

تخمین قابلیت اطمینان سازه‌های ماهواره‌بر به روش شبکه‌های بیزین و درخت خطا

سید محمد مهدی شریفی^{۱*}، حسن غلامی مزینان^۲، کامران شهانقی^۳ و مهدی کرباسیان^۴

۱- دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

* تهران، نارمک، خ فرجام

Sharifi.smm@gmail.com

شناسایی انواع خرابی سیستم‌ها به خصوص در مورد محصولات حیاتی و حساس و محاسبه قابلیت اطمینان آنها قبل از به‌کارگیری، نقش مؤثری در بهبود طراحی این سیستم‌ها ایفا می‌کند. از سویی دیگر، تخمین قابلیت اطمینان برخی از سیستم‌ها مانند اکثر محصولات فضایی به علت فقدان یا کمبود داده بسیار مشکل و بعضاً نشدنی است. روش شبکه‌های بیزین روش گرافیکی بسیار قوی و کارآ برای تخمین قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده است که مشکل کمبود داده را نیز از بین می‌برد. بر همین اساس، در این مقاله، ابتدا درخت خطای مربوط به شکست سازه یک ماهواره‌بر سوخت مایع طراحی و سپس به شبکه بیزین تبدیل شده است. در نهایت با استفاده از نظرات خبره‌های سیستم و تخمین پارامترهای شرطی مدل با استفاده از زنجیره ماکوف مونت کارلو، قابلیت اطمینان کارکرد صحیح سازه یک ماهواره‌بر تخمین زده شده است.

واژه‌های کلیدی: قابلیت اطمینان، درخت خطا، شبکه‌های بیزین، سازه ماهواره‌بر، زنجیره ماکوف مونت کارلو

مقدمه

یکی، این شاخص می‌تواند نشان‌دهنده شکست در مأموریت باشد. موفقیت یک ماهواره‌بر در گرو کارکرد صحیح تمامی زیرسیستم‌های آن ماهواره‌بر است. در این مقاله، تنها به ارزیابی و تخمین قابلیت اطمینان زیرسیستم سازه یک ماهواره بر سوخت مایع پرداخته شده است. به این صورت که ابتدا با استفاده از روش تحلیل درخت خطا، روابط بین خرابی‌ها و علل آن در قالب یک درخت خطا نشان داده شده و سپس با تبدیل این درخت به شبکه‌های بیزین با توجه به مقاله بایو^۱، قابلیت اطمینان این زیرسیستم به‌دست آمده است. روش شبکه‌های بیزین یک روش گرافیکی بسیار قوی و کارآ برای تخمین قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده است [۲]. در ابتدا بارلو^۶ در سال ۱۹۸۸ از شبکه‌های بیزین برای محاسبه قابلیت اطمینان استفاده کرد [۳]، او در مقاله خود به‌خوبی توانست سادگی و

محصولات مهندسی مدرن از تک تک قطعات تا سامانه‌های بزرگ باید به‌گونه‌ای طراحی و تولید شوند که در مدت زمان مأموریت قابلیت اطمینان لازم را داشته باشند. در هر صنعتی و به‌خصوص صنایع هوا و فضا هنگامی که سیستمی از کار می‌افتد یا دچار اختلال می‌شود، از جنبه‌های مختلفی مانند جنبه‌های اقتصادی، انسانی، سیاسی و ... خطرناک و زیان‌آور است. قابلیت اطمینان یک ماهواره‌بر نیز احتمال آن است که ماهواره‌بر مأموریت خود را با موفقیت به پایان برساند. همچنین با کم کردن مقدار این احتمال از

۱. کارشناسی ارشد (نویسنده مخاطب)

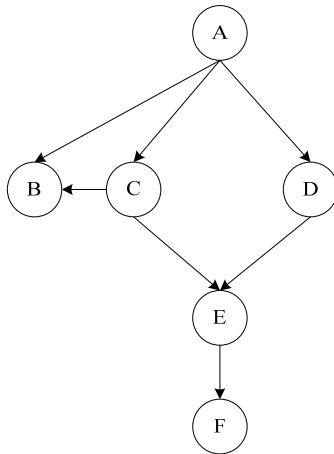
۲. کارشناسی ارشد

۳. استادیار

۴. استادیار

5. Bobbio

6. Barlow



شکل ۱- شبکه بیزین فرضی

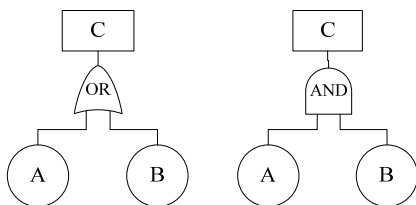
در این مثال گره A که هیچ یالی به آن متصل نیست، گره ریشه و گره‌های دیگر گره‌های والد برای گره‌های متصل به آنها هستند. در این مثال احتمال درست کارکردن F به شرط آنکه E درست کار کند را به صورت $P(F|E)$ نمایش داده شده که برای بقیه گره‌ها نیز به همین ترتیب است.

تبدیل درخت خطا به شبکه‌های بیزین

با تبدیل بلوک دیاگرام‌ها یا درخت‌های خطا به شبکه‌های بیزین و با لحاظ کردن محصول نهایی به عنوان آخرین گره می‌توان قابلیت اطمینان آن را محاسبه کرد.

درخت‌های خطا به راحتی می‌توانند به شبکه‌های بیزین تبدیل شوند. همان‌طور که در شکل (۲) مشخص شده است، می‌توان پیشامدهای خرابی را به نوعی گره‌های شبکه بیزین در نظر گرفت و دریچه‌های OR و AND نیز به یال‌ها تبدیل شوند، به طوری که تفاوت بین نوع دریچه‌ها بر احتمالات شرطی که در شبکه‌های بیزین بین متغیرها تعریف می‌شود، اثر می‌گذارد.

درخت‌های خطا را می‌توان با در نظر گرفتن دریچه‌های OR و AND به شبکه بیزین تبدیل کرد. شبکه‌های بیزین شکل‌های (۳) و (۴) مربوط به شکل (۲) هستند و معادله (۱) برای هر دو حالت نشان داده شده است. در شکل (۳) منظور از $\Pr\{A=1\}$ احتمال درست کارکردن گره A است.



شکل ۲- درخت خطای مربوط به گره‌های A, B و C با دریچه‌های OR و AND

همچنین کارایی بالای این روش را برای محاسبه قابلیت اطمینان نشان دهد. در سال‌های ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۸ زی^۷، کرشنمورتیس^۸ و گوکل^۹ با نوآوری‌هایی در مقالات خود از شبکه‌های بیزین برای تخمین قابلیت اطمینان سیستم‌های جزء محور استفاده کردند [۴-۶]. در سال ۲۰۰۰ برای اولین بار گرن^{۱۰} و داهل^{۱۱}، در مقاله خود به منظور تخمین قابلیت اطمینان نرم‌افزاری از شبکه‌های بیزین بهره گرفتند [۷]. در سال ۲۰۰۱، جنسن^{۱۲}، کاری در راستای استفاده از شبکه‌های بیزین در سیستم‌های ردیابی خطا ارائه داد [۸]، در همان سال بایو، با ایجاد یک مدل عمومی قابلیت اطمینان با استفاده از شبکه‌های بیزین، تأثیر فراوانی بر روی این روش گذاشت. همچنین او در کار خود نشان داد به راحتی می‌توان درخت‌های خطا را به شبکه‌های بیزین تبدیل کرد [۱]. در همین راستا، آماساکی^{۱۳} برای ارزیابی کیفیت مدل با استفاده از داده‌های واقعی از شبکه‌های بیزین استفاده کرد [۹]. بودالی^{۱۴}، در سال ۲۰۰۶ کار جدیدی را با پیاده‌سازی شبکه‌های بیزین برای تخمین قابلیت اطمینان سیستم‌های دینامیکی ارائه داد [۱۰]. از دیگر نوآوری‌ها در این زمینه می‌توان به مقاله داگوس^{۱۵} و همکاران اشاره کرد. آن‌ها در مقاله خود الگوریتمی پیشنهاد داده‌اند که طی آن می‌توان نقش خیره را برای تعیین روابط بین اجزای سیستم و ایجاد مدل از بین برد [۱۱].

شبکه‌های بیزین

شبکه‌های بیزین، نمونه‌ای از مدل‌های گرافیکی هستند که دارای گره‌هایی برای متغیرها و یال‌های جهت‌داری به منظور نشان دادن روابط میان این گره‌ها هستند. این شبکه‌ها از جمله گراف‌های فاقد دور^{۱۶} (DAG) هستند. از این شبکه‌ها برای محاسبه احتمال یک رخداد (پایین‌ترین گره) که متأثر از چندین متغیر دیگر است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای محاسبه احتمال هر گره والد، ابتدا، احتمالات گره‌های ریشه با استفاده از توابع توزیع خاص، مشاهدات یا نظرات خیره استخراج می‌شوند سپس با بهره‌مندی از قاعده احتمالی بییز، احتمال گره والد به دست می‌آید. به عنوان مثال برای شبکه نشان داده شده در شکل (۱)، احتمال رخداد اتفاق F از معادله (۱) به دست می‌آید:

$$P(A, B, C, D, E, F) = P(F|E) \cdot P(E|C, D) \cdot P(D|A) \cdot P(C|A) \cdot P(B|C, A) \cdot P(A) \quad (1)$$

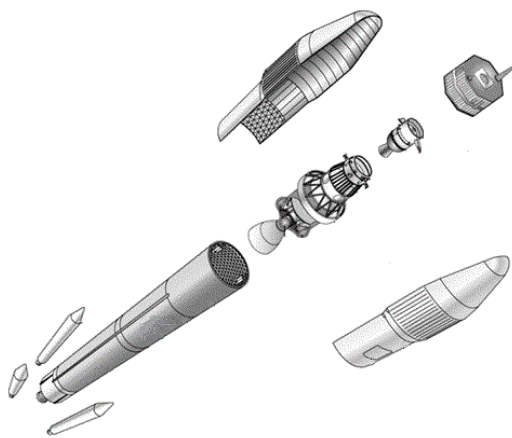
7. Xie
8. Krishnemurthys
9. Ghokale
10. Gran
11. Dahll
12. Jensen
13. Amasaki
14. Boudali
15. Doguc
16. Direct Acyclic Graph

اجزای سازه ماهواره بر در مراحل جدایش

مأموریت یک ماهواره بر از ۳ مرحله تشکیل شده است، بنابراین در هر ماهواره بر برای هر یک از این مراحل، باید سازه‌ای را در نظر گرفت. از آنجاکه در این مقاله به بررسی قابلیت اطمینان سازه پرداخته شده است، به بررسی وابستگی‌های بین زیرسیستم‌های اصلی ماهواره بر پرداخته نشده است. اجزای سازه ماهواره بر برای هر یک از مراحل به صورت زیر است:

مرحله اول: بدنه و مخازن، تقویت‌کننده طولی و عرضی مخزن اکسیدکننده، تقویت‌کننده طولی و عرضی مخزن سوخت، تقویت‌کننده طولی و عرضی پوسته موتور، عدسی مخزن اکسیدکننده موتور، عدسی مخزن سوخت موتور، و اکسیدکننده موتور. مرحله دوم: اجزای این مرحله کاملاً مشابه مرحله اول است. مرحله سوم: بدنه و مخازن، تقویت‌کننده طولی و عرضی بدنه، مخزن اکسیدکننده موتور، مخزن سوخت موتور، تقویت‌کننده طولی و عرضی دماغه.

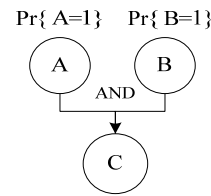
در مرحله سوم ماهواره بر دیگر موتور ندارد و سیستم تزریق ماهواره که معمولاً فبری است، جایگزین آن می‌شود. شکل (۶) نمایی شماتیک از سازه یک ماهواره بر را در مراحل مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۶- نمایی شماتیک از سازه یک ماهواره بر در مراحل مختلف

درخت خطای شکست در سازه یک ماهواره بر

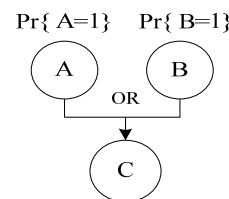
روش تحلیل درخت خطا یک نمودار منطقی و گرافیکی از بالا به پایین است که خرابی و علل آن را توصیف می‌کند [۱۴]. نمودار تحلیل درخت خطا از نظر گرافیکی، نمایانگر تمامی خرابی‌های سامانه، زیرسامانه و مجموعه‌ای از علائم و نمادها را به کار می‌گیرد. در این بخش از مقاله با انجام تحلیل بالقوه خرابی‌ها با تکنیک FMECA، خرابی‌های مربوط به زیرسیستم سازه یک ماهواره بر استخراج و در قالب یک درخت خطا در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۳- شبکه بی‌زین مربوط به درخت خطا با دریچه AND

روابط شرطی برای شبکه بی‌زین شکل (۳) به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \Pr\{C = 1|A = 0, B = 0\} &= 0 \\ \Pr\{C = 1|A = 0, B = 1\} &= 0 \\ \Pr\{C = 1|A = 1, B = 0\} &= 0 \\ \Pr\{C = 1|A = 1, B = 1\} &= 1 \end{aligned}$$



شکل ۴- شبکه بی‌زین مربوط به درخت خطا با دریچه OR

$$\begin{aligned} \Pr\{C = 1|A = 0, B = 0\} &= 0 \\ \Pr\{C = 1|A = 0, B = 1\} &= 1 \\ \Pr\{C = 1|A = 1, B = 0\} &= 1 \\ \Pr\{C = 1|A = 1, B = 1\} &= 1 \end{aligned}$$

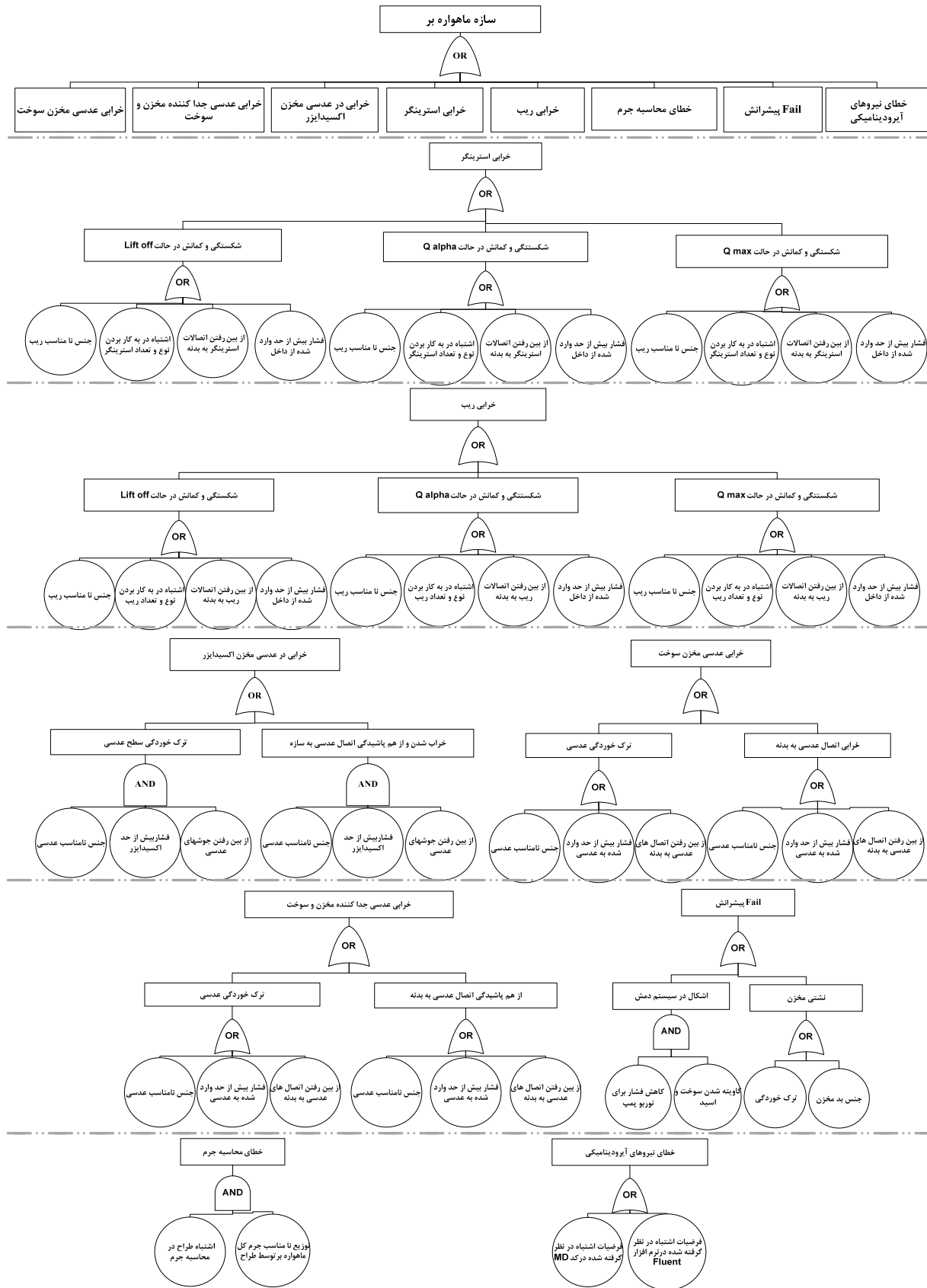
زیرسیستم‌های یک ماهواره بر

ماهواره‌ها اصولاً از ۵ زیرسیستم با عناوین زیرسیستم پیشران، زیرسیستم هدایت، ناوبری و کنترل، زیرسیستم سازه، زیرسیستم جدایش و زیرسیستم کامپیوتر مرکزی تشکیل شده‌اند که در شکل (۵) نشان داده شده است [۱۲ و ۱۳].



شکل ۵- زیرسیستم‌های یک ماهواره بر

موفقیت یک ماهواره بر در گرو کارکرد صحیح تمام این زیرسیستم‌هاست، به طوری که شکست در هر یک از این زیرسیستم‌ها منجر به شکست ماهواره بر خواهد شد. هر یک از این زیرسیستم‌ها اجزایی دارند که روابط میان این اجزاء بعضاً ساده و گاهی نیز پیچیده است. به منظور محاسبه قابلیت اطمینان هر یک از این سیستم‌ها داشتن اطلاعاتی در مورد خرابی این سیستم‌ها امری بسیار ضروری است. در این مقاله، به محاسبه قابلیت اطمینان زیرسیستم سازه ماهواره بر با سوخت مایع پرداخته شده است که در بخش‌های بعد به شرح زیرسیستم سازه و خرابی‌های مربوط به آن پرداخته شده است.



شکل ۷- درخت خطای سازه ماهواره بر و هر یک از اجزای اصلی سازه

(۷) در جدول (۱) نشان داده شده است. در این جدول، درخت خطا در سه لایه تقسیم‌بندی شده است که لایه اول، شامل خطاهای اصلی سازه ماهواره، لایه دوم، عوامل خطا برای لایه اصلی و لایه سوم که دارای احتمال شرطی نبوده و با عنوان لایه حاشیه‌ای نام‌گذاری شده است.

جدول ۱- علائم اختصاری مربوط به اجزای موجود در درخت خطا

علائم اختصاری			خطای اصلی
حاشیه‌ای ی	لایه دوم	-	
r_1, \dots, r_{12}	R_1, R_2, R_3	R	خرابی ریب
s_1, \dots, s_{12}	S_1, S_2, S_3	S	خرابی استرینگر
ol_1, \dots, ol_6	OL_1, OL_2	OL	خرابی عدسی مخزن اکسیدایزر
fl_1, \dots, fl_6	FL_1, FL_2	FL	خرابی عدسی مخزن سوخت
sl_1, \dots, sl_6	SL_1, SL_2	SL	خرابی عدسی جداکننده مخزن و وخت
p_1, \dots, p_4	P_1, P_2	P	Fail پیش‌رانش
m_1, m_2	-	M	خطای محاسبه جرم
a_1, a_2	-	A	خطای نیروهای آبرودینامیکی

احتمال درست کارکردن ریب (تقویت‌کننده)، طبق رابطه (۱) محاسبه شده و به شرح زیر خواهد بود:

$$\Pr(R) = P(R|R_1, R_2, R_3) \cdot P(R_1|r_1, r_2, r_3, r_4) \cdot P(R_2|r_5, r_6, r_7, r_8) \times P(R_3|r_9, r_{10}, r_{11}, r_{12}) \cdot P(r_1) \cdot P(r_2) \cdot P(r_3) \cdot P(r_4) \cdot P(r_5) \times P(r_6) \cdot P(r_7) \cdot P(r_8) \cdot P(r_9) \cdot P(r_{11}) \cdot P(r_{12})$$

که مقادیر احتمالات شرطی طبق رابطه (۲) و روش زنجیره مارکوف مونت کارلو محاسبه می‌شود. در زیر نحوه محاسبه احتمال شرطی درست کارکردن ریب با شرایط حاکم بر سه زیر عامل آن به شرح زیر است:

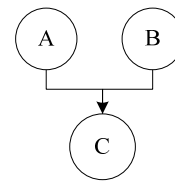
$$\begin{aligned} P(R|R_1, R_2, R_3) = & \tau_1 P(R_1)P(R_2)P(R_3) + \tau_2 P(R_1)P(R_2)(1 - P(R_3)) + \\ & \tau_3 P(R_1)(1 - P(R_2))P(R_3) + \\ & \tau_4 (1 - P(R_1))P(R_2)P(R_3) + \tau_5 (1 - P(R_1))(1 - \\ & PR2PR3 + \tau_6 1 - PR1PR21 - PR3 + \tau_7 \\ & P(R_1)(1 - P(R_2))(1 - P(R_3)) + \tau_8 (1 - P(R_1))(1 - \\ & P(R_2))(1 - P(R_3)) \end{aligned}$$

همان‌طور که ذکر شد، مقادیر احتمالی حاشیه‌ای برای تخمین قابلیت اطمینان سازه ماهواره بر از افراد خبره و برخی استانداردهای موجود دریافت و در جدول (۲) درج شده است. قابلیت اطمینان اجزای ذکر شده در شکل (۷) نیز طبق روابط فوق ارائه شده است. جدول (۳) درصد قابلیت اطمینان مربوط به لایه دوم و جدول (۴) درصد قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های اصلی سازه ماهواره بر را نشان می‌دهد.

تبدیل درخت خطای سازه ماهواره بر به شبکه بیزین و محاسبه قابلیت اطمینان

برای تبدیل درخت خطای ماهواره بر به یک شبکه بیزین باید از الگوی ارائه شده در بخش ۲ استفاده کرد که شبکه بیزین مربوطه در شکل (۹) نشان داده شده است. از آنجا که در رابطه (۱) دو نوع احتمال شرطی و حاشیه‌ای وجود دارد، بنابراین رویکردهای حل به دو صورت است. رویکرد اول آنکه مقدار احتمالات حاشیه‌ای وجود داشته باشد و باید احتمالات شرطی را محاسبه کرد و رویکرد دوم آنکه هیچکدام از احتمالات شرطی و حاشیه‌ای وجود ندارد و هر دو باید محاسبه شوند. در این مقاله، رویکرد حل از نوع اول است و مقادیر احتمالات حاشیه‌ای از افراد خبره و تکنیک FMECA و همچنین برخی استانداردهای موجود [۱۵-۱۷] استخراج و در جدول (۲) درج شده است. احتمالات شرطی با استفاده از روش زنجیره مارکوف مونت کارلو^۱ (MCMC) محاسبه و سپس مقدار قابلیت اطمینان سازه ماهواره بر طبق رابطه (۱) محاسبه شده است. الگوریتم‌های متروپلیس و گیبس از جمله الگوریتم‌های معروف زنجیره مارکوف مونت کارلو هستند که در این مقاله از الگوریتم متروپلیس استفاده شده است. در این تحقیق سعی شده است برای برآورد احتمالات شرطی، با کمک این الگوریتم و نظرات خبره، نمونه‌های تصادفی با استفاده از توزیع‌های آماری ایجاد شود که روشی کاملاً جدید برای محاسبه احتمالات شرطی است.

برای محاسبه احتمال درست کارکردن C در شرایط A و B در شکل (۸)، ابتدا باید احتمالات شرطی τ را با توجه به داده‌های تجربی به دست آمده از یک تابع توزیع یکنواخت بین صفر و یک و با استفاده از روش متروپلیس تخمین زده و سپس طبق رابطه (۲) احتمال درست کارکردن C را محاسبه کرد.



شکل ۸- شبکه بیزین فرضی

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \Pr(C = 1|A = 0, B = 0) \\ \tau_2 &= \Pr(C = 1|A = 0, B = 1) \\ \tau_3 &= \Pr(C = 1|A = 1, B = 0) \\ \tau_4 &= \Pr(C = 1|A = 1, B = 1) \end{aligned}$$

$$\Pr(C|A, B) = \tau_1 P_1 P_2 + \tau_2 P_1 (1 - P_2) + \tau_3 (1 - P_1) P_2 + \tau_4 (1 - P_1) (1 - P_2) \quad (2)$$

برای ساده‌سازی علائم اختصاری اجزای موجود در درخت خطای شکل

جدول ۲- مقادیر قابلیت اطمینان عوامل حاشیه‌ای

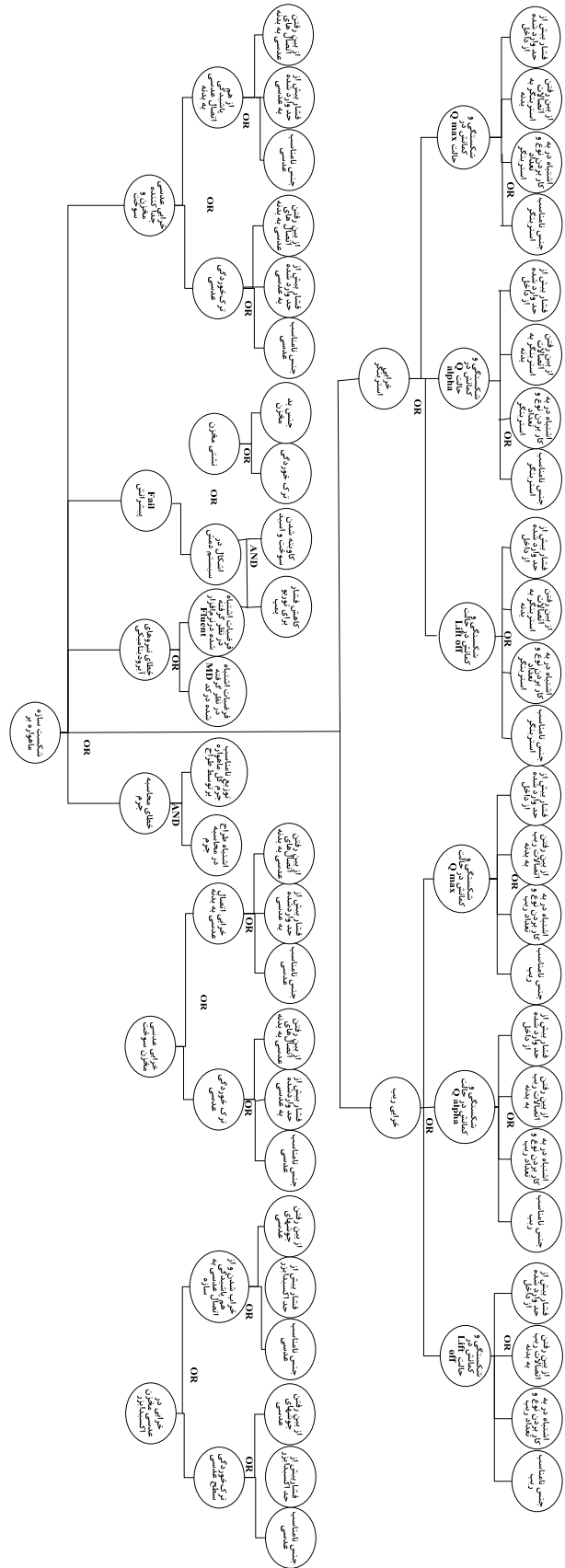
عوامل حاشیه‌ای	قابلیت اطمینان	عوامل حاشیه‌ای	قابلیت اطمینان
r_1	٪۹۹/۵	S_1	٪۹۹/۵
r_2	٪۹۹	S_2	٪۹۹
r_3	٪۹۹/۶	S_3	٪۹۹/۶
r_4	٪۹۹	S_4	٪۹۹
r_5	٪۹۹/۷	S_5	٪۹۹/۷
r_6	٪۹۹/۹	S_6	٪۹۹/۹
r_7	٪۹۹/۵	S_7	٪۹۹/۵
r_8	٪۹۹	S_8	٪۹۹
r_9	٪۹۹/۹	S_9	٪۹۹/۹
r_{10}	٪۹۹/۵	S_{10}	٪۹۹/۵
r_{11}	٪۹۹/۹	S_{11}	٪۹۹/۹
r_{12}	٪۹۹	S_{12}	٪۹۹
ol_1	٪۹۹	fl_1	٪۹۹
ol_2	٪۹۹/۱	fl_2	٪۹۹/۵
ol_3	٪۹۹/۵	fl_3	٪۹۹/۱
ol_4	٪۹۹/۹	fl_4	٪۹۹/۵
ol_5	٪۹۹/۵	fl_5	٪۹۹
ol_6	٪۹۹/۳	fl_6	٪۹۹
sl_1	٪۹۹/۱	p_1	٪۹۹/۹
sl_2	٪۹۹/۵	p_2	٪۹۹
sl_3	٪۹۹/۴	p_3	٪۹۹/۹۵
sl_4	٪۹۹/۹	p_4	٪۹۹/۹
sl_5	٪۹۹	m_1	٪۹۹/۵
sl_6	٪۹۹/۵	m_2	٪۹۹/۷
a_1	٪۹۹	a_2	٪۹۹/۵

جدول ۳- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های لایه دوم

لایه دوم	قابلیت اطمینان	لایه دوم	قابلیت اطمینان
R_1	۹۹/۹۷۹	OL_2	۹۹/۹۴۰
R_2	۹۹/۸۸۹	FL_1	۹۹/۶۹۰
R_3	۹۹/۶۸۹	FL_2	۹۹/۵۸۰
S_1	۹۹/۸۹۹	SL_1	۹۹/۱۸۱
S_2	۹۹/۴۸۹	SL_2	۹۹/۸۶۰
S_3	۹۹/۹۰۹	P_1	۹۹/۷۴۰
OL_1	۹۹/۸۹۰	P_2	۹۹/۸۶۰

جدول ۴- قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های اصلی سازه ماهواره بر

زیرسیستم	R	S	OL	FL	SL	P	M	A
قابلیت اطمینان %	۹۵۷/۵۵	۸۷/۵۵	۱۷۱/۵۵	۱۸۴/۵۵	۲۸۴/۵۵	۳۸۷/۵۵	۴۸۷/۵۵	۵۸۷/۵۵



شکل ۹- تبدیل درخت خطای سازه ماهواره بر به شبکه بی‌زین

فراوانی شده است. بنابراین لازم است در این بخش از مقاله، از این عزیزان خصوصاً جناب آقای دکتر نبوی، جناب آقای دکتر مقصودی و آقای دکتر افضل‌ی تشکر و قدردانی ویژه‌ای صورت گیرد.

مراجع

- [1] Bobbio, A. and et.al, "Improving The Analysis of Dependable Systems by Mapping Fault Trees into Bayesian Networks," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 71, No. 3, 2001, pp. 249-260.
- [2] Toledano, J. G. T. and Succar, L. E. S. , "Bayesian Networks for Reliability Analysis of Complex Systems," *Computer Science*, Vol. 1484, No. 465, 1998, pp. 1-17.
- [3] Barlow, R. E., "Using Influence Diagrams," *Accelerated Life Testing and Experts' Opinions in Reliability*, 1988, pp.145-150.
- [4] Xie, M. and Wohlin, C., "An Additive Reliability Model for the Analysis of Modular Software Failure Data," *Proceedings of the Sixth International Symposium on Software Reliability Engineering*, 1996, pp. 188-193.
- [5] Krishnemurthy, S. and Mathur, A. P., "On the Estimation of Reliability of a Software System Using Reliabilities of Its Components," *Proceedings of the Ninth International Symposium on Software Reliability Engineering*, 1997, pp.146.
- [6] Ghokale, S., Lyu, M. and Trivedi, K., "Reliability Simulation of Component Based Software Systems," *Proceedings of the International Symposium on Software Reliability Engineering*, 1998.
- [7] Gran, B. A. and et.al, "Estimating Dependability of Programmable Systems Using Bbns," *Proceedings of the Safecom*, 2000, pp. 309-320.
- [8] Jensen, F. V., *Bayesian Networks and Decision Graphs*, New York, Springer, 2001.
- [9] Amasaki, S. and et.al, "A Bayesian Belief Network for Assessing Likelihood of Fault Content," *Proceedings of the 14th International Symposium on Software Reliability Engineering*, 2003, pp. 215-226.
- [10] Boudali, H. and Dugan, J. B., "A Continuous-Time Bayesian Network Reliability Modeling and Analysis Framework," *IEEE Trans Reliability*, Vol. 55, No.1, 2006, pp. 86-97.
- [11] Doguc, O. and Marquez, J. E. R., "A Generic Method for Estimating System Reliability Using Bayesian Network," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 94, No.2, 2009, pp. 542-550.
- [12] Abou Nassar, L. and et.al., "Spacecraft Structures and Launch Vehicles," A Presentation in Department of Aerospace and Ocean Engineering, Virginia Tech University, 2004.
- [13] Stengel, R., "Launch Vehicle Design: Configurations and Structures, Space System Design", One Course in Department of Mechanical and Aerospace, Princeton University, 2008.

در نهایت قابلیت اطمینان تخمین زده شده برای سازه ماهواره بر به شرح زیر خواهد بود:

$$P_S(R,S,OL,FL,SL,M,P,A) = 97/936\%$$

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

همواره تخمین قابلیت اطمینان برای سیستم‌هایی که داده‌های آزمایشی کم و حساسیت بالایی دارند، اهمیت بالایی دارد. ماهواره بر از دستگاه‌های یکبار مصرف و با هزینه گزاف است و استفاده از نظرات خیرگان برای تخمین قابلیت اطمینان ضروری و همراه با خطاست. در این راستا، این مقاله با استفاده از تکنیک شبکه‌های بیزین به ارائه الگویی برای تخمین قابلیت اطمینان سازه ماهواره بر سوخت مایع پرداخته است. در این روش، ابتدا والد و فرزندان کل اجزای سیستم از درخت خطای سیستم استخراج و سپس روابط شرطی بیزین برای این مدل ارائه شده است. با کسب نظرات خیرگان و با استفاده از برخی استانداردهای موجود قابلیت اطمینان حاشیه‌ای تعیین (برای اجزایی که هیچ فرزندی به آنها متصل نیست) و سپس طبق روش زنجیره مارکوف مونت کارلو به تخمین قابلیت اطمینان اجزای لایه‌های فرزندی پرداخته شده است. در این روش قابلیت اطمینان شرطی اجزاء با در نظر گرفتن توزیع یکنواخت بین صفر و یک برای آنها تخمین زده شده و از رابطه معادله (۲) محاسبه شده‌اند.

در این روش با داشتن درخت خطای یک سیستم به راحتی می‌توان شبکه بیزین معادل را طراحی و سپس قابلیت اطمینان سیستم را به سادگی تخمین زد. از دیگر مزایای این روش این است که در صورت نداشتن اطلاعات کافی در مورد سیستم و حتی مقادیر احتمالی مربوط به عوامل حاشیه‌ای، می‌توان مقادیر مربوطه را تخمین و قابلیت اطمینان تخمینی قابل قبولی را برای سیستم ارائه کرد.

از آنجاکه دست یافتن به مقادیر حاشیه‌ای برای سیستم‌هایی مانند ماهواره بر پیچیده است، ارائه رویکردی که بتواند موجب کاهش این پیچیدگی شود، پیشنهاد می‌گردد. همچنین ایجاد الگوریتمی به منظور از بین رفتن نقش خیره در سیستم‌هایی نظیر ماهواره بر که دارای داده‌های آزمایشی کم هستند نیز می‌تواند تأثیر بسزایی در دقت و سرعت تخمین قابلیت اطمینان از روش شبکه‌های بیزین داشته باشد. بنابراین این دو پیشنهاد می‌تواند اساس تحقیقات آتی قرار گیرند.

تقدیر و تشکر

در قسمت‌هایی از این تحقیق برای گرفتن اطلاعات اولیه و در بخش‌هایی نیز برای اطمینان از نتایج حاصله، از نظرات و مشاوره‌های کارشناسان و افراد خبره در زمینه ماهواره بر استفاده

[16]MIL-HDBK-H 108, Sampling Procedures and Tables for Life and Reliability Testing (Based on Exponential Distribution), 2002.

[17]MIL-HDBK-338, Electronic Reliability Design Handbook, 1995.

[14]Vesely, W. and Goldbrg, B., *Fault Tree Handbook*, United State Nuclear Regulatory Commission, 1981.

[15]MIL-HDBK-217F Notice 2, Reliability Prediction of Electronic Equipment, 1995.