



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 4, No. 1, pp.: 105-118
2024

DOI:
10.22034/jssta.2024.442921.1150

Article Info

Received: 2024-02-17

Accepted: 2024-06-24

Keywords

space radiation, COTS,
shielding, total ionizing dose,
non-ionizing dose

How to Cite this article

Z. Bokaie, H. Daneshvar, S. A. H Feghhi, A. Shokri, "Investigation and Comparison of Materials Using in Radiation Protection of Commercial Parts in LEO Satellite Mission using SPENVIS Software", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 4 (1), p.:105-118, 2024.

Investigation and Comparison of Materials Using in Radiation Protection of Commercial Parts in LEO Satellite Mission using SPENVIS Software

Zahra Bokaie^{1*}, Hamideh Daneshvar², Seyed Amir Hossein Feghhi³, Aliasghar Shokri⁴

1. Department of physics, Payam Noor University, Tehran, Iran, z.bokaie@student.pnu.ac.ir
2. Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran, hdaneshvar@aeoi.org.ir
3. Department of Radiation Application, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, a_feghhi@sbu.ac.ir
4. Department of Theoretical physics and Nano, Faculty of Physics, Alzahra University, Tehran, Iran, aashokri@alzahra.ac.ir
* Corresponding Author

Abstract

Radiation damages have destructive effects on the electronic components of satellites. Due to financial reasons and the presence of different restrictions, the utilization of commercial components ended up common in short-term and low-altitude missions. The most effective method of protection against radiation is the use of shields. The results of calculations obtained from PSTAR and ESTAR software show that in case heavier metals are utilized, the energy range of particles to stop increases. The result of SHIELDDOSE, MULASSIS, PSTAR, and ESTAR software calculations is that the amount of thickness of different materials for the radiation tolerance of commercial parts does not differ much in terms of condensation thickness. Also, there is no need for complex protection and it can be used for usual protections. The maximum thickness required for the radiation tolerance of commercial parts is 0.5 mm from the combination of Aluminum and Tantalum. In order to achieve the best result considering the mass budget, it is better to use polyethylene material. From the results of the calculations to change the permutations of the aluminum and polyethylene shields, it can be concluded that it is better to have the first layer of polyethylene and the next layer of Aluminum.



دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isre.ac.ir

دو فصلنامه
علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال چهارم، شماره ۱،
صفحه ۱۰۵-۱۱۸
بهار و تابستان ۱۴۰۳

DOI:
10.22034/jssta.2024.442921.1150

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴

واژه‌های کلیدی

تشعشعات فضایی، قطعات COTS،
حفاظ‌سازی، دز یونیزان کل، دز
غیر یونیزان

نحوه استناد به این مقاله

زهره بکایی و همکاران، " بررسی و مقایسه مواد برای استفاده در حفاظ سازی تشعشعی قطعات تجاری در ماموریت ماهواره LEO با استفاده از نرم افزار SPENVIS"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد چهارم، شماره اول، صفحات ۱۱۸-۱۰۵، ۱۴۰۳.

مقاله پژوهشی

بررسی و مقایسه مواد برای استفاده در حفاظ سازی تشعشعی قطعات تجاری در ماموریت ماهواره LEO با استفاده از نرم افزار SPENVIS

زهره بکایی^{۱*}، حمیده دانشور^۲، امیرحسین فغهی^۳، علی اصغر شکری^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران z.bokaie@student.pnu.ac.ir
 - ۲- پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران، ایران hdaneshvar@aeoi.org.ir
 - ۳- گروه کاربرد پرتو، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، a_fegghi@sbu.ac.ir
 - ۴- گروه فیزیک نظری و نانو، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران، aashokri@alzahra.ac.ir
- * نویسنده مسئول

چکیده

آسیب‌های پرتویی اثرات مخربی بر قطعات الکترونیکی ماهواره‌ها دارند، به دلایل اقتصادی و وجود محدودیت‌های مختلف استفاده از قطعات تجاری در ماموریت‌های کوتاه مدت و ارتفاع کم رایج شده است. کارآمدترین روش محافظت در برابر تشعشعات، استفاده از حفاظ است. هدف از انجام این کار، بررسی بهینه حفاظ در ماموریت ۳ ساله در مدار LEO با در نظرگیری مقاومت تشعشعی قطعات تجاری با استفاده از نرم‌افزار SPENVIS و کدهای SHIELDOSE و MULASSIS است. نتایج محاسبات حاصل از نرم افزارهای PSTAR و ESTAR نشان می‌دهد در صورت استفاده از فلزات سنگین‌تر، محدوده انرژی ذرات برای توقف افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از محاسبات نرم‌افزارهای SHIELDOSE، MULASSIS، PSTAR و ESTAR نشان می‌دهد، که ضخامت چگالشی مواد مختلف جهت حفاظت تشعشعی قطعات تجاری، تفاوت زیادی با هم ندارد. همچنین نتایج حاصل از نرم‌افزارهای SHIELDOSE، MULASSIS، PSTAR و ESTAR نشان می‌دهد مقدار کمینه لازم بر حسب ضخامت چگالشی جهت دست بایی به میزان تحمل تشعشعی قطعات تجاری، در هنگام استفاده از مواد مختلف تفاوت چندانی با هم ندارد. همچنین نیاز به حفاظ‌سازی پیچیده‌ای نبوده و می‌توان از حفاظ‌های معمول نیز استفاده کرد. حداکثر مقدار ضخامت لازم برای تحمل تشعشعی قطعات تجاری به اندازه 5/0 mm از ترکیب آلومینیوم و تانتالیوم است. برای دستیابی به بهترین نتیجه با در نظرگیری بودجه جرمی، بهتر است از ماده پلی‌اتیلن استفاده شود. از نتایج محاسبات برای تغییر جایگشت‌های دو حفاظ آلومینیوم و پلی-اتیلن می‌توان نتیجه گرفت که بهتر است لایه اول پلی‌اتیلن و بعدی آلومینیوم باشد.

۱- مقدمه

(...) را برآورده کنند، در ماهواره مورد استفاده قرار می‌گیرند. کیفیت اجزای سازنده و مونتاژ می‌تواند به طور گسترده‌ای متفاوت باشد. همچنین غربالگری‌های بسیار کم و محدودی انجام می‌گیرد. استفاده از COTS برای مأموریت‌هایی با دز تشعشع بسیار کم، یا در مدارهای کم ارتفاع (LEO¹⁰) یا عمر کوتاه ماموریت، مناسب است. برای ماموریت‌های غیر پیچیده و تکراری در مدارهای کم ارتفاع که احتمال موفقیت زیاد می‌باشد، استفاده از طرح‌هایی بر مبنای قطعات COTS مناسب است [5]. بطور کلی استفاده از این قطعات، صرفه جویی در زمان، به روز بودن، صرفه اقتصادی، محدودیت‌های دسترسی به تجهیزات و افزایش استفاده از ماهواره‌های کوچکتر در مدار LEO را در بر دارد [6]. از آن جا که اکثر قطعات مهم به کار رفته در سیستم‌های الکترونیکی دارای پایه سیلیکون بوده و بر اساس فن‌آوری نیم‌رسانای VLSI¹¹ ساخته می‌شوند، بنابراین بیشترین بررسی صورت گرفته در زمینه آسیب پرتویی بر روی سیلیکون معطوف شده است.

کارآمدترین روش محافظت در برابر تشعشعات استفاده از حفاظ است. به نظر می‌رسد استفاده از حفاظ برای کاهش شدت تشعشعات، تنها ابزار عملی برای کاهش تأثیر تشعشعات بر فضاوردان و محموله‌های ماهواره‌ای است. برای حفاظ‌سازی، علاوه بر بررسی اثر حفاظتی مواد مختلف می‌توان بر روی چیدمان و ساختار حفاظ هم بهینه‌سازی انجام داد. به طور سنتی، آلومینیوم ماده‌ای استاندارد است که در کاربردهای فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هم از حفاظ پرتویی و هم از الزامات عملکردی ساختاری برخوردار است. اما مواد بسیار دیگری هم در این حوزه کاربرد دارند، از جمله پلی‌اتیلن، تالیوم و ... ، که در بسیاری از کارهای محققین از آنها بهره گرفته‌اند. همچنین می‌توان با ترکیب مواد و ساختار چند لایه‌ای، عملکرد مواد را بهبود بخشید [8][7][6].

شیشه‌های اکسید سیلیکون نیز می‌تواند به عنوان حفاظ در کاربردهای فضایی مورد استفاده قرار گیرد. مواد پلیمری که در ساخت تجهیزات که در مدارهای کم ارتفاع به کار می‌روند، می‌توانند با استفاده از لایه‌های نازک محافظ SiO₂ در برابر فرسودگی ناشی از اکسیژن اتمی¹² (AO) حفاظت شوند. در این کار از ماده SiO₂ نیز برای محاسبات حفاظ استفاده شده است [9]-[10].

با توجه به اینکه در سازه ماهواره از آلومینیم و آلیاژهای آن در ضخامت بین ۱-۲ mm استفاده می‌شود، بنابراین در این کار ضخامت ۲ mm به عنوان مبنای کار جهت مقایسه در نظر گرفته شده است [11]-[12].

ماموریت‌های طولانی مدت در فضا، با چالش‌های زیادی روبروست. از جمله این چالش‌ها، خطرات ناشی از قرار گرفتن در معرض تابش عمیق در فضا می‌باشد. محیط تابش، متشکل از پروتون‌ها و الکترون‌های باردار به دام افتاده^۱، پروتون‌های خورشیدی^۲، تابش کیهانی کهکشانی^۳ و نوترون‌هاست که می‌تواند باعث خرابی یا نقص عملکرد قطعات و تجهیزات الکترونیکی ماهواره شوند [1]-[2]. اثرات محیطی تشعشعات فضایی به سه دسته کلی اثرات دز یونیزان کل (TID)^۴، اثرات تک رخدادی (SEE)^۵ و اثرات آسیب جابجایی (DD)^۶ یا آسیب دز غیر یونیزان (NID) طبقه‌بندی می‌شوند [2]. آسیب دز یونیزان و غیر یونیزان از نوع آسیب‌های تجمعی هستند و حفاظ سازی می‌تواند موجب کاهش اثرات این نوع آسیب‌ها شود. اما حفاظ سازی بر روی آسیب SEE تأثیر زیادی ندارد [3]-[4].

انتخاب قطعات در پروژه‌های فضایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به طور کلی، سه نوع دسته بندی قطعات، برای سامانه‌های فضایی وجود دارد. در یک طرف استفاده از قطعات سخت شده پرتویی^۷ یا رده‌ی فضایی^۸ است که بنا به شرایط و امکانات، انتخاب بین دو دسته Rad Hard و Rad Tolerant صورت می‌گیرد. در طرف دیگر COTS^۹ وجود دارد. قطعات Rad Hard، قطعاتی هستند که از ابتدا صرفاً برای استفاده در سامانه‌های فضایی تولید می‌شوند و مقاوم در برابر پرتو می‌باشند. به همین علت، پیروسه ساخت بسیار پرهزینه‌ای دارند و اغلب دارای تکنولوژی‌های دهه‌های قبل هستند [5]. قطعات Rad Tolerant به عنوان یک قطعه تجاری یا صنعتی تعریف می‌شود که با در نظر گرفتن تشعشعات فضایی ساخته نشده است، اما با آزمایش مشخص شده است که در دز معینی کارایی دارد [5]. اکثر قطعات تجاری تا ۵ krad در برابر تابش مقاوم هستند. بسیاری از آنها تحمل پرتوی ۲۰ krad یا بیشتر را دارند. برخی از آنها قبل از ۱ krad خراب می‌شوند. بدون آزمایش، نمی‌توان پیش بینی کرد که یک قطعه در کدام دسته قرار می‌گیرد. کنترل و غربالگری با تعداد بالا، برای این نوع قطعات بسیار مهم است. فروشندگان تجاری ممکن است فرایندهای تولید خود قطعه را، تغییر دهند. یک قطعه خاص ساخته شده در سال گذشته ممکن است به تابش مقاوم باشد، در حالی که قطعات ساخته شده در سال جاری ممکن است مقاوم نباشد. قطعاتی که برای ماهواره استفاده می‌شوند باید کاملاً با قطعاتی که تحت آزمایش تابش قرار گرفته‌اند، یکسان باشند [5]. در طراحی بر مبنای قطعات COTS، قطعات تجاری و زیرسیستم‌ها خریداری می‌شوند و به شرطی که سایر الزامات محیطی (ارتعاش، دما و

⁷radiation hardened

⁸space grade

⁹commercial-off-the shelf

¹⁰Low Earth Orbit

¹¹Very Large Scale Integrated semiconductor (VLSI)

¹²atomic oxygen

¹trapped charged protons and electrons

²Solar Proton Events

³Galactic Cosmic Rays

⁴Total Ionization Dose

⁵Single Event Effects

⁶Displacement Damage

نرم افزار SPENVIS، از طریق یک چارچوب خدمات محور، مبتنی بر وب، از مدل‌های مربوط به محیط فضایی پرخطر پشتیبانی می‌کند. برای یک مسیر فضاپیما، مجموعه‌ای از مدل‌های پرتویی و اثرات، موجود است [17]. برای اجرای مدل‌های پرتویی، ابتدا باید مدار شبیه سازی شود، بنابراین نیاز به تعدادی پارامتر ورودی می‌باشد، سپس با توجه به مشخصات مدار و منابع پرتویی، داده‌های شار و شارش ذرات ماموریت، محاسبه و پیش‌بینی می‌شود. بعد از آن SPENVIS، با در نظر گرفتن آسیب‌های پرتویی، از ذرات به دام افتاده و طیف جریان پروتون‌های خورشیدی برای تخمین دز پشت حفاظ آلومینیومی استفاده می‌کند. از دیگر پارامترهای ورودی مورد نیاز برای محاسبات، ضخامت حفاظ به کار رفته است که می‌توان آن را با استفاده از مجموعه‌ای از ضخامت‌های پیش‌فرض (بر حسب میلی‌متر)، از 0/5 mm تا 20 mm وارد کرد.

دو کد ترابرد تابش که در این مطالعه استفاده شده است SHIELDOSE و MULASSIS که در نرم‌افزار SPENVIS تعبیه شده است. در حالی که SHEILDLOSE می‌تواند اثر حفاظتی آلومینیوم را فقط شبیه‌سازی کند، MULASSIS می‌تواند اثر حفاظتی انواع مواد از جمله آلومینیوم را شبیه‌سازی کند. علاوه بر این مورد آخر، امکان شبیه‌سازی ساختارهای لایه‌ای را دارد، که برای تجزیه و تحلیل کامپوزیت‌ها مناسب است [18]. SHIELDOSE یک کد کامپیوتری است، که دز جذب شده را به عنوان تابعی از عمق، در مواد (حفاظ آلومینیومی فضاپیما)، با توجه به شارش الکترون و پروتون در مدار مورد نظر تعیین می‌کند. این کد از داده‌های دز عمقی^{۱۴} از پیش محاسبه شده و تک‌انرژی، با چشمه‌هایی به صورت همسانگرد تابش‌های فرودی بر محیط آلومینیومی تخت یکنواخت استفاده می‌کند. چنین داده‌هایی به ویژه برای پیش‌بینی دز معمول در موقعیت‌هایی که پیچیدگی‌های هندسی و ترکیبی فضاپیما مشخص نیست، مناسب هستند [19]–[20]. GEANT4^{۱۵} یک نرم‌افزار تحلیل پرتویی مبتنی بر برای شبیه‌سازی انتقال ذرات تابشی از طریق یک ماده هدف است و در پیش‌بینی اثر حفاظتی تابشی مواد همگن و مرکب برای ماهواره‌ها در مدار، استفاده شده است [19].

۱-۱- پیشینه تحقیق

با روی آوری کشور به طراحی و ساخت ماهواره، زمینه انجام فعالیت در حوزه تشعشعات فضایی آغاز شده است. بیشتر کارهایی که سابق بر این انجام شده در حوزه تعیین آسیب پرتویی و محاسبات حفاظ با استفاده

در این پژوهش از انواع مختلفی از مواد، برای محاسبات حفاظسازی استفاده شده است.

محققان تشعشعات فضایی، مدل‌های مختلفی را برای مدل‌سازی عناصر محیط تشعشع ایجاد کرده‌اند. این مدل‌ها بر اساس مجموعه داده‌های ماموریت‌های فضایی مختلف است که در مدارهای مختلف، پرتاب شده‌اند. تجزیه و تحلیل محیط تابش برای یک ماموریت فضایی، با استفاده از این مدل‌ها انجام می‌شود و سپس روش‌های حفاظتی بعدی اعمال می‌شود [13].

اثر بخشی حفاظتی مواد مختلف را می‌توان با استفاده از کدهای ترابرد ذرات بررسی کرد. این کدها، ترابرد ذرات باردار را در محیط تابش فضا از طریق مواد مختلف و برهمکنش‌های مختلف بین تابش و مواد، مدل می‌کنند [14]. کدهای SPENVIS، MCNP، GEANT4 و SHIELDOSE-2 به صورت مستقل و یا در بسته‌های نرم‌افزاری مانند OMERE و SPENVIS در دسترس هستند. این بسته‌ها با توجه به ویژگی‌های منحصر به فردی که دارند، انجام محاسبات را برای کاربر آسان‌تر می‌کنند. در این کار از بسته‌ی نرم‌افزاری SPENVIS استفاده شده که در ادامه به طور مختصر به معرفی این نرم‌افزار پرداخته شده است. هم‌چنین برای دستیابی به برد ذرات الکترون و پروتون از نرم‌افزارهای تحت وب ESTAR و PSTAR استفاده شده است.

ESTAR، PSTAR و ASTAR نرم‌افزارهای تحت وب هستند که دارای پایگاه داده، برای محاسبه توان توقف و برد الکترون‌ها، پروتون‌ها و ذرات آلفا می‌باشند. روش‌های محاسباتی توسط اعضای کمیته ICRU^{۱۳} توسعه داده شده اند [15]. جداول مربوط به برد و توان توقف الکترون‌ها برای هر ماده خاص قابل استفاده می‌باشد. این محاسبات، برای پروتون‌ها و ذرات آلفا برای ۷۴ ماده توسعه داده شده است.

در حین عبور از ماده، ذرات باردار یونیزه می‌شوند و بنابراین در مراحل متعددی انرژی از دست می‌دهند، تا زمانی که انرژی آن‌ها (تقریباً) صفر شود. فاصله تا این نقطه، برد ذره نامیده می‌شود. برد، بستگی به نوع ذره، انرژی اولیه آن و ماده‌ای که از طریق آن عبور می‌کند، دارد [16]. معمولاً در محاسبات مربوط به برآورد برد ذرات و حفاظ سازی از مفهوم ضخامت چگالشی استفاده می‌شود. ضخامت چگالشی از حاصل ضرب ضخامت در چگالی ماده به دست می‌آید و یک عدد ثابت نیست. واحد این کمیت بر حسب گرم بر سانتی متر مربع است.

¹⁴ depth-dose

¹⁵ Multilayered Shielding Simulation Software

¹³International Commission on Radiation Units and Measurements

لایه، از پلی اتیلن و آلومینیوم و با تغییر ترتیب مواد، اثر حفاظتی آنها و دز انباشته شده در سیلیکون اندازه گیری و مقایسه شده است.

۲-۱- مشخصات ماموریت و مدار

ویژگی های محیط تابش به مشخصات ماموریت بستگی دارد و این مشخصات، تعیین کننده میزان خسارت هستند. بنابراین برنامه ریزی و طراحی ماموریت بسیار حائز اهمیت است، باید اقدامات پیشگیرانه انجام شود تا بتوان در برابر محیط تابش، ایمنی قابل قبولی ایجاد کرد. با توجه به هدف کار یعنی بررسی استفاده از قطعات تجاری، ماموریت مد نظر جهت بررسی در مدار کم ارتفاع (LEO) در نظر گرفته شده است. بازه زمانی ماموریتی نیز ۳ ساله است. مشخصات این مدار در جدول (۱) قابل مشاهده است.

جدول ۱- مشخصات مدار ماموریت

Perigee altitude	500 km
Apogee altitude	500 km
Inclination	55°
Mission start	01/01/2023
Mission end	31/12/2025

چشمه های تابشی این مدار، پروتون ها و یون های خورشیدی، ذرات به دام افتاده شامل الکترون ها، پروتون ها و پرتوهای کیهانی کهکشانی، در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج

نتایج محاسبات با استفاده از نرم افزار SPENVIS در این قسمت ارائه شده است.

۳-۱- دست یابی به شار انواع ذرات تابشی در ماموریت

در شکل (۱) و شکل (۲)، برای نمونه، نمودار شار چشمه های تابشی پروتون های خورشیدی و الکترون های به دام افتاده نشان داده شده است. اما در محاسبات چشمه های تابشی، پروتون ها و یون های خورشیدی، ذرات به دام افتاده شامل الکترون ها، پروتون ها و پرتوهای کیهانی کهکشانی، در نظر گرفته شده است.

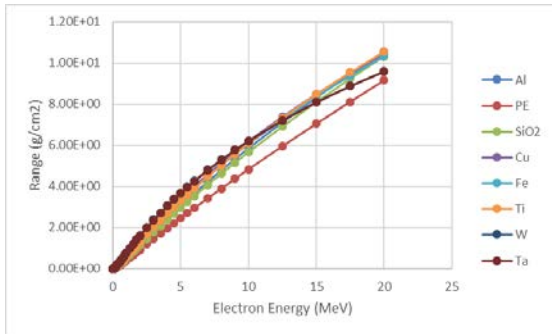
از نرم افزار OMERE بوده است. در ادامه، چند نمونه از کارهای تحقیقاتی انجام شده، آمده است:

در [21] مقاومت تشعشعی ترانزیستورهای GaN با در نظرگیری آسیب TID و برای قرارگیری ماهواره در مدار LEO مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهشی دیگر، سه نوع آسیب پرتویی شامل دز یونیزان، آسیب جابه جایی و تک رخدادی را با استفاده از نرم افزار OMERE مورد بررسی قرار داده شده است [22]. در تحقیقی دیگر، طراحی لایه های حفاظت تشعشعی برای محیط های الکترونی و پروتونی که برای همه شرایط فضایی و تمامی مدارها قابل استفاده باشند را در نظر داشتند. بعد از انجام طراحی و انتخاب تعداد لایه ها، حفاظ مدنظر با کمک نرم افزارهای متلب و MCNPX، تحلیل و بهینه سازی شده است [23]. در مقاله ای دیگر، با رویکرد محاسباتی به بررسی مهم ترین آسیب های پرتویی شامل TID، DD و SEU در ماهواره ای که دارای ماموریت در LEO می باشد، پرداخته اند [24]. در مقاله [25]، هدف بررسی روش های کاهش بودجه وزنی با ملاحظه آسیب پرتویی دز یونیزان می باشد. هدف از انجام این کار، بررسی مواد مختلف برای مقابله با اثرات تجمعی تشعشعات فضایی TID و NID با استفاده از قابلیت های مختلف نرم افزار SPENVIS می باشد. همچنین برای اعتبارسنجی نتایج از نرم افزارهای PSTAR و ESTAR نیز استفاده شده است. این کار برای ماموریت ماهواره LEO و با در نظرگیری مقاومت تشعشعی قطعات تجاری انجام شده است.

۲- روش انجام کار

همانطور که در مقدمه گفته شد، حفاظ سازی برای بهره گیری از قطعات COTS بسیار حائز اهمیت است، بنابراین برای یافتن یک حفاظ مناسب، ابتدا نیاز به محاسبات و شبیه سازی مواد مختلف و مناسب می باشد. در ابتدا برای برآورد اولیه از میزان ضخامت مورد نیاز از حفاظ های مختلف، برد ذرات پروتون و الکترون در حفاظ های مختلف با استفاده از نرم افزارهای تحت وب PSTAR و ESTAR به دست آمده است. در مرحله بعد، برای در نظرگیری تاثیرپذیری اثرات TID نسبت به حفاظ، ابتدا با استفاده از نرم افزار SHIELDOSE حفاظ های مختلف از جمله آلومینیوم، تیتانیوم، تانتالیوم، آهن، آلیاژ مس-تنگستن و یک نمونه حفاظ دولایه (متشکل از آلومینیوم و تانتالیوم) مورد بررسی قرار گرفته است و مقدار TID رسیده به سیلیکون برای هر حفاظ در حضور چشمه های تابشی مدار موردنظر، برای ضخامت های مختلف، محاسبه شده است. سپس در مرحله بعد، برای در نظرگیری هم زمان اثرات TID و NID^{۱۶} با استفاده از MULASSIS برای حفاظ های آلومینیوم، پلی اتیلن و SiO₂ در ضخامت های مختلف، شبیه سازی ها و محاسبات انجام شده است و در آخر، با شبیه سازی توسط MULASSIS، حفاظی دو

¹⁶ Non Ionizing dose



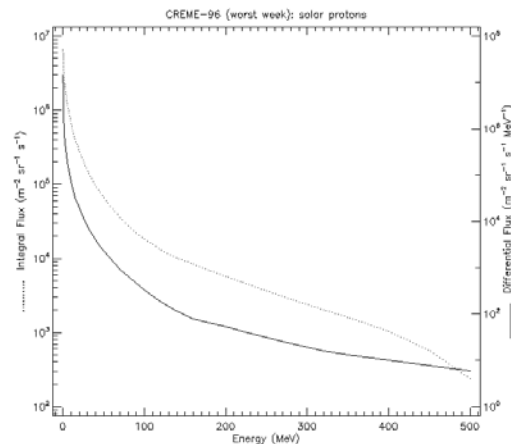
شکل ۳- منحنی مقایسه برد ذرات الکترون، در حفاظ‌های مختلف

در جدول ۲، خلاصه نتایج را می‌توان ملاحظه نمود. از آنجا که بیشینه انرژی الکترون‌های به دام افتاده ۱۰ MeV است، بنابراین برای تعیین بیشینه مقدار حفاظ، این مقدار انرژی ملاک است. هم‌چنین برای تعیین حداکثر مقدار انرژی که توسط این مواد حفاظ تحت تاثیر قرار گرفته و به عبارتی ذرات با انرژی متوقف شوند، ضخامت ۲ mm از حفاظ‌ها در نظر گرفته شده است.

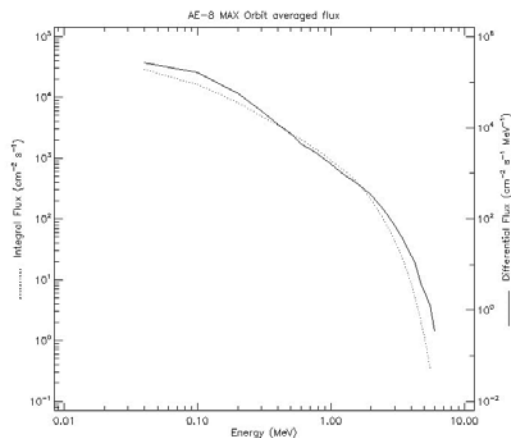
جدول ۲- مقایسه حداکثر انرژی الکترون، در ضخامت ۲ mm از حفاظ‌های مختلف و تعیین بیشینه ضخامت حفاظ برای حداکثر انرژی الکترون

shield	2mm Equivalent thickness (g/cm2)	Energy range (MeV)	Maximum thickness for 10 MeV (g/cm2)	Maximum thickness for 10 MeV (cm)
Al	0.54	0.9 - 1	5.86	2.17
PE	0.193	0.1 - 0.12	4.83	5.0
SiO2	0.53	1.0 - 1.25	5.67	2.14
Cu	1.738	2 - 2.5	6.18	0.69
Fe	1.57	2 - 2.5	6.08	0.77
Ti	0.9	1.25 - 1.5	6.1	1.35
W	3.856	5 - 5.5	6.21	0.32
Ta	3.338	4 - 4.5	6.21	0.37

همانطور که از نتایج جدول ۲، بر می‌آید، در صورت استفاده از ضخامت ۲ mm از حفاظ، برای مثال حداکثر مقدار انرژی الکترون که می‌تواند توسط حفاظ‌ها حذف شود، برای حفاظ‌های آلومینیوم، پلی‌اتیلن و اکسید سیلیکون به ترتیب در محدوده ۰/۹ - ۱ MeV، ۰/۱۲ - ۰/۱ MeV و ۱/۲۵ - ۱ MeV الکترون قرار دارد. برای حذف الکترون با انرژی بیشینه ۱۰ MeV، برای حفاظ‌های آلومینیوم، پلی‌اتیلن و اکسید سیلیکون به ترتیب ۲/۱۷، ۵ و ۲/۱۴ mm از حفاظ نیاز است. در صورت استفاده از فلزات سنگین‌تر، محدوده انرژی ذرات الکترون برای توقف افزایش پیدا می‌کند. از نتایج جدول مشخص است که برای حذف الکترون‌های با انرژی ۱۰ MeV، مقدار مواد بر حسب ضخامت چگالشی تقریباً یکسان است. کمترین مقدار لازم از بین حفاظ‌های موجود، مربوط به ماده پلی‌اتیلن است.



شکل ۱- نمودار شار دیفرانسیلی و انتگرالی پروتون‌های خورشیدی بر حسب انرژی



شکل ۲- نمودار شار دیفرانسیلی و انتگرالی الکترون‌های به دام افتاده بر حسب انرژی

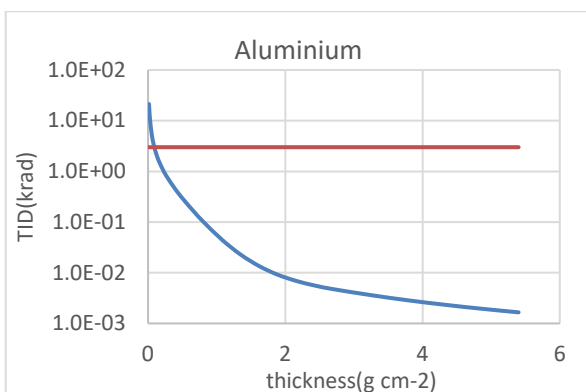
۳-۲- مقایسه برد ذرات باردار (الکترون و پروتون) در حفاظ‌های مختلف

با استفاده از نرم‌افزارهای تحت وب PSTAR و ESTAR برد ذرات باردار الکترون و پروتون در حفاظ‌های مختلف ترسیم شده است. در شکل ۳ نتایج خروجی برد ذرات الکترون تا محدوده ۲۰ MeV برای مواد آلومینیوم، پلی‌اتیلن و اکسید سیلیکون که با استفاده از نرم‌افزار ESTAR به دست آمده، نشان داده شده است.

از حفاظ نیاز است. بیشترین محدوده انرژی برای حذف ذرات در ضخامت 2mm متعلق به فلز سنگین تنگستن است. بیشینه مقدار ضخامت برای حذف پروتون با انرژی 100 MeV، بر حسب ضخامت چگالشی (g/cm^2) برای حفاظهای مختلف کمی تفاوت دارد. کمترین میزان ضخامت حفاظ بر حسب ضخامت چگالشی متعلق به حفاظ پلی اتیلن است. با توجه به محدودیت مربوط به بودجه جرمی در پروژه های فضایی، می توان به این نتیجه رسید که حفاظ پلی اتیلن برای مقابله با ذرات الکترون و پروتون مناسب تر می باشد.

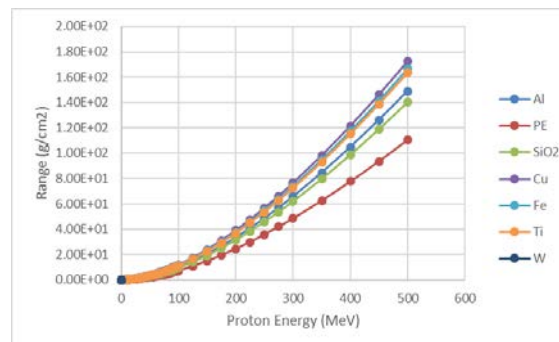
۳-۳- محاسبات با SHIELDOSE

با توجه به مشخصات مدار و چشمه های تابشی مدار مورد نظر، منحنی دز بر حسب ضخامت ترسیم شده است. در جدول (۱۱)، (در پیوست) نمونه ای از محاسبات انجام شده با استفاده از این نرم افزار نشان داده شده است. ماده هدف سیلیکون و حفاظ به صورت تخت در نظر گرفته شده است. همانطور که مشخص است دز کلی و دز ناشی از الکترون ها و پروتون های به دام افتاده و پروتون های خورشیدی رسیده به سیلیکون، بر حسب ضخامت محاسبه شده است. خروجی این جداول، منحنی دز بر حسب ضخامت چگالشی بر حسب (g/cm^2) است. این کار برای تعدادی از مواد انجام شده است. در شکل (۵)، منحنی دز بر حسب ضخامت برای حفاظ آلومینیوم ترسیم شده است. خط افقی قرمز رنگ، بیانگر میزان تحمل تشعشعی قطعات تجاری است. برای دستیابی به حداقل مقدار ضخامت برای تحمل تشعشع قطعات COTS (3 krad) باید از تقاطع دو نمودار استفاده کرد. این نتایج برای حفاظ های تیتانیوم، تانتالیوم، آهن، چندلایه تالیوم و آلومینیوم و آلیاژ مس تنگستن CW80، نیز انجام شده و نتایج در جدول (۴)، خلاصه شده است. در جدول (۴)، حداقل مقدار ضخامت چگالشی (g/cm^2) برای تحمل تابشی قطعات تجاری برای مواد مختلف در این ماموریت به دست آمده است. با توجه به اینکه مقادیر تقریبی هستند، با استفاده از درون یابی، محاسبات انجام شده است:



شکل ۵- منحنی دز یونیزان کل بر حسب ضخامت چگالشی برای آلومینیوم

در شکل (۴)، مقدار برد پروتون بر حسب انرژی در حفاظ های مختلف که با استفاده از نرم افزار PSTAR به دست آمده، ترسیم شده است. نتایج این نمودار را می توان به طور خلاصه در جدول (۳)، ملاحظه کرد. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است در فاصله تغییرات انرژی پروتون از 100 به 500 مگا الکترون ولت، عملاً با تغییرات انرژی، شار ذرات تغییر نمی کند و به کمترین میزان خود می رسد و بنابراین با توجه به افت کاهش شار ذرات و عدم تاثیر پذیری این ذرات در انرژی های بالاتر، انرژی 100 MeV در نظر گرفته شده است. همچنین برای تعیین مقدار بیشینه انرژی، ضخامت 2 mm از حفاظ ها به عنوان مبنا در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- منحنی مقایسه برد ذرات پروتون، در حفاظ های آلومینیوم، پلی اتیلن و SiO_2

جدول ۳- مقایسه حداکثر انرژی پروتون، در ضخامت 2 mm از حفاظ های مختلف و تعیین بیشینه ضخامت حفاظ

shield	2mm Equivalent thickness (g/cm^2)	Energy range (MeV)	Maximum thickness for 100 MeV (g/cm^2)	Maximum thickness for 100 MeV (cm)
Al	0.54	17.5-20	10	4.4
PE	0.193	12.5-15	7.24	7.5
SiO2	0.53	17.5-20	9.39	3.54
Cu	1.738	30-35	11.9	1.33
Fe	1.57	30-35	11.4	1.45
Ti	0.9	20-25	11.1	2.46
W	3.856	40-45	15.7	0.79

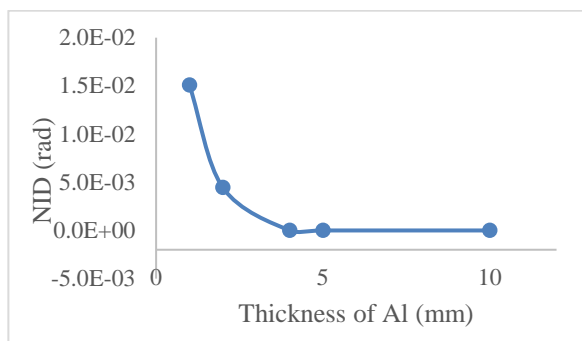
همانطور که از نتایج جدول (۳)، بر می آید، در صورت استفاده از ضخامت 2 mm از حفاظ، حداکثر مقدار انرژی پروتون که می تواند توسط حفاظ ها حذف شود، برای مثال برای حفاظ های آلومینیوم، پلی اتیلن و اکسید سیلیکون به ترتیب در محدوده 20 MeV - 17/5 - 15 MeV و 12/5 قرار دارد.

برای حذف پروتون با انرژی بیشینه 100 MeV، برای حفاظ های آلومینیوم، پلی اتیلن و اکسید سیلیکون به ترتیب 4/4، 7/5 و 3/54

۱-۴-۳- حفاظ آلومینیوم

۱- در شکل (۷) و

جدول (۵) منحنی شبیه‌سازی و محاسبه NID توسط MULASSIS، برای حفاظ آلومینیوم، در سیلیکون، برای بررسی میزان دز انباشته غیر یونیزان، در حضور چشمه‌های تابشی مورد نظر ماموریت نشان داده شده است:



شکل ۷- منحنی دز غیر یونیزان بر حسب ضخامت برای حفاظ آلومینیوم در سیلیکون در حضور پروتون‌های خورشیدی

جدول ۵- محاسبات انجام شده توسط MULASSIS، دز غیر یونیزان بر حسب ضخامت برای حفاظ آلومینیوم، در سیلیکون

Thickness (mm)	NID (rad)				
	sp	tre	trp	ger-h	total
1	1.51E-02	4.78E-03	0	4.62E-04	2.03E-02
2	4.45E-03	9.91E-03	0	8.98E-04	1.53E-02
4	0	0	0	4.60E-04	4.60E-04
5	0	0	0	3.84E-04	3.84E-04
10	0	4.05E-03	0	9.98E-04	5.05E-03

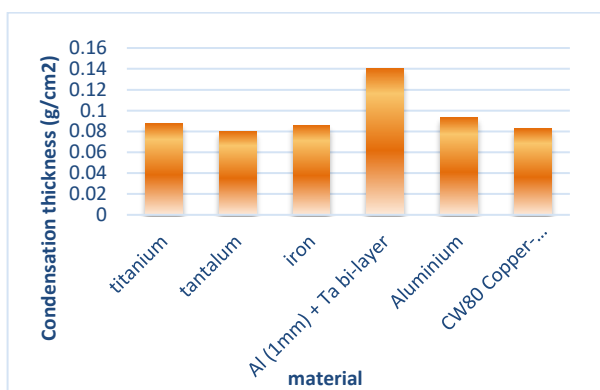
با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین مقادیر دز غیر یونیزان در این ماموریت از الکترون‌های به دام افتاده و پروتون‌های خورشیدی ناشی می‌شود. GCR ها در این ماموریت دز غیر یونیزان کمتری ایجاد می‌کنند. همانطور که در نتایج دز کلی غیر یونیزان ارائه شده است. مقدار دز کلی در ابتدا با افزایش ضخامت تا ۵ mm کاهش می‌یابد. اما در ضخامت ۱۰ mm این مقدار مجدداً افزایش یافته است. دلیل این امر به علت وجود اندرکنش‌های هسته‌ای، بیشتر با مواد حفاظ است. بنابراین این امر نشان می‌دهد که مقدار ضخامت را باید بهینه انتخاب کرد. چون با افزایش ضخامت احتمال اینکه دز رسیده به هدف افزایش یابد نیز وجود خواهد داشت.

۲- در شکل (۸) و

جدول ۴- حداقل مقدار ضخامت چگالشی (g/cm^2) برای تحمل تابشی قطعات تجاری برای مواد مختلف

Shield material	Thickness (mm)	Condensatin thickness
Titanium	۰/۱۷۹۸	۰/۰۸۷۳
Tantalum	۰/۰۴۸۵	۰/۰۷۹۹
Iron	۰/۱۰۲۹	۰/۰۸۵۸
Al + Ta bi-layer	۰/۵۰۰۰	۰/۱۴۰۰
Aluminium	۰/۳۰۰۰	۰/۰۹۳۲
CW80 Copper-Tungsten Alloy	۰/۰۵۲۰	۰/۰۸۲۵

برای مقایسه بهتر حداقل مقادیر ضخامت چگالشی برای تحمل تشعشعی قطعات تجاری در مواد مختلف بر حسب (g/cm^2) در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل ۶- مقایسه‌ی حداقل مقدار ضخامت چگالشی (g/cm^2) برای تحمل تابش مواد مختلف

همانطور که از جدول (۴) و شکل (۶)، مشخص است، مقدار ضخامت مواد مختلف، برای تحمل تشعشعی قطعات تجاری، در این ماموریت بر حسب ضخامت چگالشی، تفاوت زیادی ندارد. این مشاهدات با نتایج به دست آمده از ESTAR تطابق دارد. کمترین میزان ضخامت متعلق به Tantalum است و بیشترین مقدار ضخامت را حفاظ ترکیبی Ta+Al(1mm) تشکیل می‌دهد. واضح است، بیشترین مقدار، ناشی از دولایه بودن این حفاظ ترکیبی است.

۳-۴- محاسبات با MULASSIS

در این قسمت با استفاده از MULASSIS برای حفاظ‌های آلومینیوم، پلی‌اتیلن و SiO_2 در ضخامت‌های مختلف، شبیه‌سازی‌ها و محاسبات NID و TID در سیلیکون انجام شده است.

نتایج مشابه برای دز غیر یونیزان کل در ماده آلومینیوم نیز اتفاق افتاده است. مقایسه بین مقادیر NID حاصل از پروتون‌های خورشیدی در

جدول ۵) با وجود حفاظ آلومینیوم در سیلیکون و مقادیر NID در جدول ۷)، با استفاده از حفاظ پلی‌اتیلن، در حضور پروتون‌های خورشیدی نشان دهنده مقدار زیاد این آسیب در کنار حفاظ آلومینیوم است و این تغییرات در حد ۸ مرتبه بزرگی است. این امر نشان دهنده کیفیت بهتر حفاظ پلی‌اتیلن برای مقابله با اثرات NID می‌باشد. مشابه با نتایج به دست آمده برای حفاظ آلومینیوم، در صورت استفاده از حفاظ پلی‌اتیلن نیز مواد بیشتر تحت تاثیر اثرات TID قرار می‌گیرند. با این تفاوت که در صورت استفاده از این حفاظ نسبت دز رسیده از سوی ذرات یونیزان تقریباً ۱۳ مرتبه بزرگی بیشتر است.

جدول ۷- محاسبات انجام شده توسط MULASSIS، NID و TID بر حسب ضخامت برای حفاظ پلی‌اتیلن، در سیلیکون، در حضور پروتون‌های خورشیدی الکترون‌های به دام افتاده

Thickness of PE (mm)	SP NID (rad)	Tre TID (rad)
1	5.21E-10	2.63E+03
2	1.87E-10	4.85E+02
3	1.07E-10	1.58E+02
4	1.07E-10	3.32E+02
5	1.13E-10	1.10E+03
6	1.95E-10	-
8	3.18E-10	-

با توجه به مقادیر محاسبه شده، و مقایسه بین مقادیر

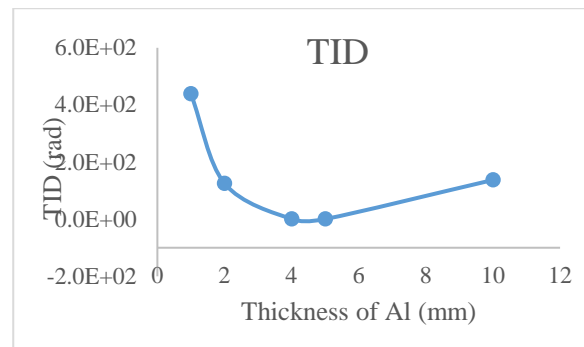
جدول ۶) و جدول ۷)، مقادیر TID با وجود حفاظ پلی‌اتیلن، در سیلیکون، نسبت به مقادیر TID با وجود حفاظ آلومینیوم، در سیلیکون، در حضور الکترون‌های به دام افتاده، بیشتر است. این مقدار در حد دو مرتبه بزرگی تغییر می‌کند. و این امر نشان دهنده کیفیت بهتر استفاده از آلومینیوم برای مقابله با اثرات TID است.

۳-۴-۳- حفاظ SiO_2

در با توجه به مقادیر محاسبه شده، و مقایسه بین مقادیر

جدول ۵) و- **Error! Not a valid bookmark self-reference.** مقادیر NID با وجود حفاظ آلومینیوم در سیلیکون، نسبت به مقادیر NID با استفاده از حفاظ SiO_2 ، در سیلیکون، در حضور پروتون‌های خورشیدی بسیار بیشتر است. این تغییرات در حد ۸ تا ۹ مرتبه بزرگی است. این امر نشان دهنده کیفیت بهتر حفاظ اکسید

جدول ۶)، منحنی شبیه‌سازی و محاسبه TID توسط MULASSIS، برای حفاظ آلومینیوم، در سیلیکون، در حضور چشمه‌های تابشی مورد نظر ماموریت نشان داده شده است:



شکل ۸- منحنی دز کل یونیزان بر حسب ضخامت برای حفاظ آلومینیوم در سیلیکون

جدول ۶- محاسبات انجام شده توسط MULASSIS، دز کل یونیزان بر حسب ضخامت برای حفاظ آلومینیوم، در سیلیکون

Thickness (mm)	TID (rad)				
	sp	tre	trp	gcr-h	total
1	6.21E+01	3.76E+02	0	5.11E-01	4.39E+02
2	4.29E+01	8.19E+02	0	8.14E-01	1.26E+02
4	0	0	0	6.26E-01	6.26E-01
5	0	0	0	4.54E-01	4.54E-01
10	0	1.36E+02	0	1.50E+00	1.37E+02

همانطور که از نتایج بر می‌آید، بیشترین مقادیر دز یونیزان در این ماموریت مشابه با نتایج حاصل از دز غیر یونیزان است. از مقایسه نتایج

جدول ۵) و

جدول ۶)، و برمی‌آید که نسبت دز رسیده از ذرات یونیزان نسبت به ذرات غیر یونیزان تقریباً ۴ مرتبه بزرگی بیشتر است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت قطعات الکترونیک بیشتر تحت تاثیر آسیب TID هستند.

۲-۴-۳- حفاظ پلی‌اتیلن

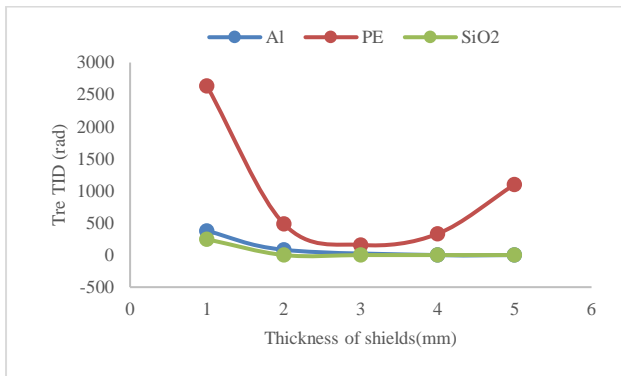
در جدول ۷)، محاسبات NID و TID توسط MULASSIS، برای حفاظ پلی‌اتیلن، در سیلیکون، برای چشمه‌های تابشی به ترتیب پروتون‌های خورشیدی و الکترون‌های به دام افتاده نشان داده شده است.

همانطور که در جدول ۷) می‌توان مشاهده نمود، مقادیر NID، با افزایش ضخامت حفاظ پلی‌اتیلن، در سیلیکون، در ابتدا کاهش می‌یابد سپس این مقدار با افزایش ضخامت از ۵ mm به بعد افزایش پیدا می‌کند. این

شکل ۹- مقایسه حفاظ های مختلف در آسیب NID (سمت راست مربوط به حفاظ Al است).

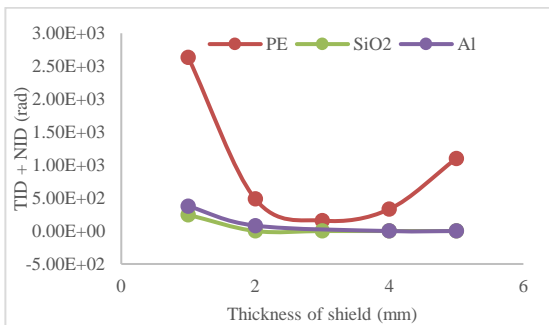
همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، مقدار دز غیر یونیزان رسیده به سیلیکون در حفاظ های پلی اتیلن و اکسید سیلیکون نسبت به آلومینیوم بسیار کمتر است.

همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در ضخامت های مختلف مقدار دز یونیزان رسیده به سیلیکون در حفاظ های اکسید سیلیکون و آلومینیوم تقریباً با هم شباهت دارد. در ضخامت های کمتر، حفاظ پلی- اتیلن به خوبی عمل نمی کند اما برای ضخامت های میانی، این حفاظ مشابه دو ماده آلومینیوم و اکسید سیلیکون است.



شکل ۱۰- مقایسه حفاظ های مختلف در آسیب TID

در شکل ۱۱) مجموع مقادیر دز یونیزان و غیر یونیزان حاصل از الکترون های به دام افتاده و پروتون های خورشیدی به ترتیب در سه حفاظ نشان داده شده است. درصد زیادی از مجموع دز از بخش یونیزان نشات می گیرد. بنابراین رفتار نمودار مقایسه دز کلی مشابه با نمودار دز یونیزان است. همانطور که در شکل ۱۱) نیز نشان داده شده است، مقدار دز کل در استفاده از حفاظ های آلومینیوم و اکسید سیلیکون کمتر است. اما در ضخامت های میانی در صورت استفاده از پلی اتیلن این مقادیر به هم نزدیک می شوند. با توجه به چگالی کمتر پلی اتیلن این ماده می تواند در استفاده های فضایی برای حفاظ تابشی موثرتر باشد. نتایج حاصل از نرم افزارهای ESTAR و PSTAR موید این مطلب است.



شکل ۱۱- مقایسه حفاظ های مختلف در آسیب TID و NID

سیلیکون برای مقابله با اثرات NID است. مشابه این اتفاق برای حفاظ پلی اتیلن نیز رخ داده است. همچنین مقادیر دز رسیده به سیلیکون با افزایش ضخامت در این ماده به شدت افت می کند.

جدول ۸)، محاسبات NID و TID توسط MULASSIS، برای حفاظ SiO_2 ، در سیلیکون، برای چشمه های تابشی به ترتیب پروتون های خورشیدی و الکترون های به دام افتاده نشان داده شده است:

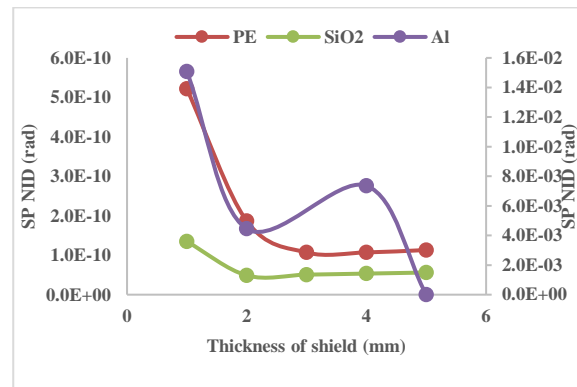
با توجه به مقادیر محاسبه شده، و مقایسه بین مقادیر

جدول ۵) و Error! Not a valid bookmark self-reference)، مقادیر NID با وجود حفاظ آلومینیوم در سیلیکون، نسبت به مقادیر NID با استفاده از حفاظ SiO_2 ، در سیلیکون، در حضور پروتون های خورشیدی بسیار بیشتر است. این تغییرات در حد ۸ تا ۹ مرتبه بزرگی است. این امر نشان دهنده کیفیت بهتر حفاظ اکسید سیلیکون برای مقابله با اثرات NID است. مشابه این اتفاق برای حفاظ پلی اتیلن نیز رخ داده است. همچنین مقادیر دز رسیده به سیلیکون با افزایش ضخامت در این ماده به شدت افت می کند.

جدول ۸- محاسبات انجام شده توسط MULASSIS، NID و TID بر حسب ضخامت برای حفاظ SiO_2 ، در سیلیکون، در حضور پروتون های خورشیدی الکترون های به دام افتاده

Thickness of SiO_2 (mm)	SP NID for SiO_2 (rad)	Tre TID (rad)
1	1.35E-10	2.46E+02
2	4.88E-11	0
3	5.07E-11	0
4	5.34E-11	0
5	5.61E-11	0
6	6.81E-11	0

۴-۳-۴ : مقایسه هر سه حفاظ



سیلیکون، در حفاظی که لایه‌ی اول آلومینیوم، و لایه‌ی دوم پلی اتیلن باشد، در حضور چشمه‌های تابشی بیشتر است.

(ب) محاسبه TID :

جدول ۱۰- محاسبات انجام شده توسط MULASSIS، دز کل یونیزان بر حسب ضخامت برای حفاظ دولایه پلی اتیلن و آلومینیوم در سیلیکون

Thickne ss	layer 1	layer 2	sp	tre	trp	gcr-h	total
1mm	Al	poly	1.34E+02	6.46E+02	0	7.32E-01	2.64E+02
1mm	poly	Al	0.00E+00	1.21E+02	0	7.32E-01	1.22E+02

باتوجه به مقادیر جدول (۱۰)، مقدار TID در سیلیکون، در حفاظی که لایه‌ی اول آلومینیوم، و لایه‌ی دوم پلی اتیلن باشد، در حضور چشمه‌های تابشی بیشتر است. بنابراین از نتایج محاسبات برای تغییر جایگشت‌های دو حفاظ آلومینیوم و پلی اتیلن می‌توان نتیجه گرفت که بهتر است از ترکیب حفاظی که در لایه اول از پلی اتیلن و بعدی آلومینیوم باشد، استفاده کرد.

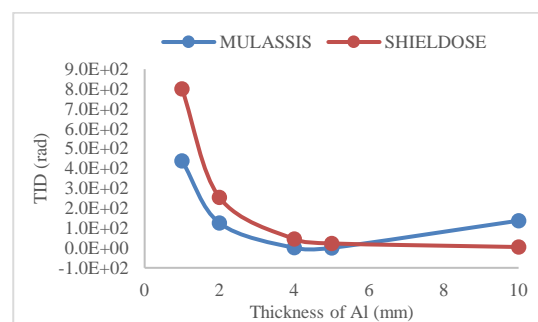
۴- نتیجه گیری

هدف از انجام این کار، بررسی بهینه حفاظ در ماموریت LEO با در نظرگیری مقاومت تشعشعی قطعات تجاری با استفاده از نرم افزار SPENVIS است. علاوه بر این در محاسبات حفاظ اثر همزمان TID و TNID نیز در نظر گرفته شده است. هم‌چنین از قابلیت‌های متعدد این نرم‌افزار برای مقایسه حفاظ‌های مختلف استفاده شده است. در این کار، ماموریتی ۳ ساله برای یک ماهواره در مدارهای کم ارتفاع در نظر گرفته شده است.

نتایج محاسبات با استفاده از نرم‌افزارهای PSTAR و ESTAR نشان می‌دهد در صورت استفاده از فلزات سنگین‌تر محدوده انرژی ذرات برای توقف افزایش پیدا می‌کند. برای حذف الکترون‌های با انرژی ۱۰ MeV، مقدار مواد بر حسب ضخامت چگالشی (g/cm^2) تقریباً یکسان است. برای ذرات پروتون در انرژی ۱۰۰ MeV، بیشینه مقدار ضخامت برای حذف این ذرات، بر حسب ضخامت چگالشی (g/cm^2) برای حفاظ‌های مختلف کمی تفاوت دارد. کمترین مقدار لازم از بین حفاظ‌های موجود، برای ذرات پروتون و الکترون مربوط به ماده پلی اتیلن است. با توجه به محدودیت مربوط به بودجه جرمی در پروژه‌های فضایی، می‌توان به این نتیجه رسید که حفاظ پلی اتیلن برای مقابله با ذرات الکترون و پروتون مناسب‌تر می‌باشد. نتایج محاسبات SHIELDSE2 نشان می‌دهد مقدار ضخامت مواد مختلف، برای تحمل تشعشعی قطعات تجاری، در این ماموریت بر حسب ضخامت چگالشی، تفاوت زیادی ندارد. این مشاهدات با نتایج به دست آمده از ESTAR تطابق دارد. کمترین میزان

۳-۵- مقایسه TID به دست آمده از محاسبات SHIELDSE و MULASSIS :

در دستیابی به مقدار دز، از دو قابلیت نرم‌افزار SPENVIS یعنی MULASSIS و SHIELDSE استفاده شده است. برای اعتبارسنجی از دو نرم‌افزار در شرایط یکسان، مقادیر دز محاسبه شده است. نتایج حاصل از این مقایسه در شکل (۱۲) ترسیم شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده، مقادیر به دست آمده برای دز، در ضخامت‌های ۲-۸ mm تقریباً به هم نزدیک و از یک مرتبه بزرگی است. در ضخامت میانی مقادیر کاملاً بر هم منطبق است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در صورت وجود محدودیت در هرکدام از قابلیت‌های نرم‌افزارهای MULASSIS و SHIELDSE می‌توان از دیگری به عنوان نرم‌افزار جایگزین استفاده کرد.



شکل ۱۲- منحنی مقایسه دز کل یونیزان به دست آمده از محاسبات MULASSIS و SHIELDSE بر حسب ضخامت برای حفاظ آلومینیوم، در سیلیکون

۳-۶- حفاظ دولایه ی پلی اتیلن و آلومینیوم

با شبیه‌سازی حفاظی دو لایه، از پلی اتیلن و آلومینیوم و با تغییر ترتیب مواد، اثر حفاظتی آنها و دز انباشته شده در سیلیکون اندازه‌گیری و مقایسه شده است و در جدول (۹) و جدول (۱۰) قابل مشاهده است:

(الف) محاسبه NID :

جدول ۹- محاسبات انجام شده توسط MULASSIS، دز کل غیر یونیزان بر حسب ضخامت برای حفاظ دولایه پلی اتیلن و آلومینیوم در سیلیکون

Thic kness	layer 1	layer 2	sp	tre	trp	gcr-h	total
1mm	Al	poly	2.82E-02	9.28E-03	0	4.66E-04	3.79E-02
1mm	poly	Al	0.00E+00	7.18E-03	0	4.01E-04	7.58E-3

باتوجه به مقادیر جدول (۹)، مقدار NID در سیلیکون، در حفاظی که لایه‌ی اول آلومینیوم، و لایه‌ی دوم پلی اتیلن باشد، در حضور چشمه‌های تابشی بیشتر است. باتوجه به مقادیر جدول (۹)، مقدار NID در

۶- مراجع

- [1] R. H. Maurer, M. E. Fraeman, M. N. Martin, and D. R. Roth, "Harsh Environments: Space Radiation," *Johns Hopkins APL Tech. Dig.*, vol. 28, no. 1, p. 17, 2008.
- [2] J.-C. Boudenot, "Radiation space environment," in *Radiation Effects on Embedded Systems*, Springer, 2007, pp. 1-9.
- [3] M. J. Campola and J. A. Pellish, "Radiation hardness assurance: Evolving for newspace," in *European Conference on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS 2019)*, 2019.
- [4] E. Secretariat, "Space product assurance," 2008.
- [5] D. Sinclair and J. Dyer, "Radiation Effects and COTS Parts in SmallSats," *27th Annu. AIAA/USU Conf. Small Satell.*, pp. 1-12, 2013, [Online]. Available: <http://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2013/all2013/69/>
- [6] B. Klamm, "Passive Space Radiation Shielding: Mass and Volume Optimization of Tungsten-Doped PolyPhenolic and Polyethylene Resins," *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut.*, pp. 1-11.
- [7] "5 Ways to Shield Satellites from the Dangers of Space," *12.08.2023*, 2023. <https://www.ni.com/en/solutions/aerospace-defense/space-launch-exploration/satellite-design-test/5-ways-shield-satellites-dangers-space.html>
- [8] A. Gohel and R. Makwana, "Multi-layered shielding materials for high energy space radiation," *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 197, p. 110131, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110131>.
- [9] C. Coia, A. C. Fozza, M. R. Wertheimer, G. Czeremuskin, and A. Houdayer, "Radiation-Induced Effects in SiO₂ Protective Coatings on Polymeric Spacecraft Materials BT - Protection of Space Materials from the Space Environment," J. I. Kleiman and R. C. Tennyson, Eds., Dordrecht: Springer Netherlands, 2001, pp. 281-290.
- [10] Z. M. CİNAN, "A theoretical focus on nanoparticle attenuation capabilities for potential utilizations in radiation protect: TiO₂-SiO₂-Fe₃O₄-B₄C-Al₂O₃," *Phys. Scr.*, vol. 98, 2023.
- [11] G. Atxaga, J. Marcos, M. Jurado, A. Carapelle, and R. Orava, "RADIATION SHIELDING OF COMPOSITE SPACE ENCLOSURES," 2012, Accessed: Sep. 30, 2020. [Online]. Available:

ضخامت متعلق به Tantalum است. بیشترین مقادیر دز غیر یونیزان در این ماموریت از الکترون‌های به دام افتاده و پروتون‌های خورشیدی ناشی می‌شود. GCR ها در این ماموریت دز غیر یونیزان کمتری ایجاد می‌کنند.

نتایج حاصل از MULASSIS نشان می‌دهد مقدار دز غیر یونیزان رسیده به سیلیکون در حفاظ‌های پلی اتیلن و اکسید سیلیکون نسبت به آلومینیوم بسیار کمتر است. در ضخامت‌های مختلف مقدار دز یونیزان رسیده به سیلیکون در حفاظ‌های اکسید سیلیکون و آلومینیوم تقریباً با هم شباهت دارد. در ضخامت‌های کمتر حفاظ پلی اتیلن به خوبی عمل نمی‌کند اما برای ضخامت‌های میانی این حفاظ مشابه دو ماده آلومینیوم و اکسید سیلیکون است. درصد زیادی از مجموع دز از بخش یونیزان نشأت می‌گیرد. بنابراین رفتار نمودار مقایسه دز کلی مشابه با نمودار دز یونیزان است.

مقایسه نتایج محاسبات حاصل از دو کد MULASSIS و SHILED DOSE در دست‌یابی به مقدار دز به هدف سیلیکونی و با حفاظ آلومینیومی بیانگر نزدیکی و شباهت مقادیر است و در صورت وجود محدودیت در هر کدام از قابلیت‌های نرم‌افزارهای MULASSIS و SHILED DOSE می‌توان از دیگری به عنوان نرم‌افزار جایگزین استفاده کرد. از محاسبات برای تغییر جایگشت‌های دو حفاظ آلومینیوم و پلی اتیلن می‌توان نتیجه گرفت که بهتر است از ترکیب حفاظی که در لایه اول از پلی اتیلن و بعدی آلومینیوم باشد، استفاده کرد. نتیجه‌گیری کلی از مباحث طراحی حفاظ در این ماموریت برای استفاده از قطعات تجاری بدین صورت است که نیاز به استفاده از حفاظ‌سازی پیچیده‌ای نبوده و می‌توان از حفاظ‌های معمول نیز برای این منظور استفاده کرد. هم‌چنین حداکثر مقدار ضخامت لازم برای تحمل تشعشعی قطعات تجاری به اندازه ۰/۵ mm از ترکیب آلومینیوم و تانتالیوم است.

با توجه به اینکه بیشینه مقدار ضخامت برای حذف الکترون‌های با انرژی ۱۰ MeV و حذف پروتون با انرژی ۱۰۰ MeV، بر حسب ضخامت چگالشی (g/cm^2) برای حفاظ‌های مختلف کمی تفاوت دارد. کمترین میزان ضخامت حفاظ بر حسب ضخامت چگالشی متعلق به حفاظ پلی اتیلن است. با توجه به محدودیت مربوط به بودجه جرمی در پروژه‌های فضایی، می‌توان به این نتیجه رسید که حفاظ پلی اتیلن برای مقابله با ذرات الکترون و پروتون مناسب‌تر می‌باشد و برای دست‌یابی به بهترین نتیجه با در نظرگیری بودجه جرمی از میان حفاظ‌های در نظر گرفته شده، بهتر است از ماده پلی اتیلن استفاده شود.

۵- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

- payload,” *Sp. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 59–74, 2023, doi: 10.30699/jsst.2023.1400.
- [22] H. Daneshvar, A. Eidi, L. Mohamadi, R. Omidi, and P. Hajipour, “Investigation and feasibility study of using components with different categories from the perspective of radiation damage in LEO and GEO orbits,” *Sp. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 11–23, 2021, doi: 10.22034/jsst.2021.1267.
- [23] K. Ghordoyi Milan, A. Sadr, S. H. Sedighy, and H. Daneshvar, “Analysis, Design and Optimization of the Multi Layer Radiation Shielding of Satellite Electronic Components,” *Sp. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 2, pp. 71–76, 2021, doi: 10.22034/jsst.2021.1246.
- [24] H. Daneshvar, M. Khoshsima, and A. Dayyani, “Study of Modeling Parameters in Determination of TID, DD, and SEE Radiation Damages for Satellite in LEO Orbit Using OMERE Software,” *Sp. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 63–71, 2019, doi: 10.30699/jsst.2019.1158.
- [25] P. Hajipour, L. mohammadi, A. Eidi, S. Shoorian, N. Eidi esfiani, and S. A. H. Fegghi, “Using Space Radiation Shielding Made of Polyethylene instead of Aluminum in GEO Orbit in order to Reduce Weight,” *Sp. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 15–27, 2023, doi: 10.30699/jsst.2023.1411.
- <https://orbi.uliege.be/handle/2268/132394>
- [12] L. Varga and E. Horvath, *Evaluation of electronics shielding in micro-satellites*. Defence R&D Canada-Ottawa, 2003.
- [13] H. B. Garrett and A. C. Whittlesey, *Guide to mitigating spacecraft charging effects*, vol. 3. John Wiley & Sons, 2012.
- [14] G. D. Badhwar and P. M. O’Neill, “An improved model of galactic cosmic radiation for space exploration missions,” *Int. J. Radiat. Appl. Instrumentation. Part D. Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, vol. 20, no. 3, pp. 403–410, 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(92\)90024-P](https://doi.org/10.1016/1359-0189(92)90024-P).
- [15] M. J. Berger, “ESTAR, PSTAR and ASTAR: Computer Programs for Calculating Stopping Powers and Ranges for Electrons, Protons and Helium Ions,” International Atomic Energy Agency (IAEA), 1995. [Online]. Available: http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=R N:26064969
- [16] B. J. McParland, “Charged Particle Range BT - Medical Radiation Dosimetry: Theory of Charged Particle Collision Energy Loss,” B. J. McParland, Ed., London: Springer London, 2014, pp. 465–482. doi: 10.1007/978-1-4471-5403-7_13.
- [17] D. Heynderickx, B. Quaghebeur, E. Speelman, and E. Daly, *ESA’s Space Environment Information System (SPENVIS) - A WWW interface to models of the space environment and its effects*. 2000. doi: 10.2514/6.2000-371.
- [18] F. Lei *et al.*, “MULASSIS: A Geant4-based multilayered shielding simulation tool,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 49, no. 6, pp. 2788–2793, 2002.
- [19] A. Emmanuel and J. Raghavan, “Experimental validation of simulations of radiation shielding effectiveness of materials by MULASSIS,” *Adv. Sp. Res.*, vol. 58, no. 11, pp. 2376–2384, 2016.
- [20] “Ionising dose model SHIELDDOSE.” <https://www.spennis.oma.be/help/background/shielddose/shielddose.html>
- [21] R. Karimzadeh Bae, H. Daneshvar, A. Ahmadi, and P. Sojoodi, “Investigating the test and evaluation of GaN transistors radiation resistance in SSPA amplifier board in LEO satellite



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. 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) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

جدول ۱۱- نمونه‌ای از محاسبات تعیین دز بر حسب ضخامت در نرم‌افزار SHIELDOSE

Eqv Al absorber thickness		Actual absorber thickness		Total	Trapped electrons	Brems-strahlung	Trapped protons	Solar protons	Tr. electrons+ Bremsstrahlung	Tr. el.+ Br emss. +Tr. protons	Total (krad)
(mm)	(mils)	(g cm ⁻²)	(mm)								
0.05	1.968	0.014	0.05	2.13E+04	2.04E+04	4.37E+01	0.00E+00	8.21E+02	2.05E+04	2.05E+04	2.13E+01
0.1	3.937	0.027	0.1	1.11E+04	1.06E+04	2.63E+01	0.00E+00	4.96E+02	1.06E+04	1.06E+04	1.11E+01
0.2	7.874	0.054	0.2	5.34E+03	5.03E+03	1.48E+01	0.00E+00	2.90E+02	5.05E+03	5.05E+03	5.34E+00
0.3	11.811	0.081	0.3	3.43E+03	3.22E+03	1.02E+01	0.00E+00	2.03E+02	3.23E+03	3.23E+03	3.43E+00
0.4	15.748	0.108	0.4	2.48E+03	2.33E+03	7.91E+00	0.00E+00	1.50E+02	2.33E+03	2.33E+03	2.48E+00
0.5	19.685	0.135	0.5	1.92E+03	1.79E+03	6.63E+00	0.00E+00	1.17E+02	1.80E+03	1.80E+03	1.92E+00
0.6	23.622	0.162	0.6	1.55E+03	1.44E+03	5.79E+00	0.00E+00	9.64E+01	1.45E+03	1.45E+03	1.55E+00
0.8	31.496	0.216	0.8	1.08E+03	1.01E+03	4.64E+00	0.00E+00	7.18E+01	1.01E+03	1.01E+03	1.08E+00
1	39.37	0.27	1	8.00E+02	7.39E+02	3.80E+00	0.00E+00	5.75E+01	7.43E+02	7.43E+02	8.00E-01
1.5	59.055	0.405	1.5	4.30E+02	3.88E+02	2.68E+00	0.00E+00	3.91E+01	3.91E+02	3.91E+02	4.30E-01
2	78.74	0.54	2	2.55E+02	2.23E+02	2.06E+00	0.00E+00	2.97E+01	2.25E+02	2.25E+02	2.55E-01
2.5	98.425	0.675	2.5	1.57E+02	1.32E+02	1.66E+00	0.00E+00	2.35E+01	1.34E+02	1.34E+02	1.57E-01
3	118.11	0.81	3	9.99E+01	7.93E+01	1.39E+00	0.00E+00	1.92E+01	8.07E+01	8.07E+01	9.99E-02
4	157.48	1.08	4	4.45E+01	2.95E+01	1.07E+00	0.00E+00	1.39E+01	3.06E+01	3.06E+01	4.45E-02
5	196.85	1.35	5	2.28E+01	1.13E+01	8.70E-01	0.00E+00	1.06E+01	1.22E+01	1.22E+01	2.28E-02
6	236.22	1.62	6	1.35E+01	4.33E+00	7.49E-01	0.00E+00	8.43E+00	5.07E+00	5.07E+00	1.35E-02
7	275.59	1.89	7	9.14E+00	1.62E+00	6.65E-01	0.00E+00	6.85E+00	2.29E+00	2.29E+00	9.14E-03
8	314.96	2.16	8	6.90E+00	5.80E-01	6.02E-01	0.00E+00	5.71E+00	1.18E+00	1.18E+00	6.90E-03
9	354.33	2.43	9	5.59E+00	1.94E-01	5.53E-01	0.00E+00	4.84E+00	7.47E-01	7.47E-01	5.59E-03
10	393.7	2.7	10	4.74E+00	5.79E-02	5.13E-01	0.00E+00	4.17E+00	5.71E-01	5.71E-01	4.74E-03
12	472.44	3.24	12	3.63E+00	2.37E-03	4.50E-01	0.00E+00	3.18E+00	4.52E-01	4.52E-01	3.63E-03
14	551.18	3.78	14	2.87E+00	1.48E-05	4.02E-01	0.00E+00	2.47E+00	4.02E-01	4.02E-01	2.87E-03
16	629.92	4.32	16	2.34E+00	1.29E-07	3.64E-01	0.00E+00	1.97E+00	3.64E-01	3.64E-01	2.34E-03
18	708.66	4.86	18	1.95E+00	0.00E+00	3.32E-01	0.00E+00	1.62E+00	3.32E-01	3.32E-01	1.95E-03
20	787.4	5.4	20	1.66E+00	0.00E+00	3.06E-01	0.00E+00	1.35E+00	3.06E-01	3.06E-01	1.66E-03