

طراحی ریزشبه‌های چندگانه مبتنی بر سناریو با نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر و در نظر گرفتن عدم قطعیت سمت تقاضا و تولید

فرهاد صمدی قاضی جهانی^۱، دانشجوی دکتری، جواد صالحی^۲، استادیار، نوید تقی زادگان کلانتری^۳، 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 ریزشبه‌های چندگانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار مصرفی و تولید منابع تولیدپراکنده تجدیدپذیر و کنترل‌پذیر همراه با جایابی بهینه سوئیچ جهت خوشه بندی شبکه توزیع و مکان بهینه منابع تولیدپراکنده تجدیدپذیر و کنترل‌پذیر همراه با جایابی بهینه سوئیچ جهت خوشه بندی شبکه توزیع سنتی به مجموعه‌ای از ریزشبه‌های به هم پیوسته با ساختاری اقتصادی و قابل اطمینان به کار گرفته 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 ریزشبه‌ها می باشد. توابع هدف مختلف در نظر گرفته شده توسط روش مجموع ضرایب وزنی به صورت یک مساله تک هدفه غیرخطی آمیخته با عدد صحیح مدل سازی 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. در انتها کارایی و عملکرد روش پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد ۳۳ باسه مورد اجرا قرار گرفته و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی ابزاری کارآمد و موثر برای طراحی ریزشبه‌های به هم پیوسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت می‌باشد.

واژه های کلیدی: طراحی ریزشبه‌های 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

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 چالش‌های 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 می‌رفت 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 می‌باشد. 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 می‌روند. طبق تعریف سازمان انرژی امریکا [۵]، ریزشبکه‌ها شبکه‌هایی با مقیاس کوچک در سطح فشار ضعیف می‌باشند که دارای بارهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل به همراه انواع مختلف منابع تولیدپراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی بوده که می‌توانند هم در حالت متصل به شبکه و هم در حالت جزیره‌ای 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 شبکه‌های توزیع به شبکه‌های فعال و متعاقباً 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 ارائه شده است. مرجع [۹] یک روش بهینه با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و امنیت سیستم توزیع برای طراحی ریزشبکه‌های چندگانه در نظر گرفته است. هدف اصلی این مقاله خوشه‌بندی شبکه توزیع به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان شبکه می‌باشد. مرجع [۱۰] یک روش چندهدفه اقتصادی با در نظر گرفتن 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 قرار گرفته است. در این مرجع پارتیشن بندی شبکه توزیع به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌ها با هدف کمترین بارزدایی از سیستم تحت شرایط جزیره‌ای و کمترین هزینه بهره‌برداری در حالت خطا مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف مرجع [۱۲] زون بندی شبکه‌های توزیع در قالب ریزشبکه‌ها 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 ارائه شده که این کار با زون بندی شبکه توزیع به خوشه‌ای از ریزشبکه‌ها عملیاتی می‌شود.

طراحی ریزشبکه‌ها می‌تواند به دو صورت برنامه‌ریزی استاتیکی و دینامیکی انجام گردد. در طراحی استاتیکی، تمامی متغیرهای سرمایه‌گذاری منابع ریزشبکه‌ها در سال اول طراحی انجام می‌شود در حالی که در مدل دینامیکی احداث منابع می‌تواند در سال‌های مختلف بهره‌برداری انجام گیرد [۱۳]. به طور مثال، طراحی ریزشبکه‌های چندگانه با در نظر گرفتن استراتژی‌های مختلف ریسک در مراجع [۱۴-۱۶] 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 نظر گرفتن عدم قطعیت در تولید منابع پراکنده تجدیدپذیر همچون توربین بادی و سیستم‌های فوتوولتائیک پیشنهاد می‌کند. 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 نظر گرفته 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 نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم مورد بررسی قرار گرفته است.

از سوی دیگر، طراحی ریزشبکه‌ها به طرق مختلف می‌تواند 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 دومرحله‌ای [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

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 به کار رفته جهت بهینه‌سازی در قسمت چهارم گزارش شده است، بخش پنجم نتایج حاصله از شبیه‌سازی‌ها را به تصویر کشیده شده و مورد ارزیابی قرار می‌دهد 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 شبکه‌های 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 برنامه‌ریزان و طراحان سیستم توزیع قرار می‌گیرد که در این قسمت مدل‌سازی 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.

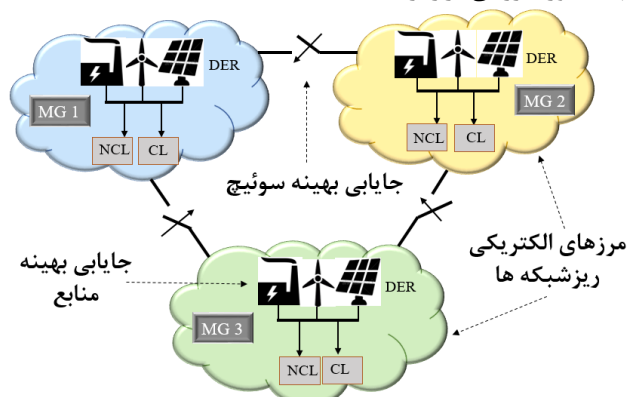
$$F_L(P^D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma} \exp\left(-\frac{(P^D - \mu)^2}{2 \times \sigma^2}\right) \quad (1)$$

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 می‌توان تابع احتمالاتی مناسبی را برای تعیین نمودن طبیعت تغییرات باد به دست آورد که در این مقاله

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



شکل (۱): مفاهیم روش پیشنهادی طراحی ریزشبکه‌ها

گرچه طراحی ریزشبکه‌های چندگانه در مراجع قبلی گزارش شده است، اما طراحی ریزشبکه‌های چندگانه با در نظر گرفتن 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 الگوریتم‌های بهینه سازی جدید و بهبود داده شده برای رسیدن به جواب بهینه‌تر بسیار مطلوب می‌باشد. به همین منظور، برای پر کردن خلایهای علمی موجود، مقاله حاضر یک روش بهینه و جامع با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی، فنی، زیست محیطی و قابلیت اطمینان با هدف ساختاری اقتصادی و قابل اطمینان با در نظر گرفتن تبادلات توان بین ریز شبکه‌ها و شبکه بالادست به منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش بارزدایی در حالت جزیره‌ای برای ریزشبکه‌های چندگانه ارائه می‌کند. محاسبات فوق تحت محیط احتمالاتی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که روش تولید سناریو برای پوشش عدم قطعیت مساله به کار گرفته شده است. تابع هدف پیشنهادی توسط یک الگوریتم هوشمند جدید به نام الگوریتم بهینه سازی فاخته با در نظر گرفتن 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
- در نظر گرفتن 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

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 می شود [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.

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

۵-۲- تولید و کاهش سناریو

به دلیل عدم قطعیت در بار مصرفی ریزشکها و تولید توان منابع تجدیدپذیر انرژی همچون توربین های بادی و سلول های خورشیدی، طراحی ریزشکها با در نظر گرفتن مساله عدم قطعیت به یکی از چالش های 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 شبیه سازی مونت کارلو از روی تابع توزیع احتمالاتی متغیرهای سیستم تعدادی حالت تصادفی برای متغیرهای سیستم ایجاد شده سپس احتمال وقوع هر حالت محاسبه می شود [۲۸]. روابط (۷) تا (۹) به ترتیب سمپل های استخراج شده از توزیع های احتمالاتی برای بار، تولید توربین بادی و تولید سلول های خورشیدی را نشان می دهد که مجموع احتمالات آن ها باید برابر یک باشد. رابطه (۱۰) نحوه ترکیب سمپل ها برای تولید سناریوها را نشان می دهد که مجموع احتمالات سناریوهای تولید شده باید همواره برابر یک باشد (۱۱).

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

$$\psi_d^1 + \psi_d^2 + \dots + \psi_d^n = 1$$

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

$$\psi_w^1 + \psi_w^2 + \dots + \psi_w^n = 1$$

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

$$\psi_s^1 + \psi_s^2 + \dots + \psi_s^n = 1$$

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

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

در روابط فوق ψ_d ، ψ_w و ψ_s به ترتیب احتمال وقوع حالت های محتمل بار، تولید توربین بادی و مدول های خورشیدی را نشان می دهند. همچنین C_d ، C_w و C_s مقدار عددی مقادیر استخراج شده از توزیع احتمالاتی برای بار، تولید توربین های بادی و سلول های خورشیدی را به ترتیب ارائه می دهد و N_S تعداد کل سناریوهای تولیدی می باشد.

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 علاوه بر کاهش حجم محاسباتی مساله و بهبود سرعت انجام آن، دقت مورد نیاز مساله را تضمین می کند. کاهش

از تابع توزیع وایبول برای مدل سازی تغییرات باد بهره برده شده است [۲۵]. رابطه (۲) تابع عمومی تابع احتمالاتی وایبول را نشان می دهد.

$$F_v(v) = \begin{cases} \frac{\partial}{\kappa} \times \left(\frac{v}{\partial} \right)^{\kappa-1} \times \exp\left(-\frac{v}{\partial} \right) & v \geq 0 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (۲)$$

در رابطه فوق ∂ ، κ و v به ترتیب ضرایب شکل توزیع وایبول و سرعت باد را نشان می دهند. در یک توربین بادی توان خروجی تولیدی متناسب با سرعت باد می باشد. 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.

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

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 می باشد.

۳-۲- سلول خورشیدی

میزان تابش نور خورشید و درجه هوای محیطی که سلول های خورشیدی در آن قرار دارند باعث متغیر بودن توان تولیدی منابع تولید توان خورشیدی می شوند. 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.

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

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

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

۴-۲- منابع تولید همزمان توان و حرارت

منابع تولید همزمان توان و حرارت به عنوان یکی از اقتصادی ترین و پر بازده ترین منابع تولید توان الکتریسیته شناخته می شود که قابلیت تولید همزمان توان الکتریکی و حرارت را دارا هستند. این منابع در سه

۲-۱-۳- هزینه تعمیرنگهداری

این هزینه نشان دهنده هزینه سالانه تعمیرات فصلی و دوره‌های منابع تولید پراکنده و کلیدهای قدرت نصب شده می‌باشد 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 و نگهداری 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.

$$C_2 = \sum_{s=1}^{N_s} \left(\sum_{i=1}^{N_{DG}} MC_i^{DG} \times P_{i,s}^{DG} + \sum_{m=1}^{N_{SW}} MC_m^{SW} \times \tau_{m,s}^{SW} \right) \quad (15)$$

$$CPV(C_2) = C_2 \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T \left(\frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (16)$$

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.

$$C_3 = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{N_{DG}} T_{i,s}^{DG} \times CG_i^{DG} \times P_{i,s}^{DG} \quad (17)$$

$$CPV(C_3) = C_3 \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T \left(\frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (18)$$

شایان ذکر است که منابع تجدیدپذیر فاقد هزینه سوخت اولیه بوده و هزینه‌های بهره‌برداری آن‌ها تنها در قالب هزینه‌های تعمیر و نگهداری در نظر گرفته شده‌اند.

۳-۲- ارزیابی فنی

در این بخش جنبه‌های فنی طراحی ریزشکه‌ها 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 نظر گرفتن این بحث در مساله طراحی ریزشکه‌ها به یکی از اهداف

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 می‌دهد. مراحل اعمال روش بکاربرد به صورت 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

$$S_1 = \arg \left\{ \min_{S' \in N_s} \sum_S \psi_S \times C(S, S') \right\} N_s = \{S_1\} \quad (12)$$

$$S_n = \arg \left\{ \min_{S' \in N_s} \sum_S \psi_S \min_{S'' \in N_s} C(S, S'') \right\} N_s \quad (13)$$

برای مشاهده جزئیات بیشتر و مفصل در مورد روش‌های موجود جهت کاهش سناریو می‌توان 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 ریزشکه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که روش پیشنهادی یک روش استاتیک بوده به طوری که تمام سرمایه‌گذاری‌ها در سال اول افق طراحی انجام می‌شود.

۳-۱-۱- هزینه سرمایه‌گذاری

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

$$C_1 = \sum_{s=1}^{N_s} \left(\sum_{i=1}^{N_{DG}} IC_{i,s}^{DG} \times P_{i,s}^{DG} \times \eta_{i,s}^{DG} + \sum_{m=1}^{N_{SW}} IC_{m,s}^{SW} \times \theta_{m,s}^{SW} \right) \quad (14)$$

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 می‌باشد. همچنین، $IC_{m,s}^{SW}$ هزینه احداث کلیدها و $\theta_{m,s}^{SW}$ متغیر باینری برای نصب کلید m در سناریو S می‌باشد.

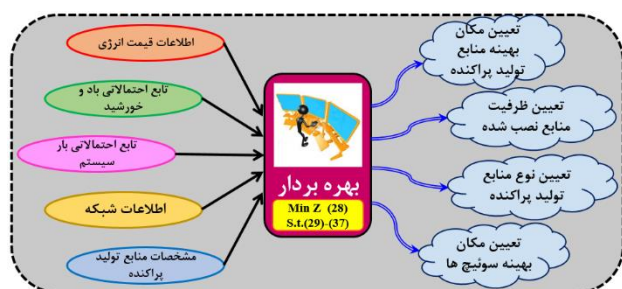
۱-۳-۳- هزینه انرژی تامین نشده

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های 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 می‌باشد که در این مقاله فرض شده است تنها خطوط شبکه دچار خطا می‌شوند و سایر تجهیزات شبکه به صورت ۱۰۰٪ قابل اطمینان می‌باشند. رابطه (۲۳) نشان دهنده هزینه قطعی مشترکین به ازای سناریوهای مختلف می‌باشد که هزینه فعلی آن توسط رابطه (۲۴) برای سال‌های مختلف بهره‌برداری محاسبه می‌شود.

$$C_6 = \sum_{s=1}^{N_s} \left\{ \sum_{b=1}^{N_b} C_{int} \times \lambda_b \times L_b \times P_{b,s}^D \times \sum_{res=1}^{N_{res}} P_s^{res} \times T_s^{res} + \sum_{rep=1}^{N_{rep}} P_s^{rep} \times T_s^{rep} \right\} \quad (23)$$

$$CPV(C_6) = C_6 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (24)$$

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 ارزیابی خطا و زمان ارزیابی 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 تصمیم‌گیری برای طراحی ریزشبکه‌ها

۴-۳- 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 مینیم کردن همزمان مجموع هزینه‌های ذکر شده با رعایت قیود مختلف سیستم می‌باشد. متغیرهای اصلی مساله شامل جایابی و ظرفیت‌یابی انواع مختلف منابع تولید پراکنده و هم چنین جایابی بهینه سوئیچ‌ها برای تعیین مرزهای الکتریکی ریزشبکه‌ها می‌باشد که توسط شکل (۲) نشان

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

$$C_4 = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{N_{CHP}} \left[\zeta_i^{CHP} \exp(\delta_i \times P_{i,s}^{CHP}) \right] \quad (19)$$

$$CPV(C_4) = C_4 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (20)$$

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 توان و 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.

۲-۲-۲- 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.

$$C_5 = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{b=1}^{N_b} (R_b \times I_{b,s}^2) C_{loss} \quad (21)$$

$$CPV(C_5) = C_5 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (22)$$

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 می‌دهد.

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 می‌باشد. 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.

$$-P_{t,s}^D + \sum_{i \in N_{DG}} P_{i,t,s}^{DG} = V_{j,t,s} \sum_{b \in N_b} Y_b \cdot V_{k,t,s} \cos(\delta_{j,t,s} - \delta_{k,t,s} - \theta_{jk}) \quad (36)$$

$$-Q_{t,s}^D + \sum_{i \in N_{DG}} Q_{i,t,s}^{DG} = V_{j,t,s} \sum_{b \in N_b} Y_b \cdot V_{k,t,s} \sin(\delta_{j,t,s} - \delta_{k,t,s} - \theta_{jk}) \quad (37)$$

در روابط فوق V_n ولتاژ باس n و 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. $P_{i,t,s}^{DG}$ ، $Q_{i,t,s}^{DG}$ ، $P_{t,s}^D$ و $Q_{t,s}^D$ به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی منابع تولیدپراکنده نصب شده و همچنین توان-های اکتیو و راکتیو مصرفی شبکه و تلفات را نشان می‌دهند.



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 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 بهینه 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

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

$$F(1) = C_1 + CPV(C_2) + CPV(C_3) \quad (25)$$

$$F(2) = CPV(C_4) + CPV(C_5) \quad (26)$$

$$F(3) = CPV(C_6) \quad (27)$$

$$Z = W_1 \times F(1) + W_2 \times F(2) + W_3 \times F(3) \quad (28)$$

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 باس‌های شبکه، حد مجاز جریان عبوری از فیدها، حداکثر میزان و تعداد احداث منابع تولیدپراکنده، محدوده ظرفیت نصب هر منبع و قید تعادل توان برای هر یک از ریزشکه‌ها و همچنین 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 ریزشکه‌های ایجاد شده اعمال می‌کند که باعث می‌شود ریزشکه‌ها به طورکلی مستقل و خودکفا باشند. در آخر روابط (۳۶) و (۳۷) معادلات پخش بار را نشان می‌دهند.

$$V_{n,s}^{\min} \leq V_{n,s} \leq V_{n,s}^{\max} \quad \forall s \in N_s \quad (29)$$

$$I_{b,s} \leq I_{b,s}^{\max} \quad \forall s \in N_s \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{DG}} P_i^{DG} \leq P^{\max} \quad \forall s \in N_s \quad (31)$$

$$P_{CHP}^{\min} \leq P_{CHP} \leq P_{CHP}^{\max} \quad \forall s \in N_s \quad (32)$$

$$P_{PV}^{\min} \leq P_{PV} \leq P_{PV}^{\max} \quad \forall s \in N_s \quad (33)$$

$$P_{WT}^{\min} \leq P_{WT} \leq P_{WT}^{\max} \quad \forall s \in N_s \quad (34)$$

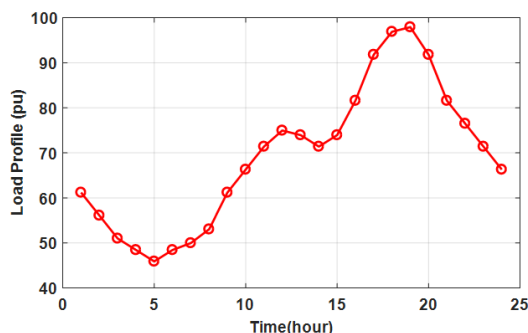
$$\sum_{n=1}^{N_{MG}} P_{i,n}^{DG} = \sum_{l=1}^{N_L} P_l^D + \sum_{b=1}^{N_b} P_b^{loss}, \forall i \quad (35)$$

یکی از مهم ترین ویژگی الگوریتم فاخته امکان جستجوی سراسری علاوه بر جستجوی محلی می باشد که امکان یافتن جواب بهینه کلی مساله را امکان پذیر می سازد و همچنین این الگوریتم زمان هم گرایی کمتری نسبت به سایر الگوریتم های فراابتکاری دارد. فلوجارت نشان داده شده در شکل (۴) الگوریتم روش پیشنهادی برای طراحی ریزشبه ها را تحت عدم قطعیت توسط الگوریتم بهینه سازی فاخته به تصویر می کشد.

۵- شبیه سازی و نتایج

برای نشان دادن کارایی و عملکرد روش پیشنهادی در این مقاله از شبکه توزیع استاندارد ۳۳ باسه برای پیاده سازی روش پیشنهادی استفاده شده است [۳۵]. هزینه های مربوط به احداث و بهره برداری منابع و سوئیچ ها از مراجع [۷]، [۱۳] و [۱۸] به دست آمده است. همچنین، از یک پروفیل بار روزانه نمونه برای محاسبه هزینه های بهره برداری در طول افق بهره برداری استفاده شده است [۶]. پروفیل بار روزانه سیستم در نظر گرفته 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 نظر گرفته شده است.

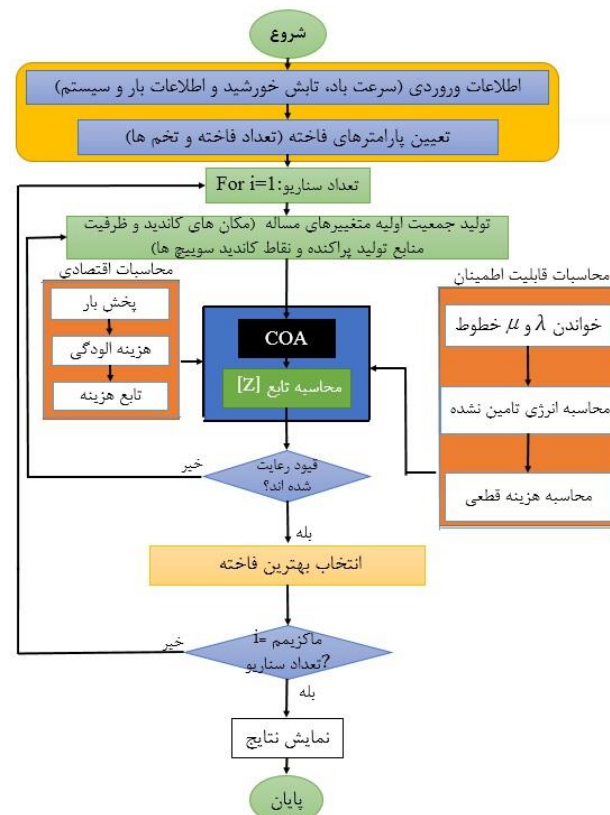
هدف این مقاله طراحی بهینه ریزشبه های چندگانه در یک شبکه توزیع هوشمند با در نظر گرفتن جنبه های اقتصادی، فنی و زیست محیطی بوده که تحت عدم قطعیت در پارامترهای طراحی سیستم توزیع انجام می گیرد. مساله طراحی ریزشبه ها بصورت جایابی بهینه منابع تولید پراکنده تجدید پذیر و منابع تولید توان کنترل پذیر همزمان با جایابی سوئیچ در شبکه توزیع انرژی به منظور تعیین مرزهای الکتریکی ریزشبه ها صورت می پذیرد. مدل پیشنهادی یک مدل استاتیکی بوده که کلیه سرمایه گذاری ها در سال اول اتخاذ می گردد و تعیین سال احداث منابع جزو متغیرهای مساله نمی باشد. الگوریتم بهینه سازی فاخته به عنوان یکی از قدرتمندترین و جدیدترین الگوریتم های فراابتکاری برای بهینه سازی تابع هدف مساله مورد استفاده قرار گرفته 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

زیست دارد. بهترین منطقه سکونت تمام گروه ها مقصد بعدی فاخته ها در سایر گروه ها خواهد بود. تمام گروه ها به سمت بهترین منطقه موجود فعلی مهاجرت می کنند. هر گروه در منطقه ای نزدیک بهترین موقعیت فعلی ساکن می شود. با در نظر گرفتن تعداد تخمی که هر فاخته خواهد گذاشت و همچنین فاصله فاخته ها از منطقه بهینه فعلی برای سکونت تعدادی شعاع تخم گذاری محاسبه شده و شکل می گیرد. سپس فاخته ها شروع به تخم گذاری تصادفی در لانه هایی داخل شعاع تخم گذاری خود می کنند. این پروسه تا رسیدن به بهترین محل برای تخم گذاری (منطقه با بیشترین سود) ادامه می یابد. این محل بهینه جایی است که بیشترین تعداد فاخته ها در آن گرد می آیند.

یکی از مهم ترین قسمت های مدل سازی مساله، تعیین درست بردار ورودی برای متغیرهای الگوریتم های هوشمند می باشد. بردار ورودی پیشنهادی برای الگوریتم فاخته جهت مدل سازی همزمان جایابی منابع تولید پراکنده و سوئیچ در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، 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 تولید پراکنده می باشد. همچنین، بخش دوم مکان و تعداد سوئیچ ها را برای تعیین مرزهای الکتریکی ریزشبه ها نشان می دهد. شایان ذکر است که در این مقاله، تمامی باس ها و خطوط شبکه به عنوان نقاط کاندید جهت نصب منابع تولید پراکنده و سوئیچ در نظر گرفته شده است.



شکل (۴): الگوریتم پیشنهادی برای حل مساله پیشنهادی

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-ب) نمودار تلفات شبکه را در دو حالت سنتی و تجدیدساختار شده به تصویر می‌کشد. طبق این شکل با طراحی شبکه توزیع بصورت مجموعه‌ای از ریزشبه‌های به هم 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 ریزشبه به هم پیوسته تقسیم شده است که هر ریزشبه می‌تواند در دسترس بهره‌بردار و صاحبان خصوصی متفاوتی قرار گیرد و می‌تواند 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.

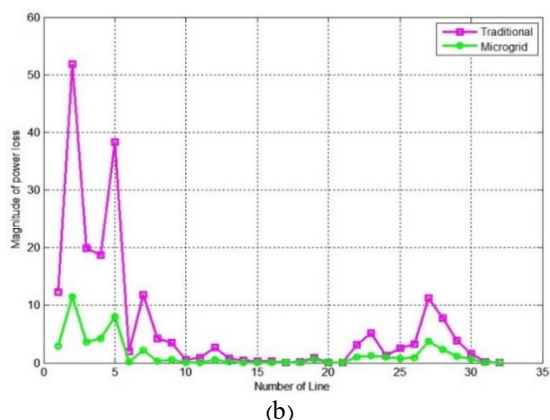
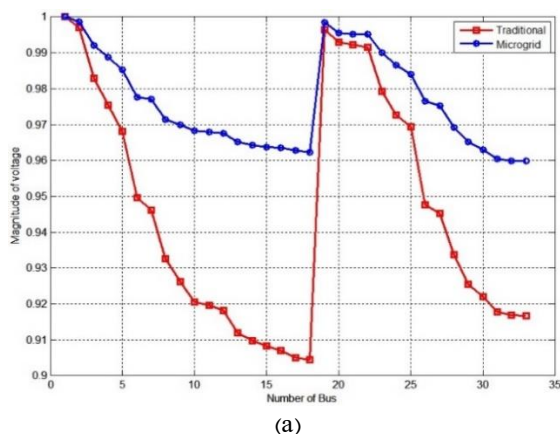
انتخاب ضرایب وزنی در تابع هدف مساله بستگی به سیاست‌ها و استراتژی‌های مختلف طراحان شبکه توزیع داشته و بسته به اهداف و اولویت‌های آنها می‌تواند مقادیر مختلفی بین صفر و یک داشته باشد. در این مقاله برای تعیین دقیق تاثیر ضرایب بهینه سازی و ضرایب وزنی بر روی مساله موردنظر از آنالیز حساسیت استفاده شده است. جدول (۱) نتایج حاصله برای جایابی و ظرفیت‌یابی بهینه منابع تولید پراکنده و همچنین جایابی سوئیچ برای مرزبندی ریزشبه‌ها را بر اساس مقادیر میانگین به دست آمده از توزیع احتمالی نشان می‌دهد. طبق این جدول تعداد ریزشبه‌های انتخاب شده برای این سیستم خاص برابر سه بوده و تعداد سه منبع تولیدپراکنده نیز برای هر ریزشبه اختصاص داده شده است. سه نوع منبع تولید توان پراکنده شامل سلول‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و منابع تولیدهمزمان برق و حرارت برای هر یک از ریزشبه‌ها 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 بار مصرفی شبکه تعریف شده است. با توجه به این جدول، روشن است که با افزایش ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده در ریزشبه‌ها، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری منابع بالا خواهد رفت اما این امر منجر به بهبود شاخص‌های 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
توربین بادی	۴، ۹، ۳۰	۱۲۵، ۱۰۰، ۷۵
سلول خورشیدی	۱۷، ۲۴، ۲۷	۵۰، ۱۰۰، ۷۵
سوئیچ	۱، ۶، ۲۵	—

جدول (۲): توابع هدف مساله برای طراحی ریزشبه‌ها

توابع هدف	مقادیر توابع هدف (\$) PI=۱۰۰%		
	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



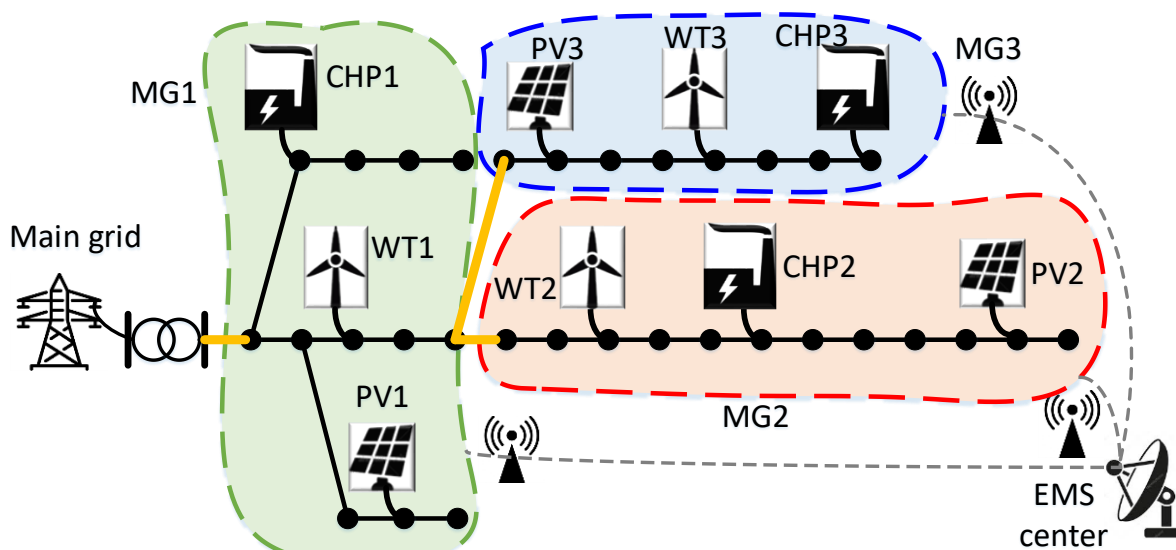
شکل (۶): a. پروفیل ولتاژ شبکه b. تلفات کل سیستم

شکل (۶-ا) پروفیل ولتاژ شبکه در دو حالت ساختار سنتی و ساختار مبتنی بر ریزشبه‌های 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

سنی برای سال های مختلف طراحی نشان می دهد. همان گونه که دیده می شود در حالت طراحی شبکه های توزیع به صورت مجموعه ای از ریزشبهه 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 (۹-ا) نمودار احتمالاتی شاخص انرژی تامین نشده سیستم را برای سناریوهای مختلف نشان می دهد. در ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه های توزیع برای هر یک 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 می شود.

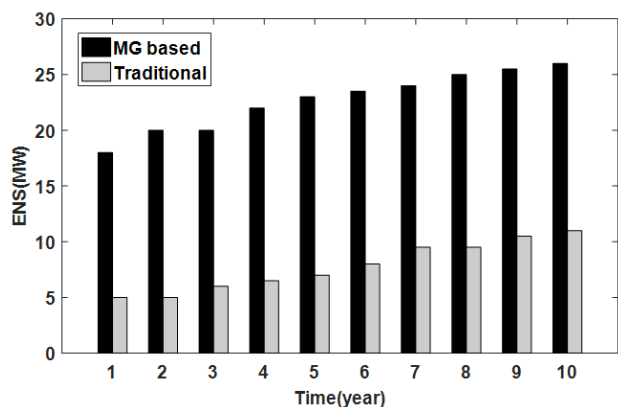
با توجه به افزایش بارهای حساس در سطح شبکه توزیع و لزوم افزایش قابلیت اطمینان در شبکه توزیع، یکی از مهم ترین اهداف این مقاله بهبود قابلیت اطمینان شبکه توزیع با جابجایی منابع تولیدپراکنده و خوشه بندی شبکه توزیع به مجموعه ای از ریزشبهه های به هم پیوسته بوده است. با تغییر ضریب وزنی مربوط به تابع تلفات سیستم از ۰ تا ۱ میتوان به درجه کاهش های مختلفی از تلفات سیستم رسید که انتخاب این عدد بستگی به سیاست های بهره برداری و برنامه ریزان شبکه توزیع دارد. تعیین دقیق ضرایب وزنی و تاثیرات آن ها بر روی مساله طراحی توسط آنالیز حساسیت تعیین می شود.

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 ریزشبهه و حالت



شکل (۷): جابجایی بهینه DG و مرزبندی ریزشبهه های چندگانه

منابع می شود. این موضوع باعث افزایش قابلیت اطمینان ریزشبهه ها هم در حالت متصل به شبکه و هم در حالت جزیره ای خواهد بود.

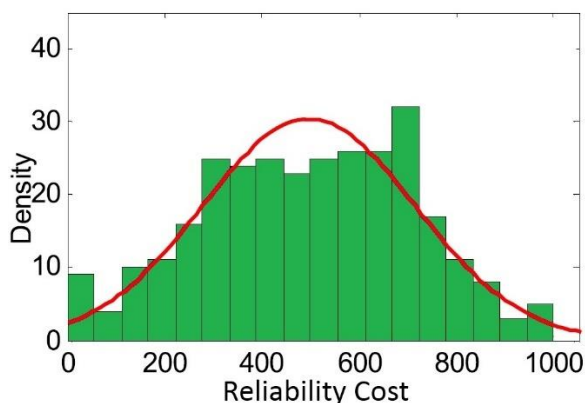


شکل (۸): مقادیر انرژی تامین نشده در طول افق طراحی

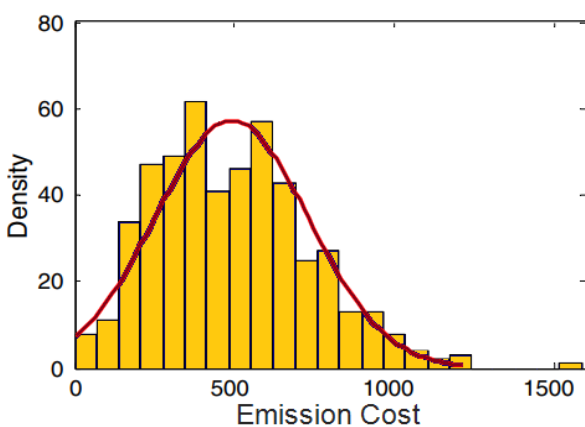
با توجه به این که در برنامه ریزی های سناریومحور جواب های متفاوتی برای هر یک از سناریوها به دست می آید، انتخاب جواب واحد از میان جواب های به دست آمده تبدیل به یکی از چالش های تصمیم

شکل (۹-ب) توزیع احتمالاتی هزینه آلودگی هوا ناشی از تولید منابع سوخت فسیلی را نشان می دهد. همچنین شکل (۹-ج) توزیع احتمالاتی هزینه کل طراحی ریزشبهه ها شامل هزینه سرمایه گذاری منابع و سوییچ ها، هزینه بهره برداری، هزینه تلفات و آلودگی هوا و همچنین هزینه انرژی تامین نشده را برای سناریوهای مختلف نمایش می دهد. برای نشان دادن مجموع هزینه های کلی طراحی از مقدار انتظاری استخراج شده از نمودار احتمالاتی به دست آمده از سناریوها استفاده شده که بیانگر وقوع محتمل ترین حالت برای هزینه طراحی ریزشبهه ها می باشد. باتوجه به مدل سازی احتمالاتی مساله طراحی ریزشبهه ها در برابر عدم قطعیت متغیرهای سیستم مقاوم بوده و روش پیشنهادی انعطاف بیشتری را نصیب بهره برداران شبکه در مواجهه با شرایط بهره برداری گوناگون می نماید. باتوجه به وابسته بودن توان تولیدی منابع تجدیدپذیر به شرایطی محیطی برنامه ریزی این منابع بر مبنای مقدار میانگین به دست آمده از توزیع احتمالاتی باعث مقاوم بودن طراحی شبکه نسبت به تغییرات جوی و نوسانات تولیدی این

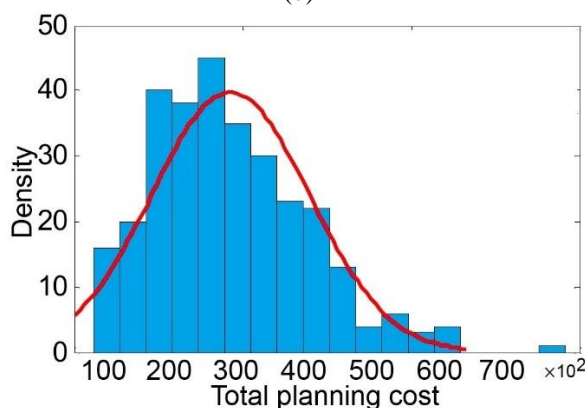
گزینه سناریویی که بیشترین هزینه را دارد (گران‌ترین شبکه) به عنوان سناریو نهایی انتخاب می‌شود. در نهایت، استراتژی ریسک خنثی حالت بینابین دو حالت ذکر شده بوده و سناریویی را که دارای بیشترین احتمال وقوع است به عنوان سناریو نهایی برمی‌گزیند. در این مقاله، از استراتژی ریسک خنثی برای یافتن سناریو نهایی (جواب واحد) بهره برده شده است.



(a)



(b)



(c)

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

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 تأثیر 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 می‌توانند داشته باشند انجام می‌گیرد و بهترین طراحی از نظر کمیت‌های به دست آمده به عنوان ضریب وزن بهینه شناخته می‌شود.

جدول (۳) تأثیر انتخاب مقادیر مختلف ضرایب وزنی در تابع هدف را بر روی هزینه کل طراحی شبکه نشان می‌دهد. طبق این جدول مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن تمامی ضرایب باعث کاهش هزینه کل سیستم خواهد شد بنابراین طراحی ریزشکه‌ها با در نظر 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 شده- اند. همچنین جدول (۳) نتایج حاصل از آنالیز حساسیت ضرایب وزنی را بر روی مرزبندی ریزشکه‌ها نشان می‌دهد که مشاهده می‌شود که هرچند وزن قابلیت اطمینان شبکه زیاد باشد تعداد ریزشکه‌ها بیشتر می‌شود که حد نهایی آن در این شبکه خاص برابر با شش می‌باشد و همچنین هرچند وزن قسمت اقتصادی بحث بیشتر انتخاب گردد تعداد ریزشکه‌ها به سمت یک ریزشکه واحد کاهش پیدا خواهد کرد. به عبارتی دیگر، ریزشکه‌های کوچک قابل اطمینان تر و ریزشکه‌های 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. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی هم از لحاظ جواب به دست آمده و هم از نظر سرعت همگرایی برتری محسوس 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 ریسک‌گریز 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 ریسک‌گریز به دنبال کاهش ریسک‌های فنی سیستم بوده که این کار با افزایش هزینه‌های طراحی میسر خواهد شد. بنابراین، در استراتژی ریسک

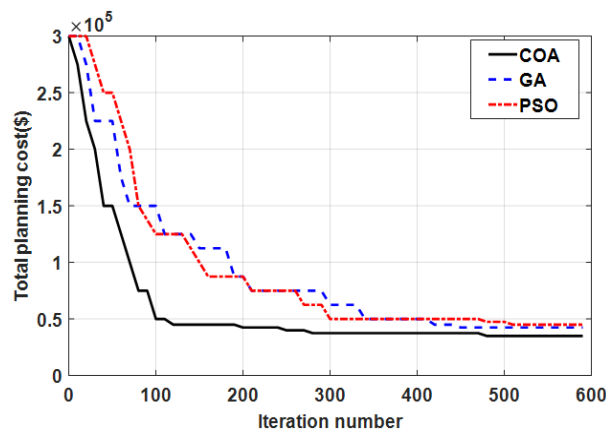
مورد استفاده قرار گرفت. در این مقاله برای پوشش عدم قطعیت پارامترهای سیستم از روش تولید سناریو استفاده گردید و همچنین روش بکوارد جهت کاهش سناریو برای افزایش سرعت محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که خوشه-بندی شبکه توزیع به مجموعه‌ای از ریزشبکه‌های به هم پیوسته باعث بهبود 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، شاختر 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 نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای سیستم روش پیشنهادی می‌تواند ابزاری موثر و کارآمد 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. Hatzigiorgiou, "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.

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

W1	W2	W3	مکان سوئیچ‌ها	هزینه (\$)
0	0	1	1, 5, 12, 18, 26	685603
0	1	0	1, 7, 25	663277
0	1	1	1, 3, 11, 25	597895
1	0	0	1	534545
1	0	1	1, 7, 26	536648
1	1	0	1, 5	474564
1	1	1	1, 6, 25	457869



شکل (۱۰): منحنی همگرایی الگوریتم پیشنهادی

به‌طور کلی نتایج ارزیابی اقتصادی و قابلیت اطمینان به دست آمده نشان می‌دهد که با خرید کردن شبکه‌های توزیع سنتی به مجموعه-ای 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 می‌توان 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 قابل اطمینان ریزشبکه‌های چندگانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در بار مصرفی و تولید توان منابع تجدیدپذیر ارائه 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

- 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.
- [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

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

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