

حفاظت‌های چندلایه در مدار LEO

مظاهر اسکندری*، علی محمد نیکو، حسین جهانبخش و حسین صادقی

دانشکده فیزیک، دانشگاه مالک اشتر، شاهین شهر اصفهان، ایران.

*اصفهان، شاهین شهر، خیابان فردوسی، دانشگاه مالک اشتر، دانشکده فیزیک، کدپستی: ۸۳۱۴۵-۱۱۵

پست الکترونیکی: M_eskandari@shirazu.ac.ir

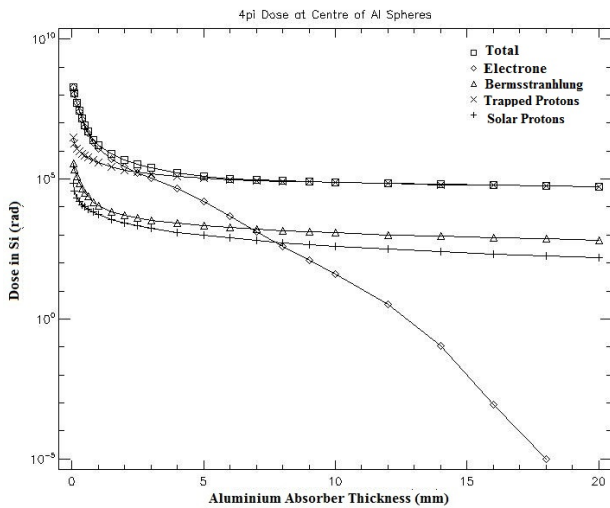
چکیده

تابش‌های موجود در محیط پرتوی فضا در مدار LEO که پروتون‌ها سهم عمده آن‌ها را تشکیل می‌دهند، آثار مخربی بر روی قطعات الکترونیکی بر جای می‌گذارند. در این مقاله، اثر آسیب یونیزان پروتون‌ها بر روی قطعات الکترونیکی ماهواره‌ای که در مدار LEO حرکت می‌کند، بررسی شد. با بررسی‌های انجام‌شده بر روی مدارهای LEO توسط نرم‌افزار Shieldose، بدترین سناریوی مطرح برای یک ماهواره، مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به در نظر گرفتن قطعات الکترونیکی بر پایه نیمه‌رسانای اکسید فلزی (MOS)، طراحی حفاظ برای اثر TID ناشی از پروتون‌های به‌دام‌افتاده به‌وسیله نرم‌افزار MULASSIS که بر پایه محاسبات مونت کارلو است، انجام شد. با در نظر گرفتن محدودیت وزن و حجم، حفاظ‌های چند لایه برای کاهش دز یونیزان، بررسی شد. با توجه به نتایج حاصل از محاسبات، حفاظ‌های سه لایه‌ای با ترکیبی از مواد با چگالی کم، با چگالی زیاد و با چگالی کم، به‌منظور بهینه‌سازی نسبی هم‌زمان وزن و حجم به‌عنوان حفاظ بهینه انتخاب شد. کلیدواژگان: TID، LEO، MULASSIS، MOS، مونت کارلو، محیط تابشی فضا، پروتون‌های به‌دام‌افتاده، حفاظ چندلایه.

۱. مقدمه

تمایل به کاهش جرم ماهواره‌ها و فضایی‌ها یکی از موارد مهمی است که در طراحی ماهواره به‌طور چشمگیری مورد توجه است. از جمله نکات مهم دیگری که در طراحی مورد توجه قرار می‌گیرد، کارکرد صحیح مدارهای الکترونیکی ماهواره در حضور تابش‌های فضایی است؛ لذا در ماهواره‌ها می‌توان از قطعات الکترونیکی که مخصوص فضا طراحی شده، یا از قطعات تجاری ارزان‌قیمت‌تر و در دسترس‌تر استفاده کرد. مشکل استفاده از قطعات تجاری برای استفاده در مدارهای ماهواره‌ها، عدم تحمل دزهای بالای تابش‌های پرنانرژی فضایی و از دست دادن کارایی قطعه است. برای برطرف کردن این مشکل تنها راه، استفاده از حفاظ‌های پرتوی مناسب برای قطعات الکترونیکی است. در طراحی حفاظ پرتوی، حفاظی که حداقل وزن را به ماهواره اضافه کند، مطلوب است. تحقیقات فراوانی در سازمان‌های فضایی کشورهای صاحب فناوری فضایی انجام شده است که حاصل آن‌ها گزارش‌های متعدد درخصوص روش‌های محاسبات پرتوهای فضایی و کاربردهای عملی آن‌ها در پروژه‌های فضایی است. در سال ۱۹۹۶، گروهی از فرانسه و امریکا مطالعاتی را درباره مواد مفید در حفاظ‌سازی تشعشعات و حفاظ‌های چندلایه‌ای تحت عنوان آثار مواد یا ساختار روی حفاظ وسایل الکترونیکی [۱] انجام داده‌اند که نتایج آن در مقاله‌ای در IEEE به چاپ رسیده است. همچنین در سال ۲۰۰۳، گروهی از کانادا مطالعاتی را درخصوص مدل‌سازی سه‌بعدی میکروماهواره‌ها و حفاظ‌های تشعشعاتی تحت عنوان ارزیابی حفاظ‌های الکترونیکی در میکروماهواره‌ها

TID ناشی از الکترون‌ها جز در موارد محدودی از اهمیت خاصی برخوردار نیست [۴].



شکل ۱: نمودار TID پرتوهای مختلف موجود در چشمه پرتوی در ارتفاع ۲۰۰۰ km بر حسب ضخامت حفاظ آلومینیومی [۴]

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 بررسی شده است.

TID به عواملی مانند ارتفاع پرواز ماهواره، زاویه میل و مدت زمان مأموریت ماهواره بستگی دارد. یونیزاسیون در نیم‌رساناها یا عایق‌ها باعث گیراندازی بار یا شکل‌دهی حالتی بین نیم‌رسانا یا عایق می‌شود که بر روی رفتار اجزا یا خصوصیات ماده تأثیر می‌گذارد؛ برای مثال، در قطعات MOS بار به‌دام‌افتاده می‌تواند منجر به تغییر ولتاژ آستانه گیت شود و برای نیم‌رساناها حالت واسط، به‌طور قابل توجهی، جریان نشستی قطعه را افزایش می‌دهد.

رابطه‌ای که براساس آن TID محاسبه می‌شود، عبارت

است از:

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

[۲] انجام داده‌اند.

محیط پرتوی فضا که از نظر حفاظ‌سازی مورد توجه است، می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد:

پروتون‌ها و الکترون‌های به‌دام‌افتاده در کمربند ون‌آلن، پروتون‌های خورشیدی، پرتوهای کیهانی و ذرات ثانویه.

از میان چشمه‌های مذکور، پروتون‌ها به‌دلیل شار بالا و غالب‌بودن اثرشان نسبت به سایر ذرات، در این کار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳].

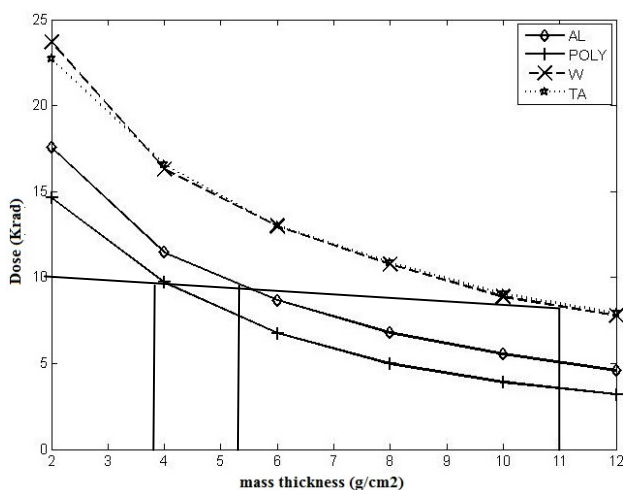
اثر پرتوهای فضایی بر روی قطعات الکترونیکی به سه دسته تقسیم می‌شوند: دز یونیزاسیون کل^۱ (TID)، آسیب جابجایی^۲ (DD) و آثار رویدادهای تک‌رخدادی^۳ (SEE).

در این کار، تنها حفاظ‌سازی برای قطعات الکترونیکی بر پایه^۴ MOS مد نظر بوده است. طبق استاندارد ECSS-10-12 برای این نوع قطعات الکترونیکی، فقط اثر TID مهم است؛ بنابراین، طراحی حفاظ انجام‌شده به‌منظور کاهش اثر TID است.

۲. اثر TID

دز یونیزان کل، انرژی ته‌نشین‌شده در واحد جرم ماده بر اثر یونیزاسیون است. TID بر اثر پرتوهای باردار که قابلیت انجام یونیزاسیون در ماده را دارند، ایجاد می‌شود. ذراتی که TID آن‌ها قابل توجه است، الکترون‌ها و پروتون‌ها هستند. با توجه به ساختار ماهواره که معمولاً از جنس آلومینیوم و به ضخامت تقریبی ۵ mm است و سایر قطعاتی که به‌عنوان حفاظ برای قطعه مورد نظر عمل می‌کنند و با توجه به شکل (۱) که با نرم‌افزار SHIELDOSE به‌دست آمده، نتیجه می‌گیریم که

1. Total ionizing dose
2. Display damage
3. Single event effects
4. Metal oxid semiconductor



شکل ۲: بررسی حفاظ تک‌لایه از جنس‌های مختلف

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

برای اینکه بتوان وزن و حجم ماهواره را تا حد امکان کم کرد، حفاظ دولایه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور، یک لایه با چگالی کم به همراه یک لایه با چگالی زیاد به‌عنوان حفاظ بررسی می‌شود. ابتدا دو نوع چینش، یک چینش لایه جلویی با ماده چگالی کم و لایه پشتی با ماده چگالی زیاد و چینش دوم برعکس چینش اول، مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی انجام‌شده نشان داد که وقتی لایه با چگالی کم در جلو قرار می‌گیرد و لایه با چگالی زیاد در پشت، بازده حفاظ بهتر می‌شود؛ لذا دو ماده آلومینیوم و تنگستن به‌عنوان مواد با چگالی کم و با چگالی زیاد انتخاب شدند (جدول ۱).

که $f(E)$ شار ذرات و LET^1 کمیتی است که انرژی یونیزان منتقل‌شده به محیط در واحد طول مسیر طی‌شده به‌وسیله ذره را نشان می‌دهد. در این کار، از نرم‌افزار MULASSIS که براساس مونت کارلو و ازجمله نرم‌افزارهای بر پایه GEANT4 است، استفاده شده است. برای تولید فایل ورودی این نرم‌افزار از نرم‌افزار تحت وب SPENVIS استفاده شده است. برای اینکه طراحی انجام‌شده به واقعیت نزدیک باشد، این کد هندسه تخت مورد استفاده قرار گرفت [۵].

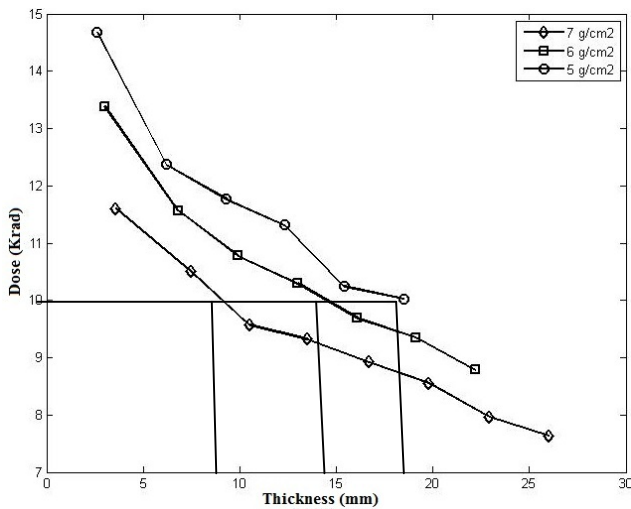
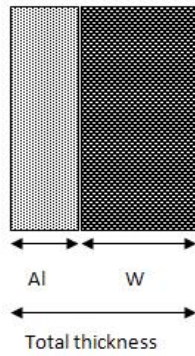
۳. طراحی حفاظ در مدارات LEO^۲

مدارهای LEO مدارهای نزدیک زمین هستند که ارتفاع آن‌ها تا ۲۰۰۰ km در نظر گرفته می‌شود. در این کار، ابتدا در ارتفاع‌ها و زوایای میل مختلف پرواز ماهواره، دز به‌وسیله نرم‌افزار SHIELDOSE مورد بررسی قرار گرفت؛ در نتیجه در این بازه، هرچه ارتفاع بیشتر می‌شود، دز بیشتر می‌شود و هرچه زاویه میل کمتر می‌شود، باز هم دز بیشتر می‌شود؛ لذا با توجه به اینکه زاویه میلی که کشور ایران را تحت پوشش قرار می‌دهد ۶۰ درجه است، سناریوی مأموریت برای ارتفاع ۲۰۰۰ km 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، $TID = 20 \text{ krad}$ گزارش شده و نیز در نظر گرفتن $RDM=2$ ، مقدار دز مجاز ایجادشده در قطعه 10 krad است. پس هدف از طراحی حفاظ رساندن حداکثر مقدار دز یونیزان 10 krad در قطعه هدف بود. برای طراحی حفاظ تک لایه و بررسی جنس حفاظ بر روی مقدار کاهش دز، چهار ماده آلومینیوم، پلی‌اتیلن، تنگستن و تانتالوم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج محاسبات توسط کد محاسباتی مونت کارلوی MULASSIS در شکل (۲) آورده شده است [۴، ۵].

1. Linear energy total
2. Low earth orbit

جدول ۱: مقایسه دو نوع حفاظ دولایه‌ای

ضخامت کل	Dose g/cm ²	لایه دوم (mm)	لایه اول (mm)
۱۸/۱	۵	AL	W
۱۸/۱	۵	W	AL



شکل ۳: نمای کلی حفاظ و ارزیابی حفاظ‌های دو لایه Al-W

برای ضخامت‌های چگالشی یکسان ۵ و ۶ و ۷ gr/cm² 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 گیرد، حجم آن نیز ارزیابی شود. نتایج این ارزیابی در شکل (۳) و جدول (۱) نشان داده شده است. نقاط سمت چپ هر نمودار نشان‌دهنده ضخامت صفر آلومینیوم و نقاط سمت راست نشان‌دهنده ضخامت صفر تنگستن است. با توجه به شکل (۳) و جدول (۲) با مقایسه حفاظ تک‌لایه و دو لایه مشخص می‌شود که می‌توان با حفاظی با چگالی کمتر، 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.

جدول ۲: مقایسه حفاظ تک‌لایه‌ای با دولایه‌ای

ضخامت کل	Trap g/cm ²	لایه دوم (mm)	لایه اول (mm)
۱۹	۵/۱۳	W	AL
۱۸/۳۸	۵/۱۳	AL	W

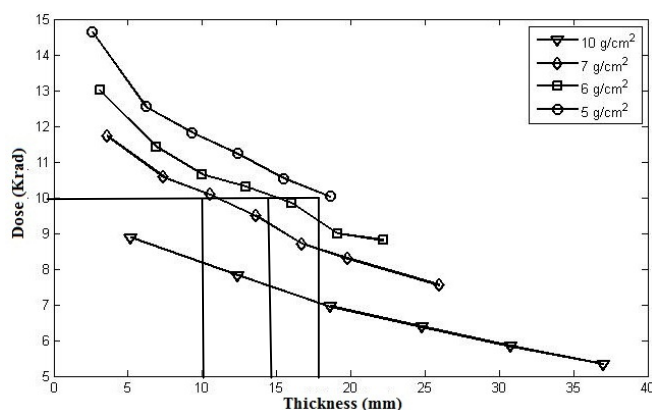
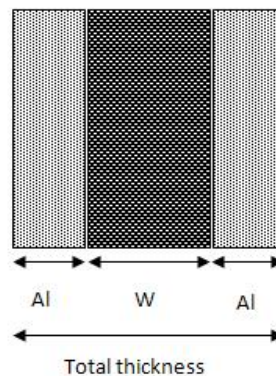
بدین منظور، دو ماده آلومینیوم و تنگستن به‌عنوان مواد با چگالی کم و با چگالی زیاد انتخاب شدند و دو نوع چینش که در یکی لایه میانی با چگالی زیاد بود و در دیگری لایه میانی با چگالی کم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه ارزیابی نشان داد که چینشی که لایه با چگالی زیاد در وسط دو لایه با چگالی کم قرار می‌گیرد، بازده بالاتری برای کاهش دز یونیزان دارد. سپس برای همین ترکیب، حالت‌های مختلف که نسبت دو لایه با چگالی کم به یکدیگر چگونه باشند، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از بازده بهتر برای حالتی بود که دو لایه با چگالی کم، ضخامت یکسانی داشته باشند.

را انتخاب کرد و اگر محدودیت حجم مهم‌تر است، می‌توان حفاظ با وزن 5 gr/cm^2 را برگزید.

۴. نتیجه‌گیری

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

در حفاظ‌های تک‌لایه، چنانچه محدودیت ضخامت وجود داشته باشد، باید از مواد با چگالی زیاد و در صورتی که محدودیت وزن وجود داشته باشد، باید از مواد با چگالی کم استفاده کرد. برای در نظر گرفتن هم‌زمان محدودیت وزن و حجم و بهینه‌سازی حفاظ در این دو حالت، به‌صورت هم‌زمان باید از حفاظ‌های چند لایه استفاده کرد. برای بهینه‌سازی هم‌زمان حجم و وزن، استفاده از حفاظ‌های سه لایه‌ای موثرتر از دو لایه‌ای است. در حفاظ‌های سه لایه‌ای حالتی که ماده با چگالی زیاد بین دو ماده با چگالی کم ساندویچ شده باشد، بازده حفاظ بیشتر خواهد بود. همچنین چنانچه از دو ماده کاملاً با چگالی زیاد و کاملاً با چگالی کم استفاده شود، نتایج بهتری به دست خواهد آمد.



شکل ۴: نمای کلی حفاظ و ارزیابی حفاظ‌های سه لایه Al-W-Al

محاسبات فوق برای بررسی حفاظ سه لایه از جنس آلومینیوم به‌عنوان ماده با چگالی کم و تنگستن به‌عنوان ماده با چگالی زیاد نیز انجام شد. نتایج در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل نیز، نقاط سمت چپ هر نمودار نشان‌دهنده ضخامت صفر آلومینیوم و نقاط سمت راست نشان‌دهنده 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 دز مجاز حاصل می‌شود. از این بین، اگر محدودیت وزن اهمیت بیشتری داشته باشد، می‌توان حفاظ با وزن 4 gr/cm^2

۵. مراجع

[1] R. Mangeret, T. Carrière, J. Beaucoeur. Effects of Material and/or Structure on Shielding of electronic Devices. IEEE Transactions on Nuclear Science. (1996)

[2] L. Varga and E. Horvath. Evaluation of Electronics Shielding in Micro-satellites. Defence R&D Canada – Ottawa. (2003).
[3] Method for the calculation of radiation received

- and its effects, and policy for design margins. ESA's standards. (2008).
- [4] Local Version of the ESA's Space Environment Information System ; www.SPENVIS.oma.be
- [5] F.Lei, R.Truscott.Mulassis, Multi-Layered shielding simulation. Geant based toolkit for dose calculation. Iee, vol.49, no 6, (2009).