

## Designing a Stable Integrated Planning Model for Multifaceted Energy Production and Equipment Repairs in the Storage Pump Power Plant in Line with Green Policies

Farid Asgari <sup>1</sup>, Fariborz Jolai <sup>2\*</sup>, Farzad Movahedisobhani <sup>3</sup>

1. Ph.D. Candidate, Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Prof., Department of Industrial Engineering, Science and Research Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3. Assistant Prof., Department of Industrial Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

### OPEN ACCESS

**Article type:** Research Article

**\*Correspondence:** Fariborz Jolai  
fjolai@ut.ac.ir

**Received:** June 1, 2024

**Accepted:** October 16, 2024

**Published:** Autumn 2024

**Citation:** Asgari, F., Jolai, F., Movahedisobhani, F. (2024). Designing a Stable Integrated Planning Model for Multifaceted Energy Production and Equipment Repairs in the Storage Pump Power Plant in Line with Green Policies. *Journal of Management and Sustainable Development Studies*, 4(3), 25-51.

**Publisher's Note:** MSDS stays neutral with regard to jurisdictional claims in published material and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Abstract:** Energy production in pumped power plants, reserve strategy, and continuous exploitation of these power plants are some of the successful policies of governments. Therefore, in this research, the minimization of the cost of energy production and maintenance and repairs in one of the large storage pump power plants in Iran in line with green policies has been discussed based on the simulation-optimization strategy. In the introduced MINLP model, optimization of the cost of maintenance and repairs based on the amount of production, operating hours of the power plant, and the deficit level of energy production, taking into account the uncertainty in the demand level of the network, is presented using the feasibility planning method. To solve the mathematical model in small dimensions, the CPLEX exact solution algorithm was solved in GAMS software, and in large sizes, two meta-heuristic algorithms GA and ICA were used with binary coding in MATLAB software. The results of this research have shown that the solution of the meta-heuristic algorithm has been implemented in a suitable period despite the approximation of optimal solutions with a confidence factor of 95%, and the results of the research indicate the applicability of the presented model in the studied power plant.

**Keywords:** Production Planning, Maintenance and Repairs, Storage Pump Power Plant, Meta-heuristic Algorithm GA and ICA.

### Extended Abstract

#### Introduction

Storage-pumped power plants, in addition to producing energy for the national power grid, consume the energy needed to transfer the energy-producing fluid from the lower reservoir to the upper reservoir during

peak load reduction hours (Elgamal et al., 2019). Due to their high production capacity, these power plants have the possibility of producing energy in emergency mode and non-operating defense (Shafiee et al., 2019). Pumped storage power plants gather electrical output from several scattered energy sources and provide this source to the national electricity distribution network. On-demand, pumped storage plants control the immediate dispatch of connected plants, thereby helping to increase energy production and grid reliability (Hadayeghparast et al., 2019). The problem of quick response to the required energy level of the network and demand response programs (DRP) to provide reserve capacity is a suitable solution to compensate for the unforeseen fluctuations in the energy consumption network, one of the characteristics of pumped power plants (Akkaş & Çam, 2019).

Having proper production planning during the planning horizon is a factor that will lead to the optimal use of the organization's resources, including human resources, equipment, financial resources, etc. According to the evaluation done in the research literature, so far, the issue of scheduling of production, maintenance, and repairs in the pumped power plant process has not been evaluated and analyzed, and in the implementation strategy, nominal capacity and equipment overload and breakdown timing have not been analyzed. On the other hand, the problem of production scheduling is a problem with many uncertainties, which have been analyzed based on the simulation model and possible planning. Therefore, in this research, a new policy is presented in the field of optimizing energy production in the pump power plant based on demand generation policies and the implementation of the maintenance and repairs program. The innovations considered in this research can be used for the topics related to the use of several energy sources for refilling tanks at rated load and overload, as well as a planning model for demand response and maintenance and repairs in the uncertain environment, taking into account The objective function of minimizing the cost of production and maintenance in the pumped storage power plant will be introduced.

### **Theoretical framework**

Renewable energy is a type of energy that, unlike non-renewable (fossil) energy, can be regenerated by nature in a short period or easily replaced after consumption. Green energy is also referred to as a source of energy that is in harmony with the environment and their production process does not cause environmental pollution. Currently, energy from wind, sun, internal heat of the earth, and running water are known as the most famous sources of green energy. Also, according to some experts, nuclear energy can be considered by taking into account considerations such as green energy. Using the word green next to the above energy sources is because these sources do not produce carbon dioxide like plants (Badam Firouz & Shariat Modari, 2019).

Today, in the electricity industry, optimal and effective economic design and operation are always considered, and in the development and operation of the electricity industry, the economic distribution of the load between fossil fuel power plants and minimizing the cost of operation are the main goals. One of the important issues in economic load distribution is coordination between power plants. Pumped-storage power plants are types of hydroelectric power plants that transfer energy from low-use hours to high-use hours with the help of a motor, as a result of which the excess electricity produced and not consumed in non-peak hours is converted into potential energy (Khodaparast & Ghezlbash, 2016).

## **Methodology**

In this research, according to the discrete and quasi-scenario nature of the data, Mulvey's stable formulation has been used for the stable approach. This is because Mulvey's model has a better analysis compared to other stability methods for the mathematical formulation of evaluation noises. Mulvey's approach is presented in two areas: model stability and solution stability.

To formulate the problem based on the robust optimization method, model symbols are introduced. The X-axis represents the design parameters while the Y-axis represents the proof parameters. A, B, and C are parameter coefficients, b and e are parameter vectors (values on the right). A and B are certain values, while B, C, and e have an indeterminate nature. A specific understanding of uncertainty parameters is called a scenario, which is assigned the symbol s and its probability is denoted by  $P_s$ .

## **Discussion and Results**

Based on the results obtained from the correlation coefficients of the factors for the SN ratios, it was observed that at the 95% confidence level, the factors  $P_c=0.6$ ,  $P_m=0.10$ ,  $P_{mu}=0.12$ ,  $G_{max}=300$  and had a significant effect on the responses. Also, for the tested factors, an analysis of variance was performed with respect to the SN coefficient and the average of the responses. According to the analysis of variance, as expected, the factors  $P_{(m)}$ ,  $P_c$ , and  $G_{max}$  with P value less than 0.05 have a significant effect on the answers. Based on the results of the correlation coefficients of the factors for SN ratios, it was observed that at the 95% confidence level, the factors  $Pop_{ICA}=400$ ,  $decade=300$ ,  $P_{ICA}=1$  have a significant effect on the answers. Also, for the tested factors, an analysis of variance was done concerning the SN coefficient and the average of the responses. According to the analysis of variance, as expected, the decade,  $P_{ICA}$ , and  $Pop_{ICA}$  factors with a P value of less than 0.05 have an effect. They are meaningful in the answers. The results show that the  $Pop_{ICA}$  factor has the highest rank, followed by the  $P_{ICA}$  factor. The ranking of the decade factor is also the same for the average responses and SN coefficients.

## **Conclusion**

Today, in order to face the fierce competition of the ruler, many production organizations have invested in fully automatic production system with modern equipment. In order to be sustainable from the economic point of view, these expensive equipments should be used until the last moment of their generator life. When an unwanted breakdown, caused by a failure, happens; It causes a decrease in productivity of the system and violates the current production plan. Revision of the production plan in emergency conditions is usually very expensive and often causes changes in the organizational and executive structures of companies. On the other hand, the use of storage pump power plants as one of the ways to adjust the amount of loss in the supply and demand of electric energy, long-term energy storage, etc. is one of the advantages of this system. The operation of these power plants improves the state of energy production at the national level in advanced and developing countries. Therefore, dealing with the issues of production, maintenance and repairs together will increase the efficiency of pumped power plants, and in this research, the mathematical model of planning in this area was presented. According to the results of the research, it was shown that a stable planning is considered the most important functional area of energy plants.

**Contribution of authors**

All authors have participated in this research in equal proportion.

**Ethical approval**

There are no human subjects in this article and informed consent is not applicable.

**Conflict of interest**

No conflicts of interest are declared by the authors.

# مطالعات مدیریت و توسعه پایدار

سال چهارم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۳ - صفحه ۵۱-۲۵

Homepage: <https://sanad.iau.ir/journal/msds> - e-ISSN: 2783-4395

## طراحی مدل برنامه‌ریزی استوار یکپارچه تولید انرژی چند وجهی و تعمیرات تجهیزات در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در راستای سیاست‌گذاری‌های سبز

فرید عسگری<sup>۱</sup>، فریبرز جولای<sup>۲\*</sup>، فرزاد موحدی سبحانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲. استاد گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۳. استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

**چکیده:** تولید انرژی در بخش نیروگاه‌های تلمبه‌ای، استراتژی ذخیره و بهره‌برداری دائم از این نیروگاه‌ها یکی از سیاست‌های موفق دولت‌ها است. از این رو در این پژوهش حداقل‌سازی میزان هزینه‌های تولید انرژی و نگهداری و تعمیرات در یکی از نیروگاه‌های بزرگ تلمبه ذخیره‌ای در ایران در راستای سیاست‌گذاری‌های سبز بر اساس راهبرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی پرداخته شده است. در مدل MINLP معرفی شده بدنبال بهینه‌سازی هزینه نگهداری و تعمیرات بر اساس میزان تولید، ساعت کارکرد نیروگاه، سطح کسری تولید انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در سطح تقاضای شبکه با استفاده از روش برنامه‌ریزی امکانی ارائه شده است. جهت حل مدل ریاضی در ابعاد کوچک از الگوریتم حل دقیق CPLEX در نرم افزار GAMS حل شده است و در ابعاد بزرگ از دو الگوریتم فرا ابتکاری GA و ICA با کدنویسی دودویی در نرم‌افزار متلب بهره‌گیری شد. نتایج این پژوهش نشان داده است که حل الگوریتم فرا ابتکاری با وجود تقریب جواب‌های بهینه با ضریب اطمینان ۹۵ درصد در مدت زمان مناسبی اجرا شده است و نتایج پژوهش به کاربردی بودن مدل ارائه شده در نیروگاه مورد مطالعه اشاره دارد.

**واژگان کلیدی:** برنامه‌ریزی تولید، نگهداری و تعمیرات، نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، الگوریتم فرا ابتکاری GA و ICA.

دسترسی آزاد

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

\*نویسنده مسئول: فریبرز جولای

fjolai@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۳

**استناد:** عسگری، فرید، جولای، فریبرز، موحدی سبحانی، فرزاد. (۱۴۰۳). طراحی مدل برنامه‌ریزی استوار یکپارچه تولید انرژی چند وجهی و تعمیرات تجهیزات در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در راستای سیاست‌گذاری‌های سبز. فصلنامه مطالعات مدیریت و توسعه پایدار، ۴(۳)، ۲۵-۵۱.

یادداشت ناشر: MSDS در خصوص ادعاهای قضایی در مطالب منتشر شده و وابستگی‌های سازمانی بی‌طرف می‌ماند.



© 2024 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### مقدمه

نیروگاه‌های تولید انرژی تلمبه ذخیره‌ای، برنامه‌ریزی فرایند تولید و کنترل بار را از طریق دپارتمان کنترل مرکزی دریافت می‌کنند. نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای، علاوه بر اینکه برای تولید انرژی مورد نیاز شبکه برق سراسری تولید انرژی انجام می‌دهند،

در ساعات کاهش اوج مصرف بار شبکه، انرژی مورد نیاز برای انتقال سیال تولید کننده انرژی از مخزن پایین به مخزن بالا مصرف می کنند (Elgamal et al., 2019). این نیروگاهها به دلیل ظرفیت تولید بالا، امکان تولید انرژی در حالت اضطراری و پدافندی غیر عامل را دارا هستند (Shafiee et al., 2019). نیروگاههای تلمبه ذخیره‌ای، خروجی الکتریکی را از چند منبع انرژی پراکنده جمع می کند و این منبع را در اختیار شبکه توزیع برق سراسری قرار می دهد. در صورت درخواست، نیروگاههای تلمبه ذخیره‌ای دیسپاچ فوری نیروگاههای متصل را کنترل می کند و در نتیجه به افزایش تولید انرژی و قابلیت اطمینان شبکه کمک می کند (Hadayeghparast et al., 2019). مسأله پاسخ سریع به سطح انرژی مورد نیاز شبکه و برنامه‌های پاسخگویی به تقاضاها (DRP) با هدف فراهم کردن ظرفیت رزرو، راه حل مناسبی برای جبران نوسانات پیش‌بینی نشده در شبکه مصرف انرژی یکی از ویژگی‌های نیروگاههای تلمبه‌ای است (Akkaş & Çam, 2019). از سوی دیگر، با توجه به اهمیت زمانبندی تولید انرژی در نیروگاهها، مقالات متعددی نیروگاههای تلمبه ذخیره‌ای و چالش‌ها و فرصت‌های آنها را در مسائل زمان‌بندی بهینه یا استراتژی تعیین قیمت در بازارها بحث و بررسی کرده‌اند (Elgamal et al., 2019; Martínez-Lucas et al., 2019; Özyön, 2020; Vasconcelos et al., 2019; Wu et al., 2020; Yin et al., 2020). از این رو یکی از مهمترین مسائلی که در بهره‌برداری سیستم قدرت باید مورد توجه قرار بگیرد، تعادل میان برنامه‌ریزی تولید و مصرف می باشد. به این معنا که در هر لحظه از زمان میزان تولید نیروگاهها باید با مجموع بار مصرفی و تلفات شبکه قدرت برابر باشد. در غیر این صورت حتی اگر میزان عدم تعادل کم باشد، فرکانس تغییر نموده و باعث بروز مشکلات متعدد در شبکه قدرت می گردد (Mennemann et al., 2019). بر اساس بار پیش‌بینی شده در یک برنامه بهینه‌سازی سعی می شود سهم هر کدام از نیروگاهها در تأمین بار مشخص شود. با عنایت به اینکه امروزه قابلیت اطمینان در سیستم قدرت از اهمیت بالایی برخوردار شده و هیچ مشتری نمی پذیرد که برق حتی برای مدت بسیار کوتاهی قطع گردد، باید تمهیداتی در بهره‌برداری سیستم قدرت به منظور جلوگیری از قطعی برق صورت پذیرد (Yao et al., 2019).

پیشرفت‌های اخیر در یکپارچه‌سازی برنامه تولید و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه موجب اتصال مباحث مقدار تولید اقتصادی<sup>۱</sup> و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (Sana, 2012)، کنترل همزمان نرخ تولید، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه شده است<sup>۲</sup> (Berthaut et al., 2011). داشتن برنامه‌ریزی تولید مناسب در طول افق برنامه‌ریزی، عاملی است که استفاده بهینه از منابع سازمان اعم از منابع انسانی، تجهیزات، منابع مالی و ... را به دنبال خواهد داشت. با توجه به ارزیابی صورت پذیرفته در ادبیات پژوهشی، تاکنون مسأله زمانبندی توان تولید و نگهداری و تعمیرات در فرآیند نیروگاه تلمبه‌ای مورد ارزیابی و تحلیل قرار نگرفته است و در راهبرد اجرایی، ظرفیت نامی و اوور لود تجهیزات و زمان‌بندی خرابی مورد تحلیل قرار نگرفته است. از سوی دیگر، مسأله زمان‌بندی تولید یک مسأله با عدم قطعیت‌های فراوانی است که بر اساس مدل شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی امکانی به تحلیل آن پرداخته شده است. از این رو در این

<sup>1</sup> Economic Production Quantity (EPQ)

<sup>2</sup> Preventive Maintenance (PM)

پژوهش سیاست جدیدی در حوزه بهینه‌سازی تولید انرژی در نیروگاه تلمبه‌ای بر اساس سیاست‌های تولید تقاضا و اجرای برنامه نگهداری و تعمیرات ارائه می‌شود. از نوآوری‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش می‌توان به مباحث مربوط به استفاده از چندین منبع انرژی برای بازپرسازی مخازن در بار نامی و اوور لود استفاده شود و همچنین یک مدل برنامه‌ریزی پاسخ به تقاضا و نگهداری و تعمیرات در فضای عدم قطعیت با در نظر گرفتن تابع هدف کمینه‌سازی هزینه تولید و تعمیرات در نیروگاه تلمبه مخزنی معرفی خواهد شد.

### مبانی نظری و پیشینه پژوهش

انرژی تجدیدپذیر به انواعی از انرژی می‌گویند که منبع تولید آن نوع انرژی، بر خلاف انرژی‌های تجدیدناپذیر (فسیلی)، قابلیت آن را دارد که توسط طبیعت در یک بازه زمانی کوتاه مجدداً به‌وجود آمده یا پس از مصرف به راحتی جایگزین می‌شوند. انرژی سبز نیز به منابعی از انرژی گفته می‌شود که در هماهنگی با محیط خود باشند و فرآیند تولید آنها آلودگی‌های زیست‌محیطی به‌بار نیاورد. در حال حاضر انرژی حاصل از باد، خورشید، گرمای درونی زمین و آب‌های روان به‌عنوان معروف‌ترین منابع انرژی سبز شناخته می‌شوند. همچنین، به اعتقاد برخی کارشناسان انرژی هسته‌ای را نیز می‌توان با در نظر گرفتن ملاحظاتی از جمله انرژی‌های سبز به حساب آورد. به کار بردن کلمه سبز در کنار منابع انرژی فوق از آن جهت است که این منابع همچون گیاهان دی‌اکسید کربن تولید نمی‌کنند (Badam Firouz & Shariat, 2019).

امروزه در صنعت برق طراحی و بهره‌برداری بهینه و مؤثر اقتصادی همواره مد نظر بوده و در توسعه و بهره‌برداری از صنعت برق، توزیع اقتصادی بار بین نیروگاه‌های سوخت فسیلی و حداقل کردن هزینه بهره‌برداری از اهداف اصلی به شمار می‌آیند. یکی از مسائل مورد توجه در توزیع اقتصادی بار، هماهنگی بین نیروگاه‌ها است. نیروگاه‌های تلمبه‌ای - ذخیره‌ای از انواع نیروگاه‌های برق آبی هستند که با عملکرد موتوری، انتقال انرژی را از ساعت‌های کم مصرف به ساعت‌های پرمصرف انجام می‌دهند که در نتیجه آن مازاد برق تولیدی و غیر قابل مصرف در ساعات غیر پیک به انرژی پتانسیل تبدیل می‌گردد (Khodaparast & Ghezelbash, 2016).

نتایج پژوهش هم‌رول<sup>۱</sup> (۲۰۱۸) نشان داده است که تمام رویکردهای نگهداری و بهبود فرایندهای تولید با عنوان «استراتژی‌های اقدام مؤثر» و تمامی روش‌های حمایت از آن به عنوان «روش‌های عمل کارآمد» اشاره دارد (Hamrol, 2018). نتایج پژوهش چریبر<sup>۲</sup> (۲۰۱۸) نشان داده که افزایش هزینه‌های تولید و الزامات بازدهی به طور مداوم برای شرکت‌های تولیدی مواجه است. یکی از راه‌های غلبه بر این چالش‌ها، ارتقاء بهره‌وری و اثربخشی تعمیر و نگهداری با توسعه و یکپارچه‌سازی ابزارهای پیش‌بینی‌کننده نگهداری و استفاده از این اطلاعات برای برنامه‌ریزی هدفمند اقدامات تعمیر و نگهداری است (Schreiber et al., 2018). از نظر لیو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۸) برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری و

<sup>1</sup> Hamrol

<sup>2</sup> Schreiber

<sup>3</sup> Liu

برنامه‌ریزی تولید دو فعالیت است که وابسته به یکدیگر هستند، اما اغلب به طور مستقل در تولید انجام می‌شود. برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری بر زمان تولید در دسترس و احتمال شکست تأثیر می‌گذارد (Liu et al., 2018). نتایج پژوهش ژیاو<sup>۱</sup> (۲۰۱۹) نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان تجهیزات به طور قابل توجهی بر بهره‌وری تأثیر می‌گذارد، و برای به دست آوردن قابلیت اطمینان تجهیزات و بهره‌وری بالا، تصمیم‌گیری در مورد نگهداری و تولید باید بطور هم‌زمان گرفته شود تا سیستم تولید سالم بماند. هزینه نگهداری، هزینه تنظیم، هزینه نگهداری موجودی، هزینه کمبود، هزینه تولید و هزینه کیفیت با تقاضای نامشخص و تضمین کیفیت محصول ناشی از خراب شدن تجهیزات تجزیه و تحلیل می‌شود (Xiao et al., 2019). به اعتقاد گلوور<sup>۲</sup> (۲۰۱۸) سیستم‌های تولید و برنامه‌ریزی تولید فعلی شرکت‌های تولید شامل راهبردهای نگهداری آینده‌ای نیستند که امکان پیش بینی دقیق وظایف تعمیر و نگهداری را فراهم می‌کنند. بر اساس یک استراتژی نگهداری پیشگویی، این مدل اقداماتی را برای به حداقل رساندن هزینه‌های تولید عمومی و همچنین هزینه‌های تعمیر و نگهداری طی یک افق برنامه‌ریزی محدود می‌کند (Glawar et al., 2018).

نتایج تحقیق تن<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۷) نشان می‌دهد که عملکرد سیستم‌های تولید مدرن همچنان تحت تأثیر آسیب‌ها و خرابی‌های دستگاه قرار می‌گیرد. برنامه‌های تعمیر و نگهداری کافی باید به منظور رفع نیازهای در طول توقف تولید به علت شکست‌های غیرمنتظره یا اقدامات پیشگیرانه (PM) انجام شود. از این رو الگوریتم شبیه‌سازی شده بر روی آن لایینی همراه با یک ماژول شبیه‌سازی مونت کارلو به عنوان یک روش حل و فصل پیشنهاد شده است (Tan et al., 2017). کانگ<sup>۴</sup> (۲۰۱۸) در پژوهش خود به کنترل یکپارچه تعمیر و نگهداری پویا و تولید در یک سیستم تولید ناخوشایند اشاره دارد. در مقاله وی یک سیاست حفظ پویا ارائه می‌شود که شامل تعمیرات اصلاحی، پیشگیرانه و فرصت‌های بالقوه است. تعمیر و نگهداری فرصت‌های شغلی از خرابی ماشین‌ها به عنوان فرصت‌های بالقوه برای انجام تعمیر و نگهداری در سایر ماشین‌ها استفاده می‌کند (Kang & Subramaniam, 2018).

در پژوهش اگیر<sup>۵</sup> (۲۰۱۸) رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی متوسط مدت برای ادغام برنامه‌ریزی تولید، برنامه‌ریزی و نگهداری پیشنهاد شده است. مشکل مطرح شده در پژوهش وی یک کارخانه تولید چند مرحله‌ای با واحدهای موازی و منابع محدود است (Aguirre & Papageorgiou, 2018). بودجلیدا<sup>۶</sup> (۲۰۱۹) در پژوهش خود بیان داشته که تولید و نگهداری پیشگیرانه در صنایع بسیار مهم و استراتژیک عمل می‌کنند. با این حال، در بیشتر کارگاه تولیدی واقعی، برنامه‌ریزی فعالیت‌های مربوطه خود مستقل است و محدودیت تولید را نمی‌توان به خوبی برنامه‌ریزی کرد. بنابراین، با مشکل زمان‌بندی تولید و تعمیر و نگهداری و پیشگیری مواجه هستیم (Boudjelida, 2019).

---

<sup>1</sup> Xiao

<sup>2</sup> Glawar

<sup>3</sup> Tan

<sup>4</sup> Kang

<sup>5</sup> Aguirre

<sup>6</sup> Boudjelida



شیخعلی‌شاهی<sup>۱</sup> (۲۰۱۹) در پژوهش خود مدل برنامه‌ریزی تولید را با در نظر گرفتن خطای انسانی و نگهداری پیشگیرانه ارائه کرده است. مدل پیشنهادی ریاضی شامل تمرکز بر اهداف متضاد شامل خطای کاری، خطای انسانی و قابلیت اطمینان به ماشین است. به منظور دستیابی به برنامه‌ریزی مطلوب، خطاهای انسانی، تعمیر و نگهداری و عوامل تولید به طور همزمان مورد توجه قرار می‌گیرند. خطای انسانی با روش ارزیابی و کاهش خطاهای انسانی (HEART) سنجیده می‌شود (Sheikhalishahi et al., 2019).

### معرفی مورد مطالعه

در تحقیقات میدانی انجام شده در این پژوهش، تأمین تقاضای انرژی الکتریکی مشترکان در ساعت‌هایی که نیاز مصرف کنندگان بیشینه می‌شود (ساعت‌های اوج مصرف) یکی از دغدغه‌ها و موضوعات مهمی است که مدیریت شبکه الکتریکی همواره درگیر آن است. هر سال میزان تقاضای بارهای الکتریکی در ایران در ساعت‌های اوج مصرف شاهد رشد درخور توجهی نسبت به سالیان قبل است. برای نمونه، میزان پیک سراسری بار سالانه طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ به ترتیب برابر با ۵۳۰۴۱ مگاوات، ۵۵۴۴۲ مگاوات و ۵۷۰۹۷ مگاوات است. بررسی پیک‌های سراسری سالانه ده سال اخیر بیان‌کننده رشد میانگین سالانه ۸/۴ درصدی بار پیک سراسری در هر سال است. از سوی دیگر، ساعت‌های اوج مصرف، درصد کمی از کل زمان‌های سال را شامل می‌شود که برای تأمین بار آن باید نیروگاه‌های جدیدی احداث شود که فقط در ساعت‌های اوج مصرف سالانه بهره‌برداری می‌شوند. از آنجا که اختلاف میزان تقاضای بارهای الکتریکی در ساعت‌های کم بار و اوج بار در برخی از روزها به چند هزار مگاوات نیز می‌رسد، استفاده از نیروگاه‌های برق آبی تلمبه - ذخیره با ظرفیت مناسب برای تسطیح منحنی تولید و مصرف توان الکتریکی، بسیار کارآمد و قابل توجه است.

نیروگاه‌های تلمبه - ذخیره به طور گسترده برای ذخیره انرژی استفاده می‌شوند. در زمان‌هایی که تقاضای برق کم است (معمولاً نیمه شب)، اضافه تولید نیروگاه‌های الکتریکی توسط پمپاژ آب از یک مخزن پایین‌تر به یک مخزن بالاتر انتقال می‌یابد و سیال در سد بالاتر ذخیره می‌شود. طی روز هنگامی که تقاضا افزایش می‌یابد، انرژی ذخیره شده (در قالب اختلاف پتانسیل سیال) به برق تبدیل می‌شود. لذا، طی فرایند ذخیره‌سازی و تولید توان، حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد اتلاف انرژی نیز وجود دارد. به طور معمول، فرایند تلمبه کردن ۱۳/۶ درصد تلفات انرژی دارد که از این مقدار، ۰/۵ درصد در ترانسفورماتورها، ۳ درصد در موتورها، ۹/۶ درصد در پمپ‌ها و ۰/۵ درصد در لوله‌ها صورت می‌پذیرد. همچنین، به طور معمول فرایند تولید توان ۹/۱ درصد تلفات دارد که از این مقدار، ۰/۴ درصد در ترانسفورماتورها، ۱/۴ درصد در ژنراتورها، ۶/۵ درصد در توربین‌ها و ۰/۸ درصد در لوله‌ها اتلاف انرژی وجود دارد (Khodaparast & Ghezelbash, 2016). نیروگاه‌های تلمبه - ذخیره در کشورهای مختلفی همانند چین، هند، ژاپن، اروپا و ایالات متحده آمریکا استفاده شده است. به طور کلی، نیروگاه‌های تلمبه - ذخیره در کشورهایی که سهم عمده‌ای از توان الکتریکی

<sup>۱</sup> Sheikhalishahi

خود را از نیروگاه های هسته‌ای (مانند فرانسه و ژاپن) و نیروگاه‌هایی با سوخت زغال سنگ (مانند آمریکا) تأمین می‌کنند، متمرکزند. از این رو قابلیت اطمینان سیستم در این فرآیندها بسیار پر اهمیت است. از این رو در این پژوهش یک مدل ریاضی جدید در حوزه برنامه‌ریزی تولید انرژی در نیروگاه و نگهداری و تعمیرات دستگاه‌ها و توربین‌ها ارائه خواهد شد.

## روش پژوهش

### فرضیات مسئله

- دو نوع محصول (تولید انرژی) در مدل‌سازی لحاظ می‌شود. تولید انرژی تجدید پذیر برای ارسال سیال به مخزن بالادست و انرژی تجدید ناپذیر ارسال سیال از مخزن بالا به پایین برای تولید انرژی.
- دوره زمانی محدود می‌باشد.
- ایستگاه پمپاژ بصورت موازی مشغول به کار هستند.
- ژنراتورهای تولید انرژی در بخش تجدید پذیر فعال نیستند و فقط در بخش تجدید ناپذیر فعال هستند.
- ایستگاه پمپاژ در بخش تجدید ناپذیر فعال نیستند و فقط در بخش تجدید پذیر فعال هستند.
- عملیات نگهداری و تعمیرات تنها بخشی از ظرفیت تولید ژنراتورها و ایستگاه پمپاژ را مسدود می‌سازد و کل سیستم از دسترس خارج نمی‌گردد.
- در هر دوره تعداد ژنراتورها و پمپاژ وابسته به تقاضا می‌توانند کم و یا زیاد شوند.
- تقاضای شبکه دارای عدم قطعیت برنامه ریزی امکانی است.

### مدل سازی مساله

- $t$  اندیس نوع انرژی تولیدی (تجدید پذیر و تجدید ناپذیر)
- $t$  اندیس دوره زمانی
- $J$  اندیس کلیه تجهیزات نیروگاه
- $J_1$  اندیس کلیه تجهیزات پمپاژ سیال از پایین به بالا
- $J_2$  اندیس کلیه ژنراتورها
- پارامترهای مدل
- $demand_{it}$  تقاضا برای انرژی  $i$  در دوره  $t$
- $C_{ij_1t}^1$  هزینه تولید انرژی  $i$  در دوره  $t$  توسط تجهیزات پمپاژ  $j_1$  در لود نامی
- $C_{ij_2t}^2$  هزینه تولید انرژی  $i$  در دوره  $t$  توسط ژنراتور  $j_2$  در اوور لود
- $C_{j_1t}^3$  هزینه ثابت بکارگیری هر پمپ در دوره  $t$  توسط ایستگاه پمپاژ  $j_1$  در لود نامی

- $C_{jt}^4$  هزینه ثابت بکارگیری هر پمپ در دوره  $t$  توسط ایستگاه پمپاژ  $1$  در اوور<sup>۱</sup> لود
- $C_{it}^5$  هزینه ثابت (سربار تولید) تولید انرژی  $i$  در دوره  $t$
- $C_{ijt}^6$  هزینه ثابت راه اندازی ایستگاه پمپاژ و ژنراتور  $j$  در تولید انرژی  $i$  در دوره  $t$
- $C_{jt}^7$  هزینه نگهداری پیشگیرانه ایستگاه پمپاژ و ژنراتور  $j$  در دوره  $t$
- $C_{jt}^8$  هزینه انتقال انرژی ایستگاه پمپاژ و ژنراتور  $j$  در دوره  $t$
- $C_{it}^9$  هزینه عدم پاسخ به تقاضای انرژی  $i$  در دوره  $t$
- $C_{jt}^{10}$  هزینه از کار افتادگی پمپاژ  $1$  در دوره  $t$
- $C_{jt}^{11}$  هزینه بکارگیری پمپاژ  $1$  جدید در دوره  $t$
- $C_{jt}^{12}$  هزینه نگهداری اصلاحی ایستگاه پمپاژ و ژنراتور  $j$  در دوره  $t$
- $IM_{it}^{MAX}$  حداکثر ظرفیت تولید انرژی  $i$  در دوره  $t$
- $S_{it}^{MAX}$  حداکثر سقف کسری تولید انرژی  $i$  در دوره  $t$
- $Sc_{it}^{MAX}$  حداکثر سقف تولید انرژی  $i$  در دوره  $t$  در اوور لود
- $Wp_t^{MAX}$  حداکثر تعداد تولید کننده انرژی در دسترس دوره  $t$
- $g_{jt}$  تعداد ساعت کارکرد تجهیزات نیروگاه  $j$  در تولید انرژی دوره  $t$
- $A_{jt}$  درصد کارکرد تجهیزات نیروگاه  $j$  در دوره  $t$  در اوور لود
- $U_{jt}$  تعداد تجهیزات نیروگاه  $j$  برای تولید انرژی در دوره  $t$  در لود نامی
- $U_{jt}^1$  تعداد تجهیزات نیروگاه  $j$  برای تولید انرژی در دوره  $t$  در اوور لود
- $e_{ji}$  زمان مورد نیاز تجهیز نیروگاهی  $j$  برای تولید انرژی  $i$
- $M_{jt}$  ظرفیت در دسترس تجهیز  $j$  برای تولید انرژی در دوره  $t$
- $W_{it}^{MAX}$  درصدی از حداکثر سقف کسری تولید انرژی  $i$  در دوره  $t$
- $k_{jt}^1$  درصدی از ظرفیت تولید تجهیزات نیروگاه  $j$  برای تولید انرژی در دوره  $t$  که در اثر نت پیشگیرانه از دست می رود.
- $k_{jt}^2$  درصدی از ظرفیت تولید تجهیزات نیروگاه  $j$  برای تولید انرژی در دوره  $t$  که در اثر نت اصلاحی از دست می رود.
- $b_{jt}^1$  درصدی از ظرفیت تولید تجهیزات نیروگاه  $j$  برای تولید انرژی در دوره  $t$  می تواند اوور لود شود.

متغیر تصمیم

- $BN_{jit}^1$  اگر تجهیز  $j$  توانایی تولید انرژی  $i$  در دوره  $t$  داشته باشد  $1$  در غیر این صورت  $0$

- $X_{jit}$  میزان تولید انرژی  $i$  توسط تجهیز  $j$  در دوره  $t$  در لود نامی انتقال داده شده
- $Y_{jit}$  میزان تولید انرژی  $i$  توسط تجهیز  $j$  در دوره  $t$  در اوور لود انتقال داده شده
- $W_{jt}$  تعداد تجهیز  $j$  مورد نیاز در دوره  $t$
- $H_{jt}$  تعداد تجهیز  $j$  اضافه شده در دوره  $t$
- $J_{jt}$  تعداد تجهیز  $j$  از سرویس خارج شده در دوره  $t$
- $OT_{jt}$  ساعت کارکرد اوور لود تجهیز  $j$  در دوره  $t$
- $I_{it}$  سطح تولید انرژی  $i$  در دوره  $t$
- $B_{it}$  سطح کسری تولید انرژی  $i$  در دوره  $t$
- $PM_{jt}$  اگر نت پیشگیرانه برای تجهیز  $j$  در دوره  $t$  اجرا شود ۱ در غیر این صورت ۰
- $CM_{jt}$  اگر نت اصلاحی برای تجهیز  $j$  در دوره  $t$  اجرا شود ۱ در غیر این صورت ۰

#### رویکرد استوار

در این تحقیق، با توجه به ماهیت گسسته و شبه سناریوی داده‌ها، از فرمول‌سازی استوار ملوی<sup>۱</sup> برای رویکرد استوار استفاده شده است. به این دلیل که مدل ملوی برای فرمول‌سازی ریاضیاتی نویزهای ارزیابی آنالیز بهتری در مقایسه با دیگر روش‌های پایداری دارد. رویکرد مالوی در دو حوزه استواری مدل و استواری راه‌حل ارائه شده است. به منظور فرمول‌سازی مسأله بر اساس روش بهینه‌سازی استوار ملوی نمادهای مدل معرفی می‌شوند. محور  $X$  نشان دهنده پارامترهای طراحی است در حالی که محور  $Y$  نشان دهنده پارامترهای گواه است.  $A$ ،  $B$  و  $C$  ضرایب پارامترها،  $b$  و  $e$  بردارهای پارامتر (مقادیر در طرف راست) هستند.  $A$  و  $B$  مقادیر معین بوده در حالی که  $B$ ،  $C$  و  $e$  ماهیتی غیرقطعی دارند. یک درک مشخص از پارامترهای عدم قطعیت یک سناریو نامیده می‌شود که نماد  $s$  به آن تخصیص داده شده است و احتمال آن با  $P_s$  نشان داده می‌شود.

برای نشان دادن مجموعه‌ای از سناریوها، از نماد  $\Omega$  استفاده می‌شود. ضرایب عدم قطعیت با  $B_s$ ،  $C_s$ ،  $e_s$  نشان داده می‌شوند و برای هر سناریو  $s \in \Omega$  تخصیص داده شده است. به علاوه، از آنجایی که متغیر گواه  $Y$  بعد از درک سناریو تعدیل می‌شود، نماد  $Y_s$  را می‌توان به سناریو  $S$  تخصیص داد. به خاطر عدم قطعیت پارامترها، مدل می‌تواند برای تعدادی از سناریوها غیرممکن شود، بنابراین،  $\eta_s$  غیرعملی بودن مدل در هر سناریو  $S$  را نشان می‌دهد. اگر مدل عملی باشد  $\eta_s$  برابر با ۰ است در غیر این صورت، برابر با یک مقدار مثبت از معادله خواهد بود.

<sup>1</sup> Mulvey

### یافته‌های پژوهش

در این بخش به بررسی یافته‌های پژوهش پرداخته خواهد شد. از این رو در بخش اول ابتدا به ارائه پارامترهای پژوهش پرداخته شده سپس تابع چگالی‌های احتمال بحث می‌شود و سپس دفازی سازی مقادیر پارامترهای معرفی شده و در تحلیل متغیرهای پژوهش بررسی و ارزیابی خواهد شد. از این رو با توجه به اینکه مسأله مورد مطالعه یک مسأله NP-HARD می‌باشد، از این رو جهت ارزیابی و حل مدل مسأله از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک استفاده شده است که پس از معرفی پارامترهای مسأله شرح آن ارائه می‌شود.

### معرفی پارامتر های مدل ریاضی

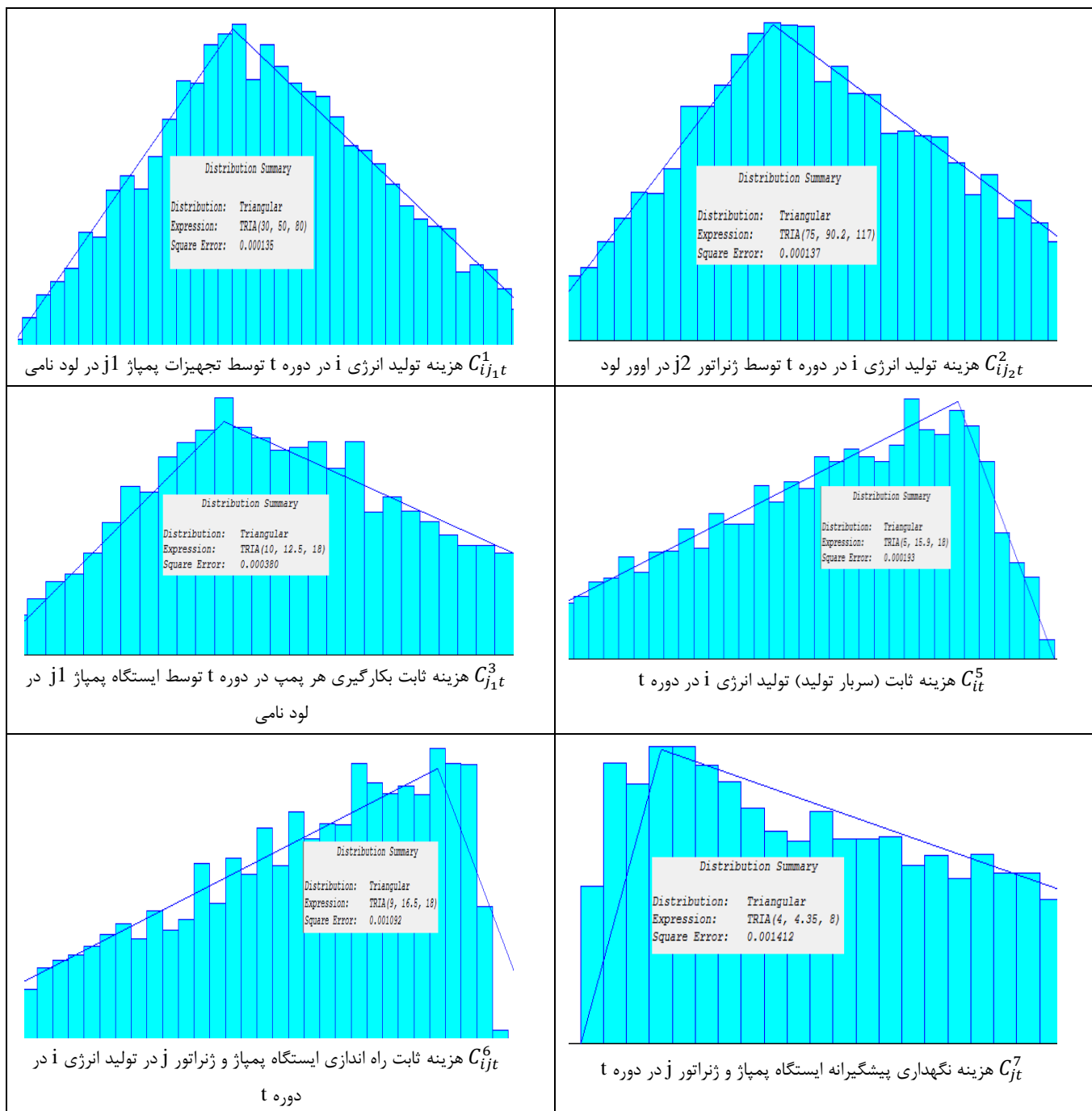
جهت ارزیابی مدل ریاضی ابتدا اندیس‌های مسأله معرفی می‌شود. در مسأله مورد مطالعه نوع انرژی تولید را به چهار طبقه‌بندی معرفی می‌نمائیم ( $i=4$ ) که به شرح انرژی بادی، انرژی خورشیدی، انرژی الکتریکی و انرژی فسیلی طبقه‌بندی می‌شود. تجهیزات نیروگاه را در سه بخش جدا از هم طبقه‌بندی می‌نمائیم ( $j=3$ ) نیروگاه بخش ۱ و نیروگاه بخش ۲ و نیروگاه بخش ۳. همچنین مسأله مورد مطالعه را برای ۴ دوره زمانی ( $t=4$ ) طرح‌ریزی می‌نمائیم. از این رو تقاضای انرژی مورد نیاز برق منطقه‌ای که نیاز است تا نیروگاه تولید نماید در جدول شماره ۱ معرفی شده است.

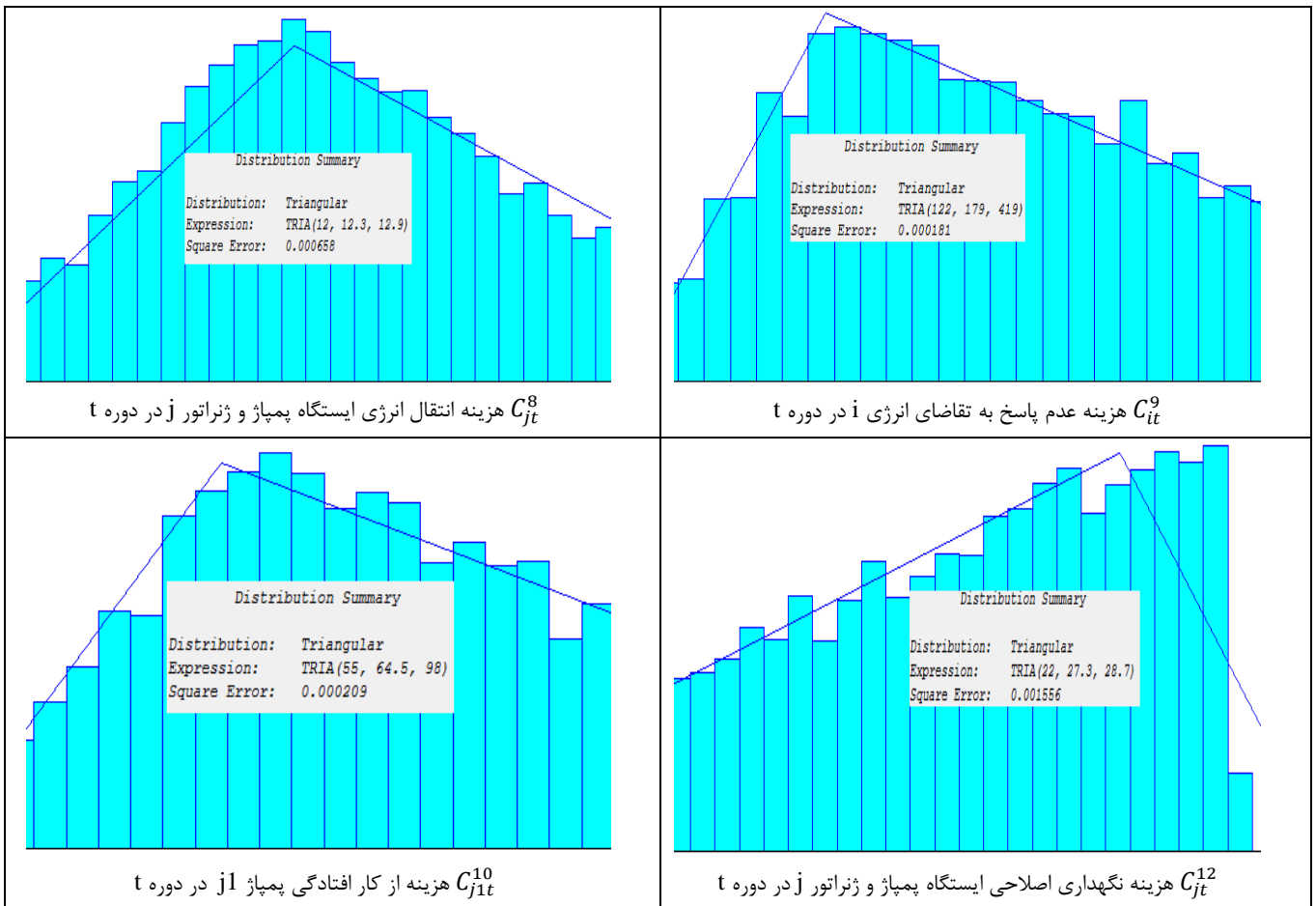
جدول ۱. تقاضای برق منطقه ای اعلام شده جهت تولید در هر دوره (Source:By author)

T=4	T=3	T=2	T=1	demand <sub>it</sub>
۶۶۸۰۰۰	۶۶۶۰۰۰	۶۵۴۰۰۰	۶۵۲۰۰۰	I=1
۶۶۸۰۰۰	۶۶۷۰۰۰	۶۶۷۰۰۰	۶۵۲۰۰۰	I=2
۶۸۸۰۰۰	۶۷۳۰۰۰	۶۶۸۰۰۰	۶۵۳۰۰۰	I=3
۶۴۵۰۰۰	۶۴۰۰۰۰	۶۴۰۰۰۰	۶۳۵۰۰۰	I=4

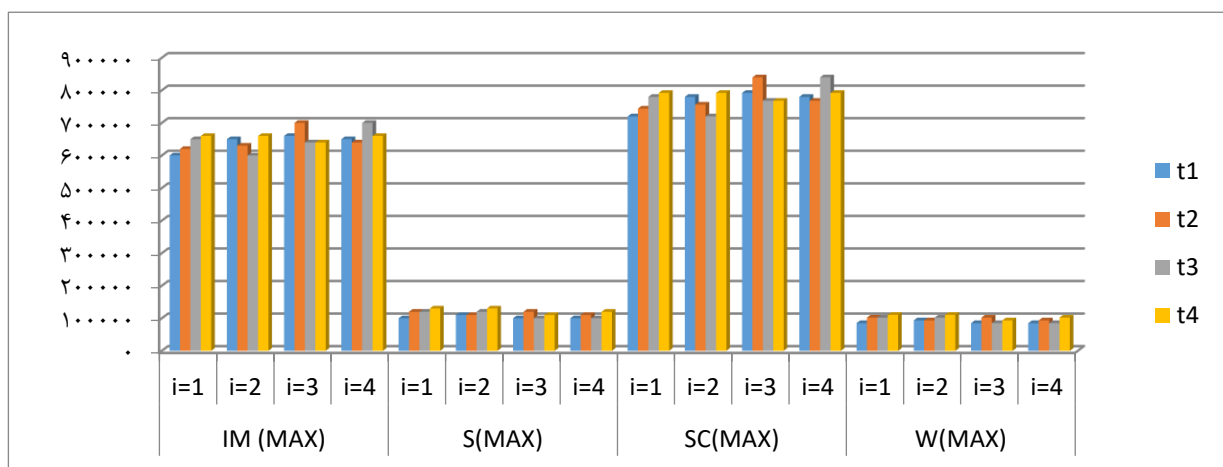
همانطور که در بیان مسأله معرفی شد، هزینه‌های استفاده از تجهیزات از تابع فازی مثلثی بهره گیری می‌کند که این توابع احتمال مثلثی به شرح جدول شماره ۲ است.

جدول ۲. هزینه های فازی بکارگیری تجهیزات نیروگاهی (Source:By author)





همچنین، پارامترهای حداکثر ظرفیت تولید و حداکثر سقف تولید انرژی و حداکثر سقف کسری تولید انرژی و درصد حداکثر سقف کسری تولید انرژی در دوره های مختلف به شرح نمودار شماره ۱ می‌باشد.



نمودار ۱. پارامترهای تولید انرژی و کسری تولید شده از بخش های مختلف نیروگاه (Source:By author)

## توسعه الگوریتم فرا ابتکاری در حل مسأله

## تنظیم پارامترهای الگوریتم فرا ابتکاری

کالیبراسیون الگوریتم یکی از مهم‌ترین مراحل طراحی الگوریتم‌های فراابتکاری در دستیابی به جواب‌های بهینه مناسب می‌باشد. از آنجایی که مقادیر مختلف پارامترهای کنترل‌کننده این الگوریتم‌ها ممکن است شاخص‌های محاسباتی شامل کیفیت جواب‌ها و زمان محاسباتی را تحت تأثیر قرار دهند، غالباً مجموعه‌ای از آزمایشات کالیبراسیون به منظور یافتن ترکیب بهینه مقادیر متفاوت پارامترهای کنترل‌کننده الگوریتم صورت می‌پذیرد. الگوریتم‌های پیشنهادی این تحقیق الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری می‌باشد. پارامترهای کنترل‌کننده الگوریتم ژنتیک عبارتند از: اندازه جامعه اولیه ( $Pop_{GA}$ )، نرخ تقاطع ( $P_c$ )، نرخ جهش ( $P_m$ )، حداکثر تعداد نسل‌ها ( $G_{max}$ ).

پارامترهای کنترل‌کننده الگوریتم رقابت استعماری عبارتند از: تعداد همسایگی‌های تولید شده ( $Pop_{ICA}$ )، تعداد تکرار الگوریتم رقابت استعماری (Decade) و درصد تأثیر قدرت کل مستعمرات هر امپراطوری روی قدرت آن ( $P_{ICA}$ ). هر یک از این پارامترها در بازه خاصی از مقادیر خود بر روی شاخص‌های محاسباتی اثرگذار هستند و در خارج از این بازه تأثیر ناچیز و قابل چشم‌پوشی دارند. شاخص‌های محاسباتی به کار رفته در انجام آزمایشات این بخش و بخش‌های آتی، میانگین مقادیر تابع هدف برای جواب‌های بهینه و میانگین زمان‌های محاسباتی آن‌ها در هر ده تکرار از الگوریتم می‌باشند. به منظور بررسی اثرات متقابل پارامترهای کنترل‌کننده الگوریتم‌های پیشنهادی و دستیابی به ترکیب بهینه آن‌ها مجموعه‌ای از آزمایشات با توجه به روش تاگوجی طراحی می‌گردد. هر یک از پارامترهای ذکر شده در بخش قبل برای هریک از الگوریتم‌های پیشنهادی در سه سطح مورد آزمون قرار می‌گیرند. سطوح پاسخ نیز میانگین جواب‌های حاصل شده و میانگین زمان‌های محاسباتی می‌باشد. به منظور در نظر گرفتن همزمان کیفیت جواب‌ها و زمان محاسباتی، مقادیر این دو، نرمالایز شده و با هم جمع می‌شود. در ابتدا پارامترهای الگوریتم ژنتیک و سپس پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری را مورد آزمون قرار می‌دهیم. فاکتورهای مورد نظر و سطوح آن‌ها در جدول شماره ۲ برای الگوریتم ژنتیک نمایش داده شده است.

جدول ۲. فاکتورها و سطوح آن‌ها (Source:By author)

فاکتور	سطوح
$Pop_{GA}$	200, 300, 400
$P_c$	0.6, 0.7, 0.8
$P_m$	0.10, 0.12, 0.15
$G_{max}$	200, 300, 400
$P_{mu}$	0.10, 0.15, 0.2



آزمایش‌های موردنیاز برای بررسی ترکیبات مختلف فاکتورها و پاسخ‌های مرتبط با آن‌ها در جدول شماره ۳ مشخص شده است. داده‌های تولید شده توسط نرم‌افزار 14 MINITAB آنالیز شده و نتایج بدست آمده از آن در جداول ارائه شده است.

جدول ۳. ترکیبات فاکتورها و سطوح پاسخ مربوطه در آزمایشات چندعاملی (Source:By author)

$Pop_{GA}$	$P_c$	$P_m$	$P_{mu}$	$G_{max}$	<i>Solution</i>	(s)CPU
200	0.6	0.10	0.10	200	164.00	6.56
200	0.6	0.10	0.10	300	42.00	11.80
200	0.6	0.10	0.10	400	46.70	13.73
200	0.7	0.12	0.15	200	40.00	8.50
200	0.7	0.12	0.15	300	13.67	12.60
200	0.7	0.12	0.15	400	32.33	13.75
200	0.8	0.15	0.20	200	66.33	12.45
200	0.8	0.15	0.20	300	26.33	16.58
200	0.8	0.15	0.20	400	27.00	20.70
300	0.6	0.12	0.20	200	20.67	14.17
300	0.6	0.12	0.20	300	14.33	23.07
300	0.6	0.12	0.20	400	48.33	12.80
300	0.7	0.15	0.10	200	20.33	16.21
300	0.7	0.15	0.10	300	21.67	22.89
300	0.7	0.15	0.10	400	44.67	13.21
300	0.8	0.10	0.15	200	18.67	22.58
300	0.8	0.10	0.15	300	22.33	23.54
300	0.8	0.10	0.15	400	49.10	12.51
400	0.6	0.15	0.15	200	15.00	28.12
400	0.6	0.15	0.15	300	45.20	14.30
400	0.6	0.15	0.15	400	26.57	20.01
400	0.7	0.10	0.20	200	14.87	27.95
400	0.7	0.10	0.20	300	14.65	27.80
400	0.7	0.10	0.20	400	13.00	29.14
400	0.8	0.12	0.10	200	8.60	34.00
400	0.8	0.12	0.10	300	9.20	31.23

$Pop_{GA}$	$P_c$	$P_m$	$P_{mu}$	$G_{max}$	<i>Solution</i>	(s)CPU
400	0.8	0.12	0.10	400	7.60	31.46

برای بررسی همزمان تأثیر فاکتورها بر کیفیت جواب و زمان محاسباتی، مقادیر جوابها و زمانهای محاسباتی، نرمالایز شده، با هم جمع شده و به صورت یک متغیر پاسخ در آمده است. در نهایت، معکوس این عدد محاسبه شده و به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شده است. هرچه این عدد بزرگتر باشد، مطلوبتر خواهد بود. این موضوع در جدول شماره ۴ به نمایش درآمده است.

جدول ۴. ترکیبات فاکتورها و سطوح پاسخ نرمالایز شده در آزمایشات چندعاملی (Source:By author)

$Pop_{GA}$	$P_c$	$P_m$	$P_{mu}$	$G_{max}$	<i>normalized</i>	$1/normalized$
200	0.6	0.10	0.10	200	0.200401	4.99
200	0.6	0.10	0.10	300	0.070722	14.14
200	0.6	0.10	0.10	400	0.079804	12.53
200	0.7	0.12	0.15	200	0.062105	16.10
200	0.7	0.12	0.15	300	0.039810	25.12
200	0.7	0.12	0.15	400	0.063385	15.78
200	0.8	0.15	0.20	200	0.099832	10.02
200	0.8	0.15	0.20	300	0.061938	16.15
200	0.8	0.15	0.20	400	0.070604	14.16
300	0.6	0.12	0.20	200	0.050836	19.67
300	0.6	0.12	0.20	300	0.060636	16.49
300	0.6	0.12	0.20	400	0.079888	12.52
300	0.7	0.15	0.10	200	0.054357	18.40
300	0.7	0.15	0.10	300	0.068697	14.56
300	0.7	0.15	0.10	400	0.076483	13.07
300	0.8	0.10	0.15	200	0.064667	15.46
300	0.8	0.10	0.15	300	0.070699	14.14
300	0.8	0.10	0.15	400	0.080214	12.47
400	0.6	0.15	0.15	200	0.071084	14.07
400	0.6	0.15	0.15	300	0.079179	12.63
400	0.6	0.15	0.15	400	0.068788	14.54
400	0.7	0.10	0.20	200	0.070609	14.16
400	0.7	0.10	0.20	300	0.070070	14.27
400	0.7	0.10	0.20	400	0.070749	14.13
400	0.8	0.12	0.10	200	0.075026	13.33
400	0.8	0.12	0.10	300	0.070403	14.20
400	0.8	0.12	0.10	400	0.069012	14.49

بر اساس نتایج به دست آمده از ضرایب همبستگی فاکتورها برای نسبت‌های SN، مشاهده گردید که در سطح اطمینان ۹۵٪ فاکتورهای  $G_{max} = 300, P_{mu} = 0.12, P_m = 0.10, P_c = 0.6$  و تأثیر معنی‌داری بر روی پاسخ‌ها دارند. همچنین برای فاکتورهای مورد آزمایش، آنالیز واریانس نسبت به ضریب SN و میانگین پاسخ‌ها صورت گرفت. با توجه به آنالیز واریانس صورت گرفته، همانطور که انتظار می‌رفت فاکتورهای  $P_c, P_m$  و  $G_{max}$  با ارزش  $P$  کمتر از ۰/۰۵ دارای اثر معنی‌داری بر روی پاسخ‌ها می‌باشند.

به منظور تعیین اولویت یا درجه اهمیت هر کدام از فاکتورها، سطوح پاسخ با توجه به شاخص‌های میانگین پاسخ‌ها و نسبت‌های SN بررسی شده و فاکتورها رتبه‌بندی می‌شوند. جدول پاسخ‌ها نشان‌دهنده متوسط هر شاخص پاسخ برای هر سطح از هر فاکتور می‌باشد. جدول‌های ۵ و ۶ رتبه‌بندی فاکتورها را با توجه به تحلیل پاسخ نسبت به ضرایب SN و میانگین‌ها نمایش می‌دهند.

جدول ۵. جدول پاسخ نسبت‌های SN (Source:By author)

level	Pop <sub>size</sub>	P <sub>c</sub>	P <sub>m</sub>	P <sub>mu</sub>	G <sub>max</sub>
1	22.47	22.15	21.86	22.06	22.40
2	23.53	24.01	24.12	23.67	23.77
3	22.90	22.74	22.93	23.17	22.73
Delta	1.06	1.86	2.25	1.61	1.38
Rank	5	2	1	3	4

همانطور که مشاهده می‌گردد، فاکتور  $P_m$  در هر دو جدول دارای بالاترین رتبه بوده و پس از آن فاکتور  $P_c$  در رتبه دوم قرار دارد. رتبه‌بندی سایر فاکتورها نیز برای شاخص‌های میانگین پاسخ‌ها و ضرایب SN یکسان است.

جدول ۶. جدول پاسخ میانگین‌ها (Source:By author)

level	Pop <sub>size</sub>	P <sub>c</sub>	P <sub>m</sub>	P <sub>mu</sub>	G <sub>max</sub>
1	33.14	51.13	92.12	30.13	14.02
2	20.15	18.16	41.16	59.15	15.74
3	98.13	82.13	18.14	62.14	13.74
Delta	22.1	67.2	49.3	29.2	2.00
Rank	5	2	1	3	4

بدین ترتیب، مقادیر پارامترهای کنترل کننده الگوریتم ترکیبی ژنتیک پیشنهادی و نیز فاکتورهای مورد نظر و سطوح آن‌ها برای الگوریتم رقابت استعماری نمایش مطابق جدول شماره ۷ تنظیم می‌شوند.

جدول ۷. مقادیر بهینه‌ی پارامترهای کنترل کننده (Source:By author)

سطوح	فاکتور
300	$Pop_{GA}$
0.7	$P_c$
0.12	$P_m$
0.15	$P_{mu}$
300	$G_{max}$

## فاکتورها و سطوح آنها

سطوح	فاکتور
300, 400, 500	$Pop_{ICA}$
200, 300, 400	$decade$
0.08, 0.10, 0.12	$P_{ICA}$

آزمایش‌های مورد نیاز برای بررسی ترکیبات مختلف فاکتورها و پاسخ‌های مرتبط با آنها در جدول شماره ۸ مشخص شده است.

جدول ۸. ترکیبات مربوطه فاکتورها و سطوح پاسخ در آزمایشات چندعاملی (Source:By author)

$Pop_{ICA}$	$decade$	$P_{ICA}$	Solution	(s)CPU
300	200	0.08	85.2	0.66
300	200	0.08	40.6	0.82
300	200	0.08	40.2	1.13
300	300	0.10	36.0	0.65
300	300	0.10	23.0	0.83
300	300	0.10	27.8	1.14
300	400	0.12	46.2	0.65
300	400	0.12	31.4	0.80
300	400	0.12	30.8	1.15
400	200	0.10	19.0	1.29
400	200	0.10	19.0	1.86
400	200	0.10	25.6	0.98
400	300	0.12	30.6	1.27
400	300	0.12	37.8	1.87

Pop <sub>ICA</sub>	decade	P <sub>ICA</sub>	Solution	(s)CPU
400	300	0.12	36.2	0.99
400	400	0.08	19.0	1.28
400	400	0.08	21.8	1.92
400	400	0.08	23.0	0.98
500	200	0.12	21.4	2.55
500	200	0.12	24.6	1.25
500	200	0.12	19.0	1.77
500	300	0.08	22.6	2.59
500	300	0.08	26.0	1.24
500	300	0.08	23.4	1.66
500	400	0.10	32.2	2.60
500	400	0.10	28.2	1.30
500	400	0.10	22.6	1.74

برای بررسی همزمان تأثیر فاکتورها بر کیفیت جواب و زمان محاسباتی، مقادیر جواب‌ها و زمان‌های محاسباتی، نرمالایز شده، با هم جمع شده و به صورت یک متغیر پاسخ در آمده است. در نهایت، معکوس این عدد محاسبه شده و به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شده است. هرچه این عدد بزرگتر باشد، مطلوب‌تر خواهد بود. این موضوع در جدول شماره ۹ به نمایش درآمده است.

جدول ۹. ترکیبات فاکتورها و سطوح پاسخ نرمالایز شده در آزمایشات چندعاملی (Source:By author)

Pop <sub>ICA</sub>	decade	P <sub>ICA</sub>	normalized	1/normalized
300	200	0.08	0.122624	8.16
300	200	0.08	0.072106	13.87
300	200	0.08	0.080000	12.50
300	300	0.10	0.061851	16.17
300	300	0.10	0.050734	19.71
300	300	0.10	0.065022	15.38
300	400	0.12	0.074394	13.44
300	400	0.12	0.060252	16.60
300	400	0.12	0.068981	14.50
400	200	0.10	0.058258	17.17
400	200	0.10	0.073676	13.57
400	200	0.10	0.057989	17.24

$Pop_{ICA}$	decade	$P_{ICA}$	normalized	1/normalized
400	300	0.12	0.071981	13.89
400	300	0.12	0.097065	10.30
400	300	0.12	0.071294	14.03
400	400	0.08	0.057987	17.25
400	400	0.08	0.078742	12.70
400	400	0.08	0.054791	18.25
500	200	0.12	0.095291	10.49
500	200	0.12	0.064062	15.61
500	200	0.12	0.071241	14.04
500	300	0.08	0.097848	10.22
500	300	0.08	0.065513	15.26
500	300	0.08	0.073676	13.57
500	400	0.10	0.109924	9.10
500	400	0.10	0.069841	14.32
500	400	0.10	0.074857	13.36

بر اساس نتایج ضرایب همبستگی فاکتورها برای نسبت‌های SN، مشاهده شد که در سطح اطمینان ۹۵٪ فاکتورهای  $Pop_{ICA} = 400$ ،  $P_{ICA} = 1$ ،  $decade = 300$ ، تأثیر معنی‌داری بر روی پاسخ‌ها دارند. همچنین برای فاکتورهای مورد آزمایش، آنالیز واریانس نسبت به ضریب SN و میانگین پاسخ‌ها صورت گرفت.

با توجه به آنالیز واریانس صورت گرفته، همانطور که انتظار می‌رفت، فاکتورهای  $P_{ICA}$ ، decade و  $Pop_{ICA}$  با ارزش  $P$  کمتر از ۰/۰۵ دارای اثر معنی‌داری بر روی پاسخ‌ها می‌باشند. به منظور تعیین اولویت یا درجه اهمیت هر کدام از فاکتورها، سطوح پاسخ با توجه به شاخص‌های میانگین پاسخ‌ها و نسبت‌های SN بررسی شده و فاکتورها رتبه‌بندی می‌شوند. جدول پاسخ‌ها نشان‌دهنده متوسط هر شاخص پاسخ برای هر سطح از هر فاکتور می‌باشد. جدول‌های شماره ۱۰ و ۱۱ رتبه‌بندی فاکتورها را با توجه به تحلیل پاسخ نسبت به ضرایب SN و میانگین‌ها نمایش می‌دهند.

جدول ۱۰. جدول پاسخ نسبت‌های SN (Source:By author)

level	$Pop_{ICA}$	decade	$P_{ICA}$
1	22.79	22.20	22.07
2	23.17	22.75	23.17
3	21.77	22.78	21.77
Delta	1.40	0.59	1.15
Rank	1	3	2

همانطور که مشاهده می‌گردد، فاکتور  $Pop_{ICA}$  در هر دو جدول دارای بالاترین رتبه بوده و پس از آن فاکتور  $P_{ICA}$  در رتبه دوم قرار دارد. رتبه فاکتور decade نیز برای شاخص‌های میانگین پاسخ‌ها و ضرایب SN به یکسان است.

جدول ۱۱. جدول پاسخ میانگین‌ها (Source:By author)

level	Pop <sub>ICA</sub>	decade	P <sub>ICA</sub>
1	14.48	13.63	13.53
2	14.93	14.28	15.11
3	12.89	14.39	13.66
Delta	2.05	0.76	1.58
Rank	1	3	2

بدین ترتیب، مقادیر پارامترهای کنترل کننده الگوریتم رقابت استعماری پیشنهادی مطابق جدول شماره ۱۲ تنظیم می‌شوند.

جدول ۱۲. مقادیر بهینه‌ی پارامترهای کنترل کننده (Source:By author)

سپتور	فاکتور
400	Pop <sub>ICA</sub>
300	decade
190	P <sub>ICA</sub>

### ارزیابی الگوریتم‌ها

از یک انحراف نسبی (RPD) بعنوان معیاری برای مقایسه دو الگوریتم GA، ICA استفاده می‌شود، رابطه (۱). در حقیقت برای سنجش کارایی این الگوریتم‌ها از دو دسته مسائل کوچک، متوسط و بزرگ استفاده می‌شود. نتایج آزمایشات، بهترین جواب، بدترین جواب، میانگین جواب‌ها و میانگین زمان‌های اجرا و همچنین، مقدار RPD و متوسط زمان‌های اجرا در جدول شماره ۱۳ ارائه شده‌اند.

رابطه (۱)

$$RPD = \frac{sol_{avg} - sol_{min}}{sol_{min}}$$

شرط توقف الگوریتم‌ها نیز ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده، آزمایشات اولیه نشان دادند که این الگوریتم‌ها معمولاً ظرف قبل از این زمان به بهترین جواب خود می‌رسند و اولین زمانی که به بهترین مقدار تابع هدف رسیدند، ثبت شده است.

جدول ۱۳. مقادیر به دست آمده از اجراهای متفاوت برای گمز هر دو الگوریتم پیشنهادی (Source:By author)

j	i	GAMS		GA				ICA			
		Global Optimal Time	Best	Worst	Mean	Time	Best	Worst	Mean	Time	
3	1	06:00:0	1	1	1	16:00:0	1	1	1	14:00:0	

4	5	4	09:00:0	4	4	4	17:00:0	4	4	4	17:00:0
	7	9	11:00:0	9	9	9	20:00:0	9	9	9	19:00:0
6	3	6	10:00:0	6	6	6	30:00:0	6	6	6	30:00:0
	5	12	42:05:0	12	12	12	37:00:0	11	12	11.33	33:00:0
	7	11	11:19:0	11	11	11	43:00:0	11	11	11	43:00:0
10	3	15	01:56:0	15	15	15	21:01:0	15	15	15	47:01:0
	5	-	-	20	26	21.2	33:02:0	21	26	22.2	29:02:0
	7	-	-	18	22	19.4	00:03:0	14	17	15.6	21:03:0
20	3	-	-	47	51	47.66	36:21:0	48	51	49.8	23: 04:0
	5	-	-	46	48	46.2	58:29:0	49	50	49.5	53:27:0
	7	-	-	19	25	22	46:28:0	19	24	23.33	49:28:0
40	3	-	-	35	40	36.2	16:32:0	35	39	37.8	10:30:0
	5	-	-	34	37	35.6	36:38:0	36	40	39.6	23:39:0
	7	-	-	16	18	17.2	34:36:0	15	17	16.8	12:37:0
60	3	-	-	70	86	72.2	45:37:0	69	73	71.2	19:36:0
	5	-	-	55	61	56.6	44:38:0	58	64	63.6	55:40:0
	7	-	-	68	73	70	08:40:0	68	74	70.2	17:41:0

نتایج جدول شماره ۱۴ نشان دهنده عملکرد بالای GA نسبت به الگوریتم ICA می‌باشد. نتایج آماری نشان دهنده برتری الگوریتم GA از ICA می‌باشد. با توجه به جدول‌های بالا و شکل پایین دو الگوریتم GA و ICA، مقدار تابع هدف و زمان اجرا نزدیک به هم می‌باشند. الگوریتم GA هم از نظر مقدار تابع هدف و هم زمان اجرا از الگوریتم ICA بهتر می‌باشد.

جدول ۱۴. مقادیر RPD و متوسط زمان‌های اجرای محاسبه شده (Source:By author)

AP	runway	GA		ICA	
		Average RPD	computation time (sec)	Average RPD	computation time (sec)
4	3	0.00	00:16:0	0.00	14:0:00
	5	0.00	0:00:17	0.00	17:00:0
	7	0.00	0:00:20	0.00	19:00:0
6	3	0.00	00:30:0	0.00	30:00:0
	5	0.00	00:37:0	0.00	33:00:0
	7	0.00	43:0:00	0.00	43:00:0
10	3	0.00	21:01:0	0.00	47:01:0
	5	0.06	33:02:0	0.06	29:02:0
	7	0.08	00:0:03	0.11	21:03:0
20	3	0.01	36:21:0	0.04	04:23:0
	5	0.004	58:29:0	0.01	53:27:0



	7	0.16	46:28:0	0.23	49:28:0
40	3	0.03	16:32:0	0.03	10:30:0
	5	0.05	36:38:0	0.10	23:39:0
	7	0.08	34:36:0	0.12	12:37:0
	3	0.03	45:37:0	0.03	19:36:0
60	5	0.07	44:38:0	0.10	55:0:40
	7	0.03	08:40:0	0.03	17:41:0

### بحث و نتیجه گیری

امروزه جهت مقابله با رقابت سخت حاکم، بسیاری از سازمان‌های تولیدی در سیستم تولید تمام اتوماتیک با تجهیزات مدرن سرمایه‌گذاری کرده‌اند. برای اینکه از لحاظ اقتصادی پایدار باشند، این تجهیزات هزینه‌بر باید تا آخرین لحظه عمر مولدشان مورد استفاده باشند. هنگامی که یک خرابی ناخواسته، ناشی از شکست، اتفاق می‌افتد؛ موجب کاهش بهره‌وری سیستم شده و برنامه تولید فعلی را نقض می‌کند. بازبینی برنامه تولید در شرایط اضطراری معمولاً بسیار پر هزینه است و اغلب باعث افزایش تغییرات در ساختارهای سازمانی و اجرایی شرکت‌ها می‌شود. از سوی دیگر، استفاده از نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای یه عنوان یکی از راه‌های تعدیل میزان اتلاف در عرضه و تقاضا انرژی برق، ذخیره طولانی مدت انرژی و غیره از مزایای این سیستم است. عملیاتی بودن این نیروگاه‌ها سبب بهبود وضعیت تولید انرژی در سطح ملی در کشورهای پیشرفته و در حال ترقی می‌شود. از این رو پرداخته به مباحث تولید و نگهداری و تعمیرات توامان سبب افزایش کارایی نیروگاه‌های تلمبه‌ای می‌شود که در این پژوهش مدل ریاضی برنامه‌ریزی این حوزه ارائه شد. با توجه به نتایج پژوهش، نشان داده شد که یک برنامه‌ریزی استوار مهم‌ترین حوزه عملکردی نیروگاه‌های انرژی محسوب می‌شود. پیشنهادات آتی پژوهش در این حوزه استفاده از رویکرد الگوریتم‌های ابتکاری بر پایه محاسبات دقیق مانند الگوریتم آزادسازی لاگرانژ و یا رویکرد الگوریتم ابتکاری بندرز جهت محاسبات دقیق میزان هزینه‌های سیستم می‌باشد.

### مشارکت نویسندگان

تمام نویسندگان به نسبت سهم برابر در این پژوهش مشارکت داشته‌اند.

### تأیید اخلاقی

هیچ موضوع انسانی در این مقاله وجود ندارد و رضایت آگاهانه قابل اعمال نیست.

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## References

- Aguirre, A. M., & Papageorgiou, L. G. (2018). Medium-term optimization-based approach for the integration of production planning, scheduling and maintenance. *Computers & Chemical Engineering, 116*, 191-211.
- Akkaş, Ö. P., & Çam, E. (2019). *Optimal Operation of Virtual Power Plant in a Day Ahead Market* In 2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), 1-4.
- Badam Firouz, J., & Shariat Modari, A. (2019). *Green energy management and solutions* The 14th National Conference on Quality and Productivity, Iran. 297-306. <https://nqpc.ir/article-1-280-fa.pdf> [In Persian]
- Berthaut, F., Gharbi, A., & Dhouib, K. (2011). Joint modified block replacement and production/inventory control policy for a failure-prone manufacturing cell. *Omega, 39*(6), 642-654.
- Boudjelida, A. (2019). On the robustness of joint production and maintenance scheduling in presence of uncertainties. *Journal of Intelligent Manufacturing, 30*(4), 1515-1530.
- Elgamal, A. H., Kocher-Oberlehner, G., Robu, V., & Andoni, M. (2019). Optimization of a multiple-scale renewable energy-based virtual power plant in the UK. *Applied energy, 256*, 113973.
- Glawar, R., Karner, M., Nemeth, T., Matyas, K., & Sihm, W. (2018). An approach for the integration of anticipative maintenance strategies within a production planning and control model. *Procedia CIRP, 67*, 46-51.
- Hadayeghparast, S., Farsangi, A. S., & Shayanfar, H. (2019). Day-ahead stochastic multi-objective economic/emission operational scheduling of a large scale virtual power plant. *Energy, 172*, 630-646.
- Hamrol, A. (2018). A new look at some aspects of maintenance and improvement of production processes. *Management and Production Engineering Review, 9*.
- Kang, K., & Subramaniam, V. (2018). Joint control of dynamic maintenance and production in a failure-prone manufacturing system subjected to deterioration. *Computers & Industrial Engineering, 119*, 309-320.
- Khodaparast, M., & Ghezlbash, A. (2016). Applied Economic Studies of Iran. 5(17), 217-242. <https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1057310.html> [In Persian]
- Liu, Q., Dong, M., & Chen, F. F. (2018). Single-machine-based joint optimization of predictive maintenance planning and production scheduling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 51*, 238-247.
- Martínez-Lucas, G., Pérez-Díaz, J. I., Chazarra, M., Sarasúa, J. I., Cavazzini, G., Pavesi, G., & Ardizzon, G. (2019). Risk of penstock fatigue in pumped-storage power plants operating with variable speed in pumping mode. *Renewable Energy, 133*, 636-646.
- Mennemann, J. F., Marko, L., Schmidt, J., Kemmetmüller, W., & Kugi, A. (2019). Nonlinear Model Predictive Control of a Variable-Speed Pumped-Storage Power Plant. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*.
- Özyön, S. (2020). Optimal short-term operation of pumped-storage power plants with differential evolution algorithm. *Energy, 194*, 116866.
- Sana, S. S. (2012). Preventive maintenance and optimal buffer inventory for products sold with warranty in an imperfect production system. *International Journal of Production Research, 50*(23), 6763-6774.
- Schreiber, M., Klöber-Koch, J., Richter, C., & Reinhart, G. (2018). Integrated Production and Maintenance Planning for Cyber-physical Production Systems. *Procedia CIRP, 72*, 934-939.
- Shafiee, M., Ghazi, R., & Moeini-Aghtaie, M. (2019). Day-ahead Resource Scheduling in Distribution Networks with Presence of Electric Vehicles and Distributed Generation Units. *Electric Power Components and Systems, 1-14*.

- Sheikhalishahi, M., Eskandari, N., Mashayekhi, A., & Azadeh, A. (2019). Multi-objective open shop scheduling by considering human error and preventive maintenance. *Applied Mathematical Modelling*, 67, 573-587.
- Tan, D., Chen, W., & Wang, H. (2017). On the Use of Monte-Carlo Simulation and Deep Fourier Neural Network in Lane Departure Warning. in *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 9(4), 76-90. <https://doi.org/10.1109/MITS.2017.2743204>
- Vasconcelos, M. H., Beires, P., Moreira, C. L., & Lopes, J. A. P. (2019). Dynamic security of islanded power systems with pumped storage power plants for high renewable integration—A study case. *The Journal of Engineering*, 18, 4955-4960.
- Wu, Y., Zhang, T., Xu, C., Zhang, B., Li, L., Ke, Y., & Xu, R. (2019). Optimal location selection for offshore wind-PV-seawater pumped storage power plant using a hybrid MCDM approach: A two-stage framework. *Energy Conversion and Management*, 199, 112066.
- Xiao, S., Chen, Z., & Sarker, B. R. (2019). Integrated maintenance and production decision for k-out-of-n system equipment with attenuation of product quality. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 36(5), 735-751.
- Yao, W., Deng, C., Li, D., Chen, M., Peng, P., & Zhang, H. (2019). Optimal Sizing of Seawater Pumped Storage Plant with Variable-Speed Units Considering Offshore Wind Power Accommodation. *Sustainability*, 11(7), 1939.
- Yin, S., Ai, Q., Li, Z., Zhang, Y., & Lu, T. (2020). Energy management for aggregate prosumers in a virtual power plant: A robust Stackelberg game approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 117, 105605.