

کاهش اثر TID حاصل از میدان پروتونی مدارات LEO توسط حفاظهای چند لایه

مظاهر اسکندری - علی محمد نیکو - حسین جهانبخش - حسین صادقی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده فیزیک

چکیده:

محیط تشعشعی فضا شامل پرتوهای کیهانی، تابش‌های خورشیدی و ذرات به دام افتاده در کمربند ون آلن می‌باشد. پروتون‌ها سهم عمده تابش‌های فضایی را تشکیل می‌دهند. از جمله آثار تابش‌های فضایی بر روی قطعات الکترونیکی می‌توان به آسیب یونیزان (TID)، آسیب نایونیزان و اثر رویداد منفرد (SEE) اشاره کرد. در این بررسی اثر آسیب یونیزان پروتون‌ها بر روی قطعات الکترونیکی ماهواره‌ای که در مدار پایین زمین (LEO) حرکت می‌کند، مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی‌های انجام شده بر روی مدارات LEO توسط نرم افزار شیلددز (Shieldose)، بدترین سناریوی مطرح برای یک ماهواره مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به در نظر گرفتن قطعات الکترونیکی بر پایه نیمه رسانای اکسید فلزی (MOS)، طراحی حفاظ برای اثر TID ناشی از پروتون‌های بدام افتاده به وسیله نرم افزار مولاسیس (MULASSIS) انجام شده است. با در نظر گرفتن محدودیت وزن و حجم، حفاظ‌های تک لایه، دو لایه و سه لایه برای کاهش دز یونیزان مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده از محاسبات انجام شده، حفاظ‌های سه لایه‌ای با ترکیبی از مواد سبک، سنگین و سبک به منظور بهینه سازی همزمان وزن و حجم، به عنوان حفاظ بهینه انتخاب شد.

کلمات کلیدی: TID - LEO - MULASSIS - پروتون‌های بدام افتاده - حفاظ سه لایه.

مقدمه:

تمایل به کاهش جرم ماهواره‌ها و فضاپیمها یکی از موارد مهمی است که در طراحی ماهواره بطور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه قرار می‌گیرد. از جمله نکات مهم دیگری که در طراحی مورد توجه قرار می‌گیرد، کارکرد صحیح مدارهای الکترونیکی ماهواره در حضور تابش‌های فضایی می‌باشد. لذا در ماهواره‌ها می‌توان از قطعات الکترونیکی که مخصوص فضا طراحی شده استفاده نمود و یا از قطعات تجاری ارزان قیمت‌تر و در دسترس‌تر استفاده نمود. مشکل استفاده از قطعات تجاری برای استفاده در مدارهای ماهواره‌ها، عدم تحمل دزهای بالای تابش‌های پرنرژی فضایی و از دست دادن کارایی قطعه می‌باشد.

برای برطرف کردن این مشکل تنها راه، استفاده از حفاظهای پرتویی مناسب برای قطعات الکترونیکی می باشد. در طراحی حفاظ پرتویی، حفاظی که حداقل وزن را به ما هواره اضافه نماید، مطلوب می باشد.

محیط پرتویی فضا که از نظر حفاظ سازی مورد توجه است را می توان به چهار دسته تقسیم کرد:

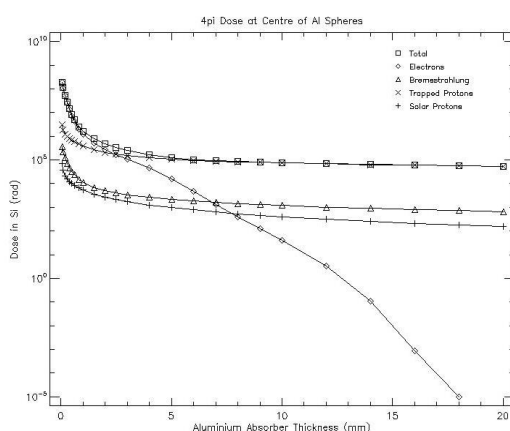
پروتون‌ها و الکترون‌های بدام افتاده در کمربند ون‌آلن، پروتون‌های خورشیدی، پرتوهای کیهانی و ذرات ثانویه. از میان چشمه‌های مذکور، پروتون‌ها به دلیل شار بالا و غالب بودن اثرشان نسبت به سایر ذرات در این کار مورد توجه قرار گرفته اند. [۱]

اثر پرتوهای فضایی بر روی قطعات الکترونیکی به سه دسته تقسیم می شوند: TID، دز آسیب جابجایی (DDD) و SEE.

در این کار تنها حفاظ سازی برای قطعات الکترونیکی بر پایه CMOS مدنظر بوده است. طبق استاندارد ECSS-۱۰-۱۲ برای این نوع قطعات الکترونیکی فقط اثر TID مهم می باشد. بنابراین طراحی حفاظ انجام شده به منظور کاهش اثر TID می باشد.

اثر TID

دز یونیزان کل، انرژی ته‌نشین شده در واحد جرم ماده در اثر یونیزاسیون می باشد. TID در اثر پرتوهای باردار که قابلیت انجام یونیزاسیون در ماده را دارند، ایجاد می شود. ذراتی که TID آنها قابل توجه می باشد الکترون‌ها و پروتون‌ها می باشند. با توجه به ساختار ما هواره که معمولا از جنس آلومینیوم و به ضخامت تقریبی ۰/۵ mm است و سایر قطعاتی که به عنوان حفاظ برای قطعه مورد نظر عمل می کنند و توجه به شکل (۱) که با نرم افزار SHIELDOSE بدست آمده نتیجه می گیریم که TID ناشی از الکترون‌ها جز در موارد محدودی از اهمیت خاصی برخوردار نیست. [۳]



شکل (۱). نمودار TID پرتوهای مختلف موجود در چشمه پرتویی در ارتفاع ۲۰۰۰ km بر حسب ضخامت حفاظ آلومینیومی

از شکل (۱) مشخص است که با حفاظ آلومینیومی به ضخامت ۵mm دز ناشی از الکترون بسیار کاهش می‌یابد. لذا در این کار تنها TID ناشی از پروتون‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

TID به عواملی مانند ارتفاع پرواز ماهواره، زاویه میل و مدت زمان ماموریت ماهواره بستگی دارد. یونیزاسیون در نیم‌رساناها یا عایق‌ها باعث گیراندازی بار یا شکل دهی حالتی بین نیم رسانا یا عایق می شود که بر روی رفتار اجزاء یا خصوصیات ماده تاثیر می‌گذارد. برای مثال در قطعات MOS بار به دام افتاده می‌تواند منجر به تغییر ولتاژ آستانه‌ی گیت شود و برای نیم‌رساناها حالت واسط، بطور قابل توجهی جریان نشتی قطعه را افزایش می‌دهد.

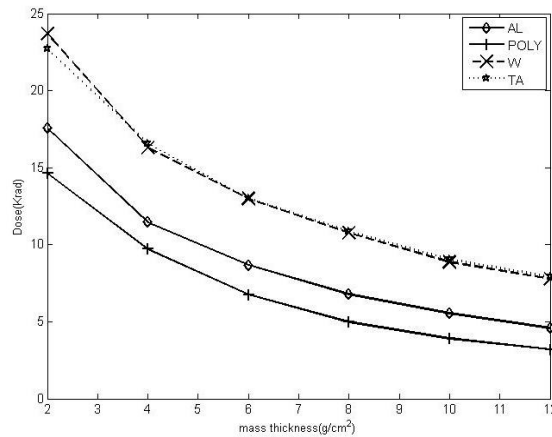
رابطه‌ای که بر اساس آن TID محاسبه می‌شود عبارتست از:

$$TID = \int f(E)LET(E)dE \quad (1)$$

که $f(E)$ شار ذرات و LET کمیتی است که انرژی یونیزان منتقل شده به محیط در واحد طول مسیر طی شده بوسیله ذره را نشان می‌دهد. در این کار از نرم افزار MULASSIS که بر اساس مونت کارلو و از جمله نرم افزارهای بر پایه GEANT4 است، استفاده شده است. برای تولید فایل ورودی این نرم افزار از نرم افزار تحت وب SPENVIS استفاده شده است. برای اینکه طراحی انجام شده به واقعیت نزدیک باشد، در این کد هندسه تخت مورد استفاده قرار گرفت.

طراحی حفاظ در مدارات LEO :

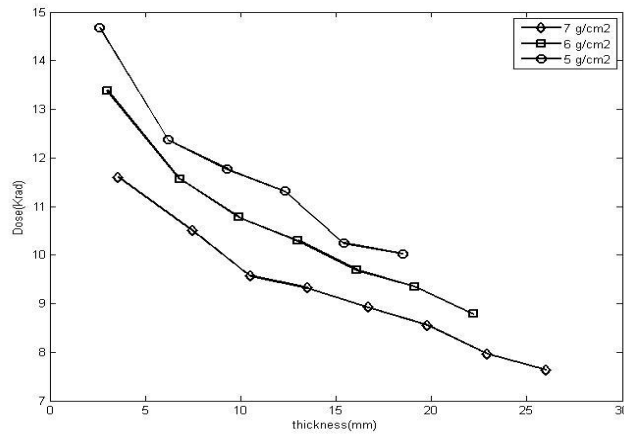
مدارات LEO مدارهای نزدیک زمین هستند که ارتفاع آنها تا ۲۰۰۰km در نظر گرفته می‌شود. در این کار ابتدا در ارتفاعها و زوایای میل مختلف پرواز ماهواره، دز بوسیله نرم افزار SHIELDOSE مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه زیر حاصل شد که در این بازه مذکور هرچه ارتفاع بیشتر می‌شود، دز بیشتر می‌شود و هرچه زاویه میل کمتر می‌شود بازهم دز بیشتر می‌شود. لذا با توجه به اینکه زاویه میلی که کشور ایران را تحت پوشش قرار می‌دهد ۶۰ درجه است، سناریوی ماموریت برای ارتفاع ۲۰۰۰km و زاویه میل ۶۰ درجه و مدت زمان ۵ سال در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن یک قطعه الکترونیکی که آستانه خرابی آن برای اثر TID ۲۰krad گزارش شده و در نظر گرفتن $RDM=2$ ، مقدار دز مجاز ایجاد شده در قطعه ۱۰krad می‌باشد. پس هدف از طراحی حفاظ رساندن حداکثر مقدار دز یونیزان ۱۰krad در قطعه هدف بود. برای طراحی حفاظ تک لایه و بررسی جنس حفاظ بر روی مقدار کاهش دز، چهار ماده آلومینیوم، پلی اتیلن، تنگستن و تانتالوم مورد بررسی قرار گرفت که نتایج محاسبات در شکل (۲) آورده شده است [۲،۴].



شکل (۲) بررسی حفاظ تک لایه از جنس‌های مختلف

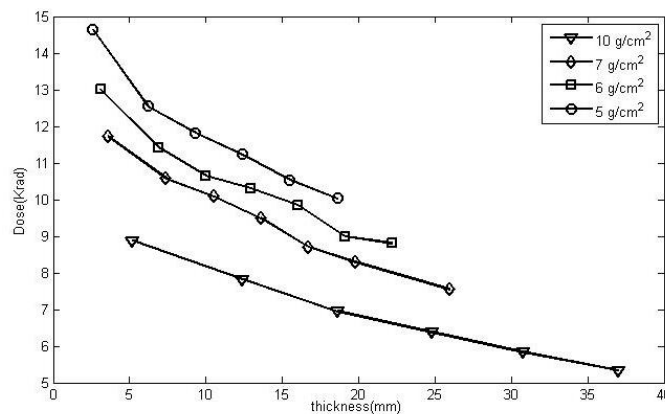
همان‌طور که از شکل (۲) مشاهده می‌شود، دو ماده‌ی تنگستن و تانتالوم با وزن‌های برابر رفتار یکسانی نشان می‌دهند. همچنین هرچه ماده از جنس سبکتری باشد، با وزن یکسان بازده بهتری به عنوان حفاظ از خود نشان می‌دهد. البته باید این نکته را نیز مد نظر قرار داد که وقتی از ماده سبک استفاده می‌شود، ضخامت حفاظ افزایش می‌یابد و در ممکن است محدودیت حجم باعث ایجاد مشکل گردد.

برای اینکه بتوان وزن ماهواره را تا حد امکان کم نمود، حفاظ دولایه مورد ارزیابی قرار داده می‌شود. بدین منظور یک لایه سبک به همراه یک لایه سنگین به عنوان حفاظ مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا دو نوع چینش، یک چینش لایه سبک لایه جلویی و لایه سنگین لایه پستی و چینش دوم برعکس چینش اول مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی انجام شده نشان داد که وقتی لایه سبک در جلو قرار می‌گیرد و لایه سنگین در پشت، بازده حفاظ بهتر می‌شود. لذا دو ماده آلومینیوم و تنگستن به عنوان مواد سبک و سنگین انتخاب شدند و برای ضخامت‌های چگالشی یکسان ۵ و ۶ و ۷ با نسبت‌های مختلف این دو ماده دز یونیزان رسیده به قطعه محاسبه شد تا از این طریق علاوه بر اینکه وزن حفاظ طراحی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد، حجم آن نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج این ارزیابی در شکل (۳) نشان داده شده است. نقاط سمت چپ هر نمودار نشان دهنده ضخامت صفر آلومینیوم و نقاط سمت راست نشان دهنده ضخامت صفر تنگستن است.



شکل (۳) ارزیابی حفاظهای دو لایه AI-W

با توجه به شکل ۳ و با مقایسه حفاظ تک لایه و دو لایه مشخص می‌شود که می‌توان با حفاظی سبکتر دز یونیزان رسیده به قطعه را به حد مجاز رساند. حال رفتار حفاظ سه لایه مورد بررسی قرار داده می‌شود تا رفتار آن مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور دو ماده آلومینیوم و تنگستن به عنوان مواد سبک و سنگین انتخاب شدند و دو نوع چینش که در یکی لایه میانی سنگین بود و در دیگری لایه میانی سبک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه ارزیابی نشان داد که چینشی که لایه سنگین در وسط دو لایه سبک قرار می‌گیرد، بازده بالاتری برای کاهش دز یونیزان دارد. سپس برای همین ترکیب مذکور حالت‌های مختلف که نسبت دو لایه سبک به یکدیگر چگونه باشند مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاکی از بازده بهتر برای حالتی بود که دو لایه سبک ضخامت یکسانی داشته باشند



شکل (۴) ارزیابی حفاظهای سه لایه AI-W-AI

محاسبات فوق برای بررسی حفاظ سه لایه از جنس پلی‌اتیلن به عنوان ماده سبک و تنگستن به عنوان ماده سنگین نیز انجام شد که نتایج در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل نیز نقاط سمت چپ هر نمودار نشان دهنده ضخامت صفر پلی‌اتیلن و نقاط سمت راست نشان دهنده ضخامت صفر تنگستن است. همانطور که از شکل (۴) مشخص است با این

ترکیب و وزن 3 gr/cm^2 نمی‌توان دز را به حد مورد نظر رساند ولی با حفاظی با وزن‌های 4 gr/cm^2 و 5 gr/cm^2 مجاز حاصل می‌شود. از این بین اگر محدودیت وزن اهمیت بیشتری داشته باشد می‌توان حفاظ با وزن 4 gr/cm^2 را انتخاب نمود و اگر محدودیت حجم مهمتر است می‌توان حفاظ با وزن 5 gr/cm^2 را برگزید.

نتیجه گیری :

نتایج بررسی ها نشان می دهد در بین مدارات مختلف LEO مدارات با زاویه شیب 30° درجه و ارتفاع 2000 کیلومتر به عنوان بدترین حالت دریافت دز پروتون محسوب می شوند. هرچه در این ارتفاع زاویه شیب صفحه مداری افزایش یابد از مقدار دز پروتون کمربند ون آلن کاسته می شود، هرچند با توجه به امتداد مرزهای جغرافیایی ایران تا عرض 55° درجه در این مقاله زاویه شیب مداری 60° درجه برای ماهواره در نظر گرفته شد. در بررسی انواع حفاظهای بکار رفته برای کاهش دز پروتون به زیر حد مجاز دز نتایج زیر حاصل شد:

در حفاظهای تک لایه چنانچه محدودیت وزن وجود داشته باشد باید از مواد خیلی سنگین و در صورتی که محدودیت وزن وجود داشته باشد باید از مواد سبک استفاده کرد. برای در نظر گرفتن همزمان محدودیت وزن و حجم و بهینه سازی حفاظ در این دو حالت به صورت همزمان باید از حفاظهای چند لایه استفاده کرد. برای بهینه سازی همزمان حجم و وزن، استفاده از حفاظ های سه لایه ای موثر تر از دو لایه ای است. در حفاظهای سه لایه ای حالتی که ماده سنگین بین دو ماده سبک ساندویچ شده باشد بازده حفاظ بیشتر خواهد بود. همچنین چنانچه از دو ماده کاملاً سنگین و کاملاً سبک استفاده گردد نتایج بهتری قابل حصول است.

مراجع

- [۱] ECSS-E-ST-۱۰-۱۲C, "Method for the calculation of radiation received and its effects, and policy for design margins", ESA's standards, ۲۰۰۸.
- [۲] "Multi-Layered Shielding Simulation (Mulassis)", Geant based Toolkit for Dose calculation, ۲۰۰۹.
- [۳] Local Version of the ESA's Space Environment Information System (SPENVIS).
- [۴] R. Mangeret, T. Caribre, J. Beaucour, "Effects of Material and/or Structure on Shielding of electronic Devices", IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. ۴۳, NO. ۶, DECEMBER ۱۹۹۶
- [۵] L. Varga and E. Horvath, "Evaluation of Electronics Shielding in Micro-satellites", Defence R&D Canada - Ottawa