

تأثیر نرخ واژگونی متغیر با زمان در حافظه‌های مقاوم‌سازی شده در کاربردهای فضایی

رضا امید¹ و کریم محمدی²

دانشگاه علم و صنعت ایران¹

دانشگاه علم و صنعت ایران²

چکیده

حافظه‌ها یکی از پرکاربردترین ماژول‌هایی می‌باشند که در مدارهای الکترونیکی به شکل‌های مختلف استفاده می‌شوند. در کاربردهای فضایی، واژگونی بیت‌های حافظه بر اثر برخورد ذرات پرنانرژی عامل محدود کننده برای کاربرد حافظه می‌باشد برای مقابله با این پدیده، تکنیک‌های مقاوم‌سازی مختلفی استفاده می‌شود از مهم‌ترین این تکنیک‌ها جوان‌سازی مجدد با پریود زمانی مشخص می‌باشد. در این مقاله با بررسی نتایج گزارش شده برای ماهواره‌های مختلف نشان خواهیم داد که در طول ماموریت، ماهواره با نرخ واژگونی متغیر مواجه می‌باشد، بر این اساس محاسبات قابلیت اطمینان انجام خواهد شد. نتایج محاسبات با نرخ SEU متغیر با زمان، نشان دهنده اختلاف 50 درصدی در تشخیص زمان جاروب حافظه نسبت به نرخ SEU ثابت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: واژگونی بیت‌های حافظه - مقاوم‌سازی حافظه‌ها - نرخ خطای متغیر با زمان

1- مقدمه

استفاده از حافظه‌ها به عنوان بخشی از مدارهای الکترونیکی در کاربردهای فضایی اجتناب ناپذیر می‌باشد اما برای این منظور باید تأثیر محیط تشعشعات فضایی مد نظر قرار گیرد؛ در یک دسته‌بندی کلی تأثیر محیط تشعشعات فضایی در دو دسته قابل تفکیک می‌باشد دسته اول اثرات ناشی از برخورد ذراتی مانند الکترون‌ها می‌باشد که تأثیری فرسایشی است یعنی با گذشت زمان المان‌های مدار کارایی خودشان را از دست می‌دهند به این دسته از تأثیرات اثرات دوز یونیزه کننده جمع‌شونده (¹TID) گفته می‌شود. دسته دوم تأثیرات مربوط به برخورد ذرات پرنانرژی مانند پروتون‌ها و یون‌های سنگین می‌باشد که به شکل ماکروسکوپی خود را نشان می‌دهند؛ این تأثیر در حافظه‌ها به شکل واژگونی بیت‌های حافظه می‌باشد [1]. نرخ SEU در حافظه‌های مختلف یکسان نیست اما در نوع SRAM و DRAM بسیار شایع می‌باشد [2] حافظه‌های استاتیکی و دینامیکی در بردهای الکترونیکی به عنوان ماژول حافظه کنار پردازنده و یا در افزاره‌های برنامه‌پذیر میدانی بر اساس SRAM مورد استفاده قرار می‌گیرند و در ماهواره‌ها با تکنیک‌های مختلف مقاوم‌سازی می‌شوند. جوان‌سازی مجدد² با یک پریود زمانی مشخص و یا به عبارت دیگر جاروب حافظه یکی از این تکنیک‌های است که در کنار واحد EDAC اجرا می‌شود [2-3] تعیین پریود زمانی مناسب جهت بازنشانی مجدد مبحثی است که در این مقاله به آن پرداخته خواهد شد این زمان معمولاً بر اساس قابلیت پردازنده تعیین می‌شود و تحلیلی در مورد زمان جاروب ارائه نشده است در این مقاله با مبنا قرار دادن اطلاعات گزارش شده از

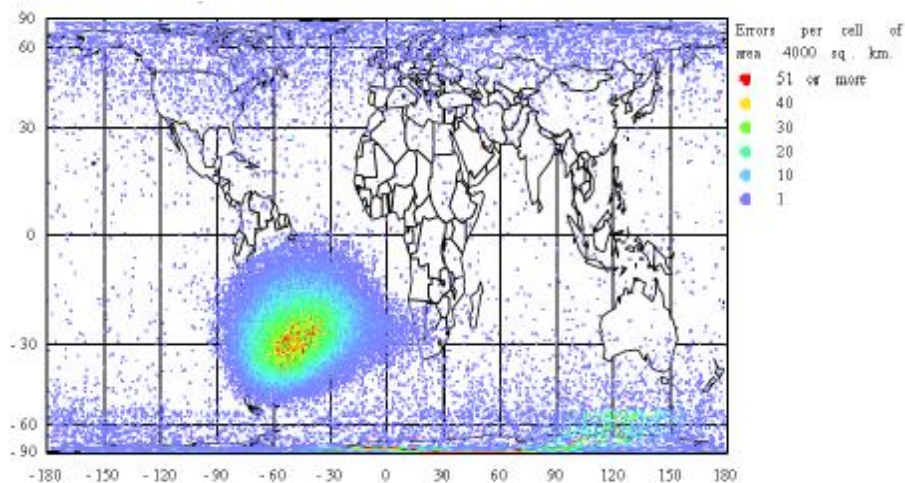
¹ Total Ionizing Dose

² Rejuvenation

ماهواره‌ها طی پرواز، و با تعیین منحنی‌های چگالی پروتون‌های اطراف زمین، نرخ SEU ثابت و متغییر با زمان تجزیه و تحلیل و نتایج محاسبات و شبیه‌سازی‌های قابلیت اطمینان ارائه شده است. در ادامه این مقاله می‌خوانید: کاربرد حافظه‌ها در ماهواره‌های مختلف و رابطه بین نرخ واژگونی بیت‌های حافظه با چگالی پروتون‌ها، شبیه‌سازی چگالی پروتون‌ها برای نمونه ماهواره با مشخصات USAT12 برای یک روز، تعیین نرخ واژگونی بیت‌های حافظه بر اساس نرخ چگالی پروتون‌ها، روابط قابلیت اطمینان بر اساس نرخ خرابی متغیر با زمان و منحنی‌ها و نتایج قابلیت اطمینان بر اساس نرخ واژگونی بیت‌های حافظه برای ماهواره نمونه و در نهایت جمع‌بندی.

2- کاربرد حافظه‌ها در ماهواره‌های مختلف و رابطه بین نرخ واژگونی بیت‌های حافظه با چگالی پروتون‌ها

حافظه‌ها به دسته‌های مختلفی، از جمله حافظه‌های فرار و غیر فرار تقسیم می‌شوند [4] و در ماهواره‌ها با اهداف مختلفی استفاده می‌شوند. متناسب با کاربرد، نوع حافظه انتخاب می‌گردد به عنوان نمونه در بخش محموله تصویر و یا زیرسیستم تله-متری ممکن است حافظه‌ها صرفاً جهت مدیریت داده³ استفاده شوند در این موارد از حافظه‌های فلش⁴ استفاده می‌گردد که نسبت به محیط تشعشعات مشخصه بهتری دارند [5]. در بخش‌هایی که از پردازنده سرعت بالا استفاده می‌شود باید با حافظه‌های سرعت بالاتر کار کرد که در این حالت از حافظه‌های استاتیکی و یا دینامیکی استفاده می‌شود. علاوه بر این‌ها در مواردی که بردهای ماهواره از افزاره‌های برنامه‌پذیر استفاده کنند متناسب با ساختار افزاره استفاده شده، حافظه استاتیکی و یا E^2 PROM و یا نوع فلش به سیستم تحمیل خواهد شد. اما تحقیقات نشان می‌دهد حافظه‌های استاتیکی و دینامیکی نسبت به پدیده واژگونی بیت‌های حافظه بسیار مستعد می‌باشند در مرجع [2] برای چند ماهواره مختلف میزان و نوع حافظه استاتیکی و دینامیکی استفاده شده آمده است.



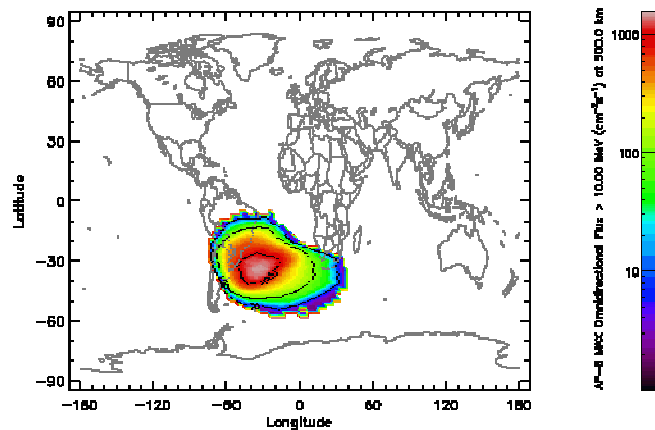
شکل 1 منحنی چگالی SEU در ماهواره SEASTAR FDRS با مشخصات مداری 705 Km & 98dec [2]

لازم به ذکر است که در این مقاله تنها شرایط اربیت‌های پایین زمین⁵ مد نظر می‌باشد و تاثیر پرتوهای کیهانی و طوفان‌های خورشیدی که بیشتر در اربیت‌های بالا، ماهواره‌ها با آن مواجه هستند در نظر گرفته نشده است. در اربیت‌های مداری پایین اثر غالب، تشعشعات ناشی از کمرندهای اطراف زمین می‌باشد. از آنجایی که الکترون‌ها قادر نیستند انرژی لازم برای واژگونی سلول‌های حافظه را فراهم کنند [4] به عبارت دیگر پارامتر LET کنندگی الکترون‌ها پایین است. به همین دلیل تنها پروتون‌های پر انرژی کمرندهای اطراف زمین در شکل 2 نشان داده شده است.

³ Data Handling

⁴ Flash

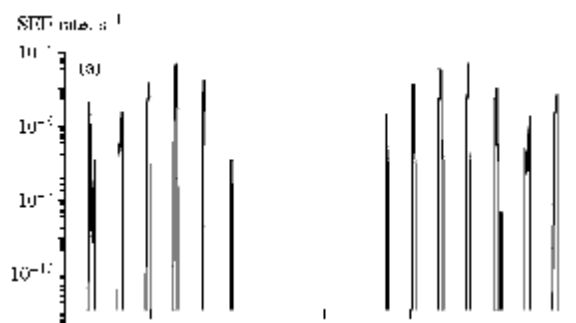
⁵ Low Earth Orbits



شکل 3: کمربندهای پروتونی اطراف زمین [11]

نگاهی به داده‌های ارسالی ماهواره‌های مختلف نشان دهنده رابطه‌ای بین چگالی پروتون‌های رسیده به ماهواره و نرخ واژگونی بیت‌های حافظه می‌باشد. چنانچه در شکل 1 مشخص است در منطقه آتلانتیک جنوبی که چگالی پروتون‌ها زیاد می‌باشد (شکل 4) نرخ واژگونی بیت‌های حافظه زیاد می‌باشد نتایج مشابهی در مراجع دیگر وجود دارد که نشان دهنده رابطه‌ای بین چگالی پروتون‌ها و نرخ واژگونی بیت‌ها می‌باشد [6-8].

هر چند مطالب و مراجع ارائه شده نشان دهنده ارتباطی بین نرخ واژگونی بیت‌ها و چگالی پروتون‌ها می‌باشد اما تعیین این ارتباط به صورت کاملاً دقیق معلوم نیست چنانچه در مرجع [9] نیز این مسئله مطرح شده و دلایلی نیز برای آن ارائه شده است از جمله مشخص نبودن دقیق شیلد ماهواره‌ها، اشباع شدن حسگرهای اندازه‌گیری کننده محیط تشعشعات، عدم توانایی حسگرها برای تفکیک ذرات مختلف. اما در مرجع دیگری [10] نرخ‌هایی برای SEU بر اساس چگالی پروتون‌ها ارائه شده است چنانچه در شکل 3 نشان داده شده است این منحنی مشابه منحنی چگالی پروتون‌های به دام افتاده در اطراف زمین می‌باشد. - در ادامه منحنی‌های چگالی پروتون‌های اطراف زمین آمده است. -



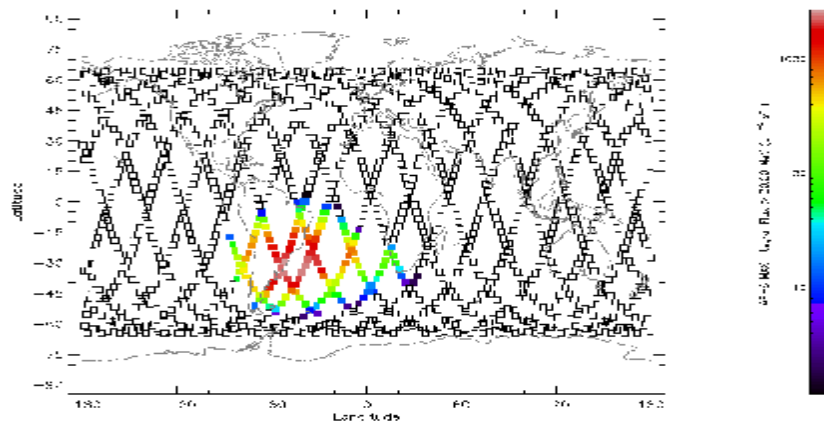
شکل 5: محاسبات نرخ رخداد SEU در حافظه Hitachi HM628128 بر حسب زمان در LEO [10]

توجه داشته باشید هر چند تعیین دقیق رابطه امکان‌پذیر نیست اما در این مقاله نیازی به رابطه دقیق نداریم. هدف تعیین تاثیر متغییر بودن نرخ SEU در منحنی‌های قابلیت اطمینان می‌باشد. برای ماهواره USAT12 نرخ خطای $0.21 \times 10^{-6} \text{ bit}^{-1} \text{ day}^{-1}$ گزارش شده است [8] در دو حالت این نرخ خطا را بررسی می‌شود در حالت اول فرض بر این است نرخ واژگونی به صورت یکنواخت در طول روز توزیع شده باشد در این صورت نرخ SEU در هر بیت و در هر دقیقه از تقسیم نرخ SEU در هر روز بر 1440 قابل تعیین می‌باشد و مقدار عددی آن برابر است با: $1.45833 \times 10^{-10} \text{ bit}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (با توجه به زمان‌های جاروب حافظه‌ها در تکنیک‌های مقاومت‌سازی [2] رزولوشن دقیقه کافی می‌باشد). اما فرض دوم این است که نرخ خطا را متناسب با چگالی پروتون‌ها در نظر گرفته شود در این صورت داریم:

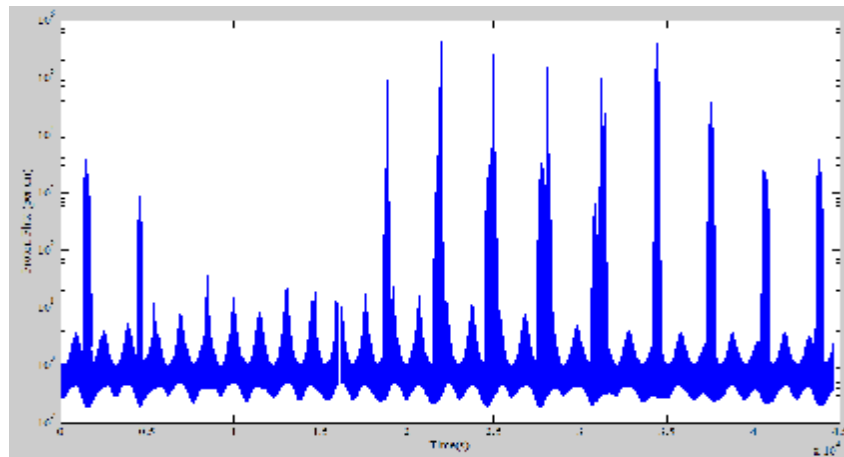
$$SEU_{Rate} \propto Flux(t) \rightarrow SEU_{Rate} = \alpha Flux(t)$$

$$\left\langle \int_0^{1440} \alpha Flux(t) dt \right\rangle_{SEU_{Rate} \cdot bit^{-1} \cdot min^{-1}} = SEU_{Rate} \cdot bit^{-1} \cdot day^{-1} \quad (1)$$

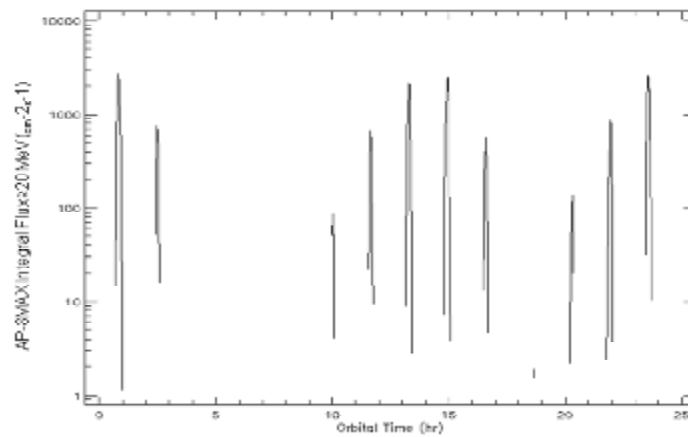
برای تعیین نرخ SEU متغیر با زمان بایستی منحنی چگالی پروتون‌ها تعیین گردد برای این منظور از ابزار شبیه‌ساز محیط تشعشعات اطراف زمین [11] استفاده شده است. منحنی چگالی کل پروتون‌ها - با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Online [11] - برای ماهواره‌ای با مشخصات مداری USAT12 و با فرض شیلدینگ 2mm و مشخصات نقطه پرتاب تهران، بر اساس مسیر سیر و زمان به صورت شکل 4 و 5 می‌باشد. اما با توجه به اینکه پروتون‌های با انرژی بالا باعث ایجاد SEU می‌شوند بنابراین با استفاده از مرجع [11] این منحنی را برای پروتون‌های با انرژی بالای 30 مگا الکترون ولت تعیین می‌کنیم (شکل 6).



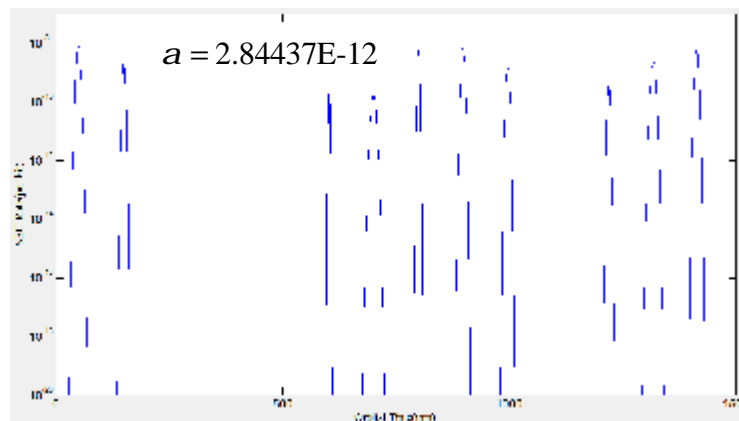
شکل 6: چگالی کل پروتون‌ها در ماهواره‌ای با مشخصات مداری USAT12 بر حسب مسیر سیر در یک روز (محل پرتاب: تهران)



شکل 7: چگالی کل پروتون‌ها در ماهواره‌ای با مشخصات مداری USAT12 بر حسب زمان در یک روز (محل پرتاب: تهران)

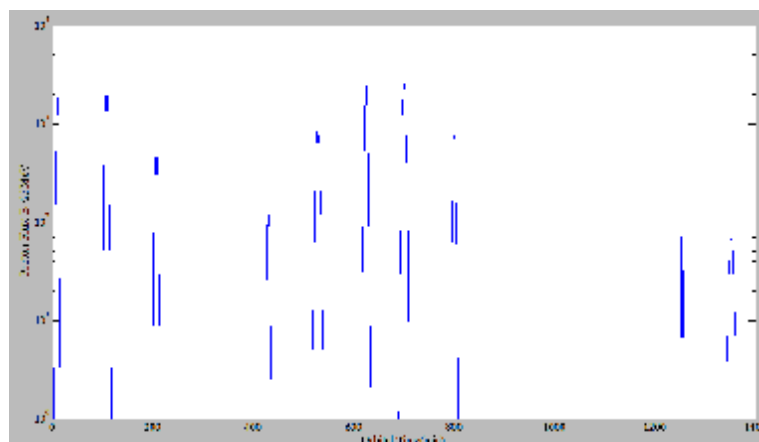


شکل 8: چگالی پروتون‌های با انرژی بالاتر از 25 مگا الکترون ولت در ماهواره‌ای با مشخصات مداری USAT12 بر حسب زمان در یک روز (محل پرتاب: تهران)



شکل 7: نرخ SEU متناسب با چگالی پروتون‌های اطراف زمین (مختصات پرتاب: تهران)

با توجه به اینکه منحنی شکل 7 پررودیک می‌باشد و متناسب با مختصات محل پرتاب ممکن است جابه‌جایی‌های در پیک‌های منحنی داشته باشیم و منحنی شکل 8 نمونه دیگری از منحنی‌های نرخ SEU می‌باشد.



شکل 8: نرخ SEU متناسب با چگالی پروتون‌های اطراف زمین (مختصات پرتاب: نامعلوم)

3- تکنیک‌های مقاوم‌سازی در ماهواره‌ها و محاسبه قابلیت اطمینان با نرخ خرابی متغیر با زمان

برای مقاوم‌سازی نسبت به SEU تکنیک‌های مختلفی در ماهواره‌ها استفاده شده است این تکنیک‌ها غالباً مبتنی بر افزودن اطلاعات با کدینگ و یا غیره می‌باشد که با پیروی زمانی معینی داده‌ها تصحیح و بازنشانی می‌شود این تکنیک مشابه تکنیک جوان‌سازی مجدد می‌باشد [3]. که با استفاده از یک واحد EDAC عمل بازیابی انجام می‌گردد. نمونه‌هایی از این تکنیک‌ها در [2] آمده است.

محاسبات قابلیت اطمینان با نرخ خرابی متغیر با زمان در مراجع مختلف [12-18] برای چند کاربرد متناسب با مورد مطالعه آمده است و نشان داده شده است که متغیر با زمان در نظر گرفتن نرخ خرابی نتایج دقیق‌تری دارد. بین مراجع مذکور روابط ارائه شده در مرجع [18] بر اساس زنجیره ماکوف می‌باشد و در محاسبات قابلیت اطمینان در حافظه‌ها از این مدل‌ها نیز استفاده شده است. برای برآورد تاثیر SEU متغیر با زمان حافظه‌های مقاوم‌سازی شده با تکنیک همینگ (8،4) مد نظر قرار گرفته است این تکنیک مقاوم‌سازی قابلیت تشخیص دو خطا و اصلاح یک خطا را دارد. مدل ماکوف برای SEU در حافظه‌ها با سه مدل مرسوم⁶، انباشته⁷ و خودزدایی⁸ مطرح می‌شود [19] در شکل مدل ماکوف برای این سه مدل رسم شده است در مرجع [19] با استفاده از روابط احتمال برای هر سه مدل متوسط زمان خرابی (MTTF) محاسبه شده است و نشان داده شده در حافظه‌های بزرگتر از 30 کلمه سه مدل تقریباً جواب مشابهی دارند (شکل 7).

با توجه به نتایج [19] و حجم حافظه‌های استفاده شده در ماهواره‌ها [2] مدل مرسوم پاسخ‌گو خواهد بود محاسبات بر حسب این شکل مرسوم تاثیر SEU عبارت است از:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -12\lambda(t)P_0(t) \quad (2-الف)$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = 12\lambda(t)P_0(t) - 12\lambda(t)P_1(t) \quad (2-ب)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = 12\lambda(t)P_1(t) \quad (2-ج)$$

که با حل روابط بالا داریم:

$$R(t) = P_0(t) + P_1(t) = e^{-\int_0^t 12\lambda(t)dt} + \left(\int_0^t \lambda'(t)dt \right) \times e^{-\int_0^t 12\lambda(t)dt} \quad (3)$$

که با نرخ ثابت خرابی رابطه 2 برای قابلیت اطمینان به دست می‌آید [20]:

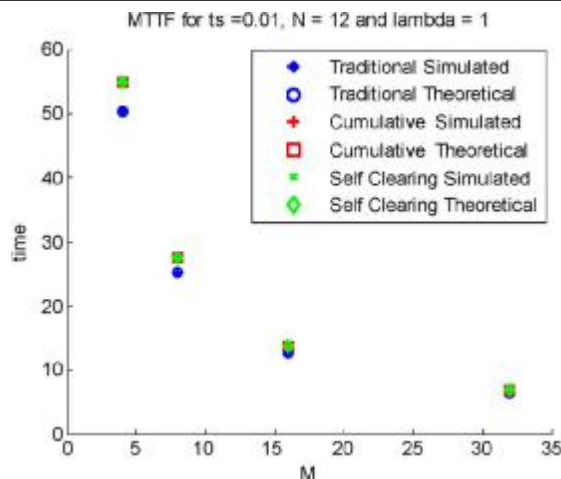
$$\lambda(t) = \lambda \rightarrow R(t) = e^{-12\lambda t} + 12\lambda t e^{-12\lambda t} \quad (4)$$

در ادامه بر اساس رابطه 3 که برای نرخ خطاهای متغیر با زمان می‌باشد قابلیت اطمینان برای نرخ‌های SEU مطابق با شکل 7 و 8 همچنین با استفاده از رابطه 4 برای نرخ خطای ثابت با زمان قابلیت اطمینان را تعیین خواهیم کرد.

⁶ Traditional

⁷ cumulative

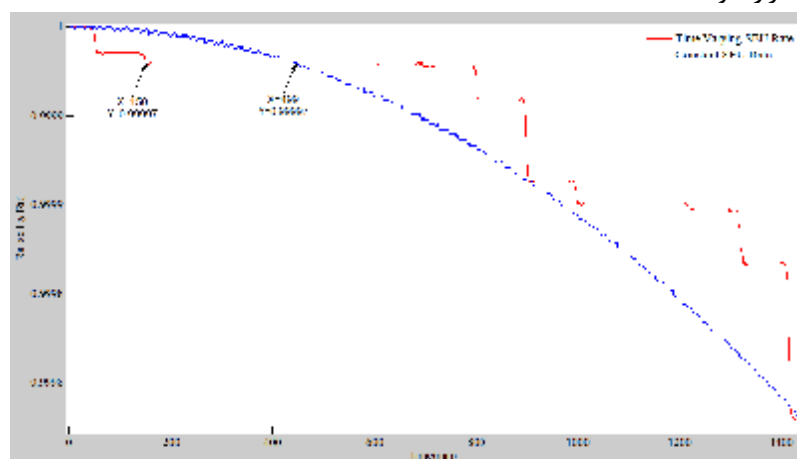
⁸ self-clearing



شکل 9: MTF بر حسب افزایش تعداد کلمه‌های حافظه بر اساس سه مدل مختلف SEU برای همینگ (8,4) [19]

4- شبیه‌سازی‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج

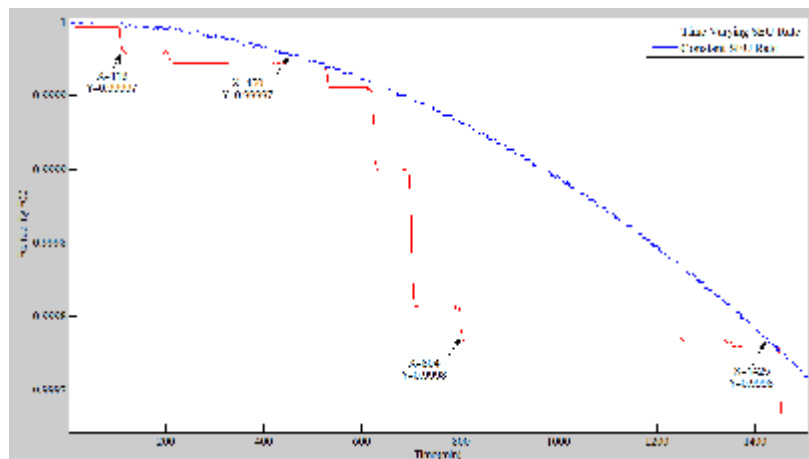
شبیه‌سازی برای یک روز و با سه نرخ خطای مختلف انجام شده و نتایج به صورت شکل 10 و شکل 11 آمده است. مقایسه بین قابلیت اطمینان با نرخ SEU ثابت و نرخ SEU متغیر با زمان برای مختصات پرتاب تهران نشان داده شده است. چنانچه در شکل نیز نشان داده شده است مقایسه دو منحنی نشان دهنده این است که قابلیت اطمینان در برخی از زمان‌ها نسبت به منحنی واقعی تقریب بالا⁹ و یا تقریب پایین¹⁰ شده است. این مسئله در تعیین زمان مناسب برای جاروب حافظه تاثیرگذار می‌باشد. به عنوان نمونه در صورتی که قابلیت اطمینان 0/99997 مطلوب باشد منحنی واقعی در 150 دقیقه در این نقطه قرار می‌گیرد اما منحنی تقریبی 499 دقیقه را نشان می‌دهد بنابراین زمان جاروب حافظه در منحنی با نرخ ثابت، حدود 3.33 برابر دیرتر پیش‌بینی می‌کند. با قابلیت اطمینان بالا 10 برابر این مقادیر یعنی 15 دقیقه و 49.9 دقیقه زمان‌های مناسب برای جاروب می‌باشند. متناسب با مختصات نقطه پرتاب نرخ فلوی پروتون‌ها و در نتیجه نرخ SEU تغییر خواهد کرد چنانچه در شکل‌های 10-11 نیز نشان داده شد. در این حالت تقریب اطمینان با نرخ SEU ثابت نسبت به حالت واقعی همواره شرایط را بهتر نشان می‌دهد. در صورتی که زمان جاروب بر اساس منحنی نرخ ثابت تمام مقادیر قابلیت اطمینان تقریب بدتری از زمان در اختیار طراح قرار خواهد داد.



شکل 10: قابلیت اطمینان در حافظه‌های مقاوم‌سازی شده با همینگ (8,4) بر حسب زمان در یک روز (متناسب با شکل 7)

⁹ Over Estimate

¹⁰ Under Estimate



شکل 11: قابلیت اطمینان در حافظه‌های مقاوم‌سازی شده با همینگ (8⁴) بر حسب زمان در یک روز (متناسب با شکل 8)

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله با تعیین چگالی پروتون‌های عرضه شده بر ماهواره‌ها بر حسب زمان، منحنی نرخ SEU متغیر با زمان مشخص گردید تاثیر متغیر بودن نرخ SEU در حافظه‌های مقاوم‌شده با کدهای همینگ (8⁴) بررسی گردید و نشان داده شد که تعیین زمان جاروب بر اساس قابلیت اطمینان مطلوب در برخی شرایط ممکن است چند برابر تفاوت داشته باشند. نرخ SEU بررسی شده در این مقاله مربوط به تاثیرات پروتون‌های به دام افتاده در کمربندهای اطراف زمین می‌باشد برای برآورد زمان جاروب دقیق‌تر بایستی تاثیر پروتون‌ها و یون‌های سنگین ناشی از پرتوهای کیهانی و فعالیت‌های خورشیدی نیز احتساب شود.

مراجع

- [1] A. Raoul Velazco and B. Pascal Fouillat, "Radiation Effects on Embedded Systems", Springer Netherlands, Page(s): 1-9, 2007.
- [2] Christian Poivey and others, 'Lessons Learned from Radiation Induced Effects on Solid State Recorders (SSR) and Memories', NASA-GSFC and SGT-Inc., December 2002.
- [3] Israel Koren and C. Mani Krishna, "Fault-Tolerant Systems", Elsevier, Pages: 11-54,147-192, 2007.
- [4] A. E. Sicard and B. S. Bendhia, "Advanced CMOS Cell Design", McGraw-Hill, page(s): 13, 2007.
- [5] A. Cellere, G. and B. Paccagnella, A, "A Review of Ionizing Radiation Effects in Floating Gate Memories", IEEE Trans. on Device and Materials Reliability, Vol.4, No. 3, Sep. 2004.
- [6] J.L. Barth & al., "Single Event Effects on Commercial SRAMs and Power MOSFETs: Final Results of the CRUX Flight Experiment on APEX," 1998 IEEE Radiation Effects Data Workshop proceedings, pp 1-10, 1998.
- [7] V.F. Bashkirov, N.V. Kuznetsov, R.A. Nymmik, "An analysis of the SEU rate of microcircuits exposed by the various components of space radiation", Elsevier Radiation Measurements 30 (1999), PP 427-433.
- [8] D. Falguere & al., "In-Flight Observations of the Irradiative Environment and its Effects on Devices in the SAC-C Polar Orbit," Presented at IEEE NSREC 2002.
- [9] S. Esteve Hoyos, N.D.R. Evans, and E. Daly, "From Satellite Ion Flux Data to SEU Rate Estimation", IEEE TRANSACTION NUCLEAR SIENCE VOL 51 No.5, OCTOBER 2004.
- [10] N. V. Kuznetsov, "The Rate of Single Event Upsets in Electronic Circuits onboard Spacecraft", Cosmic Research, Vol. 43, No. 6, 2005, pp. 423-431.
- [11] Available on line 2010: <http://www.spervis.oma.be/>
- [12] Retterath, B.; Venkata, S.S.; Chowdhury, A.A, "Impact of time-varying failure rates on distribution reliability" Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2004 International Conference on Publication Year: 2004, Page(s): 953 - 958.
- [13] Jones, J.; Hayes, J, "Estimation of system reliability using a "non-constant failure rate" model", IEEE Transactions on Reliability Volume: 50, Issue: 3, Year: 2001, Page(s): 286 - 288.
- [14] RAVISHANKAR K. IYER, "Reliability Evaluation of Fault-Tolerant Systems Effect of Variability in Failure Rates", IEEE Transactions on Computers Volume: C-33, Issue: 2 Publication Years: 1984, Page(s): 197 - 200.
- [15] Bishop, P.G.; Bloomfield, R.E.; "using a log-normal failure rate distribution for worst case bound reliability prediction", 14th International Symposium on Publication Year: 2003, Page(s): 237 - 245.
- [16] Tieling Zhang and Michio Horigome, "Availability and Reliability of System with Dependent Components and Time-Varying Failure and Repair Rates", IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY, VOL. 50, NO. 2, JUNE 2001.
- [17] Narasimha Raju Gottumukkala and others, "Reliability of a System of k Nodes for High Performance Computing Applications", IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY, VOL. 59, NO. 1, MARCH 2010.



-
- [18] Thomas F. Hassett Duane L. Dietrich Ferenc Szidarovszky, "Time-Varying Failure Rates in the Availability & Reliability Analysis of Repairable Systems", IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY, VOL. 44, NO. 1, 1995 MARCH, Page(s): 155- 160.
- [19] J.A.Maestro and P.Reviriego, "Reliability of Single-Error Correction Protected Memories", IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY, VOL. 58, NO. 1, MARCH 2009.
- [20] J.M. Kontoleonand J. Andrianakis, "Reliability analysis of simplex and duplex memory systems with SEC and soft-error scrubbing recovery," international Journal of Quality & Reliability Management. vol.20, no.5, pp.620-636, 2003.

1- تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده برق - r_omidi@elec.iust.ac.ir

2- تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده برق - mohammadi@iust.ac.ir