

**Applied Economics Studies, Iran (AESI)**

P. ISSN:2322-2530 & E. ISSN: 2322-472X

Journal Homepage: <https://aes.basu.ac.ir/>

Scientific Journal of Department of Economics, Faculty of Economic and Social Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.

Publisher: Bu-Ali Sina University. All rights reserved.

Copyright©2022, The Authors. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons.

Bu-Ali Sin
University

Optimization of Modern Electricity Supply Chain with NSGA-II

Seyed Hoseini, S. M.¹, Mohammadzadeh, A.², Seighali, M.³, Rezaei, F.⁴

Type of Article: Research

<https://dx.doi.org/10.22084/AES.2022.26912.3516>

Received: 2022.10.10; Accepted: 2022.12.05

Pp: 63-90

Abstract

Environmental problems and global warming are one of the biggest concerns of societies. Using renewable energy generation technologies as one of the most basic solutions is one of the main concerns of planners and beneficiaries of power grids, considering the variability of their output power day and night and their dependence on weather conditions. The uncertainty caused by these generations can have many effects on the costs imposed on the grid and the operation of electricity grids, such as an increase in power outages and energy not supplied. To solve this problem, a comprehensive multi-objective and probabilistic model has been proposed to determine the installation location, type, and optimal capacity of DGs in the modern supply chain of electricity. The final objective of this model is to minimize energy losses, investment and operation costs, energy not supplied, and environmental emissions. The proposed methods have been implemented by MATLAB software on the Garver power grid and IEEE 33-bus distribution grid and solved by the multi-objective NSGA-II. The final model can be effectively used to plan the supply chain of the modern electricity grid with the influence of renewable energy-based products in various economic, environmental, and social dimensions.

Keywords: MEI, Renewable Energy, NSGA-II, Investment Cost, Environment.

JEL Classification: Q22, M21, M59, O16.

1. Ph.D. candidate in Department of Industrial management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

2. Associate Professor, Department of Financial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran (Corresponding Author).

Email: A.mohammadzadeh@qiau.ac.ir

3. Assistant Professor, Department of Financial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

4. Associate Professor, Department of Accounting, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

Citations: Seyed Hoseini, S. M.; Mohammadzadeh, A.; Seighali, M. & Rezaei, F., (2023). "Optimization of Modern Electricity Supply Chain with NSGA-II". *Journal of Applied Economics Studies in Iran*, 12(46): 63-90. doi: 10.22084/aes.2022.26912.3516

Homepage of this Article: https://aes.basu.ac.ir/article_4875.html?lang=en

1. Introduction

Today, electricity plays a key role in people's lives and is used in various fields such as home consumption, production, various industries, transportation, etc. For this reason, a power outage in the network can have serious consequences (Hosseini-Motlagh et al., 2020).

Electric energy grids are one of the most complex man-made devices in the last few decades. This complexity has led to extensive and precise studies for the planning of these grids at different generation, transmission, and distribution levels. Due to the long life and wide geographical area of electric energy grids and the very high costs related to their construction and operation, it is necessary to plan these grids in a completely optimal way to avoid additional costs (Chicco & Mazza, 2021). In such conditions, it is important to respond appropriately to these challenges and adopt a suitable coping strategy by designing supply chain management methods and using renewable products to generate electrical energy. This management model must be designed in such a way that it considers all the different dimensions and, at the same time, meets the needs of the consumers and optimization the electricity transmission process with the least cost and with the least loss, and pay attention to environmental indicators and social dimensions (Ayoughi et al., 2020).

The uncertainty caused by these generations can have significant effects in increasing blackouts and imposed costs on the grid, making the operation and development of electricity grids very complicated (Deng & Lv, 2020). The behavior of the actors, the limitations of the power grid, and uncertainties are included, each of which needs more studies in a particular way and at different levels of planning (Khan et al., 2021).

2. Materials and methods

In this study, a comprehensive multi-objective and probabilistic model has been proposed to determine the installation location, type, and optimal capacity of DGs in the modern supply chain of electricity. The final objective of this model is to minimize energy losses, investment and operation costs, energy not supplied, and environmental emissions. Multi-objective NSGA-II will solve this model. Simulation has been done with MATLAB or GAMS software to analyze the data. The purpose of this study was to provide an optimal investment model for the development of the MEI supply chain with four main objectives: economic, environmental, social, and security.

3. Basic concepts

In some cases, the negative environmental effects caused by the generation of electric energy are so significant that they have caused problems in the sustainable development of societies and have caused problems in the social dimension, among which social justice, equality, and sustainable economic development can be mentioned (Yıldızbaşı et al., 2020). These problems and concerns have caused the

concept of a sustainable supply chain to be raised and pay attention to environmental and social dimensions instead of focusing on the economic dimension and profit maximization in all parts of the supply chain, from the allocation of resources and raw materials to determine the location of facilities, generation, and transportation capacity, and infrastructure (Asgharizadeh et al., 2019; Saavedra et al., 2018; Yıldızbaşı et al., 2020).

The expansion, advancement of technology, and the more complicated operation of supply chains have created the need for the supply chain management. Supply chain management is the integration of organizational units along the supply chain and the coordination of the flow of materials, information, finances, products, and services to meet consumer demand and improve the supply chain's overall competitiveness (Asgharizadeh et al., 2019).

4. Objective functions

The economic objective function is to minimize the cost of providing electric energy needed by subscribers and includes two parts: investment cost and operating cost.

$$ECOF = \sum_{g \in G} AD_g \cdot P_g^{DG} \cdot \beta + P_g^{DG} \cdot OM_g \cdot \beta + P_g^{DG} \cdot \rho_g \cdot r_g \quad (1)$$

In the MEI economic objective function, AC is equivalent to the annual investment cost for each of the electric power generation units and is calculated as follows:

$$AC_g = \frac{d(1+d)^{LT_z}}{(1+d)^{LT_z} - 1} \cdot CC_g \quad (2)$$

In order to convert the future costs (time t) into a current cost, the coefficient β has been used in the objective function. This coefficient is obtained from the following relation.

$$\beta = \frac{1}{(1+d)^t} \quad (3)$$

The rate of primary energy conversion in the gth generation unit to electric energy in non-renewable units is calculated as follows.

$$r = \frac{1}{HV_g \cdot \eta_g} \quad (4)$$

The social objective follows the minimization of the lost load and the minimization of the energy not supplied by the MEI subscribers in the planning horizon.

$$ROF = \tau \cdot \sum_{i \in B} (ENS_i) \quad (5)$$

One of the essential objective functions in locating DG units in the MEI supply chain is to minimize the number of electrical energy losses.

$$LEOF = \sum_{g \in G} P_g^{DG} - \sum_{i \in B} (P_i^{Load} - ENS_i) \quad (6)$$

The environmental objective function includes the emission rate of emissions produced by non-renewable production units and is calculated as follows.

$$EOF = \sum_{g \in G} (D_g \cdot P_g^{DG}) \quad (7)$$

5. Different scenarios to evaluate the simulation

Scenario 1: The purpose of carrying out this scenario is to study and check the status of the supply chain before updating and installing DG units and applying the proposed method. The results of this test are shown in Table 1. (Gardiner & Montpelier).

Scenario 2: Considering that there is no limit to the generation of environmental emissions in this scenario, the model uses DGs with the lowest cost. For this reason, all the DGs of the diesel generator type have been selected. The results of this test are shown in Table 2.

Scenario 3: Since, in this scenario, the amount of emissions is also raised as one of the objective functions, it uses DGs that have as little cost and emission as possible. For this reason, among non-renewable DGs, microturbine has been chosen. The results of this test are shown in Table 3.

6. Conclusions

This study showed the necessity of moving the electricity supply chain from a one-way mode with centralized and large generations to a distributed and modern supply chain with scattered and small generations. In this regard, the appropriate strategy for determining the optimal location, type, and capacity of these generations in the MEI supply chain was proposed as a useful optimization problem with four objectives: minimizing costs, energy not supplied, emissions produced, and energy losses. In order to find the optimal answers to the multi-objective problem, the NSGA-II was used. According to the obtained results, on the IEEE-bus standard supply chain, changing the approach from the traditional supply chain with a one-way approach to the modern supply chain with the influence of DGs has a significant effect on increasing the continuity of energy supply, especially when an incident occurs in the grid. According to these results, by using DG at the electricity industry's supply chain level, the lost load is zero, and no subscriber is left without electricity. Microturbine fuel is natural gas and produces fewer emissions than diesel generators. By using DGs in the distribution grid, the amount of energy loss was reduced by about a quarter and the amount of emission produced was also reduced by about a third. For future works, the use of small generations next to the consumer in the modern supply chain, the use of renewable productions in the modern supply chain, the use of generations with higher technology and fewer emissions, the energy management strategy of the MEI supply chain with the participation of electric vehicles and energy storage sources, determining the optimal location and capacity of stations for charging and discharging electric vehicles in the MEI supply chain are suggested.



فصلنامه علمی مطالعات اقتصادی کاربردی ایران

شاپای چاپی: ۲۵۳۰-۲۳۲۲؛ شاپای الکترونیکی: ۴۷۲X-۲۳۲۲

وبسایت نشریه: <https://aes.basu.ac.ir>

نشریه گروه اقتصاد، دانشکده علوم اقتصادی و علوم اجتماعی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران



بهینه‌سازی زنجیره تأمین برق مدرن با الگوریتم چند هدفه ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب

سید محمد سید حسینی^۱، امیر محمدزاده^۲، محسن صیقلی^۳، فرزین رضایی^۴

نوع مقاله: پژوهشی

شناسه دیجیتال: <https://dx.doi.org/10.22084/AES.2022.26912.3516>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۴

صص: ۶۳-۹۰

چکیده

برنامه‌ریزی توسعه شبکه یکی از مسائل مهم در سیستم قدرت برای برآوردن رشد تقاضای برق در سال‌های آینده با توجه به افزایش جمعیت، توسعه شهری و افزایش رفاه اجتماعی است. به دلیل عمر طولانی و گستره جغرافیایی شبکه‌های انرژی الکتریکی، احداث و بهره‌برداری از بخش‌های مختلف آن نیازمند هزینه‌های بسیار گزاف است. مشکلات زیست‌محیطی و گرمایش کره زمین یکی از بزرگ‌ترین دغدغه‌های جوامع است. استفاده از فناوری‌های تولید انرژی تجدیدپذیر به عنوان یکی از اساسی‌ترین راهکارها، با توجه به متغیر بودن توان خروجی آن‌ها در شبانه‌روز و همچنین وابستگی آن‌ها به شرایط آب‌وهوایی، یکی از دغدغه‌های اصلی برنامه‌ریزان و بهره‌برداران شبکه‌های قدرت است. عدم قطعیت ناشی از این تولیدات می‌تواند در هزینه‌های تحمیلی به شبکه و بهره‌برداری از شبکه‌های برق، تأثیرات زیادی مانند افزایش قطعی برق و انرژی تأمین نشده داشته باشد. برای رفع این مشکل، یک مدل جامع چندهدفه و احتمالاتی به منظور تعیین محل نصب، نوع و ظرفیت بهینه تولیدات پراکنده در سطح صنعت برق مدرن پیشنهاد شده است. هدف‌گذاری نهایی این مدل، کمینه‌سازی تلفات انرژی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، انرژی تأمین نشده و آلاینده‌های زیست‌محیطی است. روش‌های پیشنهادی توسط نرم افزار MATLAB بر روی شبکه برق Garver و شبکه توزیع ۳۳ ناحیه‌ای IEEE پیاده‌سازی و توسط الگوریتم چندهدفه ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) حل شده‌اند. مدل نهایی را می‌توان به طور مؤثر برای برنامه‌ریزی زنجیره تأمین شبکه برق مدرن با نفوذ تولیدات مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر در ابعاد مختلف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به کار گرفت.

کلیدواژگان: صنعت برق مدرن، انرژی تجدیدپذیر، الگوریتم NSGA-II، هزینه سرمایه‌گذاری، زیست‌محیطی.

طبقه‌بندی JEL: Q22, M21, M59, O16

۱. دانشجوی دکتری اقتصاد، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

Email: sm.seydhoseini@qiau.ac.ir

۲. دانشیار گروه مدیریت مالی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. (نویسنده مسئول).

Email: A.mohammadzadeh@qiau.ac.ir

۳. استادیار گروه مدیریت مالی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

Email: mohsen.seighali@qiau.ac.ir

۴. دانشیار گروه حسابداری، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

Email: Ffarzinrezaei@gmail.com

۱. مقدمه

امروزه، برق نقش کلیدی در زندگی انسان‌ها ایفا کرده و در حوزه‌های مختلفی چون مصرف خانگی، تولید، صنایع مختلف، حمل و نقل و غیره کاربرد دارد. به‌همین دلیل، قطع برق در شبکه می‌تواند پیامدهای جدی در پی داشته باشد (حسینی‌مطلق و همکاران، ۲۰۲۰)^۱. در حال حاضر منبع اصلی تولید برق در سراسر جهان (با بیش از ۶۷٪) سوخت‌های فسیلی است (جبارزاده و همکاران، ۲۰۱۸)^۲ که با توجه به روند افزایش مصرف برق و تقاضا برای تولید بیشتر، تأثیرات مخرب زیست‌محیطی آن به دلیل انتشار آلاینده‌هایی چون دی‌اکسیدکربن، موجب نگرانی‌های بسیاری شده است (جانک و همکاران، ۲۰۱۹)^۳ به دلیل این تأثیرات منفی، در سطح ملی و بین‌المللی قوانین و توافقاتی برای کاهش آلاینده‌های مختلف و به حداقل رساندن آن‌ها وضع شده است (حسینی‌مطلق و همکاران، ۲۰۲۰)^۴.

شبکه‌های انرژی الکتریکی یکی از پیچیده‌ترین تجهیزات ساخته دست بشر در چندین دهه اخیر است. این پیچیدگی موجب شده است تا مطالعات گسترده و دقیقی برای برنامه‌ریزی این شبکه‌ها در سطوح مختلف تولید، انتقال و توزیع انجام گیرد. به دلیل عمر طولانی و پهنه جغرافیایی وسیع شبکه‌های انرژی الکتریکی و هزینه‌های بسیار گزاف مربوط به احداث و بهره‌برداری از آن‌ها، لازم است برنامه‌ریزی این شبکه‌ها به شکل کاملاً بهینه انجام شده تا از تحمیل هزینه‌های اضافی جلوگیری شود (شیکو و همکاران، ۲۰۲۱)^۵. در چنین شرایطی، واکنش مناسب در برابر این چالش‌ها، اتخاذ استراتژی مقابله‌ای مناسب از طریق طراحی شیوه‌های مدیریت زنجیره تأمین و به‌کارگیری تولیدات تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی دارای اهمیت است. این مدل مدیریتی باید به‌گونه‌ای طراحی شده باشد که تمامی جنبه‌های مختلف در آن لحاظ و در عین حال، نیازهای مصرف‌کنندگان و بهینه‌سازی فرآیند انتقال برق را با کمترین هزینه و با کمترین اتلافات برآورده کند و به شاخص‌های زیست‌محیطی و جنبه اجتماعی هم توجه داشته باشد (ایوگی و همکاران، ۲۰۲۰)^۶.

ساختار زنجیره تأمین صنعت برق در سال‌های اخیر در حال تغییر رویکرد از حالت متمرکز و مرسوم (TEI)، به سمت رویکرد مدرن (MEI) و غیرمتمرکز است. اکثر طراحان شبکه، استفاده از منابع تولید پراکنده (DG) را به‌منظور برطرف کردن غالب مشکلات صنعت برق پیشنهاد می‌کنند. این زنجیره‌های تأمین جدید با نفوذ تولیدات پراکنده به زنجیره تأمین صنعت برق مدرن (MEI) شناخته می‌شوند. تولیدات پراکنده واحدهای تولید انرژی کوچک هستند که در سطح شبکه توزیع و در کنار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرند و زنجیره تأمین برق را از حالت یک‌طرفه خارج می‌کنند. «کیو» و «لو» (۲۰۱۶)^۷ اولین کسانی بودند که مسأله طراحی زنجیره تأمین برق را به‌عنوان یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه و چنددوره‌ای تحت عدم قطعیت تأمین سوخت و تقاضای برق حل

1. Hosseini-Motlagh et al.

2. Jabbarzadeh et al.

3. Jiang et al.

4. Hosseini-Motlagh et al.

5. Chicco et al.

6. Ayoughi et al.

7. Liu et al

کرده و به حداکثرسانی سود و به حداقل‌رسانی تفاوت بین حجم تقاضا و حجم برق تحویل داده شده را مورد توجه قرار دادند. «اسدی» و همکاران (۲۰۱۸)^۱ یک مدل دهدفه تصادفی برای تعیین مکان-فهرست موجود-مسیریابی برای زنجیره تأمین سوخت زیستی با استفاده از میکروآلگا پیشنهاد کردند که شامل مراکز تولید، استخراج و حمل‌ونقل بود. دو هدف کاهش هزینه و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در طراحی این مدل مورد توجه قرار گرفت. برای حل این مسأله از دو روش MOPSO و NSGA-II استفاده شد. مقایسه نتایج نشان داد که الگوریتم NSGA-II در اکثر معیارهای ارزیابی بهتر از MOPSO بود. «بیلالا» و همکاران (۲۰۲۰)^۲ یک بهینه‌سازی چندهدفه برای مسائل زنجیره تأمین چند محصولی و چنددوره‌ای چهارپله‌ای تحت عدم قطعیت انجام دادند. زنجیره تأمین آن‌ها متشکل از کارخانه‌های تولید، مراکز توزیع و خرده‌فروشان بود. هدف به حداقل رساندن هزینه کل زنجیره تأمین و به حداکثر رساندن متوسط تعداد محصولات ارسالی به مشتریان بود. از یک چارچوب یک مدل برنامه‌نویسی خطی صحیح مختلط چندهدفه استفاده شده و پس از آن، با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری الگوریتم ژنتیک چند هدفه و NSGA-II و روش قید اپسیلون از طریق نرم‌افزار MATLAB بهترین جواب‌ها انتخاب شد. نتایج تحقیق حاکی از اثربخشی و کارایی مدل پیشنهادی بود. «موسوی» و همکاران (۲۰۱۷)^۳ یک مسأله زمان‌بندی-مکان‌یابی را برای زنجیره تأمین مواد غذایی فاسدشدنی چندهدفه حل کردند. در این پژوهش کاهش انتشار کربن به‌عنوان هدف زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گرفت. برای حل مسأله از الگوریتم NSGA-II استفاده شد. نتایج عددی تأیید کرد که روش فراابتکاری جدید می‌تواند تمامی خواسته‌ها و اهداف تصمیم‌گیرنده را برآورده کند.

عدم قطعیت ناشی از این تولیدات می‌تواند تأثیرات بسزایی در افزایش خاموشی‌ها و هزینه‌های تحمیلی به شبکه داشته باشد و بهره‌برداری و توسعه شبکه‌های برق را بسیار پیچیده کند (دنگ و همکاران، ۲۰۲۰)^۴. در برنامه‌ریزی شبکه‌های برق مسائل بسیار متعددی چون: نوع ساختار اولیه شبکه، رفتار بازیگران، محدودیت‌های شبکه قدرت و عدم قطعیت‌ها دخیل بوده که هر کدام به‌شکل به‌خصوص و در سطوح مختلف برنامه‌ریزی، نیازمند مطالعات بیشتری است (خان و همکاران، ۲۰۲۱)^۵.

از سوی دیگر امروزه تغییرات وسیعی در هر دو حوزه انتقال و توزیع سیستم‌های قدرت در حال وقوع است. با تجدید ساختار در صنعت برق و ارتقاء تکنولوژی تولیدات از نیروگاه‌های بزرگ به‌صورت در محل، شبکه توزیع برق در حال تغییر ماهیت هستند؛ به‌بیان دیگر، تولیدات با توان پایین در کنار مصرف‌کننده نهایی و در سطح شبکه توزیع قرار می‌گیرند که به‌نام تولیدات پراکنده شناخته می‌شوند. تراکم حضور تولیدات پراکنده تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در سطوح توزیع روزبه‌روز بیشتر می‌شود. این افزایش حضور منابع تجدیدپذیر در سیستم‌های توزیع، باید مدیریت شود و محل نصب بهینه با توجه به اهداف مدنظر و شبکه موجود مورد توجه قرار گیرد (کاروناراتنه و

1. Asadi et al.

2. Billala et al.

3. Musavi et al.

4. Deng et al.

5. Khan et al.

همکاران، ۲۰۲۱).^۱ لزوم ارائه طرح توسعه زنجیره تأمین پایدار در صنعت برق (ESCND) برای گسترش زنجیره تأمین مدرن (با تولیدات توزیع شده و کوچک) با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها از دغدغه‌های مهم بهره‌برداران شبکه قدرت است که در این پژوهش دنبال می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، یک مدل جامع چندهدفه و احتمالاتی به منظور تعیین محل نصب، نوع و ظرفیت بهینه تولیدات پراکنده در سطح زنجیره تأمین جدید برق پیشنهاد شده است. هدف‌گذاری نهایی این مدل کمینه‌سازی تلفات انرژی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، انرژی تأمین نشده و آلاینده‌های زیست‌محیطی است. این مدل به صورت چندهدفه توسط الگوریتم چندهدفه ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب حل خواهد شد. برای تجزیه و تحلیل اطلاعات، شبیه‌سازی با نرم افزار MATLAB یا GAMS انجام شده است. هدف از انجام این پژوهش، ارائه مدل سرمایه‌گذاری بهینه برای توسعه زنجیره تأمین صنعت برق مدرن با چهار هدف اصلی اقتصادی، زیست-محیطی، اجتماعی و امنیتی است.

۳. مفاهیم اساسی

در برخی موارد تأثیرات محیطی منفی ناشی از تولید انرژی برق به حدی زیاد است که روند توسعه پایدار جوامع را دچار مشکل کرده و باعث بروز مشکلاتی در بُعد اجتماعی شده است که از جمله آن می‌توان به عدالت اجتماعی، برابری و توسعه اقتصادی پایدار اشاره نمود (یلدیزبازی و همکاران، ۲۰۲۰).^۲ این مشکلات و دغدغه‌ها باعث مطرح شدن مفهوم زنجیره تأمین پایدار شده است که در تمامی بخش‌های زنجیره تأمین از مرحله تخصیص منابع و مواد خام گرفته تا تعیین محل تأسیسات، ظرفیت تولید و حمل‌ونقل و زیرساخت‌ها به جای تمرکز بر جنبه اقتصادی و به حداکثرسانی سود به جنبه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی هم توجه می‌کند (اصغرزاده و همکاران، ۲۰۱۹).^۳

این درحالی است که رشد تقاضا و گسترده‌تر شدن شبکه تولید و توزیع و عدم قطعیت در پیش‌بینی تقاضای مصرف برق و میزان تولید منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی از یک‌سو، و فشار وارده بر شرکت‌ها از سوی جامعه و دولت‌ها برای در نظر گرفتن ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در زنجیره تأمین برق از سوی دیگر باعث شده‌اند که طراحی و برنامه‌ریزی برای سیستم‌های قدرت در صنعت برق کاری دشوار و چالش برانگیز شود (بیاتلو و همکاران، ۲۰۱۸).^۴

1. Karunaratne et al.

2. Yıldızbaşı et al.

3. Asgharizadeh et al.

4. Bayatloo et al.

افزایش آگاهی از مفهوم پایداری در سراسر جهان باعث شده که بسیاری از صنایع مانند صنعت برق از سوی مردم، نهادهای دولتی و غیردولتی، رسانه‌ها و ذینفعان مختلف تحت فشار قرار گیرند و تلاش کنند تا به اهداف پایداری دست‌یابند (دورماز و همکاران، ۲۰۲۰؛ حسینی‌مطلق، ۲۰۲۰).^۱ پایداری متشکل از سه مؤلفه زیست-محیطی، توسعه اجتماعی و عملکرد اقتصادی بوده و فصل مشترک بین این سه بعد منجر به فعالیت‌هایی در شرکت‌ها می‌شود که نه تنها تأثیر مثبتی بر محیط‌زیست طبیعی و جامعه دارد، بلکه در بلندمدت منفعت اقتصادی به همراه خواهد داشت (اصغرزاده و همکاران، ۲۰۱۹).^۲ مفهوم پایداری در زنجیره تأمین فراتر از جنبه اقتصادی بوده و مستلزم توجه به تمامی ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی می‌باشد. همچنین، شناسایی و ارزیابی ابعاد اجتماعی مانند توسعه پایدار، شیوه‌های کسب و کار سالم، کاهش فساد و مسئولیت اجتماعی شرکت (CSR) برای بهبود پایداری در شبکه برق بسیار ضروری است (اصغرزاده و همکاران، ۲۰۱۹). سرمایه‌گذاری بر روی بعد اجتماعی در زنجیره تأمین پایدار باعث ارزش‌آفرینی بیشتر برای جامعه می‌شود. برای اطمینان از دستیابی به شبکه زنجیره تأمین برق پایدار، در بررسی سیستم انرژی و تجزیه و تحلیل هزینه‌های شبکه، عوامل اجتماعی مانند رشد اقتصادی و نرخ بیکاری باید در نظر گرفته شوند (حسینی‌مطلق و همکاران، ۲۰۲۰).^۳

چالش پیش‌روی طراحی یک زنجیره تأمین پایدار یافتن راه‌حل‌های بهینه در طراحی است؛ چراکه هدف طراحی یک زنجیره تأمین در وهله اول جنبه اقتصادی (کاهش هزینه‌ها) است و این در حالی است که توجه به ابعاد زیست‌محیطی و اجتماعی هزینه‌ها را افزایش خواهد داد (حسینی‌مطلق و همکاران، ۲۰۲۰).

منظور از زنجیره تأمین، شبکه‌ای از تأسیسات متشکل از تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و مراکز توزیع می‌باشد که مجموعه عملیاتی شامل تأمین مواد خام، انتقال به سازنده، تولید محصول نهایی و در نهایت توزیع آن را شامل می‌شود (وحدت‌زاده و همکاران، ۲۰۱۸).^۴ گسترش، پیشرفت فناوری و پیچیده‌تر شدن عملیات زنجیره‌های تأمین نیاز به مدیریت زنجیره تأمین را پدید آورده است. مدیریت زنجیره تأمین به یکپارچه‌سازی واحدهای سازمانی در طول زنجیره تأمین و هماهنگ‌سازی جریان مواد، اطلاعات، امور مالی، محصولات و خدمات به منظور برآورده کردن تقاضای مصرف‌کننده با هدف بهبود رقابت‌پذیری کلی زنجیره تأمین است (اصغرزاده و همکاران، ۲۰۱۹).

یکپارچه‌سازی زنجیره تأمین به مفهوم ادغام ساختارمند و برنامه‌ریزی شده از امور متداول در طی فرآیند تولید تا مصرف است. جریان مواد و خدمات، هماهنگی شرکای زنجیره تأمین و اشتراک اطلاعات اساس این مفهوم را تشکیل می‌دهد (بها و همکاران، ۲۰۱۹).^۵ دو عملکرد مالی و عملیاتی در زنجیره تأمین باید مدنظر قرار گیرند. عملکرد مالی به شاخص‌هایی چون سودآوری، رشد و درآمد بستگی دارد؛ در حالی که عملکرد عملیاتی شامل زمان انتظار یا زمان انجام کار، بهره‌وری، انعطاف‌پذیری و غیره است (اصغر زاده و همکاران، ۲۰۱۹).^۶

1. Durmaz et al.

2. Asgharizadeh et al.

3. Hosseini-Motlagh et al.

4. Vahdatzad et al.

5. Baah et al.

6. Asgharizadeh et al.

با توجه به تأثیرات مخرب سوخت‌های فسیلی بر محیط‌زیست، توسعه انرژی پایدار امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. به‌همین دلیل، اخیراً انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان منبع جایگزین انرژی گسترش یافته است. درمیان استراتژی‌های زیست‌محیطی اتخاذ شده در طراحی زنجیره تأمین برق، توسعه تولیدات پراکنده (DGs) پاسخی کارآمد نسبت به کاهش آلودگی هوا است (رانا و همکاران، ۲۰۲۰)^۱. تولیدات پراکنده واحدهای تولید انرژی کوچک هستند که در سطح شبکه توزیع و در کنار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرند و زنجیره تأمین برق را از حالت یک‌طرفه خارج می‌کنند. این واحدهای تولیدی توزیع شده مزایای زیادی از جمله کاهش تلفات انرژی، افزایش کیفیت توان، آزادسازی ظرفیت خطوط انتقال و توزیع، کاهش هزینه‌های نصب و نگهداری و امکان استفاده در کنار انواع مشترکین را نام‌برد. واحدهای تولید پراکنده دارای انواع متنوعی مانند: میکروتوربین، پیل سوختی، دیزل ژنراتور، پنل خورشیدی و توربین بادی است.

قابلیت اطمینان در زنجیره تأمین عمدتاً به‌عنوان اختلالات ایجاد شده در زنجیره تأمین در نظر گرفته می‌شود. در صنعت برق خطر اختلال در تأسیسات تولید و توزیع برق به‌عنوان اصلی‌ترین اختلالات در نظر گرفته می‌شوند. برای مدل‌سازی دقیق زنجیره تأمین لازم است مجموعه‌ای از سناریوهای مختلف در نظر گرفته شود تا قابلیت اطمینان زنجیره تأمین برق تضمین شود (کبادرموس و همکاران، ۲۰۲۰)^۲.

تمایز مطالعه حاضر نسبت به مطالعات پیشین در داخل و خارج کشور و نظریه علمی موجود درباره موضوع تحقیق

جدول ۱: تمایز مطالعه حاضر نسبت به مطالعات پیشین

Tab. 1: The results of the first scenario

ردیف	نویسندگان	مدل‌سازی ریاضی	ارائه تابع چند هدفه	تکنیک‌های حل مسأله	کاهش اتلاف انرژی	قابلیت اطمینان	عدم قطعیت	تابع هدف
۱	Yun, Chuluunsukh, & Gen, 2020							سیستم کنترل، تجارت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای
۲	Bayatloo & Bozorgi-Amiri, 2018					✓	ایستگاه برق و خطوط انتقال نقاط مصرف	اهدافی چون: هزینه، اثربخشی شبکه، مکان‌یابی تأسیسات، قابلیت اطمینان و برنامه‌ریزی برای ظرفیت
۳	Jabbarzadeh et al., 2018		✓					بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی تعارض وجود دارد
۴	Gbadamosi, Nwulu, & Energy, 2020							بررسی شاخص‌های قابلیت اطمینان در توسعه زنجیره تأمین برق در کنار مطالعات عدم قطعیت

¹. Rana et al.

². Kabadurmus et al.

بار مشترکین بیان شده است								
هدف از انجام این پژوهش ارائه مدل سرمایه‌گذاری بهینه برای توسعه دو زنجیره تأمین صنعت برق مرسوم و مدرن با رویکرد حل مسأله اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و امنیتی است.	تقاضا و تولید منابع تجدیدپذیر			وزن‌دهی	✓			مدل پژوهش حاضر

– زنجیره برق MEI

نیروگاه‌های متمرکز، معمولاً دارای ظرفیت‌های ۱۰۰ تا ۱۲۰۰ مگاوات هستند، این نیروگاه‌ها هزینه‌های سرمایه‌گذاری بسیار زیادی برای تأمین زمین، تجهیزات، نیروی انسانی نیاز دارند. از سوی دیگر، با توجه به فاصله بین این نیروگاه‌ها و مراکز مصرف، خطوط و دکل‌های انتقال نیرو نیز برای هر نیروگاه باید طراحی و نصب شود که هزینه‌های بسیار بالایی دارد. این مسائل در کنار مشکلات زیست‌محیطی باعث افزایش هزینه و زمان طراحی، نصب، بهره‌برداری و نگهداری از این واحدهای نیروگاهی شده است. طرح پیشنهادی برای حل و یا کاهش این مشکلات، علاوه بر مباحث اقتصادی، باید مشکلات زیست‌محیطی و فنی شبکه قدرت را نیز بهبود دهد؛ از این رو، طراحان شبکه قدرت، بکارگیری و استفاده از منابع تولید پراکنده (DG) را به عنوان راهکاری جامع جهت برطرف کردن غالب مشکلات صنعت برق پیشنهاد می‌کنند. این زنجیره‌های تأمین جدید با نفوذ تولیدات پراکنده به زنجیره تأمین صنعت برق مدرن (MEI) شناخته می‌شوند. یکی از طرفدارترین منابع تولید پراکنده، واحدهای مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی هستند. توان تولیدی این واحدها وابسته به شرایط محیطی و آب‌وهوایی است که به دلیل سخت بودن پیش‌بینی آن‌ها عدم قطعیت جدیدی را به شبکه وارد می‌کنند؛ به بیان دیگر، زنجیره تأمین جدید و مدرن صنعت برق دارای قابلیت پیش‌بینی پایین‌تر و پیچیدگی بیشتر است. از این رو، ناپایداری و گسست بین عرضه و تقاضای انرژی در زنجیره تأمین جدید بسیار محتمل‌تر است.

– کاربرد مدل ارائه شده در صنعت برق: از جمله کاربرد این مدل در صنعت برق می‌توان به موارد

ذیل اشاره نمود.

۱. ارائه یک مدل بهینه برای توسعه زنجیره تأمین صنعت برق مدرن و بررسی مزایای تغییر رویکرد از تولیدات بزرگ و متمرکز و حرکت به سمت تولیدات توزیع شده و کوچک در زنجیره تأمین شبکه برق با رویکرد کاهش تلفات، افزایش قابلیت اطمینان، کاهش هزینه‌ها و آلاینده‌های زیست‌محیطی
۲. مدل سرمایه‌گذاری بهینه چندهدفه اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و امنیتی در زنجیره تأمین شبکه برق مدرن.
۳. بررسی اثر حضور منابع تجدیدپذیر به صورت تولیدات پراکنده کوچک در زنجیره تأمین پایدار.
۴. ارائه مدل برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری توسعه به صورت احتمالاتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و میزان مصرف مشترکین.
۵. کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در حوزه انتقال توان و مدل‌سازی شبکه در فضای احتمالاتی.

۶. ارائه مدل سرمایه‌گذاری و تعیین ظرفیت و محل نصب بهینه تولیدات پراکنده تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در زنجیره تأمین مدرن.

۷. کاهش انرژی تلف شده و انرژی تأمین نشده و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان عرضه انرژی در زنجیره تأمین برق مدرن.

۴. شاخص‌ها و متغیرها

متغیرها و شاخص‌های مدل ریاضی برنامه‌ریزی توسعه زنجیره تأمین MEI به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

جدول ۲: شاخص‌ها و متغیرهای مدل ریاضی

Tab. 2: The results of the second scenario

شاخص ناحیه‌ها	i, j
شاخص واحدهای تولید پراکنده	i, j
میزان ظرفیت واحد تولید پراکنده gام	g
میزان بار مصرفی مشترکین واقع در ناحیه Am	P_g^{Dn}
میزان توان الکتریکی انتقالی بین دو ناحیه i و j	P_i^{Load}
هزینه کل سرمایه‌گذاری برای واحد تولید پراکنده gام	$P_{i,j}^{Line}$
هزینه تعمیرات و نگهداری واحد تولید پراکنده gام	CC_G
هزینه سوخت مصرفی واحد تولید پراکنده gام	OM_g
ارزش حرارتی سوخت ورودی به واحد تولید پراکنده gام	ρ_g
بازدهی واحد تولید پراکنده gام	HV_g
طول عمر واحد تولید پراکنده gام	η_g
نرخ بهره سالانه	LT_g
میزان جریمه انرژی تأمین نشده	d
چگالی آلاینده‌های تولیدی واحد تولید پراکنده gام	τ
حداکثر ظرفیت مجاز برای تولید پراکنده gام	D_g
حداقل و حداکثر پتانسیل تولید تجدیدپذیر در ناحیه Am	$\overline{P_g^{Dn}}$
حداکثر ظرفیت مسیر موجود بین ناحیه i و j	$\frac{P_i^{DG}}{P_i^{DG}}$
حداکثر ضریب نفوذ تولیدات پراکنده	$\overline{P_{i,j}^{Line}}$
حداکثر تعداد تولیدات پراکنده	\overline{PD}

۴-۱. توابع هدف

در این پژوهش، یک مدل جامع چندهدفه و احتمالاتی به منظور تعیین محل نصب، نوع و ظرفیت بهینه تولیدات پراکنده در سطح زنجیره تأمین جدید برق پیشنهاد شده است. هدف‌گذاری نهایی این مدل کمینه‌سازی تلفات انرژی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، انرژی تأمین نشده و آلاینده‌های زیست‌محیطی است. این مدل به صورت چند هدفه توسط الگوریتم چندهدفه ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب حل خواهد شد. اهداف اصلی، تعیین محل، نوع و ظرفیت واحدهای تولید پراکنده در زنجیره تأمین MEI به شرح زیر، در نظر گرفته شده است:

تابع هدف اقتصادی هزینه تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز مشترکین را کمینه و شامل دو بخش هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه بهره‌برداری است. هزینه بهره‌برداری شامل هزینه تعمیر و نگهداری و هزینه سوخت است. مجموع هزینه‌های خرید، نصب تولیدات پراکنده هزینه‌های سرمایه‌گذاری است. بیان ریاضی تابع هدف اقتصادی به صورت رابطه زیر است.

$$ECOF = \sum_{g \in G} AD_g \cdot P_g^{DG} \cdot \beta + P_g^{DG} \cdot OM_g \cdot \beta + P_g^{DG} \cdot \rho_g \cdot r_g \quad (1)$$

در تابع هدف اقتصادی MEI، AC معادل هزینه سالیانه سرمایه‌گذاری برای هر یک از واحدهای تولید توان الکتریکی است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$AC_g = \frac{d(1+d)^{LT_z}}{(1+d)^{LT_z} - 1} \cdot CC_g \quad (2)$$

به منظور تبدیل هزینه‌های آینده (دوره زمانی t) به هزینه فعلی، ضریب β در تابع هدف به کار گرفته شده است. این ضریب از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\beta = \frac{1}{(1+d)^t} \quad (3)$$

نرخ تبدیل انرژی اولیه در واحد تولیدی gام به انرژی الکتریکی در واحدهای تجدیدناپذیر به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$r = \frac{1}{HV_g \cdot \eta_g} \quad (4)$$

هدف اجتماعی، کمینه‌سازی بار از دست رفته و به حداقل رساندن انرژی تأمین نشده مشترکین MEI در افق برنامه‌ریزی را دنبال می‌کند. حضور تولیدات پراکنده در کنار مشترکین و ایجاد زنجیره تأمین توزیع شده، قطعی برق را کاهش می‌دهد. وقفه در برق‌رسانی به مشترکین به صورت جریمه و با افزودن هزینه در تابع هدف در نظر گرفته شده است. مقدار جریمه به شاخص ENS (مقدار انرژی تأمین نشده) که یکی از شاخص‌های قابلیت اطمینان است، وابسته است.

$$ROF = \tau \cdot \sum_{i \in B} (ENS_i) \quad (5)$$

یکی از توابع هدف مهم در مکان‌یابی واحدهای تولید پراکنده در زنجیره تأمین MEI، کمینه کردن مقدار تلفات انرژی الکتریکی است. با توجه به جریان و مقاومت بالا در شبکه توزیع و طول بالای این شبکه، میزان تلفات در آن بسیار قابل توجه است.

$$LEOF = \sum_{g \in G} P_g^{DG} - \sum_{i \in B} (P_i^{Load} - ENS_i) \quad (6)$$

تابع هدف زیست‌محیطی، شامل میزان انتشار آلاینده‌های تولید شده توسط واحدهای تولیدی غیر تجدیدپذیر است و بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$EOF = \sum_{g \in G} (D_g \cdot P_g^{DG}) \quad (7)$$

۴-۲. هدف کاهش تلفات انرژی (ELOF)

یکی از توابع هدف مهم در مکان‌یابی واحدهای تولید پراکنده در زنجیره تأمین MEI، کمینه کردن مقدار تلفات انرژی الکتریکی است. تلفات علاوه بر مشکلات فنی، باعث تحمیل بار اضافی به سیستم و افزایش هزینه‌های بیشتر می‌شود. با توجه به جریان و مقاومت بالا در شبکه توزیع و طول بالای این شبکه، میزان تلفات در آن بسیار قابل توجه است. تابع هدف به صورت زیر بیان می‌شود:

$$LEOF = \sum_{g \in G} P_g^{DG} - \sum_{i \in B} (P_i^{Load} - ENS_i) \quad (8)$$

۴-۳. قيود و محدودیت‌ها

معادلات تعادل توان تولیدی و مصرفی در هر یک از گره‌های زنجیره تأمین به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$P_{i,j}^{Line} + P_{g,i}^{DG} = P_i^{Load} \quad (i, j) \in B, \quad g \in G \quad (9)$$

هر مسیر حداکثر ظرفیت مشخصی دارد. محدودیت توان عبوری از هر مسیر در ادامه بیان شده‌اند.

$$|P_{i,j}^{Line}| \leq \overline{P_{i,j}^{Line}} \quad (i, j) \in B \quad (10)$$

حداکثر ظرفیت واحدهای تولید پراکنده توسط رابطه زیر بیان می‌شود.

$$0 \leq P_g^{DG} \leq \overline{P_g^{DG}} \quad g \in G \quad (11)$$

حداکثر پتانسیل تولید در هر ناحیه با توجه به شرایط محیطی و اقلیمی توسط رابطه زیر بیان می‌شود. این محدوده به صورت احتمالاتی و از طریق روش تخمین نقطه مشخص می‌شود.

$$p_i^{DG} \leq p_{g,i}^{DG} \leq \overline{p_i^{DG}} \quad g \in G, i \in B \quad (12)$$

میزان توان تولید شده در کل زنجیره تأمین نباید از یک مقدار مشخص بیشتر باشد. معادله (۱۴) سطح نفوذ کل واحدهای تولیدی در زنجیره تأمین را کنترل می‌کند.

$$PD = \frac{\sum_s p_g^{DG}}{\sum_i p_i^{Load}} \quad g \in G, i \in B \quad (13)$$

$$PD \leq \overline{PD} \quad (14)$$

حداکثر تعداد واحد تولیدی جدید مجاز برای احداث در زنجیره تأمین نیز نباید از N_{max} فراتر رود.

$$g \leq N_{max} \quad g \in G \quad (15)$$

۴-۴. مدل‌سازی عدم قطعیت تولید تجدیدپذیر

از آنجایی که سرعت باد و شدت تابش خورشید ماهیت احتمالاتی دارند، توان خروجی این واحدها متناوب است. در این پژوهش، برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های تولید این واحدها، از دو تابع چگالی احتمال استفاده شده است. تابع چگالی احتمال رایلی برای مدل‌سازی مناسب رفتار سرعت باد در هر دوره پیش‌بینی استفاده شده است. تابع چگالی احتمال رایلی نوع خاصی از تابع چگالی احتمال ویبال می‌باشد.

$$f_w(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right) \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \quad (16)$$

که در آن، $f_w(v)$ ، c و v به ترتیب، تابع چگالی احتمال رایلی، شاخص مقیاس و سرعت باد می‌باشند. اگر مقدار متوسط سرعت‌های باد (v_m) برای یک ناحیه، مشخص باشد، سپس، شاخص مقیاس c می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود.

$$v_m = \int_0^{\infty} v f_w(v) dv = \int_0^{\infty} \left(\frac{2v^2}{c^2}\right) \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] dv = \frac{\sqrt{\pi}}{2} c \quad (17)$$

$$c \cong 1.128 v_m$$

توان تولید شده توسط توربین به صورت رابطه زیر محاسبه شده است.

$$p_g^{DG}(v) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq v_{aw} \leq v_{ci} \\ p_g^{rated} \times \frac{(v_{aw} - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} & , v_{ci} \leq v_{aw} \leq v_r \\ 0 & , v_{co} \leq v_{aw} \end{cases} \quad (18)$$

که در آن، v_{ci} ، v_r و v_{co} به ترتیب، سرعت cut-in، سرعت نامی و سرعت cut-off توربین بادی در ناحیه و $p_g^{DG}(v)$ توان خروجی واحد تولید پراکنده گام از نوع بادی به ازای سرعت باد v است.

توان خروجی واحد فتوولتائیک به شدت تابش بستگی دارد. توزیع ساعتی تابش در یک موقعیت خاص، یک توزیع دو قله‌ای شامل ترکیب خطی از دو تابع توزیع تک‌قله‌ای می‌باشد. برای هر تابع تک‌قله‌ای از یک تابع چگالی احتمال بتا مطابق معادله (۱۹)، استفاده شده است.

$$f_b(s_i) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times s_i^{\alpha-1} \times (1 - s_i)^{\beta-1} & , \text{for } 0 \leq s_i \leq 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

که در آن، s_i نشان‌دهنده تابش خورشید (kW/m^2) می‌باشد. پارامترهای تابع توزیع بتا (α, β) به صورت زیر محاسبه شده‌اند.

$$\beta = (1 - \mu) \times \left(\frac{\mu \times (1 + \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{\mu \times \beta}{1 - \mu} \quad (21)$$

تابع تبدیل تابش به توان استفاده شده، به صورت معادله (۲۲) است. که در آن، $P_g^{DG}(s_i)$ توان خروجی واحد تولید پراکنده g از نوع فتوولتائیک به ازای تابش s_i ، η^{PV} و Spv نیز به ترتیب، بهره‌وری و مساحت کل محدوده مجهز به فتوولتائیک در ناحیه A_m می‌باشند.

$$P_g^{DG}(s_i) = \eta_g^{DG} \times S_i \times s_i \quad (22)$$

روش تخمین نقطه به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت توان تولیدی منابع تجدیدپذیر در MEI استفاده شده است. ابتدا، تعداد متغیرهای دارای عدم قطعیت (m) تعیین می‌شوند؛ و برای A_m متغیر از مجموعه متغیرهای تصادفی مومن اول و دوم در صفر تنظیم می‌شود.

$$E(S_i^h) = 0, h = 1, 2 \quad (23)$$

در ادامه، پارامتر احتمالاتی به نام z_l انتخاب و ضریب چولگی برای آن، به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود. در این رابطه μ_{z_l} میانگین، $\lambda_{1,3}$ ضریب چولگی، E عملگر نشان‌دهنده امید ریاضی و σ_{z_l} انحراف معیار z_l است.

$$\lambda_{1,3} = \frac{E[(z_l - \mu_{z_l})^3]}{(\sigma_{z_l})^3} \quad (24)$$

سپس، به صورت رابطه زیر دو مکان استاندارد تعیین می‌شود.

$$\xi_{1,1} = \frac{\lambda_{1,3}}{2} + \sqrt{m + \left(\frac{\lambda_{1,3}}{2}\right)^2} \quad (25)$$

دو پارامتر مکان تعیین شده در مرحله قبل، به صورت رابطه زیر تخمین زده می‌شوند.

$$z_{l,k} = \mu_{zl} + \xi_{1,k} \sigma_{zl}, \quad k = 1, 2 \quad (26)$$

در این مرحله برای دو پارامتر موقعیت تخمین زده شده در مرحله قبل، تابع هدف غیر احتمالاتی زیر محاسبه می‌شود.

$$S_{i(l,k)} = F(\mu_{z1}, \mu_{z2}, \dots, \mu_{zk}, \dots, \mu_{zm}), \quad k = 1, 2 \quad (27)$$

دو عامل وزنی به توجه به رابطه (۲۸) محاسبه می‌شود.

$$\omega_{l,k} = \frac{1}{m} (-1)^k \cdot \frac{\xi_{1,(3-k)}}{\xi_{1,1} - \xi_{1,2}}, \quad k = 1, 2 \quad (28)$$

مومن‌های اول و دوم متغیرهای تصادفی به روز می‌شوند.

$$E(S_i^h) = E(S_i^h) + \sum_{k=1}^2 \omega_{l,k} \cdot (S_{i(l,k)})^h, \quad h = 1, 2 \quad (29)$$

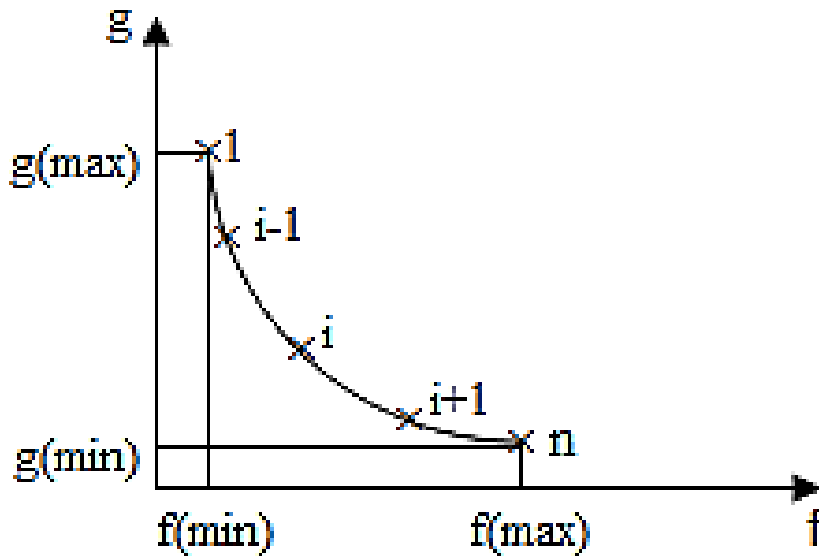
برای تمام متغیرهای تصادفی، مراحل فوق، تکرار می‌شود. میانگین و انحراف معیار با توجه به رابطه (۳۰)، محاسبه می‌شود.

$$\mu_{S_i} = E(S_i), \quad \sigma_{S_i} = \sqrt{E(S_i^2) - (E(S_i))^2} \quad (30)$$

روش حل: برای حل، از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب استفاده شده است که الگوریتم بسیار قدرتمند در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است. تفاوت عمده این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک استاندارد، در مکانیزم مرتب‌سازی پاسخ‌ها می‌باشد. مفهوم غلبه در الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب به‌عنوان یک معیار مقایسه بین اعضای جمعیت، استفاده می‌گردد. هدف در این الگوریتم ژنتیک، رسیدن به پاسخ‌های در وهله اول با کیفیت بالا و در وهله دوم نظم بالا است. در اینجا منظور از نظم، پخش شدن یکنواخت پاسخ‌ها در فضای مجموعه جواب است. در این پژوهش، از دو معیار مقایسه کیفیت و نظم برای انتخاب پاسخ‌ها استفاده می‌کنیم؛ یعنی پاسخ‌ها را مقایسه می‌کنیم و پاسخی که کیفیت بالاتری داشته باشد را می‌پذیریم و اگر دو پاسخ دارای کیفیت یکسانی باشند و به عبارتی هیچ‌یک بر دیگری غلبه نکند، پاسخی را می‌پذیریم که از نظم بهتری برخوردار باشد. ما به دنبال یافتن یک تقریب مناسب از فضای مجموعه جواب هستیم، یعنی جواب‌هایی که به دست می‌آوریم بایستی قطعاً نامغلوب باشند و همچنین تقریباً همه جای فضای مجموعه جواب را شامل شوند.

معیار اول، برای انتخاب بهترین پاسخ‌ها، رتبه‌بندی می‌باشد. بدین منظور، مجموعه Q را به‌عنوان پیش‌نویسی از F_{k+1} در نظر می‌گیریم. به ازای هر عضو از F_k مانند p و به ازای هر عضو از S_p مانند q (تمام qهایی که

توسط p مغلوب می‌شوند) یک واحد از n_q کم می‌کنیم. به این ترتیب، تأثیر سوء F_k بر سایر اعضای جمعیت را از بین می‌بریم. اگر $n_q = 0$ باشد، آنگاه q را به مجموعه Q اضافه می‌کنیم و این روند را تا جایی ادامه می‌دهیم که Q برابر یک مجموعه تهی گردد. آنگاه فرآیند رتبه‌بندی اعضای جمعیت خاتمه یافته است. معیار دوم، فاصله ازدحامی است. که هرچه مقدار بیشتری داشته باشد، پاسخ از نظم بهتری برخوردار است و به تنوع جواب‌ها کمک بیشتری می‌کند. فاصله ازدحامی نسبت به همسایه قبلی و بعدی و اولین و آخرین عضو جمعیت تعیین می‌شود.



شکل ۱: تعیین فاصله شلوغی

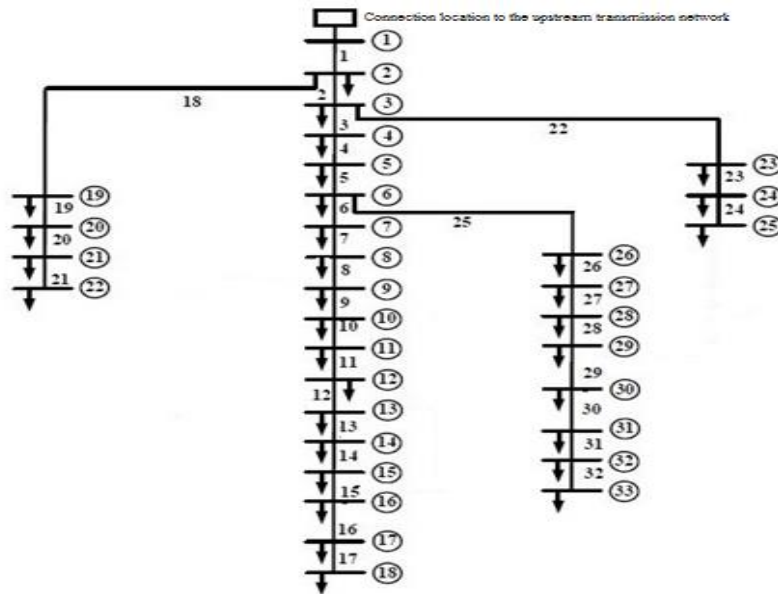
Fig. 1: Determination of crowding distance

$$d_i^j = \frac{|f_j^{i+1} - f_j^{i-1}|}{f_j^{\max} - f_j^{\min}} \quad (31)$$

$$d_i = d_i^1 + d_i^2 + \dots + d_i^m = \sum_{j=1}^m d_i^j \quad (32)$$

۴-۵. تجزیه، تحلیل و نتایج عددی

شبیه‌سازی توسعه زنجیره تأمین MEI بر روی یک شبکه استاندارد و مرجع با عنوان شبکه توزیع ۳۳ ناحیه IEEE (Pham, 2006) انجام شده است. این شبکه در حالت زنجیره تأمین سنتی، از شبکه انتقال بالادست که به ناحیه یک متصل است، تأمین انرژی می‌شود و هیچ واحد تولید پراکنده‌ای ندارد. محاسبات در محیط نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است. در ادامه، ابتدا شبکه ۳۳ ناحیه IEEE معرفی می‌شود و در ادامه با انجام تست‌های مختلف، چگونگی نفوذ تولیدات پراکنده و اثر آن‌ها بر زنجیره تأمین MEI ارزیابی می‌شود. شبکه تست: دیاگرام خطی شبکه مورد مطالعه، در شکل ۲، نمایش داده شده است.



شکل ۲: شبکه ۳۳ باس IEEE

Fig. 2: IEEE 33-bus grid

ناحیه شماره ۱ به شبکه اصلی متصل شده است و انرژی موردنیاز مشترکین در ساختار سنتی از طریق این ناحیه با دریافت از شبکه انتقال، تأمین می‌شود. میزان مصرف کل مشترکین ۳.۷ مگاوات در نظر گرفته شده است. مشخصات بارهای موجود در این سیستم نیز در جدول ۳، آورده شده است. اطلاعات مربوط به واحدهای تولیدی مختلف در جدول ۴، بیان شده است. قیمت انرژی توزیع نشده در این شبکه $7000 \text{ \$/MWh}$ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳: اطلاعات بار شین‌های مختلف شبکه ۳۳ ناحیه IEEE

Tab. 3: The results of the third scenario

توان مصرفی مشترکین (MW)	شماره ناحیه	توان مصرفی مشترکین (MW)	شماره ناحیه	توان مصرفی مشترکین (MW)	شماره ناحیه
۰.۱۰۶۵	۲۳	۰.۰۶	۱۲	۰	۱
۰.۲۲	۲۴	۰.۰۶	۱۳	۰.۱۱	۲
۰.۲۲	۲۵	۰.۱	۱۴	۰.۰۹	۳
۰.۰۶	۲۶	۰.۰۶	۱۵	۰.۲۲	۴
۰.۰۸۸۵	۲۷	۰.۰۶	۱۶	۰.۰۶	۵
۰.۰۶	۲۸	۰.۰۶	۱۷	۰.۱۶	۶
۰.۱۲	۲۹	۰.۰۸	۱۸	۰.۲	۷
۰.۲	۳۰	۰.۰۸	۱۹	۰.۲	۸
۰.۲	۳۱	۰.۰۸	۲۰	۰.۰۶	۹
۰.۲۱	۳۲	۰.۰۸	۲۱	۰.۰۶	۱۰
۰.۱۶	۳۳	۰.۰۸	۲۲	۰.۰۴۵	۱۱

جدول ۴: اطلاعات واحدهای مختلف تولید پراکنده (Firestone, 2004; Gardiner & Montpelier)

Tab. 4: The information of different production units is scattered

طول عمر (سال)	هزینه تعمیرات و نگهداری (\$/kWh)	میزان آلاینده (kg/MWh)	هزینه سوخت (\$/kWh)	هزینه سرمایه‌گذاری (\$/kW)	نوع تولیدات پراکنده
۳	۰.۰۱۵	۵۳۰	۰.۰۷۵	۱۴۸۵	میکروتوربین
۳	۰.۰۱	۵۱۰	۰.۰۶۷	۳۶۷۴	پیل سوختی
۱۲	۰.۰۱۸	۹۲۰	۰.۰۶	۱۳۵۱	دیزل ژنراتور
۰	۰.۰۰۹	۰	۰	۶۶۷۵	توربین بادی
۲۰	۰.۰۰۵	۰	۰	۳۸۶۶	فتوولتائیک

حداکثر ظرفیت هر یک از واحدهای تولید پراکنده ۴۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. برای محل نصب واحدهای تولیدی تجدیدناپذیر محدودیتی اعمال نشده است. ظرفیت استاندارد برای واحدهای تولید پراکنده در نظر گرفته شده است؛ بدین صورت که مقدار ظرفیت‌ها ضریبی از ۱۰ کیلو وات است. ضریب نفوذ تولیدات پراکنده صد درصد در نظر گرفته شده است. بدین معنا که زنجیره تأمین به‌طور کامل از نظر انرژی خودکفا شود و بتواند کل انرژی موردنیاز خود را از تولیدات پراکنده محلی تأمین کند. در این صورت حتی در صورت قطع شبکه انتقال یا تولید بالادست، زنجیره تأمین قابلیت عملکرد در حالت مستقل یا جزیره‌ای را دارد.

۶-۴. سناریوهای مختلف جهت ارزیابی شبیه سازی

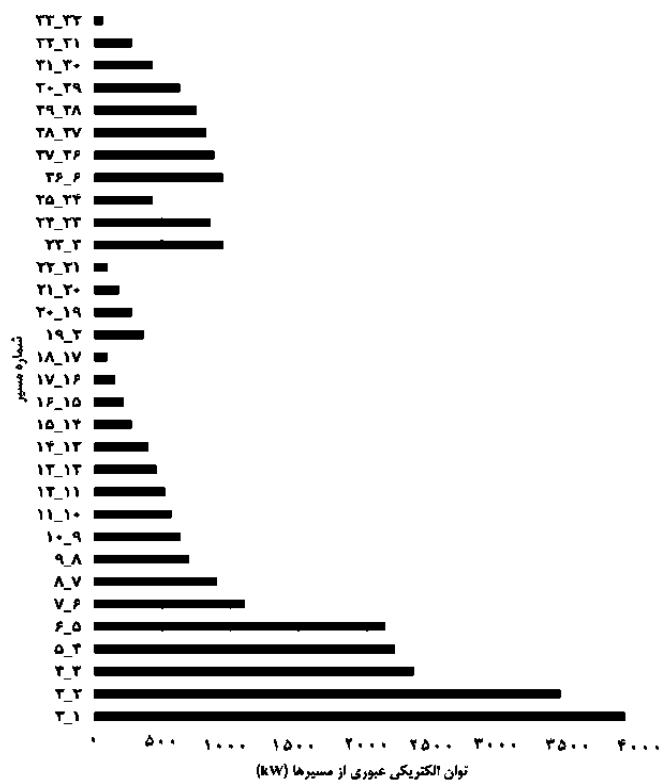
در ادامه نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی انجام شده در سناریوهای مختلف، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد؛ و مقایسه سناریوها از طریق نتایج، نمودارها، اعداد و ارقام به‌دست می‌آید. در هر سناریو، محل نصب واحدهای تولید و ظرفیت آن‌ها، میزان تلفات توان، مقدار انرژی تأمین نشده و همچنین مقدار آلاینده‌ی تولید شده بیان می‌شود.

۶-۴-۱. سناریوی اول

این سناریو، حالت اولیه و سنتی زنجیره تأمین را نشان می‌دهد که هیچ واحد پراکنده‌ای در آن نصب نشده است و صرفاً از طریق شبکه انتقال و به‌صورت یک‌طرفه تأمین می‌شود. تمام انرژی الکتریکی موردنیاز مشترکین در این حالت از شبکه انتقال متصل شده به ناحیه ۱ تأمین می‌شود و شبکه توزیع تنها وظیفه توزیع انرژی دریافتی از این ناحیه را برعهده دارد. هدف از انجام این سناریو، مطالعه و بررسی وضعیت زنجیره تأمین قبل از به‌روز شدن و نصب واحدهای تولید پراکنده و به‌کارگیری روش پیشنهادی است. با توجه به این‌که انرژی الکتریکی در این حالت توسط نیروگاه‌های بزرگ مبتنی بر سوخت‌های مختلف تأمین می‌شود، میزان آلاینده‌ی تولید شده برای تأمین هر مگاوات ساعت انرژی الکتریکی ۸۱۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است (Gardiner & Montpelier). شکل ۳، توان جاری شده در خطوط (مسیرهای) این زنجیره را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با توجه به این‌که کل توان باید از شبکه انتقال دریافت شود و از طریق مسیرها بین مشترکین

توزیع شود، بیشترین توان از مسیرهای ۱-۲ و ۲-۳ عبور می‌کند؛ لذا این دو مسیر بسیار تحت فشار هستند از آنجایی که حداکثر میزان توان عبوری از مسیرها برابر ظرفیت آن‌ها است، و با توجه به این که میزان توان عبوری از این دو مسیر (۱-۲ و ۲-۳) در آستانه بالای ظرفیت آن‌ها قرار دارد؛ لذا زنجیره اگر بخواهد تمام مشترکین پایین دست را تأمین انرژی کند، این دو خط از محدوده مجاز خارج می‌شوند. به همین دلیل نمی‌تواند انرژی الکتریکی تمام مشترکین پایین دست را تأمین کند. میزان انرژی توزیع نشده در این حالت برابر ۰.۲ MWh است و هزینه تحمیلی این مقدار بار ازدست رفته برای بهره‌بردار زنجیره تأمین \$ ۱۴۰۰ است. اطلاعات مربوط به این سناریو در جدول ۴، بیان شده است.

در ادامه این سناریو، حالت احتمالاتی برای خرابی یا قطع در خطوط شبکه با استراتژی N-1 در نظر گرفته شده است؛ به عبارت دیگر، زنجیره تأمین در شرایط بهره‌برداری بحرانی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مسیر ۵-۶ با انتخاب تصادفی و بر اثر خرابی، قطع می‌شود. در این حالت زنجیره به دو ریزشکته ۱ و ریزشکته ۲ مطابق شکل ۴، تقسیم می‌شود. مشترکین واقع در ریزشکته ۱ همچنان انرژی مورد نیاز خود را از طریق شبکه انتقال متصل به ناحیه ۱ دریافت می‌کنند؛ اما کل مشترکین واقع در ریزشکته ۲ به دلیل یک طرفه بودن و غیرفعال بودن شبکه توزیع در زنجیره تأمین سنتی بی‌برق می‌شوند که شامل بیش از نیمی از مشترکین است. به بیان دیگر، ۲۳۵۳۵ مگاوات از کل ۳۰۷ مگاوات توان مورد نیاز مشترکین، بی‌برق می‌شود. این تست به خوبی یکی از بزرگ‌ترین مشکلات این زنجیره را نشان می‌دهد.



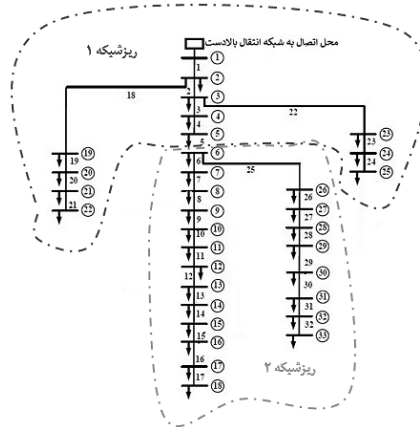
شکل ۳: توان عبوری از مسیرهای مختلف

Fig. 3: Ability to pass through different routes

جدول ۵: نتایج سناریوی اول

Tab. 5: The results of the first scenario

تلفات انرژی (kWh)	میزان انرژی تأمین نشده (kWh)	میزان آلاینده‌گی (kg/kWh)
۳۲۰	۲۰۰	۳۰۹۴.۲



شکل ۴: تبدیل زنجیره به دو ریزشبکه بعد از قطع مسیر ۵-۶

Fig. 4: Converting the chain into two micro-grids after cutting the route 5-6

۶-۴-۲. سناریوی دوم

در این سناریو، تنها اهداف اقتصادی و اجتماعی در نظر گرفته شده است. محل نصب و ظرفیت تولیدات پراکنده در جدول ۶، بیان شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در این حالت به منظور خودکفایی کامل انرژی در زنجیره تأمین واحدهای تولید پراکنده در نقاط مختلف زنجیره قرار گرفته‌اند تا مقدار توان دریافتی از شبکه انتقال ناحیه ۱ به صفر برسد؛ به عبارت دیگر ضریب نفوذ صددرد است.

جدول ۶: محل نصب و ظرفیت تولیدات پراکنده در سناریوی دوم

Tab. 6: Installation location and capacity of dispersed production in the second scenario

ظرفیت (kW)	شماره ناحیه نصب	ظرفیت (kW)	شماره ناحیه نصب
۳۲۰	۶	۴۰۰	۲۴
۲۴۰	۹	۴۰	۲۵
۲۸۰	۱۰	۴۰۰	۲۶

۲۸	۴۰	۱۱	۴۰۰
۲۹	۲۸۰	۱۳	۲۴۰
۳۰	۱۲۰	۱۴	۳۶۰
۳۱	۲۸۰	۱۵	۴۰
۳۳	۴۰۰	۱۸	۱۶۰

با توجه به این که در این سناریو محدودیتی برای تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی وجود ندارد، مدل از تولید پراکنده‌ای استفاده می‌کند که کمترین هزینه را داشته باشد. به همین دلیل تمام تولیدات پراکنده از نوع دیزل ژنراتور انتخاب شده است. در صورتی که این واحدها به درستی مکان‌یابی شوند، با توجه به نزدیک شدن تولیدکنندگان به محل مصرف، می‌توان انتظار داشت که تلفات انرژی هم‌علی‌رغم در نظر نگرفتن تابع هدف مربوطه، کاهش یابد. نتایج حاصل از این تست در جدول ۷، بیان شده است.

جدول ۷: نتایج سناریوی دوم

Tab. 7: The results of the second scenario

تلفات انرژی (kWh)	میزان انرژی تأمین نشده (kWh)	میزان آلاینده‌گی (kg/kWh)	شماره سناریو
۳۲۰	۲۰۰	۳۰۹۴.۲	سناریوی اول
۲۱۰	۰	۳۵۹۷.۲	سناریوی دوم

با توجه به نتایج حاصل از جدول (۷)، با به‌کارگیری تولیدات پراکنده در سطح زنجیره تأمین صنعت برق، میزان بار ازدست رفته صفر می‌شود و هیچ مشترکی بدون برق باقی نمی‌ماند؛ همچنین با توجه به نزدیک شدن محل تولید و مصرف و کاهش عبور توان از خطوط، تلفات انرژی کاهش، اما میزان آلاینده‌های تولید شده به علت استفاده از تولید پراکنده ارزان قیمت دیزلی با آلاینده‌گی بالا، بسیار افزایش یافته است.

۳-۶-۴. سناریوی سوم

در این سناریو، تمام اهداف بیان شده در بخش قبل در نظر گرفته شده است؛ به عبارت دیگر، علاوه بر هزینه‌ها و انرژی ازدست رفته، میزان تلفات انرژی و آلاینده‌گی تولیدشده در شبکه را نیز کمینه کند. محل نصب و ظرفیت تولیدات پراکنده در جدول ۸، بیان شده است. لازم به ذکر است، مناطق ۱۹ تا ۲۲ از نظر آب‌وهوایی مناسب برای نصب پنل خورشیدی و مناطق ۲۶ تا ۳۳ مستعد نصب توربین بادی هستند و توان خروجی این منابع بصورت احتمالاتی مدل شده است.

در این حالت نیز به منظور خودکفایی کامل انرژی و کاهش تلفات در زنجیره تأمین، واحدهای تولید پراکنده در نقاط مختلف زنجیره قرار گرفته‌اند تا مقدار توان دریافتی از شبکه انتقال ناحیه ۱ به صفر برسد؛ به عبارت دیگر ضریب نفوذ صددرد است.

جدول ۸: محل نصب و ظرفیت تولیدات پراکنده در سناریوی دوم

Tab. 8: Installation location and capacity of dispersed production in the second scenario

نوع تولید پراکنده	شماره ناحیه نصب	ظرفیت (kW)	نوع تولید پراکنده	شماره ناحیه نصب	ظرفیت (kW)
میکروتوربین	۱۷	۴۰۰	میکروتوربین	۳	۸۰
خورشیدی	۲۶	۳۶۰	میکروتوربین	۴	۴۰۰
خورشیدی	۲۷	۳۲۰	میکروتوربین	۷	۱۶۰
خورشیدی	۲۹	۲۴۰	میکروتوربین	۸	۲۰۰
خورشیدی	۳۰	۳۵۰	میکروتوربین	۱۳	۱۲۰
خورشیدی	۳۱	۴۰۰	میکروتوربین	۱۵	۴۰۰
			میکروتوربین	۱۶	۳۶۰

با توجه به این که در این سناریو میزان آلاینده‌ها نیز به‌عنوان یکی از توابع هدف مطرح شده است، از تولید پراکنده‌ای استفاده می‌کند که تا حد امکان هزینه و آلاینده‌گی کمتری داشته باشد. به‌همین دلیل از بین تولیدات پراکنده غیرتجدیدپذیر، میکروتوربین انتخاب شده است. در ضمن از بین واحدهای تجدیدپذیر نیز پنل خورشیدی به دلیل هزینه‌های کمتر به توربین بادی ترجیح داده شده است. نتایج حاصل از این تست در جدول ۹، بیان شده است.

جدول ۹: نتایج سناریوی سوم

Tab. 9: The results of the third scenario

تلفات انرژی (kWh)	میزان انرژی تأمین نشده (kWh)	میزان آلاینده‌گی (kg/kWh)	شماره سناریو
۳۲۰	۲۰۰	۳۰۹۴.۲	سناریوی اول
۲۱۰	۰	۳۵۹۷.۲	سناریوی دوم
۹۰	۰	۱۰۷۶	سناریوی سوم

با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول ۹، با به‌کارگیری تولیدات پراکنده در سطح زنجیره تأمین صنعت برق، میزان بار ازدست رفته صفر و هیچ مشتری بدون برق باقی نمی‌ماند. همچنین با در نظر گرفتن تابع هدف تلفات در کنار سایر اهداف، تلفات انرژی نسبت به سناریوی اول حدود ۱۲۰ کیلو وات کاهش یافت. سوخت میکروتوربین گاز طبیعی است که میزان آلاینده‌گی کمتری نسبت به دیزل ژنراتور تولید می‌کند؛ همچنین با

به‌کارگیری تابع هدف زیست‌محیطی، مدل به‌سمت استفاده از تولیدات خورشیدی علی‌رغم هزینه تولید نسبتاً بالای آن‌ها حرکت کرده است. به‌همین دلیل در این سناریو میزان آلاینده‌گی بسیار کاهش یافته است و تقریباً یک سوم شده است. در این سناریو با نفوذ تولیدات پراکنده و توزیع آن‌ها در سطح زنجیره تأمین، انرژی الکتریکی هیچ مشتری قطع نمی‌شود؛ لذا قابلیت اطمینان زنجیره تأمین، افزایش قابل توجهی یافته است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، لزوم حرکت زنجیره تأمین برق از حالت یک‌طرفه با تولیدات متمرکز و بزرگ به‌سمت زنجیره تأمین توزیع شده و مدرن با تولیدات پراکنده و کوچک را نشان داده شد. در این راستا استراتژی مناسب برای تعیین محل، نوع و ظرفیت بهینه این تولیدات در زنجیره تأمین صنعت برق مدرن به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی مفید با چهار هدف به‌منظور کمینه کردن هزینه‌ها، انرژی تأمین نشده، آلاینده‌های تولید شده و تلفات انرژی پیشنهاد شد. به‌منظور یافتن پاسخ‌های بهینه مسأله چند هدفه از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب استفاده شد. مطابق نتایج به‌دست آمده، بر روی زنجیره تأمین استاندارد ۳۳ ناحیه‌ای IEEE، تغییر رویکرد از زنجیره تأمین سنتی با رویکرد یک‌طرفه به زنجیره تأمین مدرن با نفوذ تولیدات پراکنده تأثیر قابل توجهی بر افزایش مداومت عرضه انرژی به‌خصوص در زمان وقوع پیشامد در شبکه دارد. مطابق این نتایج به‌کارگیری تولیدات پراکنده در سطح زنجیره تأمین صنعت برق، میزان بار ازدست رفته صفر و هیچ مشتری بدون برق باقی نمی‌ماند. همچنین با در نظر گرفتن تابع هدف تلفات در کنار سایر اهداف، تلفات انرژی نسبت به سناریوی اول حدود ۱۲۰ کیلو وات کاهش یافت. سوخت میکروتوربین گاز طبیعی است و میزان آلاینده‌گی کمتری نسبت به دیزل ژنراتور تولید می‌کند. با استفاده از تولیدات پراکنده در سطح شبکه توزیع میزان تلفات انرژی حدوداً به یک-چهارم کاهش و میزان آلاینده‌گی تولید شده را نیز حدوداً به میزان یک-سوم کاهش داد. برای کارهای آینده، استفاده از تولیدات کوچک در کنار مصرف کننده در زنجیره تأمین مدرن، استفاده از تولیدات تجدیدپذیر در زنجیره تأمین مدرن، استفاده از تولیدات با تکنولوژی بالاتر و آلاینده‌گی کمتر، استراتژی مدیریت انرژی زنجیره تأمین صنعت برق مدرن با مشارکت خودروهای الکتریکی و منابع ذخیره‌ساز انرژی، تعیین محل و ظرفیت بهینه ایستگاه‌های برای شارژ و دشارژ خودروهای برقی در زنجیره تأمین صنعت برق مدرن، پیشنهاد می‌شود.

کتابنامه

- اسدی، ای.؛ حبیبی، ف.؛ نیکلک، س.؛ و صاحبیب، ح.، (۱۳۹۷). «مدل مسیریابی مکان-موجودی-موجودی تصادفی دوهدفه برای زنجیره تأمین سوخت زیستی مبتنی بر ریزجلبک». *انرژی کاربردی*، ۲۲۸: ۲۲۳۵-۲۲۶۱. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.067
- اصغری‌زاده، ا.؛ ترابی، س.ع.؛ محقر، ع.؛ و زارع‌شوریجه، م. ع.، (۱۳۹۸). «طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار: مروری بر مدل‌های کمی با استفاده از تحلیل محتوا». *انرژی و اقتصاد محیطی*، ۳(۲): ۱۴۳-۱۷۶. DOI: 10.22097/EEER.2019.184458.1081

- عیوقی، ح؛ پودهب، ح.د؛ رادک، ع؛ و طالبید، د.، (۲۰۲۰). «ارائه یک مدل چند هدفه یکپارچه برای زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط فازی با رویکرد ابگرایی». *بین المللی تحلیل و کاربردهای غیرخطی* ۱۱ (۱): ۱۰۷-۱۳۶. (DOI: 10.22075/IJNAA2020.4244)
- جین، زی؛ و باح، سی، (۲۰۱۹). «مدیریت زنجیره تأمین پایدار و عملکرد سازمانی: نقش واسطه‌ای مزیت رقابتی». *مدیریت و پایداری*، ۹ (۱): ۱۱۹-۱۳۱. (DOI: 10.5539/JMS.V9N1P119)
- بیاتلو، ف.؛ و بزرگی امیری، ع.، (۱۳۹۷). «یک مدل برنامه ریزی تصادفی دو مرحله ای با شانس محدود برای طراحی شبکه زنجیره تأمین برق: یک مطالعه موردی». *بین المللی مهندسی صنایع و تحقیقات تولید*، ۲۹ (۴): ۴۷۱-۴۸۲. (DOI: 10.22068/IJIEPR.29.4.471)
- حسینی مطلق س.م.، و بی لالا، (۲۰۲۰). «بهینه‌سازی چند هدفه برای مشکلات زنجیره تأمین چند مرحله‌ای چند محصولی در شرایط عدم قطعیت». *بهینه‌سازی در مهندسی صنایع*، ۱۳ (۱)، ۱-۱۷. (DOI: 10.22094/JOIE.2018.555578.1529)
- جیانفرانکو، چیکو؛ و آندره، آ مازو، (۲۰۲۱). «فراابتکاری برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال». *در: برنامه‌ریزی توسعه انتقال: چالش‌های شبکه انتقال انرژی*: ۱۳-۳۸. (DOI.org/10.1016/j.bsheat.2020.08.003)
- لیو و دینگ (۲۰۲۰). برنامه ریزی سیستم قدرت با افزایش انرژی تجدیدپذیر متغیر: مروری بر مدل های بهینه سازی. ۲۴۶، ۱۱۸۹۶۲. (DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118962)
- درمز. گ.؛ و بیلگن، و.؛ (۲۰۲۰). «بهینه‌سازی چند هدفه طراحی شبکه زنجیره تأمین زیست توده پایدار». *انرژی کاربردی*، ۲۷۲: ۱۱۵۲۵۹. (DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115259)
- حسینی مطلق، س.م.؛ سامانی، م. ر. غ.؛ و شهبازیگان، و.، (۱۳۹۹). «استراتژی نوآورانه برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین برق ترکیبی انعطاف پذیر-پایدار تحت عدم قطعیت». *انرژی کاربردی*، ۲۸۰: ۱۱۵۹۲۱. (DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115921)
- جبارزاده، ع.؛ فهیم نیا، ب.؛ و رستگار، س.، (۱۳۹۶). «طراحی سبز و انعطاف پذیر شبکه های زنجیره تأمین برق: یک رویکرد بهینه سازی قوی چندهدفه». *معاملات IEEE در مدیریت مهندسی*. (DOI: 10.1109/TEM.2017.2749638)
- جبارزاده، ع.؛ فهیم نیا، ب.؛ و صبحی، ف.، (۱۳۹۷). «طراحی زنجیره تأمین انعطاف پذیر و پایدار: تجزیه و تحلیل پایداری تحت خطرات اختلال». *بین المللی تحقیقات تولید*: (Doi: 10.1080/00207543.2018.1461950)
- کبادرموش، او؛ و اردوغان، ام. اس.، (۲۰۲۰). «طراحی زنجیره تأمین پایدار، چند وجهی و قابل اعتماد». *سالنامه تحقیق در عملیات*. (DOI: 10.1007/s10479-020-03654-0)
- اکانایکه، پاسوپولتی؛ و کاروناراتنه، آلمیدا، (۲۰۲۱). «کاهش تلفات شبکه و بهبود ولتاژ با قرار دادن و اندازه بهینه ژنراتورهای پراکنده با تزریق توان اکتیو و راکتیو با استفاده از psو دقیق تنظیم شده». *Ijeecs*، ۲۱: ۶۵۶-۶۴۷. (DOI: 10.11591/ijeecs.v21.i2.pp647-656)
- خان، ام.؛ دلبیو وانگ، جی.؛ شیونگ، ال.؛ و سیستمز، ای.، (۲۰۲۱). «استراتژی زمان بندی انرژی بهینه برای شبکه تولید چند انرژی با استفاده از سیستم های چند عاملی». *برق*، ۱۲۴: ۱۰۶۴۰۰. (DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106400)
- معصومیک، س. م.؛ عبدالرشید، س.ح.؛ اولوگو، ای. یو.؛ و غزیلا، ر. ا.ر.، (۲۰۱۴). «طراحی زنجیره تأمین پایدار: یک رویکرد پیکربندی». *دنیا علمی*: DOI: 10.1155/2014/897121
- موسوی، م. م.؛ و بزرگی امیری، ع.، (۱۳۹۶). «یک مشکل برنامه ریزی مکان هاب پایدار چند هدفه برای زنجیره تأمین مواد غذایی فاسد شدنی کامپیوتر و مهندسی صنایع»: DOI: 10.1016/j.cie.2017.07.039
- فام، اچ.، (۲۰۰۶). *کتابچه راهنمای مهندسی قابلیت اطمینان*. ساینس اشپرینگر و رسانه کسب و کار.
- کیو، آر.؛ و بیژئی، وانگ؛ (۲۰۱۶). «طراحی شبکه زنجیره تأمین تحت عدم قطعیت تقاضا و اختلالات عرضه: یک رویکرد بهینه سازی قوی توزیعی». *برنامه نویسی علمی*: DOI: 10.1155/2016/3848520

- رعنا، ن؛ لطیف، م. س. ع؛ عبدالحمید، س. ای، (۲۰۲۰). «الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ: بررسی سیستماتیک برنامه‌های کاربردی». تغییرات و پیشرفت‌های معاصر محاسبات عصبی و برنامه‌های کاربردی»: DOI:10.1007/s00521-020-04849-z

- سانتیبانز-آگیلار، جی. ای؛ کاستلانوس، اس؛ فلورس-تلاکوا هواک، آ؛ شاپیرو، بی. بی؛ پاول، دی. ام؛ بووناسیسی، تی؛ و کامن، دی ام، (۲۰۲۰). «طراحی سیستم‌های تولید فتوولتائیک داخلی تحت محدودیت‌ها و عدم قطعیت جهانی انرژی‌های تجدیدپذیر». J.RENENE. ۱۴۸: ۱۱۷۴-۱۱۸۹. (DOI:10.1016/J.RENENE.2019.10.010)

- وحدت‌زاد، م. ع؛ وهاب وحدت، ع. ت. ن؛ و رضایی، ع. م، (۲۰۱۸). «چارچوب حفاظت از انرژی برای مدیریت زنجیره تأمین سبز». در: مجموعه مقالات کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت عملیات، واشنگتن دی سی، ایالات متحده آمریکا.

- یلدیزباشی، ازتورک؛ و افندیوخلو، بولکان، (۲۰۲۰). «ارزیابی شاخص‌های زنجیره تأمین پایدار اجتماعی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی یکپارچه: مطالعه موردی ترکیه». محیط زیست، توسعه و پایداری: (DOI:10.1007/s10668-020-00774-2)

- Asadi, E.; Habibib, F.; Nickelc, S. & Sahebib, H., (2018). "A bi-objective stochastic location-inventory-routing model for microalgaebased biofuel supply chain". *Applied Energy*, 228: 2235–2261.

- Asgharizadeh, E.; Torabi, S. A.; Mohaghar, A. & Zare-Shourijeh, M. A., (2019). "Sustainable Supply Chain Network Design: A Review on Quantitative Models Using Content Analysis". *Environmental Energy and Economic*, 3(2): 143-176. (DOI:10.22097/EEER.2019.184458.1081)

- Ayoughi, H.; Podehb, H. D.; Raadc, A. & Talebid, D., (2020). "Providing an Integrated Multi-Objective Model for Closed-Loop Supply Chain under Fuzzy Conditions with Upgral Approach". *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications* 11(1): 107-136. (DOI:10.22075/IJNAA2020.4244)

- Baah, C. & Jin, Z., (2019). "Sustainable Supply Chain Management and Organizational Performance: The Intermediary Role of Competitive Advantage". *Journal of Management and Sustainability*, 9(1): 119-131. (DOI:10.5539/JMS.V9N1P119)

- Bayatloo, F. & Bozorgi-Amiri, A., (2018). "A Two-Stage Chance-Constrained Stochastic Programming Model for Electricity Supply Chain Network Design: a Case Study". *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 29(4): 471-482. (DOI:10.22068/IJIEPR.29.4.471)

- Billala, M. M. & Hossaina, M., (2020). "Multi-objective Optimization for Multi-product Multi-period Four Echelon Supply Chain Problems under Uncertainty". *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 13(1): 1-17. (DOI:10.22094/JOIE.2018.555578.1529)

- Chicco, G. & Mazza, A., (2021). "Metaheuristics for Transmission Network Expansion Planning". In: *Transmission Expansion Planning: The Network Challenges of the Energy Transition*: 13-38, Springer.(doi:10.1007/978-3-030-49428-5-2)

- Deng, X. & Lv, T. J. J. o. C. P., (2020). "Power system planning with increasing variable renewable energy". *A review of optimization models*, 246: 118962. (DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118962)

- Durmaz, Y. G. & Bilgen, B., (2020). "Multi-objective optimization of sustainable biomass supply chain network design". *Applied Energy*, 272: 115259. (DOI:10.1016/j.apenergy.2020.115259)

- Firestone, R. J. L. B. N. L., available at: <http://der. lbl. gov/der-cam/technology-data-archive>. (2004). *DER-CAM natural gas technology data*.
- Gardiner, M. & Montpelier, V., Technical Status Report of the Regulatory Assistance Project.
- Hosseini-Motlagh, S.-M.; Samani, M. R. G. & Shahbazbegian, V., (2020). "Innovative strategy to design a mixed resilient-sustainable electricity supply chain network under uncertainty". *Applied Energy*, 280: 115921. (DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115921)
- Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Rastegar, S. (2017). Green and Resilient Design of Electricity Supply Chain Networks: A Multiobjective Robust Optimization Approach. *IEEE transactions on engineering management*. DOI: 10.1109/TEM.2017.2749638
- Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Sabouhi, F. (2018). Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks. *International Journal of Production Research*. DOI: 10.1080/00207543.2018.1461950
- Kabadurmus, O. & Erdogan, M. S., (2020). "Sustainable, multimodal and reliable supply chain design". *Annals of Operations Research*. Doi: 10.1007/s10479-020-03654-0
- Karunarathne, E.; Pasupuleti, J.; Ekanayake, J. & Almeida, D. J. I. J. E. E. C. S., (2021). "Network loss reduction and voltage improvement by optimal placement and sizing of distributed generators with active and reactive power injection using fine-tuned pso". *IJECS*: 21: 647-656. (DOI: 10.11591/ijeecs.v21.i2.pp647-656)
- Khan, M. W.; Wang, J.; Xiong, L. & Systems, E., (2021). "Optimal energy scheduling strategy for multi-energy generation grid using multi-agent systems". *International Journal of Electrical Power*, 124: 106400. (DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106400)
- Masoumik, S. M.; Abdul-Rashid, S. H.; Olugu, E. U. & Ghazilla, R. A. R., (2014). "Sustainable Supply Chain Design: A Configurational Approach". *The Scientific World Journal*, DOI:10.1155/2014/897121
- Musavi, M. M. & Bozorgi-Amiri, A., (2017). "A multi-objective sustainable hub locationscheduling problem for perishable food supply chain". *Computers & Industrial Engineering*, DOI:10.1016/j.cie.2017.07.039
- Pham, H., (2006). *Handbook of reliability engineering*: Springer Science & Business Media.
- Qiu, R. & Yizhi, W., (2016). "Supply Chain Network Design under Demand Uncertainty and Supply Disruptions: A Distributionally Robust Optimization Approach". *Scientific Programming*, DOI: 10.1155/2016/3848520
- Rana, N.; Latiff, M. S. A.; Abdulhamid, S. i. M. & Chiroma, H., (2020). "Whale optimization algorithm: a systematic review of contemporary applications, modifications and developments". *Neural Computing and Applications*, DOI: 10.1007/s00521-020-04849-z
- Santibanez-Aguilar, J. E.; Castellanos, S.; Flores-Tlacuahuac, A.; Shapiro, B. B.; Powell, D. M.; Buonassisi, T. & Kammen, D. M., (2020). "Design of domestic photovoltaics manufacturing systems under global constraints and uncertainty". *Renewable Energy*, 148: 1174-1189. (DOI: 10.1016/J.RENENE.2019.10.010)
- Vahdatzad, M. A.; Vahab Vahdat, A. T. N. & Rezai, A. M., (2018). *Energy Conservation Framework for Green Supply Chain Management*. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Washington DC, USA.
- Yıldızbaşı, A.; Öztürk, C.; Efendioğlu, D. & Bulkan, S., (2020). "Assessing the social sustainable supply chain indicators using an integrated fuzzy multi-criteria decision-making methods: a case study of Turkey". *Environment, Development and Sustainability*, DOI:10.1007/s10668-020-00774-2