

Increasing the Profit of Owners of Distributed Generation Units with Reducing Losses of Distribution System Using Modified Grey Wolf Algorithm

Seyed Amir Mohammad Lahaghi¹, PhD Student, Behrooz Zaker¹, Assistant Professor

¹ School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Fars, Iran

Abstract:

This paper presents a comprehensive solution for optimizing the performance of distributed generation units in distribution systems. Focusing on reducing distribution network losses, the proposed solution utilizes point-to-point pricing method to determine prices across the distribution system. The optimization objective is to minimize network losses, utilizing participatory prices declared by the owners of distributed generation units. Furthermore, price optimization is carried out using an improved grey wolf optimization algorithm, which employs a decision tree model to identify optimal solutions in each iteration, enhancing speed and accuracy at each stage of the algorithm training. The efficacy of the proposed method is evaluated on two IEEE 33-bus and 69-bus test distribution systems in MATLAB software, showing significant improvement in the speed and accuracy of the proposed solution compared to previous methods. Overall, this study can contribute to the advancement of efficient strategies for managing distributed generation units in distribution systems, emphasizing profitability and addressing network optimization challenges.

Keywords: Distributed generation, Optimal pricing, Grey wolf optimization, Decision tree

Received: 22 December 2020

Revised: 25 February 2021

Accepted: 13 March 2021

Corresponding Author: Dr. Behrooz Zaker, b.zaker@shirazu.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.1105063



افزایش دادن سود مالکان واحدهای تولید پراکنده همراه با کاهش تلفات سیستم توزیع با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری بهبودیافته

سیدامیرمحمد لاحقی^۱، دانشجوی دکتری، بهروز ذاکر^۱، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران

چکیده: این مقاله یک راهکار جامع برای بهینه‌سازی عملکرد واحدهای تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع ارائه می‌دهد. با تمرکز بر کاهش تلفات شبکه توزیع، راهکار پیشنهادی از قیمت‌گذاری نقطه به نقطه استفاده می‌کند تا قیمت‌ها را در سراسر سیستم توزیع تعیین کند. هدف بهینه‌سازی بر کمینه کردن تلفات شبکه تمرکز دارد و از قیمت‌های مشارکتی اعلام‌شده توسط مالکان واحدهای تولید پراکنده استفاده می‌کند. هم‌چنین بهینه‌سازی قیمت‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهبودیافته انجام می‌شود که برای بهبود آن از یک مدل درخت تصمیم استفاده شده است که اجازه تشخیص راهکارهای بهینه در هر تکرار را فراهم می‌کند که این اقدام باعث افزایش سرعت و دقت در هر مرحله از آموزش الگوریتم می‌شود. کارایی روش پیشنهادی بر روی دو سیستم توزیع آزمایشی ۳۳ شینه و ۶۹ شینه IEEE در نرم‌افزار MATLAB ارزیابی می‌شود که نتایج آن حاکی از بهبودی چشمگیر در سرعت و دقت راهکار ارائه‌شده نسبت به روش‌های قبلی است. به طور کلی، این مطالعه می‌تواند به پیشرفت استراتژی‌های کارآمد برای مدیریت واحدهای تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع، با تاکید بر سودآوری و حل چالش‌های بهینه‌سازی شبکه، کمک شایانی کند.

واژه‌های کلیدی: تولید پراکنده، قیمت‌گذاری بهینه، بهینه‌سازی گرگ خاکستری، درخت تصمیم

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

نویسنده‌ی مسئول: دکتر بهروز ذاکر، b.zaker@shirazu.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.1105063



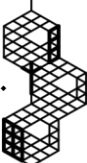


با گسترش روزافزون شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی، استفاده از منابع تولید پراکنده^۱ اهمیت بسیاری پیدا کرده است [۱]. واحدهای تولید پراکنده علاوه بر این که می‌توانند باعث بهبود شبکه شوند، باید به نحوه‌ی انرژی الکتریکی را به دست مشتریان برسانند که تعامل بین شرکت‌های توزیع برق و مشتریان برقرار گردد [۲]. در این تعامل، علاوه بر توجه به سمت مشتریان، باید به سمت مالکان واحدهای تولید پراکنده نیز توجه کرد؛ چرا که یک بازار برق هنگامی پایدار است که علاوه بر خدمت‌رسانی شرکت‌های توزیع به منظور برقراری صحیح رفاه اجتماعی، مالکان واحدهای تولید پراکنده نیز بتوانند از سود قابل قبولی بهره‌مند گردند [۳].

مطالعات گوناگونی در رابطه با واحدهای تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع انجام شده است. در [۴] یک مدار معادل دینامیکی برای ریزشبکه‌های شامل واحدهای تولید پراکنده که مبتنی بر منابع اینورتری و جبران‌سازهای ایستا می‌باشند، ارائه شده است. در [۵] طرحی به منظور پیک‌سایبی مشترکان صنعتی از طریق نصب ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز انرژی ارائه شده است که در آن یک فرمول‌بندی جدید جهت تعیین ظرفیت بهینه نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری پیشنهاد شده است. هم‌چنین یک طرح هماهنگی حفاظتی جدید به منظور بازیابی تجهیزات حفاظتی اضافه جریان در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی در حضور منابع تولید پراکنده در [۶] ارائه شده است.

قیمت‌گذاری بهینه توان واحدهای تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی از اهمیت بالایی برخوردار است. بهره‌گیری از یک روش قیمت‌گذاری با سرعت و دقت بالا، می‌تواند باعث ایجاد تعامل مثبت بین مشتریان انرژی و شرکت‌های توزیع انرژی الکتریکی شود و بستر سودآوری واحدهای تولید پراکنده را فراهم می‌سازد. از این رو، شرکت‌های توزیع فرصت‌های بیشتری را برای جذب سرمایه‌گذاران در اختیار خواهند داشت. در این مقاله از روش قیمت‌گذاری نقطه به نقطه یا همان روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای^۲ در سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی استفاده شده است که در [۷] به آن پرداخته شده است و برتری آن نسبت به سایر روش‌ها این است که بر اساس نرخ لحظه‌ای انرژی در هر نقطه از شبکه است و به همین دلیل دارای پیچیدگی محاسباتی کمتر و در نتیجه دارای سرعت بالاتری نسبت به آن‌ها است. علاوه بر این، روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای بر خلاف دیگر روش‌های موجود، نیازی به اطلاعات کامل شبکه نداشته و تنها به اطلاعات محلی در هر نقطه از شبکه نیاز دارد که این ویژگی، می‌تواند این روش را برای کاربرد در سیستم‌های توزیع پراکنده که دارای منابع تولید متعدد و پراکنده هستند، مناسب سازد. هم‌چنین روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای تحت شرایط خاصی مانند تعادل بین عرضه و تقاضا و حداقل نمودن هزینه‌های سیستم، می‌تواند بهینه‌گی سیستم را تضمین کند. قیمت‌گذاری نقطه به نقطه برای نخستین بار در سال ۲۰۰۶ میلادی توسط سوتکویچ و همکاران به منظور بهبود تاثیر منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع ارائه شد [۸]. علاوه بر این، مطالعات گوناگونی در زمینه قیمت‌گذاری بهینه در سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی انجام شده است. در [۹] قیمت‌گذاری بهینه شین‌های متصل به واحدهای تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع با استفاده از روش قیمت‌گذاری حاشیه‌ای مکانی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در قیمت بازار با استفاده از روش تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی^۳ ارائه شده است. استراتژی‌های قیمت‌گذاری پویا مبتنی بر تئوری بازی^۴ به منظور مدیریت سمت تقاضا در سیستم‌های هوشمند توزیع انرژی الکتریکی در [۱۰] انجام شده است. محاسبه قیمت‌های حاشیه‌ای مکانی در شین‌های متصل به واحدهای تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع با بهره‌گیری از الگوریتم آتش‌بازی در [۱۱] ارائه شده است. هم‌چنین در [۱۲] محاسبات قیمت‌های بهینه برای سیستم‌های فشارقوی با استفاده از روش مشتق‌گیری انجام شده است.

با بررسی مطالعات قبلی در زمینه قیمت‌گذاری بهینه، این موضوع مشهود است که قیمت‌های بهینه از سه روش مشتق‌گیری، تئوری بازی و یا روش‌های قیمت‌گذاری اقتصادی به همراه بهینه‌سازی توسط الگوریتم‌های فراابتکاری^۵ حاصل می‌شوند. در این مقاله به منظور محاسبه و بهینه‌سازی قیمت‌ها و سودهای اختصاص‌یافته به واحدهای تولید پراکنده متصل به شین‌های سیستم توزیع انرژی الکتریکی از روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای به همراه یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری بهره گرفته شده است. در واقع، در این مقاله از یک الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهبودیافته^۶ توسط یک مدل درخت تصمیم^۷ استفاده شده است. ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری با مدل درخت تصمیم، الگوریتم را قادر می‌سازد تا به تقسیم‌بندی دقیق‌تر داده‌ها و تعیین مناسب‌تر جهت بهینه‌سازی دست پیدا کند و بنابراین کارایی الگوریتم افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، دقت الگوریتم در فهم و تفسیر بهتر نتایج افزایش پیدا می‌کند و سرعت حل مسئله نیز افزایش می‌یابد.



در مرجع [۱۳]، طرحی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری به منظور پیش‌بینی بار الکتریکی کوتاه‌مدت بر اساس تجزیه حالت متغیر ارائه شده است. یک راه‌حل مبتنی بر حافظه برای بهبود الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری به منظور حل مشکل قیمت‌گذاری بازار برق در حضور ریزش‌بکه‌ها در [۱۴] ارائه گشته است. در [۱۵] به یک رویکرد مجموعه‌ای برای پیش‌بینی قیمت برق در بازارهای دارای منابع تجدیدپذیر پرداخته شده که در آن از مدل درخت تصمیم برای حل مسئله پرداخته شده است و در [۱۶] یک سیستم جدید مبتنی بر درخت تصمیم برای پیش‌بینی قیمت برق چندمرحله‌ای برای مدیریت بازار برق ارائه شده است. شکاف‌های مطالعات و پیشنهادات پیشین به شرح زیر می‌باشند:

- الگوریتم‌های قبلی و سنتی معمولاً روش‌های ثابت و از پیش تعیین‌شده‌ای دارند که قادر به یادگیری از داده‌های جدید و انطباق با شرایط متغیر سیستم توزیع نمی‌باشند. این امر باعث کاهش کارایی این الگوریتم‌ها در شرایط متفاوتی از مسئله خواهد شد.
- الگوریتم‌های قدیمی، اغلب برای یافتن جواب بهینه ضعیف عمل می‌کنند و نمی‌توانند پاسخ‌های بهینه را با دقت و کارایی بالا پیدا کنند.
- بسیاری از روش‌های پیشین برای رسیدن به جواب بهینه نیازمند محاسبات طولانی و زمان زیاد هستند که همین امر آن‌ها را برای استفاده در سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی که نیازمند پاسخ سریع می‌باشند، نامناسب می‌سازد.
- روش‌های قبلی غالباً بر اساس فرضیات و شرایط خاصی طراحی شده‌اند و قادر به تطبیق با شرایط متفاوت دیگر نمی‌باشند. این کمبود انعطاف‌پذیری باعث کاهش کارایی آن‌ها در محیط‌های متغیری از مسئله می‌گردد.
- برخی از الگوریتم‌های قدیمی برای عملکرد مناسب، نیازمند داده‌های ورودی گسترده و پیچیده هستند که تهیه این داده‌ها گاه دشوار و یا غیرممکن می‌باشد.

به همین منظور و برای پوشش شکاف‌های ذکرشده، از روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای به منظور قیمت‌گذاری توان واحدهای تولید پراکنده متصل‌شده به شین‌های سیستم توزیع استفاده شده است. هم‌چنین به منظور بهینه‌سازی سیگنال‌های دریافتی از قیمت‌ها، از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری ترکیب‌شده با مدل درخت تصمیم بهره گرفته شده است که در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی سنتی دارای سرعت و دقت بالاتری است. علاوه بر آن، تمرکز روش ارائه‌شده بر روی تلفات سیستم توزیع بوده و با به کارگیری الگوریتم ارائه‌شده، علاوه بر سودآوری واحدهای تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع، تلفات سیستم نیز کاهش پیدا می‌کند. به طور کلی، نوآوری ارائه‌شده در این مقاله، ترکیب منحصر به فرد الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری با مدل یادگیری ماشین^۸ درخت تصمیم برای حل مسئله کاهش تلفات در سیستم توزیع و افزایش مقدار سود حاصل‌شده برای مالکان واحدهای تولید پراکنده متصل‌شده به شین‌های سیستم‌های توزیع است. این رویکرد نوآورانه، روش پیشنهادی در مقاله را به یک رویکرد قدرتمند، انعطاف‌پذیر و کارآمد برای حل مسئله کاهش تلفات در سیستم‌های توزیع تبدیل می‌کند که می‌تواند سودآوری واحدهای تولید پراکنده را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد.

مزایای روش ارائه‌شده در مقاله به منظور حل مسئله به شرح زیرند:

- با استفاده از مدل درخت تصمیم که یک مدل مبتنی بر یادگیری ماشین است، برای بهبود الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، دقت و کارایی الگوریتم در یافتن بهترین جواب‌ها افزایش می‌یابد. مدل درخت تصمیم با استفاده از داده‌های مراحل قبلی الگوریتم، قادر است الگوهای موفق را شناسایی کرده و در تکرارهای بعدی از آن‌ها استفاده نماید.
- با استفاده از مدل درخت تصمیم، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهبود یافته قادر است در هر تکرار از داده‌های جدید، عمل یادگیری را انجام دهد و عملکرد خود را بهبود بخشد. این ویژگی منجر به افزایش کارایی الگوریتم ارائه‌شده در طول زمان خواهد شد.
- به دلیل این که الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهبود یافته این توانایی را دارد که از داده‌های جدید در هر تکرار از الگوریتم آموزش ببیند، می‌تواند خود را با تغییرات محیطی و شرایط متغیر سیستم توزیع انرژی الکتریکی انطباق دهد که این ویژگی مزیت بزرگی در مقایسه با روش‌های قبلی که بیشتر ثابت و غیرقابل انطباق می‌باشند، محسوب می‌شود.





- با شناسایی و استفاده از الگوهای موفق و داده‌های تکرارهای قبلی، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهبودیافته می‌تواند در زمان کوتاه‌تری به پاسخ‌های بهینه دست یابد. این ویژگی برای سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی که نیازمند پاسخ سریع هستند، بسیار مفید است.

ساختار مقاله حاضر به شرح زیر می‌باشد:

در بخش دوم، فرمول‌بندی و معادلات و قیود حاکم بر مسئله ارائه شده‌اند، بخش سوم به نحوه ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری با مدل درخت تصمیم اختصاص داده شده است، بخش چهارم به روش حل مسئله با استفاده از الگوریتم ارائه‌شده در مقاله می‌پردازد و بخش‌های پنجم و ششم، به ترتیب به نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری می‌پردازند.

۲- فرمول‌بندی مسئله

از آنجایی که تمرکز اصلی مسئله، بر اساس کاهش تلفات در شبکه توزیع است، تابع هدف مسئله بهینه‌سازی برابر با کمینه کردن تلفات خواهد بود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$OF(X) = \min_X \left\{ \sum_{i=1}^{N_{br}} R_i |I_i|^2 \right\} \quad (1)$$

که در آن OF نشان‌دهنده تابع هدف مسئله بهینه‌سازی است، X بیانگر متغیرهای کنترلی مسئله بهینه‌سازی می‌باشد، N_{br} نشان‌دهنده تعداد شاخه‌های شبکه توزیع است و R_i و I_i به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت و جریان i امین شاخه در شبکه توزیع هستند. متغیرهای کنترلی مسئله بهینه‌سازی شامل قیمت‌های نقطه‌ای و ضریب توان^۹ واحدهای تولید پراکنده متصل به شبکه توزیع می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$X = \{price, PF\} \quad (2)$$

$$price = \{price_1^{nodal}, price_2^{nodal}, \dots, price_{DG,n}^{nodal}\} \quad (3)$$

$$PF = \{PF_1, PF_2, \dots, PF_{DG,n}\} \quad (4)$$

که $price_{DG,n}^{nodal}$ و $PF_{DG,n}$ به ترتیب نشان‌دهنده قیمت نقطه‌ای و ضریب توان n امین واحد تولید پراکنده متصل به شین‌های شبکه توزیع می‌باشند.

به منظور قیمت‌گذاری توان واحدهای تولید پراکنده در این مقاله، از روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای استفاده شده است. قیمت نقطه‌ای برای واحدهای تولید پراکنده که به شین‌های سیستم توزیع متصل هستند، از طریق رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$price_{DG,n}^{nodal} = price_{DG,n}^0 + \gamma (price_{market} - price_{DG,n}^0) \quad (5)$$

که در آن $price_{DG,n}^{nodal}$ بیانگر قیمت نقطه‌ای برای n امین واحد تولید پراکنده است، $price_{DG,n}^0$ نشان‌دهنده قیمت اولیه توان برای n امین واحد تولید پراکنده می‌باشد، $price_{market}$ نشان‌دهنده قیمت بازار است و γ ضریب تنظیم‌کننده قیمت است. در واقع γ هزینه جریمه تغییرات ناگهانی قیمت بازار است که به منظور جلوگیری از نوسانات قیمت بازار استفاده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\gamma = \sum_{i=1}^{N_{br}} \sum_{t=1}^T (price_{i,t} - price_{i,t-1}) \quad (6)$$

که در آن T تعداد دوره‌های زمانی موردبررسی مانند ساعات در طول یک روز است، $price_{i,t}$ قیمت نقطه‌ای گره i در دوره زمانی t است و $price_{i,t-1}$ قیمت نقطه‌ای گره i در دوره زمانی $t-1$ می‌باشد.

هم‌چنین تابع هزینه مسئله به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$CF_{DG,n} = P_{DG,n} (a_n P_{DG,n} + b_n) + c_n \quad (7)$$

که در آن $CF_{DG,n}$ بیانگر تابع هزینه برای n امین واحد تولید پراکنده است، $P_{DG,n}$ نشان‌دهنده توان اکتیو خروجی n امین واحد تولید پراکنده است و a_n ، b_n و c_n ضرایب تابع هزینه می‌باشند.

علاوه بر آن قیود مسئله بهینه‌سازی به شرح زیر می‌باشند:



قید محدودیت ظرفیت واحدهای تولید پراکنده که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$P_{DG,n}^{\min} \leq P_{DG,n} \leq P_{DG,n}^{\max} \quad (8)$$

$$n = 1, 2, \dots, N_{DG}$$

که در آن $P_{DG,n}^{\max}$ و $P_{DG,n}^{\min}$ به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر کمینه و بیشینه توان اکتیو برای n امین واحد تولید پراکنده می‌باشند. همچنین N_{DG} نشان‌دهنده تعداد کل واحدهای تولید پراکنده متصل به سیستم توزیع انرژی الکتریکی می‌باشد.

قید محدودیت توان راکتیو واحدهای تولید پراکنده که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_{DG,n}^{\min} \leq Q_{DG,n} \leq Q_{DG,n}^{\max} \quad (9)$$

$$n = 1, 2, \dots, N_{DG}$$

که در آن $Q_{DG,n}^{\max}$ و $Q_{DG,n}^{\min}$ به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر کمینه و بیشینه توان راکتیو برای n امین واحد تولید پراکنده می‌باشند. قید محدودیت ضریب توان واحدهای تولید پراکنده که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$PF_{DG,n}^{\min} \leq PF_{DG,n} \leq PF_{DG,n}^{\max} \quad (10)$$

$$n = 1, 2, \dots, N_{DG}$$

که در آن $PF_{DG,n}^{\max}$ و $PF_{DG,n}^{\min}$ به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر کمینه و بیشینه ضریب توان برای n امین واحد تولید پراکنده می‌باشند.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهبودیافته

به منظور بهینه‌سازی قیمت‌های نقطه‌ای در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهبودیافته توسط مدل درخت تصمیم استفاده شده است. به همین منظور در ابتدا الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری معرفی می‌شود و سپس به نحوه ترکیب این الگوریتم با مدل درخت تصمیم پرداخته می‌شود.

۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری است که الهام گرفته شده از سازمان‌دهی موجود در گرگ خاکستری برای شکار کردن در طبیعت می‌باشد [۱۷]. شکل (۱) ساختار سلسله مراتبی گرگ‌های خاکستری را در این الگوریتم نشان می‌دهد.

گرگ‌های آلفا (Alpha)
گرگ‌های بتا (Beta)
گرگ‌های دلتا (Delta)
گرگ‌های امگا (Omega)

شکل (۱): ساختارهای سلسله مراتبی گرگ‌های خاکستری در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

گرگ‌های آلفا رهبر گروه هستند و تصمیمات اتخاذشده توسط آن‌ها به کل گروه اعمال می‌شود. گرگ‌های بتا به گرگ‌های آلفا در تصمیم‌گیری‌ها و سایر فعالیت‌های دسته کمک می‌کنند و در مواقعی که گرگ‌های آلفا بسیار پیر شده یا می‌میرند، بهترین کاندید برای تبدیل شدن به گرگ‌های آلفا هستند. گرگ‌های دلتا تحت فرمان گرگ‌های آلفا و بتا می‌باشند و گرگ‌های امگا دارای پایین‌ترین مقام در بین گرگ‌ها هستند که نقش پیش‌مرگ را در دسته بازی می‌کنند و مطیع تمام گرگ‌های دیگر هستند. به همین منظور همان گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، با ترتیب اهمیت گرگ‌ها، رنگ خاکستری از بالا به پایین، افزایش یافته و پررنگ‌تر می‌شود. به منظور مدلسازی ساز و کار شکار گرگ‌ها در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری از روابط زیر استفاده می‌شود:



$$D = |CX_p(t) - X(t)| \quad (11)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - AD \quad (12)$$

$$A = 2a\lambda_1 - \lambda \quad (13)$$

$$C = 2\lambda_2 \quad (14)$$

که در روابط فوق، t نشان دهنده مرتبه تکرار الگوریتم است، A و C بردارهای ضرایب بردار مکان دوره هستند و X بردار مکان گرگ خاکستری است. علاوه بر این، λ مقداری متغیر است که مقدار آن در طی تکرارهای الگوریتم از ۲ به صفر کاهش پیدا می کند و λ_1 و λ_2 بردارهایی تصادفی در بازه $[0, 1]$ هستند.

بنابراین، مراحل بهینه سازی توسط الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری به شرح زیر می باشد:

مرحله اول: مقداردهی اولیه، مشخص کردن تعداد گرگ ها و تولید جمعیت اولیه.

مرحله دوم: محاسبه برازندگی گرگ ها.

مرحله سوم: مشخص کردن گرگ های آلفا، بتا و دلتا.

مرحله چهارم: بروزرسانی موقعیت همه گرگ ها.

مرحله پنجم: بررسی شرط توقف الگوریتم.

مرحله ششم: پایان.

۳-۲- الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری ترکیب شده با درخت تصمیم

در این مقاله به منظور بهبود دقت و سرعت الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری، این الگوریتم با مدل درخت تصمیم ترکیب شده است که در [۱۸] به آن پرداخته شده است. در واقع درخت تصمیم به الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری کمک می کند تا در هر تکرار، بهترین راه حل ها را شناسایی کند و از داده های حاصل شده در هر تکرار از الگوریتم، برای آموزش خود در مراحل بعدی استفاده می کند. این راهکار به الگوریتم کمک می کند تا پاسخ های بهینه را با دقت بیشتری انتخاب کند و به اپراتور شبکه تحویل دهد. بنابراین، اپراتور شبکه با در دست داشتن مقادیر بهینه و صحیح، قادر است تا تصمیمات درست تری را برای شبکه و بازار اتخاذ کند.

در واقع، با ترکیب درخت تصمیم با الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری، با یک الگوریتم ترکیبی روبرو هستیم. این راهکار می تواند در هر تکرار از الگوریتم بهترین پاسخ ها را جمع آوری کند و از این اطلاعات برای آموزش درخت تصمیم استفاده کند. برای حل مسئله بهینه سازی با استفاده از این الگوریتم ترکیبی، در ابتدا هر تکرار از الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری اجرا شده و بهترین بهینه ترین پاسخ ها ذخیره می شوند. سپس، این اطلاعات به عنوان داده های آموزشی به درخت تصمیم داده می شوند و در نهایت درخت تصمیم با استفاده از این داده ها، می تواند بهینه سازی را انجام دهد و یک مدل بهینه بسازد.

بنابراین مراحل حل مسئله بهینه سازی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری ترکیب شده با مدل درخت تصمیم به شرح زیر است:

مرحله اول: جمعیت اولیه الگوریتم که همان مقادیر اولیه گرگ های خاکستری هستند، تولید می شود. در واقع، هر گرگ خاکستری یک مجموعه از پارامترهای درخت تصمیم را نمایش می دهد.

مرحله دوم: برای هر گرگ خاکستری، یک درخت تصمیم با پارامترهای مربوطه ساخته می شود.

مرحله سوم: تابع هدف مسئله بهینه سازی محاسبه می شود.

مرحله چهارم: بر اساس مقادیر حاصل شده برای تابع هدف مسئله، گرگ های خاکستری دسته بندی می شوند.

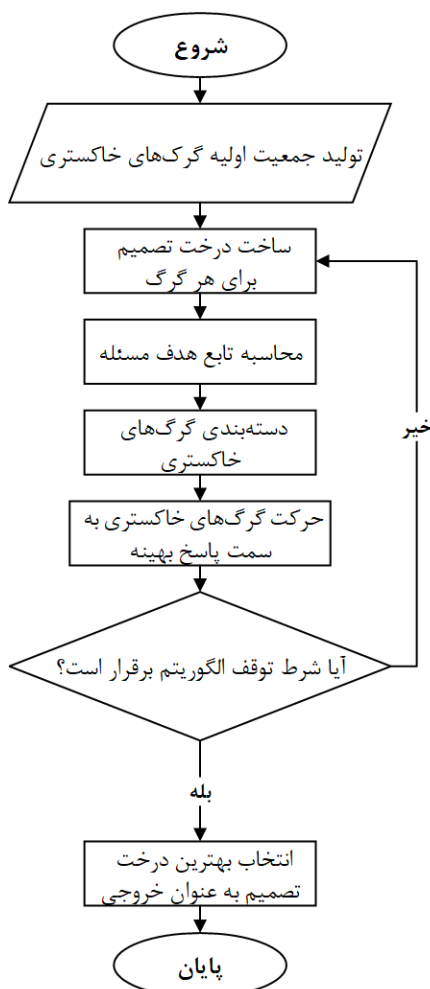
مرحله پنجم: بر اساس اصل الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری، گرگ های خاکستری به سمت راه حل و پاسخ بهینه حرکت داده می شوند و پارامترهای آن ها بهینه می شود.

مرحله ششم: شرط توقف الگوریتم مورد بررسی قرار می گیرد. شرط توقف می تواند تعداد تکراری مشخص و تعیین شده از سوی کاربر و یا رسیدن پاسخ های حاصل شده از الگوریتم به دقت خاصی باشد.

مرحله هفتم: اگر شرط توقف الگوریتم برقرار بود، مرحله هشتم اجرا می شود و در غیر این صورت مراحل دوم تا پنجم مجدداً تکرار می شوند.



مرحله هشتم: بهترین درخت تصمیم با بهترین مجموعه پارامترها به عنوان خروجی نهایی الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین شکل (۲) بلوک دیاگرام مراحل حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری ترکیب‌شده با درخت تصمیم را نشان می‌دهد.



شکل (۲): مراحل حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری ترکیب‌شده با درخت تصمیم

۴- روش حل مسئله

در این بخش از مقاله، روش حل مسئله بهینه‌سازی قیمت‌های تخصیص یافته به توان واحدهای تولید پراکنده متصل به شین‌های سیستم توزیع با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری ترکیب‌شده با درخت تصمیم ارائه شده است. شکل (۳) بلوک دیاگرام مراحل حل مسئله را نشان می‌دهد. مراحل حل مسئله به شرح زیر است:

مرحله اول: در این مرحله، اطلاعات مربوط به شبکه توزیع مورد مطالعه که شامل امپدانس خطوط سیستم توزیع، مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو شین‌ها، داده‌های قیمت بازار و قیود مربوط به مسئله هستند، تعریف می‌شوند.

مرحله دوم: در این مرحله، در اولین تکرار از الگوریتم، قیمت بازار برابر با ارزش قطعی آن در نظر گرفته می‌شود. این کار به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$price_{market} = price_{market,d} \quad (15)$$

$$price_{market} = [price_{market,d_{DG,1}}, price_{market,d_{DG,2}}, \dots, price_{market,d_{DG,NDG}}] \quad (16)$$

که در آن $price_{market,d}$ نشان‌دهنده ارزش قطعی قیمت بازار می‌باشد.

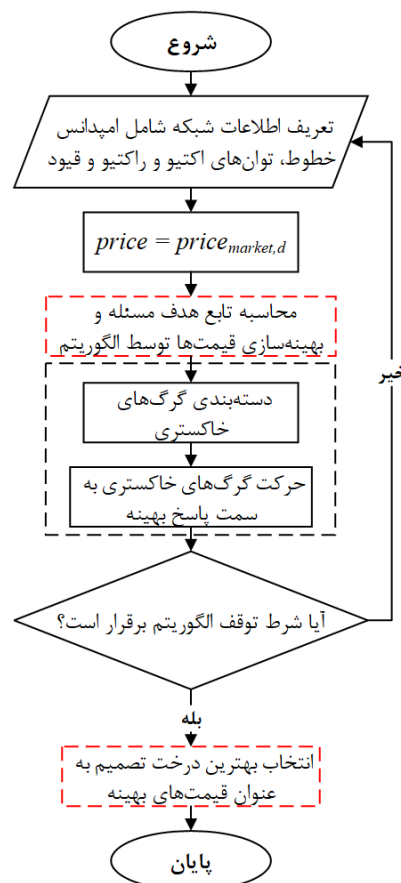


مرحله سوم: در این مرحله، پارامترهای در ابتدا پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری ترکیب شده با درخت تصمیم تعریف می‌شوند و سپس الگوریتم بهینه‌سازی به منظور بهینه‌سازی پاسخ‌ها برای تعیین مقادیر بهینه قیمت‌ها به کار گرفته می‌شود. این مرحله از الگوریتم با خط‌چین مشکی رنگ در شکل (۳) نشان داده شده است.

مرحله چهارم: در این مرحله، بهترین و بهینه‌ترین پاسخ‌ها برای مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود که برای انجام این کار مدل درخت تصمیم به الگوریتم کمک می‌کند. این مرحله با خط‌چین قرمز رنگ در شکل (۳) نشان داده شده است. هم‌چنین در این مرحله، بهینه‌سازی قیمت‌های نقطه‌ای واحدهای تولید پراکنده نیز انجام می‌شود و به هر واحد تولید پراکنده یک قیمت اختصاص می‌یابد.

مرحله پنجم: در این مرحله، شرط توقف الگوریتم بررسی می‌شود. اگر شرط توقف برقرار باشد، مرحله ششم اجرا می‌شود و در غیر این صورت، مراحل الگوریتم از مرحله سوم مجدداً تکرار می‌شوند.

مرحله ششم: بهترین درخت تصمیم با بهترین مجموعه پارامترها به عنوان قیمت‌های بهینه‌شده تخصیص یافته به واحدهای تولید پراکنده به عنوان داده‌های خروجی الگوریتم در نظر گرفته می‌شوند. این مرحله نیز با استفاده از خط‌چین قرمز رنگ در شکل (۳) نشان داده شده است.



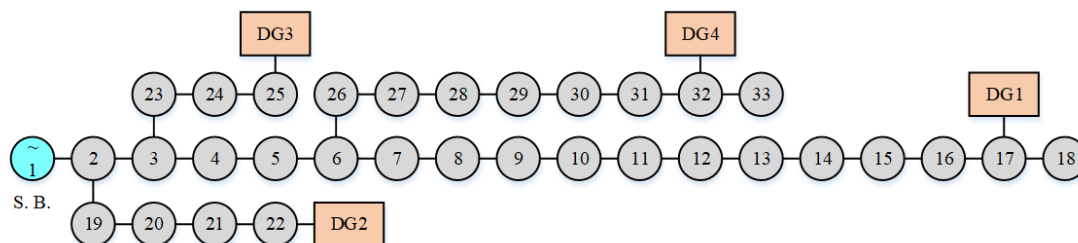
شکل (۳): بلوک دیاگرام حل مسئله بهینه‌سازی قیمت‌های توان واحدهای تولید پراکنده در سیستم توزیع با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری ترکیب شده با درخت تصمیم

۵- نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی برای دو سیستم توزیع تست ۳۳ و ۶۹ شینه IEEE ارائه شده‌اند که اطلاعات مربوط به این سیستم‌ها در [۱۹،۲۰] آورده شده است. هم‌چنین به منظور شبیه‌سازی از یک سیستم کامپیوتری با مشخصات زیر استفاده شده است: Intel® Core™ i5-3230M CPU @ 2.60GHz, 4GB of RAM, 512GB of SSD.

۵-۱- شبکه توزیع ۳۳ شینه

شکل (۴) سیستم توزیع ۳۳ شینه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، چهار واحد تولید پراکنده در شین‌های شماره ۱۷، ۲۲، ۲۵ و ۳۲ در این شبکه قرار داده شده‌اند. هم‌چنین در جدول (۱) مشخصات واحدهای تولید پراکنده موجود در این شبکه آورده شده است.



شکل (۳): سیستم توزیع ۳۳ شینه مورد مطالعه

جدول (۱): مشخصات واحدهای تولید پراکنده در سیستم توزیع ۳۳ شینه

ضرایب تابع هزینه			ضریب توان	مکان شین	ظرفیت کل (kW)	شماره واحد تولید پراکنده
c (\$)	b (\$/MW)	a (\$/MW ²)				
۰	۲۱	۰/۰۰۰۰۰۰۲۲	۰/۹ پیش‌فاز تا ۰/۹ پس‌فاز	۱۷	۸۰۰	۱
۰	۲۳	۰/۰۰۰۰۰۰۲۱	۰/۹ پیش‌فاز تا ۰/۹ پس‌فاز	۲۲	۸۰۰	۲
۰	۲۲	۰/۰۰۰۰۰۰۱۹	۰/۹ پیش‌فاز تا ۰/۹ پس‌فاز	۲۵	۸۰۰	۳
۰	۲۵	۰/۰۰۰۰۰۰۲۴	۰/۹ پیش‌فاز تا ۰/۹ پس‌فاز	۳۲	۸۰۰	۴

مقادیر قیمت‌های تخصیص‌یافته به واحدهای تولید پراکنده متصل به شین‌های سیستم توزیع ۳۳ شینه که توسط الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری ترکیب‌شده با درخت تصمیم بهینه شده‌اند، به همراه میانگین تابع هدف، انحراف معیار داده‌های حاصل شده از الگوریتم و تلفات کل شبکه به ازای ۳۰ تکرار از الگوریتم در قیمت اولیه ۲۸ دلار در جدول (۲) ارائه شده‌اند. هم‌چنین این مقادیر با به کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی گرگ خاکستری، ازدحام ذرات^{۱۰} و ژنتیک^{۱۱} برای حل مسئله در جدول (۲) ارائه شده‌اند و مقادیر حاصل از آن‌ها با مقادیر الگوریتم ارائه‌شده مقایسه شده‌اند.

جدول (۲): قیمت‌های اختصاص‌یافته به واحدهای تولید پراکنده و تلفات کل شبکه به ازای ۳۰ تکرار از الگوریتم‌های مختلف برای سیستم توزیع

۳۳ شینه در قیمت اولیه ۲۸ دلار

قیمت (\$/MWh)				تلفات کل (kW)	انحراف معیار (kW)	میانگین تابع هدف (kW)	الگوریتم
DG4	DG3	DG2	DG1				
۲۷/۸۳	۳۴/۰۹	۲۲/۷۸	۲۳/۷۱	۳۶/۱۹	۱/۹۸	۳۶/۱۲	ژنتیک [۲۱]
۲۸/۶۶	۳۴/۳۳	۲۳/۱۱	۲۴/۳۲	۳۴/۹۹	۱/۶۷	۳۴/۱۲	ازدحام ذرات [۲۲]
۳۰/۳۴	۳۴/۳۷	۲۵/۲۶	۲۷/۹۰	۳۲/۲۶	۰/۹۸	۳۱/۸۳	گرگ خاکستری
۳۱/۲۸	۳۶/۹۰	۲۷/۶۷	۳۰/۵۳	۳۱/۹۸	۰/۵۵	۳۱/۰۸	الگوریتم ارائه‌شده

همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، به کارگیری الگوریتم ارائه‌شده در مقاله یعنی الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری ترکیب‌شده با درخت تصمیم برای حل مسئله بهینه‌سازی قیمت‌های تخصیص‌داده‌شده به واحدهای تولید پراکنده در سیستم توزیع، دارای پاسخ‌های بهینه‌تری نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و گرگ خاکستری است و میانگین تابع هدف و انحراف معیار در الگوریتم ارائه‌شده در مقاله، دارای مقادیر کمتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر است.





بنابراین با در دست داشتن مقادیر قیمت‌های تخصیص یافته به واحدهای تولید پراکنده، می‌توان مقادیر سود این واحدها را محاسبه کرد. محاسبه سود از طریق رابطه زیر امکان پذیر است:

$$benefit_{DG,n} = price_{DG,n} \times capacity_{DG,n} - CF_{DG,n} \quad (17)$$

که در آن $benefit_{DG,n}$ مقدار سود n امین واحد تولید پراکنده است، $price_{DG,n}$ قیمت توان n امین واحد تولید پراکنده است و $capacity_{DG,n}$ نشان دهنده n امین واحد تولید پراکنده است. مقدار سود حاصل شده برای هر واحد تولید پراکنده یک مقدار مثبت است و هنگامی که مقدار سود برای یک واحد تولید پراکنده منفی شود، مقدار سود برای آن واحد تولید پراکنده برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۳) مقادیر سودهای حاصل شده برای واحدهای تولید پراکنده را برای هنگامی که قیمت اولیه بازار برابر با ۲۸ دلار است با به کارگیری الگوریتم‌های مختلف برای حل مسئله نشان می‌دهد.

جدول (۳): مقادیر سودهای واحدهای تولید پراکنده در قیمت اولیه ۲۸ دلار برای سیستم توزیع تست ۳۳ شینه

مقدار سود (\$)				الگوریتم
DG4	DG3	DG2	DG1	
۲/۲۵	۹/۶۵	۰	۲/۱۵	ژنتیک
۲/۹۱	۹/۸۵	۱/۴۶	۲/۶۴	ازدحام ذرات
۴/۲۶	۹/۸۸	۲/۵۹	۵/۵۱	گرگ خاکستری
۵/۰۱	۱۱/۹۱	۳/۷۲	۷/۶۱	الگوریتم ارائه شده

باید توجه شود که در جدول (۳)، حاصل شدن مقدار صفر برای مقدار سود واحدهای تولید پراکنده، مشابه واحد تولید پراکنده شماره ۲، به این معناست که سود محاسبه شده توسط رابطه (۱۷)، برای واحد تولید پراکنده مذکور دارای مقداری برابر صفر یا منفی است. در صورت حاصل شدن مقدار منفی برای سود واحدهای تولید پراکنده، مقدار سود برابر صفر در نظر گرفته می‌شود؛ چرا که در چنین شرایطی، ادامه فعالیت با زیان اقتصادی برای واحدهای تولید پراکنده منطقی نیست. علاوه بر این، باید توجه داشت که با داشتن مقدار سود منفی، واحدهای تولید پراکنده انگیزه‌ای برای مشارکت در بازار و عرضه توان نخواهند داشت. هم‌چنین، اگر سود منفی برای واحدهای تولید پراکنده در نظر گرفته شود، ممکن است برخی از این واحدها از مدار خارج شوند که می‌تواند پایداری و امنیت شبکه را تهدید کند. بنابراین، به طور کلی به منظور جلوگیری از فعالیت زیان‌ده، تشویق مشارکت بیشتر در بازار و نیز حفظ امنیت و پایداری سیستم، مقادیر سود منفی برای واحدهای تولید پراکنده برابر با صفر در نظر گرفته می‌شوند [۲۳].

به منظور مقایسه روش قیمت‌گذاری مورد استفاده در مقاله که روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای می‌باشد، قیمت‌های بهینه تخصیص یافته به واحدهای تولید پراکنده با به کارگیری این روش و روش‌های مرسوم دیگر از جمله تئوری بازی و روش مبتنی بر مشتق شبکه^{۱۲} با هم مقایسه شده‌اند. روند قیمت‌گذاری با استفاده از تئوری بازی به این صورت است که در آن، واحدهای تولید پراکنده به عنوان بازیکنان مسئله در نظر گرفته می‌شوند و برای هر بازیکن، یک تابع سود شامل درآمد و هزینه‌ها تعریف می‌شود که استراتژی هر بازیکن میزان توان تولیدی آن است و سپس در نهایت با حل بازی و یافتن تعادل نش^{۱۳}، سطح تولید بهینه هر واحد و قیمت لحظه‌ای برق در هر نقطه از سیستم مشخص می‌شود [۲۴]. هم‌چنین در روش مبتنی بر مشتق شبکه، قیمت لحظه‌ای برق در هر شین از سیستم توزیع که به آن واحد تولید پراکنده متصل شده است، از طریق محاسبه مشتقات جریان‌های شاخه‌ها نسبت به تغییرات تولید در هر شین، تعیین می‌شود [۲۵]. جدول (۴) مجموع مقادیر سود حاصل شده از واحدهای تولید پراکنده را با استفاده از روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای در برابر روش‌های تئوری بازی و مشتق شبکه به همراه زمان لازم برای شبیه‌سازی مسئله با استفاده از این روش‌ها نشان می‌دهد که بهینه‌سازی قیمت‌های تخصیص یافته به واحدهای تولید پراکنده در این روش‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهبود یافته که در مقاله ارائه شده است، انجام شده است. مجموع مقادیر سود حاصل شده از واحدهای تولید پراکنده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$benefit_{total} = \sum_{n=1}^{N_{DG}} benefit_{DG,n} \quad (18)$$



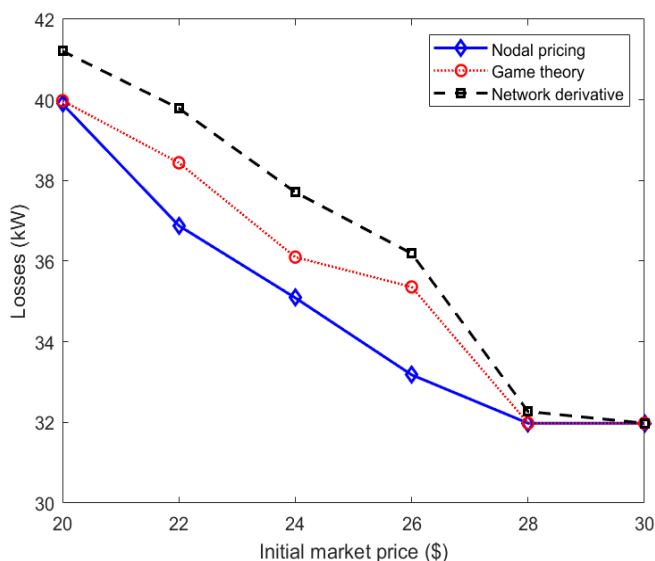
که در آن، $benefit_{total}$ نشان‌دهنده مقدار کل سود حاصل شده از تمامی واحدهای تولید پراکنده متصل به شین‌های سیستم توزیع می‌باشد.

جدول (۴): مقدار کل سود واحدهای تولید پراکنده در سیستم توزیع ۳۳ شینه با به کارگیری روش‌های مختلف قیمت‌گذاری به همراه زمان

شبیه‌سازی آن‌ها		
روش	مقدار کل سود (\$)	زمان شبیه‌سازی (ثانیه)
مشتق شبکه	۲۴/۱۸	۱۱۳/۲۷
تئوری بازی	۲۶/۷۶	۹۰/۱۰
قیمت‌گذاری نقطه‌ای	۲۸/۲۵	۶۵/۱۱

همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، مقدار کل سود حاصل شده از تمامی واحدهای تولید پراکنده، با به کارگیری روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای برای حل مسئله، دارای مقدار بیشتری نسبت به روش‌های قیمت‌گذاری مبتنی بر تئوری بازی و مشتق شبکه است که حاکی از موثر واقع شدن روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای در حل مسئله می‌باشد. علاوه بر این، زمان شبیه‌سازی مسئله با به کارگیری روش تئوری بازی، ۱/۳۸ برابر و با به کارگیری روش مشتق شبکه، ۱/۷۴ برابر زمان شبیه‌سازی مسئله با به کارگیری روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای است که نشان‌دهنده سرعت بالای این روش در مقایسه با دو روش دیگر می‌باشد.

شکل (۴)، تلفات کل حاصل شده برای شبکه توزیع ۳۳ شینه که توسط ۱۰۰ تکرار الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهبودیافته بهینه شده است را به ازای شش مقدار مختلف برای قیمت اولیه بازار با به کارگیری روش‌های قیمت‌گذاری نقطه‌ای، تئوری بازی و مشتق شبکه نشان می‌دهد.



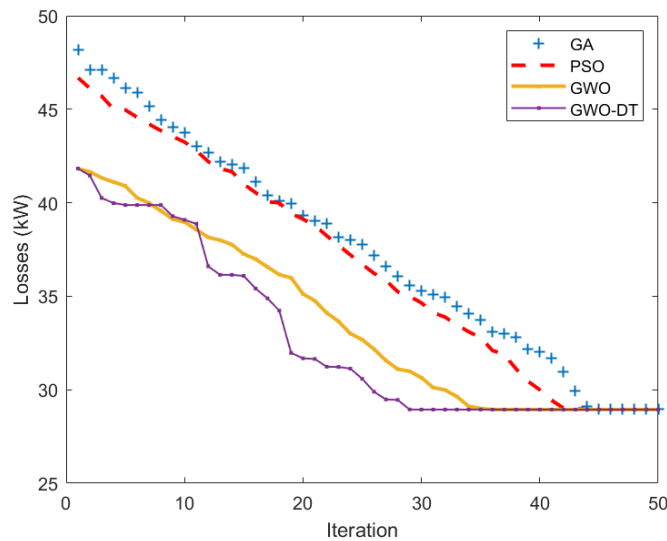
شکل (۴): تلفات کل حاصل شده برای شبکه توزیع ۳۳ شینه با به کارگیری روش‌های قیمت‌گذاری نقطه‌ای در مقایسه با روش‌های تئوری بازی و مشتق شبکه به ازای قیمت‌های اولیه مختلف برای بازار

نتایج به دست آمده در شکل (۴) نشان می‌دهد که مقدار تلفات کل حاصل شده برای سیستم توزیع ۳۳ شینه با به کارگیری روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای در مقایسه با روش‌های تئوری بازی و مشتق شبکه کمتر است. به عنوان مثال، هنگامی که قیمت اولیه بازار برابر با ۲۲ دلار است، تلفات کل حاصل شده با استفاده از روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای برابر ۳۶/۸۸ kW است و این در حالی است که تلفات کل حاصل شده با استفاده از روش‌های تئوری بازی و مشتق شبکه به ترتیب مقادیری برابر با ۳۶/۴۴ kW و ۳۹/۷۹ kW دارد. قابل به ذکر است همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، با افزایش قیمت اولیه بازار، تلفات کل شبکه کاهش پیدا می‌کند؛ چرا که با افزایش قیمت





اولیه بازار، استفاده از واحدهای تولید پراکنده افزایش می‌یابد و به همین دلیل، انگیزه واحدهای تولید پراکنده در سیستم توزیع برای تولید توان بیشتر شده که این امر باعث کاهش انتقال توان می‌گردد و در نتیجه، تلفات کل شبکه توزیع کاهش می‌یابد. علاوه بر این، شکل (۵) فرایند همگرایی تلفات شبکه توزیع نسبت به تعداد دفعات تکرار الگوریتم را با به کارگیری الگوریتم ارائه شده در مقاله در مقابل الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و گرگ خاکستری به ازای ۵۰ تکرار از الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است، سرعت همگرایی در الگوریتم ارائه شده در مقاله نسبت به الگوریتم‌های دیگر بیشتر است؛ چرا که همگرایی تابع هدف با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری ترکیب شده با درخت تصمیم در ۳۱ امین تکرار الگوریتم رخ داده است که از این تکرار به بعد، تلفات شبکه برابر با $28/94kW$ می‌باشد. هم‌چنین همگرایی تابع هدف مسئله برای الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و گرگ خاکستری به ترتیب در تکرارهای ۱۴۶، ۱۴۵ و ۱۳۷ رخ می‌دهد. بنابراین استفاده از الگوریتم ارائه شده در مقاله، سرعت و دقت حل مسئله افزایش پیدا می‌کند.



شکل (۵): فرایند همگرایی تابع هدف مسئله به ازای ۵۰ تکرار از الگوریتم‌های مختلف برای سیستم توزیع ۳۳ شینه در قیمت اولیه ۲۸ دلار

تعیین جمعیت اولیه مناسب برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌تواند در حاصل شدن پاسخ بهینه توسط الگوریتم موثر باشد. جدول (۵) تلفات کل شبکه به ازای جمعیت‌های اولیه متفاوت از الگوریتم‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، الگوریتم ارائه شده در مقاله بر خلاف سایر الگوریتم‌ها به ازای تعداد جمعیت اولیه ۴۰۰، به پاسخ بهینه رسیده است و تلفات شبکه به ازای این تعداد جمعیت اولیه برابر با $28/94kW$ می‌باشد و این در حالی است که پاسخ بهینه با به کارگیری الگوریتم گرگ خاکستری در تعداد جمعیت اولیه ۱۰۰۰ به دست می‌آید و بهینه‌ترین پاسخ برای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک، به ترتیب برابر با $29/47kW$ و $29/83kW$ هستند که به ازای تعداد جمعیت اولیه ۱۰۰۰ حاصل شده‌اند.

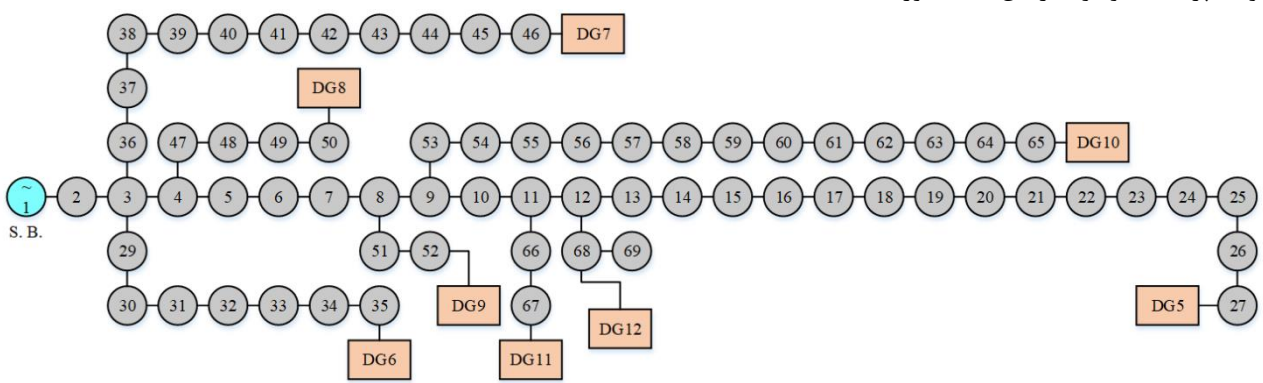
جدول (۵): تلفات شبکه به ازای تعداد جمعیت‌های متفاوت از الگوریتم‌ها برای سیستم توزیع ۳۳ شینه در قیمت اولیه ۲۸ دلار

تعداد جمعیت اولیه							الگوریتم
۱۰۰۰	۷۰۰	۵۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۵۰	
۲۹/۸۳	۳۱/۰۷	۳۱/۶۷	۳۲/۵۵	۳۴/۱۸	۳۵/۱۰	۳۵/۷۳	ژنتیک
۲۹/۴۷	۳۰/۹۷	۳۱/۱۱	۳۲/۱۲	۳۴/۰۴	۳۴/۸۳	۳۴/۸۵	ازدحام ذرات
۲۸/۹۴	۲۹/۸۳	۲۹/۸۷	۲۹/۸۷	۳۰/۹۷	۳۱/۰۶	۳۱/۹۳	گرگ خاکستری
۲۸/۹۴	۲۸/۹۴	۲۸/۹۴	۲۸/۹۴	۳۰/۳۱	۳۰/۹۷	۳۱/۱۸	الگوریتم ارائه شده



۵-۲- شبکه توزیع ۶۹ شینه

شکل (۶) سیستم توزیع ۶۹ شینه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، هشت واحد تولید پراکنده در شین‌های شماره ۲۷، ۳۵، ۴۶، ۵۰، ۵۲، ۶۵، ۶۷ و ۶۸ در این شبکه قرار داده شده‌اند. هم‌چنین در جدول (۶) مشخصات واحدهای تولید پراکنده موجود در این شبکه آورده شده است.



شکل (۶): سیستم توزیع ۶۹ شینه مورد مطالعه

جدول (۶): مشخصات واحدهای تولید پراکنده در سیستم توزیع ۶۹ شینه

ضرایب تابع هزینه			ضریب توان	مکان شین	ظرفیت کل (kW)	شماره واحد تولید پراکنده
c (\$)	b (\$/MW)	a (\$/MW ²)				
۰	۲۶	۰/۰۰۰۰۰۲۳	۰/۸۶ پیش‌فاز تا ۰/۸۶ پس‌فاز	۲۷	۱۳۰۰	۵
۰	۲۴	۰/۰۰۰۰۰۲۵	۰/۸۶ پیش‌فاز تا ۰/۸۶ پس‌فاز	۳۵	۱۳۰۰	۶
۰	۲۹	۰/۰۰۰۰۰۲۳	۰/۸۶ پیش‌فاز تا ۰/۸۶ پس‌فاز	۴۶	۱۳۰۰	۷
۰	۲۴	۰/۰۰۰۰۰۲۵	۰/۸۶ پیش‌فاز تا ۰/۸۶ پس‌فاز	۵۰	۱۳۰۰	۸
۰	۲۵	۰/۰۰۰۰۰۲۵	۰/۸۶ پیش‌فاز تا ۰/۸۶ پس‌فاز	۵۲	۱۳۰۰	۹
۰	۲۷	۰/۰۰۰۰۰۲۵	۰/۸۶ پیش‌فاز تا ۰/۸۶ پس‌فاز	۶۵	۱۳۰۰	۱۰
۰	۲۷	۰/۰۰۰۰۰۲۵	۰/۸۶ پیش‌فاز تا ۰/۸۶ پس‌فاز	۶۷	۱۳۰۰	۱۱
۰	۲۵	۰/۰۰۰۰۰۲۵	۰/۸۶ پیش‌فاز تا ۰/۸۶ پس‌فاز	۶۸	۱۳۰۰	۱۲

جدول (۷): قیمت‌های اختصاص یافته به واحدهای تولید پراکنده و تلفات کل شبکه به ازای ۳۰ تکرار از الگوریتم‌های مختلف برای سیستم توزیع ۶۹ شینه در قیمت اولیه ۲۸ دلار

قیمت (\$/MWh)								تلفات کل (kW)	انحراف معیار (kW)	میانگین تابع هدف (kW)	الگوریتم
DG12	DG11	DG10	DG9	DG8	DG7	DG6	DG5				
۲۳/۱۳	۲۲/۱۸	۳۲/۳۰	۳۱/۱۲	۳۰/۴۸	۳۰/۹۷	۲۷/۴۸	۲۳/۹۸	۱۱۸/۹۷	۱/۹۸	۹۳/۱۱	ژنتیک
۲۳/۴۴	۲۲/۷۱	۳۲/۳۳	۳۱/۵۳	۳۰/۵۲	۳۱/۵۰	۲۷/۵۲	۲۴/۱۳	۱۰۳/۰۸	۱/۹۶	۹۲/۳۹	ازدحام ذرات
۲۳/۹۱	۲۵/۱۹	۳۲/۹۸	۳۱/۹۹	۳۱/۱۵	۳۲/۰۰	۲۸/۱۹	۲۴/۱۵	۸۴/۵۶	۱/۸۸	۹۱/۳۶	گرگ خاکستری
۲۷/۶۸	۲۶/۳۶	۳۵/۶۷	۳۲/۶۸	۳۱/۱۹	۳۳/۶۹	۳۰/۳۹	۳۱/۱۱	۸۴/۵۶	۰/۲۷	۹۰/۱۰	الگوریتم ارائه‌شده

جدول (۷) مقادیر قیمت‌های تخصیص یافته به واحدهای تولید پراکنده به همراه میانگین تابع هدف و انحراف معیار داده‌ها را برای حل مسئله با استفاده از الگوریتم ارائه‌شده در مقاله و مقایسه آن با دیگر الگوریتم‌ها به ازای ۳۰ تکرار از الگوریتم‌ها، هنگامی که قیمت اولیه بازار برابر با ۲۸ دلار است، نشان می‌دهد. همان گونه که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، الگوریتم ارائه‌شده در مقاله پاسخ‌های بهینه‌تری را ارائه می‌کند و علاوه بر آن، دارای میانگین و انحراف معیار کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها است. هم‌چنین تلفات کل شبکه با به کارگیری الگوریتم ارائه‌شده برای حل مسئله، دارای مقدار کمتری می‌باشد.





بنابراین مقادیر سود واحدهای تولید پراکنده در قیمت اولیه ۲۸ دلار برای بازار مطابق جدول (۸) می‌باشد.

جدول (۸): مقادیر سودهای واحدهای تولید پراکنده در قیمت اولیه ۲۸ دلار برای سیستم توزیع تست ۶۹ شینه

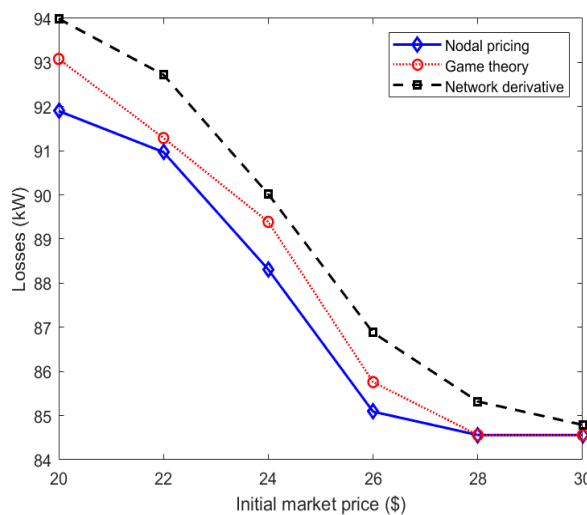
مقدار سود (\$)								الگوریتم
DG12	DG11	DG10	DG9	DG8	DG7	DG6	DG5	
۰	۰	۶/۸۵	۷/۹۱	۸/۳۸	۲/۵۲	۴/۴۸	۰	ژنتیک
۰	۰	۶/۸۹	۸/۴۵	۸/۴۳	۳/۲۱	۴/۵۳	۰	ازدحام ذرات
۰	۰	۷/۷۳	۹/۰۴	۹/۲۵	۳/۸۶	۵/۴۰	۰	گرگ خاکستری
۰/۳۴	۰/۰۳	۱۱/۲۳	۹/۹۴	۹/۳۰	۶/۰۶	۹/۲۰	۰/۶۶	الگوریتم ارائه شده

علاوه بر این، جدول (۹)، مقادیر کل سود حاصل شده از تمامی واحدهای تولید پراکنده با به کارگیری روش قیمت گذاری نقطه‌ای برای حل مسئله در برابر روش‌های تئوری بازی و مشتق شبکه به همراه زمان شبیه‌سازی آن‌ها را برای سیستم توزیع ۶۹ شینه نشان می‌دهد. قابل ذکر است که نتایج حاصل شده در جدول (۹) از طریق الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهبود یافته که در مقاله ارائه شده است، به دست آمده‌اند.

جدول (۹): مقدار کل سود واحدهای تولید پراکنده در سیستم توزیع ۶۹ شینه با به کارگیری روش‌های مختلف قیمت گذاری به همراه زمان

شبیه‌سازی آن‌ها		
روش	مقدار کل سود (\$)	زمان شبیه‌سازی (ثانیه)
مشتق شبکه	۴۱/۷۷	۱۳۳/۲۰
تئوری بازی	۴۳/۰۹	۸۸/۳۱
قیمت گذاری نقطه‌ای	۴۶/۷۶	۷۴/۰۹

شکل (۷) تلفات حاصل شده برای شبکه توزیع ۶۹ شینه را با به کارگیری روش قیمت گذاری نقطه‌ای برای حل مسئله در برابر روش‌های تئوری بازی و مشتق شبکه به ازای شش مقدار مختلف برای قیمت اولیه بازار نشان می‌دهد.



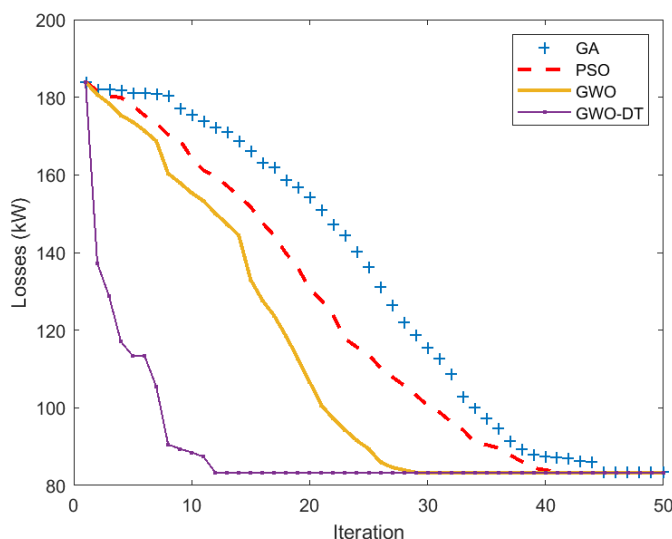
شکل (۷): تلفات کل حاصل شده برای شبکه توزیع ۶۹ شینه با به کارگیری روش‌های قیمت گذاری نقطه‌ای در مقایسه با روش‌های تئوری بازی و مشتق شبکه به ازای قیمت‌های اولیه مختلف برای بازار

همان‌طور که در شکل (۷) مشهود است، به عنوان نمونه به ازای قیمت اولیه ۲۶ دلار برای بازار، تلفات کل حاصل شده برای شبکه توزیع ۶۹ شینه با به کارگیری روش قیمت گذاری نقطه‌ای برای حل مسئله برابر با ۸۵/۰۹ kW می‌باشد و این در حالی است که مقدار تلفات کل



حاصل شده برای شیمه با به کارگیری روش های تئوری بازی و مشتت شبکه برای حل مسئله به ترتیب برابر با $86/88kW$ و $85/76kW$ است و این نشان دهنده موثر واقع شدن روش قیمت گذاری نقطه ای برای حل مسئله در مقایسه با روش های تئوری بازی و مشتق شبکه است.

هم چنین شکل (۸) فرایند همگرایی تلفات شبکه بر حسب تعداد تکرار الگوریتم ها را به ازای ۵۰ تکرار از الگوریتم ها در قیمت اولیه ۲۸ دلار برای بازار برای سیستم توزیع ۶۹ شینه نشان می دهد.



شکل (۸): فرایند همگرایی تابع هدف مسئله به ازای ۵۰ تکرار از الگوریتم های مختلف برای سیستم توزیع ۶۹ شینه در قیمت اولیه ۲۸ دلار

همان طور که در شکل (۸) مشاهده می شود، به کارگیری الگوریتم ارائه شده برای حل مسئله، سرعت همگرایی بیشتری را به همراه دارد؛ چرا که در روش ارائه شده، همگرایی تابع هدف در تکرار ۱۲ام از الگوریتم رخ داده است که در آن تلفات شبکه برابر با مقدار $83/33kW$ می باشد و این در حالی است که همگرایی تابع هدف برای الگوریتم های ژنتیک، ازدحام ذرات و گرگ خاکستری به ترتیب در تکرارهای ۱۴۵، ۱۴۱ و ۱۲۹ام از این الگوریتم ها رخ داده است.

هم چنین مقدار تابع هدف مسئله به ازای تعداد جمعیت اولیه متفاوت برای الگوریتم ارائه شده در مقایسه با سایر الگوریتم ها در قیمت اولیه ۲۸ دلار برای بازار به ازای ۱۰۰ تکرار از الگوریتم ها برای سیستم توزیع ۶۹ شینه در جدول (۱۰) آورده شده است.

جدول (۱۰): تلفات شبکه به ازای تعداد جمعیت های متفاوت از الگوریتم ها برای سیستم توزیع ۶۹ شینه در قیمت اولیه ۲۸ دلار

تعداد جمعیت اولیه							الگوریتم
۱۰۰۰	۷۰۰	۵۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۵۰	
۸۶/۰۶	۸۷/۱۵	۸۸/۸۳	۸۸/۸۳	۸۹/۷۹	۸۹/۷۹	۸۹/۷۹	ژنتیک
۸۵/۴۹	۸۶/۶۱	۸۷/۶۶	۸۷/۶۶	۸۸/۰۲	۸۸/۵۸	۸۹/۰۹	ازدحام ذرات
۸۳/۳۳	۸۳/۸۶	۸۳/۸۶	۸۴/۱۱	۸۴/۱۱	۸۴/۹۳	۸۶/۵۸	گرگ خاکستری
۸۳/۳۳	۸۳/۳۳	۸۳/۳۳	۸۳/۳۳	۸۳/۳۳	۸۳/۷۴	۸۵/۱۵	الگوریتم ارائه شده

جدول (۱۰) نشان می دهد که تابع هدف مسئله که همان مقدار کمینه تلفات در شبکه توزیع بوده است، با بهینه سازی توسط الگوریتم ارائه شده، با داشتن تعداد جمعیت اولیه ۳۰۰ به مقدار بهینه خود رسیده است که این مقدار برابر با $83/33kW$ می باشد و این در حالی است که الگوریتم گرگ خاکستری، پاسخ بهینه را به ازای جمعیت اولیه ۱۰۰۰ ارائه کرده است و مقدار پاسخ بهینه برای الگوریتم های ژنتیک و ازدحام ذرات به ترتیب برابر با $85/49kW$ و $86/06kW$ بوده است که به ازای تعداد جمعیت اولیه ۱۰۰۰ ارائه شده اند.





۵-۳- زمان شبیه‌سازی حل مسئله با به کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی متفاوت

به منظور مقایسه زمان شبیه‌سازی مسئله، شبیه‌سازی به تعداد ۱۰۰۰ بار اجرا شده است و از زمان شبیه‌سازی این ۱۰۰۰ بار تکرار، میانگین گرفته شده است. جدول (۱۱) میانگین زمان شبیه‌سازی مسئله به ازای ۱۰۰۰ بار تکرار برای الگوریتم ارائه‌شده را در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای هر دو سیستم‌های ۳۳ و ۶۹ شینه تحت مطالعه نشان می‌دهد.

جدول (۱۱): میانگین زمان شبیه‌سازی حل مسئله

الگوریتم بهینه‌سازی	زمان شبیه‌سازی برای سیستم توزیع ۳۳ شینه (ثانیه)	زمان شبیه‌سازی برای سیستم توزیع ۶۹ شینه (ثانیه)
ژنتیک	۸۵/۱۹	۱۰۸/۳۱
ازدحام ذرات	۷۴/۳۴	۸۸/۱۱
گرگ خاکستری	۷۳/۰۶	۸۰/۲۵
الگوریتم ارائه‌شده	۶۵/۱۱	۷۴/۰۹

مطابق جدول (۹) زمان شبیه‌سازی حل مسئله با به کارگیری الگوریتم ارائه‌شده برای سیستم توزیع ۳۳ شینه برابر با ۶۵/۱۱ ثانیه و برای سیستم توزیع ۶۹ شینه برابر ۷۴/۰۹ ثانیه بوده که این زمان از سایر الگوریتم‌ها کمتر است و این نشان‌دهنده سرعت بالای الگوریتم بهینه‌سازی ارائه‌شده در مقاله برای حل مسئله می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک الگوریتم جدید به منظور افزایش سودآوری واحدهای تولید پراکنده متصل به شین‌های سیستم توزیع ارائه‌شد. الگوریتم ارائه‌شده مبتنی بر کاهش تلفات سیستم‌های توزیع بوده و به طور هم‌زمان، افزایش مقدار سود برای مالکان واحدهای تولید پراکنده متصل‌شده به شین‌های سیستم توزیع را به همراه دارد. به منظور قیمت‌گذاری توان واحدهای تولید پراکنده از روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای در این مقاله استفاده شده است که نسبت به سایر روش‌های قیمت‌گذاری دارای سرعت و دقت بالاتری می‌باشد. هم‌چنین یک ضریب تحت عنوان ضریب جریمه به منظور جلوگیری از تغییرات قیمت بازار تعریف شده است. علاوه بر این، به منظور بهینه‌سازی قیمت‌های نقطه‌ای اختصاص‌یافته به واحدهای تولید پراکنده، از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری ترکیب‌شده با مدل یادگیری ماشین درخت تصمیم استفاده شده است. مدل درخت تصمیم می‌تواند بهترین و بهینه‌ترین پاسخ‌ها را در هر تکرار از الگوریتم شناسایی کند و از همان داده‌ها برای آموزش خود در تکرارهای بعدی الگوریتم استفاده نماید. الگوریتم ارائه‌شده در مقاله در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها دارای پاسخ‌های دقیق‌تر و بهینه‌تری است و علاوه بر این، سرعت همگرایی تابع هدف در الگوریتم ارائه‌شده بیشتر از الگوریتم‌های دیگر است. تعیین تعداد جمعیت اولیه مناسب برای الگوریتم بهینه‌سازی، می‌تواند یک عامل مهم در روند بهینه‌سازی تلقی شود که الگوریتم ارائه‌شده در مقاله با داشتن تعداد جمعیت کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها، می‌تواند به پاسخ بهینه دست پیدا کند. هم‌چنین زمان شبیه‌سازی حل مسئله با به کارگیری روش ارائه‌شده از سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی کمتر است که این نشان‌دهنده سرعت روش ارائه‌شده در حل مسئله بهینه‌سازی قیمت‌های نقطه‌ای برای واحدهای تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع و کمینه کردن تلفات شبکه به عنوان تابع هدف مسئله است. علاوه بر این، روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای با روش‌های تئوری بازی و مشتق شبکه برای قیمت‌گذاری تولن واحدهای تولید پراکنده در سیستم توزیع با هم مقایسه شدند و مشاهده شد که در قیمت‌های اولیه گوناگون بازار، تلفات کل حاصل‌شده برای شبکه توزیع، با به کارگیری روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای، کمتر از مقدار تلفات کل حاصل‌شده با به کارگیری روش‌های تئوری بازی و مشتق شبکه است و هم‌چنین زمان شبیه‌سازی روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای کمتر است و دارای سرعت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. به منظور مطالعات و تحقیقات آینده، در نظر گرفتن و مدلسازی عدم قطعیت در قیمت بازار و توان خروجی واحدهای تولید پراکنده، در نظر گرفتن قید آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط واحدهای تولید پراکنده و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدید و مقایسه با الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله پیشنهاد می‌گردد.



- [1] M. Dehghani, M. Ghiasi, T. Niknam, A. Kavousi-Fard, M. Shasadeghi, N. Ghadimi, F. Taghizadeh-Hesary, "Blockchain-Based Securing of Data Exchange in a Power Transmission System Considering Congestion Management and Social Welfare," *Sustainability*, vol. 13, no. 90, pp. 1-21, December 2020, doi: 10.3390/su13010090.
- [2] H. M. Alzoubi, G. Ahmed, A. Al-Gasaymeh, B. Al Kurdi, "Empirical study on sustainable supply chain strategies and its impact on competitive priorities: The mediating role of supply chain collaboration," *Management Science Letters*, vol. 10, no. 3, pp. 703-708, September 2019, doi: 10.5266/j.msl.2019.9.008.
- [3] H. Abdeltawab and Y. A. -R. I. Mohamed, "Energy Storage Planning for Profitability Maximization by Power Trading and Ancillary Services Participation," *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 1909-1920, June 2022, doi: 10.1109/JSYST.2021.3069671.
- [4] B. Zaker, "A New Dynamic Equivalent Model for Microgrids Including Distributed Generation Units and Static Compensators," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 3, no. 1, pp. 1-16, October 2023, doi: 10.30486/teeges.2023.1997093.1095.
- [5] M. Farhangnia, M. Haghighatdar-Fesharaki, "Peek Shaving of Industrial Customers through Combined Installation of Photovoltaic Power Plant and Energy Storage System," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 3, no. 1, pp. 17-32, February 2024, doi: 10.30486/teeges.2023.1997093.1095.
- [6] M. Rostamnia, M. S. Rostamnia, E. Heydarian-Forushani, S. F. Zarei, S. H. Hosseianian, "Decentralized Agent-Based Protection Coordination for Distribution Networks with Renewable Distributed Generations using Intelligent Electronic Devices," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 3, pp. 54-75, November 2023, doi: 10.30486/teeges.2023.1986361.1072.
- [7] P. M. Sotkiewicz and J. M. Vignolo, "The value of intermittent wind DG under Nodal Prices and Amp-mile Tariffs," *2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)*, Montevideo, Uruguay, 2012, pp. 1-7, doi: 10.1109/TDC-LA.2012.6319114.
- [8] P. M. Sotkiewicz and J. M. Vignolo, "Nodal pricing for distribution networks: efficient pricing for efficiency enhancing DG," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 1013-1014, May 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.873006.
- [9] S. A. M. Lahaghi, E. Azad-Farsani, "A risk-averse approach for distribution locational marginal price calculation in electrical distribution networks," *Energy*, vol. 291, March 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.130383.
- [10] R. Tang, S. Wang, H. Li "Game theory based interactive demand side management responding to dynamic pricing in price-based demand response of smart grids," *Applied Energy*, vol. 250, September 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.177.
- [11] E. Azad-Farsani, I. Goroohi Sardou, S. Abedini, "Distribution Network Reconfiguration based on LMP at DG connected busses using game theory and self-adaptive FWA," *Energy*, vol. 291, January 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119146.
- [12] D. Rabah, C. Abdelghani, H. Abdelchafik, "Efficiency of some optimization approaches with the charge simulation method for calculating the electric field under extra high voltage power lines." *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 17, November 2017, pp. 4167-4174, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1297.
- [13] M. Zhou, T. Hu, K. Bian, W. Lai, F. Hu, O. Hamrani, Z. Zhu, "Short-Term Electric Load Forecasting Based on Variational Mode Decomposition and Grey Wolf Optimization." *Energies*, vol. 14, no. 16, August 2021, doi: 10.3390/en14164890.
- [14] B. Dey, B. Bhattacharyya, R. Devarapalli, "A novel hybrid algorithm for solving emerging electricity market problem of microgrid," *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 36, no. 2, pp. 919-961, November 2020, doi: 10.1002/int.22326.
- [15] K. Bhatia, R. Mittal, J. Varanasi, M. M. Tripathi, "An ensemble approach for electricity price forecasting in markets with renewable energy sources," *Utilities Policy*, vol. 70, June 2021, doi: 10.1016/j.jup.2021.101185.





- [16] W. Yang, J. Wang, T. Niu, P. Du, "A novel system for multi-step electricity price forecasting for electricity market management," *Applied Soft Computing*, vol. 88, March 2020, doi: 10.1016/j.asacp.2019.106029.
- [17] F. B. Ozsoydan, "Effects of dominant wolves in grey wolf optimization algorithm," *Applied Soft Computing*, vol. 83, October 2019, doi: 10.1016/j.asacp.2019.105658.
- [18] Y. Y. Song, Y. Lu, "Decision tree methods: applications for classification and prediction," *Shanghai Arch Psychiatry*, vol. 27, no. 2, pp. 130-135, April 2015, doi: 10.11919/j.issn.1002-0829.215044.
- [19] S. H. Dolatabadi, M. Ghorbanian, P. Siano and N. D. Hatziargyriou, "An Enhanced IEEE 33 Bus Benchmark Test System for Distribution System Studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 3, pp. 2565-2572, May 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3038030.
- [20] S. Ghosh, Y. J. Isbeih and M. S. E. Moursi, "Assessment of Bus Inertia to Enhance Dynamic Flexibility of Hybrid Power Systems With Renewable Energy Integration," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 4, pp. 2372-2386, August 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2023.3241721.
- [21] W. Qi, N. Zhang, G. Zong, S. -F. Su, H. Yan and R. -H. Yeh, "Event-Triggered SMC for Networked Markov Jumping Systems With Channel Fading and Applications: Genetic Algorithm," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 53, no. 10, pp. 6503-6515, October 2023, doi: 10.1109/TCYB.2023.3253701.
- [22] C. Srinivas, V. Bhargavi, N. S. Babu, P. Harika and P. Kranthi, "Minimization of Power Losses in the Distribution System by Controlling Tap Changing Transformer using the PSO Algorithm," *2023 International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT)*, Bengaluru, India, 2023, pp. 740-745, doi: 10.1109/IDCIoT56793.2023.10053479.
- [23] F. Olsina, F. Graces, H. J. Haubrich, "Modeling long-term dynamics of electricity markets," *Energy Policy*, vol. 34, no. 12, pp. 1411-1433, August 2006, doi: 10.1016/j.enpol.2004.11.003.
- [24] M. H. Nazari, M. Bagheri Sanjareh, A. Khodadadi, M. Torkashvand, S. H. Hosseini, "An economy-oriented DG-based scheme for reliability improvement and loss reduction of active distribution network based on game-theoretic sharing strategy," *Sustainable Energy, Grids and Network*, vol. 27, September 2021, doi: 10.1016/j.segan.2021.100514.
- [25] K. Zhang, S. Hanif, C. M. Hackl, T. Hamacher, "A Framework for Multi-Regional Real-Time Pricing in Distribution Grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 6, pp. 6826-6838, November 2019, doi: 10.1109/TSG.2019.2911996.

زیر نویس ها

-
- ¹ Distributed generation (DG)
² Nodal pricing
³ Information gap decision theory
⁴ Game theory
⁵ Metaheuristic algorithms
⁶ Modified grey wolf optimization (MGWO)
⁷ Decision tree (DT)
⁸ Machine learning
⁹ Power factor
¹⁰ Particle swarm optimization (PSO)
¹¹ Genetic algorithm (GA)
¹² Network derivative method
¹³ Nash equilibrium

