طراحی ریزشبکه‌های چندگانه مبتنی بر سناریو با نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر و در نظرگرفتن عدم قطعیت سمت تقاضا و تولید

فرهاد صمدی قاضی جهانی[1]، دانشجوی دکتری، جواد صالحی[2]، استادیار ، نوید تقی زادگان کلانتری[3] ، استادیار

۱- گروه مهندسی برق قدرت- دانشگاه شهید مدنی آذربایجان- تبریز- ایران
f.samadi@azaruniv.ac.ir
۲-گروه مهندسی برق قدرت- دانشگاه شهید مدنی آذربایجان- تبریز- ایران
j.salehi@azaruniv.ac.ir
۳- گروه مهندسی برق قدرت- دانشگاه شهید مدنی آذربایجان- تبریز- ایران
n.taghizadegan@azaruniv.ac.ir

چکیده: این مقاله یک روش جدید مبتنی بر سناریو برای طراحی بهینه ریزشبکه‌های چندگانه با درنظرگرفتن عدم قطعیت بار مصرفی و تولید منابع تولیدپراکنده تجدیدپذیر ارایه می‌کند. روش پیشنهادی برای تعیین ظرفیت، نوع، تعداد و مکان بهینه منابع تولیدپراکنده تجدیدپذیر و کنترل‌پذیر همراه با جایابی بهینه سوئیچ جهت خوشه بندی شبکه توزیع سنتی به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های به هم پیوسته با ساختاری اقتصادی و قابل اطمینان به کارگرفته شده است. هدف مساله پیشنهادی کاهش کلیه هزینه‌های طراحی شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری، هزینه تلفات سیستم، هزینه آلودگی هوا و همچنین هزینه انرژی تامین نشده ریزشبکه‌ها می باشد. توابع هدف مختلف درنظرگرفته شده توسط روش مجموع ضرایب وزنی به صورت یک مساله تک هدفه غیرخطی آمیخته با عدد صحیح مدل‌سازی گردیده است. بعلاوه، عدم قطعیت پارامترهای ورودی مساله توسط روش تولید سناریو مدل سازی شده و برای کاهش حجم محاسباتی و افزایش سرعت اجرای برنامه از تکنیک کاهش سناریو به روش بکوارد بهره برده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته برای بهینه سازی تابع هدف استفاده شده و همچنین، تاثیر ضرایب بهینه‌سازی بر روی مساله طراحی و مقاوم بودن الگوریتم پیشنهادی توسط آنالیز حساسیت مورد بررسی قرار گرفته است. درانتها کارایی و عملکرد روش پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد ۳۳ باسه مورد اجرا قرارگرفته و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی ابزاری کارامد و موثر برای طراحی ریزشبکه‌های به‌هم پیوسته با درنظرگرفتن عدم قطعیت می‌باشد.

واژه های کلیدی: طراحی ریزشبکه‌های چندگانه، قابلیت اطمینان، منابع تولیدپراکنده تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی سناریو محور

تاریخ ارسال مقاله :۱۳۹۶/۷/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۵/۱۳

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر جواد صالحی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

۱- مقدمه

امروزه طراحان شبکه‌های توزیع انرژی با مسائلی از قبیل تغییرات قابل توجه رشد بار، رشد سریع تقاضا، محدود بودن منابع فسیلی، کم بودن قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع به دلیل شعاعی بودن آن‌ها و همچنین گسترش جغرافیایی مشتریان روبرو می‌باشند [۱]. از سویی به علت سیاست‌های زیست محیطی، سرمایه‌گذاران سیستم‌های قدرت تمایل چندانی به احداث نیروگاه‌های سوخت فسیلی نداشته و چالش-های جدیدی در بکارگیری منابع تولید توان برای طراحان سیستم قدرت به وجود آمده است [۲]. در حال حاضر با توسعه تکنولوژی‌های تولید انرژی، افزایش توجه به مسائل محیطی و علاقه برای بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی، امکان و انگیزه لازم برای تغییر شبکه‌های توزیع از حالت غیرفعال به فعال و رغبت در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح سیستم‌های توزیع فراهم شده است [۳].

از سویی دیگر اتصال منابع تولیدپراکنده به شبکه‌های توزیع کنونی، نیازهای فنی و اقتصادی سرمایه‌گذاران را فراهم نکرده و در حالی که انتظار می رفت با افزایش ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده کیفیت برق بهبود یابد، به خاطر نوسانات توان ناشی از تفاوت ولتاژ و فرکانس منابع انرژی تجدیدپذیر مختلف، نتایج عکس حاصل گردیده است [۴]. از این رو راه حل مناسب برای برطرف کردن مشکلات فوق، ساخت شبکه‌های کوچک مستقل یا ریزشبکه می باشد. ریزشبکه‌ها که از ادغام چندین منبع تولید پراکنده در سطوح فشارضعیف و متوسط تشکیل شده‌اند، یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها جهت تولید توان در شبکه‌های توزیع آینده به شمار می روند. طبق تعریف سازمان انرژی امریکا [۵]، ریزشبکه‌ها شبکه‌هایی با مقیاس کوچک در سطح فشار ضعیف می باشند که دارای بارهای قابل‌کنترل و غیرقابل‌کنترل به همراه انواع مختلف منابع تولیدپراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی بوده که می توانند هم در حالت متصل به شبکه و هم در حالت جزیره-ای مورد بهره‌برداری قرار گیرند [۶].

به طور کلی، طراحی ریزشبکه‌ها در دو فاز اصلی شامل جایابی بهینه منابع تولیدپراکنده و مرزبندی بهینه ریزشبکه‌ها انجام می‌گیرد که فاز اول به منظور تبدیل شبکه های توزیع به شبکه های فعال و متعاقبا فاز دوم برای تبدیل شبکه‌های توزیع فعال به ریزشبکه‌های به هم پیوسته صورت می‌گیرد [۷]. مراجع مختلفی با دیدگاه‌های متفاوت مساله طراحی ریزشبکه‌ها را بررسی کرده‌اند که در [۸] یک مرور کلی از روش‌های مختلف صورت گرفته برای طراحی ریزشبکه‌ها ارایه شده است. مرجع [۹] یک روش بهینه با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و امنیت سیستم توزیع برای طراحی ریزشبکه‌های چندگانه در نظرگرفته است. هدف اصلی این مقاله خوشه‌بندی شبکه توزیع به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌ها با در نظرگرفتن قابلیت اطمینان شبکه می‌باشد. مرجع [۱۰] یک روش چندهدفه اقتصادی با در نظرگرفتن خاصیت احتمالاتی منابع تولیدپراکنده تجدیدپذیر برای طراحی یک ریزشبکه واحد پیشنهاد کرده است. طراحی ریزشبکه‌ها بر اساس خودترمیمی در برابر حوادث احتمالی در شبکه توزیع در مرجع [۱۱] مورد بررسی قرارگرفته است. در این مرجع پارتیشن بندی شبکه توزیع به مجموعه ای از ریزشبکه‌ها با هدف کمترین بارزدایی از سیستم تحت شرایط جزیره‌ای و کمترین هزینه بهره‌برداری در حالت خطا مورد ارزیابی قرارگرفته است. هدف مرجع [۱۲] زون بندی شبکه‌های توزیع در قالب ریزشبکه-ها با هدف افزایش قابلیت اطمینان کل سیستم در برابر حوادث طبیعی و نادر میباشد. در این مقاله، استراتژی‌های بهره‌برداری بهینه در زمان ایجاد خطای شدید با دامنه بالا و احتمال کم ارایه شده که این کار با زون بندی شبکه توزیع به خوشه‌ای از ریزشبکه‌ها عملیاتی می شود.

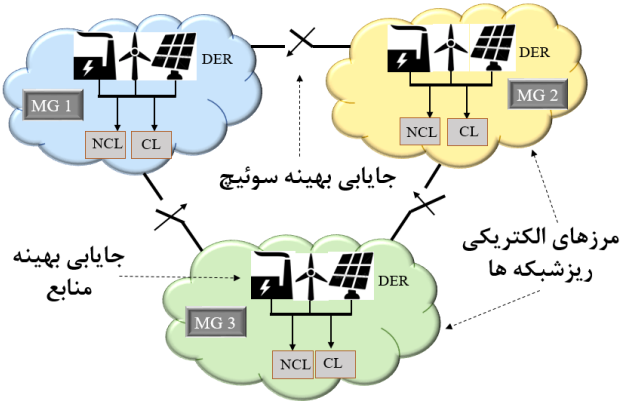
طراحی ریزشبکه‌ها می تواند به دو صورت برنامه‌ریزی استاتیکی و دینامیکی انجام گردد. در طراحی استاتیکی، تمامی متغیرهای سرمایه-گذاری منابع ریزشبکه‌ها در سال اول طراحی انجام می‌شود در حالی که در مدل دینامیکی احداث منابع می‌تواند در سال‌های مختلف بهره-برداری انجام گیرد[۱۳]. به طور مثال، طراحی ریزشبکه‌های چندگانه با در نظرگرفتن استراتژی‌های مختلف ریسک در مراجع [۱۶-۱۳] گزارش شده است. طراحی ریزشبکه‌های چندگانه بصورت متصل به هم با روش مینیمم کات‌ست در مرجع [۱۴] انجام شده است. مرجع [۱۵] یک مدل بهینه برای طراحی ریزشبکه‌ها با در نظرگرفتن عدم قطعیت در تولید منابع پراکنده تجدیدپذیر همچون توربین بادی و سیستم‌های فوتوولتاییک پیشنهاد می کند. در این مقاله تابع هدف مساله شامل هزینه نصب و بهره‌برداری واحدهای تولیدی و منابع ذخیره‌ساز انرژی بوده و جنبه‌های قابلیت اطمینان و زیست‌محیطی در نظرگرفته نشده است. طراحی ریز شبکه‌ها با استفاده از نظریه‌های گراف در مرجع [۱۶] پیشنهاد شده است. در این مقاله طراحی ساختار ریزشبکه‌ها با استفاده از نظریه پارتیشن بندی گراف‌ها بصورت ساختار حلقوی با در نظرگرفتن قابلیت اطمینان سیستم مورد بررسی قرارگرفته است.

از سوی دیگر، طراحی ریزشبکه‌ها به طرق مختلف می تواند مدل سازی و حل گردد. بطور مثال، در مراجع [۷] و [۱۷] مدل سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند برای طراحی ریزشبکه‌های چندگانه پیشنهاد شده است. همچنین، مدل سازی دو سطحی [۱۳]، مدل سازی تک هدفه مبتنی بر بهینه سازی مقاوم [۱۸] و برنامه ریزی دومرحله ای [۱۹] برای طراحی ریزشبکه‌ها استفاده شده است. در این مقاله طراحی ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن توسعه خطوط انتقال و به تعویق انداختن توسعه شبکه بالادست گزارش شده است. مراجع [۲۰] و [۲۱] ادغام بهینه منابع تولیدپراکنده را در سمت فشار متوسط شبکه توزیع با هدف بهبود قابلیت اطمینان و کفایت شبکه با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی انجام داده‌اند. همچنین، خوشه‌بندی ریزشبکه‌های چندگانه با هدف بهبود کنترل پذیری و جنبه‌های مخابراتی شبکه در [۲۲] انجام شده است. در مرجع [۲۳] طراحی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

ریزشبکه‌های جریان متناوب و جریان مستقیم به صورت هماهنگ و بهینه مورد بررسی قرارگرفته است.



شکل (۱): مفاهیم روش پیشنهادی طراحی ریزشبکه ها

گرچه طراحی ریزشبکه‌های چندگانه در مراجع قبلی گزارش شده است، اما طراحی ریزشبکه‌های چندگانه با درنظرگرفتن کلیه جنبه‌های اقتصادی، فنی، زیست محیطی و قابلیت اطمینان بصورت مبتنی بر عدم قطعیت در پارامترهای طراحی سیستم در مراجع قبلی گزارش نشده است. همچنین، باتوجه به مشخصات مساله که یک مساله غیرخطی و غیر محدب است، استفاده از الگوریتم های بهینه سازی جدید و بهبود داده شده برای رسیدن به جواب بهینه‌تر بسیار مطلوب می‌باشد. به همین منظور، برای پرکردن خلاهای علمی موجود، مقاله حاضر یک روش بهینه و جامع با درنظرگرفتن جنبه‌های اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و قابلیت‌اطمینان با هدف ساختاری اقتصادی و قابل اطمینان با در نظرگرفتن تبادلات توان بین ریز شبکه-ها و شبکه بالادست به منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش بارزدایی در حالت جزیره‌ای برای ریزشبکه‌های چندگانه ارایه می‌کند. محاسبات فوق تحت محیط احتمالاتی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که روش تولید سناریو برای پوشش عدم‌قطعیت مساله به کار گرفته شده است. تابع هدف پیشنهادی توسط یک الگوریتم هوشمند جدید به نام الگوریتم بهینه سازی فاخته با در نظرگرفتن قیود مختلف بهره‌برداری و فنی شبکه بهینه شده است. شکل (۱) مفاهیم طراحی ریزشبکه‌ها شامل جایابی منابع تولیدپراکنده و مرزبندی ریزشبکه‌ها را در شبکه توزیع به تصویر می‌کشد. به طور کلی نوآوری‌های مقاله عبارتند از:

- طراحی بهینه و هماهنگ انواع مختلف منابع تولیدپراکنده
- تعیین مرزهای الکتریکی ریزشبکه‌ها با جایابی سوئیچ
- درنظرگرفتن همزمان هزینه، قابلیت اطمینان و آلودگی هوا
- مدل سازی عدم قطعیت تولید و بار با روش تولید سناریو
- استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جدید به نام الگوریتم فاخته

ساختار کلی مقاله به صورت زیر است: در بخش دوم مدل‌سازی احتمالاتی منابع و بار مصرفی شبکه نشان داده شده است، بخش سوم فرمول بندی روش پیشنهادی را توضیح می‌دهد، الگوریتم به‌کار رفته جهت بهینه‌سازی در قسمت چهارم گزارش شده است، بخش پنج نتایج حاصله از شبیه‌سازی‌ها را به تصویر کشیده شده و مورد ارزیابی قرار می دهد و در قسمت ششم نتیجه‌گیری کلی مقاله توضیح داده شده است.

۲- مدل سازی احتمالاتی بار و منابع

با افزایش روز افزون استفاده از منابع تولید تجدیدپذیر در شبکه-های توزیع از یک طرف و ماهیت تصادفی الگوهای تجدیدساختار از سوی دیگر باعث افزایش عدم قطعیت در پارامترهای سیستم‌های قدرت می‌شود. با توجه به این قضیه طراحی شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن خاصیت احتمالاتی متغیرهای سیستم به یکی از چالش‌های اساسی در مساله طراحی شبکه‌های توزیع آینده تبدیل شده است. از این رو، آنالیزهای احتمالاتی به عنوان راهکاری موثر پیش روی برنامه-ریزان و طراحان سیستم توزیع قرار می‌گیرد که در این قسمت مدل-سازی احتمالاتی پارامترهای دارای عدم قطعیت توسط روش تولید سناریو توضیح داده شده است.

۲-۱- بار مصرفی

تقاضای سیستم توزیع تا حدود زیادی به فعالیت‌های بشری و فاکتور زمان بستگی دارد. در تئوری احتمالات رفتار تصادفی پارامترها می‌تواند توسط تابع چگالی احتمالاتی متناسب با رفتار آن‌ها در گذشته نشان داده شود. در مقاله حاضر، برای مدل سازی رفتار احتمالاتی بار شبکه از توزیع نرمال استفاده گردیده است [۲۴] که به صورت زیر می‌باشد.

$$F_L\left(P^D\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\times\sigma}\exp\left(-\frac{\left(P^D-\mu\right)^2}{2\times\sigma^2}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق μ مقدار میانگین بار و σ انحراف معیار توزیع احتمالاتی بار شبکه می‌باشد و P^D نشان دهنده توان مصرفی ریزشبکه‌ها بوده که به ازای هر P^D یک عدد برای $F_L(P^D)$ به دست می‌آید. شایان ذکر است که رابطه فوق میزان بار پیک سالانه شبکه را نشان می‌دهد.

۲-۲- توربین بادی

سرعت باد به طور پیوسته در حال تغییر بوده و میزان سرعت دقیقی را نمیتوان برای منطقه جغرافیایی خاصی تعیین کرد. برای مشخص کردن میزان فراوانی سرعت باد در یک منطقه خاص با رجوع به سرعت باد در اطلاعات قبلی آن منطقه می توان تابع احتمالاتی مناسبی را برای تعیین نمودن طبیعت تغییرات باد به دست آورد که در این مقاله

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

از تابع توزیع وایبول برای مدل‌سازی تغییرات باد بهره‌برده شده است [۲۵]. رابطه (۲) تابع عمومی تابع احتمالاتی ویبول را نشان می‌دهد.

$$F_{\upsilon}(\upsilon)=\begin{cases}\dfrac{\partial}{\kappa}\times\left(\dfrac{\upsilon}{\partial}\right)^{\rho-1}\times\exp\left(\partial\dfrac{\upsilon}{\kappa}\right) & \upsilon\geq 0\\ 0 & otherwise\end{cases} \quad (۲)$$

در رابطه فوق ∂، κ و ν به ترتیب ضرایب شکل توزیع ویبول و سرعت باد را نشان می‌دهند. در یک توربین بادی توان خروجی تولیدی متناسب با سرعت باد می‌باشد. رابطه (۳) نشان دهنده توان تولیدی توربین بادی بر حسب سرعت های مختلف باد است که بصورت یک تابع درجه دوم تقریب زده شده است.

$$P_{WT}=\begin{cases}0 & 0\leq V\leq V_{ci}\ or\ V_{co}\leq V\leq\infty\\ \left(A.V^2+B.V+C\right)P_{WT}^{rate} & V_{ci}\leq V\leq V_r\\ P_{WT}^{rate} & V_r\leq V\leq V_{co}\end{cases} \quad (۳)$$

در رابطه (۳) متغیرهای V_{ci}, V_r, V_{co} به ترتیب سرعت قطع، سرعت نامی و سرعت وصل توربین بادی بوده و P_{rate} توان تولیدی نامی توربین بادی تحت سرعت نامی توربین بادی می‌باشد.

۲-۳- سلول خورشیدی

میزان تابش نور خورشید و درجه هوای محیطی که سلول‌های خورشیدی در آن قرار دارند باعث متغییر بودن توان تولیدی منابع تولید توان خورشیدی می‌شوند. در این مقاله برای نشان دادن منحنی تغییرات تابش نور خورشید از تابع توزیع احتمالاتی بتا استفاده گردیده [۲۶] که رابطه عمومی توزیع بتا با پارامترهای شکل Ω و φ در رابطه (۴) نشان داده شده است.

$$F_S(S)=\begin{cases}\dfrac{\Gamma(\xi+\varphi)}{\Gamma(\xi)+\Gamma(\varphi)}\times S^{\xi}\times(1-S)^{\varphi}, 0\leq S\leq 1\\ 0 \quad otherwise\end{cases} \quad (۴)$$

$$P_{PV}=P_{STG}\times\frac{G_{ING}}{G_{STG}}\times\left(1+k\left(T_C-T_{ref}\right)\right) \quad (۵)$$

رابطه (۵) توان تولید مدول‌های خورشیدی را تحت شرایط محیطی مختلف نشان می‌دهد که با تغییر زاویه تابش خورشید و درجه حرارت محیط توان تولیدی مدول خورشیدی طبق رابطه فوق تعیین می‌شود. در رابطه فوق k ضریب حرارتی و P_{STG} توان تولیدی تحت شرایط نامی بوده، G_{STG} ، G_{ING} به ترتیب تابش خورشد در حالت استاندارد و شرایط عادی بوده و همچنین T_C و T_{ref} دمای اطراف سلول و دمای استاندارد می‌باشند.

۲-۴-منابع تولید همزمان توان و حرارت

منابع تولید همزمان توان و حرارت به عنوان یکی از اقتصادی‌ترین و پر بازده‌ترین منابع تولید توان الکتریسیته شناخته می‌شود که قابلیت تولید همزمان توان الکتریکی و حرارت را دارا هستند. این منابع در سه نوع ساخته می شوند که در این مقاله از نوع تولید فقط توان الکتریکی استفاده شده است. هزینه سوخت این واحدها توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۲۷]. در این رابطه، α، β و γ ضرایب هزینه تولیدی واحدهای تولید همزمان توان و حرارت بوده و P_{CHP} توان تولیدی منبع می-باشد.

$$P_{CHP}(G)=\alpha+\beta.P_{CHP}+\gamma.P_{CHP}^2 \quad (۶)$$

۲-۵- تولید وکاهش سناریو

به دلیل عدم‌قطعیت در بار مصرفی ریزشبکه‌ها و تولید توان منابع تجدیدپذیر انرژی همچون توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی، طراحی ریزشبکه‌ها با در نظرگرفتن مساله عدم قطعیت به یکی از چالش‌های اساسی برای طراحان سیستم توزیع مبدل گردیده است. در این مقاله برای پوشش عدم قطعیت پارامترهای طراحی سیستم از روش تولید سناریو استفاده شده است. در این روش با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو از روی تابع توزیع احتمالاتی متغیرهای سیستم تعدادی حالت تصادفی برای متغییرهای سیستم ایجاد شده سپس احتمال وقوع هر حالت محاسبه می‌شود [۲۸]. روابط (۷) تا (۹) به ترتیب سمپل‌های استخراج شده از توزیع‌های احتمالاتی برای بار، تولید توربین بادی و تولید سلول‌های خورشیدی را نشان می‌دهد که مجموع احتمالات آن‌ها باید برابر یک باشد. رابطه (۱۰) نحوه ترکیب سمپل‌ها برای تولید سناریوها را نشان می‌دهد که مجموع احتمالات سناریوهای تولید شده باید همواره برابر با یک باشد (۱۱).

$$\phi_d=\left\{\left(C_d^1,\psi_d^1\right),\left(C_d^2,\psi_d^2\right),...,\left(C_d^n,\psi_d^n\right)\right\} \quad (۷)$$
$$\psi_d^1+\psi_d^2+...+\psi_d^n=1$$

$$\phi_w=\left\{\left(C_w^1,\psi_w^1\right),\left(C_w^2,\psi_w^2\right),...,\left(C_w^n,\psi_w^n\right)\right\} \quad (۸)$$
$$\psi_w^1+\psi_w^2+...+\psi_w^n=1$$

$$\phi_s=\left\{\left(C_s^1,\psi_s^1\right),\left(C_s^2,\psi_s^2\right),...,\left(C_s^n,\psi_s^n\right)\right\} \quad (۹)$$
$$\psi_s^1+\psi_s^2+...+\psi_s^n=1$$

$$S=\phi_d\times\phi_w\times\phi_s \quad (۱۰)$$

$$\sum_{S\in N_S}\psi_d+\psi_w+\psi_s=1 \quad (۱۱)$$

در روابط فوق ψ_d، ψ_wو ψ_s به ترتیب احتمال وقوع حالت‌های محتمل بار، تولید توربین بادی و مدول‌های خورشیدی را نشان می‌دهند. همچنین C_d، C_wو C_s مقدار عددی مقادیر استخراج شده از توزیع احتمالاتی برای بار، تولید توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی را به ترتیب ارائه می‌دهد و N_S تعداد کل سناریوهای تولیدی می‌باشد.

لازم به ذکر است که در این مقاله برای کاهش حجم محاسباتی و افزایش سرعت اجرای برنامه از کاهش سناریو به روش بکوارد [۲۹] استفاده شده است. این روش علارغم کاهش حجم محاسباتی مساله و بهبود سرعت انجام آن، دقت مورد نیاز مساله را تضمین می‌کند. کاهش

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

سناریو روشی برای انتخاب بهینه سناریوهای مفید از میان مجموعه‌ای از سناریوهای تولید شده است که باعث کاهش زمان اجرای الگوریتم می‌شود و همچنین پیچیدگی محاسباتی مساله را به شدت کاهش می-دهد. مراحل اعمال روش بکوارد به‌صورت زیر است:

۱. تولید ماتریس فاصله بین سناریوها به صورت $C(S,S')$
۲. انتخاب سناریو اول توسط رابطه (۱۲)
۳. انتخاب سناریو بعدی و اضافه کردن به سناریو قبلی (۱۳)
۴. تکرار الگوریتم تا زمانی که به تعداد لازم سناریو انتخاب شود
۵. احتمال هر سناریو انتخاب نشده به احتمال نزدیک‌ترین سناریو انتخاب شده اضافه گردد

$$S_1 = \arg\left\{\min_{S'\in Ns}\sum_{S}\psi_S \times C\left(S,S'\right)\right\} N_S = \left\{S_1\right\} \quad (۱۲)$$

$$S_n = \arg\left\{\min_{S'\in Ns}\sum_{S}\psi_S \min_{S''\in Ns} C\left(S,S''\right)\right\} N_S \quad (۱۳)$$

برای مشاهده جزئیات بیشتر و مفصل در مورد روش‌های موجود جهت کاهش سناریو می توان به مرجع [۳۰] مراجعه کرد.

۳- فرمول بندی مساله

۳-۱-ارزیابی اقتصادی

در این قسمت ارزیابی اقتصادی جهت نصب منابع تولید پراکنده و کلیدهای قدرت شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری برای طراحی ریزشبکه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که روش پیشنهادی یک روش استاتیک بوده به طوریکه تمام سرمایه گذاری‌ها در سال اول افق طراحی انجام می‌شود.

۳-۱-۱- هزینه سرمایه گذاری

هزینه سرمایه‌گذاری منابع تولید پراکنده و کلیدها شامل هزینه نصب و هزینه‌های مربوط به زمین می‌باشد که رابطه (۱۴) نشان دهنده هزینه منابع تولیدپراکنده و سوئیچ‌ها در تمامی سناریوها می باشد.

$$C_1 = \sum_{s=1}^{N_S}\left(\sum_{i=1}^{N_{DG}} IC_{i,s}^{DG}\times P_{i,s}^{DG}\times \eta_{i,s}^{DG} + \sum_{m=1}^{N_{SW}} IC_{m,s}^{SW}\times \theta_{m,s}^{SW}\right) \quad (۱۴)$$

در رابطه فوق، $IC_{i,s}^{DG}$ هزینه احداث منابع، $P_{i,s}^{DG}$ میزان توان احداث شده برای منابع و $\eta_{i,s}^{DG}$ متغیر باینری برای نصب منبع i در سناریو s می باشد. همچنین، $IC_{m,s}^{SW}$ هزینه احداث کلیدها و $\theta_{m,s}^{SW}$ متغیر باینری برای نصب کلید m در سناریو s می‌باشد.

۳-۱-۲- هزینه تعمیرنگهداری

این هزینه نشان دهنده هزینه سالانه تعمیرات فصلی و دوره‌ای منابع تولید پراکنده و کلیدهای قدرت نصب شده می باشد که با رابطه (۱۵) نشان داده شده و توسط نرخ تورم و نرخ سود بصورت رابطه (۱۶) اصلاح می‌شود. در رابطه (۱۵)، $MC_{i,s}^{DG}$ هزینه تعمیر ونگهداری منابع و $P_{i,s}^{DG}$ میزان توان تولیدی منابع را در سناریو s می‌باشند. همچنین، $MC_{m,s}^{SW}$ هزینه تعمیر و نگهداری سوئیچ‌های نصب شده بوده و $\tau_{m,s}^{SW}$ میزان قطع و وصل کلید m در سناریو s می‌باشد. در رابطه (۱۶) نیز، $InfR$ و $IntR$ به ترتیب نرخ تورم و نرخ بهره را در افق بهره‌برداری نشان می‌دهند.

$$C_2 = \sum_{s=1}^{N_S}\left(\sum_{i=1}^{N_{DG}} MC_i^{DG}\times P_{i,s}^{DG} + \sum_{m=1}^{N_{SW}} MC_m^{SW}\times \tau_{m,s}^{SW}\right) \quad ۱۵()$$

$$CPV\left(C_2\right) = C_2\sum_{s=1}^{N_S}\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{1+InfR}{1+IntR}\right)^t \quad (۱۶)$$

۳-۱-۳- هزینه بهره‌برداری

هزینه بهره‌برداری شامل هزینه سوخت واحدهای فسیلی همچون منابع تولید همزمان برق و حرارت می‌باشد که هزینه آن در سال‌های مختلف بهره‌برداری توسط رابطه (۱۷) و رابطه اصلاح شده آن در افق زمان‌های بهره‌برداری مختلف توسط رابطه (۱۸) بدست می‌آید. در این روابط، CG_i^s هزینه تولید، $T_{i,s}^{DG}$ مدت زمان بهره‌برداری و $P_{i,s}^{DG}$ مقدار توان تولیدی را در سناریو s نشان می‌دهند.

$$C_3 = \sum_{s=1}^{N_S}\sum_{i=1}^{N_{DG}} T_{i,s}^{DG}\times CG_i^{DG}\times P_{i,s}^{DG} \quad (۱۷)$$

$$CPV\left(C_3\right) = C_3\sum_{s=1}^{N_S}\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{1+InfR}{1+IntR}\right)^t \quad (۱۸)$$

شایان ذکر است که منابع تجدیدپذیر فاقد هزینه سوخت اولیه بوده و هزینه های بهره برداری ان ها تنها در قالب هزینه های تعمیر و نگهداری درنظرگرفته شده اند.

۳-۲- ارزیابی فنی

در این بخش جنبه‌های فنی طراحی ریزشبکه‌ها شامل هزینه‌های آلودگی هوا ناشی از تولید منابع تولید پراکنده فسیلی و هزینه تلفات شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳-۲-۱-هزینه آلودگی هوا

با توجه به معاهده کیوتو و لزوم کاهش گازهای گلخانه‌ای، در نظرگرفتن این بحث در مساله طراحی ریزشبکه‌ها به یکی از اهداف

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

مهم طراحی شبکه های توزیع آینده تبدیل شده است که در این مقاله هزینه آلودگی هوا طبق رابطه زیر مدل‌سازی شده است [۳۱].

$$C_4 = \sum_{s=1}^{N_S} \sum_{i=1}^{N_{CHP}} \left[\zeta_i^{CHP} \exp\left(\delta_i \times P_{i,s}^{CHP} \right) \right] \quad (۱۹)$$

$$CPV\left(C_4\right) = C_4 \sum_{t=1}^{T} \left(\frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (۲۰)$$

در رابطه (۱۹) ζ_i^{CHP} و δ_i ضرایب مربوط به واحدهای تولید همزمان توان و حرارت برای ایجاد آلودگی هوا بوده و $P_{i,s}^{CHP}$ توان تولیدی واحدهای تولید همزمان توانو حرارت را در سناریو s نشان می‌دهد. بعلاوه، رابطه (۲۰) ارزش فعلی هزینه ناشی از آلودگی هوا را در طول افق بهره‌برداری به دست می‌دهد.

۳-۲-۲-هزینه تلفات

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های فنی برای ارزیابی کیفیت شبکه‌های توزیع تلفات الکتریکی آن است. محاسبه تلفات سیستم نیازمند اجرای برنامه پخش بار بر روی سیستم مورد مطالعه بوده که در این مقاله از روش پخش بار بکوارد-فوروارد به عنوان روشی مطمئن و مناسب برای شبکه‌های توزیع با مقاومت الکتریکی بالا استفاده شده است [۳۲]. باتوجه به مدل‌سازی احتمالاتی مساله، تلفات سیستم نیز به صورت احتمالاتی توسط روش تولید سناریو در رابطه (۲۱) نشان داده شده است. همچنین هزینه فعلی تلفات توسط رابطه (۲۲) محاسبه می‌گردد.

$$C_5 = \sum_{s=1}^{N_S} \sum_{b=1}^{N_b} \left(R_b \times I_{b,s}^2 \right) C_{loss} \quad (۲۱)$$

$$CPV\left(C_5\right) = C_5 \sum_{t=1}^{T} \left(\frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (۲۲)$$

که در این روابط R_b مقاومت خطوط شبکه، $I_{b,s}$ جریان عبوری از خطوط و C_{loss} هزینه تلفات انرژی به صورت دلار بر کیلووات را نشان می دهد.

۳-۳-ارزیابی قابلیت اطمینان

یکی از مهم‌ترین اهداف تبدیل شبکه‌های توزیع شعاعی به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های به هم پیوسته لزوم بالابردن سطح قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع می باشد. با توجه به ساختار شعاعی شبکه‌های توزیع و پایین بودن قابلیت اطمینان این شبکه‌ها، خوشه‌بندی شبکه‌های توزیع به صورت مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های به هم پیوسته باعث بهبود سطح قابلیت اطمینان مشترکین شبکه خواهد شد [۳۳]. روش پیشنهادی قابلیت اطمینان سیستم توزیع را نیز مورد ارزیابی قرارداده است که در ادامه توضیح داده می‌شود.

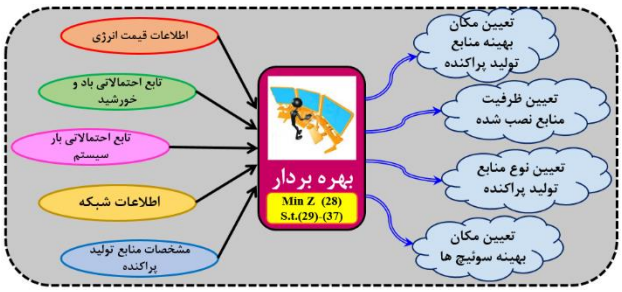
۳-۳-۱-هزینه انرژی تامین نشده

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه های توزیع شاخص انرژی تامین نشده می‌باشد که اطلاعات کاملی را از رفتار و عملکرد سیستم در اختیار قرار می‌دهد. این شاخص میزان انرژی قطع شده ناشی از وقوع پیشامد در خطوط شبکه را نشان می‌دهد که به صورت سالانه محاسبه می‌گردد [۷]. ذکر این نکته حائز اهمیت می باشد که در این مقاله فرض شده است تنها خطوط شبکه دچار خطا می‌شوند و سایر تجهیزات شبکه به صورت ۱۰۰٪ قابل اطمینان می باشند. رابطه (۲۳) نشان دهنده هزینه قطعی مشترکین به ازای سناریوهای مختلف می‌باشد که هزینه فعلی ان توسط رابطه (۲۴) برای سال‌های مختلف بهره‌برداری محاسبه می‌شود.

$$C_6 = \sum_{s=1}^{Ns} \left\{ \sum_{b=1}^{Nb} C_{\text{int}} \times \lambda_b \times L_b \times P_{b,s}^D \times \sum_{res=1}^{N_{res}} P_s^{res} \times T_s^{res} + \sum_{rep=1}^{N_{rep}} P_s^{rep} \times T_s^{rep} \right\} \quad (۲۳)$$

$$CPV\left(C_6\right) = C_6 \sum_{t=1}^{T} \left(\frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (۲۴)$$

در رابطه (۲۳) λ_b نرخ خرابی خطوط، L_b طول خطوط شبکه توزیع، P_b^D میزان توان بار قطع شده و C_{int} هزینه قطعی هر مشترک به ازای هر کیلو وات ساعت را نشان می‌دهد. همچنین P_s^{res} و T_s^{res} نیز به ترتیب توان قطع شده ناشی از عملیات بازیابی خطا و زمان بازیابی را نشان می‌دهند و P_s^{rep} و T_s^{rep} به ترتیب میزان توان قطع شده ناشی از تعمیرات و زمان تعمیرات را در سناریو s نشان می‌دهند.



شکل (۲): نمودار تصمیم گیری برای طراحی ریزشبکه‌ها

۳-۴-تابع هدف و قیود مساله

بطور کلی تابع هدف مساله از سه قسمت هزینه اقتصادی، هزینه فنی و هزینه قابلیت اطمینان تشکیل شده است که به ترتیب توسط روابط (۲۵) تا (۲۷) نشان داده شده‌اند. هدف بهینه‌سازی مینیمم کردن همزمان مجموع هزینه‌های ذکر شده با رعایت قیود مختلف سیستم می‌باشد. متغیرهای اصلی مساله شامل جایابی و ظرفیت‌یابی انواع مختلف منابع تولیدپراکنده و هم چنین جایابی بهینه سوئیچ‌ها برای تعیین مرزهای الکتریکی ریزشبکه‌ها می‌باشد که توسط شکل (۲) نشان

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

داده شده است. توابع هدف درنظرگرفته شده توسط روش ضرایب وزنی تبدیل به یک تابع هدف واحد شده است (۲۸).

$$F(1)=C_1+CPV(C_2)+CPV(C_3) \quad (۲۵)$$

$$F(2)=CPV(C_4)+CPV(C_5) \quad (۲۶)$$

$$F(3)=CPV(C_6) \quad (۲۷)$$

$$Z=W_1\times F(1)+W_2\times F(2)+W_3\times F(3) \quad (۲۸)$$

در روابط فوق $F(1)$ تابع هدف اقتصادی، $F(2)$ تابع هدف فنی و زیست محیطی و $F(3)$ تابع هدف قابلیت اطمینان مساله طراحی را نشان می‌دهد. برای ترکیب این سه تابع به یک تابع هدف واحد از روش ضرایب وزنی استفاده شده است که در رابطه (۲۸) نشان داده شده است.

مساله بهینه سازی پیشنهادی تحت قیود مختلف بهره‌برداری و فنی انجام می‌شود. در این مقاله، قیود مساله شامل محدوده مجاز ولتاژ باسبارهای شبکه، حد مجاز جریان عبوری از فیدرها، حداکثر میزان و تعداد احداث منابع تولیدپراکنده، محدوده ظرفیت نصب هرمنبع و قید تعادل توان برای هریک از ریزشبکه‌ها وهمچنین معادلات پخش بار که به ترتیب توسط روابط (۲۹) تا (۳۷) نشان داده می‌شود. قید (۲۹) محدوده ولتاژ مجاز برای باس‌های شبکه را نشان می‌دهد که در این مقاله محدوده مجاز ولتاژ باس‌ها بین ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت در نظرگرفته شده است. همچنین جریان مجاز قابل عبور از هر خط شبکه توسط (۳۰) محدود می‌گردد. قید (۳۱) ماکزیمم مقدار قابل نصب برای منابع تولیدپراکنده در شبکه توزیع را نشان می‌دهد و قیود (۳۲) تا (۳۴) به ترتیب محدود مجاز برای نصب منابع تولید همزمان برق و حرارت، سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی را نشان می‌دهد. به علاوه، رابطه (۳۵) قید تعادل توان‌ها را برای ریزشبکه‌های ایجاد شده اعمال می‌کند که باعث می‌شود ریزشبکه‌ها به طورکلی مستقل و خودکفا باشند. در اخر روابط (۳۶) و (۳۷) معادلات پخش بار را نشان می‌دهند.

$$V_{n,s}^{\min}\le V_{n,s}\le V_{n,s}^{\max} \quad \forall s\in N_S \quad (۲۹)$$

$$I_{b,s}\le I_{b,s}^{\max} \quad \forall s\in N_S \quad (۳۰)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{DG}} P_i^{DG}\le P^{\max} \quad \forall s\in N_S \quad (۳۱)$$

$$P_{CHP}^{\min}\le P_{CHP}\le P_{CHP}^{\max} \quad \forall s\in N_S \quad (۳۲)$$

$$P_{PV}^{\min}\le P_{PV}\le P_{PV}^{\max} \quad \forall s\in N_S \quad (۳۳)$$

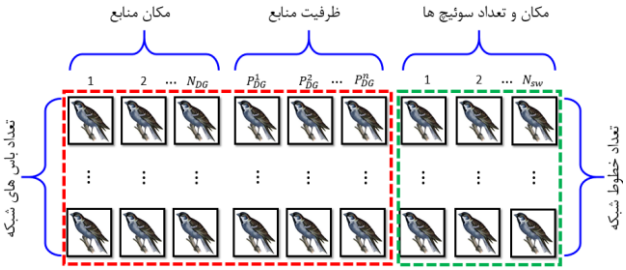
$$P_{WT}^{\min}\le P_{WT}\le P_{WT}^{\max} \quad \forall s\in N_S \quad (۳۴)$$

$$\sum_{n=1}^{N_{MG}} P_{i,n}^{DG}=\sum_{l=1}^{N_L} P_l^D+\sum_{b=1}^{N_b} P_b^{loss},\ \forall i \quad (۳۵)$$

$$-P_{t,s}^D+\sum_{i\in N_{DG}} P_{i,t,s}^{DG}= V_{j,t,s}\sum_{b\in Nb} Y_b.V_{k,t,s}\cos\left(\delta_{j,t,s}-\delta_{k,t,s}-\theta_{jk}\right) \quad (۳۶)$$

$$-Q_{t,s}^D+\sum_{i\in N_{DG}} Q_{i,t,s}^{DG}= V_{j,t,s}\sum_{b\in Nb} Y_b.V_{k,t,s}\sin\left(\delta_{j,t,s}-\delta_{k,t,s}-\theta_{jk}\right) \quad (۳۷)$$

در روابط فوق V_n ولتاژ باس n، I_b جریان انتقالی از خط b را نشان می‌دهد. همچنین Y_b ادمیتانس خط b بوده، δ_j و δ_k زاویه ولتاژ باس j و k می‌باشد. $P_{i,t,s}^{DG}$، $Q_{i,t,s}^{DG}$، $P_{t,s}^D$، $Q_{t,s}^D$ و P_b^{loss} به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی منابع تولیدپراکنده نصب شده و همچنین توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی شبکه و تلفات را نشان می‌دهند.



شکل (۳): برداری ورودی پیشنهادی برای الگوریتم فاخته

۴- الگوریتم بهینه سازی

با توجه به تابع هدف مساله که یک مدل غیرخطی غیرمحدب با تعداد زیادی متغیر باینری و عدد صحیح بوده، بدیهی است که نمی‌توان از روش‌های ریاضی و دقیق برای حل مساله بهره برد. از این رو در این این مقاله، برای بهینه‌سازی تابع هدف مساله از الگوریتم فاخته استفاده شده است [۳۴].

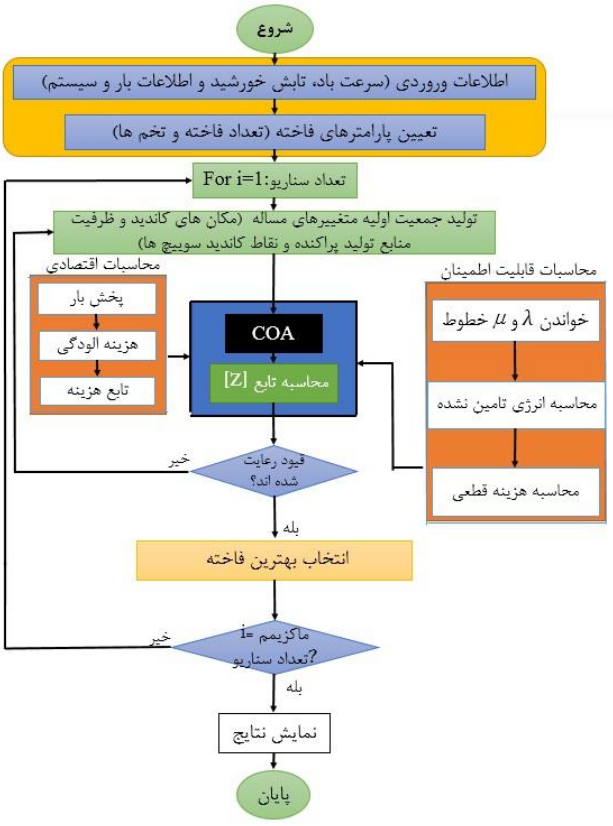
همانند سایر الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم فاخته هم با یک جمعیت اولیه کار خود را شروع می‌کند (جمعیتی متشکل از فاخته‌ها). این جمعیت از فاخته‌ها تعدادی تخم دارند که آن‌ها را در لانه تعدادی پرنده‌ی میزبان خواهند گذاشت. تعدادی از این تخم‌ها که شباهت بیشتری به تخم‌های پرنده میزبان دارند شانس بیشتری برای رشد و تبدیل شدن به فاخته بالغ خواهند داشت. سایر تخم‌ها توسط پرنده میزبان شناسایی شده و از بین می‌روند. میزان تخم‌های رشد کرده، مناسب بودن لانه‌های آن منطقه را نشان می‌دهند. هرچه تخم‌های بیشتری در یک ناحیه قادر به زیست باشند و نجات یابند به همان اندازه سود بیشتری به آن منطقه اختصاص می‌یابد. بنابراین موقعیتی که در آن بیشترین تعداد تخم‌ها نجات یابند پارامتری خواهد بود که الگوریتم فاخته قصد بهینه‌سازی آنرا دارد. فاخته‌ها برای بیشینه کردن نجات تخم‌های خود دنبال بهترین منطقه می‌گردند. پس از آنکه جوجه‌ها از تخم در آمدند و تبدیل به فاخته بالغ شدند، جوامع و گروه‌هایی تشکیل می‌دهند. هر گروه، منطقه سکونت خود را برای

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

زیست دارد. بهترین منطقه سکونت تمام گروه‌ها مقصد بعدی فاخته‌ها در سایر گروه‌ها خواهد بود. تمام گروه‌ها به سمت بهترین منطقه موجود فعلی مهاجرت می‌کنند. هر گروه در منطقه‌ای نزدیک بهترین موقعیت فعلی ساکن می‌شود. با در نظر گرفتن تعداد تخمی که هر فاخته خواهد گذاشت و همچنین فاصله فاخته‌ها از منطقه بهینه فعلی برای سکونت تعدادی شعاع تخم‌گذاری محاسبه شده و شکل می‌گیرد. سپس فاخته‌ها شروع به تخم‌گذاری تصادفی در لانه‌هایی داخل شعاع تخم‌گذاری خود می‌کنند. این پروسه تا رسیدن به بهترین محل برای تخم‌گذاری (منطقه با بیشترین سود) ادامه می‌یابد. این محل بهینه جایی است که بیشترین تعداد فاخته‌ها در آن گرد می‌آیند.

یکی از مهم‌ترین قسمت‌های مدل‌سازی مساله، تعیین درست بردار ورودی برای متغیرهای الگوریتم‌های هوشمند می‌باشد. بردار ورودی پیشنهادی برای الگوریتم فاخته جهت مدل‌سازی همزمان جایابی منابع تولید پراکنده و سوئیچ در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، بردار ورودی الگوریتم از دو بخش کلی تشکیل شده است. بخش اول که از دو قسمت جداگانه برای تعیین مکان بهینه و هم چنین ظرفیت بهینه منابع تولیدپراکنده می‌باشد. همچنین، بخش دوم مکان و تعداد سوئیچ‌ها را برای تعیین مرزهای الکتریکی ریزشبکه‌ها نشان می‌دهد. شایان ذکر است که در این مقاله، تمامی باس‌ها و خطوط شبکه به عنوان نقاط کاندید جهت نصب منابع تولیدپراکنده و سوئیچ درنظرگرفته شده است.



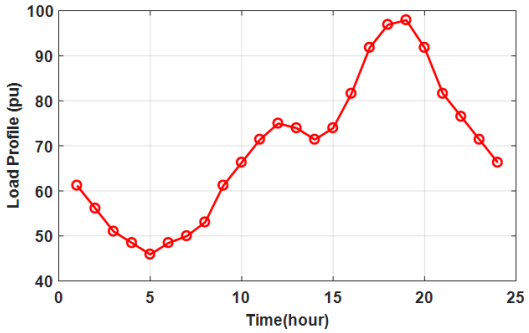
شکل (۴): الگوریتم پیشنهادی برای حل مساله پیشنهادی

یکی از مهم ترین ویژگی الگوریتم فاخته امکان جستجوی سراسری علاوه بر جستجوی محلی می‌باشد که امکان یافتن جواب بهینه کلی مساله را امکان‌پذیر می‌سازد و همچنین این الگوریتم زمان هم‌گرایی کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌های فراابتکاری دارد. فلوچارت نشان داده شده در شکل (۴) الگوریتم روش پیشنهادی برای طراحی ریزشبکه‌ها را تحت عدم قطعیت توسط الگوریتم بهینه‌سازی فاخته به تصویر می‌کشد.

۵- شبیه سازی و نتایج

برای نشان دادن کارایی و عملکرد روش پیشنهادی در این مقاله از شبکه توزیع استاندارد ۳۳ باسه برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی استفاده شده است [۳۵]. هزینه های مربوط به احداث و بهره‌برداری منابع و سوئیچها از مراجع [۷]، [۱۳] و [۱۸] به دست آمده است. همچنین، از یک پروفیل بار روزانه نمونه برای محاسبه هزینه های بهره‌برداری در طول افق بهره‌برداری استفاده شده است [۶]. پروفیل بار روزانه سیستم درنظرگرفته شده در شکل (۵) رسم شده است. قیمت انرژی الکتریکی برای بازار روز پیش از مرجع [۳۶] استفاده شده است. شایان ذکر است که افق طراحی برای مساله پیشنهادی ۱۰ سال در نظرگرفته شده است.

هدف این مقاله طراحی بهینه ریزشبکه‌های چندگانه در یک شبکه توزیع هوشمند با درنظرگرفتن جنبه های اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی بوده که تحت عدم قطعیت در پارامترهای طراحی سیستم توزیع انجام می‌گیرد. مساله طراحی ریزشبکه‌ها بصورت جایابی بهینه منابع تولیدپراکنده تجدیدپذیر و منابع تولید توان کنترل پذیر همزمان با جایابی سوئیچ در شبکه توزیع انرژی به منظور تعیین مرزهای الکتریکی ریزشبکه‌ها صورت می‌پذیرد. مدل پیشنهادی یک مدل استاتیک بوده که کلیه سرمایه‌گذاری‌ها در سال اول اتخاذ می‌گردد و تعیین سال احداث منابع جزو متغیرهای مساله نمی‌باشد. الگوریتم بهینه سازی فاخته به عنوان یکی از قدرتمندترین و جدیدترین الگوریتم‌های فراابتکاری برای بهینه سازی تابع هدف مساله مورد استفاده قرارگرفته است. برای پوشش عدم قطعیت از روش تولید سناریو استفاده شده که برای کاهش حجم محاسباتی و افزایش سرعت اجرای برنامه از تکنیک کاهش سناریو به روش بکوارد بهره برده شده است.



شکل (۵): پروفیل بار روزانه سیستم توزیع نمونه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

انتخاب ضرایب وزنی در تابع هدف مساله بستگی به سیاست‌ها و استراتژی‌های مختلف طراحان شبکه توزیع داشته و بسته به اهداف و اولویت‌های آنها می تواند مقادیر مختلفی بین صفر و یک داشته باشد. در این مقاله برای تعیین دقیق تاثیر ضرایب بهینه سازی و ضرایب وزنی بر روی مساله موردنظر از آنالیز حساسیت استفاده شده است. جدول (۱) نتایج حاصله برای جایابی و ظرفیت‌یابی بهینه منابع تولید پراکنده و همچنین جایابی سوئیچ برای مرزبندی ریزشبکه‌ها را بر اساس مقادیر میانگین به دست آمده از توزیع احتمالی نشان می‌دهد. طبق این جدول تعداد ریزشبکه‌های انتخاب شده برای این سیستم خاص برابر سه بوده و تعداد سه منبع تولیدپراکنده نیز برای هر ریزشبکه اختصاص داده شده است. سه نوع منبع تولید توان پراکنده شامل سلول‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و منابع تولیدهمزمان برق و حرارت برای هریک از ریزشبکه‌ها انتخاب شده است. به علاوه، جدول (۲) مقادیر بهینه توابع هدف مختلف را برای سه حالت مختلف ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده نشان می‌دهد. درجه نفوذپذیری منابع به صورت نسبت ظرفیت نصب شده منابع به بارمصرفی شبکه تعریف شده است. با توجه به این جدول، روشن است که با افزایش ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده در ریزشبکه‌ها، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری منابع بالا خواهد رفت اما این امر منجر به بهبود شاخص-های فنی و قابلیت اطمینان سیستم خواهد شد.

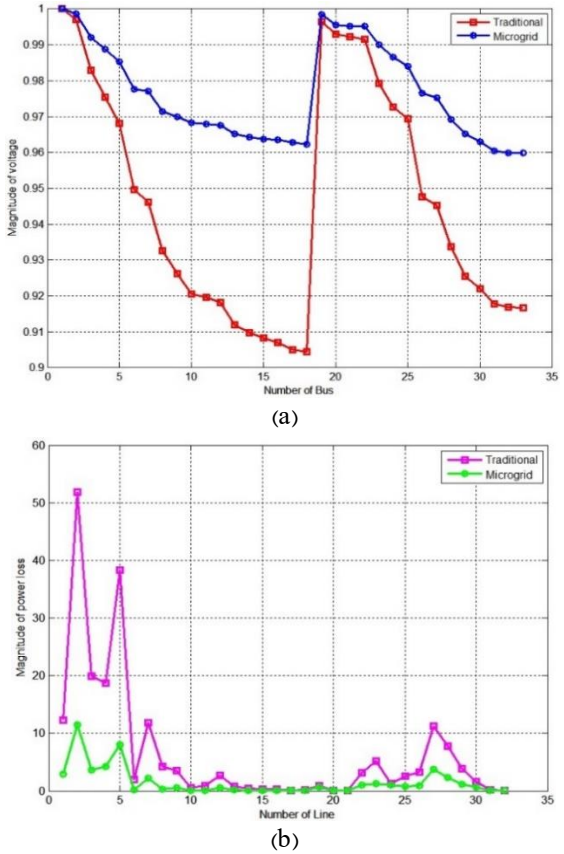
جدول (۱): جایابی بهینه منابع تولیدپراکنده و سوئیچ

نوع منبع	مکان (باس)	ظرفیت (kW)
منابع تولید برق و حرارت	۱۲, ۱۹, ۳۳	۲۰۰, ۱۵۰, ۱۷۵
	۴, ۹, ۳۰	۱۲۵, ۱۰۰, ۷۵
توربین بادی	۱۷, ۲۴, ۲۷	۵۰, ۱۰۰, ۷۵
سلول خورشیدی	۱, ۶, ۲۵	--
سوئیچ		

جدول (۲): توابع هدف مساله برای طراحی ریزشبکه‌ها

توابع هدف	مقادیر توابع هدف ($)		
	PI=۱۰۰%	PI=۷۵%	PI=۵۰%
هزینه سرمایه گذاری	۲۵۸۴۶/۲	۱۷۳۸۸/۱	۱۲۶۹۴/۸
هزینه تعمیر و نگهداری	۸۶۱۷/۳	۵۷۹۲/۸	۴۶۴۸/۷
هزینه بهره برداری	۸۹۷۷/۵	۶۶۱۹/۳	۵۰۹۱/۴
هزینه آلودگی هوا	۶۶۴/۷	۱۹۱۳/۷	۲۸۴۶/۳
هزینه تلفات	۱۰۸۴/۶	۳۱۹۸/۶	۵۲۹۷/۳
هزینه قابلیت اطمینان	۵۹۱/۴	۶۴۲۵/۶	۸۸۶۴/۱
هزینه کل	۴۵۷۸۶/۹	۴۱۳۳۵/۲	۳۹۴۴۰/۵

شکل (۶-a) پروفیل ولتاژ شبکه در دو حالت ساختار سنتی و ساختار مبتنی بر ریزشبکه های چندگانه نشان می‌دهد. طبق این شکل مشاهده می‌شود که تغییرات ولتاژ شین‌های مختلف شبکه بسیار کمتر از حالت سنتی شده و سطح ولتاژ در چارچوب محدوده مجاز خود تحت بارگیری‌های مختلف قرار دارد بنابراین از لحاظ کیفیت توان مشخصات سیستم بهبود یافته است. بنابراین استفاده از روش پیشنهادی باعث افزایش ناحیه پایداری ولتاژ شبکه توزیع خواهد شد و از ایجاد پدیده فروپاشی ولتاژ در شبکه توزیع جلوگیری می‌نماید. همچنین شکل (۶-b) نمودار تلفات شبکه را در دو حالت سنتی و تجدیدساختار شده به تصویر می‌کشد. طبق این شکل با طراحی شبکه توزیع بصورت مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های به‌هم پیوسته، تلفات سیستم تا حد زیادی کاهش خواهد داشت که باعث بهبود مشخصات فنی سیستم همچون کاهش جریان عبوری از خطوط و در نتیجه کاهش هزینه سرمایه‌گذاری برای فیدرهای توزیع و همچنین به تعویق انداختن توسعه شبکه توزیع خواهد شد. کاهش تلفات سیستم باعث افزایش عمر تجهیزات خطوط توزیع انرژی شده و از لحاظ اقتصادی باعث کاهش هزینه‌های بهره‌برداری سیستم توزیع می‌شود. شکل (۷) دیاگرام تک خطی شبکه توزیع استاندارد ۳۳ باسه را نشان می‌دهد که روش پیشنهادی بر روی آن اجرا شده است. طبق این شکل، شبکه مذکور به سه ریزشبکه به هم پیوسته تقسیم شده است که هر ریزشبکه میتواند در دسترس بهره‌بردار و صاحبان خصوصی متفاوتی قرار گیرد و می تواند در شرایط بروز خطا از شبکه اصلی جدا شده و به طور مستقل به کار خودش ادامه دهد. تعداد و نوع منابع تولیدپراکنده همراه با تعیین ظرفیت بهینه آن‌ها توسط الگوریتم پیشنهادی تعیین می‌شود.



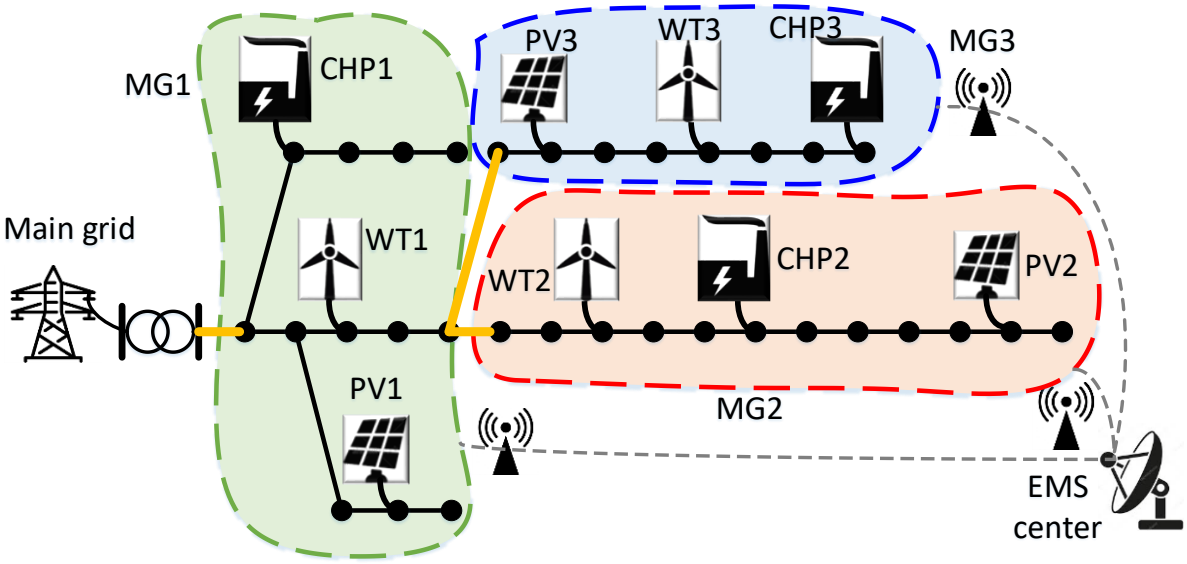
شکل (۶): a. پروفیل ولتاژ شبکه b. تلفات کل سیستم

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

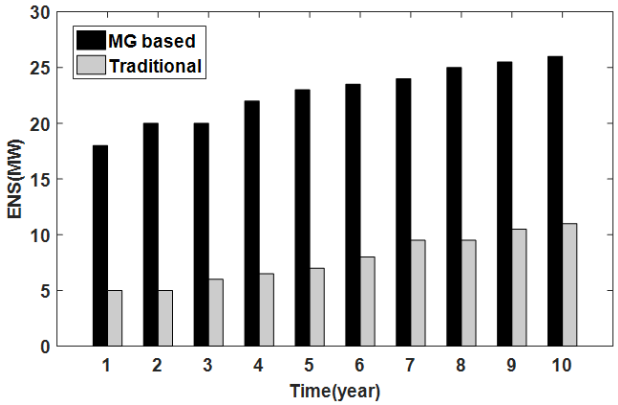
با توجه به افزایش بارهای حساس در سطح شبکه توزیع و لزوم افزایش قابلیت اطمینان در شبکه توزیع، یکی از مهم ترین اهداف این مقاله بهبود قابلیت اطمینان شبکه توزیع با جایابی منابع تولیدپراکنده و خوشه‌بندی شبکه توزیع به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های به‌هم پیوسته بوده است. با تغییر ضریب وزنی مربوط به تابع تلفات سیستم از ۰ تا ۱ میتوان به درجه کاهش‌های مختلفی از تلفات سیستم رسید که انتخاب این عدد بستگی به سیاست های بهره‌برداری و برنامه‌ریزان شبکه توزیع دارد. تعیین دقیق ضرایب وزنی وتاثیرات آن‌ها بر روی مساله طراحی توسط آنالیز حساسیت تعیین می‌شود.

در این مقاله از شاخص انرژی تامین نشده به عنوان شاخصی جهت ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم بهره برده شده است. شکل (۸) مقادیر انرژی تامین نشده شبکه را در حالت مبتنی بر ریزشبکه و حالت سنتی برای سال های مختلف طراحی نشان می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود در حالت طراحی شبکه های توزیع به صورت مجموعه ای از ریزشبکه های چندگانه، مقدار انرژی تامین نشده به دلیل خرد کردن شبکه توزیع بزرگ به قسمت های کوچک به شدت کاهش می-یابد. شایان ذکر است که ارزیابی قابلیت اطمینان تحت شرایط عدم قطعیت انجام گرفته است که شکل (a-۹) نمودار احتمالاتی شاخص انرژی تامین نشده سیستم را برای سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. در ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع برای هریک از خطوط شبکه نرخ خرابی و نرخ تعمیر اختصاص یافته و سپس شاخص های قابلیت اطمینان تحت خطاهای ایجاد شده روی تک تک فیدرها محاسبه می‌شود.



شکل (۷): جایابی بهینه DG و مرزبندی ریزشبکه های چندگانه

شکل (b-۹) توزیع احتمالاتی هزینه آلودگی هوا ناشی از تولید منابع سوخت فسیلی را نشان می‌دهد. همچنین شکل (c-۹) توزیع احتمالاتی هزینه کل طراحی ریزشبکه‌ها شامل هزینه سرمایه‌گذاری منابع و سوییچ‌ها، هزینه بهره‌برداری، هزینه تلفات و آلودگی هوا و همچنین هزینه انرژی تامین نشده را برای سناریوهای مختلف نمایش می‌دهد. برای نشان دادن مجموع هزینه‌های کلی طراحی از مقدار انتظاری استخراج شده از نمودار احتمالاتی به دست امده از سناریوها استفاده شده که بیانگر وقوع محتمل‌ترین حالت برای هزینه طراحی ریزشبکه‌ها می باشد. باتوجه به مدل‌سازی احتمالاتی مساله طراحی ریزشبکه‌ها در برابر عدم قطعیت متغیرهای سیستم مقاوم بوده و روش پیشنهادی انعطاف بیشتری را نصیب بهره‌برداران شبکه در مواجهه با شرایط بهره‌برداری گوناگون می‌نماید. باتوجه به وابسته بودن توان تولیدی منابع تجدیدپذیر به شرایطی محیطی برنامه‌ریزی این منابع برمبنای مقدار میانگین به دست آمده از توزیع احتمالاتی باعث مقاوم بودن طراحی شبکه نسبت به تغییرات جوی و نوسانات تولیدی این منابع می‌شود. این موضوع باعث افزایش قابلیت اطمینان ریزشبکه‌ها هم در حالت متصل به شبکه و هم در حالت جزیره‌ای خواهد بود.



شکل (۸): مقادیر انرژی تامین نشده در طول افق طراحی

با توجه به این که در برنامه ریزی های سناریومحور جواب های متفاوتی برای هر یک از سناریوها به‌دست می‌آید، انتخاب جواب واحد از میان جواب‌های به‌دست آمده تبدیل به یکی از چالش‌های تصمیم

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

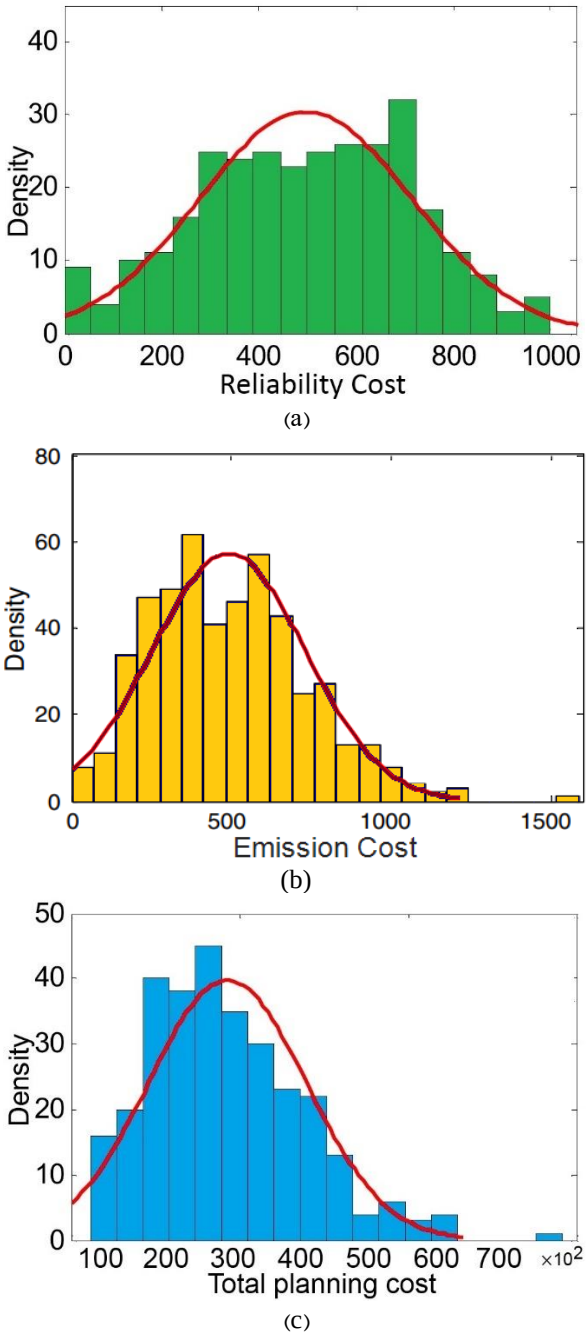
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

گیرنده شده است. در عمل از مقدار میانگین یا انتظاری به دست آمده از توزیع احتمالاتی متغیرهای دارای عدم قطعیت برای برنامه‌ریزی سیستم توزیع استفاده می‌شود که این مقدار بیشترین احتمال وقوع را نسبت به سناریوهای دیگر خواهد داشت. گرچه، در سال‌های اخیر روش‌های متنوعی برای کاهش ریسک ناشی از سناریوهای پرهزینه پیشنهاد شده است [۱۳]. در این مقاله برای بررسی تاثیر ضرایب وزنی بر روی کمیت طراحی سیستم از روش آنالیز حساسیت استفاده شده که در این روش مساله به ازای مقادیر مختلفی که ضرایب وزنی می توانند داشته باشند انجام می‌گیرد و بهترین طراحی از نظر کمیت‌های به دست آمده به عنوان ضریب وزن بهینه شناخته می‌شود.

جدول (۳) تاثیر انتخاب مقادیر مختلف ضرایب وزنی در تابع هدف را بر روی هزینه کل طراحی شبکه نشان می‌دهد. طبق این جدول مشاهده می شود که درنظر گرفتن تمامی ضرایب باعث کاهش هزینه کل سیستم خواهد شد بنابراین طراحی ریزشبکه‌ها با درنظر گرفتن همه جنبه‌های اقتصادی، فنی، زیست محیطی و قابلیت اطمینان باعث کاهش هزینه کل طراحی شبکه خواهد شد که مطابق این جدول در این مقاله هر سه ضریب برابر عدد ۱ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین جدول (۳) نتایج حاصل از آنالیز حساسیت ضرایب وزنی را بر روی مرزبندی ریزشبکه ها نشان می‌دهد که مشاهده می‌شود که هرچقد وزن قابلیت اطمینان شبکه زیاد باشد تعداد ریزشبکه‌ها بیشتر می‌شود که حد نهایی آن در این شبکه خاص برابر با شش می‌باشد و همچنین هرچقد وزن قسمت اقتصادی بحث بیشتر انتخاب گردد تعداد ریزشبکه‌ها به سمت یک ریزشبکه واحد کاهش پیدا خواهد کرد. به عبارتی دیگر، ریزشبکه‌های کوچک قابل اطمینان تر و ریزشبکه های بزرگ اقتصادی‌تر هستند.

به منظور نشان دادن کارایی و عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده در حل مساله پیشنهادی، منحنی همگرایی الگوریتم فاخته با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی معمول (الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات) در شکل (۱۰) مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی هم از لحاظ جواب به دست آمده و هم از نظر سرعت همگرایی برتری محسوسی نسبت به دو الگوریتم دیگر دارد. دلیل این برتری وجود دو جستجوگر محلی و سراسری در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته است که باعث می‌شود به جواب مطلوب‌تری در زمان کمتری دست یابد.

شایان ذکر است که در روش پیشنهادی مبتنی بر سناریو، انتخاب سناریو نهایی از میان سناریوهای تولید شده یک مساله مهم می‌باشد. به طور کلی سه استراتژی ریسک‌پذیر، ریسک خنثی و ریسک گریز می‌تواند برای این مساله تعریف گردد. استراتژی ریسک‌پذیر به دنبال کم‌ترین هزینه ممکن بود به طوریکه سناریویی را انتخاب می‌کند که کم‌ترین هزینه را داشته باشد. برخلاف آن، استراتژی ریسک گریز به دنبال کاهش ریسک‌های فنی سیستم بوده که این کار با افزایش هزینه‌های طراحی میسر خواهد شد. بنابراین، در استراتژی ریسک گریز سناریویی که بیشترین هزینه را دارد (گران ترین شبکه) به عنوان سناریو نهایی انتخاب می شود. در نهایت، استراتژی ریسک خنثی حالت بینابین دو حالت ذکرشده بوده و سناریویی را که دارای بیشترین احتمال وقوع است به عنوان سناریو نهایی برمی‌گزینند. دراین مقاله، از استراتژی ریسک خنثی برای یافتن سناریو نهایی (جواب واحد) بهره برده شده است.



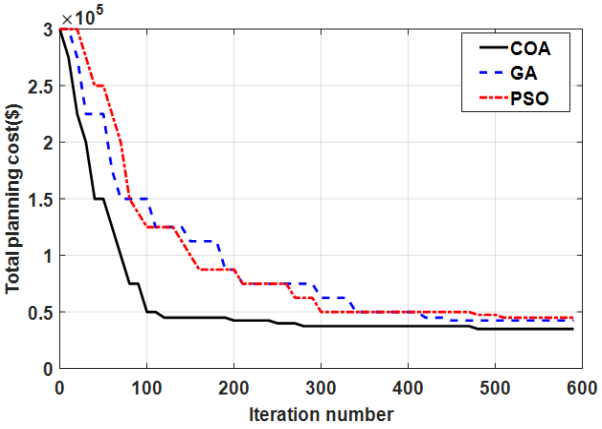
شکل (۹): a. توزیع احتمالاتی هزینه انرژی تامین نشده b. توزیع احتمالاتی هزینه کل طراحی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

جدول (۳): تاثیر ضرایب وزنی بر روی طراحی ریزشبکه‌ها

W_1	W_2	W_3	مکان سوئیچ‌ها	هزینه ($)
۰	۰	۱	۱, ۵, ۱۲, ۱۸, ۲۶	۶۸۵۶۰/۳
۰	۱	۰	۱, ۷, ۲۵	۶۶۳۲۷/۷
۰	۱	۱	۱, ۳, ۱۱, ۲۵	۵۹۷۸۹/۵
۱	۰	۰	۱	۵۳۴۵۴/۵
۱	۰	۱	۱, ۷, ۲۶	۵۳۶۶۴/۸
۱	۱	۰	۱,۵	۴۷۴۵۶/۴
۱	۱	۱	۱, ۶, ۲۵	۴۵۷۸۶/۹



شکل (۱۰): منحنی همگرایی الگوریتم پیشنهادی

به‌طور کلی نتایج ارزیابی اقتصادی و قابلیت اطمینان به دست آمده نشان می‌دهد که باخردکردن شبکه‌های توزیع سنتی به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های چندگانه اگرچه هزینه‌های سرمایه‌گذاری افزایش می‌یابد اما کاهش هزینه‌های قابلیت اطمینان و هزینه فنی ناشی از کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ به مراتب بیشتر بوده که این موضوع در کل باعث کاهش هزینه‌های کل سیستم می‌شود. طبق نتایج به دست آمده بهترین حالت برای طراحی ریزشبکه‌ها در نظر گرفتن همزمان سه جنبه مختلف برای سیستم می‌باشد که هزینه این حالت کمترین هزینه را متحمل طراحان سیستم توزیع خواهد نمود. بسته به سیاست‌های ریسک‌پذیر یا ریسک‌گریز بودن برنامه‌ریزان و صاحبان ریزشبکه‌ها می توان حالت‌های مختلفی از ضرایب وزنی را بسته به نیازهای خود و مشخصات ریزشبکه‌ها برگزینند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح جهت طراحی اقتصادی و قابل‌اطمینان ریزشبکه‌های چندگانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در بار مصرفی و تولید توان منابع تجدیدپذیر ارایه شد. روش پیشنهادی جهت تعیین مکان، تعداد، نوع و ظرفیت منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و کنترل‌پذیر و همچنین تعیین مرزهای الکتریکی ریزشبکه‌ها در شبکه‌های توزیع هوشمند مورد استفاده قرار گرفت. در این مقاله برای پوشش عدم قطعیت پارامترهای سیستم از روش تولید سناریو استفاده گردید و همچنین روش بکوارد جهت کاهش سناریو برای افزایش سرعت محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که خوشه‌بندی شبکه توزیع به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های به هم پیوسته باعث بهبود مشخصات اقتصادی، فنی و قابلیت اطمینان شبکه توزیع می‌شود. در این مقاله برای نشان دادن تاثیر ضرایب وزنی بر روی طراحی ریزشبکه‌ها از روش آنالیز حساسیت استفاده شده است که نتایج نشان می‌دهد با تغییر ضرایب وزنی مربوط به توابع مختلف، شاختار به دست آمده برای ریزشبکه‌ها دست خوش تغییرات فراوانی خواهد شد که انتخاب بهینه این ضرایب بستگی به سیاست‌های صاحبان ریزشبکه‌ها دارد. با توجه به جامع بودن روش پیشنهادی و در نظرگرفتن عدم قطعیت پارامترهای سیستم روش پیشنهادی می‌تواند ابزاری موثر و کارامد جهت طراحی شبکه‌های توزیع آینده به صورت مبتنی بر ریزشبکه‌های به هم پیوسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت سیستم باشد.

مراجع

[1] P. Georgilakis, N. Hatziargyriou, “A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research,” *Electric Power Systems Research*, vol. 121, pp. 89-100, 2015.

[2] S. Ruester, *et al*, “From distribution networks to smart distribution systems: Rethinking the regulation of European electricity DSOs,” *Utilities Policy*, vol. 31, pp. 229-237, 2014.

[3] F. Samadi Gazijahani, S. Najafi Ravadanegh, J. Salehi, “Stochastic multi-objective model for optimal energy exchange optimization of networked microgrids with presence of renewable generation under risk-based strategies,” *ISA Transactions*, vol. 73, pp. 100-113, Jul. 2018.

[4] JA. Lopes, *et al*., “Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities,” *Electric power systems research*, vol. 77, no. 9, pp. 1189-1203, 2007.

[5] Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. *Summary Report: 2012 DOE Microgrid Workshop*. 2012.

[6] S. Mohammadi, S. Soleymani, B. Mozafari, “Scenario-based stochastic operation management of microgrid including wind, photovoltaic, micro-turbine, fuel cell and energy storage devices,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 54, pp. 525-535, 2014.

[7] F. Samadi Gazijahani, J. Salehi, “Stochastic multi-objective framework for optimal dynamic planning of interconnected microgrids,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 14, pp. 1745-1755, Dec. 2017.

[8] H. Fathima, K. Palanisamy, “Optimization in microgrids with hybrid energy systems–A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, vol. 45, pp. 431-446, 2015.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

[9] S. A. Arefifar, Y. A-R. I. Mohamed, T. H. M. EL-Fouly, "Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply-Security," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no 3, pp. 1567-1575, Sep. 2013.
[10] L. Guo, W. Liu, B. Jiao, B. Hong, C. Wang, "Multi-objective stochastic optimal planning method for stand-alone microgrid system," *IET Gener. Transm. Distrib*. vol. 8, no. 7, pp.1263–1273, Nov. 2014.
[11] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, C. Chen, "Networked Microgrids for Self-Healing Power Systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no 1, pp. 1-10, Apr. 2015.
[12] Z. Wang, J. Wang, "Self-Healing resilient distribution systems Based on sectionalization into microgrids," *IEEE Trans. Power Sys*., vol. 3, no 1, pp. 1-10, Oct. 2015.
[13] F. Samadi Gazijahani, J. Salehi, "Optimal bi-level model for stochastic risk-based planning of microgrids under uncertainty," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 79, pp. 3054-3064, Jun. 2018.
[14] L. Che, X. Zhang, M. Shahidehpour, A. Alabdul-wahab, A. Abusorrah, "Optimal interconnection Planning of Community Microgrids with Renewable Energy Sources," *IEEE Trans. Smart Grid*., vol. 1, no. 5, pp. 1-10, 2015.
[15] A. Khodaei, S. Bahramirad, M. Shahidehpour," Micro-grid Planning Under Uncertainty," *IEEE Trans. Smart Grid*., vol. 30, no. 5, pp. 2417- 2425, Sep. 2015.
[16] L. Che, X. Zhang, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab, Y. A-Turki, "Optimal planning of Loop-Based micro-grid Topology," *IEEE Trans. Smart Grid*., vol. 2, no. 4, pp. 1-11, Jul. 2016.
[17] K. Nekooei, MM. Farsangi, NH. Pour, K. Lee, "An Improved multiobjective harmony search for optimal placement of DGs in distribution systems', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 557–567, 2013.
[18] F. Samadi Gazijahani, J. Salehi, "Robust design of microgrids with reconfigurable topology under severe uncertainty," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 559-569, Apr. 2018.
[19] A. Khodaei and M. Shahidehpour, "Microgrid-based co-optimization of Generation and transmission planning in power systems," *IEEE Trans. Power Syst*., vol. 28, no. 2, pp. 1582–1590, May 2013.
[20] A. Arefifar, I.M. Yasser, T. El-Fouly, "Supply-adequacy-based optimal construction of microgrids in smart distribution systems," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1491-1502, 2012.
[21] A. Arefifar, I.M. Yasser, T. El-Fouly, "DG mix, reactive sources and energy storage units for optimizing microgrid reliability and supply security," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1835-1844, 2014.
[22] A. Arefifar, I.M. Yasser, T. El-Fouly, "Optimized multiple microgrid-based clustering of active distribution systems considering communication and control requirements, " *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 2, pp. 711-723, 2015.
[23] H. Lotfi, A. Khodaei, "AC versus DC microgrid planning, " *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 296-304, 2017.
[24] F. Samadi Gazijahani, J. Salehi, "Integrated DR and reconfiguration scheduling for optimal operation of microgrids using Hong's point estimate method," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 99, pp. 481-492, April 2018.
[25] W. Su, J. Wang, and J. Roh, "Stochastic energy scheduling in microgrid with intermittent renewable energy resources," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp.1876–1883, Jul. 2014.
[26] M. Aien, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, "Probabilistic optimal power Flow in correlated hybrid wind-photovoltaic power systems. *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp.934– 943, Oct. 2013.
[27] M.H. Moradi, M. Eskandari, and S. M. Hosseinian, "Operational Strategy optimization in an optimal sized smart microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp .1087–1095, May. 2015.
[28] A. Soroudi, R. Caire, and N. Hadjsaid and M. Ehsan "Probabilistic dynamic multi-objective model for renewable and non-renewable distributed generation planning," *IET Gen., Transm. Distrib*, vol. 5, no. 11, pp. 1173–1182, May 2011.
[29] A. Soroudi and M. Afrasiab, "Binary PSO-based dynamic multi-objective model for distributed generation planning under uncertainty," *IET Gen., Transm. Distrib.* vol. 6, no. 2, pp. 67–78, 2012.
[30] S. Pineda, A. Conejo, "Scenario reduction for risk-averse electricity trading," *IET Gener. Transm. Distrib*., vol. 4, no. 6, pp. 694-705, 2010.
[31] M. Abido, "Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms." *IEEE transactions on power systems*, vol. 18, no. 4, pp. 1529-1537, 2003.
[32] E. Bompard, *et al*, "Convergence of the backward/forward sweep method for the load-flow analysis of radial distribution systems," *International journal of electrical power & energy systems*, vol. 22, no. 7, pp. 521-530, 2000.
[33] S. Wang, Z. Li, L. Wu, M. Shahidehpour, and Z. Li, "New metrics for assessing the reliability and economics of microgrids in distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.30, no.6, pp.1–10, Feb.2013.
[34] R. Rajabioun, "Cuckoo Optimization Algorithm," *Applied Soft Computing*. vol. 11, pp. 5508–5518, 2011.
[35] A. Ameli, S. Bahrami, F. Khazaeli and M. R. Haghi-fam, "A multiobjective particle swarm optimization for sizing and placement of DGs from DG owner's and distribution company's viewpoints," *IEEE Transactions on Power Deliv*, vol. 29, no.4, pp. 1831–1840, Feb 2014.
[36] G. Liu, Y. Xu, K. Tomsovic, "Bidding strategy for microgrid in day-ahead market based on hybrid stochastic/robust optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 227-237, 2016.

فهرست

کلمات اختصاری

AMI	Advanced measurement infrastructure
MG	Micro-grid
SG	Smart grid
BFPF	Backward/forward power flow
DG	Distributed generation
DR	Demand response
DER	Distributed energy resources
RES	Renewable energy sources
WT	Wind turbine
PV	Photovoltaic
CHP	Combined heat and power
PDF	Probability density function
COA	Cuckoo optimization algorithm

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]

ENS	Energy not supplied
MINLP	Mixed integer non-linear programming
MCS	Monte Carlo simulation
DSM	Demand side management
PI	Penetration index
DNO	Distribution network operator
PEV	Plug in electric vehicle
ESS	Energy storage system
GA	Genetic algorithm
PSO	Particle swarm optimization
RS	Risk seeker
RN	Risk neutral
RA	Risk averse

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.6.0]