



## آنالیز قابلیت اطمینان بخش‌های مستعد SEU در ماهواره‌ای با مشخصات ماهواره ملی امید

رضا امید قوشه‌بلاغ<sup>۱</sup>، حامد کوچکی<sup>۲</sup>، کریم محمدی<sup>۳</sup>

۱- دانشگاه علم و صنعت ایران، rezaomidi@iust.ac.ir

۲- دانشگاه علم و صنعت ایران، ha\_koochaki@physics.iust.ac.ir

۳- دانشگاه علم و صنعت ایران، mohammadi@iust.ac.ir

### چکیده

یکی از خطاهای شایع در سیستم‌های هوانوردی و هوافضا رخداد خطای SEU در بخش‌های الکترونیکی می‌باشد. به همین جهت در چنین سیستم‌هایی از تکنیک‌های مقاوم‌سازی در سطوح گوناگون و به روش‌های مختلف استفاده می‌شود یکی از این تکنیک‌ها جوان‌سازی مجدد در بخش‌های حافظه و جاروب در فضای پیکربندی افزاره‌های برنامه‌پذیر می‌باشد. نکته مهم در این تکنیک تعیین زمان بازیابی است این زمان با دو رویکرد پیش بینی رخداد خطا یا به صورت پرودیکت قابل اجراست تعیین زمان بازیابی فاکتور بسیار مهمی در قابلیت اطمینان سیستم تحت این شرایط می‌باشد. در این مقاله نرخ SEU - که بر مبنای آن قابلیت اطمینان و در نهایت زمان بازیابی تعیین می‌گردد- در ماهواره‌ای با مشخصات ماهواره ملی امید ارزیابی گردیده است نرخ SEU و چگالی پروتون‌های عرضه شده بر ماهواره، با مدل‌سازی تحت وب SPENVIS در هر روز به ازای هر بیت تعیین شده است قابلیت اطمینان در حافظه‌های مقاوم‌سازی شده با تکنیک‌های مختلف همینگ و بر اساس نرخ خرابی متغیر با زمان و نرخ خرابی ثابت ارزیابی شده است. نتایج محاسبات با نرخ SEU متغیر با زمان، اختلاف ۵۰ درصدی در زمان تشخیص جاروب حافظه نسبت به نرخ SEU ثابت می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** ماهواره امید، قابلیت اطمینان، نرخ خرابی متغیر با زمان، SEU.

### مقدمه

ماهواره امید، نخستین ماهواره ساخت کشور ایران است که تمام تجهیزاتش در سازمان فضایی ایران طراحی و تولید شده است. ماهواره «امید» با مدار ۳ فوریه ۲۰۰۹ میلادی (۱۵ بهمن ۱۳۸۷) در مدار فضا قرار گرفت و در ۵ اردیبهشت ۱۳۸۸ با جو غلیظ مناطق غربی آمریکای جنوبی و اقیانوس آرام برخورد کرد و به عمر ۸۲ روزه خود پایان داد. این ماهواره با زاویه میل مداری ۵۵/۵ درجه در مدار زمین قرار داشت

ارتفاع مدار این ماهواره ۲۴۶ تا ۳۷۷ کیلومتر بوده و در هر ۹۰/۷۶ دقیقه یک بار به دور زمین می‌چرخد به لحاظ ارتفاع جزء ماهواره‌های LEO محسوب می‌شود.

در کنار مباحث حرارتی، تامین انرژی و کنترل مداری، قابلیت اطمینان یکی از مهم‌ترین مسائل در حوزه طراحی ماهواره‌ها می‌باشد این مسئله با توجه به خارج از دسترس بودن ماهواره‌ها اهمیت بیشتری دارد. مهم‌ترین مسئله تهدید کننده قابلیت اطمینان در ماهواره پس از استقرار در مدار -به شرط طراحی درست- تشعشعات فضایی هستند گرچه سطح تاثیر گذاری آنها در اربیت‌های پایین کمتر است اما بی‌تاثیر نیست و بسته به مدار ماهواره ممکن است در عملکرد آن خلل وارد کند. در این مقاله دوز و چگالی پروتون‌های عرضه شده بر ماهواره با مشخصات ماهواره امید مدل‌سازی و ارائه خواهد شد هر چند ساختار دقیق الکترونیکی و سازه‌ای، داده‌های تله‌متری شده و سایر اطلاعات مخابره شده به واسطه ماهواره امید قابل دسترسی نیست و در نهایت نتایج مدل‌سازی با نتایج پرواز قابل ارزیابی نیست اما مطالب ارائه شده در این مقاله می‌تواند محققان را درک نیازمندی‌های طراحی مطمئن در ماهواره‌های آینده یاری می‌کند تا علاوه بر آنالیز تاثیر تشعشعات، بخش‌ها و مدارهایی مانند SEU METER در طراحی ماهواره در نظر بگیرند. تاکید اصلی ما در این مقاله روی تکنیک مقاوم‌سازی حافظه‌ها می‌باشد این تکنیک تحت عنوان جوان‌سازی مجدد، با یک دوره زمانی مشخص داده‌های ذخیره شده در حافظه را به واسطه واحد EDAC یا بخش مصون از خطا بازیابی یا بازنشانی می‌کند [۱] تا در صورت رخداد خطای واژگونی این خطا رفع گردد.

در ادامه این مقاله می‌خوانید: تاثیر تشعشعات بر میکروالکترونیک، مقاوم‌سازی حافظه‌ها، چگالی پروتون‌ها و الکترون‌ها در ماهواره‌ای با مشخصات مداری ماهواره امید، تعیین نرخ متغیر واژگونی بیت‌های حافظه و در نهایت جمع‌بندی و مراجع.

### تاثیر تشعشعات بر میکروالکترونیک



- ۱- ارتفاع اوج: ۲۴۶ کیلومتر
- ۲- ارتفاع حوض: ۳۷۷ کیلومتر
- ۳- انحراف مداری: ۵/۵ درجه
- ۴- زمان شروع ماموریت: ۳ فوریه ۲۰۰۹ میلادی
- ۵- مدت ماموریت: ۸۲ روز
- ۶- ضخامت شیلدینگ آلومینیومی: ۲ میلی متر
- ۷- ساختار سازی: شبه کروی (با توجه به ابعاد  $۷۰*۷۰*۷۰$ )

علاوه بر چگالی پروتون‌ها (شکل ۱ و ۲)، به ازای کاربرد چند نوع حافظه مختلف در مدل‌سازی ماهواره امید نرخ SEU در جدول ۱ تعیین شده است. در ادامه به بحث مقاوم‌سازی حافظه‌ها بر اساس تکنیک جوان‌سازی مجدد خواهیم پرداخت قابلیت اطمینان در این نوع حافظه‌ها و ارتباط آن با نرخ SEU ارائه شده است.

جدول ۱: نرخ واژگونی بیت‌ها در ماهواره‌ای با مشخصات ماهواره امید

نام حافظه و تولید کننده	نرخ واژگونی بیت‌ها ( $\text{bit}^1 \text{day}^{-1}$ )
HYB51410-SIEMENS	4.3491E-05
MB814100-Fujitsu	2.7910E-05
MT4C1004-Austin	6.0728E-06
KM41C4000-Samsung	4.8996E-06
SMJ44100-Texas Ins.	1.4496E-05

### تعیین نرخ متغیر واژگونی بیت‌های حافظه

حافظه‌ها به دسته‌های مختلفی، از جمله حافظه‌های فرار و غیر فرار تقسیم می‌شوند 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 تله‌متری ممکن است حافظه‌ها صرفاً جهت مدیریت داده<sup>۱</sup> استفاده شوند در این موارد از حافظه‌های فلش<sup>۲</sup> استفاده می‌گردد که نسبت به محیط تشعشعات مشخصه بهتری دارند [۶]. 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 EPROM 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 [۷] برای چند ماهواره مختلف میزان و نوع حافظه استاتیکی و دینامیکی استفاده شده آمده است. جوان‌سازی مجدد در فضای پیکربندی افزاره‌های برنامه‌پذیر از طریق EPROM و در حافظه RAM از طریق واحد EDAC انجام می‌شود.

اجزای الکترونیکی نسبت به تشعشعات فضایی حساس هستند. ذرات پراثری یونیزه شده موجود در محیط فضا علت رفتارهای غیرمتعارف مشاهده شده بر روی دستگاه‌های الکترونیکی و مخابراتی هستند. کمربندهای فضایی، شراره‌های خورشیدی، پرتوهای کیهانی سه منشأ اصلی تشعشعات فضایی به شمار می‌روند که به طور مستقیم یا غیر مستقیم میکروالکترونیک ماهواره را متاثر می‌کنند. مطالعه و درک اینکه تشعشعات فضایی چگونه بر روی مدارهای الکترونیکی و مخابراتی اثر می‌گذارند، امری ضروری برای کاهش اثرات مضر و غیرمتعارف است. از جمله این اثرات، ایجاد نقص و عیب در قطعات، تغییر مشخصه رفتاری آنها و تولید جریان‌های ناشی و پارازیتی است. اثرات میزان یونیزاسیون کل (TID) اثرات رخداد منفرد (SEE) غالب‌ترین محدودکننده عملکرد تجهیزات الکترونیکی و مخابراتی به شمار می‌آیند. شیلد کردن، کاهش اندازه ترازیستورها و ابعاد مدارها و تکنیک‌های مداری گوناگون، روش‌هایی برای مقابله با این اثرات هستند. اما شایع‌ترین شکل SEE واژگونی بیت‌های حافظه (SEU) است یکی از تکنیک‌های مقاوم‌سازی نسبت به این پدیده جوان‌سازی مجدد حافظه می‌باشد که در این مقاله به این مهم پرداخته شده است. اما پیش از بحث در رابطه با روش مقاوم‌سازی، نحوه تعیین نرخ SEU مطرح و برای ماهواره‌ای با مشخصات ماهواره ملی امید نرخ مذکور تعیین خواهد شد [۲-۳].

### چگالی پروتون‌ها و الکترون‌ها در ماهواره‌ای با مشخصات

#### مداری ماهواره امید

آژانس فضایی اروپا در بخش مدل‌سازی تشعشعات فضایی، مقدار تشعشعات فضایی در هر مدار را به صورت آنلاین در اختیار کاربران قرار می‌دهد این امر به واسطه نرم‌افزار تحت وب SPENVIS امکان‌پذیر است این نرم‌افزار به گونه‌ای طراحی شده است که مهندسان با استفاده از اطلاعات آن بتوانند بدون نیاز به داشتن روش‌های مدل‌سازی محیط تشعشعات فضایی از اطلاعات آن جهت طراحی سیستم‌های فضایی استفاده کنند SPENVIS براساس مدل‌های استاندارد شناخته شده بین‌المللی اطلاعات را در اختیار کاربران قرار می‌دهد. این نرم‌افزار با دریافت مشخصات مداری ماهواره و اطلاعات اولیه از جمله زمان پرتاب و شیلد استفاده شده، مقدار تشعشعات از جمله نرخ SEU در هر بیت و چگالی پروتون‌ها و الکترون‌ها و اثرات آن روی سیستم‌های الکترونیکی را در اختیار کاربر قرار دهد. از آنجایی که واژگونی بیت‌ها در مدارهای LEO غالباً تحت تاثیر پروتون‌ها حادث می‌شود به همین دلیل چگالی پروتون‌ها در شکل ۱ و ۲ برای ماهواره‌ای با مشخصات ماهواره امید مدل شده است [۴-۵]. اطلاعات لازم جهت مدل‌سازی عبارتند از:

<sup>1</sup> Data Handling

<sup>2</sup> Flash



متغیر با زمان لحاظ می‌شود. در ادامه ابتدا قابلیت اطمینان در حافظه‌های مقاوم‌سازی شده با تکنیک اصلاح یک خطا محاسبه و این روابط به ازای نرخ SEU ثابت و متغیر با زمان محاسبه شده است.

یک کلمه از حافظه مقاوم‌سازی شده با تکنیک‌های اصلاح یک خطا، از نظر قابلیت اطمینان سه وضعیت دارند یا بدون خطاست ( $S_0$ ) یا تنها یک خطا ( $S_1$ ) دارد یا بیش از یک خطا ( $S_2$ ). قابلیت اطمینان به طور خلاصه عبارت است از مجموع احتمال حالت بدون خطا و حالت تک خطا. مدل کامل تئوری مارکوف برای محاسبه قابلیت اطمینان در شکل ۳ آمده است. با اغماض از انتقال‌های با احتمال پایین (مسیرهای نقطه‌چین) روابط محاسبه قابلیت اطمینان در کلمه‌ای با طول  $n$  عبارتند از [۱]:

$$\frac{dS_0(t)}{dt} = -n\lambda(t)S_0(t) \quad (1-3)$$

$$\frac{dS_1(t)}{dt} = n\lambda(t)S_0(t) - n\lambda(t)S_1(t) \quad (2-3)$$

$$\frac{dS_2(t)}{dt} = n\lambda(t)S_1(t) \quad (3-3)$$

که با حل روابط بالا داریم:

$$R(t) = S_0(t) + S_1(t) = e^{-\int_0^t n\lambda(t)dt} + \left( \int_0^t n\lambda(t)dt \right) \times e^{-\int_0^t n\lambda(t)dt} \quad (4)$$

که با نرخ ثابت خرابی رابطه ۴ برای قابلیت اطمینان به دست می‌آید

$$\lambda(t) = \lambda \rightarrow R(t) = e^{-n\lambda t} + n\lambda t e^{-n\lambda t} \quad (5)$$

فرمول‌های ۴ و ۵ معیار ارزیابی زمان بازیابی برای نرخ خطای متغیر با زمان و نرخ ثابت در نظر گرفته شده است. نتایج ارزیابی زمان بازیابی برای پنج نوع حافظه مختلف - که با تکنیک‌های متفاوت مقاوم‌سازی شده‌اند - در جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این جدول حالت‌هایی که مقدار ندارند به این معنی است که در مدت یک روز قابلیت اطمینان آنها از سطح مشخص شده پایین‌تر نخواهد آمد.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله چگونگی تعیین نرخ SEU متغیر با زمان در ماهواره‌ای با مشخصات مداری ماهواره امید ارائه شد. بر اساس نرخ محاسبه شده، قابلیت اطمینان در بخش‌های از حافظه که با تکنیک اصلاح تک خطا مقاوم‌سازی شده بودند محاسبه گردید. سطحی از قابلیت اطمینان - که مد نظر طراحی است - به عنوان معیار زمان بازیابی حافظه قرار داده شد و زمان بازیابی برای چند نوع کدینگ در چند نوع حافظه ارائه گردید.

### شکل‌ها و نمودارها

نکته مهم در این تکنیک تعیین زمان بازیابی است. این زمان با دو رویکرد پیش بینی رخداد خطا و یا به صورت پررودیک قابل اجراست. در رویکرد پیش بینی، بر اساس یک سیستم تشخیص خطا، زمانی که احتمال رخداد خطا افزایش می‌یابد، بازیابی انجام می‌گردد. این تکنیک مستلزم طراحی و پذیرش هزینه مازول چک کننده می‌باشد. در روش بازیابی با پررود مشخص، سیستم با یک دوره زمانی عمل بازیابی را انجام می‌دهد. تعیین زمان بازیابی فاکتور بسیار مهمی در قابلیت اطمینان سیستم تحت این شرایط می‌باشد.

در این مقاله، معیار زمان بازیابی سطح مشخصی از قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده است به این معنی که اگر قابلیت اطمینان از آن سطح کمتر شود بازیابی انجام می‌شود. لازم به ذکر است با فرض اینکه در لحظه جدایش اشکالی در مازول حافظه وجود نداشته باشد قابلیت اطمینان ۱۰۰ درصد است و به مرور زمان بسته به نرخ خرابی، قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد. ثابت بودن نرخ خرابی یا متغیر با زمان آن، منحنی مشخصه قابلیت اطمینان را متاثر می‌کند و این دو مشخصه یکسان نیستند.

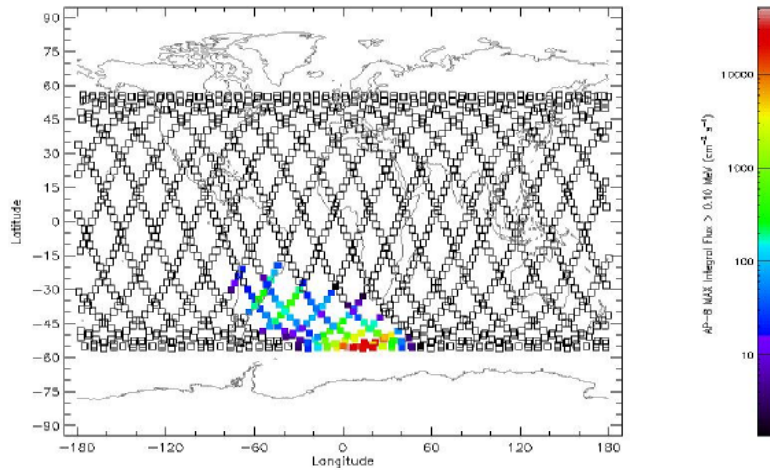
با توجه به اینکه تراکم رخداد SEU در مسیر حرکت ماهواره یکنواخت نیست - به ویژه در مناطقی با چگالی پروتونی بالا (مانند اقیانوس اطلس جنوبی) این نرخ بیشتر است [۷] - متغیر با زمان بودن نرخ SEU به واقعیت نزدیک‌تر است. اما با توجه به مقادیر گزارش شده از پرواز ماهواره‌های مختلف و نتایج مدل‌سازی، تعیین دقیق نرخ SEU بر حسب زمان مستلزم چالش‌های بیشتری است در حالت ساده‌تر و معقول‌تر می‌توان بین این نرخ با چگالی پروتون‌ها رابطه مستقیم در نظر گرفت. البته توجه به این نکته ضروری است که تنها پروتون‌هایی قادر به واژگونی بیت‌ها هستند که قدرت LET کننده‌گی کافی داشته باشند. به همین جهت تناسب بین متوسط نرخ SEU در هر روز و چگالی پروتون‌هایی با انرژی کافی در نظر گرفته شده است. این چگالی در محیط نرم‌افزار SPENVIS قابل فیلتر و جداسازی است. با این توصیف و تبدیل تناسب به تساوی خواهیم داشت:

$$SEU_{Rate} \propto Flux(t) \rightarrow SEU_{Rate} = \alpha Flux(t) \quad (1)$$

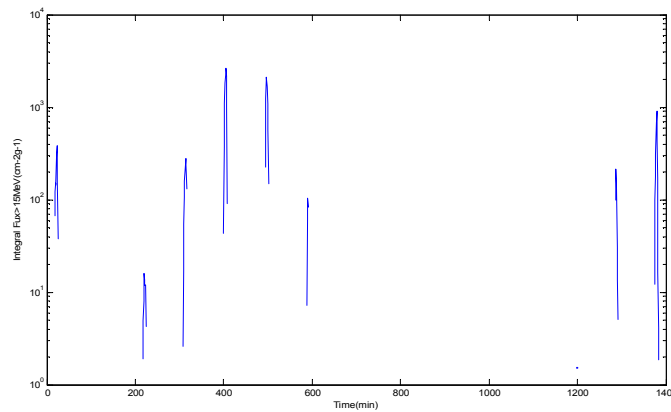
برای تعیین ضریب تساوی ( $\alpha$ ) توجه به این نکته کافی است که خطا اثری جمع‌شونده می‌باشد بنابراین انتگرال نرخ SEU متغیر با زمان به مدت یک روز معادل نرخ SEU در روز خواهد بود. از سوی دیگر نرخ SEU در روز هم از داده‌های پرواز و هم به کمک شبیه‌سازی قابل تعیین است پس داریم:

$$\left\langle \int_0^{1440} \alpha Flux(t) dt \right\rangle_{SEU_{Rate}^{bit^{-1}min^{-1}}} = SEU_{Rate}^{bit^{-1}day^{-1}} \quad (2)$$

پس از تعیین  $\alpha$  از رابطه (۲) و جایگذاری آن در رابطه (۱) نرخ SEU متغیر با زمان تعیین و در محاسبات قابلیت اطمینان، به عنوان نرخ خرابی



شکل ۱: منحنی پروتون های وارد شده بر ماهواره با مشخصات مداری ماهواره امید بر حسب مدار



شکل ۲: چگالی پروتون های بالاتر از ۱۵ مگا الکترون ولت وارد شده بر ماهواره ای با مشخصات ماهواره امید بر حسب زمان

جدول ۲: تعیین اولین زمان باز یابی حافظه در ماهواره ای با مشخصات مداری ماهواره امید

RAM	Coding	Reliability Level	Rejuvenate Time (Constant SEU Rate)	Rejuvenate Time (Variable SEU Rate)
HYB51410 SIEMENS	BCH(31,27,1)	0.9999999	478 Minute	404 Minute
	BCH(63,27,1)	0.999999	744 Minute	406 Minute
	BCH(127,27,1)	0.999999	369 Minute	403 Minute
	BCH(255,27,1)	0.999999	183 Minute	401 Minute
MB814100 Fujitsu	BCH(31,27,1)	0.9999999	744 Minute	406 Minute
	BCH(63,27,1)	0.999999	1159 Minute	498 Minute
	BCH(127,27,1)	0.999999	574 Minute	404 Minute
	BCH(255,27,1)	0.999999	286 Minute	402 Minute
MT4C1004 Austin	BCH(31,27,1)	0.9999999	-- Minute	-- Minute
	BCH(63,27,1)	0.999999	-- Minute	-- Minute
	BCH(127,27,1)	0.999999	-- Minute	-- Minute
	BCH(255,27,1)	0.999999	1316 Minute	1376 Minute
KM41C4000 Samsung	BCH(31,27,1)	0.9999999	-- Minute	-- Minute
	BCH(63,27,1)	0.999999	-- Minute	-- Minute
	BCH(127,27,1)	0.999999	-- Minute	-- Minute
	BCH(255,27,1)	0.999999	-- Minute	-- Minute
SMJ44100 Texas Ins.	BCH(31,27,1)	0.9999999	-- Minute	-- Minute
	BCH(63,27,1)	0.999999	-- Minute	-- Minute
	BCH(127,27,1)	0.999999	1107 Minute	497 Minute
	BCH(255,27,1)	0.999999	551 Minute	404 Minute



2. Reinaldo Perez; "Methods for Spacecraft Avionics Protection against Space Radiation in the Form of Single-Event Transients," IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 50, NO. 3, AUGUST 2008.

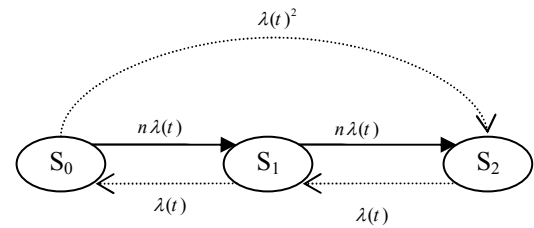
3. Dominik, L.; "System mitigation techniques for single event effects," Digital Avionics Systems Conference, 2008, Page(s): 5.C.2-1 - 5.C.2-12.

4. Available on line 2010: <http://www.spennis.oma.be/>

5. Heynderickx D., Quaghebeur B., Wera J., Daly E.J., and Evans H.D.R. "New Radiation Environment and Effects Models in ESAs Space Environment Information System (SPENVIS)", Netherlands (ESA SP-536), Proceeding of RADES, pp. 643-646, 2003.

6. 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.

7. Christian Poivey and others, 'Lessons Learned from Radiation Induced Effects on Solid State Recorders (SSR) and Memories', NASA-GSFC and SGT-Inc., December 2002.



شکل ۳: مدل ماکوف برای محاسبه قابلیت اطمینان در حافظه‌های SEC

## مراجع

1. Israel Koren and C. Mani Krishna, "Fault-Tolerant Systems", Elsevier, Pages: 11-54,147-192, 2007.