

## طراحی و بهینه‌سازی حفاظ ماهواره برای کاهش اثرات الکترون‌های به دام افتاده

علی‌النقی قادری\* - حسین صادقی - علی محمد نیکو - حسین جهانبخش

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده فیزیک

### چکیده

در اطراف کره‌ی زمین محیطی پر از ذرات گوناگون وجود دارد، این ذرات شامل الکترون‌ها، پروتون‌ها، یون‌های سنگین و تابش‌های الکترومغناطیس می‌باشد. این محیط تأثیرات مخربی بر روی قطعات حساس ماهواره و سرنشینان آن دارد. در این کار سعی شد تا با شبیه‌سازی محیط تابشی فضا در مدار LEO توسط کدهای Shieldose2، MULASSIS و MCNPX تأثیر TID ناشی از الکترون‌های به دام افتاده بر روی قطعات حساس ماهواره که در سطح ماهواره قرار می‌گیرند، مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین با بررسی برهمکنش بین مواد و تابش الکترون، رفتار مواد مختلف در برابر تابش مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که با طراحی حفاظ سانداویچی با ترتیب مواد سبک، سنگین و سبک می‌توان تعادلی بین توقف بیشتر الکترون‌ها و تولید برم‌اشترلانگ ایجاد نمود.

واژه‌های کلیدی: کاهنده انرژی - کد MCNP - سیکلوترون - تست تابشی

### مقدمه

شار الکترون‌ها در کمربند ون‌آلن با توجه به ارتفاع و زاویه میل حرکت ماهواره کاملاً متفاوت است. بدین منظور سعی شده که بدترین سناریوی ممکن مورد نظر قرار گیرد تا از کارکرد صحیح قطعات مطمئن شویم. انرژی الکترون‌ها در این مدار انرژی از  $0.04 \text{ MeV}$  تا  $6.0 \text{ MeV}$  متغیر است. هر چه از انرژی‌های پایین به سمت انرژی‌های بالا می‌رویم از تعداد الکترون‌های با انرژی بالاتر کاسته می‌شود. با استفاده از Shieldose2 این حالت در ارتفاع  $2000$  کیلومتری و مدار  $60$  درجه انتخاب شد؛ البته زاویه طوری انتخاب شد که ماهواره بر روی ایران واقع شود و زمان منظور شده یک دوره  $5$  ساله است. مقدار دز استاندارد که در این پایان‌نامه منظور شده مقدار  $10 \text{ kRad}$  می‌باشد، این میزان دز با توجه به قطعه یا جسم حساس مورد نظر ممکن است تغییر کند پس این مقدار، تقریبی است. قطعه‌ی مورد نظر یا همان هدف به شکل یک قطعه واقعی طراحی شده است که میزان دز حاصل از تخلیه‌ی یونیزان الکترون در آن حساب می‌شود. قطعه یک IC از جنس سیلیسیم (Si) با ضخامت  $10 \mu\text{m}$  می‌باشد که با دو لایه‌ی دیگر پوشیده شده است. لایه‌ی اول بر روی سیلیسیم از جنس سیلیسیم‌دی‌اکسید ( $\text{SiO}_2$ ) با ضخامت  $195 \mu\text{m}$  و لایه‌ی دوم از جنس فنول فرمالدهید ( $\text{C}_7\text{H}_7\text{O}_5$ ) با ضخامت  $300 \mu\text{m}$  می‌باشد. قطعه را طوری در نظر می‌گیریم که این دو ماده یعنی سیلیسیم‌دی‌اکسید و فنول فرمالدهید با این ضخامت‌ها پوشیده شده باشد و بعد از این دو لایه حفاظ را در دو طرف قطعه قرار می‌دهیم سپس دز را در سیلیسیم حساب خواهیم نمود. در اغلب مقالات سیلیسیم به طور برهنه در تحلیل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و از هیچ روکشی استفاده نمی‌شود ولی در این مقاله به منظور نزدیک شدن به نمونه‌های موجود از دو لایه‌ی ذکر شده استفاده شده است تا تأثیر خود حفاظی روکش روی IC نیز مورد بررسی قرار گیرد. مواد با Z بالا برای حفاظ در برابر الکترون نسبت به مواد با Z پایین موثرتر است. با این حال، تولید برم‌اشترلانگ با بالا رفتن Z افزایش می‌یابد. با طراحی حفاظ "ساندویچی" می‌توان تعادلی بین توان توقف بیشتر الکترون در مواد با Z بالا و تولید برم‌اشترلانگ کمتر در مواد با Z پایین تر ایجاد نمود.



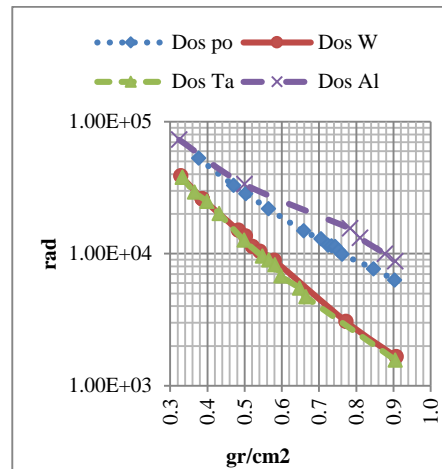
برای حفاظ در برابر الکترون معمولاً اولین لایه‌ی مقابل آن یک ماده با  $Z$  پایین است که الکترونی‌های پر انرژی را می‌کند ضمن اینکه تولید برم اشترلانگ حداقل است، در حالی که در لایه بعدی یعنی ماده با  $Z$  بالا الکترونی‌های با انرژی کاسته شده پراکنده می‌شوند و برم اشترلانگ تولید شده توسط واکنش‌های اولیه میرا می‌شود. برای اشعه  $X$ ، حفاظ معکوس است (مواد اولیه  $Z$  بالا) فوتون‌ها کند و سپس الکترون ثانویه در مواد با  $Z$  پایین جذب می‌گردند. حال با توجه به توضیحات بالا در می‌یابیم برای حفاظ مورد نظر باید از مواد سنگین و سبک با هم استفاده شود تا بتوان به مقدار ضخامت و ماده بهینه دست یافت به این منظور مواد سبکی که اختیار شده آلومینیوم با چگالی  $2.7 \text{ gr/cm}^3$  و پلی اتیلن با چگالی  $0.94 \text{ gr/cm}^3$  بوده و مواد سنگین انتخاب شده تنگستن با چگالی  $19.3 \text{ gr/cm}^3$  و تانتالم با چگالی  $16.06 \text{ gr/cm}^3$  می‌باشد.

حفاظ می‌تواند بر روی قطعه حساس به سه شکل قرار گیرد:

حالت اول اینست که تنها از یک ماده بر روی قطعه استفاده شود که در این حالت برای رسیدن به حالت دلخواه کافی است با کم و زیاد کردن ضخامت حفاظ و محاسبه‌ی دز در قطعه با استفاده از شبیه‌سازی به ضخامت مطلوب خویش دست پیدا کنیم که این حالت خیلی ساده و فقط می‌تواند ماده بهینه را از لحاظ وزن مشخص کند ولی نمی‌توان ضخامت را بهینه کرد. حالت دوم زمانی است که از دو یا چند ماده به صورت لایه لایه استفاده شود و با جابجا کردن لایه‌ها و ضخامت‌ها باید حالت بهینه را بدست آورد. حالت سوم با استفاده از یک ترکیب مناسب در حفاظ بدست می‌آید که موضوع بحث این کار نیست و در این مجال تنها به بررسی دو حالت اول پرداخته خواهد شد.

### طراحی و تحلیل حفاظ با استفاده از کد MULASSIS

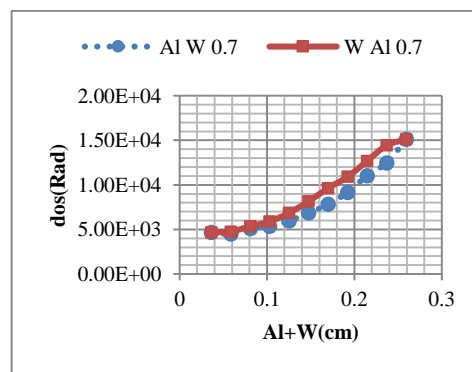
در این بخش به تبیین، بررسی و تحلیل مواد با ضخامت‌های گوناگون در کد MULASSIS پرداخته خواهد شد. در ابتدا حالت بهینه‌ی حفاظ تک لایه و سپس حفاظ در حالت‌های دو و سه لایه بررسی خواهد شد. تحلیل در تک لایه نسبت به بقیه حالات به دلیل تک جنسی بودن حفاظ ساده‌تر می‌باشد یعنی در چند لایه جنس ماده به عنوان متغیر تحلیل را مشکل می‌کند. در این قسمت از ضخامت سطح ( $\text{gr/cm}^2$ ) به عنوان شاخص ضخامت بهره برده شده. در شکل (۱) با بالا رفتن ضخامت سطح می‌بینیم که دز تخلیه شده برای هر ماده با زیاد شدن ضخامت سطح کاهش می‌یابد با این تفاوت که جای تنگستن با تانتالم و جای آلومینیوم با پلی اتیلن عوض شده است به این معنا که از لحاظ وزنی پلی اتیلن از آلومینیوم و تانتالم از تنگستن بهتر می‌باشد ولی این نمودارها نشان می‌دهد که بطور کلی مواد سنگین هم به لحاظ حجمی و هم به لحاظ وزنی برای یک حفاظ تک لایه مناسب‌تر هستند.



شکل (۱) دز تخلیه شده برای پلی اتیلن، آلومینیوم، تنگستن و تانتالم در ضخامت‌های مختلف

#### حفاظ دو لایه

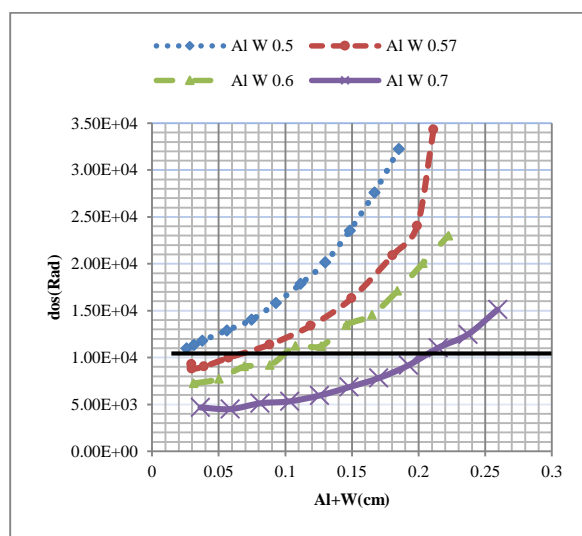
در این حالت یک بار آلومینیوم در لایه خارجی و تنگستن در لایه داخلی و یک بار تنگستن در لایه خارجی و آلومینیوم در لایه داخلی قرار گرفته است که در نام نمودار به ترتیب از بیرونی به درونی در سمت راست شکل قابل مشاهده می‌باشد. همانطور که پیداست اگر به ضخامت آلومینیوم افزوده شود چون باید ضخامت سطح ثابت بماند باید در ضخامت تنگستن نیز تغییر داده شود تا به مقدار ثابت برای ضخامت سطح برسد که این مقدار برای تنگستن با عملیات جبری ساده‌ای بدست می‌آید. یعنی در این حفاظ بدون تغییر در وزن و تنها با تغییر در مقدار هریک از مواد به کار گرفته شده دیده می‌شود در حالتی دز بیشینه ( $4.68E+03$  Rad) و در حالتی دز کمینه ( $1.51E+04$  Rad) است به عبارتی هرچه از مقدار ماده‌ی سنگین کاسته و به ماده‌ی سبک افزوده می‌شود مقدار دز افزایش می‌یابد که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲) نمودار مقادیر دز بدست آمده برای چیدمان‌ها و ضخامت‌های مختلف در ضخامت سطح

gr/cm<sup>۲</sup>۰/۷

زمانی که آلومینیوم (ماده‌ی سبک) در لایه بیرونی قرار می‌گیرد دز کمتری را در هدف خواهیم داشت یعنی تنها با یک جابجایی می‌توان دز را کاهش داد و همچنین مشاهده می‌شود با افزایش ماده سنگین در حفاظ می‌توان مقدار دز را به اندازه‌ی قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. در شکل (۳) بررسی و مقایسه‌ی نمودارها به نحوی است که در این نمودارها تنها از مقادیری استفاده شده تا چیدمان لایه‌ها آلومینیوم را در لایه‌ی خارجی و تنگستن در لایه‌ی داخلی باشد. همانطور که پیداست هرچه ضخامت سطح کاهش می‌یابد افزایش در دز متقابلاً دیده می‌شود.



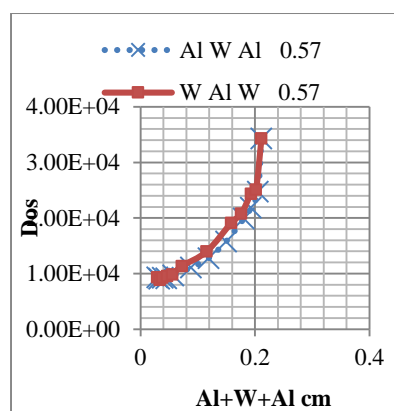
شکل (۳) نمودار مقادیر دز بدست آمده برای ضخامت‌های مختلف در چند ضخامت سطح ثابت

اگر مسیر خط‌هایی افقی در شکل (۳) دنبال شود در بعضی از نقاط هر چهار منحنی را قطع می‌کند که این بدان معناست که در یک مقدار دز ثابت چند ضخامت سطح یکسان می‌توان داشت. یکی از این خطوط افقی که در شکل مشخص شده است مربوط به دز ۱۰ kRad می‌باشد که نشان می‌دهد برای این دز با ضخامت سطح‌های ۰/۵۷، ۰/۶ و ۰/۷ می‌توان حفاظ بدست آورد. مطلب دیگری که با توجه به این نمودار به نظر می‌رسد این است که هرچه ضخامت سطح کاسته می‌شود از تندی شیب نمودارها هم کاسته می‌شود در نتیجه اثر تغییر در مقادیر آلومینیوم و تنگستن در حفاظ کاسته می‌شود یعنی به جایی می‌رسد که برای حالت بهینه فرقی نمی‌کند که از آلومینیوم تنها و یا از تنگستن تنها استفاده شود که در این موارد باید بهینه نمودن حجم حفاظ (ضخامت نشان دهنده‌ی آن است) مورد توجه قرار گیرد.

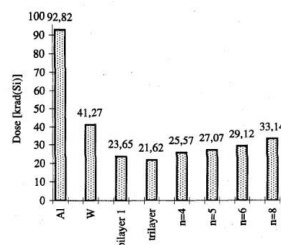
#### حفاظ سه لایه

در حفاظ سه لایه همانند دو لایه از یک ماده‌ی سنگین (تنگستن) و یک ماده‌ی سبک (آلومینیوم) بهره برده شده است. داده‌ها تنها در یک ضخامت سطح ثابت با مقدار ۰/۵۷ گرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد و همچنین لایه‌ها به دو صورت سبک سنگین سبک و سنگین سبک سنگین در نظر گرفته شده‌اند که ماده‌ی میانی با دو لایه‌ی هم اندازه پوشانده شده است. در این حال نیز مانند حفاظ دو لایه‌ای می‌بینید که با افزایش آلومینیوم دز نیز

افزایش می‌یابد و همچنین حالتی را که در آن آلومینیوم در لایه‌ی اولیه قرار دارد حالت بهینه‌تری نشان می‌دهد و این بدان خاطر است که آلومینیوم کند کننده‌ی خوبی برای الکترون می‌باشد ولی وقتی الکترون را کند می‌کند مقادیری تابش‌های الکترومغناطیس ثانوی تولید می‌کند که نسبت به الکترون در آلومینیوم تنها برد بیشتری دارد و در این جا استفاده از ماده‌ی سنگین که نسبت به مواد سبک برای جذب پرتوهای ثانوی کارآیی بیشتری دارند باعث شده‌اند. در نتیجه برای حالت سه لایه هم مانند حالت دو لایه مقدار و چینی را که برای حفاظ بهینه می‌توان در نظر گرفت هنگامی است که مقدار ماده‌ی سنگین ما به اندازه‌ی بیشینه‌ی خود برسد. این مطلب به خوبی در شکل (۴) پیداست.

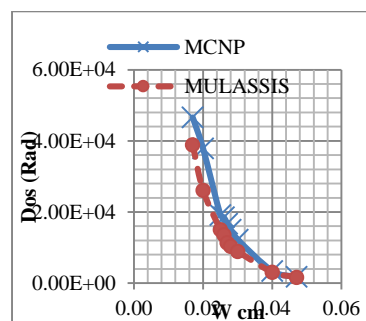


شکل (۴) نمودار مقادیر دز بدست آمده برای چیدمان‌ها و ضخامت‌های مختلف در ضخامت سطح  $0.57 \text{ gr/cm}^2$  باتوجه به مطالب بالا که برای حفاظ‌های تک لایه، دو لایه و سه لایه در بالا آورده شد حفاظ تک لایه را در حالی که از مواد سنگینی همچون تنگستن و تانتالم در آن استفاده شده باشد می‌توان به عنوان حفاظی بهینه برای قطعه‌ی هدف مورد نظر ما در نظر گرفت اما نکته‌ای که فراموش کردن آن ممکن است این نتیجه را طوری نشان دهد که با مقالات موجود در این زمینه تناقض دارد اینست که هدفی که در این پایان نامه لحاظ شده است مانند مقالات موجود در این زمینه نیست و هدف مورد نظر خود دارای دو لایه‌ی جدا از حفاظ بر روی سیلیمی می‌باشد که دز در آن محاسبه می‌گردد یعنی حفاظ تک لایه‌ی ما در حقیقت سه لایه است که دو لایه‌ی آن به طور ثابت بر روی هدف قرار گرفته است و باید دانست حفاظ بیش از سه لایه نه تنها دز را کاهش نمی‌دهد بلکه گاهی باعث افزایش دز در قطعه‌ی هدف می‌گردد.

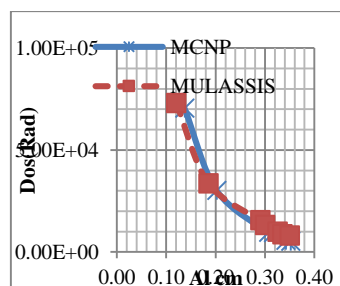


شکل (۵) میرایی دزکل بر حسب تعداد لایه‌ها با ضخامت کلی  $1.37 \text{ gr/cm}^2$

شکل (۵) که دز درمدار ۱۶۰ غربی Geo و ضخامت سطح  $1.37 \text{ gr/cm}^2$  برای حالت‌های تک لایه، دو لایه، سه لایه و... را نشان می‌دهد این مطلب را تایید می‌کند که با افزایش تعداد لایه‌ها نمی‌توان دز را کاهش داد. به همین علت در قسمت قبل برای تحلیل حفاظ سه لایه از قبل جواب‌های بدست آمده پیش بینی شده بود و تنها به بررسی یک ضخامت سطح بسنده شده است. در این بخش به بررسی نتایج بدست آمده در بخش قبل پرداخته شده با این تفاوت که به جای استفاده از نرم افزار MULASSIS از کد محاسباتی MCNP برای شبیه سازی استفاده شده است. هندسه‌ی تعریف شده همان هندسه‌ی به کار رفته در کد MULASSIS است. چشمه‌ای که استفاده شده همانند چشمه‌ای نقطه‌ای MULASSIS در نظر گرفته شده و با گرفتن طیف انرژی از قسمت آنلاین برنامه و قرار دادن آن به عنوان ورودی MCNP سعی شده تا شرایط MULASSIS کاملاً شبیه سازی شود به طوری که همانند MULASSIS از یک چشمه‌ی نقطه‌ای بهره برده و طیفی که برای الکترون در MULASSIS در نظر گرفته شده در ورودی MCNP نیز تعریف شده است. هندسه‌ی قطعه هم همان است که در بخش قبل کاملاً شرح داده شد. دز مورد محاسبه توسط MCNP باید با مقادیر بدست آمده توسط MULASSIS مقایسه شود و چون مقدار دزی که در برنامه‌ی MULASSIS اندازه‌گیری می‌شود، دز تخلیه شده در قطعه حساس (سیلیسیم Si) می‌باشد. برای اینکه بتوان این دز را در MCNP بدست آورد از تالی F6 که مقدار دز تخلیه شده در سلول مورد نظر را می‌دهد بهره گرفته شده است. درست است که منحنی‌های بدست آمده شکل (۶) و (۷) کاملاً بر روی هم نمی‌افتند ولی می‌توان گفت که به اندازه‌ی کافی به هم نزدیک هستند و جواب‌های یکدیگر را تایید می‌کنند.

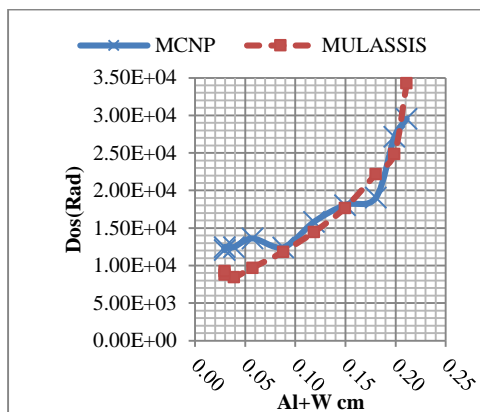


شکل (۶) نمودار مقایسه‌ی مقادیر دز بدست آمده توسط MCNP و MULASSIS برای تنگستن (تک لایه) با توجه به مطالب بالا در حالت تک لایه نتایج MCNP و MULASSIS بر هم منطبق بوده است و جواب‌های هم دیگر را تایید می‌کنند.



شکل (۷) نمودار مقایسه‌ی مقادیر دز بدست آمده توسط MCNP و MULASSIS برای آلومینیوم (تک لایه)

این حفاظ بر روی قطعه‌ی تعریف شده، طوری طراحی شده است که تنگستن در لایه‌ی بیرونی و آلومینیوم در لایه‌ی درونی حفاظ قرار گرفته شده است. نمودار شکل (۸) برای این حفاظ در ضخامت سطح ثابت ۰/۵۷ برای ضخامت‌های مختلف آلومینیوم و تنگستن در ذیل این مطلب آمده است.



شکل (۸) نمودار مقایسه‌ی مقادیر دز بدست آمده توسط MCNP و MULASSIS برای آلومینیوم و تنگستن در ضخامت سطح ۰/۵۷ gr/cm<sup>۲</sup> (دو لایه)

همانطور که می‌بینید در حفاظ دو لایه هم نمودارها به هم نزدیک هستند در نتیجه در مواردی که دقت لازم برای کاری که انجام می‌شود خیلی دقت بالایی نیاز نداشته باشد می‌توان به یکی از جواب‌های بالا برای قطعه‌ی حساس اعتماد نمود.

ضخامت‌هایی که در حالات مختلف برای بدست آوردن دز ۱۰ kRad لازم بود بیشترین آنها برای ماده‌ی سبکی مثل آلومینیوم به ۳mm و برای ماده سنگینی مثل تنگستن کمتر از ۱mm می‌باشد که نشان می‌دهد اثر خود حفاظی ماهواره می‌تواند برای قطعاتی که در درون ماهواره قرار دارند به طور کامل اثرات مخرب الکترون‌های بدام افتاده را از بین ببرد یعنی در درون ماهواره نیازی به این حفاظ نیست چون هرچه به ضخامت حفاظ افزوده می‌شود به سرعت از مقدار دز الکترون کاسته می‌شود ولی این روند برای پروتون و برم‌اشترلانگ با افزایش ضخامت کاهش چشمگیر دز را به همراه نخواهد داشت و تقریباً به یک مقدار ثابت می‌رسد یعنی برای حفاظ در برابر الکترون دیواره‌های ماهواره کفایت می‌کند ولی در همین شکل می‌بینید که برای الکترون در ضخامت‌های پایین میزان دز تخلیه شده در قطعه‌ی مورد نظر مقدار زیادی بیشتر از پروتون و برم‌اشترلانگ می‌باشد پس اگر مجبور به نصب قطعه‌ی مورد نظر در بیرون ماهواره شده باشند مهمترین اثر ناشی از الکترون است و تقریباً بیش از ۱۰۰ برابر پروتون و برم‌اشترلانگ تخلیه‌ی دز خواهد داشت در نتیجه در بیرون ماهواره حفاظ سازی برای الکترون از اهمیت بالایی برخوردار است.

## نتیجه‌گیری

دز تخلیه شده با زیاد شدن ارتفاع افزایش و با کاهش آن کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه مدار حرکت ماهواره تا زاویه ۲۰ درجه، دز کل الکترون و تابش‌های ثانویه افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر در زاویه مدار حرکت ماهواره با کاهش دز مذکور همراه است. کمینه‌ی دز کل الکترون در زاویه ۸۵ درجه و بیشینه‌ی آن در زاویه ۲۰ درجه می‌باشد.

هرچه ضخامت حفاظ بالا می‌رود از میزان دز کل الکترون کاسته می‌شود. هرچه ضخامت سطح کاهش می‌یابد افزایش در دز متقابلاً دیده می‌شود. مواد سنگین هم به لحاظ حجمی و هم به لحاظ وزنی برای یک حفاظ تک لایه مناسب‌تر هستند.

در حالت دو لایه زمانی که ماده‌ی سبک در لایه بیرونی قرار می‌گیرد دز کمتری به حجم حساس می‌رسد. برای حالت سه لایه و حالت دو لایه مقدار و چینشی را که برای حفاظ بهینه می‌توان در نظر گرفت هنگامی است که مقدار ماده‌ی سنگین ما به اندازه‌ی بیشینه‌ی خود برسد یعنی به حالت تک لایه برسد. نتایج بدست آمده توسط MCNP جواب‌های MULASSIS را تأیید می‌کند. با توجه به نتایج موجود در مقالات انتظار می‌رفت که حفاظ دو لایه بازده بهتری نسبت به حالت تک لایه داشته باشد ولی این انتظار در نتایج برآورده نشد. دلیل این عدم توافق، پوشش اولیه قطعه الکترونیکی می‌باشد. در ضمن این نکته را نیز باید مد نظر داشت که پوشش مذکور از جنس مواد سبک است و حتی چینش حاصل شده نیز رعایت نشده است. با توجه به نتایج موجود در مقالات، انتظار می‌رفت که حفاظ سه لایه گزینه مناسب‌تری باشد که با نتایج حاصل شده در این کار در توافق نیست. دلیل این عدم توافق، طراحی قطعه الکترونیکی به همراه پوشش‌های موجود بر روی قطعه‌های الکترونیکی تجاری می‌باشد. این پوشش مانند یکی از لایه‌های حفاظ عمل می‌کند. با در نظر گرفتن این نکته توافق بین نتایج حاصل می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش بیش از سه لایه در حفاظ، دز روند افزایشی می‌یابد که با نتایج موجود در مقالات هم خوانی دارد. برای قطعات درون ماهواره در برابر الکترون‌های بدام افتاده نیازی به حفاظ وجود ندارد.

مراجع:

- [ ۱ ] Denise B. Pelowitz, MCNPX USER'SMANUA. April ۲۰۰۸
- [ ۲ ] www.Spenvis.oma.be
- [ ۳ ] Noordwijk, The Netherlands, Space engineering, European , ۲۰۱۰
- [ ۴ ] R. Mangeret, T. Caribre, J. Beaucour, Effects of Material and/or Structure on Shielding of Electronic Devices, ۱۹۹۷
- [ ۵ ] Zaid T. Al-Khatib, *Total Skin Electron Therapy Using Beam Modifiers*, March ۲۰۰۶
- [ ۶ ] F. Lei, P. R. Truscott, C. S. Dyer, B. Quaghebeur, D. Heynderickx, P. Nieminen, H. Evans, and E. Daly, MULASSIS: A Geant<sup>۴</sup>-Based Multilayered Shielding Simulation Tool