

## Availability Optimization with Mixed Redundancy in the Electrical Power Distribution System of a Vessel Considering Load Sharing

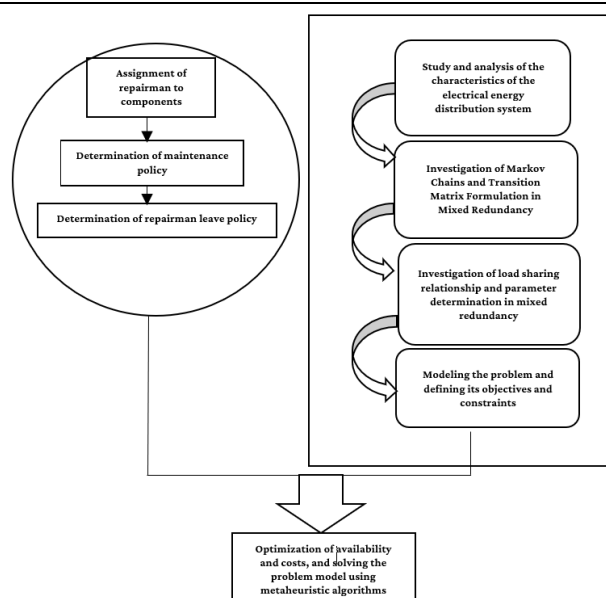
Maryam Ganji<sup>ID</sup>, Mahdi Karbasian<sup>ID</sup>\*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Management and Industrial Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

### HIGHLIGHTS

- Optimization of availability under mixed redundancy in the presence of load sharing
- Consideration of a repairman subject to a repair-and-vacation policy
- Selection of the appropriate type and number of distribution switchboards to simultaneously reduce cost and increase availability under mixed redundancy and load-sharing conditions

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 20 June 2026

Revised: 20 July 2026

Accepted: 3 August 2026

Available online: 3 August 2026

\*Correspondence:

[mkarbasi@mut-es.ac.ir](mailto:mkarbasi@mut-es.ac.ir)

#### How to cite this article:

Ganji, M., & Karbasian, M. (2027). Availability optimization with mixed redundancy in the electrical power distribution system of a vessel considering load sharing. *System Engineering and Productivity*, 7 (1), 93-116.

#### Keywords:

Mixed redundancy strategy

Load sharing

Markov chain

Availability

Vessel electrical energy distribution system

### ABSTRACT

Reliability and availability are among the most important characteristics of components and systems, and continuous efforts have been directed toward their improvement and enhancement. This is because reliability and availability are inversely related to the failure rate: the higher the reliability and availability, the lower the failure rate. The electrical energy distribution system constitutes one of the principal systems of a vessel, responsible for supplying electrical energy to the entire vessel and to energy-consuming loads such as propulsion systems, command-and-control systems, surveillance systems, and auxiliary systems. Distribution switchboards are among the main components of the electrical energy distribution system. Accordingly, in the present study a bi-objective model has been developed for the simultaneous optimization of availability and cost in a vessel electrical energy distribution system that employs mixed redundancy. To this end, the system behavior is first simulated by means of a Markov chain and a phase-type distribution, and the problem is examined under a load-sharing regime. Consequently, the failure of one component affects the failure rates of the remaining components within the subsystem and thereby elevates those rates. A single repairman is considered for the restoration of failed components, and a maintenance-and-vacation policy is adopted for the repairman in order to repair the failed units. The problem is solved by the meta-heuristic algorithms NSGA-II and MOAHA under a mixed-redundancy strategy. The results of the study identify the optimal combination of type and number of electrical distribution switchboards in each subsystem of the vessel electrical energy distribution system while taking load-sharing effects into account, thereby yielding an increase in system availability and a reduction in costs.

## 1. Introduction

Nowadays, optimizing reliability and availability is of particular importance in repairable critical systems. This is because a reduction in system reliability leads to system failure and downtime, as well as shutdown costs and human and financial losses. In addition, the availability of systems and the amount of time they remain accessible when needed are of special importance. Therefore, all maintenance and repair constraints and policies must be planned in such a way that each system and subsystem achieves maximum availability so that it can also meet the required demand levels.

One of the methods for increasing reliability is the use of redundancy. The use of spare components in a system or subsystem gives rise to different redundancy strategies, which include:

- Strategy 1: Active Redundancy Strategy
- Strategy 2: Standby Redundancy Strategy
- Strategy 3: Mixed Redundancy Strategy

The active redundancy strategy (Golmohammadi & Ardakan, 2022) is based on the assumption that all redundant components operate simultaneously from the start of the system's operation, even though only one component is required for the system's function at any given moment. In the standby strategy (Oszczypała et al., 2024), standby components replace the active system components upon their failure.

The mixed strategy simultaneously employs a combination of the active and standby strategies. This strategy was introduced by Ardakan and Hamadani (Ardakan & Hamadani, 2014). In this strategy, after the failure of the last active component, the standby components are activated sequentially by a switch, and this process continues until the last standby component is activated.

Availability (Anderson & Neri, 2012) is also an important index in any system that indicates the amount of available time and is defined using reliability and maintainability. Maintainability (repairability) is also a design and manufacturing characteristic of a product, the goal of which is to reduce repair time.

Redundancy strategies are often used to improve the reliability and availability of a system (Liu et al., 2015).

## 2. Methodology

Each vessel comprises four main systems. The electric power distribution system is one of the most critical systems of the vessel, responsible for supplying electrical energy to the entire vessel to facilitate its movement and the operation of other systems. In this study, the electric power distribution system of a vessel has been investigated. The vessel's electric power distribution system is a series-parallel system consisting of five subsystems, with each subsystem composed of a number of components.

Electrical energy distribution panels are among the most important components of the electrical energy distribution system, responsible for supplying electrical power to energy consumers such as the propulsion system, lighting, command and control, and auxiliary systems. Thus, several energy distribution panels with mixed redundancy should be considered in each subsystem for the purpose of supplying electrical energy to consumers, so that if any of the distribution panels fail, the power supply to the electrical energy system consumers does not stop and the vessel's movement is not disrupted. Therefore, the use of mixed redundancy in the vessel's electrical energy system is of great importance. The system in question has a repairman with a leave policy. Each distribution panel has a different weight, volume, and purchase cost.

In this study, the sum of the pollution-related cost and the purchase cost of each panel is considered as the first objective function, and availability is considered as the second objective function. The purpose of solving the problem is to achieve a balance between the selection of the distribution panel type—where a homogeneous type of distribution panel is used in each subsystem—and the number of distribution panels in each subsystem, so that the system can operate with the best trade-off between cost reduction and availability improvement. The problem is investigated under a mixed redundancy strategy. In this study, load sharing and failure dependency exist, meaning that the failure of one panel affects the failure rate of other panels and increases their failure rates. Accordingly, the failure rate of each panel increases when other panels fail, based on load-sharing relations. Markov chains and phase-type distributions are used to simulate the system behavior. The problem is then solved using the NSGA-II and MOAHA metaheuristic algorithms in order to increase the overall system availability and reduce the total system cost by selecting the proper type and number of distribution panels.

## 3. Results and Discussion

In this research, the electrical power distribution system of a vessel is studied using a mixed redundancy strategy. The problem is addressed by employing two meta-heuristic algorithms: NSGA-II and MOAHA. The Pareto fronts demonstrate the trade-off between availability and cost. The evolution of the Pareto frontier during the problem-solving process is illustrated in Figures 1 and 2. All obtained solutions are optimal, and none of them holds superiority over the others.

## 4. Conclusions

In this study, a series-parallel vessel electric power distribution system was analyzed under a mixed redundancy strategy. The problem was addressed using two metaheuristic algorithms, NSGA-II and

MOAHA, to identify the optimal configuration of the system. Specifically, the model determined the optimal selection of homogeneous distribution panel types and the appropriate number of panels in each subsystem to maximize system availability while minimizing total costs, taking into account the load-sharing effects within the system.

1. In the present research, a repairman with a specific maintenance and vacation policy has been used to repair failed panels. Another maintenance and vacation policy can be considered for the repairman. Furthermore, during the repairman's idle periods, the repairman can be utilized for the inspection and monitoring of other vessel systems or the repair of other failed components.
2. It is possible to use a combination of homogeneous and heterogeneous components in each subsystem and analyze the obtained results. Furthermore, similar components can be used to reduce costs and increase availability, and the results can be examined.
3. In future research, other load-sharing relationships and formulas can be employed, and the obtained results can be compared with the current results. Additionally, other redundancy strategies in the electric power distribution system can be investigated and compared with the results of the present study.

## Funding

This research received no external funding.

## Author contributions

**Maryam Ganji:** Conceptualization, Methodology, Literature review, Data collection, Formal analysis, Framework design, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Mahdi Karbasian:** Initial conceptualization, Methodology, Formal analysis, Framework design, Writing – original draft, Writing – review & editing, Supervision.

## Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

## Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude to all colleagues whose valuable insights and expertise played a significant role in the completion and advancement of this research.

## References

Anderson, R. T., & Neri, L. (Eds.). (2012). *Reliability-centered maintenance: management and engineering methods*. Springer Science &

Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-0757-7>

- Ardakan, M. A., & Hamadani, A. Z. (2014). Reliability optimization of series-parallel systems with mixed redundancy strategy in subsystems. *Reliability Engineering & System Safety*, 130, 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.06.001>
- 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.ress.2022.108500>
- 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.ress.2015.04.010>
- Oszczypała, M., Ziółkowski, J., & Małachowski, 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*, 165, 112041. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112041>

## بهینه‌سازی قابلیت دسترسی با افزونگی مختلط در سیستم توزیع انرژی الکتریکی در یک شناور با در نظر گرفتن اشتراک‌گذاری بار

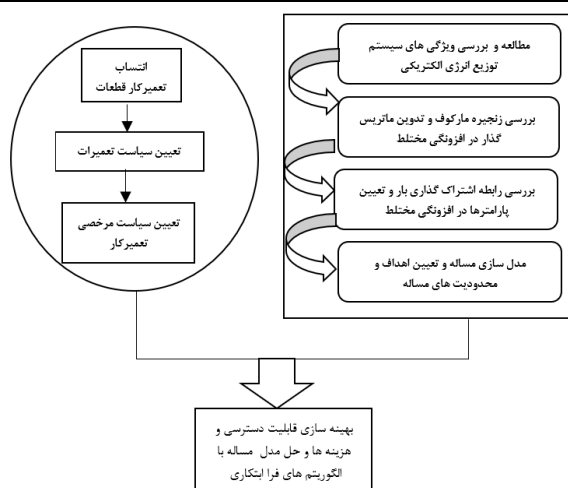
مریم گنجی <sup>id</sup>، مهدی کرباسیان <sup>id\*</sup>

گروه مهندسی صنایع، مجتمع دانشگاهی مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

### برجسته‌ها

- بهینه‌سازی قابلیت دسترسی با افزونگی مختلط و وجود اشتراک‌گذاری بار
- در نظر گرفتن تعمیرکار با نوعی سیاست تعمیر و مرخصی
- انتخاب نوع و تعداد تابلوی توزیع مناسب جهت کاهش هزینه و افزایش قابلیت دسترسی با افزونگی مختلط و اشتراک‌گذاری بار

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

#### تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲

ارائه برخط: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲

\*نویسنده مسئول:

[mkarbasi@mut-es.ac.ir](mailto:mkarbasi@mut-es.ac.ir)

#### کلیدواژه‌ها:

استراتژی افزونگی مختلط

اشتراک‌گذاری بار

زنجیره‌ی مارکوف

قابلیت دسترسی

سیستم توزیع انرژی الکتریکی شناور

### چکیده

قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی از مهم‌ترین ویژگی‌های قطعات و سیستم‌هاست و همواره تلاش‌ها در راستای بهبود و ارتقای آن‌ها بوده است؛ زیرا قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی با نرخ خرابی رابطه‌ی معکوس دارند و هرچه قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی بیشتر باشد، نرخ خرابی کمتر می‌شود. سیستم توزیع انرژی الکتریکی یکی از اصلی‌ترین سیستم‌های شناور است که وظیفه‌ی تأمین انرژی الکتریکی کل شناور و مصرف‌کنندگان انرژی نظیر سیستم‌های رانش، فرماندهی و مراقبت و سیستم‌های فرعی را بر عهده دارد. تابلوهای توزیع یکی از اجزای اصلی سیستم توزیع انرژی الکتریکی هستند. لذا در پژوهش حاضر، یک مدل دوهدفه برای بهینه‌سازی قابلیت دسترسی و هزینه‌ها در سیستم توزیع انرژی الکتریکی شناور با افزونگی مختلط طراحی شده است. به این منظور، ابتدا شبیه‌سازی رفتار سیستم با استفاده از زنجیره‌ی مارکوف و توزیع فاز-نوع صورت گرفته و مسئله با حالت اشتراک‌گذاری بار بررسی گردیده است. بدین ترتیب، خرابی یک قطعه بر نرخ خرابی سایر قطعات زیرسیستم تأثیر گذاشته و باعث افزایش نرخ خرابی می‌شود. یک تعمیرکار نیز برای تعمیر قطعات خراب در نظر گرفته شده و نوعی سیاست نگهداشت و مرخصی برای وی به‌منظور تعمیر قطعات خراب لحاظ گردیده است. برای حل مسئله از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOAHA با استراتژی افزونگی مختلط استفاده شده است. نتایج حاصل از پژوهش، بهترین ترکیب نوع و تعداد تابلوهای توزیع انرژی الکتریکی در هر زیرسیستم از سیستم توزیع انرژی الکتریکی شناور را با در نظر گرفتن تأثیر اشتراک‌گذاری بار مشخص کرده است؛ به‌گونه‌ای که نتایج حاصل منجر به افزایش قابلیت دسترسی و کاهش هزینه‌ها در سیستم توزیع انرژی الکتریکی شناور گردیده است.

## ۱- مقدمه

امروزه مسئله‌ی بهینه‌سازی قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی از اهمیت ویژه‌ای در سامانه‌های حساس تعمیرپذیر برخوردار است؛ زیرا کاهش قابلیت اطمینان سیستم‌ها منجر به خرابی و ازکارافتادگی سیستم‌ها، هزینه‌های توقفات و هزینه‌های جانی و مالی می‌گردد. علاوه بر آن، قابلیت دسترسی و مدت‌زمان در دسترس بودن سیستم‌ها در زمان‌های مورد نیاز نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و می‌بایست تمامی محدودیت‌ها و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی گردد که هر سیستم و سامانه از حداکثر قابلیت دسترسی برخوردار باشد تا بتواند مقادیر تقاضای مورد نیاز را نیز پاسخ دهد.

از جمله روش‌های افزایش قابلیت اطمینان سیستم (Noormohammadi et al., 2025) عبارتند از:

- ۱) افزایش قابلیت اطمینان یک جزء؛
  - ۲) استفاده از اجزای اضافی به‌صورت موازی؛
  - ۳) ترکیب قابلیت اطمینان افزایش‌یافته و اجزای اضافی که به‌صورت موازی تدارک دیده شده‌اند؛
  - ۴) تخصیص مجدد اجزای قابل‌جایگزین.
- گزینه‌های ۲ و ۳ به‌ترتیب مسئله‌ی تخصیص افزونگی<sup>۱</sup> و مسئله‌ی تخصیص قابلیت اطمینان-افزونگی<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند. در مسائل RAP، هر یک از اجزاء دارای ویژگی‌های شناخته‌شده‌ای همچون قابلیت اطمینان، هزینه و وزن هستند و هدف، یافتن تعداد بهینه‌ای از اجزای اضافی در هر زیرسیستم می‌باشد تا حداکثر قابلیت اطمینان کلی سیستم با توجه به محدودیت‌های موجود حاصل شود. مسئله‌ی تخصیص قابلیت اطمینان-افزونگی یک مسئله‌ی بسیار پیچیده در حوزه‌ی بهینه‌سازی قابلیت اطمینان است که هدف آن، یافتن بهترین ساختار با بالاترین قابلیت اطمینان از طریق محاسبه‌ی قابلیت اطمینان اجزاء و تعداد افزونگی برای هر زیرسیستم به‌طور همزمان می‌باشد. به عبارتی دیگر، در مسائل RRAP، قابلیت اطمینان اجزاء مشخص نمی‌باشد، بلکه به‌عنوان یک متغیر طراحی و در عین حال هزینه، وزن و حجم اجزاء به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شوند.

همان‌طور که بیان گردید، یکی از روش‌های افزایش قابلیت اطمینان، استفاده از افزونگی است. استفاده از اجزای مازاد در یک سیستم یا زیرسیستم باعث ایجاد استراتژی‌های مختلف افزونگی می‌گردد که عبارتند از:

- استراتژی اول: تخصیص اجزای مازاد فعال<sup>۳</sup>
  - استراتژی دوم: تخصیص اجزای مازاد آماده‌به‌کار<sup>۴</sup>
  - استراتژی سوم: تخصیص اجزای مازاد مختلط<sup>۵</sup>
- راهبرد افزونگی فعال بر این فرض استوار است که همه‌ی اجزای افزونه به‌طور هم‌زمان، از زمان آغاز کار سیستم شروع به فعالیت می‌کنند، هرچند در هر لحظه تنها یک جزء برای عملکرد سیستم مورد نیاز است (Golmohammadi & Ardakan, 2022). در استراتژی آماده‌به‌کار (ذخیره)، اجزای ذخیره در صورت خرابی اجزای فعال سیستم، جایگزین آن‌ها می‌شوند (Oszczypala et al., 2024). سه استراتژی آماده‌به‌کار سرد، گرم و داغ، با توجه به نرخ خرابی اجزای ذخیره وجود دارد:

- استراتژی آماده‌به‌کار سرد: قطعات ذخیره تحت تأثیر عملکرد سیستم نیستند و هر لحظه که وارد سیستم می‌شوند، مانند یک قطعه‌ی نو عمل می‌کنند.
  - استراتژی آماده‌به‌کار گرم: عمر قطعات ذخیره در حال کاهش است، اما نه به شدت کاهش عمر یک قطعه‌ی فعال.
  - استراتژی ذخیره‌ی داغ: عمر قطعات چه در حالت ذخیره باشد و چه در حالت فعال، به یک میزان کاهش می‌یابد.
- استراتژی مختلط از ترکیب استراتژی فعال و ذخیره به‌صورت همزمان به کار می‌رود. این استراتژی توسط اردکان و همدانی (Ardakan & Hamadani, 2014) معرفی گردید. در این استراتژی بعد از خرابی آخرین قطعه‌ی فعال، قطعات ذخیره به‌نوبت توسط سوئیچ فعال شده و این روند تا فعال شدن آخرین قطعه‌ی ذخیره ادامه می‌یابد. در ابتدای عملیات، تمامی قطعات فعال در حال اجرای عملیات هستند و در زمان خرابی آخرین قطعه‌ی فعال، اولین قطعه‌ی ذخیره جایگزین شده و روند به همین

<sup>۳</sup> Active Redundancy Strategy

<sup>۴</sup> Standby Redundancy Strategy

<sup>۵</sup> Mixed Redundancy Strategy

<sup>۱</sup> Redundancy Allocation Problem (RAP)

<sup>۲</sup> Redundancy-Reliability Allocation Problem (RRAP)



ترتیب ادامه می‌یابد. بدین ترتیب، سیستم زمانی از کار می‌افتد که تمامی قطعات فعال و افزونه‌ی ذخیره دچار خرابی شوند (Peiravi et al., 2018). استراتژی جدیدی که حالت عمومی برای استراتژی مختلط است، ارائه نمودند که آن را استراتژی  $k$ -mixed می‌نامند. استراتژی  $k$ -mixed حالت کلی‌تری از استراتژی مختلط است؛ به این صورت که برخلاف استراتژی مختلط، سوئیچ بعد از خرابی آخرین قطعه‌ی 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 قطعه‌ی ذخیره ادامه می‌یابد.

قابلیت دسترسی (Anderson & Neri, 2012) نیز شاخص مهمی در هر سیستم است که میزان زمان در دسترس را نشان می‌دهد و با استفاده از قابلیت اطمینان و قابلیت نگهداری تعریف می‌شود. قابلیت نگهداری (تعمیرپذیری) نیز یکی از ویژگی‌های طراحی و ساخت محصول است که هدف از انجام آن کاهش زمان تعمیر است. استراتژی‌های افزونگی اغلب برای بهبود قابلیت اطمینان و در دسترس بودن یک سیستم استفاده می‌شوند (Liu et al., 2015).

## ۲- پیشنهاد پژوهش

آسوده و ابویی اردکان در سال ۲۰۲۵ به بهینه‌سازی مقادیر قابلیت اطمینان و هزینه در یک سیستم چندحالتی دارای اشتراک عملکرد پرداختند (Asoudeh & Abouei Ardakan, 2025). در پژوهش فوق، از اشتراک عملکرد به منظور برآورده نمودن تقاضای ثابت در سطوح افزونگی زیرسیستم‌ها استفاده شده و قابلیت اطمینان سیستم با روش تابع مولد سراسری<sup>۱</sup> محاسبه گردیده است. در پژوهش گل‌محمدی و ابویی اردکان (Golmohammadi & Ardakan, 2022) به مطالعه‌ی مدل تخصیص افزونگی سیستمی با افزونگی فعال و آماده‌به‌کار با قطعات تعمیرناپذیر پرداخته شده است. 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 اجزا تحت شرایط سخت محیطی مورد مدل‌سازی و بررسی قرار گرفت. در پژوهشی که توسط اندرخور و اقبالی در سال ۲۰۲۲

(Andarkhor & Eghbali, 2022) به انجام رسیده است، به بهینه‌سازی مسئله‌ی تخصیص افزونگی سه سیستم سری، سری-موازی و پل با استفاده از الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری و ژنتیک پرداخته شده است. الگوریتم فوق کارایی بهتری در مقایسه با الگوریتم‌های پیشین داشته است (Reihaneh et al., 2021). از الگوریتم دقیق انشعاب و قیمت<sup>۲</sup> جهت حل مسئله‌ی تخصیص افزونگی با قطعات ناهمگن تعمیرناپذیر با استراتژی مختلط استفاده نموده‌اند. همچنین الگوریتم BP جهت حل تخصیص افزونگی قابلیت اطمینان با افزونگی فعال یا آماده‌به‌کار نیز مورد استفاده قرار گرفته و امکان بررسی مزایای افزونگی مختلط نسبت به افزونگی‌های فعال و آماده‌به‌کار را فراهم نموده است.

پیروی و همکاران در سال ۲۰۱۸ (Peiravi et al., 2018) مسئله‌ی تخصیص افزونگی را با راهبرد مختلط-همزمان برای قطعات تعمیرناپذیر بررسی نموده‌اند. راهبرد فوق تعمیمی از راهبرد مختلط است که تعداد دفعات سوئیچ را کاهش داده و در نتیجه قابلیت اطمینان سیستم را بهبود بخشیده است. وانگ و همکاران (Wang et al., 2016) مسئله‌ی تخصیص افزونگی را در یک سیستم با استفاده از افزونگی آماده‌به‌کار سرد با قطعات تعمیرناپذیر مورد بررسی قرار داده‌اند. در پژوهش فوق مسئله با روش تابع مولد سراسری مورد حل قرار گرفته است. در پژوهشی که توسط وانگ و لی در سال ۲۰۱۴ (Wang & Li, 2014) به انجام رسیده است، قابلیت دسترسی یک سیستم پل با استفاده از روش تابع مولد سراسری محاسبه شده است. در این پژوهش، دو مسئله‌ی تخصیص افزونگی با استراتژی فعال مدل‌سازی شده است. مسئله‌ی اول به کمینه‌سازی هزینه تحت محدودیت قابلیت دسترسی‌پذیری پرداخته و در مسئله‌ی دوم قابلیت دسترسی‌پذیری با محدودیت بودجه بررسی شده است.

اشتراک‌گذاری بار در سیستم‌ها منجر به افزایش نرخ خرابی در سیستم‌ها می‌گردد. در سیستم‌های دارای اشتراک‌گذاری بار (Ebling, 2021) برای مثال در سیستمی که دارای دو قطعه می‌باشد، 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.

<sup>2</sup> Branch-and-price (BP)

<sup>1</sup> Universal Generating Function (UGF)

باقی‌مانده تأثیرگذار است. بدین ترتیب، مدل فوق ابتدا زمان خرابی‌های قبلی و رسیدن بارهای تصادفی را در نظر گرفته و سپس تعداد مؤلفه‌های خراب را تعیین نموده است. شریفی و همکاران (Sharifi et al., 2015) یک سیستم سری-موازی با زیرسیستم‌های  $k$ -out-of- $n$  و قطعات تعمیرناپذیر 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. همچنین مسئله با حالت اشتراک‌گذاری بار مورد بررسی قرار گرفته است. مدل پیشنهادی انتخاب بهترین استراتژی افزونگی از میان فعال یا آماده‌به‌کار سرد، نوع مؤلفه و سطوح افزونگی برای هر زیرسیستم است. سیستم‌ها به دو دسته‌ی تعمیرپذیر و یا تعمیرناپذیر تقسیم می‌شوند. روش‌های متعددی برای ارزیابی سیستم‌های تعمیرپذیر و یا تعمیرناپذیر وجود دارد. یکی از روش‌های فوق، روش مدل‌سازی مارکوف (Billinton & Allan, 1985) است. یکی از کاربردهای آنالیز مارکوف (Ebling, 2021) در سیستم‌های با اشتراک‌گذاری بار می‌باشد.

در پژوهشی که توسط رضانی و همکاران در سال ۲۰۲۶ (Ramezani et al., 2026) به انجام رسیده است، مدل مسئله با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی و با هدف کمینه‌سازی زمان و هزینه و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان یک سیستم تعمیرپذیر در نظر گرفته شده است. برای حل این مسئله از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II<sup>۱</sup> و گرگ خاکستری استفاده شده است. نتایج نشان داده است که مدل پیشنهادی با تعیین زمان‌های بهینه برای انجام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را به‌طور قابل توجهی کاهش داده و در عین حال زمان ازکارافتادگی دستگاه را نیز به حداقل رسانده است. علاوه بر این، مدل نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه‌ی پیشنهادی با بهبود قابلیت اطمینان سیستم، منجر به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های ناشی از خرابی‌های ناگهانی گردیده است.

جادهاو و کومار (Jadhav & Kumar, 2025) از طریق مدل‌سازی تصادفی با استفاده از زنجیره‌ی مارکوف به بهینه‌سازی قابلیت دسترسی سیستمی پرداختند.

ژنگ و همکاران در سال ۲۰۲۵ (Zhang et al., 2025) به ارزیابی قابلیت اطمینان سیستمی با اجزای ناهمگن و دارای اشتراک‌گذاری بار پرداخته‌اند. در سیستم فوق سیاست بازرسی دوره‌ای به‌علت وجود خرابی‌های پنهان پیش‌بینی گردیده و از فرایند مارکوف جهت مدل‌سازی و حل مدل استفاده شده است. حاجیه در سال ۲۰۲۴ (Hajeeh, 2024) به بررسی یک سیستم  $k$ -out-of- $n$  دارای اشتراک‌گذاری بار پرداخته است. در سیستم فوق، در دسترس بودن و عملکرد سیستم با بررسی زمان‌های تعمیر و زمان‌های بین خرابی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. ژنگ و ژنگ در سال ۲۰۲۰ به توسعه‌ی یک مدل قابلیت اطمینان برای سیستمی با اشتراک‌گذاری بار بر اساس مدل بارگذاری عمومی پرداخته‌اند (Zhang & Zhang, 2020). بر اساس این مدل، زمان میانگین تا خرابی سیستم‌ها با سه مؤلفه و دو مؤلفه با اشتراک‌گذاری بار محاسبه شده است. همچنین احتمال خرابی و قابلیت اطمینان سیستم تحت خرابی علت مشترک محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. دی‌پائولا و همکاران در سال ۲۰۱۹ (de Paula et al., 2019) به بررسی تأثیر اشتراک‌گذاری بار بر روی قابلیت دسترسی یک مسئله‌ی تخصیص افزونگی پرداخته‌اند. قابلیت دسترسی هر زیرسیستم توسط زنجیره‌ی مارکوف برآورد شده و اثر وابستگی به شکست نیز در نتایج بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. ژو و همکاران در سال ۲۰۱۸ (Xu et al., 2018) یک روش جدید طراحی بهینه برای سیستم دارای اشتراک‌گذاری بار و قابل تعمیر ارائه نمودند. آن‌ها با توجه به مفهوم طراحی ماژولار، سیستم مفروض را به تعدادی ماژول‌های مقیاس‌پذیر و قابل تعمیر تقسیم کرده‌اند که تعیین طراحی بهینه، بستگی به نوع اجزای سیستم، ساختار ماژول‌های تشکیل‌دهنده‌ی سیستم و قواعد تعمیر سیستم دارد. با در نظر گرفتن اندازه‌های مختلف سیستم، از بهینه‌سازی با تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی وزن برای دستیابی به یک طراحی بهینه از ماژول‌های قابل تعمیر و همچنین سیاست تعمیر استفاده شده است. ژائو و لیو در سال ۲۰۱۷ (Zhao & Liu, 2017) رویکردهای جدیدی برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستمی با افزونگی فعال و دارای اشتراک‌گذاری بار ارائه کرده‌اند. از یک سو رسیدن بار و از سوی دیگر تأثیر خرابی اجزای فعال بر تخریب اجزای

<sup>۱</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

حالت‌های خرابی تجهیز مورد نظر تعیین گردیده است. نتایج این مطالعه نشان داد که با کمتر شدن تعداد فعالیت‌های غیرضروری، تعداد نیروی انسانی و زمان کمتری صرف انجام فعالیت‌های نت می‌شود و با به‌کارگیری فعالیت‌های نت مناسب، وضعیت ایمنی و آلودگی‌های زیست‌محیطی بهبود یافته است.

جویباری و همکاران (Juybari et al., 2022) به استفاده از افزونگی مختلط در یک سیستم تعمیرپذیر با به‌کارگیری تعمیرکار و بررسی قابلیت دسترسی و قابلیت نگهداری پرداخته‌اند. 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 مدل‌سازی شده است. لیو و همکاران (Liu et al., 2015) به تحلیل سیستمی تعمیرپذیر با ساختار آماده‌به‌کار سرد پرداختند که در آن سیاست‌های تعطیلات کاری تعمیرکار و وقفه در تعطیلات به‌طور همزمان در نظر گرفته شده‌اند. در این مدل، تعطیلات چندگانه‌ی 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 نیز توسط یک فرایند مارکوف مدل‌سازی شده است. هان و همکاران (Han et al., 2015) قابلیت دسترسی یک سیستم تعمیرناپذیر را با استفاده از افزونگی فعال مورد بررسی قرار داده‌اند. در پژوهش فوق اثرات خرابی بر در دسترس بودن اجزاء با استفاده از زنجیره‌ی مارکوف مدل‌سازی شده است. پس از به‌دست آوردن قابلیت اطمینان و در دسترس بودن قطعات، قابلیت اطمینان سیستم‌ها با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو ارزیابی شده است.

در پژوهش‌های اخیر انجام‌گرفته و صنایع گوناگون، مسئله‌ی قابلیت دسترسی با استفاده از تخصیص افزونگی مختلط و اشتراک‌گذاری بار و یک نیروی تعمیرکار با سیاست نگهداشت و مرخصی مورد بررسی قرار نگرفته است. از آنجا که در شناور مورد مطالعه، خرابی یک تابلو به‌علت اعمال بار اضافی بر روی سایر تابلوها تأثیرگذار است، لذا می‌بایست اشتراک‌گذاری بار در حل مسئله در نظر گرفته شود. همچنین از آنجا که تابلوهای توزیع انرژی

مدل‌سازی پژوهش فوق با استفاده از زنجیره‌ی مارکوف با زمان پیوسته و در نظر گرفتن نرخ خرابی و نرخ تعمیر هر یک از زیرسیستم‌ها انجام گرفته است. هو و همکاران (Hu et al., 2025) به بهینه‌سازی قابلیت دسترسی سیستمی دارای افزونگی آماده‌به‌کار پرداخته‌اند. سیستم فوق دارای تعمیرکاری جهت تعمیر قطعات خراب می‌باشد و از فرایند مارکوف و روش‌های تحلیل ماتریسی جهت مدل‌سازی برای تعمیر قطعات خراب استفاده گردیده است.

در پژوهشی که توسط شمس و همکاران در سال ۲۰۲۵ (Shams et al., 2025) به انجام رسیده است، طراحی یک مدل ریاضی جهت انتخاب مناسب‌ترین رویکرد نگهداری از منظر هزینه-فایده برای سیستمی تعمیرپذیر به انجام رسیده است. در این مطالعه از توزیع احتمالی گاما برای تخمین زدن مدت‌زمان لازم برای روی دادن پیشامد خرابی در یک پمپ و قبل و پس از خرابی استفاده شده است. همچنین هزینه سه رویکرد مختلف نگهداری (اصلاحی، پیشگیرانه و پیش‌بینانه) با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن بوده است که رویکرد اصلاحی به‌دلیل فقدان فرآیند نگهداری، از نظر چرخه عمر دارای کوتاه‌ترین مدت‌زمان و از نظر هزینه دارای بیشترین مقدار است؛ در مقابل رویکرد پیش‌بینانه از نظر چرخه عمر طولانی‌ترین مدت‌زمان و از نظر هزینه دارای کمترین مقدار بوده و رویکرد پیشگیرانه بین آن‌ها قرار گرفته است.

در سال ۲۰۲۴ (Oszczypala et al., 2024)، محققان لهستانی قابلیت دسترسی در یک مسئله‌ی تخصیص افزونگی تک‌هدفه را با استفاده از استراتژی ذخیره‌ی سرد، گرم و داغ مورد بررسی قرار داده‌اند. در پژوهش فوق ماهیت قطعات تعمیرپذیر می‌باشد و نرخ خرابی و نرخ تعمیر قطعات ثابت در نظر گرفته شده و از مدل‌سازی مارکوف جهت شبیه‌سازی رفتار سیستم استفاده شده است.

در پژوهشی که توسط صالحیان و جهان (Salehian & Jahan, 2021) به انجام رسیده است، انتخاب بحرانی‌ترین تجهیز تعمیرپذیر برای پیاده‌سازی نت مبتنی بر قابلیت اطمینان انجام گرفته و سپس با شناسایی کارکردها، شکست‌های کارکردی، حالات و اثرات شکست، فعالیت نگهداری و تعمیرات مناسب برای هر یک از



الکتریکی شناور بررسی شده است. از آنجا که تابع هدف مدل، افزایش قابلیت دسترسی و کاهش هزینه‌ها می‌باشد، 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 یک نیروی تعمیرکار به جهت تعمیر تابلوهایی که دچار خرابی شده‌اند در نظر گرفته شده است تا هیچ‌گاه فعالیت برق‌رسانی به سیستم مذکور دچار اختلال نشود. نوعی سیاست نگهداشت و مرخصی نیز برای تعمیرکار سیستم در نظر گرفته شده است. همان‌طور که بیان گردید، یکی از روش‌های ارزیابی سیستم‌های تعمیرپذیر و یا تعمیرناپذیر روش مدل‌سازی مارکوف (Billinton & Allan, 1985) است. زنجیره‌ی مارکوف یک مدل تصادفی برای توصیف دنباله‌ای از وقایع احتمالی است که در آن احتمال هر رویداد فقط به وضعیت واقعی قبلی بستگی دارد. توزیع فاز-نوع زمان رسیدن به حالت نهایی در یک فرآیند مارکوف با تعداد وضعیت متناهی را نشان می‌دهد و کاربرد زیادی در تئوری صف دارد. بدین ترتیب از زنجیره‌ی مارکوف و توزیع فاز-نوع برای شبیه‌سازی رفتار سیستم استفاده گردیده و نهایتاً مسئله با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOAHA<sup>۲</sup> مورد حل قرار گرفته است.

### ۳- روش‌شناسی

#### ۳-۱- مطالعه موردی پژوهش

هر شناور دارای چهار سیستم اصلی رانش، فرماندهی و مراقبت، سیستم‌های فرعی و سیستم تولید و توزیع انرژی الکتریکی است که در **شکل ۱** نمایش داده شده است. سیستم توزیع انرژی الکتریکی یکی از اصلی‌ترین سیستم‌های شناور است که وظیفه‌ی تأمین انرژی الکتریکی کل شناور را برای حرکت شناور و فعالیت سایر سیستم‌ها بر عهده دارد. در پژوهش حاضر، سیستم توزیع انرژی الکتریکی در یک شناور مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. سیستم توزیع انرژی الکتریکی شناور یک سیستم سری-موازی است و شامل پنج زیرسیستم می‌شود که هر زیرسیستم از تعدادی قطعه تشکیل

الکتریکی وظیفه‌ی برق‌رسانی به مصرف‌کنندگان انرژی شناور را بر عهده دارند، لذا استفاده از افزونگی مختلط در تابلوهای توزیع انرژی جهت برق‌رسانی به مصرف‌کنندگان انرژی و جلوگیری از توقف شناور و ... بسیار حائز اهمیت است. همچنین بررسی وجود یک تعمیرکار به جهت تعمیر تابلوهای خراب و بازگرداندن آن‌ها به چرخه‌ی توزیع انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن قوانین و سیاست نگهداشت و مرخصی موجود در صنعت مورد مطالعه، منجر به اتخاذ تصمیمات کارا تر در خصوص انتخاب نوع و تعداد مناسب تابلوی توزیع انرژی در هر زیرسیستم و کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت دسترسی کل سیستم می‌گردد. لذا در پژوهش حاضر، مسئله‌ی قابلیت دسترسی با استفاده از تخصیص افزونگی مختلط و اشتراک‌گذاری بار در یک شناور و استفاده از یک نیروی تعمیرکار با سیاست نگهداشت و مرخصی حاکم بر صنعت مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

مسئله‌ی تخصیص افزونگی به‌عنوان یک مسئله‌ی ان‌پی سخت<sup>۱</sup> به اثبات رسیده است (Peiravi et al., 2020) و با افزایش اندازه‌ی مسئله 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، اما از آنجا که کاربرد عملی روش‌های دقیق، به‌ویژه برای مسائل با ابعاد بزرگ، محدود است، لذا استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری نسبت به روش‌های دقیق رواج بیشتری یافته‌اند.

پژوهش حاضر با مطالعه‌ی موردی بر روی سیستم توزیع انرژی الکتریکی در یک شناور انجام گرفته است. سیستم توزیع انرژی الکتریکی یکی از اصلی‌ترین سیستم‌های شناور است که وظیفه‌ی تأمین 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، فرماندهی مراقبت و سیستم‌های فرعی را بر عهده دارند. بدین ترتیب، پژوهش حاضر با افزونگی مختلط و حالت اشتراک‌گذاری بار در سیستم توزیع انرژی

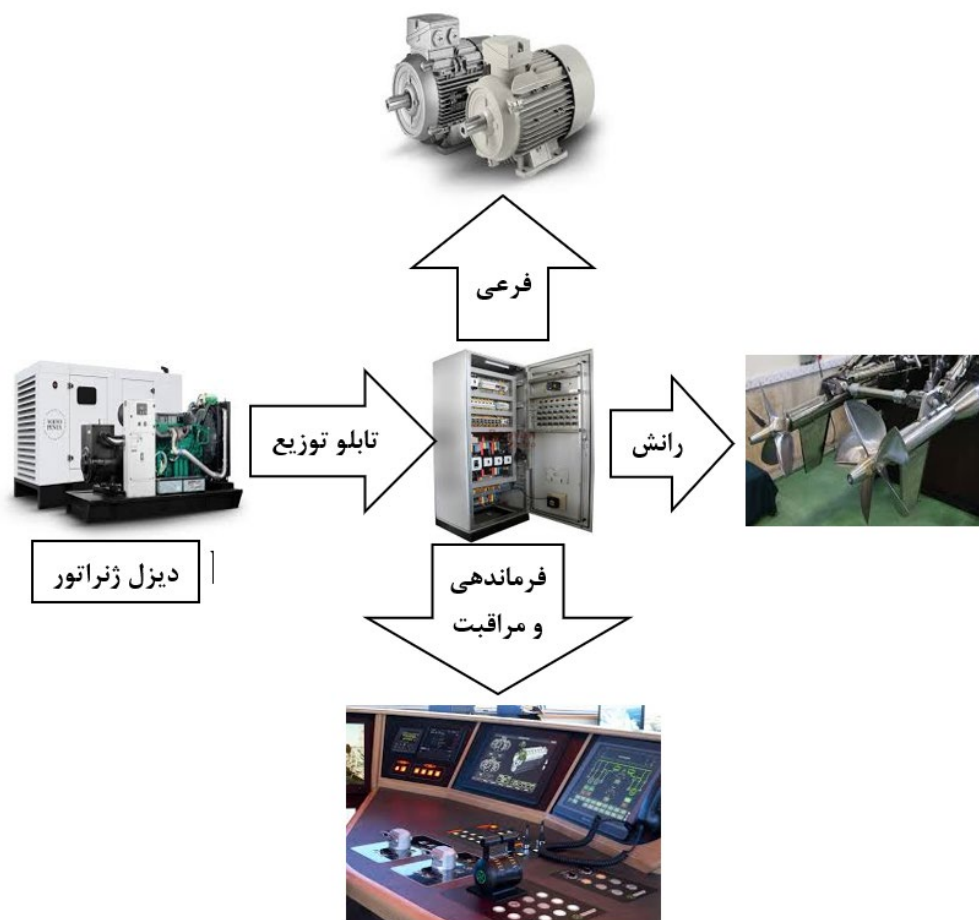
<sup>۲</sup> Multi-Objective Artificial Hummingbird Algorithm (MOAHA)

<sup>۱</sup> NP-Hard

الکتریکی شناور بسیار حائز اهمیت است. به علت کیفیت متفاوت قطعات تأمین‌کنندگان مختلف و محدودیت‌های موجود، چهار نوع تابلوی توزیع برق برای برق‌رسانی در سیستم توزیع در نظر گرفته شده است که هر زیرسیستم می‌تواند یک الی چهار تابلو (به‌صورت همگن از یک نوع) جهت توزیع انرژی داشته باشد. سیستم مورد نظر دارای یک تعمیرکار با سیاست تعمیر و مرخصی است. هر تابلوی توزیع دارای وزن، حجم و هزینه‌ی خرید متفاوتی است.

در این پژوهش، هزینه‌ی مجموع آلودگی و هزینه‌ی خرید هر تابلو به‌عنوان تابع هدف اول و قابلیت دسترسی به‌عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است و هدف از حل مسئله مورد بررسی یک مسئله‌ی دوهدفه است. هدف از تابلوی توزیع (در هر زیرسیستم از یک نوع تابلوی توزیع به‌صورت همگن استفاده می‌گردد) و تعداد تابلوی توزیع برق در هر زیرسیستم به‌دست آید تا سیستم در بهترین وضعیت کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت دسترسی قرار گیرد.

گردیده است. کابل، کلید، خازن، دیود، مقاومت، کانکتور، مبدل، پردازنده و تابلوهای توزیع از جمله قطعاتی هستند که در سیستم توزیع انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ برخی از این قطعات تعمیرپذیر بوده و برخی دیگر تعمیرپذیر نیستند یا تعمیر آن‌ها مقرون‌به‌صرفه نیست. حال آن‌که در حل مسئله‌ی قابلیت دسترسی در پژوهش حاضر، قطعه‌ی تعمیرپذیر تابلوی توزیع مد نظر می‌باشد. تابلوهای توزیع انرژی الکتریکی از اصلی‌ترین اجزای سیستم توزیع انرژی الکتریکی هستند که وظیفه‌ی برق‌رسانی به مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی نظیر سیستم‌های رانش، فرماندهی و مراقبت و سیستم‌های فرعی را بر عهده دارند. بدین ترتیب می‌بایست چندین تابلوی توزیع انرژی با افزونگی مختلط در هر زیرسیستم به‌منظور 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 دچار اختلال نشود. لذا استفاده از افزونگی مختلط در سیستم توزیع انرژی



شکل ۱. سیستم‌های اصلی شناور.

Figure 1. Main floating systems.

• طول عمر قطعات فعال (قطعاتی که در حال کار هستند و سالم می‌باشند) از توزیع  $PH(\alpha, W)$ <sup>۲</sup> پیروی می‌کنند. توزیع نمایی یک مورد ویژه از توزیع PH با پارامترهای  $W = -\lambda$ ,  $W^0 = \lambda$  و  $\alpha = [1]$  می‌باشد که اجزای سیستم از این توزیع پیروی می‌کنند. زمان تعمیر در دوره‌ی تعمیر از توزیع  $PH(S, \beta)$  پیروی می‌کند. نرخ تعمیر  $S$  و نرخ پایان تعمیر  $S^0$  می‌باشد و تعمیرکار بلافاصله پس از خرابی قطعه با پیروی از بردار  $\beta$  تعمیر را شروع می‌کند. زمان مرخصی از فرایند ورود مارکوف  $MAP(D^1, D^0)$ <sup>۳</sup> و بردار اولیه‌ی  $d$  (بردارى که شروع کردن مرخصی تعمیرکار را نشان می‌دهد) پیروی می‌کند. مرخصی با نرخ  $D^0$  (نرخ شروع مرخصی) شروع می‌شود و با نرخ  $D^1$  (نرخ پایان مرخصی) به پایان می‌رسد.

### ۳-۳- ماتریس انتقال حالت

ماتریسی که می‌تواند گذار حالت‌ها را بیان کند، ماتریس آهنگ گذار است که با  $Q$  نشان داده می‌شود.  $q_{ij}$  نشان‌دهنده‌ی تغییر حالت سیستم از  $i$  به  $j$  است. همان‌طور که بیان گردید، در پژوهش حاضر از یک تعمیرکار جهت تعمیر قطعات خراب استفاده گردیده است. سیاست نگهداشت و مرخصی تعمیرکار بدین‌گونه است که اگر در زمان مرخصی تعمیرکار قطعه‌ای دچار خرابی شود، مرخصی تعمیرکار پایان یافته و تعمیر قطعه‌ی خراب آغاز می‌گردد. در زمان تعمیر قطعه‌ی خراب نیز اگر قطعه‌ی دیگری دچار خرابی شود، می‌بایست در صف تعمیر قرار گرفته و تعمیرکار بلافاصله پس از اتمام تعمیر قطعه‌ی خراب پیشین، تعمیر قطعه‌ی خراب بعدی را آغاز نماید. زمانی که تعمیرکار در مرخصی می‌باشد، اگر هیچ قطعه‌ای دچار خرابی نشود، تعمیرکار می‌تواند مجدداً به مرخصی برود. ماتریس زیر، ماتریس گذار حالات ( $Q$ ) برای یک قطعه‌ی فعال و دو قطعه‌ی ذخیره در استراتژی مختلط را نشان می‌دهد. بدین‌ترتیب از حالت‌ها برای بیان کردن وضعیت سیستم استفاده می‌شود که در آن مجموعه حالت‌ها با  $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$

مسئله با استراتژی مختلط مورد بررسی قرار گرفته است. در مسئله‌ی مورد بررسی، اشتراک‌گذاری بار و وابستگی به شکست وجود دارد و خرابی یک تابلو بر نرخ خرابی سایر تابلوها تأثیرگذار است و نرخ خرابی آن‌ها را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب نرخ خرابی هر تابلو در هنگام خرابی سایر تابلوها با انجام محاسبات رابطه‌ی اشتراک‌گذاری بار افزایش می‌یابد. از زنجیره‌ی مارکوف و توزیع فاز-نوع برای شبیه‌سازی رفتار سیستم استفاده گردیده و در ادامه ماتریس انتقال حالت و مدل ریاضی حل مسئله با توجه به محدودیت‌های موجود بیان می‌گردد. خروجی‌های حاصل از ماتریس انتقال حالت جهت محاسبه‌ی متوسط تعداد قطعات در حال کار و هزینه‌ی آلودگی و قابلیت دسترسی مورد استفاده قرار گرفته است. نهایتاً مسئله با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOAHA مورد حل قرار گرفته است تا با انتخاب نوع و تعداد تابلوهای توزیع مناسب، مقدار قابلیت دسترسی کل سیستم افزایش یافته و هزینه‌ی کل سیستم کاهش یابد.

### ۳-۲- مفروضات پژوهش

مفروضات پژوهش به شرح زیر هستند:

- رابطه‌ی اشتراک‌گذاری بار پیشنهادشده در پژوهش دی‌پائولا و همکاران در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است (de Paula et al., 2019).
- زمانی که هیچ‌یک از اجزای خراب در سیستم وجود نداشته باشد، تعمیرکار می‌تواند به مرخصی برود و فرایند ورود مارکوف را دنبال کند. در زمان  $t = 0$  تمام اجزاء سالم هستند و تعمیرکار در حال مرخصی است.
- قطع مرخصی به این معنی است که با خرابی یک واحد در سیستم، تعمیرکار مرخصی خود را ترک می‌کند و قطعه‌ی خراب را تعمیر می‌کند.
- زمانی که بیش از یک جزء خراب شود، تعمیرکار اولین جزئی را که قبلاً خراب شده است تعمیر خواهد کرد و سپس نوبت جزء بعدی می‌شود. اولویت بر روش اولین ورودی، اولین خروجی<sup>۱</sup> است.

<sup>۲</sup> Phase-type

<sup>۳</sup> Markov Arrival Process

<sup>۱</sup> First-in-First-out (FIFO)

در ادامه حالات ماتریس انتقال حالت استراتژی مختلط برای دو قطعه‌ی فعال و یک قطعه‌ی ذخیره تشریح گردیده است:

- $S_1$ : دو قطعه فعال است و قطعه‌ی سوم به صورت ذخیره می‌باشد و تعمیرکار در مرخصی است.
  - $S_2$ : قطعه‌ی فعال خراب می‌شود و یک قطعه‌ی ذخیره جایگزین قطعه‌ی خراب‌شده و فعال می‌شود؛ یک قطعه در حالت ذخیره می‌باشد و تعمیرکار در حال تعمیر قطعه‌ی خراب است.
  - $S_3$ : قطعه‌ی فعال خراب می‌شود و آخرین قطعه‌ی ذخیره جایگزین قطعه‌ی خراب‌شده و فعال می‌شود؛ یک قطعه‌ی خراب در حال تعمیر می‌باشد و قطعه‌ی دیگر در انتظار تعمیر است.
  - $S_4$ : تمام قطعات خراب شده‌اند و یک قطعه‌ی خراب در حال تعمیر و دو قطعه‌ی خراب دیگر در انتظار تعمیر می‌باشند. تعمیرکار در حال تعمیر می‌باشد.
- توضیح حالات ماتریس گذار حالات برای یک قطعه‌ی فعال و دو قطعه‌ی ذخیره در استراتژی مختلط به شرح زیر است:
- از  $S_1$  به  $S_1$ : شامل دو بخش است. قسمت اول ( $W \oplus D^0$ ) نشان می‌دهد که انتقال ممکن است در فاز قطعات رخ دهد یا انتقال ممکن است در فاز زمان مرخصی اتفاق بیفتد. برای بخش دوم ( $I_W \otimes D^1$ ) در حالی که قطعات کار می‌کنند، مرخصی تمام می‌شود و مرخصی بعدی شروع می‌شود (تغییر فاز در تعمیرکار انجام می‌شود و فاز قطعات ثابت است).
  - از  $S_1$  به  $S_2$ : یکی از قطعات خراب می‌شود و تعمیرکار مرخصی را ترک می‌کند و بلافاصله پس از مرخصی، تعمیر قطعه‌ی خراب‌شده را شروع می‌کند.
  - $W^0$ : قطعه سالم خراب می‌شود.
  - $\beta$ : شروع کردن تعمیر با بردار  $\beta$  نشان داده می‌شود.
  - $e$ : تعمیرکار از حالت مرخصی خارج شده است (شکستن مرخصی با بردار  $e$  نشان داده

نشان داده می‌شود و ترکیب این حالت‌ها ماتریسی از فرایند مارکوف را تشکیل می‌دهد.

| $Q$   | $S_1$                            | $S_2$                         | $S_3$                      | $S_4$             |
|-------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|
| $S_1$ | $W \oplus D^0 + I_W \otimes D^1$ | $W^0 \otimes e \otimes \beta$ | 0                          | 0                 |
| $S_2$ | $\alpha \otimes S^0 d$           | $W \oplus S$                  | $W^0 \otimes I_S$          | 0                 |
| $S_3$ | 0                                | $\alpha \otimes S^0 \beta$    | $W \oplus S$               | $W^0 \otimes I_S$ |
| $S_4$ | 0                                | 0                             | $\alpha \otimes S^0 \beta$ | $S$               |

در ادامه حالات ماتریس انتقال حالت استراتژی مختلط برای یک قطعه‌ی فعال و دو قطعه‌ی ذخیره تشریح گردیده است:

- $S_1$ : یک قطعه فعال است و قطعه‌ی دوم و سوم به صورت ذخیره می‌باشند و تعمیرکار در مرخصی است.
  - $S_2$ : قطعه‌ی فعال خراب می‌شود و یک قطعه‌ی ذخیره جایگزین قطعه‌ی خراب‌شده و فعال می‌شود؛ یک قطعه در حالت ذخیره می‌باشد و تعمیرکار در حال تعمیر قطعه‌ی خراب است.
  - $S_3$ : قطعه‌ی فعال خراب می‌شود و آخرین قطعه‌ی ذخیره جایگزین قطعه‌ی خراب‌شده و فعال می‌شود؛ یک قطعه‌ی خراب در حال تعمیر می‌باشد و قطعه‌ی دیگر در انتظار تعمیر است.
  - $S_4$ : تمام قطعات خراب شده‌اند و یک قطعه‌ی خراب در حال تعمیر و دو قطعه‌ی خراب دیگر در انتظار تعمیر می‌باشند. تعمیرکار در حال تعمیر می‌باشد.
- ماتریس زیر، ماتریس گذار حالات ( $Q$ ) برای دو قطعه‌ی فعال و یک قطعه‌ی ذخیره در استراتژی مختلط را نشان می‌دهد.

| $Q$   | $S_1$                                                  | $S_2$                         | $S_3$                      | $S_4$             |
|-------|--------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|
| $S_1$ | $W_{2\alpha} \oplus D^0 + I_{W_{2\alpha}} \otimes D^1$ | $W^0 \otimes e \otimes \beta$ | 0                          | 0                 |
| $S_2$ | $\alpha_{2\alpha} \otimes S^0 d$                       | $W \oplus S$                  | $W^0 \otimes I_S$          | 0                 |
| $S_3$ | 0                                                      | $\alpha \otimes S^0 \beta$    | $W \oplus S$               | $W^0 \otimes I_S$ |
| $S_4$ | 0                                                      | 0                             | $\alpha \otimes S^0 \beta$ | $S$               |

- از  $S_4$  به  $S_4$ : در این مرحله تمام قطعات خراب شده‌اند و تعمیرکار در حال تعمیر قطعه‌ی خراب است و دو قطعه‌ی خراب دیگر منتظر تعمیر می‌باشند.

### ۳-۴- اشتراک‌گذاری بار

فرمول اشتراک‌گذاری بار در رابطه (۱) بیان گردیده است:

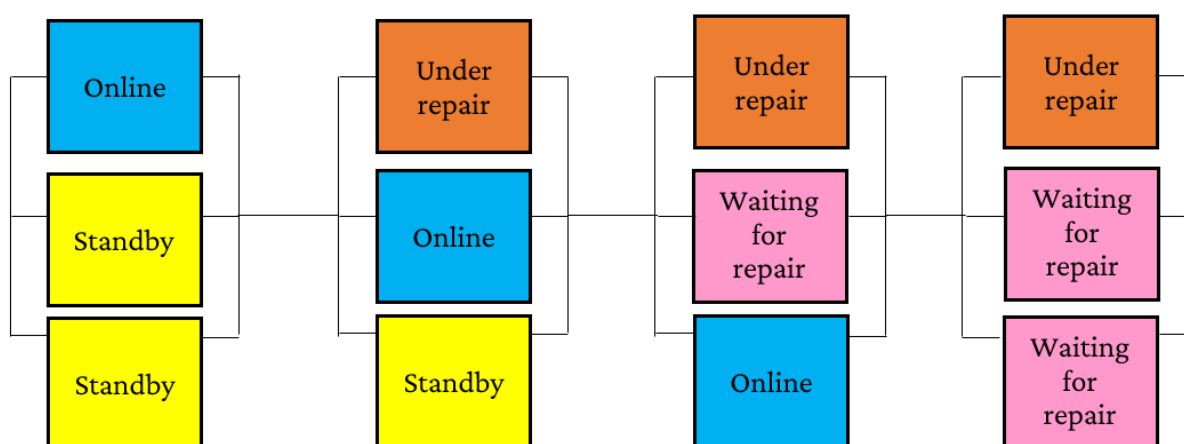
$$\lambda(i) = \lambda(0)(1 + \theta(FC(i))^Y) \quad (1)$$

که در آن تعریف پارامترها به‌صورت زیر است:

- $\lambda(0)$ : نرخ خرابی اولیه
  - $\lambda(i)$ : نرخ خرابی زیرسیستم  $i$  ( $W^0(i)$ )
  - $\theta$ : ضریب خطی تعداد قطعات خراب شده در نرخ خرابی
  - $Y$ : ضریب نمایی تعداد قطعات خراب شده در نرخ خرابی
  - $FC(i)$ : تعداد واحدهای خراب در زیر سیستم  $i$
- از فرمول اشتراک‌گذاری بار جهت محاسبه‌ی نرخ خرابی در پژوهش حاضر استفاده می‌گردد.
- شکل ۲** نمودار عملکرد سیستم با یک قطعه‌ی فعال و دو قطعه‌ی ذخیره در استراتژی مختلط با وجود یک تعمیرکار را نشان می‌دهد. **شکل ۳** مقادیر پارامتر  $Y$  و تأثیر پارامتر  $Y$  بر نرخ خرابی و **شکل ۴** مقادیر پارامتر  $\theta$  و تأثیر پارامتر  $\theta$  بر نرخ خرابی را به ازای تعداد قطعات خراب نشان می‌دهد.

می‌شود).  $e$  ماتریس ستونی است که تمام درایه‌های آن یک است.

- $S_2$  به  $S_1$ : تعمیرکار تعمیر قطعه خراب را به پایان می‌رساند، سپس مرخصی خود را شروع می‌کند.
- $\alpha$ : قطعه‌ای که سالم شده وارد سیستم می‌شود.  $\alpha$  یک بردار سطری با  $n$  درایه که قطعات بلافاصله پس از آن به حالت عملیاتی در می‌آیند.
- $S^0$ : تمام شدن تعمیر با  $S^0$  نشان داده می‌شود (نرخ پایان تعمیر).
- $d$ : شروع کردن مرخصی تعمیرکار با بردار  $d$  نشان داده می‌شود (زمانی که هیچ قطعه خرابی نداریم و تعمیرکار باید مرخصی برود).
- $S_2$  به  $S_2$ : انتقال در فاز قطعات یا انتقال در فاز تعمیر قطعات می‌باشد ( $W \oplus S$ ).
- $I_S$ : تعمیرکار در حال تعمیر قطعه قبلی می‌باشد و فاز آن ثابت است (تغییر فاز در قطعات می‌باشد).
- $S_3$  به  $S_2$ : تفاوت این حالت با حالت  $S_2$  به  $S_1$  در این است که تعمیر کار بعد از پایان تعمیر قطعه خراب، بلافاصله تعمیر قطعه خراب بعدی را شروع می‌کند.
- از  $S_3$  به  $S_3$ : مانند حالت از  $S_2$  به  $S_2$  می‌باشد.
- از  $S_3$  به  $S_4$ : مانند حالت از  $S_2$  به  $S_3$  می‌باشد.
- از  $S_4$  به  $S_3$ : مانند حالت از  $S_3$  به  $S_2$  می‌باشد.



**شکل ۲.** نمودار عملکرد سیستم با یک قطعه فعال و دو قطعه ذخیره در استراتژی مختلط با وجود یک تعمیرکار.

**Figure 2.** Performance diagram of the system with one active component and two standby components in a mixed strategy with one repairman.



اشتراک گذاری بار با افزایش پارامترهای  $\theta$  و  $\gamma$  به ازای همان تعداد قطعات خراب، نرخ خرابی افزایش می‌یابد.

### ۳-۵- بردار احتمال ثابت

از معادله  $\pi_0 = 0$  برای نشان دادن بردار احتمال ثابت استفاده می‌گردد که در آن  $\pi = (\pi_{S_1}, \pi_{S_2}, \pi_{S_3}, \pi_{S_4})$  بردار احتمال ثابت و  $Q$  ماتریس گذار است و جهت محاسبه‌ی قابلیت دسترسی و .... مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بردار احتمال ثابت برای یک قطعه فعال و دو قطعه ذخیره در استراتژی مختلط به صورت رابطه‌ی (۲) به شرح زیر می‌باشد:

$$\pi_{S_1}(W \oplus D^0 + I_W \otimes D^1) + \pi_{S_2}(\alpha \otimes S^0 d) = 0 \quad (2)$$

$$\pi_{S_1}(W^0 \otimes e \otimes \beta) + \pi_{S_2}(W \oplus S) + \pi_{S_3}(\alpha \otimes S^0 \beta) = 0$$

$$\pi_{S_2}(W^0 \otimes I_S) + \pi_{S_3}(W \oplus S) + \pi_{S_4}(\alpha \otimes S^0 \beta) = 0$$

$$\pi_{S_3}(W^0 \otimes I_S) + \pi_{S_4}(S) = 0$$

$$\pi_{S_1} + \pi_{S_2} + \pi_{S_3} + \pi_{S_4} = 1$$

$\pi_{S_i}$  احتمال ماندن در حالت  $S_i$  یا احتمال حالت  $S_i$  است.

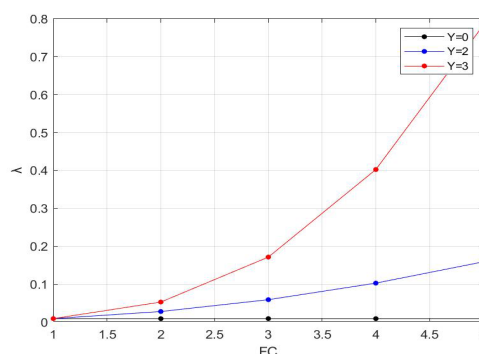
### ۳-۶- مدل سازی مسئله و حل مدل

سیستم توزیع انرژی الکتریکی در شناور دارای محدودیت‌های حجم و وزن و هزینه می‌باشد. بدین ترتیب مدل ریاضی پژوهش حاضر با توجه به محدودیت‌های موجود در پژوهش، به صورت رابطه (۳) است:

$$\begin{aligned} \min Z_T \\ \max A_S \end{aligned} \quad (3)$$

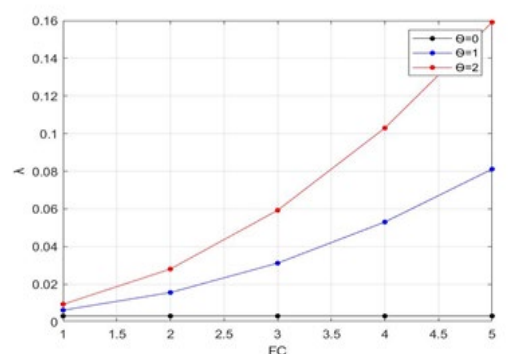
subject to:

$$\begin{aligned} g^{(1)}(n_1, n_2, \dots, n_h) &= \sum_{i=1}^h w_i v_i^2 n_i^2 \leq V \\ g^{(2)}(n_1, n_2, \dots, n_h) &= \sum_{i=1}^h c(i) n(i) \leq C \\ g^{(3)}(n_1, n_2, \dots, n_h) &= \sum_{i=1}^h n(i) w(i) e^{0.25n_i} \leq W \end{aligned}$$



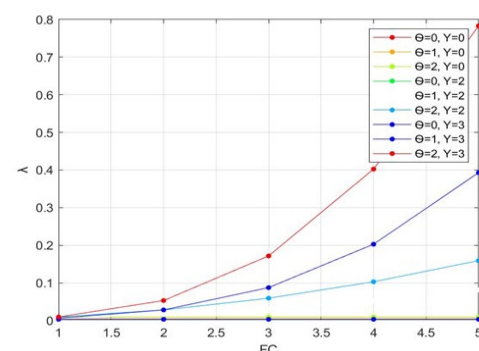
شکل ۳. تاثیر پارامتر  $\gamma$  بر نرخ خرابی.

Figure 3. The effect of parameter  $\gamma$  on failure rate.



شکل ۴. تاثیر پارامتر  $\theta$  بر نرخ خرابی.

Figure 4. The effect of parameter  $\theta$  on failure rate.



شکل ۵. تاثیر پارامترهای  $\gamma$  و  $\theta$  بر نرخ خرابی.

Figure 5. The effect of parameters  $\gamma$  and  $\theta$  on failure rate.

شکل ۵ مقادیر پارامترهای  $\theta$  و  $\gamma$  و تأثیرات همزمان هر دوی آن‌ها بر نرخ خرابی را به ازای تعداد قطعات خراب نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ تا شکل ۵ قابل مشاهده است، تأثیر پارامترهای  $\theta$  و  $\gamma$  به ازای تعداد قطعات خراب بر روی نرخ خرابی در فرمول اشتراک گذاری بار نشان داده شده است. بدین ترتیب، در فرمول

زیرسیستم، به جهت افزایش قابلیت دسترسی و کاهش هزینه‌ی کل سیستم به شرح زیر است:

$$\begin{aligned}\alpha &= [1] \\ d &= [1 \quad 0] \\ \beta &= [1 \quad 0] \\ I_0 &= [1] \\ h &= 5 \\ t &= 15 \\ \lambda(0) &= 0.5 \\ \text{Max Cost} &= 3900 \\ \text{Max Weight} &= 150 \\ \text{Max Volume} &= 550 \\ D^1 &= \begin{bmatrix} -0.40 & 0.05 \\ -0.1 & -0.5 \end{bmatrix} \\ D^0 &= \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix} \\ S^0 &= \begin{bmatrix} 0.50 \\ 0.50 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

از آنجا که نتایج الگوریتم‌های فراابتکاری به تنظیم پارامترها وابسته است، برای تنظیم پارامترها از روش تاگوچی استفاده گردیده است. مزیت تاگوچی نسبت به دیگر روش‌های طراحی آزمایشات، علاوه بر کاهش هزینه، به‌دست آوردن سطوح بهینه‌ی پارامترها در زمان کمتر است. سطوح ارائه‌شده برای پارامترهای الگوریتم NSGA-II در **جدول ۱** آورده شده است.

پارامترهای منتخب الگوریتم NSGA-II و همچنین مقادیر پارامترهای رابطه‌ی اشتراک‌گذاری بار در **جدول ۲** ارائه گردیده است. جداول مربوط به نرخ خرابی، حجم، وزن، هزینه خرید و هزینه آلودگی تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم برای حل مدل مسئله در **جدول ۳** تا **جدول ۷** ارائه گردیده است.

**جدول ۱.** سطوح ارائه شده برای پارامترهای الگوریتم NSGA-II

**Table 2.** Parameter levels for the NSGA-II algorithm

|              | سطح   |       |      |
|--------------|-------|-------|------|
|              | پایین | متوسط | بالا |
| اندازه جمعیت | ۱۰۰   | ۱۵۰   | ۲۰۰  |
| تعداد تکرار  | ۱۵۰   | ۲۰۰   | ۲۵۰  |
| نرخ تقاطع    | ۰/۸   | ۰/۹   | ۰/۹۹ |
| نرخ جهش      | ۰/۴   | ۰/۵   | ۰/۶  |

$$\begin{aligned}n_i &\in \mathbb{Z}^+ \\ A_S &= \prod_1^5 A_i \\ A_i &= \pi_{S_1} e + \pi_{S_2} e + \pi_{S_3} e \\ Z_T &= Z_1 + Z_2 \\ Z_1 &= \sum n_1(i) c(i) \\ Z_2 &= t \times \sum_{i=1}^h n_2(i) \cdot c_2(i) \\ n_2(i) &= \sum n_{S_i} \pi_{S_i}\end{aligned}$$

که در آن پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- $A_S$ : 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
- $n_1(i)$ : تعداد قطعات در زیرسیستم  $i$
- $n_2(i)$ : متوسط تعداد قطعات در حال کار در زیرسیستم  $i$
- $c_2(i)$ : هزینه آلودگی به ازای هر ساعت کارکردن هر قطعه در زیرسیستم  $i$
- $A_i$ : قابلیت دسترسی هر زیرسیستم
- $Z_2$ : هزینه آلودگی کل
- $Z_1$ : هزینه خرید کل
- $t$ : زمان مأموریت

با توجه به این که هزینه خرید قطعات و هزینه آلودگی برای شناور با توجه به ملاحظات صنعتی به یک میزان حائز اهمیت است، لذا ضریب وزنی یک برای هر دو هزینه در نظر گرفته شده است.

قابلیت دسترسی هر زیرسیستم ( $A_i$ ) به معنی احتمال کارکردن زیرسیستم می‌باشد؛ به عبارت دیگر، مجموع تمام حالات عملکردی (تمام حالاتی که زیرسیستم خراب نمی‌شود و به فعالیت خود ادامه می‌دهد).

با توجه به ماتریس انتقال حالت و مدل ریاضی حل مسئله، داده‌های ورودی جهت حل مسئله به منظور انتخاب مناسب نوع و تعداد تابلوهای توزیع در هر

جدول ۲. پارامترهای منتخب الگوریتم NSGA-II و مقادیر پارامترهای رابطه‌ی اشتراک گذاری بار

**Table 2.** Selected parameters of the NSGA-II algorithm and load sharing relationship parameter values

|     |                                                            |
|-----|------------------------------------------------------------|
| ۱۵۰ | تعداد جمعیت (n pop)                                        |
| ۰/۵ | نرخ جهش در NSGA-II                                         |
| ۰/۹ | نرخ تقاطع در NSGA-II                                       |
| ۲۰۰ | تعداد تکرار الگوریتم برای رسیدن به جواب بهینه              |
| ۱   | مقدار پارامتر $\theta$                                     |
| ۲   | مقدار پارامتر $\gamma$                                     |
| ۰/۵ | نرخ خرابی اولیه ( $\lambda(0)$ ) در رابطه اشتراک گذاری بار |

جدول ۳. نرخ خرابی تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم ( $h$ )

**Table 3.** Failure Rate of electrical distribution panels in each subsystem ( $h$ )

| زیرسیستم اول | زیرسیستم دوم | زیرسیستم سوم | زیرسیستم چهارم | زیرسیستم پنجم |                    |
|--------------|--------------|--------------|----------------|---------------|--------------------|
| ۰/۰۰۳۱۲      | ۰/۰۰۲۱۸      | ۰/۰۰۴۵۵      | ۰/۰۰۱۱۹        | ۰/۰۰۴۶۱       | تابلوی توزیع نوع ۱ |
| ۰/۰۰۳۷۲      | ۰/۰۰۴۲۷      | ۰/۰۰۲۶۲      | ۰/۰۰۲۶۶        | ۰/۰۰۱۲۴       | تابلوی توزیع نوع ۲ |
| ۰/۰۰۴۱۶      | ۰/۰۰۶۳۱      | ۰/۰۰۵۲۳      | ۰/۰۰۴۲۳        | ۰/۰۰۳۴۴       | تابلوی توزیع نوع ۳ |
| ۰/۰۰۵۱۸      | ۰/۰۰۴۷۵      | ۰/۰۰۱۵۲      | ۰/۰۰۷۱۱        | ۰/۰۰۴۲۱       | تابلوی توزیع نوع ۴ |

جدول ۴. حجم تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم ( $m^3$ )

**Table 4.** Volume of electrical distribution panels in each subsystem ( $m^3$ )

| زیرسیستم اول | زیرسیستم دوم | زیرسیستم سوم | زیرسیستم چهارم | زیرسیستم پنجم |                    |
|--------------|--------------|--------------|----------------|---------------|--------------------|
| ۰/۴۰         | ۰/۷۵         | ۰/۹۲         | ۰/۶۰           | ۰/۸۰          | تابلوی توزیع نوع ۱ |
| ۰/۴۵         | ۰/۶۰         | ۰/۵۰         | ۰/۸۰           | ۰/۷۵          | تابلوی توزیع نوع ۲ |
| ۰/۶۵         | ۰/۷۵         | ۰/۵۰         | ۰/۶۰           | ۰/۷۰          | تابلوی توزیع نوع ۳ |
| ۰/۵۵         | ۰/۷۰         | ۰/۶۵         | ۰/۸۵           | ۰/۶۰          | تابلوی توزیع نوع ۴ |

جدول ۵. وزن تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم (kg)

**Table 5.** Weight of electrical distribution panels in each subsystem (kg)

| زیرسیستم اول | زیرسیستم دوم | زیرسیستم سوم | زیرسیستم چهارم | زیرسیستم پنجم |                    |
|--------------|--------------|--------------|----------------|---------------|--------------------|
| ۶            | ۶            | ۵            | ۴              | ۷             | تابلوی توزیع نوع ۱ |
| ۵            | ۷            | ۷            | ۵              | ۸             | تابلوی توزیع نوع ۲ |
| ۱۰           | ۹            | ۸            | ۶              | ۱۱            | تابلوی توزیع نوع ۳ |
| ۶            | ۸            | ۱۱           | ۹              | ۵             | تابلوی توزیع نوع ۴ |

جدول ۶. هزینه خرید تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم (میلیون تومان)

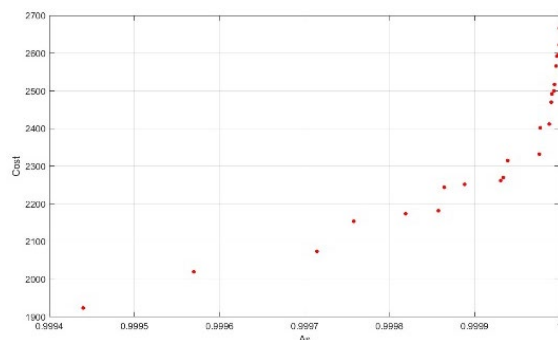
**Table 6.** Purchase cost of electrical distribution panels in each subsystem (million Tomans)

| زیرسیستم اول | زیرسیستم دوم | زیرسیستم سوم | زیرسیستم چهارم | زیرسیستم پنجم |                    |
|--------------|--------------|--------------|----------------|---------------|--------------------|
| ۱۰۰          | ۱۵۰          | ۹۶           | ۱۸۰            | ۸۵            | تابلوی توزیع نوع ۱ |
| ۸۰           | ۲۰۰          | ۱۸۵          | ۷۰             | ۱۷۰           | تابلوی توزیع نوع ۲ |
| ۱۱۰          | ۱۱۵          | ۱۷۵          | ۱۳۲            | ۹۰            | تابلوی توزیع نوع ۳ |
| ۷۵           | ۶۵           | ۱۰۲          | ۱۱۵            | ۸۸            | تابلوی توزیع نوع ۴ |

جدول ۷. هزینه آلودگی تابلوهای توزیع برق در هر زیرسیستم (میلیون تومان)

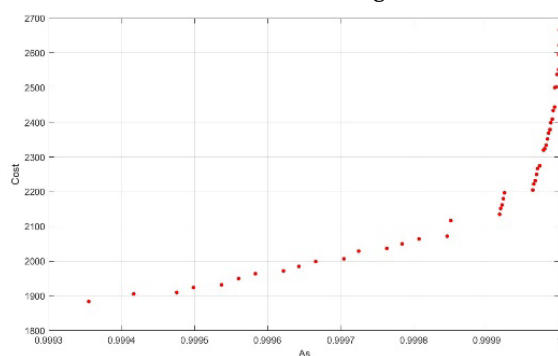
Table 7. Pollution cost of electrical distribution panels in each subsystem (million Tomans)

| 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          |



شکل ۸. روند شکل‌گیری مرز پارتو در الگوریتم MOAHA.

Figure 8. The process of forming the Pareto frontier in the MOAHA algorithm.



شکل ۹. روند شکل‌گیری مرز پارتو در الگوریتم MOAHA.

Figure 9. The process of forming the Pareto frontier in the MOAHA algorithm.

همان‌طور که در شکل‌های ۶ تا ۹ قابل مشاهده است، روند شکل‌گیری مرز پارتو در تکرارهای بالاتر الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOAHA به‌خوبی نشان داده شده است. نقاط پارتو، میزان قابلیت دسترسی در مقابل هزینه را نشان می‌دهند. کلیدی جواب‌های حاصل‌شده بهینه می‌باشند و هیچ‌یک از جواب‌ها برتری خاصی نسبت به یکدیگر ندارند.

جدول ۸ و جدول ۹ برخی از پاسخ‌های بهینه‌ی منتخب تشکیل‌شده در مرز پارتوی جواب‌ها را نشان می‌دهد. بدین‌ترتیب، پس از حل مسئله با الگوریتم‌های فراابتکاری

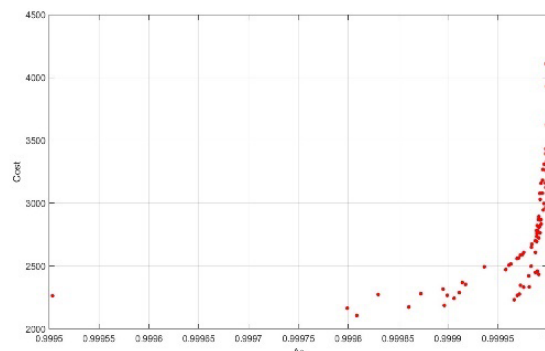
### ۳-۷- احتمال کار تعمیرکار

تعمیرکار زمانی در حال تعمیر است که سیستم دچار خرابی شده باشد، به عبارت دیگر سیستم در یکی از حالت‌های  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  قرار گرفته باشد. بنابراین، احتمال کار تعمیرکار مطابق با رابطه (۴) برابر است با:

$$P_w = \pi_{S_2} e + \pi_{S_3} e + \pi_{S_4} e \quad (4)$$

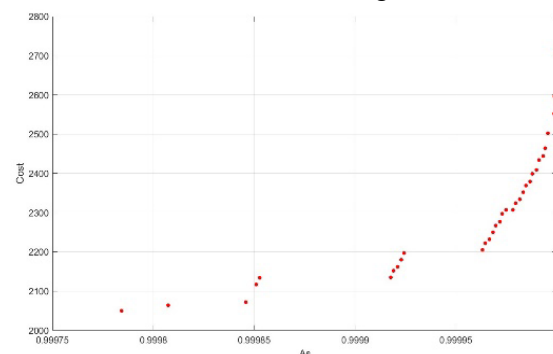
### ۴- یافته‌های پژوهش

روند شکل‌گیری مرز پارتو در حل مسئله در شکل‌های ۶ تا ۹ نشان داده شده است.



شکل ۶. روند شکل‌گیری مرز پارتو در الگوریتم NSGA-II.

Figure 6. The process of forming the Pareto frontier in the NSGA-II algorithm.



شکل ۷. روند شکل‌گیری مرز پارتو در الگوریتم NSGA-II.

Figure 7. The process of forming the Pareto frontier in the NSGA-II algorithm.

NSGA-II و MOAHA، کارایی هریک از الگوریتم‌ها در چهار فاکتور فاصله‌گذاری، بزرگی حجم، زمان و تعداد نقاط پارتو مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۰ تا

جدول ۸. پاسخ‌های بهینه‌ی منتخب تشکیل‌شده در مرز پارتو الگوریتم MOAHA

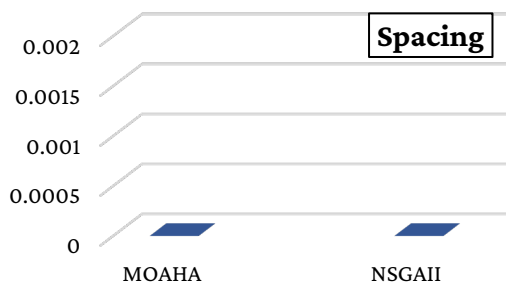
Table 8. Selected optimal responses formed on the Pareto frontier of the MOAHA algorithm

| روش MOAHA       | نوع و تعداد تابلو | قابلیت دسترسی | هزینه کل    | احتمال کار تعمیرکار | جمعیت جبهه پارتو | جواب‌های |
|-----------------|-------------------|---------------|-------------|---------------------|------------------|----------|
| نوع تابلو توزیع | (۴،۴،۲،۴)         | ۰/۹۹۹۹۹۸۶۶۳۷  | ۲۵۵۲/۰۰۰۰۴۹ | ۰/۲۷                | ۲۵               |          |
| تعداد تابلو     | (۴،۴،۳،۳،۴)       |               |             |                     |                  |          |
| نوع تابلو توزیع | (۲،۴،۴،۲،۳)       | ۰/۹۹۹۷۶۳۳۳۰۷  | ۲۰۳۶/۹۴۳۸۳۴ | ۰/۳۲                | ۴۱               |          |
| تعداد تابلو     | (۲،۳،۲،۲،۲)       |               |             |                     |                  |          |
| نوع تابلو توزیع | (۲،۴،۴،۲،۴)       | ۰/۹۹۹۹۹۱۱۴۰۳  | ۲۴۳۳/۹۹۷۹۷۰ | ۰/۳۰                | ۷۸               |          |
| تعداد تابلو     | (۳،۴،۳،۳،۳)       |               |             |                     |                  |          |
| نوع تابلو توزیع | (۲،۴،۴،۲،۱)       | ۰/۹۹۹۹۲۲۹۱۷۸  | ۲۱۷۹/۹۸۳۲۴۰ | ۰/۳۱                | ۱۱۱              |          |
| تعداد تابلو     | (۳،۳،۲،۲،۳)       |               |             |                     |                  |          |
| نوع تابلو توزیع | (۲،۴،۴،۲،۴)       | ۰/۹۹۹۷۲۴۷۰۲۷۵ | ۲۰۲۸/۹۳۴۵۱۱ | ۰/۳۳                | ۱۴۷              |          |
| تعداد تابلو     | (۲،۳،۲،۲،۲)       |               |             |                     |                  |          |

جدول ۹. پاسخ‌های بهینه‌ی منتخب تشکیل‌شده در مرز پارتو الگوریتم NSGA-II

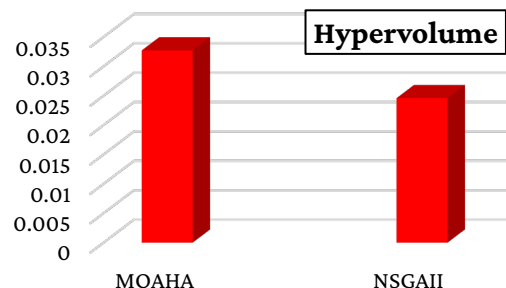
Table 9. Selected optimal responses formed on the Pareto frontier of the NSGA-II algorithm

| روش NSGA-II     | نوع و تعداد تابلو | قابلیت دسترسی | هزینه کل    | احتمال کار تعمیرکار | جمعیت جبهه پارتو | جواب‌های |
|-----------------|-------------------|---------------|-------------|---------------------|------------------|----------|
| نوع تابلو توزیع | (۲،۴،۴،۲،۳)       | ۰/۹۹۹۹۹۳۱۵۹۳  | ۲۴۴۳/۹۹۸۴۶۵ | ۰/۲۷                | ۲۴               |          |
| تعداد تابلو     | (۳،۴،۳،۳،۳)       |               |             |                     |                  |          |
| نوع تابلو توزیع | (۴،۴،۴،۲،۴)       | ۰/۹۹۹۹۱۹۱۰۵۰  | ۲۱۵۱/۹۸۲۵۴۰ | ۰/۳۱                | ۳۸               |          |
| تعداد تابلو     | (۳،۳،۲،۲،۳)       |               |             |                     |                  |          |
| نوع تابلو توزیع | (۴،۴،۴،۲،۳)       | ۰/۹۹۹۷۴۸۲۴۶   | ۲۳۰۶/۹۹۴۰۰۸ | ۰/۳۰                | ۶۴               |          |
| تعداد تابلو     | (۳،۳،۲،۳،۳)       |               |             |                     |                  |          |
| نوع تابلو توزیع | (۲،۴،۴،۲،۱)       | ۰/۹۹۹۹۲۲۹۱۷۸  | ۲۱۷۹/۹۸۳۲۴۰ | ۰/۳۲                | ۱۰۸              |          |
| تعداد تابلو     | (۳،۳،۲،۲،۳)       |               |             |                     |                  |          |
| نوع تابلو توزیع | (۴،۴،۴،۲،۳)       | ۰/۹۹۹۷۲۹۳۵۴   | ۲۲۹۶/۹۹۳۴۹۹ | ۰/۳۰                | ۱۵۰              |          |
| تعداد تابلو     | (۳،۴،۲،۳،۳)       |               |             |                     |                  |          |



شکل ۱۱. نمودار مقادیر Spacing در الگوریتم‌ها.

Figure 11. Diagram of Spacing values in algorithms.



شکل ۱۰. نمودار مقادیر Hypervolume در الگوریتم‌ها.

Figure 10. Diagram of Hypervolume value in algorithms.

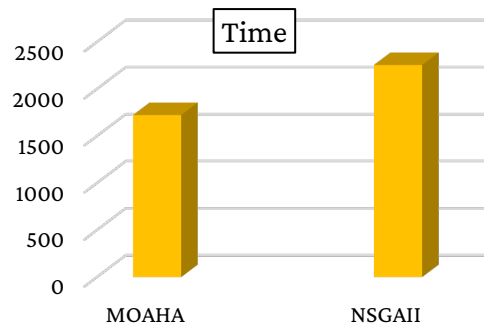
نشان می‌دهد. همان‌طور که در **جدول ۱۰** قابل مشاهده است، بر اساس آزمون ویلکاکسون، اختلاف عملکرد دو الگوریتم در معیارهای Hypervolume، Spacing و Time از نظر آماری معنادار است ( $p\text{-value} < 0.05$ ). الگوریتم MOAHA در معیارهای Hypervolume و Time عملکرد بهتری نسبت به NSGA-II نشان داده است، در حالی که NSGA-II در معیار Spacing عملکرد بهتری داشته است.

**جدول ۱۰.** مقایسه‌ی فاکتورهای کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده را با استفاده از آزمون ویلکاکسون

**Table 10.** Comparison of the performance metrics of the employed metaheuristic algorithms using the Wilcoxon test

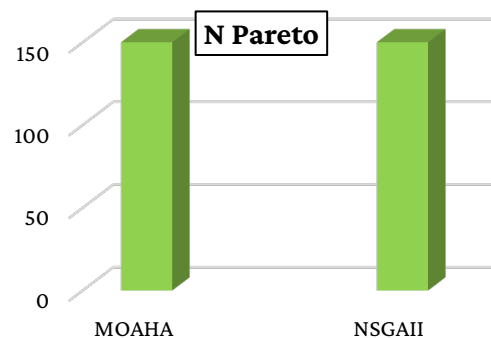
| شاخص        | p-value | الگوریتم برتر |
|-------------|---------|---------------|
| Spacing     | ۰/۰۱۳۶۷ | NSGA-II       |
| Time        | ۰/۰۰۱۹۵ | MOAHA         |
| Hypervolume | ۰/۰۰۱۹۵ | MOAHA         |

همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان گردید، مسئله‌ی مورد نظر از نوع NP-hard است و با افزایش اندازه‌ی مسئله و محدودیت‌ها، حجم محاسبات به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد؛ لذا استفاده از روش‌های دقیق برای حل مسئله میسر نبوده و می‌بایست برای حل مسئله در ابعاد بزرگ از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شود. بدین ترتیب، جهت بررسی و تست مدل و نتایج حاصل از حل با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، ابتدا مدل حاصل از پژوهش مسئله در ابعاد کوچک با استفاده از روش دقیق مورد حل قرار گرفت. نتایج برخی جواب‌های حاصل از حل مدل به روش دقیق در **جدول ۱۱** آمده است. از آنجا که اختلاف نتایج حاصل از حل به روش دقیق با نتایج حاصل از حل مسئله با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری 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 جواب‌ها وجود دارد، لذا کارایی الگوریتم‌ها و صحت نتایج استخراج‌شده از حل مدل با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری تأیید می‌گردد. **جدول ۱۱** نتایج برخی جواب‌های حاصل از حل مدل به روش دقیق را نشان می‌دهد.



**شکل ۱۲.** نمودار مقادیر Time در الگوریتم‌ها.

**Figure 12.** Diagram of Time value in algorithms.



**شکل ۱۳.** نمودار مقادیر N Pareto در الگوریتم‌ها.

**Figure 13.** Diagram of N Pareto value in algorithms.

معیار بزرگی حجم، فضای عینی تحت سلطه‌ی مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه‌ی پارتو را اندازه‌گیری می‌کند. این معیار به‌صورت حجم بخشی از فضای عینی که تحت سلطه‌ی مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها است، نسبت به حجم کل فضای عینی تعریف می‌شود. هرچه عدد معیار مذکور بزرگ‌تر باشد، الگوریتم کارا تر است. معیار فاصله‌گذاری، یکنواختی توزیع راه‌حل‌های بهینه‌ی پارتو را در فضای هدف اندازه‌گیری می‌کند. این معیار به‌عنوان میانگین فاصله بین هر راه‌حل بهینه‌ی پارتو و نزدیک‌ترین همسایه‌ی آن در مجموعه تعریف می‌شود. هرچه عدد معیار فاصله‌گذاری کمتر و به صفر نزدیک‌تر باشد، الگوریتم کارا تر است. معیار زمان، مدت زمان حل توسط الگوریتم را نشان می‌دهد. هرچه مدت زمان حل کمتر باشد، الگوریتم کارا تر است. معیار تعداد نقاط پارتو، تعداد جواب‌های بهینه‌ی پارتویی تولیدشده توسط الگوریتم را نشان می‌دهد. هرچه تعداد نقاط بهینه‌ی پارتویی بیشتر باشد، الگوریتم کارا تر است.

**جدول ۱۰** مقایسه‌ی فاکتورهای کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده را با استفاده از آزمون ویلکاکسون



## ۵- تحلیل حساسیت

۵-۱- تأثیر پارامترهای  $\theta$  و  $\gamma$ 

همان‌طور که در شکل ۳ تا شکل ۵ نشان داده شده است، با افزایش پارامترهای  $\theta$  و  $\gamma$ ، مقدار نرخ خرابی ( $\lambda$ ) با توجه به فرمول اشتراک گذاری بار افزایش می‌یابد و با کاهش پارامترهای  $\theta$  و  $\gamma$ ، مقدار نرخ خرابی ( $\lambda$ ) با توجه به فرمول اشتراک گذاری بار کاهش می‌یابد.

جدول ۱۲ و جدول ۱۳ نتایج حاصل از کاهش و افزایش مقادیر پارامترهای  $\theta$  و  $\gamma$  را بر روی حل مسئله در الگوریتم NSGA-II نشان می‌دهد. بدین ترتیب، در صورتی که پارامترهای  $\theta$  و  $\gamma$  کاهش یابد و  $\theta = 0$  و  $\gamma = 0$  در نظر گرفته شود، نتایج حاصل از حل مسئله به شرح جدول ۱۲ می‌باشد. در صورتی که پارامترهای  $\theta = 0$  و  $\gamma = 0$  در نظر گرفته شود، مسئله بدون حالت اشتراک گذاری بار در نظر گرفته شده است.

جدول ۱۱. نتایج برخی جواب‌های حاصل از حل مدل به روش دقیق

Table 11. Results of Selected solutions obtained using the exact solution method

| برخی جواب‌های حاصل از حل مدل به روش دقیق |              |              | $\theta = 1, \gamma = 2$ |
|------------------------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| ۰/۹۹۹۵۷۴۸۶۳۱                             | ۰/۹۹۹۹۹۸۹۱۸۷ | ۰/۹۹۸۹۵۷۵۲۴۶ | قابلیت دسترسی کل سیستم   |
| ۲۱۳۳/۸۵۴۲۹                               | ۲۳۵۲/۵۵۱۲۸   | ۲۰۶۱/۹۲۲۵۶۳  | هزینه کل                 |

جدول ۱۲. تأثیرات کاهش پارامتر  $\theta$  و  $\gamma$ Table 12. Effects of decreasing the parameters  $\theta$  and  $\gamma$ 

| روش NSGA-II ( $\gamma = 0$ و $\theta = 0$ ) | نوع و تعداد تابلو | قابلیت دسترسی | هزینه کل    | جمعیت جواب‌های جبهه پارتو |
|---------------------------------------------|-------------------|---------------|-------------|---------------------------|
| نوع تابلو توزیع                             | (۲,۴,۴,۲,۱)       | ۰/۹۹۹۹۹۵۵۹۰   | ۲۵۰۱/۹۹۹۹۰۰ | ۲۵                        |
|                                             | (۳,۴,۳,۳,۴)       |               |             |                           |
| تعداد تابلو                                 | (۲,۴,۴,۲,۴)       | ۰/۹۹۹۹۹۹۱۱۳۹  | ۲۴۳۳/۹۹۹۷۸۷ | ۳۹                        |
|                                             | (۳,۴,۳,۳,۳)       |               |             |                           |
| نوع تابلو توزیع                             | (۲,۴,۱,۲,۱)       | ۰/۹۹۹۹۹۸۸۷۴   | ۲۴۴۵/۹۹۹۹۸۱ | ۷۱                        |
|                                             | (۴,۴,۴,۳,۴)       |               |             |                           |
| تعداد تابلو                                 | (۲,۴,۱,۲,۱)       | ۰/۹۹۹۹۹۹۵۸۰۱  | ۲۵۶۵/۹۹۹۹۰۷ | ۱۱۸                       |
|                                             | (۳,۴,۴,۳,۴)       |               |             |                           |
| نوع تابلو توزیع                             | (۲,۴,۴,۲,۱)       | ۰/۹۹۹۹۹۰۷۴۱۰  | ۲۲۴۹/۹۹۷۶۲۳ | ۱۳۹                       |
|                                             | (۳,۳,۲,۳,۳)       |               |             |                           |

جدول ۱۳. تأثیرات افزایش پارامتر  $\theta$  و  $\gamma$ Table 13. Effects of increasing the parameters  $\theta$  and  $\gamma$ 

| روش NSGA-II ( $\gamma = 3$ و $\theta = 2$ ) | نوع و تعداد تابلو | قابلیت دسترسی | هزینه کل    | جمعیت جواب‌های جبهه پارتو |
|---------------------------------------------|-------------------|---------------|-------------|---------------------------|
| نوع تابلو توزیع                             | (۲,۴,۴,۲,۳)       | ۰/۹۹۹۷۴۲۴۹۵۷  | ۲۱۱۶/۹۴۰۱۰۸ | ۲۶                        |
|                                             | (۳,۳,۲,۲,۲)       |               |             |                           |
| تعداد تابلو                                 | (۴,۴,۴,۲,۳)       | ۰/۹۹۹۸۶۸۸۲۷   | ۲۲۰۴/۹۷۰۲۴۰ | ۴۱                        |
|                                             | (۳,۳,۲,۳,۳)       |               |             |                           |
| نوع تابلو توزیع                             | (۴,۴,۴,۲,۱)       | ۰/۹۹۹۶۲۳۶۳۹۶  | ۲۰۴۹/۹۱۴۰۵۷ | ۷۳                        |
|                                             | (۳,۳,۲,۲,۲)       |               |             |                           |
| تعداد تابلو                                 | (۴,۴,۴,۲,۱)       | ۰/۹۹۹۸۳۲۵۴۷   | ۲۵۷۲/۰۰۱۱۶۵ | ۱۰۵                       |
|                                             | (۳,۴,۲,۲,۳)       |               |             |                           |
| نوع تابلو توزیع                             | (۴,۴,۴,۲,۳)       | ۰/۹۹۹۸۸۴۲۵۷۰  | ۲۲۳۱/۹۷۴۲۹۶ | ۱۴۵                       |
|                                             | (۳,۳,۲,۳,۳)       |               |             |                           |

می‌دهد که محدودیت‌های حجم، وزن و هزینه از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر شکل و پراکندگی جواب‌های پارتویی در مدل پیشنهادی می‌باشند (جدول ۱۴).

### ۵-۳- تأثیر وجود سیاست مرخصی برای تعمیرکار در مدل‌سازی مارکوف

در مدل پژوهش حاضر، مرخصی تعمیرکار چندان باعث تأخیر در شروع تعمیر نمی‌شود، زیرا به محض خرابی اولین قطعه، تعمیرکار مرخصی را ترک کرده و فوراً تعمیر قطعه‌ی خراب را آغاز می‌کند. بنابراین تفاوت اصلی وجود مرخصی با عدم وجود آن، افزوده‌شدن حالت‌های مربوط به مرخصی در مدل‌سازی مارکوف است. به همین دلیل، اختلاف قابلیت دسترسی سیستم در حالت وجود سیاست مرخصی مفروض در پژوهش حاضر با حالتی که تعمیرکار بدون مرخصی می‌بایست مشغول اجرای تعمیرات باشد، اندک است و در حالتی که تعمیرکار بدون مرخصی به انجام فعالیت می‌پردازد، به علت ساده‌سازی و حذف برخی از حالات مدل‌سازی مارکوف، قابلیت دسترسی اندکی بیشتر خواهد بود اما در صورتی که فرض مدل پژوهش بدین‌گونه باشد که تعمیرکار تا پایان مرخصی اجازه بازگشت نداشته باشد، قابلیت دسترسی نسبت به حالتی که تعمیرکار بدون مرخصی به انجام تعمیرات بپردازد، به‌طور چشمگیری کمتر خواهد بود.

### ۵-۴- تأثیر زمان مأموریت ( $t$ ) بر قابلیت دسترسی و هزینه کل

با توجه به مفروضات و مدل حاصل از پژوهش، با افزایش مدت زمان مأموریت ( $t$ )، هزینه کل افزایش یافته و قابلیت دسترسی کاهش می‌یابد.

در صورتی که پارامترهای  $\theta$  و  $Y$  افزایش یابد و  $\theta = 2$  و  $Y = 3$  در نظر گرفته شود، نتایج حاصل از حل مسئله به شرح جدول ۱۳ می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۱۲ قابل مشاهده است، در حالتی که پارامترهای  $\theta = 0$  و  $Y = 0$  و مسئله بدون حالت اشتراک‌گذاری بار در نظر گرفته شود، مقدار قابلیت دسترسی سیستم افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج جدول ۱۳، در حالتی که پارامترهای  $\theta$  و  $Y$  افزایش یابد و  $\theta = 2$  و  $Y = 3$  در نظر گرفته شود، مقدار قابلیت دسترسی سیستم کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، نتایج حاصل از حل مسئله با استفاده از الگوریتم‌های MOAHA نیز حاکی از آن بوده است که با کاهش پارامترهای  $\theta$  و  $Y$  مقدار قابلیت دسترسی سیستم افزایش یافته و با افزایش پارامترهای  $\theta$  و  $Y$  مقدار قابلیت دسترسی سیستم کاهش می‌یابد.

### ۵-۲- تأثیر محدودیت‌های حجم و وزن و هزینه‌های خرید و آلودگی

با توجه به ساختار مدل، انتظار می‌رود افزایش حدود مجاز حجم، وزن و هزینه موجب گسترش فضای شدنی مدل و افزایش تعداد جواب‌های غیرمغلوب شود. این امر امکان انتخاب تعداد بیشتری قطعه در زیرسیستم‌ها را فراهم کرده و از طریق افزایش افزونگی، قابلیت دسترسی کل سیستم را بهبود می‌دهد. در مقابل، افزایش تعداد قطعات باعث رشد هزینه خرید و هزینه آلودگی شده و مقدار تابع هدف هزینه کل را افزایش می‌دهد. بنابراین، جبهه پارتو به سمت مقادیر بالاتر قابلیت دسترسی و هزینه بیشتر گسترش می‌یابد. بدین ترتیب، کاهش حدود مجاز حجم، وزن یا هزینه موجب کوچک شدن فضای شدنی، حذف بخشی از جواب‌های غیرمغلوب، کاهش قابلیت دسترسی و محدود شدن جبهه پارتو خواهد شد. این نتایج نشان

جدول ۱۴. تحلیل حساسیت نسبت به تغییر محدودیت‌های حجم و وزن و هزینه

Table 14. Sensitivity analysis with respect to changes in volume, weight, and cost constraints

| تغییر محدودیت  | اثر بر فضای شدنی | اثر بر قابلیت دسترسی کل | اثر بر هزینه کل | اثر بر جواب‌های پارتویی   |
|----------------|------------------|-------------------------|-----------------|---------------------------|
| افزایش ( $V$ ) | افزایش           | افزایش                  | افزایش          | تنوع جواب‌ها              |
| کاهش ( $V$ )   | کاهش             | کاهش                    | کاهش            | حذف برخی جواب‌های پارتویی |
| افزایش ( $C$ ) | افزایش           | افزایش                  | افزایش          | تنوع جواب‌ها              |
| کاهش ( $C$ )   | کاهش             | کاهش                    | کاهش            | حذف برخی جواب‌های پارتویی |
| افزایش ( $W$ ) | افزایش           | افزایش                  | افزایش          | تنوع جواب‌ها              |
| کاهش ( $W$ )   | کاهش             | کاهش                    | کاهش            | حذف برخی جواب‌های پارتویی |

**جدول ۱۵.** تأثیر مدت زمان مأموریت ( $t$ ) بر قابلیت دسترسی و هزینه کل

**Table 15.** Effect of mission time ( $t$ ) on system availability and total cost

| مدت زمان مأموریت ( $t$ ) | قابلیت دسترسی | هزینه کل    |
|--------------------------|---------------|-------------|
| ۱۰                       | ۰/۹۹۹۹۸۷۵۴۳   | ۲۱۴۵/۴۴۸۵۱۶ |
| ۱۵                       | ۰/۹۹۹۹۷۴۸۲۴۶  | ۲۳۰۶/۹۹۴۰۰۸ |
| ۲۰                       | ۰/۹۹۹۸۵۴۴۲۱   | ۲۵۱۴/۵۱۴۸۷۶ |

**جدول ۱۵** تأثیر مدت زمان مأموریت ( $t$ ) بر قابلیت دسترسی و هزینه کل را نشان می‌دهد.

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در پژوهش حاضر، یک سیستم سری-موازی توزیع انرژی الکتریکی در یک شناور با استراتژی افزونگی مختلط مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. سیستم مورد مطالعه دارای محدودیت‌های حجم، وزن و هزینه بوده و یک تعمیرکار جهت تعمیر قطعات خراب با سیاست نگهداشت و مرخصی پیش‌بینی شده است. مسئله با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و MOAHA حل شده و بهترین جواب‌های بهینه حاصل از انتخاب بهترین نوع تابلوی توزیع (به‌صورت همگن) و انتخاب تعداد مناسب تابلوهای توزیع در هر زیرسیستم، به‌منظور حداکثر نمودن قابلیت دسترسی و حداقل نمودن مجموع هزینه‌ها با امکان اشتراک‌گذاری بار در سیستم، ارائه گردیده است. جواب‌های بهینه حاصل از تشکیل مرز پارتو هیچ‌گونه برتری نسبت به یکدیگر نداشته و تمامی جواب‌های تشکیل‌شده بر روی مرز پارتو بهینه می‌باشند. در برخی از جواب‌ها هزینه کل کمتر و در برخی دیگر قابلیت دسترسی بالاتر بوده است؛ بدین ترتیب جواب‌های بهینه هیچ برتری نسبت به یکدیگر ندارند. بدین ترتیب، نتایج و پیشنهادات حاصل از انجام پژوهش به شرح زیر است:

۱) در پژوهش حاضر از یک تعمیرکار با نوعی سیاست نگهداشت و مرخصی جهت تعمیر تابلوهای خراب استفاده شده است که می‌توان سیاست‌های نگهداشت و مرخصی دیگری را نیز برای تعمیرکار در نظر گرفت. همچنین می‌توان در زمان‌های بیکاری تعمیرکار، از وی جهت بازرسی و بازمینی سایر سیستم‌های شناور و یا تعمیر سایر قطعات خراب استفاده نمود.

۲) می‌توان از ترکیب قطعات همگن و غیرهمگن در هر زیرسیستم استفاده نموده و نتایج حاصل را تحلیل کرد. علاوه بر آن، می‌توان از قطعات مشابه جهت کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت دسترسی بهره برد و نتایج را بررسی نمود.

۳) در پژوهش‌های آتی می‌توان از سایر روابط و فرمول‌های اشتراک‌گذاری بار استفاده نمود و نتایج حاصل را با نتایج فعلی مقایسه کرد. همچنین می‌توان سایر استراتژی‌های افزونگی را در سیستم توزیع انرژی الکتریکی مورد بررسی قرار داد و با نتایج پژوهش حاضر مقایسه نمود.

## تأمین مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی خارجی دریافت نکرده است.

## مشارکت‌های نویسندگان

**مریم گنجی:** مفهوم‌پردازی، روش‌شناسی، مرور ادبیات، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل صوری، طراحی چارچوب، نگارش پیش‌نویس اولیه، بازنگری و ویرایش؛ **مهدی کرباسیان:** مفهوم‌پردازی اولیه، روش‌شناسی، تحلیل صوری، طراحی چارچوب، نگارش پیش‌نویس اولیه، بازنگری و ویرایش، راهنمایی.

## تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به دست آمده است.

## قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از تمامی همکارانی که با ارائه دیدگاه‌ها و تخصص ارزشمند خود،

- optimization in repairable redundant retrial systems with working breakdown and Bernoulli feedback. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 240(3), 1045-1066. <https://doi.org/10.1177/1748006X251414185>
- 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.ress.2025.111538>
- 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. <https://doi.org/10.1002/qre.3164>
- 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.ress.2015.04.010>
- 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>
- Oszczypała, M., Ziółkowski, J., & Małachowski, 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*, 165, 112041. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112041>
- 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.ress.2020.106987>
- 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://doi.org/10.1177/1748006X17736166>
- Peiravi, A., Karbasian, M., Ardakan, M. A., & Coit, D. W. (2019). Reliability optimization of series-parallel systems with K-mixed redundancy strategy. *Reliability Engineering & System Safety*, 183, 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.008>
- Ramezani, K., Darvish Motevalli, M. H., Motamedi, M., & Movahedi, M. M. (2026). Design of a نقش مؤثری در انجام و پیشبرد این پژوهش ایفا کردند، ابراز می‌کنند.
- ## مراجع
- Andarkhor, A., & Eghbali, H. (2022). Solving the Reliability-Surplus Allocation Problem Using a Hybrid Colonial Competitive and Genetic Algorithm. *System Engineering and Productivity*, 2(3), 27-47. <https://doi.org/10.22034/sep.2022.243415>
- Anderson, R. T., & Neri, L. (Eds.). (2012). *Reliability-centered maintenance: management and engineering methods*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-0757-7>
- Ardakan, M. A., & Hamadani, A. Z. (2014). Reliability optimization of series-parallel systems with mixed redundancy strategy in subsystems. *Reliability Engineering & System Safety*, 130, 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.06.001>
- Asoudeh, F., & Abouei Ardakan, M. (2025). A bi-objective model for reliability analysis of a multi-state system with performance sharing mechanism. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 16(1), 15-32. <https://doi.org/10.1007/s12652-024-04863-2>
- Billinton, R., & Allan, R. N. (1985). *Reliability evaluation of engineering systems* (Vol. 198, No. 3). New York: Pitman. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0685-4>
- 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.ress.2018.08.012>
- Ebeling, C. E. (2019). *An introduction to reliability and maintainability engineering*. Waveland Press.
- 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.ress.2022.108500>
- Hajeeh, M. A. (2025). Performance of load sharing repairable k-out-of-N: G systems. *Journal of Engineering Research*, 13(2), 627-635. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.01.004>
- 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>
- Hu, D., Tian, R., Zhang, J., & Zheng, H. (2026). Reliability assessment and bi-objective

- Safety, 112072. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.112072>
- 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>
- preventive maintenance mathematical model for high-speed press machines. *System Engineering and Productivity*, 6(1), 251-271. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2067829.1372>
- Reihaneh, M., Ardakan, M. A., & Eskandarpour, M. (2022). An exact algorithm for the redundancy allocation problem with heterogeneous components under the mixed redundancy strategy. *European Journal of Operational Research*, 297(3), 1112-1125. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.06.033>
- Salehian, Z., & Jahan, A. (2022). Establishing a reliability-based maintenance methodology in a gas pressure reduction system. *System Engineering and Productivity*, 1(1), 121-136. <https://doi.org/10.22034/sep.2022.243401>
- Shams, H., Hashemzadeh Khorasgani, G. R., Abbaspour Esfadan, G., Farsijani, H., & Shahmansouri, A. (2025). Presentation of a mathematical model to examine the economic advantages of maintenance strategies. *System Engineering and Productivity*, 5(2), 17-33. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2051634.1264>
- Sharifi, M., Cheragh, G., Maljaili, 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*, 13(39), 171-188. <https://doi.org/10.1001.1.22518029.1394.13.39.7.8>
- Wang, W., Xiong, J., & Xie, M. (2016). A study of interval analysis for cold-standby system reliability optimization under parameter uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 97, 93-100. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.04.017>
- Wang, Y., & Li, L. (2014). A PSO algorithm for constrained redundancy allocation in multi-state systems with bridge topology. *Computers & Industrial Engineering*, 68, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.11.016>
- 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. <https://doi.org/10.1002/qre.2323>
- Zhang, C., & Zhang, Y. (2020). Common cause and load-sharing failures-based reliability analysis for parallel systems. *Eksplotacja i Niezawodność*, 22(1), 26-34. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.1.4>
- Zhang, N., Yi, X., Ma, Y., & Cai, K. (2025). Reliability assessment and maintenance optimization of a load-sharing system considering dependent failure rates and component heterogeneity. *Reliability Engineering & System*