



Experimental Study of the Effect of using Space Sandwich Structures for Protection Against Space Radiation

Majid Mokhtari^{1,3*}, Hamideh Daneshvar², Morteza Bahmani Nezhad³, Shahryar Maleki⁴, Armin Mosayebi⁵, Amir Torabpoor Esfahani⁶, and Iman Aryanian⁷

1. Instructor, Automotive Mechanics, Department, Shahid Babaei Faculty, Technical and Vocational University of Qazvin Province, Qazvin, Iran

2. Assistant Professoer, Faculty Member of Radiation processing and Dosimetry Research Group, Radiation Application Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

3. M.Sc.,Department of Structures and Vibrations, Department of Composites and Advanced Materials, Shahid Qandi Research Center, Tehran, Iran

4. Assistant Professoer, Faculty Member of Radiation processing and Dosimetry Research Group, Radiation Application Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

5. Assistant Professoer, Faculty Member of Radiation processing and Dosimetry Research Group, Radiation Application Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

6. PhD, Materials and Energy Research Institute, Iran Space Research Institute, Esfahan, Iran

7. Assistant Professor, Department of Satellite Communication, Iran Telecommunication Research Center (ITRC), Research Institute of Communication andInformation Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author E-Mail: m_mokhtari@tvu.ac.ir

Sandwich panels are used in various industries due to their high special strength. It is used in ultra-light aerospace structures. In this paper the protective effect of sandwich structures used in ultralight space structures against gamma rays is investigated. Eight structures of the most widely used structures used in space structures such as telecommunication antennas and satellite bodies are exposed to radioisotopic sources of gamma rays (Americium barium and cesium) with energies of 60 kV, 80 kV, 382 and 66 kV, have been compared to each other. Surface material (aluminum and carbon), surface thicknesses and honeycomb cell dimensions are the most important evaluation parameters. In this paper, different structures have been compared using the "special protection" parameter and the best structure from a protection perspective has been identified and reported.

Keywords: Sandwich panels, Space structures, Radiation protection, Carbon fibercomposites



بررسی تجربی تأثیر استفاده از چند سازه فضایی ساندوبیچی برای حفاظت در برابر تشعشعات فضایی

مجید مختاری^{*}^۱^۳، حمیده دانشور^۲، مرتضی بهمنی نژاد^۳، شهریار ملکی^۴، آرمین مسیبی^۵،
امیر تراب پور اصفهانی^۶ و ایمان آریانیان^۷

- ۱- دپارتمان مکانیک خودرو، دانشکده شهید بابایی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان قزوین، قزوین، ایران
- ۲، ۴ و ۵- گروه پژوهشی پرتوفارمتری و دزیمتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران
- ۳- دپارتمان سازه و ارتعاشات، گروه کامپوزیت و مواد پیشرفته، مرکز تحقیقاتی شهید قندی، تهران، ایران
- ۶- پژوهشکده مواد و انواع، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان، ایران
- ۷- گروه ارتباطات ماهواره‌ای، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

*m_mokhtari@tvu.ac.ir

ساندوبیچ پل‌ها به علت استحکام ویژه بالا در صنایع مختلفی کاربرد دارند. از آن جمله استفاده در سازه‌های فوق سبک هوافضایی است. یکی از مخاطرات اصلی در فضا که مأموریت پرتاب را با خطر مواجه می‌کند، تشعشعات فضایی هستند. حفاظت از تجهیزات در برابر این تشعشعات مضر اهمیت بالایی دارد. در این مقاله به بررسی تجربی تأثیر حفاظتی ساختارهای ساندوبیچی مورد استفاده در سازه‌های فضایی فوق سبک در برابر پرتوهای گاما پرداخته شده است. هشت ساختار از پرکاربردترین سازه‌هایی که در ساختارهای فضایی مانند آتنن‌های مخابراتی و بدن‌های ماهواره‌ها استفاده می‌شود، در معرض تشعشع چشم‌های رادیوایزوتوپی پرتوهای گاما (امرسیوم، باریم و سریوم) با انرژی‌های ۱۰ keV ، ۳۸۵ keV و ۶۶۲ keV قرار داده شده و نتایج آن با هم مقایسه شده است. جنس رویه (آلومینیومی و کربنی)، ضخامت‌های رویه‌ها و ابعاد سلول لانه زنبوری از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی هستند. میزان حفاظت بوجود آمده در هر یک از این ساختارها و استنده به ضخامت، جنس و مشخصات هندسی اجزای مختلف است. در این مقاله با استفاده از پارامتر «حفاظت ویژه» ساختارهای مختلف تست شده مقایسه شده‌اند و بهترین ساختار از دیدگاه حفاظتی شناسایی و گزارش شده است. با توجه به بومی بودن (طراحی، ساخت و تست) ساندوبیچ پل‌های این تحقیق و همچنین دسترسی به مواد اولیه آن‌ها در کشور، نتایج بدست آمده از این بررسی قابل استفاده برای طراحی سازه‌های فضایی و غیرفضایی است.

واژه‌های کلیدی: ساندوبیچپل، سازه‌های فضایی، حفاظت در برابر تشعشع، کامپوزیت‌های الیاف کربن

علامه و اختصارات

مقدمه

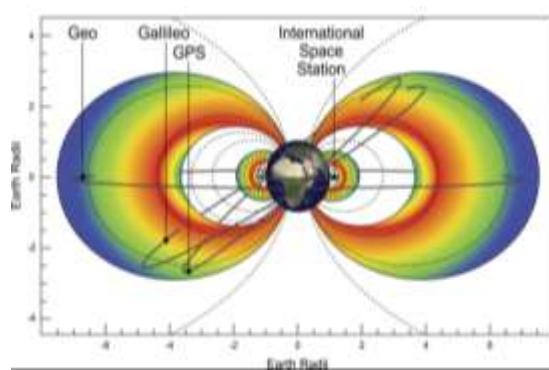
تشعشعات فضایی یکی از مسائل بسیار مهم در طراحی سامانه‌های فضایی می‌باشد. در حین مأموریت تجهیزات استفاده شده در سامانه‌های فضایی تحت تأثیر انواع ذرات تابشی قرار می‌گیرند و

I	شدت پرتوها پس از عبور از حفاظ
I_0	شدت پرتوهای اولیه
X	ضخامت حفاظ
μ	ضریب تضعیف تشعشعی

۵. استادیار
۶. دکتری
۷. استادیار

۱. مری (نویسنده مخاطب)
۲. استادیار
۳. کارشناس ارشد
۴. استادیار

این کمرندهای مغناطیسی متحدم‌المرکز بوده و به شکل دونات می‌باشند (شکل ۱). کمرندهای داخلی در محدوده بین ۱۲۰۰ km تا ۶۰۰۰ km قرار دارد. محدوده کمرندهای خارجی از ۲۵۰۰ km تا ۴۵۰۰ km است. این دو ناحیه با یک شکاف از هم جدا می‌شوند. در سال ۲۰۱۳، ناسا از وجود کمرندهای دیگری در بین این دو کمرندهای خبر داد. ابعاد این کمرندها با توجه به شرایط ژئومغناطیسی زمین در حال تغییر است [۴]. انواع مختلفی از مدارهای ماهواره‌ای شامل LEO، MEO و GEO در این کمرندها قرار می‌گیرد [۵، ۶].



شکل ۱ • موقعیت کمرندهای داخلی و خارجی ون آن و مدارهای ماهواره‌ای [۵]

در صنایع فضایی، ادوات و تجهیزات الکترونیکی در سیستم‌ها و زیرسیستم‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در برخی موارد این تجهیزات بسیار حساس هستند و توقف یا خطا در آن‌ها تأثیر حیاتی دارد. یکی از مسائل عمده، خطاهای ناشی از تشعشعات هسته‌ای و محیطی است که ممکن است در عملکرد عادی ادوات مشکل ایجاد نماید. این موضوع مبحث قابلیت اطمینان در تجهیزات دیجیتال را نیز مطرح می‌کند. آسیب‌های ناشی از اندرکنش ذرات با ماده به سه دسته زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۷]:

- آسیب دز یونیزان کل^{۱۴}
- آسیب جابه‌جا^{۱۵}
- آسیب اثرات تک رخدادی^{۱۶}

جهت انجام موفق مأموریت‌های فضایی باید در طراحی سامانه‌های فضایی راهکارهای مقابله با این ذرات مدنظر قرار گیرد. یکی از راهکارهای بسیار مؤثر، استفاده از حفاظ^{۱۷} است. طراحی حفاظ باید به گونه‌ای باشد که زیرسیستم‌های هر سامانه فضایی بتوانند در کل بازه زمانی مأموریت عملکرد صحیح خود را ادامه دهد [۸]. محافظت از تجهیزات داخلی به خصوص ادوات الکترونیکی ماهواره با

بنابراین می‌توانند دچار آسیب شوند. حوزه بررسی تشعشعات فضایی در سه مقوله شناسایی، سنجش و آشکارسازی تشعشعات فضایی، اثربخشی تشعشعات فضایی و حفاظت در برابر تشعشعات فضایی قرار می‌گیرد [۱]. سازه‌های فضایی به عنوان جبهه مواجهه با تشعشعات فضایی هستند. مهم‌ترین مأموریتی که برای سازه‌های فضایی تعریف می‌شود، حفظ استحکام و یکپارچگی در حین اعمال بارهای ناشی از پرتاب و همچنین ایجاد فضای مناسب برای جانشانی بهینه تجهیزات است. از منظر تشعشعی سازه‌های فضایی به عنوان اولین حفاظ در برابر پرتوهای کیهانی هستند. بیشترین اهمیت بررسی اثرات تشعشعات فضایی از دیدگاه قابلیت اطمینان است. قابلیت اطمینان مورد نیاز برای کاربردهای فضایی موجب می‌شود که فرآیند تضمین تشعشعی^۸ یک فرآیند کلیدی در دست‌یابی به موقیتی ماهواره باشد [۲]. فرآیند RHA از دیدگاه طراحی بر اساس استاندارد فضایی ECSS^۹ به صورت زیر مطرح می‌شود [۲]:

فاز صفر یا فاز A: محیط تابشی تعریف می‌شود و الزامات بالا به پایین تابشی از آن استخراج می‌شود. بررسی‌های مقدماتی ویژگی‌های تابشی می‌تواند در انتخاب فناوری و فعالیت‌های مصالحه^{۱۰} طراحی کمک کند.

فاز B: محیط تابشی مطابق با الزامات بالا به پایین تکمیل می‌شود. طراحی الکترونیکی طرح‌بندی ماهواره یا فضایی‌ها تعریف می‌شود. تحلیل اولیه از حفاظ می‌تواند ویژگی‌های محیط تابشی آغاز شود.

فاز C: آزمون‌های ویژگی‌های تابشی اجرا می‌شود. تحلیل حفاظ تجهیزات، نهایی می‌شود. آنالیز طراحی مدار (بدترین شرایط) اجرا می‌شود. در انتهای فاز C، برای CDR^{۱۱}، بیشتر فعالیت‌های RHA تکمیل شده است.

فاز D: در این فاز الباقی فعالیت‌های RHA باقیمانده مربوط به آزمون‌های تابشی (تست تایید تشعشع^{۱۲} یا آزمایش پذیرش لات پرتو^{۱۳}) انجام می‌شود [۲].

به دلیل وجود کمرندهای مغناطیسی اطراف زمین، مقدار قابل توجهی از این ذرات در این کمرندها به دام افتاده و نمی‌توانند به جو زمین برسند. اما در فضا شار این ذرات بسیار زیاده بوده و باقیستی در طراحی سامانه‌های فضایی به این مسئله توجه داشت. شار ذرات یونیزان فضایی با توجه به طول و عرض جغرافیایی زمین، ارتفاع از سطح زمین، آغاز مأموریت و بازه زمانی آن تغییرات قابل توجهی دارد [۳].

8. Radiation Hardness Assurance (RHA)

9. European Cooperation for Space Standardization (ECSS)

10. Trade-off

11. Critical Design Review (CDR)

12. Radiation Verification Testing (RVT)

13. Radiation Lot Acceptance Testing (RADLAT)

14. Total Ionization Dose

15. Displacement Damage

16. Single Event Effect

17. Shielding

بایستی بعد از طراحی و قبل از استفاده، مورد آزمون های مختلف مکانیکی، استاتیکی و حرارتی قرار گیرند [۹، ۱۰].

در تعیین مواد حفاظ با توجه به محدودیت های موجود در پرتاب ماهواره ها و همچنین در هنگام اجرای مأموریت، استفاده از مواد سبک و کم وزن ضروری است. بنابراین، شناخت نوع مواد مورد استفاده در حفاظ های مؤثر در برابر تابش های فضایی اهمیت زیادی دارد [۱۱]. ساختارهای حفاظ متفاوتی برای محافظت از قطعات حساس وجود دارند که هر کدام مقادیر متفاوتی از محافظت ایجاد می کنند [۱۲].

با توجه به استحکام ویژه بالا، میرایی سازه ای و صلابت بالای ساختارهای ساندوبیچی در اکثر ماهواره های موجود در مدارهای LEO و GEO از ساختار لانه زنبوری استفاده می شود [۱۳]. از مزایای این ساختار امکان تعییه لوله های حرارتی در کنترل حرارت موجود در ماهواره است که این موضوع با توجه به محدودیت فضایی موجود در ماهواره نقش بسیار مهمی در طراحی مهندسی ماهواره دارد [۱۴]. ساختار لانه زنبوری فلزی به واسطه کم بودن چگالی، سفتی خمی بالا و تجربیات موفق در شرایط سخت محیطی و همچنین مشخصات جذب انرژی بالا، دارای کاربردهای زیادی در زمینه های هوایی و فضایی است [۱۵-۱۷]. در بسیاری از مأموریت های فضایی از این ساختار استفاده می شود [۱۸] و بسته به نوع مأموریت از خصامت های مختلف و سلول با اندازه های متفاوت استفاده می شود [۱۹]. در شکل (۲) سازوکار کاهش شار تایید شده به ساختار ساندوبیچی لانه زنبوری فلزی نشان داده شده است.

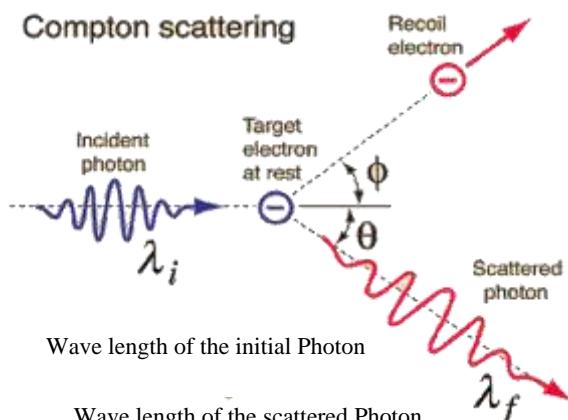
با توجه به انجام آزمایش های میزان تضعیف حفاظ در برابر چشممه های گاما که نوعی چشممه فوتونی محسوب می شوند، مختصراً در مورد اندرکنش فوتون ها با مواد توضیح داده خواهد شد. فوتون ها تابش های الکترومغناطیس هستند که بار و جرم ندارند و با سرعتی به اندازه سرعت نور حرکت می کنند. با توجه به اینکه فوتون ها دارای بار نیستند، نمی توانند مانند ذرات باردار، انرژی خود را از طریق اندرکنش های کولنی از دست بدهنند. فوتون ها نسبت به ذرات باردار با همان انرژی، دارای قدرت نفوذ بیشتری هستند. سازوکار افت انرژی فوتون در مواد به سه صورت کلی: ۱- فرآیندهای فوتوالکتریک، ۲- پراکندگی کامپتون و ۳- تولید زوج خواهد بود [۲۰، ۲۱].

حفاظه های مختلفی انجام می شود. بدن ماهواره اولین حفاظی است که وظیفه محافظت از تجهیزات داخلی را دارد. در سازه های هوافضایی، وزن اهمیت بسیار بالایی دارد. افزوده شدن وزن موجب افزایش چشمگیر هزینه های پرتاب خواهد شد. از آن جاکه وزن سازه ماهواره تابع جنس و نوع سازه است، بنابراین انتخاب ساختاری که بازگذاری ارتعاشی سطح بالا (در حدود ۱۴ برابر شتاب گرانش)، محدودیت فرکانس طبیعی (فرکانس طبیعی طولی ۶۰ هرتز و عرضی ۲۰ هرتز)، وزن نهایی کمینه و در نهایت محافظت از تشعشعت فضایی را داشته باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است.

حافظت از بوردهای الکترونیکی در برابر تشعشعت فضایی در دو سطح مختلف انجام می شود. در سطح اول بدن ماهواره با توجه به جنس و ساختار سازه خود، تمام یا مقداری از شار تایید شده را جذب می کند. در سطح دوم حفاظتی که حفاظ موضعی^{۱۸} نامیده می شود، از جعبه های فلزی که در برگیرنده بوردهای الکترونیکی و تجهیزات حساس هستند، استفاده می شود. محدودیت های موجود، طراحان را قادر می کند که در ساخت بدن های ماهواره پارامتر کاهش وزن و تحمل پذیری بیشتر بار را به عنوان مهم ترین پارامترهای اصلی مد نظر قرار دهند و بنابراین میزان محافظت سازه ای در برابر تشعشعت در درجه بعدی اهمیت قرار خواهد داشت. از این رو، مسئولیت اصلی حفاظت برعهده جعبه های نگهدارنده خواهد بود. استفاده از سازه های مختلف برای بدن ماهواره می تواند مقداری از شار تایید شده را کاهش دهد و خود منجر به کم شدن ضخامت جعبه های نگهدارنده شود. کاهش ضخامت جعبه های نگهدارنده موجب کاهش وزن کل مجموعه و در نهایت صرفه جویی اقتصادی خواهد شد. از این رو در این پژوهش، نمونه های مورد تایید برای استفاده در سازه های فضایی که هر کدام برای موضوع مربوطی و بر اساس استاندارد فضایی اروپا (ECSS-E-ST-32) طراحی و ساخته شده اند انتخاب شده است تا از نظر حفاظت تششعی مورد ارزیابی قرار گیرد.

با توجه به محدودیت های موجود در پرتاب و اجرای مأموریت ماهواره ها، استفاده از مواد سبک در حفاظ ضروری می باشد. مواد مورد استفاده در طراحی ساختار حفاظ، بایستی توانایی مقابله با تشعشعت فضایی را داشته و کاملاً اینم و قابل اطمینان باشند. به این معنی که قابلیت استفاده در شرایط خلا (اجابت الزامات گازش^{۱۹} مطابق استاندارد ECSS-E-ST-10-32) و تحمل سیکل های حرارتی شدید فضایی را داشته باشند. این مواد بایستی سبک و محکم بوده و از نظر ویژگی های مکانیکی، استاتیکی و حرارتی هم مناسب باشند. براساس استانداردهای فضایی این مواد

جذب شده و انرژی فوتون تبدیل به یک جفت الکترون و پوزیترون خواهد شد. انرژی به طور مساوی بین هردو توزیع و این دو با زاویه ۱۸۰° از هم دور می‌شوند. احتمال وقوع این رخداد متناسب با مجدور عدد اتمی ماده است [۲۳].

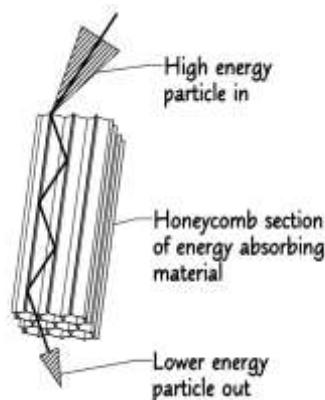


شکل ۳- پدیده پراکندگی کامپتون

رابطه تضعیف تشعشعی چشمی فوتونی
 زمانی که حفاظ در برابر چشمی فوتونی مانند پرتوهای ایکس و کاما قرار می‌گیرد، در صورتی که ضخامت جاذب کم و باریکه چشمی موازی باشد، شار گاما ای از حفاظ از رابطه بیر- لامبرت پیروی می‌کند (رابطه ۲) [۲۴، ۲۵].

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

که در آن I شدت پرتوها پس از عبور از حفاظ، I_0 شدت پرتوهای اولیه، x ضخامت حفاظ و μ ضریب تضعیف تشعشعی می‌باشد. میزان تغییرات شدت بیانگر میزان تضعیف تشعشعی است.
 تعدادی کار در زمینه بررسی اثرات حفاظهای مختلف در برابر پرتوهای پرانرژی انجام شده است. در کاری که در سال ۱۹۹۷ انجام شده، با استفاده از روش‌های مونت کارلو به بررسی ساختارهای ترکیبی آلومینیوم و کامپوزیت گرافیت در برابر پرتوهای پرانرژی پرداخته شده است [۲۶]. در کار دیگری که در سال ۲۰۰۳ در مجموعه تحقیقات دفاعی کانادا انجام شده، به بررسی انواع مختلف ساختارهای لانه زنبوری با استفاده از کد MCNPX برای استفاده در حفاظ و جهت مقابله با تشعشعات فضایی در میکرومادهارهای پرداخته شده است [۲۷]. در کاری که توسط چن در دپارتمان علوم و فنون هسته‌ای دانشگاه نانچینگ چین در سال ۲۰۱۷ انجام شده است، به بررسی ساختارهای لانه زنبوری با کد مونت کارلوی GEANT انجام شده است و ساختارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲].



شکل ۲- سازوکار افت انرژی تشعشعات فضایی در ساختارهای ساندوبیچی دارای لانه زنبوری فلزی

پدیده فوتوالکتریک

اثر فوتوالکتریک یا جذب فوتوالکتریک یکی از انواع اصلی اندرکنش‌های پرتوهای ایکس و گاما با ماده می‌باشد. در این اندرکنش، یک فوتون با الکترون لایه داخلی یک اتم اندرکنش انجام داده و باعث کندن شدن آن از لایه خواهد شد. احتمال وقوع این اثر زمانی افزایش می‌باشد که انرژی فوتون فرودی مساوی و یا بزرگتر از انرژی پیوندی الکترون از لایه آن باشد. الکترون کنده شده، فوتوالکtron نامیده می‌شود و فوتون فرودی کاملاً در این فرآیند جذب می‌شود. جذب فوتوالکتریک متناسب با عدد اتمی (Z)، انرژی فرودی و چگالی فیزیکی ماده جاذب است و به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۵].

$$Z^3 p / E^3 \quad (1)$$

پدیده کامپتون

اثر کامپتون در سال ۱۹۲۲ توسط آرتور کامپتون کشف شد. در پدیده کامپتون فوتون به یک الکترون آزاد و ساکن برخورد کرده و باعث پراکندگی الکترون و تشکیل فوتون جدید با انرژی کمتر از انرژی فوتون فرودی می‌شود. احتمال وقوع پدیده کامپتون متناسب با تعداد الکترون‌های مداری یا به عبارتی چگالی الکترون‌ها است. این پدیده برخلاف اثرات فوتوالکتریک و تولید زوج به عدد اتمی وابسته نیست و دارای تابعیت عکس با انرژی می‌باشد. یعنی با کاهش انرژی، احتمال وقوع این پدیده بیشتر خواهد بود. در محدوده انرژی‌های بیشترین احتمال وقوع را دارد [۲۲].

تولید و نابودی زوج

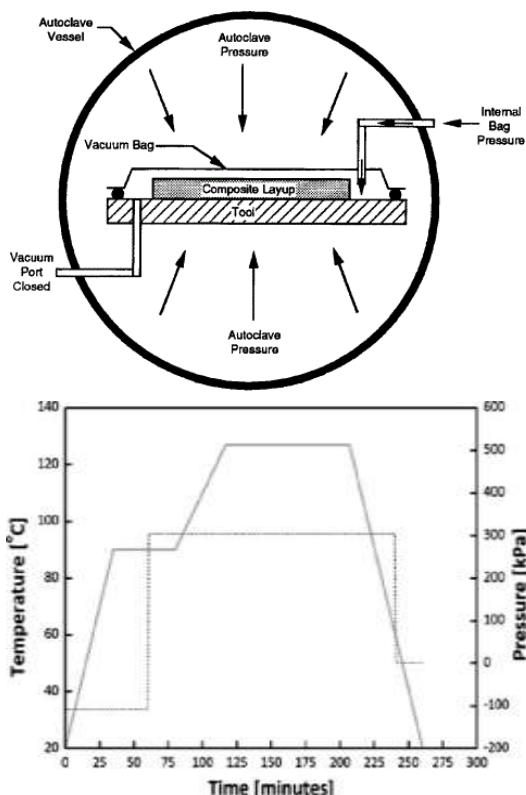
در این پدیده فوتون فرودی به شرطی که دارای انرژی بیش از $2m_e C^2$ یعنی $1/22 \text{ MeV}$ باشد، به طور کامل در مجاورت هسته

مجید مختاری، حمیده دانشور، مرتضی پهمنی‌زاد شهریار ملکی، آرمن مسیی، امیر ترابیبور اصفهانی و ایمان آریانیان

شده برای لانه زنبوری و ساختار هندسی آن نیز در طبقه کامل با الزامات فضایی است. سوراخ‌دار بودن لانه زنبوری و استفاده از آلیاژهای سری ۵۰۰۰ که برای ساختارهای فضایی توصیه شده است، از جمله موارد رعایت شده در کنار آلوواین شدن هسته به عنوان الزامات سازه‌ای فضایی است. روش تولید تمام سازه‌های این مقاله با استفاده از فشار منفی خلاً بوده است. نمونه‌های این تحقیق با فرایند اتوکلاو و کیسه خلاً در پژوهشگاه فضایی ایران و مرکز تحقیقاتی شهید قندی ساخته شده‌اند.

آزمون حفاظت در برابر تشعشع

برای انجام کار پژوهشی فوق از ۸ نمونه حفاظت (جدول (۱)) با مشخصات متفاوت استفاده شده است. با توجه به محدودیت‌های موجود در تعیین ضریب تضعیف تشعشعی از چشممه‌های نقطه‌ای گاما (جدول (۲)) در آزمایشگاه کالیبراسیون SSDL پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای استفاده شده است. چشممه‌های گاما در واقع رادیوایزوتوپ‌های نقطه‌ای با مشخصات تشعشعی مد نظر هستند.



شکل ۴- طرح‌واره‌ای از فرایند اتوکلاو و سطح فشارهای مثبت و منفی اعمال شده بر روی ساندویچ پنل به همراه تغییرات دماهی وابسته به زمان (با مجوز مرکز تحقیقاتی شهید قندی)

23. Total mass loss

در پژوهشی که توسط دانشور و همکارانش در پژوهشگاه ارتباطات فناوری اطلاعات انجام شده، به بررسی آسیب پرتویی دز یونیزان کل و آسیب جابجایی بر روی ساختارهای مختلف لانه زنبوری با استفاده از کد MCNPX و برای مدار GEO پرداخته شده است [۲۸، ۲۹]. در کار دیگری که در سال ۲۰۱۶ در دانشگاه NC A&T انجام شده، به بررسی ساختارهای مختلف ساندویچی با کامپوزیت‌های هیبریدی ساندویچی یا به عبارتی مواد HMWPE^{۲۱} پرداخته شده در برابر چشممه نوترونی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در مواد آمیخته شده با نانوپورهای بور، نسبت به دیگر مواد، نتایج بهتری برای مقابله با چشممه‌های نوترونی دارند [۳۰، ۳۱].

در این مقاله به بررسی تجربی تأثیر حفاظتی ساختارهای ساندویچی مورد استفاده در سازه‌های فضایی فوق سبک در برابر تشعشعات گاما پرداخته شده است. هشت ساختار از پرکاربردترین سازه‌هایی که در ساختارهای فضایی مانند آتن‌های مخابراتی و بدن‌های ماهواره‌ها استفاده می‌شود، در معرض تشعشع چشممه‌های پرتو گاما (امرسيوم، باريوم و سزيوم) با انرژی‌های ۶۰، ۳۸۵ و ۶۶۲ keV قرار داده شده است و نتایج آن با هم مقایسه شده است. ميزان حفاظت بوجود آمده در هر يك از اين ساختارها وابسته به ضخامت، جنس و مشخصات هندسی اجزاي مختلف آن هاست. در اين مقاله با استفاده از پارامتر «حفاظت ويزه» ساختارهای مختلف تست شده مقایسه شده‌اند و بهترین ساختار از ديدگاه حفاظتی شناسایي و گزارش شده است. با توجه به بومي بودن (طراحی، ساخت و تست) ساندویچ‌پنل‌های اين تحقیق و همچنین دسترسی به مواد اولیه آن‌ها در کشور، نتایج به دست آمده از این بررسی قابل استفاده برای طراحی سازه‌های فضایی و غير فضایی است.

تحلیل تجربی

برای ارزیابی ميزان حفاظت ایجاد شده در برابر پرتوهای گاما، ۸ ساختار پرکاربرد فوق سبک مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. پارامترهای مختلفی مانند نوع و جنس رویه، ضخامت رویه، ضخامت هسته، ابعاد سلول لانه زنبوری و تأثیر استفاده از لایه‌های فلزی در این بررسی به صورت تجربی ارزیابی شده است.

ساخت نمونه‌های ساندویچی

مشخصات ۸ نمونه استفاده شده در این تحقیق در جدول (۱) آورده شده است. اتصال رویه به هسته در تمام نمونه‌های ساندویچی با استفاده از چسب‌های هوای‌فضایی پایه اپوکسی انجام شده است. در نمونه‌های فضایی مواد استفاده شده مطابقت بالایی با شرایط خارج جو دارند (فشار خلاً در حدود 10^{-11} Pa) به نحوی که در عمد نمونه‌های استفاده شده، تمام الزامات فضایی از جمله الزامات گازروی (گازرش) ($\text{CVCM}^{22} < 0.1$)

21. High Molecular Weight Poly Ethylene (HMWPE)

22. Collected Volatile Condensable Material

اثر ضخامت پنل

با فرض کم بودن تأثیر تغییر ضخامت رویه آلومینیومی که در محدوده ۰/۰۲ میلی متر است، برای در نظر گیری اثر مجموع ضخامت رویه های آلومینیومی و هسته از دو نمونه #۱ و #۴ استفاده شده است. همانطور که در جدول (۴) نشان داده شده است، در نمونه #۴ به رغم ضخامت بیشتر، دارای افت کمتری است. این تغییرات در انرژی های کمتر بیشتر ظاهر می شود.

جدول ۱ - مشخصات هندسی، ساختاری، چگالی (ρ) و روش تولید نمونه های تست شده برای بررسی پارامترهای مربوط به حفاظت تشعشعات فضایی

ردیف	مشخصات ساختاری و تولید	نمای
۱	اتوکلاو $\rho = 210/53$	
۲	وکیوم بگ $\rho = 207/27$	
۳	اتوکلاو $\rho = 258/36$	
۴	اتوکلاو $\rho = 357/44$	

ساندwich پنل با رویه آلومینیومی سری ۷۰۷۵ با ضخامت ۳۰۰ میکرون، ضخامت هسته ۲۰ میلی متر و ابعاد سلول ۱/۸ اینچ، اتصال هسته به رویه با چسب فیلمی پایه اپوکسی

ضخامت ۵۰۰ میکرون لمینیت کامپوزیتی کربن T300 و اپوکسی به

ساندwich پنل با رویه آلومینیومی سری ۷۰۷۵ با ضخامت ۵۰۰ میکرون، ضخامت هسته ۲۲ میلی متر و ابعاد سلول ۱/۸ اینچ، اتصال هسته به رویه با چسب فیلمی پایه اپوکسی

ساندwich پنل با رویه آلومینیومی سری ۷۰۷۵ با ضخامت ۵۰۰ میکرون، ضخامت هسته ۲۲ میلی متر و ابعاد سلول ۱/۱۶ اینچ، اتصال هسته به رویه با چسب فیلمی پایه اپوکسی

بررسی تجربی تأثیر استفاده از چند سازه فضایی ساندwichی برای حفاظت در برابر تشعشعات فضایی

برای تعیین شار چشمی رادیوایزوتوپی از آشکارسازهای تابشی استفاده می شود. آشکارسازی با استفاده از CsI (Tl)-NT-812 انجام شده و ثبت طیف مربوط به شار اندازه گیری شده با حضور و عدم حضور حفاظت با استفاده از نرم افزار مربوط به شرکت نوین طیف انجام شده است. چیدمان پرتودهی را می توان در شکل (۵) مشاهده کرد.

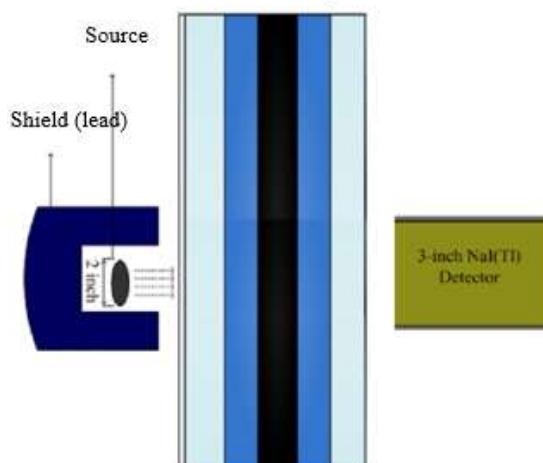
نتایج

در این بخش پارامترهای تأثیرگذار بر میزان تضعیف تشعشعی بر نمونه های حفاظت که با چشممه های گاما پرتودهی شده اند، مورد بررسی قرار گرفته است. برای تشریح نتایج از درصد افت تشعشعات عبوری و حفاظت ویژه $(\Delta I/I_0)^{24}$ استفاده شده است.

اثر ابعاد سلول لانه زنبوری

ابعاد سلول در لانه زنبوری در واقع قطر دایره محیط شده در شش ضلعی است. برای تأثیر این پارامتر بر ضربیت تضعیف تشعشعی از دو نمونه #۲# و #۴ استفاده شده است. در این دو نمونه تمامی مشخصات مشابه است و تنها در اندازه سلول با هم تفاوت دارد که به ترتیب برابر با $\frac{1}{8}$ و $\frac{1}{16}$ اینچ است.

Sandwich panel



شکل ۵- چیدمان آزمون برای اندازه گیری میزان حفاظت

همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است، هرچقدر اندازه سلول کوچکتر باشد، افت بیشتر است یا به عبارتی تأثیر شیلدینگ بیشتر است. این اتفاق در انرژی های بیشتر، کمتر مشهود است و گویی اثر اندازه تأثیر زیادی بر افت ندارد و عملا هرچقدر انرژی فوتون بیشتر باشد، اثر اندازه سلول کمتر خواهد بود. این امر نیز طبیعی به نظر می رسد، با کوچکتر شدن اندازه سلول، راه برای نفوذ و ورود ذرات زیان بار کمتر شده و بنابراین تأثیر حفاظت شیلد بیشتر است.

نمونه				انرژی (keV)
-۹/۰۳	-۴/۲۸	-۵/۲۸	-۱/۴۷	۸۰
-۳/۸۱	۱/۸۱	-۳/۹۷	-۱/۱۱	۳۵۶
-۲/۳۴	-۱/۱۱	-۲/۸۱	-۰/۷۸	۶۶۲

در توصیف اندرکنش فوتون با مواد گفته شد که در محدوده انرژی فوتونی که در این کار آزمایش انجام شده است، اثر غالب اندرکنش بین فوتون و مواد اثر پراکندگی کامپتون است که به طور معکوس با انرژی تغییر می‌کند. بنابراین در انرژی‌های کمتر این اثر بیشتر ظاهر می‌شود و بنابراین وجود اثرات ثانویه پراکندگی کامپتون که در اندرکنش فوتون با شیلد ظاهر می‌شود می‌تواند بر خروجی تأثیرگذار باشد. یعنی علاوه بر فوتون‌های اولیه، تعدادی نیز در اثر پراکندگی کامپتون در آشکارساز ظاهر خواهد شد. هرچقدر مقدار شیلد بیشتر باشد، این اثر بیشتر ظاهر می‌شود. همانطور که در مقایسه این دو نمونه مشاهده می‌شود در انرژی‌ها به نسبت کمتر ۳۵۶ keV و ۸۰ keV، این اثر غالب نسبت به اثر ثانویه پراکندگی خود ضخامت شیلد است و با توجه به اینکه کامپتون در این انرژی‌ها کمتر ظاهر می‌شود، در شیلد با ضخامت بیشتر افت بیشتری ظاهر خواهد شد.

اثر لایه فلزی استیل

برای مقایسه این اثر از دو نمونه #۶ و #۷ استفاده شده است. همانطور که در توضیحات ارائه شده است برای نمونه #۷، یک سمت ساندویچ با یک لایه فلزی ۱۲۵ میکرون از جنس استیل ۳۰۶ نشانده شده است. بنابراین، به عبارتی مقدار ضخامت نیز در مجموع در اینجا افزایش یافته است، توجیه نتایج به دست آمده تقریباً مشابه با اثر مجموع ضخامت آلومینیم و هسته است. در انرژی‌های کمتر اثر غالب پراکندگی کامپتون است و بنابراین علی‌رغم ضخامت بیشتر نمونه #۷، شاهد افت کمتری خواهیم بود و این امر به علت وجود پراکندگی‌های ناشی از اثرات کامپتون است که در انرژی‌های کمتر نیز بیشتر ظاهر می‌شود در انرژی بیشتر اثر ضخامت غالب بوده و نمونه با ضخامت بیشتر دارای افت بیشتری خواهد بود (جدول ۵).

جدول ۵- اندازه‌گیری تأثیر رویه فلزی روی حفاظت تشعشعی

نمونه		انرژی (keV)
#۶	#۷	
%($\Delta I/I_0$)	SS	%($\Delta I/I_0$) SS
-۱۹/۲۴	-۴/۴۱	-۱۷/۶۲
-۳/۴۰	-۰/۷۸	-۳/۷۴
		-۰/۸۱
		۶۰
		۶۶۲

اثر تعداد لایه‌ها

برای بررسی اثر تعداد لایه‌ها از دو نمونه #۶ و #۸ استفاده شده است. این دو نمونه تنها در تعداد لایه‌ها با هم تفاوت دارند. توجیه

مشخصات ساختاری و تولید	ع.
اتوکلاو $P = ۱۹۵/۵۳$	۵
ساندویچ پنل با یک رویه آلومینیومی سری ۷۰۷۵ با ضخامت ۵۰۰ میکرون و یک رویه از ROGERS سری ۱۰۰۰، ضخامت هسته ۷ میلی متر و ابعاد سلول ۱/۴ اینچ، اتصال هسته به رویه با چسب فیلمی پایه اپوکسی	
وکیوم بگ $P = ۴۳۶/۳۶$	۶
ساندویچ پنل با رویه الیاف کربن T 300 با ضخامت ۷۵۰ میکرون، ضخامت هسته ۱۰ میلی متر و ابعاد سلول ۱/۸ اینچ، اتصال هسته به رویه با چسب فیلمی پایه اپوکسی	
وکیوم بگ $P = ۲۵۸/۸۴$	۷
ساندویچ پنل با رویه الیاف کربن 300 T با ضخامت ۷۵۰ میکرون تقویت شده با یک لایه فلزی ۲۰۰ میکرونی از یک طرف، ضخامت هسته ۱۰ میلی متر و ابعاد سلول ۱/۸ اینچ، اتصال هسته به رویه با چسب فیلمی پایه اپوکسی	
وکیوم بگ $P = ۴۵۵/۰۳$	۸
ساندویچ پنل با رویه الیاف کربن 300 T با ضخامت ۱۰۰۰ میکرون و روکش دهنده شده با یک لایه فلزی به روش رسوب بخار به ضخامت ۲۰۰ میکرون، ضخامت هسته ۱۰ میلی متر و ابعاد سلول ۱/۸ اینچ، اتصال هسته به رویه با چسب فیلمی پایه اپوکسی	

جدول ۲- چشممه‌های رادیوایزوتوپ گاما برای پرتودهی حفاظ

Am-241	Ba-133	Cs-137	منبع
ع.	۸۰	۳۵۶	(keV) انرژی

جدول ۳- اندازه‌گیری تأثیر استفاده از لانه زنبوری با دو اندازه سلول مختلف روی حفاظت تشعشعی

نمونه		انرژی (keV)
#۳	#۴	
%($\Delta I/I_0$)	SS	%($\Delta I/I_0$) SS
-۱/۴۹	-۰/۵۷	-۴/۲۱
-۲/۳۲	-۱/۱۰	-۲/۸۱
		-۰/۷۸
		۶۰
		۶۶۲

جدول ۴- اندازه‌گیری تأثیر ضخامت پنل روی حفاظت تشعشعی

نمونه		انرژی (keV)
#۱	#۴	
%($\Delta I/I_0$)	SS	%($\Delta I/I_0$) SS
-۵/۲۶	-۲/۴۹	-۴/۲۱
		-۱/۱۷
		۶۰

جمع‌بندی

در این کار به بررسی انواع ساختارها برای استفاده به عنوان شیلد تشعشعی پرداخته شده است. با توجه به محدودیت‌های موجود برای انجام آزمون پرتودهی، در این جا تنها به چشممه‌های گاما‌ی تک انرژی اکتفا شده است. در این کار با در اختیار داشتن تفاوت و تمایز ساختارهای مختلف، برای مقایسه پارامترهای ابعاد سلول لانه زنبوری، اثر هسته، لایه فلزی و مجموع ضخامت رویه‌های آلومینیمی و هسته مورد بررسی قرار گرفته است.

هرچقدر اندازه سلول کوچکتر باشد، افت بیشتر است. این اتفاق در انرژی‌های بیشتر، کمتر مشهود است. نتایج مربوط به تأثیرات مجموع ضخامت هسته و لایه آلومینیمی حکایت از تأثیر متقابل این اثر با پراکندگی کامپتون دارد. در انرژی‌های کمتر اثر غالب پراکندگی است و بنابراین موجب می‌شود تعداد ذرات بیشتری به آشکارساز برسند. در انرژی‌های بالاتر اثر غالب همان ضخامت شیلد است و بنابراین در ساختار با ضخامت بیشتر شاهد افت کمتر خواهیم بود. اضافه شدن لایه فلزی موجب افزایش ضخامت نمونه شده اما این تأثیر در افت شار تنها در انرژی‌های بالاتر ظاهر می‌شود و در انرژی‌های کمتر، به علت اثر غالب پراکندگی کامپتون، افت کمتر مشاهده خواهد شد. مقایسه دو نمونه مشابه با تعداد لایه‌های متفاوت حاکی از عدم اثرپذیری افت شار نسبت به افزایش تعداد لایه‌ها دارد. این نتیجه نیز با توجه به اثر غالب پراکندگی کامپتون به خصوص در انرژی‌های کم، قابل توجیه است. ماهیت هسته با توجه به وجود روزنه‌های لانه زنبوری در آن دارای اثر مخبری بر میزان تضعیف شیلد خواهد بود. اثر مخبر در انرژی‌های بیشتر کمتر خواهد شد. برای اکثر نمونه‌ها با افزایش انرژی، میزان افت به شدت کاهش پیدا می‌کند. در انرژی‌های بالاتر میزان افت نمونه‌ها تفاوت چندانی با هم ندارند ولی برای انرژی کمتر تفاوت کاملاً مشهود است و نمونه‌های سه لایه با ساختار لانه زنبوری و هم چنین لایه فلزی استیل دارای افت مناسبی تقریباً برابر با ۲۰ و ۱۸ درصد می‌باشند. بنابراین، بهینه‌ترین شیلد محسوب می‌شوند.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسنده‌گان بیان نشده است.

نتایج به دست آمده تقریباً مشابه با اثر مجموع ضخامت آلومینیم و هسته و اثر لایه فلزی استیل است (جدول ۶). در این مورد افزایش تعداد لایه‌ها در انرژی‌های مختلف عملاً تأثیری مشتبه بر افت نداشته است. تغییرات شدت افت در انرژی‌های کمتر به علت اثر غالب پراکندگی کامپتون بیشتر است و با افزایش انرژی این اثر کمتر می‌شود.

جدول ۶- اندازه‌گیری تأثیر تعداد لایه‌های رویه پنل روی حفاظت تشعشعی

		نمونه		سطح انرژی (keV)
#6		#8		
%($\Delta I/I_{10}$)	SS	%($\Delta I/I_{10}$)	SS	
-۱۹/۲۴	-۴/۴۱	-۵/۸۶	-۱/۲۸	۶۰
-۳/۴۰	-۰/۷۸	-۲/۲۰	-۰/۴۸	۶۶۲

اثر حضور هسته

برای مقایسه تأثیر و نقش هسته بر میزان افت شدت از دو نمونه #۲ استفاده شده است. ماهیت هسته با توجه به وجود روزنه‌های لانه زنبوری در آن دارای اثر مخبری بر میزان تضعیف شیلد خواهد بود. این نتایج برای انرژی‌های مختلف برای مقایسه در جدول (۷) نشان داده شده است. اثر مخبر در انرژی‌های بیشتر کمتر خواهد شد.

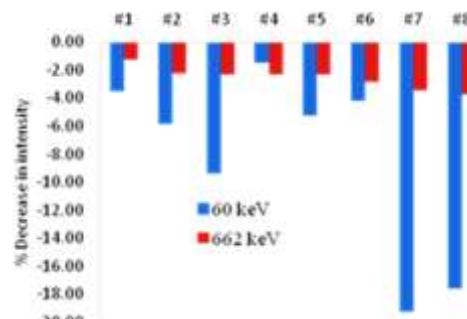
جدول ۷- اندازه‌گیری تأثیر حضور هسته روی حفاظت تشعشعی

		نمونه		انرژی (keV)
#2		#8		
%($\Delta I/I_{10}$)	SS	%($\Delta I/I_{10}$)	SS	
-۹/۳۶	-۴/۵۱	-۵/۸۶	-۱/۲۸	۶۰
-۲/۴۹	-۱/۱۰	-۲/۲۰	-۰/۴۸	۶۶۲

مقایسه کلی نمونه‌ها

برای مقایسه کلی از همه نمونه‌ها در دو انرژی ۶۰ keV و ۶۶۲ keV و استفاده شده است. این نتیجه در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، برای اکثر نمونه‌ها با افزایش انرژی، میزان افت به شدت کاهش پیدا می‌کند. در انرژی‌های بالاتر میزان افت نمونه‌ها تفاوت چندانی با هم ندارند ولی برای انرژی کمتر تفاوت کاملاً مشهود است و نمونه‌های #۷ و #۸ دارای افت قابل قبول تقریباً ۲۰ و ۱۸ درصدی هستند.

بنابراین، بهینه‌ترین شیلد محسوب می‌شوند.



شکل ۶- مقایسه میزان افت ایجاد شده ناشی از حفاظت ساندویچ‌پنل‌های سازه‌ای در برابر تابش دو سطح انرژی ۶۰ keV و ۶۶۲ keV

مراجع

- [15] L. Zheng, D. Wu, A. Zhou, B. Pan, Y. Wang, and J. Wang, "Experimental and numerical study on heat transfer characteristics of metallic honeycomb core structure in transient thermal shock environments," *International Journal of Thermophysics*, vol. 35, pp. 1557-1576, 2014.
- [16] R. Battiston, W. Burger, V. Calvelli, R. Musenich, V. Choutko, V. Datskov, et al., "ARSSEM—Active radiation shield for space exploration missions," *arXiv: 1209.1907 [physics.space-ph]*, 2012.
- [17] W.L. Ko, "Heat shielding characteristics and thermostructural performance of a superalloy honeycomb sandwich thermal protection system (TPS)," NASA Dryden Flight Research Center Edwards, California 2004.
- [18] F. Cataldo and M. Prata, "New composites for neutron radiation shielding," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 320, pp. 831-839, 2019.
- [19] Honeycomb radiation shield for spacecraft. Available: <https://contest.techbriefs.com/2010/entries/transportation/304>
- [20] C. Leroy and P.-G. Rancoita, Principles of radiation interaction in matter and detection: World Scientific, 2011.
- [21] G. Gilmore, *Practical gamma-ray spectroscopy*: John Wiley & Sons, 2011.
- [22] Compton effect. Available: <https://radiopaedia.org/articles/compton-effect>
- [23] P.W. Hawkes, *Advances in imaging and electron physics*: Elsevier, 2004.
- [24] H. O. Tekin, "MCNP-X Monte Carlo code application for mass attenuation coefficients of concrete at different energies by modeling 3×3 inch NaI (TI) detector and comparison with XCOM and Monte Carlo data," *Science and technology of nuclear installations*, vol. 2016, 2016.
- [25] A. Kiyanı, A.A. Karami, M. Bahiraei, and H. Moghadamian, "Calculation of gamma buildup factors for point sources," *Advances in materials Research*, vol. 2, pp. 93-98, 2013.
- [26] M. Stanton, J. Barth, E. Stassinopoulos, W. Stapor, and T. Jordan, "Proton transport through graphite composite honeycomb solar array panel," in *RADECS 97. Fourth European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems* (Cat. No. 97TH8294), pp. 305-310, 1997.
- [27] L. Varga and E. Horvath, Evaluation of electronics shielding in micro-satellites: Defence R&D Canada-Ottawa, 2003.
- [28] H. Daneshvar, P. Hajipour, L. Mohammadi, and M. Ebrahimzadeh, "Evaluation of the amount of displacement damage in silicon volumes caused by GEO orbit radiation particles using MCNPX code," presented at the Second National Conference on Space Radiation, Tehran, 2012.in Persian
- [29] H. Daneshvar, P. Hajipour, L. Mohammadi, and M. Ebrahimzadeh, "Investigation and comparison of the most important radiation protection design parameters in GEO satellites using MCNPX code," presented at the Second National Conference on Space Radiation, Tehran, 2012 (in Persian).
- [1] B. Taylor, C. Underwood, A. Dyer, C. Ashton, S. Rason, and J. Browning, "The micro radiation environment monitor (MuREM) and SSTL radiation monitor (SSTL RM) on TechDemoSat-1," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 59, pp. 1060-1065, 2012.
- [2] European Coppration for Space Standardization, "Space product Assurance," Materials, mechanical parts and processes, ESA2009.
- [3] M. R. S. James R. Schwank, and Paul E, "Radiation Hardness Assurance Testing of Microelectronic Devices and Integrated Circuits: Radiation Environments, Physical Mechanisms, and Foundations for Hardness Assurance," sandia National Laboratories Document, 2008.
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt
- [5] Available: <https://www.bas.ac.uk/media-post/new-risk-index-for-satellite-operators>
- [6] R. Horne, S. Glauert, N. Meredith, D. Boscher, V. Maget, D. Heynderickx, et al., "Space weather impacts on satellites and forecasting the Earth's electron radiation belts with SPACECAST," *Space Weather*, vol. 11, pp. 169-186, 2013.
- [7] H. T. Mebrahtu, Heavy Ion Radiation Effects on CMOS Image Sensors, 2005.
- [8] E. Secretariat, "Methods for the calculation of radiation received and its effects, and a policy for design margins," European Cooperation for Space Standardization, Noordwijk, 2008.
- [9] R. Uzel and A. Özyildirim, "A study on the local shielding protection of electronic components in space radiation environment," *2017 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, 2017, pp. 295-299.
- [10] M. Mayanbari 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*, 2011, pp. 489-493.
- [11] D. Croley, H. Garrett, G. Murphy, and T. Garrard, "Solar particle induced upsets in the TDRS-1 attitude control system RAM during the October 1989 solar particle events," *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 1489-1496, 1995.
- [12] T. Chen, F. Chen, X. Tang, M. Ni, Y. Zhang, and H. Huang, "Shielding performance of honeycomb and foam structures in a magnetic field against spatial high-energy electron radiation," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 410, pp. 127-133, 2017.
- [13] J. Solin, "The GEO total ionizing dose," *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 45, pp. 2964-2971, 1998.
- [14] B. Spieth, K. Qassim, R. Pittman, and D. Russell, "Shielding electronics behind composite structures," *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 45, pp. 2752-2757, 1998.

- [31] N.A. Galehdari, V. Mani, and A.D. Kelkar, "Fabrication of Nanoengineered Radiation Shielding Multifunctional Polymeric Sandwich Composites," *Int. J. Chem. Mol. Nucl. Mater. Metall. Eng.*, vol. 10, pp. 257-260, 2016.
- [30] N. Abuali Galehdari and A.D. Kelkar, "Characterization of nanoparticle enhanced multifunctional sandwich composites subjected to space radiation," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2016, p. V001T03A032.

COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](#)

