هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

توسعه نرم‌افزار تخصیص قابلیت اطمینان ماهواره مخابراتی LEO

احسان ذبیحیان[1*]، زینب سلطانی محمدی[2] و سید محمد نوید قریشی[3] و مهتا خداداد[4]

۱- استادیار،پژوهشکده سامانه‌های ماهواره پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، e.zabihian@isrc.ac.ir
۲- پژوهشگر،پژوهشکده سامانه‌های ماهواره پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، soltanimzeinab@gmail.com
۳- استادیار،پژوهشکده سامانه‌های ماهواره پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، smn.ghoreishi@isrc.ac.ir
۴- پژوهشگر،پژوهشکده سامانه‌های ماهواره پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، m.khodadad@live.com

چکیده

با توجه به اهمیت فرآیند تخصیص قابلیت اطمینان در سیستم‌های پیچیده، در این مقاله به بررسی روش‌های متداول در این حوزه پرداخته شده است، ضمن مقایسه‌ی روش‌ها، روندنمای مناسب برای استفاده در تخصیص قابلیت اطمینان ماهواره‌ها، که خود شامل زیرسیستم‌های مختلف و پیچیدگی بالا است، انتخاب شده است. بر اساس این انتخاب نشان داده شده است که روش امکانسنجی اهداف به صورت مطلوبی پاسخ‌گوی نیازهای طراحی قابلیت اطمینان در ماهواره‌هاست. در ادامه مقاله با بررسی داده‌های ۱۸۸ ماهواره مخابراتی در مدار LEO با استفاده از روش کاپلان–میر رابطه قابلیت اطمینان این نوع ماهواره بر اساس عمر عملیاتی محاسبه شده و در نهایت نرم افزاری بر پایه‌ی روش امکانسنجی اهداف و رابطه‌ی حاصله از نمودار کاپلان–میر توسعه داده شده است که به صورتی موثر و سریع قابلیت تخصیص قابلیت اطمینان به زیرسیستم های ماهواره‌ی مخابراتی را براساس عمر عملیاتی ماهواره داراست. جهت صحه گذاری نتایج نرم افزار توسعه داده شده با سایر نرم‌افزارهای موجود در دنیا مقایسه شده و قابلیت اطمینان تخصیص یافته با نتایج طراحی یک ماهواره واقعی ساخته شده تطابق داده شده است. نتایج نشان دهنده کمتر از ۱۲٪ خطا میان تخصیص قابلیت اطمینان بر اساس عمر با مقدار قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های ماهواره‌ی ساخته شده است. که با توجه به تجربه سازندگان ماهواره و ذات فاز طراحی بر مبنای تخصیص قابلیت اطمینان و محاسبه قابلیت اطمینان خطای حاصله در رنج قابل قبولی است.

واژه‌های کلیدی: تخصیص قابلیت اطمینان، روش امکان‌سنجی اهداف، روش کاپلان–میر، ماهواره‌ی مخابراتی، قابلیت اطمینان

مقدمه

مبحث تخصیص قابلیت اطمینان از آغاز شکل‌گیری سیستم‌های پیچیده حائز اهمیت بوده است. با توجه به نامشخص بودن جزئیات سیستم در فازهای آغازین طراحی نیاز است به طریقی قابلیت اطمینان مورد نیاز هریک از بخش‌های سیستم به آن تخصیص داده شود و به عنوان مبنایی در روند طراحی در نظر گرفته شود. به همین منظور روش‌های مختلفی در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته است. فایفه و همکارانش [۱] در سال ۱۹۶۸ اذعان داشتند که روش‌های مرسوم مورد استفاده به این منظور، جامع نیستند و تنها می‌توانند به عنوان مبنای اولیه‌ای در نظر گرفته شوند و نیاز است که با توجه به محدودیت‌های مواد، سطح تکنولوژی، هزینه‌های توسعه و سایر عوامل به طور مرتب بازبینی شوند.

راه‌های مختلفی وجود دارد که در مواقع تخطی الزامات قابلیت اطمینان از مقدار پیش‌بینی شده مورد استفاده قرار گیرند. روش تخمین قابلیت اطمینان جزئی، روشی است که فایفه و همکارانش به منظور انتخاب راه حل بهینه در زمینه‌ی آنالیزهای مصالحه پیشنهاد داده‌اند. متاس [۲] در سال ۲۰۰۲ یک مدل کلی برای برای تخمین حداقل قابلیت اطمینان مورد نیاز برای سیستم‌های دارای اجزای متعدد ارائه داد که شامل دو قسمت فرمولاسیون برنامه نویسی غیرخطی در مساله‌ی تخصیص و فرمولاسیون تابع هزینه است. کو و همکارش [۳] در سال ۲۰۰۷ مطالعاتی بر روی پیشرفت‌های جدید این حوزه انجام دادند و به این منظور سیستم‌های سری–موازی، سیستم‌های k از N، شبکه‌های پل، معماری بلوک بازیابی و سایر سیستم‌های منسجم نامشخص را در نظر

گرفتند و به بررسی پیشرفت تکنیک‌های بهینه سازی روش‌های هیوریستیک، متا هیوریستیک و روش‌های دقیقی پرداختند که در طراحی قابلیت اطمینان بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به منظور انجام فرآیند تخصیص قابلیت اطمینان نرم افزارهایی نیز با هدف کاربری خاص توسعه یافته‌اند. Lambda predict ، نرم افزار BlockSim، نرم افزار Relex و یا نرم‌افزار قابلیت اطمینان Windchill از نرم‌افزارهای مطرح مورد استفاده در این حوزه هستند که در ادامه معرفی و مقایسه خواهند شد.

ماهواره ها نیز به عنوان یک سامانه‌ی پیچیده با طول عمر بالا جهت طراحی و ساخت، نیاز به روندی مشخص و گام‌به‌گام برای تخصیص و تحلیل قابلیت اطمینان دارند. با توجه به نوع مأموریت، پیچیدگی، طول عمر عملیاتی و عدم امکان تعمیر و نگهداری در زمان قرارگیری در مدار، در نظر گرفتن تمامی ابعاد شکست و خطاهای احتمالی در عملکرد زیرسیستم‌ها و تجهیزات در مدها و فازهای مختلف مأموریت در طول عمر ماهواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این موضوع سبب توجه بسیار جهت شناسایی و تحلیل منابع خرابی در فازهای طراحی و ساخت شده و با توجه به پیچیدگی طرح و تعداد زیرسیستم‌ها، تحلیل و تخصیص قابلیت اطمینان را امری پیچیده و مشکل کرده است. ازاین‌رو استفاده از رویکردی جامع و مطلوب جهت بررسی ابعاد شکست و خرابی‌ها در تحلیل قابلیت اطمینان بسیار حائز اهمیت است.

با توجه به اهمیت مبحث تخصیص و تخمین قابلیت اطمینان ماهواره‌ها تا کنون مطالعات بسیاری در این موضوع انجام شده است. به طور مثال، در سال ۲۰۱۹ پاتریارکا و همکارانش [۴] تاریخچه‌ی ریسک، ایمنی و قابلیت اطمینان مربوط به ماهواره‌ها را شامل طیف وسیعی از اسناد بررسی کردند و یک متاآنالیز بر اساس شاخص‌های بیبلیومتریک در این زمینه انجام دادند. همچنین گورس و همکاران [۵] در یک بررسی تخصیص قابلیت اطمینان را با روش امکان سنجی اهداف (FOO) که یکی از روش‌های متداول تخصیص قابلیت اطمینان است، بر روی یک ماهواره انجام دادند و نتایج آن را با الگوریتم تخمین خطای به دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای عملیاتی در مدار مقایسه کردند. در این بررسی مطابق با روش امکان سنجی اهداف که در استاندارد MIL-HDBK-338B [۶] بیان شده است، شامل چهار پارامتر اصلی برای وزن دهی قابلیت اطمینان تخصیص داده شده به قسمت‌های مختلف است. این مشخصه‌ها شامل پیچیدگی زیرسیستم، سطح تکنولوژی، زمان عملکرد و شرایط محیطی است. میرشکاری و همکاران [۷] نیز با استفاده از پایگاه داده‌ای شامل ۱۲۸ ماهواره مشابه، خرابی‌های ممکن در ماهواره‌هاکیوبست را استخراج کردند و سپس مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان را بر روی یک ماهواره‌ی مکعبی نمونه‌ی مدار LEO انجام دادند.

در مقاله‌ی حاضر ابتدا روش‌های مختلف تخصیص قابلیت اطمینان مقایسه شده و سپس با بررسی داده های ۱۸۸ ماهواره مخابراتی مدار LEO با استفاده از روش غیرپارامتری کاپلان–میر رابطه قابلیت اطمینان بر اساس عمر ماهواره استخراج شده است. در ادامه نرم‌افزار های موجود در این حوزه بررسی و بر اساس داده های موجود نرم افزار جدیدی در این حوزه توسعه داده شده است. توسط نرم افزار توسعه داده شده قابلیت اطمینان به زیرسیستم‌های مختلف یک ماهواره مخابراتی تخصیص داده شده است. در ادامه قابلیت اطمینان تخصیص داده شده با مدل واقعی ساخته شده مقایسه و صحت آن مشخص شده است.

روش‌های تخصیص قابلیت اطمینان

تخصیص قابلیت اطمینان فرآیندی است که به وسیله آن خرابی مجاز برای یک سیستم مشخص می شود. هدف اصلی تخصیص قابلیت اطمینان تعیین یک قابلیت اطمینان هدف برای هر زیرسیستم به نحوی است که در نهایت مقدار قابلیت اطمینان کل سیستم مطابق با الزامات اولیه یا تخمین اولیه تعیین شود. اختصاص قابلیت اطمینان سامانه شامل حل نامساوی بر مبنای رابطه زیر است:

$$f(R_1, R_2, \dots R_n) \geq R^n \qquad (۱)$$

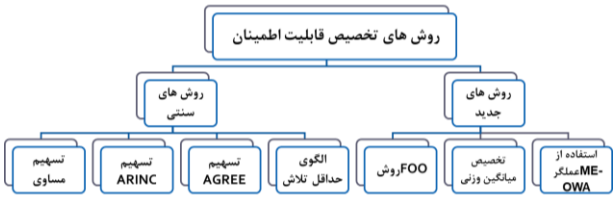
که در آن متغیرها عبارتند از:

R_i: پارامتر اختصاص قابلیت اطمینان برای تأمین زیرسامانه

R^n: پارامتر الزام قابلیت اطمینان سامانه

f: تابع ارتباط دهنده‌ی قابلیت اطمینان زیرسامانه و سامانه

روش های متعددی برای تخصیص قابلیت اطمینان وجود دارد که در شکل زیر قابل مشاهده است.



شکل ۱: روش‌های متداول تخصیص قابلیت اطمینان

در روش تسهیم مساوی با توجه به عدم دسترسی به اطلاعات تجهیزات، قابلیت اطمینان مساوی به تمامی تجهیزات اختصاص داده شده و قابلیت اطمینان کلی به صورت حاصل‌ضرب قابلیت اطمینان تجهیزات در نظر گرفته می‌شود. این روش تنها برای سیستم‌های سری کاربرد دارد.

در روش تسهیم ARINK که تنها برای سیستم‌های سری غیر قابل تعمیر و با نرخ خرابی ثابت استفاده می‌شود، تخصیص قابلیت اطمینان بر اساس نرخ خرابی فعلی انجام می‌شود و بر اساس

قابلیت اطمینان مورد نیاز و نرخ خرابی فعلی، قابلیت اطمینان جدید به اجزاء اختصاص داده می‌شود.

روش AGREE از دیگر روش‌های سنتی مورد استفاده برای سیستم‌های سری است. در این روش تعدادی از اجزاء برای هر سیستم در نظر گرفته می‌شود و با توجه به نرخ خرابی تجهیزات، زمان عملیات ماژول و تعداد اجزاء فرض شده، تخصیص قابلیت اطمینان انجام می‌شود.

در روش الگوریتم حداقل تلاش نیاز است یک تابع بر اساس نیازمندی‌ها تعریف شود. برای این کار باید تمام منابع را به صورت واحد تبدیل و تابعی به عنوان تابع هزینه تعریف نمود.

روش FOO یک روش متداول برای تخصیص قابلیت اطمینان بدون تعمیر در سیستم‌های مکانیکی–الکتریکی است. این روش ابتدا به عنوان روشی در سال ۱۹۷۶ تهیه شد و هندبوک MIL-HDBK-338B [۶] که استانداردی نظامی برای طراحی قابلیت اطمینان است، این روش را توصیه کرده است. در این روش بر اساس وزن‌دهی به چهار پارامتر اثرگذار، تخصیص قابلیت اطمینان به اجزاء مختلف سیستم صورت می‌گیرد. پیچیدگی، سطح تکنولوژی، زمان عملکرد و شرایط محیطی چهار پارامتر معرفی شده در این استاندارد به منظور تسهیم قابلیت اطمینان بین زیرسیستم‌ها هستند. هرکدام از این پارامترها با مقداری بین ۱ تا ۱۰ و بر اساس طراحی مهندسی و توافق‌ها و تجربیات تخصصی ارزش‌گذاری می‌شوند. سپس مقادیر مربوط به این چهار پارامتر در یکدیگر ضرب شده و نتیجه که عددی بین ۱ تا ۱۰۰۰۰ است، با توجه به نرخ خطای کلی سیستم نرمالایز می‌شود؛ به نحوی که مجموع آن‌ها برابر یک است. این روش یکی از روش‌های متداول تخصیص قابلیت اطمینان است که برخی نواقص روش‌های سنتی در آن مرتفع شده است.

در روش تخصیص میانگین وزنی از تحقیق پرسش‌نامه‌ای استفاده شده است و مشابه روش امکان‌سنجی اهداف از وزن‌دهی پارامترهایی نظیر پیچیدگی، تکنولوژی جدید، سیستم بحرانی، شرایط محیطی، ایمنی و نگهداری بین یک تا ده استفاده می‌شود. عملگر ME-OWA از اجتماع عملگرهای مهم در مجموع روش‌های وزنی است. دست‌یابی به وزن‌دهی بهینه از نسبت‌ها، مبتنی بر نسبت بردارهای وزنی بعد از فرآیند تجمعی و از روش لاگرانژ چندگانه است. روش‌های دیگری نیز در این زمینه توسعه یافته‌اند و متخصصین بر اساس شرایط و مرحله‌ی طراحی از روش مناسب بهره می‌گیرند.

سیلوستری و همکاران [۸] مطالعه‌ای بر روی روش‌های تخصیص قابلیت اطمینان انجام دادند و راهنمایی برای انتخاب روش مناسب ارائه دادند. انتخاب روش تخصیص قابلیت اطمینان مناسب به عوامل متعدد و همچنین مرحله‌ی طراحی بستگی دارد. بر این اساس هر روش تخصیص، طبق قابلیت اطمینان هدف سیستم و مشخصات آن شامل تکنولوژی، چرخه‌ها و زمان‌های عملیات دسته‌بندی می‌شود. نتایج این بررسی در جدول ۱) ارائه شده‌است.

جدول ۱: مقایسه روش‌های مختلف تخصیص قابلیت اطمینان

مرحله طراحی	امکان استفاده از ابزار ریاضی	معایب	مزایا	روش
I	X	نادیده گرفتن تفاوت زیرسیستم‌ها	سادگی کاربرد	تسهیم مساوی
II	✓	مخصوص سیستم‌های سری استفاده در فازهای اولیه نیاز به نرخ خطای ورودی	سادگی کاربرد عینی بودن	تسهیم ARINC
II	X	مخصوص سیستم‌های سری استفاده در فازهای اولیه	تطبیق‌پذیری	Boyd
III	X	مخصوص سیستم‌های سری استفاده در فازهای اولیه	دارای جزئیات	تسهیم AGREE
III	✓	دشواری تشخیص فاکتور تنش نادیده گرفتن میزان بحرانی بودن تجهیزات	رفتار تحلیلی دقیق	Bracha
II	✓	مخصوص سیستم‌های سری استفاده در فازهای اولیه	سادگی کاربرد جزئیات مناسب	روش FOO
II	✓	فاعلیت تحلیل	جزئیات بالا قابل استفاده در سیستم‌های نوآورانه	Karmiol
III	✓	مخصوص سیستم‌های سری نیاز به داشتن اطلاعات دقیق	جزئیات بالا قابل استفاده در سیستم‌های نوآورانه قابل استفاده در هر فاز	IFM
III	✓	نیاز داشتن به اطلاعات دقیق	قابل استفاده در سیستم‌های پیچیده	CFM

افزایش سطح اطلاعات سیستم

در ماهواره‌ها نیز تخصیص قابلیت اطمینان در مراحل اولیه‌ی طراحی با توجه به نامشخص بودن مشخصات دقیق اجزاء هر زیرسیستم، در سطح زیرسیستم‌ها انجام می‌گیرد. با توجه به شرایط طراحی در این فاز، روش FOO پاسخ گوی خوبی به نیازهای طراحی است و معمولا در ماهواره‌ها تخصیص به این روش انجام می‌گیرد. در مراحل بعدی پروژه با پیشرفت طراحی و مشخص شدن تجهیزات، بررسی‌های قابلیت اطمینان از طریق تخمین قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها و سپس اجزاء آن‌ها انجام می‌شود.

لازم است شیوه‌های پیش‌بینی قابلیت اطمینان با اهداف زیر انجام شود:

۱. بهینه کردن قابلیت اطمینان طراحی با توجه به قیود و محدودیت‌هایی همچون هزینه و جرم

۲. پیش‌بینی قابلیت اطمینان محصول در زمان بهره‌برداری
۳. جمع‌آوری داده‌های احتمال خرابی جهت ارزیابی ریسک

آزمون و تأیید قابلیت اطمینان با توجه به الزامات محصول نیز با اهداف زیر انجام می‌شود:

۱. صحه گذاری حالات خرابی و اثرات آن‌ها.
۲. بررسی شناسایی، تحمل و بازیابی خرابی.
۳. جمع‌آوری داده‌های آماری خرابی‌ها جهت انجام پیش‌بینی و ارزیابی ریسک.
۴. تثبیت ارزیابی‌های قابلیت اطمینان.
۵. اثبات قابلیت اطمینان اقلام بحرانی
۶. صحه‌گذاری یا توجیه پایگاه‌های داده‌های مورد استفاده برای اثبات نظری.

به صورت کلی با توجه به هزینه بر بودن خرید پایگاه داده از روش های نظری دیگری برای تخصیص و تخمین قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. هر چند مناسب است پایگاه داده‌های نرم‌افزاری معتبر خرایداری و استفاده شود.

روش امکان سنجی اهداف (FOO)

با توجه به توضیحات پیشین، در این مقاله از روش FOO برای تسهیم قابلیت اطمینان استفاده شده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، این روش، به صورت پایه ضرایب اختصاص یافته به زیرسامانه‌ها به صورت تابعی از نرخ عددی پیچیدگی، حالت تکنولوژی جدید، زمان عملکرد و شرایط محیطی تعیین شده است، به طور معمول از یک تیم با تجربه درخواست می‌شود پارامترهایی که از نظر ایشان می‌تواند در تخصیص قابلیت اطمینان تاثیر گذار باشد را با تعریف مد نظرشان اضافه نمایند.

بدیهی است پس از نهایی سازی پارامترها می‌توان روابط را نهایی نمود و قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها را تخصیص داد. هر نرخ از ۱ تا ۱۰ مقیاس‌بندی می‌شود. در ادامه، چگونگی تعیین مقدار نرخ‌ها توضیح داده می‌شود.

نرخ‌ها برای هر زیرسامانه با یکدیگر مرتبط می‌شوند تا نرخ کلی زیرسامانه را مشخص کنند. هر نرخ زیرسامانه بین ۱ تا ۱۰ است. سپس نرخ‌های زیرسامانه نرمالیزه می‌شوند بطوریکه مجموع آن‌ها ۱ شود. و سایر محاسبات انجام می شود تا تخصیص نهایی قابلیت اطمینان به زیرسیستم ها صورت پذیرد. در ادامه تعریف پارامترهای در نظر گرفته شده آمده است.

پیچیدگی: پیچیدگی با بررسی تعداد احتمالی قطعات یا اجزایی که سامانه را تشکیل می‌دهند و همچنین با توجه به پیچیدگی سامانه‌ی مونتاژ شده‌ای که از ترکیب آن‌ها شکل گرفته است ارزیابی می‌شود. پیچیدگی به دو نوع ذاتی و عملیاتی تقسیم شده و برای هر کدام کم‌ترین نرخ پیچیدگی سامانه ۱ و بیش‌ترین مقدار آن ۱۰ است.

تکنولوژی جدید: پیشرفت‌های مهندسی در حال حاضر در همه زمینه‌ها در نظر گرفته می‌شود. پیشرفت‌های طراحی یا روش، که حداقل توسعه را داشته‌اند با مقدار ۱۰ و پیشرفت‌هایی که تا حد زیادی گسترش یافته‌اند با مقدار ۱ تعیین می‌شوند.

زمان عملکرد: جزیی که برای تمام زمان مأموریت کار می‌کند مقدار ۱۰ و جزیی که کمترین زمان حین مأموریت عمل می‌کند مقدار ۱ می‌گیرند.

محیط: شرایط محیطی هم از ۱ تا ۱۰ مقیاس‌بندی می‌شوند. اجزایی که برای تحمل شرایط محیطی سخت و ناملایم حین عملکرد آن‌ها در نظر گرفته می‌شوند مقدار ۱۰ و اجزایی که برای فعالیت در محیطی با شرایط ملایم تر در نظر گرفته می‌شوند، مقدار ۱ می‌گیرند.

اهمیت: اهمیت زیرسامانه در عملیات ماهواره با توجه به حیاتی بودن فعالیت آن در سطح سامانه، مدهای سیستمی و ماموریت مشخص می‌شود، با توجه به این، کم‌ترین اهمیت در عملیات با مقدار ۱ و بیش‌ترین با مقدار ۱۰ مشخص می‌شود.

در ادامه روابط حاکم بر معادلات روش امکان سنجی اهداف آمده است. با استفاده از معادلات زیر مقادیر پیچیدگی ذاتی زیرسیستم، نرخ شکست کل زیرسیستم و مقدار قابلیت اطمینان تخصیصی برای هز زیرسیستم مشخص می‌شود.

$$C_K' = \frac{W_k'}{W'} \quad (۲)$$

$$W_k' = r_{1k}' r_{2k}' r_{3k}' r_{4k}' r_{5k}' r_{6k}' \quad (۳)$$

$$W' = \sum_{i=1}^{N} W_k' \quad (۴)$$

که در آن:

W_k': نرخ زیرسامانه K ام

W': مجموع نرخ‌ها

r_{ik}': نرخ هریک از شش ضریب هر زیرسامانه

N: تعداد زیرسامانه‌ها

$$\lambda_s = \frac{-\ln R}{T} \quad (۵)$$

$$\bar{\lambda}_k = C_K' \lambda_s \quad (۶)$$

که در آن:

λ_s: نرخ شکست سامانه

T: زمان مأموریت

$\bar{\lambda}_k$: نرخ شکست اختصاص یافته به هر زیرسامانه

C_K': پیچیدگی زیرسامانه Kام

همچنین:

$$R_i = e^{-\lambda_i T} \quad (۷)$$

که در آن:

R_i: قابلیت اطمینان زیرسامانه

λ_s: نرخ شکست سامانه

T: زمان مأموریت

تحلیل کمی قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان را می‌توان به روش‌های مختلفی کمی کرد که یکی از روش‌های متداول تحلیل بقای داده‌های آماری است. تحلیل بقا به روش‌های آماری در ارائه صحیح نتایج منطبق با مدل بنیادی، موثر است. تحلیل بقا به مجموعه‌ای از روش‌های آماری تحلیل داده گفته می‌شود که در آن‌ها متغییر مطلوب، زمان وقوع یک پدیده است. ویژگی خاص تحلیل بقا این است که که با داده‌های عمدا حذف شده وفق داشته و از این رو از اطلاعات که در زمان ارزیابی هنوز معتبر هستند استفاده می‌نماید. تحلیل بقا می‌تواند در آنالیز داده‌های طول عمر مورد استفاده قرار گیرد. مدل‌های تولید داده در دو گروه عمده پارامتریک و غیرپارامتریک طبقه‌بندی می‌شود. در این مقاله تحلیل کمی غیرپارامتری به روش کاپلان–میر انجام شده است.

تحلیل کمی غیرپارامتری به روش کاپلان–میر

استفاده از توزیع‌های غیرپارامتری سعی در برآورد تابع احتمالاتی از داده‌های آماری دارد تا بتوان براساس آن به پیش‌بینی رفتار متغیر مورد نظر در آینده پرداخت. روش مورد استفاده برای تحلیل غیرپارامتری در این مقاله برآوردگر[1] کاپلان–میر است و یک برآوردگر تخمین تابع بقا از اطلاعات عمر عملیاتی است و در مهندسی، جهت محاسبه زمان باقی‌مانده تا وقوع خرابی قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۹]

در این قسمت برای انجام تحلیل غیرپارامتریک، اطلاعات آماری با تمام حالت‌های واماندگی مدنظر قرار گرفته است. ماهواره‌ها به حالت‌های مختلف دچار واماندگی می‌شود. حالت‌های مختلف واماندگی باعث از کارافتادگی کامل و یا جزئی ماهواره می‌شود. با توجه به تعریف قابلیت اطمینان و در نظر گرفتن اولین زمان وقوع خرابی، تابع قابلیت اطمینان غیرپارامتریک $R(t)$ به کمک رابطه کاپلان–میر، معادله (۲) تخمین زده می‌شود[۱۰]

$$R(t) = \prod_{all\ i\ such\ that\ t_i \le t} \frac{n_i - d_i}{n_i} \qquad (۸)$$

در معادله فوق t_i زمان واماندگی i، n_i تعداد قطعات سالم قبل از زمان t_i و d_i تعداد قطعات دچار واماندگی در زمان t_i است. تابع $R(t)$ تابع پله‌یی است که در زمان $t = 0$ برابر ۱ است و پس از زمان t_i به اندازه‌ی $\frac{n_i - d_i}{n_i}$ کاهش پیدا می‌کند.

روش کاپلان–میر برآوردی با حداکثر احتمال ارائه می‌دهد اما میزان پراکندگی اطراف $R(t)$ را مشخص نمی‌کند. میزان این پراکندگی با توجه به مقدار واریانس و انحراف معیار $R(t)$ تخمین زده می‌شود. برای استخراج حدود بالا و پایین حاشیه اطمینان ۵٪ کاربرد دارد. با در نظر گرفتن حاشیه اطمینان ۵٪ قابلیت اطمینان واقعی بین حد بالا و پایین قرار می‌گیرد.

در ادامه نیاز است اطلاعات آماری مربوط به ماهواره‌های مشابه مد نظر قرار گیرد برای این اقدام ۱۸۸ ماهواره مخابراتی در مدار LEO مورد بررسی قرار گرفتند. این ماهواره‌ها عموما دارای ماموریت مخابراتی بوده و جهت افزایش تعداد داده بعضا ماموریت های مخابراتی و سنجشی توام نیز در پایگاه داده قرار گرفتند. این ماهواره ها اکثرا در بازه عمر ماموریتی ۳ تا ۷ سال قرار دارند ولی برای محاسبات حال حاضر زمان اولین خرابی تاثیر گذار در سیستم در نظر گرفته شده است.

نمودار مربوط به قابلیت اطمینان غیرپارامتریک ماهواره با در نظر گرفتن حاشیه اطمینان ۵٪ در شکل ۲ نمایش داده شده است.

این شکل نشان دهنده مقدار قابلیت اطمینان پس از مدت زمان عمر ماهواره در مدار LEO است. همانطور که در شکل ۲ مشخص است پس از عمر ۳ سال قابلیت اطمینان به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. که این موضوع نشان دهنده تاثیر تشعشعات فضایی روی قطعات الکرونیکی ماهواره می‌باشد. به طور معمول پس از سال سوم از عمر ماهواره در مدار حدودا ۱۰ کیلوراد تشعشع به قطعات ماهواره وارد می‌شود و این عامل سبب می‌شود انتخاب قطعات در بازه عمر بیش از سه سال متاثر شود.

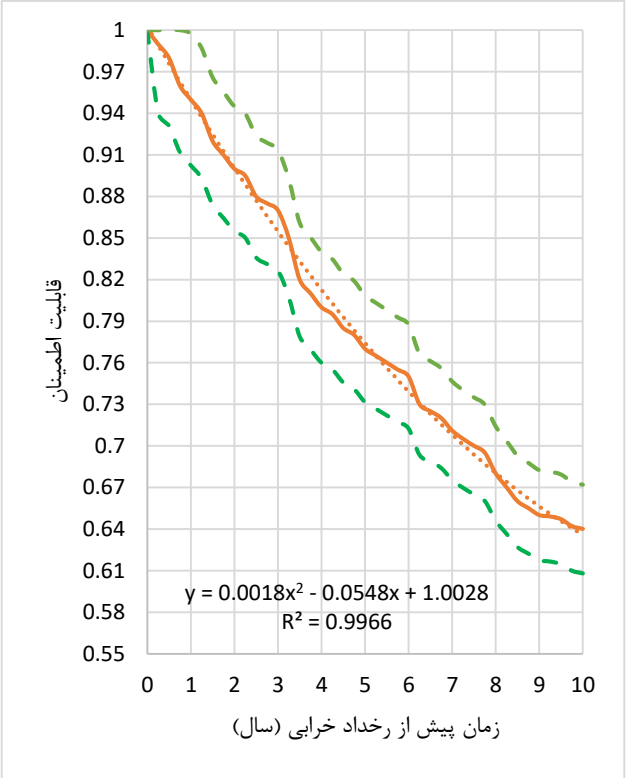
با برازش یک منحنی روی نمودار قابلیت اطمینان می‌توان تخمین مناسبی از قابلیت اطمینان ماهواره‌های مخابراتی LEO بر اساس عمر عملیاتی داشت. در ادامه معادله ناشی از برازش منحنی روی این نمودار آمده است.

$$y = 0.0018x2 - 0.0548x + 1.0028 \qquad (۹)$$

در این معادله x مقدار عمر بر مبنای سال و y مقدار حداکثر قابلیت اطمینان قابل دستیابی می‌باشد.

واریانس رابطه به دست آمده نیز در رنج قابل قبولی است و می‌توان به نتایج آن تکیه نمود.

[1] Estimator



شکل ۲: نمودار کاپلان-میر قابلیت اطمینان ماهواره مخابراتی LEO با حاشیه اطمینان ۵٪

نرم‌افزارهای مورد استفاده در تخصیص قابلیت اطمینان

به طور کلی نرم افزارهای متعددی برای استفاده در فازهای ابتدای طراحی ماهواره در دنیا توسعه داده شده‌اند. میرشمس و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۱۸ در مقاله ای نرم افزارهای طراحی ماهواره را جمعبندی و بررسی نموده و نرم افزار جدید برای طراحی ماهواره های مخابراتی زمین آهنگ ارائه نموده‌اند. به منظور انجام فرآیند تخصیص قابلیت اطمینان نیز نرم افزارهایی با هدف کاربری خاص توسعه یافته‌اند. Lambda predict یکی از نرم‌افزارهای این حوزه است که از الگوریتم‌های مختلف شامل تسهیم مساوی، تسهیم AGREE، تسهیم ARINC، روش امکان‌سنجی اهداف و تسهیم سیستم‌های تعمیرپذیر استفاده می‌کند. نرم افزار BlockSim نیز ابزار دیگری است که می‌تواند به این منظور مورد استفاده قرار گیرد. این نرم افزار قابلیت مدل سازی سیستم‌های پیشرفته و بلوک دیاگرام‌های پیچیده‌ی قابلیت اطمینان و سپس تخصیص قابلیت اطمینان و بهینه‌سازی آن را دارد. نرم افزار Relex و یا نرم‌افزار قابلیت اطمینان Windchill نیز از دیگر نرم‌افزارهای مورد استفاده در این حوزه هستند. متخصصین در زمینه‌های مختلف می‌توانند بر اساس نیاز و الگوریتم مناسب محصول خود، ابزاری را به منظور تخصیص قابلیت اطمینان بر روی اجزای سیستم خود توسعه دهند. به طور مثال لیو و همکارانش [۱۲] در سال ۱۹۹۷ ابزاری برای تخصیص قابلیت اطمینان سیستم‌های نرم‌افزاری با استفاده از روش‌های عددی و ابزار برنامه‌ریزی غیر خطی به منظور تسهیل مساله‌ی بهینه‌سازی توسعه دادند و آن را بر روی یک سیستم نرم افزار مخابراتی پیاده کردند.

در ادامه مقایسه‌ای بین نرم‌افزارهای موجود در بازار بر اساس سه پارامتر پوشش‌دهی الگوریتم‌های مختلف، وابستگی به مشخصات اولیه و اطلاعات دقیق از اجزاء و نیز حجم بالای محاسبات ارائه گردیده است.

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود نرم‌افزارها نیازمند مشخصات اولیه برای انجام فرآیند تخصیص هستند و همچنین حجم محاسبات بالایی دارند. بنابراین نیازمند صرف زمان بیشتری نیز به منظور انجام فرآیند تخصیص هستند. لذا در فازهای ابتدایی یک پروژه شاید بهتر باشد ابزاری به منظور انجام فرآیند متناسب با نیاز محصول توسعه داد و از آن بهره برد.

در خصوص ماهواره‌ها با توجه به این‌که در فازهای ابتدایی مشخصاتی از تجهیزات در دست نیست و تنها زیرسیستم‌های مورد استفاده و کلیات آن‌ها مشخص هستند، امکان ایجاد مشخصات ورودی با جزئیات مقدور نیست. با توجه به مشخص بودن زیرسیستم‌های یک ماهواره و نیز پارامترهای روش FOO که روش بهینه‌ای برای انجام تخصیص در این فاز است، بهتر است نرم افزاری با حجم محاسبات پایین‌تر متناسب با نیاز پروژه‌های ماهواره‌ای ایجاد شود. در مقاله [۱۳] نمونه‌ی مناسبی از تدوین نرم افزار با سرعت پردازش بالا و کاربردی آمده است. در ادامه نرم افزار توسعه داده شده به این منظور معرفی خواهد شد. در جدول ۲ مقایسه‌ای میان نرم افزارهای موجود شناسایی شده و نرم افزار طراحی شده که در بخش آتی (با نام LEO ComSat Rel Allocate) به آن پرداخته خواهد شد، آمده است. در این جدول امتیاز دهی به نرم افزارها بر مبنای قابلیت‌های آنها انجام شده است.

جدول ۲: مقایسه نرم‌افزارهای تخصیص قابلیت اطمینان

نرم افزار	Lambda Predict	Block Sim	Relex/ Windchill	LEO ComSat Rel Allocate
پوشش الگوریتم‌های مختلف	۵	۹	۹	۳
ورودی‌های کم حجم	۷	۶	۶	۱۰
حجم محاسبات	۶	۷	۸	۸
زمان اجرا	۸	۷	۸	۹
هزینه	۶	۶	۵	۱۰
جمعبندی امتیازها	**۳۲**	**۳۵**	**۳۶**	**۴۰**

پیاده‌سازی و توسعه نرم افزار تخصیص قابلیت اطمینان

ماهواره‌ها به طور کلی از زیرسیستم‌های مشخصی تشکیل شده‌اند. این زیرسیستم‌ها شامل مخابرات، مدیریت داده و فرمان، تامین توان الکتریکی، تعیین و کنترل وضعیت، سازه، مکانیزم و کنترل حرارت هستند. ماهواره‌های مخابراتی دارای محموله‌ی مخابراتی هستند و ممکن است بر اساس نیاز ماموریت دارای زیرسیستم پیشرانش نیز باشند. در مقاله مرجع [۱۴] در این خصوص توضیحات کاملی ارائه شده است. همانطور که ذکر شد در روش امکانپذیری اهداف می‌بایست وزن دهی به تمام زیرسیستم‌ها با در نظر گرفتن ۵ عامل پیچیدگی، محیط، زمان عملکرد، جدید بودن فناوری و اهمیت انجام شود. در این مقاله وزن دهی بر مبنای نظر ۱۰ نفر از خبرگان حوزه فضایی کشور انجام شده است و نتایج در این بخش ارائه شده است. نظر خبرگان بر مبنای روش‌های پرسشنامه نویسی معتبر دلفی انجام شده است.

در جدول ۳ مقادیر پیشنهادی برای نرخ های پارامترهای مربوط به روش FOO برای زیرسیستم‌های مختلف یک ماهواره‌ی مخابراتی آمده است. این مقادیر با نظر خبرگان استخراج شده و از روش‌های نظرسنجی خبرگانی و نیز تجربیات متخصصین برای تعیین آن استفاده شده است.

در ادامه‌ی تخصیص قابلیت اطمینان نیاز است قابلیت اطمینان کل سیستم مشخص باشد تا بتوان تخصیص قابلیت اطمینان به زیرسیستم ها را انجام داد. که بهترین روش آن استفاده از داده های آماری است. که این اقدام نیز بر مبنای روش کاپلان–میر انجام و در بخش‌های قبلی ارائه شد. رابطه‌ی به دست آمده در نرم افزار قرار گرفته و بر مبنای آن با توجه به عمر ماهواره مقدار قابلیت اطمینان تعیین می‌شود. بر این اساس برای طول عمر ۳ سال مقدار قابلیت اطمینان کل سیستم برابر با ۸۴٪ است.

جدول ۳: مقادیر پارامترهای روش FOO در ماهواره نمونه

زیرسامانه	اهمیت	فناوری جدید	زمان عملکرد	شرایط محیطی	پیچیدگی
محموله مخابراتی	۱۰	۸	۱۰	۱۰	۸
پیشرانش	۷	۱۰	۳	۱۰	۱۰
مدیریت داده و فرمان	۸	۸	۱۰	۸	۱۰
مخابرات	۹	۶	۲	۱۰	۸
توان الکتریکی	۹	۶	۱۰	۱۰	۷
تعیین و کنترل وضعیت	۹	۶	۱۰	۸	۹
کنترل حرارت	۴	۶	۳	۵	۳
سازه	۴	۴	۱	۹	۳
مکانیزم	۹	۱۰	۱	۷	۷

در شکل ۳) شمای نرم افزار تخصیص قابلیت اطمینان توسعه یافته بر پایه اکسل قابل مشاهده است. این نرم افزار شمای جدولی شکل داشته و به صورت اتوماتیک محاسبات را پس از وارد کردن ورودی‌ها انجام می‌دهد.

LEO ComSatRelAllocate

ورودی ها			خروجی ها		
ورودی	مقدار		پارامتر محاسباتی	مقدار	
عمر عملیاتی (سال)	۳		عمر برحسب (ساعت)	۲۶۲۸۰	
قابلیت اطمینان مد نظر نهایی	۰.۸۴		نرخ شکست سامانه	۰.۰۰۰۰۰۶۶۳۴	
نرخ ورودی پارامترهای مربوط به هر زیرسیستم بر مبنای نظر خبرگان			پارامترهای محاسباتی خروجی		

زیرسامانه	اهمیت	فناوری جدید	زمان عملکرد	شرایط محیطی	پیچیدگی	نرخ کل زیرسامانه	پیچیدگی Ck	اختصاص نرخ شکست زیرسامانه براساس عمر	اختصاص قابلیت اطمینان
محموله مخابراتی	۱۰	۸	۱۰	۱۰	۸	۶۴۰۰۰	۰.۲۸۱۴	۰.۰۰۰۰۰۱۸۶۷	۰.۹۵۲۱۲
پیشرانش	۷	۱۰	۳	۱۰	۱۰	۲۱۰۰۰	۰.۰۹۲۳	۰.۰۰۰۰۰۰۶۱۳	۰.۹۸۴۰۳
مدیریت داده و فرمان	۸	۸	۱۰	۸	۱۰	۵۱۲۰۰	۰.۲۲۵۱	۰.۰۰۰۰۰۱۴۹۳	۰.۹۶۱۵۱
مخابرات	۹	۶	۲	۱۰	۸	۸۶۴۰	۰.۰۳۸۰	۰.۰۰۰۰۰۰۲۵۲	۰.۹۹۳۴۰
توان الکتریکی	۹	۶	۱۰	۱۰	۷	۳۷۸۰۰	۰.۱۶۶۲	۰.۰۰۰۰۰۱۱۰۳	۰.۹۷۱۴۴
تعیین و کنترل وضعیت	۹	۶	۱۰	۸	۹	۳۸۸۸۰	۰.۱۷۰۹	۰.۰۰۰۰۰۱۱۳۴	۰.۹۷۰۶۳
کنترل حرارت	۴	۶	۳	۵	۳	۱۰۸۰	۰.۰۰۴۷	۰.۰۰۰۰۰۰۰۳۲	۰.۹۹۹۱۷
سازه	۴	۴	۱	۹	۳	۴۳۲	۰.۰۰۱۹	۰.۰۰۰۰۰۰۰۱۳	۰.۹۹۹۶۷
مکانیزم	۹	۱۰	۱	۷	۷	۴۴۱۰	۰.۰۱۹۴	۰.۰۰۰۰۰۰۱۲۹	۰.۹۹۶۶۳
مجموع									۰.۸۴

شکل ۳: شمای نرم‌افزار تخصیص قابلیت اطمینان توسعه داده شده بر پایه اکسل

نتایج

با استفاده از نرم افزار توسعه داده شده در بخش قبل تخصیص قابلیت اطمینان یک ماهواره مخابراتی LEO ساخته شده در داخل کشور انجام شده است. نتایج حاصله از تخصیص قابلیت اطمینان به شرح جدول زیر است. این ماهواره با طول عمر سه سال و ماموریت مخابراتی در مدار LEO در نظر گرفته شده است. و همانطور که در بخش قبل اشاره شد بر مبنای معادله استخراج شده از داده های آماری مقدار قابلیت اطمینان کل سیستم نیز ۸۴٪ در نظر گرفته شده است.

جدول ۴: مقادیر تخصیص قابلیت اطمینان به ماهواره نمونه بر اساس عمر

زیرسامانه	اختصاص قابلیت اطمینان	نرخ شکست زیرسامانه	پیچیدگی Ck	نرخ کل زیرسامانه
محموله مخابراتی	۰,۹۵۲۱۲	۰,۰۰۰۰۰۱۸۶۷	۰,۲۸۱۴	۶۴۰۰۰
پیشرانش	۰,۹۸۴۰۳	۰,۰۰۰۰۰۰۶۱۳	۰,۰۹۲۳	۲۱۰۰۰
مدیریت داده و فرمان	۰,۹۶۱۵۱	۰,۰۰۰۰۰۱۴۹۳	۰,۲۲۵۱	۵۱۲۰۰
مخابرات	۰,۹۹۳۴۰	۰,۰۰۰۰۰۰۲۵۲	۰,۰۳۸۰	۸۶۴۰
توان الکتریکی	۰,۹۷۱۴۴	۰,۰۰۰۰۰۱۱۰۳	۰,۱۶۶۲	۳۷۸۰۰
تعیین و کنترل وضعیت	۰,۹۷۰۶۳	۰,۰۰۰۰۰۱۱۳۴	۰,۱۷۰۹	۳۸۸۸۰
کنترل حرارت	۰,۹۹۹۱۷	۰,۰۰۰۰۰۰۰۳۲	۰,۰۰۴۷	۱۰۸۰
سازه	۰,۹۹۹۶۷	۰,۰۰۰۰۰۰۰۱۳	۰,۰۰۱۹	۴۳۲
مکانیزم	۰,۹۹۶۶۳	۰,۰۰۰۰۰۰۱۲۹	۰,۰۱۹۴	۴۴۱۰

در ادامه مقدار قابلیت اطمینان واقعی حاصل از ساخت ماهواره با قابلیت اطمینان تخصیص داده شده مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در جدول زیر مشخص است.

جدول ۵: مقادیر تخصیص قابلیت اطمینان به ماهواره نمونه بر اساس عمر

زیرسامانه	اختصاص قابلیت اطمینان	قابلیت اطمینان واقعی	درصد خطا
محموله مخابراتی	۰,۹۵۲۱۲	۰,۹۴	۱,۳
پیشرانش	۰,۹۸۴۰۳	۰,۸۷	۱۱,۶
مدیریت داده و فرمان	۰,۹۶۱۵۱	۰,۹۲	۴,۳
مخابرات	۰,۹۹۳۴۰	۰,۹۸	۱,۳
توان الکتریکی	۰,۹۷۱۴۴	۰,۹۱	۶,۳
تعیین و کنترل وضعیت	۰,۹۷۰۶۳	۰,۸۹	۸,۳
کنترل حرارت	۰,۹۹۹۱۷	۰,۹۹	۰,۹
سازه	۰,۹۹۹۶۷	۰,۹۹	۱
مکانیزم	۰,۹۹۶۶۳	۰,۹۵	۴,۷

نتایج خطای محاسبات نشان دهنده کمتر از ۱۲ درصد خطا می‌باشد که با توجه به سطح تکنولوژی ساخت ماهواره داخلی و فاز استفاده از تخصیص قابلیت اطمینان که فاز اول پروژه است و فاز امکان استخراج قابلیت اطمینان نهایی زیرسیستم‌ها که فاز پایانی آن می‌باشد. این مقدار خطا قابل قبول است.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، نرم افزار تخصیص قابلیت اطمینان توسعه داده شده بر مبنای روش امکان پذیری اهداف، با پشتوانه‌ی پایگاه داده ۱۸۸ ماهواره‌ای از ماهواره‌های مشابه تشریح شد. برای انتخاب روش امکان پذیری اهداف روش‌های مختلف تخصیص قابلیت اطمینان بررسی شدند و با استفاده از روش کاپلان–میر، رابطه ای برای استخراج مقدار کمی قابلیت اطمینان کل سیستم بر مبنای عمر عملیاتی استخراج شد. در نهایت نرم افزار توسعه داده شده با سایر نرم افزارهای موجود برای کاربردهای مختلف مقایسه شد و از ایده‌های موجود در تمام نرم افزارها برای بهینه‌تر نمودن توسعه‌ی نرم افزاری استفاده شد. با استفاده از نرم افزار حاضر تخصیص قابلیت اطمینان برای یک ماهواره مخابراتی مدار LEO انجام شد و با مقدار قابلیت اطمینان زیرسیستم های ساخته شده‌ی ماهواره مقایسه شد. خطای قابل قبول کمتر از ۱۲ درصد مشاهده شد. این خطا ناشی از ذات زمان استفاده از تخصیص قابلیت اطمینان در فاز ابتدایی پروژه و محاسبه آن در فاز انتهایی پروژه بوده و دلیل دوم آن نیز سطح تکنولوژی پایین ساخت ماهواره داخلی در قیاس با داده‌های آماری است. قابلیت اطمینان کل سیستم بر اساس روش کاپلان–میر برابر با ۸۴ درصد و قابلیت اطمینان زیرسیستم های ماهواره در بازه ۹۵ تا ۹۹ درصد به دست آمده‌اند.

مراجع

[1] D. Fyffe, W. Hines, and N. Lee, “System Reliability Allocation and a Computational Algorithm,” IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-17, Issue: 2,1968.

[2] A. Mettas, “Reliability allocation and optimization for complex systems,” Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2000 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity (Cat. No.00CH37055).

[3] W. Kuo and R. Wan, “Recent Advances in Optimal Reliability Allocation,” Studies in Computational Intelligence, SCI,volume 39, 2007.

[4] R. Patriarca, F. Costantino, and G. D. Gravio, “Risk, safety, reliability and satellites: Chronicles of a fragmented research field,” Journal of Space Safety Engineering, Vol. 6, Issue 3, 2019, Pages 201-211.

[5] S. D. Güreş, I. Ulusoy, and B. Durmaz, “Satellite Failure Estimation vs. Reliability Prediction Analysis,” 2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS).

[6] “Electronic Reliability Design Handbook,” MILITARY HANDBOOK, MIL-HDBK-338B, 1998.

[۷]س. میرشکاری، ح. اسدی، ا. ذبیحیان، م. میرشمس و ح. علیصادقی، “مدلسازی و تحلیل قابلیت اطمینان یک ماهواره مکعبی نمونه مدار LEO “، پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی، ۲۰۱۸.

[8] L. Silvestri, and D. Falcone, “Guidelines for Reliability Allocation Methods,” The international conference on modelling and applied simulation, 2018.

[9] Saleh, J. H., Castet, J. F,. Spacecraft reliability and multi-state failures: a statistical approach, John Wiley & Sons, 2011.

[۱۰]س. میرشکاری، م. میرشمس، ا. ذبیحیان، تحلیل قابلیت اطمینان براساس عمر عملکردی در ماهواره‌های مخابراتی زمین آهنگ "، پایان نامه کارشاسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۲۰۱۸.

[11] M. Mirshams and E. Zabihian, "FADSat: A system engineering tool for the conceptual design of geostationary Earth orbit satellites platform" Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2018.

[12]M. R. Lyu, S. Rangarajan, and A. P. A. van Moorsel, "Optimization Of Reliability Allocation And Testing Schedule For Software Systems," ISSRE '97: Proceedings of the Eighth International Symposium on Software Reliability Engineering, 1997.

[۱۳]ز. آقاجانی، ا. ذبیحیان، م. میرشمس، "نرم‌افزار طراحی مهندسی ماهواره‌های مخابراتی زمین‌آهنگ"، مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری فضایی، ۲۰۱۸.

[14]M. Mirshams, E. Zabihian, A.R. Zabihian, "Statistical design model (SDM) of communication satellites" 7th international conference on recent advances in space technologies (RAST), 2015.