

ارائه روش تحلیلی و تصمیم‌گیری برای انجام آزمون دز یونیزان کل در ماموریت‌های فضایی

حمیده دانش‌نور^{۱*}

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

چکیده

بقا و عملکرد موفق سامانه‌های فضایی در محیط تابش‌های فضایی بدون در نظر گرفتن ملاحظات تشعشعی امکان پذیر نیست. یکی از وجوه اصلی تمایز طراحی سامانه‌های فضایی با سامانه‌های زمینی وجود پرتوهای زیان‌بار فضایی است. RHA یا تضمین مقاومت تشعشعی، دربرگیرنده تمامی فعالیت‌ها در خصوص فراهم‌آوری ضمانت لازم برای درست کارکردن قطعات الکترونیک بعد از قرارگیری در معرض تابش‌های فضایی است. هدف از انجام این کار ارائه روشی برای تحلیل داده‌های حاصل از مقادیر پارامترهای آسیب پرتویی TID برای قرارگیری فن‌آوری‌های حساس به تابش در ماموریت‌های فضایی است. در نهایت بر مبنای تحلیل انجام شده، تصمیمات لازم جهت انجام و یا عدم انجام آزمون TID اتخاذ می‌شود. نتایج بررسی نشان می‌دهد که با توجه به سطح آستانه تحملی قطعات و مقایسه با سطحی که در ماموریت وجود دارد و توجه به حاشیه تشعشعی، توجه به داده‌های قبلی حساسیت تشعشعی قطعات، فرآیند دیفیوژن و هم‌چنین تاریخ کدگذاری ویفر، می‌توان در مورد انجام آزمون تصمیم‌گیری به عمل آورد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش بازه زمانی ماموریت و احتمال قرارگیری بیشتر در معرض تشعشعات، TID زیادتر شده و بنابراین الزام انجام آزمون تشدید می‌شود. هم‌چنین در ضخامت‌های کمتر سازه؛ احتمال آسیب بیشتر بوده و بنابراین جهت بررسی تحمل قطعه باید آزمون انجام شود.

کلیدواژه‌ها تشعشعات فضایی، دز یونیزان کل، آزمون تشعشعی، تضمین مقاومت تشعشعی

Investigation of Analytical Method and Decision to Perform Total Ionization Dose Test in Space Missions

Hamideh Daneshvar^{1*}

1. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract:

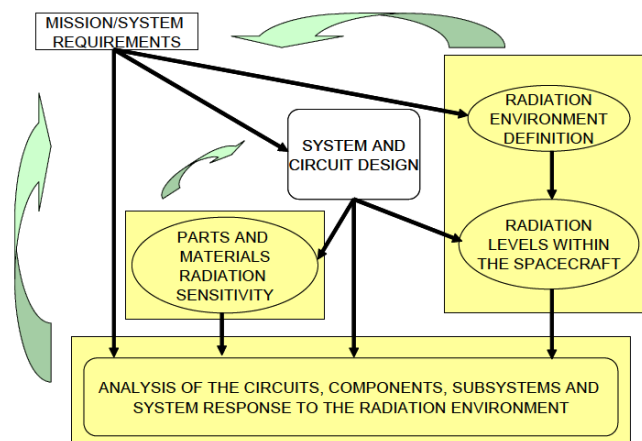
Survival and successful operation of space systems in space radiation environment is not possible without considering radiation considerations. One of the main differences between the design of space systems and ground systems is the presence of harmful space radiation. The RHA covers all activities related to providing the necessary guarantee for the proper operation of electronic components after exposure to space radiation. The purpose of this work is to provide a method for analyzing data obtained from the values of TID radiation damage parameters for the placement of radiation-sensitive technologies in space missions. Finally, based on the analysis performed, the necessary decisions are made to perform or not to perform the TID test. The results show that according to the level of tolerance threshold of parts and comparison with the level in the mission and attention to the radiation margin, according to previous data radiation sensitivity of parts, diffusion process and also the wafer coding date, may be able to make decisions about the test. The results show that with increasing mission time and the possibility of more radiation exposure, TID increases and therefore the need for testing intensifies. Also, in less thicknesses, the probability of damage is higher and therefore a test should be performed to check the tolerance of the device.

Keywords: Space radiation, Total Ionizing Dose, Radiation test, Radiation Hardness Assurance

¹ hdaneshvar@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

بقا و عملکرد موفق سامانه‌های فضایی در محیط تابش‌های فضایی بدون در نظر گرفتن ملاحظات تشعشعی امکان پذیر نیست. تابش می‌تواند موجب اثرات مخربی بر روی قطعات الکترونیکی شود. این اثرات شامل TID^2 ، DD^3 و SEE^4 می‌باشند. قابلیت اطمینان مورد نیاز برای کاربردهای فضایی موجب می‌شود که فرآیند RHA^5 یک فرآیند کلیدی در دستیابی به موفقیت ماهواره باشد. RHA یا تضمین مقاومت تشعشعی، دربرگیرنده تمامی فعالیت‌ها در خصوص فراهم‌آوری ضمانت لازم برای درست کارکردن قطعات الکترونیک بعد از قرارگیری در معرض تابش‌های فضایی است. کلید اصلی در RHA انتخاب قطعاتی است که دارای مقاومت کافی در برابر اثرات تابش باشند. با این حال RHA تنها به قطعه محدود نمی‌شود و در برگیرنده الزامات سیستمی و عملکردی، طراحی مدارهای زیرسیستمی و سیستمی و طرح بندی^۶ ماهواره و فضاپیما است [۱]. شکل ۱ طرح‌واره‌ای از این فرآیند را نشان می‌دهد. فرآیند RHA دارای یک رویکرد تکرار شونده و بالا به پایین است. محیط تابشی مأموریت از الزامات مأموریت آغاز شده و مدل‌های محیط تابشی و قواعد تعریف شده در آن با استفاده از استاندارد ECSS-E-ST-10-04 به دست می‌آید. الزامات سطح بالا که از مشخصات محیط تابشی مأموریت استخراج می‌شود، به عنوان نقطه آغازی اعمال می‌شود. سپس زمانی که لازم باشد، تحلیل قطاعی^۷ و یا تحلیل مونت کارلو محیط تابشی مطابق با ECSS-E-ST-10-12 به سطح قطعه اعمال می‌شود. حساسیت تابشی هر قطعه تعریف شده و اثر آن بر عملکرد تجهیزات^۸ تحلیل می‌شود. طراحی یک تجهیز الکترونیکی زمانی اعتبار می‌یابد که آن تجهیز بتواند الزامات عملکردی‌اش را تحت پرتوگیری محیط تابشی فضا با یک حاشیه امنیت کافی تحقق بخشد [۱].



شکل ۱: بررسی اجمالی فرآیند RHA در ESA-TEC-QE [۱].

فازبندی RHA در پروژه‌های فضایی طبق استاندارد فضایی اروپا، بدین صورت می‌باشد [۱].

فاز ۰ یا فاز A: محیط تابشی تعریف می‌شود و الزامات بالا به پایین تابشی از آن استخراج می‌شود. بررسی‌های مقدماتی ویژگی‌های تابشی می‌تواند در انتخاب فناوری و فعالیت‌های مصالحه^۹ طراحی کمک کند.

فاز B: محیط تابشی مطابق با الزامات بالا به پایین تکمیل می‌شود. طراحی الکترونیکی طرح‌بندی ماهواره یا فضاپیما

² Total Ionizing Dose

³ Displacement Damage

⁴ Single Event Effects

⁵ Radiation Hardness Assurance

⁶ layout

⁷ sector

⁸ equipment

⁹ trade-off

تعریف می‌شود. تحلیل اولیه از حفاظ می‌تواند مانند ویژگی‌های محیط تابشی آغاز شود. فاز C: آزمون‌های تابشی اجرا می‌شود. تحلیل حفاظ تجهیزات نهایی می‌شود. آنالیز طراحی مدار (بدترین شرایط) اجرا می‌شود. در انتهای فاز C، بیشتر فعالیت‌های RHA تکمیل شده است.

فاز D: فعالیت‌های RHA باقیمانده مربوط به آزمون‌های تابشی بر روی قطعات پروازی (RVT^{10} و یا $RADLAT^{11}$) هستند [۱]. آزمون RVT یا RADLAT برای نمونه‌های پروازی انجام می‌شود که دقیقاً از یک دیفیوژن لات یکسان تهیه شده باشند. فرآیند دیفیوژن یکی از مراحل اساسی در ساخت ویفر محسوب می‌شود و می‌تواند بر مقدار حساسیت تشعشعی تاثیرگذار باشد، بنابراین این عامل نیز یکی از عوامل تصمیم‌گیری انتخاب شده است. هم‌چنین با توجه به اینکه فرآیند دیفیوژن در طی سال‌های متمادی به تدریج در حال تغییر است، تاریخ فرآیند کدگذاری نیز می‌تواند بسیار اهمیت داشته باشد [۲].

همانطور که گفته شد، در این مقاله بر اساس استانداردهای معتبر فضایی و گزارش‌ها و مقالات موجود، روشی جهت تحلیل تشعشعی TID و تصمیم‌گیری برای انجام این آزمون ارائه خواهد شد. انباشت انرژی در ماده توسط یونیزاسیون، دز نام دارد و برحسب راد یا گری اندازه‌گیری می‌شود. این اثرات طولانی مدت تابش (به‌خصوص الکترون‌ها و پروتون‌های پرنانرژی) بر اجزای الکترونیکی، TID نامیده می‌شوند که جزء آسیب‌های تجمعی می‌باشند. اثرات یونیزان، علت اصلی در، از کار افتادگی^{۱۲} تجهیزات الکترونیکی هستند. ساز و کار این اثر به‌طور کلی عبارت است از تولید بار، به‌دام افتادن و انباشت بار در لایه‌های عایق. اثرات اصلی آن شامل

- سوق پارامتر^{۱۳}،
- افزایش جریان‌های نشتی،
- کاهش بهره ترانزیستور،
- تغییر خواص کاری و
- از کارافتادگی احتمالی^{۱۴} می‌باشد.

در جدول ۱ فن‌آوری‌های در معرض اثرات دز یونیزان کل ارائه شده است [۱].

جدول (۱): فن‌آوری‌های در معرض اثرات دز یونیزان کل

اثرات	دسته‌های زیرگروه	دسته فن‌آوری
تغییر ولتاژ آستانه	NMOS	MOS
کاهش جریان راه انداز	PMOS	
کاهش سرعت سوئیچینگ	CMOS	
افزایش جریان نشتی	CMOS/SOS/SOI	
تضعیف hFE، به ویژه برای شرایط کم انرژی		BJT
جریان نشتی سورس-درین افزایش یافته		JFET
تغییرات در ولتاژ جبرانی و جریان جبرانی ^{۱۵}		میکروالکترونیک
تغییرات در جریان بایاس		آنالوگ
تضعیف گین		
نشت افزایش یافته ترانزیستور		میکروالکترونیک
خطای منطقی از		دیجیتال
بهره کاهش یافته (BJT) یا		

¹⁰ Radiation Verification Testing

¹¹ Radiation Lot. Acceptance Test

¹² Failure

¹³ Parameter drift

¹⁴ Eventual functional failure

¹⁵ offset

تغییرات ولتاژ آستانه و سرعت‌های سوئیچینگ کاهش یافته (CMOS)	
CCD ها	جریان در تاریکی افزایش یافته اثرات روی عناصر ترانزیستور MOS بعضی اثرات روی CTE ¹⁶
APS	تغییرات در مدار برپایه سنسورهای MOS که شامل تغییرات در بهره تقویت پیکسل‌هاست
MEMS	تغییر در پاسخ به دلیل تغییر در build-up لایه‌های دی‌الکتریک نزدیک قسمت‌های متحرک
بلورهای نوسان- ساز کوارتز ¹⁷	تغییرات فرکانسی
مواد اپتیکی	شیشه‌های محافظ ¹⁸ فیبرهای نوری قطعات اپتیکی پوشش‌ها ¹⁹ ابزارها ²⁰ سوسون‌ها ²¹
سطوح پلیمری (معمولاً فقط برای مواد خارجی فضاپیما مهم هستند)	تضعیف مکانیکی تغییرات در خواص دی‌الکتریک

هدف از انجام این کار روشی برای تحلیل داده‌های حاصل از مقادیر پارامترهای آسیب پرتویی TID برای قرارگیری فن‌آوری‌های حساس به تابش یعنی مرحله پیش از فاز C در مأموریت‌های فضایی است.

۲. روش کار

در این بخش مطابق با الزامات تشعشعات فضایی در حوزه دز یونیزان کل، مراحل مختلف جهت ارزیابی و تحلیل این آسیب و روند صحنه‌گذاری بر آن ارائه خواهد شد. برای در نظرگیری این الزامات استانداردهای فضایی اروپا یعنی ECSS، مبنای کار قرار گرفته است. روش تحلیل و صحنه‌گذاری فوق، منوط به داشتن اطلاعات اولیه از پارامترهای مداری ماهواره و همچنین اطلاعات در خصوص حساسیت پذیری قطعات مختلف و تحمل آنها نسبت به پرتو است. روند تصمیم‌گیری در انتخاب قطعات به ترتیب از ابتدای کار تا زمان مربوط به آزمون در این مقاله آمده است.

۲.۱. تعیین مشخصات مأموریت ماهواره

با توجه به اثرپذیری پارامترهای مداری بر میزان تشعشعات دریافتی می‌بایست، در ابتدا بر اساس بیانیه مأموریت، پارامترهای مداری تعیین شود. همانطور که مشخص است میزان TID نسبت به زاویه انحراف و ارتفاع دارای تغییرات زیادی می‌باشد [۳]. برای مثال در ماهواره‌های کم ارتفاع LEO²² مقدار TID می‌تواند از ۴ krad (Si)/yr تا ۴۰ krad (Si)/yr برای ۴۰ mil (۱۰/۲۵۴ mm) از آلومینیم تغییرات داشته باشد [۴]. اطلاعات مأموریتی که در تعیین سطح دز دارای اهمیت می‌باشند، شامل ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی، زاویه انحراف مداری، بازه زمانی مأموریت، زمان پرتاب و میزان حفاظ ماهواره است.

¹⁶ Charge transfer efficiency

¹⁷ Quartz resonant crystals

¹⁸ Cover glasses

¹⁹ coating

²⁰ instruments

²¹ scintillators

²² Low Earth Orbit

۲.۲. تعیین نوع قطعه و محاسبه مقدار TIDL^{۲۳}

برای قطعاتی که نسبت به این اثر، آسیب پذیر هستند، TIDL باید مورد بررسی قرار گیرد [۵]. TIDL، سطحی از TID است که به قطعه مورد نظر می‌رسد [۵]. این کار با استفاده از نرم افزارهای تشعشعات فضایی مانند OMERE و SPENVIS انجام می‌شود. در این نرم افزارها با در نظرگیری مدل‌های مختلف محیط تشعشعی فضا، میزان TID رسیده به قطعات تخمین زده می‌شود [۶-۱۱]. مقدار TID با توجه پارامترهای ماموریت که از کاربر خواسته می‌شود و بر حسب ضخامت حفاظ که معمولاً آلومینیم می‌باشد، ترسیم می‌شود. بنابراین باید با در نظرگیری مجموع حفاظ سازه و حفاظ محلی^{۲۴} که برای قطعه مورد نظر در طراحی در نظر گرفته شده است، مقدار TID را به دست آورد.

۲.۳. تعیین حساسیت قطعه نسبت به TID

قطعات به لحاظ بررسی TIDL به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند. دسته ۱ - قطعاتی که با "همه سطوح" مشخص شده‌اند و بیانگر این است که باید از منظر TIDL کاملاً مورد بررسی قرار گیرند. یعنی به عبارت دیگر، لزوم بررسی TID به میزان آن بستگی ندارد و هر مقدار که باشد، تحلیل بایستی انجام شود. دسته دوم قطعاتی که مقدار TIDL با 300 krad-Si eq مشخص شده‌اند. در این صورت اگر مقدار TIDL بیشتر از این مقدار باشد، به بررسی بیشتر نیاز دارد.

جدول (۲): دسته بندی قطعات با توجه به حساسیت پذیری نسبت به TIDL [۵].

TIDL	زیرخانواده	خانواده قطعات EEE
همه سطوح	ولتاژ مرجع، زنر	دیودها
$> 300 \text{ krad} - \text{Si eq}$	سویچینگ، شاتکی، یکسوکننده	میکروموج های دیودی
همه سطوح		مدارهای مجتمع
$> 300 \text{ krad} - \text{Si eq}$		مدارهای مجتمع GaAs
همه سطوح		نوسان سازهای هیبریدی
همه سطوح		CCD
همه سطوح	قطعات اپتیکی، دیودهای نوری، LED، مقاومت های نوری، اپتوکوپلرها	
همه سطوح	ترانزیستورها (دو قطبی و MOS)	
$> 300 \text{ krad} - \text{Si eq}$		ترانزیستورهای GaAs
همه سطوح		هیبریدهای با قطعات اکتیو

۲.۴. تعیین رده قطعه

در دیتا شیت بر اساس پارامتر RHA و یا TID مقدار TIDS^{۲۵} (مقدار تحمل TID در قطعه مورد نظر)، تعیین می‌شود. در صورتی که قطعه قابلیت تحمل تشعشع را نداشته باشد، با No RHA مشخص می‌شود

قطعات خاصی می‌توانند تا حداقل محدوده 30 krad مقاوم در برابر تابش محسوب شوند.

(۱) هرگونه قطعه‌ای که دارای مواد نیمه‌رسانا نباشد. (مقاومت‌ها، خازن‌ها، القاگرها...)

(۲) دیودهای تک اتصالی^{۲۶} (استاندارد، شاتکی و زنر)

²³ Total Ionizing Dose Level

²⁴ Local shield

²⁵ Total Ionizing Dose Sensitivity

²⁶ single junction

۳) ترانزیستورهای دوقطبی

باید دقت داشت که برخی قطعات دو پایانه^{۲۷} ممکن است شبیه دیودها به نظر برسند اما دارای پیچیدگی می‌باشند. این قطعات شامل حسگرهای حرارتی، تنظیم‌کننده^{۲۸}های ولتاژ و تنظیم‌کننده‌های جریان می‌باشند. این موارد ممکن است، مقاوم در برابر پرتو به نظر برسند اما در عین حال مصون نیستند. برخی مواد غیرالکترونیکی (مانند زیر لایه PCB، هادی‌ها، بست و ...) به عنوان مواد مقاوم در برابر پرتو در نظر گرفته می‌شوند [۱۲].
قطعات از نظر مقاومت در برابر پرتو به سه دسته تقسیم می‌شوند [۱۳].

۱- تجاری

- سطوح مقاومت در برابر پرتو

➤ دز یونیزان کل: ۱۰-۲ krad

۲- Rad Tolerant

- سطوح مقاومت در برابر پرتو

➤ دز یونیزان کل: ۵۰-۲۰ krad

۳- Rad Hard

- سطوح مقاومت در برابر پرتو

➤ دز یونیزان کل: ۱ Mrad - ۲۰۰ krad

۵.۲. تعیین RDM قطعه

مقدار RDM (Radiation Design Margin)، مطابق معادله ۱ محاسبه می‌شود و از این پارامتر برای تعیین لزوم انجام آزمون و کفایت محاسبات استفاده می‌شود.

$$\text{RDM} = \text{TIDS/TIDL} \quad \text{معادله ۱}$$

عواملی که باعث عدم قطعیت در تعیین TIDS می‌شوند، شامل پنج دسته هستند. این کمیت‌ها شامل نوسانات آماری در خط تولید، نوع قطعه، فرآیند ساخت، طراحی مدار و کاربرد آن می‌باشد. تعریف محیط تابشی نیز به مدل‌های تابشی، کدهای تراپرد تابشی و مدل جرمی فضاپیما وابسته است [۱۴].

۶.۲. نحوه تصمیم‌گیری برای لزوم انجام آزمون و یا کفایت محاسبات

پس از محاسبه مقدار RDM، جهت تصمیم‌گیری برای انجام آزمون از جدول ۳ استفاده می‌شود [۱۶]. RVT لزوم انجام آزمون تشعشعی TID را تعیین می‌کند. همانطور که در این جدول ارائه شده، مبنای تصمیم‌گیری برای انجام آزمون، اولاً توجه به مقدار RDM است و ثانیاً باید شماره دیفیوژن لات^{۲۹} نمونه پروازی با نمونه‌هایی که داده‌های آزمون آن در اختیار است، مورد مقایسه قرار گیرد. با توجه به اینکه فرآیند دیفیوژن یکی از مراحل اساسی در ساخت ویفر محسوب می‌شود و می‌تواند بر مقدار حساسیت تشعشعی تاثیرگذار باشد، بنابراین این عامل نیز یکی از عوامل تصمیم‌گیری انتخاب شده است. هم‌چنین با توجه به اینکه فرآیند دیفیوژن در طی سال‌های متمادی به تدریج در حال تغییر است، تاریخ فرآیند کدگذاری نیز می‌تواند بسیار اهمیت داشته باشد. لذا در مجموع همه این عوامل در کنار هم الزام تعیین‌کننده جهت انجام آزمون TID است.

²⁷ Two-terminal

²⁸ regulator

²⁹ diffusion lot

جدول (۳): تصمیم‌گیری در مورد انجام آزمون TID [15]

گروه	زیرگروه	RDM	الزام انجام آزمون
دیود	زنر، ولتاژ مرجع	-	اگر شماره دیفیوژن لات پروازی با شماره دیفیوژن لات که داده‌های آزمون آن در اختیار است، متفاوت بوده و بیش از ده سال از تاریخ کدبندی گذشته باشد، آزمون تشعشعی باید انجام شود.
مدارهای مجتمع	یکپارچه سیلیکونی ^{۳۰} CMOS	-	اگر شماره دیفیوژن لات پروازی با شماره دیفیوژن لات که داده‌های آزمون آن در اختیار است، متفاوت بوده و بیش از چهار سال از تاریخ کدبندی گذشته باشد، آزمون تشعشعی باید انجام شود.
	دوقطبی یکپارچه سیلیکونی BICMOS	> 4	اگر شماره دیفیوژن لات پروازی با شماره دیفیوژن لات که داده‌های آزمون آن در اختیار است، متفاوت بوده و بیش از چهار سال از تاریخ کدبندی گذشته باشد، آزمون تشعشعی باید انجام شود.
		< 4	آزمون تشعشعی باید انجام شود.
ترانزیستورها	توان بالا NPN	> 4	اگر شماره دیفیوژن لات پروازی با شماره دیفیوژن لات که داده‌های آزمون آن در اختیار است، متفاوت بوده و بیش از چهار سال از تاریخ کدبندی گذشته باشد، آزمون تشعشعی باید انجام شود.
	توان بالا PNP	< 4	آزمون تشعشعی باید انجام شود.
	FET کانال P	-	اگر شماره دیفیوژن لات پروازی با شماره دیفیوژن لات که داده‌های آزمون آن در اختیار است، متفاوت بوده و بیش از چهار سال از تاریخ کدبندی گذشته باشد، آزمون تشعشعی باید انجام شود.
	FET کانال N	-	اگر شماره دیفیوژن لات پروازی با شماره دیفیوژن لات که داده‌های آزمون آن در اختیار است، متفاوت بوده و بیش از چهار سال از تاریخ کدبندی گذشته باشد، آزمون تشعشعی باید انجام شود.
CCD, CMOS APS		> 4	اگر شماره دیفیوژن لات پروازی با شماره دیفیوژن لات که داده‌های آزمون آن در اختیار است، متفاوت بوده و بیش از چهار سال از تاریخ کدبندی گذشته باشد، آزمون تشعشعی باید انجام شود.
ادوات غیرمجمع اپتیکی ^{۳۱}		< 4	آزمون تشعشعی باید انجام شود.

در حالت کلی برای تخمین اولیه جهت انجام آزمون مطابق با استاندارد ECSS-Q-ST-60-15C می‌توان از شرایط زیر استفاده کرد [۵].

الزام انجام آزمون با در نظرگیری RDM تعیین خواهد شد.

- شرط اول: اگر $TIDL < 2 TIDS$ یعنی $RDM > 2$ در این صورت آزمون نیاز نیست.
- شرط دوم: اگر $TIDL < TIDS < 2TIDL$ یعنی $1.2 < RDM < 2$ که آزمون مطابق با الزام بالا مورد نیاز است.
- شرط سوم: اگر $TIDS < 1.2TIDL$ یعنی $RDM < 1.2$ که در این صورت استفاده از آن جایز نیست [۵].

³⁰ Silicon Monolithic

³¹ opto discrete devices

۳. نتایج

برای تفهیم بیشتر در این قسمت به معرفی یک نمونه کاربردی برای انجام آزمون TID در یک شرایط عملیاتی که هدف استفاده از قطعات تجاری است، پرداخته می‌شود. بنابراین با در نظرگیری بدترین شرایط، مقدار حساسیت قطعات تجاری برابر ۲ krad در نظر گرفته می‌شود. محاسبات برای ماموریتی با ارتفاع تقریبی ۵۰۰ km در بازه‌های زمانی ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ سال و برای حفاظ سازه آلومینیمی با محدوده ضخامت ۳-۴/۵ mm و با استفاده از نرم‌افزار OMERE انجام شده است. آغاز بازه زمانی ماموریت برای سال ۲۰۲۰ در نظر گرفته شده است. در جدول (۴) نتایج بررسی ارائه شده است.

جدول (۴): تصمیم‌گیری در مورد انجام آزمون برای یک نمونه خاص

طول عمر (سال)	thickness of Al (mm)	TID (krad)	RDM	الزام
1.5 years	3.00	0.98	2.04	آزمون لازم نیست
	3.25	0.83	2.40	آزمون لازم نیست
	3.50	0.71	2.82	آزمون لازم نیست
	3.75	0.61	3.28	آزمون لازم نیست
	4.00	0.53	3.80	آزمون لازم نیست
2 years	3.00	1.45	1.38	آزمون لازم است
	3.25	1.23	1.63	آزمون لازم است
	3.50	1.05	1.91	آزمون لازم است
	3.75	0.90	2.22	آزمون لازم نیست
	4.00	0.78	2.58	آزمون لازم نیست
2.5 years	3.00	1.81	1.10	استفاده جایز نیست
	3.25	1.54	1.30	آزمون لازم است
	3.5	1.31	1.53	آزمون لازم است
	3.75	1.13	1.78	آزمون لازم است
	4.00	0.97	2.06	آزمون لازم نیست
3 years	3.00	2.18	0.92	استفاده جایز نیست
	3.25	1.84	1.09	استفاده جایز نیست
	3.50	1.57	1.27	آزمون لازم است
	3.75	1.35	1.48	آزمون لازم است
	4.00	1.17	1.72	آزمون لازم است
	4.25	1.01	1.98	آزمون لازم است
	4.50	0.89	2.26	آزمون لازم نیست

همانطور که مشخص است، مقادیر TID با افزایش ضخامت سازه، کاهش می‌یابد و بنابراین میزان RDM افزایش پیدا می‌کند. برای بازه زمانی ماموریت ۱/۵ ساله، می‌توان از قطعات تجاری در این محدوده از ضخامت استفاده کرد. در صورتی که بازه زمانی ماموریت به دو سال افزایش یابد، در محدوده ضخامت ۳-۳/۵ mm انجام آزمون الزامی است و برای ضخامت‌های بیشتر قطعه مصون بوده و با در نظرگیری الزامات استاندارد ECSS-Q-ST-60-15C نیاز به انجام آزمون نخواهد بود. برای بازه زمانی ۲/۵ ساله در ضخامت ۳mm، استفاده از قطعه تجاری جایز نیست. برای بازه ضخامت ۳/۲۵ - ۳/۷۵ mm انجام آزمون الزامی است و برای ضخامت‌های بیشتر قطعه تجاری مصون خواهد بود. برای بازه زمانی ۳ ساله در ضخامت‌های ۳-۳/۲۵ mm استفاده از قطعه تجاری جایز نیست. برای بازه ضخامت ۳/۵ - ۴/۲۵ mm انجام آزمون الزامی است و برای ضخامت‌های بیشتر قطعه تجاری مصون خواهد بود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روند تصمیم‌گیری برای لزوم انجام آزمون TID یا کفایت محاسبات با به عبارتی بررسی‌های تحلیلی ارائه شده است. همانطور که مشخص است در این روند، پارامترهای ماموریت در تعیین سطح TID بسیار اهمیت دارد، مرحله بعدی نوع قطعات است که با توجه به سطح آستانه تحملی قطعات و مقایسه با سطحی که در ماموریت وجود دارد و توجه

به حاشیه تشعشعی، توجه به داده‌های قبلی حساسیت تشعشعی قطعات، فرآیند دیفیوژن و هم چنین تاریخ کدگذاری ویفر، می‌توان در مورد انجام آزمون تصمیم‌گیری به عمل آورد. شرایط برای تصمیم‌گیری برای نمونه خاصی از ماموریت انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش بازه زمانی ماموریت و احتمال قرارگیری بیشتر در معرض تشعشعات، TID زیادتر شده و بنابراین الزام انجام آزمون تشدید می‌شود. هم‌چنین در ضخامت‌های کمتر ساره احتمال آسیب بیشتر بوده و بنابراین جهت بررسی تحمل قطعه باید آزمون انجام شود.

۵. مراجع

۱. Space product Assurance, in ESA-TEC-QE/2009/22. 2009, ESA.
۲. radiation verification test (RVT). 2021]; Available from: https://ecss.nl/item/?glossary_id=2118.
۳. Poizat, M. Radiation Environment and its Effects in EEE. Components and Hardness Assurance for Space. Application. in Radiation environment and its effects in EEE components and hardness assurance for space applications. 2017.
۴. Olsen, W., Microcontroller Survivability in Space Conditions. 2017.
۵. Radiation hardness assurance - EEE components, in ECSS Secretariat. 2012.
۶. Varotsou, A., The OMERE freeware for space radiation environment and effects. 2013.
۷. Varotsou, A., OMERE space radiation environment and effects tool: new developments and new interface. 2017.
۸. Daneshvar, H., 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. Journal of Space Science and Technology, 2019. **12**(3): p. 63-71.
۹. Sukhaseum, N., et al. Statistical estimation of uncertainty for single event effect rate in OMERE. in 2011 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. 2011. IEEE.
۱۰. Varotsou, A., et al. Shielding geometry effect on SEE prediction using the new OMERE release: JASON-2 mission case study. in 2011 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. 2011. IEEE.
۱۱. SPENVIS. Available from: <http://www.spervis.oma.be/spervis/help/system/toc.html>.
۱۲. Sinclair, D. and J. Dyer ,Radiation effects and COTS parts in SmallSats. 2013.
۱۳. Hardware Review of an On Board Controller for a Cubesat. 2015: Norwegian University of Science and Technology.
۱۴. radiation design margin requirement. 1996, NASA. p. 1-7.
۱۵. Space product assurance. Radiation hardness assurance EEE componenets for JUICE. 2012.