

Improving the Efficiency of Actual Distribution System by Allocating Multi-DG and DSTATCOM

Masoud Alilou¹, *PhD Student*, Sajad Sadi², *PhD Student*, Saeed Zamanian³, *MSc*,
Javad Gholami⁴, *PhD Student*, Shahab Moshari⁵, *PhD*

¹Department of Electrical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
m.alilou@urmia.ac.ir

²Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
s.sadi@modares.ac.ir

³Department of Engineering and defense, Imam Hossein University, Tehran, Iran
saeidzamanian94@gmail.com

⁴School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
javadgholami@mecheng.iust.ac.ir

⁵Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
s.moshari@modares.ac.ir

Abstract:

Optimal allocation of distributed generation units and DFACTS affects the efficiency of these devices; for this reason, in this article, the simultaneous placement of distributed generation and Distributed-STATIC-COMPensator (DSTATCOM) are done in the distribution system. The load model is considered as a combination of various customers' daily load patterns and sensitive to voltage-frequency. The micro turbine, wind turbine, photovoltaic and fuel cell are considered as DG units. The objective functions of the problem consist of the technical index (the voltage stability and the active and reactive power loss) and environmental index (the amount of pollutant DG unit's gas emissions). The whale optimisation algorithm (WOA) is used to multi-objective optimize the location and capacity of devices. After applying the multi-objective WOA, the analytical hierarchy process is utilized to select one of the Pareto optimal solutions as the best location and size of devices. The proposed algorithm is implemented on the 69-bus distribution system and actual 101-bus distribution system in Khoy-Iran. The results indicate the significant effect of load models and various DG units on the efficiency of the distribution system in the presence of DSTATCOM. Moreover, the indices of the distribution system are improved considerably after applying the proposed method.

Keywords: Analytical Hierarchy Process, DSTATCOM, Environmental Index, Multi-Objective Whale Optimisation Algorithm, Nonlinear Load Model.

Received: 4 September 2020

Revised: 4 October 2020

Accepted: 5 November 2020

Corresponding Author: Dr. Masoud Alilou

Citation: M. Alilou, S. Sadi, S. Zamanian, J. Gholami, S. Moshari, "Improving the efficiency of actual distribution system by allocating multi-DG and DSTATCOM", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 12, no. 45, pp. 1-15, Spring 2021 (in Persian).

بهبود بهره‌وری سیستم توزیع با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه انواع منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک توزیع

مسعود علیلو^۱، دانشجوی دکتری، سجاد سعدی^۲، دانشجوی دکتری، سعید زمانیان^۳، دانش‌آموخته کارشناسی - ارشد، جواد غلامی^۴، دانشجوی دکتری، شهاب مشاری^۵، دانش‌آموخته دکتری

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
m.alilou@urmia.ac.ir

۲- دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
s.sadi@modares.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه امام حسین، تهران، ایران
saeidzamanian94@gmail.com

۴- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
javadgholami@mecheng.iust.ac.ir

۵- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
s.moshari@modares.ac.ir

چکیده: جایابی و ظرفیت‌یابی بهینه واحدهای تولید پراکنده و جبران‌سازهای مدرن تاثیر مستقیمی بر روی کارایی این ادوات در سیستم توزیع دارد. به همین دلیل، در این مقاله، بهینه‌سازی همزمان مکان و اندازه انواع منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک سنکرون در سیستم‌های توزیع مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت نزدیک‌تر کردن نتایج به شرایط واقعی تر بهره‌برداری، از یک مدل بار غیرخطی که ترکیبی از الگوری مصرف روزانه و بار متغیر به ولتاژ و فرکانس است، استفاده می‌شود. میکروتوربین، توربین بادی، پنل فتوولتائیک و پیل سوختی به عنوان منابع تولید پراکنده در نظر گرفته می‌شوند. توابع هدف مسئله ترکیبی از شاخص‌های فنی و زیست‌محیطی هستند. از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه وال برای بهینه‌سازی توابع هدف و تشکیل صفحه بهینه پارتو استفاده می‌شود. پس از اجرای الگوریتم چندهدفه، از روش تحلیل سلسله مراتبی برای انتخاب بهترین ذره از صفحه پارتو که معادل با بهینه‌ترین مکان و اندازه ادوات است، استفاده می‌شود. در نهایت، روش پیشنهادی در سیستم‌های توزیع استاندارد ۶۹ شینه IEEE و واقعی ۱۰۱ شینه خوی- ایران مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده کارایی مناسب روش پیشنهادی در جایابی و ظرفیت‌یابی بهینه ادوات و بهبود شاخص‌های سیستم توزیع هستند.

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه وال، جبران‌ساز، روش تحلیل سلسله مراتبی، شاخص زیست‌محیطی، مدل بار

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۶/۱۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۷/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۸/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مسعود علیلو

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ارومیه- کیلومتر ۱۱ جاده سرو- دانشگاه ارومیه- دانشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، ادغام واحدهای تولید پراکنده^۱ (DG) در شبکه‌های توزیع برق به‌طور فزاینده‌ای افزایش پیدا کرده است. یافتن مکان و اندازه بهینه ادوات با توجه به شرایط سیستم تاثیر بسزایی بر روی بهره‌وری آنها می‌گذارد. در سیستم توزیع، انواع مختلفی از فن‌آوری‌های تولید پراکنده برای تولید انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تکنولوژی‌ها را می‌توان به گروه‌های تجدیدپذیر (توربین بادی و فتوولتائیک) و تجدیدناپذیر (میکرو توربین و پیل سوختی) تقسیم کرد. در حالت کلی، قرار دادن بهینه منابع تولید پراکنده پارامترهای فنی، اقتصادی و زیست محیطی شبکه را بهبود می‌بخشد [۱-۳].

توان راکتیو یکی از مهم‌ترین معیارهای پایداری سیستم توزیع است. بنابراین بهره‌بردار شبکه همواره باید میزان توان راکتیو را کنترل کرده و در شرایط لازم آن را جبران نماید. امروزه جبران‌سازهای مدرن^۲ (DFACTS) برای جبران‌سازی توان راکتیو شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. ادوات DFACTS تجهیزات کنترلی مبتنی بر سیستم‌های الکترونیکی و استاتیکی هستند که برای کنترل یک یا چند پارامتر سیستم برق AC مورد استفاده قرار می‌گیرند. این جبران‌سازها توانایی کنترل ولتاژ شین‌ها در کنار جبران‌سازی توان راکتیو را برخوردار هستند در حالیکه جبران‌سازهای سنتی (بانک‌های خازنی) فقط توانایی کنترل توان راکتیو را برخوردار هستند. علاوه بر این، جبران‌سازهای DFACTS سریع‌تر و دقیق‌تر بانک‌های خازنی هستند. جبران‌ساز استاتیک توزیع^۳ (DSTATCOM) یکی از محبوب‌ترین عضو خانواده ادوات DFACTS است که برای بهبود کارایی سیستم توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. جبران‌سازهای DSTATCOM می‌توانند توان راکتیو متغیری را تامین نمایند و ولتاژ شین متصل شده را تنظیم نمایند [۴،۵].

مسئله یافتن مکان و ظرفیت مناسب منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک توزیع از اهمیت بسیاری در عملکرد آنها و بهبود بهره‌وری شبکه برق دارد. از این رو در سال‌های اخیر مطالعاتی در این حوزه انجام شده است. به عنوان مثال، پژوهشگران در مرجع [۶] برای مشخص کردن مکان و ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده در سیستم توزیع، از یک روش بهینه‌سازی ترتیبی استفاده کرده‌اند. اهداف اصلی این مطالعه به حداقل رساندن تلفات و حداکثر رساندن ظرفیت منابع تولید پراکنده است. نویسندگان در مرجع [۷]، تکنیک جدیدی را بر اساس الگوریتم رقابتی امپریالیستی اصلاح شده برای یافتن مکان و اندازه مناسب واحدهای تولید پراکنده پیشنهاد داده‌اند. روشی مبتنی بر الگوریتم ازدحام ذرات در مرجع [۸] برای تخصیص بهینه انواع منابع تولید پراکنده جهت به حداقل رساندن تلفات انرژی پیشنهاد شده است. در مطالعه‌ای دیگر، روشی برای قرار دادن چندین واحد تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع با توجه به نوع مصرف‌کنندگان ارائه شده است [۹]. در مرجع [۱۰]، یک روش جدید برای بهینه‌سازی مکان و اندازه جبران‌ساز استاتیک توزیع ارائه شده است. احتمال افت ولتاژ، از بین رفتن شبکه و هزینه سرمایه‌گذاری جبران‌ساز به عنوان توابع هدف مسئله جایابی هستند. نویسندگان در مرجع [۱۱]، روش جدیدی را بر اساس الگوریتم خفاش برای تخصیص بهینه واحدهای DSTATCOM در شبکه‌های توزیع شعاعی پیشنهاد داده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، پژوهشگران با توجه به کاهش تلفات انرژی و بهبود مشخصات ولتاژ و جریان سیستم توزیع، مکان و اندازه بهینه واحدهای جبران‌ساز استاتیک توزیع را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۲]. در مرجع [۱۳]، رویکرد جدیدی برای یافتن مکان و ظرفیت بهینه واحدهای DSTATCOM جهت حداقل کردن تلفات کل شبکه پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۴]، پژوهشگران از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات جهت بهینه‌سازی مکان و اندازه منابع تولید پراکنده و واحدهای جبران‌ساز توان راکتیو به‌منظور کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ سیستم توزیع استفاده کرده‌اند. در مطالعه‌ای مشابه، مکان و اندازه منابع تولید پراکنده و واحدهای DSTATCOM با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی وال بهینه‌سازی شده‌اند [۱۵]. در این مطالعه، هدف از بهره‌برداری از ادوات، کاهش تلفات و هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم توزیع است. در مطالعه‌ای دیگر، واحدهای تولید پراکنده و DSTATCOM با رویکرد ارزیابی‌های حساسیت در سیستم توزیع قرار گرفته‌اند. نویسندگان در مرجع [۱۶]، با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلونی مورچگان و روش فازی به تخصیص همزمان پنل فتوولتائیک و جبران‌ساز استاتیک توزیع پرداخته‌اند.

بنابراین، مطالعات متعددی در حوزه منابع تولید پراکنده و جبران‌سازهای مدرن انجام شده است. در این مقاله، به جهت تکمیل‌تر کردن مطالعات پیشین، تغییرات ساعتی بارهای مختلف سیستم توزیع و همچنین انواع تکنولوژی‌های تجدیدپذیر و

تجدیدناپذیر تولید پراکنده در طول بهینه‌سازی همزمان مکان و اندازه واحدهای تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک توزیع در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان دهنده کارایی مناسب روش پیشنهادی در مدل بارهای مختلف است. در نتیجه در این مقاله، روشی جدید مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه وال و روش تحلیل سلسله‌مراتبی به‌منظور بهینه‌سازی همزمان مکان و اندازه واحدهای انرژی در سیستم توزیع با مدل بار متغیر پیشنهاد شده و با روش‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفته شده است. ادامه این مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲، مدل‌سازی ادوات سیستم توزیع شامل منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک توزیع بیان شده است. در بخش ۳ نیز مدل بار غیرخطی سیستم شرح داده شده است. توابع هدف فنی و زیست‌محیطی مسئله در بخش ۴ مدل‌سازی شده‌اند. در بخش ۴ نیز الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه که ترکیبی از الگوریتم‌های وال و روش تحلیل سلسله‌مراتبی بوده، شرح داده شده است. نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی در سیستم‌های توزیع ۶۹ شینه استاندارد و ۱۰۱ شینه واقعی در بخش ۵ آورده شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شده است. در بخش ۶ نیز نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- ادوات سیستم توزیع

در این بخش به معرفی و مدل‌سازی انواع منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک توزیع پرداخته شده است.

۲-۱- منابع تولید پراکنده

شرح مختصری از فن‌آوری‌های تولید پراکنده و مدل‌سازی آنها در معادلات پخش بار به شرح زیر است [۱،۲]:
الف- توربین بادی: توان خروجی توربین بادی ارتباط مستقیمی با سرعت باد (V_w) و مساحت منطقه جاروب شده توسط پره‌های توربین (A_{wt}) دارد. اگرچه پارامترهای دیگر مانند چگالی هوا (ρ) و ضریب توان توربین (C_p) نیز بر توان توربین بادی تاثیر می‌گذارند، بنابراین، توان اکتیو تولید شده توسط توربین بادی توسط رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho A_{wt} V_w^3 C_p \quad (1)$$

در معادلات پخش بار، یک توربین بادی به عنوان یک باس مدل PQ با توان راکتیو متغیر شبیه‌سازی می‌شود. توان راکتیو توربین بادی در رابطه (۲) بیان شده است [۸].

$$Q_{WT} = -(0.5 + 0.04 P_{WT}^2) \quad (2)$$

ب- پنل فتوولتائیک: توان خروجی هر پنل فتوولتائیک با میزان تابش نور خورشید (μ)، مساحت (A_{pv}) و کارایی (β) پنل خورشیدی ارتباط مستقیم دارد. از نظر ریاضی، توان اکتیو پنل فتوولتائیک با رابطه (۳) قابل محاسبه است.

$$P_{PV} = A_{pv} \beta \mu \quad (3)$$

این نوع منبع تولید پراکنده فقط توانایی تزریق توان اکتیو به شبکه را دارا است. بنابراین در معادلات پخش بار، پنل فتوولتائیک به عنوان یک مدل باس P شبیه‌سازی می‌شود [۸].

ج- میکروتوربین: واحدهای میکروتوربین توانایی بی‌نظیری در تولید همزمان برق و گرما برخوردار هستند. همچنین، آنها توانایی تزریق همزمان توان اکتیو و راکتیو به شبکه را دارا هستند. در معادلات پخش بار، این نوع منبع تولید پراکنده به‌عنوان یک مدل باس ولتاژ ثابت شبیه‌سازی می‌شود.

د- پیل سوختی: پیل سوختی و سیله‌ای الکتروشیمیایی برای تولید انرژی الکتریکی است. این نوع واحد تجدیدناپذیر همانند پنل فتوولتائیک فقط توانایی تزریق توان اکتیو را دارد. بنابراین در معادلات پخش بار به‌صورت یک باس مدل P مدل‌سازی می‌شود.

۲-۲- جبران‌ساز استاتیک توزیع

در این مطالعه، یکی از کارآمدترین مدل‌های جبران‌ساز استاتیک توزیع در حالت پایدار در نظر گرفته شده است. در این مدل، واحد DSTATCOM به صورت یک باس مدل PV مدل‌سازی می‌شود. به بیان ریاضی، توان راکتیو تزریق شده توسط واحد جبران‌ساز استاتیک توزیع برای بهبود ولتاژ شین متصل شده با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۱۲].

$$jQ_{DSTATCOM} = V_{jnew}(I_{DSTATCOM})^* \quad (4)$$

$$V_{jnew} = |V_{jnew}| < \alpha_{new} \quad (5)$$

$$I_{DSTATCOM} = |I_{DSTATCOM}| < ((\pi/2) + \alpha_{new}) \quad (6)$$

در این روابط، $Q_{DSTATCOM}$ و $I_{DSTATCOM}$ به ترتیب جریان و توان راکتیو تزریق شده توسط واحد $DSTATCOM$ به شین متصل شده هستند تا بتوانند ولتاژ شین (V_{jnew}) را در محدوده مشخص تنظیم کنند.

۳- مدل بار سیستم توزیع

در این مطالعه، از یک مدل بار غیرخطی برای آزمایش روش پیشنهادی در شرایط واقعی تر بهره‌برداری استفاده شده است. مدل بار سیستم به صورت ترکیبی از الگوی بار روزانه و بار حساس به فرکانس - ولتاژ در نظر گرفته شده است [۱۷، ۱۸]. مدل ریاضی وابستگی توان‌های اکتیو و راکتیو باس‌ها به ولتاژ و فرکانس به صورت روابط (۷) و (۸) بیان می‌شود [۱۷].

$$P_i = P_{0i} \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^{k_{pv}} [1 + k_{pf}(f - f_0)] \quad (7)$$

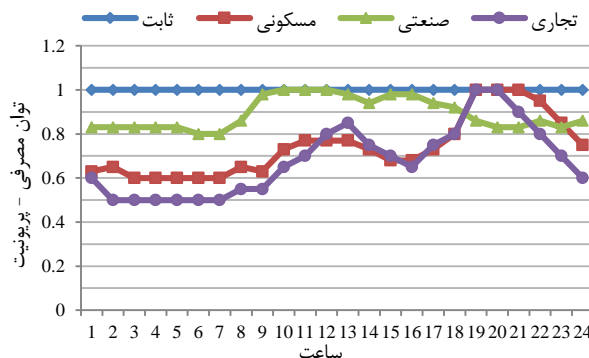
$$Q_i = Q_{0i} \left(\frac{V_i}{V_{0i}} \right)^{k_{qv}} [1 + k_{qf}(f - f_0)] \quad (8)$$

در روابط فوق، P_i و Q_i به ترتیب توان اکتیو و توان راکتیو باس i هستند. P_{0i} و Q_{0i} نیز توان‌های اکتیو و راکتیو باس i قبل از اعمال ضرایب وابستگی هستند. V_i و V_{0i} به ترتیب ولتاژ واقعی و نامی باس i بوده و فرکانس واقعی و نامی سیستم نیز به ترتیب با f و f_0 نشان داده شده‌اند. پارامترهای K_{pv} ، K_{qv} ، K_{pf} و K_{qf} ضرایب وابستگی توان‌های اکتیو و راکتیو به ولتاژ و فرکانس در مدل بارهای مختلف هستند. مقادیر ضرایب وابستگی در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. همچنین فرکانس‌های اسمی و واقعی شبکه به ترتیب ۱ و ۰/۹۸ پریونیت در نظر گرفته شده است.

Table (1): Load types and values of dependence coefficients [17]

جدول (۱): نوع و مقادیر ضرایب وابستگی مدل بار سیستم [۱۷]

ضرایب وابستگی				مدل بار
K_{qf}	K_{pf}	K_{qv}	K_{pv}	
۰	۰	۰	۰	ثابت
-۱/۷	۱/۰	۲/۶	۱/۷	مسکونی
۱/۶	۲/۶	۰/۶	۰/۱	صنعتی
-۱/۱	۱/۵	۲/۵	۰/۶	تجاری



شکل (۱): تقاضای بار روزانه برای هر نوع مدل بار

Figure (1): Daily load demand of different load models

در این مقاله، مدل بار شبکه همچنین بر اساس الگوهای بار مشتری تغییر یافته است. شکل (۱) تقاضای ساعتی مدل بارهای

مختلف در طول شبانه‌روز را نشان می‌دهد [۱۸].

۴- توابع هدف

در این مطالعه، جابجایی و ظرفیت‌یابی انواع منابع تولیدی پراکنده و جبران سازه‌ستاتیک توزیع به صورت بهینه‌سازی چندهدفه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شاخص‌های تلفات (I_L)، ولتاژ (I_V) و محیط زیست (I_B) به عنوان اهداف مسئله مدنظر قرار گرفته شده‌اند که در رابطه (۹) بیان شده است.

$$\text{objective function : } \min \{ I_L, I_V, I_E \} \quad (9)$$

۴-۱- شاخص تلفات

تلفات را می‌توان به عنوان یکی از معضلات مهم و بزرگ شبکه‌های توزیع نام برد. از این‌رو کارشناسان همواره به دنبال راهکارهایی برای کاهش تلفات جهت افزایش بهره‌وری سیستم هستند. به همین دلیل است که در اکثر مطالعات انجام گرفته در حوزه توزیع، تلفات به عنوان یکی از مهم‌ترین اهداف پژوهش مطرح بوده است. در این پژوهش، شاخص تلفات به صورت ترکیبی از تلفات توان اکتیو (L_A) و تلفات توان راکتیو (L_R) با استفاده از رابطه (۱۰) تعریف شده است.

$$I_L = C_p L_A + C_q L_R \quad (10)$$

$$L_A = P_i / P_{i0} \quad (11)$$

$$L_R = Q_i / Q_{i0} \quad (12)$$

در روابط فوق، C_p و C_q ضرایب ترکیب تلفات هستند. پارامترهای P_i و Q_i به ترتیب مقدار تلفات اکتیو و راکتیو شبکه بعد از اتصال ادوات بوده و P_{i0} و Q_{i0} نیز به ترتیب مقدار تلفات توان اکتیو و راکتیو اولیه سیستم توزیع هستند. جهت محاسبه تلفات توان اکتیو ($Active_L$) و راکتیو ($Reactive_L$) در هر مرحله (قبل و بعد از اتصال ادوات) از روابط (۱۳) و (۱۴) استفاده شده است. در این روابط، R_i و X_i به ترتیب مقدار مقاومت و راکتانس شاخه i ام هستند. I_{hi} جریان شاخه i ام در ساعت h ام بوده و N_{br} هم تعداد شاخه‌های شبکه توزیع است.

$$Active_L = \max_{h=1}^{24} \{ \sum_{i=1}^{N_{br}} R_i |I_{hi}|^2 \} \quad (13)$$

$$Reactive_L = \max_{h=1}^{24} \{ \sum_{i=1}^{N_{br}} X_i |I_{hi}|^2 \} \quad (14)$$

۴-۲- شاخص ولتاژ

پایداری ولتاژ هرچقدر بیشتر باشد، شبکه نیز از پایداری مناسبی برخوردار است. از این رو، شاخص پایداری ولتاژ به عنوان شاخص ولتاژی جابجایی ادوات در نظر گرفته شده است. شاخص پایداری ولتاژ، توانایی سیستم در نگهداری ولتاژ باس‌ها در سطح قابل قبول است. این قابلیت در زمانی که بار نرمال سیستم افزایش یافته و در اثر آن توان اکتیو تزریق شده به شبکه نیز افزایش می‌یابد، ولتاژ و توان را کنترل می‌کند. شاخص ولتاژ با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$I_V = V_s / V_{s0} \quad (15)$$

$$V_s = \max_{h=1}^{24} \{ 1 - \text{Voltage_Stability}_h \} \quad (16)$$

$$V_{s0} = \max_{h=1}^{24} \{ 1 - \text{Initial_Voltage_Stability}_h \} \quad (17)$$

در روابط فوق، V_{s0} و V_s به ترتیب شاخص ولتاژ قبل و بعد از اتصال ادوات هستند. جهت محاسبه پایداری ولتاژ در هر مرحله (قبل و بعد از اتصال ادوات) از رابطه (۱۸) استفاده می‌شود [۱۹].

$$VS_{m_2} = |V_{m_1}|^4 - \{ 4[P_{m_2} X_i - Q_{m_2} R_i]^2 \} - \{ 4|V_{m_1}|^2 [P_{m_2} R_i + Q_{m_2} X_i] \} \quad (18)$$

در این رابطه، VS_{m_2} شاخص پایداری ولتاژ برای باس m_2 است ($m_2=2,3,\dots,N$) تعداد باس‌های سیستم). i شماره شاخه‌ی شبکه، R_i و X_i به ترتیب مقاومت و راکتانس خط i هستند. V_{m_1} ولتاژ باس m_1 است. P_{m_2} مجموع کل بار اکتیو گذرنده از باس m_2 و بار اکتیو مصرف شده در همان باس بوده و Q_{m_2} مجموع کل بار راکتیو گذرنده از باس m_2 و بار راکتیو مصرف شده در

همان باس است.

۴-۳- شاخص زیست‌محیطی

شاخص زیست‌محیطی در نظر گرفته شده معادل میزان گازهای آلاینده تولید شده توسط واحدهای تولید پراکنده در طول شبانه‌روز است. گازهای آلاینده اصلی عبارتند از: مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید کربن (CO₂)، دی‌اکسید گوگرد (SO₂)، اکسیدهای ازت (NO_x) و ذرات پراکنده (PM₁₀) [۲۰]. در نتیجه، شاخص زیست‌محیطی به صورت رابطه (۱۹) بیان می‌شود. برای محاسب میزان آلاینده‌گی منابع در مراحل مختلف از رابطه (۲۰) استفاده می‌شود.

$$I_E = TPG_i / TPG_{Max} \quad (19)$$

$$TPG = \sum_{i=tech} \sum_{j=1}^{NDG_{tech}} \sum_{h=1}^{24} \sum_{g=1}^{ng} P_{DG_{ijh}} \times WE_g \times EDG_{ig} \quad (20)$$

در معادلات فوق، TPG_i مقدار کل گازهای آلاینده تولید شده توسط واحدهای تولید پراکنده بوده و TPG_{Max} حداکثر میزان آلودگی است. پارامتر P_{DG-ijh} میزان توان تولید شده واحد تولید پراکنده در ساعت h ام بوده و EDG_{ig} نرخ آلاینده‌گی واحد تولید پراکنده براساس گازهای مختلف است. پارامتر WE_g نیز نشان‌دهنده ضرایب وابستگی گازهای آلاینده مختلف است.

۵- الگوریتم بهینه‌سازی

برای دستیابی به بهترین نتیجه، در مرحله اول، توابع هدف با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه وال^۴ (MOWOA) بهینه‌سازی می‌شوند. پس از اعمال الگوریتم هوشمند، از روش تحلیل سلسله مراتبی^۵ (AHP) برای انتخاب مکان و اندازه بهینه ادوات از صفحه بهینه پارتو استفاده می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی وال از رفتار شکار وال‌ها در طبیعت الهام گرفته شده است. در این الگوریتم، ذرات بر اساس دو مکانیزم کاهش محدوده محاصره و بروزرسانی مارپیچی موقعیت، بهینه‌سازی می‌شوند [۲۱]. جهت استفاده از مکانیزم کاهش محدوده محاصره از روابط (۲۱) الی (۲۳) استفاده می‌شود در حالی که روابط (۲۴) و (۲۵) در مکانیزم بروزرسانی مارپیچی موقعیت برقرار هستند [۲۱].

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (21)$$

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (22)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (23)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (24)$$

$$\vec{D} = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (25)$$

در این روابط، t نشان‌دهنده شماره تکرار الگوریتم بهینه‌سازی است و بردارهای A، C و D نیز ضرایب برداری هستند که با توجه به مکان ذرات (وال‌های مصنوعی) و سایر پارامترها محاسبه می‌شوند. بردار X نشان‌دهنده مکان ذرات بوده در حالی که بردار X* نشان‌دهنده بهترین مکان به دست آورده شده توسط ذرات تا بدین مرحله است. بردار a ضریبی است که به صورت خطی از ۲ تا ۰ در طی تکرارهای مختلف کاهش می‌یابد. بردار r نیز مقداری تصادفی بین ۰ و ۱ است [۲۱]. در الگوریتم بهینه‌سازی وال فرض بر این است که ذرات با احتمال ۵۰ درصد یکی از مکانیزم‌های بروزرسانی بیان شده را انتخاب می‌کنند [۲۱]. لازم به ذکر است که در این مطالعه، از روش بیان شده در مرجع [۲۲] برای چندهدفه کردن الگوریتم بهینه‌سازی وال استفاده شده است.

پس از بهینه‌سازی چندهدفه و تشکیل صفحه بهینه پارتو، از روش تحلیل سلسله مراتبی برای یافتن بهترین نتیجه بهینه‌سازی براساس اهمیت شاخص‌های سیستم توزیع استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت پایداری سیستم توزیع، شاخص ولتاژ بیشترین وزن را دارد. همچنین شاخص زیست‌محیطی نسبت به شاخص تلفات وزن کمتری دارد. از روش میانگین حسابی برای به دست آوردن وزن نهایی معیارها استفاده می‌شود [۲۳]. بنابراین، ماتریس ضرایب روش تحلیل سلسله مراتبی به صورت مقادیر داده شده در جدول (۲) است. در نهایت، برای انتخاب بهینه‌ترین جواب از رابطه (۲۶) استفاده می‌شود. در این معادله، W_i ها ضرایب حاصل از روش تحلیل سلسله مراتبی هستند.

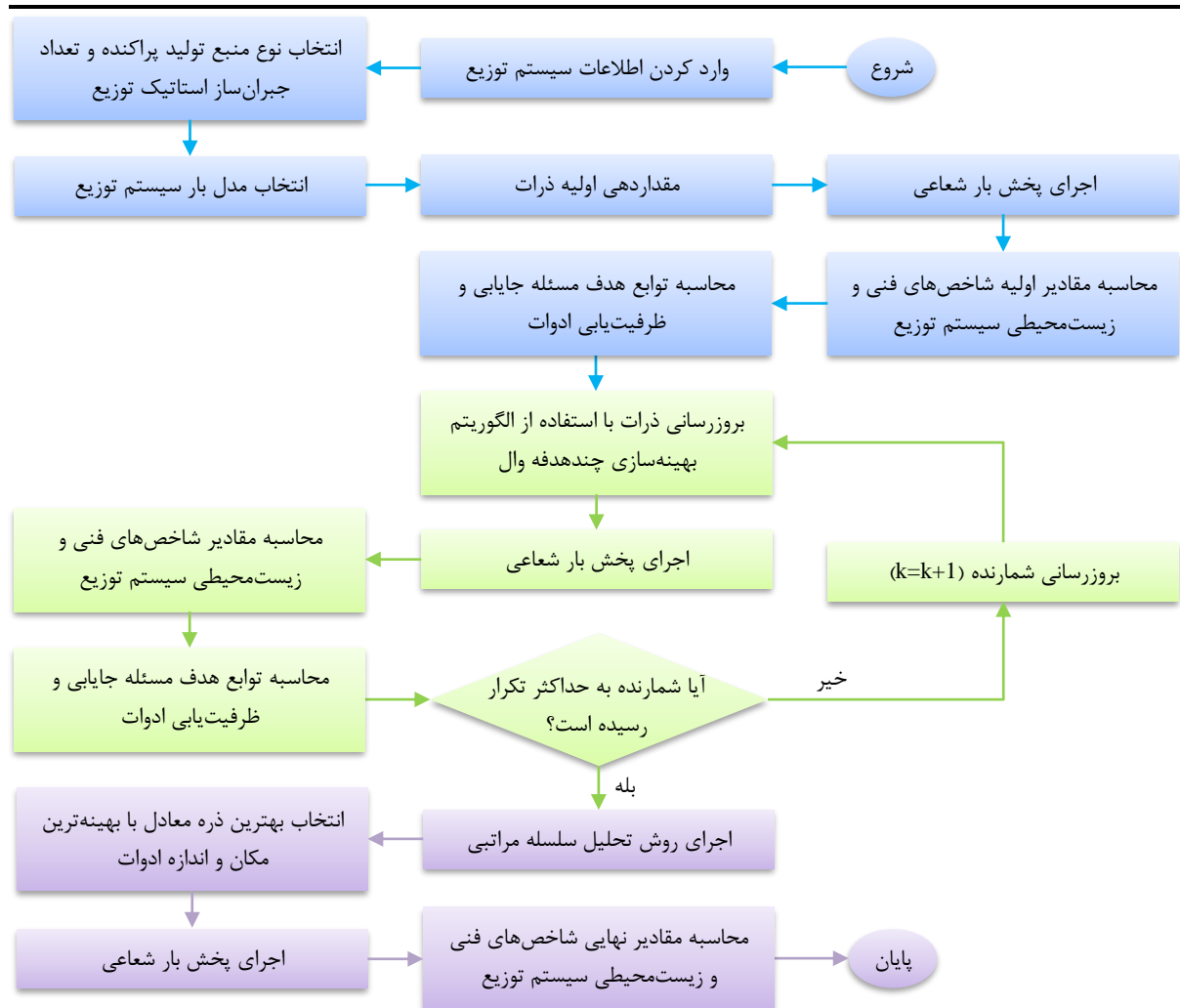
$$\text{final}_{\text{function}} = W_L \times \text{loss} + W_V \times \text{Voltage}_{\text{stability}} + W_E \times \text{environmental}_{\text{index}} \quad (26)$$

فلوچارت کلی برای جایابی و ظرفیت‌یابی همزمان انواع منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک توزیع در سیستم توزیع با مدل بار متغیر در شکل (۲) نشان داده شده است.

Table (2): Judgment matrix of analytical hierarchy process method

جدول (۲): ماتریس ضرایب روش تحلیل سلسله مراتبی

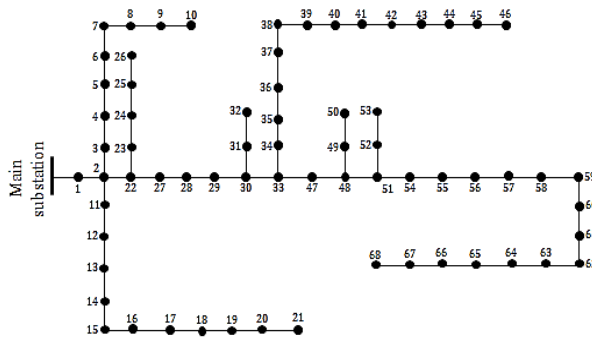
وزن نهایی شاخص‌ها	ماتریس قضاوت معیار			شاخص
	زیست‌محیطی	تلفات	ولتاژ	
۰/۵۴۶۱	۳	۲	۱	ولتاژ
۰/۲۷۳۱	۱/۵	۱	۰/۵	تلفات
۰/۱۸۰۸	۱	۰/۶۶	۰/۳۳	زیست‌محیطی



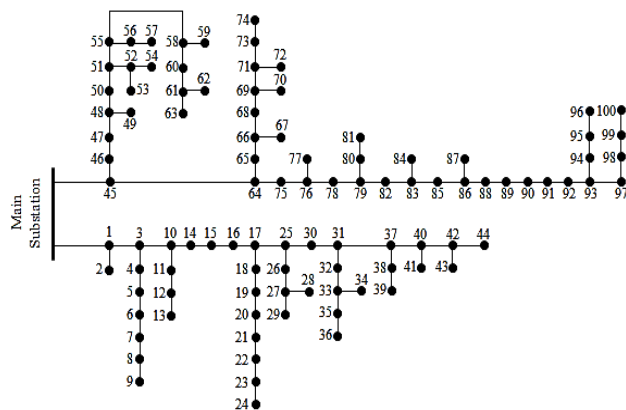
شکل (۲): فلوچارت روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی چندهدفه مکان و اندازه انواع منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک توزیع
Figure (2): Flowchart of the proposed method for multi-objective optimizing the location and size of DGs and DSTATCOM

۶- نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش، روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی همزمان مکان و اندازه انواع منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک توزیع با استفاده از سیستم‌های توزیع استاندارد ۶۹ شینه IEEE [شکل (۳)] و واقعی ۱۰۱ شینه خوی-ایران [شکل (۴)] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۲۴، ۱۷].



شکل (۳): دیاگرام تک خطی سیستم توزیع ۶۹ شینه استاندارد [۱۷]
Figure (3): The single line diagram of IEEE 69 bus distribution system [17]



شکل (۴): دیاگرام تک خطی سیستم توزیع ۱۰۱ شینه شهرک صنعتی خوی، ایران [۲۴]
Figure (4): The single line diagram of actual 101 bus distribution system in Khoys, Iran [24]

جهت ارزیابی بهتر نتایج، حداکثر توان قابل بهره‌برداری از همه تکنولوژی‌های تولید پراکنده برابر با $2/5$ مگاوات در نظر گرفته شده است. حداکثر ظرفیت قابل تزریق واحد جبران‌ساز استاتیک توزیع نیز برابر با $2/5$ مگاوار است. اطلاعات زیست‌محیطی انواع منابع تولید پراکنده در جدول (۳) بیان شده است [۲۰]. واحدهای تجدیدپذیر به صورت ترکیبی از منابع تولید پراکنده و باتری در نظر گرفته شده‌اند به نحوی که آنها می‌توانند به درستی انرژی مورد نیاز را در طول شبانه‌روز تامین نمایند.

Table (3): Environmental details of various distributed generation units
جدول (۳): اطلاعات زیست‌محیطی انواع منابع تولید پراکنده

نرخ آلاینده‌گی (کیلوگرم بر کیلووات ساعت)					تکنولوژی
PM ₁₀	CO	SO ₂	NO _x	CO ₂	تولید پراکنده
.	۰/۰۰۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۰/۴۶	پیل سوختی
۰/۰۱۸	۰/۲۴۷	۰/۰۰۲	۰/۰۹۱	۰/۷۲	میکروتوربین
.	.	.	.	.	فتوولتائیک
.	.	.	.	.	توربین بادی

۶-۱- سیستم توزیع ۶۹ شینه

در این شبکه، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی با نتایج اعمال روش‌های بهینه‌سازی دیگر شامل الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات^۶ (MOPSO)، الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک نامغلوب^۷ (NSGA) و الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب نامغلوب^۸ (NSFA) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. بهینه‌ترین مکان و اندازه حاصل شده برای انواع منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز

استاتیک توزیع پس از اجرای روش‌های بهینه‌سازی مختلف در جدول (۴) آورده شده است.

Table (4): Optimal location and size of devices in the 69 bus distribution system

جدول (۴): مکان و اندازه بهینه ادوات در سیستم توزیع ۶۹ شینه

شماره آزمایش	تکنولوژی تولید پراکنده	منابع تولید پراکنده			مکان (شماره شین، ظرفیت (مگاوات))			جبران‌ساز استاتیک توزیع									
		MOPSO	NSGA	NSFA	روش پیشنهادی	MOPSO	NSGA	NSFA	روش پیشنهادی	مکان (شماره شین، ظرفیت (مگاوار))							
۱	پیل سوختی	۴۳	۴۲	۴۲	۴۲	۴۳	۴۴	۴۶	۴۵	۲/۰۱۰۰	۱/۷۸۰۰	۱/۹۷۶۰	۱/۹۰۲۳	۱/۵۴۰۰	۱/۷۱۵۰	۰/۹۵۰۰	۰/۹۸۴۷
		مکان ظرفیت	۱/۸۸۲۰	۱/۸۹۰۰	۲/۱۵۰۰	۱/۹۶۰۰	۱/۴۰۸۰	۱/۱۹۴۰	۰/۶۵۰۰	۱/۲۴۴۷	۲۶	۵۵	۵۴	۴۳	۴۹	۴۴	۴۶	۴۵
۲	میکروتوربین	۴۲	۴۲	۴۱	۴۳	۴۶	۴۴	۴۶	۴۵	۱/۸۸۲۰	۱/۸۹۰۰	۲/۱۵۰۰	۱/۹۶۰۰	۱/۴۰۸۰	۱/۱۹۴۰	۰/۶۵۰۰	۱/۲۴۴۷
		مکان ظرفیت	۱/۵۷۹۷	۱/۹۸۰۶	۱/۸۲۰۴	۲/۲۵۲۴	۱/۳۸۷۰	۱/۶۸۹۰	۱/۳۵۷۵	۱/۲۵۷۹	۳	۴۲	۴۲	۴۳	۴۶	۳۶	۴۶	۴۵
۳	پنل فتوولتائیک	۴۲	۴۲	۴۲	۴۲	۴۲	۴۲	۴۲	۴۳	۱/۸۸۲۰	۱/۸۹۰۰	۲/۱۵۰۰	۱/۹۶۰۰	۱/۴۰۸۰	۱/۱۹۴۰	۰/۶۵۰۰	۱/۲۴۴۷
		مکان ظرفیت	۰/۹۲۹۵	۰/۹۸۰۶	۱/۸۲۰۴	۲/۲۵۲۴	۱/۳۸۷۰	۱/۶۸۹۰	۱/۳۵۷۵	۱/۲۵۷۹	۴	۴۲	۴۲	۴۳	۴۶	۴۳	۴۶	۴۵
۴	توربین بادی	۴۲	۴۲	۴۲	۴۲	۴۲	۴۲	۴۲	۴۳	۱/۸۸۲۰	۱/۸۹۰۰	۲/۱۵۰۰	۱/۹۶۰۰	۱/۴۰۸۰	۱/۱۹۴۰	۰/۶۵۰۰	۱/۲۴۴۷
		مکان ظرفیت	۲/۰۰۰۰	۰/۹۲۹۵	۲/۱۴۰۰	۲/۲۰۶۹	۱/۴۸۰۰	۱/۹۰۴۰	۱/۵۸۰۰	۲/۱۹۷۵							

Table (5): The value of technical indices of 69 bus distribution system (Per-unit)

جدول (۵): مقادیر شاخص‌های فنی سیستم توزیع ۶۹ شینه (پریونیت)

شماره آزمایش	الگوریتم مدنظر	مدل بار ثابت		مدل بار صنعتی		مدل بار تجاری		مدل بار مسکونی	
		شاخص تلفات	شاخص ولتاژ	شاخص تلفات	شاخص ولتاژ	شاخص تلفات	شاخص ولتاژ	شاخص تلفات	شاخص ولتاژ
۱	MOPSO	۱/۰۰۰۰	۰/۶۸۳۳	۱/۰۰۰۰	۰/۷۰۲۴	۱/۰۰۰۰	۰/۷۱۱۴	۱/۰۰۰۰	۰/۷۲۴۴
		۰/۱۶۱۰	۰/۸۶۱۰	۰/۱۹۰۴	۰/۸۶۸۷	۰/۳۵۵۴	۰/۸۶۵۴	۰/۲۷۸۱	۰/۸۶۵۳
		۰/۱۶۸۴	۰/۸۶۲۲	۰/۲۲۰۰	۰/۸۶۹۹	۰/۳۹۶۳	۰/۸۶۶۵	۰/۳۲۵۴	۰/۸۶۶۳
		۰/۱۵۳۶	۰/۸۴۵۹	۰/۱۷۸۶	۰/۸۵۲۲	۰/۲۴۸۹	۰/۸۴۹۱	۰/۲۲۰۵	۰/۸۴۸۷
۲	MOPSO	۰/۱۴۳۳	۰/۸۹۲۴	۰/۱۵۲۳	۰/۸۹۸۵	۰/۲۳۳۴	۰/۸۹۵۱	۰/۱۹۹۸	۰/۸۹۴۳
		۰/۱۶۱۰	۰/۸۷۲۰	۰/۱۹۱۷	۰/۸۷۸۱	۰/۳۴۸۴	۰/۸۷۳۹	۰/۲۸۴۱	۰/۸۷۲۶
		۰/۱۴۳۹	۰/۸۶۹۹	۰/۱۹۷۶	۰/۸۷۶۰	۰/۳۶۴۶	۰/۸۷۱۸	۰/۳۰۰۹	۰/۸۷۰۵
		۰/۱۶۱۵	۰/۸۷۸۳	۰/۲۱۱۴	۰/۸۸۴۳	۰/۳۷۴۵	۰/۸۸۰۲	۰/۳۱۳۲	۰/۸۷۸۸
۳	MOPSO	۰/۱۳۰۸	۰/۸۹۶۷	۰/۱۶۰۲	۰/۹۰۴۵	۰/۳۰۱۱	۰/۹۰۱۴	۰/۲۴۲۷	۰/۹۰۱۶
		۰/۲۲۰۱	۰/۸۸۶۵	۰/۲۵۸۷	۰/۸۹۲۸	۰/۴۳۷۲	۰/۸۸۹۹	۰/۴۰۸۹	۰/۸۸۹۵
		۰/۲۵۱۴	۰/۸۹۱۴	۰/۲۷۲۵	۰/۸۹۹۳	۰/۴۵۲۸	۰/۸۹۶۴	۰/۴۱۶۵	۰/۸۶۳۸
		۰/۲۳۴۴	۰/۸۹۴۲	۰/۲۵۳۴	۰/۸۹۲۲	۰/۴۵۷۰	۰/۸۹۹۲	۰/۴۵۸۷	۰/۸۹۸۶
۴	MOPSO	۰/۱۷۲۹	۰/۹۰۲۸	۰/۲۴۱۶	۰/۹۱۰۵	۰/۴۱۸۹	۰/۹۰۶۹	۰/۳۴۹۹	۰/۹۰۶۷
		۰/۲۰۸۲	۰/۸۹۲۵	۰/۳۲۵۷	۰/۸۹۹۰	۰/۵۸۹۶	۰/۸۹۵۴	۰/۵۸۶۵	۰/۸۹۴۶
		۰/۲۴۹۷	۰/۸۵۸۰	۰/۳۷۶۹	۰/۸۶۴۹	۰/۶۲۵۵	۰/۸۶۳۸	۰/۴۸۷۷	۰/۸۶۵۰
		۰/۲۲۰۱	۰/۸۹۶۴	۰/۳۲۵۰	۰/۹۰۴۲	۰/۵۶۷۷	۰/۹۰۱۰	۰/۴۶۹۴	۰/۹۰۱۲
روش پیشنهادی	۰/۱۹۸۵	۰/۹۰۹۷	۰/۳۲۰۴	۰/۹۱۷۳	۰/۵۴۸۷	۰/۹۱۳۳	۰/۴۶۰۹	۰/۹۱۲۷	

در جدول (۵)، مقادیر شاخص‌های فنی سیستم توزیع ۶۹ شینه پس از بهره‌برداری از ادوات در سیستم توزیع با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مختلف ارائه شده است. اگرچه همه روش‌های بهینه‌سازی باعث کاهش تلفات و بهبود ولتاژ شبکه می‌شوند، میزان بهبود شاخص‌ها با استفاده از روش پیشنهادی به مراتب در همه سناریوها و مدل بارها بیشتر است. برای ارزیابی سرعت الگوریتم‌های مختلف نیز از دستور "tic - toc" در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. سرعت بهینه‌سازی مکان و اندازه ادوات در سیستم توزیع ۶۹ شینه با استفاده از الگوریتم‌های MOPSO، NSGA، NSFA و روش پیشنهادی (الگوریتم چندهدفه وال) به ترتیب برای ۵۰ تکرار با در نظر گرفتن ۵۰ ذره برابر با ۷۲۹/۷۱، ۷۶۵/۶۳، ۷۲۲/۶۱ و ۷۰۱/۹۹ ثانیه است. در حالت کلی می‌توان بیان کرد که روش بهینه‌سازی چندهدفه وال از دقت و سرعت بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی برخوردار است.

روش پیشنهادی مقدار شاخص تلفات را در حدود ۵ الی ۲۴ درصد بیشتر از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی کاهش می‌دهد. همچنین، هنگامی که از روش پیشنهادی برای یافتن بهترین مکان و اندازه دستگاه‌ها استفاده می‌شود، پایداری ولتاژ نیز در حدود ۱۰ الی ۳۰ درصد بیشتر از سایر روش‌ها افزایش می‌یابد. روش پیشنهادی همچنین باعث می‌شود که وقتی مدل بار سیستم از یک مدل به مدل دیگر تغییر می‌کند، تغییرات شاخص‌های فنی از حالت اولیه و روش‌های دیگر خطی‌تر بشود. در حالت کلی می‌توان گفت که روش بهینه‌سازی در نظر گرفته شده عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها در بهینه‌سازی مکان و اندازه انواع منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک دارد. در مجموع، میکروتوربین و توربین بادی به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را در بهبود شاخص‌های فنی را دارند. تفاوت عملکردها بستگی به نوع خروجی واحدهای تولید پراکنده دارد. به عبارت دیگر می‌توان بیان کرد، منبعی که توانایی تزریق همزمان توان اکتیو و راکتیو (میکروتوربین) را دارد، بهینه‌ترین نوع منبع تولید پراکنده است. البته این نتیجه‌گیری بدون در نظر گرفتن جنبه‌های زیست‌محیطی است. با در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی، در آزمایش‌هایی که از منابع تولید پراکنده استفاده می‌شود (آزمایش‌های ۳ و ۴)، میزان آلاینده‌گی واحدها برابر صفر است در حالیکه در آزمایش‌هایی که از پیل سوختی یا میکروتوربین استفاده شده است (آزمایش‌های ۱ و ۲) به ترتیب در حدود ۲۱۹۱۵ و ۵۰۸۶۴ کیلوگرم مواد آلاینده به صورت روزانه وارد محیط زیست می‌شود.

۶-۱-۱- ارزیابی اقتصادی روش پیشنهادی

مسائل اقتصادی یکی از مباحث جدانشدنی در تصمیم‌گیری‌های شبکه برق هستند. از این رو، نتایج روش پیشنهادی در سیستم توزیع ۶۹ شینه از دید مباحث اقتصادی نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سود روزانه شرکت توزیع از فروش الکتریسیته به مشترکین به عنوان شاخص اقتصادی مدنظر قرار گرفته شده است. جهت محاسبه این شاخص از رابطه (۲۷) استفاده می‌شود. در این رابطه، Profit_{DC} نشان‌دهنده سود روزانه شرکت توزیع بوده و پارامترهای Re و Co نیز به ترتیب درآمد و هزینه‌های روزانه شرکت توزیع را نشان می‌دهند [۲۵].

$$\text{Profit}_{DC} = \text{Re} - \text{Co} \quad (27)$$

از رابطه (۲۸) برای محاسبه درآمد روزانه شرکت توزیع استفاده می‌شود. در این رابطه، n_b و P_{l-i} به ترتیب تعداد شین‌ها و میزان توان اکتیو مصرفی در آن شین را نشان می‌دهند. پارامتر C_{MP} نیز قیمت بازار برق می‌باشد.

$$\text{Re} = \sum_{i=1}^{n_b} P_{l-i} \times C_{MP} \times 24 \quad (28)$$

برای محاسبه هزینه‌های روزانه شرکت توزیع نیز از رابطه (۲۹) استفاده می‌شود. در این رابطه، n_{DG} و P_{DG-ij} به ترتیب تعداد منابع تولید پراکنده و میزان توان اکتیو تولید شده آن هستند. پارامترهای C_A و C_R به ترتیب هزینه توان اکتیو و راکتیو خریداری شده از شبکه بالادست هستند. پارامترهای C_{DS} و C_{DG-i} نیز به ترتیب هزینه توان تولید شده توسط منابع تولید پراکنده و واحد DSTATCOM را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که در شرایط اولیه بهره‌برداری، پارامترهای مربوط به منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک از این رابطه حذف می‌شوند.

$$\text{Co} = \left[\left(\sum_{i=1}^{n_b} P_{l-i} - \sum_{i=\text{tech}} \sum_{j=1}^{n_{DG}} P_{DGij} \right) \times C_A \times 24 \right] + \left[\sum_{h=1}^{24} \text{Active}_L \times C_A \right] + \left[\sum_{h=1}^{24} \text{Reactive}_L \times C_R \right] + \left[\sum_{i=\text{tech}} \sum_{j=1}^{n_{DG-i}} P_{DGij} C_{DG-i} \times 24 \right] + \left[\sum_{i=1}^{n_{DS}} Q_{DSi} \times C_{DS} \times 24 \right] \quad (29)$$

پارامترهای اقتصادی مورد نیاز برای ارزیابی روش پیشنهادی در جدول (۶) قابل مشاهده هستند [۲۵]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی از دید اقتصادی نیز عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد. روش پیشنهادی نه تنها سود شرکت توزیع را در ترکیب‌های مختلف ادوات در حدود ۱۸ الی ۲۶ درصد نسبت به حالت اولیه بهبود می‌بخشد، نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیز در حدود ۲ الی ۵ درصد سودآورتر است. بیشترین سود روزانه زمانی بدست می‌آید که سیستم توزیع ۶۹ شینه با استفاده از ترکیب پیل سوختی و جبران‌ساز استاتیک با توجه به نتایج حاصل از روش پیشنهادی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. با توجه به مکان و اندازه ادوات حاصل شده در سیستم توزیع ۶۹ شینه پس از اجرای روش پیشنهادی [جدول (۴)] و رابطه (۲۹)، سود روزانه شرکت توزیع محاسبه شده است. در جدول (۷)، سود روزانه شرکت توزیع در شرایط مختلف بهره‌برداری قابل مشاهده است.

Table (6): The required economic parameters

جدول (۶): پارامترهای اقتصادی مورد نیاز

مقدار	واحد	پارامتر	مقدار	واحد	پارامتر
۱/۰۷۳	\$/MWh	C_{WT}	۳۵	\$/MWh	C_{MP}
۲/۵۸۴	\$/MWh	C_{PV}	۱۳/۰۸۷	\$/MWh	C_A
۰/۴۵۷	\$/MWh	C_{MT}	۴/۱۵۳	\$/MVar h	C_R
۰/۲۹۴	\$/MWh	C_{FC}	۶/۸۴۹	\$/MVar h	C_{DS}

Table (7): The profit of Distribution Company of 69 bus system in various operational conditions

جدول (۷): سود شرکت توزیع سیستم توزیع ۶۹ شینه در شرایط مختلف بهره‌برداری

سود شرکت توزیع (\$)				الگوریتم مدنظر	شماره آزمایش
مدل بار مسکونی	مدل بار تجاری	مدل بار صنعتی	مدل بار ثابت		
۱۴۴۵/۵۹	۱۳۳۰/۱۳	۱۷۲۷/۴۹	۱۹۱۸/۶۳	حالت اولیه	
۱۸۳۰/۸۴	۱۷۰۹/۵۴	۲۱۳۵/۱۱	۲۳۵۲/۸۰	MOPSO	۱
۱۷۸۹/۷۳	۱۶۶۸/۲۳	۲۰۹۴/۰۹	۲۳۱۲/۱۶	NSGA	
۱۸۶۰/۰۲	۱۷۴۰/۵۹	۲۱۶۲/۵۵	۲۳۷۶/۴۱	NSFA	
۱۸۹۲/۴۳	۱۷۷۲/۵۳	۲۱۹۵/۵۳	۲۴۱۰/۴۳	روش پیشنهادی	
۱۸۰۵/۹۱	۱۶۸۴/۸۵	۲۱۱۰/۳۸	۲۳۲۷/۷۹	MOPSO	۲
۱۸۴۲/۵۰	۱۷۲۱/۴۲	۲۱۴۷/۱۲	۲۳۶۴/۶۶	NSGA	
۱۸۳۲/۷۳	۱۷۱۸/۷۱	۲۱۳۴/۳۴	۲۳۵۱/۵۸	NSFA	
۱۸۵۸/۴۴	۱۷۳۷/۷۹	۲۱۶۲/۳۴	۲۳۷۸/۸۲	روش پیشنهادی	
۱۶۳۵/۹۲	۱۵۱۶/۳۹	۱۹۳۸/۴۹	۲۱۵۲/۷۲	MOPSO	۳
۱۶۸۴/۶۲	۱۵۶۵/۳۳	۱۹۸۷/۲۴	۲۲۰۰/۸۲	NSGA	
۱۶۹۹/۲۱	۱۵۷۹/۴۲	۲۰۰۲/۰۶	۲۲۱۶/۶۸	NSFA	
۱۸۲۴/۱۵	۱۷۰۲/۵۴	۲۱۲۸/۶۳	۲۳۴۶/۷۶	روش پیشنهادی	
۱۷۰۳/۲۹	۱۶۰۲/۵۵	۲۰۰۷/۱۹	۲۲۲۳/۸۱	MOPSO	۴
۱۴۱۹/۰۵	۱۳۰۰/۲۵	۱۷۱۹/۷۶	۱۹۳۱/۳۲	NSGA	
۱۷۲۴/۸۷	۱۶۰۳/۵۱	۲۰۲۹/۲۲	۲۲۴۶/۹۷	NSFA	
۱۷۳۳/۶۷	۱۶۱۰/۹۳	۲۰۳۸/۵۶	۲۲۵۸/۶۹	روش پیشنهادی	

۶-۲- سیستم توزیع ۱۰۱ شینه

پس از آزمایش الگوریتم پیشنهادی در سیستم توزیع استاندارد، برای ارزیابی توانایی آن در انتخاب مکان و اندازه بهینه دستگاه‌ها در شرایط واقعی تر بهره‌برداری، به سیستم توزیع واقعی ۱۰۱ شینه خوی- ایران اعمال می‌شود. همچنین، توانایی روش پیشنهادی را می‌توان در یک سیستم توزیع گسترده و پیچیده مورد ارزیابی قرار داد. این شبکه یک سیستم توزیع صنعتی ۲۰ کیلوولت بوده که ۲۰۵ مشترک دارد و در حدود ۲۱۰۳۷ کیلووات و ۱۲۸۰۶ کیلووات مصرف انرژی الکتریکی دارد. با توجه به مشتریانی که این شبکه در شرایط واقعی دارد، مدل بار صنعتی برای قرارگیری ادوات در نظر گرفته شده است. در جدول (۸) بهترین مکان و ظرفیت منابع تولید پراکنده و جبران‌ساز استاتیک سنکرون در آزمایش‌های مختلف بیان شده است. شاخص‌های فنی و زیست محیطی سیستم توزیع ۱۰۱ شینه در طول اجرای روش پیشنهادی در جدول (۹) آورده شده است. مطابق این جدول، عملکرد سیستم واقعی با قرار دادن ادوات با استفاده از الگوریتم پیشنهادی بهبود می‌یابد. درصد بهبود تلفات شبکه پس از بهره‌برداری از ادوات در شکل (۵) نشان داده شده است. روش پیشنهادی مقدار شاخص تلفات را در حدود ۵۱ الی ۵۸ درصد کاهش می‌دهد.

Table (8): The optimal location and size of devices in the 101 bus distribution system

جدول (۸): مکان و اندازه بهینه ادوات در سیستم توزیع ۱۰۱ شینه

شماره آزمایش	منابع تولید پراکنده		جبران ساز استاتیک توزیع	
	مکان (شماره شین)	ظرفیت (مگاوات)	مکان (شماره شین)	ظرفیت (مگاوار)
۱	۴۴	۲/۴۷۵۶	۴۰	۲/۴۴۴۹
	۹۹	۲/۳۲۹۵	۸۶	۲/۱۱۰۳
۲	۳۸	۲/۳۲۱۵	۸۴	۱/۲۸۴۰
	۹۵	۲/۲۷۲۷	۴۴	۱/۶۸۷۰
۳	۴۲	۲/۴۸۳۴	۳۵	۱/۶۹۴۵
	۹۶	۲/۱۲۴۰	۱۰۰	۲/۵۰۰۰
۴	۴۳	۲/۲۸۶۹	۹۴	۲/۴۳۳۵
	۹۶	۲/۱۰۷۷	۴۲	۱/۸۰۲۷

Table (9): The amount of indices of 101 bus distribution system

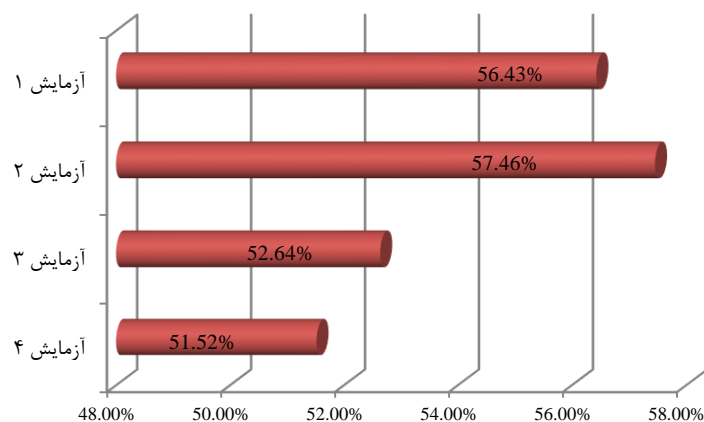
جدول (۹): مقادیر شاخص‌های سیستم توزیع ۱۰۱ شینه

شماره آزمایش	تلفات اکتیو (مگاوات)	تلفات راکتیو (مگاوار)	پایداری ولتاژ (پریونیت)	آلاینده‌گی (کیلوگرم)
حالت اولیه	۰/۴۰۸۷	۰/۲۳۹۵	۰/۸۸۱۲	-
۱	۰/۱۷۸۰	۰/۱۰۴۳	۰/۹۱۷۳	۵۵۳۵۴/۷۵۲
۲	۰/۱۷۳۸	۰/۱۰۱۹	۰/۹۱۷۷	۱۱۸۸۶۱/۱۴
۳	۰/۱۹۳۵	۰/۱۱۳۴	۰/۹۱۷۳	.
۴	۰/۱۹۸۱	۰/۱۱۶۱	۰/۹۱۷۰	.

Table (10): Statistical details of the voltage of 101 bus distribution system

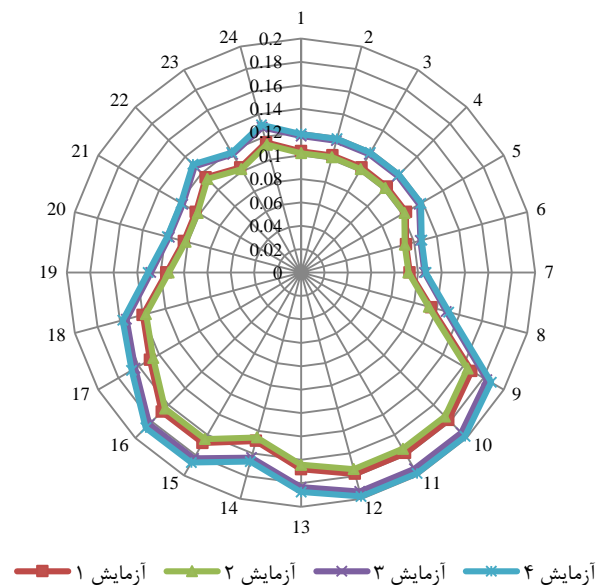
جدول (۱۰): جزئیات آماری ولتاژ سیستم توزیع ۱۰۱ شینه

شماره آزمایش	حداقل ولتاژ (پریونیت)	حداکثر ولتاژ (پریونیت)	محدوده تغییرات ولتاژ	میانگین ولتاژ	واریانس ($\times 10^{-6}$)
حالت اولیه	۰/۹۷۳۳	۰/۹۹۶۷	۰/۰۲۳۴	۰/۹۸۳۹۷	۵۱/۸۳۵۰
۱	۰/۹۸۵۸	۰/۹۹۷۸	۰/۰۱۲۰	۰/۹۹۰۸۰	۹/۹۹۵۲
۲	۰/۹۸۶۴	۰/۹۹۷۹	۰/۰۱۱۵	۰/۹۹۱۲۱	۸/۴۷۸۶
۳	۰/۹۸۵۸	۰/۹۹۷۷	۰/۰۱۱۹	۰/۹۹۰۶۴	۹/۴۲۳۷
۴	۰/۹۸۵۴	۰/۹۹۷۶	۰/۰۱۲۲	۰/۹۹۰۲۴	۱۰/۶۸۸۰

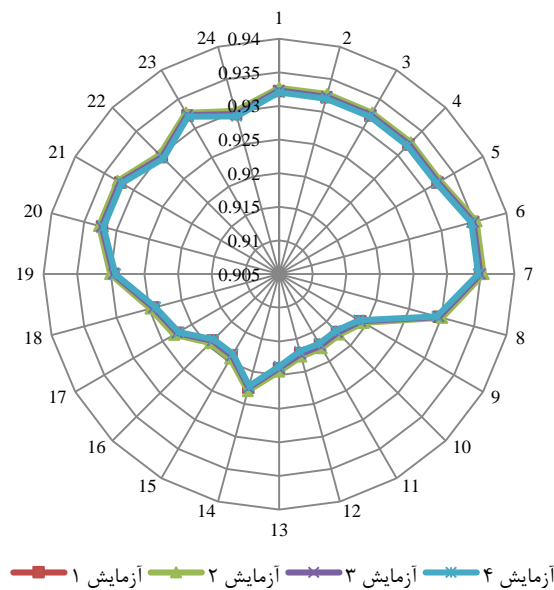


شکل (۵): میزان بهبود تلفات سیستم توزیع ۱۰۱ شینه

Figure (5): The improvement amount of the loss of 101 bus distribution system



شکل (۶): تغییرات ساعتی تلفات سیستم توزیع ۱۰۱ شینه
Figure (6): Hourly variation of the loss of 101 bus distribution system



شکل (۷): تغییرات ساعتی ولتاژ سیستم توزیع ۱۰۱ شینه
Figure (7): Hourly variation of the voltage of 101 bus distribution system

پایداری ولتاژ نیز پس اجرای روش پیشنهادی در حدود ۳۲ درصد بهبود یافته است. تغییرات ولتاژ با استفاده از محاسبات آماری نیز مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. جزئیات آماری ولتاژ در جدول (۱۰) ارائه شده است. با توجه به نتایج این جدول، تخصیص همزمان ترکیب‌های مختلف ادوات با کاهش ۴۸ الی ۵۱ درصدی محدوده تغییرات ولتاژ و ۷۹ الی ۸۴ درصدی واریانس ولتاژ باعث افزایش پایداری ولتاژ باس‌ها و در حالت کلی پایداری سیستم توزیع می‌شود. در سیستم توزیع واقعی، میکروتوربین و پیل سوختی به ترتیب حدود ۱۱۹ و ۵۵ تن گاز آلاینده تولید می‌کنند. بنابراین، استفاده از فن‌آوری‌های تجدید پذیر بر اساس جنبه‌های زیست محیطی مفید تر از فن‌آوری‌های تجدیدناپذیر است.

شاخص‌های در نظر گرفته شده سیستم توزیع واقعی ۱۰۱ شینه در آزمایش‌های مختلف در طول شبانه‌روز بدلیل در نظر گرفتن مدل بار متغیر، تغییر می‌کنند. در شکل‌های (۶) و (۷)، به ترتیب تغییرات ساعتی تلفات و ولتاژ سیستم توزیع ۱۰۱ شینه نشان

داده شده است. همانطور که در این شکل‌های قابل مشاهده بوده، شاخص‌ها در ساعات مختلف با کاهش و افزایش مواجه می‌شوند که رابطه مستقیمی با میزان مصرف انرژی الکتریکی در شبکه دارد. البته اجرای روش پیشنهادی باعث کاهش محدوده تغییرات می‌شود.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بهینه‌سازی همزمان مکان و اندازه انواع واحدهای تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تولید پراکنده و واحد جبران‌ساز استاتیک توزعی در یک سیستم توزیع با مدل بار متغیر مورد مطالعه قرار گرفت. از ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه وال و روش تحلیل سلسله مراتبی برای بهینه‌سازی توابع هدف فنی و زیست‌محیطی استفاده شد.

نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی به سیستم‌های توزیع استاندارد و واقعی نشان‌دهنده کارایی مناسب روش پیشنهادی در مدل بارهای مختلف است. روش پیشنهادی بیش از ۵۰ درصد میزان تلفات و ولتاژ سیستم توزیع را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، وقتی مدل بار سیستم تغییر می‌یابد، تغییرات شاخص‌های فنی ناچیز است؛ در نتیجه به اعمال روش پیشنهادی و تغییر مدل بار بهره‌وری سیستم تغییر چندانی نمی‌کند. با توجه به نوع منابع تولید پراکنده می‌توان اظهار داشت که انواع تکنولوژی‌ها در مقدار شاخص‌های فنی تاثیر مثبتی می‌گذارند در حالی که میکروتوربین و توربین بادی بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهند. بر اساس مسائل زیست محیطی، فن‌آوری‌های تجدیدپذیر نسبت به تجدیدناپذیرها مفیدتر هستند. واحدهای جبران‌ساز استاتیک توزیع نیز باعث افزایش بهره‌وری سیستم توزیع می‌شوند. محل قرارگیری این ادوات در شبکه به نحوی است که به کمک واحدهای تولید پراکنده ولتاژ شین‌ها را بهبود بخشند. روش پیشنهادی عملکرد سریع و دقیق‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌های هوشمند (MOPSO، NSGA و NSFA) در بهینه‌سازی توابع هدف و انتخاب بهینه مکان و اندازه ادوات از خود نشان می‌دهد. در حالت کلی، نتایج حاکی از عملکرد بالای روش پیشنهادی در بهبود شاخص‌های در نظر گرفته شده سیستم توزیع در طول شبانه‌روز، در مدل‌های مختلف بار و ترکیب‌های مختلف ادوات است.

References

مراجع

- [1] P. Huy, V. Ramachandaramurthy, J. Yong, K. Tan, J. Ekanayake, "Optimal placement, sizing and power factor of distributed generation: A comprehensive study spanning from the planning stage to the operation stage", *Energy*, vol. 195, Article Number: 117011, March 2020 (doi: 10.1016/j.energy.2020.117011).
- [2] A. Ehsan, Q. Yang, "Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques", *Applied Energy*, vol. 210, pp. 44-59, Jan. 2018 (doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.106).
- [3] M. Salari, F. Haghghatdar-Fesharaki, "Optimal placement and sizing of distributed generations and capacitors for reliability improvement and power loss minimization in distribution networks", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 11, no. 43, pp. 83-93, Autumn 2020 (in Persian).
- [4] Y. Han, G. Lv, E. Mokaramian, "A review modeling of optimal location and sizing integrated M-FACTS with wind farm and fuel cell", *Journal of Cleaner Production*, vol. 268, Article Number: 121726, Sep. 2020 (doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121726).
- [5] A. Motaghi, M. Alizadeh, M. Abbasian, "Reactive power compensation and reducing network transmission losses by optimal placement of parallel and series FACTS devices with fuzzy-evolutionary method", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 9, no. 35, pp. 27-38, Autumn 2018 (in Persian).
- [6] R.A. Jabr, B.C. Pal, "Ordinal optimisation approach for locating and sizing of distributed generation", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 3, pp. 713-723, Aug. 2009 (doi: 10.1049/iet-gtd.2009.0019).
- [7] B. Poornazaryan, P. Karimyan, G.B. Gharehpetian, M. Abedi, "Optimal allocation and sizing of DG units considering voltage stability, losses and load variations", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 79, pp. 42-52, July 2016 (doi: 10.1016/j.ijepes.2015.12.034).
- [8] S. Kansal, V. Kumar, B. Tyagi, "Optimal placement of different type of DG sources in distribution networks", *Electrical Power and Energy System*, vol. 23, pp. 752-760, Dec. 2013 (doi: 10.1016/j.ijepes.2013.05.040).
- [9] R. Ebrahimi, M. Ehsan, H. Nouri, "A profit-centric strategy for distributed generation planning considering time varying voltage dependent load demand", *Electrical Power and Energy System*, vol. 44, pp. 168-178, Jan. 2013 (doi: 10.1016/j.ijepes.2012.07.039).
- [10] S. Li, Y. Li, Y. Cao, Y. Tan, B. Keune, "Capacity optimisation method of distribution static synchronous

- compensator considering the risk of voltage sag in high-voltage distribution networks”, IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, pp. 2602-2610, Nov. 2015 (doi: 10.1049/iet-gtd.2014.1047).
- [11] T. Yuvaraj, K. Ravi, K. R. Devabalaji, “DSTATCOM allocation in distribution networks considering load variations using bat algorithm”, Ain Shams Engineering Journal, vol. 8, pp. 391- 403, Sept. 2017 (doi: 10.1016/j.asej.2015.08.006).
- [12] A. Taher, A. Afsari, “Optimal location and sizing of DSTATCOM in distribution systems by immune algorithm”, Electrical Power and Energy Systems, vol. 60, pp. 34-44, Sep. 2014 (doi: 10.1016/j.ijepes.2014.02.020).
- [13] T. Yuvaraja, K. R. Devabalajia, K. Ravia, “Optimal placement and sizing of DSTATCOM using harmony search algorithm”, Energy Procedia, vol. 79, pp. 759-765, Nov. 2015 (doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.563).
- [14] S. Devi, M. Geethanjali, “Optimal location and sizing determination of distributed generation and DSTATCOM using particle swarm optimisation algorithm”, Electrical Power and Energy Systems, vol. 62, pp. 562-570, Nov. 2014 (doi: 10.1016/j.ijepes.2014.05.015).
- [15] T. Yuvaraj, K. R. Devabalaji, T. Babu, “Simultaneous allocation of DG and DSTATCOM using whale optimization algorithm”, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, vol. 44, pp. 879-896, 2020 (doi: 10.1007/s40998-019-00272-w).
- [16] H. Tolabi, M. Ali, M. Rizwan, “Simultaneous reconfiguration, optimal placement of DSTATCOM and photovoltaic array in a distribution system based on fuzzy-ACO approach”, IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 6, no. 1, pp. 210-218, Jan. 2015 (doi: 10.1109/TSTE.2014.2364230).
- [17] M. Alilou, V. Talavat, H. Shayeghi, “Simultaneous placement of renewable DGs and protective devices for improving the loss, reliability and economic indices of distribution system with nonlinear load model”, International Journal of Ambient Energy, vol. 41, pp. 871-881, 2020 (doi: 10.1080/01430750.2018.1490352).
- [18] H. Shayeghi, M. Alilou, B. Tousi, “Multi-objective allocating the protective devices beside wind turbine and photovoltaic panel in the distribution system”, International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, vol. 12, pp. 51-57, 2020.
- [19] A. Nageswa, P. Vijaya, M. Kowsalya, “Voltage stability indices for stability assessment: A review”, International Journal of Ambient Energy, In Press, 2018 (doi: 10.1080/01430750.2018.1525585).
- [20] T. Ayodele, M. Alao, A. Ogunjuyigbe, “Effect of collection efficiency and oxidation factor on greenhouse gas emission and life cycle cost of landfill distributed energy generation”, Sustainable Cities and Society, vol. 52, Article Number: 101821, Jan. 2020 (doi: 10.1016/j.scs.2019.101821).
- [21] L. Wong, V. Ramachandaramurthy, S. Walker, P. Taylor, M. Sanjari, “Optimal placement and sizing of battery energy storage system for losses reduction using whale optimization algorithm”, Journal of Energy Storage, vol. 26, Article Number: 100892, Dec. 2019 (doi: 10.1016/j.est.2019.100892).
- [22] M. Ehyaei, A. Ahmadi, M. Assad, T. Salameh, “Optimization of parabolic through collector (PTC) with multi objective swarm optimization (MOPSO) and energy, exergy and economic analyses”, Journal of Cleaner Production, vol. 234, pp. 285-296, Oct. 2019 (doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.210).
- [23] Y. Liu, C. Eckert, C. Earl, “A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgments”, Expert Systems with Applications, vol. 161, Article Number: 113738, Dec. 2020 (doi: 10.1016/j.eswa.2020.113738).
- [24] M. Alilou, D. Nazarpour, H. Shayeghi, “Multi-objective optimization of demand side management and multi DG in the distribution system with demand response”, Journal of Operation and Automation in Power Engineering, vol. 6, pp. 230-242, 2018 (doi: 10.22098/JOAPE.2006.4207.1328).
- [25] M. Alilou, B. Tousi, H. Shayeghi, “Simultaneous placement of DG and compensators in the actual 101-bus distribution system in Khoy-Iran”, 23rd Electrical Power Distribution Conference, Tehran, Iran, 2018.

زیر نویس:

1. Distributed generation
2. Distribution flexible AC transmission systems
3. Distribution static compensator
4. Multi-objective whale optimization algorithm
5. Analytical hierarchy process method
6. Multi-objective particle swarm optimization algorithm
7. Non-dominated sorting genetic algorithm
8. Non-dominated sorting firefly algorithm