

شبیه‌سازی اثر تشعشعی دز یونیزان کل بر ماهواره مخابراتی با جعبه ابزار GEANT4

ساسان زمانی مقدم*، رضا امجدی فرد و مسعود خوش‌سیما

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

*تهران، پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، کدپستی: ۱۹۹۷۹۹۴۳۱۳

پست الکترونیکی: sassanzamanixmega@hotmail.com

چکیده

محیط فضا شامل منابع مختلف تشعشعات است که انواع مختلفی از ذرات را منتشر می‌کنند. به دلیل سرعت و انرژی زیاد، این ذرات فضایی می‌توانند موادی که با آن‌ها برخورد می‌کنند را به روش‌های مختلف تحت تأثیر قرار دهند. یکی از مهم‌ترین آسیب‌ها که تجهیزات الکترونیکی فضایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، دز یونیزان کل است. در این مقاله اثرات دز یونیزان کل برای یک ماهواره با هندسه‌ای واقعی شبیه‌سازی شده است. با توجه به شرایط تشعشعی برآورد شده، میزان موفقیت برای ماهواره فوق‌ارزیابی شده است. مدل کردن این اثرات با جعبه ابزار GEANT4 و روش مونت‌کارلو انجام شده است. در این جعبه‌ابزار شبیه‌سازی‌ها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C++ انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که حداکثر 3 rad طی یک مأموریت ۳ ساله در مدار ۵۰۰ کیلومتری در حجم حساس دز القا خواهد شد. پس از صحت-سنجی نتایج، مشخص گردید که استفاده از قطعات تجاری در مدار مأموریت فوق، با لحاظ نمودن حداقل ضخامت حفاظ در نظر گرفته شده، امکان‌پذیر است.

کلیدواژه‌گان: دز یونیزان کل، ماهواره، تشعشع، GEANT4.

۱. مقدمه

اثرات زیان‌آور مختلفی بروز خواهد کرد. در صورتی که میزان این آسیب‌ها از حد تحمل قطعه الکترونیکی بیش‌تر باشد، آن قطعه از کار خواهد افتاد و در حالت بدتر، ممکن است که تمام سیستم‌ها دچار اختلال شوند و پروژه با شکست کامل روبه‌رو شود [۱-۳].

با وجود پیچیدگی فرآیندهای فیزیکی اندرکنش، وابستگی آن‌ها به مشخصات پرتوهای برخوردکننده و ماده هدف، دو مکانیزم پایه برای آسیب‌های تشعشعی وجود دارد که آسیب یونیزان و آسیب غیریونیزان نام دارند. آسیب یونیزان

فضای ماورای جو به دلیل وجود پرتوهای مختلف برای ماهواره‌ها یک محیط تشعشعی محسوب می‌شود. واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی این محیط بر عملکرد و طول عمر دستگاه‌ها و تجهیزات الکترونیکی شامل حافظه‌ها، ترانزیستورها، میکروکنترلرها و میکروپروسورها بسیار تأثیرگذار می‌باشد. بسیاری از این قطعات و تجهیزات برای کار در محیط‌های تشعشعی باید مقاوم‌سازی شوند. اگر این تجهیزات در برابر محیط تشعشعی مقاوم نباشند، دچار آسیب‌های فراوانی می‌شوند که بر اساس نوع پرتو، آهنگ و نوع برهم‌کنش پرتو،

مدارهای قطبی به دلیل تراکم بالای عوامل تشعشعی، میزان دز بالایی را در قطعات الکترونیکی ایجاد می‌کنند.

آموکان^۴ [۶] با استفاده از نرم افزار OMERE شارهای ذرات در ارتفاعات بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ کیلومتر از زمین به دست آورده است. همچنین ایشان اثر دز یونیزان کل را برای هرکدام از عوامل تشعشعی موجود در ارتفاعات و زاویه‌های انحراف مختلف، محاسبه کرده و در قسمتی دیگر میزان دز یونیزان کل برای پرتوهای گاما را به دست آورده است. البته در این شبیه‌سازی از کبالت ۶۰ برای تست استفاده شده است.

در این مقاله هدف اصلی امکان‌سنجی مأموریت یک ماهواره با هندسه و شرایط واقعی در مدار ۵۰۰ کیلومتر با زاویه انحراف ۵۵ درجه و طول عمر ۳ سال می‌باشد. اگرچه در ماهواره مورد بررسی از تمام قطعات فوق‌الذکر، استفاده شده است ولی در این بررسی فقط در مورد ترانزیستور ماسفت تحلیل انجام شده است. برای این منظور میزان دز یونیزان کل در نواحی حساس تعریف شده، محاسبه می‌گردد. سپس محیط فضا از نظر شار ذرات پر انرژی الکترون و پروتون شبیه‌سازی شده و نهایتاً با استفاده از جعبه ابزار GEANT4 نتایج شبیه‌سازی به دست می‌آید و تحلیل‌های لازم ارائه خواهد شد. اساس کار این جعبه ابزار بر مبنای مونت‌کارلو بوده و زبان برنامه‌نویسی آن C++ می‌باشد. برای استفاده از این جعبه ابزار، ابتدا هندسه و شرایط محیطی وارد می‌شوند و نهایتاً با اجرای برنامه، اثر تشعشعات بر روی حجم حساس تعریف شده، به دست می‌آید.

۲. مبانی نظری

دز یونیزان کل به صورت مقدار انرژی به‌جا گذاشته شده توسط یونیزاسیون یا برانگیختگی در ماده بر واحد جرم ماده تعریف شده است. در سیستم بین‌المللی واحد دز Gy است که معادل با $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$ می‌باشد و به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد.

یعنی آسیبی که در آن یونیزاسیون اتفاق می‌افتد و آسیب غیر یونیزان آسیبی است که در آن یونیزاسیون روی نمی‌دهد. از آسیب‌های غیر یونیزان می‌توان به آسیب جابجایی و از بین آسب‌های یونیزان، می‌توان به آسیب تکرخدادی و دز یونیزان کل اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین آسیب‌های یونیزان که در قطعات الکترونیکی ماهواره‌ها قابل ملاحظه می‌باشد، آسیب دز یونیزان کل است. افت تدریجی ناشی از دز یونیزان کل در قطعات میکروالکترونیک از تشکیل بار در لایه‌های عایق نتیجه می‌شود و دارای اثر تجمعی در قطعات الکترونیکی است که منجر به از دست رفتن تدریجی عملکرد و شکست احتمالی آن می‌شود. این اثر بر قطعات مختلف الکترونیکی تأثیر می‌گذارد که از بین آن‌ها می‌توان به مواردی همچون شیفیت ولتاژ آستانه، کاهش در جریان درایو، سرعت سوئیچینگ و افزایش جریان نشتی در قطعات ماسفت^۱ اشاره نمود. برای ترانزیستورهای دوقطبی، کاهش تدریجی بهره جریان^۲ مخصوصاً در جریان‌های کم کلکتور، جریان نشتی، به وجود آمدن ولتاژ آفست، تغییرات جریان آفست، جریان بی‌اس و کاهش تدریجی بهره در قطعات آنالوگ قابل ذکر می‌باشد. از دیگر اثرات این آسیب می‌توان شیفیت فرکانسی در کریستال‌ها، افت مکانیکی و تغییرات در مشخصات دی‌الکتریک در سطوح پلیمری خارجی نیز نام برد [۴].

در سال‌های اخیر کارهای مشابهی در این مورد انجام شده است. مارینان^۳ [۵] برای ماهواره‌های مکعبی در ارتفاعات بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ کیلومتر با زاویه انحراف متغیر از صفر تا ۱۰۰ درجه، میزان دز یونیزان کل را محاسبه کرده است. در این شبیه‌سازی‌ها ضخامت حفاظ با جنس Al7075، ۱ تا ۱/۵ میلی-متر در نظر گرفته شده است. از نتایج ارائه شده می‌توان به مقایسه مدارهای کم انحراف با مدارهای قطبی اشاره نمود.

^۱ MOSFET

^۲ h_{fe}

^۳ Marinan

^۴ Amutkan

$$Dose = \frac{d(Energy)}{d(Mass)} \quad (۱)$$

اثرات دز یونیزان کل به دو عامل مهم بستگی دارد. اولین عامل در قطعات نیمه‌رسانا، تولید زوج‌های الکترون-حفره داخل لایه‌های دی‌الکتریک (برای مثال اکسیدها) می‌باشد. دومین عامل محل به دام افتادن بارها (داخل یا نزدیک مرزهای نواحی مختلف) است. این آسیب می‌تواند اثرات مختلفی بر قطعه بگذارد که از بین آن‌ها می‌توان به شیفتهای ولتاژ آستانه و بانداصف، جریان نشتی سطحی و نویز اشاره کرد [۴].

در قطعات نیمه‌رسانا، یونیزاسیون منجر به تولید زوج‌های الکترون-حفره در نیمه‌رسانا و عایق‌ها (از جمله اکسیدها) می‌شود. مقداری از این بار در عایق‌ها به دام می‌افتد یا منجر به تشکیل حالت‌های واسط در سطح بین نیمه‌رسانا و دی-الکتریک می‌کند. در ساختارهای ماسفت، بار به دام افتاده موجب شیفته در ولتاژ آستانه گیت می‌شود. از آنجایی که بار به دام افتاده از یونیزاسیون مثبت است، ماسفت‌های n کانال، کاهش در ولتاژ آستانه را تجربه می‌کنند، لذا زمانی که بایاس خارجی اعمال نمی‌شود، به طور کامل خاموش نمی‌شوند. از طرفی، ماسفت‌های p کانال، افزایش در ولتاژ آستانه را تجربه می‌کنند و روشن شدن و درایو آن‌ها سخت‌تر می‌شود. قابلیت تحرک که سرعت سوئیچینگ و جریان درایو را تحت تأثیر قرار می‌دهد نیز افت تدریجی پیدا می‌کند. علاوه بر اکسید گیت، یونیزاسیون، می‌تواند اکسید زمینه را نیز تحت تأثیر قرار دهد. اکسید زمینه برای اکسید کردن در مدارات مجتمع ماسفت استفاده می‌شود. اگر شیفتهای آستانه به اندازه کافی برای ایجاد وارونگی بزرگ باشد، این موضوع، جریان‌های نشتی بسیار زیادی را نتیجه می‌دهد. خرابی در زمینه اکسید برای خیلی از قطعات سیماس تجاری، یک خرابی مهم است [۴]. آسیب دز یونیزان کل به صورت تدریجی عملکرد قطعه را با افت کیفیت و انحراف از مقدار نامی پارامتر به هم می‌ریزد و مشخصات موادی که قطعه را تشکیل می‌دهند، تغییر می‌دهد. این میزان تغییرات به کل انرژی جذب شده یونیزان بستگی دارد. این اثر جریان‌های بهبوده در پیوندهای pn

که به صورت معکوس بایاس شده‌اند به وجود می‌آورد و ممکن است موجب به هم ریختن شرایط کاری عناصر حافظه شده یا در مدارهای آنالوگ و منطق ترکیبی، ولتاژهای گذرا به وجود آورد. همچنین در سلول‌های گیت شناور، تولید جریان‌های دشارژ کرده که ممکن است اطلاعات ذخیره شده را خراب کند. در بسیاری از حالات، دلیل اصلی برای تنزل کیفیت به خاطر دز یونیزان کل، به دام افتادن بار در محیط است و در قطعات سیماس^۱ به خاطر به دام افتادن بار و تولید نقص در لایه‌های مجزاکننده است. با عبور عامل تشعشعی به ماده هدف، بنا بر نوع و مشخصات آن (برای مثال ذره‌ای یا موجی بودن تشعشع، مقدار انرژی، اندازه و نوع بار الکتریکی ذرات، جرم ذرات، اندرکنش‌های ممکن، آهنگ برهمکنش)، دو گونه اثر که غیر قابل خنثی کردن و برگشت ناپذیر و دیگری قابل خنثی کردن و برگشت پذیر است به وجود می‌آید. اثرات برگشت ناپذیر، منجر به آسیب دائمی و اثرات برگشت پذیر، موجب آسیب موقتی به ماده، می‌شوند. آسیب دز یونیزان کل در حالت کلی موجب انحراف از مقدار نامی پارامترها می‌شود که در ارتباط با ماسفت‌ها دو اثر شیفته ولتاژ آستانه و افت در هدایت انتقالی اهمیت بیشتری داشته و برای ترانزیستورهای دوقطبی کاهش بهره جریان حائز اهمیت می‌باشد [۴].

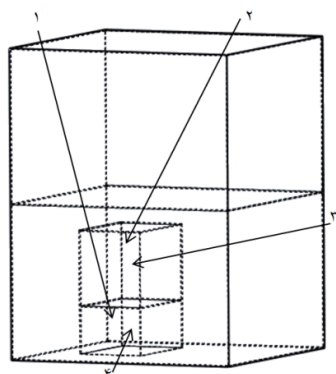
۳. شبیه‌سازی

ورودی‌های اولیه برای شبیه‌سازی تشعشعی، محاسبه میانگین تعداد و شار ذراتی که به هدف برخورد می‌کنند می‌باشد. در این مقاله این اطلاعات از نرم‌افزار اینترنتی SPENVIS^۲ و OMERE به دست آمده است و پس از آن با استفاده از زبان برنامه نویسی ++C در جعبه ابزار GEANT4 وارد می‌شود. از مهم‌ترین پارامترهای ورودی مورد نیاز برای شبیه‌سازی انجام شده، می‌توان به نوع، شار و تعداد ذرات، هندسه مورد بررسی به همراه تعریف مواد و

^۱ Complementary Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

^۲ Space Environment Information System

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، به دلیل شیلدینگ ناهمسان، ذرات برحسب محل و نقطه ورود ذره به داخل ماهواره، ممکن است با ضخامت‌های مختلفی مواجه شوند تا به قطعات الکترونیکی داخل جعبه برخورد کنند. با توجه به این که ضخامت هر دیواره ۲ میلی‌متر است، مجموع این ضخامت برای بعضی ذرات ۴ میلی‌متر، برای بعضی دیگر از ذرات ۶ میلی‌متر و برای دسته‌ای دیگر از ذرات ۸ میلی‌متر از جنس AI7075 خواهد بود. اثر این موضوع در نمودارهای بعدی، به وضوح مشاهده می‌شود.



شکل (۱): نمایش شیلدینگ ناهمسان در هندسه ماهواره. ذره ۱ به میزان ۸ میلی‌متر، ذره ۲ به میزان ۶ میلی‌متر، ذره ۳ و ۴ نیز ۴ میلی‌متر شیلد در مسیر خود خواهند دید.

ماهواره مفروض در معرض ذرات و عوامل تشعشعی می‌باشد. آسیب دز یونیزان کل یکی از آسیب‌های مخرب این پرتوهاست. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد ماهواره به مدت سه سال به دور زمین گردش خواهد کرد و مدار آن نزدیک به کمربند داخلی ون آلن است و از محیط نابهنجاری آتلانتیک جنوبی^۲ می‌گذرد. در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتر عوامل تشعشعی موجود با ماهیت ذره‌ای، شامل الکترون‌ها و پروتون‌ها هستند که می‌توان با استفاده از نرم‌افزار OMERE و همچنین نرم‌افزار تحت وب SPENVIS شار آن‌ها را در مدت مأموریت به دست آورد. در شکل ۲ شار پرتوهای فوق که با نرم‌افزار OMERE شبیه‌سازی شده است، نشان داده شده است.

مشخصات مربوط به آن‌ها و همچنین حجم حساس که اندازه‌گیری در آن انجام می‌شود، فیزیک مورد نیاز برای اندازه‌گیری، محل قرارگیری اولیه ذره برای پرتاب، ناحیه‌ای که برخورد با ماده هدف رخ می‌دهد و انرژی ذرات اشاره کرد که در ادامه در مورد مهم‌ترین آن‌ها توضیح داده می‌شود. مدل‌سازی تشعشعی ماهواره با مشخصاتی که در جدول ۱ آمده است، انجام خواهد شد.

جدول (۱): مشخصات مداری ماهواره شبیه‌سازی شده

پارامتر	مقدار عددی
طول عمر مأموریت	۳ سال
زمان پرتاب	۲۰۱۶/۱/۱
ارتفاع	۵۰۰ الی ۵۵۰ کیلومتر
زاویه انحراف	۵۵ درجه
آرگومان حضیض	۴۵ درجه
True Anomaly	۹۸ درجه
RAAN	۲۲ درجه
دوره‌گردش	۹۴ دقیقه و ۵۹ ثانیه

تمام سطوح موجود در این سازه AI7075 با پوشش آلوداین در نظر گرفته شده است. ترکیبات این آلیاژ از آلومینیوم، بنابر شرکت سازنده می‌تواند کمی متفاوت باشد. در این مقاله، ۱۰ مورد مدارچاپی برای قرارگرفتن تجهیزات الکترونیکی تعبیه شده است. بر روی بوردهای مدارچاپی در نظر گرفته شده، آسی‌های تجاری با روکش پلاستیکی از جنس اپی‌اکسی^۱ در نظر گرفته شده است.

در هندسه تعریف شده، هر یک از بوردهای مدارچاپی به عنوان محافظ برای سایر بوردها خواهد بود که باعث می‌شود میزان دز در بوردهای میانی کمتر از بوردهای دیگر باشد اما به علت شیلدینگ ناهمسان، عدم یکنواخت بودن صعود و نزول نمودارهای مربوط به دز و عمق مشاهده می‌شود. شکل ۱ مفهوم این موضوع (شیلدینگ ناهمسان) را واضح‌تر بیان می‌کند. در شکل فوق، سطوح خاکستری رنگ، بوردهای مدارچاپی در هر دو بخش جعبه الکترونیکی می‌باشند.

² SAA (South Atlantic Anomaly)

¹ Epoxy

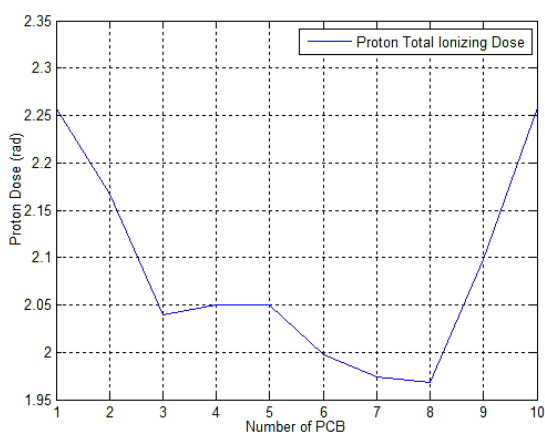
واحد (یعنی با شعاع $\frac{1}{\sqrt{\pi}}$) است. این مطلب تفاوت شار همه‌جانبه با شار ایزوتروپیک می‌باشد [۱۲]. با توجه به همه‌جانبه بودن شار در حالت واقعی، برای انجام شبیه‌سازی واقعی این مسئله، باید نحوه توزیع شار در برنامه، همه‌جانبه در نظر گرفته شود.

۴. نتایج شبیه‌سازی و بحث

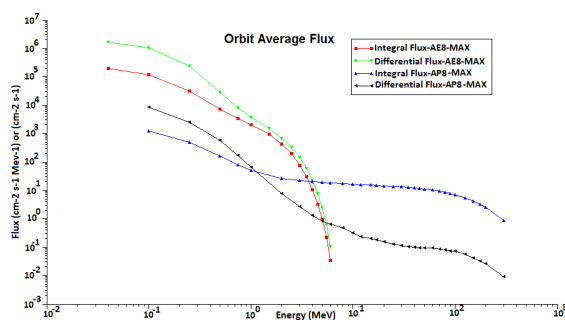
نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، برای ذرات و پرتوهای مورد بررسی به دست آمده در ادامه بیان شده است.

۱.۴. پروتون‌های ون‌آلن

شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی انجام شده برای پروتون‌های کمر بند داخلی ون‌آلن را نشان می‌دهد. در کلیه نمودارهای به دست آمده در شبیه‌سازی‌های انجام شده، پایین‌ترین مورد مدارچاپی را مورد شماره ۱ و بالاترین مورد مدارچاپی مورد شماره ۱۰ فرض شده است. یک مورد شیلد در جعبه الکترونیکی در نظر گرفته شده، برای کاهش اثرات تداخل الکترومغناطیسی بین بردهای پردازش و بردهای توان یک محافظ با ضخامت ۲ میلی‌متر تعبیه شده و آن را به دو بخش تقسیم کرده است.



شکل (۳): نمودار دز پروتونی به دست آمده در هر مورد مدارچاپی همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در بردهای میانی نمودار دز دچار افت می‌شود. یکی از دلایل افت احتمالاً این است که هرچه در عمق آیزی بیشتر وارد شود، انرژی ذره کمتر می‌شود و میزان یونیزاسیون کمتر و در نتیجه دز کمتری به وجود می‌آورد. دلیل دوم اینکه، بردهای بالایی و پایینی

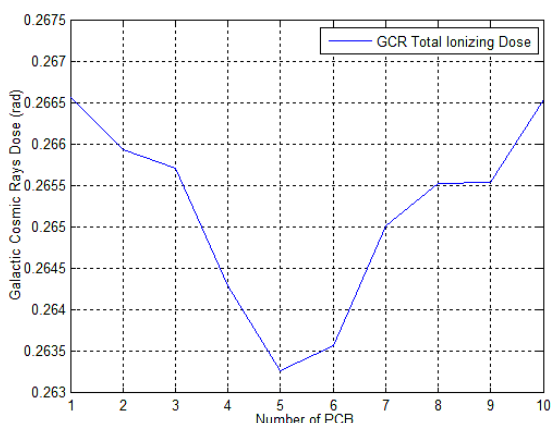


شکل (۲): میزان شار ذرات باردار موجود در کمر بند داخلی ون‌آلن

بر اساس انرژی آن‌ها در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتر

بازه انرژی ذرات و فراوانی پروتون‌های کمر بند داخلی ون‌آلن از حدود انرژی ۰/۱ MeV تا ۳۰۰ MeV می‌باشد. بازه انرژی الکترون‌های موجود در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتر است، بین ۰/۰۴ MeV تا ۶ MeV می‌باشد که نسبت به بازه انرژی مربوط به پروتون‌ها بسیار محدودتر است. تعداد ذرات برخوردکننده به ماده هدف در ارتفاع حدود ۵۰۰ کیلومتر به طور متوسط، $3000 \frac{Particle}{cm^2 sec}$ است [۸،۹]. حداکثر شار ذرات پرتوهای کیهانی $4 \frac{Particle}{cm^2 sec}$ است [۱۰،۱۱] و پروتون‌های موجود در این پرتوها حدود ۸۵٪ آن‌ها را تشکیل می‌دهند. به منظور امکان‌سنجی هرچه دقیق‌تر و همچنین در نظر گرفتن بدترین شرایط ممکن لازم است تا حدود ۳۰۰ میلیارد ذره برای پروتون‌ها و الکترون‌های ون‌آلن و نیز ۴ میلیون ذره برای پروتون‌های پرتوهای کیهانی کهکشانی در نظر گرفته شود. این تعداد بر اساس شارهای به دست آمده و احتساب دقیق تعداد ثانیه‌های مأموریت (۳ سال) محاسبه شده است. نکته مهم در این شبیه‌سازی و تحلیل این است که چه نوع شاری را برای شبیه‌سازی باید بر هدف بتابانیم. بنا بر مطالب مندرج در استاندارد ECSS [۱۲] شارهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی در این مقاله به صورت همه‌جانبه در نظر گرفته می‌شود. این نکته در محاسبه شارهای شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار تحت وب SPENVIS در نظر گرفته شده است. شار همه‌جانبه، انتگرال عددی شار در همه جهتها است. شار در نقطه، تعداد ذرات گذرکننده از یک کره با سطح مقطعی

الکترون‌های ون‌آلن، بیشتر بودن بازه انرژی و سنگین‌تر بودن این ذرات نسبت به الکترون‌ها می‌باشد.

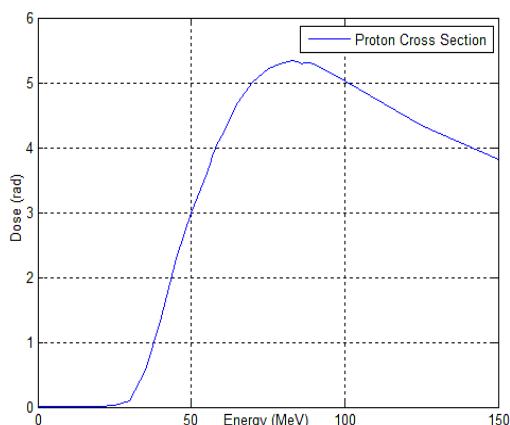


شکل (۵): نمودار دز پروتون‌های کیهانی کهکشانی به دست آمده

برحسب شماره مورد مدارچایی

۴.۴. نتایج تست سطح مقطع

شکل ۶، نمودار دز برحسب انرژی ذرات را به صورت تک انرژی نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق، یک نقطه بیشینه وجود دارد که بیشترین میزان دز را در ماده هدف ایجاد کرده است. در نقاط دیگر این منحنی، کاهش تدریجی میزان دز مشاهده می‌شود.



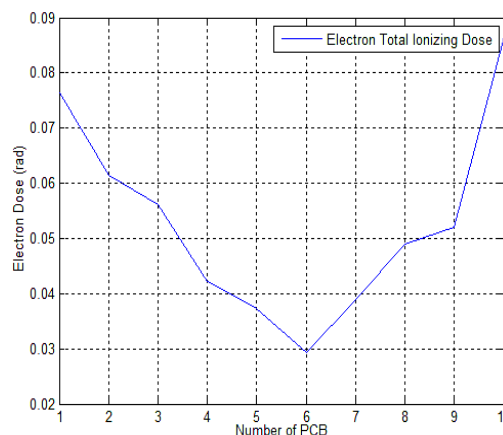
شکل (۶): نمودار دز برحسب انرژی ذرات (تک‌انرژی)

برای رسم شکل ۶، شبیه‌سازی‌ها به صورت تک‌انرژی انجام و سپس میزان دز به دست آمده به صورت نمودار رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این منحنی دارای یک قله می‌باشد. در این نقطه پروتون برخوردکننده دارای حداکثر سطح مقطع اندرکنش است. افت نقاط در انرژی‌های کمتر از این قله به دلیل انرژی کمتر از حد مورد نیاز

برای بوردهای میانی مانند محافظ عمل می‌کنند در نتیجه بوردهای بالایی و پایینی دزهای بالاتری را دریافت می‌کنند. همان‌طور که گفته شد، علت یکنواخت نبودن این صعود و نزول، شیلدینگ ناهمسان است.

۲.۴. الکترون‌های ون‌آلن

شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی انجام شده برای الکترون‌های موجود در ارتفاع حدودی ۵۰۰ کیلومتر، نزدیک به کمربند داخلی ون‌آلن را نشان می‌دهد. در شکل ۴ ملاحظه می‌شود که نتایج دز به دست آمده برای الکترون با پروتون‌ها مشابه است و در بوردهای میانی دز کمتری القا شده است. لازم به ذکر است که اگرچه این کمربند به کمربند پروتونی ون‌آلن معروف است، ولی نمی‌توان آن را خالی از الکترون دانست. لذا باید اثر الکترون‌ها را نیز در شبیه‌سازی در نظر گرفت.

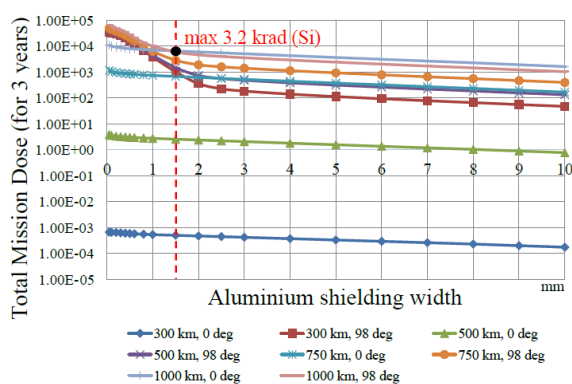


شکل (۴): نمودار دز الکترونی به دست آمده در هر مورد مدارچایی

۳.۴. پرتوهای کیهانی کهکشانی

در این پژوهش به دلیل ناچیز بودن شار پرتوهای کیهانی از بین ذرات تشکیل‌دهنده آن‌ها، تنها نتایج برای پروتون‌ها که ۸۵٪ پرتوهای کیهانی را تشکیل می‌دهند [۱۰ و ۱۱]، به دست آمده است. در شکل ۵، همان‌طور که مشاهده می‌شود، دز به دست آمده کمتر از نتایج به دست آمده برای پروتون‌های ون‌آلن و بیشتر از الکترون‌های ون‌آلن است. علت کمتر بودن این مقادیر نسبت به نتایج پروتونی، شار بسیار کمتر نسبت به پروتون‌های ون‌آلن و علت بیشتر بودن آن نسبت به نتایج

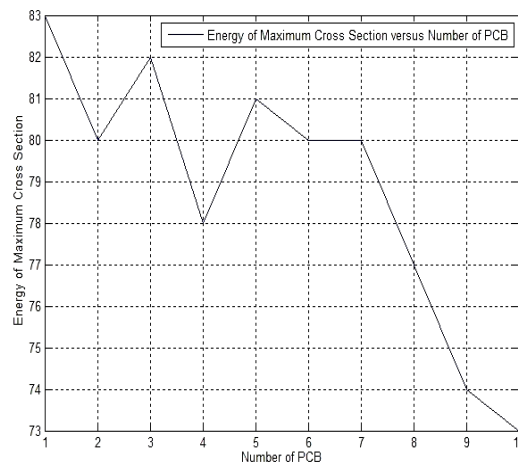
دیگران انجام شده است. در صورت صحیح بودن میزان دز یونیزان کل، این مقدار با حداکثر میزان دز قابل تحمل برای آرسی‌های تجاری مقایسه خواهد شد. در صورتی که مقدار دز به دست آمده از حداکثر دز قابل تحمل برای این آرسی‌ها بیشتر نباشد، نتایج به دست آمده حاکی از موفقیت‌آمیز بودن این امکان‌سنجی خواهد بود. مطابق با نتایجی که در شکل ۷ نشان داده شده است، مأموریت‌های مختلفی با استفاده از برنامه SPENVIS برای ضخامت‌های مختلف آلومینیوم به عنوان شیلد در نظر گرفته شده است [۱۳]. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با آنچه در مرجع [۱۳] نمودار شکل ۸ نشان داده شده است، صحت نتایج به دست آمده را تأیید می‌کند.



شکل (۸): نمودار دز بر حسب شیلد در منبع [۱۳]

به علت داشتن شیلدینگ ناهمسان که توضیح داده شد، میانگین مقدار ضخامت شیلد یعنی ۶ میلی‌متر، برای مقایسه نتایج در نظر گرفته می‌شود. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده، مجموع دز به دست آمده که حاصل از عوامل مختلف تشعشعی است، در حدود ۳ rad می‌باشد. پس از مقایسه این مقدار با داده‌های موجود در شکل ۸، صحت نتایج تأیید می‌شود. حال که صحت نتایج به دست آمده تضمین شد، باید میزان دز دریافت‌شده با مقدار قابل تحمل برای قطعات تجاری مقایسه شود. در صورتی که میزان دز یونیزان کل به دست آمده از میزان دز قابل تحمل کمتر باشد، یعنی قطعات تجاری استفاده شده در ماهواره، دچار خرابی ناشی از آسیب دز

برای رساندن حداکثر آسیب و افت نقاط در انرژی‌های بیشتر از قله به دلیل داشتن سرعت حرکت زیاد در ماده و در نتیجه زمان کمتر برای بودن در ماده برای آسیب رساندن به آن می‌باشد. این نمودار مربوط به مورد ۱ است که در ادامه به مقدار انرژی‌ای که در آن حداکثر دز القا شده است، اشاره خواهد شد. لازم به ذکر است که برای الکترون‌ها نیز چنین نموداری وجود دارد اما به علت محدود بودن بازه انرژی الکترون‌های مورد بحث رسم چنین نموداری بی‌معنی و بی‌فایده خواهد بود. در صورتی که چنین نموداری با توجه به بازه محدود انرژی موجود رسم شود مشاهده می‌شود که بیشینه نمی‌شود و هرچه میزان انرژی ذره بیشتر شود، دز بیشتری در ماده القا می‌کند.



شکل (۷): نمودار انرژی حداکثر سطح مقطع‌ها بر حسب شماره مورد

در شکل ۷ مقدار انرژی‌ای که بیشترین سطح مقطع را دارد برای بوردهای مختلف به صورت نمودار رسم شده است. در این نمودار، منحنی غالباً به صورت نزولی است و این نشان می‌دهد که در بوردهای ۱ تا ۴ که توسط حفاظی از جنس Al7075 محافظت می‌شوند، پروتون‌های پر انرژی‌تری نیاز است تا حداکثر میزان آسیب به این بوردها وارد شود. لذا می‌توان گفت که این بوردها نسبت به بوردهای دیگر حفاظت شده‌تر هستند. صحت این گفته را می‌توان در مقایسه بوردهای ۱ تا ۴ نسبت به بوردهای دیگر در نمودار دز بر حسب شماره مورد مدارچاپی مشاهده نمود. برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده، مقایسه‌ای با نتایج کارهای انجام شده توسط

که در متن مقاله ذکر شد، مقایسه شد و صحت نتایج به دست آمده برای هرکدام از بوردهای مدارچاپی موجود در جعبه الکترونیکی ماهواره مورد تأیید قرار گرفت. میزان مجموع دز القا شده به بوردهای مدارچاپی در محدوده مجاز برای قطعات استفاده شده در ماهواره می‌باشد. به همین دلیل تشعشعات محیط فضا در مدت زمان مأموریت برای ماهواره در نظر گرفته شده، قابل تحمل است. در ضمن با توجه به برقرار بودن شرط قید شده در استاندارد فضایی اروپایی ECSS ($TID < 2TIDL$)^۱ نیازی به انجام آزمون‌های عملی مرتبط با TID برای ماهواره وجود ندارد و در نظر گرفتن طول عمر سه سال برای ماهواره مورد نظر مناسب می‌باشد.

¹ Total Ionizing Dose Sensitivity

² Total Ionizing Dose Level

- [1] W, R. Leo. Techniques for Nuclear and Particle Physics + Experiments. 2nd, Springer-verlag Berlin Heidelberg GmbH,(1994).
- [2] H, Cember. Introduction to health Physics. 4th,McGraw Hill Companies-Medical, (2009).
- [3] E.M.A. Hussein. Computed Radiation Imaging, Elsevier Insights, (2011).
- [4] European Cooperation for Space Standardization. Calculation of radiation and its effects and margin policy handbook, ECSS-E-HB-10-12A, (2010).
- [5] A. Marinan, K. Cahoy. From CubeSats to Constellations: Systems Design and Performance Analysis, (Master of Science), Department of Aeronautics and Astronautics, (2013).
- [6] Ö. Amutkan. Space Radiation Environment And Radiation Hardness Assurance Tests of Electronic Components to be Used In Space Missions, The Graduate School Of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, (2010).
- [7] J. Datta. Key to Aluminium Alloys, 5th Ed., Aluminium-Verlag, (1997).
- [8] K. Iguchi, V.C. Parro, L.P. Da Silva, F. de Oliveira, H.Y. Kim. Development of a hybrid algorithm for time resolved stellar photometry from space images, xxix Simposio Brasileiro de telecomunicacoes, (2011).
- [9] R. Galindez, T. Davis. Tactical satellite 3 CDL communications, a communications link for

یونیزان کل نمی‌شوند و قابلیت اطمینان پروژه افزایش خواهد یافت. در غیر این صورت شاهد از کار افتادگی قطعات و شکست مأموریت خواهیم بود. طبق استاندارد آمریکا [۱۴،۱۵]، میزان حداکثر دز یونیزان کل قابل تحمل و مجاز برای درصد زیادی از قطعات الکترونیکی بین ۲Krad تا ۱۰Krad می‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده برای دز با الزام مشخص شده در استاندارد ECSS-Q-ST-60-15C نیز تطابق دارد [۱۶].

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر دز یونیزان کل برای یک ماهواره با هندسه واقعی و پارامترهای دقیق مداری به دست آمد. این شبیه‌سازی-ها با استفاده از یک مدل‌ساز تشعشعی به نام جعبه ابزار GEANT4 برای امکان‌سنجی میزان موفقیت مأموریت فضایی ماهواره انجام شد. نتایج به دست آمده با استفاده از دو مرجع

۶. مراجع

- mission utility, Military Communications Conference, MILCOM, IEEE, (2007).
- [10] C. Morrell. Analysis of the space radiation environment across a solar cycle, Department of Physics, University of Surrey, Guildford, Surrey, (2004).
- [11] C.I. Underwood. Cosmic Ray Astronomy, Lecture for Detection and Measurement in Astronomy module, Department of Physics, University of Surrey, (2003).
- [12] European Cooperation for Space Standardization. Calculation of radiation and its effects and margin policy handbook. ECSS-E-ST-10-04C, (2008), p64.
- [13] D. Burlyayev. System-level Fault-Tolerance Analysis of Small Satellite On-Board Computer, M. Sc Thesis, Delft University of Technology, (2012).
- [14] Practice NO. PD-ED-1258, Space Radiation effects on electronic components in low-earth orbit,(1996).
- [15] Y. M. Seo, Y.H. Kim, S.H. Park, J. Seon. Cumulative Ionizing effect from solar-terrestrial charged particles and cosmic rays for CubeSats as simulated with GEANT4. Current Applied Physics, (2012), 1541-1547.
- [16] European Cooperation for Space Standardization. Space product assurance.ECSS-Q-ST-60-15C, (2012).