

## ارائه‌ی راهبرد جدید برای تخصیص قطعات مازاد در مسئله‌ی بهینه‌سازی قابلیت اطمینان

عبدانصابر بیروی (دانش آموخته کارشناسی ارشد)

مهدی کرباسیان\* (دانشیار)

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

مصطفی ابویی اردکان (استادیار)

گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی تهران

یکی از روش‌های رایج در بهینه‌سازی قابلیت اطمینان، استفاده از اجزای مازاد موازی در زیرسیستم‌هاست. این مسئله که با عنوان مسئله‌ی تخصیص اجزای مازاد شناخته می‌شود، شامل انتخاب اجزای مازاد به منظور بهینه‌کردن قابلیت اطمینان سیستم با توجه به محدودیت‌های از پیش تعیین شده‌ی نظیر هزینه، وزن و حجم سیستم است. به تازگی راهبرد جدیدی با عنوان راهبرد مختلط ارائه شده است. در این مقاله حالت کلی‌تری از راهبرد مختلط با عنوان راهبرد مختلط - هم‌زمان پیشنهاد شده است. راهبرد پیشنهادی تعمیمی از راهبرد مختلط است که تلاش می‌کند تعداد دفعات استفاده از سویچ را کاهش دهد و در نتیجه قابلیت اطمینان را بهبود بخشد. به منظور ارزیابی راهبرد جدید و مقایسه‌ی آن با راهبردهای پیشین و با توجه به پیچیدگی فرمول‌های راهبرد جدید، یک زیرسیستم با پنج قطعه در نظر گرفته شده و قابلیت اطمینان آن با استفاده از راهبردهای متفاوت بررسی و با راهبرد پیشنهادی مقایسه شده است.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی قابلیت اطمینان، تخصیص اجزای مازاد، راهبرد مختلط - هم‌زمان، انتخاب راهبرد.

### ۱. مقدمه

بزرگ یا با اضافه شدن فرض‌های جدید و پیچیدگی بیشتر مسئله دشوارتر خواهد شد.

در مسائل RAP، بهبود قابلیت اطمینان سیستم از طریق اضافه کردن قطعات موازی به زیرسیستم‌های یک سیستم اصلی رخ می‌دهد. در این مسئله، نحوه‌ی استفاده یا ورود قطعات مازاد به زیرسیستم در میزان قابلیت اطمینان زیر سیستم و به تبع آن در قابلیت اطمینان کل سیستم اثرگذار است. نحوه‌ی استفاده از قطعات مازاد را راهبرد قطعات مازاد<sup>[۱]</sup> می‌نامند. <sup>[۲]</sup> به طور سنتی دو راهبرد کلی برای قطعات مازاد وجود دارد که به ترتیب عبارت‌اند از راهبردهای قطعات فعال<sup>۳</sup> و قطعات ذخیره<sup>۴</sup>. پژوهشگران زیادی به بررسی و مقایسه‌ی عملکرد این راهبردها در شرایط مختلف و ساختارهای مختلف پرداخته‌اند. به تازگی در سال ۲۰۱۴، یک راهبرد جدید با عنوان راهبرد مختلط<sup>۵</sup> ارائه شده است که کارایی بسیار بالایی در بهبود قابلیت اطمینان داشته است.<sup>[۵]</sup> راهبرد مختلط در حالت خاص خود هر دو راهبرد فعال و ذخیره را نیز پوشش می‌دهد؛ بنابراین استفاده از این راهبرد نسبت به دو راهبرد دیگر در اولویت قرار دارد. زیرا هر زمان که لازم باشد خود به راهبردهای فعال و ذخیره تبدیل می‌شود.

قابلیت اطمینان یک ویژگی الزامی و مهم قطعات، سیستم‌ها و محصولات است. امروزه با پیشرفت فناوری و پیچیده‌تر شدن سیستم‌ها، مفهوم قابلیت اطمینان و بهینه‌سازی آن به طور گسترده‌ی توسط محققان بررسی شده است. کاربرد این مفهوم در جهان واقعی را می‌توان در بسیاری از سیستم‌های صنعتی همچون سیستم‌های ارتباطات، سیستم‌های الکتربکی، کاوشگرهای فضایی و سیستم‌های ماهواره‌ی یافت.<sup>[۱]</sup> چهار روش کلی برای بهبود قابلیت اطمینان یک سیستم وجود دارد که عبارت‌اند از: الف) افزایش قابلیت اطمینان قطعات؛ ب) استفاده از قطعات مازاد موازی در سیستم؛ ج) ترکیب افزایش قابلیت اطمینان قطعات و استفاده از قطعات مازاد؛ د) باز طراحی سیستم.<sup>[۲]</sup> روش دوم که به مسئله‌ی تخصیص اجزای مازاد (RAP) معروف است، به علت داشتن حوزه‌ی وسیع‌تر و کاربردی‌تر بیش از سایر موارد به کار برده می‌شود. همچنین ثابت شده است که مسائل RAP در دسته مسائل NP-Hard قرار دارند.<sup>[۳]</sup> بنابراین حل این مسائل به خصوص در ابعاد

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۳/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۶/۷/۱۰، پذیرش ۱۳۹۶/۷/۱۸.

DOI:10.24200/J65.2019.7222.1763

در مسئله‌ی RRAP که مسئله‌ی به مراتب سخت‌تر از RAP است، نیز تست شده است و نتایج برتری کامل راهبرد ذخیره را در تمام مسائل الگو نسبت به راهبردهای قبلی نشان می‌دهند.<sup>[۲۵]</sup>

با همه‌ی این مزیت‌ها، به نظر می‌رسد که راهبرد جدید مختلط دارای ضعفی است که همان استفاده از سویچ است. این اشکال در راهبرد ذخیره نیز وجود دارد. از آنجا که سویچ‌ها ایده‌آل نیستند و احتمال خرابی آنها وجود دارد، به هر میزان که بتوان استفاده از سیستم سویچ را کاهش داد می‌توان بر میزان قابلیت اطمینان سیستم افزود. در این مقاله، یک راهبرد تعمیم یافته از راهبرد مختلط ارائه می‌شود که به استفاده‌ی کمتری از سویچ نیاز است. این راهبرد با عنوان راهبرد مختلط هم‌زمان<sup>۶</sup> نام‌گذاری شده است. در این راهبرد همانند راهبرد مختلط تعداد قطعات فعال و آماده به کار در هر زیر سیستم به صورت یک متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. تفاوت این راهبرد با راهبرد مختلط در نحوه‌ی وارد شدن قطعات ذخیره بعد از خرابی آخرین قطعه‌ی فعال است.

## ۲. راهبرد مختلط هم‌زمان

در راهبرد مختلط، در هر زیرسیستم بعد از خرابی آخرین قطعه‌ی فعال قطعات ذخیره یک به یک فعال می‌شوند، اما در راهبرد جدید بعد از خرابی آخرین قطعه‌ی فعال، چند قطعه به طور هم‌زمان فعال و وارد سیستم می‌شوند و به طور هم‌زمان شروع به کار خواهند کرد. شکل ۱، تفاوت دو راهبرد مختلط و مختلط - هم‌زمان را نمایش می‌دهد. در شکل ۱، یک زیرسیستم با چهار قطعه متشکل از دو قطعه‌ی فعال و دو قطعه‌ی ذخیره در نظر گرفته شده است. در شکل ۱- الف که راهبرد مختلط را نمایش می‌دهد، بعد از خرابی آخرین قطعه‌ی فعال، قطعات ذخیره به صورت یک به یک و بعد از خرابی قطعه‌ی فعال وارد سیستم می‌شوند. در شکل ۱- ب که راهبرد جدید را نشان می‌دهد، بعد از این‌که آخرین قطعه‌ی فعال در زیرسیستم خراب شد، هر دو قطعه‌ی ذخیره با هم وارد سیستم می‌شوند. مزیت اصلی این راهبرد این است که تعداد دفعات استفاده از سویچ به مراتب کمتر از راهبرد مختلط است. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است تعداد دفعات استفاده از سویچ در راهبرد مختلط دو مرتبه و تعداد دفعات استفاده از سویچ در راهبرد جدید یک مرتبه است.

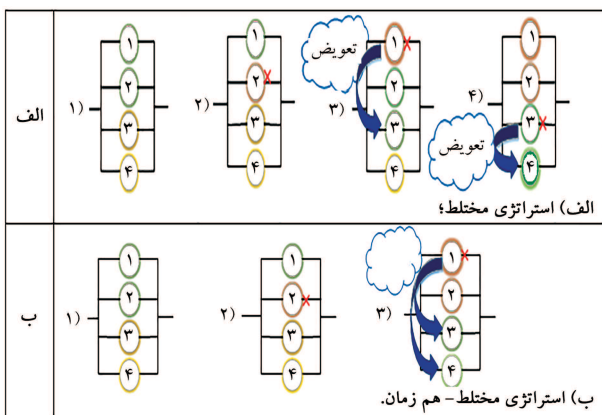
در راهبردهای آماده به کار، مختلط و راهبرد جدید پیشنهادی همان‌طور که گفته شد برای اضافه کردن قطعات مازاد به سیستم سوئیچینگ نیاز است. به طور کلی دو نوع سناریو برای عملکرد سیستم سوئیچینگ در زمان کارکرد سیستم در نظر

مسائل بهینه‌سازی قابلیت اطمینان، بیشتر با در نظر گرفتن راهبرد فعال مدل‌سازی شده‌اند. برای حل این دسته مسائل روش‌های مختلفی همچون روش‌های بهینه‌سازی دقیق از جمله برنامه‌ریزی پویا<sup>[۷،۶]</sup>، برنامه‌ریزی عدد صحیح<sup>[۸]</sup>، ضرایب لاگرانژ<sup>[۹]</sup> و انواع متفاوتی از الگوریتم‌های فراابتکاری همانند الگوریتم ژنتیک<sup>[۱۱،۱۰]</sup>، کلونی مورچه‌ها<sup>[۱۲-۱۳]</sup>، جستجوی ممنوعه<sup>[۱۵]</sup>، الگوریتم انبوه ذرات<sup>[۱۶]</sup> و شبیه‌سازی تبرید<sup>[۱۷]</sup> به کار برده شده است.

راهبرد ذخیره یا آماده به کار خود دارای سه حالت متفاوت با نام‌های ذخیره-سرد، ذخیره-گرم و ذخیره-داغ است. در حالت ذخیره-سرد، قطعات از تنش‌های ناشی از عملکرد سیستم در امان هستند و در هنگام عدم کاربرد قطعه آسیبی به آن وارد نمی‌شود. در حالت ذخیره-گرم امکان تأثیرگذاری این تنش‌ها بر روی قطعات ذخیره وجود دارد و در حالت ذخیره-داغ خراب شدن قطعه ربطی به در حال کار بودن یا نبودن قطعه ندارد و امکان خرابی قطعات در هر لحظه با نرخ یکسان وجود دارد.<sup>[۱۸]</sup> در این مقاله هر جا از قطعات ذخیره نام برده می‌شود منظور حالت ذخیره-سرد است. در راهبرد ذخیره یک قطعه (قطعه‌ی اصلی) به صورت فعال کار می‌کند و سایر قطعات به صورت ذخیره در سیستم قرار می‌گیرند. قطعات ذخیره به هنگام خرابی قطعه فعال و بر اساس یک اولویت از قبل تعیین شده به ترتیب وارد سیستم می‌شوند. در این نوع راهبرد، به هنگام خرابی یک قطعه‌ی فعال، یک سوئیچ الکترونیکی یا مکانیکی قطعه‌ی ذخیره‌ی بعدی را وارد مدار می‌کند. درباره‌ی راهبرد ذخیره-سرد در مقایسه با راهبرد فعال مطالعات کمتری صورت گرفته است. رابینسون و همکاران<sup>[۱۹]</sup> بر روی این راهبرد با در نظر گرفتن قطعات غیرقابل تعمیر مطالعاتی را انجام دادند. درباره‌ی مسئله‌ی سری-موازی، کویت<sup>[۷]</sup> مسئله‌ی RAP را با در نظر گرفتن راهبرد ذخیره-سرد برای کل سیستم و استفاده از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح مطالعه کرده است. همچنین ابویی و همدانی<sup>[۲۰]</sup> با در نظر گرفتن همین راهبرد برای حل مسئله‌ی تخصیص قابلیت افزونگی-تخصیص قابلیت اطمینان (RRAP)، که نوع پیچیده‌تری از مسئله‌ی RAP است، از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند.

در اکثر طرح‌ها، به دلیل وجود توابع هدف چندگانه‌ی متضاد محاسبه‌ی قابلیت اطمینان دشوار است. عزیز محمدی و همکاران<sup>[۲۱]</sup> سه هدف شامل بهینه‌سازی قابلیت اطمینان، کمینه‌سازی حجم و کمینه‌سازی هزینه در نظر گرفتند و برای حل آن، یک الگوریتم تلفیقی چند هدفه‌ی جدید بر پایه‌ی الگوریتم‌های رقابتی و ژنتیک پیشنهاد دادند. در دیگر تحقیقات از توابع چند هدفه برای بهینه کردن قابلیت اطمینان و طول عمر<sup>[۲۲]</sup>، قابلیت اطمینان و هزینه‌ی سیستم در یک سیستم سری-موازی استفاده کرده‌اند.<sup>[۲۳]</sup>

در سال ۲۰۱۴، ابویی و همدانی<sup>[۵]</sup> راهبرد جدیدی با نام راهبرد مختلط را برای مسئله‌ی تخصیص قطعات مازاد پیشنهاد دادند. این راهبرد شامل استفاده‌ی هم‌زمان از قطعات فعال و ذخیره برای هر زیرسیستم یک متغیر تصمیم در نظر گرفته شده و پس از خرابی تمام قطعات فعال، قطعات ذخیره یک به یک سوئیچ وارد سیستم می‌شوند. این راهبرد ترکیبی از راهبردهای فعال و ذخیره است و نشان داده شده است که نسبت به راهبردهای قبلی خود (فعال و ذخیره) به مقادیر قابلیت اطمینان بالاتری برای سیستم منجر می‌شود. برای نشان دادن میزان برتری این راهبرد نسبت به راهبردهای قبلی، این راهبرد بر روی یک بنچمارک معروف و در حالت دو هدفه بررسی شده است.<sup>[۲۴]</sup> نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که راهبرد مختلط قادر است مسئله‌ی الگو سری-موازی را با ۱۴ حالت مختلف طراحی کند که در تمام حالت‌ها، میزان قابلیت اطمینان از بهینه‌ی آن در حالت فعال و ذخیره بهتر است. علاوه بر این، این راهبرد

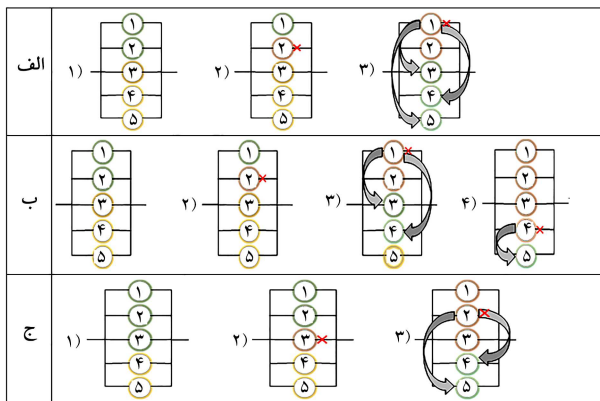


شکل ۱. تفاوت دو راهبرد مختلط و مختلط - هم‌زمان.

### ۳. توصیف سیستم پیشنهادی

در این مقاله برای مقایسه نتایج راهبرد پیشنهادی و با توجه به پیچیدگی محاسبات راهبرد جدید، دو زیر سیستم با تعداد ۵ و ۴ قطعه در نظر گرفته شده است و حالت‌های مختلف راهبرد جدید با راهبرد فعال، ذخیره و مختلط مقایسه شده است. برای اینکه عملکرد و کارایی راهبرد جدید مشخص شود، یک دامنه از مقادیر مختلف قابلیت اطمینان قطعه و سوئیچ در نظر گرفته شده است و در هر حالت عملکرد راهبردها با یکدیگر مقایسه شده است. حالتی که برای راهبرد مختلط برای زیر سیستم با ۵ قطعه به وجود می‌آید، در جدول ۱ بیان شده است.

شکل ۲ حالت‌های امکان‌پذیر برای راهبرد مختلط - هم‌زمان را به صورت طرح واره نمایش می‌دهد. در دو حالت از حالات زیر تعداد قطعات فعال یکسان اما نحوه تعویض قطعات باقیمانده متفاوت است (حالت الف و ب). برای حالت فعال و ذخیره فقط یک حالت امکان‌پذیر است.



شکل ۲. حالت‌های مختلف راهبرد مختلط - هم‌زمان در یک زیر سیستم با پنج قطعه.

جدول ۱. انواع حالت‌های ممکن تخصیص قطعات مازاد برای زیر سیستم با استفاده از راهبرد پیشنهادی و راهبرد مختلط.

تخصیص قطعات مازاد با استفاده از راهبرد مختلط - هم‌زمان	تخصیص قطعات مازاد با استفاده از راهبرد مختلط
الف) دو قطعه فعال و سه قطعه ذخیره (بعد از خرابی قطعات فعال، سه قطعه ذخیره به صورت هم‌زمان وارد سیستم می‌شوند و سیستم به کار خود ادامه می‌دهد.)	الف) دو قطعه فعال و سه قطعه ذخیره (بعد از شکست هر دو قطعه فعال، سه قطعه ذخیره به ترتیب و یک به یک بعد از هر خرابی وارد سیستم می‌شوند.)
ب) دو قطعه فعال و سه قطعه ذخیره (بعد از شکست قطعات فعال اولیه، ابتدا دو قطعه از قطعات ذخیره به صورت هم‌زمان وارد شده و بعد از شکست این دو قطعه آخر وارد سیستم می‌شوند.)	ب) سه قطعه فعال و دو قطعه ذخیره (بعد از شکست سه قطعه فعال، دو قطعه باقی‌مانده به ترتیب بعد از خرابی وارد سیستم می‌شوند.)
ج) سه قطعه فعال و دو قطعه ذخیره (در این حالت نیز ابتدا سه قطعه اول با شکست روبرو می‌شوند و سپس دو قطعه ذخیره به صورت هم‌زمان وارد سیستم می‌شوند.)	ج) چهار قطعه فعال و یک قطعه ذخیره (در این قسمت نیز چهار قطعه فعال و پس از شکست چهار قطعه، قطعه ذخیره وارد سیستم می‌شوند.)

گرفته می‌شود.<sup>[۱۸]</sup> در سناریوی اول، سیستم سوئیچینگ به صورت پیوسته عملکرد سیستم را کنترل می‌کند و به محض رخداد یک شکست (خرابی) در یک قطعه‌ی فعال، سوئیچ قطعه‌ی ذخیره‌ی بعدی را وارد سیستم می‌کند. در این حالت فرض می‌شود که خرابی در خود سوئیچ در هر زمانی امکان رخداد دارد و به تعداد دفعات استفاده از سوئیچ ارتباطی ندارد. در سناریوی دوم، خرابی سوئیچ زمانی رخ می‌دهد که نیاز به سوئیچ کردن باشد. به عبارت دیگر سوئیچ در زمان خرابی یک قطعه فعال می‌شود و یک قطعه‌ی ذخیره را وارد سیستم می‌کند، در همین لحظه ممکن است سوئیچ کار نکند و منجر به ازکار افتادن کل سیستم شود. در این حالت احتمال خرابی سوئیچ در هر بار استفاده برابر با مقدار ثابتی در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله از سناریوی دوم برای حل مسئله استفاده شده است. به منظور مقایسه‌ی نتایج راهبرد جدید با راهبردهای پیشین یک زیر سیستم با پنج قطعه در نظر گرفته شده و قابلیت اطمینان زیر سیستم با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان‌های مختلف برای سوئیچ و قطعه، با استفاده از راهبرد پیشنهادی و تمام راهبردهای پیشین - راهبردهای فعال، ذخیره و مختلط - محاسبه شده است.

مفروضات مسئله به صورت زیر است:

- ۱- زیر سیستم و اجزای آن می‌توانند در یکی از دو حالت کاملاً سالم یا کاملاً خراب باشند.
- ۲- خصوصیات اجزا از قبیل میزان قابلیت اطمینان قطعات و قابلیت اطمینان سوئیچ مشخص و قطعی هستند.
- ۳- قطعات استفاده شده در زیر سیستم یکسان و مشابه هستند.
- ۴- خرابی قطعات تأثیری بر روی هم ندارند و از هم مستقل هستند.
- ۵- قطعات و سوئیچ تعمیر ناپذیر هستند.
- ۶- در راهبردهایی که به سوئیچ نیاز است، سیستم سوئیچینگ غیرایده‌آل فرض می‌شود.
- ۷- زمان کارکرد تا خرابی اجزا از توزیع نمایی پیروی می‌کند.

#### ۴. قابلیت اطمینان راهبرد پیشنهادی

همان طور که اشاره شد تابع هدف مسئله به دست آوردن بیشترین قابلیت اطمینان و همچنین مشخص شدن بهترین نوع راهبرد و تعداد قطعات فعال و ذخیره است. به منظور محاسبه قابلیت اطمینان راهبرد جدید پیشنهادی نیاز است که فرمول محاسباتی آن مشخص شود. برای این منظور پارامترهای جدول ۲ تعریف می‌شوند. نکته‌ی اساسی در محاسبه قابلیت اطمینان راهبرد مختلط - هم‌زمان این است که برخلاف سایر راهبردها، فرمول محاسباتی این راهبرد یک فرمول ثابت نیست و با تغییر تعداد قطعات فعال و ذخیره در زیرسیستم، فرمول مورد نظر نیز تغییر می‌کند. این موضوع باعث پیچیدگی و سختی محاسبات این راهبرد خواهد شد. به همین دلیل در این قسمت فرمول ریاضی محاسبه قابلیت اطمینان راهبرد مختلط - هم‌زمان برای حالت‌های (الف) و (ب) به صورت جداگانه ارائه شده است و سپس به تحلیل یکی از معادلات به دست آمده پرداخته خواهد شد. برای حالت (الف) یعنی حالتی که تعداد قطعات فعال دو و تعداد قطعات ذخیره سه باشد:

فرمول محاسبه قابلیت اطمینان در حالتی که تعداد قطعات فعال دو و تعداد قطعات ذخیره سه باشد (حالت ب) در رابطه‌ی ۴ نشان داده شده است.

$$R = (1 - (1 - r_i(t))^{n_A}) + \rho_{(i)} \int_0^t (1 - (1 - r_i(t-u))^{n_{s_i}}) \times f^{Max, n_A}(u) du + \rho_{(i)} \int_0^t \int_{t_1}^t (1 - (1 - r_i(t-u))^{n_{s_1}}) \times f^{Max, n_A}(t_1) \times f^{Max, n_{s_i}}(u - t_1) du dt_1 \quad (4)$$

فرمول محاسبه قابلیت اطمینان برای حالت سوم (حالت ج) که زیرسیستم دارای سه قطعه‌ی فعال و دو قطعه‌ی ذخیره باشد، به صورت رابطه‌ی ۵ است.

$$R = (1 - (1 - r_i(t))^{n_A}) + \rho_{(i)} \int_0^t (1 - (1 - r_i(t-u))^{n_s}) \times f^{Max, n_A}(u) du \quad (5)$$

$$R = (1 - (1 - r_i(t))^{n_A}) + \rho_{(i)} \int_0^t (1 - (1 - r_i(t-u))^{n_s}) \times f^{Max, n_A}(u) du \quad (1)$$

که  $f^{max, n_A}$  به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$f^{max, n_A}(u) = n_A f_i(t) [1 - F_i(t)]^{n_A - 1} \quad (2)$$

در این معادله،  $f_i(t)$  توزیع چگالی برای زمان تا خرابی قطعه است و  $F_i(t)$  تابع توزیع تجمعی آن است. در این پژوهش فرض شده است که زمان تا خرابی قطعات از توزیع نمایی پیروی می‌کند و قابلیت اطمینان قطعه با استفاده از رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید.

$$r_i(t) = e^{(-\lambda_i t)} \quad (3)$$

به منظور تفسیر معادلات به دست آمده، رابطه‌ی ۴ که مربوط به حالت ب (دو قطعه‌ی فعال و سه قطعه‌ی ذخیره) است، انتخاب و به تفسیر آن پرداخته می‌شود. در این معادله، قابلیت اطمینان زیرسیستم شامل جمع سه احتمال مربوط به سه رویداد مرتبط با حالات زیرسیستم است که منجر به کارکرد صحیح زیرسیستم تا زمان مأموریت یا همان  $t$  می‌شوند. عبارت  $(1 - (1 - r_i(t))^{n_A})$ ، احتمال رخ داد حالتی را بیان می‌کند که حداقل یکی از قطعات فعال تا پایان زمان  $t$  سالم بماند، پس نیازی به استفاده از قطعات ذخیره نیست. عبارت دوم

$$\rho_{(i)} \int_0^t (1 - (1 - r_i(t-u))^{n_{s_1}}) \times f^{Max, n_A}(u) du$$

جدول ۲. پارامترهای مسئله

تعداد قطعات استفاده شده در زیرسیستم	$N$
تعداد قطعات ذخیره استفاده شده در زیرسیستم	$n_s$
تعداد قطعات ذخیره‌ی $i$ ام بعد از شکست قطعات فعال اضافه می‌شوند	$n_{s_i}$
تعداد قطعات فعال استفاده در زیرسیستم	$n_A$
زمان مأموریت	$T$
پارامتر توزیع نمایی برای نرخ شکست قطعه استفاده شده در زیرسیستم	$\lambda_i$
قابلیت اطمینان سوئیچ در زمان $t$ (سناریو اول)	$\rho_i(t)$
قابلیت اطمینان سوئیچ در زمان $t$ (سناریو دوم)	$\rho_i$
قابلیت اطمینان قطعه‌ی $i$ استفاده شده در زیرسیستم در زمان $t$	$r_i(t)$
$pdf$ برای وقوع $j$ زمین خرابی، یعنی جمع $j$ عدد از	$f(j)$
زمان‌های خرابی مستقل و یکسان در قطعه‌ی استفاده شده در زیرسیستم	
$pdf$ برای زمان خرابی آخرین قطعه‌ی فعال از بین $n_A$ عدد قطعه فعال در زیرسیستم	$f^{max, n_A}$
$pdf$ برای زمان خرابی آخرین قطعه‌ی ذخیره در مرحله‌ی $i$ ام از بین $n_{s_i}$ عدد قطعه در زیرسیستم	$f^{max, n_{s_i}}$

همان طور که گفته شد در این مسئله فرض شده است که تعداد قطعات استفاده شده در زیر سیستم از قبل مشخص شده باشد؛ در نتیجه محدودیت‌های وزن، حجم و هزینه رعایت شده در نظر گرفته شده و در مدل آورده نشده است. تمرکز اصلی این مقاله بر روی بررسی عملکرد راهبرد مختلط - هم‌زمان در شرایط مختلف و مقایسه‌ی آن در درجه‌ی اول با راهبرد مختلط و سپس با راهبردهای فعال و ذخیره است.

### ۶. محاسبات عددی

زیر سیستم مورد نظر با در نظر گرفتن پنج حالت مختلف برای قابلیت اطمینان قطعه و سه حالت برای قابلیت اطمینان سوئیچ بررسی شده است. جمعاً پانزده مسئله‌ی مختلف لحاظ شده و قابلیت اطمینان زیر سیستم با مقدارهای متفاوت از قابلیت اطمینان سوئیچ و قطعه حل شده است. برای مقایسه‌ی بهتر تأثیر قابلیت اطمینان قطعه و سوئیچ بر عملکرد راهبرد جدید نتایج به صورت جدول ارائه شده است. در سطرهای این جدول، قابلیت اطمینان قطعه و در ستون‌ها مقادیر مختلف قابلیت اطمینان سوئیچ قرار گرفته است. در جدول از علامت‌های اختصاری که نماینده‌ی هر یک از راهبردها هستند استفاده شده. که توضیح آنها در جدول ۳ نشان داده شده است.

در جدول ۴، نتایج مربوط به حل مسئله با استفاده از تمام راهبردها در حالت‌های مختلف قابلیت اطمینان قطعه و سوئیچ در زیر سیستم‌هایی با پنج و چهار قطعه نشان داده شده است. نتایج در هر خانه از جدول به صورت نزولی از چپ به راست نشان داده شده به نوعی که بهترین راهبرد، راهبرد سمت چپ و ضعیف‌ترین راهبرد برای آن حالت، راهبرد سمت راست است.

برای نمونه قابلیت اطمینان زیر سیستم با پنج قطعه با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۰٫۳۰ برای قطعه و قابلیت اطمینان ۰٫۹۹ برای سوئیچ حل شده است و نتایج به صورت:  $\{S, M1, SM2, M2, SM3, SM1, M3, A\}$  به دست آمده است. پس راهبرد  $S$  که نماینده‌ی راهبرد آماده به کار است، بهترین نتیجه را در این حالت داشته است. به ترتیب  $M1$  راهبرد مختلط (حالت اول)،  $SM2$  راهبرد مختلط - هم‌زمان (حالت دوم)،  $M2$  راهبرد مختلط (حالت دوم) و به همین ترتیب آخرین راهبرد، راهبرد فعال است.

همان طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، در تمام خانه‌هایی که به صورت زرد رنگ است، راهبرد مختلط - هم‌زمان بهتر از راهبردهای آماده به کار و فعال است اما از بعضی از حالت‌های راهبرد مختلط بهتر نیست. برای نمونه در حالتی که قابلیت اطمینان قطعه ۰٫۴۰ و قابلیت اطمینان سوئیچ ۰٫۹۵ باشد، راهبرد مختلط (حالت دوم) از بقیه‌ی راهبردها بهتر و بعد از آن راهبردهای مختلط - هم‌زمان (حالت دوم و سوم) نسبت به بقیه‌ی راهبردها از جمله راهبردهای فعال، ذخیره و مختلط (حالت اول و سوم) بهتر است. در خانه‌هایی که به رنگ خاکستری است راهبرد فعال

احتمال حالتی را نشان می‌دهد که در آنها تمام قطعات فعال خراب می‌شوند و دو قطعه به طور هم‌زمان وارد سیستم می‌شوند و سیستم به عملکرد صحیح خود ادامه می‌دهد و تا زمان  $t$  سالم می‌ماند. همچنین عبارت سوم یعنی:

$$\rho_{(i)}^2 \int_0^t \int_{t_1}^t (\lambda - (\lambda - r_i(t-u))^{n_{s,i}}) \times f^{Max, n_A}(t_1) \times f^{Max, n_{s,i}}(u - t_1) du dt_1$$

احتمال حالتی را نشان می‌دهد که تمام قطعات فعال خراب شده‌اند و اولین و دومین قطعه‌ی ذخیره نیز که هم‌زمان وارد سیستم شده بودند، پس از مدتی کارکرد خراب شوند و قطعه‌ی ذخیره‌ی سوم شروع به کار کرده و تا پایان زمان  $t$  به کارکرد خود ادامه داده است.

در مطالعه‌ی ابویی و همکاران<sup>[۲۵]</sup> فرمول مربوط به محاسبه‌ی قابلیت اطمینان راهبرد مختلط ارائه شده است. فرمول به صورت کلی است و برای تمام حالت‌های متفاوت تخصیص قابل استفاده است. این فرمول با در نظر گرفتن سناریوی دوم برای سوئیچ به صورت رابطه‌ی ۶ است.

$$R = (\lambda - (\lambda - r_i(t))^{n_A}) + \int_0^t \rho_i \times r_i(t-u) \times f^{Max, n_A}(u) du + \sum_{j=1}^{n_S-1} \rho^{j+1} \int_0^t \int_{t_1}^t r_i(t-u) \times f^j(u-t_1) \times f^{Max, n_A}(t_1) du dt_1 \quad (6)$$

### ۵. انتخاب راهبرد

همان طور که قبلاً ذکر شد، هنگامی که راهبرد تخصیص قطعات در هر زیر سیستم از قبل مشخص نباشد باید از طریق مقایسه‌ی قابلیت اطمینان سیستم با استفاده از راهبردهای مختلف اقدام شود. بدین منظور برای به دست آوردن بهترین راهبرد برای زیر سیستم تعریف شده و تخصیص قطعات فعال و ذخیره، قابلیت اطمینان زیر سیستم با استفاده از تمام راهبردها محاسبه و سپس مقایسه شده است. برای حل مسئله، قابلیت اطمینان سوئیچ و قابلیت اطمینان قطعات مشخص در نظر گرفته شده تا تمرکز بر روی پیدا کردن بهترین راهبرد در هر ترکیب باشد. مسئله با مقدارهای مختلفی برای قابلیت اطمینان سوئیچ و قطعات حل شده است. مقادیر مختلف در نظر گرفته شده برای قابلیت اطمینان قطعات و سوئیچ به صورت زیر است.

قابلیت اطمینان قطعات:  $\{0.40, 0.50, 0.60, 0.65, 0.65\}$  قابلیت اطمینان سوئیچ:  $\{0.90, 0.95, 0.99\}$

جدول ۳. علائم اختصاری.

علامت	نوع راهبرد	علامت	نوع راهبرد
A	راهبرد فعال	M3	راهبرد مختلط (حالت ج)
S	راهبرد ذخیره	SM1	راهبرد مختلط - هم‌زمان (حالت الف)
M1	راهبرد مختلط (حالت الف)	SM2	راهبرد مختلط - هم‌زمان (حالت ب)
M2	راهبرد مختلط (حالت ب)	SM3	راهبرد مختلط - هم‌زمان (حالت ج)

جدول ۴. مقايسه‌ى قابليت اطمينان زير سيستم با پنج قطعه با استفاده از راهبردهاى تخصيصى مختلف.

قابليت اطمينان						قابليت اطمينان زير سيستم
سوئيچ						
۰٫۷۵	۰٫۸۰	۰٫۸۵	۰٫۹۰	۰٫۹۵۶	۰٫۹۹	
$M^3 SM^3 M^2$	$M^3 M^2 SM^3$	$M^3 M^3 M^2$	$M^2 SM^2 SM^3$	$M \setminus M^2$	$S M \setminus SM^2$	۰٫۳۰
$SM \setminus SM^2 A M \setminus S$	$M^2 SM \setminus M \setminus A S$	$SM^2 M \setminus SM \setminus A S$	$M \setminus M^3 SM \setminus S A$	$SM^2 SM^3 S SM \setminus M^3 A$	$M^2 SM^3 SM \setminus M^3 A$	
$M^3 SM^3 M^2 A$	$M^3 SM^3 M^2 A SM^2 SM \setminus M \setminus S$	$M^3 M^2 SM^3 SM^2 SM \setminus M \setminus A S$	$M^2 M^3 SM^3 SM^2 M \setminus SM \setminus A S$	$M^2 SM^2 SM^3 M \setminus M^3 SM \setminus S A$	$M \setminus SM^2 S M^2 SM^3 AM \setminus M^3 A$	
$M^3 A SM^3 M^2 SM \setminus SM^2 M \setminus S$	$M^3 SM^3 M^2 A SM^2 SM \setminus M \setminus S$	$M^3 SM^3 M^2 A SM^2 SM \setminus M \setminus S$	$M^3 M^2 SM^3 A SM \setminus SM \setminus M \setminus S$	$M^2 SM^3 M^3 SM^2 M \setminus SM \setminus A S$	$M \setminus M^2 SM^2 M^3 S SM \setminus M^3 A$	
$M^3 A SM^3 M^2 SM \setminus SM^2 M \setminus S$	$M^3 A SM^3 M^2 SM \setminus SM^2 M \setminus S$	$M^3 A SM^3 M^2 SM^2 SM \setminus SM \setminus M \setminus S$	$M^3 SM^3 M^2 A SM^2 SM \setminus M \setminus S$	$M^3 M^2 SM^3 SM^2 SM^2 SM \setminus M \setminus A S$	$M^2 M \setminus SM^3 SM^2 M^3 SM^2 M^3 SM \setminus S A$	
$M^3 A SM^3 M^2 SM \setminus SM^2 M \setminus S$	$M^3 A SM^3 M^2 SM \setminus SM^2 M \setminus S$	$M^3 A SM^3 M^2 SM^2 SM \setminus SM \setminus M \setminus S$	$M^3 SM^3 M^2 A SM^2 SM \setminus M \setminus S$	$M^3 M^2 SM^3 A SM^2 SM \setminus M \setminus S$	$M^2 SM^3 M^3 SM^2 M \setminus SM \setminus S A$	
$A M^3 SM^3 M^2 SM \setminus SM^2 M \setminus S$	$M^3 A SM^3 M^2 SM \setminus SM^2 M \setminus S$	$M^3 A SM^3 M^2 SM^2 SM \setminus SM \setminus M \setminus S$	$M^3 A SM^3 SM \setminus M^2 SM^2$	$M^3 M^2 SM \setminus A SM^2 SM \setminus M \setminus S$	$M^2 SM^3 M^3 SM^2 M \setminus SM \setminus A S$	۰٫۷۰

قابليت اطمينان قطعه

جدول ۵. مقايسه‌ى قابليت اطمينان زير سيستم با چهار قطعه با استفاده از راهبردهاى تخصيصى مختلف.

قابليت اطمينان سوئيچ					قابليت اطمينان زير سيستم	
۰٫۷۵	۰٫۸۰	۰٫۸۵	۰٫۹۰	۰٫۹۵	۰٫۹۹	
$SM A S$	$SM S A$	$SM S A$	$SM S A$	$S SM A$	$S SM A$	۰٫۳۰
$SM A S$	$SM A S$	$SM A S$	$SM S A$	$S SM A$	$S SM A$	۰٫۴۰
$A SM S$	$A SM S$	$SM A S$	$SM A S$	$SM S A$	$S SM A$	۰٫۵۰
$A SM S$	$A SM S$	$A SM S$	$SM A S$	$SM A S$	$S SM A$	۰٫۶۰
$A SMS$	$A SM S$	$A SM S$	$A SM S$	$SM A S$	$SM S A$	۰٫۶۵
$A SM S$	$A SM S$	$A SM S$	$A SM S$	$SM A S$	$SM S A$	۰٫۷۰

قابليت اطمينان قطعه

در خانه‌های زرد رنگ در جدول ۵ راهبرد پیشنهادی از راهبردهای فعال و ذخیره قابلیت اطمینان بیشتری برای زیرسیستم مورد نظر به همراه داشته‌اند که نشان دهنده‌ی کارایی راهبرد پیشنهادی است. از همین رو استفاده از راهبرد جدید در زیر سیستم‌هایی با ویژگی مشابه پیشنهاد می‌شود.

جدول ۶ مقادیر دقیق قابلیت اطمینان زیر سیستم را با راهبردهای مختلف نشان می‌دهد. ستون اول مربوط به خانه‌های جدول ۴ است، برای مثال  $h_{11}$  در جدول ۶، مربوط به خانه‌ی اول جدول ۴ است که مقادیر قابلیت اطمینان سوئیچ و قطعه به ترتیب  $0.9999$  و  $0.3$  هستند. در این حالت، راهبرد ذخیره از همه قوی‌تر است و بعد از آن راهبرد مختلط اول و سپس مختلط - هم‌زمان حالت دوم و به همین ترتیب.

با توجه به جدول ۶ و با ثابت در نظر گرفتن قابلیت اطمینان قطعه و تغییر (کاهش) در قابلیت اطمینان سوئیچ ترتیب راهبردها تغییر می‌کند. انتظار می‌رود که با کاهش قابلیت اطمینان سوئیچ، راهبردهایی بهتر باشند که تعداد قطعات ذخیره‌ی کمتر و تعداد قطعات فعال بیشتر داشته باشند.

شکل ۳ تغییر در مقادیر قابلیت اطمینان راهبردهای مختلف در شرایطی که قابلیت اطمینان قطعه ثابت و  $0.5\%$  در نظر گرفته شده و قابلیت اطمینان سوئیچ متغیر است، نمایش می‌دهد.

با ذخیره نسبت به راهبرد پیشنهادی بهتر بوده است. مزیت راهبرد مختلط هم‌زمان نسبت به راهبرد مختلط، استفاده‌ی کمتر از سوئیچ است. پس، اگر تعداد قطعات زیر سیستم زیاد باشد و در نتیجه نیاز به استفاده‌ی زیاد از سیستم سوئیچینگ باشد، راهبرد جدید عملکرد بهتری از راهبرد مختلط نیز خواهد داشت. از آن‌جا که بیشتر مسائل الگو در مسئله‌ی تخصیص قابلیت اطمینان فرض کرده‌اند که حداکثر ۵ قطعه در یک زیر سیستم باشند، در این مقاله نیز همین حالت بررسی شده است و نشان داده شد که راهبرد جدید در بیشتر شرایط از راهبردهای سنتی فعال و ذخیره بهتر عمل می‌کند و بسیار به عملکرد راهبرد مختلط نزدیک است. شاهد این مدعا، اختلاف بسیار اندک در مقادیر قابلیت اطمینان این دو راهبرد است.

به منظور نشان دادن برتری راهبرد پیشنهادی در مقایسه با راهبردهای فعال و ذخیره، یک زیر سیستم دیگر با چهار قطعه نیز در نظر گرفته شد. در این زیر سیستم به طور کلی تنها در یک حالت می‌توان از راهبرد مختلط - هم‌زمان استفاده کرد. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که تعداد قطعات فعال دو و تعداد قطعات ذخیره نیز دو عدد باشد. شکل ۱ (قسمت ب) این حالت را نشان می‌دهد. جدول ۵ نتایج مقایسه‌ی بین قابلیت اطمینان زیر سیستم با استفاده از راهبردهای مختلط - هم‌زمان، ذخیره، و فعال را نشان می‌دهد. خانه‌های زرد رنگ برتری راهبرد پیشنهادی را نشان می‌دهد که با علامت اختصاری  $SM$  در جدول نشان داده شده است.

جدول ۶. قابلیت اطمینان ریز سیستم با پنج قطعه با استفاده از راهبردهای مختلف در حالت‌های مختلف قابلیت اطمینان قطعه و سوئیچ

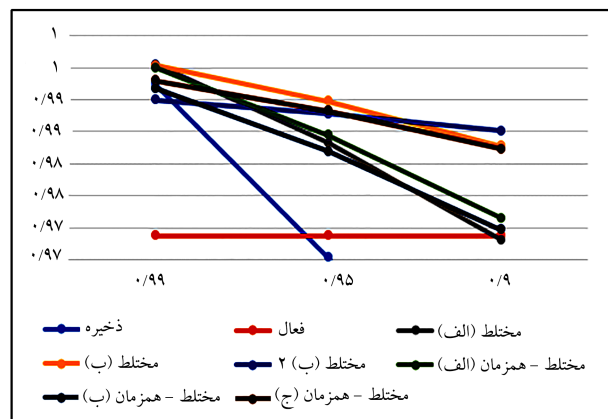
سلول	ترتیب برتری راهبردها از چپ به راست	مقادیر قابلیت اطمینان
$h_{11}$	$S \ M \ SM \ M \ SM \ M \ SM \ M \ M \ A$	$0.951323 \ 0.968293 \ 0.972904 \ 0.979996 \ 0.980584$ $0.949853 \ 0.931731 \ 0.831930$
$h_{21}$	$M \ SM \ S \ M \ SM \ SM \ SM \ M \ A$	$0.980749 \ 0.98749 \ 0.988476 \ 0.988540 \ 0.990841$ $0.992224 \ 0.972236 \ 0.979309$
$h_{31}$	$M \ M \ SM \ SM \ SM \ S \ SM \ M \ A$	$0.992378 \ 0.992990 \ 0.994963 \ 0.995318 \ 0.995532$ $0.968875 \ 0.989931 \ 0.991720$
$h_{41}$	$M \ M \ SM \ SM \ M \ SM \ S \ A$	$0.996953 \ 0.997706 \ 0.997732 \ 0.997759 \ 0.998398$ $0.989760 \ 0.994724 \ 0.996772$
$h_{51}$	$M \ SM \ M \ SM \ M \ SM \ S \ A$	$0.998426 \ 0.998445 \ 0.998484 \ 0.998792 \ 0.999109$ $0.994747 \ 0.995619 \ 0.994747$
$h_{61}$	$M \ SM \ M \ SM \ M \ SM \ A \ S$	$0.998919 \ 0.998957 \ 0.999314 \ 0.999392 \ 0.999528$ $0.996405 \ 0.99757 \ 0.998762$
$h_{12}$	$M \ M \ SM \ SM \ S \ SM \ M \ A$	$0.935573 \ 0.939431 \ 0.951664 \ 0.95259 \ 0.952873$ $0.83193 \ 0.924788 \ 0.932081$
$h_{22}$	$M \ SM \ SM \ M \ M \ SM \ S \ A$	$0.968121 \ 0.972062 \ 0.972800 \ 0.97320 \ 0.977664$ $0.92224 \ 0.953277 \ 0.965600$
$h_{32}$	$M \ SM \ M \ SM \ M \ SM \ A \ S$	$0.983202 \ 0.984506 \ 0.987812 \ 0.988204 \ 0.988716$ $0.965358 \ 0.96875 \ 0.981954$

ادامه‌ی جدول ۶.

مقادیر قابلیت اطمینان	ترتیب برتری راهبردها از چپ به راست	سلول
۰٫۹۹۶۰۴۲ ۰٫۹۹۵۵۸۸ ۰٫۹۹۵۲۳۷ ۰٫۹۹۱۱۲۲ ۰٫۹۹۰۴۳۷ ۰٫۹۹۰۲۶۲ ۰٫۹۸۹۷۶ ۰٫۹۷۴۶۳	$M^3 M^2 SM^3 SM^2 SM \setminus M \setminus A S$	$h_{22}$
۰٫۹۹۷۹۳۹ ۰٫۹۹۷۲۴۷ ۰٫۹۹۷۱۰۸ ۰٫۹۹۴۷۴۷ ۰٫۹۹۳۴۳۹ ۰٫۹۹۳۱۲۷ ۰٫۹۹۲۸۲۱ ۰٫۹۷۸۶۲۴	$M^3 M^2 SM^3 A SM^2 SM \setminus M \setminus S$	$h_{52}$
۰٫۹۹۹۰۱۵ ۰٫۹۹۸۳۶۸ ۰٫۹۹۸۳۲۶ ۰٫۹۹۷۵۷ ۰٫۹۹۵۳۰۰ ۰٫۹۹۵۱۷۶ ۰٫۹۹۴۸۹۳ ۰٫۹۸۲۲۹۶	$M^3 M^2 SM^3 A SM^2 M \setminus S$	$h_{62}$
۰٫۹۳۳۳۳۷ ۰٫۹۲۵۴۱۴ ۰٫۹۲۴۵۶۶ ۰٫۹۲۰۱۰۲ ۰٫۹۱۶۱۱۰ ۰٫۹۰۹۸۶۶ ۰٫۸۸۲۰۳۸ ۰٫۸۳۱۹۳	$M^2 SM^2 SM^3 M \setminus M^3 SM \setminus S A$	$h_{13}$
۰٫۹۶۵۵۶۲ ۰٫۹۶۲۹۷۸ ۰٫۹۶۲۸۶۳ ۰٫۹۵۴۱۷۳ ۰٫۹۴۹۲۱۳ ۰٫۹۴۸۴۶۳ ۰٫۹۲۲۲۴ ۰٫۹۱۰۹۷۴	$M^2 M^3 SM^3 SM^2 M \setminus SM \setminus A S$	$h_{12}$
۰٫۹۸۵۱۶۴ ۰٫۹۸۲۸۰۰ ۰٫۹۸۲۲۴۶ ۰٫۹۷۱۵۰۲ ۰٫۹۶۹۷۴۶ ۰٫۹۶۸۷۵ ۰٫۹۶۸۱۰۸ ۰٫۹۳۲۵۹۴	$M^3 M^2 SM^3 SM^2 SM \setminus A M \setminus S$	$h_{23}$
۰٫۹۹۴۹۰۳ ۰٫۹۹۲۱۲۰ ۰٫۹۹۲۱۰۹ ۰٫۹۸۹۷۶ ۰٫۹۸۲۹۱۷ ۰٫۹۸۲۵۲۰ ۰٫۹۸۱۰۳۵ ۰٫۹۵۰۰۸۹	$M^3 SM^3 M^2 A SM^2 SM \setminus M \setminus S$	$h_{22}$
۰٫۹۹۷۲۵۸ ۰٫۹۹۵۰۰۴ ۰٫۹۹۴۹۳۹ ۰٫۹۹۴۷۴۷ ۰٫۹۸۷۱۹۵ ۰٫۹۸۷۰۴۱ ۰٫۹۸۵۹۰۶ ۰٫۹۵۷۷۸۵	$M^3 SM^3 M^2 S SM^2 SM \setminus M \setminus S$	$h_{53}$
۰٫۹۹۸۶۴۰ ۰٫۹۹۷۵۷ ۰٫۹۹۶۹۹۳ ۰٫۹۹۶۹۳۰ ۰٫۹۹۰۷۳۷ ۰٫۹۹۰۶۹۳ ۰٫۹۸۹۹۱۵ ۰٫۹۶۴۹۴۰	$M^3 A SM^3 M^2 SM^2 SM \setminus M \setminus S$	$h_{63}$

### ۷. نتیجه‌گیری

در بحث بهینه‌سازی قابلیت اطمینان، استفاده از قطعات مازاد یک روش بسیار رایج است. در زمان استفاده از قطعات مازاد در یک زیر سیستم (یا سیستم) نحوه‌ی استفاده از قطعات مازاد حائز اهمیت است که با عنوان راهبرد قطعات مازاد شناخته می‌شود. به طور سنتی دو راهبرد فعال و ذخیره برای قطعات مازاد در نظر گرفته می‌شود. به تازگی راهبرد جدیدی با عنوان راهبرد مختلط ارائه شده است که عملکردی به مراتب بهتر نسبت به راهبردهای سنتی داشته است. در این مقاله یک راهبرد جدید با عنوان راهبرد مختلط - هم‌زمان ارائه شده است که حالتی عام‌تر از راهبرد مختلط دارد. در ابتدا فرمول محاسباتی این راهبرد به دست آمده است و سپس بر روی دو زیر سیستم با ۴ و ۵ قطعه پیاده‌سازی شده و نتایج در حالت‌های مختلف بررسی و تحلیل قرار شده است. نتایج نشان می‌دهد که تقریباً در تمام ترکیب‌های مختلف قطعات و سوئیچ در مسئله‌ی ۴ قطعه‌یی و در بیشتر حالت‌های مسئله با ۵ قطعه، راهبرد جدید عملکرد بهتری نسبت به راهبردهای فعال و ذخیره دارد و همچنین در بعضی از حالت‌ها نسبت به ساختارهای مختلف راهبرد مختلط نیز عملکرد بهتری دارد. راهبرد جدید پیشنهادی پتانسیل بهبود قابلیت اطمینان در حالت‌های مختلف را داراست و از این رو پیشنهاد می‌شود تا برای تحقیقات آتی، پیاده‌سازی این راهبرد بر روی مسائل الگو در حوزه‌ی مسئله‌ی تخصیص قطعات



شکل ۳. تغییرات راهبرد با تغییر در قابلیت اطمینان سوئیچ.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است با کاهش قابلیت اطمینان سوئیچ، قابلیت اطمینان زیر سیستم با استفاده از راهبردهای متفاوت (به جز راهبرد فعال) نیز کاهش پیدا کرده است. در این بین راهبرد ذخیره نسبت به بقیه، به تغییرات قابلیت اطمینان سوئیچ بیشتر حساسیت نشان داده و با سرعت بیشتری کاهش پیدا کرده است و از آن طرف راهبرد فعال که از سوئیچ استفاده نمی‌کند، بدون تغییر باقی مانده است.



عملکرد سیستم سوئیچ باید بررسی شود. ایده‌ی اصلی این راهبرد استفاده‌ی کمتر از سیستم سوئیچ بوده است، بنابراین بررسی عملکرد سناریوهای مختلف سوئیچ همچون سوئیچ پیوسته و گسسته همانند آنچه در مرجع<sup>[۷]</sup> ارائه شده است نیز جالب خواهد بود.

مازاد (RAP) و با مسائل تخصیص قابلیت اطمینان - قطعات مازاد (RRAP) بررسی شود. بررسی عملکرد راهبردهای مختلف در حالت عدم قطعیت در قابلیت اطمینان سوئیچ نیز یکی از موضوعات با اهمیت برای پژوهش‌های آینده خواهد بود؛ به عبارت دیگر میزان حساسیت راهبردهای مختلف نسبت به تغییرات در

### پانویس‌ها

1. redundancy allocation problem (RAP)
2. redundancy strategy
3. active strategy
4. standby strategy
5. mixed strategy
6. sync-mixed strategy

### منابع (References)

1. Chambari, A., Rahmati, S. H. A. and Najafi, A. A. "A bi-objective model to optimize reliability and cost of system with a choice of redundancy strategies", *Computers & Industrial Engineering*, **63**, pp. 109-119 (2012).
2. Kuo, W. and Prasad, V. R. "An annotated overview of system-reliability optimization", *IEEE Transactions on Reliability*, **49**, pp. 176-187 (2000).
3. Chern, M.-S. "On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system", *Operations Research Letters*, **11**, pp. 309-315 (1992).
4. Fyffe, D. E., Hines, W. W. and Lee, N. K. "System reliability allocation and a computational algorithm", *IEEE Transactions on Reliability*, **2**, pp. 64-69 (1968).
5. Abouei, Ardakan M. and Zeinal Hamadani, A. "Reliability optimization of series-parallel systems with mixed redundancy strategy in subsystems", *Reliability Engineering & System Safety*, **130**, pp. 132-139 (2014).
6. Ng, K. Y. and Sancho, N. "A hybrid 'dynamic programming/depth-first search' algorithm, with an application to redundancy allocation", *IIE Transactions*, **33**, pp. 1047-1058 (2001).
7. Coit, D. W. "Maximization of system reliability with a choice of redundancy strategies", *IIE Transactions*, **35**, pp. 535-543 (2003).
8. Misra, K. B. and Sharma, U. "An efficient algorithm to solve integer-programming problems arising in system-reliability design", *IEEE Transactions on Reliability*, **40**, pp. 81-91 (1991).
9. Misra, K. B. "Reliability optimization of a series-parallel system", *IEEE Transactions on Reliability*, **21**, pp. 230-238 (1972).
10. Coit, D. W. and Smith, A. E. "Reliability optimization of series-parallel systems using a genetic algorithm", *IEEE Transactions on Reliability*, **45**, pp. 254-260, 266 (1996).
11. Mahmoodi, M., Eslami Balade, A. Seyed Esfahani, M. and etal. "Optimization of number of surplus components by random programming in series-parallel and multiple systems ", *presented at the 10th International Conference on Industrial Engineering*, (In Persian), (2014).
12. Liang, Y.-C. and Smith, A. E. "An ant colony optimization algorithm for the redundancy allocation problem (RAP)", *IEEE Transactions on Reliability*, **53**, pp. 417-423 (2004).
13. Khaksefidi, M. Reissi Ardali, Mir Mohammadi, S. and etal. "Optimization of reliability of series-parallel system in multiple component allocation problem ", *presented at the 8th International Conference on Industrial Engineering*, (In Persian), (2013).
14. Azimi, P. and Hadi Nejad, F. "Presenting a Multi-Objective Optimization Model on the Problem of Redundancy Allocation of Repairable Systems Using Multi-Criteria Decision Making Techniques, Design of experiments and Simulation", (In Persian), (2016).
15. Ouzineb, M., Nourelfath, M. and Gendreau, M. "Tabu search for the redundancy allocation problem of homogeneous series-parallel multi-state systems", *Reliability Engineering & System Safety*, **93**, pp. 1257-1272 (2008).
16. Beji, N., Jarbouli, B., Eddaly, M. and etal. "A hybrid particle swarm optimization algorithm for the redundancy allocation problem", *Journal of Computational Science*, **1**, pp. 159-167 (2010).
17. Seyed Esfahani, M. Hajiyan Heydari, M. and Jaberi, S. "Presentation of refrigeration simulation algorithm to optimize reliability of series-parallel, k-from-n Systems and Fuzzy Parameter Substitution", (In Persian) (2013).
18. Coit, D. W. "Cold-standby redundancy optimization for nonrepairable systems", *Iie Transactions*, **33**, pp. 471-478, (2001).

19. Robinson, D. and Neuts, M. "Standby redundancy in reliability: a review", *IEEE Trans Reliab*, **38**, pp. 430-435 (1989).
20. M. and Zeinal Hamadani, A. "Reliability-redundancy, Abouei Ardakan allocation problem with cold-standby redundancy strategy", *Simulation Modelling Practice and Theory*, **42**, pp. 107-118 (2014).
21. Azizi, R. Amiri, M. Tavakoli Moghadam, R. and Mashat Zadegan, H. "Providing a model for the problem solving assignment allocation aroblem by a multi-objective integrated competitive algorithm", (In Persian) (2016).
22. Azizi Brojerdi, S. Amiri, M. and Garshasbi, D. "Proposing a mathematical model to solve the multi-objective problem of selecting a surplus allocation strategy with the goal of maximizing the average lifetime of K from N systems", *presented at the 13th International Conference on Industrial Engineering*, (In Persian) (2016).
23. Jamshidi, H. and Hejazi, T.H. "Presenting a two-objective mathematical programming model to solve the problem of surplus allocation of a parallel series system with", *presented at the 13th International Conference on Industrial Engineering mixed strategy and discount policy*, (In Persian) (2016).
24. Hamadani, A. Z. and Ardakan, M. A. "Bi-objective Zoulfaghari, H., redundancy allocation problem for a system with mixed repairable and non-repairable components", *ISA Transactions*, **53**, pp. 17-24 (2014).
25. Ardakan Abouei, M., Sima, M., Zeinal Hamadani, A. and etal. "A novel strategy for redundant components in reliability-redundancy allocation problems", *IIE Transactions*, pp. 00-00 (2016).