

Vol. 15 / Issue 2 / 2022 / (No. 52) Print ISSN: 2008-4560 / Online ISSN: 2423-4516 https://doi.org/10.30699/jsst.2021.1344



Pages: 59-69 / Research Paper / Received: 16 May 2021 / Revised: 24 August 2021 / Accepted: 21 September 2021

Journal Homepage: https://jsst.ias.ir

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

Majid Mokhtari^{1*}, Hamideh Daneshvar², Morteza Bahmani Nejad³, Shahryar Malekie⁴, Armin Mosayebi⁵, Amir Torabpoor Isfahani⁶ and Iman Aryanian⁷

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

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

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

6. M.Sc., 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 and Information Technology, Tehran, Iran

*Corresponding Author's E-mail: m_mokhtari@tvu.ac.ir

Abstract

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 (Amercium 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 fiber composites



© 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).

How to cite this article:

M. Mokhtari, H. Daneshvar, M. Bahmani Nejad, et al, "Experimental Study of the Effect of Using Space Sandwich Structures for Protection Against Space Radiation," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 15, No. 2, pp. 59-69, 2022 (in Persian), <u>https://doi.org/10.30699/jsst.2021.1344</u>.







ص. ص. ۶۹- ۵۹ / مقاله علمی- پژوهشی / دریافت: ۲/۲۶/۰۲/۴۰ / بازنگری: ۲۰/۶۶/۰۴ / پذیرش: ۱۴۰۰/۶۶/۳۰

Journal Homepage: https://jsst.ias.ir

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

مجيد مختاري^{(*}، حميده دانشور^۲، مرتضى بهمنينژاد^۳، شهريار ملكي^۴، آرمين مسيبي^۵، امير ترابيور اصفهاني و ايمان آريانيان

۱- دپارتمان مکانیک خودرو، دانشکده شهید بابایی، دانشگاه فنی و حرفهای استان قزوین، قزوین، ایران ۲، ۴، ۵ – گروه پژوهشی پرتوفرآوری و دزیمتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، تهران، ایران ۳- دیارتمان سازه و ارتعاشات، گروه کامپوزیت و مواد پیشرفته، مرکز تحقیقاتی شهید قندی، تهران، ایران ۶- پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان، ایران

۷- گروه ارتباطات ماهوارهای، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران *س_mokhtari@tvu.ac.ir *ايميل نويسنده مخاطب:

حكىدە

ساندویچ پنل ها به علت استحکام ویژهٔ 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 می کند، تشعشعات فضایی هستند. حفاظت از تجهیزات در برابر این تشعشعات مضر اهمیت بالایی دارد. در این مقاله به بررسی تجربی تأثیر حفاظتی ساختارهای ساندویچی مورد استفاده در سازههای فضایی فوق سبک در برابر پرتوهای گاما پرداخته شده است. هشت ساختار از پرکاربردترین سازههایی که در ساختارهای فضایی مانند آنتن های مخابراتی و بدنههای ماهوارهها استفاده می شود، در معرض تشعشع چشمههای رادیوایزوتویی پرتوهای گاما (امرسیوم، باریم و سزیوم) با انرژیهای ۶۰ keV، ۲۰ 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 وابسته به ضخامت، جنس و مشخصات هندسی اجزای مختلف است. در این مقاله با استفاده از یارامتر «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) ساندویچ پنل های این تحقیق و همچنین دسترسی به مواد اولیه آن ها در کشور، نتایج بدست آمده از این بررسی قابل استفاده برای طراحی سازههای فضایی و غیرفضایی است.

واژدهای کلیدی: ساندویچینل، سازههای فضایی، حفاظت در برابر تشعشع، کامپوزیتهای الیاف کربن

Ι

 I_0

х

μ

علائم و اختصارات

شدت پرتوها پس از عبور از حفاظ شدت پرتوهای اولیه ضخامت حفاظ ضريب تضعيف تشعشعي

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

مقدمه

۱. مربى ۲. استادیار ۳. کارشناسی ارشد ۲. استادیا،

 \odot © 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).

۵. استادیار

۷. استادیار

۶ کارشناسی ارشد

COPYRIGHTS

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

بنابراین میتوانند دچار آسیب شوند. حوزه بررسی تشعشعات فضایی در سه مقوله شناسایی، سنجش و آشکارسازی تشعشعات فضایی، اثرسنجی تشعشعات فضایی و حفاظت دربرابر تشعشعات فضایی قرار می گیرد [۱]. سازدهای فضایی به عنوان جبهه مواجهه با تشعشعات فضایی هستند. مهمترین مأموریتی که برای سازههای فضایی تعریف میشود، حفظ استحکام و یکپارچگی درحین 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 اطمينان است. قابليت اطمينان مورد نياز براي كاربردهاي فضايي موجب می شود که فرآیند تضمین تشعشعی⁸یک فرآیند کلیدی در دستیابی به موفقیت ماهواره باشد [۲]. فرآیند RHA از دیدگاه طراحی بر اساس استاندارد فضایی ECSS⁹ به صورت زیر مطرح می شود [7]:

فاز صفر یا فاز A: محیط تابشی تعریف می شود و الزامات بالا به پایین تابشی از آن استخراج می شود. بررسی های مقدماتی ویژگیهای تابشی میتواند در انتخاب فناوری و فعالیتهای مصالحه ' طراحي كمك كند.

فاز B: محیط تابشی مطابق با الزامات بالا به پایین تکمیل می شود. طراحی الکترونیکی طرحبندی ماهواره یا فضاپیما تعریف می شود. تحلیل اولیه از حفاظ می تواند مانند ویژگی های محیط تابشی آغاز شود.

فاز C: آزمونهای ویژگیهای تابشی اجرا میشود. تحلیل حفاظ تجهیزات، نهایی می شود. آنالیز طراحی مدار (بدترین شرایط) اجرا می شود. در انتهای فاز C، برای CDR¹¹، بیشتر فعالیتهای RHA تکمیل شدہ است.

فاز D: در این فاز الباقی فعالیتهای RHA باقیمانده مربوط به آزمونهای تابشی (تست تایید تشعشع¹² یاآزمایش پذیرش لات پرتو¹³) انجام می شود [۲].

به دلیل وجود کمربندهای مغناطیسی اطراف زمین، مقدار قابل توجهی از این ذرات در این کمربندها به دام افتاده و نمی توانند به جو زمین برسند. اما در فضا شار این ذرات بسیار زیاده بوده و بایستی در طراحی سامانه های 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].

فصلنامهٔ علمی- پژوهشی علوم و فناوری فضایی ٦١ / دوره ۱۵/ شمارهٔ ۲ / تابستان ۱۴۰۱ (پیاپی ۵۲)

این کمربندهای مغناطیسی متحدالمرکز بوده و به شکل دونات میباشند (شکل ۱). کمربند داخلی در محدوده بین ۶۰۰۰km تا ۱۲۰۰۰km قرار دارد. محدوده کمربند خارجی از ۲۵۰۰۰ km تا ۴۵۰۰۰ km است.. این دو ناحیه با یک شکاف از هم جدا می شوند. در سال ۲۰۱۳، ناسا از وجود کمربندهای دیگری در بین این دو کمربند خبر داد. ابعاد این کمربندها با توجه به شرایط ژئومغناطیسی زمین در حال تغییر است [۴]. انواع مختلفی از مدارهای ماهوارهای شامل GEO، MEO و LEO در این کمربندها قرار می گیرد [۵, ۶].



شکل 1- موقعیت کمربندهای داخلی و خارجی ون آلن و مدارهای ماهوارهای [۵]

در صنایع فضایی، ادوات و تجهیزات الکترونیکی در سیستمها و زیرسیستمهای مختلف مورد استفاده قرار می گیرند. در برخی موارد این تجهيزات بسيار حساس هستند و توقف يا خطا در آنها تأثير حياتي 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 قابليت اطمينان در تجهيزات ديجيتال را نيز مطرح مي كند.

آسیبهای ناشی از اندرکنش ذرات با ماده به سه دستهٔ زیر تقسیم بندی می شوند [۷]:

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

جهت انجام موفق مأموریتهای فضایی باید در طراحی سامانههای فضایی راهکارهای مقابله با این ذرات مد نظر قرار گیرد. یکی از راهکارهای بسیار مؤثر، استفاده از حفاظ^{۱۷}است. طراحی حفاظ باید به گونهای باشد که زیرسیستمهای هر سامانهٔ فضایی بتواند در کل بازه زمانی مأموریت عملکرد صحیح خود را ادامه دهد [٨]. محافظت از تجهیزات داخلی به خصوص ادوات الکترونیکی ماهواره با



^{8.} Radiation Hardness Assurance (RHA) 9. European Cooperation for Space Standardization (ECSS)

^{10.} Trade-off

^{11.} Critical Design Review (CDR)

Radiation Verification Testing (RVT)
Radiation Lot Acceptance Testing (RADLAT)

^{14.} Total Ionization Dose

Displacement Damage 16. Single Event Effect

^{17.} Shielding

فصلنامهٔ علمی- پژوهشی علوم و فناوری فضایی دوره ۱۵ / شماره ۲/ تابستان ۱۴۰۱ (پیابی ۵۲)

حفاظهای مختلفی انجام می شود. بدنهٔ ماهواره اولین حفاظی است که وظیفه محافظت از تجهیزات داخلی را دارد. در سازههای هوافضایی، وزن اهمیت بسیار بالایی دارد. افزوده شدن وزن موجب افزایش چشمگیر هزینههای پرتاب خواهد شد. از آنجاکه وزن سازهٔ ماهواره تابع جنس و نوع سازه است، بنابراین انتخاب ساختاری که بارگذاری 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 تشعشعات فضایی را داشته باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است.

حفاظت از بوردهای الکترونیکی در برابر تشعشعات فضایی در دو سطح مختلف انجام میشود. در سطح اول بدنهٔ ماهواره با توجه به جنس و ساختار سازهٔ خود، تمام یا مقداری از شار تابیده شده را جذب می کند. در سطح دوم حفاظتی که حفاظ موضعی^۸ نامیده میشود، از جعبههای فلزی که در برگیرندهٔ بوردهای الکترونیکی و تجهیزات حساس هستند، استفاده میشود. محدودیتهای موجود، طراحان را وادار می کند که در ساخت بدنههای ماهواره پارامتر کاهش وزن و تحمل پذیری بیشتر بار را به عنوان مهمترین پارامترهای اصلی مد نظر قرار دهند و بنابراین میزان محافظت سازهای در برابر تشعشعات در درجه بعدی اهمیت قرار خواهد داشت. از این رو، مسئولیت اصلی حفاظت برعهدهٔ جعبههای نگهدارنده خواهد بود.

استفاده از سازههای مختلف برای بدنه ماهواره می تواند مقداری از شار تابیده شده را کاهش دهد و خود منجر به کم شدن ضخامت جعبههای نگهدارنده شود. کاهش ضخامت جعبههای نگهدارنده موجب کاهش وزن کل مجموعه و در نهایت صرفه جویی اقتصادی خواهد شد. از این رو در این پژوهش، نمونههای مورد تایید برای استفاده در سازههای فضایی که هر کدام برای موضوع مرتبطی و بر اساس استاندارد فضایی اروپا (-ECSS ECSS) طراحی و ساخته شدهاند انتخاب شده است تا از نظر حفاظت تشعشعی مورد ارزیابی قرارگیرد.

با توجه به محدودیتهای موجود در پرتاب و اجرای مأموریت ماهوارهها، استفاده از مواد سبک در حفاظ ضروری میباشد. مواد مورد استفاده در طراحی ساختار حفاظ، بایستی توانایی مقابله با تشعشعات فضایی را داشته و کاملاً ایمن و قابل اطمینان باشند. به این معنی که قابلیت استفاده در شرایط خلاً (اجابت الزامات گازش^۱ مطابق استاندارد ECSS-E-ST-10-32) و تحمل سیکلهای حرارتی شدید فضایی را داشته باشند. این مواد بایستی سبک و محکم بوده و از نظر ویژگیهای مکانیکی، استاتیکی و حرارتی هم مناسب باشند. براساس استانداردهای فضایی این مواد

18. Local

مجید مختاری، حمیده دانشور، مرتضی بهمنینژاد، شهریار ملکی، آرمین مسیبی، امیر ترابپور اصفهانی و ایمان آریانیان

بایستی بعد از طراحی و قبل از استفاده، مورد آزمونهای مختلف مکانیکی، استاتیکی و حرارتی قرارگیرند [۹, ۱۰].

در تعیین مواد حفاظ با توجه به محدودیتهای موجود در پرتاب ماهوارهها و همچنین در هنگام اجرای مأموریت، استفاده از مواد سبک و کم وزن ضروری است. بنابراین، شناخت نوع مواد مورد استفاده در حفاظهای مؤثر در برابر تابشهای فضایی اهمیت زیادی دارد [11]. ساختارهای حفاظ متفاوتی برای محافظت از قطعات حساس وجود دارند که هر کدام مقادیر متفاوتی از محافظت ایجاد می کنند [1۲].

با توجه به استحکام ویژهٔ بالا، میرایی سازهای و صلبیت بالای ساختارهای ساندویچی در اکثر ماهوارههای موجود در مدارهای LEO و GEO از ساختار لانه زنبوری استفاده می شود [۱۳]. از مزایای این ساختار امکان تعبیه لولههای 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 مهندسی ماهواره دارد [۱۴]. ساختار لانه زنبوری فلزی به واسطه کم بودن چگالی، سفتی خمشی بالا و تجربیات موفق در شرایط سخت محیطی و هم چنین مشخصات جذب انرژی بالا، دارای کاربردهای زیادی در زمینههای هوایی و فضایی است [۱۵–۱۷]. در بسیاری از مأموریتهای فضایی از این ساختار استفاده می شود اندازههای متفاوت استفاده می شود [۱۹]. در شکل (۲) سازوکار اندازههای متفاوت استفاده می شود [۱۹]. در شکل (۲) سازوکار نشان داده شده به ساختار ساندویچی لانه زنبوری فلزی نشان داده شده است.

با توجه به انجام آزمایشهای میزان تضعیف حفاظ در برابر چشمههای گاما که نوعی چشمه فوتونی محسوب می شوند، مختصری 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 بدهند. 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].

19. Outgassing

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



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

پديده فوتوالكتريك

اثرفوتوالکتریک 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 کنده شدن آن از لایه خواهد شد. احتمال وقوع این اثر زمانی افزایش مییابد که انرژی فوتون فرودی مساوی و یا بزرگتر از انرژی پیوندی الکترون از لایه آن باشد. الکترون کنده شده، فوتوالکترون نامیده میشود و فوتون فرودی کاملا در این فرآیند جذب میشود. جذب فوتوالکتریک متناسب با عدد اتمی (Z)، انرژی فرودی و چگالی فیزیکی ماده جاذب است و به صورت رابطهٔ (۱) بیان میشود [۵].

$$Z^{3} p / E^{3}$$

پديده كامپتون

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 بر خلاف 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 احتمال وقوع این پدیده بیشتر خواهد بود. در بافتهای انسانی 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 MeV یعنی 2 $2m_e C^2$

20. Beer-Lambert

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 مجذور عدد اتمی ماده است [۲۳].



شکل ۳- پدیدہ پراکندگی کامپتون

رابطه تضعيف تشعشعي چشمه فوتوني

زمانی که حفاظ در برابر چشمه فوتونی مانند پرتوهای ایکس و گاما قرار می گیرد، در صورتی که ضخامت جاذب کم و باریکه چشمه موازی باشد، شار گامای عبوری از حفاظ از رابطه بیر- لامبرت^{۲۰} پیروی می کند (رابطهٔ ۲) [۲۵, ۲۵].

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{(7)}$$

که در آن I شدت پرتوها پس از عبور از حفاظ، I₀ 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 پروتونهای پر انرژی 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 میکروماهوارهها 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].

۳٤ / فصلنامهٔعلمی- پژوهشی علوم و فناوری فضایی دوره ۱۵ / شماره ۲/ تابستان ۱۴۰۱ (پیاپی ۵۲)

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 HMWPE²¹ پرداخته شده در برابر چشمه نوترونی یرداخته شده است. نتایج نشان میدهد که در مواد آمیخته شده با نانوپودرهای بور، نسبت به دیگر مواد، نتایج بهتری برای مقابله با چشمههای نوترونی دارند [۳۱, 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 آنتنهای مخابراتی و بدنههای ماهوارهها استفاده می شود، در معرض تشعشع چشمه های پرتو گاما (امرسیوم، باریم و سزیوم) با انرژیهای ۶۰، ، ۳۸۵ و ۶۶۲ keV قرار داده شده است و نتایج آن با هم مقایسه شده است. میزان حفاظت بوجود آمده در هر یک از این ساختارها وابسته به ضخامت، جنس و مشخصات هندسی اجزای مختلف آنهاست. 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) ساندویچپنلهای این تحقیق و همچنین دسترسی به مواد اولیه آنها در کشور، نتایج بهدست آمده از این بررسی قابل استفاده برای طراحی سازههای فضایی و غیر فضایی است.

تحليل تجربى

برای ارزیابی میزان حفاظت ایجاد شده در برابر پرتوهای گاما، ۸ ساختار پر کاربرد 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 نمونهٔ استفاده شده در این تحقیق در جدول (۱) آورده شده است. اتصال رویه به هسته در تمام نمونههای ساندویچی با استفاده از چسبهای هوا-فضایی پایه اپوکسی انجام شده است. در نمونههای فضایی مواد استفاده شده مطابقت بالایی با شرایط خارج جو دارند (فشار خلاً در حدود Pa ۲۰-۱۱ ×۱/۳۲۲ (۱/۳۲۲) به نحوی که در عمده نمونه های استفاده شده، $m CVCM^{22}$ < 0.1) (گازش) تمام الزامات گازروی (گازش) ($m CVCM^{22}$

مجيد مختاري، حميده دانشور، مرتضى بهمنينژاد، شهريار ملكي، أرمين مسيبي، امير تراب پور اصفهاني و ايمان أريانيان

%و % 1> TML²³ رعایت شده است. از طرف دیگر، آلیاژهای استفاده شده برای لانه زنبوری و ساختار هندسی آن نیز در تطابق 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 آلوداین شدن هسته به عنوان الزامات سازهای فضایی است. روش توليد تمام سازههاي اين مقاله با استفاده از فشار منفى خلاً بوده است. نمونههای این تحقیق با فرایند اتوکلاو و کیسه خلاً در پژوهشگاه فضایی ایران و مرکز تحقیقاتی شهید قندی ساخته شدهاند.

أزمون حفاظت در برابر تشعشع

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



شکل ٤- طرحوارهای از فرایند اتوکلاو و سطح فشارهای مثبت و منفی اعمال شده بر روی ساندویچ پنل به همراه تغییرات دمایی وابسته به زمان (با مجوز مرکز تحقیقاتی شهید قندی)

23. Total mass loss



^{21.} High Molecular Weight Poly Ethylene (HMWPE) 22. Collected Volatile Condensable Material

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

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

نتايج

در این بخش پارامترهای تأثیرگذار بر میزان تضعیف تشعشعی بر نمونههای حفاظ که با چشمههای گاما پرتودهی شدهاند، مورد بررسی قرار گرفته است. برای تشریح نتایج از درصد افت تشعشعات عبوری و حفاظت ویژه²⁴ (ΔΙ/ΙΟ)/ρ) استفاده شده است.

اثر ابعاد سلول لانه زنبوري

ابعاد سلول در لانه زنبوری در واقع قطر دایره محیط شده در شش ضلعی است. برای تأثیر این پارامتر بر ضریب تضعیف تشعشعی از دو نمونهٔ #۳ و #۴ استفاده شده است. در این دو نمونه تمامی مشخصات مشابه است و تنها در اندازه سلول با هم تفاوت دارند که به ترتیب برابر با $\frac{1}{4}$ و $\frac{1}{2}$ اینچ است.



شکل ۵- چیدمان آزمون برای اندازهگیری 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 میرسد، با کوچکتر شدن اندازه سلول، راه برای نفوذ و ورود ذرات زیان بار کمتر شده و بنابراین تأثیر حفاظت شیلد بیشتر است.

24. Specific shielding (\overline{SS})

فصلنامهٔ علمی- پژوهشی علوم و فناوری فضایی / ۵۵ دوره ۱۵/ شمارهٔ ۲ / تابستان ۱۴۰۱ (پیابی ۵۲)

اثر ضخامت پنل

با فرض کم بودن تأثیر تغییر ضخامت رویهٔ آلومینیومی که در محدوده ۰/۰۲ میلیمتر است، برای در نظرگیری اثر مجموع ضخامت رویههای آلومینیمی و هسته از دو نمونه #۱ و #۴ استفاده شده است. همانطور که در جدول (۴) نشان داده شده است، در نمونه #۴ بهرغم ضخامت بیشتر، دارای افت کمتری است. این تغییرات در انرژیهای کمتر بیشتر ظاهر می شود.

جدول ۱- مشخصات هندسی، ساختاری، چگالی (kg/m³-p) و روش تولید نمونه های تست شده برای بررسی پارامترهای مربوط به حفاظت تشعشعات فضایی



لی ا فصلنامهٔ علمی- پژوهشی علوم و فناوری فضایی دوره ۱۵ / شماره ۲/ تابستان ۱۴۰۱ (پیایی ۵۲)



گاما برای پرتودهی حفاظ	۲- چشمەھاى راديوايزوتوپ	جدول
------------------------	-------------------------	------

Am-241	Ba	-133	Cs-137	منبع
۶.	٨٠	308	887	انرژی (keV)

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

	انرژی(keV)				
#3	#3 #4				
%(ΔI/I0)	SS		%(ΔI/I0)	SS	
-1/49	-•/۵Y		-4/21	-1/14	۶.
-۲/۳۲	-1/1+		-7/81	-•/YA	557

جدول ٤- اندازه گیری تأثیر ضخامت پنل روی حفاظت تشعشعی

	انرژی(keV)				
#1	#1				
%(ΔI/I0)	SS		%(ΔI/I0)	SS	
-۵/۲۶	-٢/۴٩		-4/21	-1/14	۶.

مجید مختاری، حمیده دانشور، مرتضی بهمنینژان شهریار ملکی، آرمین مسیبی، امیر ترابپور اصفهانی و ایمان آریانیان

	انرژی(keV)			
_۹/۰۳	-4/17	-۵/۲۸	-1/44	٨٠
-٣/٨١	١/٨١	_٣/૧٧	-1/11	۳۵۶
-7/74	-1/11	-۲/۸۱	-•/YA	887

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 می کند. بنابراین در انرژیهای کمتر این اثر بیشتر ظاهر می شود و بنابراین وجود اثرات ثانویه پراکندگی کامپتون که در اندرکنش فوتون با شیلد ظاهر می شود می تواند بر خروجی تأثیرگذار باشد. یعنی علاوه بر فوتونهای اولیه، تعدادی نیز در اثر پراکندگی کامپتون در آشکارساز ظاهر خواهد شد. هرچقدر مقدار نیز در اثر پراکندگی کامپتون در آشکارساز ظاهر خواهد شد. هرچقدر مقدار با توجه به وجود اثرات کامپتون بیشتر در نمونه #۴ نسبت به نمونه #۱، با توجه به وجود اثرات کامپتون بیشتر در نمونه #۴ نسبت به نمونه #۱، فنت کمتری از شدت ورودی ظاهر می شود. در حالی که در انرژیهای بیشتر افت کمتری از شدت ورودی ظاهر می شود. در حالی که در انرژیهای بیشتر مونامت شیلد است و با توجه به اینکه کامپتون در این انرژیها کمتر ظاهر ضخامت شیلد با ضخامت بیشتر افت بیشتری خاهر خواهد شد.

اثر لایه فلزی استیل

برای مقایسه این اثر از دو نمونه ۲۲ و ۶۶ استفاده شده است. همانطور که در توضیحات ارائه شده است برای نمونه ۲۲، یک سمت ساندویچ – لایه فلزی به ضخامت ۱۲۵ میکرون از جنس استیل ۳۰۶ نشانده شده است. بنابراین، به عبارتی مقدار ضخامت نیز در مجموع در اینجا افزایش یافته است، توجیه نتایج بهدست آمده تقریباً مشابه با اثر مجموع ضخامت آلومینیم و هسته است. در انرژیهای کمتر اثر غالب پراکندگی کامپتون است و بنابراین علی غم ضخامت بیشتر نمونه ۲۷، شاهد افت کمتری خواهیم بود و این امر به علت وجود پراکندگیهای ناشی از اثرات کامپتون است که در انرژیهای کمتر نیز بیشتر ظاهر می شود. در انرژی بیشتر اثر ضخامت غالب بوده و نمونه با ضخامت بیشتر دارای افت بیشتری خواهد بود (جدول ۵).

حفاظت تشعشعي	فلزى روى ا	تأثير رويهٔ	۵- اندازه گیری	جدول
--------------	------------	-------------	-----------------------	------

	انرژی(keV)				
#6 #7					
%(ΔI/I0)	SS		%(ΔI/I0)	SS	
-19/74	-۴/۴۱		-17/87	-٣/٨۴	۶.
-٣/۴•	-•/٧٨		-٣/٧ ۴	-•/A١	887

اثر تعداد لايهها

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

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

نتایج بهدست 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 مثبتی 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.

جدول٦- اندازه گیری تأثیر تعداد لایه های رویهٔ پنل روی حفاظت تشعشعی

	4	سطح انرژی(keV)		
#	6	#8		
%(ΔI/I0)	SS	%(ΔI/I0)	SS	
-19/74	-۴/۴۱	-۵/ <i></i> λ۶	-1/78	۶۰
-٣/۴•	-•/YA	-7/7•	-٠/۴۸	887

اثر حضور هسته

برای مقایسه تأثیر و نقش هسته بر میزان افت شدت از دو نمونه #۸ و ۲۲ استفاده شده است. ماهیت هسته با توجه به وجود روزنههای لانه زنبوری در آن دارای اثر مخربی بر میزان تضعیف شیلد خواهد بود. این نتایج برای انرژیهای مختلف برای مقایسه در جدول (۲) نشان داده شده است. اثر مخرب در انرژیهای بیشتر کمتر خواهد شد.

جدول ۷- اندازه گیری تأثیر حضور هسته روی حفاظت تشعشعی

	انرژی(keV)				
#2			#8		
%(ΔI/I0)	SS		%(ΔI/I0)	SS	
_٩/٣۶	-۴/۵۱		-۵/ <i></i> λ۶	-1/78	۶.
-۲/۲۹	-1/1•		-7/7•	-•/۴٨	888

مقايسه كلى نمونهها

برای مقایسه کلی از همه نمونهها در دو انرژی keV و ۶۰ keV و ۶۶۲ keV استفاده شده است. همان طور که استفاده شده است. این نتیجه در شکل (۶) نشان داده شده است. همان طور 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 #۷و #۸ دارای افت قابل قبول تقریباً ۲۰ و ۱۸ درصدی هستند. بنابراین، بهینهترین شیلد محسوب می شوند.



شکل ۲- مقایسه میزان افت ایجاد شده ناشی از حفاظت ساندویچپنلهای سازهای در برابر تابش دو سطح انرژی ۶۰ keV و ۶۶۲ keV

فصلنامهٔ علمی- پژوهشی علوم و فناوری فضایی / ۷۲ دوره ۱۵/ شمارهٔ ۲ / تابستان ۱۴۰۱ (پیایی ۵۲)

جمعبندى

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 چشمههای 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 رویه های آلومینیمی و هسته مورد بررسی قرار گرفته است.

هرچقدر اندازه سلول كوچكتر باشد، افت بیشتر است. این اتفاق در انرژی.های بیشتر، کمتر مشهود است. نتایج مربوط به تأثيرات مجموع ضخامت هسته و لايه آلومينيمي حكايت از تأثير متقابل این اثر با پراکندگی کامیتون دارد. در انرژیهای کمتر اثر غالب پراکندگی است و بنابراین موجب می شود تعداد ذرات بیشتری به آشکارساز برسند. در انرژیهای بالاتر اثر غالب همان ضخامت شیلد است و بنابراین در ساختار با ضخامت بیشتر شاهد افت كمترى خواهيم بود. اضافه شدن لايه فلزى موجب افزايش ضخامت نمونه شده اما این تأثیر در افت شار تنها در انرژیهای بالاتر ظاهر می شود و در انرژی های کمتر، به علت اثر غالب پراکندگی کامپتون، افت کمتری مشاهده خواهد شد. مقایسه دو نمونه مشابه با تعداد لایه های متفاوت حاکی از عدم اثریذیری افت شار نسبت به افزایش تعداد لایه ها دارد. این نتیجه نیز با توجه به اثر غالب پراکندگی کامپتون به خصوص در انرژی های کم، قابل توجیه است. ماهیت هسته با توجه به وجود روزنههای لانه زنبوری در آن دارای اثر مخربی بر میزان تضعیف شیلد خواهد بود. اثر مخرب در انرژی های بیشتر کمتر خواهد شد. برای اکثر نمونه ها 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 کاملا 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 می باشند. بنابراین، بهینه ترین شیلد محسوب می شوند. در کل با توجه به افت کم شار، این ساختارها به تنهایی مناسب کاربردهای فضایی برای مقابله با تشعشعات فضایی نمی باشند. وجود چسب و رزین پیش بینی و توجیه نتایج را برای مقابله با پرتوهای گاما پیچیده می کند. نتایج بدست آمده می تواند برای بودجه بندی حفاظت تشعشعی بسیار حائز اهميت باشد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مجید مختاری، حمیده دانشور، مرتضی بهمنینژاد، شهریار ملکی، آرمین مسیبی، امیر ترابپور اصفهانی و ایمان آریانیان

- [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/transportati on/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
- [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 (Tl) detector and comparison with XCOM and Monte Carlo data," *Science and technology of nuclear installations*, vol. 2016, 2016.
- [25] A. Kiyani, A.A. Karami, M. Bahiraee, 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 Radiatio6n 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).

فصلنامهٔ علمی- پژوهشی علوم و فناوری فضایی دوره ۱۵ / شماره ۲/ تابستان ۱۴۰۱ (پیایی ۵۲)

مراجع

- 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-riskindex-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.

فصلنامهٔ علمی- پژوهشی علوم و فناوری فضایی ٦٩ / دوره ۱۵/ شمارهٔ ۲ / تابستان ۱۴۰۱ (پیاپی ۵۲)

[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. بررسی تجربی تأثیر استفاده از چند سازه فضایی ساندویچی برای حفاظت در برابر تشعشعات فضایی

[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.