

مقاله علمی - پژوهشی

تحلیل، طراحی و بهینه‌سازی حفاظ تشعشی چندلایه برای قطعات الکترونیکی ماهواره

کاووس قوردویی میلان^۱، علی صدر^۲، سید حسن صدیقی^{۳*} و حمیده دانشور^۴

۱، ۲، ۳- دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۴- معاونت طراحی و تضمین مأموریت سامانه‌های فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

sedighy@iust.ac.ir

در این مقاله، هدف طراحی لایه‌های حفاظت تشعشی برای محیط‌های الکترونی و پروتونی است که برای همه‌ی شرایط فضایی و تمامی مدارها قابل استفاده باشند. بعد از انجام طراحی و انتخاب تعداد لایه‌ها، حفاظ مدنظر با کمک نرم‌افزارهای متلب و MCNPX تحلیل و بهینه‌سازی شده است. بهینه‌سازی، از طریق نرم‌افزار متلب و الگوریتم ژنتیک به‌گونه‌ای انجام شده است که با لینک شدن نرم‌افزار متلب و MCNPX، تمامی حالات ممکن در نظر گرفته شده و بهترین حالت از طریق الگوریتم ژنتیک انتخاب شده است. در حفاظ‌های بهینه طراحی شده، دز کل یونیزاسیون رسیده به قطعه الکترونیکی برای محیط‌های پروتونی و الکترونی به ترتیب ۵۳/۳ و ۷۲ درصد در مقایسه با حفاظ آلومینیومی با ضخامت مشابه کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: تشعشعات فضایی، نرم‌افزار MCNPX، لایه‌های حفاظتی، نرم‌افزار متلب

علائم و اختصارات

Total Ionizing Dose (TID)

دز یونیزاسیون کل

مقدمه

ماهواره‌هایی که در محیط فضایی در مدارهای مختلف مشغول انجام مأموریت هستند در تمام طول عمرشان درگیر تشعشعات فضایی می‌باشند. محیط فضا شامل ذرات باردار و خنثی، پلاسما، میدان‌های الکترومغناطیسی، زباله‌های فضایی و شهاب‌سنگ‌ها است که هر یک ممکن است موجب نقصان جزئی یا کلی مأموریت شده و

آسیب‌های جدی و متنوعی بر روی ماهواره ایجاد کنند. ذرات خورشیدی، الکترون‌ها و پروتون‌های به دام افتاده در کمربند ون‌آلن و پرتوهای کیهانی کهکشانی، منبع اصلی تشعشعات فضایی هستند [۱ و ۲]. اثر این ذرات به‌صورت دز یونیزاسیون کل، آسیب جابه‌جایی و اثرات تک رخدادی مشاهده شده و موجب تخریب قطعات الکترونیکی ماهواره می‌شوند [۳ و ۴]. دز یونیزاسیون کل، عمدتاً به واسطه الکترون‌ها و پروتون‌ها ایجاد شده و موجب تخریب‌های عمیقی در قطعات الکترونیکی ماهواره می‌شود. این اثرات به‌صورت انرژی در قطعات الکترونیکی انباشته شده و به مرور زمان تأثیرات منفی زیادی بر روی قطعات می‌گذارد. یکی از عوامل مهم دیگر، اثرات تک رخدادی است. از آنجاکه ذرات پرانرژی از قبیل یون‌های سنگین و پروتون‌ها می‌توانند انرژی‌های بسیار بالایی در محدوده‌ی ۱۰۰ MeV تا ۱۰۰۰ MeV داشته باشند، به‌راحتی به داخل ماهواره نفوذ کرده و موجب اختلال در عملکرد ماهواره یا برهم‌زدن کل مأموریت آن می‌شوند. تخریب‌های عملکردی و

۱. کارشناس ارشد

۲. دانشیار

۳. دانشیار (نویسنده مخاطب)

۴. دانشجوی دکتری

درصد در مقایسه با حفاظ آلومینیومی کاهش یافته است. در نتیجه می-توان از این حفاظ‌های پیشنهادی برای مقابله با تشعشعات فضایی در قطعات الکترونیکی حساس ماهواره استفاده کرد.

طراحی ساختار چندلایه

مواد مورد استفاده در طراحی ساختار حفاظ چندلایه باید توانایی مقابله با تشعشعات فضایی را داشته باشند و کاملاً ایمن و قابل اطمینان باشند، به این معنی که تشعشع رادیواکتیو نداشته باشند. این مواد باید سبک و محکم بوده و از نظر ویژگی‌های مکانیکی، استاتیکی و حرارتی هم مناسب باشند. براساس استانداردهای فضایی این مواد باید بعد از طراحی و قبل از استفاده مورد آزمون‌های مختلف مکانیکی و استاتیکی و حرارتی قرار بگیرد تا در هنگام استفاده در محیط فضایی دچار مشکل نشود [۸ و ۹].

به عبارت دیگر همه‌ی مواد قابلیت استفاده در حفاظ‌های تشعشعی را ندارند. بعضی از مواد رایجی که در مقالات و کتاب‌های علمی مورد تأیید قرار گرفته‌اند و قابلیت استفاده در طراحی حفاظ تشعشعی را دارند در جدول (۱) ارائه شده است [۹ و ۱۰]. این جدول شامل ۸ ماده‌ی خالص می‌باشد که برای طراحی حفاظ بسیار رایج هستند. در طراحی‌های انجام شده در این مقاله از بین مواد موجود در طبیعت، این ۸ ماده به عنوان مواد مناسب در فرآیند طراحی و بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. ضخامت این مواد نیز عامل مهم دیگری است که در حین بهینه‌سازی باید تعیین گردد.

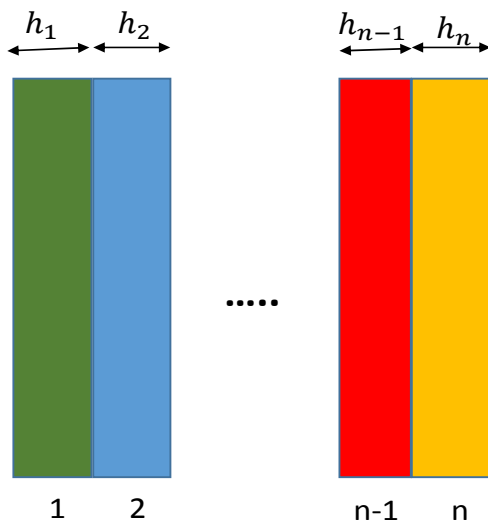
جدول ۱- مواد رایج مورد استفاده برای طراحی حفاظ‌های تشعشعی

شماره	ماده	چگالی (g/cm^3)
۱	تانتالیم	۱۶/۶۹
۲	تنگستن	۱۹/۲۵
۳	سرب	۱۱/۳۴
۴	آلومینیوم	۲/۷
۵	نقره	۱۰/۴۹
۶	طلا	۱۹/۳۰
۷	مس	۸/۹۴
۸	تیتانیوم	۴/۵

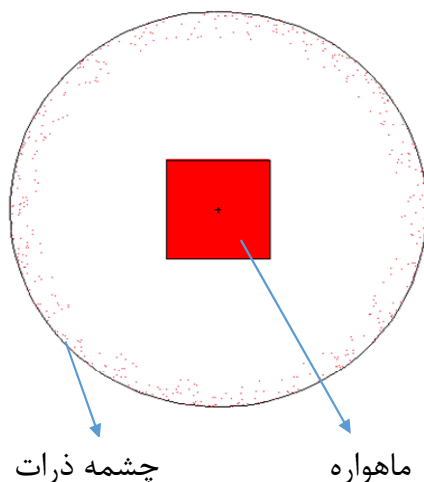
از مواد موجود در جدول (۱) برای طراحی ساختارهای چندلایه‌ی حفاظتی استفاده خواهد شد که جنس لایه‌ها متناسب با شرایط بهینه‌سازی هر یک از مواد موجود در جدول می‌تواند باشد. طرح کلی ساختار چندلایه‌ی مدنظر در شکل (۱) ارائه شده است.

ناهنجاری‌های متعدد ماهواره، عمدتاً به دلیل تشعشع و باردار شدن ماهواره است که موجب نقصان در قطعات الکترونیکی ماهواره می‌گردد. الکترون‌ها در محیط فضا ممکن است به داخل دیواره‌های ماهواره نفوذ کرده و بنابراین بار الکتریکی منفی در داخل دی‌الکتریک یا فلزات موجود در ماهواره به‌جای گذاشته خواهد شد. زمانی که میدان الکتریکی ناشی از تجمع الکترون‌ها، بزرگ‌تر از آستانه تحمل دی‌الکتریک شود، تخلیه‌ی الکترواستاتیکی اتفاق می‌افتد. تشعشعات فضایی سبب اختلال مولکولی و تغییر خواص الکترومغناطیسی مواد مورد استفاده در ماهواره‌ها نیز می‌شوند. همچنین اثر تشعشعات می‌تواند موجب تخریب و آسیب به تجهیزات الکتریکی شده و موجب صدور دستورات نادرست و برهم خورد تعادل جریان الکتریکی می‌شود که همگی این عوامل دست‌به‌دست هم داده و می‌تواند خطر بزرگی برای مأموریت ماهواره ایجاد کند. به‌همین جهت، راهکار کاهش اثرات تشعشع بر روی قطعات الکترونیکی حساس ماهواره، نقش کلیدی در طراحی ماهواره خواهد داشت [۵]. از سوی دیگر با طراحی حفاظ‌های مناسب، امکان به‌کارگیری قطعات غیرفضایی در مأموریت‌های ماهواره با هزینه کمتر نیز فراهم می‌شود. به‌کارگیری حفاظ‌های تشعشعی برای مقاوم‌سازی ماهواره‌ها در برابر تشعشعات فضایی نیز در مراجع مخفف مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند [۶ و ۷].

در این مقاله، ساختارهای حفاظ چندلایه برای محیط‌های الکترونی و پروتونی طراحی شده و به کمک الگوریتم ژنتیک انواع مختلفی از آن بهینه‌سازی شده است. این ساختارها قادر به دفع بخش بزرگی از دز یونیزاسیون کل رسیده به قطعات حساس الکترونیکی ماهواره بوده و می‌توانند خطرات ناشی از محیط کیهانی را به حداقل برسانند. در واقع برای محافظت از قطعات و مدارهای مجتمع الکترونیکی حساس ماهواره می‌توان از حفاظ‌های ارائه شده در محل قطعه و یا به عنوان باکس استفاده کرد. ساخت این حفاظ‌ها با استفاده از روش‌هایی مانند پاشش فلز^۵ با هزینه مناسب در داخل کشور به سادگی ممکن است. حفاظ‌های طراحی شده برای دو محیط الکترونی و پروتونی به صورت کلی و مستقل از مأموریت ماهواره تعریف شده است. پس از مشخص شدن مأموریت ماهواره و شرایط محیطی مرتبط با مدار آن، و نیز آستانه تحمل قطعات مورد استفاده در بردهای الکترونیکی می‌توان ضخامت و تعداد لایه مناسب حفاظ را براساس روش طراحی ارائه شده استخراج کرد. در حفاظ‌های بهینه طراحی شده به عنوان نمونه، دز کل یونیزاسیون رسیده به قطعه الکترونیکی برای محیط‌های پروتونی و الکترونی به ترتیب ۵۳/۳ و ۷۲



شکل ۱- طرح کلی حفاظ چندلایه‌ی تشعشی



شکل ۲- ساختار کلی چشمه‌ی ذرات و ماهواره در نرم‌افزار MCNPX

در رابطه ۱ تابع ارزش برای انجام عمل بهینه سازی به صورت مجموع دز یونیزاسیون کل (TID) و ذرات ثانویه (SP) تعریف شده است که با وزن دهی مناسب با هم جمع شده‌اند. این ضرایب وزن دهی به صورت میزان اهمیت اثر ذرات ثانویه و ذر یونیزاسیون کل را در انجام بهینه‌سازی تنظیم می‌کنند. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده مقدار این ضرایب $\alpha = 2\beta$ انتخاب شده است.

$$\text{Cost} = \alpha \times \text{TID} + \beta \times \text{SP} \quad (1)$$

خروجی این بهینه‌سازی ضخامت هر لایه و جنس آن می‌باشد. فلوجارت نحوه‌ی اجرای فرآیند طراحی به کمک الگوریتم ژنتیک در شکل (۳) آمده است.

برای بررسی و مقایسه‌ی طراحی‌های حفاظتی مختلف نیاز به یک نرم‌افزار ترابرد ذرات که قادر به محاسبه‌ی دز یونیزاسیون کل و تشعشعات ثانویه باشد داریم. برای این منظور از MCNPX استفاده شده است.

ماهواره‌هایی که در مدارهای مختلف حول کره‌ی زمین در حال انجام مأموریت هستند بسته به شرایط کیهانی و مأموریت خاصی که انجام می‌دهند دارای طرح کلی و هندسه‌ی منحصر به فردی هستند. ابعاد ماهواره‌ها با توجه به پارامترهایی از قبیل توانایی انجام مأموریت، قابلیت‌ها، انرژی مورد نیاز ماهواره، کارکرد ماهواره و عواملی از قبیل طول عمر و مأموریت خاصی که انجام می‌دهند متفاوت است. اما اغلب ماهواره‌هایی که در مدارهای کیهانی در حال انجام مأموریت هستند دارای طراحی مکعبی با اندازه‌های متفاوت‌اند. ابعاد ماهواره‌ها از نانو ماهواره‌ها تا ماهواره‌های غول‌پیکر دارای طیف ابعادی گسترده‌ای هستند. جهت بررسی و طراحی حفاظ مدنظر یک ماهواره‌ی مکعبی با ابعاد ۱ متر مناسب‌ترین و بهترین انتخاب می‌تواند باشد، چرا که یک ابعاد میانی در بین ابعاد رایج برای انواع ماهواره‌ها می‌باشد. علاوه بر ابعاد ماهواره، تعیین عواملی از قبیل شرایط فضایی بسیار مهم هستند.

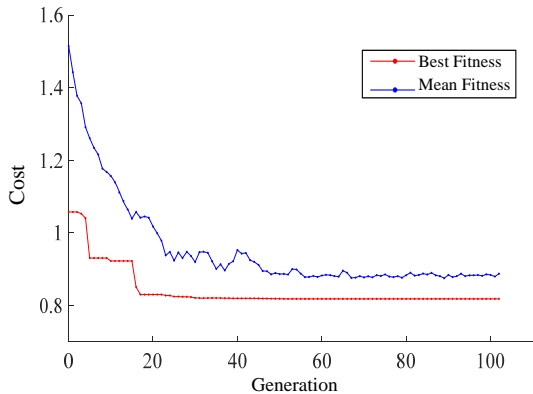
طراحی‌های حفاظتی انجام شده در این مقاله برای محیط‌های پروتونی و الکترونی می‌باشد برای این منظور چشمه به صورت تک ذره در نظر گرفته شده است که به صورت کروی در اطراف ماهواره قرار گرفته است (شکل ۲) ساختار کلی چشمه‌ی ذرات و ماهواره را در نرم‌افزار MCNPX نشان می‌دهد.

بعد از طراحی ساختار مدنظر در نرم‌افزار MCNPX با استفاده از دستورات نرم‌افزار، از طریق الگوریتم ژنتیک موجود در نرم‌افزار متلب، ساختار چند لایه ارائه شده در شکل (۱) برای رسیدن به بیشترین میزان حفاظت، بهینه‌سازی می‌گردد. به این منظور از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. خروجی این فرآیند بهینه‌سازی، جنس و ضخامت لایه‌های حفاظ تشعشی می‌باشند. در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، ابتدا یک جمعیت اولیه توسط نرم‌افزار ارائه می‌شود. این جمعیت اولیه شامل چندین ساختار چندلایه با ضخامت‌های مختلف و جنس‌های قابل استفاده براساس جدول (۱) است. به منظور ارزیابی این ساختارها، نرم‌افزار MCNPX به صورت خودکار در متلب فراخوان شده و نتایج تحلیل به آن برگردانده می‌شود. سپس تابع هزینه محاسبه می‌شود. در صورت برقراری شرط همگرایی الگوریتم ژنتیک ساختار بهینه بدست می‌آید و در غیر این صورت فرآیند تا رسیدن به همگرایی تکرار خواهد شد.

بهینه‌ای رسیده‌اند. تابع ارزش برای این بهینه‌سازی‌ها طبق فرمول ۱ تعریف می‌گردد. نتایج حاصل از این بهینه‌سازی‌ها در جدول (۲) برای هر ۳ نوع حفاظ بهینه‌شده قابل مشاهده‌اند. روند همگرایی الگوریتم ژنتیک نیز برای حفاظ ۳ لایه‌ای در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تابع هزینه (Cost) روند همگرایی را به خوبی نشان می‌دهد. شایان ذکر است که مقدار مطلق تابع هزینه مهم نبوده و عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی براساس مقادیر نسبی تابع ارزش می‌باشد.

جدول ۲- نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک برای حفاظ‌های ۳، ۵ و ۷ لایه در محیط الکترونی

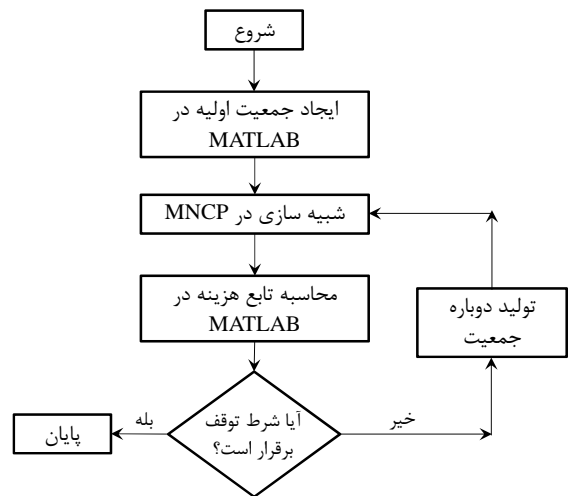
تعداد لایه‌ها		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۳	جنس	طلا	تنگستن	آلمینیوم				
	ضخامت	۰/۳۴۵	۰/۳۳۸	۰/۳۰۰				
۵	جنس	طلا	طلا	تنگستن	تیتانیوم	تیتانیوم		
	ضخامت	۰/۲۰۵	۰/۸۵۱	۰/۷۲۹	۰/۱۹۰	۰/۱۰		
۷	جنس	تنگستن	تانتالیم	طلا	تانتالیم	تنگستن	تیتانیوم	آلمینیوم
	ضخامت	۰/۳۵۰	۰/۱۹۳	۰/۴۷۸	۰/۴۷۴	۰/۲۷۰	۰/۱۷۹	۰/۰۲۹



شکل ۴- نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای حفاظ تشعشی ۳ لایه‌ای در محیط‌های الکترونی

در این جدول، برای هر ۳ حالت مواد متفاوت انتخاب شده‌اند. شیوه‌ی انتخاب مواد به‌گونه‌ای است که ترکیبی از مواد با چگالی بالا و پایین می‌باشد. همان‌گونه که از نتایج حاصل می‌شود بهترین حالت برای طراحی حفاظ استفاده از سیستم چندلایه‌ای با مواد چگالی بالا و پایین می‌باشد که در این حالت جلوی نفوذ ذرات یونیزاسیون کل و تشعشعات ثانویه به بهترین شکل ممکن گرفته می‌شود.

کارایی این ۳ حفاظ بهینه‌شده در جدول (۳) برای مقایسه در کنار آلومینیم به عنوان ماده متداول مورد استفاده در حفاظ‌ها و



شکل ۳- فلوچارت اجرای الگوریتم ژنتیک

برای اجرای الگوریتم ژنتیک از نواریزهای نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در این نرم‌افزار، به ازای هر لایه دو متغیر انتخاب می‌شود، یک متغیر برای ضخامت و دیگری برای جنس لایه. ضخامت لایه‌ها به صورت تصادفی یک عدد بین ۰/۱ mm تا ۲mm انتخاب می‌شود به نحوی که مجموع ضخامت‌های لایه‌ها کمتر از ضخامت کلی تعیین شده (۲ mm) باشد. جنس لایه نیز براساس عدد تصادفی انتخاب شده بین ۱ تا ۸ یکی از موارد جدول (۱) انتخاب می‌شود.

ساختارهای چندلایه برای محیط‌های الکترونی

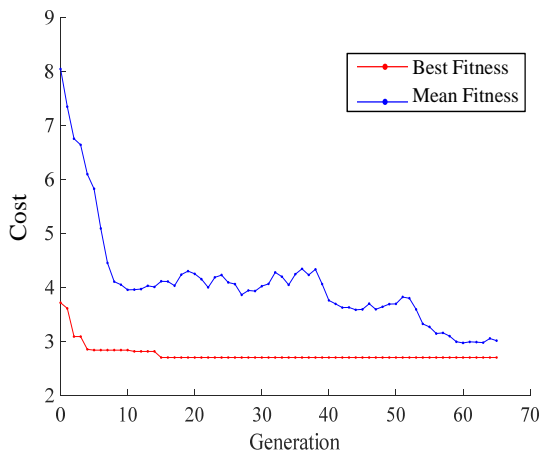
در این قسمت، به تحلیل و بهینه‌سازی حفاظ تشعشی بهینه شده برای محیط‌های الکترونی پرداخته شده است. این بهینه‌سازی‌ها برای ۳ نوع حفاظ ۳، ۵ و ۷ لایه‌ای انجام شده است. ضخامت این ساختارهای چند لایه مجموعاً ۲mm در نظر گرفته شده است. حفاظ‌های طراحی شده با در نظر گرفتن بدترین شرایط فضایی بهینه‌سازی شده‌اند که برای محیط‌های الکترونی، این شرایط شامل الکترون‌هایی با طیف انرژی در محدوده‌ی بین ۱ تا ۲۵ مگا الکترون‌ولت می‌باشد [۱۱ و ۱۲]. منبع تک‌ذره‌ای در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی الکترون‌ها را به سمت ماهواره می‌تاباند و این الکترون‌ها با عبور از میان حفاظ، تولید ذرات ثانویه کرده و همچنین موجب ایجاد دز یونیزاسیون کل بر روی ماهواره می‌گردد که ذرات ثانویه و دز یونیزاسیون کل، تأثیرات نامطلوبی بر روی عملکرد ماهواره دارند. برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از این دو عامل باید حفاظ را به‌گونه‌ای بهینه کرد که مجموع این دو تا حد امکان حداقل باشد. این بهینه‌سازی‌ها، از نقطه‌نظر دز یونیزاسیون کل، ذرات ثانویه و تعداد لایه‌ها انجام شده‌اند؛ که در نهایت به حالات

روند همگرایی الگوریتم ژنتیک نیز در شکل (۵) مشاهده می شود که نحوه ی همگرایی این الگوریتم را برای حفاظ ۳ لایه ای نشان داده است.

جدول ۴- تابع حاصل از الگوریتم ژنتیک برای حفاظ های ۳، ۵ و ۷ لایه در محیط پروتونی

تعداد لایه ها		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۳	جنس	تنگستن	سرب	تانتالیم				
	ضخامت	۰/۷۰۵	۰/۵۸۹	۰/۷۰۳				
۵	جنس	طلا	تانتالیم	طلا	مس	مس		
	ضخامت	۰/۴۷۸	۰/۵۰۹	۰/۲۱۱	۰/۳۰۲	۰/۵۰۰		
۷	جنس	تانتالیم	تنگستن	تانتالیم	تانتالیم	تنگستن	تنگستن	سرب
	ضخامت	۰/۴۰۰	۰/۳۵۲	۰/۰۹۱۰	۰/۳۹۳	۰/۲۹۹	۰/۳۵۰	۰/۱۰۸

در جدول (۵) مشخصات عملکردی حفاظ های چندلایه ی بهینه شده همراه با حفاظ آلومینیوم برای مقایسه آورده شده است. دز یونیزاسیون کل در حفاظ های ۵ و ۷ لایه نسبت به حفاظ ۳ لایه ای تفاوت چندانی نداشته است اگر چه در حفاظ ۷ لایه ای اندکی بهتر شده است.



شکل ۵- نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای حفاظ تشعشی ۳ لایه ای در محیط های پروتونی

تولید ذرات ثانویه هم در هر ۳ نوع حفاظ به دلیل اینکه پروتون ها در حالت کلی ذرات ثانویه ی کمتری تولید می کنند به مقدار کمی در مقایسه با یک لایه آلومینیم میل کرده است که برای هر ۳ نوع حفاظ این مقادیر قابل قبول است. پس در حالت کلی به دلیل افزایش هزینه ی ساخت با افزایش تعداد لایه های مورد استفاده بهترین حالت، استفاده از حفاظ ۳ لایه ای است که هزینه ی ساخت کمتری در مقایسه با حفاظ های ۵ و ۷ لایه ای دارد.

سازه های فضایی آورده شده است. با توجه به جدول مشاهده می شود که دز یونیزاسیون کل، در هر ۳ حالت نسبت به آلومینیم حدود ۲/۵ برابر کمتر شده است. اگرچه این سه حالت تفاوت چندانی با هم ندارند. در حالت ۷ لایه ای، با وجود اینکه دز اندکی بهتر شده است ولی به دلیل هزینه ی بالای ساخت طراحی ۷ لایه، استفاده از حفاظ ۳ لایه انتخاب مناسب تری است. پس از ادامه ی بهینه سازی برای تعداد لایه های بیشتر صرف نظر و حفاظ ۳ لایه ای به عنوان بهترین حفاظ انتخاب می شود. شایان ذکر است که برای مقایسه در شرایط یکسان، مجموع ضخامت این سه حفاظ و آلومینیم یکسان و برابر با ۲mm در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- مشخصات نوعی حفاظ های تشعشی چندلایه و حفاظ آلومینیومی

نوع حفاظ	دز یونیزاسیون کل		ذرات ثانویه	ضخامت کل (mm)
	مقدار	درصد		
۳ لایه	$۰/۵۱۳۰ \times ۱۰^{-۶}$	۳۲	$۰/۶۱۲۹ \times ۱۰^{-۵}$	۱/۹۸۳
۵ لایه	$۰/۵۹۸۵ \times ۱۰^{-۶}$	۲۸	$۰/۴۰۷۱ \times ۱۰^{-۵}$	۱/۹۸۵
۷ لایه	$۰/۴۵۲۴ \times ۱۰^{-۶}$	۲۸	$۰/۴۷۲۱ \times ۱۰^{-۵}$	۱/۹۷۳
آلومینیوم	$۱/۵۷۱۳ \times ۱۰^{-۶}$	۱	$۰/۴۰۱۳ \times ۱۰^{-۵}$	۲

ساختارهای چندلایه برای محیط های پروتونی

در این قسمت، به بهینه سازی و تحلیل حفاظ تشعشی برای محیط های پروتونی پرداخته شده است، حفاظ های طراحی شده، با در نظر گرفتن بدترین شرایط فضایی بهینه سازی شده اند که قادر به استفاده در هر محیطی باشند. برای این منظور، انرژی پروتون ها در محدوده ی بین ۱ تا ۱۰۰ مگا الکترون ولت در نظر گرفته شده است [۱۳] که از طریق یک منبع تک ذره ای، به سمت ماهواره می تابد. این پروتون ها با عبور از میان مواد حفاظ، تولید ذرات ثانویه کرده و این ذرات به همراه دز یونیزاسیون ناشی از پروتون ها، تأثیرات نامطلوبی بر روی ماهواره می گذارند. هر چه این دو عامل کمتر باشند، حفاظ بهتری خواهیم داشت و آسیب کمتری به ماهواره وارد می گردد. در این قسمت، برای تهیه ی یک ساختار حفاظتی مناسب برای محیط های پروتونی، بهینه سازی انجام شده است که این بهینه سازی از نقطه نظر دز یونیزاسیون، ذرات ثانویه و تعداد لایه ها انجام شده است. تابع ارزش برای این بهینه سازی ها طبق فرمول ۱ تعریف می گردد.

نتایج حاصل از بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک برای حفاظ های ۳، ۵ و ۷ لایه ای در جدول (۴) نشان داده شده است که مشخصات نوعی این حفاظ ها از قبیل ضخامت و جنس لایه ها بهینه شده است.

مراجع

- [1] Secretariat, E. C. S. S., *Space environment. ECSS-E-10-04A*, ESA Publications Division, 2000
- [2] Barth, J. L., Dyer, C. S., & Stassinopoulos, E. G., "Space, Atmospheric, and terrestrial radiation environments," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 50, no. 3, 2003, pp. 466-482.
- [3] Claflin, E.S. and R. S. White. "A study of equatorial inner belt protons from 2 to 200 MeV." *Journal of Geophysical Research*, vol. 79, no. 7, 1974, pp. 959-965.
- [4] Benton, E.R. and Benton, E.V., "Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 184, no. (1-2), 2001, pp.255-294.
- [5] Velazco, R., P. Fouillat and R. Ricardo, *Radiation effects on embedded systems*, Springer Science & Business Media", 2007.
- [6] Cucinotta, F.A., M.H.Y. Kim and L.J. Chappell, "Evaluating shielding approaches to reduce space radiation cancer risks," NASA Technical Memorandum, 2012, pp. 217361.
- [7] Schiavone, C.C., "Polymeric Radiation Shielding for Applications in Space: Polyimide Synthesis and Modeling of Multi-Layered Polymeric Shields" (Thesis), William and Mary, Chapter 1693, 2013.
- [8] Assurance, Space Product. "Radiation Hardness Assurance-IEEE Components. ECSS-Q-ST-60-15C, 2011.
- [9] Uzel, R. and A. Özyildirim. "A study on the local shielding protection of electronic components in space radiation environment." *8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, IEEE 2017, pp. 295-299.
- [10] Mayanbari, M. and Y. Kasesaz, "Design and analyse space radiation shielding for a nanosatellite in Low Earth Orbit (LEO)." *In Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies-RAST2011*, IEEE, 2011, pp. 489-493.
- [11] Wall, J. and A. Macdonald. "The NASA ASIC Guide: Assuring ASICS for Space, published by Jet Propulsion Laboratory." California Institute of Technology and NASA, 1993.
- [12] Maria Martinez S.L.. "Analysis of LEO Radiation Environment and its Effects on Spacecraft's Critical Electronic Devices," Thesis, Master of Science In Engineering Physics, Embry-Riddle Aeronautical University Daytona Beach, Florida. 2011.
- [13] Battiston, R., W. J. Burger, V. Calvelli and et al. A. Della Torre "Active Radiation Shield for Space Exploration Missions (ARSSEM)." arXiv preprint arXiv:1209.1907, 2012.

با مقایسه‌ی دز یونیزاسیون کل در حفاظ ۳ لایه‌ای و حفاظ آلومینیومی مشخص است که حفاظ ۳ لایه‌ای دز یونیزاسیون کل را تا مرز ۵۰ درصد بهینه کرده که قابل توجه می‌باشد ضخامت هر دو حفاظ تقریباً ۲ میلی‌متر می‌باشد و ذرات ثانویه هم در حالت ۳ لایه‌ای کمتر از حفاظ آلومینیومی تولید شده‌اند. پس در حالت کلی حفاظ ۳ لایه‌ای عملکرد بسیار بهتری از حفاظ آلومینیومی رایج ۲ میلی‌متری دارد.

جدول ۵- مشخصات نوعی حفاظ‌های تشعشی چندلایه و حفاظ آلومینیومی

نوع حفاظ	دز یونیزاسیون کل		ضخامت کل (mm)	ذرات ثانویه
	درصد	مقدار		
۳ لایه	۵۰	$2/6926 \times 10^{-6}$	۱/۹۹۷	0.196×10^{-7}
۵ لایه	۵۰	$2/7066 \times 10^{-6}$	۲	0.356×10^{-8}
۷ لایه	۴۶/۷	$2/4867 \times 10^{-6}$	۱/۹۹۳	0.116×10^{-5}
آلومینیوم	۱	$5/3142 \times 10^{-6}$	۲	0.458×10^{-5}

نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی، بهینه‌سازی و تحلیل انواع مختلف حفاظ‌های چندلایه‌ای در شرایط فضایی، برای محیط‌های الکترونی و پروتونی انجام شد و حفاظ‌های تشعشی مناسبی طراحی شدند که این حفاظ‌ها، در برابر تأثیرات نامطلوب تشعشعات فضایی مقاومت مناسبی دارند. این حفاظ‌ها عمدتاً برای حفاظ‌های محلی مناسب‌اند. این حفاظ‌های طراحی شده، در همه‌ی شرایط فضایی در انرژی‌های مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفتند و با حفاظ‌های رایج ۲ میلی‌متری آلومینیومی مقایسه شدند که برتری کامل حفاظ‌های طراحی شده نمایان شد به گونه‌ای که حفاظ طراحی شده برای الکترون، تا نزدیک ۷۰ درصد دز یونیزاسیون کل را بهبود می‌بخشد و حفاظ طراحی شده برای پروتون نیز، تا نزدیک ۵۰ درصد موجب بهبود دز یونیزاسیون کل می‌گردد، همه‌ی حفاظ‌های طراحی شده، قابلیت مناسبی در کاهش اثرات تشعشعات ثانویه هم دارند. بهینه‌سازی‌های انجام شده برای ۳، ۵ و ۷ لایه انجام شدند و نتایج حاصله بسیار به هم نزدیک بودند و حفاظ ۳ لایه به دلیل تنوع و تعداد لایه‌ی کمتر و هزینه‌ی ساخت کمتر، برتری‌هایی نسبت به حفاظ‌های با لایه‌های بیشتر دارد و قادر به تأمین نیازهای تشعشی ماهواره است.