد که از حدود ۴ rad به حدود ۱۰ rad روند افزایشی دارد. همچنین، این نمودار به

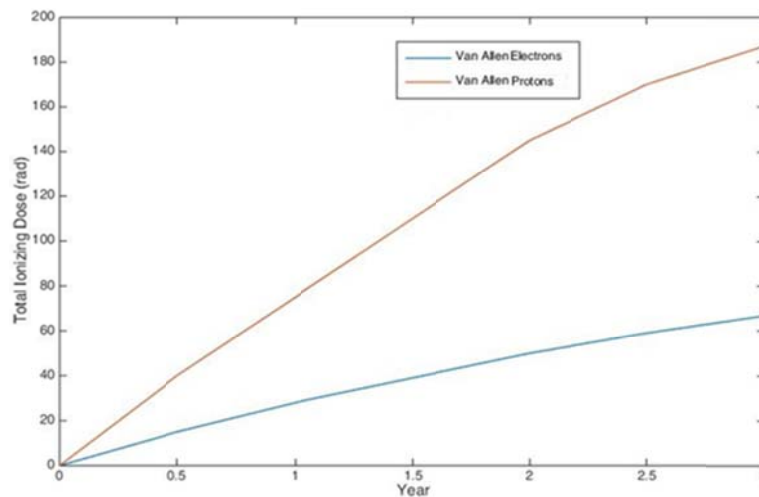
مطابق با نتایج جانسون و همکاران (۲۰۰۳) که در شکل ۳-الف بیان شده است، نمودار جریان آستانه لیزر برحسب شار زمانی پروتون‌های ۵۰ MeV است که محور عمودی میزان جریان نرمالیزه شده و محور افقی میزان شار زمانی را نشان می‌دهد. در نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها، مقدار دُز در واحد سانتی‌متر مربع محاسبه شده است. در شکل ۳ با ضرب کردن دُز القایی به دست آمده در واحد سطح، در مساحت جانبی، مقدار کل دُز در قطعه و با ضرب کردن مساحت جانبی در تعداد ذرات، کل ذرات برخوردکننده به قطعه محاسبه می‌شود و بر همین اساس می‌توان مقدار افزایش جریان آستانه را در یک دیود لیزری محاسبه کرد. با بهره‌گیری از داده‌های آزمایش جانسون و با توجه به تعداد ذرات محاسبه شده، تخمین زده می‌شود تغییر جریان آستانه حدود ۱۵ درصد خواهد شد. همچنین تغییرات توان اپتیکی لیزر برحسب جریان آستانه در شکل ۳-ب الگوی مناسبی برای برآورد تغییرات توان لیزر است. به طوری که محور عمودی توان اپتیکی و محور افقی میزان شار زمانی برای پروتون‌های ۵/۵ MeV را نشان می‌دهد. در شکل ۳-ب با در نظر گرفتن تعداد کل ذرات برخوردکننده به قطعه، نمودار مربوط به رابطه جریان و توان اپتیکی تخمین می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش شار زمانی،

دُز یونیزان مربوط به ذرات ون آلن به ترتیب ۱۹۰rad و ۵۰rad برای پروتون‌ها و الکترون‌هاست. نکته قابل توجه شیب ملایم افزایشی الکترون‌ها و شیب تند پروتون‌ها تا پایان مدت زمان مأموریت می‌باشد. روند تغییرات این نمودار صعودی و با تقعر رو به پایین است. کاهش فعالیت خورشیدی در طول مدت زمان مأموریت یکی از دلایل احتمالی تقعر رو به پایین در این نمودار است و با استدلال مشابه از میزان شار ذرات به دام‌افتاده در کمربند کاسه می‌شود.

صورت صعودی و با تقعر رو به بالاست. دلیل احتمالی این تقعر رو به بالا این است که در طول مدت زمان مأموریت از فعالیت خورشیدی کاسه می‌شود و به شار پرتوهای کیهانی کیهانی کیهانی (Galactic Cosmic Ray) افزوده می‌گردد. نتایج مربوط به شبیه‌سازی مقدار دُز حاصل از ذرات به دام‌افتاده در کمربند ون آلن در شکل ۴-ب بیان شده است. محور عمودی نمودار دُز القایی برحسب rad توسط ذرات به دام‌افتاده در کمربند داخلی ون آلن در محیط بهره است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین



(الف)



(ب)

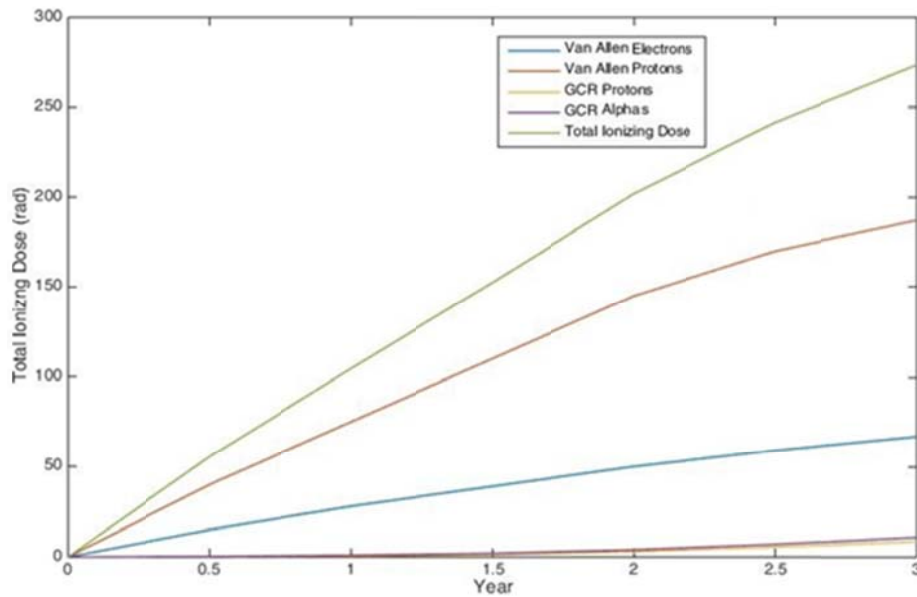
شکل ۴. الف) میزان دُز القایی در محیط بهره توسط پرتوهای ذرات آلفا و پروتون کیهانی GCR. ب) میزان دُز القایی توسط ذرات موجود در ون آلن شامل الکترون‌ها و پروتون‌ها.

داخلی ون آلن است.

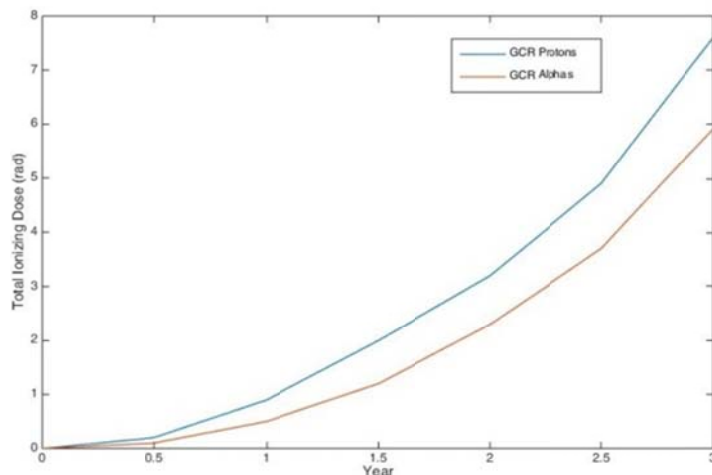
۴-۴. نتایج شبیه‌سازی برای دیود لیزری

اثر پرتوهای کیهانی کهکشانی، ذرات ون آلن و کل ذرات بر دیود لیزری در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود. در این شکل‌ها، محور افقی نشان‌دهندهٔ زمان برحسب سال است و محور عمودی میزان دُز القایی در دیود لیزری است. در شکل ۶ محور عمودی به ترتیب بیانگر ذرات کیهانی و کمربند داخلی ون آلن می‌باشد. مطابق با شکل ۶-الف میزان اثر دُز ذرات آلفا از اثر دُز توسط پرتون‌های موجود در پرتوهای کیهانی کهکشانی بیشتر است. چنین موضوعی احتمالاً می‌تواند به بار الکتریکی بیشتر ذرات آلفا نسبت به بار الکتریکی پرتون مرتبط باشد. در شکل ۶ ذرات القایی برای پرتون‌ها و ذرات آلفا به ترتیب $7/5$ rad و 6 rad است که در پایان سال دوم مأموریت با شیب تند افزایشی شبیه‌سازی شده است.

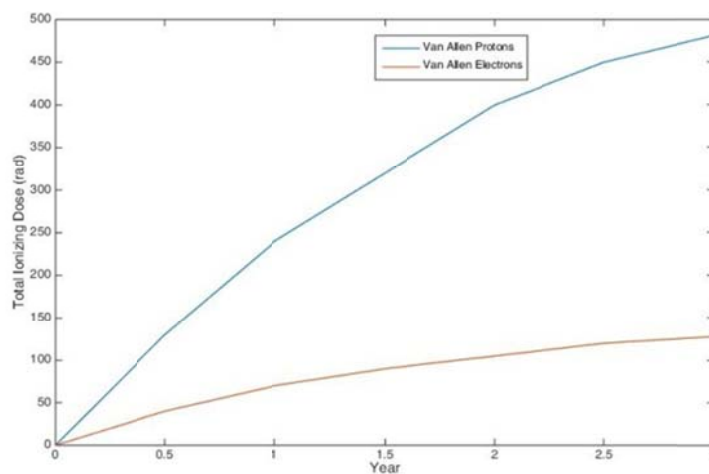
همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، میزان دُز یونیزان کل حاصل از تمام تابش‌های ذره‌ای موجود در فضا در محیط بهره شبیه‌سازی شده است و محور عمودی میزان دُز القایی کل ناشی از همهٔ ذرات در محیط بهره است. همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، اثر دُز ذرات کیهانی کهکشانی از ذرات به دام‌افتاده در کمربند ون آلن بسیار کمتر است. دلیل چنین موضوعی شار ناچیز این پرتوها در مقایسه با شار ذرات به دام‌افتاده در ارتفاع فوق است. بیشترین دُز در محیط بهره توسط پرتون‌ها القا می‌شود. دلیل چنین موضوعی مؤثرتر بودن میزان شار پرتون‌ها در مقایسه با الکترون‌های موجود می‌باشد. در این نمودار مجموع دُز حاصل از تمام عوامل تابشی به rad 275 می‌رسد که این روند با زمان افزایش می‌یابد. در مدت زمان مأموریت، از نظر شرایط تابشی فضایی به سمت دورهٔ حداقل فعالیت خورشیدی پیش می‌رویم؛ بنابراین منحنی مربوطه با نرخ ثابتی افزایش پیدا نمی‌کند و دلیل آن کاهش قابل توجه ذرات به دام‌افتاده در کمربند



شکل ۵. مجموع دُز القایی در Nd:YAG شامل الکترون‌ها و پرتون‌های ون آلن، ذرات آلفا و پرتون‌های پرتوهای کیهانی.



(الف)

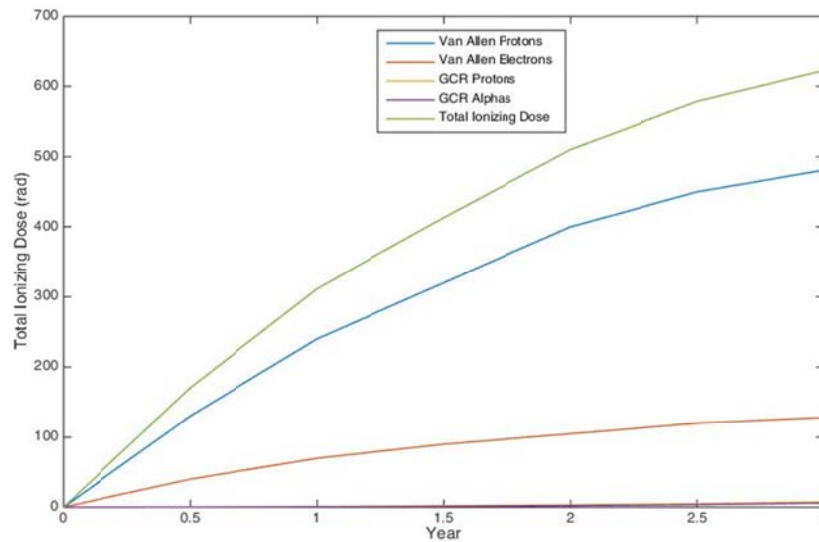


(ب)

شکل ۶. الف) مقدار دُز القایی در دیود لیزری توسط پروتوهای کیهانی کهکشانی، ب) مقدار دُز القایی در دیود لیزری توسط ذرات موجود در ون‌آلن.

لیزری القا کرده‌اند. در شکل ۷، تغییرات دُز القایی در دیود لیزری برای کل ذرات مشاهده می‌شود. در شکل ۷، دُز یونیزان کل در محیط پمپ با روند افزایشی تا پایان مأموریت به ۶۲۳ rad خواهد رسید. در این مقدار دُز القایی، همان‌طور که مشاهده می‌شود، پروتون‌های ون‌آلن بیشترین سهم را دارند. دلیل چنین موضوعی فراوان‌تر بودن شار پروتون‌ها در مقایسه با الکترون‌های موجود است. اثر دُز ذرات کیهانی کهکشانی از ذرات به دام‌افتاده در کمربند ون‌آلن بسیار کمتر است. علت چنین موضوعی شار ناچیز این پروتوها در مقایسه با شار ذرات به دام‌افتاده است.

در شکل ۶-ب تغییرات شار ذرات به دام‌افتاده در کمربند داخلی طی زمان مأموریت ملاحظه می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اثر دُز حاصل از پروتون‌ها از اثر دُز الکترون‌های موجود در کمربند داخلی ون‌آلن بیشتر است. علت چنین موضوعی شار بالاتر پروتون‌ها در مقایسه با الکترون‌ها در کمربند داخلی ون‌آلن می‌باشد. در شکل ۶-ب، دُز القایی ناشی از الکترون‌ها و پروتون‌های ون‌آلن به ترتیب تا ۱۲۹/۵ rad و ۴۸۱ rad افزایش می‌یابد که در این شبیه‌سازی پروتون‌ها با شیب بسیار بیشتری از الکترون‌ها از ابتدا تا انتهای مأموریت دُز به دیود



شکل ۷. مجموع دُز القایی در دیود لیزری.

دریافت میزان دُز در حالت‌های با شیلد و بدون شیلد بررسی شد و تأثیر استفاده از محافظ در کاهش دُز دریافتی لیزر مشخص شد. از آنجا که محیط بهره هم بر چگونگی تبدیل توان پمپاژ جذب‌شده به نور خروجی و هم بر چگونگی جذب نور پمپاژ در یک لیزر تأثیرگذار است ارتباط مستقیمی بین عملکرد لیزر با تغییرات پارامترهای محیط بهره وجود دارد. از طرفی توان خروجی لیزر به توان پمپاژ نور ورودی (پمپ یا تغذیه‌کننده لیزر) نیز بستگی دارد، به طوری که افزایش در توان پمپاژ به افزایش توان خروجی لیزر منجر می‌شود. در حالت بدون وجود تابش بازدهی جذب، لیزر دیودی (پمپ لیزر) نسبتاً بالا است زیرا تمام توان در یک تک طول موج مصرف می‌شود و تقریباً بدون اتلاف است. از طرفی تابش‌های با ایجاد طیف پمپاژ در لیزر دیودی، توان اولیه تغذیه را کاهش می‌دهد؛ به بیانی دیگر، شامل تعداد زیادی فوتون با انرژی متناظر با فاصله ترازهای انرژی Nd^{3+} است، به طوری که در پمپاژ دیودی، برای حالت عادی اختلاف انرژی بین تراز پمپ‌شده و تراز بالاتر لیزر کوچک‌تر از اختلاف متناظر آن در حالت متأثر از تابش است. بنابراین انرژی پمپاژ کمتری در گذار غیرتابشی به تراز پایین‌تر

در بررسی الزامات تابشی پروژه‌های فضایی، میزان نرخ دُز به اندازه دُز کل مهم است؛ نگاهی به داده‌ها و ملاحظات تابشی ماهواره‌هایی با مأموریت‌های مشابه می‌تواند درباره پارامترهای تست یا حداقل پارامترهای محیطی برای برون‌یابی داده‌های شبیه‌سازی‌شده راه‌گشا باشد. در نتایج به‌دست‌آمده از دُز کل و نرخ آن در مأموریت‌های ماهواره‌های GLAS، MLA و EO-1، متناسب با طول مدت مأموریت، دُز کل بین مقدار ۱۵ krad تا ۱۰۰ krad متغیر است. این میزان دُز یونیزان کل واردشده به قطعات ماهواره، خصوصاً بخش لیزر، به نوع و مقدار شیلدینگ و همچنین پارامترهای مداری و مدت مأموریت وابسته است. برای محاسبه نرخ دُز متوسط، دُز کل دریافت‌شده در زمان مأموریت بر مدت مأموریت تقسیم می‌شود. محاسبه میانگین نرخ دُز این روش، تخمینی محافظه‌کارانه برای محاسبه است. به‌عنوان مثال نرخ دُز برای ماهواره‌های مذکور به ترتیب ۰/۰۴ rad/s، ۰/۰۱۱ و ۰/۰۴ برای بازه زمانی ۵ تا ۱۰ سال دریافت شده است (اوت، ۲۰۰۰)؛ بنابراین در جمع‌بندی کلی، نتایج شبیه‌سازی‌ها مقدار دریافت تابش‌های فضایی به‌ویژه دُز یونیزان کل در محیط بهره و پمپ لیزر دیودی را نشان داد. همچنین تغییرات

عملکرد محموله متناسب با استانداردهای فضایی اروپا در مدار LEO، از محافظ (شیلد) برای بخش لیزر استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که دُز القایی با در نظر گرفتن شیلد آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر، حدود 275 rad به محیط بهره و حدود 623 rad به دیود لیزری (پمپ لیزر)، تا پایان مأموریت کاهش می‌یابد. این مقدار حفاظ باعث شد تا با توجه به بودجه جرمی در نظر گرفته‌شده، مقدار دُز به کمترین اندازه خود کاهش یابد. نتایج حاصل از مقایسه دُز یونیزان شبیه‌سازی شده در لیزر این پژوهش با اندازه‌گیری آزمایشگاهی سایر پژوهش‌های مشابه نشان می‌دهد دُز یونیزان کل وارد شده به محیط بهره و پمپ در حالت محافظت‌شده، موجب افزایش جریان آستانه در حدود ۱۵ درصد می‌شود؛ بنابراین براساس میزان جریان تزریقی به لیزر، متقابلاً کاهش در توان اپتیکی (نور خروجی) را به دنبال خواهد داشت. در پژوهش‌های آتی ارتباط ابعاد محیط بهره و دُز دریافتی بررسی خواهد شد. موازنه این دو پارامتر یکی از گلوگاه‌های طراحی لیزر در محموله لیدار است.

مراجع

علیایی، س. و قهرمانی‌راد، ا.، ۱۳۹۴، مهندسی لیزر و مخابرات نوری فضای آزاد، انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

- Afzal, S. R., 2006, Review of solid-state lasers for space applications, Proceedings Volume 6100, Solid State Lasers XV: Technology and Devices; 61001U (2006); doi: 10.1117/12.660699.
- ECSS-E-HB-10-12A, 2010, European Cooperation for Space Standardization, 25-50.
- ECSS-Q-ST-60-15C-1, 2012, Space product assurance Radiation hardness assurance - EEE component, 14-33.
- Gill, K., Arbet-Engels, V., Batten, J., Cervelli, G., Grabit, R., Mommaert, C., Stefanini, G., Troska, J. and Vase, F., 1997, Radiation damages studies of optoelectronic components for the CMS tracker optical links, Radiation and Its Effects on Components and Systems, RADECS 97, Fourth European Conference on. DOI: 10.1109 / RADECS. 1997.698956.

اتلاف می‌شود. در حالت کلی می‌توان گفت دُز یونیزان کل به عنوان بخشی از آسیب‌های تابشی بر توان پمپاژ آستانه و بازدهی لیزر تأثیر گذار است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با در نظر گرفتن شرایط واقعی تابش در فضا که شامل طیف گسترده‌ای از شار ذرات الکترون‌ها و پروتون‌های ون‌آلن، آلفا و پروتون‌های کیهانی است، تأثیر آسیب دُز یونیزان کل بر دو جزء اصلی لیزر (محیط بهره Nd:YAG و لیزر دیودی) یک محموله لیدار فضایی با مدت زمان مأموریت سه‌ساله در مدار ۵۰۰ کیلومتری توسط جعبه‌ابزار تابشی GEANT4 شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی‌های محیطی (متناسب با مدار ۵۰۰ کیلومتری) نشان می‌دهد تعداد ذرات گذرنده در هر ثانیه از هر سانتی‌متر محیط فضا حدود ۳۰۰۰ ذره است؛ همچنین با در نظر گرفتن مساحت جانبی محیط بهره و پمپ، برای مدت زمان حضور در فضا (ماهواره در مدار) تعداد ذرات برخورد کننده با لیزر محموله برابر با 7×10^{11} ذره محاسبه شده است، به طوری که این ذرات باردار و پراثرزی عامل ایجاد دُز در محیط بهره و پمپ لیزر است. نتایج نشان می‌دهد دُز تابشی دریافت‌شده در محیط بهره بدون در نظر گرفتن محافظ برابر با 1951 rad است. با توجه به الزامات و قيود طراحی سیستمی و افزایش قابلیت اطمینان

- Gruppen, C., 2010, Introduction to Radiation Protection: practical knowledge for handling radiative sources, Springer science & Business media, 410-453.
- Houghton, J., 2002, The physics of atmospheres. 275.
- Johnson, A. H., 2003, Radiation effects in light-emitting and laser diode, IEEE Transactions on nuclear science, 50, 126-141.
- Johnson, A. H. and Miyahira, T. F., 2004, Radiation Degradation Mechanisms in laser diodes, in IEEE Transactions on Nuclear science, 51(6), 3564-3571.
- Myers, T. L., 2015, Proton and gamma irradiation of Fabry-Perot quantum cascade lasers for space qualification", Optical Society of America, 440-451.
- Ott, M. N., 2000, Validation of Commercial Fiber

- Optic Components for Aerospace Environments, misspiggy. gsfc.nasa.gov/ photonics, NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt MD, 20771.
- Ott, M. N., coyle, N., John S., Canham, H., leidecker, W., 2006, Qualification and issues with Space Flight Laser Systems and Components, lasers and applications in science and engineering, International society for optics and photonics, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20060013395.pdf>.
- Phifer, C., 2004, Effects of Radiation on Laser Diodes, United states, Department of Energy, Technical Report.38-44.
- Roner.M.,2015, Total Ionizing Dose and Displacement Damage effects in a tunable laser diode based fiber optic sensing system, IEEE, Radiation and its effects on components and systems, Russi, DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365688.
- Rose, T. S., Hopkins, M. S. and Fields, R.A., 1995, Characterization and control of Gamma and proton radiation effects on the performance of Nd:YAG and Nd:YLF laser, IEEE Journal of quantum Electronics, 31(9), 1593 – 1602.
- Spohn, T., Breuer, D., Johnson, T., 2014, Encyclopedia of the solar system ,Elsevier, 3rd edition, 11-68.

Effect of Total Ionizing Dose Damage on Laser Subsystem of Space LIDAR payload: System Level Design of Remote Sensing Satellite

Khoshsima, M.^{1*}, Amjadifard, R.², Zamani Moghadam, S.³ and Ghazanfarinia, S.³

1. Assistant Professor, Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

2. Lecturer, Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

3. Researcher, Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

(Received: 22 Oct 2016, Accepted: 24 Jan 2017)

Summary

Space environment radiation affects the operation and life-time of optical and electronic devices on satellites payloads. LIDAR payloads include electro-optical components such as laser section. LIDAR payloads are usually setup on various platforms. Space-borne remote sensing technology provides global data set of uniform quality and rapid data acquisition and also specially provides key information for evaluating the local, regional of aerosol irradiative forcing in global climate system, cloud properties and precipitation, Air pollution and hydrologic cycle. Also, global coverage collected data is updated in every time range. On the other hand, high expenditures of design, manufacture and using advanced technology are caused an increase in design and manufacture of high reliability LIDAR payloads, the mission duration and its quality in space. Due to space standards of NASA and ESA, one of the effective factors on degradation of space systems is radiation damages. In this research, effect of Total Ionizing Dose (TID) radiation on the operation of LIDAR subsystem orbiting 500 km altitude orbit with a 3-year mission is simulated. Radiation simulations on gain medium (Nd:YAG) and pump (laser diode) are performed by GEANT4 and C++ programming.

Laser subsystem in LIDAR payload includes 3 different parts. These parts are Nd:YAG, mirrors and laser diodes pump. Space radiation sources are classified in three types: Van Allen radiation belts, Galactic cosmic rays (GCR), periodic gradual activities of sun. The sun emits neutralized plasma (almost protons and electrons) to the space. Some energetic particles originated from solar winds and GCRs are trapped in Earth magnetic field. These belts are expanded from 1000km to 65000 km and consist of electrons up to 7MeV and protons up to 300MeV. GCR particles are mainly protons with very high speed originated from out of the galaxy. The most populated particles in 500km altitude are electrons and protons. In order to simulate the radiation effects, Input data such as average flux number of incident particles, total number of particles passing through the sensitive volume are needed. These input data will be entered in GEANT4 toolkit by C++. Most important input data are flux, total number of incident particles during the mission, Energy range, geometry, materials definition and their properties, sensitive volume definition are needed physics and initial position of particles. The most important radiation damages related to lasers and solid state optical devices are total ionizing dose and displacement damage. TID is resulted from passing charged particles through matter, while displacement damage is due to collision of passing particles with atoms of matter. TID effects depend on two factors. The first factor is generation of electron-hole pairs in dielectric layers (such as oxides). The second factor is trapping sites (oxide and interface). This damage results in degradation and possible failure, such as threshold voltage shift, decrease in drive current, switching frequencies, leakage current, noises, etc. In bipolar transistors, hfe degradation, leakage current, offset voltage, changes in offset current, bias current and gain degradation in analog devices are possible effect. In other devices, frequency shift in crystals, mechanical degradations and changes in dielectric parameters are considered.

The results demonstrated that the absorbed dose from different space radiation sources for Nd:YAG and laser diode are important. Also, differences between the absorbed doses in 2 cases were simulated. The first case was absorbed dose with no shield against space radiation and the second one was calculating the absorbed dose with 2 mm Al7075 shielding the sensitive volumes against incoming particles. GEANT4 simulations determined that the absorbed dose in Nd:YAG when no shield was used to protect the laser parts against space radiation, was reached 1951 rad. In order to decrease the absorbed dose, the shield was used and it made considerable changes. The absorbed dose was reduced to 275 rad. Calculation showed that approximately 7×10^{12} protons would pass through the Nd:YAG, during the mission period. The number of passing particles through the sensitive volume depends on particle flux rate, sensitive volume sizes, mission duration. This value for GCR particles was 4×10^8 particles in each square centimeter. Results related to simulation of inner Van Allen radiation belt particles effect on Nd:YAG showed that the absorbed doses from the inner belt electrons and protons were about 68 rad and 187.5 rad respectively while these values for GCR protons and alpha particles were about 11 rad and 8.5 rad respectively. These values were about 481 rad, 128.5 rad, 7.5 rad and 6 rad for laser diode respectively. The total values for Nd:YAG and laser diode reached 275 rad and 623 rad. It is estimated that absorbed doses for radiation sensitive parts will be increased about 15 percent and according to the threshold current, the optical power versus threshold current curve will be changed.

Keywords: Laser, Nd:YAG, Space radiation, Total Ionizing Dose, LIDAR.

* Corresponding author:

khoshsima@alumni.ut.ac.ir