

فرمول‌بندی قابلیت اطمینان و ایمنی در سیستم‌های مطمئن پشتیبانی‌شده با رزرو سرد به کمک مدل مارکوف

غلامرضا لطیف شبگاهی^{۱*}، کوروش اصلان صفت^۲ و مهدی بهار گوگانی^۳

۱. استادیار گروه کنترل و ابزار دقیق دانشگاه شهیدبهشتی

۲. کارشناس ارشد مهندسی کنترل دانشگاه شهیدبهشتی

۳. کارشناس ارشد مهندسی کنترل دانشگاه شهیدبهشتی

(تاریخ دریافت ۹۲/۱۲/۱۷ - تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۳/۱۱/۱۰ - تاریخ تصویب ۹۴/۳/۱۶)

چکیده

یکی از مباحث مهم در صنایع مختلف، اعم از حمل‌ونقل دریایی، هوایی، نظامی، شیمیایی و هسته‌ای، تحمل‌پذیری آن‌ها درمقابل عیوب و خطاهاست. از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های یک سیستم تحمل‌پذیر عیب می‌توان به قابلیت اطمینان و ایمنی بالا در آن اشاره کرد. یکی از روش‌های مرسوم برای افزایش این دو ویژگی، استفاده از افزونگی در ساختار سیستم‌هاست. این پژوهش، تأثیر رزرو سرد بر افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم را بررسی می‌کند و برای این کار، از مدل مارکوف به سبب جامعیت و قابلیت آن در مدل‌سازی اولویت، وابستگی عملیاتی و زمانی، ریکآوری و ترتیب و توالی سیستم‌ها بهره می‌گیرد. در پژوهش‌های پیشین، برای قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم رزرو سرد، فرمولی کلی ارائه نشده است. این پژوهش با استفاده از مدل مارکوف سیستم رزرو سرد، رابطه‌ای برای دو ویژگی انتکاپذیری مذکور ارائه می‌دهد و از طریق آن‌ها تأثیر تعداد رزورها، میزان خرابی آن‌ها، کیفیت کار و سازوکار سوئیچ را در عملکرد سیستم بررسی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: افزونگی، ایمنی، رزرو سرد، قابلیت اطمینان، مدل مارکوف.

مقدمه

درست کارکردن آن در یک بازه زمانی معین به شرطی که در لحظه شروع به کار، به‌طور صحیح کار کرده باشد. داشتن قابلیت اطمینان بالا، لازمه بسیاری از سیستم‌ها و تأسیسات صنعتی است. طراحی برای قابلیت اطمینان بالا و راه‌های ارزیابی آن، از جمله بحث‌های بسیار مهم در صنایع امروز است. نیروگاه‌ها، هواپیماها، کشتی‌ها و تجهیزات پزشکی، از جمله این موارد به‌شمار می‌روند. استفاده از افزونگی در لایه‌های مختلف سیستم و استفاده از قطعات و زیرسیستم‌های با کیفیت مطلوب، دو روش معمول برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم‌هاست. این ویژگی را با روش‌های متعددی نظیر دیاگرام بلوکی قابلیت اطمینان، درخت عیب و مدل مارکوف ارزیابی می‌کنند.

دسته‌ای از سیستم‌های مورد استفاده در صنایع نظامی، شیمیایی، هسته‌ای و هوایی، به‌دلیل حساسیت مأموریت باید توانایی تحمل خطاهای نرم‌افزاری و عیوب سخت‌افزاری را داشته باشند. درواقع، ایجاد عیب در این سیستم‌ها، ممکن است عواقب فاجعه‌آمیز و جبران‌ناپذیری داشته باشد [۱]. بخشی از تلاش طراحان سیستم‌های مطمئن در این است که در صورت ایجاد عیب، از هرگونه از کارافتادگی سیستم جلوگیری کنند. در صورتی که سطح تحمل‌پذیری سیستم در برابر عیوب پایین باشد، خسارت‌های مالی و جانی شایان توجهی به‌بار می‌آید. برای این منظور، بسته به نوع کاربرد، بعضی از ویژگی‌ها نظیر قابلیت اطمینان و ایمنی در طراحی سیستم لحاظ می‌شود.

ایمنی

احتمال اینکه یک سیستم در بازه معینی از زمان درست

قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان^۱ یک سیستم عبارت است از احتمال

در صنایع مختلف اشاره کرد [۶].

رزرو ولرم: در این نوع رزروها (رزرو ولرم^۷) - که اغلب در افزودنی‌های نرم‌افزاری به کار می‌روند- رزرو به صورت نیمه‌روشن در کنار ماجول اصلی قرار داده می‌شود. این رزرو در زمان‌های از پیش تعیین شده، با ماجول اصلی هماهنگ می‌شود. وقفه جایگزین شدن این رزرو از رزرو گرم بیشتر و از رزرو سرد^۸ کمتر است. همچنین میزان مصرف انرژی در این رزرو، بین میزان مصرف انرژی در دو رزرو گرم و سرد است.

رزرو سرد: در سیستم‌های دارای این رزرو، رزروها هم‌زمان با ماجول‌های اصلی کار نمی‌کنند؛ بلکه در صورت معیوب شدن ماجولی از ماجول‌های اصلی سیستم، رزرو شروع به کار می‌کند و در این بازه زمانی، وقفه‌ای گاه شایان توجه در کار سیستم رخ می‌دهد. این سازوکار برای سیستم‌های بدون وقفه مناسب نیست؛ چراکه مدتی طول می‌کشد تا رزرو وارد عمل شود و پس از برق‌دار و گرم شدن، ادامه کار ماجول قبلی از کار افتاده را پی بگیرد. از این رو، رزرو برای سیستم‌هایی که وقفه در عملکرد آن‌ها بحرانی است، مناسب نیست و برای آن‌هایی که وجود وقفه در کار سیستم‌ها، ضرر اساسی در سرویس‌دهی آن‌ها ایجاد نمی‌کند (نظیر سرورهای کامپیوتری پشتیبان، ماهواره‌ها، فضاپیماها و سیستم‌های بلادرنگ از نوع نرم) مناسب است. البته این نوع از رزروها در سیستم‌هایی که مصرف انرژی در آن‌ها بحرانی است، گزینه مناسبی به شمار می‌روند. می‌توان در بعضی از کاربردها، ترکیبی از رزروهای گرم و سرد را به کار گرفت. در شکل ۱، نحوه عملکرد یک سیستم با دو رزرو سرد نمایش داده شده است.

در این سیستم فرض می‌شود که:

۱. ماجول اولیه و رزروها دقیقاً مشابه‌اند و عملکرد مستقل از زمان دارند.
۲. در ابتدای کار، ماجول اولیه در حال کار است و رزروها خاموش‌اند.
۳. سوئیچ ایده‌آل است؛ به طوری که در صورت معیوب شدن ماجول اولیه، به درستی عمل می‌کند و یکی از دو رزرو را وارد کار می‌سازد.
۴. در صورت معیوب شدن رزروی که جایگزین ماجول اصلی شده بود، سوئیچ رزرو دوم را وارد

کار کند یا در صورت معیوب شدن، با انجام عملیات مناسب به صورت ایمن از کار بیفتد- به طوری که عواقب فاجعه‌آمیزی به بار نیاید- ایمنی^۹ نام دارد. سیستم‌هایی که به مدارهای ایمن تجهیز شده‌اند، آثار رخدادهای ناخواسته و نامطلوب را کاهش می‌دهند و از آسیب‌رسانی به محیط زیست، ازدست‌رفتن خروجی، ازدست‌رفتن سرمایه و به خطر افتادن جان انسان‌ها جلوگیری می‌کنند [۲]. بحث ایمنی در سیستم‌های حمل‌ونقل هوایی، زمینی و دریایی، سیستم‌های کنترل در تجهیزات پزشکی و نیروگاه‌های هسته‌ای بسیار حائز اهمیت است.

افزودنی

همان‌طور که گفته شد، یکی از روش‌های مرسوم برای تحمل‌پذیر کردن سیستم در برابر عیوب، استفاده از افزودنی‌هاست. افزودنی^۳ ممکن است استاتیکی (غیرفعال یا پسیو^۴)، دینامیکی (فعال یا اکتیو^۵) یا ترکیبی از این دو باشد [۳] که در چهار سطح سخت‌افزار، نرم‌افزار، زمان و اطلاعات قابل‌پیاده‌سازی است [۴].

در افزودنی استاتیکی، هدف تولید خروجی مداوم و بی‌وقفه از سیستم و پوشاندن عیوب رخ داده در بعضی از ماجول‌های افزونه است. از جمله افزودنی‌های استاتیکی می‌توان به ساختار NMR در سخت‌افزار و NVP در نرم‌افزار اشاره کرد [۳].

در افزودنی دینامیکی، عیب ماجول در حال کار آشکار می‌شود و پس از محل‌یابی عیب و ایزوله کردن جزء معیوب، عمل جایگزینی با رزرو صورت می‌گیرد. رزروها را می‌توان بر حسب نحوه عملکرد، به سه دسته گرم، ولرم و سرد دسته‌بندی کرد.

رزرو گرم: در سیستم‌های حمایت‌شده با رزرو گرم^۶، ماجول‌های سیستم اعم از اصلی و رزروها، به موازات یکدیگر کار می‌کنند. در صورتی که ماجول اصلی دچار عیب شود، یکی از ماجول‌های رزرو جایگزین آن می‌شود. این جایگزینی، وقفه‌ای در کار سیستم ایجاد می‌کند که در بعضی از سیستم‌ها پذیرفتنی نیست. ایراد سیستم‌هایی از این نوع، مصرف بالای انرژی در آن‌هاست. از میان کاربردهای این نوع رزرو در صنعت می‌توان در نیروگاه‌های هسته‌ای و سیستم‌های کنترل مبتنی بر PLC مورد استفاده

سیستم استفاده می‌شود [۱۰ و ۱۱]. همچنین ساختار داخلی حافظه‌های SRAM، بر مبنای رزرو سرد طراحی می‌شوند [۱۲]. در صنایع هوایی نیز برای نمونه، می‌توان برای افزایش ایمنی در فرایند پرواز در سیستم کنترل سکان هواپیما از رزرو سرد استفاده کرد [۱۳].

سازمان‌دهی مقاله

این پژوهش، دو ویژگی قابلیت اطمینان و ایمنی را با استفاده از مدل مارکوف سیستم ارزیابی می‌کند. ما قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم رزرو سرد را بررسی و فرمول بسته‌ای را برای هر یک از آن‌ها ارائه می‌کنیم. مدل مارکوف به دلیل جامعیت و قابلیت‌های متعدد آن در مدل‌سازی ویژگی‌های دینامیکی سیستم انتخاب شده است.

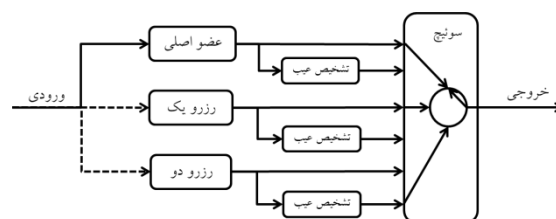
در بخش دوم پژوهش‌های گذشته مرور می‌شوند. در بخش سوم با آوردن یک مثال نمونه، نحوه محاسبه قابلیت اطمینان و ایمنی، از روی مدل مارکوف سیستم تشریح می‌شود. در بخش چهارم، قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم‌های پشتیبانی‌شده با رزرو سرد فرموله می‌شوند، رابطه‌ای کلی برای این دو ویژگی، ارائه و صحت فرمول‌های ارائه‌شده اثبات می‌شود. بخش پنجم اثر افزایش تعداد رزورها، کیفیت سوئیچ، میزان خرابی و احتمال خرابی ایمن بر قابلیت اطمینان و ایمنی را بررسی می‌کند.

مروری بر کارهای گذشته

مرجع [۱۴] در دسترس پذیری، میانگین زمان تا خرابی و قابلیت اطمینان سیستم با دو رزرو سرد را با فرض ثابت بودن میزان خرابی و پیروی میزان تعمیر از توزیع ارلانگ به دست آورد و نزدیکی نتایج خود با توزیع نرمال را بررسی کرد. مرجع [۱۵] با در نظر گرفتن سیستمی با دو جزء غیرمشابه و رزرو سرد و با فرض اینکه تنها یک تعمیرکار وجود داشته باشد و میزان خرابی و تعمیر از تابع توزیع نمایی پیروی کند، به محاسبه قابلیت اطمینان، در دسترس پذیری، میانگین زمان تا اولین خرابی، میزان وقوع خرابی و احتمال تنبلی تعمیرکار پرداخت. سپس با حل مسئله بهینه‌سازی، بهترین راهبرد تعمیر برای کمینه‌سازی هزینه‌ها را بررسی کرد. مدل اتفاقی شبکه پتری برای سیستم با افزونگی رزرو سرد به منظور محاسبه

مدار می‌کند.

۵. با معیوب شدن رزرو دوم، سیستم از کار می‌افتد. این ساختار را می‌توان برای N رزرو گسترش داد که در این صورت، طراح باید با در نظر گرفتن مصالحه‌ای بین قیمت، ابعاد، وزن، پیچیدگی در سیستم و پارامترهای اتکا پذیری، تعداد بهینه رزورها را مشخص کند. رزرو سرد به دلیل داشتن قابلیت اطمینان بالاتر از رزرو گرم، در صنعت کاربرد بیشتری دارد. در زیر به بعضی از این کاربردها اشاره می‌شود.



شکل ۱. ساختار ساده سیستمی با دو رزرو سرد

در مرجع [۷] ساختار یک سیستم کمک‌قلبی که برای پشتیبانی بیماران قلبی به کار می‌رود، معرفی شده است. این سیستم دارای چهار بخش اصلی تحریک، موتور، پردازشگر مرکزی و پمپ‌هاست که در آن، پمپ‌ها را با دو رزرو سرد و پردازشگر مرکزی را با یک رزرو ولرم طراحی کرده‌اند تا اتکا پذیری سیستم را بالا ببرند.

در یک شبکه سنسوری بی‌سیم، مطابق با آنچه در مرجع [۸] آمده است، از رزرو سرد و گرم برای بهبود قابلیت اطمینان استفاده شده است. یک شبکه سنسوری را به دو بخش ایستگاه مرکزی و تعدادی خوشه تقسیم کرده‌اند که در آن، برای ایستگاه مرکزی از رزرو گرم و برای سرگروه هر خوشه، از رزرو سرد در جهت افزایش قابلیت اطمینان استفاده کرده‌اند.

از دیگر نمونه‌های کاربرد رزرو سرد می‌توان به استفاده از آن در سیستم کنترل زبانه احتراق بدنه موشک اشاره کرد که قسمت حلقه‌های کنترلی آن از رزرو سرد استفاده می‌کند [۹]. مثال دیگر، سیستم ارتباطات و کنترل مأموریت‌های هوایی است که در آن، برای جلوگیری از تأثیرگذاری خطا بر مدیریت مأموریت، از رزرو گرم و سرد به عنوان پشتیبان استفاده شده است. از رزرو سرد در قسمت ماجول CPU، ماجول‌های حافظه و ماجول مدیریت

آن، روابط دیفرانسیلی هستند. این درحالی است که پژوهش حاضر، احتمال عملکرد سوئیچ را در نظر می‌گیرد و روابطی ساده و جبری را ارائه می‌کند. مرجع [۲۴] فرمولی پارامتریک و جامع برای ارزیابی قابلیت اطمینان و در دسترس پذیری رزرو سرد ارائه کرد. مرجع [۲۵] برای نخستین بار مدل شبه مارکوف گیت رزرو سرد در درخت عیب دینامیکی را ارائه کرد و گیت‌های دینامیکی جدیدی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌هایی با پیکره‌بندی مجدد و رزرو سرد در درخت عیب دینامیکی مطرح ساخت. مرجع [۲۶] روشی سیستماتیک برای رسم مدل مارکوف سیستم‌هایی با قابلیت پیکره‌بندی مجدد و حمایت رزرو سرد ارائه داد. مرجع [۲۷] با هدف کمینه‌سازی هزینه سیستم‌های 1-out-of-N با حمایت رزرو سرد و گرم را بررسی کرد. این پژوهش، تخمین گسسته‌ای از تابع توزیع زمان تا خرابی^۹ را فرموله ساخت و با استفاده از روش‌های عددی، به بهینه‌سازی هزینه و قابلیت اطمینان در کنار یکدیگر پرداخت. پژوهش حاضر، موضوع هزینه و رزرو گرم را در نظر نمی‌گیرد و رابطه‌ای که ارائه می‌دهد، تحلیلی و دقیق است. بررسی مراجع فوق نشان می‌دهد که تاکنون رابطه‌ای جامع و تحلیلی برای ارزیابی ایمنی سیستم‌های حمایت‌شده با رزرو ارائه نشده است.

ارزیابی قابلیت اطمینان و ایمنی از روی مدل مارکوف

در این پژوهش، قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم رزرو سرد، از روی مدل مارکوف سیستم محاسبه می‌شود. از میان روش‌های موجود برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها نظیر بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان، درخت عیب، مونت کارلو و مارکوف، مدل مارکوف به این جهت انتخاب شده است که روشی تحلیلی است و از قابلیت مدل‌سازی بالا نظیر لحاظ کردن پیکره‌بندی مجدد، وابستگی عملیاتی، ترتیب و توالی و اولویت برخوردار است. به علاوه، نظریه مارکوف امکان در نظر گرفتن انواع توزیع آماری را برای میزان خرابی و میزان تعمیر سیستم در محاسبه فراهم می‌کند. در این بخش، برای یک سیستم پشتیبانی‌شده با دو رزرو سرد، با رسم مدل مارکوف، قابلیت اطمینان و ایمنی محاسبه می‌شود تا در بخش بعدی پژوهش بتوان آن‌ها را به درستی با N رزرو تعمیر داد.

اتکاپذیری سیستم در مرجع [۱۶] ارائه شده است. در این مقاله، پارامترهایی نظیر قابلیت اطمینان، در دسترس پذیری، میانگین زمان خرابی، میانگین زمانی تعمیر و قابلیت بقا ارزیابی شده است. مرجع [۱۷] با فرض یکسان بودن اجزای سیستم و ایده‌آل بودن سوئیچ، فرمولی برای محاسبه هزینه نسبت به زمان راه‌اندازی هر جزء در سیستم با افزونگی سرد ارائه داده است. مقاله مزبور، با یک مثال فواید روش خود را اثبات کرده است. مدل مارکوف ایمنی سیستمی، با دو رزرو سرد در مرجع [۱۸] ارائه و ایمنی سیستم ارزیابی شده است. در پژوهش فوق، نقش رزرو سرد در ساختار نرم‌افزاری و ضرورت افزایش ایمنی آن بیان شده است. ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم رزرو سرد از طریق درخت‌های عیب دینامیکی و با استفاده از دیاگرام‌های سلسله‌مراتبی تصمیم‌گیری دودویی در مرجع [۱۹] آمده است. این پژوهش، ارزیابی قابلیت اطمینان با استفاده از روش‌های فضای حالت یا شبیه‌سازی را در سیستم‌های بدون تعمیر وقت‌گیر دانست و این روش را راهکاری برای ارزیابی سریع‌تر این سیستم‌ها اعلام کرد. مرجع [۲۰] به محاسبه میانگین زمانی سیستم k -out-of- N با یک رزرو سرد و فرض اینکه میزان خرابی از تابع توزیع پواسون پیروی کند، پرداخت و نتایج عددی خود را با نتایج عددی حاصل از فرض پیروی میزان خرابی از توزیع ویبال مقایسه کرد. مرجع [۲۱] از طریق شبکه پتری، مدلی متفاوت از رزرو سرد ارائه کرد و به بیان کاربردهای سیستم‌هایی با افزونگی رزرو سرد در شبکه‌های کامپیوتری تجاری پرداخت. مرجع [۲۲] به ارائه یک رابطه تخمینی مبتنی بر تئوری حد مرکزی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های حمایت‌شده با رزرو سرد پرداخت. از مزایای رابطه پیشنهادی می‌توان به امکان ارزیابی سیستم‌هایی با تابع توزیع غیرنمایی اشاره کرد. در رابطه مقاله حاضر، احتمال عملکرد سوئیچ لحاظ شده است. رابطه تخمینی نیست، به صورت تحلیلی به دست می‌آید و ضعف آن نسبت به مقاله مذکور این است که در آن، تابع توزیع خرابی، نمایی فرض شده است. مرجع [۲۳] با تأکید بر مسئله تخصیص افزونگی و قابلیت اطمینان، به ارائه راهکاری نوین برای بهینه‌سازی این مسئله پرداخته است. این مرجع، روابط خود را از نظریه احتمالات به دست آورد که در آن، روابط و احتمال عملکرد سوئیچ لحاظ نشده است و علاوه بر

روابط ۶ تا ۸ به دست می‌آید و قابلیت اطمینان سیستم، مطابق رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda_0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_0 & -\lambda_0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_0 & -\lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P_p(0)=1, P_{s_2}(0)=0, P_{s_1}(0)=0, P_f(0)=0 \quad (4)$$

$$(sI - A) \times P(s) = P(0) \quad (5)$$

$$P_p(s) = \frac{1}{s + \lambda} \Rightarrow P_p(t) = e^{-\lambda t} \quad (6)$$

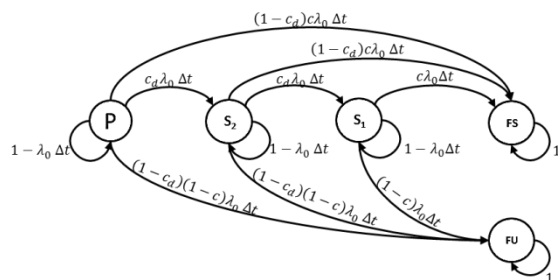
$$P_{S_1}(s) = \frac{\lambda}{(s + \lambda)^2} \Rightarrow P_{S_1}(t) = \lambda t e^{-\lambda t} \quad (7)$$

$$P_{S_2}(s) = \frac{\lambda^2}{(s + \lambda)^3} \Rightarrow P_{S_2}(t) = \frac{\lambda^2 t^2}{2!} e^{-\lambda t} \quad (8)$$

$$R_{CS-2} = P_p + P_{S_1} + P_{S_2} = (1 + \lambda t + \frac{\lambda^2 t^2}{2!}) e^{-\lambda t} \quad (9)$$

ساخت مدل مارکوف ایمنی

شکل ۳ مدل مارکوف ایمنی سیستم با دو رزرو سرد را نشان می‌دهد. در این مدل، سه حالت کاری و دو حالت خرابی برای سیستم در نظر گرفته می‌شود که این دو حالت، شامل حالت خرابی ایمن و خرابی غیرایمن است. از هر حالت کاری، به جز حالت آخر با احتمال c_d مدار تشخیص عیب و سوئیچ عمل می‌کند و به حالت بعدی گذر می‌کند. در صورتی که مدار سوئیچ درست عمل نکند، با احتمال $(1-c)$ به حالت $(I-c)$ خرابی ایمن و با احتمال $(1-c_d)(1-c)$ به حالت خرابی غیرایمن می‌رود. در حالت آخر، احتمال عملکرد سوئیچ بی‌تأثیر است و حذف می‌شود.



شکل ۳. مدل مارکوف ایمنی سیستم با دو رزرو سرد

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم با رزرو سرد با استفاده از مدل مارکوف

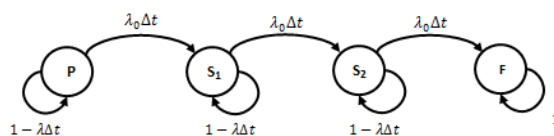
به منظور سهولت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم حمایت‌شده با رزرو سرد از روی مدل مارکوف آن، فرض می‌شود که سوئیچ ایده‌آل باشد.

ساخت مدل مارکوف قابلیت اطمینان

شکل ۲ بیانگر مدل مارکوف قابلیت اطمینان یک سیستم با دو رزرو سرد است. در رسم این مدل، فرض شده است که میزان خرابی ماجول‌ها از تابع توزیع نمایی تبعیت می‌کند. از این‌رو، می‌توان احتمال گذر حالت‌ها را- که با معادله ۱ در زیر بیان می‌شود- با توجه به کوچک‌بودن λ و Δt با معادله ۲ تقریب زد.

$$P = 1 - e^{-\lambda \Delta t} \quad (1)$$

$$P \cong \lambda \Delta t \quad (2)$$



شکل ۲. مدل مارکوف قابلیت اطمینان سیستم با دو رزرو سرد

مدل دارای چهار حالت است؛ حالت P (تنها ماجول اولیه کار می‌کند و رزروها در حالت انتظارند)، حالت S_1 (ماجول اولیه معیوب شده و رزرو اول وارد مدار شده است)، حالت S_2 (رزرو اول معیوب شده و رزرو دوم وارد مدار شده است) و حالت F (سیستم از کار افتاده است). در این مدل فرض می‌شود که سیستم از حالت P شروع به کار کند و با وقوع عیب در ماجول P و تشخیص درست آن سیستم، روی رزرو اول سوئیچ می‌کند. با وقوع عیب در رزرو اول، سیستم به حالت S_2 سوئیچ می‌کند و با وقوع عیبی دیگر در این رزرو، سیستم به‌طور کامل از کار می‌افتد.

حل مسئله قابلیت اطمینان

از روی مدل مارکوف شکل ۲، ماتریس گذر حالت پیوسته رابطه ۳ حاصل می‌شود. با فرض شرایط اولیه به صورت رابطه ۴ و استفاده از رابطه ۵، احتمال هر حالت به صورت

قابلیت اطمینان سیستم با N رزرو سرد با سوئیچ ایده‌آل

یکی از موارد بررسی اتکاپذیری یک سیستم، ارزیابی قابلیت اطمینان آن است. در این بخش، فرمولی بسته برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم با N رزرو سرد ارائه می‌شود. شایان ذکر است که در پژوهش‌های پیشین، برای قابلیت اطمینان یک سیستم با تعداد محدود رزرو سرد (تا سه رزرو) روابطی ارائه شده است [۱]، اما برای حالتی که تعداد رزورها N فرض شده و وضعیت سوئیچ (ایده‌آل یا غیرایده‌آل بودن) نیز لحاظ شده باشد، رابطه‌ای برای قابلیت اطمینان وجود ندارد؛ شاید به این دلیل که در صنعت، عموماً تعداد رزورها به ندرت از دو افزایش می‌یابد. شکل ۴ نشان‌دهنده یک سیستم رزرو سرد با N رزرو و سوئیچ ایده‌آل است. روابط ۱۹، ۲۰ و ۲۱، به ترتیب برای سیستم با یک، دو و سه رزرو سرد به دست می‌آید.



شکل ۱. مدل مارکوف قابلیت اطمینان سیستم رزرو سرد

$$R_{CS-1}(t) = (1 + \lambda t) e^{-\lambda t} \quad (19)$$

$$R_{CS-2} = \left(1 + \lambda t + \frac{\lambda^2 t^2}{2!}\right) e^{-\lambda t} \quad (20)$$

$$R_{CS-2} = \left(1 + \lambda t + \frac{\lambda^2 t^2}{2!} + \frac{\lambda^3 t^3}{3!}\right) e^{-\lambda t} \quad (21)$$

با ارزیابی سه معادله بالا، رابطه بسته ۲۲ به دست می‌آید که در آن، S بیانگر تعداد کل رزورهاست. این رابطه، با فرض ایده‌آل بودن سوئیچ به دست آمده است. با فرض اینکه احتمال خرابی سوئیچ باشد، رابطه ۲۲ به صورت رابطه کلی تر ۲۳ بازنویسی می‌شود.

$$R_{CS-S} = \left(\sum_{n=0}^S \frac{\lambda^n t^n}{n!}\right) e^{-\lambda t} \quad (22)$$

$$R_{CS-S} = \left(\sum_{n=0}^S \frac{c_d^n \lambda^n t^n}{n!}\right) e^{-\lambda t} \quad (23)$$

حل مسئله ایمنی

با توجه به مدل مارکوف در شکل ۳، ابتدا مفروضات رابطه ۱۰ در نظر گرفته می‌شود و سپس ماتریس‌های انتقال حالت، به صورت رابطه ۱۱ نوشته می‌شود. با فرض شرایط اولیه به صورت رابطه ۱۲ و حل معادله‌ها می‌توان احتمال هر حالت را به صورت روابط ۱۳ تا ۱۶ بیان کرد. از روی این روابط، ایمنی سیستم با دو رزرو به صورت رابطه ۱۸ قابل محاسبه است.

$$c(1-c_d)\lambda\Delta t \rightarrow f, (1-c)(1-c_d)\lambda\Delta t \rightarrow g \quad (10)$$

$$\dot{P} = \begin{bmatrix} -\lambda & c_d\lambda & 0 & f' & g' \\ 0 & -\lambda & c_d\lambda & f' & g' \\ 0 & 0 & -\lambda & c\lambda & (1-c)\lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$P_P(0) = 1, P_{S_2}(0) = 0, P_{S_1}(0) = 0, P_{FS}(0) = 0, P_{FU}(0) = 0 \quad (12)$$

$$P_P = \frac{1}{s + \lambda} \Rightarrow e^{-\lambda t} \quad (13)$$

$$P_{S_1} = \frac{b}{(s + \lambda)^2} \Rightarrow c_d \lambda t e^{-\lambda t} \quad (14)$$

$$P_{S_2} = \frac{b^2}{(s + \lambda)^3} \Rightarrow \frac{c_d^2 \lambda^2 t^2}{2!} e^{-\lambda t} \quad (15)$$

$$P_{FS} = (c - cc_d)(1 - e^{-\lambda t}) + (c_d - cc_d^2)(1 - \lambda t e^{-\lambda t} - e^{-\lambda t}) + cc_d^2 \left(1 - \frac{\lambda^2 t^2}{2!} e^{-\lambda t} - \lambda t e^{-\lambda t} - e^{-\lambda t}\right) \quad (16)$$

$$s(t) = P_P + P_{S_1} + P_{S_2} + P_{FS} \quad (17)$$

$$s(t) = c + (1-c) \left(\frac{c_d^2 \lambda^2 t^2}{2!} + c_d \lambda t + 1 \right) e^{-\lambda t} \quad (18)$$

فرموله کردن قابلیت اطمینان و ایمنی

سیستم‌های دارای رزرو سرد

این بخش، روابطی جامع برای ارزیابی قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم‌های حمایت‌شده با N رزرو سرد را ارائه می‌دهد.

اثبات صحت رابطه قابلیت اطمینان

برای اثبات درستی رابطه ۲۲ از اصل استقرا استفاده می‌کنیم. از بحث بالا پیداست که افزودن رزرو z ، جمله $\lambda^j t^j / j!$ را به قابلیت اطمینان سیستم اضافه می‌کند. رابطه ۲۴ برای یک رزرو به صورت زیر است که درستی آن براساس منابع و مراجع موجود، ثابت شده است [۶].

$$R_{CS-1}(t) = \frac{\lambda^0 t^0}{0!} e^{-\lambda t} + \frac{\lambda t}{1!} e^{-\lambda t} = (1 + \lambda t) e^{-\lambda t} \quad (24)$$

حال فرض می‌کنیم رابطه ۲۴ برای تعداد k رزرو درست باشد. باید اثبات کنیم که این رابطه برای $k+1$ رزرو نیز درست است. برای k رزرو رابطه ۲۵ نوشته می‌شود.

$$R_{CS-k}(t) = \sum_{i=0}^k \frac{\lambda^i t^i}{i!} e^{-\lambda t} \quad (25)$$

افزودن رزرو $k+1$ ام معادل افزودن جمله $\lambda^{k+1} t^{k+1} / (k+1)!$ به عبارت $R_{CS-k}(t)$ است؛ بنابراین، رابطه ۲۶ قابل ارائه است:

$$R_{CS-k}(t) + \frac{\lambda^{k+1} t^{k+1}}{(k+1)!} e^{-\lambda t} = R_{CS-(k+1)} \quad (26)$$

حاصل طرف راست رابطه اخیر، با استفاده از رابطه ۲۵

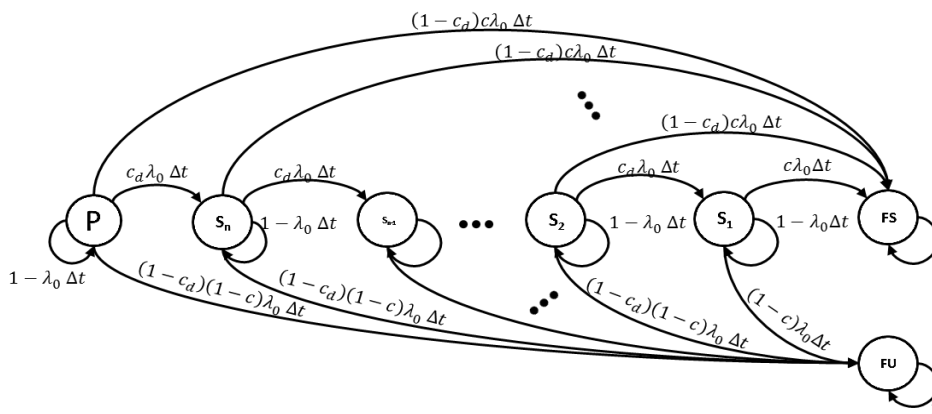
برابر است با رابطه ۲۷ که در زیر آمده است:

$$R_{CS-(k+1)}(t) = \sum_{i=0}^k \frac{\lambda^i t^i}{i!} e^{-\lambda t} + \frac{\lambda^{k+1} t^{k+1}}{(k+1)!} e^{-\lambda t} = \sum_{i=0}^{k+1} \frac{\lambda^i t^i}{i!} e^{-\lambda t} \quad (27)$$

در رابطه ۲۷، با تغییر متغیر $k' = k + 1$ رابطه ۲۲ به دست می‌آید که درستی آن در ابتدای اثبات، محرز فرض شده است. بدین ترتیب، صحت رابطه ۲۲ اثبات می‌شود.

ایمنی سیستم با N رزرو سرد با سوئیچ ایده‌آل

شکل ۵ مدل مارکوف ایمنی سیستمی با S رزرو را نشان می‌دهد. روابط ۲۸، ۲۹ و ۳۰ ایمنی سیستم را به‌ازای یک، دو و سه رزرو نشان می‌دهند. با توجه به معادله‌های به‌دست آمده می‌توان رابطه‌ای کلی برای ارزیابی ایمنی سیستمی با S رزرو یا N ماجول به‌دست آورد. رابطه ۳۱ نتیجه نهایی را نشان می‌دهد. درستی این روابط نیز مانند روابط قابلیت اطمینان و به‌روش استقرای ریاضی اثبات‌شده است.



شکل ۵. مدل مارکوف ایمنی سیستم با یک رزرو سرد

$$S(t) = e^{-\lambda t} (c_d \lambda t + 1) (1 - c) + c \quad (28)$$

$$S(t) = e^{-\lambda t} \left(\frac{c_d^2 \lambda^2 t^2}{2!} + c_d \lambda t + 1 \right) (1 - c) + c \quad (29)$$

$$S(t) = e^{-\lambda t} \left(\frac{c_d^3 \lambda^3 t^3}{3!} + \frac{c_d^2 \lambda^2 t^2}{2!} + c_d \lambda t + 1 \right) (1 - c) + c \quad (30)$$

$$S(t) = \left(\sum_{n=0}^S \frac{(c_d \lambda t)^n}{n!} \right) (1 - c) e^{-\lambda t} + c \quad (31)$$

تحلیل روابط

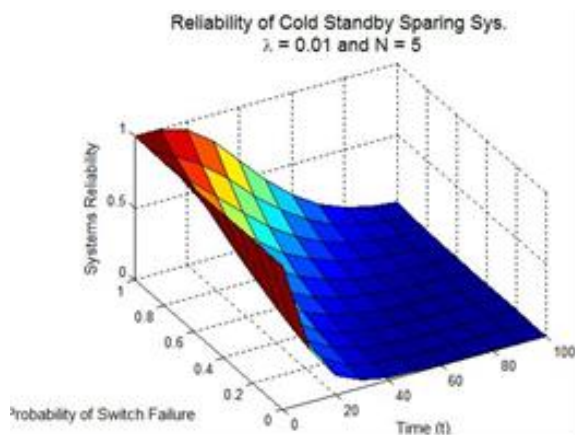
در این بخش، روابط به دست آمده برای ارزیابی قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم با رزرو (های) سرد در سناریوهای مختلف تحلیل می شوند.

تحلیل رابطه قابلیت اطمینان

شکل ۶ منحنی های قابلیت اطمینان سیستم رزرو سرد را در بازه زمانی ۰ تا ۱۵۰، با فرض ایده آل بودن سوئیچ و میزان خرابی ۰/۱ برای تعداد مختلف رزروها (یک تا هفت رزرو) نشان می دهد. شکل ۷ نیز منحنی های قابلیت اطمینان را برای حالتی که احتمال خرابی سوئیچ برابر ۰/۸ باشد، به تصویر کشیده است.

بررسی هر دو شکل نشان می دهد که با افزایش تعداد رزروها، قابلیت اطمینان سیستم بالا می رود. به علاوه، با افزایش احتمال خرابی سوئیچ (کاهش کیفیت آن) قابلیت اطمینان سیستم کاهش می یابد. با بررسی جزئی تر رفتار سیستم می توان گفت قابلیت اطمینان سیستم در زمان های اولیه کار، وابستگی بسیاری به کیفیت سوئیچ دارد، اما این وابستگی با گذشت زمان کمتر می شود.

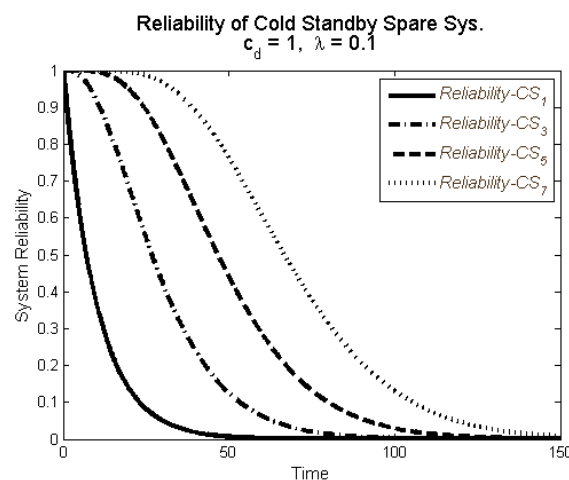
شکل ۸ قابلیت اطمینان سیستم حمایت شده از طریق رزرو سرد را نسبت به «گذر زمان» و «تغییرهای احتمال خرابی سوئیچ» نشان می دهد. هرچه در طراحی سیستم، از سوئیچ با کیفیت بالاتری استفاده شود، قابلیت اطمینان، بیشتر افزایش می یابد.



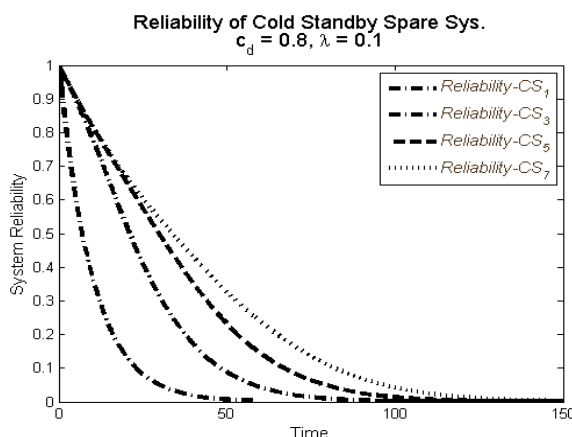
شکل ۸. منحنی سه بعدی قابلیت اطمینان سیستم حمایت شده با رزرو سرد نسبت به تغییرهای زمان و احتمال خرابی سوئیچ

شکل ۹ رفتار قابلیت اطمینان سیستم رزرو سرد را نسبت به تغییرهای «تعداد رزروها» و «احتمال خرابی سوئیچ» نشان می دهد. از روی این منحنی می توان دریافت که برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم، افزایش کیفیت کار سوئیچ از افزایش تعداد رزروها مهم تر و کارا تر است. به عبارت دیگر، برای طراحی سیستمی مطمئن تر، بهتر است ابتدا سازوکار سوئیچ با کیفیت تری انتخاب شود و اگر مقصود حاصل نشد، تعداد رزروها افزایش یابد تا هزینه کمتری به طراحی تحمیل شود.

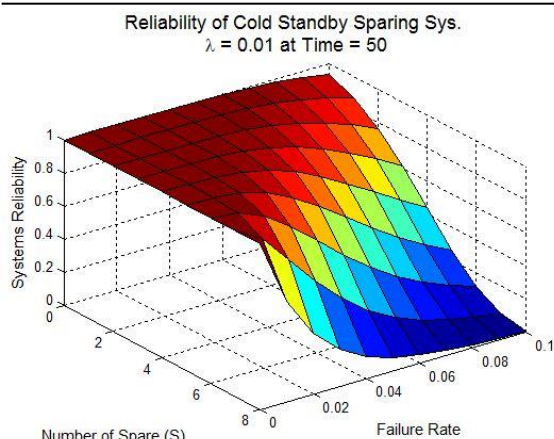
با استفاده از روابط به دست آمده در این پژوهش، می توان منحنی قابلیت اطمینان سیستم حمایت شده با



شکل ۶. منحنی قابلیت اطمینان سیستم حمایت شده با رزرو سرد و با فرض ایده آل بودن سیستم سوئیچ

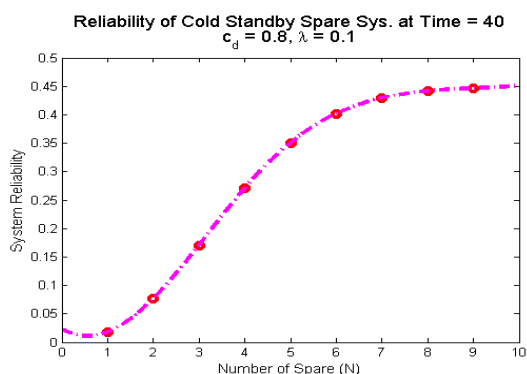


شکل ۷. منحنی قابلیت اطمینان سیستم حمایت شده با رزرو سرد و با فرض غیر ایده آل بودن سیستم سوئیچ



شکل ۱۱. دیاگرام قابلیت اطمینان برحسب تعداد رزرو و تغییرهای میزان خرابی رزورها

برای بررسی دقیق‌تر رابطه قابلیت اطمینان با تعداد رزورها (از روی رابطه ۲۷ مقاله) منحنی شکل ۱۲ رسم شده است. همچنان که انتظار می‌رود، افزایش تعداد رزورها همواره قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهد، اما این روند خطی نیست و برای تعداد بیش از پنج رزرو، میزان افزایش قابلیت اطمینان چشمگیر به نظر نمی‌رسد. این بدان معناست که از دیدگاه قابلیت اطمینان، درقبال سربارهای ایجادشده (شامل هزینه، اندازه، مصرف انرژی، وزن و پیچیدگی طراحی) به‌کارگیری تعداد بیش از پنج رزرو در سیستم به‌صلاح نیست. شاید علت اینکه در صنعت، به‌ندرت تعداد رزورها از چهار تجاوز می‌کند، ناشی از این موضوع است.

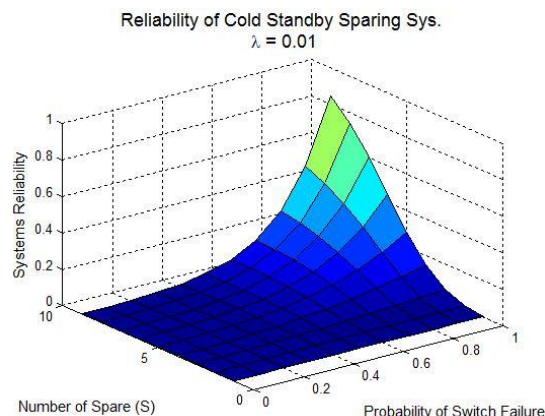


شکل ۱۲. قابلیت اطمینان سیستم در زمان ثابت برای تعداد متفاوت رزرو

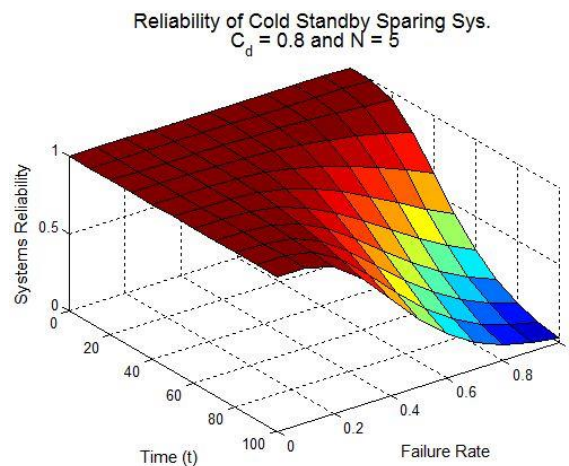
تحلیل رابطه ایمنی

در این بخش، به تحلیل رابطه به‌دست‌آمده برای ایمنی سیستم رزرو سرد و تأثیر پارامترهای طراحی سیستم بر آن پرداخته می‌شود. شکل ۱۳ تأثیر افزودن تعداد رزورها

رزرو سرد را در «گذر زمان» و نسبت به «تغییرهای میزان خرابی رزورها» به‌صورت شکل ۱۰ رسم کرد. افزایش تعداد رزورها موجب بهبود بسیار قابلیت اطمینان سیستم می‌شود؛ مشروط به آنکه میزان خرابی رزورها به‌اندازه کافی کوچک باشد و ماجول‌های سیستم با کیفیت بالایی ساخته شده باشند.



شکل ۹. دیاگرام قابلیت اطمینان سیستم حمایت‌شده با رزرو سرد نسبت به تغییرهای تعداد رزرو و احتمال خرابی سوئیچ

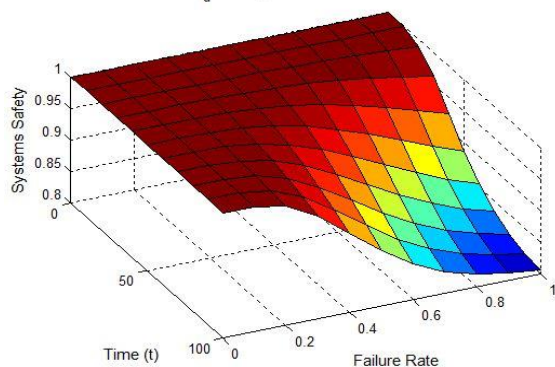


شکل ۱۰. دیاگرام قابلیت اطمینان سیستم حمایت‌شده با رزرو سرد برحسب تغییرهای زمان و احتمال خرابی ماجول‌ها

با ترسیم قابلیت اطمینان سیستم حمایت‌شده با رزرو سرد نسبت به «تغییرهای میزان خرابی رزورها» و «تعداد رزورها» می‌توان منحنی شکل ۱۱ را رسم کرد. این منحنی، برای طراح سیستم دید خوبی را در زمینه رابطه قابلیت اطمینان سیستم و تعداد رزورها و نیز میزان خرابی آن‌ها عرضه می‌کند.

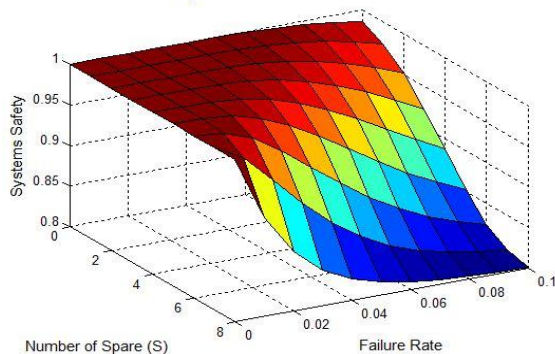
افزایش «تعداد رزروها» و کاهش «میزان خرابی رزروها» هر دو قادر به بالابردن ایمنی سیستم هستند. با نگاه دقیق تر به شکل فوق می توان دریافت که افزایش «تعداد رزروها» نسبت به کاهش «میزان خرابی رزروها» تأثیر بیشتری بر افزایش ایمنی یک سیستم دارد. در نتیجه، در صورتی که «میزان خرابی رزروها» در حد قابل قبولی باشد، به منظور افزایش ایمنی سیستم، افزایش «تعداد رزروها» مؤثرتر است. منحنی شکل ۱۵، تغییرهای ایمنی سیستم را نسبت به «تغییرهای زمان» و «میزان خرابی رزروها» و منحنی شکل ۱۶ تغییرهای ایمنی را نسبت به تغییرهای «میزان خرابی رزروها» و «تعداد رزروها» نشان می دهند. تحلیل این دو منحنی، مشابه منحنی های متناظر در قسمت مربوط به قابلیت اطمینان است که نشان می دهد رفتار ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم، تشابه زیادی به یکدیگر دارند.

Safety of Cold Standby Sparing Sys.
 $C_d = 0.8, C = 0.8$ and $N = 5$



شکل ۱۵. دیاگرام ایمنی سیستم حمایت شده با رزرو سرد نسبت به تغییرهای میزان خرابی سیستم و تعداد رزرو در سیستم با فرض ثابت بودن احتمال خرابی ایمن و احتمال خرابی سوئیچ

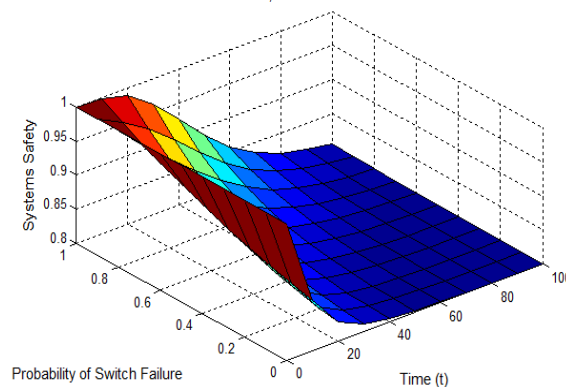
Safety of Cold Standby Sparing Sys.
 $C_d = 0.8, C = 0.8$ at Time = 50



شکل ۱۶. دیاگرام ایمنی سیستم حمایت شده با رزرو سرد نسبت به تغییرهای میزان خرابی سیستم و تعداد رزرو در سیستم با فرض ثابت بودن احتمال خرابی ایمن و احتمال خرابی سوئیچ

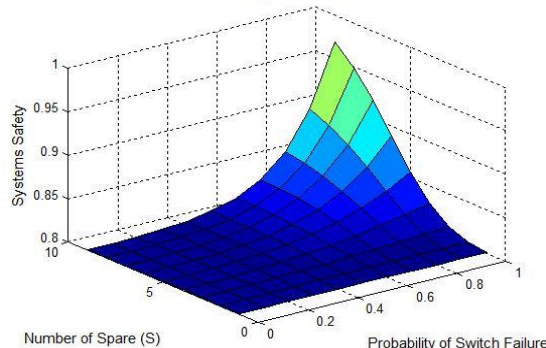
را بر ایمنی سیستم با فرض احتمال های مختلف برای عملکرد سازوکار تشخیص عیب و سوئیچینگ نشان می دهد. در این منحنی ها احتمال خرابی ایمن برای سیستم ۰/۸ و مقدار سایر پارامترها نظیر منحنی های قابلیت اطمینان است. این دو منحنی نشان می دهند که تغییرهای ایمنی شباهت زیادی به تغییرهای قابلیت اطمینان سیستم دارد. دیاگرام ایمنی نسبت به «گذر زمان» و «احتمال خرابی سوئیچ» و همچنین دیاگرام ایمنی نسبت به تغییرهای «احتمال خرابی سوئیچ» و «تعداد رزروها» در شکل ۱۴ رسم شده است. این منحنی ها نشان می دهند که رفتار ایمنی در سیستم های حمایت شده با رزرو سرد، مشابه رفتار قابلیت اطمینان آن هاست و موارد ذکر شده در قسمت تحلیل منحنی های قابلیت اطمینان، برای ایمنی نیز صادق است.

Safety of Cold Standby Sparing Sys.
 $\lambda = 0.01, C = 0.8$ and $N = 5$



شکل ۱۳. دیاگرام ایمنی سیستم حمایت شده با رزرو سرد نسبت به تغییرهای زمان و احتمال خرابی سوئیچ با فرض ثابت بودن احتمال عملکرد ایمن سیستم

Safety of Cold Standby Sparing Sys.
 $\lambda = 0.01$ and $C = 0.8$

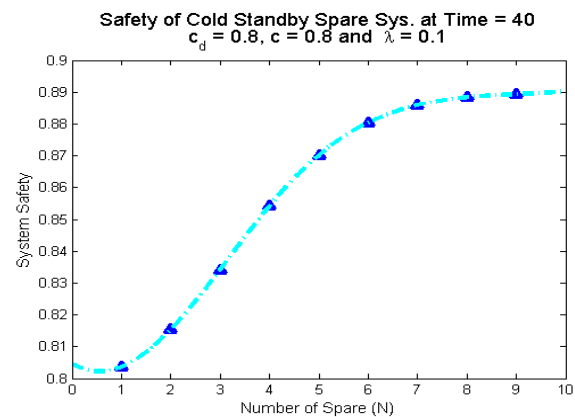


شکل ۱۴. دیاگرام ایمنی سیستم حمایت شده با رزرو سرد نسبت به تغییرهای احتمال خرابی سوئیچ و تعداد رزرو با فرض ثابت بودن احتمال عملکرد ایمن سیستم

نتیجه‌گیری

در گروه بزرگی از صنایع، طراحی سیستم‌هایی با قابلیت تحمل پذیری بالا در مقابل عیوب و خطاها اجتناب‌ناپذیر است. این کار سبب پایین آمدن هزینه‌های نگهداری و کاهش آسیب‌های جانی و مالی ناشی از بروز عیب در سیستم می‌شود. در این موارد، داشتن سیستم‌هایی با قابلیت اطمینان و ایمنی بالا مورد نظر است. در این پژوهش، برای بالابردن این دو ویژگی، ساختار رزرو سرد به کار رفت و فرمول جامعی برای قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم‌های پشتیبانی‌شده با رزرو سرد ارائه شد. روابط عرضه‌شده در سناریوهای مختلف بررسی شدند و اثر پارامترهای طراحی روی نتایج آن‌ها مطالعه و در قالب دیاگرام‌های مختلف عرضه شد. این نتایج برای طراحان چنین سیستم‌هایی، دید خوبی را از بابت انتخاب تعداد رزروها، انتخاب خود رزروها (از دیدگاه حدود میزان خرابی)، انتخاب سازوکار تشخیص عیب و سوئیچینگ به‌ارمغان می‌آورد.

شکل ۱۷ نیز منحنی ایمنی سیستم را نسبت به تغییر «تعداد رزروها» در هر لحظه خاص از زمان نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که نظیر بحث‌های قابلیت اطمینان، افزایش تعداد رزروها ایمنی سیستم را به صورت غیرخطی بهبود می‌دهد و بنابراین، باید همواره مصالحه‌ای بین تعداد رزروها و سربارهای ناشی از افزایش آن‌ها از سوی طراح سیستم ایجاد شود. از دیدگاه ایمنی نیز به‌کارگیری تعداد بیش از پنج یا شش رزرو در ازای افزایش سربارهای ایجادشده برای سیستم (شامل هزینه، اندازه، مصرف انرژی، وزن و پیچیدگی طراحی) مطلوب نیست.



شکل ۱۷. ایمنی سیستم در زمان ثابت برای تعداد متفاوت رزرو

مراجع

- Ahmad, S. H. (1985). "Reliability of a 3-Unit Cold Redundant System with Weibull Failure." *Microelectronics Reliability*, Vol. 25, No.2, PP. 325-330.
- Amari, S. and Dill, G. (2009). "A New Method for Reliability Analysis of Standby Systems." *Reliability and Maintainability Symposium*, Fort Worth, TX: Annual Reliability and Maintainability Symposium. PP. 417 - 422
- Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B. and Landwehr, C. (2004). "Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing." *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, Vol. 1, No. 1, PP. 11 - 33.
- Chandrasekhar, P., Natarajan, K. and Yadavalli, V. S. (2004). A "Study on a Two Unit Standby System with Relangian Erlanian Repair Time." *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, Vol. 21, No. 3, PP. 271-277.
- Coit, D. W. (2001). "Cold-Standby Redundancy Optimization for Nonrepairable Systems." *Institute of Industrial Engineers (IIE) Transactions*, Vol. 33, No. 6, PP. 471-478.
- Dubrova, E. (2013). *Fault-Tolerant Design*. New York Heidelberg Dordrecht London, United States of America, UK: Springer.
- Dugan, J. B., Bavuso, S. J. and Boyd, M. A. (1992). "Dynamic Fault-Tree Models for Fault-Tolerant Computer Systems." *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 41, No. 3, PP. 363 - 377.

8. Guimarães, A. P., Maciel, P. R. and Matias Jr., R. (2013). "An Analytical Modeling Framework to Evaluate Converged Networks Through Business-Oriented Metrics." *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 118, No.0, PP. 81–92.
9. Hoang, T., Ross, J., Doyle, S., Rea, D., Chan, E., Neiderer, W. and Bumgarner, A. (2007). "A Radiation Hardened 16-Mb SRAM for Space Applications." *Aerospace Conference* (PP. 1-6). Big Sky, MT: Aerospace Conference.
10. Hsu, Y.-T. and Hsu, C.-F. (1991). "Novel Model of Intermittent Faults for Reliability and Safety Measures in Long-Life Computer Systems." *International Journal of Electronics*, Vol. 71, No. 6, PP. 917-937.
11. Jia, J. and Wu, S. (2009). "Optimizing Replacement Policy for a Cold-Standby System with Waiting Repair Times." *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 214, No. 1, PP. 133–141.
12. Kumar, A. and Agarwal, M. (1980). "A Review of Standby Redundant Systems." *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 29, No. 4, PP.290 - 294.
13. Liu, S., Xu, Z., Chen, G. and Hu, X. (2009). "Dependability Research of Standby System Based on Stochastic Petri Net." *International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*. Wuhan, Hubei.
14. Xing, L. and shrestha, A. (2006). "QoS Reliability of Hierarchical Clustered Wireless Sensor Networks." *25th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference. IPCCC 2006* (PP. 6 - 646). Phoenix, AZ: 25th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, IPCCC 2006..
15. Xing, L., Tannous, O. and Bechta Dugan, J. (2012). "Reliability Analysis of Nonrepairable Cold-Standby Systems Using Sequential Binary Decision Diagrams." *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, Vol. 42, No. 3, PP. 715 - 726.
16. Yearout, R. D., Reddy, P. and Grosh, D. L. (1986). "Standby Redundancy in Reliability - A Review." *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 35, No. 3, PP. 285 - 292.
17. Yearout, R., Reddy, P. and Lloyd Grash, D. (1986, August). "Standby Redundancy in Reliability - A Review." *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 35, No. 3, PP. 285 - 292.
18. Yuan, J. and Long, Y. (2010). "The Missile Flight Control System Reliability Analysis Based on Hybrid fault Trees." *2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR)* (PP. 158-160). Wuhan: 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics.
19. Zhang, K., Bedette, G. and DeMara, R. (2006). "Triple Modular Redundancy with Standby (TMRSB) Supporting Dynamic Resource Reconfiguration." *IEEE Autotestcon* (PP. 690 - 696). Anaheim, CA: Autotestcon.
20. Zhang, Y. L., & Wang, G. J. (2007). "A Deteriorating Cold Standby Repairable System with Priority in Use." *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, No. 1, PP. 278–295.
21. Zhu, H., Zhou, S., Dugan, J. B. and Sullivan, K. (2001). "A Benchmark for Quantitative Fault Tree Reliability Analysis." *Reliability and Maintainability Symposium*. Philadelphia, PA.
22. Wang, C., Xing, L. and Amari, S. V. (2012). "A Fast Approximation Method for Reliability Analysis of Cold-Standby Systems." *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 106, No. 1, PP. 119–126.
23. Latif-Shabgahi, GR., Bahar Gogani, M. and Aslansafat, K. (2013). Formulation the Reliability and Availability of Industrial Systems with Cold Backups. *3th International conference on Reliability*, Tehran, Iran.
24. Aslansafat, K. (2014). A Novel Approach for Reliability and Safety Evaluation of Control Systems with Dynamic Fault Tree. *MSc. Thesis, Abbaspur Campus, Shahid Beheshti University*. Tehran, Iran.
25. Aslansafat, K. and Latif-Shabgahi, G.R. (2013). A New Method in Drawing Reliability Markov Model of

- Reconfigurable TMR Systems with Frequency Formulations. *5th Iranian Conference on Electrical & Electronics Engineering (ICEEE)*, Gonabad, Iran.
26. Ardakan, M. A. and Hamadani, A. Z. (2014). "Reliability–Redundancy Allocation Problem with Cold-Standby Redundancy Strategy." *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 42, No. 1, PP. 107-118.
27. Levitin, G., Xing, L. and Dai, Y. (2014). "Cold vs. Hot Standby Mission Operation Cost Minimization for 1-out-of-N Systems." *European Journal of Operational Research*, Vol. 234, No. 1, PP. 155-162.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Reliability
2. Safety
3. Redundancy
4. Passive Redundancy
5. Active Redundancy
6. Hot Standby Spare
7. Warm Standby Spare
8. Cold Standby Spare
9. Time-To-Failure