

Simultaneous Optimization of Resource Allocation and Maintenance Strategy in Wind Farms Considering Resource Shortage Penalty Cost

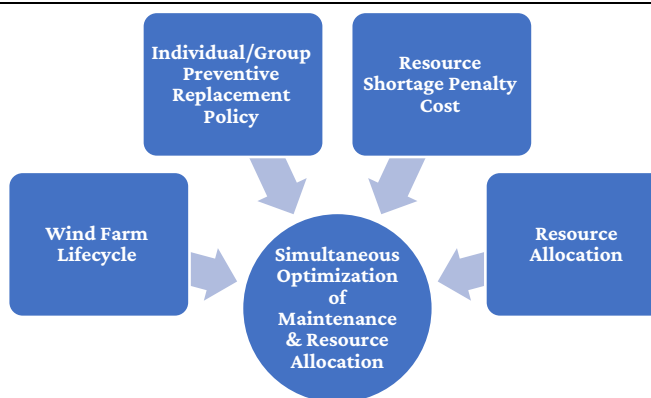
Hamid Moakedi ^{*}, Mobin Effati 

Department of Industrial Engineering, College of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

HIGHLIGHTS

- Modeling of preventive and corrective replacements under Weibull failure rate
- Sensitivity analysis under individual/group replacement scenarios with resource constraints
- Genetic algorithm implementation for total cost minimization over the typical lifecycle of wind farms

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 25 June 2026

Revised: 2 August 2026

Accepted: 29 August 2026

Available online: 29 August 2025

*Correspondence:

moakedi@qut.ac.ir

How to cite this article:

Moakedi, H., & Effati, M. (2027). Simultaneous optimization of resource allocation and maintenance strategy in wind farms considering resource shortage penalty cost. *System Engineering and Productivity*, 7 (1), 301-329.

Keywords:

Maintenance
Simultaneous optimization
Resource allocation
Wind farms
Genetic algorithm

ABSTRACT

Wind turbines are prone to frequent failures due to harsh environmental conditions, and maintenance and repair (M&R) costs constitute a significant portion of their lifecycle costs. This paper presents a mathematical model for simultaneous optimization of M&R strategy and resource allocation in wind farms. The model considers three wind farms with turbines consisting of four main components (rotor, bearing, gearbox, and generator) following a Weibull failure rate distribution. Maintenance operations are defined as preventive and corrective replacements, and resources are classified into four categories: tools, technicians, transportation equipment, and lifting equipment. The objective function minimizes the average total cost of resource allocation, maintenance and repair costs, and resource shortage penalty cost over the typical lifecycle of wind farms (20 years). The model is solved using a single-objective genetic algorithm. Numerical results show that the optimal preventive replacement plan includes 7 replacements for the rotor, 6 for the bearing, 4 for the gearbox, and 6 for the generator, achieving an average total cost of approximately \$68,529 per year. Sensitivity analysis is performed under four scenarios (individual and group replacement with and without resource constraints) and on Weibull distribution parameters. Results reveal that reducing available resources decreases the number of preventive replacements, and individual component replacement incurs lower cost than group replacement. Moreover, changes in the Weibull scale parameter have a greater impact on total cost than the shape parameter. Future research directions include real case studies and integration of resource logistics.

1. Introduction

Wind energy has experienced remarkable growth over the past two decades, establishing itself as a primary source of clean and competitive energy worldwide. It is projected that wind power could supply 20–38% of global electricity by 2050. However, wind turbines operate under harsh and variable environmental conditions, making them susceptible to frequent failures. Maintenance and repair (M&R) costs can account for 12–32% of the total lifecycle costs of wind farms, underscoring the critical need for efficient maintenance strategies.

Despite extensive research in wind farm maintenance optimization, a systematic literature review reveals several research gaps: (1) limited integration between maintenance strategy optimization and resource allocation; (2) insufficient attention to shortage penalty costs for maintenance resources; (3) lack of comparison between individual and group component replacement strategies under resource constraints; and (4) short-term planning horizons in most existing studies. Recent research has moved toward simultaneous optimization of maintenance strategies considering resource constraints (Ji et al., 2025; Li et al., 2026; Xiang et al., 2024), yet the mentioned gaps persist.

This paper presents a novel mathematical model for simultaneous optimization of maintenance strategy and resource allocation in wind farms. The model integrates preventive and corrective replacements under Weibull failure rate distribution, while considering resource shortage penalty cost as a key component of the objective function. The main contributions of this work are: (1) simultaneous optimization of preventive replacement strategy and resource allocation in an integrated model; (2) modeling of shortage penalty cost for maintenance resources (tools, technicians, transportation, and lifting equipment); (3) comparative analysis of individual versus group component replacement under different resource constraint scenarios; and (4) long-term planning horizon (20 years) aligned with wind farm lifecycle.

2. Methodology

This study considers three wind farms (A, B, and C) with 20, 20, and 40 turbines respectively, sharing a common maintenance system. Each turbine consists of four main components: rotor, bearing, gearbox, and generator, each following a Weibull failure rate distribution. Maintenance operations include two types of replacements: preventive (scheduled) and corrective (failure-based). Resources are classified into four categories: tools, technicians, transportation equipment, and lifting equipment.

A mathematical model is formulated to minimize the average total cost over the typical lifecycle of wind farms (20 years, equivalent to 240 months). The objective function includes three cost components: (1) resource allocation costs to wind farms; (2)

maintenance and repair costs (preventive and corrective replacements); and (3) resource shortage penalty costs. The decision variable is the number of preventive replacements for each component (N_l), while auxiliary variables include total average cost ($E[C_T]$), number of required maintenance operations (NP_{ki}), allocated resources (NV_{kj}), resource consumption (L_j), and resource shortage (S_j).

Due to the NP-hard nature of the problem—arising from discrete decision variables and a nonlinear objective function (including Weibull failure rate integrals)—exact solution methods are impractical for large-scale instances. Therefore, a single-objective genetic algorithm (GA) is developed as an efficient metaheuristic approach. The GA chromosome consists of four genes representing the number of preventive replacements for each component (values between 1 and 240). The algorithm uses roulette wheel selection, single-point crossover, and mutation operators. Parameters (population size, crossover probability, mutation probability, and maximum iterations) are calibrated using the Taguchi design of experiments method with an L9 orthogonal array, maximizing the signal-to-noise (SNR) ratio criterion. The optimal parameter values are: population size = 100, crossover probability = 0.8, mutation probability = 0.2, and maximum iterations = 1000. The methodology section of your paper, you should provide details of the methods used in your research. This includes an explanation of the data collection methods, tools, techniques, and statistical analyses used in the research.

The goal is for the reader to be able to understand how your research was conducted and, if necessary, replicate it. In other words, the methodology section should be clear enough to allow for an assessment of the replicability and validity of the study's results.

3. Results and Discussion

Numerical experiments are conducted on a dataset from (Zhang & Yang, 2021) with three wind farms (20, 20, and 40 turbines) over the typical lifecycle of wind farms (20 years). The optimal preventive replacement plan obtained is $N = [7, 6, 4, 6]$, representing 7 replacements for rotor, 6 for bearing, 4 for gearbox, and 6 for generator, with an average total cost of $E[C_T] = 1,370,586\$$ over 20 years, equivalent to approximately 68,529\$ per year. The resource allocation matrix (NV) and average monthly resource consumption (L) are:

$$NV = \begin{bmatrix} 5.2197 & 9.6620 & 4.3962 & 4.3962 \\ 5.2197 & 9.6620 & 4.3962 & 3.962 \\ 10.4394 & 19.3240 & 8.7925 & 8.7925 \end{bmatrix},$$

$$L = [20.9, 38.6, 17.6, 17.6].$$

The genetic algorithm convergence diagram confirms proper performance, with the objective function steadily decreasing toward the optimal value. Sensitivity Analysis is performed under four

scenarios: (1) individual replacement with unlimited resources; (2) individual replacement with resource constraints; (3) group replacement with unlimited resources; and (4) group replacement with resource constraints. Additionally, sensitivity analysis is conducted on Weibull distribution parameters (β and η) and inflation rate.

Scenario 1: With unlimited resources, the penalty cost has no effect on the optimal solution. The preventive replacement plan remains constant at $N = [7,6,4,6]$ regardless of penalty cost values.

Scenario 2: Under resource constraints (10% to 80% reduction), the optimal replacement plan changes significantly. With 20% resource reduction, the plan becomes $N = [5,3,4,4]$ under heavy penalty and $N = [5,4,4,4]$ under light penalty. At 30% to 80% reduction, the plan stabilizes at $N = [3,2,4,3]$ under heavy penalty and $N = [4,3,4,4]$ under light penalty, indicating a saturation point where further resource reduction does not change the optimal plan. In the light penalty scenario, the model accepts a small penalty cost to maintain more preventive replacements, avoiding higher corrective costs.

Scenario 3: Under group replacement with unlimited resources, the optimal plan is $N = [5,5,5,5]$ with total cost of 1,410,800\$, higher than the individual replacement scenario. Although group replacement consumes fewer resources ($L = [18.4,34,15.5,15.5]$ vs. $L = [20.9,38.6,17.6,17.6]$), it results in higher total cost due to increased corrective replacements caused by longer intervals between preventive replacements.

Scenario 4: Under group replacement with resource constraints, the plan stabilizes at $N = [3,3,3,3]$ under heavy penalty and $N = [4,4,4,4]$ under light penalty, regardless of resource reduction level. This demonstrates that group replacement strategy is less flexible than individual replacement in responding to varying resource constraints.

Weibull Parameter Sensitivity Analysis: Changes in the scale parameter (η) have a much greater impact on total cost than changes in the shape parameter (β). Under 40% resource constraint with heavy penalty, reducing η to half (0.5η) increases total cost to over five times (from 4,187,868\$ to 21,263,547\$), while increasing η to 1.5 times eliminates penalty costs and significantly reduces total cost to 933,335\$. Increasing β to twice the base value reduces total cost by up to 72% under resource constraints.

Inflation Rate Analysis: It is mathematically proven that a constant inflation rate appears as a fixed coefficient in the objective function and does not affect the optimal replacement plan. While inflation impacts absolute cost values, the structure of the optimal replacement plan remains unchanged.

Key findings from sensitivity analysis:

- Resource constraints have a direct and significant impact on reducing preventive replacements.

- Lower shortage penalty costs encourage more preventive replacements.
- A saturation point exists at 30% resource reduction under heavy penalty, beyond which further resource constraints do not affect the optimal replacement plan.
- Individual replacement outperforms group replacement in terms of total cost.
- The lowest resource consumption does not necessarily imply the lowest total cost; a balance must be struck between current costs (resources and preventive maintenance) and future costs (failures and corrective replacements).
- The Weibull scale parameter (η) has a significantly greater impact on total cost than the shape parameter (β).
- Constant inflation rate does not affect the optimal replacement plan, only absolute cost values.

4. Conclusions

This paper presents an integrated mathematical model for simultaneous optimization of maintenance strategy and resource allocation in wind farms. The model incorporates preventive and corrective replacements, resource allocation costs, and resource shortage penalty costs within a 20-year planning horizon. A genetic algorithm with Taguchi-calibrated parameters is developed to solve the NP-hard problem.

The optimal preventive replacement plan ($N = [7,6,4,6]$) achieves a total cost of 1,370,586\$ over 20 years. Sensitivity analysis across four scenarios reveals that: (1) under unlimited resources, penalty cost has no effect on the optimal solution; (2) resource constraints significantly reduce preventive replacements; (3) lower shortage penalty costs encourage more preventive maintenance; (4) a saturation point exists at 30% resource reduction under heavy penalty; (5) individual replacement consistently outperforms group replacement in terms of total cost; (6) group replacement is less flexible under varying resource constraints; and (7) Weibull parameter analysis shows that the scale parameter (η) has a significantly greater impact on total cost than the shape parameter (β).

Theoretical contributions: This study introduces a four-component integrated model for simultaneous maintenance and resource optimization, models resource shortage penalty costs, and compares individual versus group replacement strategies under various resource constraints with a long-term horizon and provides comprehensive sensitivity analysis on Weibull distribution parameters.

Practical contributions: The framework provides managers with a decision-making tool for determining optimal maintenance strategies, resource allocation, and cost management under different resource constraint scenarios. The

sensitivity analysis demonstrates that investing in resource availability (e.g., warehouse fortification) enhances both reliability and cost efficiency. The sensitivity analysis demonstrates that investing in higher-quality components (with lower failure rates) and maintaining adequate resource availability can significantly reduce total costs.

Limitations: One limitation is the assumption of a constant inflation rate over time, while in reality inflation may fluctuate. However, it is mathematically proven that a constant inflation rate does not affect the optimal replacement plan. Additionally, the model does not consider the time required for maintenance operations or logistics and transportation of maintenance resources.

Future research directions: (1) extending the model to multi-objective optimization including sustainability and environmental goals (e.g., carbon emission reduction); (2) incorporating uncertainty in failure rates and costs using stochastic or fuzzy approaches; (3) investigating weather conditions' impact on resource accessibility in offshore wind farms; (4) developing an integrated model covering maintenance strategy, resource allocation, and logistics simultaneously; and (5) developing age-based group replacement models considering remaining component life. The conclusion section of the article, a summary of the main findings and content of the article should be provided, so that the reader can have a clear understanding of the topic and message of the article.

Also, the questions raised in the introduction should be answered and the importance of the work done and its impact on future research should be stated.

Avoid presenting new information or detailed discussions and focus on summarizing and summarizing the main points.

Acknowledgments

The authors sincerely thank the Editor-in-Chief, the anonymous reviewers, and the editorial staff for their constructive feedback and timely handling of the manuscript.

Funding

This research received no external funding.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Author Contribution Statement

Hamid Moakedi: Conceptualization, Methodology, Supervision, Validation, Writing – original draft, Writing – review & editing, Project administration, Resources, Visualization, Formal analysis; **Mobin Efati:** Investigation, Software, Data curation.

Data Availability Statement

The data supporting the findings of this study are derived from the work of (Zhang & Yang, 2021), which is cited in the manuscript. The numerical example in this paper utilizes the failure rate parameters, cost data, and resource requirement data from that publicly available source. The datasets generated and/or analyzed during the current study are not publicly available due to the ongoing nature of the research project, but they can be obtained from the corresponding author upon reasonable request.

References

- Ji, X., Shen, X., Du, Y., Ali, N., & Tan, R. (2025). Two phase optimization method for corrective maintenance of offshore wind farms considering vessel fleet size. *Ocean Engineering*, 341, 122669. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122669>
- Li, W., Xiang, D., & Liang, F. (2026). Multi-objective opportunity maintenance optimization for wind farms considering multiple factors. *Renewable Energy*, 256, 123868. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123868>
- Xiang, H., Liu, Q., Dong, M., & Wang, Y. (2024). Hybrid group opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbines considering maintenance resource allocation in harsh working environments. *Ocean Engineering*, 312, 119147. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119147>
- Zhang, C., & Yang, T. (2021). Optimal maintenance planning and resource allocation for wind farms based on non-dominated sorting genetic algorithm-II. *Renewable Energy*, 164, 1540-1549. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.125>

بهینه‌سازی همزمان تخصیص منابع و استراتژی نگهداری و تعمیرات در مزارع بادی با در نظر گرفتن هزینه جریمه کمبود منابع

حمید مؤکدی^۱، مبین عفتی^{۲*}

گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

برجسته‌ها

- مدل‌سازی تعویض‌های پیشگیرانه و اصلاحی با نرخ خرابی وایبل
- تحلیل حساسیت در سناریوهای تعویض انفرادی و گروهی با محدودیت منابع
- پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک برای کمینه‌سازی هزینه کل در طول چرخه عمر متداول مزارع بادی

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۷

ارائه برخط: ۱۴۰۵/۰۶/۰۷

*نویسنده مسئول:

moakedi@qut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

نگهداری و تعمیرات
بهینه‌سازی همزمان
تخصیص منابع
مزارع بادی
الگوریتم ژنتیک

چکیده گرافیکی



چکیده

توربین‌های بادی به دلیل شرایط محیطی سخت، مستعد خرابی‌های مکرر هستند و هزینه نگهداری و تعمیرات (نت) آن‌ها سهم قابل توجهی از هزینه چرخه عمر را تشکیل می‌دهد. در این مقاله، یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی همزمان استراتژی نت و تخصیص منابع در مزارع بادی ارائه می‌شود. مدل شامل سه مزرعه بادی با توربین‌های دارای چهار مؤلفه اصلی (روتور، بورینگ، گیربکس و ژنراتور) با نرخ خرابی وایبل است. عملیات نت در دو نوع تعویض پیشگیرانه و اصلاحی تعریف شده و منابع در چهار دسته ابزارآلات، تکنسین‌ها، تجهیزات حمل‌ونقل و تجهیزات بالابر طبقه‌بندی می‌گردند. تابع هدف، کمینه‌سازی متوسط مجموعه هزینه‌های تخصیص منابع، هزینه‌های نت و هزینه جریمه کمبود منابع در طول چرخه عمر متداول مزارع بادی (۲۰ سال) است. مدل با الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه حل شده است. نتایج مثال عددی نشان می‌دهد برنامه تعویض پیشگیرانه بهینه شامل ۷ بار تعویض روتور، ۶ بار بورینگ، ۴ بار گیربکس و ۶ بار ژنراتور است و میانگین هزینه کل به ۶۸۵۲۹ دلار در سال می‌رسد. تحلیل حساسیت در چهار حالت مختلف (تعویض انفرادی و گروهی با و بدون محدودیت منابع) و بر روی پارامترهای توزیع وایبل انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد کاهش منابع در دسترس، تعداد تعویض‌های پیشگیرانه را کاهش می‌دهد و تعویض انفرادی مؤلفه‌ها نسبت به تعویض گروهی هزینه کمتری دارد. همچنین، تغییرات پارامتر مقیاس وایبل تأثیر بیشتری بر هزینه کل نسبت به پارامتر شکل دارد. انجام مطالعه موردی و یکپارچه‌سازی لجستیک حمل‌ونقل منابع به عنوان تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

۱- مقدمه

امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به دلایل متعددی از جمله کمبود منابع فسیلی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین مورد توجه گسترده قرار گرفته است. انرژی بادی طی ۲۰ سال گذشته رشد چشمگیری داشته و به یکی از منابع اصلی انرژی پاک در جهان تبدیل شده است. همانطور که در پژوهشی (Zhang & Yang, 2021) پیش‌بینی شده است، نیروی باد می‌تواند ۲۰ تا ۳۸ درصد از برق جهان را تا سال ۲۰۵۰ تأمین کند. در مطالعه‌ای (Bilal et al., 2021) نیز اشاره شده است که برخی کشورها متعهد شده‌اند تا سال ۲۰۵۰ تقریباً به طور کامل از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر نیاز خود را تأمین نمایند. با وجود مزایای فراوان انرژی بادی، محیط‌های عملیاتی سخت و متغیر توربین‌های بادی منجر به خرابی‌های مکرر می‌شود. بر اساس آمارهای ارائه شده، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری می‌تواند سهم قابل‌توجهی از کل هزینه چرخه حیات را در مزارع بادی دریایی و خشکی تشکیل دهد. بنابراین، سرمایه‌گذاری در بهینه‌سازی سیستم نگهداری و تعمیرات (نت) از اهمیت بالایی برخوردار است.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه نگهداری و تعمیرات توربین‌های بادی انجام شده است. در مطالعه‌ای (Zhao et al., 2018) بر نظارت مداوم بر سلامت توربین‌ها با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق تأکید شده است. در پژوهش دیگری (Froger et al., 2018) طرح‌های نگهداری و تعمیرات با هدف حداکثرسازی درآمد حاصل از تولید برق و با در نظر گرفتن محدودیت تکنسین‌ها توسعه یافته است. در مقاله‌ای (Dalgic et al., 2017) روش‌های جامعی برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات در مزارع بادی فراساحلی ارائه شده است. در مطالعه دیگری (Erguido et al., 2017) سیاست‌های نگهداری مبتنی بر آستانه‌های قابلیت اطمینان متغیر پیشنهاد گردیده است. همچنین در پژوهش‌های انجام‌شده قبلی (Dai et al., 2015؛ Stålthane et al., 2015) به مسیریابی ناوگان نگهداری و تعمیرات و یافتن مسیرهای بهینه برای کشتی‌های خدماتی در مزارع بادی فراساحلی پرداخته شده است.

در یک مطالعه انجام‌شده (Besnard et al., 2012) مدلی برای بهینه‌سازی سازمان پشتیبانی نگهداری و تعمیرات مزارع بادی فراساحلی تدوین شده است. مسئله تخصیص و مسیریابی تکنسین‌ها در مطالعه دیگری (Schrotenboer et al., 2018) معرفی گردیده است. در مقاله‌ای (Balasubramanian et al., 2020) بررسی و مقایسه مدل‌های بهینه‌سازی مزارع بادی از نظر توابع هدف، پیچیدگی الگوریتم و سرعت محاسبات انجام شده است. در یک مطالعه انجام‌شده (Carlos et al., 2013) مدل‌هایی با در نظر گرفتن رفتار تصادفی سرعت باد و قابلیت اطمینان ارائه شده است. در پژوهش دیگری (Atashgar & Abdollahzadeh, 2016) بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات فرصت‌طلبانه، افزونگی و بلوکی ناقص به صورت همزمان بررسی شده است.

در مطالعه‌ای انجام شده (Allal et al., 2021) رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با الگوریتم کلونی مورچگان برای مسیریابی و برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات در مزارع بادی فراساحلی پیشنهاد شده است. در مقاله دیگری (Ding et al., 2013) مرور ادبیاتی بر مدل‌سازی و بهینه‌سازی استراتژی نت در توربین‌های بادی انجام شده و چالش‌هایی نظیر کمبود اطلاعات میدانی و پتانسیل رویکردهای مبتنی بر وضعیت^۱ (CBM) شناسایی گردیده است. در یک پژوهش (Ambarita et al., 2023) چالش‌ها و فناوری‌های توانمند برای توسعه مزارع بادی شناور مستقل بررسی شده است. در مطالعه انجام‌شده دیگری (Golestani et al., 2023) مدل سیستم دینامیک برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی و مدیریت دارایی مزارع بادی فراساحلی ارائه شده است. در مقاله دیگری (Li et al., 2022) چارچوب تصمیم‌گیری یکپارچه شامل مدل نگهداری و تعمیرات و رویکرد مدل‌سازی عدم قطعیت احتمالی پیشنهاد گردیده است. همچنین در یک پژوهش دیگر (Rinaldi et al., 2021) روشی برای محاسبه شاخص‌های سرمایه و عملیاتی مزارع بادی شناور ارائه شده است.

در سطح ملی نیز پژوهش‌هایی در حوزه مدل‌سازی ریاضی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (Ramezani et al., 2026) و تحلیل اقتصادی راهبردهای نگهداری و تعمیرات

^۱ Condition-Based Maintenance

هدف از مدل ارائه شده، تعیین برنامه تعویض پیشگیرانه بهینه برای مؤلفه‌های توربین‌های بادی با کمینه‌سازی متوسط هزینه‌های کل مزارع است. برای حل این مسئله که به دلیل ماهیت ترکیبیاتی و غیرخطی در زمره مسائل با پیچیدگی محاسباتی بسیار بالا^۲ قرار دارد، از الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش فراابتکاری کارآمد استفاده شده است. نوآوری‌های پژوهش شامل بهینه‌سازی همزمان استراتژی نت و تخصیص منابع، مدل‌سازی هزینه جریمه کمبود منابع، مقایسه تعویض انفرادی و گروهی مؤلفه‌های توربین می‌باشد.

بر این اساس، سؤالات پژوهش حاضر عبارتند از:

- (۱) برنامه بهینه تعویض پیشگیرانه برای هر مؤلفه توربین در چرخه عمر مفید مزارع بادی چگونه تعیین می‌شود؟
- (۲) تخصیص بهینه منابع به مزارع بادی با در نظر گرفتن فاکتور اشتراک منابع چگونه انجام می‌گیرد؟
- (۳) هزینه جریمه کمبود منابع چه تأثیری بر استراتژی بهینه نت و تخصیص منابع دارد؟
- (۴) تعویض انفرادی مؤلفه‌ها در مقایسه با تعویض گروهی، کدام یک عملکرد بهتری از نظر هزینه کل دارد؟

ادامه مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش ۲، مبانی نظری پژوهش شامل مرور ادبیات موضوع، مفاهیم پایه، شکاف‌های تحقیقاتی و نوآوری پژوهش حاضر ارائه می‌شود. بخش ۳ به تعریف مساله، تشریح مدل ریاضی پیشنهادی و همچنین روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک اختصاص دارد. در بخش ۴، یافته‌های پژوهش شامل مثال عددی، نتایج الگوریتم پیشنهادی و تحلیل حساسیت در چهار حالت مختلف ارائه می‌گردد. نهایتاً، بخش ۵ به بحث و نتیجه‌گیری، بیان محدودیت‌ها و ارائه پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده می‌پردازد.

۲- مبانی نظری پژوهش

در این بخش، مفاهیم پایه و پیشینه تحقیقات انجام‌شده در حوزه نگهداری و تعمیرات توربین‌های بادی، تخصیص منابع، و مدل‌های بهینه‌سازی همزمان ارائه می‌گردد. همچنین شکاف‌های تحقیقاتی با جزئیات بیشتر

(Shams et al., 2025) انجام شده است که در آن‌ها، استراتژی‌های مختلف نت با هدف بهینه‌سازی هزینه و قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار گرفته است. با این حال، این مطالعات عمدتاً روی تجهیزات صنعتی عمومی متمرکز بوده و ویژگی‌های خاص مزارع بادی مانند توزیع وایبل، هزینه جریمه کمبود منابع و افق بلندمدت برنامه‌ریزی بررسی نشده است.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های جدیدتری به سمت بهینه‌سازی همزمان استراتژی‌های نگهداری با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع و عوامل عملیاتی حرکت کرده‌اند. برای نمونه، در یک مطالعه قبلی (Xiang et al., 2024) یک استراتژی نگهداری فرصت‌طلبانه گروهی ترکیبی برای توربین‌های بادی فراساحلی با در نظر گرفتن تخصیص منابع در محیط‌های عملیاتی سخت ارائه شده است. همچنین، در پژوهش دیگری (Ji et al., 2025) یک روش بهینه‌سازی دومرحله‌ای برای نگهداری اصلاحی در مزارع بادی فراساحلی با در نظر گرفتن اندازه ناوگان کشتی‌ها توسعه داده شده است. علاوه بر این، در مطالعه‌ای (Li et al., 2026) بهینه‌سازی چندهدفه نگهداری فرصت‌طلبانه برای مزارع بادی با در نظر گرفتن عوامل متعدد و با استفاده از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نسخه دوم^۱ مورد بررسی قرار گرفته است. با وجود این پژوهش‌های گسترده در حوزه نگهداری و تعمیرات مزارع بادی، هنوز شکاف‌هایی نظیر یکپارچگی ناکافی تصمیمات، کم‌توجهی به هزینه جریمه کمبود منابع، عدم مقایسه تعویض انفرادی و گروهی و محدودیت در افق زمانی برنامه‌ریزی وجود دارد که در بخش ۲-۵ به تفصیل به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

پژوهش حاضر با هدف تدوین یک مدل ریاضی جامع برای بهینه‌سازی همزمان استراتژی نگهداری و تعمیرات و تخصیص منابع در مزارع بادی انجام شده است. در این مدل، هزینه جریمه کمبود منابع در تابع هدف لحاظ می‌شود تا تصمیمات بهینه در شرایط محدودیت منابع اتخاذ گردد. مدل پیشنهادی سه دسته هزینه را دنبال می‌کند: ۱- هزینه تخصیص منابع به مزارع بادی، ۲- هزینه عملیات نگهداری و تعمیرات (شامل تعویض‌های پیشگیرانه و اصلاحی)، و ۳- هزینه جریمه کمبود منابع.

² Nondeterministic Polynomial-time hard (NP-hard)

¹ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

تبیین شده و جایگاه پژوهش حاضر در میان مطالعات پیشین مشخص می‌شود.

۲-۱- نگهداری و تعمیرات در مزارع بادی

توربین‌های بادی به دلیل استقرار در محیط‌های سخت و بعضاً دور از دسترس (به ویژه در مزارع فراساحلی)، همواره در معرض خرابی‌های متعدد هستند. به طور کلی، در مطالعات پیشین (Ding et al., 2013؛ Zhao et al., 2018) نشان داده شده است که خرابی توربین‌های بادی می‌تواند به دلایل شرایط محیطی (بادهای شدید، تغییرات ناگهانی دما، رطوبت، شوری آب)، فرسایش مکانیکی (خستگی قطعات متحرک، سایش یاتاقان‌ها و گیربکس‌ها) و عدم نگهداری به موقع رخ دهد.

در ادبیات موضوع، استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات معمولاً به چهار دسته تقسیم می‌شوند. در پژوهش ژائو و همکاران (Zhao et al., 2018) تعریف شده است که نگهداری واکنشی (اصلاحی) به تعمیرات پس از وقوع خرابی گفته می‌شود. این روش ساده‌ترین اما پرهزینه‌ترین رویکرد است زیرا ممکن است منجر به توقف طولانی مدت توربین شود. در مطالعه‌ای انجام‌شده (Carlos et al., 2013) بیان شده است که نگهداری پیشگیرانه شامل تعمیرات در فواصل زمانی از پیش تعیین شده، صرف نظر از وضعیت واقعی قطعه است. این روش می‌تواند از خرابی‌های ناگهانی جلوگیری کند اما ممکن است منجر به تعویض زود هنگام قطعات سالم شود. در پژوهش ژائو و همکاران (Zhao et al., 2018) به نگهداری مبتنی بر وضعیت اشاره شده است که در آن پایش مداوم وضعیت توربین با استفاده از حسگرها و داده‌های سامانه نظارت، کنترل و جمع‌آوری داده‌ها^۱ انجام شده و تعمیرات تنها در صورت تشخیص ناهنجاری صورت می‌پذیرد. همچنین، در مطالعه دیگری (Atashgar & Abdollahzadeh, 2016) نگهداری فرصت‌طلبانه تعریف شده است که در آن چندین عملیات نگهداری به صورت همزمان در یک فرصت (مثلاً زمانی که تیم تعمیرات برای یک خرابی در محل حاضر است) انجام می‌شود تا هزینه دسترسی و توقف‌های مکرر کاهش یابد. در پژوهش حاضر، استراتژی نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر تعویض دوره‌ای مؤلفه‌ها در نظر گرفته شده است. دلیل

انتخاب این استراتژی، سادگی اجرا، قابلیت برنامه‌ریزی بلندمدت و وجود داده‌های کافی برای تخمین نرخ خرابی است.

اگر چه روش‌های مبتنی بر پایش وضعیت در سال‌های اخیر در توربین‌های بادی مدرن رو به گسترش هستند، اما اجرای این روش‌ها نیازمند زیرساخت‌های حسگری، تحلیل داده‌های بلادرنگ و سرمایه‌گذاری قابل‌توجه است که در بسیاری از مزارع بادی در دسترس نیست. از سوی دیگر، نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر زمان، به دلیل سادگی اجرا، قابلیت برنامه‌ریزی بلندمدت و عدم نیاز به داده‌های لحظه‌ای، همچنان به عنوان یک رویکرد پایه و عملی در صنعت بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zhang & Yang, 2021). همچنین، نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان مرجعی برای مقایسه با روش‌های پیشرفته‌تر (مانند CBM) مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۲- نرخ خرابی و ایبل در توربین‌های بادی

یکی از رایج‌ترین توزیع‌ها برای مدل‌سازی نرخ خرابی قطعات مکانیکی، توزیع وایبل است (Atashgar & Abdollahzadeh, 2016). تابع نرخ خرابی وایبل به صورت $h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$ تعریف می‌شود که در آن، β پارامتر شکل و η پارامتر مقیاس توزیع است. در یک پژوهش قبلی (Zhang & Yang, 2021) توضیح داده شده است که مقادیر مختلف β نشان‌دهنده رفتارهای متفاوت خرابی می‌باشد: اگر $\beta < 1$ باشد، نرخ خرابی نزولی (شکست زود هنگام)؛ اگر $\beta = 1$ باشد، نرخ خرابی ثابت (خرابی تصادفی)؛ و اگر $\beta > 1$ باشد، نرخ خرابی صعودی (فرسایش و پیری) خواهد بود. در توربین‌های بادی، مؤلفه‌های مکانیکی مانند روتور، بورینگ، گیربکس و ژنراتور معمولاً دارای $\beta > 1$ هستند که نشان‌دهنده افزایش نرخ خرابی با گذشت زمان است.

لازم به ذکر است که پارامترهای نرخ خرابی مورد استفاده در این مقاله (جدول ۳)، مستقیماً از پژوهش ژانگ و یانگ (Zhang & Yang, 2021) اقتباس شده است که در آن نیز از توزیع وایبل برای مدل‌سازی نرخ خرابی مؤلفه‌های توربین بادی استفاده شده است.

^۱ Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)

۲-۳- تخصیص منابع در نگهداری و تعمیرات

در یکی از پژوهش‌های انجام شده قبلی (Allal et al., 2021؛ Schrottenboer et al., 2018) منابع مورد نیاز برای انجام عملیات نت در مزارع بادی به دو دسته کلی تقسیم شده است: منابع انسانی (تکنسین‌های متخصص با مهارت‌های مختلف) و منابع مصرفی و تجهیزاتی (ابزارآلات تخصصی، تجهیزات حمل‌ونقل و تجهیزات بالابر). در مطالعات پیشین (Besnard et al., 2012؛ Dai et al., 2015؛ Stålhane et al., 2015) نشان داده شده است که در مزارع بادی فراساحلی، هزینه دسترسی به توربین‌ها بسیار بالاست و محدودیت منابع (به ویژه کشتی‌های خدماتی و تکنسین‌های متخصص) یک چالش جدی محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، چهار دسته منبع در نظر گرفته شده است: ابزارآلات، تکنسین‌ها، تجهیزات حمل‌ونقل و تجهیزات بالابر. همچنین امکان اشتراک منابع بین مزارع بادی مختلف (فاکتور اشتراک) در مدل لحاظ شده است.

۲-۴- مدل‌های بهینه‌سازی همزمان در مزارع بادی

تعداد محدودی از مطالعات به بهینه‌سازی همزمان استراتژی نت و تخصیص منابع پرداخته‌اند که در ادامه به مهمترین آنها اشاره می‌شود.

در مطالعه‌ای (Froger et al., 2018) طرح نگهداری و تعمیرات با هدف حداکثرسازی درآمد حاصل از تولید برق با در نظر گرفتن محدودیت تکنسین‌ها ارائه شده و یک رویکرد جستجوی محله بزرگ مبتنی بر برنامه‌نویسی محدودیت برای حل آن پیشنهاد گردیده است.

در مقاله‌ای انجام‌شده (Schrottenboer et al., 2018) مسئله تخصیص و مسیریابی تکنسین برای مزارع بادی فراساحلی معرفی شده که هدف آن بهینه‌سازی مشترک تخصیص روزانه تکنسین‌ها به پایگاه‌های نگهداری و مسیرهای روزانه کشتی‌ها بوده است.

در پژوهش دیگری (Allal et al., 2021) رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با الگوریتم کلونی مورچگان برای مسیریابی و برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات در مزارع بادی فراساحلی پیشنهاد شده و پارامترهایی مانند شرایط

آب و هوایی، هزینه منابع و مدت زمان نگهداری در آن در نظر گرفته شده است.

در مطالعه‌ای (Atashgar & Abdollahzadeh, 2016) مدل بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات فرصت‌طلبانه، افزودنی و بلوکی ناقص به صورت همزمان ارائه شده و هدف آن تعیین سطح افزودنی مزرعه بادی و استراتژی نگهداری به گونه‌ای بوده که به طور همزمان از دست دادن احتمال بار و هزینه چرخه عمر را حداقل نماید.

در پژوهش ژانگ و یانگ (Zhang & Yang, 2021) برنامه‌ریزی نت و تخصیص منابع در مزارع بادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک دوهدفه بهینه‌سازی شده است، هر چند در آن مطالعه استراتژی نت به صورت ثابت فرض شده و فقط تخصیص منابع بهینه گردیده است.

پژوهش‌های اخیر نیز با تأکید بر بهینه‌سازی همزمان نگهداری و تخصیص منابع، گام‌های مؤثری در این حوزه برداشته‌اند. در مطالعه‌ای (Xiang et al., 2024) با ارائه یک استراتژی نگهداری فرصت‌طلبانه گروهی ترکیبی برای توربین‌های بادی فراساحلی، تأثیر تخصیص منابع در محیط‌های عملیاتی سخت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، در مطالعه دیگری (Ji et al., 2025) با توسعه یک روش بهینه‌سازی دومرحله‌ای، به مسئله نگهداری اصلاحی در مزارع بادی فراساحلی با در نظر گرفتن محدودیت‌های ناوگان پرداخته شده است. از سوی دیگر، در پژوهشی (Li et al., 2026) با به‌کارگیری الگوریتم NSGA-II در یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، به بررسی همزمان عوامل متعدد مؤثر بر نگهداری فرصت‌طلبانه پرداخته‌اند. اگرچه این پژوهش‌ها گام‌های مهمی در جهت یکپارچه‌سازی تصمیمات نگهداری و منابع برداشته‌اند، اما همچنان به موضوعاتی نظیر هزینه جریمه کمبود منابع و مقایسه تعویض انفرادی و گروهی در یک مدل یکپارچه با افق بلندمدت کمتر توجه شده است.

در پژوهشی (Moakedi et al., 2026) با بهره‌گیری از تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر روش فوکام، استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به عنوان برترین استراتژی نت از میان هفت گزینه انتخاب شده است. همچنین، در مقاله‌ای (Salehian & Jahan, 2022) با استقرار روش‌شناسی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت‌اطمینان در سیستم تقلیل فشار گاز، کارایی رویکرد نت پیشگیرانه در حوزه انرژی به‌طور عملی نشان داده

شده است. در پژوهش حاضر با الگوبری از مطالعات مذکور، این استراتژی برای کاربرد در مزارع بادی با رویکرد بهینه‌سازی همزمان نت و تخصیص منابع توسعه داده شده است.

۲-۵- جمع‌بندی و نوآوری پژوهش

با بررسی جامع مقالات مرتبط با پژوهش حاضر، شکاف‌های زیر در تحقیقات گذشته شناسایی می‌شود:

۱- یکپارچگی ناکافی استراتژی نت و تخصیص منابع: در اکثر مقالات گذشته، استراتژی نگهداری و تعمیرات به صورت ثابت و از پیش تعیین شده در نظر گرفته شده و تنها تخصیص منابع بهینه شده است (Schrotenboer et al., 2018; Allal et al., 2021; Zhang & Yang, 2021)، در حالی که بهینه‌سازی همزمان این دو می‌تواند به کاهش چشمگیر هزینه‌ها منجر شود.

۲- کم‌توجهی به هزینه جریمه کمبود منابع: اگرچه نقش محدودیت منابع در عملیات نت غیرقابل انکار است، مرور منابع نشان می‌دهد که تنها شماری اندک از تحقیقات، هزینه ناشی از کمبود منابع را به صورت صریح مدل کرده‌اند. در بسیاری از مطالعات انجام شده (Dai et al., 2015; Besnard et al., 2012; Stålhane et al., 2015; Froger et al., 2018; Schrotenboer et al., 2018) فرض شده است که منابع به میزان کافی در دسترس هستند یا هزینه کمبود در نظر گرفته نشده است.

۳- عدم مقایسه تعویض انفرادی و گروهی: در حالی که در عمل ممکن است به دلایل عملیاتی (مانند محدودیت دسترسی)، تعویض همزمان چند مؤلفه (تعویض گروهی) ضروری باشد، مطالعات کمی به مقایسه این دو استراتژی از نظر هزینه کل پرداخته‌اند. بیشتر پژوهش‌های موجود تنها بر روی تعویض پیشگیرانه یا اصلاحی به صورت مجزا تمرکز کرده‌اند (Atashgar & Abdollahzadeh, 2016; Zhao et al., 2018; Erguido et al., 2017).

۴- افق برنامه‌ریزی بلندمدت و اثر تورم: بیشتر مطالعات موجود، افق برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت (روزانه، هفتگی یا ماهانه) را در نظر گرفته‌اند و همانطور که در برخی پژوهش‌های انجام شده قبلی

(Ding et al., 2013; Balasubramanian et al., 2020) نیز اشاره شده است، بهینه‌سازی بلندمدت (متناسب با طول چرخه عمر متداول مزرعه بادی) کمتر دیده می‌شود. از طرف دیگر، اثر تورم بر هزینه‌های آتی در پژوهش‌های پیشین در حوزه نگهداری و تعمیرات مزارع بادی (Zhang & Yang, 2021) لحاظ نشده است. این در حالی است که با توجه به افق بلندمدت برنامه‌ریزی (۲۰ سال)، تورم می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر هزینه‌های نگهداری و تعمیرات داشته باشد و برنامه بهینه تعویض را تحت تأثیر قرار دهد. لذا در پژوهش حاضر، اثر تورم بر هزینه‌ها در یک افق بلندمدت مدل‌سازی شده است.

با توجه به شکاف‌های شناسایی شده، پژوهش حاضر به بهینه‌سازی همزمان استراتژی نت و تخصیص منابع در مزارع بادی با در نظر گرفتن هزینه جریمه کمبود منابع می‌پردازد. نوآوری‌های پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین به شرح زیر است:

- ۱) بهینه‌سازی همزمان استراتژی تعویض پیشگیرانه و تخصیص منابع در یک مدل یکپارچه.
- ۲) مدل‌سازی هزینه جریمه برای کمبود منابع (ابزارآلات، تکنسین، تجهیزات حمل‌ونقل و بالابر).
- ۳) مقایسه تعویض انفرادی و گروهی مؤلفه‌ها تحت سناریوهای مختلف محدودیت منابع.
- ۴) افق برنامه‌ریزی بلندمدت متناسب با چرخه عمر متداول مزارع بادی (۲۰ سال معادل ۲۴۰ ماه).

۳- روش پژوهش

در این بخش، مدل ریاضی بهینه‌سازی همزمان استراتژی نگهداری و تعمیرات و تخصیص منابع در مزارع بادی ارائه می‌شود. ابتدا مسئله به زبان ساده تعریف شده و مفروضات آن بیان می‌گردد. سپس، مدل ریاضی پیشنهادی شامل نمادها، تابع هدف و محدودیت‌ها معرفی می‌شود. در ادامه، روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک تشریح می‌گردد.

۳-۱- تعریف مساله

سه مزرعه بادی با نام‌های A، B و C در نظر گرفته می‌شود که هر سه از یک سیستم نگهداری و تعمیرات مشترک خدمات می‌گیرند. در این پژوهش، استراتژی نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر تعویض دوره‌ای مؤلفه‌ها در نظر گرفته

نگهداری و تعمیرات وجود دارد که برای انجام هرکدام از آنها به میزانی منابع از هر ۴ نوع منابع، لازم است. (۱۰) منابع مورد نیاز برای انجام عملیات نگهداری و تعمیرات را می‌توان به صورت اشتراکی در چند مزرعه بادی استفاده کرد (فاکتور اشتراک منابع).

(۱۱) هدف مدل‌سازی و بهینه‌سازی همزمان استراتژی تعویض پیشگیرانه و تخصیص منابع است، به صورتی که متوسط مجموع هزینه نت و تخصیص منابع در طول چرخه عمر مزارع بادی کمینه شود.

(۱۲) با توجه به افق بلندمدت برنامه‌ریزی (۲۰ سال معادل ۲۴۰ ماه) و همچنین اینکه در پژوهش‌های پیشین در حوزه نگهداری و تعمیرات مزارع بادی (Zhang & Yang, 2021; Allal et al., 2021; Schrottenboer et al., 2018)، اثر تورم بر هزینه‌های آتی لحاظ نشده است، در پژوهش حاضر نرخ تورم در محاسبات وارد شده است.

(۱۳) از مدت زمان انجام هر عملیات نگهداری و تعمیرات صرف‌نظر شده است، زیرا تمرکز اصلی بر روی تعداد و نوع تعویض‌ها و میزان منابع مصرف‌شده است. منابع مصرفی بر اساس تعداد عملیات نت و نیاز منبعی هر عملیات محاسبه می‌شوند و کمبود منابع از طریق مقایسه منابع مصرف‌شده با منابع در دسترس در هر ماه تعیین می‌گردد.

۳-۲- مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش، مدل ریاضی مسئله شامل نمادهای مورد نیاز، تابع هدف و محدودیت‌ها ارائه می‌شود.

۳-۲-۱- نمادهای مورد نیاز

اندیس‌ها

k	اندیس مزارع بادی، $k = A, B, C$
l	اندیس مولفه‌های توربین بادی $l = 1, 2, 3, 4$ به ترتیب بیانگر روتور، بورینگ، گیربکس و ژنراتور است.
i	اندیس عملیات نگهداری و تعمیرات (نت) $i = 1, 2, 3, 4$ به ترتیب بیانگر تعداد تعویض پیشگیرانه روتور، بورینگ، گیربکس و ژنراتور و $i = 5, 6, 7, 8$ بیانگر تعداد تعویض اصلاحی روتور،

شده است. بر اساس این سیاست، هر مؤلفه در فواصل زمانی مشخص، به صورت پیشگیرانه تعویض می‌شود. تعداد تعویض‌های پیشگیرانه توسط مدل بهینه‌سازی تعیین می‌شود؛ به گونه‌ای که مجموع هزینه‌های پیشگیرانه، اصلاحی، تخصیص منابع و جریمه کمبود منابع کمینه شود. در صورت وقوع خرابی در بازه زمانی بین دو تعویض پیشگیرانه‌ی متوالی، تعویض اصلاحی برای مؤلفه مربوطه انجام می‌گیرد. این رویکرد، علی‌رغم سادگی اجرا، امکان برنامه‌ریزی بلندمدت و بهینه‌سازی همزمان هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را فراهم می‌آورد. اگر چه روش‌های مبتنی بر پایش وضعیت در سال‌های اخیر رو به گسترش هستند، اما سیاست تعویض پیشگیرانه دوره‌ای به دلیل سادگی اجرا، قابلیت برنامه‌ریزی بلندمدت و عدم نیاز به داده‌های لحظه‌ای، به عنوان یک رویکرد پایه و عملی در این پژوهش انتخاب شده است.

سایر مفروضات مسئله به شرح زیر است:

- (۱) مزرعه A دارای ۲۰ توربین، مزرعه B دارای ۲۰ توربین و مزرعه C دارای ۴۰ توربین بادی است.
- (۲) هر توربین بادی دارای چهار مؤلفه اصلی به نام‌های روتور، بورینگ، گیربکس و ژنراتور است.
- (۳) هر مؤلفه دارای تابع نرخ خرابی وایبل است.
- (۴) دوره برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات با توجه به چرخه عمر متداول مزارع بادی، ۲۰ سال معادل ۲۴۰ ماه در نظر گرفته شده است.
- (۵) تمامی توربین‌ها از یک سازنده با مشخصات یکسان تهیه شده است.
- (۶) عملیات نگهداری و تعمیرات برای هر یک از مؤلفه‌های توربین‌ها از نوع تعویض در نظر گرفته شده است. تعویض‌ها به دو نوع تعویض اصلاحی و تعویض پیشگیرانه تقسیم می‌شوند.

- (۷) منابع مورد نیاز برای عملیات نگهداری و تعمیرات به چهار دسته ابزارآلات، تکنسین‌ها، تجهیزات حمل‌ونقل و تجهیزات بالابر تقسیم می‌شوند.
- (۸) استفاده از منابع هزینه مخصوص به خود را دارد که هزینه در هر مزرعه متفاوت با دیگری است.
- (۹) با توجه به اینکه هر توربین دارای ۴ مؤلفه اصلی است و هرکدام از آن مؤلفه‌ها دارای دو نوع عملیات تعویض هستند، به صورت کلی ۸ نوع عملیات

زمان	بورینگ، گیربکس و ژنراتور است.
NV_{kj} متوسط تعداد منبع تخصیص داده شده‌ی j ام به	j اندیس منابع نگهداری و تعمیرات (نت)
مزرعه k ام در طی افق برنامه ریزی T در هر واحد زمان	$j = 1, 2, 3, 4$ به ترتیب بیانگر ابزارها، تکنسین‌ها، تجهیزات حمل و نقل و تجهیزات بالابر است.
L_j متوسط میزان منبع مصرف شده j ام در هر واحد زمان	$t = 1, 2, \dots, T$ اندیس دوره‌های زمانی (ماه‌ها)،
S_j متوسط میزان کمبود منبع j ام در هر واحد زمان	که در آن T طول افق برنامه‌ریزی است.

پارامترها

T طول افق برنامه‌ریزی که منطبق با چرخه عمر متداول مزارع بادی (۲۰ سال معادل ۲۴۰ ماه) است.	T
V_j تعداد منبع در دسترس j ام در هر واحد زمان (ماه)	V_j
m_k تعداد توربین های مزرعه k ام	m_k
Y_{kj} فاکتور اشتراک منبع j ام در مزرعه k ام (نشان‌دهنده سهم مزرعه k از منبع j در حالت استفاده اشتراکی بین مزارع)	Y_{kj}
PV_{ij} تعداد منبع مورد نیاز j ام برای انجام عملیات i ام	PV_{ij}
$h_l(t)$ تابع نرخ خرابی مولفه l ام	$h_l(t)$
β_l پارامتر شکل تابع نرخ خرابی مولفه l ام	β_l
η_l پارامتر مقیاس تابع نرخ خرابی مولفه l ام	η_l
Cp_l هزینه هر تعویض پیشگیرانه مولفه l ام	Cp_l
Cf_l هزینه هر تعویض اصلاحی مولفه l ام	Cf_l
Cr_{kj} هزینه استفاده از هر واحد منبع j ام در مزرعه k ام	Cr_{kj}
P_j هزینه جریمه کمبود منبع j ام به ازای هر واحد زمان	P_j
f نرخ تورم در هر واحد زمان (نرخ تورم ماهانه)	f
τ_{min} حداقل فاصله زمانی ممکن بین دو تعویض پیشگیرانه متوالی برای هر مولفه	τ_{min}

متغیر تصمیم‌گیری

N_l تعداد تعویض پیشگیرانه مولفه l ام در طول افق برنامه‌ریزی T	N_l
---	-------

متغیرهای کمکی

$E[C_T]$ متوسط هزینه کل مزارع بادی در طول افق برنامه‌ریزی T	$E[C_T]$
NP_{ki} متوسط تعداد عملیات مورد نیاز i ام برای مزرعه k ام در طی افق برنامه ریزی T در هر واحد	NP_{ki}

۳-۲-۲- تابع هدف و محدودیت‌ها

مدل ریاضی پیشنهادی در قالب روابط (۱) تا (۷) ارائه شده است:

$$\min E[C_T] = \quad (1)$$

$$\sum_{t=1}^T \left[\sum_j \sum_k NV_{kj} \times Cr_{kj} \right] \times (1+f)^t + \sum_{t=1}^T \left[\sum_k \sum_l \frac{m_k}{T} \times \left(\frac{N_l \times Cp_l}{N_l} + \left(N_l \times H_l \left(\frac{T}{N_l} \right) \times Cf_l \right) \right) \right] \times (1+f)^t$$

$$+ \sum_{t=1}^T \left[\sum_j S_j \times P_j \right] \times (1+f)^t$$

$$H_l(t) = \int_0^t h_l(t) dt = \int_0^t \frac{\beta_l}{\eta_l} \left(\frac{t}{\eta_l} \right)^{\beta_l-1} dt \quad (2)$$

$$NP_{ki} = \begin{cases} \frac{m_k \times N_i}{T}, & \forall k \& i = 1, 2, 3, 4 \\ \frac{m_k \times N_{i-4} \times H\left(\frac{T}{N_{i-4}}\right)}{T}, & \forall k \& i = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (3)$$

$$NV_{kj} = Y_{kj} \times \sum_i NP_{ki} \times PV_{ij}, \quad \forall k, j \quad (4)$$

$$L_j = \sum_k NV_{kj}, \quad \forall j \quad (5)$$

$$S_j = \max(L_j - V_j, 0), \quad \forall j \quad (6)$$

$$1 \leq N_l \leq \frac{T}{\tau_{min}}, \quad \forall l \quad (7)$$

رابطه (۱)، تابع هدف مساله را نمایش می‌دهد که متوسط هزینه کل مزارع بادی در طول افق برنامه‌ریزی T (یعنی $E[C_T]$) را کمینه می‌کند. در این رابطه، جمله اول،

ثابت در تابع هدف ظاهر می‌شود و بر برنامه‌ی بهینه‌ی تعویض پیشگیرانه (N_l^*) تأثیری ندارد ولی بر مقدار مطلق هزینه‌ها تأثیرگذار است. این موضوع نشان می‌دهد که لحاظ کردن تورم در مدل، واقع‌گرایی هزینه‌ها را افزایش می‌دهد، اما ساختار برنامه بهینه تعویض را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

۳-۳- روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

با توجه به ماهیت ترکیبیاتی مسئله که شامل متغیرهای تصمیم‌گیری گسسته (تعداد تعویض‌های پیشگیرانه) و یک تابع هدف غیرخطی (شامل انتگرال نرخ خرابی وایل) است، این مسئله در زمره مسائل NP-hard قرار می‌گیرد (Zhang & Yang, 2021). پیچیدگی محاسباتی چنین مسائلی به‌گونه‌ای است که با افزایش ابعاد (افزایش تعداد توربین‌ها، مؤلفه‌ها و دوره‌های زمانی)، روش‌های دقیق عملاً قادر به یافتن جواب بهینه در زمان معقول نخواهند بود. به همین دلیل، در این بخش، یک روش کارا بر اساس الگوریتم ژنتیک معرفی می‌شود تا به وسیله آن بتوان به جواب بهینه (یعنی N_l) دست یافت. لازم به ذکر است که الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یکی از روش‌های کارآمد فراابتکاری، در مسائل بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی نیز کاربرد گسترده‌ای یافته است. به عنوان مثال، در پژوهشی (Ganji & Karbasian, 2026) از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی قابلیت دسترسی با افزونگی مختلط در سیستم توزیع انرژی استفاده شده است.

در ادامه، رویه‌ی کلی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به صورت گام‌های زیر تشریح می‌شود:

- (۱) ساخت جمعیت اولیه (والدین) به‌اندازه‌ی n_{pop}
- (۲) محاسبه‌ی متوسط هزینه کل ($E[C_T]$) برای تک والدین با استفاده از رابطه (۱).
- (۳) انتخاب $P_{Crossover} = 80\%$ از والدین بامکانیزم چرخه رولت و جفت کردن دوبه‌دوی آنها به منظور ایجاد فرزندان به وسیله‌ی عملگر ترکیب^۱ (تعیین میزان ترکیب بر اساس روش تاگوچی، برابر با ۰/۸ انتخاب گردید).

- (۴) انتخاب $P_{mutation} = 20\%$ از والدین به صورت تصادفی به منظور ایجاد فرزندان به وسیله‌ی عملگر

نمایانگر متوسط هزینه‌ی کل منابع تخصیص داده شده به مزارع بادی است. جمله دوم نشان‌دهنده متوسط هزینه‌ی کل نت (پیشگیرانه و اصلاحی) توربین‌های موجود در مزارع بادی مختلف است و جمله سوم نشان‌دهنده هزینه جریمه کمبود منابع است. هدف مدل، یافتن تعداد تعویض پیشگیرانه بهینه برای هر یک از مؤلفه‌های توربین بادی (یعنی N_l^*) در طول افق برنامه‌ریزی T است، بگونه‌ای که متوسط هزینه کل مزارع بادی کمینه گردد.

در رابطه (۲)، متوسط تعداد تعویض‌های اصلاحی یا متوسط تعداد خرابی‌های مؤلفه‌ی l ام در بازه‌ی $[0, t]$ محاسبه می‌شود. از طریق رابطه‌ی (۳)، متوسط تعداد عملیات نگهداری و تعمیرات مورد نیاز i ام در مزرعه بادی k ام به دست می‌آید. تعداد منبع تخصیص داده شده z ام به مزرعه k ام در رابطه‌ی (۴) محاسبه شده و متعاقباً در رابطه (۵)، تعداد منبع مورد نیاز نوع z ام حاصل می‌شود. نهایتاً اختلاف تعداد منبع z ام در دسترس از تعداد منبع z ام مورد نیاز در رابطه (۶) مشخص می‌گردد که این اختلاف بیانگر میزان کمبود منبع z ام است. رابطه (۷) نیز بیانگر حدود تعداد تعویض پیشگیرانه برای هر یک از مؤلفه‌های توربین بادی است.

۳-۲-۳- تحلیل اثر تورم

با توجه به اینکه نرخ تورم (f) در طول زمان ثابت فرض شده است، تابع هدف (۱) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\min E[C_T] = A \times \sum_{t=1}^T (1+f)^t \quad (8)$$

که در آن:

$$A = \sum_j \sum_k NV_{kj} \times Cr_{kj} + \sum_k \sum_l \frac{m_k}{T} \times \left(\frac{N_l \times Cp_l}{(N_l \times H_l \times (\frac{T}{N_l}) \times Cf_l)} \right) + \sum_j S_j \times P_j \quad (9)$$

از آنجا که A مستقل از t است و همچنین برای یک نرخ تورم مشخص، $\sum_{t=1}^T (1+f)^t$ عددی ثابت است، بهینه‌سازی تابع هدف $E[C_T]$ معادل با بهینه‌سازی A خواهد بود. به عبارت دیگر، نرخ تورم به‌عنوان یک ضریب

^۱ Crossover

هزینه کل کمتری دارند، برازندگی بیشتری داشته و شانس بیشتری برای انتخاب در نسل‌های بعدی خواهند داشت.

۳	۵	۱۰	۲۰
---	---	----	----

شکل ۱. کدگذاری برنامه تعویض پیشگیرانه.

Figure 1. Coding of preventive replacement schedule.

۳-۳-۳- عملگر ترکیب

در فرآیند ترکیب، یک جفت کروموزوم از والدین انتخاب و با هم ترکیب می‌شوند تا یک جفت کروموزوم جدید خلق شود. در این مقاله، ابتدا یک جفت کروموزوم با مکانیزم چرخ رولت برای فرآیند ترکیب انتخاب می‌شوند. در این مکانیزم انتخاب، هر چه میزان برازندگی یک کروموزوم بیشتر باشد، احتمال انتخاب شدن آن بیشتر است. سپس، از عملگر ترکیب یک نقطه‌ای به منظور ایجاد یک جفت کروموزوم جدید استفاده می‌شود. در ترکیب یک نقطه‌ای، ابتدا یک نقطه ثابت به صورت تصادفی در طول جفت کروموزوم والد انتخاب شده و سپس سمت راست کروموزوم والد اول با سمت چپ کروموزوم والد دوم ترکیب می‌شود تا فرزند اول ایجاد شود. فرزند دوم از ترکیب سمت چپ کروموزوم والد اول با سمت راست کروموزوم والد دوم ایجاد می‌گردد.

۳-۳-۴- عملگر جهش

جهش به منظور موفقیت الگوریتم ژنتیک حیاتی است زیرا از غیر افتادن در نقاط بهینه محلی جلوگیری کرده و جهت جستجو را مشخص می‌کند. به عبارت دیگر، جهش باعث می‌شود نقاط بیشتری از فضای حل جستجو شود و امکان دستیابی به جواب‌های بهتر، بیشتر شود. در این مقاله، ابتدا یک کروموزوم به صورت تصادفی از والدین انتخاب، سپس یک ژن به صورت تصادفی از این کروموزوم، انتخاب می‌گردد و اعمال عملگر جهش با تغییر مقدار این ژن از یک به صفر و بالعکس صورت می‌گردد.

۳-۳-۵- معیار توقف

در الگوریتم ارائه شده، معیار توقف در نظر گرفته شده برای اجرای الگوریتم، تعداد تکرار^۲ (یا تعداد جمعیت یا تعداد

جهش^۱ (تعیین میزان جهش بر اساس روش تاگوچی، برابر با ۰/۲ انتخاب گردید).

۵) محاسبه‌ی متوسط هزینه کل ($E[C_T]$) برای تک تک فرزندان با استفاده از رابطه (۱).

۶) مرتب کردن کروموزوم‌های موجود در جمعیت (والدین و فرزندان) به ترتیب صعودی مقادیر متوسط هزینه کل و سپس انتخاب n_{pop} کروموزوم اول از لیست مرتب شده به عنوان والدین جمعیت بعدی.

۷) تکرار گام‌های ۳ تا ۶ تا برقراری معیار توقف. در ادامه برخی از مفاهیم الگوریتم، جهت وضوح بیشتر توضیح داده می‌شود.

۳-۳-۱- کدگذاری

یکی از موارد مهم در الگوریتم ژنتیک، طراحی سیستم کدگذاری برای تعیین شیوه نمایش جواب مساله و تاثیر متقابل این کدگذاری بر عملگرهای جهش و ترکیب است. کروموزوم مدل دارای ۴ ژن است. هر ژن بیان‌کننده‌ی تعداد تعویض پیشگیرانه لازم برای هر مولفه از توربین است. شیوه تولید کروموزوم‌ها به این صورت است که هر ژن، مقداری تصادفی بین ۱ تا ۲۴۰ می‌گیرد. با این فرض که چرخه عمر مزارع بادی ۲۰ سال معادل ۲۴۰ ماه و همچنین حداقل فاصله زمانی بین دو تعویض پیشگیرانه متوالی، یک ماه است. هر مولفه از هر توربین یا حداقل یک بار تعویض پیشگیرانه می‌شود یا حداکثر ۲۴۰ بار. به عنوان مثال، کروموزوم نشان داده شده در شکل ۱ به این معنی است که تعداد تعویض پیشگیرانه روتور ۳ بار، بورینگ ۵ بار، گیربکس ۱۰ بار و ژنراتور ۲۰ بار است. بر اساس این کدگذاری، هر کروموزوم نمایانگر یک برنامه تعویض پیشگیرانه برای تمام مؤلفه‌های توربین در طول چرخه عمر مزارع بادی است و الگوریتم ژنتیک با جستجو در فضای گسسته‌ی این کروموزوم‌ها، به دنبال یافتن برنامه بهینه با کمترین هزینه کل است.

۳-۳-۲- برازندگی

به منظور مشخص کردن میزان برازندگی (میزان مطلوبیت) هر کروموزوم (هر برنامه تعویض پیشگیرانه)، از مقدار تابع هدف (یعنی $E[C_T]$) که در رابطه (۱) تعریف شده است، استفاده می‌شود. کروموزوم‌هایی که مقدار

^۲ Iteration

^۱ Mutation

بر اساس تحلیل میانگین اثرات (جدول ۲)، ترکیب بهینه پارامترها به صورت $n_{pop} = 100$ ، $P_{Crossover} = 0.8$ و $P_{mutation} = 0.2$ و $N_{iteration} = 1000$ انتخاب شده و در تمامی اجراهای الگوریتم به کار گرفته می‌شوند.

جدول ۲. میانگین اثرات سطوح پارامترهای الگوریتم ژنتیک بر اساس معیار SNR

Table 2. Main effects of genetic algorithm parameter levels based on SNR criterion

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	بهترین سطح
تعداد جمعیت اولیه (n_{pop})	۱۲/۸۳	۱۳/۳۳	۱۲/۹۸	سطح ۲ (۱۰۰)
احتمال ترکیب ($P_{Crossover}$)	۱۲/۹۷	۱۳/۱۶	۱۳/۰۱	سطح ۲ (۰/۸)
احتمال جهش ($P_{mutation}$)	۱۳/۰۳	۱۳/۱۵	۱۲/۹۵	سطح ۲ (۰/۲)
تعداد تکرار ($N_{iteration}$)	۱۲/۷۶	۱۳/۱۷	۱۳/۲۱	سطح ۳ (۱۰۰۰)

۴- یافته‌های پژوهش

۴-۱ بیان مسئله

داده‌های این مساله از پژوهش ژانگ و یانگ (Zhang & Yang, 2021) گرفته شده است. سه مزرعه بادی با نام‌های A، B و C را در نظر بگیرید که به ترتیب دارای ۲۰، ۴۰ و ۲۰ توربین بادی هستند. تمامی توربین‌ها از یک سازنده با مشخصات یکسان تهیه شده‌اند. هر توربین دارای چهار مؤلفه اصلی به نام‌های روتور، بورینگ، گیربکس و ژنراتور است. پارامترهای نرخ خرابی هر مؤلفه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. پارامترهای نرخ خرابی مؤلفه‌های توربین

Table 3. Failure rate parameters of wind turbine components

مؤلفه	β_i	η_i (بر حسب ماه)
روتور	۳	۱۰۰
بورینگ	۲	۱۲۵
گیربکس	۳	۸۰
ژنراتور	۲	۱۱۰

هر مؤلفه شامل دو نوع تعویض است: تعویض به دلیل خرابی (تعویض اصلاحی) و تعویض پیشگیرانه. هزینه

نسل تولید شده) است که با $N_{iteration}$ نمایش داده می‌شود.

۳-۳-۶ تنظیم پارامترها

عملکرد الگوریتم ژنتیک به مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده مانند تعداد جمعیت اولیه (n_{pop})، احتمال ترکیب ($P_{Crossover}$)، احتمال جهش ($P_{mutation}$) و تعداد تکرار ($N_{iteration}$) وابسته است. انتخاب نامناسب این پارامترها ممکن است منجر به همگرایی زودرس یا عدم دستیابی به جواب بهینه شود.

از آنجایی که روش تاگوچی به عنوان یکی از روش‌های کارآمد برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری، در پژوهش‌های مختلف از جمله بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی مورد استفاده قرار گرفته است (Ganji & Karbasian, 2026)، در این پژوهش نیز از این روش برای تنظیم همزمان پارامترهای الگوریتم استفاده شده است. به این منظور، برای هر یک از این پارامترها، سه سطح مختلف در نظر گرفته شده است (جدول ۱). با توجه به چهار پارامتر و سه سطح برای هر پارامتر، از آرایه متعامد L9 استفاده می‌شود که ۹ ترکیب مختلف از پارامترها را پوشش می‌دهد.

جدول ۱. سطوح پارامترهای الگوریتم ژنتیک

Table 1. Levels of genetic algorithm parameters

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
تعداد جمعیت اولیه (n_{pop})	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
احتمال ترکیب ($P_{Crossover}$)	۰/۷	۰/۸	۰/۹
احتمال جهش ($P_{mutation}$)	۰/۱	۰/۲	۰/۳
تعداد تکرار ($N_{iteration}$)	۵۰۰	۷۵۰	۱۰۰۰

در این راستا، ابتدا به ازای یک ترکیب مشخص از پارامترها، الگوریتم m بار اجرا شده و مقدار تابع هدف در اجرای i ام (y_i) ثبت می‌شود. سپس، از آنجا که هدف، کمینه‌سازی هزینه کل است، معیار نسبت سیگنال به نویز (Signal-to-Noise Ratio) طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$SNR = -10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i^2 \right) \quad (8)$$

هرچه مقدار SNR بزرگتر باشد، عملکرد الگوریتم در آن ترکیب پارامتری، بهتر و پایدارتر خواهد بود.

عملیات نگهداری و تعمیرات هر مؤلفه از توربین در **جدول ۷** ارائه شده است. لازم به ذکر است که تعداد منابع مورد نیاز برای هر مؤلفه، برای هر دو نوع عملیات تعویض پیشگیرانه و تعویض اصلاحی یکسان در نظر گرفته شده است. با این فرض که طول چرخه عمر مزارع ۲۰ سال (۲۴۰ ماه) است؛ هدف مسئله، تعیین فاصله‌ی بهینه بین دو تعویض پیشگیرانه متوالی برای هر مؤلفه از توربین‌ها در مزارع بادی است، به گونه‌ای که میانگین مجموع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، تخصیص منابع و جریمه کمبود منابع در طول چرخه عمر کمینه شود. لازم به ذکر است که با هدف تمرکز بر ساختار اصلی مدل، نرخ تورم برابر با صفر در نظر گرفته شده است ($f = 0$). با این حال، مدل قابلیت لحاظ کردن نرخ‌های تورم مختلف را داشته و در صورت نیاز، کاربران می‌توانند آن را در مدل اعمال نمایند.

جدول ۷. تعداد منابع مورد نیاز برای انجام عملیات نت هر مؤلفه (PV_{ij})

Table 7. Required resources for maintenance operations per component

مؤلفه	منبع ۱ (ابزارآلات)	منبع ۲ (تکنسین)	منبع ۳ (حمل و نقل)	منبع ۴ (بالابر)
روتور	۱۰	۹	۲	۲
بورینگ	۸	۸	۲	۲
گیربکس	۱۰	۸	۲	۲
ژنراتور	۱۰	۱۰	۲	۲

۴-۲- نتایج الگوریتم پیشنهادی

شایان ذکر است که در این مرحله، مدل با فرض در دسترس بودن منابع به میزان نامحدود (منابع بینهایت) حل شده است. به عبارت دیگر، محدودیتی از نظر کمبود منابع در این بخش اعمال نشده و هدف، ارزیابی عملکرد الگوریتم در یافتن برنامه بهینه تعویض پیشگیرانه بدون اعمال محدودیت منابع است.

شایان ذکر است که به منظور کاهش اثر تصادفی بودن الگوریتم ژنتیک، مدل ۱۰ بار اجرا شده و بهترین جواب به عنوان پاسخ نهایی گزارش شده است. نتایج این ۱۰ اجرا نشان می‌دهد که در اکثر سناریوها، الگوریتم به جواب یکسان (انحراف معیار صفر) همگرا شده است و در سناریوهایی که انحراف معیار غیرصفر بوده، مقدار آن

تعویض هر مؤلفه در **جدول ۴**، هزینه استفاده از هر واحد منبع در هر مزرعه بادی در **جدول ۵** و هزینه جریمه کمبود منابع در **جدول ۶** نشان داده شده است. لازم به ذکر است که هزینه تعویض اصلاحی (Cf_l) در این مدل، صرفاً هزینه تعویض قطعه خراب نیست، بلکه به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که هزینه‌های جانبی ناشی از خرابی مانند توقف تولید، از دست رفتن درآمد، و هزینه‌های دسترسی و نصب را نیز پوشش می‌دهد.

جدول ۴. هزینه‌های تعویض مؤلفه‌های توربین

Table 4. Replacement costs of wind turbine components

مؤلفه	هزینه پیشگیرانه (Cp_l)	هزینه تعویض اصلاحی (Cf_l)
روتور	۲۰۰	۳۰۰۰
بورینگ	۱۰۰	۲۰۰۰
گیربکس	۷۰۰	۱۰۰۰
ژنراتور	۵۰۰	۴۰۰۰

جدول ۵. هزینه استفاده از هر واحد منبع در هر مزرعه بادی (Cr_{kj})

Table 5. Cost per unit of resource in each wind farm

مزرعه	منبع ۱ (ابزارآلات)	منبع ۲ (تکنسین)	منبع ۳ (حمل و نقل)	منبع ۴ (بالابر)
A	۴	۵	۹	۸
B	۱۲	۲۱	۱۴	۳
C	۱	۸	۷	۱۰

جدول ۶. هزینه جریمه کمبود منابع (P_j)

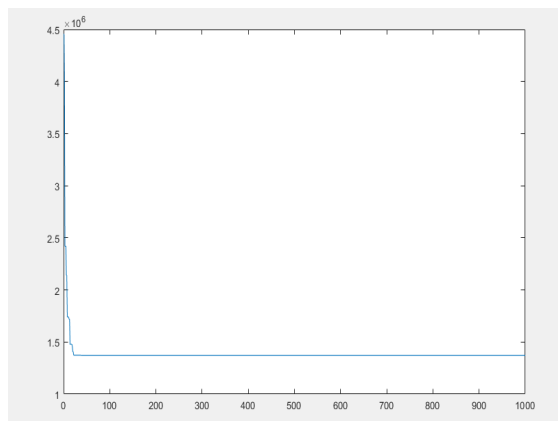
Table 6. Resource shortage penalty cost

منبع	منبع ۱ (ابزارآلات)	منبع ۲ (تکنسین)	منبع ۳ (حمل و نقل)	منبع ۴ (بالابر)
۸۰۰	۶۰۰	۴۰۰	۲۰۰	

این تفاوت قیمت، بیانگر این واقعیت است که خرابی توربین هزینه‌های بسیار بیشتری نسبت به تعویض پیشگیرانه و برنامه‌ریزی شده به همراه دارد و این رویکرد با پژوهش‌های مشابه در حوزه نگهداری و تعمیرات (Zhang & Yang, 2021; Atashgar & Abdollahzadeh, 2016) همخوانی دارد.

فاکتور اشتراک منابع برای هر سه مزرعه A، B و C به صورت $Y_{kj} = [0.25 \ 0.5 \ 1]$ برای چهار منبع در نظر گرفته شده است. تعداد منابع مورد نیاز برای انجام

با انتخاب برنامه $N_l = [7\ 6\ 4\ 6]$ ، هزینه کل را حدود ۵/۲٪ کاهش داده است.



شکل ۲. نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک.

Figure 2. Convergence diagram of the genetic algorithm.

تحلیل تفکیکی هزینه‌ها نشان می‌دهد که این کاهش عمدتاً ناشی از کاهش ۱۲۰۰۰۰ دلاری هزینه پیشگیرانه است که در مقابل، افزایش ۴۶۲۶۸ دلاری هزینه اصلاحی را به همراه داشته است. با این حال، میزان کاهش هزینه پیشگیرانه به مراتب بیشتر از افزایش هزینه اصلاحی است که نشان‌دهنده عملکرد صحیح مدل در ایجاد تعادل اقتصادی بین دو نوع هزینه است. همچنین، تعداد کل تعویض‌ها (پیشگیرانه و اصلاحی) در مدل پیشنهادی کمتر از استراتژی آستانه ۰/۹ است که منجر به کاهش مصرف منابع و در نتیجه کاهش هزینه تخصیص منابع به میزان ۱،۵۵۴ دلار شده است. اگرچه این کاهش به‌تنهایی قابل‌توجه نیست، اما در کنار کاهش چشمگیر هزینه پیشگیرانه، نشان‌دهنده کارایی بیشتر مدل در مدیریت منابع و هزینه‌هاست. این یافته تأکید می‌کند که رویکرد بهینه‌سازی همزمان هزینه‌های پیشگیرانه، اصلاحی و تخصیص منابع، عملکرد بهتری نسبت به استراتژی‌های مبتنی بر آستانه قابلیت‌اطمینان دارد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای تصمیم‌گیری در حوزه نگهداری و تعمیرات مزارع بادی مورد استفاده قرار گیرد.

۴-۳- آنالیز حساسیت استراتژی نت

به منظور بررسی صحت مدل و تأثیر پارامترهای کلیدی بر جواب بهینه، تحلیل حساسیت بر روی دو پارامتر هزینه جریمه کمبود منابع (P_j) و میزان منابع در دسترس (V_j) صورت گرفته است.

بسیار ناچیز است (کمتر از ۱٪). این موضوع نشان‌دهنده پایداری بسیار بالای الگوریتم و عدم وابستگی آن به شروع تصادفی است. با اجرای الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، برنامه تعویض پیشگیرانه بهینه به صورت $N_l = [7\ 6\ 4\ 6]$ با متوسط هزینه کل $E[C_T] = 1,370,586\$$ در طول چرخه عمر (۲۰ سال) به دست می‌آید (معادل با ۶۸۵۲۹ دلار در هر سال). به عبارت دیگر، تعداد تعویض‌های پیشگیرانه در طول چرخه عمر برای روتور ۷ بار، برای بورینگ ۶ بار، برای گیربکس ۴ بار و برای ژنراتور ۶ بار تعیین شده است. بدیهی است که در صورت خرابی هر یک از مؤلفه‌ها در بازه زمانی بین دو تعویض پیشگیرانه متوالی، تعویض اصلاحی برای آن مؤلفه انجام خواهد گرفت. لازم به ذکر است که در این برنامه تعویض پیشگیرانه، میانگین تعداد تعویض‌های اصلاحی (خرابی‌ها) در طول ۲۰ سال برای روتور برابر با ۰/۲۸، بورینگ ۰/۶۱، گیربکس ۱/۶۹ و ژنراتور برابر با ۰/۷۹ بار می‌باشد. ماتریس متوسط تخصیص منابع به مزارع بادی در هر ماه (NV_{kj}) و متوسط میزان منابع مصرف‌شده در هر ماه (L_j) به ترتیب به صورت زیر حاصل شده است:

$$NV = \begin{bmatrix} 5.2197 & 9.6620 & 4.3962 & 4.3962 \\ 5.2197 & 9.6620 & 4.3962 & 4.3962 \\ 10.4394 & 19.3240 & 8.7925 & 8.7925 \end{bmatrix}$$

$$L = [20.9 \quad 38.6 \quad 17.6 \quad 17.6].$$

نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. محور افقی نمودار تعداد تکرارهای الگوریتم و محور عمودی بهترین مقدار تابع هدف در هر تکرار را نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، مقدار تابع هدف روند نزولی داشته و نهایتاً به کمترین مقدار خود همگرا می‌گردد. این رفتار نشان‌دهنده عملکرد صحیح الگوریتم در یافتن جواب بهینه است.

در مقاله (Zhang & Yang, 2021)، استراتژی تعویض پیشگیرانه بر اساس آستانه قابلیت‌اطمینان ۹۰٪ است. به این معنا که هر زمان قابلیت اطمینان هر مؤلفه به ۰/۹ کاهش یابد، تعویض پیشگیرانه انجام می‌شود. با توجه به پارامترهای توزیع وایبل مولفه‌ها، این استراتژی منجر به برنامه $N_l = [5\ 6\ 6\ 7]$ در افق ۲۰ ساله می‌شود.

برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، مسئله با همان داده‌ها و با اعمال استراتژی مذکور (یعنی $N_l = [5\ 6\ 6\ 7]$) مجدداً حل و نتایج در جدول ۸ آورده شده است. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی

جدول ۸. مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با استراتژی آستانه قابلیت اطمینان (Zhang & Yang, 2021)

Table 8. Comparison of the proposed model results with the reliability threshold strategy (Zhang & Yang, 2021)

استراتژی نت	برنامه تعویض (N_I)	هزینه نت پیشگیرانه	هزینه نت اصلاحی	هزینه تخصیص منابع	هزینه جرمه کمبود منابع	هزینه کل
تعویض پیشگیرانه دوره‌ای (مقاله حاضر)	[۷ ۶ ۴ ۶]	۶۲۴۰۰۰	۵۵۴۸۹۸	۱۹۱۶۸۹	۰	۱۳۷۰۵۸۶
آستانه قابلیت اطمینان ۰/۹ (Zhang & Yang, 2021)	[۵ ۶ ۶ ۷]	۷۴۴۰۰۰	۵۰۸۶۳۰	۱۹۳۲۴۳	۰	۱۴۴۵۸۷۲

جدول ۹. تحلیل حساسیت در حالت تعویض انفرادی با منابع نامحدود

Table 9. Sensitivity analysis in individual replacement with unlimited resources

هر مقدار دلخواه	برنامه تعویض پیشگیرانه (N_I)	متوسط منابع مصرف شده (L_f)
[۷ ۶ ۴ ۶]	[۲۰/۹ ۳۸/۶ ۱۷/۶ ۱۷/۶]	

بدین منظور، مسئله در چهار حالت زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

- ۱) تعویض انفرادی مؤلفه‌ها با منابع نامحدود
- ۲) تعویض انفرادی مؤلفه‌ها با محدودیت منابع
- ۳) تعویض گروهی مؤلفه‌ها با منابع نامحدود
- ۴) تعویض گروهی مؤلفه‌ها با محدودیت منابع

لازم به ذکر است که در حالت تعویض گروهی، تمامی چهار مؤلفه (روتور، بویلر، گیربکس و ژنراتور) به صورت پیشگیرانه، همزمان با هم در فواصل زمانی یکسان تعویض می‌شوند و هر مؤلفه، در صورت خرابی بین دو تعویض پیشگیرانه‌ی متوالی، به صورت انفرادی، تعویض اصلاحی می‌شود. در واقع، سیاست نت گروهی مورد بررسی در این پژوهش، از نوع «تعویض پیشگیرانه‌ی بلوکی»^۱ است که در ادبیات قابلیت‌اطمینان به عنوان یک استراتژی شناخته‌شده و پرکاربرد مورد مطالعه قرار گرفته است (Nakagawa, 2005؛ Jardine & Tsang, 2021). در این

استراتژی، صرف‌نظر از وضعیت یا عمر باقیمانده هر مؤلفه، تمام مؤلفه‌های سیستم به‌صورت دوره‌ای و همزمان با هم، تعویض پیشگیرانه می‌شوند که از نظر عملیاتی، اجرای آن نسبت به تعویض دوره‌ای پیشگیرانه‌ی انفرادی مؤلفه‌ها، آسان‌تر است و نیاز به برنامه‌ریزی جداگانه برای هر مؤلفه را حذف می‌کند. هدف از مقایسه‌ی این سناریو با استراتژی تعویض انفرادی، بررسی اقتصادی آن و تعیین این موضوع است که آیا تعویض همزمان و یکسان مؤلفه‌ها، با وجود سادگی عملیاتی، می‌تواند از نظر هزینه

کل در طول چرخه عمر مزرعه بادی رقابت‌پذیر باشد یا خیر.

۴-۳-۱- تعویض انفرادی با منابع نامحدود

تحلیل حساسیت بر روی هزینه جرمه کمبود منابع (P_f) در حالت تعویض انفرادی با منابع نامحدود انجام شده است. سایر پارامترهای مسئله در این تحلیل ثابت نگه داشته شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۹ مشاهده می‌شود، برنامه تعویض پیشگیرانه و میزان منابع مصرف‌شده در تمامی سطوح هزینه جرمه ثابت باقی مانده است. بنابراین، در غیاب محدودیت منابع، هزینه جرمه کمبود منابع تأثیری بر جواب بهینه ندارد و استراتژی بهینه نت مستقل از آن خواهد بود. دلیل این امر، وجود منابع نامحدود و عدم مواجهه با کمبود منابع در این حالت است.

۴-۳-۲- تعویض انفرادی با محدودیت منابع

در این حالت، تحلیل حساسیت بر روی منابع در دسترس انجام شده است. به این منظور، منابع در دسترس در شش سطح ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ نسبت به حالت پایه ($V = [20.9 \ 38.6 \ 17.6 \ 17.6]$) کاهش یافته و سایر پارامترهای مسئله ثابت نگه داشته شده‌اند. همچنین، برای بررسی تأثیر هزینه جرمه کمبود منابع (P_f)، دو حالت حدی شامل افزایش ۸۰٪ (جرمه سنگین) و کاهش ۸۰٪ (جرمه سبک) نسبت به مقدار پایه در نظر گرفته شده و نتایج به ترتیب در جداول ۱۰ و ۱۱ آورده

^۱ Block Preventive Replacement Policy

شده است. نتایج **جدول ۱۰** نشان‌دهنده تأثیر کاهش منابع در دسترس بر برنامه‌ی بهینه تعویض پیشگیرانه و هزینه‌های مختلف است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود با کاهش ۱۰ درصدی و ۲۰ درصدی منابع در دسترس، مدل دچار کمبود منابع نشده است (هزینه جریمه کمبود منابع برابر با صفر است) ولی هزینه تخصیص منابع روند کاهشی داشته است یعنی مدل در مواجهه با منابع در دسترس کمتر، به ناچار باید تعداد عملیات نت (مجموع تعویض‌های پیشگیرانه و اصلاحی) را کاهش می‌دهد تا از منابع کمتری استفاده کرده تا از بروز کمبود منابع و تحمیل هزینه‌های جریمه جلوگیری کند. نکته قابل توجه در اینجا، تأثیر معکوس تعداد تعویض‌های پیشگیرانه و اصلاحی بر یکدیگر است؛ به گونه‌ای که افزایش یکی منجر به کاهش دیگری می‌شود و مدل باید تعادل بهینه‌ای بین این دو برقرار کند. در سطوح کاهش ۱۰٪ و ۲۰٪، تعداد تعویض پیشگیرانه از [۷۶۴۶] به [۵۶۴۴] و سپس به [۵۳۴۴] کاهش یافته است. این

کاهش در تعداد تعویض‌های پیشگیرانه، باعث افزایش فاصله زمانی بین تعویض‌های متوالی مؤلفه‌ها شده و در نتیجه متوسط تعداد خرابی‌ها و به تبع آن هزینه نت اصلاحی افزایش یافته است. هرچند هزینه پیشگیرانه و هزینه تخصیص منابع کاهش یافته‌اند، اما افزایش هزینه اصلاحی به گونه‌ای است که کاهش این دو هزینه را جبران کرده و در نتیجه هزینه کل افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، صرفه‌جویی حاصل از کاهش تعویض‌های پیشگیرانه و کاهش مصرف منابع، نمی‌تواند افزایش هزینه‌های ناشی از خرابی‌های بیشتر را پوشش دهد. این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط محدودیت منابع، مدل با کاهش تعویض‌های پیشگیرانه، هزینه‌های جاری را کاهش می‌دهد، اما این کاهش منجر به افزایش هزینه‌های آتی (خرابی و تعویض اصلاحی) می‌شود و در نهایت، هزینه کل افزایش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده وجود یک نقطه تعادل اقتصادی است که مدل سعی در یافتن آن دارد.

جدول ۱۰. تحلیل حساسیت در حالت تعویض انفرادی با محدودیت منابع و جریمه سنگین کمبود منابع

Table 10. Sensitivity analysis in individual replacement with resource constraints and heavy shortage penalty

کاهش منابع در دسترس (درصد)	برنامه تعویض بهینه (N_I)	هزینه نت پیشگیرانه	هزینه نت اصلاحی	هزینه تخصیص منابع	هزینه جریمه کمبود منابع	هزینه کل
۰ (حالت پایه)	[۷۶۴۶]	۶۲۴۰۰۰	۵۵۴۸۹۸	۱۹۱۶۸۹	۰	۱۳۷۰۵۸۶
۱۰	[۶۴۴۵]	۵۵۲۰۰۰	۶۷۹۲۷۷	۱۶۶۹۵۲	۰	۱۳۹۸۲۳۰
۲۰	[۵۳۴۴]	۴۸۸۰۰۰	۸۴۵۱۴۵	۱۵۰۱۳۳	۰	۱۴۸۳۲۷۸
۳۰	[۳۲۴۳]	۴۰۸۰۰۰	۱۳۰۶۳۲۱	۱۳۵۲۶۸	۱۵۹۱۵۱	۲۰۰۸۷۴۰
۴۰	[۳۲۴۳]	۴۰۸۰۰۰	۱۳۰۶۳۲۱	۱۳۵۲۶۸	۲۳۳۸۲۸۰	۴۱۸۷۸۶۸
۶۰	[۳۲۴۳]	۴۰۸۰۰۰	۱۳۰۶۳۲۱	۱۳۵۲۶۸	۶۶۹۶۵۳۶	۸۵۴۶۱۲۴
۸۰	[۳۲۴۳]	۴۰۸۰۰۰	۱۳۰۶۳۲۱	۱۳۵۲۶۸	۱۱۰۵۴۷۹۲	۱۲۹۰۴۳۸۰

جدول ۱۱. تحلیل حساسیت در حالت تعویض انفرادی با محدودیت منابع و جریمه سبک کمبود منابع

Table 11. Sensitivity analysis in individual replacement with resource constraints and light shortage penalty

کاهش منابع در دسترس (درصد)	برنامه تعویض بهینه (N_I)	هزینه نت پیشگیرانه	هزینه نت اصلاحی	هزینه تخصیص منابع	هزینه جریمه کمبود منابع	هزینه کل
۰ (حالت پایه)	[۷۶۴۶]	۶۲۴۰۰۰	۵۵۴۸۹۸	۱۹۱۶۸۹	۰	۱۳۷۰۵۸۶
۱۰	[۶۵۴۵]	۵۶۰۰۰۰	۶۴۹۷۸۶	۱۷۲۴۹۹	۲۴۶۵	۱۳۸۴۷۵۰
۲۰	[۵۴۴۴]	۴۹۶۰۰۰	۷۹۵۹۹۳	۱۵۴۸۴۴	۲۱۱۳۰	۱۴۶۷۹۶۷
۳۰	[۴۳۴۴]	۴۷۲۰۰۰	۹۱۹۷۹۴	۱۴۵۰۳۵	۱۴۰۵۷۷	۱۶۷۷۴۰۶
۴۰	[۴۳۴۴]	۴۷۲۰۰۰	۹۱۹۷۹۴	۱۴۵۰۳۵	۳۸۲۷۰۲	۱۹۱۹۵۳۱
۶۰	[۴۳۴۴]	۴۷۲۰۰۰	۹۱۹۷۹۴	۱۴۵۰۳۵	۸۶۶۹۵۳	۲۴۰۳۷۸۲
۸۰	[۴۳۴۴]	۴۷۲۰۰۰	۹۱۹۷۹۴	۱۴۵۰۳۵	۱۳۵۱۲۰۳	۲۸۸۸۰۳۲

قادر به واکنش به تغییرات منابع در دسترس و هزینه جریمه کمبود منابع است و نتایج آن از منطق اقتصادی قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

در حالت جریمه سبک، بر خلاف حالت جریمه سنگین، مدل حتی در سطوح کاهش ۱۰٪ و ۲۰٪ منابع نیز با کمبود منابع مواجه شده است. این موضوع به دلیل تفاوت در برنامه تعویض پیشگیرانه بهینه و در نتیجه میزان منابع مصرفی در دو حالت است.

در حالت جریمه سنگین (جدول ۱۰)، مدل با کاهش ۱۰٪ و ۲۰٪ منابع، برنامه تعویض را به گونه‌ای تنظیم کرده است که مصرف منابع از منابع در دسترس تجاوز نکند. اما در حالت جریمه سبک (جدول ۱۱)، با وجود کاهش ۱۰٪ منابع، مدل برنامه تعویضی را انتخاب کرده است که مصرف منابع آن از منابع در دسترس اندکی بیشتر است و در نتیجه هزینه جریمه ناچیزی (۲۴۶۵ دلار) به سیستم تحمیل می‌شود. در کاهش ۲۰٪ نیز این هزینه به ۲۱۱۳۰ دلار افزایش می‌یابد. دلیل این تفاوت در هزینه جریمه کمبود منابع است.

در حالت جریمه سبک، هزینه جریمه پایین است، بنابراین مدل ترجیح می‌دهد با پذیرش هزینه جریمه کم، برنامه تعویض را کمتر کاهش دهد (یعنی تعویض‌های پیشگیرانه بیشتری انجام دهد) تا از هزینه‌های بالاتر اصلاحی جلوگیری کند. به عبارت دیگر، مدل با پذیرش هزینه جریمه ناچیز، از کاهش بیشتر تعویض‌های پیشگیرانه و افزایش هزینه اصلاحی صرف نظر می‌کند.

به عنوان مثال، در کاهش ۲۰٪ منابع، برنامه تعویض در حالت جریمه سبک [۴ ۴ ۴ ۵] است، در حالی که در حالت جریمه سنگین این برنامه [۴ ۳ ۴ ۵] می‌باشد. این تفاوت کوچک در برنامه تعویض (یک تعویض بیشتر برای بورینگ) باعث می‌شود که مصرف منابع در حالت جریمه سبک از منابع در دسترس فراتر رفته و هزینه جریمه به سیستم تحمیل شود. با این حال، هزینه جریمه پرداخت شده (۲۱۱۳۰ دلار) بسیار کمتر از صرفه جویی حاصل از کاهش هزینه اصلاحی است.

در سطوح کاهش ۳۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ منابع، برنامه تعویض پیشگیرانه به [۴ ۳ ۴ ۴] محدود شده و بدون تغییر باقی می‌ماند. در نتیجه، هزینه‌های پیشگیرانه، اصلاحی و تخصیص منابع نیز ثابت می‌مانند و تنها هزینه جریمه کمبود منابع است که افزایش می‌یابد. این رفتار

در سطوح کاهش ۳۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ منابع در دسترس، برنامه تعویض پیشگیرانه به [۳ ۲ ۴ ۳] محدود شده و بدون تغییر باقی می‌ماند. در نتیجه، هزینه‌های پیشگیرانه، اصلاحی و تخصیص منابع نیز ثابت می‌مانند و تنها هزینه جریمه کمبود منابع است که افزایش می‌یابد. این رفتار نشان می‌دهد که مدل به یک جواب پایدار رسیده است که کاهش بیشتر تعویض‌های پیشگیرانه، اگرچه مصرف منابع را کاهش می‌دهد، اما منجر به افزایش شدید خرابی‌ها و هزینه‌های اصلاحی می‌شود و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست.

در این نقطه، مدل با یک چالش اساسی مواجه است: اگر تعداد تعویض‌های پیشگیرانه را بیش از این کاهش دهد، هزینه اصلاحی به شدت افزایش می‌یابد و منابع بیشتری برای تعویض‌های اصلاحی مصرف خواهد شد. بنابراین، مدل ترجیح می‌دهد برنامه تعویض را در همین سطح نگه دارد و در صورت لزوم، هزینه جریمه کمبود منابع را بپذیرد. این موضوع نشان‌دهنده عملکرد صحیح مدل در ایجاد تعادل بین هزینه‌های جاری (پیشگیرانه و تخصیص منابع) و هزینه‌های آتی (اصلاحی و جریمه) است.

از سوی دیگر، با افزایش محدودیت منابع، هزینه جریمه کمبود منابع به سرعت رشد می‌کند و سهم غالب هزینه کل را تشکیل می‌دهد. به عنوان مثال، در کاهش ۳۰٪ منابع، هزینه جریمه حدود ۱۵۹۱۵۱ دلار (کمتر از ۸٪ هزینه کل) است، اما در کاهش ۸۰٪ به ۱۱۰۵۴۷۹۲ دلار (بیش از ۸۵٪ هزینه کل) می‌رسد. این افزایش شدید هزینه جریمه نشان می‌دهد که با کاهش چشمگیر منابع، تأمین نیازهای تعمیراتی حتی با حداقل تعویض‌های پیشگیرانه نیز ممکن نیست و مدل ناچار است هزینه سنگین کمبود منابع را بپذیرد.

در مجموع، در این بازه، مدل با انتخاب برنامه تعویض پایدار [۳ ۲ ۴ ۳]، سعی در حفظ تعادل بین هزینه‌های نت و جلوگیری از افزایش بی‌رویه هزینه اصلاحی دارد، اما با کاهش بیشتر منابع، هزینه جریمه به عنوان تنها متغیر افزایش‌یابنده، هزینه کل را به شدت بالا می‌برد. این یافته نشان می‌دهد که سیاست‌های جریمه سنگین، در شرایط کمبود شدید منابع، تأثیر بسیار زیادی بر هزینه کل دارند و مدیران باید با مدیریت دقیق منابع، از ورود به این ناحیه جلوگیری کنند. در مجموع، تحلیل حساسیت انجام شده در این بخش نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی به خوبی

همانطور که مشاهده می‌شود، هزینه کل در حالت تعویض گروهی ($E[C_T] = 1,410,800\$$) نسبت به حالت تعویض انفرادی ($E[C_T] = 1,370,586\$$) افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تعویض انفرادی مؤلفه‌ها پاسخ بهینه‌تری ارائه می‌دهد. این در حالی است که مصرف منابع در حالت تعویض گروهی کمتر از حالت انفرادی است ($[18.4 \ 34 \ 15.5 \ 15.5] = L_{\text{گروهی}}$ در مقابل $[20.9 \ 38.6 \ 17.6 \ 17.6] = L_{\text{انفرادی}}$).

دلیل این رفتار را می‌توان در ساختار تابع هزینه جستجو کرد. اگرچه در تعویض گروهی تعداد تعویض‌های پیشگیرانه کاهش یافته و مصرف منابع کمتر شده است، اما افزایش تعویض‌های اصلاحی (که هزینه هر واحد آن به مراتب بیشتر از تعویض پیشگیرانه است) باعث شده هزینه کل افزایش یابد. به عبارت دیگر، صرفه‌جویی در مصرف منابع و هزینه‌های پیشگیرانه، جبران‌کننده‌ی هزینه‌های سنگین تعویض‌های اصلاحی نبوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تعویض انفرادی مؤلفه‌ها پاسخ بهینه‌تری را ارائه می‌دهد.

این یافته نشان می‌دهد که کمترین مصرف منابع لزوماً به معنای کمترین هزینه کل نیست و در طراحی استراتژی نگهداری و تعمیرات، باید بین هزینه‌های جاری (منابع و تعویض پیشگیرانه) و هزینه‌های آتی (خرابی و تعویض اصلاحی) تعادل برقرار کرد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تعویض انفرادی مؤلفه‌ها پاسخ بهینه‌تری نسبت به تعویض گروهی ارائه می‌دهد.

۴-۳-۴- تعویض گروهی با محدودیت منابع

در این بخش، برای استراتژی تعویض پیشگیرانه گروهی، تحلیل حساسیت روی منابع در دسترس انجام شده است. به این منظور، منابع در دسترس در شش سطح ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ نسبت به حالت پایه ($V = [18.4 \ 34 \ 15.5 \ 15.5]$) کاهش یافته و سایر پارامترهای مسئله ثابت نگه داشته شده‌اند. همچنین، برای بررسی تأثیر هزینه جریمه کمبود منابع (P_j)، دو حالت حدی شامل افزایش ۸۰٪ (جریمه سنگین) و کاهش ۸۰٪ (جریمه سبک) نسبت به مقدار پایه در نظر گرفته شده و نتایج به ترتیب در جداول ۱۲ و ۱۳ آورده شده است.

نشان می‌دهد که مدل به یک جواب پایدار رسیده است که کاهش بیشتر تعویض‌های پیشگیرانه، اگرچه مصرف منابع را کاهش می‌دهد، اما منجر به افزایش شدید خرابی‌ها و هزینه‌های اصلاحی می‌شود و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. با این حال، در حالت جریمه سبک، هزینه جریمه با شیب ملایم‌تری نسبت به حالت جریمه سنگین افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در کاهش ۸۰٪ منابع، هزینه جریمه در حالت جریمه سبک ۱۳۵۱۲۰۳ دلار (۴۶/۸٪ از هزینه کل) است، در حالی که در حالت جریمه سنگین این مقدار ۱۱۰۵۴۷۹۲ دلار (بیش از ۸۵٪ از هزینه کل) می‌باشد. این تفاوت نشان می‌دهد که در شرایط جریمه سبک، مدل با خیال راحت‌تری تعویض‌های پیشگیرانه بیشتری انجام می‌دهد و کمبود منابع را با هزینه کمتری تحمل می‌کند. مقایسه دو حالت جریمه سنگین و سبک در این بازه نشان می‌دهد که انتخاب سیاست جریمه، تأثیر بسیار زیادی بر ساختار هزینه‌ها دارد. در حالت جریمه سبک، هزینه جریمه سهم کمتری از هزینه کل را تشکیل می‌دهد و مدل می‌تواند با انعطاف‌پذیری بیشتری برنامه تعویض را مدیریت کند. در مقابل، در حالت جریمه سنگین، هزینه جریمه به سرعت افزایش یافته و به عامل غالب هزینه کل تبدیل می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که در شرایط کمبود شدید منابع، سیاست‌های جریمه سنگین می‌تواند هزینه‌های بسیار سنگینی را به سیستم تحمیل کند و مدیران باید با مدیریت دقیق منابع، از ورود به این ناحیه جلوگیری کنند.

۴-۳-۳- تعویض گروهی با منابع نامحدود

در این حالت، مدل با فرض تعویض همزمان هر چهار مؤلفه (تعویض گروهی) به صورت پیشگیرانه و عدم محدودیت در دسترسی به منابع حل شده است. هدف از بررسی این حالت، مقایسه عملکرد استراتژی تعویض گروهی با استراتژی تعویض انفرادی (حالت اول) است. پس از حل مدل با داده‌های اولیه (جداول ۱ تا ۵)، برنامه تعویض پیشگیرانه بهینه به صورت $N = [5 \ 5 \ 5 \ 5]$ با مقدار تابع هدف $E[C_T] = 1,410,800\$$ به دست می‌آید (معادل با ۷۰۵۴۰ دلار در هر سال). متوسط میزان منابع مصرف‌شده در هر ماه نیز به صورت $L = [18.4 \ 34 \ 15.5 \ 15.5]$ حاصل می‌شود.

جدول ۱۲. تحلیل حساسیت در حالت تعویض گروهی با محدودیت منابع و جریمه سنگین کمبود منابع

Table 12. Sensitivity analysis in group replacement with resource constraints and heavy shortage penalty

کاهش منابع در دسترس (درصد)	برنامه تعویض بهینه (N_I)	هزینه نت پیشگیرانه	هزینه نت اصلاحی	هزینه تخصیص منابع	هزینه جریمه کمبود منابع	هزینه کل
۰ (حالت پایه)	[۵ ۵ ۵ ۵]	۶۰۰,۰۰۰	۶۴۱۷۳۶	۱۶۹۰۸۹	۰	۱۴۱۰۸۲۵
۱۰	[۴ ۴ ۴ ۴]	۴۸۰,۰۰۰	۸۷۰۶۴۲	۱۴۹۷۴۶	۰	۱۵۰۰۳۸۸
۲۰	[۳ ۳ ۳ ۳]	۳۶۰,۰۰۰	۱۳۱۳۰۱۷	۱۴۰۰۷۱	۵۶۹۱۵۶	۲۳۸۲۲۴۳
۳۰	[۳ ۳ ۳ ۳]	۳۶۰,۰۰۰	۱۳۱۳۰۱۷	۱۴۰۰۷۱	۲۴۹۲۲۳۵	۴۳۰۵۳۲۲
۴۰	[۳ ۳ ۳ ۳]	۳۶۰,۰۰۰	۱۳۱۳۰۱۷	۱۴۰۰۷۱	۴۴۱۵۳۱۳	۶۲۲۸۴۰۱
۶۰	[۳ ۳ ۳ ۳]	۳۶۰,۰۰۰	۱۳۱۳۰۱۷	۱۴۰۰۷۱	۸۲۶۱۴۷۱	۱۰۰۷۴۵۵۸
۸۰	[۳ ۳ ۳ ۳]	۳۶۰,۰۰۰	۱۳۱۳۰۱۷	۱۴۰۰۷۱	۱۲۱۰۷۶۲۸	۱۳۹۲۰۷۱۶

جدول ۱۳. تحلیل حساسیت در حالت تعویض گروهی با محدودیت منابع و جریمه سبک کمبود منابع

Table 13. Sensitivity analysis in group replacement with resource constraints and light shortage penalty

کاهش منابع در دسترس (درصد)	برنامه تعویض بهینه (N_I)	هزینه نت پیشگیرانه	هزینه نت اصلاحی	هزینه تخصیص منابع	هزینه جریمه کمبود منابع	هزینه کل
۰ (حالت پایه)	[۵ ۵ ۵ ۵]	۶۰۰,۰۰۰	۶۴۱۷۳۶	۱۶۹۰۸۹	۰	۱۴۱۰۸۲۵
۱۰	[۴ ۴ ۴ ۴]	۴۸۰,۰۰۰	۸۷۰۶۴۲	۱۴۹۷۴۶	۰	۱۵۰۰۳۸۸
۲۰	[۴ ۴ ۴ ۴]	۴۸۰,۰۰۰	۸۷۰۶۴۲	۱۴۹۷۴۶	۱۸۳۶۹۲	۱۶۸۴۰۸۰
۳۰	[۴ ۴ ۴ ۴]	۴۸۰,۰۰۰	۸۷۰۶۴۲	۱۴۹۷۴۶	۳۹۷۳۶۷	۱۸۹۷۷۵۵
۴۰	[۴ ۴ ۴ ۴]	۴۸۰,۰۰۰	۸۷۰۶۴۲	۱۴۹۷۴۶	۶۱۱۰۴۲	۲۱۱۱۴۳۱
۶۰	[۴ ۴ ۴ ۴]	۴۸۰,۰۰۰	۸۷۰۶۴۲	۱۴۹۷۴۶	۱۰۳۸۳۹۳	۲۵۳۸۷۸۱
۸۰	[۴ ۴ ۴ ۴]	۴۸۰,۰۰۰	۸۷۰۶۴۲	۱۴۹۷۴۶	۱۴۶۵۷۴۴	۲۹۶۶۱۳۲

جدول ۱۲ تأثیر کاهش منابع در دسترس را بر برنامه‌ی

بهینه‌ی تعویض پیشگیرانه گروهی و هزینه‌های مختلف در شرایط جریمه سنگین نشان می‌دهد همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، در حالت پایه (بدون کاهش منابع)، برنامه‌ی تعویض گروهی بهینه [۵ ۵ ۵ ۵] با هزینه کل ۱۴۱۰۸۲۵ دلار است. با کاهش ۱۰٪ منابع، برنامه تعویض به [۴ ۴ ۴ ۴] کاهش می‌یابد و هزینه کل به ۱۵۰۰۳۸۸ دلار افزایش می‌یابد. در این سطح، هزینه جریمه کمبود منابع صفر است و افزایش هزینه کل ناشی از افزایش هزینه اصلاحی (از ۶۴۱۷۳۶ به ۸۷۰۶۴۲ دلار) می‌باشد.

از سطح کاهش ۲۰٪ به بعد، برنامه تعویض به [۳ ۳ ۳ ۳] محدود می‌شود و تا کاهش ۸۰٪ بدون تغییر باقی می‌ماند. در این نقطه، مدل به یک جواب پایدار رسیده است که کاهش بیشتر تعویض‌های پیشگیرانه گروهی، اگرچه مصرف منابع را کاهش می‌دهد، اما منجر به افزایش شدید خرابی‌ها و هزینه‌های اصلاحی می‌شود و از نظر اقتصادی

مقرون‌به‌صرفه نیست. از سطح کاهش ۲۰٪ به بعد، هزینه جریمه کمبود منابع به‌سرعت افزایش می‌یابد و سهم غالب هزینه کل را تشکیل می‌دهد. به‌عنوان مثال، در کاهش ۲۰٪ منابع، هزینه جریمه ۵۶۹۱۵۶ دلار (حدود ۲۴٪ هزینه کل) است و در کاهش ۸۰٪ به ۱۲۱۰۷۶۲۸ دلار (بیش از ۸۶٪ هزینه کل) می‌رسد.

نکته قابل توجه این است که هزینه‌های پیشگیرانه، اصلاحی و تخصیص منابع از سطح کاهش ۲۰٪ به بعد ثابت می‌مانند و تنها هزینه جریمه کمبود منابع است که افزایش می‌یابد. این رفتار نشان می‌دهد که در استراتژی تعویض گروهی، به دلیل هماهنگی اجباری بین مؤلفه‌ها، مدل انعطاف‌پذیری کمتری برای تنظیم برنامه تعویض بر اساس سطوح مختلف محدودیت منابع دارد و پس از رسیدن به یک جواب پایدار، تنها راه مقابله با محدودیت بیشتر منابع، پذیرش هزینه جریمه است. در مجموع، در این بازه، مدل با انتخاب برنامه تعویض پایدار [۳ ۳ ۳ ۳]، سعی در حفظ تعادل بین هزینه‌های نت و جلوگیری از

انعطاف‌پذیری بیشتری برنامه تعویض را مدیریت کند (تعداد تعویض‌های بیشتری انجام دهد) و هزینه جریمه سهم کمتری از هزینه کل را تشکیل می‌دهد. در مقابل، در حالت جریمه سنگین، مدل ناچار است تعداد تعویض‌ها را کاهش دهد و هزینه جریمه به سرعت افزایش یافته و به عامل غالب هزینه کل تبدیل می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که در شرایط کمبود شدید منابع، سیاست‌های جریمه سنگین می‌تواند هزینه‌های بسیار سنگینی را به سیستم تحمیل کند و مدیران باید با مدیریت دقیق منابع، از ورود به این ناحیه جلوگیری کنند. همچنین، مقایسه نتایج تعویض گروهی (جداول ۱۲ و ۱۳) با نتایج تعویض انفرادی (جداول ۱۰ و ۱۱) نشان می‌دهد که در شرایط مشابه، تعویض انفرادی هزینه کل کمتری دارد و انعطاف‌پذیری بیشتری در مواجهه با محدودیت منابع از خود نشان می‌دهد. این موضوع تأییدکننده نتیجه‌گیری حاصل از بخش ۳-۳-۴ است که تعویض انفرادی پاسخ بهینه‌تری نسبت به تعویض گروهی ارائه می‌دهد.

۴-۴- آنالیز حساسیت توزیع وایبل

با توجه به اینکه نرخ خرابی مؤلفه‌ها تأثیر مستقیم بر تعداد تعویض‌های پیشگیرانه و اصلاحی دارد، در این بخش تأثیر تغییرات پارامترهای شکل (β) و مقیاس (η) توزیع وایبل بر جواب بهینه بررسی شده است. به این منظور، هر یک از پارامترها در سطوح مختلف (افزایش و کاهش نسبت به مقدار پایه) تغییر داده شده و مدل مجدداً حل گردیده است. تحلیل حساسیت در دو حالت منابع نامحدود (برای بررسی رفتار ذاتی مدل) و محدودیت ۴۰٪ منابع با جریمه سنگین (برای بررسی شرایط واقعی‌تر) انجام شده است. نتایج در جداول ۱۴ تا ۱۷ ارائه شده است.

۴-۴-۱- آنالیز حساسیت بتا با منابع نامحدود

جدول ۱۴ تأثیر تغییرات پارامتر شکل (β) توزیع وایبل را بر برنامه بهینه تعویض پیشگیرانه و هزینه‌ها نشان می‌دهد. با افزایش β از مقدار پایه به $1/5\beta$ و 2β نرخ خرابی مؤلفه‌ها در ابتدای عمر کاهش یافته و در نتیجه نیاز به تعویض‌های پیشگیرانه کمتر می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش β از مقدار پایه به $1/5\beta$ ، برنامه

افزایش بی‌رویه هزینه اصلاحی دارد، اما با کاهش بیشتر منابع، هزینه جریمه به‌عنوان تنها متغیر افزایش‌یابنده، هزینه کل را به‌شدت بالا می‌برد. این یافته نشان می‌دهد که در شرایط کمبود شدید منابع، استراتژی تعویض گروهی با محدودیت‌های جدی‌تری نسبت به استراتژی تعویض انفرادی مواجه است و مدیران باید با مدیریت دقیق‌تر منابع، از ورود به این ناحیه جلوگیری کنند.

جدول ۱۳ تأثیر کاهش منابع در دسترس را بر برنامه‌ی بهینه تعویض پیشگیرانه گروهی و هزینه‌های مختلف در شرایط جریمه سبک نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، در حالت پایه (بدون کاهش منابع)، برنامه تعویض گروهی بهینه [۵ ۵ ۵ ۵] با هزینه کل ۱۴۱۰۸۲۵ دلار است. با کاهش ۱۰٪ منابع، برنامه تعویض به [۴ ۴ ۴ ۴] کاهش می‌یابد و هزینه کل به ۱۵۰۰۳۸۸ دلار افزایش می‌یابد که مشابه حالت جریمه سنگین است و هزینه جریمه در این سطح صفر می‌باشد. نکته قابل توجه این است که در حالت جریمه سبک، بر خلاف حالت جریمه سنگین، برنامه تعویض در سطح کاهش ۲۰٪ به بعد به [۴ ۴ ۴ ۴] محدود می‌شود و تا کاهش ۸۰٪ بدون تغییر باقی می‌ماند. در حالی که در حالت جریمه سنگین، برنامه در کاهش ۲۰٪ به [۳ ۳ ۳ ۳] کاهش یافته بود. این تفاوت نشان می‌دهد که در شرایط جریمه سبک، مدل با خیال راحت‌تری تعویض‌های پیشگیرانه بیشتری انجام می‌دهد (۴ بار به جای ۳ بار) و کمبود منابع را با هزینه کمتری تحمل می‌کند. از سطح کاهش ۲۰٪ به بعد، هزینه‌های پیشگیرانه، اصلاحی و تخصیص منابع ثابت می‌مانند و تنها هزینه جریمه کمبود منابع است که افزایش می‌یابد. با این حال، در حالت جریمه سبک، هزینه جریمه با شیب ملایم‌تری نسبت به حالت جریمه سنگین افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در کاهش ۸۰٪ منابع، هزینه جریمه در حالت جریمه سبک ۱۴۶۵۷۴۴ دلار (حدود ۴۹٪ از هزینه کل) است، در حالی که در حالت جریمه سنگین این مقدار ۱۲۱۰۷۶۲۸ دلار (بیش از ۸۶٪ از هزینه کل) می‌باشد.

مقایسه دو حالت جریمه سنگین و سبک در استراتژی تعویض گروهی نشان می‌دهد که انتخاب سیاست جریمه، تأثیر بسیار زیادی بر ساختار هزینه‌ها و برنامه بهینه تعویض دارد. در حالت جریمه سبک، مدل می‌تواند با

تعویض پیشگیرانه از [۷ ۶ ۴ ۶] به [۵ ۵ ۴ ۵] کاهش می‌یابد و هزینه کل حدود ۲۶٪ کاهش می‌یابد. در سطح β ، برنامه تعویض بدون تغییر باقی می‌ماند اما هزینه اصلاحی به شدت کاهش می‌یابد (از ۳۱۰۰۶۰ به ۱۴۷۰۳۶ دلار) که منجر به کاهش بیشتر هزینه کل به ۸۳۶۶۳۵ دلار (حدود ۳۹٪ کاهش نسبت به حالت پایه) می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که افزایش β (کاهش نرخ خرابی در ابتدای عمر) تأثیر مستقیمی بر کاهش هزینه‌های اصلاحی دارد و مدل با کاهش تعویض‌های پیشگیرانه، به تعادل اقتصادی جدیدی می‌یابد.

۴-۴-۲- آنالیز حساسیت بتا با منابع محدود

جدول ۱۵ تأثیر تغییرات پارامتر شکل (β) توزیع وایبل را بر برنامه بهینه تعویض و هزینه‌ها در شرایط محدودیت ۴۰٪ منابع و جریمه سنگین نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش β از مقدار پایه به ۱/۵، تعداد تعویض پیشگیرانه برای بورینگ از ۲ به ۳ افزایش می‌یابد و هزینه اصلاحی به شدت کاهش می‌یابد.

جدول ۱۴. تحلیل حساسیت پارامتر شکل (β) با منابع نامحدود

Table 14. Sensitivity analysis of shape parameter (β) with unlimited resources

سطح β	برنامه تعویض بهینه	هزینه پیشگیرانه	هزینه اصلاحی	هزینه تخصیص منابع	هزینه جریمه	هزینه کل
β	[۷ ۶ ۴ ۶]	۶۲۴۰۰۰	۵۵۴۸۹۸	۱۹۱۶۸۹	۰	۱۳۷۰۵۸۶
۱/۵ β	[۵ ۵ ۴ ۵]	۵۴۴۰۰۰	۳۱۰۰۶۰	۱۵۲۲۰۵	۰	۱۰۰۶۲۶۵
۲ β	[۵ ۵ ۴ ۵]	۵۴۴۰۰۰	۱۴۷۰۳۶	۱۴۵۵۹۹	۰	۸۳۶۶۳۵

جدول ۱۵. تحلیل حساسیت پارامتر شکل (β) با محدودیت ۴۰٪ منابع و جریمه سنگین

Table 15. Sensitivity analysis of shape parameter (β) with 40% resource constraint and heavy penalty

سطح β	برنامه تعویض بهینه	هزینه پیشگیرانه	هزینه اصلاحی	هزینه تخصیص منابع	هزینه جریمه	هزینه کل
β	[۳ ۲ ۴ ۳]	۴۰۸۰۰۰	۱۳۰۶۳۲۱	۱۳۵۲۶۸	۲۳۳۸۲۸۰	۲۳۳۸۲۸۰
۱/۵ β	[۳ ۲ ۴ ۳]	۴۱۶۰۰۰	۸۴۶۵۷۸	۱۲۴۱۳۶	۱۰۶۱۲۵۸	۱۰۶۱۲۵۸
۲ β	[۳ ۳ ۴ ۳]	۴۱۶۰۰۰	۵۹۴۷۹۹	۱۱۴۷۵۵	۳۳۴۸۷	۳۳۴۸۷

جدول ۱۶. تحلیل حساسیت پارامتر مقیاس (η) با منابع نامحدود

Table 16. Sensitivity analysis of scale parameter (η) with unlimited resources

سطح η	برنامه تعویض بهینه	هزینه پیشگیرانه	هزینه اصلاحی	هزینه تخصیص منابع	هزینه جریمه	هزینه کل
۰/۵ η	[۱۳ ۱۳ ۸ ۱۱]	۱۲۰۰۰۰۰	۱۱۶۲۴۶۷	۳۷۶۱۱۰	۰	۲۷۳۸۵۷۷
η	[۷ ۶ ۴ ۶]	۶۲۴۰۰۰	۵۵۴۸۹۸	۱۹۱۶۸۹	۰	۱۳۷۰۵۸۶
۱/۵ η	[۴ ۴ ۳ ۴]	۴۲۴۰۰۰	۳۶۷۳۴۳	۱۲۴۰۴۰	۰	۹۱۵۳۸۴

(از ۱۳۰۶۳۲۱ به ۸۴۶۵۷۸ دلار). همچنین هزینه جریمه کمبود منابع از ۲۳۳۸۲۸۰ به ۱۰۶۱۲۵۸ دلار کاهش می‌یابد و در نتیجه هزینه کل حدود ۴۱٪ کاهش می‌یابد. در سطح β ، برنامه تعویض بدون تغییر باقی می‌ماند اما هزینه اصلاحی (به ۵۹۴۷۹۹ دلار) و هزینه جریمه (به ۳۳۴۸۷ دلار) کاهش پیدا می‌کنند که منجر به کاهش بیشتر هزینه کل به ۱۱۵۹۰۴۱ دلار (حدود ۷۲٪ کاهش نسبت به حالت پایه) می‌شود.

این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط محدودیت منابع، افزایش β (کاهش نرخ خرابی در ابتدای عمر) تأثیر بسیار بیشتری بر کاهش هزینه‌ها دارد. در حالت پایه (β)، هزینه جریمه، سهم غالب هزینه کل را تشکیل می‌دهد (حدود ۵۶٪)، اما با افزایش β به β ، هزینه جریمه به کمتر از ۳٪ هزینه کل کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط محدودیت منابع و جریمه سنگین، بهبود قابلیت اطمینان مؤلفه‌ها (با افزایش β) می‌تواند به‌طور چشمگیری هزینه‌های جریمه و اصلاحی را کاهش دهد و مدیران را از پرداخت هزینه‌های سنگین جریمه نجات دهد.

جدول ۱۷. تحلیل حساسیت پارامتر مقیاس (η) با محدودیت ۴۰٪ منابع و جریمه سنگین

Table 17. Sensitivity analysis of scale parameter (η) with 40% resource constraint and heavy penalty

سطح η	برنامه تعویض بهینه	هزینه پیشگیرانه	هزینه اصلاحی	هزینه تخصیص منابع	هزینه جریمه	هزینه کل
۰/۵ η	[۷ ۴ ۸ ۵]	۷۹۲۰۰۰	۲۶۲۰۱۴۴	۲۶۹۰۴۷	۱۷۵۸۲۳۵۶	۲۱۲۶۳۵۴۷
η	[۳ ۲ ۴ ۳]	۴۰۸۰۰۰	۱۳۰۶۳۲۱	۱۳۵۲۶۸	۲۳۳۸۲۸۰	۴۱۸۷۸۶۸
۱/۵ η	[۴ ۳ ۳ ۳]	۳۷۶۰۰۰	۴۴۵۶۰۷	۱۱۱۷۲۷	۰	۹۳۳۳۳۵

۴-۴-۳- آنالیز حساسیت اِتا با منابع نامحدود

جدول ۱۶ تأثیر تغییرات پارامتر مقیاس (η) توزیع وایبل را بر برنامه بهینه تعویض و هزینه‌ها در شرایط منابع نامحدود نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات پارامتر مقیاس (η) تأثیر بسیار چشمگیری بر برنامه بهینه تعویض و هزینه کل دارد. با کاهش η از مقدار پایه به نصف (۰/۵ η)، نرخ خرابی مؤلفه‌ها افزایش یافته و مدل برای جلوگیری از هزینه‌های بالای تعویض اصلاحی، تعداد تعویض‌های پیشگیرانه را به‌شدت افزایش می‌دهد (از [۷ ۶ ۴ ۶] به [۱۳ ۱۳ ۸ ۱۱]) این افزایش باعث می‌شود هزینه کل بیش از دو برابر شود (از ۱۳۷۰۵۸۶ به ۲۷۳۸۵۷۷ دلار).

در مقابل، با افزایش η به ۱/۵ η ، نرخ خرابی کاهش یافته و مدل تعداد تعویض‌های پیشگیرانه را به [۴ ۴ ۳ ۴] کاهش می‌دهد. در این حالت، هزینه کل حدود ۳۳٪ کاهش یافته و به ۹۱۵۳۸۴ دلار می‌رسد. این رفتار نشان می‌دهد که پارامتر مقیاس (η) تأثیر مستقیمی بر نرخ خرابی مؤلفه‌ها دارد و تغییرات آن می‌تواند برنامه بهینه تعویض و هزینه کل را به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار دهد. به عبارت دیگر، در مؤلفه‌هایی با عمر مفید کمتر (η کوچکتر)، انجام تعویض‌های پیشگیرانه بیشتر، علی‌رغم افزایش هزینه‌های جاری، از هزینه‌های بسیار بالاتر تعویض‌های اصلاحی جلوگیری می‌کند.

۴-۴-۴- آنالیز حساسیت اِتا با منابع محدود

جدول ۱۷ تأثیر تغییرات پارامتر مقیاس (η) توزیع وایبل را بر برنامه بهینه تعویض و هزینه‌ها در شرایط محدودیت ۴۰٪ منابع و جریمه سنگین نشان می‌دهد. نتایج جدول نشان می‌دهد که در شرایط محدودیت منابع و جریمه سنگین، تغییرات پارامتر مقیاس (η) تأثیر بسیار چشمگیری بر هزینه کل دارد. در سطح ۰/۵ η (نرخ خرابی بالاتر)، برنامه تعویض به [۷ ۴ ۸ ۵] می‌رسد و هزینه

جریمه کمبود منابع به ۱۷۵۸۲۳۵۶ دلار افزایش می‌یابد که بیش از ۸۲٪ هزینه کل را تشکیل می‌دهد. هزینه کل در این حالت به ۲۱۲۶۳۵۴۷ دلار می‌رسد که بیش از ۵ برابر حالت پایه η است.

در سطح ۱/۵ η (نرخ خرابی پایین‌تر)، برنامه تعویض به [۴ ۳ ۳ ۳] کاهش می‌یابد و هزینه جریمه به صفر می‌رسد. هزینه کل در این حالت به ۹۳۳۳۳۵ دلار کاهش می‌یابد که حدود ۷۸٪ کمتر از حالت پایه است.

مقایسه نتایج دو حالت منابع نامحدود و محدودیت منابع نشان می‌دهد که در شرایط محدودیت منابع، تأثیر تغییرات η بر هزینه کل، بسیار بیشتر است. در حالت ۰/۵ η با منابع نامحدود، هزینه کل ۲۷۳۸۵۷۷ دلار بود، اما با اعمال محدودیت ۴۰٪ منابع، این مقدار به ۲۱۲۶۳۵۴۷ دلار افزایش یافته است (افزایش حدود ۶۷٪). این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط نرخ خرابی بالا، محدودیت منابع می‌تواند هزینه‌های بسیار سنگینی را به سیستم تحمیل کند و مدیران باید در چنین شرایطی، تأمین منابع کافی را در اولویت قرار دهند. در مقابل، در سطح ۱/۵ η ، محدودیت منابع تأثیر چندانی بر هزینه کل ندارد (۹۱۵۳۸۴ دلار در حالت نامحدود در مقابل ۹۳۳۳۳۵ دلار در حالت محدودیت) که نشان می‌دهد در شرایط نرخ خرابی پایین، مدل به‌خوبی می‌تواند با محدودیت منابع کنار بیاید.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، به یکی از مسائل مهم در مزارع بادی یعنی بهینه‌سازی همزمان استراتژی نگهداری و تعمیرات و تخصیص منابع پرداخته شد. با توجه به هزینه‌بر بودن عملیات نگهداری و تعمیرات و نیز محدودیت‌های منابع در دنیای واقعی، طراحی یک مدل جامع که بتواند این دو جنبه را به‌طور همزمان بهینه کند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

در ابتدا، ضرورت پرداختن به این موضوع با مرور ادبیات پژوهش تشریح شد. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان داد که اغلب مطالعات موجود، استراتژی نگهداری و تعمیرات را به صورت ثابت و از پیش تعیین شده در نظر گرفته‌اند و کمتر به بهینه‌سازی همزمان آن با تخصیص منابع پرداخته‌اند. همچنین، هزینه جریمه کمبود منابع به عنوان یکی از چالش‌های کلیدی در عملیات نت، در مطالعات گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

مدل ریاضی پیشنهادی در این پژوهش، با هدف کمینه‌سازی متوسط مجموعه هزینه‌های تخصیص منابع، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات (شامل تعویض‌های پیشگیرانه و اصلاحی) و هزینه جریمه کمبود منابع در طول چرخه عمر مزارع بادی تدوین شد. مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه حل گردید و نتایج آن بر روی یک مثال عددی برگرفته از پژوهش‌های معتبر، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

نتایج حاصل از حل مدل نشان داد که برنامه تعویض پیشگیرانه بهینه به صورت $N = [7, 6, 4, 6]$ با متوسط هزینه کل $E[C_T] = 1,370,586$ دلار در طول ۲۰ سال به دست می‌آید. ماتریس تخصیص منابع و متوسط میزان منابع مصرف‌شده در هر ماه نیز محاسبه گردید. نمودار همگرایی الگوریتم، عملکرد صحیح روش حل را تأیید کرد. همچنین، به منظور کاهش اثر تصادفی بودن الگوریتم ژنتیک، مدل ۱۰ بار به صورت مستقل اجرا شد که نتایج نشان‌دهنده پایداری بسیار بالای الگوریتم و همگرایی آن به جواب یکسان در اکثر سناریوها بود.

تحلیل حساسیت در چهار حالت مختلف (تعویض انفرادی با منابع نامحدود، تعویض انفرادی با محدودیت منابع، تعویض گروهی با منابع نامحدود و تعویض گروهی با محدودیت منابع) انجام شد. همچنین، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای توزیع وایبل انجام گردید. یافته‌های کلیدی این تحلیل عبارتند از:

(۱) در حالت منابع نامحدود، هزینه جریمه کمبود منابع تأثیری بر جواب بهینه ندارد و استراتژی نت مستقل از آن است.

(۲) با کاهش منابع در دسترس، تعداد کل عملیات نت (مجموع تعویض‌های پیشگیرانه و اصلاحی) کاهش می‌یابد و مدل با کاهش تعویض‌های پیشگیرانه، سعی در کاهش مصرف منابع دارد تا

از بروز کمبود منابع و تحمیل هزینه‌های جریمه جلوگیری کند. در سطوح کاهش ۳۰٪ به بعد، برنامه تعویض پیشگیرانه به جواب‌های پایداری محدود می‌شود و کاهش بیشتر آن ممکن نیست، زیرا کاهش بیشتر تعویض‌های پیشگیرانه منجر به افزایش شدید خرابی‌ها و هزینه‌های اصلاحی می‌شود که خود نیازمند صرف منابع بیشتری است.

(۳) با کاهش هزینه جریمه‌ی کمبود منابع (جریمه سبک‌تر)، تعداد تعویض‌های پیشگیرانه افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، زمانی که هزینه جریمه‌ی کمبود منابع زیاد است (جریمه سنگین)، مدل تمایل دارد تعویض‌های پیشگیرانه کمتری انجام دهد تا از پرداخت جریمه جلوگیری کند. در مقابل، زمانی که هزینه جریمه ناچیز است، مدل برنامه تعویض کامل‌تری را اجرا کرده و در صورت نیاز، جریمه را می‌پذیرد.

(۴) مقایسه دو حالت جریمه سنگین و سبک نشان داد که در سطوح پایین کاهش منابع (تا ۲۰٪)، تفاوت هزینه کل در دو حالت ناچیز است، اما در سطوح بالای کاهش منابع (۳۰٪ به بعد)، هزینه جریمه سنگین به سرعت افزایش یافته و هزینه کل را به شدت بالا می‌برد.

(۵) تعویض انفرادی مؤلفه‌ها در مقایسه با تعویض گروهی، هزینه کل کمتری دارد و پاسخ بهینه‌تری ارائه می‌دهد. اگرچه تعویض گروهی منابع کمتری مصرف می‌کند، اما افزایش فاصله زمانی بین تعویض‌های پیشگیرانه، احتمال خرابی و هزینه‌های تعویض اصلاحی را به شدت افزایش می‌دهد و این افزایش هزینه‌ها، هرگونه صرفه‌جویی را خنثی می‌کند. همچنین، در حالت تعویض گروهی با محدودیت منابع، مدل انعطاف‌پذیری کمتری نسبت به حالت تعویض انفرادی دارد و در مواجهه با سطوح مختلف محدودیت منابع، جواب‌های ثابتی ارائه می‌دهد.

(۶) تحلیل حساسیت پارامترهای وایبل نشان داد که تغییرات پارامتر مقیاس (η) تأثیر بسیار بیشتری بر هزینه کل نسبت به تغییرات پارامتر شکل

خرابی پایین‌تر) می‌تواند به‌طور چشمگیری هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را در طول چرخه عمر کاهش دهد. از نظر مفاهیم نظری، این پژوهش با معرفی یک مدل یکپارچه برای بهینه‌سازی همزمان استراتژی نت و تخصیص منابع با در نظر گرفتن هزینه جریمه کمبود منابع، به غنای ادبیات موضوع در حوزه نگهداری و تعمیرات مزارع بادی افزوده است. همچنین، مقایسه استراتژی‌های تعویض انفرادی و گروهی و تحلیل رفتار مدل در سطوح مختلف محدودیت منابع و تحلیل حساسیت پارامترهای وایبل، بینش‌های جدیدی را در این حوزه ارائه می‌دهد.

یکی از محدودیت‌های این پژوهش، فرض نرخ تورم ثابت در طول زمان است، در حالی که در دنیای واقعی، نرخ تورم ممکن است نوسان داشته باشد. با این حال، نتایج نشان می‌دهد نرخ تورم ثابت بر برنامه بهینه تعویض تأثیری ندارد، این فرض با هدف اصلی پژوهش (تعیین برنامه بهینه تعویض) همخوانی دارد. علاوه بر این، از مدت زمان لازم جهت انجام عملیات نگهداری و تعمیرات صرف‌نظر شده است و محدودیت دیگر، عدم بررسی لجستیک و حمل‌ونقل منابع نگهداری و تعمیرات است. در دنیای واقعی، دسترسی به منابع به ویژه در مزارع بادی فراساحلی با چالش‌های لجستیکی همراه است که می‌تواند بر عملکرد سیستم نت تأثیر بگذارد.

موارد زیر برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود:

- (۱) توسعه مدل به صورت چندهدفه با اضافه کردن هدف پایداری و زیستمحیطی (مانند کاهش انتشار کربن ناشی از حمل‌ونقل منابع).
- (۲) در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای نرخ خرابی و هزینه‌ها با استفاده از رویکردهای تصادفی یا فازی.
- (۳) بررسی تأثیر شرایط آب و هوایی بر دسترسی به منابع و برنامه‌ریزی نت در مزارع بادی فراساحلی.
- (۴) توسعه مدل تعویض گروهی مبتنی بر عمر باقیمانده مؤلفه‌ها و تصمیم‌گیری برای تعویض همزمان تنها در صورتی که از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد.
- (۵) توسعه یک مدل یکپارچه که استراتژی نگهداری و تعمیرات، تخصیص منابع و لجستیک حمل‌ونقل را به صورت همزمان بهینه کند.

(β) دارد. در شرایط محدودیت منابع و جریمه سنگین، کاهش η (افزایش نرخ خرابی) می‌تواند هزینه کل را تا بیش از ۵ برابر افزایش دهد، در حالی که افزایش η (کاهش نرخ خرابی) هزینه جریمه را به صفر رسانده و هزینه کل را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. این یافته تأکید می‌کند که در مزارع بادی با مؤلفه‌های با قابلیت اطمینان پایین، تأمین منابع کافی برای انجام تعویض‌های پیشگیرانه از اهمیت حیاتی برخوردار است.

(۷) افزایش پارامتر شکل (β) از مقدار پایه به دو برابر، هزینه کل را در حالت محدودیت منابع تا ۷۲٪ کاهش می‌دهد که نشان می‌دهد کیفیت بالاتر مؤلفه‌ها (با نرخ خرابی پایین‌تر در ابتدای عمر) می‌تواند به‌طور چشمگیری هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را در طول چرخه عمر کاهش داده و سرمایه‌گذاری در این زمینه را توجیه‌پذیر سازد.

(۸) اگرچه تورم بر مقدار مطلق هزینه‌ها تأثیر دارد، اما با توجه به اثبات ریاضی ارائه‌شده، نرخ تورم به‌عنوان یک ضریب ثابت در تابع هدف ظاهر می‌شود و بر برنامه بهینه تعویض تأثیری ندارد.

از نظر مفاهیم عملی، نتایج این پژوهش برای مدیران برنامه‌ریزان مزارع بادی کاربرد مستقیم دارد. مدل ارائه‌شده می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری برای تعیین استراتژی بهینه نگهداری و تعمیرات، تخصیص بهینه منابع و مدیریت هزینه‌ها در شرایط مختلف محدودیت منابع مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، تحلیل حساسیت انجام‌شده نشان می‌دهد که سیاست‌های جریمه سنگین، اگرچه باعث کاهش تعویض‌های پیشگیرانه و در نتیجه کاهش مصرف منابع در کوتاه‌مدت می‌شوند، اما این کاهش تعویض‌ها منجر به افزایش خرابی‌ها و هزینه‌های اصلاحی در بلندمدت می‌گردد و در نهایت هزینه‌های سنگینی را به سیستم تحمیل می‌نماید. بنابراین، مدیران باید در تعیین سیاست‌های جریمه، تعادل بین کاهش هزینه‌های جاری (پیشگیرانه و تخصیص منابع) و افزایش هزینه‌های آتی (اصلاحی و جریمه) را در نظر بگیرند. نتایج تحلیل حساسیت وایبل نیز نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری بر روی مؤلفه‌های با کیفیت بالاتر (با نرخ

- Industrial Engineering*, 157, 107342.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107342>
- Ambarita, E. E., Karlsen, A., Osen, O. & Hasan, A. (2023). Towards fully autonomous floating offshore wind farm operation & maintenance. *Energy Reports*, 9, 103-108.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.148>
- Atashgar, K., & Abdollahzadeh, H. (2016). Reliability optimization of wind farms considering redundancy and opportunistic maintenance strategy. *Energy Conversion and Management*, 112, 445-458.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.027>
- Balasubramanian, K., Thanikanti, S. B., Subramaniam, U., & Sichilalu, S. (2020). A novel review on optimization techniques used in wind farm modelling. *Renewable Energy Focus*, 35, 84-96.
<https://doi.org/10.1016/j.ref.2020.09.001>
- Besnard, F., Fischer, K., & Tjernberg, L. B. (2012). A model for the optimization of the maintenance support organization for offshore wind farms. *IEEE Transactions On Sustainable Energy*, 4(2), 443-450.
<https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2225454>
- Bilal, B., Adjallah, K. H., Yetilmezsoy, K., Bahramian, M., & Kıyan, E. (2021). Determination of wind potential characteristics and techno-economic feasibility analysis of wind turbines for Northwest Africa. *Energy*, 218, 119558.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119558>
- Carlos, S., Sánchez, A., Martorell, S., & Martón, I. (2013). Onshore wind farms maintenance optimization using a stochastic model. *Mathematical and Computer Modelling*, 57(7-8), 1884-1890.
<https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.12.025>
- Dai, L., Stålhane, M., & Utne, I. B. (2015). Routing and scheduling of maintenance fleet for offshore wind farms. *Wind Engineering*, 39(1), 15-30.
<https://doi.org/10.1260/0309-524X.39.1.15>
- Dalgic, Y., Lazakis, I., Dinwoodie, I., McMillan, D., & Revie, M. (2015). Advanced logistics planning for offshore wind farm operation and maintenance activities. *Ocean Engineering*, 101, 211-226.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.040>
- Ding, F., Tian, Z., & Jin, T. (2013). Maintenance modeling and optimization for wind turbine systems: A review. 2013 International conference on quality, reliability, risk, maintenance, and safety engineering (QR2MSE).
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6625648/>

۶) در نظر گرفتن مدت زمان انجام هر عملیات نگهداری و تعمیرات و بررسی احتمال همپوشانی عملیات در برنامه‌ریزی نت.

قدردانی

از سردبیر محترم، داوران ناشناس و عوامل اجرایی نشریه که با زمان‌بندی دقیق و بازبینی‌های سازنده خود به بهبود کیفیت این مقاله کمک شایانی نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنیم.

حمایت مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

مشارکت‌های نویسندگان

حمید مؤکدی: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، نظارت، اعتبارسنجی، نگارش - پیش‌نویس اصلی، نگارش - بازبینی و ویرایش، مدیریت پروژه، منابع، مصورسازی، تحلیل رسمی؛ **مبین عفتی:** بررسی، نرم‌افزار، ساماندهی داده‌ها.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های پشتیبان‌کننده نتایج این مطالعه، برگرفته از پژوهش (Zhang & Yang, 2021) است که در مقاله به آن ارجاع داده شده است. سایر داده‌های تولیدشده یا تحلیل‌شده در این پژوهش، به‌دلیل ادامه‌دار بودن پروژه تحقیقاتی، به‌صورت عمومی در دسترس نیستند، اما در صورت درخواست منطقی از نویسندگان مسئول قابل ارائه خواهند بود.

مراجع

- Allal, A., Sahnoun, M. h., Adjoudj, R., Benslimane, S. M., & Mazar, M. (2021). Multi-agent based simulation-optimization of maintenance routing in offshore wind farms. *Computers &*

- Ramezani, K., Darvish Motevalli, M. H., Motamedi, M., & Movahedi, M. M. (2026). Design of a Preventive Maintenance Mathematical Model for High-speed Press Machines. *System Engineering and Productivity*, 6(1), 251-271 (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/sep.2025.2067829.1372>
- Rinaldi, G., Garcia-Teruel, A., Jeffrey, H., Thies, P. R., & Johanning, L. (2021). Incorporating stochastic operation and maintenance models into the techno-economic analysis of floating offshore wind farms. *Applied Energy*, 301, 117420.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117420>
- 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 (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/sep.2022.243401>
- Schrotenboer, A. H., uit het Broek, M. A., Jargalsaikhan, B., & Roodbergen, K. J. (2018). Coordinating technician allocation and maintenance routing for offshore wind farms. *Computers & Operations Research*, 98, 185-197.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.05.019>
- 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 (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/sep.2025.2051634.1264>
- Stålthane, M., Hvattum, L. M., & Skaar, V. (2015). Optimization of routing and scheduling of vessels to perform maintenance at offshore wind farms. *Energy Procedia*, 80, 92-99.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.411>
- Xiang, H., Liu, Q., Dong, M., & Wang, Y. (2024). Hybrid group opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbines considering maintenance resource allocation in harsh working environments. *Ocean Engineering*, 312, 119147.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119147>
- Zhang, C., & Yang, T. (2021). Optimal maintenance planning and resource allocation for wind farms based on non-dominated sorting genetic algorithm-II. *Renewable Energy*, 164, 1540-1549.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.125>
- Zhao, H., Liu, H., Hu, W., & Yan, X. (2018). Anomaly detection and fault analysis of wind turbine components based on deep learning network. *Renewable Energy*, 127, 825-834.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107342>
- Erguido, A., Márquez, A. C., Castellano, E., & Fernández, J. G. (2017). A dynamic opportunistic maintenance model to maximize energy-based availability while reducing the life cycle cost of wind farms. *Renewable Energy*, 114, 843-856.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.017>
- Froger, A., Gendreau, M., Mendoza, J. E., Pinson, E., & Rousseau, L.-M. (2018). Solving a wind turbine maintenance scheduling problem. *Journal of Scheduling*, 21(1), 53-76.
<https://doi.org/10.1007/s10951-017-0513-5>
- Ganji, M., & Karbasian, M. (2026). Availability Optimization with Mixed Redundancy in the Electrical Power Distribution System of a Vessel Considering Load Sharing. *System Engineering and Productivity*, In Press (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/sep.2026.2091972.1515>
- Golestani, N., Arzaghi, E., Abbassi, R., Garaniya, V., & Meng, H. (2023). A system dynamics model of offshore wind farm degradation: Enabling operation and maintenance planning under foreseen asset management impacts. *Applied Ocean Research*, 138, 103685.
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103685>
- Jardine, A. K., & Tsang, A. H. (2021). *Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications*. CRC press.
<https://doi.org/10.1201/9780429021565>
- Ji, X., Shen, X., Du, Y., Ali, N., & Tan, R. (2025). Two phase optimization method for corrective maintenance of offshore wind farms considering vessel fleet size. *Ocean Engineering*, 341, 122669.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122669>
- Li, M., Jiang, X., Carroll, J., & Negenborn, R. R. (2022). A multi-objective maintenance strategy optimization framework for offshore wind farms considering uncertainty. *Applied Energy*, 321, 119284.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119284>
- Li, W., Xiang, D., & Liang, F. (2026). Multi-objective opportunity maintenance optimization for wind farms considering multiple factors. *Renewable Energy*, 256, 123868.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123868>
- Moakedi, H., Hajizadeh Ebrahimi, F., & Soltanmohammadi, M. (2026). Integrating Sustainability into Maintenance Strategy Selection: A FUCOM-based Case Study from Automotive Parts Industry. *System Engineering and Productivity*, 6(2), 205-235 (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/sep.2025.2074271.1408>
- Nakagawa, T. (2005). *Maintenance theory of reliability*. Springer. <https://doi.org/10.1007/1-84628-221-7>