

Original Research Paper

Enhanced Radiation Tolerance of a Remote Interface Unit Using Commercial-off-the-Shelf Components for Space Applications

Reza Omidi^{1*}  and Azam Eidi²

1. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2. Satellite Communication Group, Faculty of Communications Technology, ICT Research Institute, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 02 August 2024

Revised 23 September 2024

Accepted 23 September 2024

Available Online 19 October 2024

Keywords:

Space radiation

Cobalt-60 test

Total ionization dose

Radiation hardening

TT&C subsystems

RIU unit

ABSTRACT

The radiation hardness of satellite subsystems, particularly their susceptibility to total ionizing dose (*TID*), presents a significant challenge in space mission design. This study introduces an innovative approach to enhancing the radiation tolerance of a *remote interface unit (RIU)* by leveraging commercial off-the-shelf (*COTS*) components in conjunction with a strategic integration of hardware and software solutions. Experimental irradiation results demonstrate that this approach successfully increased the *RIU's* radiation tolerance from 20 krad to over 60 krad—a significant achievement given that geostationary satellite simulations estimate a cumulative radiation dose of approximately 50 krad over a five-year mission. Furthermore, comprehensive performance evaluations confirm that the radiation-hardened *RIU* maintains stable and acceptable functionality under high radiation exposure. All proposed solutions were experimentally validated using Co-60 irradiation, and the results indicate that the *TID*-hardened *RIU* can serve as a viable alternative to specialized space-grade components in specific applications. This novel approach reduces satellite development costs and time-to-market and enhances design flexibility. The methodologies presented in this study hold significant potential for adoption in other satellite subsystems, such as *on-board data handling (OBDH)* units and *telemetry, tracking, and command (TT&C)* systems, thereby contributing to the advancement of more reliable space technologies.

*Corresponding Author's E-mail: rezaomidi@znu.ac.ir

How to Cite this Article:

R. Omidi and A. Eidi, "Enhanced radiation tolerance of a remote interface unit using commercial-off-the-shelf components for space applications," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 1-13, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1495>.



COPYRIGHTS

© 2024 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 \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



طراحی، ساخت و تست یک واحد رابط راه دور با تاب آوری بالا برای کاربردهای فضایی: رویکردی مبتنی بر قطعات تجاری

رضا امیدی^{*۱} و اعظم عیدی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- کارشناسی ارشد، گروه ارتباطات ماهواره‌ای، پژوهشکده فناوری ارتباطات، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

تاب آوری زیرسیستم‌های ماهواره‌ای در برابر تشعشعات فضایی، به‌ویژه دوز یونیزاسیون جمعی (TID)، یکی از چالش‌های اصلی در طراحی مأموریت‌های فضایی است. در این مقاله، رویکردهای نوآورانه برای افزایش تاب آوری یک واحد رابط راه دور (RIU) با استفاده از قطعات تجاری ارائه شده است. با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از راه‌کارهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، تاب آوری RIU از ۲۰ کیلو راد به بیش از ۶۰ کیلو راد افزایش یافته است. شایان ذکر است که شبیه‌سازی‌ها برای ماهواره ژئو نشان می‌دهد که دوز تابشی جمعی مورد انتظار برای مأموریت ۵ ساله حدود ۵۰ کیلو راد است. نتایج حاصل از پرتودهی در سایت بر روی RIU مقاوم‌سازی شده نشان می‌دهد که این واحد قادر به تحمل این سطح از تابش بوده و عملکرد مطلوبی را از خود نشان می‌دهد. همه راه‌کارهای پیشنهادی به‌صورت تجربی و تحت تابش کبالت ۶۰ ارزیابی شده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که RIU مقاوم شده در برابر آسیب TID می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای قطعات رده فضایی در برخی کاربردها مورد استفاده قرار گیرد. ایده‌های مطرح شده در این مقاله می‌تواند در سایر زیرسیستم‌های ماهواره‌ای مانند OBDH یا TT&C نیز اعمال شود.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۲ مرداد ۱۴۰۳

بازنگری ۰۲ مهر ۱۴۰۳

پذیرش ۰۲ مهر ۱۴۰۳

اولین انتشار ۲۸ مهر ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

تشعشعات فضایی

تست کبالت ۶۰

دوز یونیزاسیون جمعی

افزایش تاب آوری

زیرسیستم TT&C

واحد RIU

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rezaomidi@znu.ac.ir

How to Cite this Article:

R. Omidi and A. Eidi, "Enhanced radiation tolerance of a remote interface unit using commercial-off-the-shelf components for space applications," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 1-13, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1495>.



COPYRIGHTS

© 2024 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 \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



علائم و اختصارات

TID	Total Ionizing Dose
SPENVIS	Space Environment Information System
ESA	European Space Agency
OMERE	Orbit-MEchanical Radiation Environment
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
GEO	Geostationary Earth Orbit

مقدمه

محیط فضا با چالش‌های متعددی از جمله خلاء، تغییرات دمایی شدید و تشعشعات فضایی پرنرژی روبرو است. از میان این چالش‌ها، دوز یونیزاسیون تجمعی (TID) یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب‌کننده قطعات الکترونیکی محسوب می‌شود. تشعشعات فضایی با برهم‌کنش با مواد نیمه‌رسانا، باعث ایجاد نقص‌های ساختاری و تغییر در خواص الکتریکی آن‌ها شده و در نهایت منجر به اختلال در عملکرد مدارهای الکترونیکی، کاهش عمر مفید قطعات و حتی از کار افتادن کامل سیستم می‌شود [۱]. اثرات TID بر قطعات الکترونیکی بسیار متنوع بوده و شامل پدیده‌هایی مانند ایجاد بارهای سطحی، تغییر در آستانه ولتاژ ترانزیستورها، افزایش جریان نشتی و کاهش بهره تقویت‌کننده‌ها می‌شود. این اثرات می‌تواند به صورت تدریجی و با گذشت زمان رخ دهد و در نهایت منجر به کاهش قابلیت اطمینان و عملکرد سیستم شود [۲، ۳]. با توجه به اهمیت حفظ عملکرد ماهواره‌ها در طول عمر مأموریت، یافتن راه‌کارهای موثر برای مقاوم‌سازی قطعات الکترونیکی در برابر TID از جمله مهم‌ترین چالش‌های مهندسی فضایی است. در این پژوهش، با بررسی دقیق نحوه آسیب‌رسانی TID به مدار دیجیتال مبتنی بر میکروکنترلر، روش‌های مختلف مقاوم‌سازی و بهینه‌سازی طراحی مدارها برای کاهش تأثیرات مخرب تشعشعات ارائه خواهد شد.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که فناوری‌های مختلفی برای کاهش اثرات TID بر قطعات الکترونیکی توسعه یافته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به طراحی مدارهای مقاوم در برابر تشعشعات، استفاده از مواد نیمه‌رسانا با تحمل‌پذیری بالاتر در برابر تشعشعات و به‌کارگیری راه‌کارهای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای تشخیص و تصحیح خطاهای ناشی از تشعشعات فضایی اشاره کرد [۴-۷].

در این پژوهش، با بهره‌گیری از آخرین دستاوردهای علمی در زمینه مهندسی فضایی و الکترونیک، رویکردهای نوآورانه برای مقاوم‌سازی مدارهای دیجیتال برابر TID ارائه خواهد شد. نتایج این

پژوهش می‌تواند به بهبود قابلیت اطمینان و عمر مفید ماهواره‌ها و سایر سیستم‌های فضایی منجر شود. محیط فضا از نظر تشعشعات فضایی تا حدود بسیار زیادی شناخته شده است و نرم‌افزارهای مختلفی برای ارزیابی شرایط ماهواره یا فضاپیما در تراز مدار مورد نظر قابل استفاده می‌باشد. از جمله این نرم‌افزارها می‌توان به SPENVIS که توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) توسعه یافته و برای محاسبه طیف انرژی ذرات و دوز جذب شده در مدارهای مختلف استفاده می‌شود، اشاره کرد. همچنین نرم‌افزار GEANT4 یک ابزار شبیه‌سازی تعاملی ذرات است که به‌طور گسترده در فیزیک انرژی بالا و مهندسی هسته‌ای به‌کار می‌رود و در شبیه‌سازی عبور ذرات از مواد و برهم‌کنش آن‌ها با ماده نیز کاربرد دارد. نرم‌افزارهای دیگری مانند OMERE نیز برای محاسبه محیط تشعشعی در مدارهای مختلف توسعه یافته‌اند. با استفاده از این نرم‌افزارها، مهندسان می‌توانند دوز جذب شده توسط قطعات الکترونیکی، اثر تشعشعات بر سلول‌های خورشیدی و سایر اجزای ماهواره را پیش‌بینی کرده و اقدامات لازم برای محافظت از آن‌ها را انجام دهند [۸].

ماهواره‌ها، صرف‌نظر از اینکه در مدار پایین (LEO)، متوسط (MEO) یا زمین‌آهنگ (GEO) قرار داشته باشند، به‌طور مداوم تحت تشعشعات فضایی قرار دارند. این تشعشعات، از ذرات پرنرژی خورشیدی تا ذرات محبوس شده در کمربندهای وان آلن، می‌توانند به مدارهای الکترونیکی، سلول‌های خورشیدی و دیگر اجزای حیاتی ماهواره‌ها آسیب جدی وارد کنند. شدت و نوع این آسیب به مدار ماهواره و نوع تشعشع بستگی دارد. ماهواره‌های LEO بیشتر در معرض شراره‌های خورشیدی هستند، ماهواره‌های MEO با چالش ذرات پرنرژی کمربندهای وان آلن روبرو هستند و ماهواره‌های GEO نیز به‌طور مداوم در معرض جریان ذرات پرنرژی باد خورشیدی قرار دارند. این ذرات می‌توانند به تدریج اجزای حساس ماهواره‌ها و سامانه‌های فضایی آسیب رسانده و عملکرد آن‌ها را کاهش دهند. به همین دلیل، مهندسان فضایی با طراحی دقیق و استفاده از مواد مقاوم در برابر تشعشع، تلاش می‌کنند تا عمر مفید ماهواره‌ها و سامانه‌های فضایی در تمام مدارها را افزایش داده و عملکرد پایدار آن‌ها را تضمین کنند. تشعشعات فضایی با هر ماهیتی، نشات گرفته از هر منبع یا چشمه‌ای، با هر اسمی، با هر انرژی یا توانی که باشند در نهایت یک‌سری اثراتی بر سامانه‌های فضایی خواهد داشت که غالباً معطوف به بخش‌های الکترونیکی ماهواره می‌باشد. در مراجع علمی و استانداردهای فضایی اثرات تشعشع که برای طراحی سامانه‌های فضایی باید در نظر گرفته شوند، در سه دسته قرار می‌گیرند: تخریب ناشی از TID، تخریب ناشی از TNID یا 1NIEL یا 2DDD و 3SEE [۹]. در این بین تأثیرات SEE و TID بیشتر مورد توجه هستند و استانداردهای

پیشین، اهمیت نتایج این پژوهش در زمینه مهندسی فضایی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

مروری بر روش‌های مقاوم‌سازی در برابر TID

برخورد پرتوها یا ذرات بیرون جو زمین به بخش‌های الکترونیکی ماهواره به زبان بسیار ساده از نظر فیزیکی دو حالت اثرگذاری دارد. حالت اول زمانی است که ذره به دلیل داشتن انرژی بالا یا سنگین بودن در مسیر حرکت خود پلاسمايي از زوج الکترون و حفره ایجاد کند. حال اگر این پلاسما در میدان الکتریکی واقع شده باشد، یک جریان لحظه‌ای به وجود می‌آید که این جریان لحظه‌ای اثرات بزرگ و در مقیاس قابل درک در پی خواهد داشت؛ مثلاً به‌طور ناخواسته یک بیت حافظه از صفر به یک تغییر وضعیت می‌دهد. به این دسته اثرات رخداد یکتا (SEE) می‌گویند. همه ذرات یا پرتوها قادر به ایجاد چنین جریان لحظه‌ای بزرگی نیستند یا به احتمالاً در ناحیه دارای میدان الکتریکی واقع نمی‌شوند. اما، گاهی برخورد پرتو یا ذرات محیط بیرون جو زمین یک‌سری نقص‌هایی در بلور یا نیمه‌هادی ایجاد می‌کند. این نقص‌ها در همان لحظه یا همان روز یا همان ماه اثر خود را نشان نمی‌دهد. بلکه به‌مرور زمان و با گذشت چند ماه به تدریج تعداد این نقص‌ها به حدی می‌رسد که عملکرد تراشه مختل می‌شود. این نقص‌ها قابل بازیابی یا اصلاح نیستند و رفته‌رفته در تراشه جمع می‌شود به همین خاطر نام دوز یونیزاسیون جمع‌شونده یا تجمعی به آنها اطلاق می‌شود [۱۳، ۱۲].

برای افزایش تاب‌آوری نسبت به اثرات SEE تا حدودی روش‌های مداری معقول و مطلوب وجود دارد [۱۶-۱۴]. اما در رابطه با اثر TID صرفاً باید به افزایش حفاظت اکتفا کرد یا به فکر تغییر بلور یا نیمه‌هادی به‌کار رفته در ساخت تراشه بود [۷-۲]. با توجه به پیچیدگی فناوری ساخت تراشه‌ها و محدودیت‌های دسترسی به فرآیند تولید آن‌ها، اعمال تغییرات اساسی در ساختار داخلی تراشه‌ها به‌منظور افزایش مقاومت در برابر تشعشعات، خارج از حیطه کنترل بسیاری از سازمان‌ها و پژوهشگاه‌ها است. لذا، تمرکز اصلی باید بر روی روش‌های حفاظت خارجی قطعات الکترونیکی قرار گیرد.

با این حال، رویکردهای سنتی حفاظت‌سازی با چالش‌های جدی مواجه هستند. افزایش ضخامت پوشش‌های محافظ مانند آلومینیوم، به‌منظور کاهش اثرات تشعشعات، به‌طور مستقیم منجر به افزایش جرم کلی سامانه فضایی و در نتیجه کاهش قابلیت‌های مانوری آن می‌شود. از سوی دیگر، استفاده از مواد با چگالی بالاتر مانند سرب، اگر چه می‌تواند حفاظت بهتری را فراهم آورد، اما به دلیل افزایش چشمگیر جرم، عملاً قابل اجرا نیست. علاوه بر این، استفاده از مواد ترکیبی چندلایه [۱۸، ۱۷]

تست برای SEE و TID وجود دارد [۱۱، ۱۰]. در رابطه با افزایش تاب‌آوری در برابر SEE بسیار نوشته شده است و کارهای زیادی در این زمینه انجام شده است. اما در رابطه با اثرات TID با توجه به ماهیت فیزیکی آن، روش‌های مقاوم‌سازی کمتر قابل استفاده است. صرفاً تغییر فناوری ساخت تراشه‌ها و افزایش یا بهبود حفاظت‌گذاری در برابر این اثر در سال‌های گذشته مورد توجه بوده است. اما در این مقاله ایده‌های عملی برای افزایش تاب‌آوری در برابر این اثر مطرح و تبیین شده است. سپس نتایج کسب شده در پرتودهی با منبع کبالت ۶۰ گزارش می‌گردد؛ نتایج پرتودهی در سایت اتمی نشان‌دهنده کارایی ایده‌های مطرح شده در این مقاله می‌باشد. ایده‌هایی که صرفاً با استفاده از قطعات تجاری، بدون تحمیل هزینه مهندسی از جمله زمان اجراء هزینه مالی، افزایش وزن سامانه فضایی، افزایش توان مصرفی در یک پروژه فضایی قابل تحقق می‌باشد. روش‌های پیشین از جمله افزایش ضخامت حفاظت‌گذاری باعث افزایش وزن سامانه می‌شود، همچنین روش‌هایی مانند استفاده از نسخه پشتیبان نیز علاوه بر وزن سامانه، توان مصرفی بالاتری را تحمیل خواهند کرد. نوآوری‌ها و دستاوردهای مهم این مقاله در زمینه مقاوم‌سازی در برابر دوز یونیزاسیون تجمعی به‌طور خلاصه عبارتند از:

۱. پیشنهاد و ارزیابی نتایج پرتودهی ایده استفاده از حفاظت‌گذاری موضعی.
۲. پیشنهاد و ارزیابی نتایج پرتودهی یک نمونه ساده از حفاظت‌گذاری چند لایه.
۳. پیشنهاد و ارزیابی نتایج پرتودهی ایده استفاده از کلیدزنی پویا.
۴. پیشنهاد و ارزیابی نتایج پرتودهی ایده غربالگری، شناسایی و جایگزینی قطعات حساس در برابر TID.
۵. ارزیابی تأثیر پرتودهی مستقیم و معکوس (پشت و روی برد).
۶. ارزیابی تأثیر حجم برنامه میکروکنترلر بر میزان تاب‌آوری نسبت به TID.

پس از مقدمه‌ای مختصر، در ادامه به بررسی جامع اثرات دوز یونیزاسیون تجمعی بر قطعات الکترونیکی، به‌ویژه واحد RIU¹ که هدف اصلی مطالعه حاضر است، پرداخته شده است. همچنین، شیوه‌های آسیب‌رسانی TID و چالش‌های ناشی از آن در محیط فضایی تشریح خواهد شد. سپس، روش‌های مختلف مقاوم‌سازی واحد RIU در برابر اثرات مخرب تشعشعات، مورد ارزیابی قرار گرفته و روش پیشنهادی این پژوهش معرفی خواهد شد. در بخش آزمایش‌ها، جزئیات آزمایش‌های پرتودهی انجام شده بر روی واحد RIU، شامل شرایط پرتودهی، دوزهای اعمال شده و روش‌های اندازه‌گیری، ارائه خواهد شد. در نهایت، نتایج حاصل از پرتودهی‌ها به‌طور جامع تحلیل شده و ضمن مقایسه با مطالعات

در انرژی و توانایی نفوذ آن‌ها در مواد است. به دلیل انرژی بالاتر و جرم بیشتر، پروتون‌ها توانایی نفوذ بیشتری در مواد، از جمله آلومینیوم که معمولاً در ساختار سامانه‌های فضایی استفاده می‌شود، دارند. در نتیجه، پروتون‌ها می‌توانند به عمق بیشتری از سامانه نفوذ کرده و آسیب‌های بیشتری را ایجاد کنند. الکترون‌ها به دلیل انرژی کمتر و جرم بسیار کم‌تر، توانایی نفوذ کمتری در مواد دارند. بسیاری از الکترون‌ها در لایه‌های بیرونی سازه متوقف شده و انرژی خود را از دست می‌دهند. همچنین باید توجه داشت که استفاده از چشمه کبالت ۶۰ برای شبیه‌سازی تأثیر ذرات باردار، به‌ویژه الکترون‌ها، دارای محدودیت‌هایی است. طیف انرژی ذرات گاما از چشمه کبالت ۶۰ با طیف انرژی ذرات باردار در محیط فضایی متفاوت است و این تفاوت می‌تواند بر نتایج شبیه‌سازی تأثیر گذار باشد. با این حال، استاندارد ESA استفاده از چشمه کبالت ۶۰ را به دلیل سهولت دسترسی و هزینه کمتر، به‌عنوان یک روش استاندارد برای ارزیابی تأثیر TID پیشنهاد می‌کند [۱۱]. برای شبیه‌سازی دقیق‌تر تأثیر ذرات باردار، می‌توان از شتاب‌دهنده‌های ذرات استفاده کرد. در بحث نوع حفاظ نیز باید یادآور شد که برای کاهش اثرات تابش ترمزی، از موادی استفاده می‌شود که الکترون‌ها را به راحتی جذب کرده و باعث کاهش سرعت آن‌ها شوند. مواد سبک با چگالی کم مانند آلومینیوم، انتخاب‌های مناسبی برای این منظور هستند. این مواد به دلیل چگالی کم، احتمال وقوع برهم‌کنش‌های الکترون-الکترون را افزایش می‌دهند و در نتیجه، الکترون‌ها انرژی خود را سریع‌تر از دست می‌دهند. اما سرب به دلیل چگالی بسیار بالا، توانایی جذب بالایی پروتوهای گاما را دارد. اتم‌های سرب دارای تعداد زیادی الکترون هستند که با برهم‌کنش با فوتون‌های گاما، انرژی آن‌ها را جذب کرده و باعث کاهش شدت پرتو می‌شوند.

جدول ۱- مشخصات ماموریت مفروض برای شبیه‌سازی در محیط SPENVIS.

Table 1. Assumed mission specifications for simulation in SPENVIS environment.

Modeling Specifications	
1 jun 2023	Launch Time
2020 to 2031	Solar Cycle
2024	Solar Cycle Maximum
۵ سال	Mission Duration
GEO	Orbit
IGE-2006(upper flux)	Trapped Electron Model
AP8-MAX	Trapped Proton Model
ESP	Solar Proton Model
GCR_ISO (Solar minimum)	Galactic Cosmic Ray Model

نیز با چالش‌هایی همچون پیچیدگی فرآیند تولید و عدم وجود مطالعات جامع در این زمینه هنوز نیازمند مطالعات و تحقیقات بیشتری است تا در سامانه‌های فضایی کاربردی شود.

شبیه‌سازی محیط تشعشعات فضایی و برآورد میزان TID در ماموریت مفروض

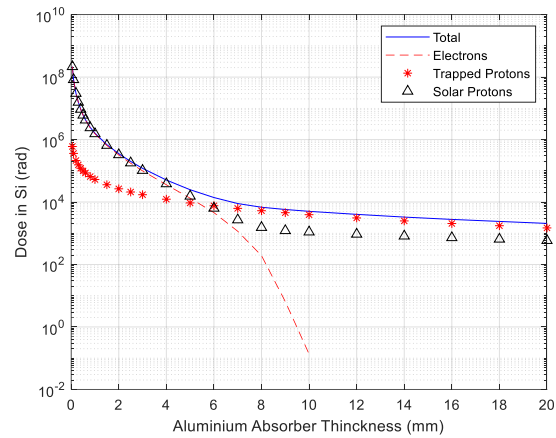
دوز یونیزاسیون تجمعی یکی از چالش‌های اصلی در طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های فضایی است. میزان TID که یک سامانه فضایی در طول ماموریت خود تجربه می‌کند، به عوامل متعددی از جمله تراز مدار، مدت زمان ماموریت، فعالیت خورشیدی، جنس و ضخامت پوشش‌های محافظ بستگی دارد. برای تخمین تقریبی دوز TID دریافتی توسط یک سامانه فضایی، می‌توان از نرم‌افزارهای تخصصی مانند SPENVIS استفاده کرد. این نرم‌افزارها با در نظر گرفتن مدل‌های محیط فضایی و پارامترهای مدار، امکان محاسبه دوز تابشی را فراهم می‌آورند. به‌عنوان یک برآورد کلی، ماهواره‌های با تراز مدار پایین و عمر کوتاه‌تر، معمولاً دوز TID کمتری را تجربه می‌کنند. برای مثال، ماهواره‌هایی با تراز مدار پایین (LEO) و عمر کمتر از سه سال، با در نظر گرفتن پوشش محافظ آلومینیومی به ضخامت دو میلی‌متر، معمولاً دوز TID کمتر از ۵ کیلوگرا را دریافت می‌کنند. با افزایش ارتفاع مدار و مدت زمان ماموریت، دوز TID به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای ماموریت‌های طولانی‌مدت و ترازهای مدار بالا، مانند ماموریت‌های بین‌سیاره‌ای، دوز TID می‌تواند به صدها کیلوگرا یا حتی مگا راد برسد. مقاومت قطعات الکترونیکی در برابر TID به نوع ماده نیمه‌رسانا، فرآیند ساخت و طراحی مدار بستگی دارد. قطعات فضایی به گونه‌ای طراحی می‌شوند که در برابر دوزهای بالای TID مقاوم‌تر باشند. با این حال، حتی قطعات فضایی نیز دارای محدودیت‌هایی در تحمل دوز تابشی می‌باشند. برای شبیه‌سازی ابتدا مشخصات اولیه مطابق جدول ۱ را برای محاسبات مربوط به آسیب‌های پرتویی TID، DD و SEE در یک ماموریت ۵ ساله در مدار GEO در طول جغرافیایی ۸۱ درجه شرقی آورده شده، در نظر می‌گیریم. نتایج شبیه‌سازی به‌طور کامل در شکل ۱ آمده است همچنین بخشی از نتایج به‌صورت عددی برای مشاهده آسان‌تر و برای ضخامت‌های معقول سازه آلومینیومی در جدول ۲ نشان داده شده است. اگر ضخامت سازه حدود ۲ میلی‌متر و ضخامت باکس را نیز ۲ میلی‌متر در نظر بگیریم، مجموع ضخامت حفاظ ۴ میلی‌متر باید در نظر گرفته شود. مطابق شبیه‌سازی TID کل حدود ۵۰ کیلوگرا برای دوره ماموریت خواهد بود.

همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی در محیط SPENVIS نشان می‌دهد، ذرات باردار موجود در محیط فضایی، تأثیرات متفاوتی بر روی سامانه‌های فضایی دارند. یکی از دلایل اصلی تفاوت تأثیر الکترون‌ها و پروتون‌ها، تفاوت

دوز یونیزاسیون تجمعی (TID) است. مقادیر TID اعلام شده در مراجع و استانداردها اغلب به عنوان یک میانگین برای طیف گسترده‌ای از قطعات و فناوری‌های مختلف ارائه می‌شوند. بنابراین، این مقادیر لزوماً نشان دهنده مقاومت دقیق قطعاتی که در یک طراحی خاص استفاده می‌شوند، نیستند. علاوه بر این، عوامل دیگری مانند نرخ دوز، نقطه کار قطعه در سیستم و شرایط محیطی نیز بر مقاومت قطعات در برابر TID تأثیر گذار هستند. به منظور اطمینان از عملکرد صحیح سامانه فضایی در طول ماموریت، مفهوم ضریب طراحی ایمنی^۱ (RDM) معرفی شده است [۲۰، ۱۹]. ضریب RDM به عنوان نسبت دوز TID که یک قطعه می‌تواند تحمل کند به دوز TID پیش‌بینی شده برای ماموریت تعریف می‌شود. مقدار RDM بالا نشان‌دهنده حاشیه ایمنی بیشتری برای سامانه فضایی در برابر اثرات مخرب TID است. مقدار ایده‌آل برای RDM معمولاً ۱۰ در نظر گرفته می‌شود، به این معنی که قطعات باید قادر به تحمل ده برابر دوز TID پیش‌بینی شده برای ماموریت باشند. با این حال، دستیابی به چنین مقدار RDM بالایی ممکن است از نظر هزینه و پیچیدگی طراحی، چالش‌برانگیز باشد. استانداردهای جدیدتر [۱۹] شرایط آسان‌تری دارند و حتی تحت شرایطی RDM را حتی می‌توان یک در نظر گرفت. در این پژوهش مقدار RDM برابر یک در نظر گرفته شده است.

واحد RIU یا C&M مورد مطالعه

تجهیزی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است، به‌طور معمول با دو نام مختلف در ماهواره‌ها و فضایی‌ها شناخته می‌شود و هدف از این مطالعه، افزایش تاب‌آوری آن در برابر دوز یونیزاسیون تجمعی بوده است. در برخی سیستم‌های فضایی به عنوان واحد کنترل مانیتورینگ محلی (C&M) و در برخی به عنوان واحد راه دور محلی (RIU) از آن یاد می‌شود. این واحد در محل قرار گرفته در سامانه فضایی، به عنوان واسط بین زیرسیستم تحت کنترل و پایش خود و زیرسیستم TT&C یا OBDH عمل می‌کند. دستورات ارسال شده از TT&C یا OBDH را در زیرسیستم تحت فرمان خود اعمال یا اجرا می‌کند. همچنین داده‌های خانه‌داری^۲ را از زیرسیستم تحت نظر خود جمع‌آوری و تحویل TT&C یا OBDH ماهواره می‌دهد. علاوه بر این یک سری الگوریتم‌های کنترلی یا پردازش‌های لازم برای سیستم هدف نیز در این واحد ممکن است انجام شود. به عنوان نمونه RIU یا C&M محلی مورد بحث در این مقاله موظف است از طریق باس CAN با OBDH ماهواره تبادل داده و دستور داشته باشد. همچنین یک سری الگوریتم‌ها مانند الگوریتم مدیریت خطا و الگوریتم مدیریت مخابراتی به صورت خودکار یا دستی را در زیرسیستم مخابراتی تحت کنترل و پایش خود به اجرا بگذارد.



شکل ۱- نتایج شبیه‌سازی میزان دوز یونیزاسیون تجمعی بر حسب ضخامت حفاظ آلومینیوم.

Fig. 1. Simulated results of total ionizing dose as a function of aluminum shield thickness.

جدول ۲- بخشی از نتایج نمودار شکل ۱ به صورت عددی.

Table 2. Part of the data from figure 1, presented numerically.

Thickness of aluminum (mm)	Total ionizing dose (rad)
0.05	2.17E+08
0.10	8.33E+07
0.20	3.03E+07
0.30	1.58E+07
0.40	9.43E+06
0.50	6.14E+06
0.60	4.29E+06
0.80	2.45E+06
1.00	1.59E+06
1.50	6.87E+05
2.00	3.53E+05
2.50	1.99E+05
3.00	1.20E+05
4.00	5.06E+04

اما نکته بعدی میزان تاب‌آوری قطعات در برابر TID است. که با شبیه‌سازی قابل ارزیابی نیست و نیاز به پرتودهی دارد. نتایج پرتودهی در بخش‌های آتی ارائه و بحث و بررسی خواهد شد. یکی از چالش‌های اصلی در طراحی سامانه‌های فضایی، ارزیابی مقاومت قطعات الکترونیکی در برابر

استفاده از سوکت‌های محافظتی برای تراشه‌ها به منظور بهبود تاب‌آوری در برابر TID مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل شماتیکی از برد مدار چاپی طراحی شده را نشان می‌دهد که در آن حفره‌های ایجاد شده است. حفره‌های موجود بر روی برد مدار چاپی معمولاً به دو منظور اصلی ایجاد می‌شوند: محل قرارگیری پیچ‌ها برای اتصال برد به سایر اجزا و محل عبور پایه‌های قطعات سوراخ‌دار^۱. با این حال، برخی حفره‌ها با هدف حفاظت از مدار در برابر آسیب‌های تشعشعات، طراحی شده‌اند. چنانچه در شکل قابل مشاهده است، در برخی موارد، حفره‌های حفاظتی در طراحی لحاظ شده‌اند اما پر نشده‌اند. دلایل اصلی این امر عبارت‌اند از: الف) ابعاد بسیار کوچک حفره‌ها؛ این حفره‌ها بسیار کوچک هستند و پر کردن آن‌ها متأسفانه باعث خرابی مدار می‌شود و نیازمند تجهیزات تخصصی است. ب) کاربرد حفره‌ها در قطعات غیرفعال: این حفره‌ها برای قطعات غیرفعال مانند خازن‌ها و مقاومت‌ها تعبیه شده‌اند که به دلیل ساختار ساده‌تر، کمتر در معرض آسیب‌های ناشی از تشعشعات TID قرار می‌گیرند. به همین دلایل، پر کردن این حفره‌ها در برخی موارد از اولویت خارج شده است. شایان ذکر است که حفره‌های ایجاد شده با آلیاژ قلع-سرب پوشش‌دهی شده‌اند. آلیاژ سرب و قلع به دلیل نقطه ذوب پایین، قابلیت لحیم‌کاری آسان با هویه و سازگاری با مواد تشکیل‌دهنده برد مدار چاپی، به‌عنوان لایه حفاظتی انتخاب شد. این آلیاژ به‌راحتی در دسترس بوده و می‌تواند حفره‌های ایجاد شده را به‌طور کامل پر کند.

اصل بنیادین روش پیشنهادی دوم، یعنی کلیدزنی پویا، بر پایه درک عمیق از سازوکار اثرگذاری دوز یونش جمعی (TID) بر ساختار بلور تراشه است. به‌طور کلی، خاموش کردن دستگاه گاهی اوقات می‌تواند پاسخ تشعشع را بهبود بخشد [۲۲، ۲۱]. البته استثناهایی هم در این زمینه وجود دارد [۲۳]. با خاموش کردن دوره‌ای بخش‌هایی از مدار، فرصت کافی برای بازترکیب حامل‌های بار و ترمیم آسیب‌های ناشی از پرتوهای یونیزان فراهم می‌شود. این رویکرد، ضمن کاهش میزان دوز جذب شده توسط تراشه، از تجمع آسیب‌ها در طول زمان جلوگیری کرده و در نتیجه، پایداری عملکرد طولانی مدت مدار را تضمین می‌کند. شایان ذکر است که اجرای موفق این روش مستلزم طراحی دقیق مدارهای منطقی کنترل‌کننده و توسعه الگوریتم‌های بهینه برای تعیین زمان و مدت کلیدزنی است. به‌عبارت دیگر، کلیدزنی پویا صرفاً مستلزم تغییر در نحوه عملکرد مدار بوده و هزینه‌های تولید را افزایش نمی‌دهد. در شکل شمایی از ساختار دوگانه که غالباً در سیستم‌های افزونگی دوگانه سرد یا گرم^۲ دیده می‌شود، نشان داده شده است. در این ساختار دو برد کاملاً مشابه در کنار هم قرار می‌گیرند و به موازات هم یا به‌عنوان یکد یکدیگر به کار برده می‌شوند. اما در این پژوهش، به ازای هر یک کیلوراد پرتودهی (تقریباً هر یک ساعت) بین این دو بخش کلیدزنی انجام شده است، تا تاثیر کلیدزنی روشن و خاموش بودن متوالی بررسی گردد.

با توجه به کم بودن تعداد ورودی/خروجی‌ها و سرعت پردازش پایین بر حسب مصالحه‌های انجام شده، برای واحد RIU مورد نیاز در زیرسیستم مورد نظر، میکروکنترلر به‌عنوان پردازنده اصلی این واحد در نظر گرفته شده است. میکروکنترلر مورد استفاده دارای ماژول‌های لازم جهت تبادل داده با CAN اصلی و یکدک و همچنین مبدل آنالوگ به دیجیتال داخلی است. با توجه به وظایف تعریف شده برای واحد مورد مطالعه در این پژوهش، علاوه بر میکروکنترلر، یک سری رگولاتور تغذیه، فرستنده گیرنده CAN، فرستنده گیرنده ديفرانسیلی RS485، مبدل سطح ولتاژ، سنسور دمای دیجیتال و برخی تراشه‌های دیگر نیز در واحد قرار دارد. در طول تست پرتودهی نیز مؤلفه‌های زیر مدام پایش می‌گردد:

- جریان کشی کل تجهیز.
- ارتباط CAN (اصلی و یکدک).
- ارسال و دریافت با پروتکل SPI (روی خود تجهیز).
- سنسور دمای نصب شده روی برد.
- دو نمونه ولتاژ آنالوگ خوانده شده با ADC.
- چند ورودی خروجی دیجیتال (نوشتن و خواندن مقدار دیجیتال پایه‌ها).

راه کارهای پیشنهادی جهت افزایش تاب‌آوری TID

جهت ارتقای تاب‌آوری در برابر دوز یونیزاسیون جمعی (TID) در تراشه‌های یک سامانه فضایی، با فرض استفاده از قطعات تجاری و عدم دسترسی به قطعات فضایی، راه کارهای زیر در این مقاله پیشنهاد و کارایی آنها بر پرتودهی سنجیده می‌شود:

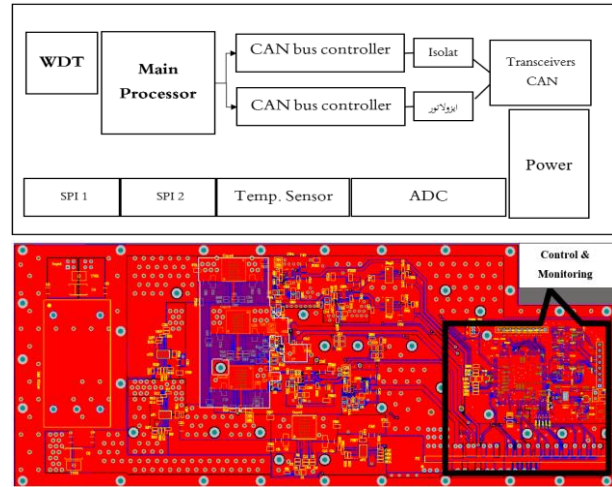
- حفاظت موضعی: اعمال پوشش‌های محافظتی بر روی نواحی بحرانی تراشه به منظور کاهش دوز جذب شده.
- کلیدزنی پویا: قطع و وصل کردن تغذیه تجهیز اصلی و تجهیز پشتیبان.
- غربالگری تراشه‌های ضعیف: شناسایی و حذف تراشه‌هایی که تاب‌آوری کمتری دارند پیش از بهره‌برداری.

برای ارزیابی کارایی روش حفاظت موضعی، رویکردی مبتنی بر ایجاد حفره‌های محافظتی در برد مدار چاپی و پوشش‌دهی آن‌ها با آلیاژ قلع و سرب اتخاذ شد. با تمرکز بر نواحی حساس تراشه و اجتناب از افزایش ضخامت کلی محافظ، تلاش شده است تا حداکثر میزان حفاظت با حداقل مواد مصرفی حاصل شود. به‌همین منظور، حفره‌هایی در برد مدار چاپی ایجاد و با آلیاژ مذکور پر شده است. لازم به‌ذکر است که در صنایع فضایی، روش‌های مشابه به ویژه

در رویکرد سوم، با هدف افزایش تاب‌آوری، شناسایی و جایگزینی قطعات با حساسیت بالاتر به TID در اولویت قرار گرفته است. این رویکرد مستلزم انجام تست‌های پرتودهی گسترده و تحلیل دقیق داده‌های حاصل از آن‌ها است. با این حال، تغییر در طراحی مدار و جایگزینی قطعات، چالش‌های مرتبط با زمان‌بندی پروژه و هزینه‌ها را به همراه دارد. لذا، اجرای این روش در مراحل اولیه طراحی سیستم فضایی ضروری است تا فرصت کافی برای اصلاح و بهبود طراحی فراهم شود. در این پژوهش، با توجه به ماهیت تحقیقاتی پروژه، دو مرحله تست پرتودهی با فاصله زمانی مناسب انجام شد تا امکان ارزیابی عملکرد قطعات، شناسایی نقاط ضعف و انجام اصلاحات لازم فراهم گردد. در مورد نمونه مطالعاتی این مقاله یعنی برد RIU یک سری تست اولیه انجام شده است و قطعه‌ای که کمترین مقاومت در برابر TID داشته شناسایی گردید. سپس برای تست‌های سری دوم یک قطعه جایگزین استفاده شد. نتایج پرتودهی این جایگزینی نیز در بخش آتی بحث و بررسی خواهد شد.

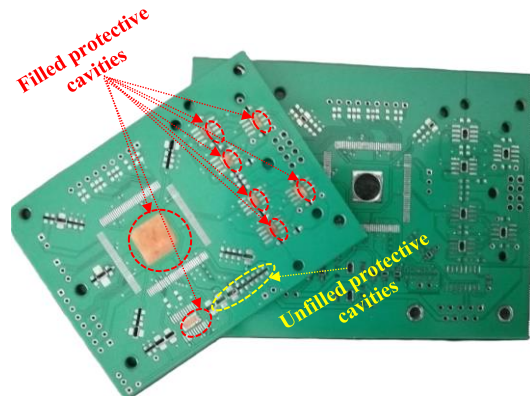
در این پژوهش، علاوه بر ارزیابی روش‌های پیشنهاد شده در این مقاله برای افزایش تاب‌آوری، موارد دیگری نیز به صورت پرتودهی بررسی و نتایج آن در این مقاله منعکس شده است. مورد اول بررسی تأثیر حجم نرم افزار (میزان استفاده از حافظه برنامه‌نویسی پردازنده) و فرکانس کاری پردازنده بر تاب‌آوری است. به این صورت که در این پژوهش دو نسخه مشابه از سخت‌افزار RIU، اما با حجم برنامه متفاوت و فرکانس کاری متفاوت نیز پرتودهی گردیده است. علاوه بر این در این پژوهش به بررسی تأثیر جهت تابش پرتو بر آسیب‌پذیری قطعات الکترونیکی نیز پرداخته شده است. این سؤال تحقیقاتی، با هدف شناخت بهتر رفتار قطعات الکترونیکی در محیط‌های پرتوزا و ارائه راه‌کارهای بهینه‌سازی حفاظت از آن‌ها، مطرح گردید. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، اطلاعات ارزشمندی در خصوص تأثیر جهت تابش پرتو بر میزان آسیب‌پذیری قطعات ارائه داده و به غنی‌سازی دانش موجود در این حوزه کمک کرده است.

در بخش‌های پیش رو، به بررسی نتایج آزمایش‌های پرتودهی انجام شده بر روی نمونه‌های مجهز به راه‌کارهای پیشنهادی پرداخته می‌شود. با تحلیل داده‌های حاصل از این پرتودهی، کارایی هر یک از روش‌های حفاظت موضعی، کلیدزنی پویا و جایگزینی قطعات در افزایش تاب‌آوری مدار ارزیابی خواهد شد. همچنین، تأثیر جهت تابش پرتو بر آسیب‌پذیری قطعات و تأثیر جایگزینی قطعات بر عملکرد کلی مدار مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با ارائه نتایج تجربی و تحلیل نتایج، به ارزیابی جامع روش‌های پیشنهادی پرداخته شده و بهترین راه‌کار برای افزایش تاب‌آوری مدار در برابر دوز یونش تجمعی (TID) پیشنهاد خواهد شد.



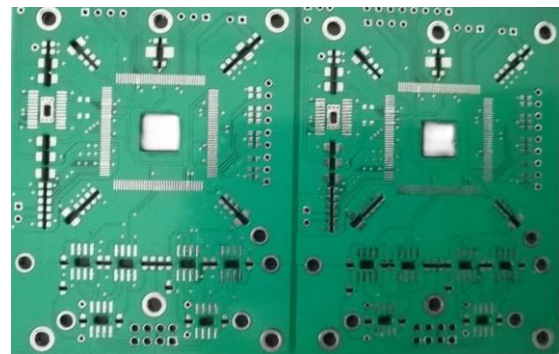
شکل ۲- بلوک دیاگرام عملکردی و شمای سخت افزار واحد RIU در پیکربندی نهایی محموله.

Fig. 2. Block diagram and hardware of the RIU unit in the final payload.



شکل ۳- برد مدار چاپی پیشنهادی حاوی حفره‌های محافظتی و تصویر نمونه پر شده حفره‌ها.

Fig. 3. Proposed printed circuit board with protective cavities and an image of the filled cavities as an example.



شکل ۴- شمایی از ساختار دوگانه از برد RIU جهت تست پرتودهی و ارزیابی اثر کلیدزنی.

Fig. 4. Schematic of a dual-RIU structure for radiation testing and switching evaluation.

پرتودهی: چالش‌ها، جزئیات و نتایج

یکی از چالش‌های اصلی در انجام پژوهش‌های مرتبط با تاب‌آوری قطعات الکترونیکی در برابر پرتوهای یونیزان، محدودیت‌های موجود در دسترسی به تجهیزات تست پرتودهی است. به ویژه در زمینه تست‌های دوز یونش تجمعی، امکانات موجود بسیار محدود و همراه با محدودیت‌هایی است. در این پژوهش، با توجه به محدودیت‌های موجود، از منابع کبالت ۶۰ موجود استفاده شده است. با این حال، این منابع با چالش‌هایی همچون ظرفیت محدود، ناهمگونی میدان پرتو و محدودیت‌های زمانی مواجه هستند.

- محدودیت‌های منابع کبالت ۶۰: منابع کبالت ۶۰ موجود عمدتاً در مراکز درمانی و سازمان انرژی اتمی مستقر هستند. استفاده از این منابع به دلیل اولویت‌های درمانی و محدودیت‌های دسترسی با چالش‌هایی همراه می‌باشد.

- ناهمگونی میدان پرتو: میدان پرتو در بسیاری از منابع کبالت ۶۰ موجود، یکنواخت نبوده و دارای شیب دوز است. این موضوع باعث ایجاد مشکلاتی در کنترل یکنواخت بودن دوز دریافتی توسط نمونه‌ها می‌شود.

- محدودیت‌های هندسی: ابعاد محفظه‌های پرتودهی در برخی موارد کوچک بوده و امکان قرارگیری نمونه‌های بزرگ از جمله تجهیز RIU را محدود می‌کند.

- محدودیت‌های زمانی: تخصیص زمان برای انجام آزمایش‌های پرتودهی در برخی موارد با محدودیت‌هایی همراه بود و باعث طولانی شدن فرایند آزمایش می‌گردد.

با توجه به چالش‌های فوق، برای انجام آزمایش‌های پرتودهی در این پژوهش، از منبع کبالت ۶۰ موجود در سایت انرژی اتمی کرج استفاده شده است. مطابق استاندارد پرتودهی و تست TID اژانس فضایی اروپا [۱۱]، پرتودهی سامانه فضایی مورد مطالعه در پنجره نرخ استاندارد (۰/۳۶ تا ۱۸۰ /krad(Si) ساعت) قابل انجام است. در این پژوهش، با تنظیم فاصله صفحه نصب تجهیز از منبع، آهنگ دوز به مقدار ۰/۹۸۹۶ کیلو راد در ساعت تنظیم گردیده است. صفحه نصب دارای ابعاد ۲۸×۲۸ سانتی‌متر مربع بوده که مطابق با استاندارد، عدم یکنواختی میدان تابش در آن کمتر از ۱۰٪ بود. ارزیابی صحت عملکردی نمونه‌ها نیز در هر ساعت (تقریباً در هر یک کیلو راد) انجام شده و نتایج ثبت شده است.

به منظور ارزیابی تاب‌آوری اولیه نمونه‌های RIU در برابر دوز یونیزاسیون تجمعی، دو نمونه مشابه از نظر سخت‌افزار اما متفاوت از نظر نرم‌افزار (حجم برنامه و فرکانس کاری پردازنده) در شرایط استاندارد آزمایشگاه پرتودهی کرج تحت آزمایش قرار گرفتند. این آزمایش‌ها مطابق با استانداردهای تست TID [۱۱] و با هدف تعیین حد تاب‌آوری

اولیه نمونه‌ها انجام شدند. هر دو نمونه در معرض دوز پرتوی قرار گرفتند. در دوز تقریبی ۲۰ و ۲۳ کیلو راد، افزایش ناگهانی جریان مصرفی و در نتیجه از دست رفتن عملکرد مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که حد تاب‌آوری اولیه نمونه‌ها در این محدوده قرار دارد. نتایج تجزیه و تحلیل این دو نمونه عبارت است از:

- تأثیر نقطه کار میکروکنترلر RIU: بررسی نتایج نشان می‌دهد که نقطه کار مدار، شامل حجم برنامه و فرکانس کاری، تأثیر قابل توجهی بر میزان تاب‌آوری دارد. نمونه‌ای که حجم نرم‌افزاری و فرکانس کاری بالاتری داشت، در دوز پایین‌تری دچار شکست شد.
- انتشار خرابی: پس از تجزیه و تحلیل نمونه‌های آسیب دیده، مشخص شد که خرابی یک قطعه خاص منجر به خرابی سایر قطعات شده است. این نتیجه منجر به پیشنهاد ایده غربالگری، شناسایی و تعویض قطعات حساس به TID گردید.

با تکیه بر نتایج حاصل از پرتودهی مرحله اول و با هدف ارزیابی اثربخشی روش‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی (حفاظت موضعی و کلیدزنی پویا، غربالگری و جایگزینی قطعه حساس نسبت به TID)، مرحله دوم آزمایش‌های پرتودهی برنامه‌ریزی و اجرا شد.

ساختار پرتودهی با منبع کبالت ۶۰ برای سری دوم در شکل ۵ نشان داده شده است. چنانچه در شکل مشخص می‌باشد نمونه‌ها بر روی یک صفحه در فاصله مشخصی از چشمه قرار داده شده‌اند. با تنظیم سازه آسانسوری زیر برد می‌توان فاصله را کم و زیاد کرد. هر چه قدر فاصله نمونه‌ها از چشمه بیشتر شود، نرخ پرتودهی کاهش می‌یابد و با نزدیک کردن صفحه به چشمه آهنگ پرتودهی بیشتر می‌شود. به هر حال، چنانچه اشاره شده فاصله از چشمه به گونه‌ای تنظیم شده است که نرخ دوز حدود یک کیلو راد در ساعت باشد. از هر نمونه نیز زوج سیم برای تغذیه و یک زوج سیم برای ارتباط CAN خارج شده و به منبع تغذیه و لب‌تاب در بیرون از اتاق پرتودهی متصل شده است. قطع و وصل کردن تغذیه بردها و پایش عملکرد آنها به واسطه این سیم‌کشی‌ها انجام شده است. در تمام صفحه پرتودهی (۲۸ در ۲۸ سانتی‌متر مربع) با استفاده از دزیتر آهنگ دوز به صورت دوره‌ای اندازه‌گیری شده تا این اطمینان حاصل شود که در کل دوره پرتودهی (حدود ۶۰ ساعت متوالی) عدم یکنواختی از ۱۰٪ مجاز در استاندارد [۱۱] تجاوز نکند.

در پرتودهی یک تجهیز پیچیده مانند RIU، سطح تاب‌آوری با پایش دو عامل تعیین می‌شود. عامل اول و رایج عبارت است از میزان جریان کشی تجهیز در حین پرتودهی و عامل دوم صحت عملکردی تجهیز در طول پرتودهی می‌باشد. پایش جریان کشی عبارت است از ثبت میزان جریان مصرفی تجهیز در بازه‌های زمانی مشخص که این بازه زمانی برای این پژوهش در هر ساعت تقریباً معادل یک کیلو راد

جریان‌کشی و مشکل رگولاتور از کار افتاده‌اند و سایر بخش‌ها کارایی خود را بر اثر پرتودهی از دست نداده‌اند.

به‌طور خلاصه هر یک از نمونه‌ها در یک سطح مشخصی از پرتودهی بر اثر رشد نمایی جریان‌کشی کارایی خود را از دست داده‌اند این مقادیر عبارتند از: نمونه یک (بورد اصلی با پرتودهی در دو حالت مقابل و پشت) با سطح تاب‌آوری ۲۶/۵ کیلو راد؛ نمونه دو (بورد اصلی با پرتودهی از پشت با شیلد محلی حدود ۲ میلی‌متر پشت شده با قطع و سرب به اضافه یک ورق نازک آلومینیومی) با سطح تاب‌آوری ۲۶ کیلو راد؛ نمونه سه (بورد با کلیدزنی یا روشن/خاموش شدن متوالی) با سطح تاب‌آوری ۳۷ کیلو راد و در نهایت در رابطه با نمونه چهار (جایگزینی قطعه ضعیف)، حداقل تا حدود ۶۰ کیلو راد هیچ مشکلی در نمونه دیده نشد.

تحلیل نتایج آزمایش‌های مرحله دوم، دستاوردهای ارزشمندی را در مورد تأثیر روش‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی بر تاب‌آوری مدارها ارائه می‌دهد. نتایج تجزیه و تحلیل پرتودهی سری دوم عبارت است از:

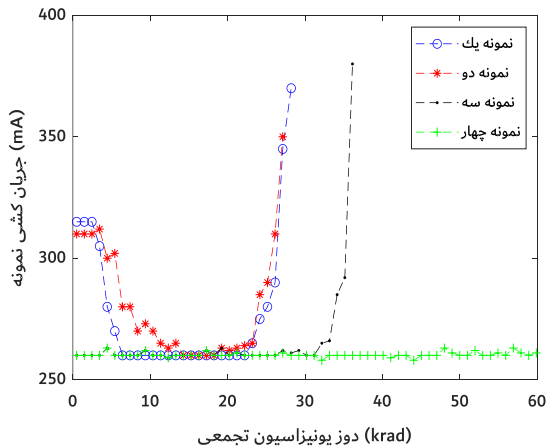
- تأثیر جهت تابش: آزمایش‌ها نشان داد که جهت تابش پرتو (از رو یا پشت) تأثیر قابل توجهی بر تاب‌آوری مدار ندارد.
- حفاظت موضعی: استفاده از لایه حفاظتی سرب و قلع به ضخامت ۲ میلی‌متر تأثیر قابل توجهی در افزایش تاب‌آوری مدار نداشت. بررسی‌های بیشتر نشان داد که روش‌های پیچیده‌تر حفاظتی مورد نیاز است. دلیل این موضوع ممکن است به اثر تابش‌ها یا ذرات ثانویه مرتبط باشد. یا ممکن است به دلیل تفاوت ماهیت و نحوه اثرگذاری کبالت ۶۰ با نحوه اثرگذاری TID فضایی که ناشی از تابش الکترون‌ها و یون‌های سبک می‌باشد، مرتبط باشد. دلیل استفاده از لایه حفاظتی سرب و قلع این بود که این آلیاژ قابل دسترس است و با حرارت هویه به راحتی حفره‌های ایجاد شده را پر می‌کند. همچنین با مواد به کار رفته در برد مدار چاپی سازگار می‌باشد.
- کلیدزنی پویا: روش کلیدزنی پویا با فرکانس ۵۰٪ (یک ساعت روشن و یک ساعت خاموش) منجر به افزایش قابل توجه تاب‌آوری شد. با این حال، بررسی تأثیر سایر فرکانس‌های کلیدزنی می‌تواند به بهینه‌سازی این روش کمک کند.
- جایگزینی قطعات بحرانی: جایگزینی قطعه بحرانی با قطعه‌ای با تاب‌آوری بالاتر، منجر به افزایش قابل توجه تاب‌آوری مدار تا ۶۰ کیلو راد شد.

در این پژوهش، چندین ایده عملی برای افزایش تاب‌آوری در برابر TID مطرح و ساختارهای خاصی از این ایده‌ها با پرتودهی مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به مخرب بودن پرتودهی و غیر قابل استفاده بودن نمونه‌های پرتودهی شده، تست حالت‌های مختلف هر یک از ایده‌های

پرتودهی می‌باشد. برای ممانعت از آسیب به سایر بخش‌های سامانه فضایی معمولاً زمانی که جریان تجهیز از یک درصد مشخص مثلاً ۲۰٪ جریان‌کشی نامی بیشتر می‌شود؛ تجهیز به‌عنوان تجهیز خراب شناسایی می‌گردد. در برخی تجهیزات ممکن است بدون افزایش محسوس در جریان‌کشی تجهیز، بخشی از توابع عملکردی را از دست ببرد؛ که در این حالت نیز میزان دوزی که باعث از دست رفتن بخشی از توابع تجهیز شده است را به‌عنوان سطح تاب‌آوری گزارش می‌شود. بر این اساس، در این مقاله نیز دو سری نمودار بر حسب میزان پرتودهی گزارش شده است. در شکل ۶ میزان جریان‌کشی نمونه‌ها بر حسب دوز یونیزاسیون تجمعی و در شکل عملکرد تابعی نمونه‌ها بر حسب دوز یونیزاسیون تجمعی نشان داده شده است. البته لازم به یادآوری است که تجهیز RIU، توابع عملکردی مختلفی دارد که در بخش قبلی به آن اشاره شد؛ اما برای جلوگیری از تکرار نمودارهای فاقد اطلاعات جدید، صرفاً عملکرد قرائت سنسور دما در این مقاله ارائه شده است.

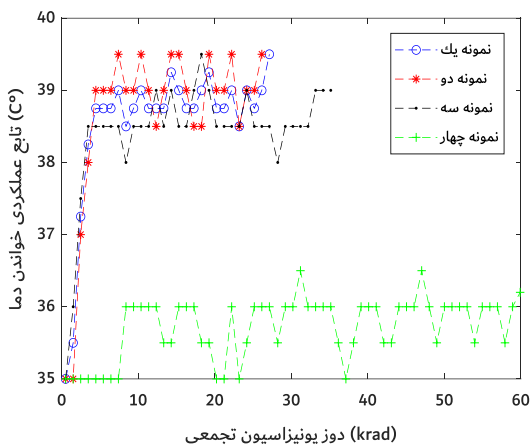
چنانچه اشاره شد در شکل ۶ میزان جریان‌کشی نمونه‌های تحت پرتودهی بر حسب دوز یونیزاسیون تجمعی نشان داده شده است. محور افقی میزان دوز تجمعی است که هر یک کیلو راد با توجه به آهنگ چشمه کبالت ۶۰ حدود یک ساعت پرتودهی می‌باشد. محور عمودی این نمودار نیز میزان جریان‌کشی نمونه‌ها بر حسب میلی‌آمپر را نشان می‌دهد. نمونه‌هایی که از قطعه تغذیه اولیه استفاده کرده‌اند، جریان‌کشی لحظه شروع آنها حدود ۳۱۵ میلی‌آمپر و برد با قطعه جدید تغذیه، جریان‌کشی لحظه شروع ۲۶۰ میلی‌آمپر دارد. در نمونه‌هایی که جریان‌کشی اولیه بالاتری دارند حدود ۶-۷ ساعت پس از پرتودهی کاهش ناگهانی جریان‌کشی ثبت شده است. همه این نمونه‌ها از یک رگولاتور مشابه استفاده کرده‌اند به همین دلیل رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند. با افزایش مدت زمان پرتودهی اولین نشانه از افزایش نمایی جریان‌کشی در نمونه یک و نمونه دو پس از حدود ۲۶ ساعت پرتودهی مشاهده می‌شود. به دنبال این افزایش نمایی جریان‌کشی، ارزیابی عملکردی نیز نشان دهنده خرابی و عدم امکان تبادل داده با نمونه می‌باشد. این جریان‌کشی برای نمونه سه در دوز تجمعی بالاتر رخ داده است و برای نمونه چهار تا ۶۰ کیلو راد، یعنی حتی پس از ۶۰ ساعت پرتودهی مشکلی در جریان‌کشی مشاهده نشده است.

چنانچه اشاره شد، در شکل نیز دمای سنسور روی هر نمونه نمایش داده شده است. هدف از ارایه دمای خوانده شده اطمینان از صحت عملکرد تابعی نمونه در طول پرتودهی است. این نمودارها نشان می‌دهد که تا زمانی که جریان‌کشی نمونه در محدوده مورد انتظار باشد و حالت صعود نمایی رخ نداده است نمونه‌ها به درستی کار می‌کنند و توابع عملکردی لازم را فراهم می‌کنند. با کنار هم قرار دادن نتایج شکل ۶ و شکل می‌توان نتیجه گرفت در نمونه‌های مختلف RIU همگی بر اثر



شکل ۶- جریان کشی (میلی‌آمپر) نمونه‌های تحت پرتودهی بر حسب دوز یونیزاسیون تجمعی (کیلو راد).

Fig. 6. Current (mA) of irradiated samples vs. total dose (kRad).



شکل ۷- دمای خوانده شده از نمونه‌های تحت پرتودهی بر حسب دوز یونیزاسیون تجمعی (کیلو راد).

Fig. 7. Measured temperature of irradiated samples as a function of total ionization dose (kRad).

جمع‌بندی

در این پژوهش، با هدف افزایش تاب‌آوری مدارهای الکترونیکی در برابر دوز یونیزاسیون تجمعی (TID) و با استفاده از قطعات تجاری، راه‌کارهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های پرتودهی نشان داد که نمونه اولیه، بدون اعمال هیچ‌گونه روش مقاوم‌سازی، تا دوز ۲۰ کیلو راد عملکرد خود را حفظ نمود. این نتیجه، حاکی از پتانسیل بالای قطعات تجاری در کاربردهای فضایی است. با توجه به نتایج اولیه، چند روش مقاوم‌سازی مختلف، شامل حفاظت موضعی، کلیدزنی پویا،

مطرح شده نیازمند مجموعه سخت‌افزار جدیدی است که هزینه بالایی دارد. بر این اساس، پوشش جامع همه حالت‌ها ممکن برای ایده‌ها در این پژوهش محقق نشد. در ادامه به کاستی‌ها و پرسش‌های باقی مانده در این پژوهش پرداخته شده است تا محققان در ادامه بتوانند این مسیر را تکمیل کنند. پیشنهادهای مطالعات آتی عبارت‌اند از: ۱- بهینه‌سازی روش حفاظت موضعی: در این پژوهش صرفاً تأثیر آلیاژ قلع و سرب برای پر کردن حفره‌های حفاظتی مورد بررسی قرار گرفته است. در حالی که می‌توان مواد یا آلیاژهای دیگری را نیز در تحقیقات مورد بررسی قرار داد. همچنین حفاظت موضعی در این پژوهش صرفاً از پشت برد انجام شده است. در تحقیقات آتی می‌توان حفاظت موضعی از دو سمت را نیز بررسی کرد. ۲- در این پژوهش کلیدزنی پویا صرفاً در بازه زمانی حدود یک ساعت یا هر یک کیلو راد انجام شده است. در تحقیقات آتی می‌توان این با بازه‌های زمانی مختلفی ارزیابی کرد. در طولانی‌ترین بازه زمانی می‌توان کلیدزنی را بعد از خرابی برد اول انجام داد که این حالت مشابه ایده استفاده از افزونگی سرد خواهد شد. ۳- ترکیب روش‌های مقاوم‌سازی: احتمالاً ترکیب روش‌های مختلف مقاوم‌سازی، مثلاً ترکیب ایده حفاظت موضعی و کلیدزنی پویا، ممکن است به افزایش بیشتر تاب‌آوری مدارها منجر شود، این کار نیز مستلزم پرتودهی‌ها، بررسی و تحلیل‌های جدیدی است. ۴- پرتودهی بالاتر از ۶۰ کیلو راد و تعیین میزان تاب‌آوری محصول RIU: چنانچه در نتایج مشهود می‌باشد، پرتودهی‌های انجام شده در این پژوهش به ۶۰ کیلو راد محدود شده است. پرتودهی باید در تحقیقات آتی برای سطوح بالاتر از ۶۰ کیلو راد انجام شود تا قطعه مستعد خرابی و سطح تاب‌آوری نهایی مشخص گردد.



شکل ۵- پیکربندی پرتودهی نمونه‌های سری دوم.

Fig. 5. Irradiation configuration of the second series samples.

- [6] Y. Zheng *et al.*, "Space radiation and plasma effects on satellites and aviation: Quantities and metrics for tracking performance of space weather environment models," *Space Weather*, vol. 17, no. 10, pp. 1384-1403, 2019, <https://doi.org/10.1029/2018SW002042>.
- [7] M. Kumar, J. S. Ubhi, S. Basra, A. Chawla, and H. S. Jatana, "Total ionizing dose hardness analysis of transistors in commercial 180 nm CMOS technology," *Microelectronics Journal*, vol. 115, 2021, Art. no. 105182, <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2021.105182>.
- [8] H. Evans, "Space environment basics & calculation methods," in *ESA Internal Course, EEE Component Radiation Hardness Assurance Tutorial, ESTEC*, 2016.
- [9] *Space Product Assurance*, ECSS-Q-ST-60-15C, European Cooperation For Space Standardization, ECSS Secretariat ESA-ESTEC, 2012.
- [10] "Single Event Effects Test Method and Guidelines," European Space Components Coordination, ESCC Basic Specification, no. 25100, 2014.
- [11] "Total Dose Steady-State Irradiation Test Method," European Space Components Coordination, ESCC, Basic Specification, no. 22900, 2016.
- [12] L. D. Edmonds, C. E. Barnes, and L. Z. Scheick, *An Introduction to Space Radiation Effects on Microelectronics*, Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, Colifornia Institute Of Technology Pasadena, California, 2000.
- [13] R. D. Schrimpf and D. M. Fleetwood, *Radiation Effects and Soft Errors in Integrated Circuits and Electronic Devices*, World Scientific, 2004.
- [14] S. Shukla, Utkarsh, M. Azam, and K. C. Ray, "An efficient fault-tolerant instruction decoder for RISC-V based dual-core soft-processors," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 70, no. 12, pp. 4816-4825, 2023, <https://doi.org/10.1109/TCSI.2023.3315604>.
- [15] R. Omidi Gosheblagh and K. Mohammadi, "SEU rate and reliability analysis in leo satellites," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 1-9, 2012, (in Persian).
- [16] R. Omidi Gosheblagh and K. Mohammadi, "Three-level management algorithm to increase the SEU emulation rate in DPR based emulators," *Journal of Electronic Testing*, vol. 30, pp. 739-749, 2014, <https://doi.org/10.1007/s10836-014-5489-x>.
- [17] A. Fetzer, M. Anger, P. Oleynik, and J. Praks, "Total ionising dose multilayer shielding optimisation for nanosatellites on geostationary transfer orbit," *Advances in Space Research*, vol. 73, no. 1, pp. 831-845, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.10.028>.
- [18] H. Daneshvar, K. G. Milan, A. Sadr, S. H. Sedighy, S. Malekie, and A. Mosayebi, "Multilayer radiation

غربالگری قطعات و بازطراحی مدار، پیاده‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های پرتودهی بر روی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نشان داد که روش کلیدزنی پویا منجر به افزایش حدود ۵۰٪ تاب‌آوری مدار نسبت به حالت اولیه گردید. بازطراحی مدار با استفاده از قطعات جایگزین با تاب‌آوری بالاتر، منجر به افزایش بیش از سه برابری تاب‌آوری مدار تا ۶۰ کیلو راد گردید. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از روش‌های مقاوم‌سازی مناسب و انتخاب دقیق قطعات، می‌توان تاب‌آوری مدارهای الکترونیکی در برابر دوز یونیزاسیون تجمعی را به‌طور قابل توجهی افزایش داد. نتایج این پژوهش می‌تواند در طراحی و ساخت مدارهای الکترونیکی برای کاربردهای فضایی و سایر محیط‌های پرتوزا مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از کلیه همکارانی که در انجام آزمایش‌های پرتودهی این پژوهش مشارکت داشته‌اند، به‌ویژه از مسئول و کارشناسان محترم آزمایشگاه پرتودهی که با ارائه مشاوره‌های تخصصی و پشتیبانی فنی، نقش مؤثری در موفقیت این پژوهش ایفا نموده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] Y. Chi, C. Cai, and L. Cai, "Radiation effects of advanced electronic devices and circuits," *Electronics*, vol. 13, no. 6, 2024, Art. no. 1073, <https://doi.org/10.3390/electronics13061073>.
- [2] 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," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 71-76, 2021, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2021.1246>.
- [3] Y. Sun *et al.*, "Investigation of total ionizing dose effects in 4H-SiC power MOSFET under gamma ray radiation," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 197, 2022, Art. no. 110219, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110219>.
- [4] M. Naito *et al.*, "Investigation of shielding material properties for effective space radiation protection," *Life Sciences in Space Research*, vol. 26, pp. 69-76, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2020.05.001>.
- [5] NASA Technical Reports Server (NTRS). [online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov>

- Nuclear Science*, vol. 52, no. 6, pp. 2602-2608, 2005, <https://doi.org/10.1109/TNS.2005.860709>.
- [22] J. S. Li *et al.*, "Reversible total ionizing dose effects in NiO/Ga₂O₃ heterojunction rectifiers," *ECS Transactions*, vol. 111, no. 2, 2023, Art. no. 35, <https://doi.org/10.1149/11102.0035ecst>.
- [23] M. Poizat, "TID total ionizing dose: Radiation environment and its effects in EEE components and hardness assurance for space applications," in *15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*, Moscow, Russia, 2015.
- shield for satellite electronic components protection," *Scientific Reports*, vol. 11, 2021, Art. no. 20657, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99739-2>.
- [19] "Space product assurance, Radiation, Hardness Assurance," ESA-TEC-QE/2009/22. Issue 1, 2009.
- [20] "Radiation Design Margin Requirement." NASA, Lesson number, 792, 1999. [Online]. Available: <https://llis.nasa.gov/lesson/792>
- [21] S. C. Witczak, R. C. Lacoce, J. V. Osborn, J. M. Hutson, and S. C. Moss, "Dose-rate sensitivity of modern nMOSFETs," *IEEE, Transactions on*