پخش بار بهینه مبتنی‌بر الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری با استفاده از استخراج توابع چگالی احتمال با درنظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی

عباس چهارلنگ[۱]، علی درویش فالحی[۲*]، حسین توپچی‌زاده[۱]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق، دانشکده فنی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
*۲- استادیار گروه برق، واحد شادگان، دانشگاه آزاد اسلامی، شادگان، ایران ،a_darvishfalehi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵

چکیده: در سالیان اخیر استفاده از واحدهای تولیدی تجدیدپذیر گسترش زیادی در سیستم‌های قدرت داشته است. یکی از پرکاربردترین واحدهای تجدیدپذیر، واحدهای مبتنی بر انرژی باد می‌باشند. به دلیل استفاده از انرژی باد جهت تولید انرژی الکتریکی، توربین‌های بادی هیچ‌گونه آلایندگی به محیط زیست منتشر نمی‌کنند. در نتیجه استفاده از این واحدها علاوه بر فوائد اقتصادی، از منظر زیست‌محیطی نیز بسیار مورد توجه قرار دارد. با این وجود عدم قطعیت در توان تولیدی این واحدها که ناشی از ماهیت نوسانی سرعت باد است، مشکلاتی را در بهره‌برداری از سیستم قدرت از جمله در مسئله پخش بار بهینه (OPF) ایجاد کرده است. در این مقاله برای در نظر گرفتن عدم قطعیت توان تولیدی واحدهای بادی، به جای استفاده از توابع توزیع احتمال از پیش تعیین شده همچون توزیع ویبول، از توابع چگالی احتمال استخراج شده بر اساس اطلاعات پیشین واحدهای بادی استفاده شده است. مسئله پخش بار بهینه به صورت یک مسئله بهینه‌سازی تصادفی با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری شبکه مدلسازی شده است. جهت مدلسازی شبکه قدرت، از قیود پخش بار مستقیم استفاده شده است. به منظور ارزیابی روش فوق، سناریوهای عدم قطعیت به دو دسته سناریوهای نمونه و تست تقسیم‌بندی شده و عملکرد شبکه در سناریوهای نمونه، توسط سناریوهای تست ارزیابی خواهد شد. برای حل مسئله بهینه‌سازی فوق، از روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری با گام تصادفی (RWGWO) استفاده شده است. شبیه‌سازی روش فوق در نرم‌افزار MATLAB روی دو شبکه تست ۳۰ و ۱۱۸ شینه IEEE انجام گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیان‌گر این است که استفاده از تابع چگالی احتمال استخراج شده سازگاری بیشتری با شرایط واقعی شبکه قدرت داشته و در نتیجه در مقایسه با تابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده، هزینه‌های شبکه را کاهش داده است.

واژه‌های کلیدی: پخش بار بهینه (OPF)؛ بهینه‌سازی تصادفی؛ سناریوهای عدم قطعیت؛ تابع چگالی احتمال استخراج شده؛ روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری با گام تصادفی (RWGWO).

۱- مقدمه

مهمترین وظیفه در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، تأمین بار مصرفی مشترکین با حداقل هزینه ممکن همزمان با ضمن حفظ قیود شبکه می‌باشد. برای بهره‌برداری از شبکه در بازه زمانی یک ساعته، از برنامه پخش بار بهینه (OPF) استفاده می‌شود. توسط حل مسئله پخش بار بهینه، از یک سو توان تولیدی هر یک از واحدهای شبکه تعیین شده و از سوی دیگر، ولتاژ باس‌ها و توان عبوری خطوط محاسبه شده و

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022

محدودیت‌های مرتبط با آنها رعایت می‌گردد. توسعه و گسترش پخش بار بهینه روندی طولانی را تا به امروز طی کرده است. پخش بار بهینه برای نخستین بار توسط کارپنتیر در سال ۱۹۶۲ ارائه گردید و با تکامل روش‌های مدلسازی و حل آن، به تدریج به ابزاری اساسی در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت تبدیل گشته است [۲،۱]. تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت در سالیان اخیر موجب افزایش اهمیت مسائل اقتصادی در شبکه قدرت شده است. در چنین فضایی، پخش بار بهینه یکی از ابزارهای پرکاربرد در تسویه بازار برق و محاسبه قیمت‌های انرژی الکتریکی می‌باشد [۳].

در دو دهه گذشته، گسترش دغدغه‌ها در مورد مسائل زیست‌محیطی موجب افزایش نفوذ واحدهای تجدیدپذیر از جمله توربین‌های بادی در شبکه قدرت شده است. به دلیل فوائد زیست‌محیطی و هزینه بهره‌برداری پایین توربین‌های بادی، نفوذ انرژی بادی در شبکه‌های قدرت به طور مداوم در حال افزایش بوده است. با این وجود استفاده از واحدهای بادی چالش‌های جدیدی را برای بهره‌برداران شبکه ایجاد کرده است. عدم قطعیت در توان تولیدی واحدهای بادی، به طور قابل توجهی بر عملکرد سیستم‌های قدرت تأثیرگذار است. انحراف توان تولیدی تحقق یافته واحدهای بادی از مقدار پیش‌بینی شده، موجب می‌شود پاسخ بهینه به دست آمده توسط روش‌های پخش بار بهینه قطعی که در آنها از عدم قطعیت توان بادی صرف نظر می‌شود، در عمل نقطه بهینه بهره‌برداری از شبکه نباشد و حتی ممکن است قیود شبکه را برآورده نسازد. به همین دلیل محققین به بررسی راهکارهایی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی در برنامه پخش بار بهینه پرداخته‌اند [۴،۲].

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی در مسئله پخش بار بهینه انجام شده است. مرجع [۵] مسئله پخش بار بهینه را به صورت یک مسئله بهینه‌سازی احتمالاتی مورد بررسی قرار داده و از روش تخمین دونقطه‌ای برای در نظر گرفتن عدم قطعیت سرعت باد تحت تابع توزیع احتمال ویبول استفاده کرده است. مرجع [۶] برای در نظر گرفتن عدم قطعیت توان واحد بادی، از روش برنامه‌ریزی مبتنی بر تصادف تحت توزیع ویبول استفاده کرده است. مرجع [۷] مدل سازی احتمالی پتانسیل انرژی باد را برای برنامه ریزی توسعه شبکه قدرت ارائه داده است که مدل احتمالی پیشنهادی پتانسیل انرژی باد را از طریق توزیع ویبول تخمین می‌زند. مرجع [۸] نیز از توزیع ویبول استفاده کرده و مسئله پخش بار بهینه را به صورت یک مسئله تصادفی مدلسازی کرده است. مرجع [۹] علاوه بر در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی توسط توزیع ویبول، عدم قطعیت توان واحدهای فتوولتائیک را نیز در نظر گرفته است. مرجع [۱۰] از تابع توزیع احتمال نرمال برای مدلسازی عدم قطعیت توان بادی در مسئله OPF بهره گرفته و مدلسازی مسئله را به صورت چندهدفه انجام داده است. مرجع [۱۱] نیز از تابع توزیع نرمال برای این منظور استفاده کرده است. مرجع [۱۲] همبستگی بین عدم قطعیت سرعت واحدهای بادی را توسط روش شبیه‌سازی مونت کارلو در نظر گرفته است. مرجع [۱۳] برای در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی، روش‌های برنامه‌ریزی مبتنی بر تصادف و بهینه سازی مقاوم را با یکدیگر ترکیب کرده است. مرجع [۱۴] نیز از رویکرد مشابهی استفاده کرده و همبستگی زمانی و مکانی توان توربین‌های بادی را در مدلسازی مسئله در نظر گرفته است. مرجع [۱۵] در مسئله پخش بار بهینه توان‌های اکتیو و راکتیو، عدم قطعیت سرعت باد را توسط توزیع ویبول در نظر گرفته است. مرجع [۱۶] نیز از توزیع ویبول برای مدلسازی رفتار تصادفی سرعت باد استفاده کرده است. در مرجع [۱۷] برای حداکثرسازی پیش‌بینی‌پذیری شبکه قدرت، از توزیع ویبول برای در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی در روش تخمین دونقطه‌ای استفاده شده است. مرجع [۱۸] عدم قطعیت توان تولیدی واحدهای بادی و فتوولتائیک را توسط تابع توزیع نرمال در مسئله پخش بار بهینه لحاظ کرده است. در مرجع [۱۹] عدم قطعیت توان بادی را توسط توزیع تصادفی پیوسته محدود در مسئله پخش بار بهینه در نظر گرفته است. در مرجع [۲۰] عدم قطعیت سرعت باد توسط توزیع ویبول مدلسازی شده و برای این منظور از ترکیب شبیه سازی مونت‌کارلو و روش متغیرهای متضاد استفاده شده است. مرجع [۲۱] عدم قطعیت توان‌های بادی و فتوولتائیک را به ترتیب توسط توابع توزیع احتمال ویبول و نرمال لگاریتمی در نظر گرفته است. مرجع [۲۲] نیز از توابع توزیع مشابهی برای عدم قطعیت توان‌های بادی و فتوولتائیک استفاده کرده است. در مرجع [۲۳] عدم قطعیت توان‌های تولیدی بادی، فتوولتائیک و برق‌آبی در مسئله پخش بار بهینه در نظر گرفته شده و برای عدم قطعیت سرعت باد، از توزیع ویبول استفاده شده است.

بررسی تحقیقات پیشین نشان‌گر این است که در اغلب تحقیقات، از توابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده برای مدلسازی عدم قطعیت توان تولیدی واحدهای بادی استفاده شده است. به بیان دیگر، در این تحقیقات فرض شده است که عدم قطعیت توان بادی دارای رفتاری مشابه با توابع چگالی احتمالی همچون توزیع های نرمال و ویبول می‌باشد. سپس بر اساس همین فرض، از توابع چگالی احتمال فوق برای تولید سناریوهای عدم قطعیت استفاده شده است. این فرض دارای ایراداتی می‌باشد. نخست اینکه توان تولیدی واحدهای بادی در هر منطقه جغرافیایی دارای سری‌های زمانی فرّاری است که از یک تابع چگالی احتمال خاص پیروی نمی‌کنند. از سوی دیگر، حتی در مورد یک واحد بادی نیز ممکن است به دلیل تغییر در رفتار تصادفی سرعت باد، تابع چگالی احتمال توان بادی در طول زمان دچار تغییر شود. در نتیجه استفاده از تابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده برای عدم قطعیت توان بادی ممکن است موجب کاهش دقت در مدلسازی رفتار تصادفی توان بادی گردد.

این مقاله قصد دارد روشی جدید برای مدلسازی و حل مسئله پخش بار بهینه ارائه دهد. در این روش، مسئله پخش بار بهینه به صورت یک مسئله بهینه سازی تصادفی مدلسازی می شود. برای تولید سناریوهای

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022

عدم قطعیت، مشابه با مرجع [۴]، از توابع چگالی احتمال استخراج شده استفاده خواهد شد. برای استخراج توابع چگالی احتمال، اطلاعات پیشین واحدهای بادی در یک بازه زمانی یک ساله گردآوری شده و توسط روش‌های آماری، تابع چگالی احتمال توان تولیدی واحدهای بادی تشکیل خواهد شد. به منظور ارزیابی کارایی روش فوق، سناریوهای عدم قطعیت به دو بخش سناریوهای نمونه و سناریوهای تست تقسیم می‌شوند. ابتدا از سناریوهای نمونه برای تعیین برنامه توان تولیدی واحدهای شبکه استفاده می شود. سپس از سناریوهای تست برای انجام یک تحلیل خارج از نمونه استفاده می‌شود تا کارایی روش فوق در مورد سناریوهایی که تاکنون در نظر نگرفته، سنجیده شود. همچنین نتایج حاصل از روش فوق با نتایج به دست آمده توسط تابع چگالی احتمال ویبول که پرکاربردترین تابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده برای توان بادی است، مقایسه خواهد شد. همچنین از روش بهینه‌سازی بهینه‌سازی گرگ خاکستری با گام تصادفی (RWGWO) برای حل مسئله پخش بار بهینه استفاده خواهد شد.

۲- مدلسازی مسئله پخش بار بهینه

۲-۱- مدلسازی عدم قطعیت‌های مسئله

به منظور مدلسازی عدم قطعیت‌های مسئله، مشابه با روش ارائه شده در مرجع [۴]، تولید سناریوهای عدم قطعیت بر اساس توابع چگالی احتمال استخراج شده برای توان‌های بادی، صورت می‌گیرد. برای این منظور، مراحل زیر اجرا خواهد شد:

۱) در ابتدا گردآوری اطلاعات تاریخی برای یک بازه زمانی طولانی (حداقل یک سال) انجام می‌گیرد. سپس از این اطلاعات برای محاسبه خطای پیش‌بینی توان بادی در هر یک از ساعات ($WPFE_t$) مطابق رابطه زیر استفاده خواهد شد [۴]:

$$WPFE_t = \frac{actualWP_t - forecastWP_t}{actualWP_t} \qquad (۱)$$

۲) حجم اطلاعات خطای پیش‌بینی توان بادی در طول یک سال، بسیار زیاد است. برای کاستن از حجم اطلاعات به منظور تشکیل یک تابع چگالی احتمال، از روش خوشه‌بندی k-میانگین استفاده خواهد شد. پس از انجام خوشه‌بندی توسط روش فوق، مشخصات مرکز هر یک از خوشه‌ها به همراه اطلاعاتی در مورد اینکه کدام داده در هر خوشه جای گرفته، به دست می‌آید. فاصله اقلیدسی هر داده با مرکز هر یک از خوشه‌ها بصورت زیر ارائه می‌شود[۲۴]:

$$d_{i,k} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} \left(x_{i,j} - C_{k,j}\right)^2} \quad \forall k = 1, \dots, N_c \qquad (۲)$$

۳) برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها، از شاخص اعتبار سنجی دیویس- بولدین استفاده خواهد شد که توسط روابط زیر محاسبه می‌گردد.

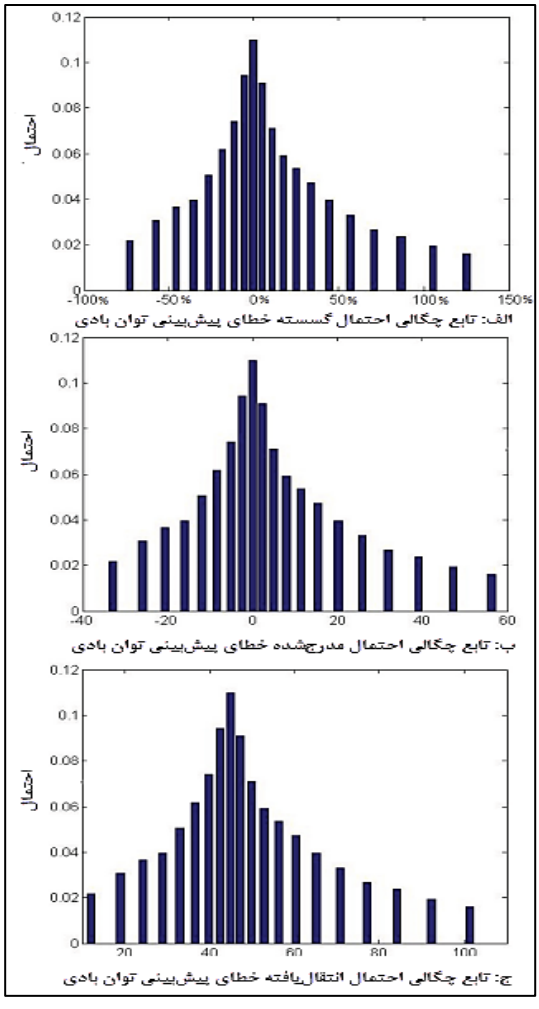
$$AI(C_i, C_k) = \left(\frac{A(C_i) + A(C_k)}{d(C_i, C_k)}\right) \qquad (۳)$$

$$DB = \frac{1}{N_c}\sum_{i=1}^{N_c} \underset{k\neq i}{max}\{AI(C_i, C_k)\} \qquad (۴)$$

۴) پس از تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها توسط روش فوق، خوشه‌بندی اطلاعات خطای پیش‌بینی توان بادی بر اساس تعداد بهینه خوشه‌ها انجام می‌گیرد. داده‌های خوشه‌بندی شده خطای پیش‌بینی توان بادی، یک تابع چگالی احتمال گسسته را تشکیل می‌دهند. مقدار خطای پیش‌بینی توان بادی در هر خوشه، برابر با مرکز آن خوشه بوده و احتمال هر خوشه، توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_i = \frac{M_i}{N_T} \qquad (۵)$$

۵) تشکیل تابع چگالی احتمال توان بادی توسط روش فوق، تابع چگالی احتمال گسسته خطای پیش‌بینی توان بادی به دست آمد. نمونه‌ای از این تابع در **شکل ۱**-الف نمایش داده شده است.



شکل ۱: روند تشکیل تابع چگالی احتمال توان بادی

در این شکل، محور افقی بیان‌گر مقدار خطای پیش‌بینی توان بادی برای هر خوشه (قطعه) بوده و محور عمودی، احتمال هر خوشه را

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

نشان می‌دهد. حال باید نمودار فوق در مقدار توان پیش‌بینی شده واحد بادی ضرب شود تا مطابق **شکل ۱**-ب، تابع چگالی احتمال مدرج‌شده* تشکیل شود. به طور نمونه در این شکل، خطای پیش‌بینی در مقدار توان پیش‌بینی شده واحد بادی که MW ۴۰ است، ضرب شده است. سپس نمودار مدرج‌شده با مقدار توان پیش‌بینی شده واحد بادی جمع می‌شود تا در راستای محور افقی انتقال یافته و مطابق **شکل ۱**-ج، تابع چگالی احتمال انتقال‌یافته برای توان بادی تشکیل شود [۴].

۶) حال که تابع چگالی احتمال توان بادی مشابه با **شکل ۱**-ج به دست آمد، از آن برای تولید سناریوهای عدم قطعیت استفاده می‌شود. سناریوهای فوق باید شامل تمامی حالات قابل وقوع برای توان واحدهای بادی باشد. به طور نمونه در صورتی که تابع چگالی احتمال توان بادی دارای ۱۰ خوشه بوده و ۳ واحد بادی داشته باشیم، تعداد کل سناریوها برابر با $10 \times 10 \times 10 = 1000$ خواهد بود. در هر سناریو، توان تولیدی هر یک از واحدهای بادی به همراه احتمال آن سناریو محاسبه می‌شود. برای محاسبه احتمال وقوع شماره s ($prob_s$)، از رابطه زیر استفاده می‌شود. در این رابطه، n شمارش‌گر واحدهای بادی و W تعداد کل واحدهای بادی است. $pr_{s,n}^{wind}$ نیز احتمال توان تولیدی واحد شماره n در سناریو شماره s است [۴]:

$$prob_s = \prod_{n \in W} pr_{s,n}^{wind} \qquad (۶)$$

تعداد کل سناریوهای عدم قطعیت (N_{GS}) نیز توسط رابطه زیر به دست می‌آید. در این رابطه، N_{C_i} تعداد خوشه‌های تابع چگالی احتمال واحد بادی شماره i بوده و W تعداد کل واحدهای بادی است [۴]:

$$N_{GS} = N_{C_1} \times \dots \times N_{C_i} \times \dots \times N_{C_W} \qquad (۷)$$

پس از تولید سناریوهای عدم قطعیت بر اساس توابع چگالی احتمال استخراج یافته، تعدادی از سناریوها به عنوان سناریوهای نمونه تعیین شده و از آنها برای حل مسئله پخش بار بهینه استفاده می‌شود. از سایر سناریوها که به عنوان سناریوهای تست شناخته می‌شوند، برای تحلیل خارج از نمونه استفاده خواهد شد. به منظور ارزیابی روش فوق، علاوه بر تابع چگالی احتمال استخراج یافته، از تابع چگالی احتمال ویبول که پرکاربردترین تابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده برای توان بادی است نیز برای تولید سناریوهای عدم قطعیت استفاده خواهد شد. پارامترهای تابع توزیع ویبول مطابق روش ارائه شده در مراجع [۲۵،۲۶] محاسبه شده و سپس با تولید اعداد تصادفی تحت توزیع ویبول، سناریوهای نمونه تشکیل خواهند شد. بدین ترتیب سناریوهای نمونه توسط هر دو رویکرد فوق (تابع چگالی استخراج شده و تابع چگالی از پیش تعیین شده) تولید شده و حل مسئله پخش بار بهینه توسط آنها صورت می‌گیرد. برای اینکه امکان مقایسه نتایج دو رویکرد فوق فراهم شود، در تحلیل خارج از نمونه از سناریوهای تست تولید شده توسط توابع چگالی احتمال استخراج شده استفاده خواهد شد [۴].

۲-۲- مدلسازی مسئله OPF برای سناریوهای نمونه

تابع هدف مسئله پخش بار بهینه، حداقل‌سازی مجموع هزینه تولید توان توسط واحدهای حرارتی در یک ساعت می‌باشد که توسط رابطه زیر نمایش داده شده است. واحدهای بادی هیچ‌گونه سوختی مصرف نمی‌کنند و بنابراین تنها هزینه واحدهای حرارتی لحاظ خواهد شد. دقت شود که مسئله بهینه‌سازی بر اساس رابطه زیر باید به طور جداگانه برای هر یک از سناریوهای نمونه حل شود [۴]:

$$min\ \{CF_s\} = \sum_{n \in G} C_n . P_{n,s}\ , \qquad \forall s \in N_{sample} \qquad (۸)$$

در رابطه فوق CF_s مجموع هزینه بهره‌برداری شبکه در سناریو نمونه شماره s بوده و N_{sample} مجموعه سناریوهای نمونه است. n شمارش‌گر واحدهای حرارتی بوده و G مجموعه کل واحدهای حرارتی است. C_n ضریب هزینه تولید توان توسط واحد شماره n بوده و $P_{n,s}$ توان تولیدی واحد شماره n در سناریو شماره s است.

با حل مسئله بهینه‌سازی برای سناریوهای نمونه، مقدار بهینه توان تولیدی واحدها و هزینه شبکه در هر سناریو به دست می‌آید. سپس توسط رابطه (۹)، مقدار انتظاری (تجمیع‌شده) هزینه شبکه در سناریوهای نمونه (CF_{sample}^{agrt}) محاسبه می‌شود. در این رابطه $prob_s$ بیان‌گر احتمال وقوع سناریو شماره s است. همچنین توسط رابطه (۱۰)، با تجمیع توان تولیدی واحدها در سناریوهای نمونه، مقدار انتظاری توان تولیدی هر واحد ($P_{n,e}$) محاسبه خواهد شد. به دلیل خطی بودن مدلسازی مسئله پخش بار بهینه در این مقاله، مقدار تجمیع‌شده توان تولیدی واحدها ($P_{n,e}$)، یک پاسخ ممکن برای مسئله بوده و قیود شبکه را برآورده می‌سازد. بنابراین از $P_{n,e}$ به عنوان مقدار برنامه‌ریزی‌شده توان تولیدی واحدهای حرارتی در تحلیل خارج از نمونه استفاده خواهد شد [۴]:

$$CF_{sample}^{agrt} = \frac{\sum_{s \in N_{sample}} CF_s \times prob_s}{\sum_{s \in N_{sample}} prob_s} \qquad (۹)$$

$$P_{n,e} = \sum_{s \in N_{sample}} \frac{P_{n,s} \times prob_s}{prob_s} \qquad (۱۰)$$

قیود مسئله پخش بار بهینه برای سناریوهای نمونه، در روابط (۱۴)-(۱۱) ارائه شده است. این روابط باید برای هر یک از سناریوهای نمونه، برقرار باشد. در رابطه (۱۱)، قید تعادل توان در هر یک از باس‌های شبکه ارائه شده است. رابطه (۱۲) توان تولیدی واحدها را بین مقادیر حداقل و حداکثر محدود می‌کند. در رابطه (۱۳) توان عبوری خطوط شبکه بر اساس اصول پخش بار مستقیم (DC) محاسبه می‌شود. محدودیت توان عبوری خطوط نیز در رابطه (۱۴) در نظر گرفته شده است [۴]:

$$P_{n,s} - \sum_{m \in NB} P_{nm,s} + Pw_{n,s} = P_n^L \qquad (۱۱)$$

$$P_n^{min} \le P_{n,s} \le P_n^{max} \qquad (۱۲)$$

$$P_{nm,s} = B_{nm} . \left(\delta_{n,s} - \delta_{m,s}\right) \qquad (۱۳)$$

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

$$-P_{nm}^{max} \le P_{nm,s} \le P_{nm}^{max} \quad (۱۴)$$

۳-۲- مدلسازی مسئله OPF برای سناریوهای تست

پس از حل مسئله پخش بار بهینه برای سناریوهای نمونه، مقدار انتظاری هزینه شبکه و توان تولیدی واحدهای حرارتی به دست می‌آید. حال از یکتحلیل خارج از نمونه برای ارزیابی عملکرد شبکه استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، حل مسئله برای سناریوهای نمونه معادل با فرآیند برنامه‌ریزی شبکه در روز پیش از اجرا است، در حالیکه حل مسئله برای سناریوهای تست، مشابه با شرایط شبکه در زمان واقعی است. بنابراین اگرچه مقدار توان تولیدی واحدهای حرارتی توسط سناریوهای نمونه به دست آمده است، اما در زمان واقعی به دلیل عدم قطعیت‌های مسئله، توان‌های بادی نسبت به مقدار پیش‌بینی شده و مقادیر سناریوهای نمونه، متفاوت خواهند بود. بنابراین در زمان واقعی، کمبود یا اضافه توان در شبکه رخ می‌دهد که باید به طریقی دیگر جبران شود. با توجه به اینکه برنامه تولید واحدها ($P_{n,e}$) با حل مسئله در سناریوهای نمونه مشخص شده است، کمبود یا اضافه توان توسط ذخیره چرخان افزایشی و کاهشی و در صورت نیاز توسط حذف بار (وقوع خاموشی) جبران خواهد شد. تابع هدف مسئله پخش بار بهینه در تحلیل خارج از نمونه، حداقل‌سازی مجموع هزینه بهره‌برداری شبکه در سناریوهای تست است که شامل هزینه توان تولیدی، هزینه ذخیره چرخان افزایشی و کاهشی و هزینه حذف بار می‌باشد [۴]:

$$min\ \{CF_{s'}^{t}\} = \sum_{n\in G} C_n.P_{n,e} + \sum_{n\in SR^U} C_n^U.R_{n,s'}^U + \sum_{n\in SR^D} C_n^D.R_{n,s'}^D + \sum_{n\in NB} VOLL_n.LS_{n,s'}, \quad \forall s' \in N_{test} \quad (۱۵)$$

در رابطه فوق، $CF_{s'}^{t}$ هزینه بهره‌برداری شبکه در سناریو تست شماره s' بوده و N_{test} مجموعه سناریوهای تست است. $R_{n,s'}^U$ و $R_{n,s'}^D$ به ترتیب ذخیره چرخان افزایشی و کاهشی واحدهای حرارتی بوده و C_n^U و C_n^D هزینه تأمین ذخیره چرخان افزایش و کاهشی می‌باشد. $VOLL_n$ هزینه حذف بار بوده و $LS_{n,s'}$ مقدار حذف بار در باس شماره n می‌باشد. مسئله بهینه سازی فوق، برای هر یک از سناریوهای تست به طور جداگانه حل خواهد شد. سپس مقدار انتظاری هزینه شبکه در سناریوهای تست (CF_{test}^{agrt})، توسط رابطه زیر به دست می‌آید. در این رابطه $prob_{s'}$ احتمال سناریو تست شماره s' می‌باشد [۴]:

$$CF_{test}^{agrt} = \frac{\sum_{s'\in N_{test}} CF_{s'}^{t} \times prob_{s'}}{\sum_{s'\in N_{test}} prob_{s'}} \quad (۱۶)$$

برای سناریوهای تست نیز باید قیود (۲۲)-(۱۷) رعایت گردد. قید تعادل توان در رابطه (۱۷) ارائه شده است که در آن تأثیر ذخیره چرخان افزایشی ($R_{n,s'}^U$)، کاهشی ($R_{n,s'}^D$) و حذف بار ($LS_{n,s'}$) لحاظ شده است. محدودیت ذخیره چرخان افزایشی و کاهشی در روابط (۱۸) و (۱۹) ارائه شده است. R_n^{Umax} و R_n^{Dmax} به ترتیب حداکثر ذخیره چرخان افزایشی و کاهشی قابل تأمین توسط واحد شماره n می‌باشند.

تو سط رابطه (۲۰)، مقدار حذف بار در هر یک از باس‌ها به بار مصرفی آن باس (P_n^L) محدود شده است. در رابطه (۲۱) نیز محاسبه توان عبوری خطوط انجام شده و مقدار آن توسط رابطه (۲۲) محدود شده است [۴]:

$$P_{n,e} + R_{n,s'}^U - R_{n,s'}^D - \sum_{m\in NB} P_{nm,s'} + Pw_{n,s'} + LS_{n,s'} = P_n^L \quad (۱۷)$$

$$0 \le R_{n,s'}^U \le R_n^{Umax} \quad (۱۸)$$

$$0 \le R_{n,s'}^D \le R_n^{Dmax} \quad (۱۹)$$

$$0 \le LS_{n,s'} \le P_n^L \quad (۲۰)$$

$$P_{nm,s'} = B_{nm}.(\delta_{n,s'} - \delta_{m,s'}) \quad (۲۱)$$

$$-P_{nm}^{max} \le P_{nm,s'} \le P_{nm}^{max} \quad (۲۲)$$

۳- حل مسئله پخش بار بهینه

۳-۱- معرفی روش GWO

روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) از سلسله مراتب و استراتژی شکار گرگ‌های خاکستری الهام گرفته شده است. گرگ‌های خاکستری اغلب دارای گله‌هایی شامل ۵ تا ۱۱ گرگ می‌باشند. به منظور شکار طعمه و حفظ نظم در گله، گرگ‌های خاکستری به چهار نوع گرگ تقسیم‌بندی می‌شود [۲۸،۲۷]:

- دسته اول: گرگ آلفا (α) که رهبر گله بوده و مسئول تصمیمات حیاتی گله است.
- دسته دوم: گرگ‌های بتا (β) که زیردست گرگ آلفا بوده مسئول انتقال پیام او به گرگ‌های گله می‌باشند.
- دسته سوم: گرگ‌های دلتا (δ) که که شامل گرگ‌های مراقب، شکارچی و نگهبان می‌باشد.
- دسته چهارم: گرگ‌های امگا (ω) که گرگ‌های ضعیف‌تر را شامل می‌شود که وظیفه خاصی بر عهده ندارند.

یکی دیگر از ویژگی‌های مهم گله گرگ‌های خاکستری، شکار گروهی آنها است که شامل سه مرحله می‌باشد. در ابتدا دنبال کردن، تعقیب کردن و نزدیک شدن به طعمه انجام می‌شود. سپس طعمه احاطه شده و خسته می شود تا هنگامی که متوقف شود. در انتها نیز حمله کردن به طعمه صورت می‌گیرد. در ابتدای الگوریتم، موقعیت گرگ‌ها به صورت تصادفی تولید می‌شود. سپس مسئله بهینه‌سازی در یک فرآیند تکراری حل خواهد شد. در هر یک از تکرارها، استراتژی احاطه کردن طعمه و حمله به آن توسط گرگ‌ها به صورت ریاضی از طریق روابط زیر مدلسازی می‌شود [۲۷]:

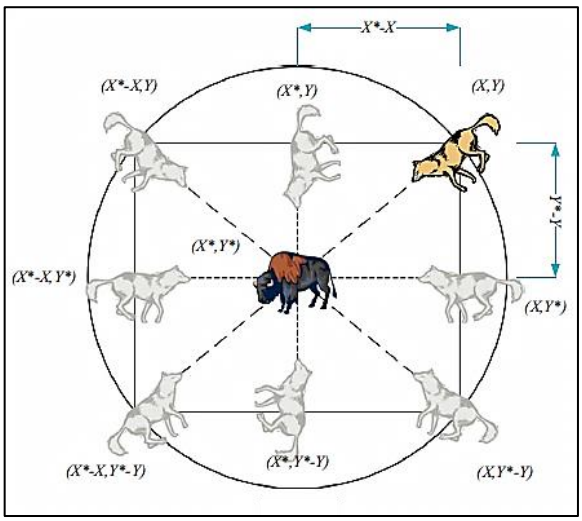
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

$$X_{t+1} = X_{p,t} - \mu . d \quad (۱)$$

$$d = \left| c . X_{p,t} - X_t \right| \quad (۲)$$

$$\mu = 2 . b . r_1 - b \qquad c = 2 . r_2 \qquad b = 2 - 2 . \left(\frac{t}{t_{max}} \right) \quad (۳)$$

در روابط فوق، t شـــمارش‌گر تکرارهای الگوریتم و t_{max} تعداد کل تکرارها اســت. X_t بردار موقعیت گرگ‌ها در تکرار شــماره t می‌باشــد. $X_{p,t}$ موقعیت طعمه و d بردار تفاوت بین موقعیت گرگ‌ها و موقعیت طعمه اســت. μ، b و c پارامترهای مدل هســتند. r_1 و r_2 نیز اعداد تصادفی در بازه بین صفر و یک می‌باشند. فرآیند احاطه کردن طعمه و حمله به آن در یک فضای دوبُعدی، در **شکل ۲** نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، با توجه به مقادیر مختلف پارامترهای مدل، گرگ‌ها موقعیت خود را در حول طعمه تغییر داده یا به آن نزدیک می‌شوند [۲۸،۲۷].



شکل ۲: فرآیند احاطه کردن طعمه و حمله به آن

موقعیت طعمه با کمک پاسخ‌های آلفا، بتا و دلتا تخمین زده می‌شود. بنابراین هر یک از گرگ‌ها توسط روابط (۶)-(۴)، سه مرتبه به‌روزرسانی موقعیت خود را بر اساس موقعیت گرگ‌های رهبر (آلفا، بتا و دلتا) انجام می‌دهند. ســپس موقعیت نهایی با میانگین‌گیری از این ســه موقعیت توسط رابطه (۷) به دست می‌آید [۲۷،۲۸]:

$$d_\alpha = c . X_\alpha - X_t \qquad X_1' = X_\alpha - \mu . d_\alpha \quad (۴)$$

$$d_\beta = c . X_\beta - X_t \qquad X_2' = X_\beta - \mu . d_\beta \quad (۵)$$

$$d_\delta = c . X_\delta - X_t \qquad X_3' = X_\delta - \mu . d_\delta \quad (۶)$$

$$X_{t+1} = \frac{(X_1' + X_2' + X_3')}{3} \quad (۷)$$

در روابط فوق X_α، X_β و X_δ به ترتیب موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا می‌باشــد. d_α، d_β و d_δ بردار تفاوت محاســبه شــده بر اســاس گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا اســت. X_t موقعیت قبلی گرگ‌ها بوده و X_{t+1} موقعیت جدید گرگ‌ها می‌باشد.

۲-۳- معرفی فرآیند گام تصادفی

در روش RWGWO، جست‌وجوی گرگ‌های رهبر (آلفا، بتا و دلتا) در فضــای مســئله بر اســاس فرآیند گام تصــادفی انجام شــده و ســپس گرگ‌های امگا به‌روزرســانی موقعیت خود را بر اســاس گرگ‌های رهبر انجام خواهند داد. گام تصــادفی به فرآیندی گفته می‌شــود که شــامل مجموعه‌ای از گام‌های متوالی است که هر یک به طور تصادفی انتخاب شده‌اند. بر اساس توضیحات فوق، به‌روزرسانی موقعیت گرگ‌های رهبر در الگوریتم RWGWO توســط رابطه (۸) صــورت می‌گیرد. در این رابطه، s_t مقدار گام تصــادفی در تکرار شــماره t اســت که در واقع یک عدد تصــادفی تحت تابع توزیع کوچی (لورنتز) می‌باشــد. a نیز پارامتر کنترلی گام تصــادفی اســت که توســط رابطه (۹) بگونه‌ای محاســبه می‌شــود که به صــورت خطی کاهش یابد تا با کاهش اندازه گام‌های تصادفی، گرگ‌های رهبر به سمت پاسخ بهینه متمرکز شوند [۲۷]:

$$X_{t+1} = X_t + a \times s_t \quad (۸)$$

$$a_i = 2 - 2 . \left(\frac{t}{t_{max}} \right) \quad (۹)$$

۳-۳- حل مسئله OPF توسط روش RWGWO

حل مسئله پخش بار بهینه در روش ارائه شده در این مقاله، شامل دو بخش است. در ابتدا حل مسئله برای هر یک از سناریوهای نمونه انجام شده، سپس پاسخ‌های مسئله در سناریوهای نمونه تجمیع می‌شود. در انتها نیز حل مسئله برای هر یک از سناریوهای تست صورت گرفته و پاسخ‌های حاصله، تجمیع خواهند شد. در حل مسئله برای سناریوهای نمونه، متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله، توان تولیدی واحدهای حرارتی ($P_{n,s}$) می‌باشــد. در حل مســئله برای ســناریوهای تســت، متغیرهای تصــمیم‌گیری شــامل ذخیره چرخان افزایشــی ($R^U_{n,s'}$) و کاهشــی واحدهای حرارتی ($R^D_{n,s'}$) و نیز میزان حذف بار در باس‌های شــبکه ($LS_{n,s'}$) می‌باشند.

مراحل حل مســئله پخش بار بهینه برای ســناریوهای نمونه یا تســت (تحلیل خارج از نمونه)، توسط روش RW-GWO در **شکل ۳** نمایش داده شده است. مراحل این روش بدین صورت است: در ابتدا پاسخ‌های اولیه مسئله توسط تولید اعداد تصادفی در محدوده بین مقادیر حداقل و حداکثر مجاز تولید می‌شــوند. همچنین مقداردهی اولیه پارامترهای b، c و μ توســط رابطه (۳) انجام می‌گیرد. ســپس مقدار تابع هدف مسئله برای هر یک از گرگ‌ها محاسبه می‌شود. در تحلیل سناریوهای نمونه از رابطه (۸) و در تحلیل ســناریوهای تســت از رابطه (۱۵) برای این منظور اســتفاده می‌شــود. حال ســه گرگی که دارای بهترین مقدار تابع هدف (یعنی کمترین هزینه) هســتند، به عنوان گرگ‌های بهبر (آلفا، بتا و دلتا) تعیین می‌شــوند. ســپس در هر یک از تکرارهای الگوریتم، این مراحل اجرا می‌شود: به‌روزرسانی موقعیت گرگ‌های رهبر توسط رابطه (۸)؛ به‌روزرسانی موقعیت گرگ‌های امگا توسط رابطه (۷)؛ به‌روزرسانی پارامترهای b، c و μ توسط رابطه (۳)؛ محاسبه تابع هدف

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

برای هر یک از گرگ‌ها؛ انتخاب گرگ‌های رهبر بر ا ساس مقادیر جدید تابع هدف. مراحل زیر تا پایان تکرارهای الگوریتم ادامه یافته و در پایان، گرگ آلفا که بهترین مقدار تابع هدف را دارا می‌باشد، به عنوان پاسخ بهینه انتخاب خواهد شد [۲۸].



شکل ۳: فلوچارت روش RWGWO برای حل مسئله پخش بار بهینه

۴- نتایج شبیه‌سازی

شبیه سازی روش ارائه شده در این مقاله، بر روی دو شبکه تست ۳۰ باس و ۱۱۸ باس IEEE انجام می‌گیرد. شبکه ۳۰ باس دارای ۶ واحد تولیدی حرارتی و ۴۱ خط انتقال است که اطلاعات آنها در [۳۰،۲۹،۴] ارائه شده است. بار مصرفی این شبکه برابر با ۲۸۳،۴ MW می‌باشد. شبکه ۱۱۸ باس نیز دارای ۵۴ واحد تولیدی حرارتی و ۱۷۹ خط انتقال است که اطلاعات آنها از [۳۱،۲۹،۴] گرفته شده است. در هر یک از دو شبکه فوق سه واحد بادی به شبکه اضافه شده است که اطلاعات آنها در [۴] آورده شده است. برای استخراج توابع توزیع احتمال، از اطلاعات توان تولیدی واحدهای بادی شبکه ناحیه الیا در کشور بلژیک در سال ۲۰۱۴ خواهد شد که این اطلاعات در سایت این شبکه [۳۲] ارائه شده است. به منظور پیاده سازی روش RWGWO، تعداد گرگ‌ها برابر با ۸ گرگ در نظر گرفته شده است. تعداد تکرارهای الگوریتم RWGWO در تحلیل سناریوهای نمونه برای شبکه‌های ۳۰ باس و ۱۱۸ باس، به ترتیب برابر با ۴۰ و ۸۰ تکرار و برای سناریوهای تست، به ترتیب برابر با ۸۰ و ۱۶۰ تکرار در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی تأثیر عوامل مختلف بر نتایج مسئله پخش بار بهینه، شبیه‌سازی در چهار حالت انجام می‌گیرد:

- حالت صفر: بدون واحدهای بادی
- حالت ۱: با استفاده از واحدهای بادی و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت توان واحدهای بادی
- حالت ۲: با در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی بر اساس تابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده (تابع توزیع ویبول)
- حالت ۳: با در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی بر اساس تابع چگالی احتمال استخراج شده

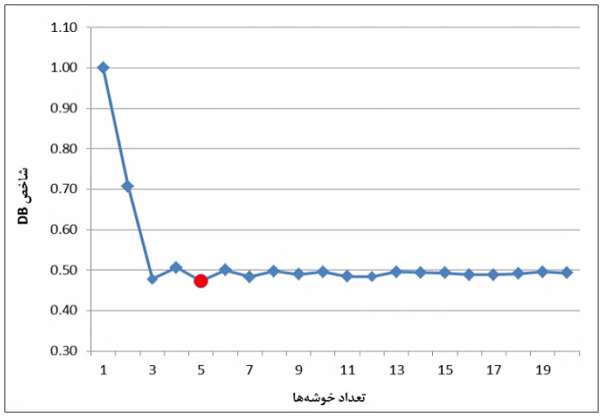
برای حالت صفر تنها تحلیل سناریوهای نمونه انجام گرفته تا در مقایسه با حالت ۱، تأثیر استفاده از واحدهای بادی مشخص گردد. در حالات ۱ تا ۳ علاوه بر تحلیل سناریوهای نمونه، تحلیل خارج از نمونه (برای سناریوهای تست) نیز انجام گرفته است. شبیه‌سازی روش فوق توسط نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است.

۴-۱- استخراج توابع چگالی احتمال

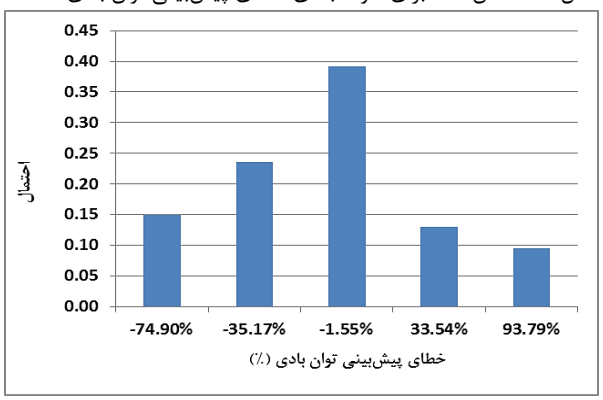
در شبکه ناحیه الیا بلژیک، هر یک از اطلاعات شبکه در بازه‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای ثبت می شوند. بنابراین برای توان بادی پیش‌بینی شده و واقعی، در هر ساعت چهار مقدار جداگانه وجود خواهد داشت. در مجموع تعداد داده‌های توان بادی در سال ۲۰۱۴ برابر با ۳۵۰۴۰ داده خواهد بود که با حذف داده‌های ناقص، تعداد داده‌های باقیمانده برای بررسی عدم قطعیت توان بادی، ۳۴۵۷۱ داده خواهد بود. مطابق توضیحات بخش سوم، ابتدا توسط شاخص دیویس-بولدین (DB)، تعداد بهینه خوشه‌ها به دست می‌آید. نمودار شاخص DB برای تعداد مختلف خوشه‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تعداد بهینه خوشه‌ها که متناظر با کمترین مقدار شاخص DB است، برابر با ۵ خوشه می‌باشد. حال خوشه‌بندی خطای پیش‌بینی توان بادی در شبکه الیا، برای تعداد بهینه خوشه‌ها انجام شده و نتایج حاصل، در شکل ۵ ارائه شده است. توسط تابع چگالی احتمال گسسته استخراج شده خطای پیش‌بینی توان بادی و بر اساس مقدار پیش‌بینی شده توان تولیدی واحدهای بادی هر یک از شبکه‌های ۳۰ باس و ۱۱۸ باس، توابع چگالی احتمال برای واحدهای فوق تشکیل می‌شوند. از این توابع برای تولید سناریوهای عدم قطعیت استفاده خواهد شد. با توجه به وجود سه واحد بادی در هر یک از دو شبکه فوق و تعداد پنج خوشه برای هر واحد بادی، تعداد کل سناریوهای عدم قطعیت برابر با ۱۲۵ سناریو خواهد بود. تعداد ۱۴ سناریو به صورت تصادفی به عنوان سناریوهای نمونه در نظر گرفته شده و سایر سناریوها که تعداد آنها ۱۱۱ سناریو است، به عنوان سناریوهای تست در تحلیل خارج از نمونه بکار می‌روند. به همین

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022

ترتیب ۱۴ سناریو نمونه توسط تابع چگالی احتمال ویبول تولید شده و از آن در تحلیل نمونه استفاده خواهد شد. در تحلیل خارج از نمونه در حالات ۱ تا ۳، از سناریوهای تست حاصل از تابع چگالی احتمال استخراج شده استفاده می‌شود تا کارایی رویکردهای مختلف با سناریوهای تست یکسانی سنجیده شود.



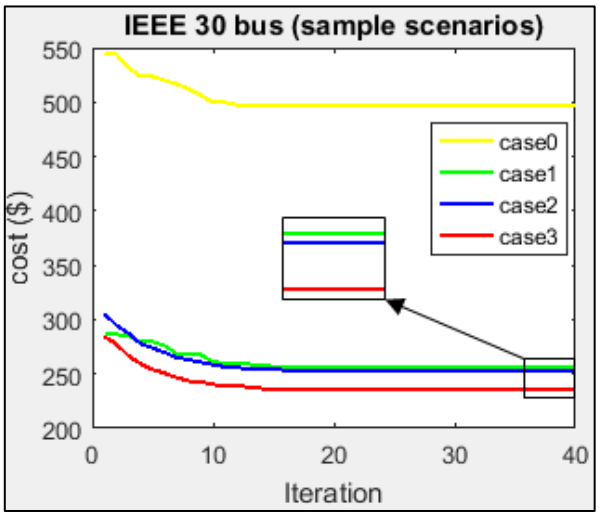
شکل ۴: شاخص DB برای خوشه‌بندی خطای پیش‌بینی توان بادی



شکل ۵: تابع چگالی احتمال استخراج شده برای خطای پیش‌بینی توان بادی

۲-۴- نتایج شبکه ۳۰ شینه

نمودار همگرایی تابع هدف تجمیع‌شده مسئله پخش بار بهینه برای سناریوهای نمونه شبکه ۳۰ شینه در شکل ۶ نمایش داده شده است. بررسی این شکل نشان‌گر این است که در تمامی حالات شبیه سازی، روش RWGWO موفق شده با کاهش تابع هدف به سرعت به سمت پاسخ بهینه مسئله همگرا شود. هزینه شبکه در حالات مختف سناریوهای نمونه شبکه ۳۰ شینه در جدول ۱ ارائه شده است. در ستون آخر نیز تفاوت هزینه هر حالت نسبت به حالت قبل درج شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می شود، هزینه تجمیع شده شبکه در حالت صفر برابر با ۴۹۶٫۸ دلار و در حالت ۱ برابر با ۲۵۶٫۸ دلار بوده است. در نتیجه استفاده از واحدهای بادی در حالت ۱ موجب ۴۸٫۳۱٪ کاهش در هزینه شبکه نسبت به حالت صفر شده است. دلیل این موضوع این است که واحدهای بادی بر خلاف واحدهای حرارتی، سوخت مصرف نمی‌کنند و در نتیجه توان تولیدی آنها هزینه‌ای در بر نخواهد داشت. در حالت ۲ که عدم قطعیت توان بادی توسط تابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده (توزیع ویبول) لحاظ شده، هزینه شبکه برابر با ۲۵۲٫۸۶۵۶ دلار بوده است. در نتیجه در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی در حالت ۲ موجب ۱٫۵۳٪ کاهش در هزینه سناریوهای نمونه نسبت به حالت ۱ شده است. در حالت ۳ نیز که در آن از تابع چگالی احتمال استخراج شده برای در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی بهره گرفته شده است، هزینه شبکه برابر با ۲۳۵٫۲۱۰۱ دلار بوده است. بنابراین در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی توسط تابع چگالی احتمال استخراج شده نسبت به توزیع ویبول، هزینه شبکه را در سناریوهای نمونه به میزان ۶٫۹۸٪ کاهش داد.



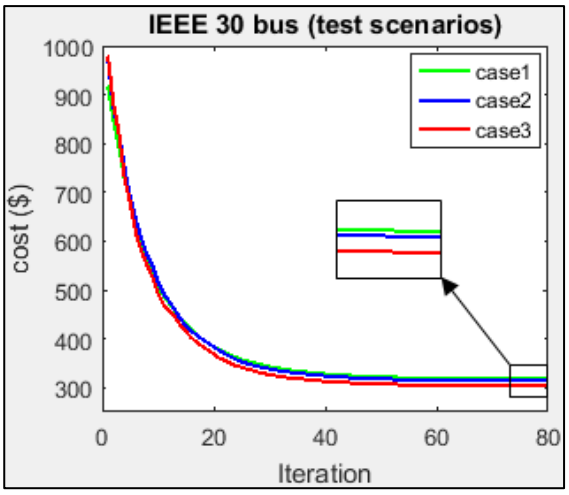
شکل ۶: نمودار همگرایی تابع هدف در سناریوهای نمونه شبکه ۳۰ باس

جدول ۱: هزینه شبکه ۳۰ باس در سناریوهای نمونه

	هزینه شبکه ($)	تفاوت نسبت به حالت قبل (٪)
حالت صفر (بدون واحدهای بادی)	496.8000	-
حالت ۱ (بدون عدم قطعیت)	256.8000	-48.31%
حالت ۲ (تابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده)	252.8656	-1.53%
حالت ۳ (تابع چگالی احتمال استخراج شده)	235.2101	-6.98%

نمودار همگرایی تابع هدف تجمیع‌شده مسئله پخش بار بهینه برای سناریوهای تست شبکه ۳۰ باس در شکل ۷ نمایش داده شده است. بررسی این شکل نیز نشان می‌دهد روش RWGWO در تمامی حالات شبیه‌سازی موفق به کاهش تابع هدف و همگرایی به سمت پاسخ بهینه شده است. هزینه شبکه در حالات مختف سناریوهای تست در جدول ۲ ارائه شده است. در حالت ۱ شبیه سازی هزینه تجمیع شده شبکه در حالت ۱ برابر با ۳۱۷٫۲۳۰۷ دلار بوده است. در حالت ۲ در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی توسط تابع چگالی از پیش تعیین شده (توزیع ویبول) موجب ۱٫۱۵٪ کاهش در هزینه شده است. در حالت ۳ نیز در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی توسط تابع چگالی استخراج شده، هزینه شبکه را نسبت به حالت دوم ۳٫۴۱٪ کاهش داده است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

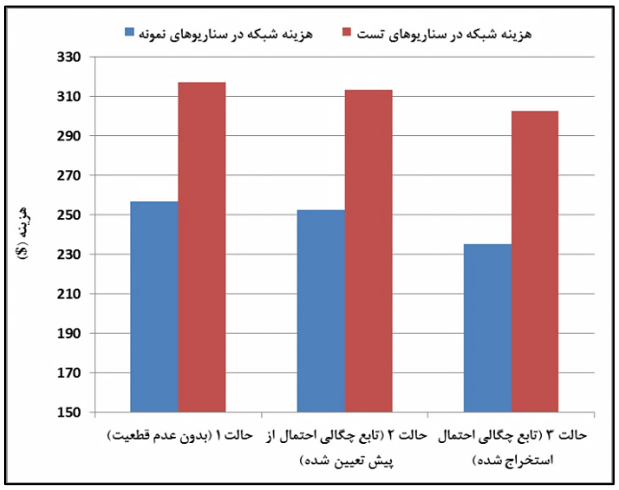


شکل ۷: نمودار همگرایی تابع هدف در سناریوهای تست شبکه ۳۰ شینه

جدول ۲: هزینه شبکه ۳۰ باس در سناریوهای تست

	هزینه شبکه ($)	تفاوت نسبت به حالت قبل (٪)
حالت ۱ (بدون عدم قطعیت)	317.2307	-
حالت ۲ (تابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده)	313.5696	-1.15%
حالت ۳ (تابع چگالی احتمال استخراج شده)	302.8623	-3.41%

هزینه شبکه ۳۰ شینه در حالات مختلف شبیه‌سازی در شکل ۸ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، در تمامی حالات شبیه‌سازی هزینه شبکه در سناریوهای تست بیشتر از سناریوهای نمونه بوده است. دلیل این موضوع این است که در سناریوهای تست، شبکه با حالات جدیدی از توان تولیدی واحدهای بادی مواجه می‌شود که پیش‌تر آنها را در نظر نگرفته است. در نتیجه برای حفظ تعادل تولید و مصرف نیازمند استفاده از ذخیره چرخان یا حذف بار است که موجب صرف هزینه‌های اضافی می شود. همچنین مشاهده می‌شود که در سناریوهای نمونه و تست، بیشترین هزینه برای حالت ۱ به دست آمده که عدم قطعیت توان بادی در آن لحاظ نشده است. کمترین هزینه نیز برای حالت ۳ به دست آمده که در آن مطابق روش ارائه شده در این مقاله، از تابع چگالی احتمال استخراج شده برای در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی استفاده شده است. بنابراین مشاهده می‌شود که تابع چگالی احتمال استخراج شده به دلیل اینکه از اطلاعات پیشین واحدهای بادی تشکیل شده، با شرایط شبکه سازگارتر است و در نتیجه هزینه کمتری را برای شبکه به همراه داشته است. در جدول ۳ نتایج به دست آمده در این مقاله توسط روش RWGWO با نتایج ارائه شده در مرجع [۴] مقایسه شده است. مرجع فوق برای حل مسئله پخش بار بهینه از روش برنامه‌ریزی خطی استفاده کرده است. مشاهده این جدول نشان‌گر این است که روش RWGWO موفق شده در اغلب حالات هزینه شبکه را نسبت به مرجع فوق کاهش دهد. در سناریوهای تست میزان کاهش هزینه توسط روش RWGWO در حالات ۱ تا ۳ به ترتیب ۱۶٫۹۵٪، ۱۷٪ و ۱۹٫۴۸٪ بوده است. بنابراین مشاهده می شود که روش RWGWO در حل مسئله پخش بار بهینه در شبکه ۳۰ باس در حضور عدم قطعیت توان بادی، پاسخ‌های مسئله را نسبت به تحقیقات پیشین بهبود بخشیده است.



شکل ۸: هزینه شبکه در حالات مختلف شبکه ۳۰ شینه

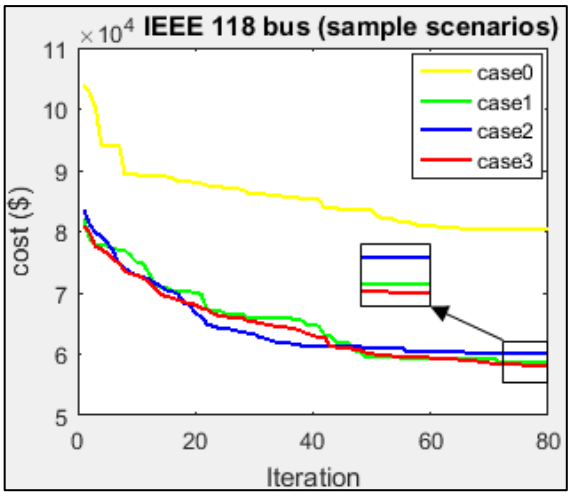
جدول ۳: مقایسه نتایج شبکه ۳۰ باس با تحقیقات پیشین

		حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
هزینه شبکه در سناریوهای نمونه ($)	نتایج مرجع [۴]	258.2560	250.0570	244.4840
	نتایج مقاله	256.8000	252.8656	235.2101
	تفاوت با مرجع [۴] (٪)	-0.56%	1.12%	-3.79%
هزینه شبکه در سناریوهای تست ($)	نتایج مرجع [۴]	381.9580	377.8120	376.1450
	نتایج مقاله	317.2307	313.5696	302.8623
	تفاوت با مرجع [۴] (٪)	-16.95%	-17.00%	-19.48%

۳-۴- نتایج شبکه ۱۱۸ شینه

نمودار همگرایی تابع هدف مسئله در سناریوهای نمونه برای شبکه ۱۱۸ شینه در شکل ۹ نمایش داده شده است. در این شکل نیز مشاهده می شود که روش RWGWO با کاستن از تابع هدف مسئله در تکرارهای برنامه، به سمت پاسخ بهینه همگرا شده است. هزینه شبکه در حالات مختلف شبکه ۱۱۸ باس برای سناریوهای نمونه در جدول ۴ نمایش داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، استفاده از واحدهای بادی در حالت ۱ موجب ۲۷٫۲۵٪ کاهش در هزینه‌های شبکه شده نسبت به حالت صفر شده است. در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی در حالت ۲ موجب شده هزینه شبکه به میزان ۲٫۷۰٪ نسبت به حالت ۱ افزایش یابد. البته در ادامه مشاهده خواهد شد که علی‌رغم افزایش هزینه در سناریوهای نمونه، استفاده از توزیع ویبول در سناریوهای تست موجب کاهش هزینه نسبت به حالت ۱ شده است. همچنین مشاهده می شود که استفاده از تابع چگالی احتمال استخراج شده در حالت ۳ هزینه‌های شبکه در سناریوهای نمونه را به میزان ۳٫۴۳٪ نسبت به حالت ۲ کاهش داده است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

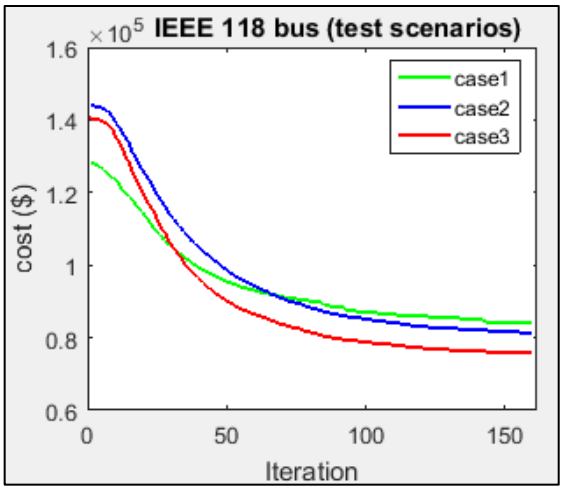


شکل ۹: نمودار همگرایی تابع هدف در سناریوهای نمونه شبکه ۱۱۸ شینه

جدول ۴: هزینه شبکه ۱۱۸ شینه در سناریوهای نمونه

	هزینه شبکه ($)	تفاوت نسبت به حالت قبل (٪)
حالت صفر (بدون واحدهای بادی)	80577.86	-
حالت ۱ (بدون عدم قطعیت)	58621.03	-27.25%
حالت ۲ (تابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده)	60201.88	2.70%
حالت ۳ (تابع چگالی احتمال استخراج شده)	58138.50	-3.43%

در شکل ۱۰ نمودار همگرایی تابع هدف در سناریوهای تست شبکه ۱۱۸ باس نمایش داده شده است. در این شکل نیز مشاهده می‌شود که روش RWGWO در تمامی حالات شبیه‌سازی موفق به کاهش تابع هدف و همگرایی به سمت پاسخ بهینه شده است. هزینه شبکه ۱۱۸ باس در حالات مختلف سناریوهای تست نیز در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می شود، در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی توسط تابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده (توزیع ویبول) در حالت ۲ موجب ۳,۱۳٪ کاهش در هزینه شبکه شده است. همچنین استفاده از تابع چگالی استخراج شده در حالت ۳ نسبت به توزیع ویبول، هزینه شبکه را به میزان ۶,۸۳٪ کاهش داده است.

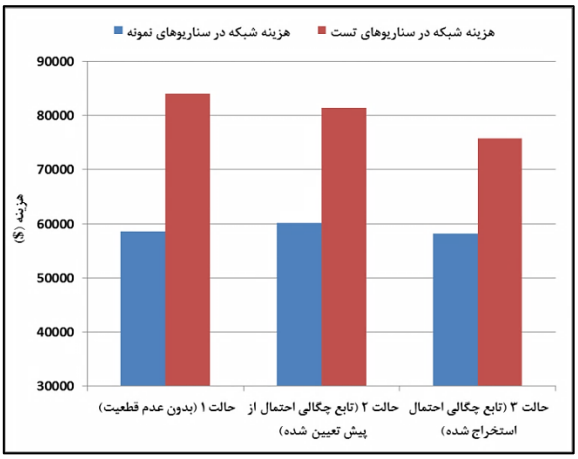


شکل ۱۰: نمودار همگرایی تابع هدف در سناریوهای تست شبکه ۱۱۸ شینه

جدول ۵: هزینه شبکه ۱۱۸ شینه در سناریوهای تست

	هزینه شبکه ($)	تفاوت نسبت به حالت قبل (٪)
حالت ۱ (بدون عدم قطعیت)	83973.75	-
حالت ۲ (تابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده)	81348.17	-3.13%
حالت ۳ (تابع چگالی احتمال استخراج شده)	75795.22	-6.83%

هزینه شبکه ۱۱۸ شینه در حالات مختلف شبیه‌سازی در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. بررسی این شکل نشان‌گر این است که مشابه با شبکه ۳۰ باس، در شبکه ۱۱۸ شینه نیز هزینه شبکه در سناریوهای تست همواره بیش از سناریوهای نمونه بوده است. همچنین بررسی این شکل نشان می‌دهد که در سناریوهای تست، بیشترین هزینه برای حالت شبیه‌سازی ۱ به دست آمده که در آن عدم قطعیت توان بادی در نظر گرفته نشده است. کمترین هزینه در سناریوهای نمونه و تست نیز در حالت شبیه‌سازی ۳ حاصل شده که در آن بر اساس روش ارائه شده در این مقاله، عدم قطعیت توان بادی توسط تابع چگالی احتمال استخراج شده در نظر گرفته شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در شبکه ۱۱۸ باس مشابه با شبکه ۳۰ باس، تابع چگالی احتمال استخراج شده با شرایط شبکه قدرت در حضور عدم قطعیت توان بادی سازگارتر است و همین موضوع موجب شده که روش فوق هزینه کمتری را برای شبکه به همراه داشته باشد. در جدول ۶ نتایج به دست آمده در این مقاله توسط روش RWGWO با نتایج ارائه شده در مرجع [۴] مقایسه شده است. مشاهده این جدول نشان‌گر این است که روش RWGWO در سناریوهای نمونه موفق شده در تمامی حالات هزینه شبکه را نسبت به مرجع فوق کاهش دهد. با این وجود در سناریوهای تست، عملکرد مرجع فوق بهتر بوده است، هرچند اختلاف نتایج اندک بوده است.



شکل ۱۱: هزینه شبکه در حالات مختلف شبکه ۱۱۸ شینه

جدول ۶: مقایسه نتایج شبکه ۱۱۸ شینه با تحقیقات پیشین

		حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
هزینه شبکه در سناریوهای نمونه ($)	نتایج مرجع [۴]	73525.24	73299.04	73119.36
	نتایج مقاله	58621.03	60201.88	58138.50
	تفاوت با مرجع [۴] (٪)	-20.27%	-17.87%	-20.49%
هزینه شبکه در سناریوهای تست ($)	نتایج مرجع [۴]	74652.02	74522.53	74087.46
	نتایج مقاله	83973.75	81348.17	75795.22

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

تفاوت با مرجع [۴] (٪)	12.49%	9.16%	2.31%	

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری با گام تصادفی (RWGWO) برای حل مسئله پخش بار بهینه (OPF) توسط استخراج توابع چگالی احتمال برای عدم قطعیت توان بادی استفاده گردید. در ابتدا نحوه استخراج توابع چگالی احتمال توان بادی بر اساس اطلاعات گذشته تشریح گردید. سپس مدلسازی مسئله پخش بار بهینه انجام گرفت و نحوه حل آن توسط روش RWGWO بررسی شد. شبیه‌سازی روش فوق بر روی دو شبکه تست ۳۰ باس و ۱۱۸ باس IEEE در چهار حلت مختلف انجام گرفت. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان‌گر این است که استفاده از واحدهای بادی موجب کاهش قابل ملاحظه در هزینه شبکه در مسئله پخش بار بهینه شده است. بررسی نتایج نشان داد که در هر دو شبکه، در نظر گرفتن عدم قطعیت توان بادی موجب کاهش در هزینه شبکه در سناریوهای تست در مقایسه با حالت قطعی شده است. بنابراین به دلیل ماهیت نوسانی توان تولیدی واحدهای بادی، لحاظ نکردن عدم قطعیت فوق موجب افزایش در هزینه‌های شبکه خواهد شد. همچنین نتایج نشان داد که در هر دو شبکه، استفاده از تابع چگالی احتمال استخراج شده (مطابق روش این مقاله) موجب کاهش در هزینه شبکه در سناریوهای نمونه و تست در مقایسه با تابع چگالی احتمال از پیش تعیین شده ویبول (مطابق با تحقیقات پیشین) شده است. استخراج توابع چگالی احتمال بر اساس اطلاعات گذشته واحدهای بادی، سازگاری بیشتری با عدم قطعیت‌های شبکه خواهد داشت که در نتیجه موجب کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شبکه می‌گردد. بررسی نتایج نشان‌گر این است که روش RWGWO عملکرد مناسب در حل مسئله پخش بار بهینه داشته و در تمامی موارد با کاهش تابع هدف، به سمت پاسخ بهینه همگرا شده است. مقایسه با تحقیقات پیشین نیز نشان داد که روش RWGWO در اغلب موارد پاسخ‌هایی بهتر برای مسئله پخش بار بهینه به دست آورده است.

مراجع

[1] Wood, A. J., Wollenberg, B. F., "Power Generation, Operation and Control", John Wiley & Sons, second edition, 1996.

[2] Ayelea, G. T., Mabrouk, M. T., Haurant, P., Laumert, B. Lacarrière, B., "Optimal heat and electric power flows in the presence of intermittent renewable source, heat storage and variable grid electricity tariff", Energy Conversion and Management, Vol. 243, pp. 114430, 2021.

[3] Abdi, H., Derafshi-Beigvand, S., La Scala, M., "A review of optimal power flow studies applied to smart grids and microgrids", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 71, pp. 742-766, 2017.

[4] Rahmani, S., Amjady, N., "A new optimal power flow approach for wind energy integrated power systems", Energy, Vol. 134, pp. 349-359, 2017.

[5] Shargh, S., Khorshid-ghazani, B., Mohammadi-ivatloo, B., Seyedi, H., Abapour, M., "Probabilistic multi-objective optimal power flow considering correlated wind power and load uncertainties", Renewable Energy, Vol. 94, pp. 10-21, 2016.

[6] Jin, J., Zhou, D., Zhou, P., Qian, S., Zhang, M., "Dispatching strategies for coordinating environmental awareness and risk perception in wind power integrated system", Energy, Vol. 106, pp. 453-463, 2016.

[7] Author links open overlay panel Kim, G., Hur, J, "Probabilistic modeling of wind energy potential for power grid expansion planning", Energy, Vol. 230, pp. 120831, 2021.

[8] Dasgupta, K., Roy, P. K., Mukherjee, V., "Power flow based hydro-thermal-wind scheduling of hybrid power system using sine cosine algorithm", Electric Power Systems Research, Vol. 178, pp. 106018, 2020.

[9] Shilaja, C., Arunprasath, T., "Internet of medical things-load optimization of power flow based on hybrid enhanced grey wolf optimization and dragonfly algorithm", Future Generation Computer Systems, Vol. 98, pp. 319-330, 2019.

[10] Bukar, A. L., Tan, C. W., Yiew, L. K., Ayop, R., Tand, W. S, "A rule-based energy management scheme for long-term optimal capacity planning of grid-independent microgrid optimized by multi-objective grasshopper optimization algorithm", Energy Conversion and Management, Vol. 221, pp. 113161, 2020.

[11] Viafora, N., Delikaraoglou, S., Pinson, P., Holbøll, J., "Chance-constrained optimal power flow with non-parametric probability distributions of dynamic line ratings", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 114, pp. 105389, 2020.

[12] Lin, C., Bie, Z., Zhou, B., Wang, T., Wang, T., "Comparison of Different Methods in Stochastic Power Flow with Correlated Wind Power Generation", IFAC-PapersOnLine, Vol. 51, pp. 67-72, 2018.

[13] Fang, X., Hodge, B. M., Jiang, H., Zhang, Y., "Decentralized wind uncertainty management: Alternating direction method of multipliers based distributionally-robust chance constrained optimal power flow", Applied Energy, Vol. 239, pp. 938-947, 2019.

[14] Fang, X., Hodge, B. M., Du, E., Zhang, N., Li, F., "Modelling wind power spatial-temporal correlation in multi-interval optimal power flow: A sparse correlation matrix approach", Applied Energy, Vol. 230, pp. 531-539, 2018.

[15] Awad, N. H., Ali, M. Z., Mallipeddi, R., Suganthan, P. N., "An efficient Differential Evolution algorithm for stochastic OPF based active-reactive power dispatch problem considering renewable generators", Applied Soft Computing Journal, Vol. 76, pp. 445-458, 2019.

[16] Tripathy, M., Samal, R. K., "A new perspective on wind integrated optimal power flow considering turbine characteristics, wind correlation and generator reactive limits", Electric Power Systems Research, Vol. 170, pp. 101-115, 2019.

[17] Galvani, S., Marjani, S. R., "Optimal power flow considering predictability of power systems", Electric Power Systems Research, Vol. 171, pp. 66-73, 2019.

[18] Zhao, S., Fang, Y., Wei, Z., "Stochastic optimal dispatch of integrating concentrating solar power plants with wind farms", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 109, pp. 575-583, 2019.

[19] Mohagheghi, E., Gabash, A., Alramlawi, M., Li, P., "Real-time optimal power flow with reactive power dispatch of wind stations using a reconciliation algorithm", Renewable Energy, Vol. 126, pp. 509-523, 2018.

[20] Morshed, M. J., Hmida, J. B., Fekih, A., "A probabilistic multi-objective approach for power flow optimization in

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

hybrid wind-PV-PEV systems", Applied Energy, Vol. 211, pp. 1136-1149, 2018.
[21] Quan, H., Yang, D., Khambadkone, A. M., Srinivasan, D., "A Stochastic Power Flow Study to Investigate the Effects of Renewable Energy Integration", proceeding in IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), pp. 19-24, 2018.
[22] Shafiq, S., Javaid, N., Asif, S., Ali, F., "An Optimal Power Flow Approach for Stochastic Wind and Solar Energy Integrated Power Systems", proceeding in Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems, pp. 292-304, 2018.
[23] Sarda, J., Pandya, K., "Optimal Active–Reactive Power Dispatch Considering Stochastic Behavior of Wind, Solar and Small-Hydro Generation", Applications of Artificial Intelligence Techniques in Engineering, Vol. 698, pp. 255-263, 2019.
[24] Yadav, J., Sharma, M., "A Review of K-mean Algorithm", International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), Vol. 4, pp. 2972-2976, 2013.
[25] Rabiee, A., Sadeghi, M., Aghaei, J., Heidari, A., "Optimal operation of microgrids through simultaneous scheduling of electrical vehicles and responsive loads considering wind and PV units uncertainties", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 57, pp. 721-739, 2016.
[26] Jabbari-Sabet, R., Moghaddas-Tafreshi, S. M., Mirhoseini, S. S., "Microgrid operation and management using probabilistic reconfiguration and unit commitment", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 75, pp. 328-336, 2016.
[27] Gupta, S., Deep, K., "A novel Random Walk Grey Wolf Optimizer", Swarm and Evolutionary Computation, Vol. 44, pp. 101-112, 2019.
[28] Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., Lewis, A., "Grey Wolf Optimizer", Advances in Engineering Software, Vol. 69, pp. 46-61, 2014.
[29] "MATPOWER Matlab Toolbox" [Online]. Available: http://www.pserc.cornell.edu/matpower.
[30] Power Systems Test Case Archive, Department of Electrical engineering, University of Washington, [Online]. Available: https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/index.html.
[31] Power Systems Test Case Archive, Electrical and Computer Engineering Department, Illinois Institute of Technology, [Online]. Available: http://motor.ece.iit.edu/DC/VSC/IEEE118.xls.
[32] Elia electricity grid data, [online]. Available: http://www.elia.be/en/grid-data.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022

Optimal power flow based on gray wolf optimization algorithm using probability density functions extraction considering wind power uncertainty

Abbas Charlang[1], Ali Darvish Falehi[2*], Hossein Toupchizadeh[1]

1- MSc student, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University Ahvaz, Iran

2-Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Shadegan Branch, Islamic Azad University, Shadegan, Iran, a_darvishfalehi@sbu.ac.ir

Abstract: In recent years, utilization of the renewable based power plants has become widespread in the power systems. One of the most widely used renewable based power plants is wind power plants. Due to the utilization of wind energy to generate electricity, wind turbines have not emitted any environmental pollution. Thus, in addition to economic benefits, utilization of these power plants is of great interest from the environmental view point. As the uncertainty in the generated power of these plants is due to the fluctuating nature of wind speed, some problems related to the power system operation including the optimal Power Flow (OPF) issue are revealed. In this paper, instead of using the predetermined probability distribution functions (such as Weibull distribution), the probability density functions extracted based on previous information of wind power plants are used to consider the generated power uncertainty of the wind power plants. The OPF issue has been modeled as an optimization problem aimed at minimizing the network operating cost. The direct power flow constraints are used to model the power grid. To evaluate the above method, the uncertainty scenarios are divided into two categories of sample scenarios and tests that the network performance in sample scenarios will be evaluated by test scenarios. To solve the above optimization problem, a new Random Walk Gray Wolf Optimization (RWGWO) has been used. The simulation of the above method has been performed using MATLAB software for two test networks of IEEE 30 buses and IEEE 118 buses. The simulation results indicate that the utilization of the extracted probability density function has been more consistent with the actual power network conditions and therefore has reduced the network costs as compared to the predetermined probability density function.

Keywords: Optimal Power Flow, Random Optimization, Uncertainty Scenarios, Extracted Probability Density Function, Random Walk Gray Wolf Optimization.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.4.2.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10, No. 4 Winter 2022