

بهینه‌سازی قابلیت اطمینان رایانه مرکزی یک کاوشگر با استفاده از داده‌های مربوط

به طول عمر اجزای آن

هادی قلی‌نژاد^۱، سید حسین ترابی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۴

چکیده

بهینه‌سازی قابلیت اطمینان یکی از زمینه‌های مسائل بهینه‌سازی است که مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. قابلیت اطمینان یک سیستم معیاری مهم و حیاتی برای ارزیابی آن به شمار می‌رود، به خصوص در سیستم‌هایی که دسترسی برای تعمیر آن وجود ندارد مانند کاوشگرها، ماهواره‌ها و هواپیماهای بدون سرنشین و ... در صنایع هوافضا. در این مقاله سعی می‌شود با تخصیص اجزای مازاد به زیرسیستم‌های تشکیل‌دهنده رایانه مرکزی یک کاوشگر، قابلیت اطمینان کل آن تا حد امکان بهبود پیدا کند، به صورتی که محدودیت‌های مسئله شامل محدودیت‌های هزینه، وزن و حجم رعایت شود. لذا با یک مسئله بهینه‌سازی قابلیت اطمینان به نام مسئله تخصیص افزونگی روبرو هستیم. در مدل ارائه‌شده راهبرد تخصیص اجزای مازاد برای هر زیرسیستم به صورت یک متغیر تصمیم در نظر گرفته شده که می‌تواند فعال، ذخیره یا مختلط باشد. در مسئله تخصیص افزونگی نیاز هست که توزیع طول عمر تمام قطعات مشخص باشد اما در این مقاله فرض می‌شود که فقط داده‌های طول عمر اجزا در دسترس است. لذا ابتدا با استفاده از روش‌های آماری توزیع طول عمر مناسب‌تر به داده‌ها برازش شده و در انتها قابلیت اطمینان سیستم بهینه‌سازی می‌شود. در سیستم مورد مطالعه نشان داده می‌شود که با تخصیص اجزای مازاد، به ازای افزایش کمتر از ۳ برابری هزینه، وزن و حجم، می‌توان قابلیت اطمینان را بیش از ۱۴ برابر افزایش داد و سیستمی با قابلیت اطمینان کمتر از ۷ درصد را که می‌توان گفت انتظار کار کردن آن تا زمان مأموریت نمی‌رود به سیستمی تقریباً پایا با قابلیت اطمینان بیش از ۹۴ درصد ارتقاء داد.

^۱ دکتری مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه صنعتی اصفهان و نویسنده مسئول، صندوق الکترونیکی: gholinezhad.hadi@gmail.com

^۲ کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، صندوق الکترونیکی: htorabi@mail.kntu.ac.ir

کلمات کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی قابلیت اطمینان، تخصیص اجزای مازاد، رایانه مرکزی کاوشگر، نیکویی برازش.

مقدمه

برای دستیابی پایدار به مالکیت فضا لازم است سیستم‌هایی طراحی شود که مأموریت واگذار شده به آن‌ها به درستی و با اطمینان بالا انجام شده و قابل‌اعتماد باشند. از طرفی محدودیت‌هایی مانند هزینه، مانع از این می‌شود که برای طراحی یک سیستم، هر مقدار منبع دلخواه تخصیص داده شود. لذا استفاده از روش‌های بهینه‌سازی به منظور حداکثر استفاده از منابع در دست برای رسیدن هرچه بیشتر به اهداف موردنظر ضروری به نظر می‌رسد.

قابلیت اطمینان^۱ یک سیستم معیاری است که میزان احتمال انجام درست مأموریت یک سیستم به وسیله آن ارزیابی می‌شود. این معیار خصوصاً در سیستم‌هایی که هزینه ساخت بالایی داشته و خرابی آن‌ها هزینه‌های هنگفت مالی و گاهی جانی در بردارد و نیز در سیستم‌هایی که دسترسی لازم برای تعمیر آن‌ها وجود ندارد، مانند ماهواره‌ها، کاوشگرها، هواپیماهای بدون سرنشین و ... بسیار مهم و حیاتی است. در ساخت بسیاری از سیستم‌های مربوط به صنایع هوایی نظیر کاوشگرها محدودیت‌های جدی از جمله وزن و حجم آن‌ها یا هزینه ساخت آن‌ها مطرح است. گاهی اوقات بهبود تا حد مطلوب قابلیت اطمینان برای چنین سیستم‌هایی با محدودیت‌های آن‌ها در تضاد است. بنابراین در چنین موقعیت‌هایی مسئله بهینه‌سازی قابلیت اطمینان^۲ مطرح می‌شود.

بهینه‌سازی قابلیت اطمینان از جمله مسائلی است که با توجه به اهمیت آن، موردبررسی محققان زیادی قرار گرفته است. یکی از مسائل مهم مطرح شده در زمینه بهینه‌سازی قابلیت اطمینان مسئله تخصیص افزونگی^۳ است. در این مسئله سعی می‌شود با تخصیص اجزائی به صورت مازاد در کنار جزء اصلی در زیرسیستم‌ها قابلیت اطمینان کل سیستم بهبود پیدا کند.

^۱ Reliability

^۲ Reliability optimization

^۳ Redundancy allocation problem

طرح مسئله

در مسئله تخصیص افزونگی، نحوه تخصیص و شروع به کار اجزای مازاد به هر زیرسیستم راهبرد تخصیص^۱ نامیده می شود که می تواند فعال، ذخیره یا مختلط باشد.

در راهبرد تخصیص فعال^۲، اجزای مازاد به صورت موازی در کنار جزء اصلی قرار می گیرند و هم زمان با شروع به کار سیستم، شروع به کار می کنند. در راهبرد تخصیص آماده به کار (ذخیره)^۳، با شروع به کار سیستم تنها جزء اصلی شروع به کار می کند و اجزای مازاد به صورت ذخیره قرار می گیرند. به محض شکست جزء در حال کار، جزء ذخیره توسط یک سوئیچ الکترونیکی یا مکانیکی به جای جزء اصلی قرار می گیرد. زمانی که آخرین جزء ذخیره دچار شکست شود، زیرسیستم مربوطه از کار می افتد. سیستم سوئیچینگ معمولاً به صورت غیرایده آل است، به این معنی که دارای قابلیت اطمینانی به صورت تابع غیر افزایشی از زمان است. اگر قابلیت اطمینان سیستم سوئیچینگ یک باشد (سوئیچینگ کامل یا ایده آل) قطعاً استفاده از راهبرد ذخیره نسبت به راهبرد فعال بهتر خواهد بود.

برای راهبرد تخصیص آماده به کار، سه حالت سرد، گرم و داغ وجود دارد. در حالت ذخیره سرد، قطعات ذخیره در برابر استرس های ناشی از عملکرد سیستم محافظت می شوند و قطعات قبل از استفاده شدن خراب نمی گردند. از آنجاکه این راهبرد کاربرد بیشتری در صنعت و دنیای واقعی دارد اکثر مقالاتی که راهبرد تخصیص آماده به کار را استفاده می کنند، از حالت سرد بهره می برند. در این مقاله نیز از این راهبرد تخصیص استفاده شده است و از این به بعد منظور از راهبرد تخصیص ذخیره همان راهبرد تخصیص ذخیره سرد است. در راهبرد تخصیص مختلط^۴، تعدادی قطعه (بیش از یکی) به صورت فعال و تعدادی (حداقل یکی) به صورت آماده به کار تخصیص می یابند (Ardakan, et al, 2014: 132-139). در این راهبرد، تعداد قطعات فعالی که قبل از استفاده از عمر آنها کاسته می شود نسبت به راهبرد تخصیص فعال کمتر است و از طرفی تعداد دفعات استفاده از سیستم سوئیچینگ نسبت به راهبرد تخصیص ذخیره کمتر است. راهبرد تخصیص

^۴ Redundancy strategy

^۱ Active redundancy strategy

^۲ Standby redundancy strategy

^۳ Mixed redundancy strategy

مختلط از مزایای هر دو راهبرد قبلی استفاده می‌کند و سعی می‌کند توازنی بین این دو ایجاد نماید. در اکثر مقالات ارائه شده در این زمینه، فرض می‌گردد که راهبرد تخصیص اجزای مازاد به صورت مشخص و از قبل تعیین شده است. برای واقعی تر شدن مسئله تخصیص افزونگی می‌توان از همه راهبردهای تخصیص به طور هم‌زمان در یک سیستم مشخص استفاده کرد.

برای محاسبه قابلیت اطمینان هر زیرسیستم در مسئله تخصیص افزونگی نیاز به دانستن توزیع طول عمر قطعات تخصیص داده شده به آن‌ها است؛ اما در این مقاله فرض می‌شود که فقط داده‌های مربوط به طول عمر این قطعات در دست است. لذا بایستی این داده‌ها را به توزیع طول عمر تبدیل نمود. برای این کار از آزمون‌های نیکویی برازش استفاده می‌کنیم.

آزمون‌های نیکویی برازش^۱ در قالب یک آزمون فرض مطرح می‌شوند که فرض صفر، یعنی فرضی که قرار است در مورد پذیرش یا رد آن تصمیم گرفته شود به این صورت تعریف می‌شود که داده‌های یک سری زمانی از یک توزیع خاص مفروض پیروی می‌کنند. فرض یک یعنی فرض مقابل فرض صفر نیز به صورت عدم پیروی داده‌ها از این توزیع تعریف می‌شود. برای انجام یک آزمون فرض یک آماره و یک بازه پذیرش تعریف می‌شود. آماره تابعی از داده‌های در دست است که هیچ پارامتر مجهولی در آن نباشد و با داشتن داده‌ها می‌توان آن را محاسبه کرد. بازه پذیرش نیز بازه‌ای است که اگر آماره داخل آن قرار گیرد، فرض صفر پذیرفته و در غیر این صورت رد می‌شود. در هر آزمون فرض دو نوع خطا وجود دارد. خطای نوع یک به این معناست که فرض صفر درست باشد ولی به اشتباه رد شود و خطای نوع دو به این معناست که فرض صفر اشتباه باشد ولی به اشتباه پذیرفته شود. احتمال خطای نوع یک با α نشان داده می‌شود و مشخص‌کننده بازه پذیرش است.

در این مقاله قابلیت اطمینان رایانه مرکزی یک کاوشگر مورد بررسی قرار می‌گیرد که قصد داریم با تخصیص اجزای مازاد در قالب مسئله تخصیص افزونگی، آن را بهبود دهیم. راهبرد تخصیص اجزای مازاد برای هر زیرسیستم یک متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند فعال، ذخیره یا مختلط باشد. در این مقاله فرض می‌شود توزیع طول عمر قطعات مشخص نیست و فقط داده‌های

^۱ Goodness of fit tests

طول عمر هر قطعه در دست است که بایستی با استفاده از روش های نیکویی برآزش، توزیع مناسب برای طول عمر هر یک اختصاص یابد.

اهمیت و ضرورت تحقیق

از آنجایی که قابلیت اطمینان بسیاری از سیستم‌ها معیاری حیاتی برای طراحی و ارزیابی آن‌ها به شمار می‌رود، افزایش تا حد امکان آن از ضرورت خاصی برخوردار است. سیستم‌های با قابلیت اطمینان پایین سیستم‌های ناکارآمد و ضعیفی به شمار می‌آیند. این مهم خصوصاً در سیستم‌های مربوط به صنایع هوافضا دارای اهمیت زیادی هست؛ بنابراین ضروری است با استفاده از روش های علمی به ارزیابی و بهبود این معیار مهم پرداخته شود.

برای افزایش قابلیت اطمینان یک سیستم بدون تغییر چیدمان زیرسیستم‌های آن لازم است قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها افزایش یابد. یکی از راه‌های افزایش قابلیت اطمینان یک زیرسیستم استفاده از قطعات با قابلیت اطمینان بالاتر است که معمولاً کار دشواری بوده و نیازمند صرف زمان و هزینه زیاد است. یکی دیگر از راه‌های افزایش قابلیت اطمینان استفاده از اجزای مازاد در کنار جزء اصلی است که در صورت خرابی و شکست جزء اصلی از آن‌ها استفاده شود تا از شکست زیرسیستم مربوطه جلوگیری شود. از آنجایی که با توجه به محدودیت‌های موجود، هر تعداد دلخواه اجزاء نمی‌توان به زیرسیستم اضافه کرد، لذا در اینجا مسئله تخصیص افزونگی مطرح می‌شود که در آن هدف، تعیین نوع و تعداد اجزای مازادی است که به هر زیرسیستم تخصیص داده می‌شود، به صورتی که ضمن رعایت محدودیت‌های مسئله قابلیت اطمینان کل سیستم حداکثر شود.

در مسائل تخصیص افزونگی بررسی شده در پژوهش‌های قبلی، معمولاً فرض می‌شود که مشخصات قطعات قابل تخصیص به هر زیرسیستم، از جمله توزیع طول عمر آن‌ها مشخص است و هدف اصلی تعیین نوع و تعداد قطعاتی است که به هر زیرسیستم تخصیص داده شود تا ضمن رعایت محدودیت‌های مسئله، قابلیت اطمینان سیستم حداکثر شود. حال سؤال این است که چنانچه توزیع طول عمر قطعات مشخص نباشد و فقط داده‌هایی از طول عمر آن‌ها که در گذشته استفاده شده‌اند در دست باشد، چگونه می‌توان قابلیت اطمینان سیستم را حداکثر کرد؟ در این مقاله

سعی می‌شود به این سؤال پاسخ داده شود و قابلیت اطمینان رایانه مرکزی یک کاوشگر به‌عنوان مطالعه موردی بررسی شود.

فرضیه موردتحقیق در این مقاله این است که با استفاده از داده‌های مربوط به طول عمر قطعات قابل تخصیص به زیرسیستم‌های یک سیستم می‌توان قابلیت اطمینان آن را با تعیین بهترین ترکیب و تعداد قطعات و نیز راهبرد تخصیص برای هر زیرسیستم تا حد امکان بهبود داد، طوری که محدودیت‌های موجود مانند هزینه، وزن و حجم رعایت شود. به عبارت دیگر در این مقاله ادعا می‌شود که با استفاده از فقط داده‌های مربوط به طول عمر قطعات قابل تخصیص به زیرسیستم‌ها می‌توان قابلیت اطمینان سیستم را بهینه کرد و به مقدار مطلوبی بهبود داد.

پیشینه و ادبیات موضوع

یکی از راه‌های بهبود قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها، تغییر راهبرد تخصیص آن‌ها است. به طوری که می‌توان بدون افزایش هزینه یا وزن، قابلیت اطمینان را بهبود داد. در اکثر مقالات ارائه شده در زمینه مسئله تخصیص افزونگی فرض می‌گردد که راهبرد تخصیص مشخص و از قبل تعیین شده است. این محدودیت ممکن است از افزایش قابلیت اطمینان بعضی زیرسیستم‌ها جلوگیری کند. گاهی اوقات می‌توان با تعیین راهبرد تخصیص بهینه برای هر زیرسیستم، قابلیت اطمینان را بهبود داد. کویت و لئو^۱ (Coit, et al, 2000: 129-142) یک مدل ریاضی برای مسئله تخصیص افزونگی ارائه دادند که راهبردهای تخصیص فعال و ذخیره از قبل برای هر زیرسیستم تعریف شده بود. هدف این پژوهش تعیین ترکیب بهینه قطعات در هر زیرسیستم بود.

کویت (Coit, 2003: 535-543) مدلی را برای مسئله تخصیص مازاد ارائه داد که در آن انتخاب راهبرد تخصیص فعال یا ذخیره برای هر زیرسیستم یک متغیر تصمیم در نظر گرفته شد و مدل باید بهترین راهبرد تخصیص را برای هر زیرسیستم تعیین می‌کرد. پس از آن محققان زیادی راهبرد تخصیص را به‌عنوان یک متغیر تصمیم در نظر گرفتند و مسئله تخصیص افزونگی با فرضیات مختلفی ارائه و با روش‌های گوناگونی حل شد (Tavakkoli-Moghaddam, et al,

^۱ Coit & Liu

556-550 (2008)، (Safari, 2012: 10-20)، (Chambari, et al, 2012: 109-119). پس از آن راهبرد تخصیص مختلط توسعه داده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از این راهبرد می تواند به مقدار نسبتاً زیادی قابلیت اطمینان سیستم را افزایش دهد (Ardakan, et al, 2014: 132-139). در مدل دوهدفه این راهبرد تخصیص نیز با توابع هدف حداکثر سازی قابلیت اطمینان و حداقل سازی هزینه، نشان داده شد که استفاده از این راهبرد تخصیص می تواند باعث بهبود همزمان هر دو هدف شود؛ یعنی ضمن افزایش قابلیت اطمینان سیستم می تواند هزینه نیز کاهش یابد (Ardakan, et al, 2015: 116-128). پس از این، پژوهش های در حوزه مسئله تخصیص افزونگی عمدتاً روی روش یافتن نقطه بهینه متمرکز شده و به ارائه روش های جدید پرداخته اند (Yeh, 2017: 182-197)، (Chang, et al, 2018: 1094-1101)، (Sabri- Mousavi, et al, 2019: 144-162)، (Laghaie, et al, 2019: 1175-1194).

برای ارزیابی این که آیا یک سری داده از توزیع خاصی پیروی می کند یا نه آزمون های نیکویی برازش زیادی تاکنون معرفی شده اند. آزمون کای اسکوئر^۱ قدیمی ترین و معروف ترین آزمون است که توسط پیرسون^۲ (Pearson, 1900: 157-175) معرفی شد. آزمون های مبتنی بر تابع توزیع تجربی بر اساس مقایسه تابع توزیع تجربی و تابع توزیع مفروضی ساخته می شوند. آزمون های مبتنی بر تابع توزیع تجربی را می توان به دودسته تقسیم کرد: ۱- آزمون هایی بر اساس حداکثر اختلاف توابع توزیع تجربی و مفروض (مانند آزمون کلموگوروف-اسمیرنوف^۳) و ۲- آزمون های درجه دوم (مانند آزمون اندرسون-دارلینگ^۴). آزمون کلموگوروف-اسمیرنوف اولین بار توسط کلموگوروف (Kolmogorov, 1933: 83-91) و اسمیرنوف (Smirnov, 1936: 449-452) و آزمون اندرسون-دارلینگ توسط اندرسون و دارلینگ (Anderson, et al, 1954: 765-769) معرفی شد. روش های دیگری نیز برای آزمون نیکویی برازش ارائه شده است که از ذکر آن ها خودداری می کنیم.

^۱ Chi-Square test

^۲ Pearson

^۳ Kolmogorov-Smirnov test

^۴ Anderson-Darling test

روش‌شناسی

برای محاسبه قابلیت اطمینان زیرسیستمی با اجزای هازاد، در راهبرد تخصیص فعال نیاز به دانستن قابلیت اطمینان اجزاء و در راهبردهای ذخیره و مختلط نیاز به دانستن توزیع طول عمر اجزاست. در این مقاله فرض شده تنها داده‌های طول عمر در دست است و باید توزیع مناسبی به هر سری داده نسبت داده شود. برای تعیین توزیع احتمالی مناسب از آزمون‌های نیکویی برازش استفاده می‌شود. معمولاً هیچ توزیع آماری بر داده‌های مشاهده‌شده برازش کامل ندارد و توزیعی که در مقایسه با سایر توزیع‌ها بهترین است انتخاب می‌شود.

آزمون نیکویی برازش

آزمون نیکویی برازش در قالب یک آزمون فرض به صورت قدم‌های زیر انجام می‌شود:

- قدم ۱. مشخص کردن فرض صفر (فرض تناسب داده‌ها با یک تابع توزیع احتمال)
 - قدم ۲. انتخاب آماره و روش آزمون
 - قدم ۳. تعیین مقدار خطای موردقبول و سطح اطمینان آزمون
 - قدم ۴. محاسبه مقدار آمار آزمون بر اساس داده‌های در دست یا با استفاده از نمونه‌گیری
 - قدم ۵. تصمیم‌گیری در موردپذیرش یا رد فرض صفر
- روش و آماره آزمون که در قدم دوم تعیین می‌شود می‌تواند کای اسکور، کلو هوگروف-اسمیرنوف یا اندرسون-دارلینگ یا آزمون‌های دیگر باشد.

بهینه‌سازی قابلیت اطمینان

پس از تعیین توزیع احتمال طول عمر هر قطعه، می‌توان مقدار قابلیت اطمینان آن را در هر لحظه محاسبه کرد. اگر T متغیر تصادفی طول عمر یک قطعه با تابع چگالی احتمال $f_T(t)$ در زمان t باشد، قابلیت اطمینان آن در زمان t به صورت زیر است:

$$r(t) = P\{T \geq t\} = \int_t^{\infty} f_T(u) du = 1 - \int_0^t f_T(u) du \quad (1)$$

قابلیت اطمینان زیرسیستمی با اجزای هازادی که دارای قابلیت اطمینان $r(t)$ در لحظه t هستند، در راهبردهای تخصیص مختلف به صورت زیر به دست می آید:

اگر راهبرد تخصیص به صورت فعال باشد (Fyffe, et al, 1968: 64-69)،

$$R_{i, \text{Active}}(t) = 1 - (1 - r_i(t))^{n_i} \quad (۲)$$

اگر راهبرد تخصیص به صورت ذخیره باشد (Coit, 2001: 471-478)،

$$R_{i, \text{Standby}}(t) = r_i(t) + \sum_{j=1}^{n_i-1} \int_0^t \rho_i(u) r_i(t-u) f_i^{(j)}(u) du \quad (۳)$$

و اگر راهبرد تخصیص به صورت مختلط باشد (Ardakan, et al, 2014: 132-139)،

$$R_{i, \text{Mixed}}(t) = \left(1 - (1 - r_i(t))^{n_{Ai}}\right) + \int_0^t \rho_i(u) r_i(t-u) \times f_i^{\text{Max}, n_{Ai}}(u) du \quad (۴)$$

$$+ \sum_{j=1}^{n_{Ai}-1} \int_0^t \int_{t_1}^t \rho_i(u) r_i(t-u) \times f_i^{(j)}(u-t_1) \times f_i^{\text{Max}, n_{Ai}}(t_1) du dt_1$$

روش حل: الگوریتم ژنتیک

از آنجاکه مسئله تخصیص افزونگی جزء مسائل NP-hard است، باید از روش‌های غیردقیق برای حل آن استفاده کرد. در این مقاله برای حل مسئله معرفی شده از الگوریتم ژنتیک^۱ استفاده شده که به نظر می رسد با توجه به تک‌هدفه بودن مسئله و ساختار گسسته جواب‌ها الگوریتم مناسبی برای حل این مسئله باشد (متغیرهای مسئله نوع و تعداد قطعات فعال و ذخیره زیرسیستم‌هاست که گسسته هستند).

الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم فرا ابتکاری است که برای مسائل بهینه‌سازی ترکیبی به کار گرفته می شود. در این قسمت، یک الگوریتم مناسب برای حل مسئله مورد نظر ارائه می شود. برای این منظور باید بخش‌های این الگوریتم مطابق شرایط و ویژگی‌های مسئله مورد بررسی تعریف شوند. در ادامه تک تک این بخش‌ها توضیح داده می شوند.

۱- رمزگذاری جواب (کروموزوم): در الگوریتم ژنتیک رمز گذاری جواب ها به صورت یک بردار یا ماتریس است. در الگوریتم پیشنهادی، هر جواب با تعداد ۵ زیرسیستم به صورت یک ماتریس 3×5 است که سطر اول تعیین کننده نوع قطعه انتخاب شده و سطرهای دوم و سوم تعداد قطعات فعال و ذخیره هر زیرسیستم است. با توجه به این که تعداد قطعات فعال و ذخیره در هر زیرسیستم راهبرد تخصیص آن را (مطابق جدول ۱) مشخص می‌کند، نیازی به قرار دادن سطری جداگانه برای تعیین راهبرد تخصیص هر زیرسیستم وجود ندارد و در اینجا نیز قرار داده نشده است.

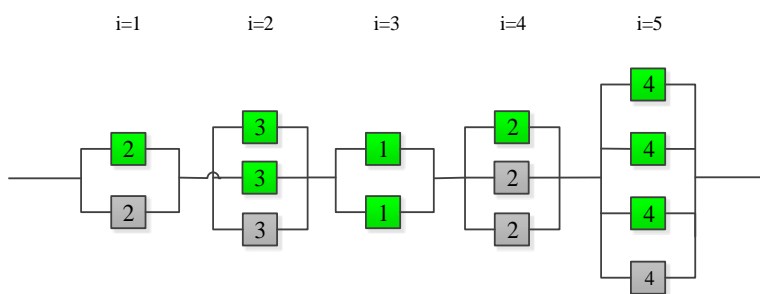
شکل ۱، یک نمونه کروموزوم برای سیستمی با پنج زیرسیستم را نشان می‌دهد. این ماتریس جوابی را نشان می‌دهد که در آن زیرسیستم، ۱ دارای راهبرد تخصیص ذخیره با یک قطعه به صورت فعال و یک قطعه به صورت ذخیره از نوع ۲ است. زیرسیستم ۲ دارای راهبرد تخصیص مختلط با دو قطعه به صورت فعال و یک قطعه به صورت ذخیره از نوع ۳ است و به همین ترتیب زیرسیستم‌های ۳، ۴ و ۵ نیز به ترتیب دارای راهبرد تخصیص فعال، ذخیره و مختلط هستند. شکل ۲ ساختار این جواب را نشان می‌دهد.

جدول ۱. نحوه تعیین راهبرد تخصیص هر زیرسیستم با توجه به تعداد قطعات فعال و ذخیره در آن

تعداد قطعات فعال	تعداد قطعات ذخیره	راهبرد تخصیص نتیجه شده
۱	۰	بدون راهبرد تخصیص
≥ 2	۰	راهبرد تخصیص فعال
۱	≥ 1	راهبرد تخصیص ذخیره
≥ 2	≥ 1	راهبرد تخصیص مختلط

	1	2	3	4	5
<i>components type</i>	2	3	1	2	4
<i>number of active components</i>	1	2	2	1	3
<i>number of standby components</i>	1	1	0	2	1

شکل ۱. نحوه رمزگذاری یک جواب



شکل ۲. ساختار یک جواب

۲- **جمعیت اولیه:** جمعیت اولیه به صورت تصادفی و منطقی با تولید n_{pop} کروموزوم

ایجاد می شود. منظور از منطقی بودن این است که هر کروموزوم شرایط شدنی بودن مسئله را داشته باشد، به عنوان مثال مقدار عنصر سطر اول مربوط به یک زیرسیستم از تعداد نوع قطعه موجود برای آن بیشتر نباشد.

۳- **تابع برازندگی:** تابع برازندگی^۱ برابر مجموع مقدار قابلیت اطمینان سیستم و جریمه

ناشی از تخطی از محدودیتها با علامت منفی (با توجه به این که تابع هدف به صورت حداکثر سازی است) تعریف می شود. این جریمه برای تضمین این است که در جواب نهایی تمام محدودیتها برقرار باشند و از طرفی الگوریتم بتواند در فضای غیرموجه مسئله نیز جستجو انجام دهد که تنوع جوابها را افزایش دهد.

^۱ Fitness function

۴- انتخاب کروموزوم‌های والد: نحوه و در واقع احتمال انتخاب والدین جهت انجام عملگرهای تقاطع و جهش بر اساس میزان تابع برازندگی تعریف می‌شود. به این صورت که هرچه برازندگی یک جواب بیشتر باشد، احتمال انتخاب آن نیز بیشتر است.

۵- عملگر تقاطع: عملگر تقاطع^۱ با نرخ از پیش تعیین شده r_C از جام می‌شود. در عملگر تقاطع دو والد انتخاب شده و از آن‌ها دو فرزند (جواب جدید) تولید خواهد شد. با انجام عملگر تقاطع تعداد $r_C \times npop$ کروموزوم جدید تولید خواهد شد.

۶- عملگر جهش: اصلی‌ترین دلیل استفاده از این عملگر، افزایش تنوع در جواب‌ها و فرار از نقاط بهینه محلی است. عملگر جهش^۲ با نرخ از پیش تعیین شده r_M اعمال می‌شود. برای به‌کاربردن عملگر جهش تعداد $r_M \times p$ کروموزوم به‌عنوان والد انتخاب می‌شوند و مقادیر ژن‌های آن‌ها به‌صورت تصادفی تغییر پیدا می‌کنند.

۷- نحوه تولید نسل بعد: عملگرهای تقاطع و جهش، یک نسل را به نسل بعدی انتقال می‌دهند. برای این منظور، مقدار تابع برازندگی برای $npop$ جواب از نسل قبلی، $r_C \times npop$ فرزند تولید شده از عملگر تقاطع و $r_M \times npop$ فرزند تولید شده از عملگر جهش محاسبه شده و از بین مجموع این جواب‌ها تعداد $npop$ جواب که از لحاظ تابع برازندگی از بقیه بهتر باشند، به‌عنوان نسل جدید انتخاب می‌شوند.

۸- شرط توقف: الگوریتم ژنتیک بعد از تعداد از پیش تعیین شده‌ای از تکرار متوقف می‌شود. این تعداد تکرار الگوریتم با MaxIt نشان داده می‌شود.

یافته‌ها: بهینه‌سازی قابلیت اطمینان رایانه مرکزی یک کاوشگر

در این مقاله به‌عنوان یک مورد واقعی، رایانه مرکزی یک کاوشگر مدنظر قرار گرفته است. اجزای رایانه مرکزی کاوشگر را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت.

^۱ Crossover operator

^۲ Mutation operator

CPU
A/D converter
Digital I/O
Ethernet
Adaptor
Framegrab
Backplane
communication ports

در اینجا رایانه مرکزی کاوشگر یک سیستم و اجزای آن به عنوان زیرسیستم‌ها در نظر گرفته می‌شود که به صورت سری کنار هم قرار گرفته‌اند، یعنی برای کار کردن این سیستم لازم است تمام اعضای آن در حال کار کردن باشند. برای بهبود قابلیت اطمینان این سیستم می‌توان در کنار جزء اصلی زیرسیستم‌ها اجزای مازاد تخصیص داد. برای هر زیرسیستم ممکن است چند نوع قطعه قابل انتخاب باشد، اما در هر زیرسیستم فقط یک نوع تخصیص داده می‌شود. برای محاسبه قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها لازم است توزیع طول عمر اجزاء را بدانیم. از آنجایی که داده‌های در دست، داده‌های مربوط به طول عمر قطعات است، لازم است با روش‌های نیکویی برازش، توزیع احتمال مناسبی برای هر کدام برازش داده شود. در اینجا از آزمون‌های کای اسکوئر، کلوموگروف-اسمیرنوف و اندرسون-دارلینگ استفاده می‌شود. داده‌های مربوط به هزینه، وزن و حجم قطعات در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲. هزینه، وزن و حجم قطعات مثال عددی

نام قطعه	نوع ۱			نوع ۲			نوع ۳			نوع ۴		
	حجم	وزن	هزینه	حجم	وزن	هزینه	حجم	وزن	هزینه	حجم	وزن	هزینه
CPU	۷۰	۱۸۰	۳۰	۸۰	۱۸۰	۱۰۰	۷۰	۱۷۰	۸۰	۶۰	۱۷۰	۶۰
A/D converter	۹۰	۸۰	۲۸۰	۱۰۰	۹۰	۲۰۰	۹۰	۷۰	۲۲۰			
Digital I/O	۹۰	۱۴۰	۸۰	۷۰	۱۱۰	۵۰	۸۰	۱۲۰	۶۰			
Ethernet	۴۰	۱۰۰	۱۳۰	۶۰	۱۱۰	۱۰۰	۵۰	۱۲۰	۱۵۰	۶۰	۱۲۰	۱۲۰
Adaptor	۱۱۰	۱۳۰	۱۵	۱۰۰	۱۳۰	۲۰						
Framegrab	۵۰	۲۶۰	۷۵۰	۶۰	۲۸۰	۸۵۰	۷۰	۲۷۰	۷۰۰			
Backplane	۵۰	۲۳۰	۷۰	۵۰	۲۵۰	۸۰	۵۰	۲۰۰	۶۰			
Ports	۹۰	۱۳۰	۴۰	۸۰	۱۲۰	۳۰	۹۰	۱۲۰	۲۰			

از آنجاکه توزیع‌های نمایی و ارلنگ توزیع‌های مناسبی برای طول عمر بسیاری از قطعات هستند، ابتدا بررسی می‌شود که آیا می‌توان این توزیع‌ها را بر داده‌های طول عمر برازش داد یا خیر. اگر این توزیع‌ها برازش خوبی برای داده‌ها نباشند، توزیع‌های دیگر را ارزیابی می‌کنیم. به این منظور ابتدا داده‌ها را با آزمون‌های کای اسکوتر، کلو هوگروف-سمیرنوف و اندرسون-دارلینگ جهت برازش با توزیع ارلنگ ارزیابی می‌کنیم. در تمام این آزمون‌ها سطح معناداری ۰.۰۲ در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده از این آزمون‌ها به همراه پارامترهای تخمین زده شده برای توزیع ارلنگ در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع ارلنگ برای تمام داده‌ها توزیع مناسبی است. فقط در یک مورد (قطعه مربوط به ردیف

۲۲ ام جدول ۳) طبق آزمون اندرسون-دارلینگ برازش توزیع ارلنگ با داده‌ها رد می‌شود که در این مورد طبق دو آزمون دیگر این برازش رد نشده است؛ بنابراین با کمی چشم‌پوشی می‌توان در این مورد نیز توزیع ارلنگ را به‌عنوان توزیع مناسبی برای داده‌ها پذیرفت.

جدول ۳. نتایج آزمون‌های نیکویی برازش برای توزیع طول عمر قطعات

پارامترهای توزیع			آزمون اندرسون-دارلینگ			آزمون کلموگروف-اسمیرنوف			آزمون کای اسکوئر			
پارامتر λ توزیع $(\lambda=1/\beta)$	پارامتر β توزیع	پارامتر k توزیع	فرض صفر رد شود؟	مقدار بحرانی	مقدار آماره	فرض صفر رد شود؟	مقدار بحرانی	مقدار آماره	فرض صفر رد شود؟	مقدار بحرانی	مقدار آماره	قطعه
۰.۰۰۹۵۸	۱۰۴.۳۳	۶	خیر	۳.۲۸۹۲	۰.۷۱۹۱۳	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۵۵۹۱	خیر	۹.۸۳۷۴	۰.۴۷۱۲۶	CPU #1
۰.۰۰۴۹۴	۲۰۲.۲۶	۳	خیر	۳.۲۸۹۲	۰.۳۸۴۷۹	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۹۹۰۷	خیر	۱۱.۶۶۸	۰.۸۵۴۶۲	CPU #2
۰.۰۰۷۷۴	۱۲۹.۲۵	۴	خیر	۳.۲۸۹۲	۰.۷۹۵۷۹	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۶۰۱۶	خیر	۷.۸۲۴	۰.۵۶۶۴۸	CPU #3
۰.۰۰۵۵۴	۱۷۱.۱۴	۲	خیر	۳.۲۸۹۲	۰.۳۲۴۹۱	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۱۸۱۶	خیر	۹.۸۳۷۴	۰.۲۲۹۸۱	CPU #4
۰.۰۰۹۶۶	۱۰۳.۵	۷	خیر	۳.۲۸۹۲	۰.۶۶۳۱۵	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۶۲۶۳	خیر	۹.۸۳۷۴	۰.۳۱۰۶۳	A/D converter #1
۰.۰۰۹۱۶	۱۰۹.۱۲	۵	خیر	۳.۲۸۹۲	۰.۵۶۷۷	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۴۴۲۲	خیر	۹.۸۳۷۴	۳.۰۵۸۳	A/D converter #2
۰.۰۰۵۳۳	۱۸۷.۷۷	۳	خیر	۳.۲۸۹۲	۰.۷۱۴۰۳	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۶۸۹۱	خیر	۷.۸۲۴	۲.۶۳۰۲	A/D converter #3
۰.۰۰۵۳۳	۱۸۶.۸۱	۴	خیر	۳.۲۸۹۲	۱.۲۱۲۲	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۷۵۵۵	خیر	۹.۸۳۷۴	۱.۵۲۱۱	Digital I/O #1
۰.۰۰۶۸۰	۱۴۷.۰۹	۲	خیر	۳.۲۸۹۲	۱.۱۵۴۶	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۵۷۹۶	خیر	۹.۸۳۷۴	۱.۶۸۷۱	Digital I/O #2
۰.۰۰۶۳۶	۱۵۷.۱۵	۳	خیر	۳.۲۸۹۲	۰.۹۱۷۳	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۴۵۲۴	خیر	۷.۸۲۴	۱.۲۲۳۴	Digital I/O #3
۰.۰۰۳۶۶	۲۵۹.۲۳	۲	خیر	۳.۲۸۹۲	۱.۶۹۸۲	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۹۲۶۱	خیر	۹.۸۳۷۴	۲.۶۳۸	Ethernet #1
۰.۰۰۶۶۱	۱۵۱.۲۵	۶	خیر	۳.۲۸۹۲	۰.۶۱۷۵۱	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۴۷۹۷	خیر	۹.۸۳۷۴	۰.۸۱۲۲۱	Ethernet #2
۰.۰۰۴۷۴	۲۱۰.۹۳	۲	خیر	۳.۲۸۹۲	۲.۲۵۱۷	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۲۳۳۹۸	خیر	۹.۸۳۷۴	۲.۹۷۲۹	Ethernet #3
۰.۰۰۴۳۸	۲۲۸.۲۶	۳	خیر	۳.۲۸۹۲	۰.۴۵۶۸۵	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۰۹۶۷۲	خیر	۹.۸۳۷۴	۰.۸۰۴۷۵	Ethernet #4

۰.۰۰۷۵۵	۱۳۲.۵۱	۵	خیر	۳.۲۸۹۲	۲.۱۸۳۶	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۲۰۴۹۴	خیر	۹.۸۳۷۴	۳.۶۶۳۶	Adaptor #1
۰.۰۰۵۵۸	۱۷۹.۲۵	۳	خیر	۳.۲۸۹۲	۰.۶۲۵۴۴	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۳۳۹۱	خیر	۹.۸۳۷۴	۰.۲۳۱۸۱	Adaptor #2
۰.۰۰۴۹۵	۲۰۲.۰۵	۲	خیر	۳.۲۸۹۲	۱.۹۵۱۱	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۲۲۵۹۹	خیر	۹.۸۳۷۴	۳.۰۳۶۸	Framegrab #1
۰.۰۰۷۳۶	۱۳۵.۸۵	۴	خیر	۳.۲۸۹۲	۲.۲۵۹۱	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۸۷۱۶	خیر	۹.۸۳۷۴	۳.۴۷۹۹	Framegrab #2
۰.۰۰۶۹۹	۱۴۳.۰۵	۳	خیر	۳.۲۸۹۲	۲.۲۱۶۱	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۲۰۳۶۷	خیر	۷.۸۲۴	۱.۷۳۶۶	Framegrab #3
۰.۰۰۰۰۱	۷۹۱.۵۰	۱	خیر	۳.۲۸۹۲	۱.۸۰۸	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۹۵۵۵	خیر	۹.۸۳۷۴	۱.۹۷۰۱	Backplane #1
۰.۰۰۱۰۱	۹۹۰.۵۶	۴	خیر	۳.۲۸۹۲	۱.۰۸۱۳	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۶۰۴۴	خیر	۹.۸۳۷۴	۲.۱۴۸۸	Backplane #2
۰.۰۰۰۲۵	۳۹۵۳.۴	۱	بله	۳.۲۸۹۲	۴.۳۳۰۹	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۲۶۷۶۴	خیر	۷.۸۲۴	۴.۱۶۸۹	Backplane #3
۰.۰۰۶۴۰	۱۵۶.۳۷	۳	خیر	۳.۲۸۹۲	۱.۸۹۱۴	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۲۲۴۷۶	خیر	۹.۸۳۷۴	۲.۷۵۷۸	Ports #1
۰.۰۰۵۰۴	۱۹۸.۳	۳	خیر	۳.۲۸۹۲	۰.۴۹۹۸	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۰۹۵۳	خیر	۷.۸۲۴	۰.۷۴۰۶۶	Ports #2
۰.۰۰۶۲۹	۱۵۹.۰۹	۴	خیر	۳.۲۸۹۲	۱.۱۷۳۹	خیر	۰.۲۷۰۲۳	۰.۱۵۱۶۱	خیر	۹.۸۳۷۴	۶.۸۱۳	Ports #3

اکنون می‌توان قابلیت اطمینان هر قطعه و زیرسیستم را محاسبه نمود. زمان مأموریت یعنی زمانی که نیاز دارد تا آن لحظه سیستم کار کند، برابر $t=500$ در نظر گرفته شده است. مقدار قابلیت اطمینان قطعات در زمان مأموریت در جدول ۴ داده شده است. در صورتی که هیچ قطعه‌ای به زیرسیستم‌ها تخصیص داده نشود و در هر زیرسیستم یک قطعه (قطعه با بالاترین قابلیت اطمینان) استفاده شود، قابلیت اطمینان سیستم برابر ۰.۰۶۷۱ خواهد بود که مقدار بسیار کمی است و تقریباً می‌توان گفت این سیستم نمی‌تواند تا زمان خواسته شده سالم بماند. در نتیجه استفاده از چنین سیستمی به هیچ‌عنوان توصیه نمی‌شود. در این حالت هزینه، وزن و حجم سیستم به ترتیب برابر ۱۴۵۵ ، ۱۲۹۰ و ۶۲۰ خواهد بود.

جدول ۴. قابلیت اطمینان اجزای قابل تخصیص در زمان مأموریت

نام قطعه	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳	نوع ۴
CPU	۰.۶۵۲۸	۰.۵۵۱۵	۰.۴۵۹۳	۰.۲۱۱۴
A/D converter	۰.۷۸۶۶	۰.۵۱۷۰	۰.۵۰۲۲	
Digital I/O	۰.۷۱۹۶	۰.۱۴۶۸	۰.۳۸۴۱	
Ethernet	۰.۴۲۵۳	۰.۸۸۲۳	۰.۳۱۵۰	۰.۶۲۵۴
Adaptor	۰.۶۷۲۷	۰.۴۷۱۸		
Framegrab	۰.۲۹۲۵	۰.۴۹۸۳	۰.۳۲۱۸	
Backplane	۰.۹۹۳۷	۰.۹۹۸۲	۰.۸۸۱۲	
Ports	۰.۳۷۹۹	۰.۲۸۳۲	۰.۶۱۴۸	

در این مقاله فرض بر این است که راهبرد تخصیص قطعات برای هر زیرسیستم به عنوان یک متغیر تصمیم در نظر گرفته می شود که می تواند فعال، ذخیره یا مختلط باشد. حداکثر مقدار هزینه، وزن و حجم در نظر گرفته شده برای کل سیستم به ترتیب ۳۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۱۷۰۰ است. به عبارت دیگر مسئله مورد بررسی ما دارای سه محدودیت است. هدف مسئله این است که نوع و تعداد قطعات تخصیص داده شده و نیز راهبرد تخصیص هر زیرسیستم به صورتی مشخص شود که با رعایت محدودیت های مسئله قابلیت اطمینان کل سیستم در زمان مأموریت حداکثر شود. در زیرسیستم هایی که از راهبرد تخصیص ذخیره یا مختلط استفاده می کنند نیاز به یک سیستم سوئیچ است. در این مسئله هزینه و وزن سوئیچ ها ناچیز و مقدار قابلیت اطمینان آن ها در زمان مأموریت برابر ۰.۹۹ فرض می شود. با اجرای الگوریتم ژنتیک معرفی شده روی مسئله مورد نظر، جواب بهینه به دست آمده است که جزئیات آن به صورت جدول ۵ است.

مشاهده می شود با تخصیص اجزای مازاد، قابلیت اطمینان سیستم به مقدار ۰.۹۴۵۸ بهبود پیدا کرده است که افزایش چشم گیری نسبت به حالت بدون قطعات مازاد به شمار می آید. در این حالت هزینه، وزن و حجم سیستم به ترتیب برابر ۲۹۷۵ و ۲۹۰۰ و ۱۱۵۰ است. مشاهده

می‌شود که قابلیت اطمینان سیستم بیش از ۱۴ برابر افزایش یافته است، درحالی‌که هزینه، وزن و حجم آن کمتر از ۳ برابر افزایش داشته‌اند. با تخصیص اجزای مازاد، احتمال کار نکردن سیستم تا زمان مأموریت کمتر از ۶ درصد است که تقریباً می‌توان گفت این سیستم تا زمان مأموریت به کار خود ادامه خواهد داد.

جدول ۵. جزئیات جواب بهینه به دست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک

نام قطعه	نوع قطعه تخصیص داده شده	تعداد قطعات فعال	تعداد قطعات ذخیره	راهبرد تخصیص	قابلیت اطمینان زیرسیستم
CPU	۱	۱	۲	ذخیره	۰.۹۹۶۵
A/D converter	۱	۱	۱	ذخیره	۰.۹۹۷۴
Digital I/O	۱	۲	۱	مختلط	۰.۹۹۸۷
Ethernet	۲	۱	۱	ذخیره	۰.۹۹۸۵
Adaptor	۱	۲	۱	مختلط	۰.۹۹۸۵
Framegrab	۲	۱	۱	ذخیره	۰.۹۶۱۰
Backplane	۲	۱	۰	فعال	۰.۹۹۸۲
Ports	۳	۲	۱	مختلط	۰.۹۹۶۷
			۰.۹۴۵۸	قابلیت اطمینان سیستم	
			۲۹۷۵	هزینه سیستم	
			۲۹۰۰	وزن سیستم	
			۱۵۵۰	حجم سیستم	

نتیجه گیری

قابلیت اطمینان یک سیستم خصوصاً در مواردی که هزینه خرابی آن بالا بوده و یا دسترسی لازم به تعمیر آن وجود ندارد، معیاری بسیار مهم به شمار می‌رود. یکی از این موارد سیستم‌های مربوط به صنایع هوافضا مانند کاوشگرها، ماهواره‌ها و هواپیماهای بدون سرنشین می‌باشد. بهبود قابلیت اطمینان در چنین سیستم‌هایی امری ضروری و مهم است که باید به آن توجه خاصی شود.

در این مقاله بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم‌ها از طریق تخصیص اجزای مازاد بررسی شد. در اینجا برخلاف پژوهش‌های قبلی نیازی به دانستن جزئیات کامل طول عمر و قابلیت اطمینان قطعات سیستم نیست و با در دست داشتن اطلاعاتی از میزان طول عمر آن‌ها می‌توان بهینه‌سازی قابلیت اطمینان را انجام داد که نشان‌دهنده مزیت پژوهش حاضر است. هدف مسئله تعیین نوع و تعداد قطعات و نیز راهبرد تخصیص هر زیرسیستم است به طوری که با رعایت محدودیت‌های مسئله، قابلیت اطمینان کل سیستم حداکثر شود. در این مقاله به منظور تعیین توزیع احتمال طول عمر قطعات جهت محاسبه قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها از روش‌های نیکویی برازش استفاده شد. الگوریتم ژنتیک به عنوان روش حل برای به دست آوردن جواب بهینه ارائه شد. پس از آن رایانه مرکزی یک کاوشگر فضایی به عنوان مطالعه موردی بررسی شد. همان‌طور که نتایج عددی نشان داد در صورت عدم تخصیص هیچ قطعه مازادی قابلیت اطمینان سیستم در زمان مأموریت حداکثر می‌تواند برابر ۰.۰۶۷۱ باشد که مقدار بسیار پایینی بوده و به هیچ‌عنوان نمی‌توان از چنین سیستمی انتظار کار کردن تا زمان مأموریت را داشت؛ اما با تخصیص اجزای مازاد قابلیت اطمینان سیستم به مقدار ۰.۹۴۵۸ افزایش یافت که مقدار مطلوبی است و با اطمینان بالایی می‌توان گفت این سیستم تا زمان مأموریت به کار خود ادامه می‌دهد. با تخصیص اجزای مازاد هزینه، وزن و حجم سیستم از مقادیر به ترتیب ۱۴۵۵، ۱۲۹۰ و ۶۲۰ به مقادیر به ترتیب ۲۹۷۵ و ۲۹۰۰ و ۱۵۵۰ افزایش یافت؛ یعنی با افزایش کمتر از ۳ برابری هزینه، وزن و حجم سیستم می‌توان قابلیت اطمینان آن را بیش از ۱۴ برابر بهبود داد که منطقی و قابل توجه به نظر می‌رسد.

پیشنهادها

برای ادامه کار می‌توان بهینه‌سازی قابلیت دسترسی را که برای قطعات تعمیر پذیر تعریف می‌شود مورد بررسی قرارداد و همچنین امکان استفاده از قطعات غیر یکسان به صورت هم‌زمان در هر زیرسیستم، در نظر گرفتن حالت های گرم و داغ برای راه‌برد تخصیص آماده به کار، بررسی سیستم‌های چندحالت به جای دو حالت، بررسی سیستم‌های دیگر جهت مطالعه موردی و بررسی مسئله بهینه‌سازی قابلیت اطمینان با توابع هدف دیگر می‌تواند به عنوان زمینه‌های دیگر برای پیشنهاد های آتی توصیه شود.

منابع

- Anderson, T. W., & Darling, D. A. (1954). A test of goodness of fit. *Journal of the American statistical association*, 49(268), 765-769.
- Ardakan, M. A., & Hamadani, A. Z. (2014). Reliability optimization of series-parallel systems with mixed redundancy strategy in subsystems. *Reliability Engineering & System Safety*, 130, 132-139.
- Ardakan, M. A., Hamadani, A. Z., & Alinaghian, M. (2015). Optimizing bi-objective redundancy allocation problem with a mixed redundancy strategy. *ISA transactions*, 55, 116-128.
- Chambari, A., Rahmati, S. H. A., & Najafi, A. A. (2012). A bi-objective model to optimize reliability and cost of system with a choice of redundancy strategies. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 109-119.
- Chang, K. H., & Kuo, P. Y. (2018). An efficient simulation optimization method for the generalized redundancy allocation problem. *European Journal of Operational Research*, 265(3), 1094-1101.
- Coit, D. W. (2001). Cold-standby redundancy optimization for nonrepairable systems. *Iie Transactions*, 33(6), 471-478.
- Coit, D. W. (2003). Maximization of system reliability with a choice of redundancy strategies. *IIE transactions*, 35(6), 535-543.

- Coit, D. W., & Liu, J. C. (2000). System reliability optimization with k-out-of-n subsystems. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 7(02), 129-142.
- Essadqi, M., Idrissi, A., & Amarir, A. (2018). An Effective Oriented Genetic Algorithm for solving redundancy allocation problem in multi-state power systems. *Procedia Computer Science*, 127, 170-179.
- Fyffe, D. E., Hines, W. W., & Lee, N. K. (1968). System reliability allocation and a computational algorithm. *IEEE Transactions on Reliability*, 17(2), 64-69.
- Kolmogorov, A. N. (1933), Sulla Determinazione Empirica di una legge di Distribuzione. *Giornale dell'Intituto Italiano degli Attuari*, 4, 83-91.
- Mousavi, S. M., Alikar, N., Tavana, M., & Di Caprio, D. (2019). An improved particle swarm optimization model for solving homogeneous discounted series-parallel redundancy allocation problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(3), 1175-1194.
- Pearson, K. (1900). X. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 50(302), 157-175.
- Sabri-Laghaie, K., & Karimi-Nasab, M. (2019). Random search algorithms for redundancy allocation problem of a queuing system with maintenance considerations. *Reliability Engineering & System Safety*, 185, 144-162.
- Safari, J. (2012). Multi-objective reliability optimization of series-parallel systems with a choice of redundancy strategies. *Reliability Engineering & System Safety*, 108, 10-20.
- Smirnov, N. V. (1936). Sui la distribution de w^2 (Criterium de MRv Mises). *Comptes Rendus (Paris)*, 202, 449-452.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Safari, J., & Sassani, F. (2008). Reliability optimization of series-parallel systems with a choice of redundancy strategies using a genetic algorithm. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(4), 550-556.
- Yeh, W. C. (2017). A new exact solution algorithm for a novel generalized redundancy allocation problem. *Information Sciences*, 408, 182-197.

