



Paper Type: Original Article

Bi-objective Optimization of Active Redundancy Allocation in the Electrical Power Distribution System of a Marine Vessel Considering Load Sharing and a Single Repairman

Maryam Ganji¹, Mahdi Karbasian^{1*} 

¹ Department of Industrial Management and Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran; maryamganji.mg@gmail.com; mkarbasi@mut-es.ac.ir.

Citation:

Received: 03 June 2025

Revised: 05 October 2025

Accepted: 27 November 2025

Ganji, M., & Karbasian, M. (2026). Bi-objective optimization of active redundancy allocation in the electrical power distribution system of a marine vessel considering load sharing and a single repairman. *Journal of Quality Engineering and Management*, 16(1), 15-38.

Abstract

Purpose: The objective of the present study is to determine an optimal configuration in terms of the type and number of components in order to maximize system availability and reduce costs, using an active redundancy allocation strategy, while considering load-sharing capability and the use of maintenance personnel under maintenance and leave policies, in the electrical power distribution system of a marine vessel. In the active redundancy strategy, all additional components and subsystems are operated simultaneously from the start of system operation, and the system fails only when all components have failed.


Methodology: In this study, a bi-objective model is developed for an electrical power distribution system with active redundancy in a marine vessel, where the first objective is minimization of total cost and the second objective is maximization of system availability. System behavior is simulated using a Markov chain and a phase-type distribution, and the model is solved using the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II). Failure of one component affects the failure rates of other components within the same subsystem, leading to an increase in their failure rates. In other words, the problem is analyzed under a load-sharing condition. A single repairman is considered for equipment repair. The maintenance and leave policy is defined such that if a component fails during the repairman's leave period, the leave is terminated and repair of the failed component begins immediately. If another component fails while a component is under repair, it is placed in a repair queue, and the repairman starts repairing the next failed component immediately after completing the repair of the previous one. When the repairman is on leave and no component failure occurs, the repairman may resume the leave period.

Findings: The results of the study identify the optimal combination of the type and number of electrical power distribution panels in each subsystem of the vessel's electrical power distribution system, aimed at increasing system availability and reducing costs through the use of active redundancy. In addition, the results provide the probability of the repairman being busy, which can support managerial decision-making regarding maintenance and leave policies.

Originality/Value: Considering the innovative aspects of the study, the results can be effectively used for engineering analyses, particularly in evaluating system availability, as well as for managerial analyses, including cost estimation and the allocation of maintenance personnel.

Keywords: Active redundancy allocation strategy, Load-sharing, Markov chain, Availability.

 Corresponding Author: mkarbasi@mut-es.ac.ir

 10.48313/jqem.2026.546474.1574



Licensee System Analytics. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



بهینه‌سازی دودهدفه تخصیص افزونگی فعال در سیستم توزیع انرژی الکتریکی در یک

شناور با در نظرگیری اشتراک بار و تعمیرکار واحد

مریم گنجی^۱، مهدی کرباسیان^{۱*}

^۱گروه مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

چکیده

هدف: هدف از پژوهش حاضر، یافتن چیدمان مناسب از نوع و تعداد تجهیزات جهت حداکثر نمودن قابلیت دسترسی و کاهش هزینه‌ها با استفاده از استراتژی تخصیص افزونگی فعال با در نظر گرفتن امکان اشتراک‌گذاری بار و استفاده از نیروی تعمیرکار با سیاست نگهداشت و مرخصی در سیستم توزیع انرژی الکتریکی یک شناور است. در استراتژی فعال، تمام قطعات و اجزای اضافه‌شده به سیستم به‌صورت فعال از زمان شروع به کار سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند و سیستم زمانی خراب می‌شود که تمام اجزا دچار خرابی شده باشند.

روش‌شناسی پژوهش: در پژوهش حاضر یک مدل دو هدفه برای سیستم توزیع انرژی الکتریکی با افزونگی فعال در یک شناور در نظر گرفته شده است که هدف اول آن هزینه کل و هدف دوم آن قابلیت دسترسی است. شبیه‌سازی رفتار سیستم با استفاده از زنجیره مارکوف و توزیع فاز نوع صورت گرفته و برای حل آن از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (*NSGA-II*) استفاده گردیده است. خرابی یک تجهیز بر نرخ خرابی سایر تجهیزات زیرسیستم تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش نرخ خرابی می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر، مساله باحالت اشتراک‌گذاری بار بررسی شده است. یک تعمیرکار نیز برای تعمیر تجهیزات در نظر گرفته شده است. سیاست نگهداشت و مرخصی بدین گونه است که اگر در زمان مرخصی تعمیرکار، تجهیز دیگری دچار خرابی شود، مرخصی تعمیرکار پایان‌یافته و تعمیر تجهیز خراب آغاز می‌گردد. در زمان تعمیر تجهیز خراب نیز اگر تجهیز دیگری دچار خرابی شود، می‌بایست در صف تعمیر قرار گرفته و تعمیرکار بلافاصله پس از اتمام تعمیر تجهیز خراب پیشین، تعمیر تجهیز خراب بعدی را آغاز نماید. زمانی که تعمیرکار در مرخصی است، اگر هیچ تجهیز دیگری دچار خرابی نشود، تعمیرکار می‌تواند مجدداً به مرخصی برود.

یافته‌ها: نتایج حاصل از پژوهش، بهترین ترکیب نوع و تعداد تابلوهای توزیع انرژی الکتریکی در هر زیرسیستم از سیستم توزیع انرژی الکتریکی شناور را جهت افزایش قابلیت دسترسی و کاهش هزینه‌ها با استفاده از افزونگی فعال نشان داده است. همچنین میزان احتمال کار تعمیرکار را جهت اتخاذ تصمیمات مدیریتی در جهت سیاست‌های نگهداشت و مرخصی نشان داده است.

اصالت/ارزش افزوده علمی: با توجه به نوآوری تحقیق، نتایج حاصل از پژوهش می‌تواند جهت تحلیل‌های مهندسی به لحاظ بررسی قابلیت دسترسی و جهت تحلیل‌های مدیریتی در برآورد هزینه‌ها و تخصیص نیروهای تعمیراتی مفید واقع شود.

کلیدواژه‌ها: استراتژی افزونگی فعال، اشتراک‌گذاری بار، زنجیره مارکوف، قابلیت دسترسی.

۱- مقدمه

امروزه مساله بهینه‌سازی قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی از اهمیت ویژه‌ای در صنایع گوناگون برخوردار است؛ زیرا کاهش قابلیت اطمینان سیستم‌ها منجر به خرابی و از کارافتادگی سیستم‌ها، هزینه‌های توقفات، هزینه‌های جانی و مالی و ... می‌گردد. علاوه بر آن قابلیت دسترسی و مدت‌زمان در دسترس بودن سیستم‌ها در زمان‌های موردنیاز نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و می‌بایست تمامی محدودیت‌های و سیاست‌های

نگهداری و تعمیرات به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی گردد که هر سیستم و سامانه از حداکثر قابلیت دسترسی برخوردار باشد تا بتواند مقادیر تقاضای موردنیاز را نیز پاسخ دهد. قابلیت اطمینان یک محصول ارتباط نزدیکی باکیفیت یک محصول دارد و اغلب به‌عنوان زیرمجموعه‌ای از آن در نظر گرفته می‌شود [1]. قابلیت دسترسی نیز شاخص مهمی است که میزان زمان در دسترس را نشان می‌دهد و با استفاده از قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری تعریف می‌شود [2]. قابلیت نگهداری (تعمیرپذیری) نیز یکی از ویژگی‌های طراحی و ساخت محصول است که هدف از انجام آن کاهش زمان تعمیر است.

ماهیت حل مساله قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی یکسان است، با این تفاوت که مفهوم قابلیت دسترسی برای سیستم‌های تعمیرپذیر و قابلیت اطمینان برای سیستم‌های تعمیرناپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های بهینه‌سازی قابلیت اطمینان استفاده از افزونگی است. راهبرد افزونگی فعال بر این فرض استوار است که همه‌ی اجزای افزونه به‌طور هم‌زمان از زمان آغاز کار سیستم شروع به کار می‌کنند، هرچند در هر لحظه تنها یک جز برای عملکرد سیستم موردنیاز است [3]. بدین ترتیب سیستم زمانی دچار خرابی می‌گردد که تمام قطعات فعال از کار افتاده باشد. در سیستم‌های دارای اشتراک‌گذاری بار، در هنگام خرابی یک قطعه، نرخ خرابی دیگر به علت افزایش بار وارد بر آن، افزایش می‌یابد. بدین ترتیب، در سیستمی با افزونگی فعال و امکان اشتراک‌گذاری بار، در هنگام خرابی یک قطعه، فشار و بار بر روی سایر قطعات بیشتر شده و نرخ خرابی قطعات دیگر افزایش می‌یابد و نهایتاً سیستم زمانی از کار می‌افتد که تمام قطعات فعال آن دچار خرابی شده باشد. اسزسزیپالا و همکاران [4] به بررسی مساله بهینه‌سازی قابلیت دسترسی تک هدفه با استفاده از استراتژی افزونگی ذخیره سرد، گرم و داغ مورد پرداختند. در پژوهش انجام‌گرفته، ماهیت قطعات تعمیرپذیر بوده و رابطه‌ی اشتراک‌گذاری بار وجود نداشته و نرخ خرابی و نرخ تعمیر قطعات ثابت در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی با استفاده از زنجیره‌ی مارکوف و پژوهش فوق با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد حل قرار گرفته و نتایج پژوهش حاکی از آن است که تخصیص افزونگی با استفاده از استراتژی آماده به‌کار سرد قابلیت دسترسی بالاتری را برای سیستم فراهم می‌آورد.

بدین ترتیب، در پژوهش‌های اخیر انجام‌گرفته، مساله قابلیت دسترسی با استفاده از تخصیص افزونگی فعال و رابطه‌ی اشتراک‌گذاری بار و وجود یک تعمیرکار باسیاست نگهداشت و مرخصی مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا پژوهش حاضر با مطالعه‌ی موردی بر روی یک شناور انجام‌گرفته است. سیستم توزیع انرژی الکتریکی، یکی از اصلی‌ترین سیستم‌های شناور است که وظیفه‌ی تامین انرژی الکتریکی کل شناور را به جهت حرکت شناور و فعالیت سایر سیستم‌ها بر عهده دارد. تابلوهای توزیع انرژی الکتریکی نیز از اصلی‌ترین اجزای سیستم توزیع انرژی الکتریکی هستند که وظیفه‌ی برق‌رسانی به مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی نظیر سیستم رانش و... را بر عهده دارند. بدین ترتیب می‌بایست چندین تابلوی توزیع انرژی به‌صورت فعال به جهت برق‌رسانی به مصارف انرژی الکتریکی در نظر گرفته شود تا در صورت خرابی هر یک از تابلوهای توزیع، برق‌رسانی به مصرف‌کنندگان سیستم انرژی الکتریکی متوقف نگردد و حرکت شناور و... دچار اختلال نشود. بدین ترتیب، استفاده از افزونگی فعال در تابلوهای توزیع سیستم انرژی الکتریکی شناور بسیار حائز اهمیت است. مساله باحالت اشتراک‌گذاری بار در نظر گرفته شده است، بدین ترتیب خرابی یک تابلو منجر به افزایش بار و فشار کاری بر روی سایر تابلوها گردیده و نرخ خرابی سایر تابلوها افزایش می‌یابد. از آنجاکه تابع هدف مدل، افزایش قابلیت دسترسی و کاهش هزینه‌ها است، لذا انتخاب بهینه‌ی نوع و تعداد تابلوی توزیع بسیار حائز اهمیت است تا حداکثر قابلیت دسترسی و حداقل هزینه‌ها در سیستم توزیع انرژی الکتریکی برآورده گردد. همچنین از آنجاکه سیستم انرژی الکتریکی از جمله حیاتی‌ترین سیستم شناور به شمار می‌آید، لذا می‌بایست یک نیروی تعمیرکار به جهت تعمیر تابلوهایی که دچار خرابی شده‌اند در نظر گرفته شود تا هیچ‌گاه فعالیت برق‌رسانی سیستم مذکور دچار اختلال نشود. نوعی سیاست نگهداشت و مرخصی نیز برای تعمیرکار سیستم در نظر گرفته شده است. به علت آن که در پژوهش‌های اخیر انجام‌گرفته، مساله بهینه‌سازی قابلیت دسترسی با افزونگی فعال و امکان اشتراک‌گذاری بار و وجود نیروی تعمیرکار باسیاست نگهداشت و مرخصی به جهت انجام تعمیر تجهیزات خراب مورد بررسی قرار نگرفته است، بدین ترتیب، در پژوهش حاضر مساله بهینه‌سازی دو هدفه تخصیص افزونگی فعال باهدف افزایش قابلیت دسترسی و کاهش هزینه‌ها در سیستم توزیع انرژی الکتریکی با وجود اشتراک‌گذاری بار و وجود یک نیروی تعمیرکار باسیاست مرخصی در نظر گرفته شده است. از زنجیره‌ی مارکوف و توزیع فاز-نوع برای شبیه‌سازی رفتار سیستم استفاده گردیده و نهایتاً مساله با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری *NSGA-II* مورد حل قرار گرفته است.

ساختار مقاله‌ی حاضر به این ترتیب است که در بخش دوم مبانی نظری و پیشینه انجام پژوهش بیان گردیده است. در بخش سوم انواع استراتژی‌های تخصیص قطعات مازاد، در بخش چهارم مدل‌سازی سیستم با استفاده از زنجیره مارکوف، در بخش پنجم تشریح رابطه‌ی اشتراک‌گذاری بار، در بخش ششم و هفتم تشریح الگوریتم و مدل‌سازی مطالعه موردی و در بخش آخر بحث و نتیجه‌گیری حاصل از انجام پژوهش ارائه گردیده است.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

قابلیت اطمینان بالا، نقش بسیار مهمی در صنایع مدرن امروزی از جمله صنایع هوافضا، صنایع دفاعی، شیمیایی و خودرو ایفا می‌کند. قابلیت اطمینان امکان عملکرد صحیح و رضایت‌بخش سیستم در شرایط کاری مشخص برای مدت‌زمان مشخص و باکیفیت مشخص است. از جمله روش‌های افزایش قابلیت اطمینان سیستم [5] عبارت‌اند از ۱- افزایش قابلیت اطمینان یک جز، ۲- استفاده از اجزای اضافی به صورت موازی، ۳- ترکیب قابلیت اطمینان افزایش‌یافته و اجزای اضافی که به صورت موازی تدارک دیده شده‌اند و ۴- تخصیص مجدد اجزای قابل جایگزین. گزینه‌های ۲ و ۳ به ترتیب "مساله تخصیص افزونگی"^۱ و "مساله تخصیص افزونگی- قابلیت اطمینان"^۲ نامیده می‌شوند. در مساله RAP هر یک از اجزای دارای ویژگی‌های شناخته‌شده‌ای مثل قابلیت اطمینان، هزینه و وزن هستند و هدف، یافتن تعداد بهینه‌ای از اجزای اضافی در هر زیرسیستم است تا حداکثر قابلیت اطمینان کلی سیستم با توجه به محدودیت‌های موجود حاصل شود. مساله تخصیص قابلیت اطمینان- افزونگی یک مساله بسیار پیچیده در حوزه بهینه‌سازی قابلیت اطمینان است که هدف آن، یافتن بهترین ساختار با بالاترین قابلیت اطمینان از طریق محاسبه قابلیت اطمینان اجزای و تعداد افزونگی برای هر زیرسیستم به طور همزمان است. به عبارتی دیگر، در مساله RRAP، قابلیت اطمینان اجزا مشخص ناست، بلکه به‌عنوان یک متغیر طراحی و در عین حال هزینه، وزن، حجم اجزای به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شوند. قابلیت دسترسی عبارت است از احتمال این‌که یک سیستم و یا یک قطعه عملکرد مربوط به خود را در زمان مفروض و یا دوره زمانی مشخص در شرایط معین بهره‌برداری و یا نگهداری انجام دهد [1]. قابلیت دسترسی را می‌توان به‌عنوان احتمال اینکه سیستم در مدت زمانی معین در حال کار باشد و یا به‌صورت درصد زمان عملکرد از یک بازه زمانی نیز در نظر گرفت.

سه روش کلی جهت افزایش قابلیت دسترسی سیستم وجود دارد [2] که عبارت‌اند از:

۱. افزایش زمان کارکرد بین خرابی‌ها
۲. کاهش زمان توقف سیستم به‌واسطه انجام تعمیرات اضطراری و یا پیشگیرانه
۳. انجام فعالیت‌های اول و دوم به‌صورت کارا تر و با هزینه کمتر

ماهیت حل مسایل قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی یکسان است، درحالی‌که مفهوم قابلیت دسترسی برای قطعات تعمیرپذیر کاربرد دارد و برای قطعات تعمیرناپذیر مفهوم قابلیت اطمینان استفاده می‌شود.

جاده‌و و کومار [6] در پژوهش خود به بهینه‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم^۳ مورد استفاده در صنایع کشاورزی از طریق مدل‌سازی تصادفی با استفاده از زنجیره مارکوف با زمان پیوسته و بهینه‌سازی قابلیت دسترسی سیستم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۴ پرداختند. مدل‌سازی پژوهش فوق با استفاده از زنجیره مارکوف با زمان پیوسته و در نظر گرفتن نرخ خرابی و نرخ تعمیر برای زیرسیستم‌های حیاتی نظیر میکروکنترلر، واحد حسگر و واحد قدرت انجام گرفته است. ماتریس دسترس‌پذیری نشان می‌دهد که واحد کنترل نیازمند انجام نگهداری و تعمیرات بیشتری نسبت به سایر واحدها است. مقدار بهینه‌ی قابلیت دسترسی سیستم با استفاده از الگوریتم PSO محاسبه گردیده و نتایج حاکی از آن است که بهینه‌سازی قابلیت دسترسی تاثیر زیادی بر روی عملکرد سیستم و هم‌چنین تعیین اولویت‌های نگهداری و تعمیرات خواهد داشت.

جاکولا و همکاران [7] در پژوهش خود به توسعه یک مدل مبتنی بر قابلیت اطمینان جهت پیش‌بینی فواصل زمانی تعمیر و نگهداری برای تجهیزات معدن زیرزمینی^۵ پرداختند. بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان^۶ سیستم جهت ارزیابی قابلیت اطمینان کلی سیستم برای هر دستگاه LHD ترسیم شد. از مدل شبکه عصبی مصنوعی^۷ برای تخمین لایه‌های ورودی قابلیت اطمینان و پارامترهای توزیع مناسب، نظیر پارامتر مقیاس (η)، پارامتر شکل (β)

¹ Redundancy Allocation Problem (RAP)

² Redundancy-reliability allocation problem (RRAP)

³ Wireless Sensor Networks (WSN)

⁴ Particle swarm optimization (PSO)

⁵ Load-Haul-Dumper (LHD)

⁶ Reliability Block Diagram (RBD)

⁷ Artificial Neural Network (ANN)

و پارامتر مکان (ν) استفاده شد. مدل ANN ایجاد شده با استفاده از الگوریتم یادگیری لونیگ-مارکواردت¹ آموزش داده شد. نتایج حاکی از آن بوده است که مقادیر پیش‌بینی شده بسیار نزدیک به مقادیر محاسبه شده بودند، در نتیجه استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند عملکرد تجهیزات را با تاثیر عمده‌ای بهبود بخشد. بدین ترتیب پیشنهاد گردید که متخصصان صنعت قابلیت اطمینان تجهیزات را با استفاده از رویه‌های نگهداری برنامه‌ریزی شده طراحی شده توسط ANN افزایش دهند. گارج و همکاران [8] در پژوهش خود به بهینه‌سازی چهار فاکتور قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی، قابلیت نگهداری و قابلیت اتکا² در یک سیستم صنعتی پیچیده با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات³ پرداختند. بدین ترتیب بهینه‌سازی چهار فاکتور مذکور منجر به کاهش میزان توقفات سیستم، تخصیص بهینه منابع، کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، افزایش قابلیت دسترسی، افزایش فاکتورهای ایمنی و نهایتاً بهبود عملکرد سیستم گردیده است و نتایج حاصل از دو الگوریتم مورد مقایسه قرار گرفته است.

یوسف و همکاران [9] در پژوهش خود به بهینه‌سازی قابلیت دسترسی یک سرور مشتری⁴ با استفاده از روش رایانش ابری و مدل‌سازی تصادفی مارکوف پرداختند. به جهت افزایش عملکرد و در دسترس‌پذیری، سرور مذکور با پنج زیرسیستم سری- موازی تعبیه گردیده است و هر زیرسیستم وظیفه‌ای را بر عهده دارد. استفاده از سرورها، متعادل‌کننده‌های بار، گره‌ها، سازمان‌دهی مشتریان و ... بارهای محاسباتی را توزیع نموده و امکان استفاده‌ی بهینه از منابع و در دسترس بودن شبکه را فراهم می‌نماید. برای مدل‌سازی شبکه از معادلات دیفرانسیلی- تفاضلی و نمودارهای انتقال استفاده گردیده است. نتایج حاکی از آن است که متعادل‌کننده‌های بار و گره‌ها، با استفاده از توزیع بارهای محاسباتی، در دسترس‌پذیری سرور را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهند. بدین ترتیب، استفاده از ساختار سری- موازی و بهره‌گیری از گره‌ها و متعادل‌کننده‌های برابر بهبود عملکرد و افزایش قابلیت دسترسی و ایجاد شبکه‌هایی کارا تر بسیار تاثیر گذار است. اسزسزیپالا و همکاران [4] در پژوهش خود یک مساله تخصیص افزونگی تک هدفه را در یک سیستم سری با زیرسیستم‌های k -out-of- n با استفاده از استراتژی ذخیره سرد، گرم و داغ مورد بررسی قرار داده‌اند. در پژوهش فوق ماهیت قطعات تعمیر پذیر است و تابع هدف سیستم افزایش قابلیت دسترسی است و نرخ خرابی و نرخ تعمیر قطعات ثابت در نظر گرفته شده است.

تعداد قطعات در کل سیستم ثابت در نظر گرفته است. مدل پژوهش فوق با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد حل قرار گرفته و نتایج پژوهش حاکی از آن است که تخصیص افزونگی با استفاده از استراتژی آماده به کار سرد قابلیت دسترسی بالاتری را برای سیستم فراهم می‌آورد. گل محمدی و ابویی [3] در پژوهش خود به مطالعه یک مدل تخصیص افزونگی یک سیستم سری- موازی با اجزای فعال و آماده به کار با قطعات تعمیرناپذیر پرداخته‌اند. در مدل مذکور تعداد و نوع اجزای بهینه و فواصل زمانی سیاست بازرسی دوره‌ای و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به منظور جلوگیری از کاهش عملکرد و خرابی اجزای آماده به کار تحت شرایط سخت محیطی با الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب مورد مدل‌سازی و بررسی قرار گرفت و در سیستم تولید انرژی الکتریکی در یک شناور کارایی مدل مذکور مورد تایید صنعت‌گران و خبرگان قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که عملکرد اجزای ذخیره‌شده در حالت آماده به کار سرد در طول زمان به دلیل تنش‌های محیطی کاهش می‌یابد. از این رو، اقدامات بازرسی دوره‌ای و نگهداری پیشگیرانه برای جلوگیری از کاهش عملکرد و همچنین حفظ قابلیت اطمینان و کارایی سیستم انجام می‌گیرد. جویباری و همکاران [10] در مطالعه خود برای نخستین بار به بررسی کاربرد استراتژی افزونگی مختلط در یک سیستم تعمیر پذیر با حضور تعمیرکار از دیدگاه‌های در دسترس بودن و قابلیت نگهداری پرداخته‌اند. در این سیستم، یک تعمیرکار مسئول ارائه خدمات تعمیر است. سیستم مورد نظر به‌طور هم‌زمان از مفهوم مرخصی تعمیرکار، بر اساس سیاست‌های مختلف از جمله وقفه در مرخصی و مرخصی‌های متعدد بهره برده است. همچنین، زمان‌های متوالی مرخصی تحت فرآیند مارکوف تنظیم شده است. بر این اساس، سیستم با مدل‌سازی یک فرآیند مارکوفی برداری تحلیل شده و چند معیار عملکرد در هر دو حالت گذرا و پایدار با استفاده از روش تحلیلی ماتریسی استخراج شده است. در نهایت، عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از مثال‌های عددی شامل سیستمی با سه مولفه تعمیر پذیر غیرهمسان تحت استراتژی مختلط و همچنین یک سیستم میکروگرید که به‌عنوان مطالعه موردی واقعی است، بررسی

¹ Levenberg Marquardt (LM)

² Reliability, Availability, Maintainability, and Dependability (RAMD)

³ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁴ Client-server

و تایید گردیده است. تحلیل رفتار سیستم منجر به تعیین سهم هر زیرسیستم در تولید توان الکتریکی گردیده است. نتایج حاصل در اصلاح طراحی سیستم موثر واقع شده است.

پیروی و همکاران [11] در پژوهش خود مدلی دقیق بر مبنای زنجیره مارکوف جهت بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستمی سری- موازی دارای افزونگی مختلط ارایه و از نوعی الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم استفاده نمودند. از آنجاکه فرمول‌بندی استراتژی مختلط دارای پیچیدگی‌هایی است و استخراج جواب‌های حاصل از پژوهش‌های پیشین زمان‌بر و نادقیق بوده است، لذا در پژوهش حاضر مدلی دقیق مبتنی بر زنجیره مارکوف جهت بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم دارای تخصیص افزونگی مختلط ارایه گردیده است. نتایج حاکی از آن است که رویکرد جدید عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های قبلی دارد و مساله آزمون معیار را در زمان مناسب حل می‌کند. از این رو، مدل قابلیت اطمینان پیشنهادی می‌تواند برای طراحی سیستم‌های مقیاس بزرگ توصیه گردد. علاوه بر آن، روش مورد استفاده در مقایسه با مطالعات پیشین، مدل بهتری با مقادیر قابلیت اطمینان بالاتر ارایه نموده است.

چایوژنگ و یونان ژنگ [12] طی پژوهش خود به توسعه یک مدل قابلیت اطمینان برای سیستمی موازی با اشتراک‌گذاری بار بر اساس مدل بارگذاری عمومی پرداخته‌اند. در صورت وجود بار خارجی گسسته، روش پیشنهادی از تغییرات توزیع بار و میزان آسیب وارد بار سیستم در اثر خرابی قطعات استفاده می‌کند تا مستقیماً اثر اشتراک‌گذاری بار را منعکس کند. این تکنیک می‌تواند از اندازه‌گیری میزان خرابی جلوگیری کند. علاوه بر این، روش مدل‌سازی قابلیت اطمینان مبتنی بر نرخ شکست نیز در این مقاله بهبود یافته است، زیرا تابع رابطه بین میزان خرابی قطعه و بار قطعه بدین طریق قابل تحلیل است. بر اساس این مدل، زمان میانگین تا شکست سیستم‌های موازی با سه مولفه و دو مولفه با اشتراک‌گذاری بار محاسبه شده است. همچنین احتمال شکست و قابلیت اطمینان مدل سیستم موازی با سه مولفه و دو مولفه تحت شکست علت مشترک محاسبه و مورد بحث قرار گرفته است. قابلیت اطمینان مدل سیستم موازی با سه مولفه تحت شکست علت مشترک بیشتر از مدل دو مولفه بوده است. حال آنکه مشاهده شده است که زمان میانگین تا شکست سیستم موازی با سه مولفه طولانی‌تر از سیستم دو مولفه نبوده است. دپائولا و همکاران [13] به بررسی تاثیر اشتراک‌گذاری بار در مساله چندهدفه تخصیص افزونگی فعال بر روی سیستمی سری- موازی پرداخته‌اند. قابلیت دسترسی هر زیرسیستم توسط زنجیره مارکوف برآورد شده است و از الگوریتم *NSGA-II* برای حل مساله استفاده گردیده است. در این پژوهش اثر وابستگی شکست نیز در نتایج بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، تاثیر آن بر در دسترس بودن سیستم و هزینه نهایی نشان داده شده است. هوپانگ سو و همکاران [14] یک روش جدید طراحی بهینه برای سیستم‌های اشتراک‌گذاری بار و قابل تعمیر k از n ارایه نمودند. آن‌ها با توجه به مفهوم طراحی ماژولار، سیستم مفروض را به تعدادی ماژول‌های مقیاس پذیر و قابل تعمیر تقسیم کرده‌اند که تعیین طراحی بهینه، بستگی به نوع اجزای سیستم، ساختار ماژول‌های تشکیل دهنده سیستم و قواعد تعمیر سیستم دارد. با در نظر گرفتن اندازه‌های مختلف سیستم، از بهینه‌سازی واکنش چندمنظوره با تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی وزن برای دستیابی به یک طراحی بهینه از ماژول‌های قابل تعمیر و همچنین سیاست تعمیر استفاده شده است.

کپدپور و همکاران [15] در پژوهش خود به حل مساله تخصیص افزونگی قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن در دسترس بودن، اجزای قابل تعمیر و انتخاب استراتژی‌های پیکربندی بر اساس فرآیندهای مارکوف در یک سیستم سری- موازی با رویکرد قطعی پرداخته‌اند و از الگوریتم *NSGA-II* برای حل مدل خود استفاده نموده‌اند. مدل مذکور برای حل مسایل تخصیص افزونگی با استراتژی آماده به کار گرم و سرد مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن بوده است که در اکثر تحقیقات *RAP* در دسترس بودن سیستم‌ها در مدت زمان طولانی مختل خواهد شد و می‌بایست روش‌های مورد استفاده برای بهینه‌سازی سیستم‌هایی با در دسترس بودن موقت پیاده‌سازی شود. زوا و همکاران [16] در مقاله خود رویکردهای جدیدی برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستمی موازی در معرض اشتراک‌گذاری بار ارایه کرده‌اند. فرض بر این است که اجزای موجود در سیستم به طور مداوم تحت تاثیر اشتراک‌گذاری بار هستند و این موضوع باعث افزایش سرعت تخریب می‌شود. از یک سو رسیدن بار و از سوی دیگر تاثیر خرابی اجزای فعال بر تخریب اجزای باقیمانده به شکلی پیچیده تاثیر گذار است. رویکردهای پیشنهادی در این مقاله در صدد کاهش این پیچیدگی و سهولت مدل‌سازی بوده است. بدین ترتیب، ابتدا زمان خرابی‌های قبلی و رسیدن بارهای تصادفی را در نظر گرفته و سپس تعداد مولفه‌های خراب را تعیین می‌نمایند. شیائو و همکاران [17] در پژوهش خود به حل مساله تخصیص افزونگی در یک سیستم سری- موازی با استفاده از رویکرد قطعی و ماهیت قطعات تعمیرپذیر پرداخته‌اند. در پژوهش فوق هدف مساله کاهش هزینه‌ها بوده و قابلیت دسترسی به عنوان محدودیت سیستم در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داده است که افزایش هزینه‌های تعمیر منجر به کاهش دسترس پذیری سیستم می‌گردد. بدین ترتیب در پژوهش حاضر

مدلی برای ایجاد توازن میان هزینه‌های تعمیر و قابلیت دسترسی با امکان اشتراک‌گذاری بار و وابستگی به شکست ارایه گردیده است و مدل فوق با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد حل قرار گرفته است.

شریفی و همکاران [18] در پژوهش خود یک سیستم سری-موازی با زیرسیستم‌های k -out-of- n و قطعات تعمیر ناپذیر را مورد بررسی قرار داده‌اند. هر یک از زیرسیستم‌ها ممکن است از استراتژی فعال یا افزونگی سرد استفاده نمایند که به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. در پژوهش فوق، نرخ شکست به کارکرد اجزای سیستم بستگی دارد. بدین ترتیب که نرخ خرابی قطعات زمانی افزایش می‌یابد که یک جز از کار بیافتد. به عبارتی مساله باحالت اشتراک‌گذاری بار مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام پژوهش فوق، افزایش قابلیت اطمینان تحت محدودیت‌های هزینه و وزن است. مدل پیشنهادی انتخاب بهترین استراتژی افزونگی از میان فعال یا آماده به‌کار سرد، نوع مولفه و سطوح افزونگی برای هر زیرسیستم است. از چهار الگوریتم فرا ابتکاری به نام‌های الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ممتیک، باز پخت شبیه‌سازی شده و بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل مساله استفاده شده است. در نهایت، برای مقایسه نتایج الگوریتم‌ها از آزمون آماری استفاده گردیده است. لیو و همکارانش [19] در پژوهش خود به تحلیل یک سیستم تعمیرپذیر موازی با ساختار آماده به‌کار سرد پرداختند که در آن سیاست‌های تعطیلات کاری تعمیرکار و وقفه در تعطیلات به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شده‌اند. در این مدل، تعطیلات چندگانه تعمیرکار، سیاست تعطیلات کاری و همچنین سیاست وقفه در تعطیلات به‌طور تلفیقی مدل‌سازی شده‌اند. زمان‌های تعمیر در دوره‌های تعمیر عادی و دوره‌های تعطیلات کاری نیز به‌صورت مستقل از یکدیگر از توزیع فاز-نوع پیروی می‌کنند. توزیع زمانی تعطیلات پی‌درپی نیز توسط یک فرآیند مارکوف کنترل می‌شود. برای تحلیل این سیستم، یک فرآیند مارکوف برداری با مقادیر برداری طراحی شده است.

هن و همکاران [20] در پژوهش خود یک سیستم موازی تعمیر ناپذیر را با استفاده از استراتژی افزونگی فعال مورد بررسی قرار داده‌اند. در پژوهش فوق یک مساله افزونگی چند سطحی مورد بررسی قرار گرفته و سیستم، زیرسیستم و قطعات جهت تخصیص افزونگی در نظر گرفته شده‌اند. قابلیت دسترسی به‌عنوان تابع هدف و هزینه‌های سیستم به‌عنوان محدودیت مساله در نظر گرفته شده است. روش بلوک دی‌گرام قابلیت اطمینان و سپس اثرات خرابی عملکرد بر در دسترس بودن اجزای از طریق مدل زنجیره مارکوف چندحالتی مدل‌سازی شده است. پس از به دست آوردن قابلیت اطمینان و در دسترس بودن قطعات، قابلیت اطمینان سیستم‌ها از طریق شبیه‌سازی غیرمتوالی مونت کارلو ارزیابی شده است. در نهایت از روش شبیه‌سازی برای تخمین شاخص‌های سیستم استفاده گردیده و مساله با یک الگوریتم فرا ابتکاری مورد حل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بهبود قابل توجهی در قابلیت اطمینان سیستم‌های ترکیبی وجود دارد. جیانشینگ و همکاران [21] در پژوهش خود یک مساله تخصیص افزونگی را با رویکرد عدم قطعیت برای یک سیستم سری موازی با قطعات تعمیر پذیر بررسی نموده‌اند. توابع هدف مساله قابلیت دسترسی پذیری و هزینه‌های خرید و تعمیرات سیستم بوده است. مساله فوق با استراتژی فعال و الگوریتم کلونی زنبور عسل چندهدفه مورد حل قرار گرفته است و با نتایج حاصل از الگوریتم $NSGA-II$ مقایسه گردیده است. ذوالفقاری و همکاران [22] در پژوهش خود سیستمی سری-موازی متشکل از قطعات تعمیر پذیر و تعمیر ناپذیر را با استراتژی افزونگی فعال مورد بررسی قرار دادند.

هدف از پژوهش انجام شده افزایش قابلیت دسترسی سیستم مورد مطالعه بوده است. مساله فوق با رویکرد قطعی چندهدفه مورد بررسی قرار گرفته و توابع هدف مساله فوق افزایش قابلیت دسترسی و کاهش هزینه‌ها است. در نهایت نتایج حاصل از حل مساله با الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار گمز مقایسه گردیده است. نورمحمدی و همکارانش [23] در پژوهش خود به بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستمی سری-موازی دارای افزونگی فعال و آماده به‌کار سرد با اجزای ناهمگن با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی و استفاده از استراتژی دفاع و حمله در تئوری بازی‌ها پرداختند. مدل ریاضی فوق با استفاده از الگوریتم‌های $NSGAI$ و $MPSO$ مورد حل قرار گرفته و ترکیب بهینه‌ای از تخصیص منابع و استقرار اهداف با استفاده از افزونگی فعال را مشخص نموده است. علاوه بر آن، نتایج حاکی از آن است که استفاده هم‌زمان از اهداف مجازی و افزونگی آماده به‌کار سرد منجر به بهبود قابلیت اطمینان سیستم می‌گردد. صوفی و همکارانش [24] در پژوهش خود، به مدل‌سازی و حل مساله زمان‌بندی کار ماشین‌الات با استفاده از منابع انسان و ماشین و در نظر گرفتن خرابی ماشین‌الات پرداختند. نحوه واگذاری بارها به ماشین‌ها و توالی عملیات بر روی هر ماشین به‌گونه‌ای بوده است که تحت هر سناریوی محتمل، حداکثر زمان تکمیل کارها کمینه شود تا عملکرد هر سیستم و مقدار تابع هدف با توجه به سناریوهای مختلف بهینه باشد. در پژوهش فوق یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور استوار در قالب برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارایه گردیده و برای حل مدل در ابعاد کوچک و متوسط از نرم‌افزار گمز و برای مدل در ابعاد بزرگ از الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر ژنتیک استفاده گردیده است. مطالعه‌ی موردی در شرکت البرز یکد انجام پذیرفته و نتایج تحقیق حاکی از آن بوده است که الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی ژنتیک

برای حل مساله در ابعاد بزرگ مناسب است. جانباز و همکارانش [25] در پژوهش خود به بهینه‌سازی یک مدل ریاضی چندهدفه با رویکرد زمان‌بندی و جریان مالی با استفاده از الگوریتم *NSGAI* پرداختند.

در پژوهش فوق، مدل چندهدفه‌ی زمان‌بندی و جریان مالی باهدف بهینه‌سازی تخصیص منابع و کاهش هزینه‌ها با استفاده از الگوریتم *NSGAI* در شرکت عمرانی کیسون مورد حل قرار گرفت و یافته‌ها حاکی از آن است که الگوریتم *NSGAI* به‌عنوان الگوریتم بهینه‌سازی برای یافتن راه‌حل‌های کارآمد در زمینه چندهدفه قابل استفاده است و نتایج بهینه جهت انتخاب پروژه‌های عمرانی و ساختمانی ارائه شد. راعی و همکارانش [26] به‌منظور پیش‌بینی و ارزیابی قابلیت اطمینان یک هواپیمای بدون سرنشین (پهباد) با استراتژی فعال، مدلی بر مبنای نرخ ثابت خرابی و تعمیرات و با استفاده از زنجیره مارکوف ارائه نموده‌اند. در پژوهش فوق یک مدل ریاضی مبنی بر فضای حالت وقوع خرابی در پهباد ارائه گردیده است و نتایج حاکی از آن است که به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان، افزایش ایمنی، افزایش آمادگی و کاهش نرخ خرابی، لازم است شرکت‌های سازنده نسبت به کاهش پیچیدگی در فرآیند طراحی اقدام نمایند. هم‌چنین بهبود کیفیت قطعات و زیرسیستم‌ها و بهبود کیفی در شیوه‌های تعمیر و نگهداری منجر به افزایش قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری سامانه خواهد شد. فاروقی و سلگی [26] در پژوهش خود به حل مساله بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم سری موازی چند وضعیت با رویکرد قطعی و قطعات تعمیرپذیر پرداخته‌اند. در پژوهش فوق یک مدل ریاضی به‌منظور افزایش دسترس‌پذیری و کاهش هزینه‌های طراحی با در نظر گرفتن محدودیت‌های بودجه و وزن توسعه داده شده است و مدل مذکور با روش تابع مولد عمومی مورد حل قرار گرفته است. سیستم موردنظر به‌صورت چند وضعیت با در نظر گرفتن وضعیت شکست کامل، عملکرد کامل و شکست جزئی ناشی از قطع برق و... با استفاده از استراتژی ذخیره سرد برای قطعات موردبررسی قرار گرفته و مدل پژوهش با الگوریتم ژنتیک مورد حل قرار گرفته است.

بدین ترتیب، در پژوهش‌های اخیر انجام‌گرفته، مساله قابلیت دسترسی با استفاده از تخصیص افزونگی فعال و رابطه اشتراک‌گذاری بار و وجود یک تعمیرکار باسیاست نگهداشت و مرخصی موردبررسی قرار نگرفته است. لذا پژوهش حاضر با مطالعه‌ی موردی بر روی سیستم توزیع انرژی الکتریکی در یک شناور انجام‌گرفته است. سیستم توزیع انرژی الکتریکی، یکی از اصلی‌ترین سیستم‌های شناور است که وظیفه تامین انرژی الکتریکی کل شناور را به جهت حرکت شناور و فعالیت سایر سیستم‌ها بر عهده دارد. تابلوهای توزیع انرژی الکتریکی نیز از اصلی‌ترین اجزای سیستم توزیع انرژی الکتریکی هستند که وظیفه برق‌رسانی به مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی نظیر سیستم رانش و... را بر عهده دارند. بدین ترتیب مساله با افزونگی فعال و حالت اشتراک‌گذاری بار در سیستم توزیع انرژی الکتریکی شناور در نظر گرفته شده است. از آنجا که تابع هدف مدل، افزایش قابلیت دسترسی و کاهش هزینه‌ها است، لذا انتخاب بهینه نوع و تعداد تابلوی توزیع بسیار حائز اهمیت است تا حداکثر قابلیت دسترسی و حداقل هزینه‌ها در سیستم توزیع انرژی الکتریکی برآورده گردد. هم‌چنین یک نیروی تعمیرکار به جهت تعمیر تابلوهایی که دچار خرابی شده‌اند در نظر گرفته شود تا هیچ‌گاه فعالیت برق‌رسانی سیستم مذکور دچار اختلال نشود. نوعی سیاست نگهداشت و مرخصی نیز برای تعمیرکار سیستم در نظر گرفته شده است. از زنجیره‌ی مارکوف و توزیع فاز-نوع برای شبیه‌سازی رفتار سیستم استفاده گردیده و نهایتاً مساله با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری *NSGA-II* مورد حل قرار گرفته است.

۳- استراتژی تخصیص قطعات مازاد

در هر سیستم [27]، اجزای تشکیل دهنده سیستم پس از مدت‌زمانی از کار می‌افتند و بدین ترتیب سیستم فوق نیازمند پشتیبانی است. به‌طوری‌که از کارافتادن یک جز توسط دیگر اجزا پوشش داده شود تا علی‌رغم آن که جز معیوب، تعمیرپذیر و یا تعمیرناپذیر باشد، بتوان سیستم را در شرایط عملکرد رضایت‌بخش قرارداد. این فرآیند پشتیبانی از سیستم تخصیص قطعات مازاد نام دارد.

استفاده از اجزای مازاد در یک سیستم یا زیرسیستم باعث ایجاد استراتژی‌های مختلف افزونگی می‌گردد که عبارت‌اند از:

استراتژی ۱- تخصیص اجزا مازاد فعال^۱

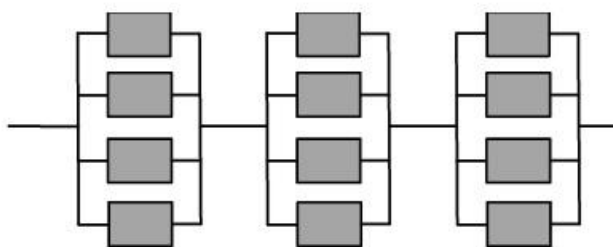
استراتژی ۲- تخصیص اجزا مازاد آماده به کار^۲

استراتژی ۳- تخصیص اجزا مازاد مختلط^۳

۳-۱- استراتژی تخصیص قطعات مازاد فعال

همان‌طور که بیان گردید، راهبرد افزونگی فعال [3] بر این فرض استوار است که همه‌ی اجزای افزونه به‌طور هم‌زمان از زمان آغاز کار سیستم شروع به کار می‌کنند، هرچند در هر لحظه تنها یک جز برای عملکرد سیستم موردنیاز است. بدین ترتیب در راهبرد مذکور، به جهت کاهش خرابی احتمالی سیستم، تمامی قطعات به‌صورت فعال با یکدیگر کار می‌کنند و سیستم زمانی شکست می‌خورد و خراب می‌شود که تمام اجزا دچار خرابی شده باشند.

شکل ۱ استراتژی تخصیص قطعات مازاد فعال را نشان می‌دهد.



شکل ۱- استراتژی تخصیص قطعات مازاد فعال.

Figure 1- Active surplus parts allocation strategy.

۳-۲- استراتژی تخصیص قطعات مازاد ذخیره (آماده به کار)

در استراتژی ذخیره (آماده به کار) [4] اجزای ذخیره در صورت خرابی اجزای فعال سیستم جایگزین آن‌ها می‌شوند. در صورتی که جایگزینی اجزای ذخیره با اجزای فعال بلافاصله انجام شود، سوئیچ کامل و در صورتی که جایگزینی زمان قابل توجهی طول بکشد، سوئیچ ناقص نام دارد. سه استراتژی ذخیره سرد، گرم و داغ، با توجه به نرخ خرابی اجزای ذخیره وجود دارد.

استراتژی ذخیره سرد: قطعات ذخیره تحت تاثیر عملکرد سیستم نیستند و هر لحظه که وارد سیستم می‌شوند مانند یک قطعه نو عمل می‌کنند.

استراتژی ذخیره گرم: عمر قطعات ذخیره در حال کاهش است، اما نه به‌شدت کاهش عمر یک قطعه فعال.

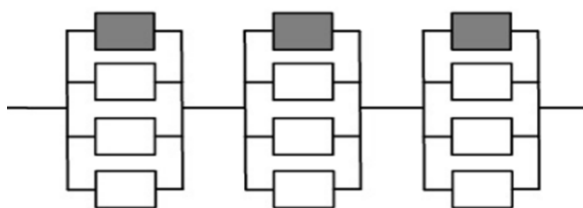
استراتژی ذخیره داغ: عمر قطعات چه در حالت ذخیره باشد و چه در حالت فعال به یک میزان کاهش می‌یابد.

¹ Active redundancy strategy

² Standby redundancy strategy

³ Mixed redundancy strategy

شکل ۲- استراتژی تخصیص قطعات مازاد آماده به کار را نشان می دهد.



شکل ۲- استراتژی تخصیص قطعات مازاد آماده به کار.

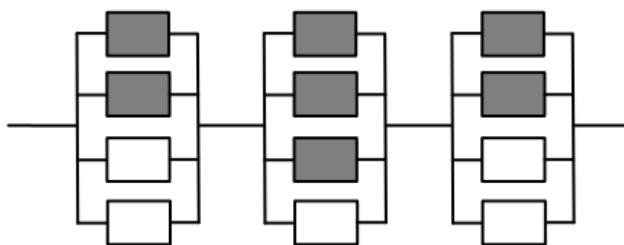
Figure 2- Allocation strategy for surplus ready-to-use parts.

۳-۳- استراتژی تخصیص قطعات مختلط

استراتژی فعال و ذخیره دارای معایبی هستند. عیب اصلی استراتژی فعال این است که اجزا مازاد اضافه شده به زیرسیستم در زمانی که نیازی به آن‌ها ناست و قطعه اصلی در حال کار است، فعال هستند، در نتیجه عمر آن‌ها کاهش می یابد.

مشکل اصلی استراتژی ذخیره آن است که در هنگام نیاز به یک قطعه مازاد که به صورت ذخیره تعبیه شده است، نیاز به یک سویچ است تا بتواند قطعه مازاد را فعال و وارد سیستم کند. ممکن است عملکرد خود این سویچ گاهی اوقات با خطا همراه باشد، لذا در حالت کلی احتمال کارکرد کل سیستم کاهش پیدا می کند.

با توجه به موارد گفته شده استراتژی دیگری پدید آمد که به آن استراتژی مختلط می گویند. استراتژی مختلط از ترکیب استراتژی فعال و ذخیره به صورت هم زمان در دنیای واقعی به کار می رود. این استراتژی در سال ۲۰۱۴ توسط ابویی و همکاران [28] معرفی گردید. این استراتژی بعد از خرابی آخرین قطعه فعال، قطعات ذخیره به نوبت توسط سویچ فعال شده و این روند تا فعال شدن آخرین قطعه ذخیره ادامه می یابد. در ابتدای عملیات تمامی قطعات فعال در حال اجرای عملیات هستند و در زمان شکست آخرین قطعه فعال، اولین قطعه ذخیره جایگزین شده و روند به همین ترتیب ادامه می یابد. در چنین سیستمی تمامی قطعات فعال در حال اجرای عملیات هستند و در هنگام شکست آخرین قطعه فعال، اولین قطعه ذخیره جایگزین می شود و روند به همین ترتیب ادامه می یابد. زمانی که تمامی قطعات فعال دچار شکست و خرابی شده اند و در نهایت فقط یک قطعه افزونه ذخیره باید جای آخرین قطعه شکست خورده را بگیرد، مانند استراتژی ذخیره عمل می کند. سیستم زمانی از کار می افتد و شکست می خورد که تمامی قطعات فعال و افزونه ذخیره دچار خرابی و شکست شوند. شکل ۳ استراتژی تخصیص قطعات مازاد مختلط را نشان می دهد.



شکل ۳- استراتژی تخصیص قطعات مازاد مختلط.

Figure 3- Mixed surplus parts allocation strategy.

۳-۴- استراتژی تخصیص قطعات k-mixed

پیروی و همکاران [29] استراتژی جدیدی که حالت عمومی برای استراتژی مختلط است، ارائه نمودند که آن را استراتژی k -mixed می نامند. به دلیل آن که این استراتژی k -mixed پیچیدگی ذاتی داشت، تنها این استراتژی را بر روی یک زیرسیستم خاص با چهار قطعه پیاده نمودند. استراتژی k -mixed حالت کلی تری از استراتژی مختلط است. به این صورت که برخلاف استراتژی مختلط، سویچ بعد از خرابی آخرین قطعه فعال شروع به

کار نمی‌کند، بلکه بلافاصله بعد از خرابی هر یک از قطعات فعال، سوئیچ عمل کرده و یکی از قطعات ذخیره را فعال می‌کند و این روند تا فعال شدن آخرین قطعه ذخیره ادامه می‌یابد.

۴- مدل‌سازی سیستم‌ها با استفاده از زنجیره مارکوف

روش‌های متعددی برای ارزیابی سیستم‌های تعمیرپذیر و یا تعمیرناپذیر وجود دارد. یکی از روش‌های فوق، روش مدل‌سازی مارکوف [27] است. برای اینکه بتوان از روش مارکوف استفاده نمود، می‌بایست رفتار سیستم نمایانگر فقدان حافظه باشد. یعنی حالت و وضعیت آینده سیستم باید مستقل از وضعیت‌های گذشته، به‌جز آخرین وضعیت آن باشد. بدین ترتیب رفتار آتی سیستم می‌بایست صرفاً باید بستگی به وضعیت حال آن داشته و هیچ وابستگی به گذشته آن و یا چگونگی حصول وضعیت حال نداشته باشد.

زنجیره مارکوف [2] فرآیند تصادفی با زمان گسسته است که در آن وضعیت آینده سیستم فقط به وضعیت فعلی آن بستگی دارد. احتمال P_{ij} نمایانگر احتمال انتقال وضعیت فرآیند از وضعیت j به وضعیت i است. این احتمال غیرمنفی است و در هر صورت فرآیند می‌بایست به یکی از وضعیت‌های تعریف شده انتقال یابد. بدین ترتیب مطابق با رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$\sum_{j=1}^{\infty} P_{ij} = 1 \quad i=0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

اگر ماتریس P ماتریس انتقال یک مرحله‌ای برای فرآیند باشد، مطابق با رابطه (۲) خواهیم داشت:

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots \\ P_{10} & P_{11} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2)$$

بدین ترتیب ماتریس P را ماتریس انتقال یک مرحله‌ای و یا ماتریس احتمال انتقال وضعیت پس از یک مرحله می‌نامند.

هر سطر از ماتریس P یک بردار احتمال بوده و جمع عناصر هر سطر از ماتریس برابر با یک است. زیرا پس از هر مرحله انتقال، سرانجام سیستم در یکی از وضعیت‌های صفر تا n قرار می‌گیرد. برای یک زنجیره مارکوف یکپارچه، Π_j هایی وجود دارد که مستقل از وضعیت اولیه سیستم اند و جواب غیرمنفی حاصل از دستگاه معادلات رابطه (۳) است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi_j = \sum_{i=0}^{\infty} \Pi_i P_{ij} \quad j = 0, 1, \dots \\ \sum_{j=0}^{\infty} \Pi_j = 1 \end{array} \right. \quad (3)$$

احتمال حدی Π_j را می‌توان به صورت احتمال وجود سیستم در وضعیت j دانست و به تعبیر دیگر درصد زمانی است که سیستم در وضعیت j است [2]. به عبارت دیگر مطابق با رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \Pi &= \Pi P \\ \Pi \cdot e &= 1, \end{aligned} \quad (4)$$

که $\Pi = (\Pi_1, \Pi_2, \dots)$ و $e = (1, 1, \dots)$ است. e بردار ستونی هم واحد و هم بعد Π است.

۴-۱- مدل زنجیره مارکوف و متغیرهای تصادفی با توزیع طول عمر Phase-Type

زنجیره مارکوف یک مدل تصادفی برای توصیف دنباله‌ای از وقایع احتمالی است که در آن احتمال هر رویداد فقط به وضعیت واقعه قبلی بستگی دارد. توزیع فاز-نوع (PH) یک توزیع احتمالی است که با ترکیبی از توزیع نمایی به دست می‌آید و کاربردهای زیادی در تئوری صف و حل مساله

قابلیت اطمینان دارد. از جمله مزایای این توزیع، انعطاف پذیری بالا، فرم تحلیلی مشخص و تفسیر مارکوفی آن است. این توزیع اولین بار توسط نوتس [30] پیشنهاد شد. توزیع PH زمان رسیدن به حالت نهایی (حالت جاذب) را در یک فرآیند مارکوف با تعداد محدودی وضعیت نشان می‌دهد.

حالت نهایی (جاذب) [27] به حالتی اطلاق می‌گردد که با وقوع آن، امکان خروج سیستم از آن حالت میسر نباشد، مگر آنکه ماموریت جدیدی با شروع یکی از حالات غیر جاذب آغاز گردد. در سیستم‌های تعمیر پذیر می‌توان با انجام تعمیرات، سیستم را از حالت جاذب نامطلوب خارج نمود.

۵- اشتراک گذاری بار در سیستم‌ها

یکی از کاربردهای آنالیز مارکوف [2] در سیستم‌های با اشتراک گذاری بار است. برای مثال در سیستمی که دارای دو قطعه است، در صورتی که بین دو قطعه وابستگی وجود داشته باشد، در صورت خرابی یک قطعه، نرخ خرابی قطعه‌ی دیگر به دلیل بار اضافی که بر روی آن قرار می‌گیرد، افزایش می‌یابد.

۶- الگوریتم بهینه‌سازی NSGA II

مساله تخصیص افزونگی به‌عنوان یک مساله $NP-Hard$ به اثبات رسیده است [11] و با افزایش اندازه مساله و تعداد محدودیت‌ها، حجم محاسبات به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد و لذا محاسبات کامپیوتری فراوانی را می‌طلبد. مطالعات متعددی روش‌های مختلف حل و الگوریتم‌های دقیق را بررسی کرده‌اند، روش‌هایی نظیر برنامه‌ریزی پویا، الگوریتم‌های شاخه و کران، برنامه‌ریزی عدد صحیح، ضرایب لاگرانژ و... که برای حل این دسته از مساله پیشنهاد شده‌اند. اما از آنجاکه کاربرد عملی روش‌های دقیق، به‌ویژه برای مساله با ابعاد بزرگ، محدود است، لذا استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری نسبت به روش‌های دقیق رواج بیشتری یافته‌اند.

لذا با توسعه الگوریتم ژنتیک و دیگر الگوریتم‌های محاسباتی بهینه‌سازی و الگوریتم‌های تکاملی و ترکیبی [31] بیشتر محققان علاقه‌مند به استفاده از این روش‌ها برای حل مساله تخصیص افزونگی هستند. روش‌های فوق انعطاف‌پذیری بیشتری دارند، به فرضیات کمتری در مورد تابع هدف و هم‌چنین محدودیت‌های موجود در مساله نیاز دارند و پیاده‌سازی آن‌ها آسان‌تر است. هم‌چنین روش‌های مذکور کارآمدتر هستند و صرف‌نظر از اینکه فضای جست‌وجوی مساله گسسته و یا پیوسته است، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

الگوریتم مرتب‌سازی $NSGAII$ یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه پرکاربرد است [25] که بر اساس اصول الگوریتم‌های ژنتیک است. این الگوریتم به‌طور خاص برای رسیدگی به مساله با اهداف متضاد چندگانه طراحی شده است. تا جایی که هدف یافتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها است که تحت سلطه هیچ راه‌حل امکان‌پذیر دیگری نیستند. الگوریتم فوق با حفظ جمعیتی از راه‌حل‌های کاندید که به‌عنوان جمعیت نیز شناخته می‌شوند، کار می‌کند و به‌طور مکرر این جمعیت را برای بهبود کیفیت و تنوع راه‌حل‌ها تغییر می‌دهد. هم‌چنین از ترکیبی از عملگرهای ژنتیکی مانند انتخاب، متقاطع و جهش برای شبیه‌سازی فرآیند طبیعی تکامل و جست‌وجوی راه‌حل‌های بهینه استفاده می‌کند.

یکی از ویژگی‌های کلیدی $NSGAII$ استفاده از مرتب‌سازی غیر غالب [25] برای طبقه‌بندی جمعیت به جبهه‌ها یا لایه‌های مختلف است. عدم تسلط به خاصیتی اطلاق می‌شود که یک راه‌حل حداقل در یک هدف بهتر از راه‌حل دیگر باشد، بدون اینکه در هیچ هدف دیگری بدتر باشد. با مرتب‌سازی جمعیت بر اساس عدم تسلط، $NSGAII$ سلسله مراتبی از راه‌حل‌ها را ایجاد می‌کند که در آن جبهه اول شامل راه‌حل‌های غیر تحت سلطه و جبهه‌های بعدی شامل راه‌حل‌هایی است که تحت سلطه راه‌حل‌های قبلی هستند. برای حفظ تنوع در جمعیت، $NSGAII$ از مکانیسم فاصله ازدحام استفاده می‌کند. فاصله ازدحام، تراکم در فضای هدف را اندازه‌گیری می‌کند و برای هدایت فرآیند انتخاب در طول تکامل استفاده می‌شود. الگوریتم فوق با ترجیح راه‌حل‌هایی با فواصل ازدحام بالاتر، تضمین می‌کند که جمعیت مجموعه‌ای از راه‌حل‌های توزیع‌شده را در سراسر جبهه پارتو نشان دهد که نشان‌دهنده مبادلات بهینه بین اهداف متضاد است.

در نتیجه، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی $NSGAII$ یک الگوریتم قدرتمند برای حل مساله بهینه‌سازی چندهدفه [25] است. از طریق استفاده از مرتب‌سازی بدون تسلط، فاصله ازدحام و نخبه‌گرایی، $NSGAII$ یک رویکرد قوی و کارآمد برای یافتن راه‌حل‌های بهینه‌ارایه می‌کند که مبادلات بین

اهداف متضاد را نشان می‌دهد. تطبیق‌پذیری و مقیاس‌پذیری آن، آن را به یک انتخاب محبوب در حوزه‌های مختلف تبدیل کرده است که در آن تصمیم‌گیرندگان به دنبال کشف و تجزیه و تحلیل مجموعه متنوعی از راه‌حل‌های بهینه پارتو هستند. در مبنای نظری و پیشینه‌ی انجام پژوهش به بررسی برخی از مدل‌های حل مساله و روش‌های حل مدل با برخی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری پرداخته شد. برای مثال نومحمدی و همکارانش [23] و جانباز و همکارانش [25] نیز در پژوهش خود به حل مدل مساله با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند و نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک از کارایی و دقت خوبی برخوردار بوده است. لذا در پژوهش حاضر نیز از الگوریتم فرا ابتکاری *NSGAII* جهت حل مدل مساله استفاده خواهد شد.

۷- مدل‌سازی و حل مطالعه موردی

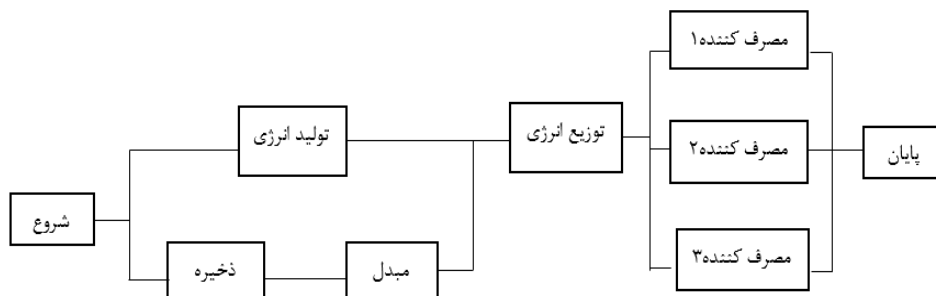
در پژوهش حاضر، سیستم توزیع انرژی الکتریکی در یک شناور مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. سیستم توزیع انرژی الکتریکی، یکی از اصلی‌ترین سیستم‌های شناور است که وظیفه‌ی تامین انرژی الکتریکی کل شناور را به جهت حرکت شناور و فعالیت سایر سیستم‌ها بر عهده دارد. سیستم توزیع انرژی الکتریکی یک سیستم سری - موازی و شامل ۵ زیرسیستم است و هر زیرسیستم از تعدادی تجهیز تشکیل گردیده است. کابل، کلید، خازن، دیود، مقاومت، کانکتور، درایوها، مبدل، پردازنده و... از جمله تجهیزاتی است که در سیستم توزیع انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و برخی از تجهیزات مذکور تعمیرپذیر بوده و برخی دیگر از آن‌ها تعمیر پذیر نیستند و یا تعمیر آن‌ها مقرون به صرفه نیست. حال آنکه در حل مساله قابلیت دسترسی در پژوهش حاضر، تجهیز تعمیرپذیر تابلوی توزیع مدنظر است.

تابلوهای توزیع انرژی الکتریکی از اصلی‌ترین اجزای سیستم توزیع انرژی الکتریکی هستند که وظیفه‌ی برق‌رسانی به مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی نظیر سیستم رانش و... را بر عهده دارند. بدین ترتیب می‌بایست چندین تابلوی توزیع انرژی به صورت فعال به جهت برق‌رسانی به مصارف انرژی الکتریکی در نظر گرفته شود تا در صورت خرابی هر یک از تابلوهای توزیع، برق‌رسانی به مصرف‌کنندگان سیستم انرژی الکتریکی متوقف نگردد و حرکت شناور و... دچار اختلال نشود. لذا استفاده از افزونگی فعال در تابلوهای توزیع سیستم انرژی الکتریکی شناور بسیار حائز اهمیت است.

به علت کیفیت متفاوت تجهیزات تامین‌کنندگان مختلف و محدودیت‌های موجود، چهار نوع تابلو توزیع برق برای برق‌رسانی در سیستم توزیع در نظر گرفته شده است که هر زیرسیستم می‌تواند یک الی چهار تابلو (به صورت همگن از یک نوع) جهت توزیع انرژی داشته باشد. سیستم موردنظر دارای یک تعمیرکار با تعطیلات کاری است. هر تابلو دارای وزن و حجم و هزینه خرید متفاوتی است. در این پژوهش، هزینه مجموع آلودگی و هزینه خرید هر تابلو به عنوان تابع هدف اول و قابلیت دسترسی به عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است و مساله مورد بررسی یک مساله دوهدفه است. هدف از حل مساله آن است که توازن و تعادلی بین انتخاب نوع تابلوی توزیع (در هر زیرسیستم از یک نوع تابلوی توزیع به صورت همگن استفاده می‌گردد) و تعداد تابلوی توزیع برق در هر زیرسیستم به دست آید تا سیستم در بهترین وضعیت کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت دسترسی قرار گیرد. در مساله مورد بررسی، اشتراک‌گذاری بار و وابستگی به شکست وجود دارد و خرابی یک تابلو بر روی نرخ خرابی سایر تابلوها تاثیرگذار است و نرخ خرابی سایر تابلوها را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب نرخ خرابی هر تابلو در هنگام خرابی سایر تابلوها با استفاده از انجام محاسبات رابطه‌ی اشتراک‌گذاری بار افزایش می‌یابد. از زنجیره مارکوف و توزیع فاز- نوع برای شبیه‌سازی رفتار سیستم استفاده گردیده و در ادامه ماتریس انتقال حالت و مدل ریاضی حل مساله با توجه به محدودیت‌های موجود بیان می‌گردد. خروجی‌های حاصل از ماتریس انتقال حالت جهت محاسبه‌ی متوسط تعداد تجهیزات (قطعات) در حال کار و هزینه‌ی الودگی و قابلیت دسترسی و... مورد استفاده قرار گرفته و نهایتاً مدل مساله با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری *NSGA-II* مورد حل قرار گرفته است تا با انتخاب نوع و تعداد تابلوهای توزیع مناسب در هر زیرسیستم، مقدار قابلیت دسترسی سیستم افزایش یافته و هزینه‌ی کل کاهش یابد.

بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان^۱ سیستم‌های شناور در شکل ۴ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، سیستم توزیع انرژی الکتریکی از جمله مهم‌ترین و اصلی‌ترین سیستم‌های شناور است، زیرا سیستم توزیع انرژی الکتریکی مستقیماً وظیفه‌ی تامین برق مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی را بر عهده دارد و در صورت اختلال در سیستم توزیع انرژی الکتریکی، سایر مصرف‌کنندگان انرژی دچار اختلال خواهند شد.



شکل ۴- بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان سیستم‌های شناور.
Figure 4- Block diagram of reliability of floating systems.

۷-۱- ماتریس انتقال حالت

ماتریسی که می‌تواند گذار حالت‌ها را بیان کند ماتریس آهنگ گذار است که با Q نشان داده می‌شود. است، q_{ij} نشان‌دهنده‌ی تغییر حالت سیستم از i به j است.

طول عمر تجهیزات فعال (تجهیزاتی که در حال کار هستند و سالم هستند) از توزیع $PH(\alpha, w)$ پیروی می‌کنند. توزیع نمایی یک مورد ویژه از توزیع PH با پارامترهای λ ، $W = -\lambda$ ، $W_0 = \lambda$ و $\alpha = [I]$ است که اجزا از این توزیع پیروی می‌کنند. زمان تعمیر در دوره تعمیر توزیع $PH(S, \beta)$ را دنبال می‌کند. نرخ تعمیر S و نرخ پایان تعمیر S_0 است و تعمیرکار بلافاصله بعد از خرابی قطعه‌ای با پیروی از بردار β تعمیر را شروع می‌کند. زمان تعطیلات از فرآیند ورود مارکوف $MAP(D_1, D_0)$ و بردار اولیه d برداری که شروع کردن مرخصی تعمیرکار را نشان می‌دهد) پیروی می‌کند. تعطیلات با نرخ D_0 شروع می‌شود و با نرخ D_1 به پایان می‌رسد.

جدول ۱- ماتریس گذار حالات.
Table 1- State matrix.

	S1	S2	S3	S4
S1	$W3\alpha \oplus D0 + IW3\alpha \otimes D1$	$W03\alpha \otimes e \otimes \beta$	0	0
S2	$\alpha3\alpha \otimes S0d$	$W2\alpha(1) \oplus S$	$W02\alpha(1) \otimes Is$	0
S3	0	$\alpha2\alpha \otimes S0\beta$	$W(2) \oplus S$	$W0(2) \otimes Is$
S4	0	0	$\alpha \otimes S0\beta$	S

بدین ترتیب از حالت‌ها برای بیان کردن وضعیت سیستم استفاده می‌شود، که در آن مجموعه حالت‌ها با $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ نشان داده می‌شود و ترکیب این حالت‌ها ماتریسی از فرآیند مارکوف را تشکیل می‌دهد. در ادامه ماتریس انتقال حالت استراتژی فعال برای سه تجهیز تشریح گردیده است.

¹ Reliability block diagram

پس از حل مساله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی، بهینه‌ترین حالت جهت افزایش قابلیت دسترسی و کاهش هزینه‌ها مشخص خواهد شد. حالت‌های ماتریس انتقال حالت در استراتژی فعال به صورت زیر است:

$S_1 = S_1$ همه اجزا فعال هستند، تعمیرکار در تعطیلات است.

$S_2 = S_2$ دو قطعه فعال هستند، یک قطعه خراب شده است و در حال تعمیر است.

$S_3 = S_3$ یک قطعه فعال است، دو قطعه خراب شده‌اند که یکی از آنها در حال تعمیر است و دیگری در انتظار تعمیر است.

$S_4 = S_4$ همه قطعات خراب شده‌اند، یکی از آنها در حال تعمیر است، دو قطعه دیگر در انتظار تعمیر هستند.

$S_1 \rightarrow S_1$: شامل دو بخش است، قسمت اول ($W_{3a} \otimes D^0$) نشان می‌دهد که انتقال ممکن است در فاز قطعات رخ دهد یا انتقال ممکن است در فاز زمان تعطیلات اتفاق بیفتد. برای بخش دوم ($I_{W_{3a}} \otimes D^1$) درحالی‌که قطعات کار می‌کنند مرخصی تمام می‌شود و مرخصی بعدی شروع می‌شود. (تغییر فاز در تعمیرکار انجام می‌شود و فاز قطعات ثابت است.)

نکته: ثابت بودن فاز را با I_X نشان می‌دهیم. (یک ماتریس واحد به سائز X)

$S_1 \rightarrow S_2$: یکی از قطعات خراب می‌شود و تعمیرکار تعطیلاتش را ترک می‌کند و بلافاصله پس از تعطیلات تعمیر قطعه شکست‌خورده را شروع می‌کند.

$W_{3a}^0 \otimes e \otimes \beta$ ← قطعه سالم خراب می‌شود.
↓
شروع کردن تعمیر با بردار β نشان داده می‌شود.

e = تعمیرکار از حالت مرخصی خارج شده است. (شکستن مرخصی با بردار e نشان داده می‌شود.)

نکته: e ماتریس ستونی است که تمام درایه‌های آن یک است.

$S_2 \rightarrow S_1$: تعمیرکار تعمیر قطعه خراب را به پایان می‌رساند، سپس تعطیلات و مرخصی خود را شروع می‌کند. قطعه تعمیرشده با پیروی از بردار α وارد سیستم می‌شود.

$\alpha_{3a} \otimes S^0 d$
↓ ↓
قطعه ای که سالم شده وارد سیستم می‌شود.
تمام شدن تعمیر با S^0 نشان داده می‌شود.

d = شروع کردن مرخصی تعمیرکار با بردار d نشان داده می‌شود؛ (زمانی که هیچ قطعه خرابی نداریم و تعمیرکار باید مرخصی برود).

$S_2 \rightarrow S_2$: انتقال در فاز قطعات یا انتقال در فاز تعمیر قطعات است ($W_{2a(1)} \otimes S$).

$S_2 \rightarrow S_3$: درحالی‌که تعمیرکار در حال تعمیر قطعه شکست‌خورده قبلی است، قطعه‌ی سالم خراب می‌شود.

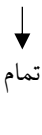
$W02\alpha(1) \otimes Is$ ← قطعه سالم خراب می شود.



تعمیرکار در حال تعمیر قطعه قبلی است و فاز آن ثابت است؛ (تغییر فاز در قطعات است).

$S_3 \rightarrow S_2$: تفاوت این حالت با حالت $S_1 \rightarrow S_2$ در این هست که تعمیر کار بعد از پایان تعمیر قطعه، بلافاصله تعمیر قطعه بعدی را شروع می کند.

$\alpha_{2\alpha} \otimes S^0\beta$ ← قطعه ای که سالم شده است وارد سیستم می شود.



تمام شدن تعمیر با S^0 نشان داده می شود.

شروع کردن تعمیر با بردار β نشان داده می شود.

$S_3 \rightarrow S_3$: مانند حالت $S_2 \rightarrow S_2$ است.

$S_3 \rightarrow S_4$: مانند حالت $S_2 \rightarrow S_3$ است.

$S_4 \rightarrow S_3$: مانند حالت $S_3 \rightarrow S_2$ است.

$S_4 \rightarrow S_4$: در این مرحله تمام قطعات خراب شده اند و تعمیرکار مشغول تعمیر قطعه خراب است و دو واحد خراب دیگر منتظر تعمیر هستند.

طبق رابطه ی اشتراک گذاری بار به صورت رابطه (۵) داریم:

$$\lambda(i) = \lambda(0)(1 + \theta(FC(i)))^{\gamma} \quad (5)$$

از رابطه ی اشتراک گذاری بار جهت محاسبه نرخ خرابی استفاده می گردد.

i : نرخ خرابی در زیرسیستم

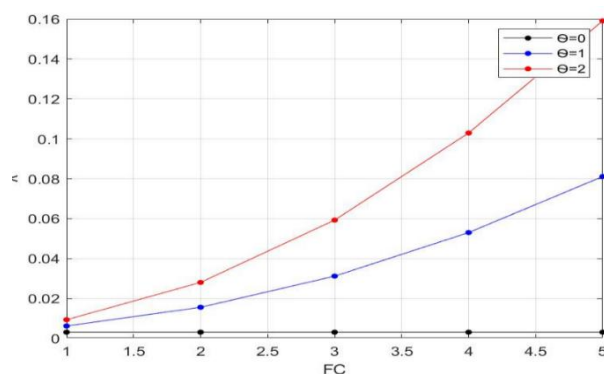
$\lambda(0)$: نرخ خرابی اولیه قطعات فعال

$FC(i)$: تعداد واحدهای خراب در زیرسیستم i

θ : ضریب خطی تعداد قطعات خراب در نرخ خرابی

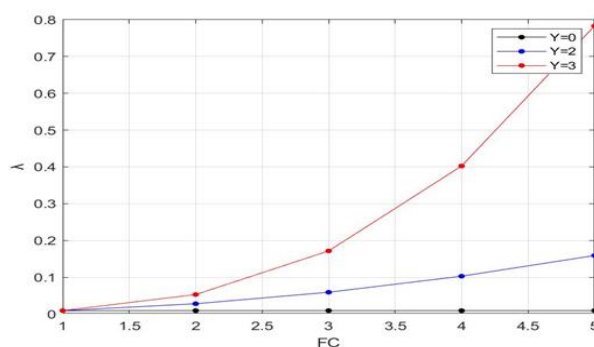
Y : ضریب نمایی تعداد قطعات خراب در نرخ خرابی

شکل ۵ مقادیر پارامتر θ و تاثیر پارامتر θ بر نرخ خرابی و شکل ۶ مقادیر پارامتر Y و تاثیر پارامتر Y بر نرخ خرابی را نشان می دهد.



شکل ۵- تاثیر پارامتر θ بر نرخ خرابی.

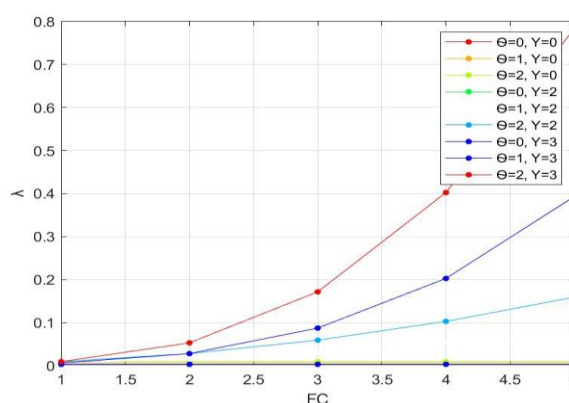
Figure 5- The effect of parameter θ on failure rate.



شکل ۶- تاثیر پارامتر Y بر نرخ خرابی.

Figure 6- The effect of parameter Y on the failure rate.

شکل ۷ مقادیر پارامتر θ و Y و تاثیرات هم زمان هر دوی آن ها بر نرخ خرابی را نشان می دهد.



شکل ۷- تاثیر پارامتر θ و Y بر نرخ خرابی.

Figure 7- The effect of parameters θ and Y on the failure rate.

همان طور که در شکل ۴ و شکل ۵ قابل مشاهده است، در رابطه اشتراک گذاری بار با افزایش پارامتر θ و Y ، نرخ خرابی افزایش می یابد. بدین ترتیب، میزان تاثیر و معتبر بودن اعداد پارامتر θ و Y بر روی رابطه اشتراک گذاری بار نشان داده شده است.

بردار احتمال ثابت

از معادله $\pi Q=0$ برای نشان دادن بردار احتمال ثابت استفاده می گردد که در آن $\pi = (\pi_{s1}, \pi_{s2}, \pi_{s3}, \pi_{s4})$ بردار احتمال ثابت و Q ماتریس گذار است و جهت محاسبه قابلیت دسترسی و ... مورد استفاده قرار می گیرد.

بردار احتمال ثابت به صورت رابطه (۶) به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \pi_{s1}(W_{3a} \oplus D^0 + I_{W_{3a}} \otimes D^1) + \pi_{s2}(\alpha_{3a} \otimes S^0 d) &= 0 \\ \pi_{s1}(W^0_{3a} \otimes e \otimes \beta) + \pi_{s2}(W_{2a(1)} \oplus S) + \pi_{s3}(\alpha_{2a} \otimes S^0 \beta) &= 0 \\ \pi_{s2}(W^0_{2a(1)} \otimes I_s) + \pi_{s3}(W_{(2)} \oplus S) + \pi_{s4}(\alpha \otimes S^0 \beta) &= 0 \\ \pi_{s3}(W^0_{(2)} \otimes I_s) + \pi_{s4}(S) &= 0 \\ \pi_{s1} + \pi_{s2} + \pi_{s3} + \pi_{s4} &= 1 \end{aligned} \quad (۶)$$

π_{si} = احتمال ماندن در حالت S_i یا احتمال حالت S_i

بدین ترتیب مدل ریاضی پژوهش حاضر با توجه به محدودیت‌های موجود در پژوهش، به صورت رابطه (۶) است:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_T \\ \text{Max } A_S \\ g_{(1)}(n_1, n_2, \dots, n_h) = \sum_i^h w_i v_i^2 n_i^2 \leq V, \\ g_{(2)}(n_1, n_2, \dots, n_h) = \sum_i^h c_{(i)} n_{(i)} \leq C, \\ g_{(3)}(n_1, n_2, \dots, n_h) = \sum_i^h n_{(i)} w_{(i)} \leq W, \end{aligned} \quad (۶)$$

A_S : قابلیت دسترسی کل سیستم

Z_T : جمع هزینه‌های خرید و آلودگی

$n_{(i)}$: تعداد قطعات در زیرسیستم i

$c_{(i)}$: هزینه هر قطعه در زیرسیستم i

$w_{(i)}$: وزن هر قطعه در زیرسیستم i

$v_{(i)}$: حجم هر قطعه در زیرسیستم i

V : حد بالای حجم کل سیستم

C : حد بالای هزینه کل سیستم

W : حد بالای وزن کل سیستم

h : تعداد زیرسیستم‌ها

تابع هدف هزینه‌ها

$n_{1(i)}$: تعداد قطعات در زیرسیستم i است.

Z_1 : کل هزینه خرید است و مطابق با رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

$$Z_1 = \sum n_{1(i)} c_{(i)}. \quad (۷)$$

$n_2(i)$: متوسط قطعات در حال کار در زیرسیستم i با استفاده از رابطه (۸) قابل محاسبه است و n_{si} تعداد قطعات فعال هر زیرسیستم است.

$$n_2(i) = \sum n_{si} \pi_{si}. \quad (۸)$$

$c_2(i)$: هزینه آلودگی به ازای هر ساعت کارکردن هر قطعه در زیرسیستم i است.

Z_2 : کل هزینه آلودگی است و مطابق با رابطه (۹) محاسبه می‌گردد. مدت زمان $t=20$ ساعت به ازای ۲۰ ساعت کارکردن تجهیز و با توجه به نوع سیستم موردبررسی و نوع شناور در نظر گرفته شده است.

$$Z_2 = t \times \sum^h n_2(i) \cdot c_2(i). \quad (۹)$$

هزینه کل به صورت جمع هزینه خرید و آلودگی مطابق با رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

قابلیت دسترسی زیرسیستم‌ها و سیستم

در دسترس بودن زیرسیستم، به معنی احتمال کارکردن زیرسیستم است، یعنی مجموع تمام حالات عملکردی (تمام حالاتی که سیستم خراب نمی‌شود و به فعالیت خود ادامه می‌دهد) که به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$Z_T = Z_1 + Z_2. \quad (۱۰)$$

$$A_i = \pi s_1 e + \pi s_2 e + \pi s_3 e. \quad (۱۱)$$

قابلیت دسترسی سیستم توزیع شامل ۵ زیرسیستم نیز با استفاده از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است:

$$\prod_{i=1}^5 A_i = A_S. \quad (۱۲)$$

احتمال کار تعمیرکار

تعمیرکار زمانی مشغول تعمیر است که سیستم دچار خرابی شده باشد، به عبارت دیگر سیستم در یکی از حالت‌های S_2 ، S_3 و S_4 قرارگرفته باشد. بنابراین، احتمال کار تعمیرکار مطابق با رابطه (۱۳) برابر است با:

$$PW = \pi s_2 e + \pi s_3 e + \pi s_4 e. \quad (۱۳)$$

با توجه به ماتریس انتقال حالت و مدل ریاضی حل مساله، داده‌های ورودی جهت حل مساله با استفاده از الگوریتم NSGAI به جهت انتخاب مناسب نوع و تعداد تابلوهای توزیع در هر زیرسیستم به جهت افزایش قابلیت دسترسی سیستم و کاهش هزینه کل سیستم به شرح زیر است:

$$\alpha = [1] \quad d = [1 \quad 0] \quad \beta = [1 \quad 0] \quad t = 20 \quad I_0 = [1] \quad h = 5$$

$$\text{Max Cost} = 3700 \quad \text{Max Weight} = 130 \quad \text{Max Volume} = 450$$

$$D^1 = \begin{bmatrix} -0.45 & 0.05 \\ -0.1 & -0.5 \end{bmatrix} \quad D^0 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0.4 \end{bmatrix}$$

$$S^0 = \begin{bmatrix} 0.55 \\ 0.55 \end{bmatrix}.$$

مشخصات الگوریتم NSGAI با استفاده از روش تاگوچی استخراج و در جدول ۱ ارایه گردیده است. همچنین مقادیر پارامترهای رابطه اشتراک‌گذاری بار در جدول ۲ ارایه گردیده است.

جدول ۲- مشخصات الگوریتم NSGAI و مقادیر پارامترهای رابطه‌ی اشتراک‌گذاری بار.

Table 2- NSGAI algorithm specifications and load sharing relationship parameter values.

300	تعداد جمعیت (n pop)
0.9	نرخ عملگر تقاطع (Crossover rate)
0.3	نرخ عملگر جهش (Mutation rate)
100	تعداد تکرار الگوریتم برای رسیدن به جواب بهینه
2	مقدار پارامتر θ
3	مقدار پارامتر γ
0.5	نرخ خرابی اولیه ($\lambda(0)$) در رابطه اشتراک‌گذاری بار

در جدول ۳ نرخ خرابی هر نوع تابلو توزیع برق در هر زیرسیستم مشخص گردیده است. در هر زیرسیستم می‌بایست تابلوی مناسب با توجه به نرخ خرابی تابلوها و رابطه‌ی اشتراک‌گذاری بار مورد استفاده قرار گیرد تا حداکثر قابلیت دسترسی سیستم حاصل گردد.

جدول ۳- نرخ خرابی تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم.

Table 3- Failure rate of power distribution boards in each subsystem.

زیرسیستم اول	زیرسیستم دوم	زیرسیستم سوم	زیرسیستم چهارم	زیرسیستم پنجم	
0.00312	0.00218	0.00455	0.00119	0.00461	تابلوی توزیع نوع ۱
0.00372	0.00427	0.00262	0.00266	0.00124	تابلوی توزیع نوع ۲
0.00416	0.00631	0.00523	0.00423	0.00344	تابلوی توزیع نوع ۳
0.00518	0.00475	0.00152	0.00711	0.00421	تابلوی توزیع نوع ۴

حجم هر یک از تابلوهای توزیع برق مورد استفاده در سیستم برق متفاوت است. در جدول ۴ حجم تابلوهای مورد استفاده ارائه شده است. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی و پس از حل مساله، بهینه‌ترین حالت جهت ترکیب تابلوها جهت برقراری محدودیت حجم مشخص خواهد شد.

حجم تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم به صورت جدول ۴ است:

جدول ۴- حجم تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم.

Table 4- Volume of electrical distribution panels in each subsystem.

زیرسیستم اول	زیرسیستم دوم	زیرسیستم سوم	زیرسیستم چهارم	زیرسیستم پنجم	
0.40	0.75	0.90	0.60	0.80	تابلوی توزیع نوع ۱
0.45	0.60	0.50	0.80	0.75	تابلوی توزیع نوع ۲
0.65	0.75	0.50	0.60	0.	تابلوی توزیع نوع ۳
0.55	0.70	0.65	0.85	0.60	تابلوی توزیع نوع ۴

وزن هر یک از تابلوهای توزیع برق مورد استفاده در سیستم برق نیز متفاوت است. در جدول ۵ وزن تابلوهای توزیع برق مورد استفاده ارائه شده است. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی و پس از حل مساله، بهینه‌ترین حالت جهت ترکیب تابلوهای توزیع برق جهت برقراری محدودیت وزن مشخص خواهد شد.

وزن تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم به صورت جدول ۵ است:

جدول ۵- وزن تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم.

Table 5- Weight of electrical distribution panels in each subsystem.

زیرسیستم اول	زیرسیستم دوم	زیرسیستم سوم	زیرسیستم چهارم	زیرسیستم پنجم	
6	6	5	4	7	تابلوی توزیع نوع ۱
5	7	7	5	8	تابلوی توزیع نوع ۲
10	9	8	6	11	تابلوی توزیع نوع ۳
6	8	11	9	5	تابلوی توزیع نوع ۴

هزینه خرید و الودگی هر یک از تابلوهای توزیع برق مورد استفاده در سیستم برق متفاوت است. در جدول ۶ و جدول ۷ هزینه تابلوهای توزیع برق مورد استفاده، ارایه شده است. با استفاده از الگوریتم بهینه سازی و پس از حل مساله، بهینه ترین حالت جهت ترکیب تابلوهای توزیع برق جهت برقراری محدودیت هزینه و مقدار بهینه ی تابع هدف هزینه ی کل مشخص خواهد شد.

هزینه خرید تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم به صورت جدول ۶ است:

جدول ۶- هزینه خرید تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم.

Table 6- Cost of purchasing power distribution panels in each subsystem.

زیرسیستم اول	زیرسیستم دوم	زیرسیستم سوم	زیرسیستم چهارم	زیرسیستم پنجم
۱۰۰	۱۵۰	۹۶	۱۸۰	۸۵
۸۰	۲۰۰	۱۸۵	۷۰	۱۷۰
۱۱۰	۱۱۵	۱۷۵	۱۳۲	۹۰
۷۵	۶۵	۱۰۲	۱۱۵	۸۸

هزینه الودگی تابلوهای توزیع برق به ازای هر ساعت کارکرد هر قطعه در هر زیرسیستم به صورت جدول ۷ است:

جدول ۷- هزینه الودگی تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم.

Table 7- Cost of pollution of electrical distribution boards in each subsystem.

زیرسیستم اول	زیرسیستم دوم	زیرسیستم سوم	زیرسیستم چهارم	زیرسیستم پنجم
۱۳	۱۶.۵	۱۲.۵	۱۷.۶	۱۲.۱
۱۲	۲۰	۱۸	۱۰	۱۶.۵
۱۴	۱۴.۵	۱۷	۱۵	۱۲.۷
۱۰.۵	۱۰	۱۳.۲	۱۴	۱۲.۵

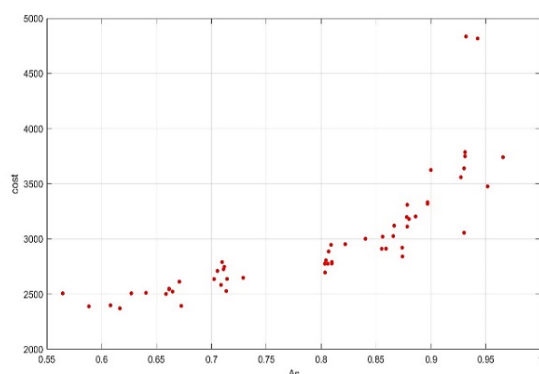
همان طور که در بخش های قبل بیان گردید، مساله مورد نظر از نوع $NP-hard$ است و با افزایش اندازه ی مساله و محدودیت ها، حجم محاسبات به صورت نمایی افزایش می یابد، لذا استفاده از روش های دقیق برای حل مساله میسر نبوده و می بایست برای حل مساله در ابعاد بزرگ از الگوریتم های فرا ابتکاری نظیر $NSGAI$ استفاده شود. بدین ترتیب، جهت بررسی و تست مدل و نتایج حاصل از حل با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری $NSGAI$ ، ابتدا مدل حاصل از پژوهش مساله در ابعاد کوچک با استفاده از روش دقیق مورد حل قرار گرفت. نتایج برخی جواب های حاصل از حل مدل به روش دقیق در جدول ۸ آمده است. از آنجا که اختلاف نتایج حاصل از حل به روش دقیق با نتایج حاصل از حل مساله با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری $NSGAI$ اندک است و در حالت کلی برخی از مقادیر توابع هدف در روش حل دقیق از برخی از مقادیر توابع هدف حاصل از حل با الگوریتم بهتر و از برخی دیگر اندکی بدتر است و اختلاف اندکی بین جواب ها وجود دارد، لذا کارایی الگوریتم و صحت نتایج استخراج شده از حل مدل با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری $NSGAI$ تایید می گردد.

جدول ۸- نتایج برخی جواب های حاصل از حل مدل به روش دقیق.

Table 8- Results of some solutions obtained from solving the model using the exact method.

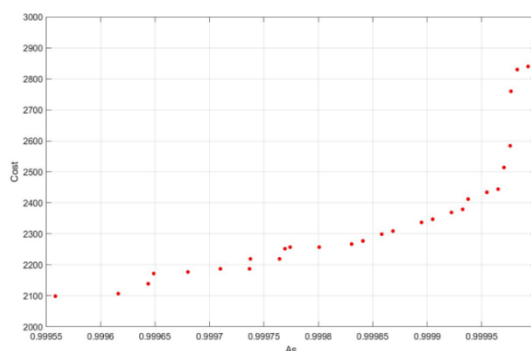
برخی جواب های حاصل از حل مدل به روش دقیق			$\Theta=2 \quad Y=3$
0.9995748631	0.9999972187	0.9999972187	قابلیت دسترسی کل سیستم
2133.85429	2352.55128	2061.922563	هزینه کل

روند شکل‌گیری مرز پارتو در حل مساله با استفاده از الگوریتم *NSGAII* در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است:



شکل ۸- روند شکل‌گیری مرز پارتوی جواب‌ها در تکرار ۱۰.

Figure 8- The process of forming the Pareto frontier of solutions in iteration 10.



شکل ۹- روند شکل‌گیری مرز پارتوی جواب‌ها در تکرار ۳۰.

Figure 9- The process of forming the Pareto frontier of solutions in iteration 30.

همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، روند شکل‌گیری مرز پارتو در تکرارهای بالاتر الگوریتم به خوبی نشان داده شده است. نقاط پارتو، میزان قابلیت دسترسی در مقابل هزینه را نشان می‌دهند. کلیه‌ی جواب‌های حاصل شده بهینه می‌باشند و هیچ یک از جواب‌ها برتری خاصی نسبت به یکدیگر ندارند. جدول ۹ برخی از پاسخ‌های بهینه‌ی منتخب تشکیل شده در مرز پارتوی جواب‌ها و احتمال کار تعمیرکار در هر جواب بهینه پارتو را نشان می‌دهد.

جدول ۹- پاسخ‌های بهینه منتخب تشکیل شده در مرز پارتو.

Table 9- Selected optimal responses formed on the Pareto frontier.

احتمال کار تعمیرکار	هزینه کل	قابلیت دسترسی	زیرسیستم ۵	زیرسیستم ۴	زیرسیستم ۳	زیرسیستم ۲	زیرسیستم ۱	
0.35	2166.93136	0.999688011	3	2	1	4	4	نوع تابلو توزیع
			4	1	2	2	1	تعداد تابلو
0.30	2463.999863	0.999999421	4	2	4	4	4	نوع تابلو توزیع
			2	2	4	3	3	تعداد تابلو
0.29	2615.999982	0.999999887	4	2	1	4	4	نوع تابلو توزیع
			3	2	3	3	3	تعداد تابلو
0.33	2044.917392	0.99992645	1	2	1	3	2	نوع تابلو توزیع
			1	1	4	2	1	تعداد تابلو

۸- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر یک سیستم سری-موازی توزیع انرژی الکتریکی در یک شناور باهدف بهینه‌سازی قابلیت دسترسی و مجموع هزینه‌ها با امکان اشتراک‌گذاری بار مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. سیستم مورد مطالعه دارای محدودیت حجم، وزن و هزینه بوده و یک تعمیرکار جهت تعمیر تجهیزات خراب باسیاست نگهداشت و مرخصی پیش‌بینی گردیده است. مساله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی NSGAIII مورد حل قرار گرفته است و بهترین جواب‌های بهینه حاصل از انتخاب بهترین نوع تابلوی توزیع به صورت همگن و انتخاب تعداد مناسب تابلو توزیع در هر زیرسیستم حاصل از حل مدل جهت حداکثر نمودن قابلیت دسترسی و حداقل نمودن مجموع هزینه‌ها در سیستم ارایه گردیده است. ترکیب بهینه نوع و تعداد تابلوها در جدول نتایج حاصل از الگوریتم به جهت افزایش قابلیت دسترسی و کاهش هزینه‌ها ارایه گردیده است. جواب‌های بهینه حاصل از تشکیل مرز پارتو، هیچ‌گونه برتری نسبت به یکدیگر نداشته و تمامی جواب‌های تشکیل شده بر روی مرز پارتو بهینه هستند. در برخی از جواب‌ها هزینه‌ی کل کمتر بوده و در برخی دیگر قابلیت دسترسی بالاتر بوده است و بدین ترتیب جواب‌های بهینه هیچ برتری نسبت به یکدیگر ندارند. از یک تعمیرکار با نوعی سیاست نگهداشت و مرخصی جهت تعمیر تابلوهای خراب استفاده گردیده است که با مشاهده‌ی احتمال کار تعمیر در هر پاسخ بهینه می‌توان دریافت که حجم کار تعمیرکار به گونه‌ای است که می‌توان جهت تعمیر برخی دیگر از تجهیزات خراب در سیستم توزیع انرژی الکتریکی نیز از تعمیرکار مربوطه استفاده نمود. علاوه بر آن، می‌توان سیاست نگهداشت و مرخصی دیگری را نیز برای تعمیرکار در نظر گرفت. همچنین می‌توان در زمان‌های بیکاری تعمیرکار، از تعمیرکار مربوطه به جهت بازرسی و بازرینی از سایر سیستم توزیع تجهیزات استفاده نمود. همچنین می‌توان از چند تعمیرکار جهت تعمیر تمامی تجهیزات خراب سیستم توزیع باسیاست نگهداشت و مرخصی متفاوت استفاده نمود. همچنین می‌توان به جای تجهیزات همگن، از تجهیزات متفاوت در هر زیرسیستم استفاده نموده و نتایج حاصل را تحلیل نمود. با توجه به مشخص بودن مقادیر هزینه در هر جواب بهینه، می‌توان از سایر تامین‌کنندگان دارای تجهیزات باکیفیت مشابه جهت کاهش هزینه‌ها استفاده نمود. در پژوهش‌های آتی می‌توان از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی جهت حل مساله استفاده نمود.

در پژوهش‌های آتی می‌توان مقادیر پارامترهای رابطه اشتراک‌گذار بار را تغییر داده و تاثیر آن‌ها بر روی نرخ خرابی و سایر خروجی‌های حاصل از حل مدل بررسی گردد و با نتایج فعلی مقایسه شود.

مشارکت نویسندگان

کلیه نویسندگان در تمامی مراحل این پژوهش، مشارکتی فعال داشته‌اند. نسخه نهایی مقاله نیز توسط تمامی نویسندگان مطالعه و تایید شده است.

تعارض با منافع

هیچ تضادی در منافع در مورد انتشار این نسخه وجود ندارد و همه نویسندگان، نسخه نهایی ارسال شده را مشاهده و تایید کرده‌اند. نویسندگان تضمین می‌کنند که مقاله اثر اصلی آن‌ها بوده و پیش از این چاپ نشده و در حال حاضر تحت انتشار نیست.

منابع مالی

در طول انجام این پژوهش هیچ‌گونه کمک هزینه خاصی از هیچ موسسه، سرمایه‌گذار در بخش عمومی، خصوصی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نشده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از داوران محترم اعلام می‌دارند، بی‌شک دیدگاه ارزشمند ایشان در بهبود کیفیت مقاله نقش به‌سزایی داشته است.

- [1] Ebling, C. E. (2021). *An introduction to reliability and maintainability engineering*. Akhtar negar. <https://ketabnak.com/book/123841/>
- [2] Jafarnejad, A., Esmaeilian, M. (2012). *Maintenance and reliability management*. <https://samta.samt.ac.ir/content/9539/>
- [3] Golmohammadi, E., & Ardakan, M. A. (2022). Reliability optimization problem with the mixed strategy, degrading components, and a periodic inspection and maintenance policy. *Reliability engineering & system safety*, 223, 108500. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108500>
- [4] Oszczypała, M., Ziółkowski, J., & Malachowski, J. (2024). Redundancy allocation problem in repairable k-out-of-n systems with cold, warm, and hot standby: A genetic algorithm for availability optimization. *Applied soft computing*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112041>
- [5] Noormohammadi, G., Safari, J., Najafi, S. E., & Movahedi Sobhani, F. (2025). Defense and attack strategy optimization for reliability systems with virtual components and active redundancy with a game theory approach. *Journal of decisions and operations research*, 10(1), 109–124. <https://doi.org/10.22105/dmor.2025.497532.1902>
- [6] Jadhav, S., & Kumar, A. (2025). Stochastic modeling and availability optimization of wireless sensor network through particle swarm optimization. *Reliability engineering & system safety*, 111538. <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111538>
- [7] Jakkula, B., Mandela, G. R., & Tripathi, A. K. (2025). Reliability-based scheduled maintenance (SM) for mining equipment with artificial neural network (ANN) model. *Precis. mech. digit. fabr.*, 2(2), 124–133. https://library.acadlore.com/PMDF/2025/2/2/PMDF_02.02_05.pdf
- [8] Garg, D., Popli, D., Kamboj, P., & Vashishth, N. (2025). Reliability availability maintainability dependability (ramd) optimization: A case study of manufacturing plant. *Reliability: theory & applications*, 20(2 (84)), 308–323. <https://cyberleninka.ru/article/n/reliability-availability-maintainability-dependability-ramd-optimization-a-case-study-of-manufacturing-plant>
- [9] Yusuf, I., Auta, K. S., & Kabeer, M. (2024). Optimizing system availability in client-server network through fog computing: a stochastic model with foggy markovian paths. *Risk assessment and management decisions*, 1(1), 102–118. <https://doi.org/10.48314/ramd.v1i1.38>
- [10] Juybari, M. N., Zeinal Hamadani, A., & Liu, B. (2022). A Markovian analytical approach to a repairable system under the mixed redundancy strategy with a repairman. *Quality and reliability engineering international*, 38(7), 3663–3688.
- [11] Peiravi, A., Ardakan, M. A., & Zio, E. (2020). A new Markov-based model for reliability optimization problems with mixed redundancy strategy. *Reliability engineering & system safety*, 201, 106987. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.106987>
- [12] ZhAng, C., & ZhAng, Y. (2020). Common cause and load-sharing failures-based reliability analysis for parallel systems. *Eksploatacja i niezawodność*, 22(1). <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.1.4>
- [13] de Paula, C. P., Visnadi, L. B., & de Castro, H. F. (2019). Multi-objective optimization in redundant system considering load sharing. *Reliability engineering & system safety*, 181, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.08.012>
- [14] Xu, H., Fang, Y., & Fard, N. (2018). Optimal design for resilient load-sharing systems with nonidentical components. *Quality and reliability engineering international*, 34(6), 1254–1270.
- [15] Kayedpour, F., Amiri, M., Rafizadeh, M., & Nia, A. S. (2017). Multi-objective redundancy allocation problem for a system with repairable components considering instantaneous availability and strategy selection. *Reliability engineering & system safety*, 160, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.10.009>
- [16] Zhao, X., Liu, B., & Liu, Y. (2018). Reliability modeling and analysis of load-sharing systems with continuously degrading components. *IEEE transactions on reliability*, 67(3), 1096–1110. <https://doi.org/10.1109/TR.2018.2846649>
- [17] Xiao, H., Shi, D., Ding, Y., & Peng, R. (2016). Optimal loading and protection of multi-state systems considering performance sharing mechanism. *Reliability engineering & system safety*, 149, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.12.001>
- [18] Sharifi, M., Cheragh, G., Maljajii, K. D., Zaretalab, A., & Fakre Daei, A. V. (2015). Reliability optimization of a series-parallel k-out-of-n system with failure rate depends on working components of system. *International journal of industrial engineering*, 22(4). <https://www.researchgate.net/profile/Arash-Zaretalab/publication/281061933>
- [19] Liu, B., Cui, L., Wen, Y., & Shen, J. (2015). A cold standby repairable system with working vacations and vacation interruption following Markovian arrival process. *Reliability engineering & system safety*, 142, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.04.010>
- [20] Han, Y., Wen, Y., Guo, C., & Huang, H. (2015). Incorporating cyber layer failures in composite power system reliability evaluations. *Energies*, 8(9), 9064–9086. <https://doi.org/10.3390/en8099064>
- [21] Guo, J., Wang, Z., Zheng, M., & Wang, Y. (2014). Uncertain multiobjective redundancy allocation problem of repairable systems based on artificial bee colony algorithm. *Chinese journal of aeronautics*, 27, 1477–1487. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2014.10.014>
- [22] Zoufaghari, H., Zeinal Hamadani, A., & Ardakan, M. (2013). Bi-objective redundancy allocation problem for a system with mixed repairable and non-repairable components. *ISA transactions*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2013.08.002>
- [23] Noormohammadi, G., Safari, J., Najafi, A., & Movahedi Sobhani, F. (2025). Defense and attack strategy optimization for reliability systems with virtual components and active redundancy using a game theory approach, 10(1), 109-124. (In Persian). doi.org/10.22105/dmor.2025.497532.1902.

- [24] Wu, R., Li, Y., Guo, S., & Wenxiang, X. (2018). Solving the dual-resource constrained flexible job shop scheduling problem with learning effect by a hybrid genetic algorithm. *Advances in mechanical engineering*, 10. <https://doi.org/10.1177/1687814018804096>
- [25] Janbaz, S., Davoodi, S. M., & Abdolbaghi Ataabadi, A. (2023). Presenting a multi-objective mathematical model with an integrated approach to scheduling and financial flow in manufacturing projects using non-dominated sorting genetic algorithm. *Journal of decisions and operations research*, 8(4), 975-992 (In Persian). <https://doi.org/10.22105/dmor.2023.367956.1681>
- [26] farughi, hiva, & Solgi, Z. (2017). Multi-objective optimization of redundancy and reliability allocation in multi-state series-parallel systems. *Journal of quality engineering and management*, 7(3), 176–185. https://www.pqprc.ir/article_79601.html?lang=en
- [27] Billinton, Roy & Allen, R. (2022). *Reliability assessment of engineering systems*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0685-4>
- [28] Abouei Ardakan, M., & Zeinal Hamadani, A. (2014). Reliability optimization of series–parallel systems with mixed redundancy strategy in subsystems. *Reliability engineering & system safety*, 130, 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.res.2014.06.001>
- [29] Peiravi, A., Karbasian, M., & Abouei Ardakan, M. (2018). K-mixed strategy: A new redundancy strategy for reliability problems. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part o: journal of risk and reliability*, 232(1), 38–51. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1748006x17736166>
- [30] Robinson, D. G., & Neuts, M. F. (1989). An algorithmic approach to increased reliability through standby redundancy. *IEEE transactions on reliability*, 38(4), 430–435. <https://doi.org/10.1109/24.46457>
- [31] Sahoo, L. (2017). Genetic algorithm based approach for reliability redundancy allocation problems in fuzzy environment. *International journal of mathematical, engineering and management sciences*, 2(4), 259–272. <https://dx.doi.org/10.33889/IJMEMS.2017.2.4-020>