

Presenting a new index to improve voltage stability and optimal placement of wind turbines in the distribution network considering uncertainty

Amirhossein Foomani¹, Majid Moradlou^{1*}, Peyman Nazarian¹

¹Department of Electrical Engineering, Za.C., Islamic Azad University, Zanjan, Iran
majid.moradlou@iau.ac.ir

Abstract:

Due to the increasing loads in power networks and the diversity of these loads, the need to maintain stability and performance in critical networks is becoming more urgent. Meanwhile, the presence of distributed generation (DG) in various areas complicates efforts to maintain optimal performance in these regions. Voltage stability margin is one of the most important technical and functional characteristics of the power system. In fact, the voltage stability limit is the network's resilience to increased load utilization and transient disturbances.

In recent studies, the voltage stability index has been defined as the initial absolute value of the deviation from the unit voltage. Since the bus voltage is related to both the real and reactive power passing through the branches, placing a WT at an appropriate bus with optimal capacity can enhance voltage stability. This paper aims to develop a new index for voltage stability and optimal allocation of DG in a radial distribution system to improve operations such as voltage profile enhancement, reduction of power losses, improvement of voltage reliability, and reduction of growing costs. To more accurately assess and compare costs, the objective function is formulated as a profit function, evaluating the positive impact of the proposed method and index while considering WT power uncertainty on IEEE 33 and 37 bus standard networks

In section third, a proposed voltage stability index for optimal allocation of DG in a radial power distribution system is introduced. Figure 2 shows the equivalent circuit of a simple radial distribution system with two buses, where a power source with voltage V_1 is located at the beginning of the distribution network and the load (P_2+jQ_2) is located at the end of the distribution network. Considering equation (7), it is observed that for stable bus voltages, the quadratic equation in terms of V_2 must have a solution, that is, Δ must be a non-negative equation. Therefore, the following inequality is obtained:

$$\left(\frac{P_2 V_1 \sin(\delta)}{Q_2} - V_1 \cos(\delta) \right)^2 - 4 \left(\frac{P_2^2}{Q_2} + Q_2 \right) X \geq 0$$

So, the new index for voltage stability is presented:

$$\frac{4 \left(\frac{P_2^2}{Q_2} + Q_2 \right) X}{\left(\frac{P_2 V_1 \sin(\delta)}{Q_2} - V_1 \cos(\delta) \right)^2} \leq 1$$

Under normal operating conditions, the value of the proposed voltage stability index should be less than unity.

Third section presents an efficient approach to determine the optimal locations of WTs in distribution systems, taking into account the uncertainties in WT power generation and the load demand of consumers. Daily load profiles, as well as the seasonal and geographically dependent behaviors of WTs, are also

considered. The proposed probabilistic approach is based on scenario tree modelling, and each scenario is evaluated with respect to minimizing power losses. The TOPSIS method (Technique for Ordering Preference Based on Similarity to an Ideal Solution) is then adopted to adjust the optimal WT placement, considering the mean and standard deviation of active power losses.

Fourth section presents several types of technical constraints are considered in the benefit functions. By assigning different weights to each function, the impact of technical constraints on the total benefits is evaluated. To create a comprehensive analysis, four different scenarios are presented as follows:

- Scenario 1: Base case study structure without considering WT
- Scenario 2: Optimal placement of one WT
- Scenario 3: Optimal placement of two WTs
- Scenario 4: Optimal placement of three WTs

For scenarios 2, 3, and 4, two different cases are considered as follows:

- Case 1: WT location at unity power factor
- Case 2: WT location at adjustable power factor

In this study, the goal is to increase the profitability of the private sector and the distribution system operator by considering the technical constraints. Finally, in Section 4, the results from the standard IEEE 33- and 37- bus networks were thoroughly examined. The results show that the proposed index, along with the AHP process and the developed algorithm, performs well and, while controlling the optimal size and location of DG, provides better performance and improves the voltage stability margin. The most important factor in the accuracy of this operation is the consideration of uncertainty and its related equations, which bring the obtained results closer to reality.

Keywords: Voltage Stability, Stability Index, wind Turbine, AHP technique, Uncertainty, Distribution System

Date of sending the article: 2025/11/22
Date of the article: 2026/03/16

Name of the Corresponding Author: Majid Moradlou

Corresponding Author's Address: Islamic Azad University, Zanjan Branch, Iran

ارائه یک شاخص جدید به منظور بهبود پایداری ولتاژ و جایابی بهینه توربین‌های بادی در شبکه توزیع با لحاظ کردن عدم قطعیت انرژی بادی

نوع مطالعه: پژوهشی

امیرحسین فومنی، مجید مرادلو، پیمان نظریان

گروه مهندسی برق، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

majid.moradlou@iaau.ac.ir

چکیده: استفاده از منابع تولید پراکنده و زیرساخت ارتباطی برای آگاهی از میزان تولید، بار و تعداد محدودیت‌های فنی در سیستم توزیع، سیستم موجود را به یک سیستم توزیع فعال تبدیل می‌کند. در این مقاله، با ارایه یک شاخص جدید برای پایداری ولتاژ و لحاظ کردن آن در مسأله مکان یابی بهینه تولیدات پراکنده، مسأله جدیدی تعریف شده و اثربخشی آن در بهبود پایداری ولتاژ بررسی می‌گردد. در این مقاله، تابع هدف به صورت یک تابع سود برای سرمایه‌گذار بخش خصوصی (مالک توربین بادی) و اپراتور سیستم توزیع تعریف شده و شاخص‌های پایداری ولتاژ، تلفات اکتیو و راکتیو نیز در آن گنجانده شده‌اند و با دادن وزن‌های مختلف به هر شاخص، تابع سود از دیدگاه بخش خصوصی و اپراتور سیستم توزیع به دست آمده است. همچنین، توربین بادی در دو حالت ضریب توان ثابت و ضریب توان متغیر بررسی شده است. برای حل مسأله بهینه سازی در این مقاله، از الگوریتم ژنتیک استفاده گردیده است. با توجه به نتایج به دست آمده برای شاخص‌ها و طرح‌های مختلف و با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، نتایج برای دیدگاه‌های مختلف (از دیدگاه بخش خصوصی و اپراتور سیستم توزیع) اولویت‌بندی شده‌اند. همچنین در این مقاله، عدم قطعیت تولید توربین‌های بادی و نیز عدم قطعیت تقاضای بار در مسأله بهینه سازی لحاظ شده و مطالعه برای انواع مدل بار صورت پذیرفته است. با پیاده سازی روش پیشنهادی در دو شبکه استاندارد ۳۳ و ۳۷ شینه IEEE و مقایسه آن با سایر شاخص‌ها، کارایی روش پیشنهادی اثبات می‌گردد.

کلمات کلیدی: پایداری ولتاژ، شاخص پایداری، توربین بادی، روش AHP، عدم قطعیت، سیستم توزیع

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

نام نویسنده مسئول: مجید مرادلو

نشانی نویسنده مسئول: زنجان - جاده اراضی پایین کوه - بلوار دانشجو - سایت دانشگاه آزاد اسلامی زنجان (سایت امام خمینی) - دانشکده روزبه

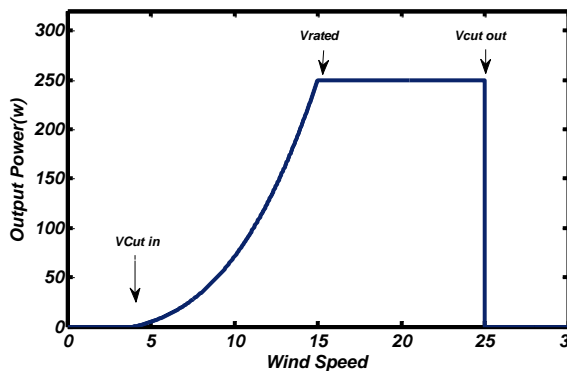
۱- مقدمه

رشد است، می باشد. به منظور بررسی دقیق تر و مقایسه هزینه ای، تابع هدف بصورت تابع سود نوشته شده تا تاثیر مثبت الگوی پیشنهادی بصورت کاهش هزینه و افزایش سود مشاهده گردد. روش و شاخص پیشنهادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت توان توربین بادی بر روی شبکه های استاندارد ۳۳ و ۳۷ شینه IEEE بررسی می گردند.

نوآوری های برجسته این مقاله به شرح زیر می باشند:

- ارایه شاخص جدید به منظور اندازه گیری پایدار ولتاژ
- لحاظ کردن عدم قطعیت تقاضای بار
- لحاظ کردن عدم قطعیت تولید توربین های بادی
- لحاظ کردن انواع مدل بار

در ادامه این مقاله در بخش دوم، پیشینه تحقیق مبتنی بر مرور مطالعات جدید در مکانیابی تولیدات پراکنده با لحاظ کردن شاخص پایداری ولتاژ ارایه می گردد. در بخش سوم، به بیان مساله شامل روابط حاکم بر این مساله و مدلسازی به کار رفته پرداخته خواهد شد. در بخش چهارم، نتایج حاصل از شبیه سازی در سناریوها و حالت های مختلف ارایه شده و مقایسه های تحلیلی صورت خواهد پذیرفت. در انتها در بخش پنجم، جمع بندی و نتیجه گیری ارایه می گردد.



شکل (۱): توان خروجی توربین بادی

۲- پیشینه تحقیق

مراجعی که در ادامه مورد بحث قرار خواهند گرفت، تمرکز بیشتری در خصوص جایابی بهینه تولیدات پراکنده در شبکه توزیع دارند. در این مراجع سعی شده است تا ضمن جایابی بهینه تولیدات پراکنده به عنوان یک هدف اصلی، با استفاده از ارائه یک شاخص جدید در حفظ پایداری ولتاژ و یا ارائه یک الگوریتم جدید به منظور بررسی شرایط شینه های شبکه توزیع به این امر دست یابند.

در (Chung Phan et al., 2024) الگوریتمی به منظور تعیین موقعیت بهینه توربین های بادی با هدف کمینه سازی تلفات انرژی سالیانه ارایه

امروزه با توجه به افزایش روز افزون بارها در شبکه قدرت و همچنین تنوع بار، نیاز به حفظ ثبات و عملکرد دقیق پارامترهای مهم شبکه قدرت بیش از پیش احساس می شود. در این میان حضور تولیدات پراکنده در ناحیه توزیع و نزدیکی آنها به بار باعث می شود تا پیچیدگی های حفظ این پارامترها در ناحیه عملکرد مطلوب بیشتر از قبل احساس شود. حاشیه پایداری ولتاژ یکی از مهم ترین پارامترهای فنی و عملکردی در سیستم قدرت است. در واقع، حد پایداری ولتاژ بیانگر میزان تاب آوری شبکه در مواجهه با افزایش تقاضای بار و بروز اغتشاشات گذرا می باشد (Tourani M, 2025)

با رشد منابع تولید پراکنده، سیستم های توزیع را می توان سیستم های اکتیو دانست که تولید و مصرف انرژی همزمان در آن وجود دارد. دو جهت بودن پخش توان که از آثار منابع تولید پراکنده می باشد باعث لزوم تغییرات گسترده در طراحی و بهره برداری شبکه های توزیع شده است (Ali Farhan et al., 2024). منابع تولید پراکنده را به طور کلی می توان به دو دسته انرژی های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم کرد. ویژگی های اقتصادی و همچنین سازگاری با محیط زیست، انرژی باد را به عنوان یک منبع عالی نسبت به سایر منابع انرژی تجدیدپذیر دیگر معرفی کرده است. تولید توان توسط توربین بادی تابعی از سرعت باد می باشد. برای هر توربین با توجه به محدودیت ها و ویژگی های ساختاری در اقلیم مختلف توان خروجی بصورت شکل (۱) بدست می آید (Moazen et al., 2024).

استفاده از منابع تولید پراکنده در سیستم توزیع به منظور تامین بخشی از تقاضا و بهبود قیود فنی الزامی است. توربین های بادی بدلیل تامین توان در ضریب قدرت های مختلف و قابل تنظیم، توانایی بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش پایداری ولتاژ سیستم را خواهند داشت. در ابتدایی ترین مطالعات، شاخص پایداری ولتاژ بصورت قدر مطلق فاصله پریونت ولتاژ از مقدار واحد تعریف شده است. با توجه به اینکه ولتاژ شینه ها با توان حقیقی و راکتیو عبوری از شاخه ها رابطه دارد، با جایگذاری توربین بادی در شینه مناسب و با ظرفیت بهینه، می توان شاخص پایداری ولتاژ را بهبود بخشید. چون این مقاله در ارتباط با تاثیر پیکربندی و جایابی بهینه توربین بادی در شاخص پایداری ولتاژ است، روابط ریاضی و نتایج در بخش های بعدی بصورت مسوط بحث خواهند شد.

هدف از این مقاله، تعریف یک شاخص جدید برای پایداری ولتاژ و به کارگیری آن به عنوان یکی از قیود اصلی مساله تخصیص بهینه تولید پراکنده در سیستم توزیع شعاعی، جهت برآورده کردن اهدافی مانند بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات توان، بهبود حاشیه پایداری ولتاژ و کاهش هزینه اتلاف انرژی در شرایطی که تقاضای بار سیستم در حال

جستجو و بر اساس کمترین تلفات توان اکتیو برای سطوح مختلف بار تعیین می‌شود. در (Mohammad Aryanfar, 2023) از شاخص پایداری ولتاژ (VSI) برای یافتن بهترین مکان برای قرار دادن یک منبع تولید پراکنده استفاده نموده و الگوریتم PSO تطبیقی (APSO) برای یافتن ظرفیت مناسب تولید پراکنده در راستای کمینه سازی تلفات توان اکتیو شبکه توزیع به کار برده شده است.

در (N. Srilatha, 2023) شاخص پایداری ولتاژ و نرخ کاهش تلفات خط به یک شاخص واحد (VSLR) تبدیل گردیده اند تا مکان بهینه تولیدات پراکنده تعیین شود. بر اساس این شاخص، گره با حساسیت بالا و نرخ کاهش تلفات توان بالا، به عنوان معیار برای مکان بهینه تولیدات پراکنده متصل به شبکه برق انتخاب شده و ظرفیت دسترسی بهینه آن توسط الگوریتم پیشنهادی در این مقاله تعیین می‌گردد. در (Zhihui Lia et al., 2020) از الگوریتم قهرمانی لیگ (LCA) برای مکان‌یابی و تعیین اندازه بهینه واحدهای تولید پراکنده (خورشیدی) در سیستم‌های توزیع با هدف کمینه سازی تلفات سیستم و همچنین بهبود پروفیل ولتاژ استفاده شده است. مکان بهینه واحدهای تولید پراکنده از طریق ضریب حساسیت تلفات (LSF) تعیین شده و اندازه بهینه آنها از طریق الگوریتم LCA به دست می‌آید. در (Djemoui Benkhetta et al., 2024)، یک شاخص تحلیلی برای تعیین اندازه و مکان بهینه تولیدات پراکنده در یک شبکه توزیع پیشنهاد شده است. شاخص پیشنهادی شامل ضریب حساسیت تلفات، شاخص پایداری ولتاژ و عوامل مبتنی بر قابلیت اطمینان بوده است.

با توجه به توضیحات فوق، در راستای افزایش پایداری ولتاژ، جلوگیری از فروپاشی ولتاژ، پشتیبانی از پخش بار بهینه و افزایش تاب آوری شبکه، شاخص پایداری ولتاژ (VSI) نقش حیاتی در مکان‌یابی بهینه تولیدات پراکنده (DG) در سیستم‌های قدرت ایفا می‌کند. لذا ارائه یک شاخص پایداری جدید که دارای سادگی در نوشتن معادلات باشد و در عین حال این توانایی را داشته باشد که پارامترهای ضروری همانند توان اکتیو و راکتیو، حد مجاز ولتاژ شینه و ضریب توان آن را ضمن در نظر داشتن بارهای مختلف و پاسخ گویی به نیازهای آینده در خود جای دهد، کمک شایانی به بهبود پایداری ولتاژ و تعیین تعداد و اندازه بهینه تولیدات پراکنده خواهد کرد. این شاخص جدید باید ضمن بهبود پاسخ‌های شاخص‌های گذشته، عملکرد بهتری در مواجهه با شبکه‌ها و انواع بارهای مختلف از خود نشان دهد.

۳- بیان مسئله

در این بخش شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی برای تخصیص بهینه تولید پراکنده در سیستم توزیع نیروی برق شعاعی معرفی می‌شود.

گردیده است. در (Y. Merzoug et al., 2020) از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای یافتن بهترین مکان برای توربین بادی در شبکه توزیع شعاعی استفاده شده است. مکان بهینه با استفاده از ضریب حساسیت تلفات و با در نظر گرفتن محدودیت‌های توان اکتیو منتقل شده در شاخه‌ها و محدودیت‌های مازول‌های ولتاژ برای همه شینه‌ها بدست آمده است. در (G. A. Adepoju et al., 2023) نیز از PSO برای تعیین اندازه و مکان بهینه واحدهای تولید پراکنده با هدف اصلی کاهش تلفات توان و افزایش پروفیل ولتاژ در یک شبکه برق استفاده گردیده است.

در (F. A. Jumaa et al., 2021)، مطالعه و بررسی تأثیر اتصال واحدهای تولید پراکنده در شبکه توزیع بر بازده انتقال، تلفات توان راکتیو و انحراف ولتاژ علاوه بر دیدگاه اقتصادی و با در نظر گرفتن نرخ بهره و تورم صورت گرفته است. در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) برای مکان‌یابی بهینه تولید پراکنده در شبکه توزیع استفاده شده و نتایج آن با الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO) مقایسه گردیده و راستی آزمایشی کل کار بر روی شبکه استاندارد ۳۳ شینه انجام شده است.

در (T. A. Boghdady et al., 2022) مسأله جایابی تولیدات پراکنده برای به حداقل رساندن تلفات توان سیستم توزیع ارائه شده و برای جستجوی بهترین مکان و ظرفیت تولیدات پراکنده، الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA) مورد استفاده قرار گرفته است. مسأله و روش پیشنهادی بر روی دو سیستم آزمایشی متشکل از شبکه‌های ۳۳ و ۶۹ شینه شبیه سازی شده‌اند. در (T. Nguyen et al., 2021) انواع بارهای ترکیبی استاتیک و دینامیک (بارهای ۱۰۰٪ استاتیک، ۵۰٪ استاتیک و ۵۰٪ دینامیک و ۱۰۰٪ دینامیک) در شرایط مختلف اضافه بار برای سیستم استاندارد ۳۳ شینه در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، مکان‌یابی بهینه منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA) در سیستم ۳۳ شینه صورت پذیرفته و با سایر روش‌های بهینه‌سازی مقایسه گردیده است.

در (M. A. Sameh et al., 2022) روشی برای تعیین مکان و اندازه بهینه تولیدات پراکنده در سطوح مختلف بار برای بهره برداری بهینه از شبکه توزیع ارائه شده است. تابع هدف آن، کاهش تلفات توان اکتیو و بهبود پروفیل ولتاژ برای عملکرد پایدار سیستم بوده و مکان بهینه تولیدات پراکنده با تحلیل حساسیت بر اساس یک شاخص پایداری ولتاژ جدید تعیین می‌شود. تولیدات پراکنده بارها را در سطوح مختلف تأمین کرده و سپس با انتخاب شینه مناسب از بین شینه‌های مهم (از لحاظ شاخص پیشنهادی)، اندازه بهینه تولیدات پراکنده با استفاده از یک الگوریتم

با توجه به نامساوی فوق، شاخص جدید برای پایداری ولتاژ بصورت زیر ارایه می گردد:

$$\frac{4 \left(\frac{P_2^2}{Q_2} + Q_2 \right) X}{\left(\frac{P_2 V_1 \sin(\delta)}{Q_2} - V_1 \cos(\delta) \right)^2} \leq 1 \quad (9)$$

در وضعیت کار معمولی، مقدار شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی باید کمتر از یک باشد. اگر مقدار این شاخص به صفر نزدیک باشد، پایداری سیستم بیشتر میشود. اگر مقدار شاخص پیشنهادی بزرگ باشد پایداری سیستم در معرض خطر قرار می گیرد. یک شینه با مقدار شاخص پایداری ولتاژ زیاد، دارای حساسیت بیشتری قلمداد گردیده و گزینه مناسبی برای مکان نصب تولید پراکنده خواهد بود.

در این مقاله، تأثیر استفاده از شاخص پایداری ولتاژ جدید بر مکان‌یابی و تعیین اندازه بهینه تولیدات پراکنده در راستای بهبود پایداری ولتاژ، تلفات توان اکتیو، محدودیت جریان خط، تلفات توان راکتیو و شاخص پروفیل ولتاژ بررسی شده است. هر یک از شاخص‌ها به صورت زیر تعریف می شوند:

$$DSM_1 = \max \{ B_{Total}^{discharge} + B_{Total}^{Load} + B_{Total}^{Loss} + B_{Total}^{WT} - C_{Total}^{inv} \} \quad (10)$$

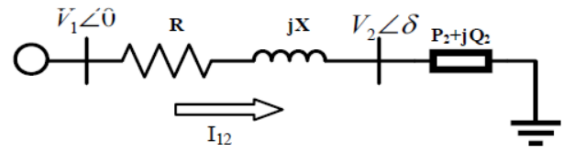
$$DSM_2 = \max \{ B_{Total}^{discharge} + B_{Total}^{Load} + B_{Total}^{VSI} + B_{Total}^{WT} - C_{Total}^{inv} \} \quad (11)$$

$$DSM_3 = \max \{ B_{Total}^{discharge} + B_{Total}^{Load} + B_{Total}^{LFL} + B_{Total}^{WT} - C_{Total}^{inv} \} \quad (12)$$

$$DSM_4 = \max \{ W_1 \times DSM_1 + W_2 \times DSM_2 + W_3 \times DSM_3 \} \quad (13)$$

DSM در سیستم قدرت به معنای Demand Side Management بوده که نشان دهنده اثر برنامه های مدیریت انرژی بار بر روی تابع سود می باشد. به طور کلی DSM به معانی کاهش پیک بار، جابه‌جایی بار (Load Shifting)، کاهش هزینه بهره برداری سیستم، افزایش پایداری ولتاژ و کاهش تلفات اشاره دارد که تمامی این موارد به غیر از جابه‌جایی بار در معادلات ۱۰ الی ۱۲ ذکر شده و پس از آن در معادلات ۱۴ الی ۱۹ به تفکیک شرح داده می‌شود. وزن حاصل از معادلات ۱۰ الی ۱۲ در نهایت به عنوان تابه سود اصلی در معادله ۱۳ ذکر شده است.

شکل (۲) مدار معادل سیستم توزیع شعاعی ساده با دو شینه را نشان می دهد که یک منبع تغذیه با ولتاژ V_1 در ابتدای شبکه توزیع و بار $(P_2 + jQ_2)$ در انتهای شبکه توزیع قرار گرفته اند.



شکل (۲): مدار معادل سیستم توزیع شعاعی ساده

مدل ریاضی شاخص پیشنهادی برای پایداری ولتاژ با استفاده از محاسبات زیر بدست خواهد آمد.

جریان خط بین دو شینه یعنی I_{12} برابر است با:

$$I_{12} = \left(\frac{P_2 + jQ_2}{V_2 \angle \delta} \right)^* = \left(\frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta} \right) \quad (1)$$

از طریق معادله KVL، ولتاژ شینه بار به صورت زیر می باشد:

$$V_2 \angle \delta = V_1 \angle 0 - (R + jX) I_{12} \quad (2)$$

با جاگذاری (۱) در (۲)، معادله زیر حاصل می گردد:

$$V_2 \angle \delta = V_1 \angle 0 - (R + jX) \left(\frac{P_2 - jQ_2}{V_2 \angle -\delta} \right) \quad (3)$$

با ضرب طرفین (۳) در $V_2 \angle \delta$ معادله زیر بدست می آید:

$$V_2^2 = V_1 V_2 \angle -\delta - (R + jX)(P_2 - jQ_2) \quad (4)$$

با تجزیه (۴) به دو بخش حقیقی و موهومی، روابط زیر حاصل می گردند:

$$V_2^2 + P_2 R + Q_2 X = V_1 V_2 \cos(\delta) \quad (5)$$

$$P_2 X - Q_2 R = -V_1 V_2 \sin(\delta) \quad (6)$$

با ترکیب (۵) و (۶)، رابطه زیر بدست می آید:

$$V_2^2 + \left(\frac{P_2 V_1 \sin(\delta)}{Q_2} - V_1 \cos(\delta) \right) V_2 + \left(\frac{P_2^2}{Q_2} + Q_2 \right) X = 0 \quad (7)$$

با توجه به (۷) مشاهده می شود که برای ولتاژهای پایدار شینه باید معادله درجه ۲ بر حسب V_2 دارای جواب باشد یعنی Δ معادله نامنفی باشد. لذا نامساوی زیر حاصل می گردد:

$$\left(\frac{P_2 V_1 \sin(\delta)}{Q_2} - V_1 \cos(\delta) \right)^2 - 4 \left(\frac{P_2^2}{Q_2} + Q_2 \right) X \geq 0 \quad (8)$$

$$C_{Total}^{Load} = \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^{N_h} (P_{t,h,pu}^{grid} \times \rho_{t,h}^{grid} \times \tau_{t,h}^{grid}) \times \left(\frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (16)$$

$$R_{Total}^{Load} = \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^{N_h} (P_{t,h,pu}^{load} \times \rho_{t,h}^{load} \times \tau_{t,h}^{load}) \times \left(\frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (17)$$

$$B_{Total}^{Load} = R_{Total}^{Load} - C_{Total}^{Load} \quad (18)$$

$$P_{t,h}^{grid} = \begin{cases} P_{t,h}^{load} + P_{loss} + P_{charge}^b - P_{WT} \\ P_{t,h}^{load} + P_{loss} - P_{discharge}^b - P_{WT} \end{cases} \quad (19)$$

در این روابط، متغیرهای $P_{t,h,pu}^{grid}$ ، $P_{t,h,pu}^{load}$ ، P_{charge}^b و R_{Total}^{Load} به ترتیب بیانگر توان مبادله شده با شبکه بالادستی، قیمت برق مبادله ای با شبکه بالادستی، توان شارژ باتری، میزان درآمد حاصل از فروش به شبکه بالادستی و میزان هزینه مبادله با شبکه بالادستی می باشند (M.Hemmati et al., 2023).

برای جلوگیری از اضافه بار در انشعابات، در نظر گرفتن حد مجاز پخش بار مهم است. برای ارزیابی تأثیرات اتصالات DGها بر جریان بار خط، شاخص حد جریان خط به عنوان جریان شینه‌ها تعریف می‌شود [17]:

$$LFL = \text{Max} \left(\frac{S_{ij}}{CS_{ij}} \right) \quad (20)$$

که متغیرهای LFL ، S_{ij} ، CS_{ij} به ترتیب بیانگر میزان شارش بار مجاز، شارش بار بین i و j و ظرفیت شارش بار بین آنها می‌باشد.

در این مقاله، بار با وابستگی ولتاژ غیرخطی در کنار بار روزانه در نظر گرفته شده است. بار روزانه شامل سه سطح تقاضا (بار کم، پایه و پیک) است (S.Rezaeian et al., 2022):

$$P_{i,t,h}^{DS} = P_i^D \times DLF_{i,t,h}^S \times (1+\alpha)^t \quad (21)$$

$$Q_{i,t,h}^{DS} = Q_i^D \times DLF_{i,t,h}^S \times (1+\alpha)^t \quad (22)$$

$$S_{i,t,h}^{DS} = P_{i,t,h}^{DS} + j Q_{i,t,h}^{DS} \quad (23)$$

که متغیرهای $DLF_{i,t,h}^S$ و α به ترتیب سطح بار و ضریب افزایش بار می باشند. مدل ریاضی وابستگی ولتاژ توان اکتیو و راکتیو شینه‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود (López et al., 2024):

$$P_i = P_{i,t,h}^{DS} \times \left(\frac{V_i}{V_{oi}} \right)^{k_{pv}} \quad (24)$$

در این شاخص‌ها، متغیرهای B_{Total}^{WT} ، B_{Total}^{Loss} ، B_{Total}^{Load} ، $B_{Total}^{discharge}$ ، C_{Total}^{inv} و B_{Total}^{LFL} ، B_{Total}^{VSI} ، باتری، سود حاصل از کاهش خرید از شبکه بالا دستی، سود حاصل از کاهش تلفات توان، سود حاصل از تولید توان توسط توربین بادی، سود حاصل از بهبود پایداری ولتاژ، سود حاصل از حد جریان خط و همچنین هزینه سرمایه گذاری می باشند.

تابع هدف اصلی این مساله، رابطه (۱۳) می باشد. در این رابطه، W_1 تا W_3 بیانگر وزن مربوط به تاثیر مکانیابی بهینه DG در قیود فنی مختلف می باشد. بدین منظور در هر بخش از حل مسئله با توجه به اهمیت هر شاخص، وزن مربوط به آن بیشتر در نظر گرفته شده و وزن مربوط به شاخص‌های باقیمانده یکسان در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال اگر شاخص تلفات توان با اهمیت فرض شود، W_1 برابر ۰٫۵ در نظر گرفته شده و دو وزن دیگر برابر ۰٫۲۵ در نظر گرفته می‌شوند و در حالت‌های دیگر این وزن به همین صورت به شاخص‌های دیگر تخصیص داده می‌گردد.

مقدار سود کسب شده با نصب WT به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$B_{Total}^{WT} = \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^{N_h} \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{WT=1}^{N_{WT}} (P_{i,t,h}^{WT} \times \rho_{t,h} \times \tau_{t,h}) \times \left(\frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (14)$$

که متغیرهای $P_{i,t,h}^{WT}$ ، $\rho_{t,h}$ ، $\tau_{t,h}$ ، $IntR$ ، $InfR$ به ترتیب بیانگر توان تولیدی توربین بادی، قیمت برق، دوره بهره برداری، نرخ سود و نرخ مالیات می باشند (Zhang, Lidong et al., 2023). مجموع منافی که با در نظر گرفتن اثرات مثبت WT به دست می‌آید به شرح زیر محاسبه می‌شود (H.Hamed and M.Farsadi., 2015):

$$B_{Total}^{Loss} = \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^{N_h} \left[(P_{loss_{t,h}}^{WithoutWT} - P_{loss_{t,h}}^{WithWT}) \right] \times \left(\frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \times \rho_{t,h} \times \tau_{t,h} \quad (15)$$

مبالغ کل سود به دست آمده با کاهش مقدار انرژی خرید/فروش از شبکه بالادستی به شرح زیر تعیین می‌شود:

مقدار میانگین هر حالت برای محاسبه متغیرهای خروجی در آن حالت خاص استفاده شده و احتمال هر بازه به صورت زیر طراحی می شود که DL1 و DL2 به ترتیب، حداقل و حداکثر حد تقاضای بار در هر بازه هستند:

$$P(D)_{Interval} = \int_{DL1}^{DL2} \left(\frac{1}{\sqrt{(2\pi\delta)^2}} \exp \left(-\frac{(D-\mu)^2}{2\delta^2} \right) \right) \quad (29)$$

برای مدلسازی عدم قطعیت توربین بادی، از تابع رایلی استفاده شده است. تابع PDF رایلی یک مورد خاص از ویبول است که در آن شاخص شکل برابر با ۲ می باشد. چنین فرضی به طور گسترده در مطالعات مشابه به عنوان توضیح مناسب عملکرد سرعت باد استفاده می شود [۲۰]. این رفتار به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$PDF(V_h^S) = \left(\frac{K \times V_h^S}{C_h^S} \right)^{k-1} \times \exp \left(-\left(\frac{V_h^S}{C_h^S} \right)^k \right) \quad (30)$$

که در آن k بیانگر ضریب شکل بوده و برابر با ۲ می باشد. همچنین V_h^S و C_h^S به ترتیب مقدار پیش بینی شده سرعت باد و ضریب مقیاس آن را نشان می دهند. بنابراین، شاخص مقیاس بندی را می توان به صورت زیر مدل نمود:

$$(V_h^S)_{mean} = \int_0^\infty V_h^S \times PDF(V_h^S) \times dV_h^S = \quad (31)$$

$$\int_0^\infty \frac{2 \times (V_h^S)^2}{(C_h^S)^2} \times \exp \left(-\left(\frac{V_h^S}{C_h^S} \right)^2 \right) \times dV_h^S = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times C_h^S$$

$$C_h^S = 1.128 V_{h_{mean}}^S \quad (32)$$

توان تولیدی یک WT معمولی در هر ساعت بر اساس منحنی توان WT تعیین می شود. این ویژگی به صورت زیر تفسیر می گردد:

$$P_{h(w)}^S = \begin{cases} 0 & v_{mean} \leq v_{in}^c \\ \frac{v_{mean} - v_{in}^c}{v_{reated} - v_{in}^c} \times p_r^w & v_{in}^c \leq v_{mean} \leq v_{reated} \\ p_r^w & v_{reated} \leq v_{mean} \leq v_{out}^c \\ 0 & v_{out}^c \leq v_{mean} \end{cases} \quad (33)$$

توان خروجی در هر بازه با مقدار میانگین هر حالت به دست می آید. احتمال هر بازه به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P(w)_{interval} \quad (34)$$

$$= \int_{VL1}^{VL2} \left(\frac{2 \times v_{mean}}{C^2} \exp \left(-\left(\frac{v_{mean}}{C} \right)^2 \right) \right) \times dv_{mean}$$

$$Q_i = Q_{i.t.h}^{DS} \times \left(\frac{V_i}{V_{oi}} \right)^{k_{pv}} \quad (25)$$

در این مقاله از پخش بار نیوتن رافسون برای بدست آوردن ولتاژ شینه ها و انشعاب جریان استفاده می شود. برای هر سطح تقاضا و سال افق برنامه ریزی، معادلات پخش توان به صورت زیر محاسبه می شوند (M.Shafiee, 2022):

$$P_{t.h}^{grid} + P_{i.t.h}^b + P_{i.t.h}^{WT} - P_{i.t.h}^{De} - V_{i.t.h}^e \sum Y_{ij} V_{i.t.h}^e \times \cos(\delta_{i.t.h}^e - \delta_{i.t.h}^e - Q_{ij}) = 0 \quad (26)$$

$$Q_{t.h}^{grid} - Q_{i.t.h}^{De} - V_{i.t.h}^e \sum Y_{ij} V_{i.t.h}^e \times \sin(\delta_{i.t.h}^e - \delta_{i.t.h}^e - Q_{ij}) = 0 \quad (27)$$

۳-۱ بررسی و اجرای عدم قطعیت توربین بادی

این بخش یک رویکرد کارآمد برای تعیین مکان های بهینه توربین های بادی (WT) در سیستم های توزیع ارائه می کند که عدم قطعیت های موجود در تولید برق WT و تقاضای بار مصرف کنندگان را در نظر می گیرد. پروفیل های بار روزانه و رفتارهای فصلی و وابسته به جغرافیایی WT نیز در نظر گرفته شده اند. رویکرد احتمالی پیشنهادی، مبتنی بر مدل سازی درخت سناریو است و هر سناریو با توجه به حداقل سازی تلفات توان ارزیابی می شود. سپس، روش Topsis (تکنیک برای اولویت سفارش بر اساس شباهت به یک راه حل ایده آل) برای تنظیم قرارگیری بهینه WT با در نظر گرفتن مقدار متوسط و انحراف استاندارد تلفات توان اکتیو اتخاذ می شود [۲۰]. همانطور که قبلاً ذکر شد، عدم قطعیت در پروفیل تقاضای بار و توان تولیدی توربین های بادی در اینجا در نظر گرفته شده است. این پروفیل ها به صورت ساعتی برای هر یک از دوره های فصلی استخراج می شوند.

۳-۱-۲ مدلسازی عدم قطعیت تقاضای بار و تولید توربین بادی

مدلسازی عدم قطعیت تقاضای بار بصورت زیر می باشد (ADEGOKE et al., 2023):

$$PDF(D_h^S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_h^S)^2}} \exp \left[-\frac{(D_h^S - \mu_h^S)^2}{2(\sigma_h^S)^2} \right] \quad (28)$$

که در این رابطه، D_h^S بیانگر تقاضای توان بوده و μ_h^S و σ_h^S به ترتیب میانگین و انحراف معیار تقاضا را نشان می دهند. مدل سازی درخت سناریو برای فرآیند مدیریت عدم قطعیت به کار گرفته شده و تعداد حالت ها به طور معقولی تعیین می شود، زیرا تعداد بازه های کوچک دقت مدل سازی را کاهش می دهد در حالی که تعداد بازه های بزرگ بار محاسباتی را افزایش می دهد و پیچیدگی مسئله را افزایش می دهد.

معادله (۲۹) میزان حداکثر تقاضای بار به دست خواهد آمد و پس از آن توان تولیدی توربین بادی و میانگین توان خروجی آن در هر بازه زمانی به ترتیب از معادلات (۳۳) و (۳۴) حاصل خواهد شد. بعد از آن با در نظر داشتن احتمالات هر سناریو که از معادله (۳۵) به دست خواهد آمد، جواب‌های مورد نظر برای دو هدف تعیین شده در این بخش ظاهر خواهد شد.

با فرض $P(Loss)$ به عنوان کل تلفات توان اکتیو در خطوط شبکه برق و تعیین تلفات توان اکتیو و احتمال هر سناریو، مقدار مورد انتظار (EV) و انحراف معیار (SD) سناریوهای مختلف در هر ساعت به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$EV = \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s \times P_s(Loss) \quad (37)$$

$$SD = \quad (38)$$

$$\sqrt{(\sum_{s=1}^{N_s} \pi_s \times P_s(Loss)^2) - (\sum_{s=1}^{N_s} \pi_s \times P_s(Loss))^2}$$

که $P_s(Loss)$ تلفات توان سیستم توزیع را در سناریوی s نشان می‌دهد. هر دو رابطه به عنوان ویژگی‌های بررسی شده در رویکرد احتمالی مبتنی بر TOPSIS در نظر گرفته می‌شوند. نفوذ باد و مقدار توان تولید شده توسط توربین بادی به عنوان عوامل احتمالی و حفظ کمینه مقدار تلفات توان خط به عنوان محدودیت فرآیند عدم قطعیت در نظر گرفته می‌شود. به همین منظور مقدار مورد انتظار (EV) و انحراف معیار (SD) سناریوهای مختلف در هر ساعت از روابط ۳۷ و ۳۸ حاصل خواهد شد. همان طور که رویکرد پیشنهادی یک رویکرد چند ویژگی‌های اصلی مطالعه پیشنهادی تعیین می‌شوند. در این زمینه، تابع هدف اول تلفات توان اکتیو در فیدرهای توزیع را به حداقل می‌رساند و تابع هدف دوم به دنبال راه حلی با حداقل تغییرات تلفات توان اکتیو است. اولویت بندی شینه‌های کاندید برای جابجایی بهینه احتمالی WT با بکارگیری رویکرد TOPSIS در ادامه بررسی می‌گردد. بدین منظور یک رویکرد سه سطحی بصورت شکل زیر تعریف شده که در آن، تابع هدف در سطح اول تعریف می‌گردد. معیارها در سطح دوم و گزینه‌ها در سطح سوم تعریف شده‌اند. اولویت بندی شینه‌های کاندید برای جابجایی بهینه احتمالی WT با بکارگیری رویکرد TOPSIS در ادامه بررسی می‌گردد. بدین منظور یک رویکرد سه سطحی بصورت شکل زیر تعریف شده که در آن، تابع هدف در سطح اول تعریف می‌گردد. معیارها در سطح دوم و گزینه‌ها در سطح سوم تعریف شده‌اند. در شکل (۴) این سطوح مشاهده می‌گردند.

طبق تلفات توان بدست آمده در هر سناریو و SD نتایج بعنوان

که، V_{L1} و V_{L2} به ترتیب نشان دهنده مرزهای پایین و بالایی هر بازه می‌باشند. علاوه بر این، C مخفف ضریب مقیاس و V_{mean} مقدار میانگین سرعت باد است.

۳-۱-۳ مدل سازی درخت سناریوی عدم قطعیت

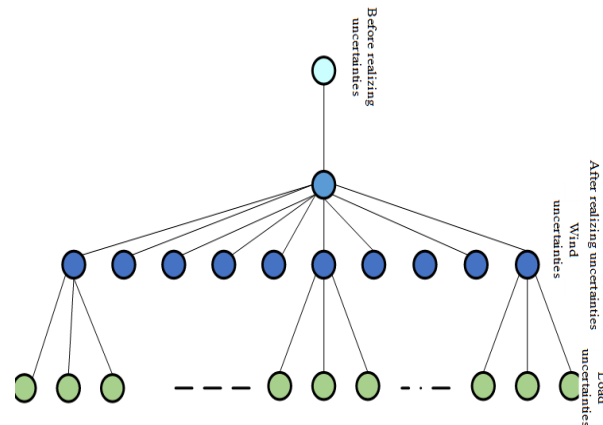
مدل سازی درخت سناریو برای تعریف مجموعه‌ای از سناریوها در مکان‌یابی بهینه WTs با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضای بار و سرعت باد به کار گرفته شده است. هر سناریو شامل دو سطح از ارزش تقاضا و تولید باد همراه با یک مقدار احتمال خاص است. احتمال هر سناریو بر اساس (۳۵) محاسبه می‌گردد که شرایط آن در (۲۹) و (۳۴) محاسبه شده است. همانطور که در (۳۶) نشان داده شده است، جمع تجمعی همه سناریوها برابر با یک است.

$$\pi_s = P(D)_{interval} \times P(w)_{interval} \quad (35)$$

$$\sum_{s=1}^{N_s} \pi_s = 1 \quad (36)$$

که π_s احتمال هر سناریو و N_s تعداد سناریوها است.

شکل (۳) درخت سناریو را برای مسأله جابجایی بهینه توربین بادی نشان می‌دهد.



شکل (۳): درخت سناریو برای عدم قطعیت

همان طور که رویکرد پیشنهادی یک رویکرد چند ویژگی مبتنی بر TOPSIS را بیان می‌کند، دو هدف به عنوان ویژگی‌های اصلی مطالعه این پروژه در بخش عدم قطعیت تعیین و بررسی می‌شوند. در این زمینه، هدف اول به حداقل رساندن تلفات توان اکتیو در فیدرهای توزیع و هدف دوم راه حلی با حداقل تغییرات تلفات توان اکتیو است. در واقع در این بخش با حفظ تابع سود اصلی و قیود گفته شده، ابتدا عملیات تخمین ضریب نفوذ باد با معادله (۲۸) اجرا خواهد شد، سپس به کمک

ویژگی ها، مراحل زیر دنبال می گردد:

$$EV_{mean} = \frac{\sum_{h=1}^{24} EV_h}{24} \quad (39)$$

$$SD_{mean} = \frac{\sum_{h=1}^{24} SD_h}{24} \quad (40)$$

نوشته شده و با روش AHP جهت تایید نهایی و ادامه روند بررسی خواهد شد. اولین مرحله از فرآیند اجرای تکنیک AHP تشکیل ماتریس مقایسه زوجی است. این مرحله به صورت زیر بیان می گردد:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (41)$$

سپس ماتریس نرمال شده بصورت زیر مدل سازی می شود:

$$N_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} & \frac{a_{13}}{\sum_{i=1}^n a_{i3}} & \dots & \frac{a_{1n}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \\ \frac{a_{21}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} & \frac{a_{23}}{\sum_{i=1}^n a_{i3}} & \dots & \frac{a_{2n}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{a_{n1}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \frac{a_{n2}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} & \frac{a_{n3}}{\sum_{i=1}^n a_{i3}} & \dots & \frac{a_{nn}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \end{bmatrix} \quad (42)$$

در مرحله بعد، ماتریس نسبی بصورت زیر نوشته می گردد:

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix} = \quad (43)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} & \frac{a_{13}}{\sum_{i=1}^n a_{i3}} & \dots & \frac{a_{1n}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \\ \frac{a_{21}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} & \frac{a_{23}}{\sum_{i=1}^n a_{i3}} & \dots & \frac{a_{2n}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{a_{n1}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} & \frac{a_{n2}}{\sum_{i=1}^n a_{i2}} & \frac{a_{n3}}{\sum_{i=1}^n a_{i3}} & \dots & \frac{a_{nn}}{\sum_{i=1}^n a_{in}} \end{bmatrix} \times \frac{1}{n}$$

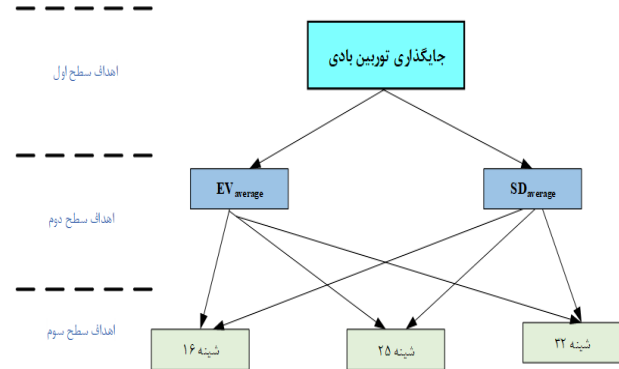
پس از آن، معادلات ماتریس مقدار ویژه نوشته خواهد شد:

$$N_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{V_1}{W_1} \\ \frac{V_2}{W_2} \\ \dots \\ \frac{V_n}{W_n} \end{bmatrix} \quad (44)$$

در نهایت، ماتریس V_i به صورت زیر بیان می گردد:

$$V_i = \begin{bmatrix} \frac{V_1}{W_1} \\ \frac{V_2}{W_2} \\ \dots \\ \frac{V_n}{W_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{W_1} + \frac{a_{12}}{W_2} + \dots + \frac{a_{1n}}{W_n} \\ \frac{a_{21}}{W_1} + \frac{a_{22}}{W_2} + \dots + \frac{a_{2n}}{W_n} \\ \dots \\ \frac{a_{n1}}{W_1} + \frac{a_{n2}}{W_2} + \dots + \frac{a_{nn}}{W_n} \end{bmatrix} \quad (45)$$

سپس، ماتریس ارزیابی تشکیل خواهد شد:



شکل (۴): رویکرد TOPSIS سه مرحله‌ای

۲-۳ توضیح عملکرد رویکرد AHP

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از کارآمدترین رویکردها برای حل مسأله چند معیاره است. این تکنیک با ارزیابی مسأله در سه مرحله، مسائل را به صورت زیر حل می کند [۲۱]:

- تشریح مشکل
- فهرست کردن انواع مسیرهای حل با تعیین گزینه ها و ویژگی های آنها

- انتخاب معیارهای بهینه راه حل ها در میان سایر راه حل ها

شکل (۵) نمودار جریان الگوریتم بهینه سازی را نشان می دهد. الگوریتم بهینه سازی شامل دو مرحله است. در مرحله اول با استفاده از الگوریتم ژنتیک و حل مسأله بهینه سازی، نتایج عددی بدست می آید و در مرحله دوم با استفاده از AHP معیارهای بهینه انتخاب می شوند. از آنجایی که تابع سود با ضرب وزن هر یک از توابع فنی تشکیل می شود، الگوریتم ژنتیک با اختصاص مقدار بزرگتر به محدودیت فنی اصلی، حل مسأله بهینه سازی را آغاز می کند. الگوریتم به گونه ای طراحی شده که اگر از بین جواب های به دست آمده با توجه به قید مسأله اگر مطابق با فرآیند AHP جواب بهینه حاصل شده باشد به مرحله بعد خواهد رفت در غیر اینصورت مجدد کوروموزمها و احتمالات جدید با توجه به قید اصلی

سوم در نظر گرفتن حد مجاز جریان خط می‌باشد. برای ایجاد یک تحلیل جامع، چهار سناریو مختلف به شرح زیر ارائه گردیده است:

- سناریوی ۱: ساختار پایه مورد مطالعاتی بدون در نظر گرفتن توربین بادی
- سناریوی ۲: جایابی بهینه یک توربین بادی
- سناریوی ۳: جایابی بهینه دو توربین بادی
- سناریوی ۴: جایابی بهینه سه توربین بادی

برای سناریوهای ۲، ۳ و ۴ دو حالت مختلف به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

- حالت ۱: جایابی توربین بادی در ضریب توان بهره برداری واحد
- حالت ۲: جایابی توربین بادی در ضریب توان قابل تنظیم

جدول (۱) ویژگی‌های بارهای مسکونی، صنعتی و تجاری را نشان می‌دهد. در جدول (۲) قیمت مبادله انرژی ارائه شده است. در جدول (۳) پارامترهای برنامه ریزی مشاهده می‌گردند.

جدول (۱): مشخصات بارهای استفاده شده در سناریوهای مختلف

مدل بار	ضرایب وابستگی	
	k_{pv}	k_{qv}
ثابت	۰	۰
خانگی	۱٫۵	۲٫۴
صنعتی	۰٫۲	۰٫۷
تجاری	۰٫۵	۲٫۴

جدول (۲): قیمت مبادله برق در سناریوهای مختلف

پارامتر	مقدار	واحد
$\rho_{t,h}$	۷۵	دلار/مگاوات ساعت
$\rho_{t,h}^{grid}$	۶۵	دلار/مگاوات ساعت
C_d	۰٫۰۰۱	دلار/مگاوات ساعت
IC_b	۱۰۰۰	دلار/مگاوات ساعت

جدول (۳): پارامترهای طراحی توربین بادی

پارامتر	مقدار	واحد
α	۳	%
V_{min}	۰٫۹	پریونیت
V_{max}	۱٫۱	پریونیت
$InfR$	۴	درصد
$IntR$	۵	درصد

$$E_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{W_1} & \frac{a_{12}}{W_2} & \frac{a_{13}}{W_3} & \dots & \frac{a_{1n}}{W_n} \\ \frac{a_{21}}{W_1} & \frac{a_{22}}{W_2} & \frac{a_{23}}{W_3} & \dots & \frac{a_{2n}}{W_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{a_{n1}}{W_1} & \frac{a_{n2}}{W_2} & \frac{a_{n3}}{W_3} & \dots & \frac{a_{nn}}{W_n} \end{bmatrix} \quad (46)$$

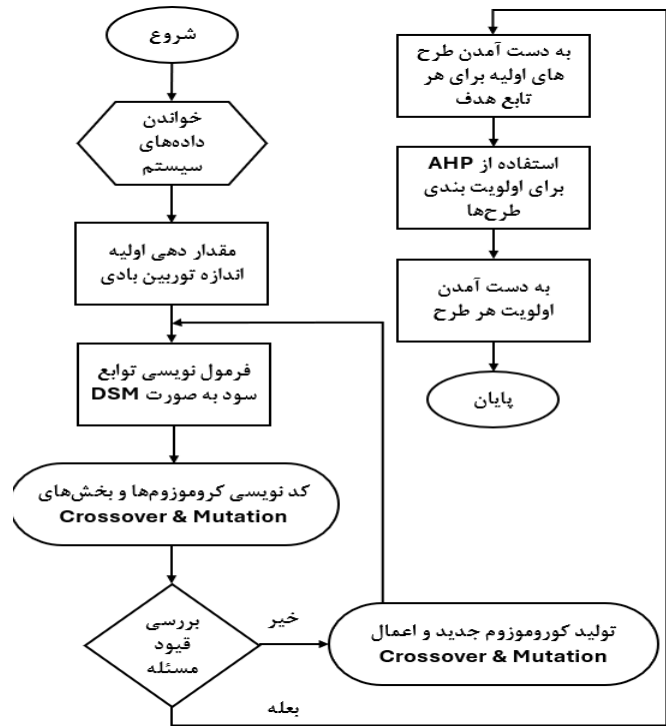
در نهایت، حداکثر مقدار ویژه به صورت زیر مشخص خواهد شد:

$$\tau_{max} = \left[\frac{V_1}{W_1} + \frac{V_2}{W_2} + \dots + \frac{V_n}{W_n} \right] \times \frac{1}{n} \quad (47)$$

با توجه به معادلات فوق، شاخص سازگاری و نسبت سازگاری نیز به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$CI = \left[\frac{\tau_{max} - n}{n-1} \right] \times \frac{1}{n} \quad (48)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (49)$$



شکل (۵): الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر AHP

۴- شبیه سازی و ارزیابی نتایج

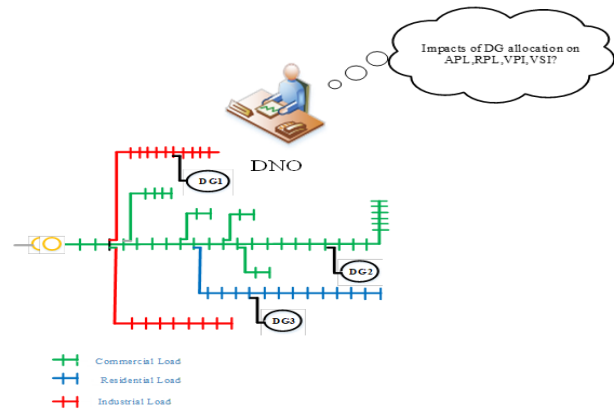
سه نوع محدودیت فنی در توابع سود در نظر گرفته شده است. با تخصیص وزن‌های مختلف به هر تابع، تأثیر محدودیت‌های فنی در کل منافع ارزیابی می‌شود. محدودیت اول در نظر گرفتن کاهش تلفات توان اکتیو، محدودیت دوم اعمال شاخص پایداری ولتاژ جدید، محدودیت

$\sigma_{t,h}$	0.1	عدد ثابت
	$\times \mu_{t,h}$	

در سیستم ۳۳ شینه ارائه شده، شینه ۱ به عنوان شینه مرجع در نظر گرفته شده است. به دلیل محدودیت بودجه برای اپراتورها، سه توربین بادی با اندازه ۰/۲ تا ۲ مگاوات و ضریب توان ۰/۸ تا ۱ در مسأله جایابی در نظر گرفته شده است. تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک برابر ۵۰، تعداد جمعیت برابر ۴۰ و در صد مربوط به ترکیب و جهش به ترتیب ۰/۳ و ۰/۸ در نظر گرفته شده اند.

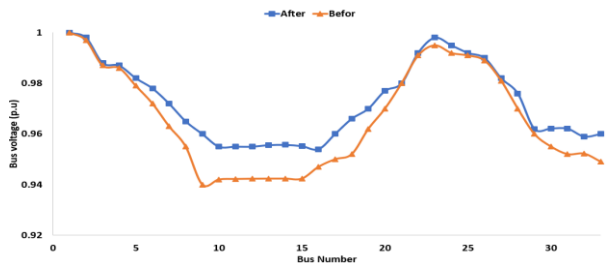
۴-۱ نتایج شبیه سازی در شبکه استاندارد ۳۳ شینه

شبکه مورد نظر در شکل (۶) نشان داده شده است. همان طور که در جدول (۴) نشان داده شده است، حداقل ولتاژ و توان اکتیو در حالت پایه در شینه ۱۸ به ترتیب برابر با ۰/۹۰۳۸ پریونیت و ۲۱۰/۹۸ کیلووات است. شکل های (۷) تا (۹)، ولتاژ شینه ها را به ترتیب برای سناریوهای ۳، ۲ و ۴ نشان می دهند.

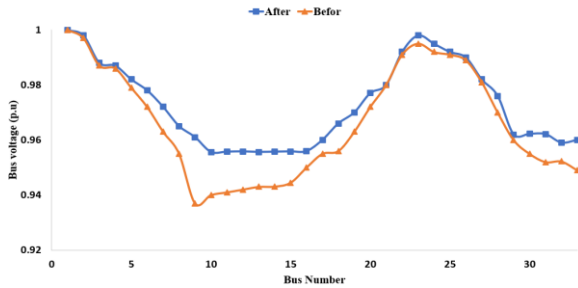


شکل (۶): شبکه استاندارد ۳۳ شینه IEEE

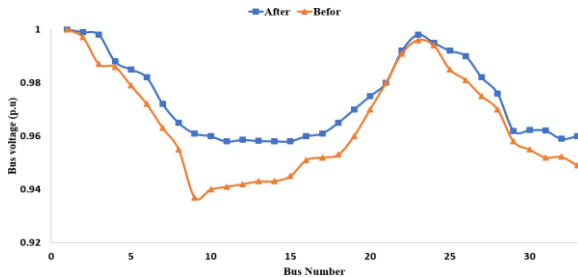
همان طور که از شکل (۷) به وضوح مشاهده می شود، نصب توربین با اندازه ۱/۹۴۲ مگاوات در شینه ۸، حداقل ولتاژ شینه ۱۸ را از ۰/۹۱ به ۰/۹۴۸ پریونیت بهبود می بخشد.



شکل (۷): تغییرات ولتاژ شینه ها در سناریوی شماره ۲ در حالت اول

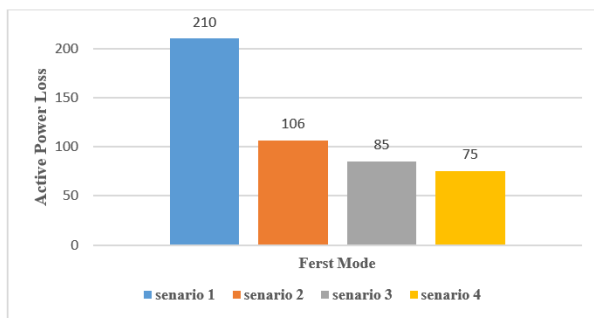


شکل (۸): تغییرات ولتاژ شینه ها در سناریوی شماره ۳ در حالت اول



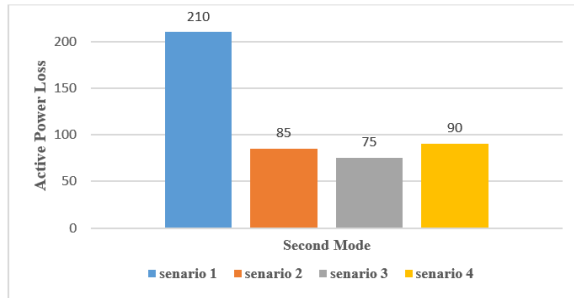
شکل (۹): تغییرات ولتاژ شینه ها در سناریوی شماره ۴ در حالت اول

شکل (۸) نقش مثبت نصب توربین بادی با اندازه های ۰/۸۵۷ و ۱/۲۰۴ مگاوات را در شینه های ۱۳ و ۳۰ در بهبود حداقل ولتاژ از ۰/۹۱ به ۰/۹۹۱ پریونیت نشان می دهد. نصب توربین ها با اندازه های ۰/۷۴۹، ۰/۸۷۹ و ۰/۴۰۸ مگاوات در شینه های ۱۴، ۲۵ و ۳۰ باعث بهبود پروفیل ولتاژ شینه ها طبق شکل (۹) می شود. در شکل (۱۰) تلفات توان اکتیو در چندین سناریو نشان داده شده است.



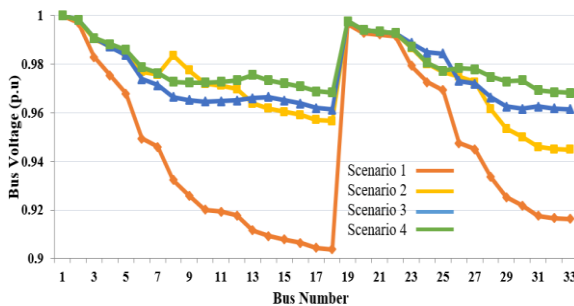
شکل (۱۰): تلفات توان اکتیو در هر سناریو در حالت اول

شکل های (۱۱) تا (۱۳)، ولتاژ شینه ها را به ترتیب برای سناریوهای ۲، ۳ و ۴ در حالت دوم نشان می دهد. نصب توربین ۱/۱۹ مگاوات با ضریب توان تنظیم شده ۰/۸۷، مشخصات ولتاژ را مطابق شکل (۱۱) بهبود می بخشد. شکل (۱۲) نمایه ولتاژ بهبود یافته را با نصب توربین با اندازه ۱/۲۴ و ۰/۸۵۷ مگاوات و ضریب توان تنظیم شده ۰/۹ و ۰/۸۷ نشان می دهد. تجهیز شبکه به سه توربین ۰/۷۴۹، ۰/۸۷۹ و ۰/۴۰۸ با ضریب

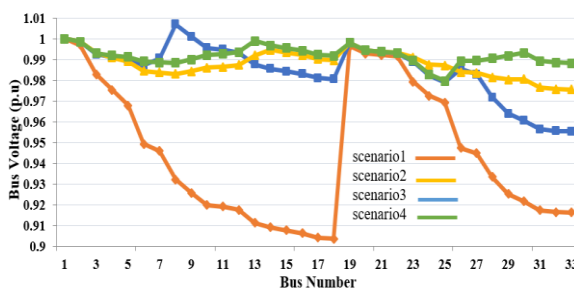


شکل (۱۴): تلفات توان اکتیو در هر سناریو در حالت دوم

در شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، اثرات افزایش تعداد توربین‌های بادی بر ولتاژ شینه‌ها نشان داده شده است. در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد که با نصب توربین‌ها، ولتاژ برخی از شینه‌ها بیش از ۱ پریونیت شده است. در جدول (۴) نیز مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از جایابی و تعیین اندازه بهینه توربین‌های بادی در سناریوها و حالت‌های مختلف ارائه شده است که بیشترین کاهش تلفات مربوط به سناریوی ۴ و حالت ۱ می‌باشد. همچنین در سناریوی ۳ و حالت ۲، از لحاظ ولتاژ شینه‌ها و حداقل مقدار آن، بهترین وضعیت مشاهده می‌گردد.

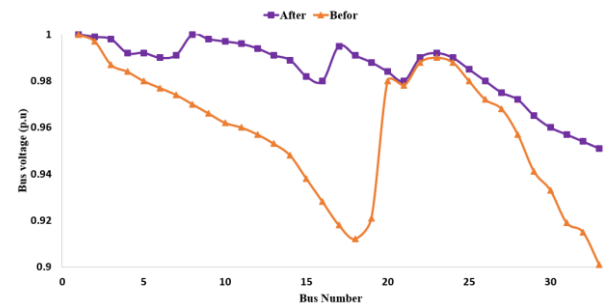


شکل (۱۵): ولتاژ شینه‌ها با اعمال ۱ الی ۴ توربین در حالت اول

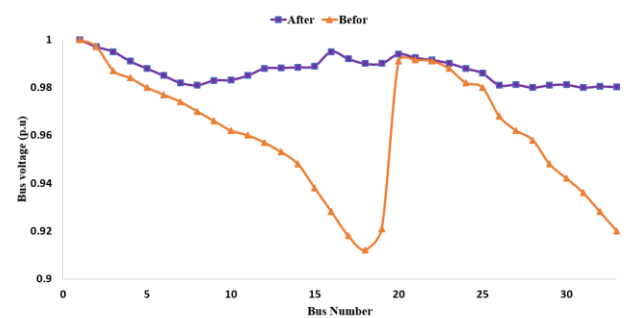


شکل (۱۶): ولتاژ شینه‌ها با اعمال ۱ الی ۴ توربین در حالت دوم

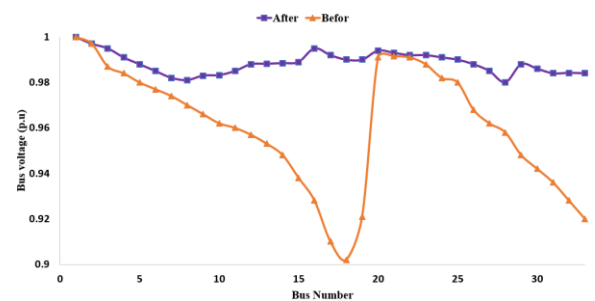
توان تنظیم شده در ۰/۸۸، ۰/۹۲ و ۰/۸۹ پروفایل ولتاژ شینه‌ها را مطابق شکل (۱۳) بهبود می‌بخشد.



شکل (۱۱): تغییرات ولتاژ شینه‌ها در سناریوی شماره ۲ در حالت دوم



شکل (۱۲): تغییرات ولتاژ شینه‌ها در سناریوی شماره ۳ در حالت دوم



شکل (۱۳): تغییرات ولتاژ شینه‌ها در سناریوی شماره ۴ در حالت دوم

در شکل (۱۴) نیز تلفات توان اکتیو در چندین سناریو نشان داده شده است.

جدول (۴): نتایج مقایسه‌ای جایابی و تعیین اندازه بهینه توربین بادی در سناریوهای مختلف با محدودیت توان اکتیو

سناریو	حالت	تلفات توان حقیقی (کیلو وات)	کاهش تلفات توان حقیقی	حداقل ولتاژ (پریونیت)	مکان و اندازه بهینه توربین بادی (مگاوات)	ضریب توان بهینه
۱	حالت پایه	۲۱۰.۹۸	-	۰.۹۰۳۸ (شینه ۱۸)	-	-
۲	حالت ۱	۱۰۶	۴۹.۵۲	۰.۹۴۴۸ (شینه ۲۳)	۱.۹۴۲ (شینه ۸)	۱.۰۰
	حالت ۲	۸۱.۰۲	۶۱.۴۳	۰.۹۵۵۱ (شینه ۲۳)	۱.۹۴۱ (شینه ۸)	۰.۸۷ (شینه ۸)
۳	حالت ۱	۸۵.۲۲	۵۹.۵۲	۰.۹۶۸۳ (شینه ۲۳)	۱.۲۰۴ (شینه ۳۰)	۱.۰۰ (شینه ۱۳)
	حالت ۲	۸۱.۹	۳۸.۷۱	۰.۹۷۹۷ (شینه ۲۵)	۰.۸۷۱ (شینه ۱۶) ۱.۲۱۴ (شینه ۳۰)	۰.۸۷۱ (شینه ۱۶) ۱.۰۰ (شینه ۱۳)
۴	حالت ۱	۷۵.۴۶	۶۴.۲۹	۰.۹۶۱۳ (شینه ۱۸)	۰.۸۱۱ (شینه ۱۴)	۱.۰۰ (شینه ۱۴) ۱.۰۰ (شینه ۲۵) ۱.۰۰ (شینه ۳۱)
	حالت ۲	۹۰.۴۳	۱۹.۷۲	۰.۹۷۵۷ (شینه ۳۰)	۰.۷۴۹ (شینه ۱۴) ۰.۸۷۹ (شینه ۲۵) ۰.۴۰۸ (شینه ۳۰)	۰.۸۸ (شینه ۱۴) ۰.۹۲ (شینه ۲۵) ۰.۸۹ (شینه ۳۰)

از جایابی و تعیین اندازه بهینه توربین های بادی در سناریوها و حالت های مختلف را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، کل مزایای به دست آمده با در نظر گرفتن تلفات توان اکتیو به عنوان یک محدودیت فنی اصلی، بیشتر از سایرین است.

شکل (۱۷) منحنی همگرایی سود را نشان داده و شکل (۱۸) رویکرد AHP را برای انتخاب بهترین راه حل از میان راه حل های به دست آمده از چندین سناریو را نشان می دهد. با در نظر گرفتن هر یک از توابع به عنوان یک محدودیت فنی اصلی، تمامی طرح ها و شاخص ها در جدول (۸) ارایه گردیده است. پس از به کارگیری AHP، طرح های انتخابی برای هر یک از توابع به ترتیب طرح ۲، طرح ۳ و طرح ۵ می باشد. جدول (۸) نشان دهنده سه سناریو (به غیر از حالت پایه) در دو حالت است که شامل ۶ طرح خواهد شد. هر سناریو در ۳ حالت متفاوت با محدودیت های متفاوت از قبیل تلفات توان، شاخص پایداری ولتاژ جدید و حد مجاز جریان خط بررسی شده است که مجموعاً تعداد حالات را به ۱۸ خواهد رساند.

۴-۱-۱ نتایج شبیه سازی با در نظر داشتن شاخص پایداری ولتاژ

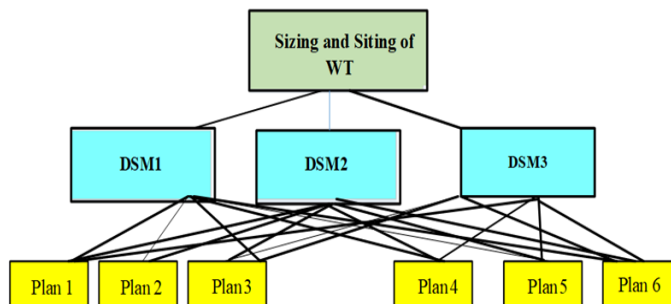
جدید به عنوان محدودیت فنی

جدول (۵) نتایج را در شرایطی ارائه می دهد که VSI به عنوان محدودیت های فنی اصلی در نظر گرفته می شود. همانطور که مشاهده می شود سناریوها و حالت های مختلفی برای داشتن یک مطالعه جامع در نظر گرفته شده است. نتایج نشان دهنده تأثیرات مثبت تزریق توان راکتیو در شرایط ضریب توان قابل تنظیم، بر کاهش تلفات توان اکتیو و افت ولتاژ است.

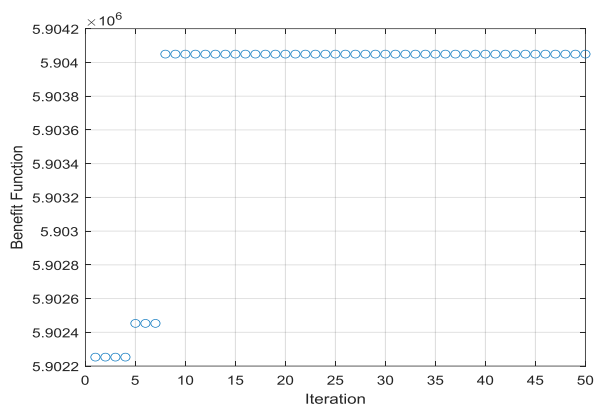
۴-۱-۲ نتایج شبیه سازی با در نظر گرفتن LFL به عنوان

محدودیت فنی

در این بخش مکان یابی و تعیین اندازه بهینه توربین های بادی با محاسبه توابع سود و با در نظر گرفتن LFL به عنوان یک محدودیت فنی اصلی انجام می شود. مقدار سود به دست آمده در هر سناریو در جدول (۶) ارایه شده است. جدول (۷) نیز مقایسه ای بین نتایج حاصل



شکل (۱۸): انتخاب بهترین راه حل با استفاده از AHP و ۶ طرح متفاوت



شکل (۱۷): منحنی همگرایی تابع سود برای سناریو دوم در حالت دوم

جدول (۵): نتایج مقایسه ای جایابی و تعیین اندازه بهینه توربین بادی با محدودیت شاخص پایداری ولتاژ جدید

سناریو	حالت	تلفات توان حقیقی (کیلو وات)	کاهش تلفات توان حقیقی	حداقل ولتاژ (پریونیت)	اندازه و مکان بهینه توربین بادی	ضریب توان بهینه
۱	حالت پایه	۲۱۰.۹۸	-	۰.۹۰۳۸ (شینه ۱۸)	-	-
۲	حالت ۱	۱۱۸	۴۴.۰۷	۰.۹۵۶۲ (شینه ۳۳)	۱.۹۱۱ (شینه ۸)	۱.۰۰
	حالت ۲	۸۳.۱۳	۶۰.۶	۰.۹۶۷۰ (شینه ۳۳)	۱.۹۱۲ (شینه ۸)	۰.۸۶ (شینه ۸)
۳	حالت ۱	۸۷.۱۷	۵۸.۶۸	۰.۹۷۲۵ (شینه ۳۳)	۰.۸۴۹ (شینه ۱۳) ۱.۱۵۱ (شینه ۳۰)	۱.۰۰ (شینه ۳۰)
	حالت ۲	۸۰.۶	۴۰.۹۱	۰.۹۸۱۲ (شینه ۲۵)	۰.۸۶۲ (شینه ۱۶) ۱.۱۳۴ (شینه ۳۰)	۰.۸۵ (شینه ۱۶) ۰.۹ (شینه ۳۰)
۴	حالت ۱	۸۰.۶۶	۶۱.۷۷	۰.۹۶۱۷ (شینه ۱۸)	۰.۷۲۸ (شینه ۱۴)	۱.۰۰ (شینه ۱۴) ۱.۰۰ (شینه ۲۵) ۱.۰۰ (شینه ۳۱)
	حالت ۲	۸۶.۲۳	۲۸.۸۳	۰.۹۸۷۲ (شینه ۳۰)	۰.۷۳۳ (شینه ۱۴) ۰.۸۴۷ (شینه ۲۵) ۰.۳۷۸ (شینه ۳۰)	۰.۸۶ (شینه ۱۴) ۰.۹ (شینه ۲۵) ۰.۸۶ (شینه ۳۰)

جدول (۶): مقایسه میزان سود بدست آمده با در نظر گرفتن LFL به عنوان محدودیت اصلی در سناریوهای مختلف

سود (بر حسب ۱۰ ^۷ دلار)	سناریو های مختلف			
	۱	۲	۳	۴

سود ناشی از کاهش وابستگی به شبکه بالادستی	۱.۰۱۵	۱.۰۲۳	۱.۰۳۸	۱.۰۷۵
سود ناشی از کاهش تلفات توان راکتیو	۱.۱۰۱	۱.۱۰۸	۱.۱۰۹	۱.۲۰۸
سود ناشی از کاهش تلفات توان حقیقی	۱.۴۲۸	۱.۴۷۵	۱.۵۰۲	۱۶۷۸
سود ناشی از بهبود پایداری ولتاژ	۱.۲۴۳	۱.۳۰۵	۱.۳۷۵	۱.۴۵۷
سود کل (دلار)	۱.۵۷۸	۱.۶۰۵	۱.۶۴۲	۱.۷۰۸

جدول (۷) : نتایج مقایسه‌ای جایابی بهینه توربین بادی با محدودیت حد مجاز جریان خط

سناریو	حالت	تلفات توان حقیقی (کیلو وات)	کاهش تلفات توان حقیقی	حداقل ولتاژ (پریونیت)	مکان و اندازه بهینه توربین بادی (مگاوات)	ضریب توان بهینه
۱	حالت پایه	۲۱۰.۹۸	-	۰.۹۰۳۸ (شینه ۱۸)	-	-
۲	حالت ۱	۱۱۲	۴۶.۶۷	۰.۹۴۷۲ (شینه ۳۳)	۱.۹۱۱ (شینه ۸)	۱.۰۰
	حالت ۲	۸۲.۱۵	۶۰.۸۹	۰.۹۵۶۰ (شینه ۳۳)	۱.۹۱۲ (شینه ۸)	۰.۸۸ (شینه ۸)
۳	حالت ۱	۸۵.۴۱	۵۹.۳۳	۰.۹۶۴۳ (شینه ۳۳)	۰.۸۴۹ (شینه ۱۳) ۱.۱۵۱ (شینه ۲۰)	۱.۰۰ (شینه ۱۳) ۰.۰۰ (شینه ۳۰)
	حالت ۲	۸۱.۱۳	۳۹.۶۲	۰.۹۷۶۵ (شینه ۲۵)	۰.۸۶۲ (شینه ۱۶) ۱.۱۳۴ (شینه ۳۰)	۰.۸۸ (شینه ۱۶) ۰.۰۹ (شینه ۳۰)
۴	حالت ۱	۷۹.۷۴	۶۲.۰۲	۰.۹۵۷۸ (شینه ۱۸)	۰.۷۲۸ (شینه ۱۴)	۰.۰۰ (شینه ۱۴) ۱.۰۰ (شینه ۲۵) ۰.۰۰ (شینه ۳۱)
	حالت ۲	۸۷.۳۴	۲۶.۵۸	۰.۹۷۹۵ (شینه ۳۰)	۰.۷۳۳ (شینه ۱۴) ۰.۸۵۶ (شینه ۲۵) ۰.۴۲۱ (شینه ۳۰)	۰.۸۷ (شینه ۱۴) ۰.۹۱ (شینه ۲۵) ۰.۸۸ (شینه ۳۱)

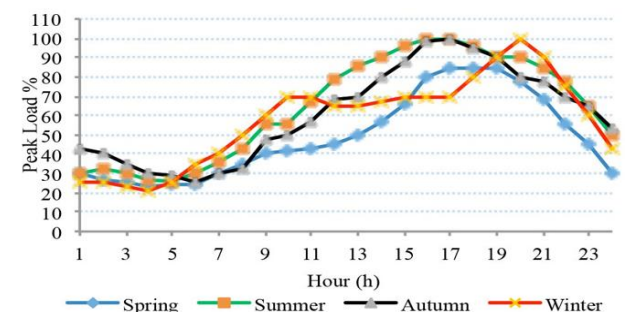
جدول (۸) : تعداد طرح‌ها با توجه به سناریوهای تعریف شده

OF1= Power Loss Minimization $P_{Loss}(x, u) = \sum_k I_k ^2 R_k$			OF2= Voltage Profile Improvement $VSI = \left[1 - \frac{4 \left(\frac{P_2^2}{Q_2} + Q_2 \right) X}{\left(\frac{P_2 \sin \delta V_1}{Q_2} - V_1 \cos \delta \right)^2} \right]$			OF3 = load flow limitation $LFL = \text{Max} \left(\frac{S_{ij}}{CS_{ij}} \right)$		
سناریو	حالت	طرح	سناریو	حالت	طرح	سناریو	حالت	طرح
۲	حالت ۱	طرح ۱	۲	حالت ۱	طرح ۷	۲	حالت ۱	طرح ۱۳
	حالت ۲	طرح ۲		حالت ۲	طرح ۸		حالت ۲	طرح ۱۴
۳	حالت ۱	طرح ۳	۳	حالت ۱	طرح ۹	۳	حالت ۱	طرح ۱۵
	حالت ۲	طرح ۴		حالت ۲	طرح ۱۰		حالت ۲	طرح ۱۶
۴	حالت ۱	طرح ۵	۴	حالت ۱	طرح ۱۱	۴	حالت ۱	طرح ۱۷
	حالت ۲	طرح ۶		حالت ۲	طرح ۱۲		حالت ۲	طرح ۱۸

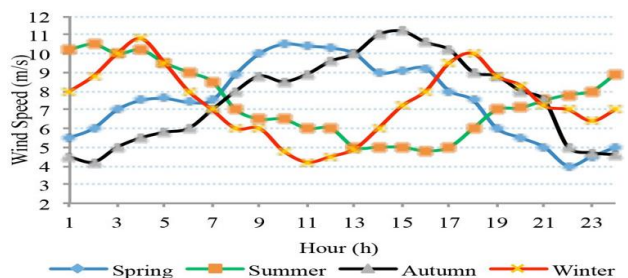
۳-۱-۴ نتایج شبیه سازی با در نظر داشتن عدم قطعیت

منحنی های بار روزانه جمع‌آوری شده مربوط به فصول مختلف در شکل (۱۸) نشان داده شده است. با توجه به سیستم توزیع معمول در ساختار پایه آن، کل تقاضای اوج برابر با ۳.۷۱۵ مگاوات و ۲.۳ مگاوات‌آمپر است. همان طور که مشاهده می‌شود، ساعات اوج در فصول مختلف متفاوت است. مقدار میانگین PDF معمولی برابر با مقدار پیش‌بینی شده در نظر گرفته شده و انحراف معیار تقاضای بار برابر با ۵٪ در نظر گرفته شده است. قرار است شینه ۱ شینه پست باشد و به شبکه فوق توزیع متصل گردد. سه شینه ۱۶، ۲۵ و ۳۲ به عنوان منتخب قرارگیری توربین‌های بادی معرفی شده‌اند. فقط یک توربین بادی در شبکه نصب خواهد شد و قرار است با ضریب توان واحد کار کند. ظرفیت نامی توربین بادی ۵۰۰ کیلووات فرض شده است. با توجه به مشخصات منحنی توان، سرعت قطع برق برابر با ۳ متر بر ثانیه، سرعت نامی ۱۲ متر بر ثانیه و سرعت قطع برق ۲۵ متر بر ثانیه تعیین شده است. میانگین سرعت باد ساعتی در هر فصل در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

با توجه به تفاوت‌های ساعتی در سرعت باد و تقاضای بار، مقادیر متفاوتی از EV و SD به دست می‌آید. همان طور که در جدول (۹) نشان داده شده است، سه شینه منتخب با توجه به مقادیر میانگین EV و SD نتایج متفاوتی دارند. قبلاً توضیح داده شد که راه حل بهینه قرارگیری باید حداقل SD را نشان دهد.



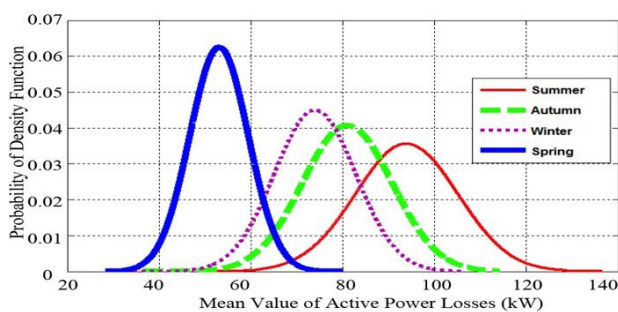
شکل (۱۸): منحنی بار روزانه در فصول مختلف



شکل (۱۹): میانگین سرعت باد در فصول مختلف

بر اساس رویکرد TOPSIS، اولویت‌های منتخب قرارگیری WT بر اساس ۲۴ ساعت تعیین می‌شوند. به این ترتیب، نتایج برای هر فصل در جدول (۱۰) ارائه شده است. علاوه بر این، بیشترین فاصله از بدترین پاسخ به عنوان رتبه‌بندی نهایی در نظر گرفته شده و این شینه به عنوان بهترین مکان برای نصب تعیین می‌گردد. بنابراین، شینه ۲۵ به عنوان بهترین مکان نصب WT با حداقل تلفات توان انتخاب می‌شود.

همچنین جدول (۱۱) تأثیر توربین بادی نصب شده بر میانگین تلفات توان مورد انتظار در هر فصل را نشان می‌دهد. در این جدول، طرح پایه، ساختار اساسی مورد آزمایش را بدون قرار دادن توربین بادی نشان می‌دهد. این راه‌حل با حداقل تلفات توان در شبکه مطابقت دارد و حداقل انحراف معیار تلفات توان را در طول ساعات مورد بررسی به صورت سالانه نشان می‌دهد. در این راستا، PDF تلفات توان برای هر فصل با در نظر گرفتن توربین بادی نصب شده در شینه ۲۵ در شکل (۲۰) نشان داده شده است.



شکل (۲۰): نتیجه بهینه برای PDF تلفات توان

جدول (۹): ویژگی‌ها و شاخص‌ها در مکانیابی توربین بادی

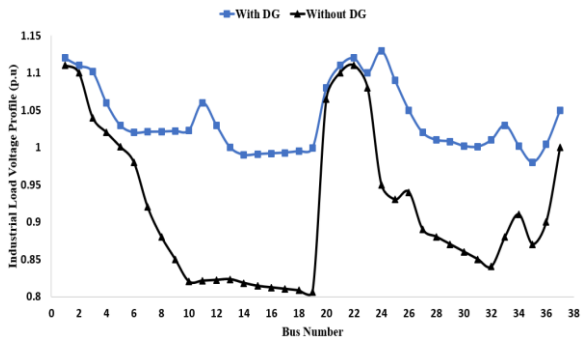
فصول	شینه	EV average	SD average
بهار	۱۶	۴۶.۹	۷.۸
	۲۵	۵۳	۶.۳
	۳۲	۴۸	۷.۷
تابستان	۱۶	۸۶	۱۴
	۲۵	۹۴	۱۲
	۳۲	۸۸	۱۳
پاییز	۱۶	۷۱	۱۲
	۲۵	۸۲	۱۰
	۳۲	۷۳	۱۱.۵
زمستان	۱۶	۶۶	۱۰.۸
	۲۵	۷۴.۱	۸.۹
	۳۲	۶۸.۰۲	۱۰.۹۷

جدول (۱۰): ویژگی‌ها و شاخص رتبه‌بندی شینه های منتخب برای جایگذاری

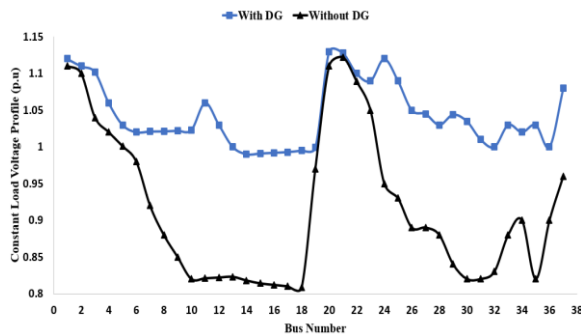
WT بر اساس تکنیک TOPSIS

فصول	شینه	C _i	رتبه نهایی
بهار	۱۶	۰.۳۹۸۲	۲

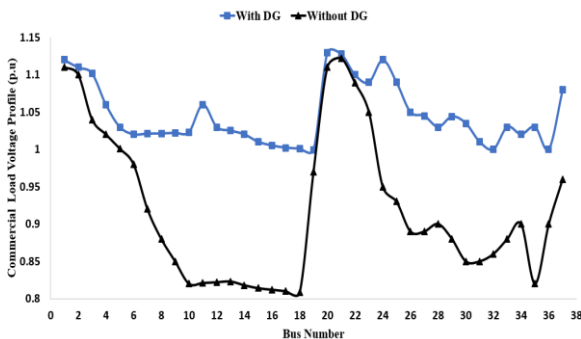
شکل (۲۱): شبکه استاندارد ۳۷ شینه IEEE



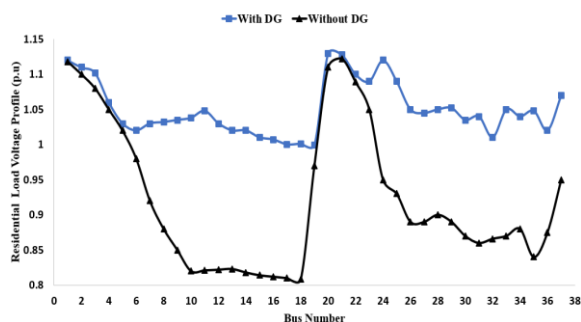
شکل (۲۲): تاثیر شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی روی بار صنعتی



شکل (۲۳): تاثیر شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی روی بار ثابت



شکل (۲۴): تاثیر شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی روی بار تجاری



شکل (۲۵): تاثیر شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی روی بار خانگی

	۲۵	۰.۶۰۱۸	۱
	۳۲	۰.۳۹۰۴	۳
تابستان	۱۶	۰.۳۷۲۱	۳
	۲۵	۰.۶۲۷۹	۱
پاییز	۱۶	۰.۴۰۸۷	۲
	۲۵	۰.۴۲۴۱	۲
زمستان	۱۶	۰.۵۷۵۹	۱
	۳۲	۰.۴۲۰۷	۳
	۱۶	۰.۳۶۷۱	۳
	۲۵	۰.۶۳۲۹	۱
	۳۲	۰.۴۲۷۸	۲

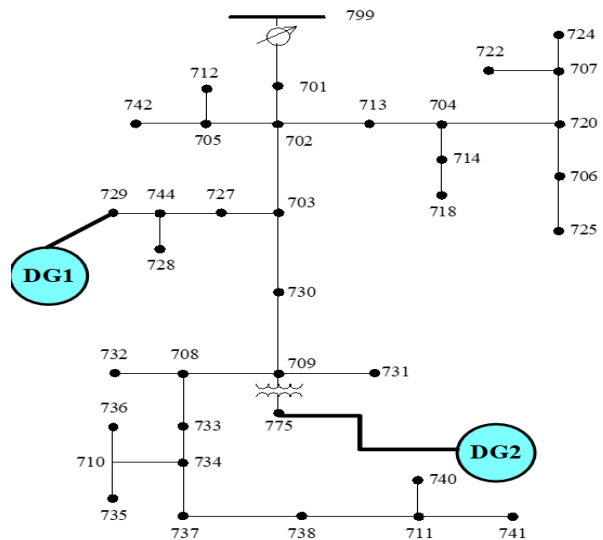
جدول (۱۱): جدول مقایسه‌ای میزان بهبود تلفات توان با در نظر داشتن عدم

قطعیت

مقدار میانگین تلفات توان حقیقی			
فصول	طرح پایه	با جایگذاری WT	کاهش تلفات توان
بهار	۵۶.۱۵	۵۳.۱۵	۶.۵۲
تابستان	۹۸.۴۵	۹۳.۲۷	۴.۶۱
پاییز	۸۶.۳۲	۸۱.۳۷	۶.۳۷
زمستان	۷۸.۸۴	۷۳.۴۲	۵.۲۲

۲-۴ نتایج شبیه سازی در شبکه استاندارد ۳۷ شینه

اعمال شاخص پایداری ولتاژ به سیستم ۳۷ شینه IEEE که در شکل (۲۱) نشان داده شده است دارای پروفیل ولتاژ برای بارهای مختلف بصورت شکل های (۲۲) تا (۲۵) خواهد بود. همان طور که از شکل ها قابل مشاهده است، در نظرگرفتن شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی موجب تخصیص بهینه منابع تولید پراکنده و بهبود پروفیل ولتاژ در همه انواع بار (صنعتی، تجاری، خانگی و ثابت) شده است.



۳-۴ مقایسه نتایج با سایر شاخص‌های پایداری ولتاژ

همان‌طور که در ابتدا نیز بیان شده است هدف از این مطالعه ارائه یک شاخص جدید برای پایداری ولتاژ بوده تا ضمن بهبود حاشیه پایداری ولتاژ، به دلیل داشتن تمامی پارامترهای اصلی شبکه از قبیل توان اکتیو، راکتیو و زاویه بار باعث دقت بیشتر در جایابی و اندازه تولیدات پراکنده و بهبود پایداری ولتاژ شود. در کنار موارد فوق سرعت عمل و سادگی الگوریتم از دیگر موارد مورد اهمیت می‌باشد.

به همین دلیل و برای اعتماد بیشتر به شاخص پایداری و الگوریتم پیشنهاد شده در این مطالعه، مقایسه‌ای در هر دو سیستم شبیه‌سازی شده با سایر الگوریتم‌ها و شاخص‌های پایداری ولتاژ که در بخش مرور مطالعات مورد بازبینی قرار گرفته، انجام شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که شاخص پایداری ولتاژ پیشنهاد شده موفق شده است تا ضمن سادگی در نوشتار و در نظر داشتن قیود فنی متفاوت، میزان حاشیه پایداری ولتاژ را بین ۱ الی ۴٪ نسبت به سایر شاخص‌های پایداری ولتاژ افزایش دهد. نتایج این مورد در جدول (۱۲) به طور کامل مقایسه شده است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

رشد بار در سیستم و هزینه بر بودن احداث نیروگاه جدید، استفاده از منابع تولید پراکنده در نزدیکی بار بمنظور بهبود قیود فنی و بهره‌برداری سیستم را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. ترکیب این منابع در سیستم توزیع متداول، این سیستم را به سیستم توزیع فعال تبدیل می‌کند. در این

مطالعه، هدف افزایش سود آوری بخش خصوصی و بهره‌بردار سیستم توزیع با در نظر گرفتن قیود فنی است. در ابتدا مقدمه‌ای از منابع تولید پراکنده و شاخص پایداری ولتاژ ارائه گردید و سپس مدلسازی از توربین بادی و توان خروجی توربین بادی بیان ارائه شد. در بخش دوم به مرور مطالعات اخیر در مورد پایداری ولتاژ و نقش منابع تولید پراکنده در بهبود پایداری ولتاژ و سایر قیود فنی اشاره شد و نقاط قوت و ضعف مطالعات مختلف و زنجیره‌گمشده در تحقیقات این حوزه که منجر به ارائه مدل ارائه شده هست بیان گردید. در بخش سوم، شاخص پایداری ولتاژ پیشنهادی ارائه شد و روابط مربوط به آن به طور کامل ارائه گردیدند. سپس، قیود اصلی و نحوه معادلات مورد استفاده در بخش عدم قطعیت تقاضای بار و تولید توربین‌های بادی مورد بررسی قرار گرفت.

در نهایت در بخش چهارم نتایج به دست آمده در دو شبکه ۳۳ و ۳۷ شینه استاندارد IEEE به طور کامل بررسی شد. از بررسی نتایج کاملاً مشخص است که شاخص پیشنهادی در کنار فرآیند AHP و الگوریتم نوشته شده به خوبی عملکرد و ضمن کنترل اندازه و مکان بهینه تولیدات پراکنده، باعث ارائه عملکرد بهتر و بهبود حاشیه پایداری ولتاژ شده است. مهم‌ترین عامل در صحت دقت این عملیات، در نظر داشتن عدم قطعیت و معادلات مربوط به آن می‌باشد که نتایج به دست آمده را بیشتر به واقعیت نزدیک خواهد کرد.

جدول (۱۲) : نتایج مقایسه میزان پایداری ولتاژ شاخص پیشنهادی با سایر شاخص‌های پایداری ولتاژ

انواع شاخص‌های پایداری ولتاژ	۳۳ شینه	۳۷ شینه
شاخص پیشنهادی جدید	۰.۹۷۲۵	۰.۹۶۴۲
$V_{Bus-min} = \max(1 - V_n)$	۰.۹۶۵۲	۰.۹۵۱۰
$VSI_{(m2)} = V_{(m1)} ^4 - 4\{P_{(m2)} \times (Jf) - Q_{(m2)}r(Jf)^2\} - 4\{P_{(m2)} \times r(Jf) + Q_{(m2)} \times (Jf)\} V_{(m1)} ^2$	۰.۹۶۷۲	۰.۹۶۰۱
$LVSI = \frac{4RP_r}{V_2 \cos\theta - \delta \leq 1}$	۰.۹۶۵۱	۰.۹۵۸۹
$LVSI = \frac{4(Vi Vj \cos\delta - Vj^2 \cos\delta^2)}{Vi^2}$	۰.۹۴۳۰	۰.۹۵۲۱
$LVSI = \sqrt{\frac{Vi^2 - 2Z(Pr \cos\theta + Qr \sin\theta)}{2}}$	۰.۹۲۸۵	۰.۹۴۸۶

مراجع :

- Mohammad Aryanfar. (2023). Optimal Dispatchable DG Location and Sizing with an Analytical Method, based on a New Voltage Stability Index. *International Journal of Research and Technology in Electrical Industry IJRTEI.*, Vol.2, No. 1, pp. 87-96
- N. Srilatha. (2023). Distributed Generation Placement Using Voltage Stability Index and Optimal Sizing Using Adaptive Particle Swarm Optimization. *E3S Web of Conferences* 399, 01007.
- S.Rezaeeian, N.Bayat, A.Rabiee, S.Nikkhah and A.Soroudi. (2022). Optimal Scheduling of Reconfigurable Microgrids in Both Grid-Connected and Isolated Modes Considering the Uncertainty of DERs. *Energies* 15, no. 15: 5369.
- T. A. Boghdady, S. G. A. Nasser, and E. E. D. A. Zahab. (2022). Energy harvesting maximization by integration of distributed generation based on economic benefits. *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 25, no. 2, pp. 610-625.
- Tourani M. (2025). Microgrid power scheduling considering the risk of power supply from renewable units in the presence of electric vehicle. *Iejqp*, 14 (1) :9-18.
- T. T. Nguyen, T. T. Ngoc, T. T. Nguyen, T. P. Nguyen, and N. A. Nguyen. (2021). Optimization of location and size of distributed generations for maximizing their capacity and minimizing power loss of distribution system based on cuckoo search algorithm. *Bull of Electr. Eng. & Inf.*, vol. 10, no. 4, pp. 1769-1776.
- Y. Merzoug, B. Abdelkrim, and B. Larbi. (2020). Optimal placement of wind turbine in a radial distribution network using PSO method. *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 1074-108.
- Zhang, Lidong, Jiao Li, Xiandong Xu, Fengrui Liu, Yuanjun Guo, Zhile Yang, and Tianyu Hu. (2023). High spatial granularity residential heating load forecast based on Dendrite net model. *Energy* 269, no.
- Zhihui Lia, Yanli Zou and Zheng Gao. (2020). The Research on Optimal Location and Sizing of Distributed Generation Considering Voltage Stability Index and Line Loss Reduction Rate. *Materials Science and Engineering* 782-032047.
- Ali Farhan R, Shahgholian G, Fani B. (2024). Providing a Protection Strategy to Reduce the Impact of Distributed Generation in Electrical Energy Distribution Systems. *iejqp*; 13 (3).
- ADEGOKE, Samson Ademola; SUN, Yanxia. (2023). Power system optimization approach to mitigate voltage instability issues: A review. *Cogent Engineering*, 10.1: 2153416.
- D.Chung Phan, T.Trinh, D.Truc Ha. (2024). Optimal placement of wind turbine in distribution grid to minimize energy loss considering power generation probability. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* Vol. 13, No. 4, August, pp. 2251~2259.
- Djemoui Benkhetta1, Abdelhafid Rouina, Abdelouahab Necira. (2024). Optimal Placement and sizing of DG Units Using LCA Algorithm. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web* Volume 11.
- F. A. Jumaa, O. M. Neda, and M. A. Mhawesh. (2021). Optimal distributed generation placement using artificial intelligence for improving active radial distribution system. *Bull of Electr. Eng. & Inf.*, vol. 10, no. 5, pp. 2345-2354, Oct.
- G. A. Adepoju, B. A. Aderemi, S. A. Salimon, and O. J. Alabi. (2023). Optimal placement and sizing of distributed generation for power loss minimization in distribution network using particle swarm optimization technique. *Eur. J. Eng. Sci. Tech.*, vol. 8, no. 1, pp. 19-25.
- H.Hamed and M.Farsadi. (2015).Utilization Cat Swarm Optimization Algorithm for Selected Harmonic Elimination in Current Source Inverter. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)* 6, no. 4.
- López, M.Zamudio, H.Zareipour and M.Quashie. (2024). Forecasting the Occurrence of Electricity Price Spikes: A Statistical-Economic Investigation Study”, *Forecasting* 6, no. 1: 1-23.
- M. A. Sameh, A. A. Aloukili, M. A. El-Sharkawy, M. A. Attia, and A. O. Badr. (2022). Optimal DGs siting and sizing considering hybrid static and dynamic loads, and overloading conditions. *Processes*, vol. 10, no. 12, p. 2713, Dec.
- M.Hemmati, N.Amjady and M. Ehsan. (2023). Islanded Micro-Grid Modeling and Optimization of its Operation Considering Cost of Energy not Served by an Enhanced Differential Search Algorithm. *Energy Engineering and Management* 3, no. 4: 2-13.
- M.Shafiee. (2022). Wind Energy Development Site Selection Using an Integrated Fuzzy ANP-TOPSIS Decision Model. *Energies*, 15, 4289.
- Moazen M, Saghafi M. (2024). Power Control of VSVP BDFRG – Wind Turbine System Considering Wind Shear and Tower Shadow Effects. *iejqp*; 13 (3).