# ارتقاء شاخص‌های پدافند غیرعامل با استفاده از برنامه‌ریزی بهینه منابع تجدیدپذیر انرژی در شبکه‌های هوشمند توزیع برق

**بابک جدی[۱]  رضا غفارپور[۲]  علی‌محمد رنجبر[۳]**

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران
barg.babak@gmail.com

۲- مربی- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه جامع امام حسین(ع)- تهران - ایران
rghaffarpour@ihu.ac.ir

۳- استاد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی شریف - تهران - ایران
amranjbar@sharif.edu

**چکیده:** **شبکه‌های توزیع برق به‌عنوان آخرین زیر سیستم در شبکه‌های قدرت که وظیفه نهایی سیستم که همان توزیع انرژی به مشترکین را ایفا می‌کنند، دارای اهمیت بسیار مهمی هستند. از این‌رو درنظر گرفتن معیارهای پدافندغیرعامل در مباحث مربوط به مطالعات طراحی و توسعه این شبکه‌ها امری ضروری است. با توجه به مشکلات شبکه‌های سنتیِ توزیع در تامین انرژی پایدار، نیاز به ایده‌ای جدید در این حوزه به‌منظور افزایش ضریب امنیت در صنعت برق است. شبکه هوشمند انرژی به‌عنوان یک طرح جدید می‌تواند میان فرآیندهای حوزه تولید، انتقال، توزیع و مصرف برق پیوستگی ایجاد کرده و براساس اصل مهم پراکندگی پدافند غیرعامل، با فراهم نمودن امکان استفاده از منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی آن تهدیدها را کاهش دهد. در این مقاله مدلی جدید برای برنامه‌ریزی پویای منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع هوشمند با درنظر گرفتن ملاحظات پدافند غیرعامل به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با هدف کمینه‌سازی مدت زمان خاموشی بارهای شبکه، کمینه‌سازی هزینه‌ها و کمینه‌سازی تلفات ارائه می‌شود. هدف از حل مسئله تعیین بهترین مکان نصب، ظرفیت و زمان نصب این واحدها می‌باشد. عدم‌قطعیت موجود در میزان تولید منابع تجدیدپذیر و عدم‌قطعیت بار مصرفی شبکه در مدل برنامه‌ریزی با استفاده از روش برنامه‌ریزی مقید به شانس لحاظ خواهد شد.**

**کلمات کلیدی:** **منابع تولید پراکنده، شبکه‌های هوشمند برق، پدافند غیرعامل، عدم‌قطعیت، بهینه‌سازی چندهدفه**

**تاریخ ارسال مقاله :** ۱۳۹۵/۱۱/۰۳

**تاریخ پذیرش مشروط مقاله:** ۱۳۹۶/۰۳/۰۲

**تاریخ پذیرش مقاله :** ۱۳۹۶/۰۴/۱۱

**نام نویسنده‌ی مسئول:** پروفسور علی‌محمد رنجبر

**نشانی نویسنده‌ی مسئول:** ایران – تهران – خیابان آزادی- دانشگاه صنعتی شریف- دانشکده مهندسی برق

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

**فهرست علائم و نشانه‌ها**

| | |
|---|---|
| $N_{CB}$ | تعداد شین‌های کاندید نصب DG |
| $N_{TDG}$ | تعداد فناوری‌های مختلف DG برای نصب در شبکه |
| $N_{FD}$ | تعداد فیدرهای شبکه توزیع |
| $N_{SS}$ | تعداد پست‌های تغذیه‌کننده شبکه توزیع |
| $N_{U}$ | تعداد ترانسفورماتورهای موردنیاز برای نصب |
| $N_{TB}$ | تعداد کل شین‌های شبکه توزیع |
| $N_{LB}$ | تعداد شین‌های متصل به بار شبکه توزیع |
| $T$ | طول دوره برنامه‌ریزی |
| $C_{inv,i}^{DG}$ | هزینه سرمایه‌گذاری DG نوع $i$ |
| $C_{o,i}^{DG}$ | هزینه بهره‌برداری DG نوع $i$ |
| $C_{f}^{upg}$ | هزینه ارتقاء ظرفیت خط $f$ |
| $C_{s,u}^{T}$ | هزینه نصب ترانسفورماتور $u$ در پست $s$ |
| $\mu_{s}^{Grid}$ | قیمت خرید برق از شبکه در محل پست $s$ |
| $C_{e}^{ENS}$ | هزینه انرژی تامین نشده در شین $e$ |
| $S_{i,k}^{DG}$ | ظرفیت DG نوع $i$ برای نصب روی شین$k$ |
| $PF_{i}^{DG}$ | ضریب توان کاری DG نوع $i$ |
| $\delta_{i,k,t}^{DG}$ | متغیر باینری نشانگر وجود DG نوع $i$ روی شین $k$ در سال $t$ |
| $L_f$ | طول فیدر $f$ |
| $P_{s}^{Grid}$ | توان خریداری شده از شبکه بالادست در پست $s$ |
| $ENS_{e,t}$ | مقدار انرژی تامین نشده در شین $e$ در سال $t$ |
| $V_{i,t}$ | مقدار ولتاژ شین $i$ در سال $t$ |
| $P_{G_{i,t}}$ | مجمع توان تولیدی DGهای متصل به شین $i$ در سال $t$ |
| $P_{L_{i,t}}$ | مقدار بار متصل به شین $i$ درسال $t$ |
| $I_{l,t}$ | مقدار جریان عبوری از خط $l$ در سال $t$ |
| $IYDG_{i,k}$ | سال نصب DG نوع $i$ در شین $k$ |
| $IYLine_{f}$ | سال ارتقاء ظرفیت خط $f$ |
| $IYT_{s,u}$ | سال نصب ترانسفورماتور $u$ در پست$s$ |
| $d$ | نرخ بهره |
| $\tau$ | رشد بار سالیانه |
| $n$ | طول عمر پروژه |

## ۱- مقدمه

امروزه، از بین بردن زیرساخت‌های صنعتی و فلج کردن کشور از طریق انهدام تجهیزات اصلی موردنیاز کشور از اهداف اولیه در جنگ‌ها می‌باشد. دشمن تاکید دارد تا با از بین بردن زیرساخت‌های حیاتی به‌عنوان سرمایه‌های ملی، آستانه مقاومت مردم را کاهش دهد. آمار و سوابق جنگ‌های گذشته حاکی از این است که پدافندعامل به تنهایی قادر به مقابله با سلاح‌های مدرن و مخرب جهت جلوگیری از اثرات ویرانگر آن‌ها بر مراکز حیاتی، حساس و مهم و نیز نیروی انسانی نبوده و لذا به‌کارگیری اصول و معیارهای پدافند غیرعامل در کنار روش‌های به‌روز جهانی در سیاست‌های برنامه‌ریزی و مدیریتی کشور می‌تواند به تکمیل زنجیره دفاعی کمک موثر و قابل توجهی نماید. صنعت برق کشور به‌عنوان فناوری زیرساخت در اداره امور کشور، بسیار حساس و حیاتی بوده و در اولویت‌های اولیه تهاجم دشمن قرار خواهد گرفت. هدف این صنعت تحویل برق مطمئن و پایدار به مشترکین با درنظر گرفتن الویت مراکز حیاتی، حساس و مهم است. تجربیات و نتایج جنگ‌های اخیر نشان می‌دهد که خسارت وارده ناشی از تهاجم دشمن به تاسیسات زیربنایی برقی، از کار افتادن کارخانجات حیاتی و اساسی کشور، وقفه در فعالیت پایگاه‌های حساس نظامی و از سوی دیگر، قطع طولانی مدت برق شهروندان، تضعیف روحیه آنان و فشار غیرمستقیم بر دستگاه‌های نظامی کشور را به دنبال خواهد داشت. تجربه جنگ ایران و عراق نشان داده است که نیروگاه‌ها، خطوط انتقال و پست‌های برق از جمله اولین تأسیساتی هستند که مورد آسیب قرار می‌گیرند. در طول جنگ تحمیلی پنج نیروگاه مهم کشور در مجموع بیش از ۲۰ بار مورد تهاجم جنگنده‌های دشمن قرار گرفتند[۱]. از این‌رو درنظر گرفتن ضوابط پدافندغیرعامل در مباحث مربوط به مدیریت تولید، انتقال و توزیع و هم‌چنین توسعه صنعت برق امری ضروری است.

مبحث پدافند غیرعامل در صنعت برق را می‌توان از جنبه‌های گوناگون شامل اجرایی، مطالعاتی و بهره‌برداری و با درنظر گفتن معیارهای مختلف مورد بررسی قرار داد. از جمله این معیارها می‌توان موارد زیر را نام برد [۲]: تامین بارهای حساس شبکه برق در تمام شرایط، کاهش قطع ناخواسته برق مشترکین عمومی جهت جلوگیری از بروز نارضایتی اجتماعی در شرایط بحرانی، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم قدرت جهت مدیریت بهتر کشور در شرایط بحران و تمرکززدایی با استفاده از منابع تولید پراکنده و برنامه‌های مشارکت مصرف‌کنندگان در مدیریت شبکه برق. شبکه‌های هوشمند انرژی ایده جدیدی است که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه مهندسین و محققین صنعت برق قرار گرفته است، می‌تواند با پوشش دادن معیارهای بالا و با هدف ارتقا شاخص‌های پدافند غیرعامل اجرا گردیده و ضریب امنیت شبکه‌های برق را افزایش دهد. در این سیستم منابع انرژی به شکل پراکنده توزیع شده و امکان عملکرد مستقلِ اجزای شبکه پس از وقوع بحران در اثر عملیات مخرب دشمن و تشکیل ریزشبکه‌های جدا از هم را فراهم می‌آورد [۳]. هم‌چنین اقدامات خودترمیمی شبکه باعث می‌گردد که وقفه کمتری در ارائه خدمات به مصرف‌کنندگان پیش آید [۴].

استفاده از منابع تولید انرژی در مقیاس کوچک به‌عنوان مشخصه اصلی شبکه‌های هوشمند، میزان اتکا به شبکه‌های طولانی برق را کاهش خواهد داد. سرمایه‌گذاری و توسعه منابع تولید پراکنده مزایایی از قبیل تنوع‌بخشی به منابع انرژی و عدم وابستگی به یک یا دو منبع انرژی (مانند گاز و گازوئیل بخصوص در شرایط تحریم)، مهیاسازی ساختار بازار برق، افزایش بازده تولید انرژی از طریق تولید همزمان برق و حرارت و پیک‌سائی را به همراه دارد. لذا منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر از دیدگاه پدافند غیرعامل منابعی استراتژیک به شمار رفته و می‌توانند جایگزین خوبی برای سوخت‌های فسیلی در صورت وقوع جنگ و یا شرایط تحریمی باشند. با این حال، این منابع یک عیب



[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.1 Spring 2018

بزرگ و غیر قابل چشم‌پوشی دارند: عدم‌قطعیت در تولید. یکی دیگر از مسائل مهم در مطالعات برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع برق چگونگی اعمال مقدار بار نقاط مصرف در محاسبات است. این مسئله به‌دلیل عدم‌قطعیت اطلاعات بار و نیز مسائل حاکم بر پیش‌بینی بار است.

## ۲- مرور مقالات و نوآوری تحقیق

مرور مقالات منتشر شده نشان می‌دهد که از منظر زمانی حل مسئله برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع با دو رویکرد ایستا[1] و پویا[2] انجام می‌پذیرد [۵]. در رویکرد ایستا یک افق زمانی در نظر گرفته‌شده، مقدار بار برای سال آخر دوره برنامه‌ریزی به‌دست آمده و مسئله برای این سال حل می‌گردد. هدف مسئله تعیین نوع، محل و ظرفیت تجهیزات لازم برای نصب یا توسعه تجهیزات موجود در شبکه برای تأمین بار در سال آخر است. همه تجهیزات مشخص‌شده، در اولین سال شروع برنامه‌ریزی در شبکه نصب و راه‌اندازی شده و یا از بین تجهیزات موجود توسعه می‌یابند [۶, ۷]. در رویکرد پویا هدف مسئله نه تنها تعیین نوع، محل و ظرفیت تجهیزات لازم برای نصب یا توسعه تجهیزات موجود در شبکه است، بلکه بهترین زمان ممکن برای نصب یا توسعه نیز مشخص می‌گردد [۸]. رویکرد پویا به‌دلیل وجود وابستگی بین سال‌های مختلف برنامه‌ریزی، بسیار پیچیده‌تر و مشکل‌تر از رویکرد ایستا است. ولی درعین‌حال جواب به‌دست آمده بسیار به‌صرفه‌تر است. اکثر مقالات موجود در این حوزه از رویکرد ایستا استفاده کرده‌اند. بیشتر مطالعات انجام شده در حوزه برنامه‌ریزی توسعه واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، از منظر اقتصادی صورت گرفته است [۸-۶]. هدف از این مطالعات جایابی و اندازه‌یابی بهینه‌ی واحدهای تولید پراکنده برای نصب در شبکه توزیع به‌منظور تأمین بار با صرف حداقل هزینه می‌باشد. هم‌چنین، در برخی از مقالات واحدهای تولید پراکنده به‌منظور کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش پایداری شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۹،۱۰]. تنها تعداد کمی از مقالات با هدف ارتقاء شاخص‌های قابلیت‌اطمینان شبکه توزیع و افزایش امنیت مشترکین شبکه از واحدهای تولید پراکنده در برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع استفاده کرده‌اند [۱۱،۱۲]. روش‌های بهینه‌سازی در مطالعات انجام شده در حالت کلی نیز به دو دسته روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک [۱۳, ۶] و روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری[3] [۱۴, ۱۵] تقسیم می‌شوند.

با توجه به بحث بالا، می‌توان گفت که مقالات متعددی در زمینه برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع با درنظر گرفتن منابع تولید پراکنده منتشر شده است. با این حال، اکثر این تحقیقات در فضای قطعی و بدون درنظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های مسئله بوده است. برای دستیابی به یک مسئله واقعی‌تر و نتایج دقیق‌تر لحاظ کردن عدم‌قطعیت‌ها امری ضروری است. عدم‌قطعیت‌های تاثیرگذار و مهم در مسئله برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع عبارتنداز میزان تولید منابع تجدیدپذیر، مقدار بار مصرفی نقاط بار و قیمت برق. با توجه به پیشرفت‌های صورت‌گرفته در سال‌های اخیر در زمینه روش‌های مدل‌سازی داده‌های غیرقطعی در مسائل بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های موجود مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. از میان روش‌های موجود، تکنیک برنامه‌ریزی مقید به شانس (CCP)[4] یک از شیوه‌های مدل‌سازی عدم‌قطعیت در حوزه بهینه‌سازی است [۱۶]. یکی از مزایای این روش در مقایسه با روش‌های دیگر اینست که در این روش قیود نامساوی مسئله بهینه‌سازی با در نظرگرفتن یک مقدار احتمال از قبل تعیین شده و مشخص ارضا می‌شوند. در واقع این روش به‌دنبال ایجاد توازن بین قابلیت اطمینان در برآورده‌کردن قیود نامساوی از یک طرف و رسیدن به یک جواب بهینه و مقرون به‌صرفه از طرف دیگر است. به عبارت دقیق‌تر، هدف این تکنیک ارائه یک جواب بهینه از مسئله با پارامترهای غیرقطعی است در حالیکه احتمال ارضا شدن قیود در یک حد مطلوب و قابل کنترل نگه داشته شده است. در مرجع [۱۷] از این روش به‌منظور مدل‌سازی عدم‌قطعیت داده‌ها در مسئله تخصیص بهینه منابع تولید پراکنده استفاده شده است. در این مرجع، تابع هدف مسئله به‌صورت کمینه‌سازی هزینه‌ها و تلفات تعریف شده و الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. مرجع [۱۸] نیز مدلی برای جایابی منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها و تلفات براساس روش CCP ارائه می‌دهد. هر دو مرجع فوق از رویکرد ایستا استفاده کرده و برنامه‌ریزی را برای یک سال انجام داده‌اند. همچنین، تاثیر حضور منابع تولید پراکنده روی قابلیت‌اطمینان شبکه و کاهش مدت زمان خاموشی بارها در نظر گرفته نشده است. علاوه براین، توابع هدف مختلف (هزینه و تلفات) که از یک جنس نیستند، با هم جمع شده و مسئله به‌صورت یک مسئله تک‌هدفه درآمده است. درحالیکه، به‌منظور رسیدن به جواب‌های واقعی‌تر و مطلوب‌تر بایستی مسئله به‌صورت یک مسئله چندهدفه فرمول‌بندی شده و از الگوریتم‌های مخصوصی که توانایی بهینه‌سازی چندین تابع هدف به‌صورت همزمان را دارند، استفاده کرد.

در این مقاله مسئله برنامه‌ریزی بهینه واحدهای تولید پراکنده‌ی تجدیدپذیر انرژی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه و به‌منظور کمینه‌سازی هزینه‌ها، کمینه‌سازی تلفات و حداقل‌کردن مدت زمان خاموشی بارهای شبکه با درنظر گرفتن اولویت بارهای حیاتی، حساس و مهم مدل‌سازی، فرمول‌بندی و حل خواهد شد. هدف از حل مسئله تعیین بهترین مکان نصب، ظرفیت این واحدها و نیز بهترین زمان نصب آن‌ها می‌باشد. ظرفیت این واحدها بایستی به‌گونه‌ای تعیین شود که در صورت بروز هرگونه خرابی در سیستم تولید، سیستم انتقال و یا پست فوق توزیع و در نتیجه قطع انرژی، بار مراکز حیاتی، حساس و مهم تامین شوند.

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

**جدول (۱): مقایسه اثرات شبکه‌های هوشمند و شبکه‌های سنتی انرژی بر معیارهای پدافند غیرعامل**

| اصول پدافند غیرعامل | اثرات شبکه‌های هوشمند انرژی | اثرات شبکه‌های سنتی |
|---|---|---|
| استتار، اختفاء و فریب | کاهش خطر شناسایی و آسیب‌رسانی با توجه به پراکندگی منابع | کاهش امکان استتار به‌دلیل ارتباط ضعیفِ تک‌سویه و تولیدمتمرکز |
| پوشش | جداسازی بخش آسیب‌دیده با توجه به ساختار شبکه و پراکندگی منابع | انتشار اختلال به کل سیستم به‌دلیل ساختارخطی و سلسله مراتبی |
| تفرقه و پراکندگی | توزیع غیرمتمرکز و پراکندگی منابع تولید انرژی | افزایش آسیب‌پذیری در اثر متمرکز بودن تولید در نیروگاه‌ها |
| اعلام خبر | خبررسانی سریع و اعمال محدودیت‌های کنترلی با به‌کارگیری شبکه‌های هوشمند پردازش داده، حسگرها و ابزارهای قطع و وصل خودکار | نبود خبررسانی بموقع به‌دلیل کنترل محدود شبکه، تست و بررسی دستی، حسگرها و ابزار اندازه‌گیری محدود |
| توسعه کمی و کیفی | عدم نیاز به احداث خطوط و نیروگاه‌ها، بازیابی شبکه در کمترین زمان ممکن و به بهترین نحو با بهره‌گیری از ابزار کنترل هوشمند | توسعه شبکه منوط به افزایش ظرفیت تولید نیروگاه‌هاست، عدم ارائه سرویس مختلف به‌دلیل ساختار ضعیف و خطی شبکه |

هم‌چنین، ارتقاء ظرفیت خطوط شبکه و بهترین زمان برای اینکار به‌عنوان گزینه دیگر توسعه شبکه و جزء متغیرهای مسئله درنظر گرفته شده است. برای دستیابی به جواب‌های بهینه و به‌منظور در نظر گرفتن شرایط واقعی حاکم بر شبکه‌های توزیع برق، عدم‌قطعیت موجود در میزان تولید این منابع و نیز عدم‌قطعیت بار مصرفی شبکه در مدل برنامه‌ریزی با استفاده از روش CCP لحاظ خواهد شد. از الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات چندهدفه[۵](MOPSO) به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی بهره گرفته شده است. برنامه‌ریزی به‌صورت پویا و برای یک دوره زمانی ده ساله خواهد بود. بصورت خلاصه نوآوری‌های این مقاله نسبت به مطالعات قبل عبارتند از:

۱- ارائه مدل پویا برای برنامه‌ریزی چندهدفه شبکه‌های توزیع برق با درنظرگرفتن واحدهای تولید پراکنده و ارتقا ظرفیت خطوط شبکه؛

۲- فرمول‌بندی مسئله و ارائه روش حل با درنظر گرفتن اهداف چندگانه با معیارهای متضاد شامل تلفات، هزینه‌ها و مدت زمان خاموشی؛

۳- درنظر گرفتن عدم‌قطعیتِ ورودی‌های مسئله شامل عدم-قطعیت تولید منابع تولید پراکنده‌ی تجدیدپذیر و عدم‌قطعیت بار شبکه،

۴- توجه به شاخص‌ها و اصول پدافند غیرعامل در برنامه‌ریزی شبکه برق با استفاده از مزایای شبکه‌های هوشمند انرژی.

## ۳- شبکه‌های هوشمند برق و امنیت انرژی

سیستم‌های تولید و توزیع هوشمند نیرو بهترین راه حل برای رفع نواقص شبکه‌های سنتی هستند که همراستا با اهداف و آرمان‌های پدافند غیرعامل حرکت می‌کند [۱۹]. در ساختار شبکه‌های هوشمند، دیگر با یک منبع تولید نیرو به نام نیروگاه مواجه نبوده، بلکه با منابع متعدد تولیدکننده توان که در سطح شهر یا منطقه پراکنده شده‌اند روبرو هستیم. در این سیستم هر مصرف‌کننده خود می‌تواند یک تولید کننده باشد، بدین معنی که هر ساختمان می‌تواند با استفاده از انرژی خورشیدی، انرژی باد در اطراف خود، انرژی زمین گرمایی، منابع ذخیره انرژی الکتریکی و یا منابع دیگر توانایی تولید کامل یا بخشی از نیروی برق خود را داشته باشد. این ساختمان می‌تواند در ساعات ارزانی برق، انرژی خود را از شبکه گرفته و یا در منابعی ذخیره کند و در ساعات اوج مصرف که قیمت انرژی برق بالا می‌رود، برق تولید یا ذخیره‌شده خود را به شبکه بفروشد. بدین صورت هم بخشی از نیروی برق مورد نیاز شبکه تامین می‌شود و هم مدیریت مصرف انرژی در ساختمان صورت می‌گیرد. در این شبکه‌ها، در صورت حمله به نیروگاه‌ها یا اختلال در شبکه سراسری، با اینکه طبق اصول توزیع خطی نیرو، باید قسمت عمده‌ای از شهر در خاموشی فرو رود، اما به‌دلیل اینکه این شبکه‌ها از درون خود مولد نیروی برق هستند، پس قسمتی از برق مورد نیاز قسمتِ خاموش، توسط خود مشتریان آن منطقه تامین خواهد شد و شهر در بلوک‌های متفاوت شهری خود، دارای روشنایی موقت خواهد بود. توزیع هوشمند نیرو توسط این سیستم می‌تواند انرژی ذخیره‌شده و پایدار را در جهت مصرف به کاربری‌های حساس شهری منتقل کند که این توزیع غیرسلسله مراتبی و بهره‌گیری از تولید پراکنده شبکه های هوشمند یا " Economical Grids" می‌باشد. بدین‌صورت اصل پوشش که یکی از اصول پدافند غیرعامل است نیز اعمال می‌شود [۲۰]. عکس این قضیه نیز ممکن است اتفاق بیفتد؛ یعنی قسمتی از تولیدکنندگان یا مصرف-کنندگان داخلی ، بر اثر نوعی حمله یا حادثه مجبور به جداسازی از شبکه شوند تا از بروز حوادث بعدی جلوگیری شود. این عمل توسط فناوری توزیعِ خود بازیاب در شبکه هوشمند انجام می‌شود تا توسط کنترل غیرمتمرکز و فراگیر با استفاده از انواع حسگرها و لوازم اندازه-گیری، به‌صورت خودکار، حذف بخشی از شبکه امکان پذیر باشد که این نیز جزء اصول پدافند غیرعامل یعنی اعلام خبر و مقاوم‌سازی است [۲۰].

یکی دیگر از اصول اصلی پدافند غیرعامل بحث پراکندگی است. این اصل در ساختار شهری بیانگر این موضوع است که منابع یک شهر

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]

باید به‌گونه‌ای در یک شهر یا منطقه پراکنده شوند تا در صورت بروز حمله یا حوادث غیرمترقبه تنها بخشی از آن از سیستم مدیریت شهری خارج شود و بقیه‌ی بخش‌های آن بتوانند ادامه حیات داده و به خدمت‌رسانی خود ادامه دهند. ساختار شبکه‌های برق سنتی با سیستم خطی عمل می‌کنند. ممکن است یک شهر دارای یک یا چند نیروگاه تولید برق باشد و یا قسمتی از برق خود را از شبکه سراسری برق تامین کند. در این شرایط در صورت حمله به نیروگاه و از کارافتادن آن یا ایجاد اختلال در شبکه سراسری، کل شهر یا منطقه یا قسمتی از آن در تاریکی فرو می‌روند که این کار باعث ایجاد اختلال در نظم و بروز فاجعه‌های انسانی در کلان‌شهرها می‌گردد که در همین راستا، خدمات مدیریت و امدادرسانی را نیز دچار بحران خواهد کرد. در جدول ۱ مقایسه‌ای بین شبکه‌های هوشمند و شبکه‌های سنتی انرژی با در نظر گرفتن معیارهای پدافند غیرعامل صورت گرفته است.

## ۴- تشریح مسئله و ارائه روش حل

### ۴-۱- تابع هدف و قیود مسئله برنامه‌ریزی قطعی

الف) توابع هدف مسئله برنامه‌ریزی قطعی:

- *کمینه‌سازی هزینه:* هزینه‌های شبکه توزیع شامل هزینه نصب و بهره‌برداری واحدهای تولید پراکنده، هزینه خرید برق از شبکه بالادست، هزینه ارتقاء ظرفیت خطوط شبکه و هزینه نصب ترانسفورماتورهای جدید در پست‌های شبکه است [۸]:

$$\begin{aligned} OF_1 &= \min Cost = InvDG + OprDG \\ &\quad + InvFeeder + InvSub + PurchGrid \\ InvDG &= \left(\frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n-1}\right)\sum_{k=1}^{N_{CB}}\sum_{i=1}^{N_{TDG}}\frac{1}{(1+d)^{IYDG_{i,k}}}C_{inv,i}^{DG}S_{i,k}^{DG} \\ OprDG &= 8760\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{N_{CB}}\sum_{i=1}^{N_{TDG}}\frac{1}{(1+d)^t}C_{o,i}^{DG}S_{i,k}^{DG}PF_i^{DG}\delta_{i,k,t}^{DG} \\ InvFeeder &= \sum_{f=1}^{N_{FD}}\frac{1}{(1+d)^{IYLine_f}}C_f^{upg}L_f \\ InvSub &= \left(\frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n-1}\right)\sum_{s=1}^{N_{SS}}\sum_{u=1}^{N_U}\frac{1}{(1+d)^{IYT_{s,u}}}C_{s,u}^{T} \\ PurchGrid &= 8760\sum_{t=1}^{T}\sum_{s=1}^{N_{SS}}\frac{1}{(1+d)^t}P_s^{Grid}\mu_s^{Grid} \end{aligned} \quad (۱)$$

- *کمینه‌سازی تلفات:* کاهش تلفات شبکه توزیع برق از طریق نصب و راه‌اندازی بهینه منابع تولید پراکنده هدف دیگر مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های برق است:

$$OF_2 = \min \text{ Loss} = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{TB}}\sum_{j=1}^{N_{TB}}\text{Re}\left\{(\boldsymbol{V}_{i,t}-\boldsymbol{V}_{j,t})\boldsymbol{I}_{ij,t}^{*}\right\} \quad (۲)$$

- *ارتقاء شاخص‌های پدافند غیرعامل:* در این تحقیق برای نشان دادن تأثیر منابع تولید پراکنده در شرایط قطعی شبکه در اثر خطاهای مختلف، از شاخص انرژی تأمین نشده[۶](ENS) استفاده خواهد شد. این شاخص براساس مکان نصب تجهیزات حفاظتی و نیز آرایش منابع تولید پراکنده مقدار انرژی تأمین نشده مشترکین را با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف وقوع خرابی در تجهیزات شبکه، محاسبه می‌کند. درصورتیکه واحدهای تولید پراکنده مجاز به عملکرد جزیره‌ای و مستقل از شبکه باشند، قادرند بخشی از بارهای شبکه را به‌هنگام قطعی‌های برنامه‌ریزی‌شده یا تصادفی تأمین کنند. لذا تابع هدف مربوط به حوزه پدافند غیرعامل به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$OF_3 = \min \ ReliabilityCost = \sum_{t=1}^{T}\sum_{e=1}^{N_{LB}}C_e^{ENS}\times ENS_{e,t} \quad (۳)$$

در این تحقیق از روش تحلیلی ارائه شده در مرجع [۲۱] برای محاسبه مقدار انرژی تأمین نشده استفاده شده است.

ب) قیود مسئله برنامه‌ریزی قطعی:

- *محدودیت ولتاژ مجاز شین‌ها:*

$$V_{\min} \le V_{i,t} \le V_{\max}, \quad \forall i \in N_{TB}, \ t \in T \quad (۴)$$

- *توازن توان در شین‌های شبکه:* : این قید با استفاده از معادلات پخش بار بررسی خواهد شد. در این تحقیق از روش پخش بار نیوتن-رافسون و با استفاده از معادلات زیر توازن تولید و مصرف در شین‌های شبکه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

$$\begin{aligned} &P_{G_{i,t}} - P_{L_{i,t}} - V_{i,t}\sum_{j=1}^{N_{TB}}V_{j,t}\left[G_{ij,t}\cos(\theta_{i,t}-\theta_{j,t})\right. \\ &\left.+B_{ij,t}\sin(\theta_{i,t}-\theta_{j,t})\right] = 0 \quad \forall i \in N_{TB}, \ t \in T \end{aligned} \quad (۵)$$

$$\begin{aligned} &Q_{G_{i,t}} - Q_{L_{i,t}} - V_{i,t}\sum_{j=1}^{N_{TB}}V_{j,t}\left[G_{ij,t}\sin(\theta_{i,t}-\theta_{j,t})\right. \\ &\left.+B_{ij,t}\cos(\theta_{i,t}-\theta_{j,t})\right] = 0 \quad \forall i \in N_{TB}, \ t \in T \end{aligned} \quad (۶)$$

- *محدودیت ظرفیت خطوط انتقال:*

$$I_{l,t} \le I_l^{\max}, \quad \forall l \in N_{FD}, \ t \in T \quad (۷)$$

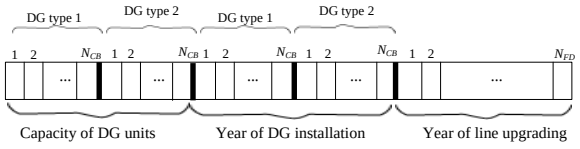
- *محدودیت حداکثر نفوذ منابع تولید پراکنده:* این محدودیت به‌دلیل جلوگیری از شارش معکوس توان به سمت پست فوق توزیع است که ممکن در عملکرد تجهیزات حفاظتی اختلال ایجاد کند [۱۲]:

$$\sum_{k=1}^{N_{CB}}\sum_{i=1}^{N_{TDG}}S_{i,t}^{DG}PF_{i,t}^{DG} \le 0.6\times\sum_{s=1}^{N_{SS}}P_{s,t}^{Grid} + 0.3\times\sum_{j=1}^{N_{LB}}P_{L_{j,t}} \ \forall t \in T \quad (۸)$$

### ۴-۲- مدل‌سازی بار

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018




**شکل (۱): کدگذاری متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله**

در شبکه‌های توزیع واقعی بارهای مصرفی ثابت نبوده بلکه وابسته به ولتاژ هستند. به‌منظور ایجاد یک مدل دقیق و دست‌یابی به نتایج بهتر و البته واقعی‌تر درنظر گرفتن مدل‌های واقعی بار در محاسبات پخش بار امری ضروری است [۷]. عموماً بارهای یک شبکه توزیع به سه نوع خانگی، صنعتی و تجاری تقسیم‌بندی می‌شوند. توان مصرفی هر نقطه بار از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$P_{L_i} = P_{L0_i} \times V_i^{\theta} \quad (۹)$$

$$Q_{L_i} = Q_{L0_i} \times V_i^{\rho} \quad (۱۰)$$

که $P_{L_i}$ و $Q_{L_i}$ توان حقیقی و راکتیو متصل به شین $i$، و $P_{L0_i}$ و $Q_{L0_i}$ توان حقیقی و راکتیو نامی و پیش‌بینی شده متصل به شین $i$، $\theta$ و $\rho$ ضریب تغییر بار حقیقی و بار راکتیو هستند. در این مقاله مقادیر $\theta$ و $\rho$ برای انواع بارها براساس مرجع [۹] انتخاب شده است. در مطالعات برنامه‌ریزی دینامیکی شبکه توزیع، رشد سالیانه بار نیز بایستی در نظر گرفته شود. با در دست داشتن مقدار بار حقیقی و راکتیو پیش‌بینی‌شده برای سال اول شروع دوره برنامه‌ریزی، بار سال‌های مختلف از روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$P_{L_{i,t}} = P_{L0_{i,t}} \times V_i^{\theta} \times (1+\tau)^{t-1} \quad (۱۱)$$

$$Q_{L_{i,t}} = Q_{L0_{i,t}} \times V_i^{\rho} \times (1+\tau)^{t-1} \quad (۱۲)$$

## ۳-۴- کدگذاری متغیر تصمیم مسئله برنامه‌ریزی

برای بهینه‌سازی یک مسئله توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری، اولین نکته تبدیل متغیرهای تصمیم‌گیری[۷] مسئله در قالب کدهای قابل‌استفاده در طول اجرای الگوریتم است. ساختار مربوط به پیکربندی هر یک از ذرات در الگوریتم بهینه‌سازی با فرض وجود دو نوع منبع تولید پراکنده مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. در تعیین محل نصب منابع تولید پراکنده عوامل و پارامترهای متعددِ فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی دخیل هستند [۲۵]. در این تحقیق، فرض براینست که مطالعات لازم صورت گرفته و محل‌های کاندید برای نصب منابع تولید پراکنده در شبکه مشخص شده است. لذا متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله‌ی برنامه‌ریزی شامل تعداد و سال نصب فناوری‌های مختلف منابع تولید پراکنده روی شین‌های کاندید نصب است. هم‌چنین، بهترین زمان برای ارتقاء ظرفیت هر یک از خطوط شبکه متغیر دیگر مسئله بهینه‌سازی است. لذا، ساختار هر ذره از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اول برای تعیین ظرفیت هر یک از انواع منابع تولید پراکنده برای نصب روی هر شین کاندید شبکه استفاده می‌شود. مقادیر این قسمت اعداد صحیح نامنفی می‌باشد که هر عدد نشان‌دهنده مضربی از ظرفیت پایه هر نوع منبع تولید پراکنده است. در این روش عدد صفر به معنای آن است که هیچ منبع تولید پراکنده‌ای از آن نوع در شین موردنظر نصب نخواهد شد. قسمت دوم نیز برای تعیین سال نصب هر یک از منابع تولید پراکنده اختصاص یافته است. مقادیر این قسمت اعداد طبیعی را شامل می‌شود. قسمت سومِ ساختار هر ذره برای تعیین بهترین سال برای ارتقاء ظرفیت هر یک از خطوط شبکه به‌کار گرفته خواهد شد. مقادیر این قسمت اعداد صحیح نامنفی هستند و عدد صفر به معنای این است که خط موردنظر در طول دوره برنامه-ریزی نیاز به ارتقاء ظرفیت نخواهد داشت. پس از مشخص شدن تعداد و سال نصب واحدهای تولید پراکنده روی شین‌های کاندید، برنامه پخش بار اجرا شده و توان تأمین شده از سمت پست فوق توزیع محاسبه شده و نیاز یا عدم‌نیاز به نصب ترانسفورماتور جدید مشخص می‌شود.

## ۴-۴- بهینه‌سازی چندهدفه

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی دنیای مهندسی چند هدفه بوده که در آنها بایستی چندین تابع هدف که با هم در تعارض هستند، بهینه شوند. بهینه‌سازی چندهدفه تفاوت‌های بسیاری با بهینه‌سازی تک هدفه دارد. در بهینه‌سازی تک هدفه، بهترین جواب معمولا همان نقطه اکسترمم مطلق تابع هدف است. درحالیکه در بهینه‌سازی چندهدفه، مشکل اساسی تعارض توابع هدف می‌باشد؛ بطوریکه یک جواب یکتا وجود ندارد که همزمان تمامی اهداف را بهینه کند. به عبارت دیگر، در این گونه مسائل برخلاف مسائل بهینه‌سازی تک هدفه به جای تنها یک جواب، مجموعه‌ای از جواب‌ها حاصل می‌شود. این جواب‌ها را حل-های پارتو[۸] یا جواب‌های نامغلوب[۹] می‌نامند. نکته مهم در مورد این جواب‌ها آن است که هیچ یک بر دیگری برتری ندارند و انتخاب یکی از آن‌ها نیازمند شناخت مسئله و فاکتورهای وابسته به آن بوده و کاملا بستگی به نظر طراح دارد. برای فهم بهتر مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، یک مسئله بهینه‌سازی با دو تابع هدف را در نظر بگیرید [۲۲]:

$$\begin{aligned} &\text{Min}\,(f_1(u), f_2(u)) \\ &\text{Subject to: } g(\boldsymbol{u}) = 0,\ h(\boldsymbol{u}) \le 0 \end{aligned} \quad (۱۳)$$

فرض کنید $\boldsymbol{u}_1$ و $\boldsymbol{u}_2$ دو جواب این مسئله باشند. گوییم $\boldsymbol{u}_1$، $\boldsymbol{u}_2$ را مغلوب ساخته است، اگر و فقط اگر شرایط زیر صادق باشند:

$$\begin{aligned} &\forall j \in \{1,2,3\}, f_j(u_1) \le f_j(u_2) \\ &\exists k \in \{1,2,3\}, f_k(u_1) < f_k(u_2) \end{aligned} \quad (۱۴)$$

اگر $\boldsymbol{u}_1$ بتواند $\boldsymbol{u}_2$ را مغلوب سازد، گوییم $\boldsymbol{u}_1$ یک جواب نامغلوب در مجموعه جواب $\{\boldsymbol{u}_1, \boldsymbol{u}_2\}$است.

## ۵-۴- الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات چندهدفه

در طی چند دهه گذشته طبیعت الهام‌بخش ابداع تعداد نسبتاً زیادی از الگوریتم‌های توانمند و زیبای بهینه‌سازی موسوم به الگوریتم‌های فراابتکاری[۱۰] یا روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر هوش دسته‌جمعی بوده است. از جمله قابلیت‌های این الگوریتم‌ها می‌توان به توانایی جستجوی موثر فضاهای بسیار بزرگ در زمان کم، عدم نیاز به مشتق تابع هدف،

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]

توانایی گریز از نقاط بهینه محلی، هزینه محاسباتی کم و ریاضیات آسان اشاره کرد. الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات یا PSO یکی از قوی‌ترین روش‌های فراابتکاری می‌باشد و تاکنون در حل چندین مسئله پیچیده در سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم با یک گروه از جواب‌های تصادفی (ذره‌ها) شروع به کار می‌کند، سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای مسأله با به روز کردن نسل‌ها به جستجو می پردازد. هر ذره با دو مقدار $X_i$ و $V_i$ که به ترتیب معرف وضعیت مکانی و سرعت مربوط به $i$امین ذره هستند مشخص می‌شود. در مرحله از حرکت ذرات، هر ذره با دو مقدار بهترین به روز می‌شود. اولین مقدار، بهترین جواب از لحاظ شایستگی است که تاکنون برای هر ذره بطور جداگانه بدست آمده است، این مقدار *P_best* نامیده می‌شود. مقدار بهترین دیگری که توسط الگوریتم بدست می‌آید، بهترین مقداری است که تاکنون توسط تمام ذرات در میان جمعیت بدست آمده است. این مقدار بهترین کلی و *G_best* نام دارد. در هر تکرار الگوریتم موقعیت جدید هر یک از ذرات طبق روابط زیر بدست می‌آید:

$$V_i^{k+1} = W \times V_i^k + C_1 \times rand \times (P_best - X_i) + C_2 \times rand \times (G_best - X_i) \quad (۱۵)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1}$$

در این روابط $C_1$، $C_2$ و $W$ جزو پارامترهای الگوریتم هستند که انتخاب درست آنها موجب همگرایی بهتر و سریعتر الگوریتم می‌شود. در این مطالعه مقادیر $C_1=C_2=2$ و مقدار $W$ در هر تکرار از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W = W_{\max} - \frac{W_{\min} - W_{\max}}{itr_{\max}} \times itr \quad (۱۶)$$

که مقادیر $W_{\min} = 0.4$ و $W_{\max} = 0.9$ انتخاب شده‌اند. الگوریتم پس از انجام تعداد معینی از تکرارها خاتمه می‌یابد و نهایتا مقدار *G_best* به عنوان جواب بهینه مساله معرفی می‌گردد. الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات چندهدفه (MOPSO) یکی از اولین روش‌های فراابتکاری چندهدفه محسوب می‌شود. در این تحقیق از روش معرفی شده در مرجع [۲۳] استفاده خواهیم کرد. الگوریتم MOPSO تا حدود زیادی شبیه الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات تک هدفه است. با این تفاوت که در الگوریتم MOPSO از یک حافظه خارجی برای ذخیره‌کردن جواب‌های نامغلوب استفاده می‌شود. در هر تکرار الگوریتم، جواب‌های نامغلوب از بین جواب‌های بدست آمده جدا شده و در یک حافظه خارجی ذخیره خواهند شد. این حافظه مرتبا و پس از پایان هر تکرار، به‌روز خواهد شد. نهایتا پس از خاتمه الگوریتم، جواب‌های ذخیره‌شده در این حافظه به عنوان خروجی مسئله و لیست پارتو و مینای تصمیم‌گیری قرار خواهند گرفت. تفاوت دیگر الگوریتم MOPSOبا الگوریتم تک هدفه در نحوه انتخاب مقادیر *G_best* و *P_best* است. در الگوریتم چند هدفه مقدار *G_best* از بین جواب‌های ذخیره شده در حافظه خارجی انتخاب خواهد شد. برای انتخاب مقدار *P_best* نیز مفهوم غلبه‌سازی به‌کار خواهد رفت. بدین‌صورت که در هر تکرار و به هنگام به‌دست آمدن یک نقطه جدید برای هر ذره، اگر مقدار بدست آمده برای توابع هدف قادر به غلبه بر مقادیر قبلی باشد، مقادیر جدید به عنوان *P_best* جایگزین مقادیر قبلی خواهند شد. درصورتیکه جواب جدید نتواند مقادیر قبلی را مغلوب سازد، مقدار *P_best* تغییر نخواهد کرد. درحالتیکه، هیچ کدام از جواب‌های جدید و قبلی نتوانند همدیگر را مغلوب سازند، بصورت تصادفی یک از جواب‌ها به عنوان *P_best* برای آن ذره درنظر گرفته خواهد شد.

## ۵- بهینه‌سازی در شرایط عدم‌قطعیت

### ۵-۱- برنامه‌ریزی مقید به شانس

به‌دلیل وجود عدم‌قطعیت در تمامی مسائل دنیای واقعی، از ابتدای پیدایش کاربردهای بهینه‌سازی، عدم‌قطعیت همواره به‌عنوان جزء جدایی‌ناپذیر مباحث بهینه‌سازی مطرح بوده است. عدم‌قطعیت در داده‌های یک مسئله بهینه‌سازی می‌تواند در اثر خطای پیش‌بینی، خطای اندازه‌گیری، خطای پیاده‌سازی و یا عوامل دیگری بوجود آید. برنامه‌ریزی مقید به شانس یا CCP یکی از انواع برنامه‌ریزی تصادفی است و خیلی مناسب برای حل مسئله بهینه‌سازی به همراه ضرایب دارای عدم‌قطعیت است [۱۶]. این نوع برنامه‌ریزی کوشش می‌کند که بهینه‌سازی را با قیدهای عدم‌قطعیت تطبیق دهد. قیدها که شامل پارامترهای احتمالاتی هم هستند، در نقطه بهینه به‌دست آمده باید در محدوده خودشان باشند. به‌عنوان نمونه مدل بهینه‌سازی خطی زیر را در نظر بگیرید [۱۶]:

$$\min \quad \boldsymbol{c}^T \boldsymbol{x} \quad (۱۷)$$
$$\text{s.t.} \quad \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} \le \boldsymbol{b}$$
$$\boldsymbol{l} \le \boldsymbol{x} \le \boldsymbol{u}$$

در مدل فوق $n$ متغیر وجود دارد و ماهیت متغیرها ممکن است عدد صحیح، گسسته یا پیوسته باشد. با فرض داشتن $m$ قید، $\mathbf{c}$ برداری $n\times1$، $\mathbf{A}$ ماتریسی با ابعاد $m\times n$ و $\mathbf{b}$ برداری $m\times1$ می‌باشد. اگر فرض کنیم که ضرایب متغیرها در قیود ($a_{ij}$) غیرقطعی باشند، مدل مقید به شانس این مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌شود[ ۱۶] :

$$\min \quad \boldsymbol{c}^T \boldsymbol{x} \quad (۱۸)$$
$$\text{s.t.} \quad \Pr\{\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} \le \boldsymbol{b}\} \ge \alpha$$
$$\boldsymbol{l} \le \boldsymbol{x} \le \boldsymbol{u}$$

اگر ضرایب تابع هدف نیز دچار عدم‌قطعیت باشند، مدل به فرم زیر تبدیل می‌شود [۱۶]:

$$\min \quad \boldsymbol{t} \quad (۱۹)$$
$$\text{s.t.} \quad \Pr\{\boldsymbol{c}^T \boldsymbol{x} \le \boldsymbol{t}\} \ge \beta$$
$$\Pr\{\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} \le \boldsymbol{b}\} \ge \alpha$$
$$\boldsymbol{l} \le \boldsymbol{x} \le \boldsymbol{u}$$

که $\Pr\{.\}$ تعیین‌کننده احتمال رخ دادن پیشامد $\{.\}$، $\alpha$ و $\beta$ سطح‌های اطمینان[۱] مشخص‌شده به ترتیب برای قیدها و تابع هدف هستند.

بهترین راه برای حل مسائل CCP که در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است، روش شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد. برای

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

تشریح این روش مسئله نمونه CCP به‌صورت زیر را در نظر بگیرید [۱۷]:

$$\begin{cases} \min \quad f(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi}) \\ P_r\left\{g_i(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi}) \le 0, j=1,2,...,k\right\} \ge \alpha \end{cases} \quad (۲۰)$$

که در آن $\boldsymbol{x} \in R^n$ بردار متغیر تصمیم است، $\boldsymbol{\xi}$ بردار تصادفی همراه با تابع چگالی احتمالاتی معین $\varphi(\xi)$، $f(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi})$ تابع هدف و $g_i(.)$ تابع قیدهاست. برای سادگی فرض می‌کنیم که پارامترهای غیرقطعی در تابع هدف وجود ندارند. الگوریتم مونت کارلو برای هر متغیر تصمیم‌گیری بمنظور بررسی تخطی قید به شرح زیر است [۲۴]:

۱- $N$، مشخص کردن تعداد شبیه‌سازی مونت‌کارلو
۲- قرار دادن شمارنده $t=0$
۳- قراردادن $N'=0$
۴- تولید بردار تصادفی $\xi_t$ با درنظر گرفتن تابع چگالی $\varphi(\xi)$
۵- محاسبه $g_i(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi})$
۶- اگر $g_i(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi}) \le 0$، $N'=N'+1$
۷- $t=t+1$
۸- اگر $t<N$ ، بازگشت به ۴، در غیر این‌صورت مرحله۹.
۹- اگر $\frac{N'}{N} \ge \alpha$ ، قید $P_r\left\{g_i(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi}) \le 0\right\} \ge \alpha$ برقرار است.

در صورتیکه تابع هدف مسئله نیز دارای پارامترهای غیرقطعی باشد، مسئله به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \min \quad \bar{f} \\ P_r\left\{f(x,\xi) \le \bar{f}\right\} \ge \beta \\ P_r\left\{g_i(x,\xi) \le 0, j=1,2,...,k\right\} \ge \alpha \end{cases} \quad (۲۱)$$

در این حالت روش کار برای محاسبه مقدار تابع هدف برای هر متغیر تصمیم‌گیری بصورت زیر است:

۱- محاسبه $f$ برای هر $\xi_t$ و تولید بردار $\{f_1, f_2, ..., f_N\}$
۲- مرتب کردن مقادیر $f$ از بیش‌ترین به کم‌ترین.
۳- قرار دادن $N'$ برابر با قسمت صحیح $(1-\beta)N$.
۴- انتخاب $N'$امین مقدار به عنوان تابع هدف.

## ۲-۵- مدل CCP مسئله برنامه‌ریزی شبکه توزیع

با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت بار و عدم‌قطعیت تولید منابع تجدیدپذیر، مدل CCP توسعه شبکه توزیع به‌صورت زیر درخواهد آمد:

$$\text{Min } (\overline{OF}_1, \overline{OF}_2, \overline{OF}_3) \quad (۲۲)$$

$$S.t: \ (۵)-(۶)$$

$$P_r\left\{OF_i(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\xi}) \le \overline{OF}_i\right\} \ge \beta \qquad ,i=1,2,3$$

$$P_r\left\{V_{min} \le V_{i,t} \le V_{max}\right\} \ge \alpha \quad i \quad N_{TB}, t \quad T$$

$$P_r\left\{I_{l,t} \le I_l^{max}\right\} \ge \alpha \quad \forall l \in N_{FD}, t \in T$$

$$P_r\left\{\begin{array}{l} \sum_{k=1}^{N_{CB}} \sum_{i=1}^{N_{TDG}} S_{i,t}^{DG} PF_{i,t}^{DG} \\ \le 0.6 \times \sum_{s=1}^{N_{SS}} P_{s,t}^{Grid} + 0.3 \times \sum_{j=1}^{N_{LB}} P_{L_{j,t}} \end{array}\right\} \ge \alpha \quad \forall t \in T$$

مسئله چند هدفه فرمول‌بندی شده شامل دو قید تساوی مربوط به معادلات پخش باراست که بایستی حتما ارضا شوند. چهار قید نامساوی نیز وجود دارد که میزان ارضای آن‌ها از روی مقادیر $\alpha$ و $\beta$ و براساس روشی که در بخش ۵-۱شرح داده شد، مشخص خواهد شد. در این رابطه $\boldsymbol{\xi}$ نشان‌دهنده داده های غیرقطعی مسئله برنامه‌ریزی که شامل مقدار توان خروجی واحدهای تجدیدپذیر و مقدار بار متصل به نقاط بار شبکه توزیع است. $\boldsymbol{x}$ نیز دربردارنده متغیر تصمیم‌گیری مسئله می‌باشد.

## ۳-۵- مدل‌سازی داده‌های غیرقطعی مسئله

*الف) توان خروجی واحدهای بادی:* براساس مطالعات صورت‌گرفته تابع توزیع ویبال[۱۲]تخمین خوبی از سرعت باد است. با این فرض، سرعت باد ($v$) یک متغیرتصادفی با تابع ویبال به‌صورت زیر است [۲۵]:

$$f_w(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (۲۳)$$

که $k$ ضریب شکل[۱۳]و $c$ ضریب پیمایش[۱۴]نامیده می‌شود. زمانی که مقدار $k$=2 باشد، تابع توزیع ریلی[۱۵]به‌دست خواهد آمد. در بسیاری از کاربردها، این تابع توزیع بهترین تخمین از سرعت باد را به دست می‌دهد. توصیف ریاضی این تابع به صورت زیر است [۲۵]:

$$f_r(v) = \left(\frac{2v}{c^2}\right)\exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \quad (۲۴)$$

با فرض معلوم بودن سرعت باد از روی تابع توزیع ریلی و در دست بودن اطلاعات مربوط به پارامترهای توربین، مقدار توان تولیدی یک مولد بادی از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۸]:

$$P_w(v) = \begin{cases} 0 & 0 \le v \le v_{ci} \\ P_{rated} * \dfrac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \le v \le v_r \\ P_{rated} & v_r \le v \le v_{co} \\ 0 & v \ge v_{co} \end{cases} \quad (۲۵)$$

که $v_{ci}$ ، $v_r$ و $v_{co}$ جزو پارامترهای توربین نصب شده در محل هستند. $P$rated توان نامی توربین است.

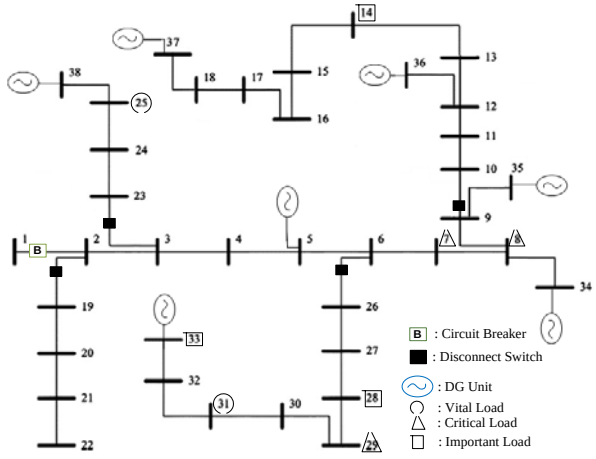
[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]

*ب) عدم‌قطعیت رشد بار:* مقدار رشد بار سالانه شبکه متغیرِ دیگر دارای عدم‌قطعیت مسئله است [۱۷]. فرض براین است که مقدار بار متصل به شین $i$ شبکه در سال $t$ برابر $P_{Li}(t)$ بوده که با در نظر گرفتن مقدار رشد بار $\Delta P_{Li}(t)$ در سال $t+1$ به $P_{Li}(t+1)= P_{Li}(t) + \Delta P_{Li}(t)$ افزایش خواهد یافت. در این مطالعه فرض می‌شود که مقدار $\Delta P_{Li}(t)$ از توزیع نرمال با یک مقدار میانگین و واریانس مشخص پیروی می‌کند.

## ۶- شبیه‌سازی و نتایج عددی

شبکه مورد مطالعه یک شبکه توزیع شعاعی ۳۸ شینه فشار متوسط که بارهای آن ترکیبی از بارهای خانگی، تجاری و صنعتی هستند (شکل ۲) [۹]. در سال شروع برنامه‌ریزی بار کل شبکه ۴/۰۴۵MW و ۲/۵MVAR بوده که با در نظر گرفتن رشد سالیانه ۳٪ به MW ۵/۲۷۸ و MVAR ۳/۲۶۲ در سال آخر برنامه‌ریزی افزایش یافته است. فرض بر این است که این شبکه هوشمند بوده و تمام اقدامات لازم و تجهیزات دیجیتال و پیشرفته‌ای که بتوان توسط آن‌ها به اهداف تعیین‌شده شبکه هوشمند دست یافت، در این شبکه نصب و راه‌اندازی شده است. شین‌های ۵، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷ و ۳۸ به‌عنوان شین کاندید نصب منابع تولید پراکنده در نظر گرفته‌شده‌اند [۱۲]. دو نوع منبع تولید پراکنده برای نصب در این شبکه درنظر گرفته شده است. نوع اول مربوط به منابع تولید پراکنده‌ی متداول نظیر توربین‌های گازی، دیزلی، میکروتوربین‌ها و سلول‌های سوختی می‌باشد. توربین بادی بعنوان منبع تولید پراکنده نوع دوم، برای نصب در این شبکه درنظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به این منابع در جدول ۲ آمده است [۲۶]. سایر پارامترهای مربوط به شبکه نیز در جدول ۳ آمده است. برای این شبکه نرخ خرابی خطوط ۰/۱۲ f/km در نظر گرفته شده است. بقیه تجهیزات شبکه توزیع ۱۰۰٪ قابل‌اطمینان فرض می‌شوند. مدت زمان لازم برای مکان‌یابی خطا و عملکرد ادوات کلیدزنی نیز ۳ ساعت است. ظرفیت ترانسفورماتور پست این شبکه ۵ مگاولت-آمپر با ضریب توان کاری ۰/۸۵می‌باشد. برای افزایش ظرفیت پست دو ترانسفورماتور سه فاز با ظرفیت ۲ مگاولت‌آمپر هر کدام با هزینه ۰/۰۵ میلیون دلار می‌توان نصب کرد.

از دیدگاه پدافند غیرعامل دارایی‌های کشور در حوزه‌ها و بخش‌های مختلف در سه دسته حیاتی، حساس و مهم قابل تقسیم بندی است. در همین راستا، معیارها و شاخص‌هایی برای سطح‌بندی تجهیزات در حوزه انرژی نیز وجود دارد. این معیارها براساس شاخص‌های مختلفی از جمله عوامل اجتماعی، اقتصادی، منطقه‌ای و نظامی انتخاب می‌شوند. معیارهای مختلفی برای سطح‌بندی بارهای متصل به شبکه توزیع می‌توان در نظر گرفت. یک روش ارزیابی برای اینکار در مرجع [۲۷] معرفی شده است. در اینجا فرض می‌شود که قبلا مطالعات در حوزه پدافند غیرعامل روی این شبکه انجام گرفته، بارهای شبکه مورد مطالعه از دیدگاه پدافند غیرعامل مشخص شده و به چهار گروه بارهای حیاتی ، بارهای حساس، بارهای مهم و بارهای بی‌ارزش تقسیم‌بندی




**شکل(۲): شبکه ۳۸ شینه مورد مطالعه**

**جدول (۲): مشخصات منابع تولید پراکنده مورد استفاده**

| نوع منبع | اندازه واحد (kW) | بیشترین ظرفیت (kW) | *p.f* | هزینه نصب ($/kVA) | هزینه بهره‌برداری ($/kWh) |
|---|---|---|---|---|---|
| مرسوم | ۱۰۰۰ | ۲۰۰۰ | ۰/۹ | ۵۰۰ | ۰/۰۴۵ |
| بادی | ۱۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۱ | ۴۵۰۰ | ۰/۰۱۰ |

**جدول (۳): پارامترهای فنی و اقتصادی شبکه مورد مطالعه**

| پارامتر | مقدار |
|---|---|
| طول عمر پروژه | ۳۰ سال |
| طول دوره برنامه‌ریزی | ۱۰ سال |
| نرخ بهره | ۱۲٪/۵ |
| انحراف ولتاژ مجاز شین‌ها | ۵٪ |
| هزینه ارتقای خط | ۰/۱۵ (M$/km) |
| قیمت خرید برق از شبکه | ۷۰ ($/MWh) |

شده‌اند. برای اینکه اولویت کاهش میزان خاموشی این بارها در نظر گرفته شود، هزینه انرژی تأمین نشده برای این چهار نوع بار به ترتیب برابر با ۰ $/kWh، ۵۰۰ $/kWh، ۲۵۰۰ $/kWh و ۱۰۰۰۰ $/kWh انتخاب می‌شود. یعنی ارزش بارهای حیاتی را ۴ برابر بارهای حساس و ۲۰ برابر بارهای مهم در نظر می‌گیریم. برای این شبکه شین‌های شماره ۲۵ و ۳۱ به‌عنوان بار حیاتی، شین‌های شماره ۷، ۸ و ۲۹ به‌عنوان بار حساس و شین‌های شماره ۱۴، ۲۸ و ۳۳ به‌عنوان بار مهم در نظر گرفته می‌شوند. بقیه شین‌های شبکه از نظر ملاحظات پدافند غیرعامل ارزشی ندارند [۲۷].

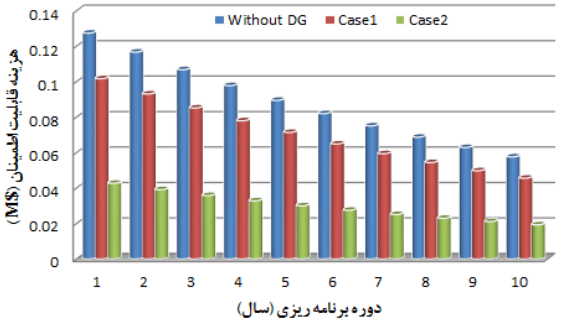
### ۱-۶- برنامه‌ریزی قطعی تک‌هدفه

در این بخش مدل برنامه‌ریزی فرمول‌بندی شده را بدون درنظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه مورد مطالعه با درنظر گرفتن هر یک از توابع هدف به‌صورت جداگانه مورد استفاده قرار خواهیم داد. نتایج حاصل از اعمال الگوریتم بهینه‌سازی ذرات تک‌هدفه در جدول ۴ آمده است. در حالت برنامه‌ریزی با تابع هدف هزینه،

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

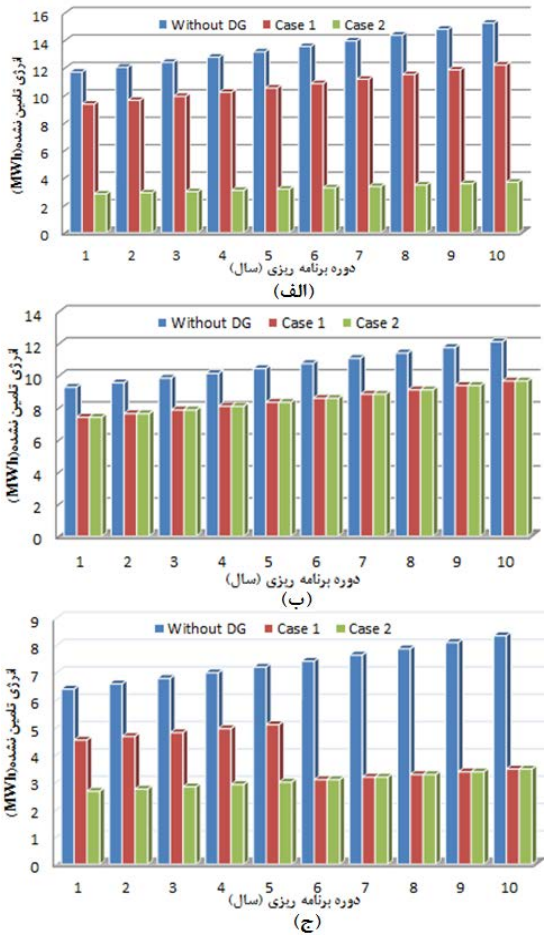
**جدول (۵): برنامه‌ریزی قطعی شبکه بدون درنظرگفتن محدودیت نفوذ منابع تولید پراکنده**

| شین‌های کاندید نصب DG | بدون DG | ظرفیت منابع تولید پراکنده MW (سال نصب) | |
|---|---|---|---|
| | | منابع مرسوم | توربین بادی |
| ۵ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۳۳ | ۰ | ۰ | ۲ (۱) |
| ۳۴ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۳۵ | ۰ | ۴ (۱۰) | ۰ |
| ۳۶ | ۰ | ۰ | ۱/۳ (۱) |
| ۳۷ | ۰ | ۰ | ۰/۲ (۱) |
| ۳۸ | ۰ | ۰ | ۲ (۱) |
| هزینه انرژی تامین‌نشده ($M) | ۰/۸۸۴۵ | ۰/۲۹۶۳ | |
| درصد کاهش | - | ۶۶/.۵ | |




**شکل (۳): هزینه قابلیت‌اطمینان شبکه در حالت‌های مختلف**

ظرفیت منابع تولید پراکنده مرسوم بیشتر از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر انتخاب شده است. دلیل این امر هزینه نصب کمتر این منابع در مقایسه با منابع تجدیدپذیر است. در این حالتِ برنامه‌ریزی ۱۷ خط شبکه در طول دوره برنامه‌ریزی، توسط الگوریتم بهینه‌سازی برای ارتقا ظرفیت انتخاب شده‌اند و هزینه ارتقا ظرفیت خطوط ۳/۵۰۳۵ میلیون دلار است. درحالیکه در حالت برنامه‌ریزی بدون درنظرگرفتن منابع تولید پراکنده ۲۱ خط شبکه نیازمند ارتقا ظرفیت بوده و در مجموع ۸/۵۲۳۲ میلیون دلار برای اینکار باید اختصاص داده شود. در حالت برنامه‌ریزی بدون حضور منابع تولید پراکنده، با توجه به رشد بار مصرفی شبکه نیاز به نصب یک ترانسفورماتور جدید در سال نهم دوره برنامه‌ریزی است، ولی در حالت برنامه‌ریزی در حضور این منابع، این نیاز برطرف گردیده است. نهایتا، برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده موجب کاهش حدود ۵۶ درصدی هزینه-های کل شبکه گردیده است. در حالت برنامه‌ریزی با تابع هدف تلفات، حضور منابع تولید پراکنده کاهش ۷۰ درصدی تلفات شبکه توزیع را به‌دنبال داشته است. هم‌چنین در این حالت میزان نفوذ منابع تجدیدپذیر نسبت به حالت قبل افزایش داشته است، چراکه در این حالت هزینه مطرح نبوده و منابع تجدیدپذیر نیز می‌توانند همانند منابع مرسوم در کاهش میزان تلفات شبکه مشارکت نمایند. همچنین بهبود قابل قبول و چشم‌گیری در مورد شاخص انرژی تامین نشده



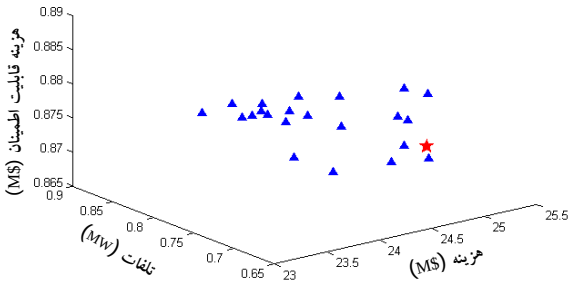

**شکل(۴): انرژی تأمین نشده بارهای (الف) حیاتی، (ب) حساس، (ج) مهم در حالت‌های مختلف برنامه ریزی**

حاصل نشده است. این به این دلیل است که هزینه انرژی تامین نشده در این حالت تابع هدف مسئله نبوده و الگوریتم هیچ توجهی به مقدار این شاخص ندارد. برای حالت برنامه‌ریزی با درنظر گرفتن شاخص پدافند غیرعامل، حضور منابع تولید پراکنده باعث بهبود ۲۰ درصدی شاخص پدافند غیرعامل در شبکه مورد مطالعه گردیده است.

به‌منظور بررسی بیشتر و دقیق‌تر تاثیر حضور منابع تولید پراکنده روی شاخص پدافند غیرعامل، این مسئله بهینه‌سازی بدون درنظر گرفتن قید مربوط به حداکثر نفوذ منابع تولید پراکنده (رابطه (۸)) نیز حل شده است. در واقع این حالت نشان‌دهنده حالتی است که منابع تولید پراکنده در حالت عملکرد عادی به شبکه متصل نبوده و در حالت خرابی و قطع انرژی از سمت پست شبکه توزیع برای تأمین بار مشترکین به شبکه متصل می‌شوند. یعنی‌اینکه که در این حالت به دنبال استفاده از مزیت منابع تولید پراکنده در تأمین بار مشترکین در حالت‌های قطعی و خطا بوده و از سایر مزایای این واحدها نظیر کاهش هزینه‌ها، کاهش تلفات و یا بهبود پروفیل ولتاژ صرف نظر شده است. نتایج حاصل از حل این مسئله در این حالت در جدول ۵ آمده است. همانطور که از این جدول مشاهده می‌شود، در این حالت منابع تولید پراکنده با ظرفیت بیش‌تری در شبکه نصب می‌شوند و کاهش بیشتر و قابل ملاحظه‌تری در میزان هزینه انرژی تامین نشده نسبت به حالت




[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]




**شکل (۵): جواب‌های پارتو مسئله بهینه‌سازی قطعی چندهدفه**

قبل اتفاق می‌افتد. در شکل ۳ هزینه قابلیت‌اطمینان شبکه در سه حالت مختلف (بدون منابع تولید پراکنده، در حضور منابع تولید پراکنده و در حضور منابع تولید پراکنده بدون درنظر گرفتن محدویت نفوذ) در سال‌های مختلف دوره برنامه‌ریزی مورد مقایسه قرارگرفته شده است. همانطورکه از این شکل برمی‌آید حضور منابع تولید پراکنده تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای روی قابلیت‌اطمینان شبکه توزیع دارد. در واقع قابلیت‌اطمینان شبکه توزیع با درنظر گرفتن منابع تولید پراکنده بهبود می‌یابد. در حالتی که قید مربوط به نفوذ منابع تولید پراکنده در نظر گرفته نشود، یعنی حالت دوم، ظرفیت منابع تولید پراکنده در شبکه بیشتر شده و درنتیجه کاهش بیشتری روی هزینه قابلیت‌اطمینان رخ داده و افزایش در میزان قابلیت‌اطمینان شبکه بیشتر است. در واقع می‌توان گفت که در این حالت میزان مشارکت منابع تولید پراکنده در تأمین انرژی بارهای حیاتی، حساس و مهم بیش‌تر شده و کاهش بیش‌تری در مدت زمان خاموشی این بارها حاصل می‌شود.

در شکل ۴ مقدار انرژی تأمین نشده برای بارهای حیاتی، حساس و مهم شبکه در طول سال‌های برنامه‌ریزی در سه حالت مختلف نشان داده شده است. با مشاهده این شکل‌ها می‌توان دریافت که بیش‌ترین تأثیر حضور منابع تولید پراکنده روی مقدار انرژی تأمین نشده بارهای حیاتی شبکه است، چرا که ارزش این بارها خیلی بیشتر از سایر بارها در پروسه برنامه‌ریزی لحاظ شده است.

## ۲-۶- برنامه‌ریزی قطعی چندهدفه

در این بخش مدل برنامه‌ریزیِ چندهدفه فرمول‌بندی شده برای برنامه‌ریزی توسعه منابع تولید پراکنده را مورد استفاده قرار خواهیم داد. در شکل ۵ مجموعه جواب‌های بدست آمده از حل مسئله بهینه-سازی چندهدفه نشان داده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی ۲۳ جواب به عنوان جواب‌های بهینه مسئله ارائه داده است. پس از بدست آمدن لیست پارتو، مهم‌ترین مسئله انتخاب یک جواب به‌عنوان جواب مسئله بهینه‌سازی می‌باشد. یکی از روش‌هایی که معمولا برای انتخاب یک جواب از بین مجموعه جواب‌های پارتو به‌کار می‌رود، روش تصمیم-گیری فازی[۴]است . در این روش برای اینکه بتوان توابع هدف مختلف که ممکن است هم‌جنس نبوده و محدوده‌های متفاوتی داشته باشند، را با هم مقایسه کرد، مقادیر به‌دست آمده برای توابع هدف به عددی بین صفر و یک نگاشته می‌شود. بدین ترتیب که یک مقدار به‌نام تابع عضویت برای هر جواب موجود در لیست پارتو به ازای هر تابع هدف به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\mu_{i\ i=1,2,3}^{k}=\begin{cases}1 & \text{if} \quad f_i < f_i^{\min}\\ \dfrac{f_i^{\max}-f_i}{f_i^{\max}-f_i^{\min}} & \text{if} \quad f_i^{\min}<f_i<f_i^{\max}\\ 0 & \text{if} \quad f_i > f_i^{\max}\end{cases} \qquad (۲۶)$$

که $\mu_i^k$ مقدار تابع عضویت به ازای تابع هدف $i$ام برای جواب شماره $k$ می‌باشد، $f_i^{\max}$ و $f_i^{\min}$ به ترتیب حد بالا و حد پایین برای تابع هدف $i$ام هستند. سپس با استفاده از این مقادیر محاسبه شده، برای هر یک از جواب‌های بدست آمده یک مقدار نرمالیزه شده به-صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\mu^k=\frac{\sum_{j=1}^{3} w_j \mu_j^k}{\sum_{k=1}^{p}\sum_{j=1}^{3} w_j \mu_j^k} \qquad (۲۷)$$

در این رابطه $w_j$ ضریب وزنی اختصاص داده شده به تابع هدف $i$ام در مسئله بهینه‌سازی بوده و $p$ تعداد جواب‌های بدست آمده از حل الگوریتم است. مقدار ضریب وزنی توسط طراح مسئله و بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی تعیین می‌شود. پس از محاسبه این مقدار برای همه جواب‌ها، جوابی که دارای بیش‌ترین مقدار است به‌عنوان جواب بهینه برای مسئله انتخاب خواهد شد. در جدول ۴ جواب بهینه بدست آمده برای مسئله چندهدفه بهینه‌سازی منابع تولید پراکنده با به‌کارگیری این روش نشان داده شده است. هم‌چنین این جواب در شکل ۵ با رنگ قرمز مشخص شده است.

## ۳-۶- برنامه‌ریزی تک‌هدفه با داده‌های غیرقطعی

در این بخش مدل برنامه‌ریزی تک‌هدفه فرمول‌بندی شده برای برنامه‌ریزی توسعه منابع تولید پراکنده را با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت-ها مورد استفاده قرار خواهیم داد. فرض بر این است که الگوی سرعت باد در همه شین‌های کاندید نصب توربین بادی به یک شکل بوده و مقدار پارامتر ضریب پیمایش برای تابع توزیع ریلی نیز c=۶/۵ در نظر گرفته شده است. پارامترهای مربوط به توربین بادی برای نصب در این شبکه بدین صورت است [۱۷]: $v_{ci}$= ۴ m/s ،$v_{co}$= ۲۰ m/s و ۱۵ m/s =$v_r$. تعداد آزمایشات لازم در فرآیند شبیه‌سازی مونت کارلو نیز ۱۰۰۰ انتخاب شده است. همچنین مقدار سطوح اطمینان برای ارضا شدن قیدها و توابع هدف نیز به‌صورت $\alpha$ = ۰/۹ و $\beta$ = ۰/۹ تعیین گردیده است. در جدول ۶ نتایج حاصل از اعمال روش برنامه‌ریزی مقید به شانس برای کمینه‌سازی هزینه‌های شبکه نشان داده شده است. با توجه به نتایج این جدول می‌توان گفت که میزان نفوذ توربین‌های بادی در مقایسه با حالت برنامه‌ریزی بدون درنظرگرفتن عدم‌قطعیتِ سرعت باد افزایش یافته است. دلیل این امر آنست که در اثر نوسان سرعت باد و در نتیجه تغییر در مقدار توان تولیدی توربین‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی ظرفیت زیادی را برای نصب در شبکه انتخاب کرده تا این

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

**جدول (۶): نتایج برنامه‌ریزی غیرقطعی شبکه توزیع مورد مطالعه در حالت‌های مختلف**

| | | بدون DG | ظرفیت منابع تولید پراکنده MW (سال نصب) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | کمینه‌سازی هزینه | | کمینه‌سازی تلفات | | ارتقاء شاخص پدافند غیرعامل | | چندهدفه | |
| | | | منابع مرسوم | توربین بادی | منابع مرسوم | توربین بادی | منابع مرسوم | توربین بادی | منابع مرسوم | توربین بادی |
| شین‌های کاندید نصب منابع تولید پراکنده | ۵ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | (۱۰) ۰/۲ |
| | ۳۳ | ۰ | (۱) ۰/۸ | ۰ | (۱) ۰/۹ | ۰ | (۱) ۱/۴ | ۰ | (۱) ۰/۸ | (۱۰) ۰/۱ |
| | ۳۴ | ۰ | ۰ | (۳) ۰/۴ | (۱) ۰/۳ | (۸) ۰/۱ | ۰ | ۰ | (۳) ۰/۴ | ۰ |
| | ۳۵ | ۰ | ۰ | ۰ | (۱) ۰/۳ | ۰ | ۰ | ۰ | (۴) ۰/۲ | ۰ |
| | ۳۶ | ۰ | (۱) ۰/۸ | ۰ | (۱) ۰/۴ | ۰ | (۶) ۰/۶ | ۰ | (۱) ۰/۴ | ۰ |
| | ۳۷ | ۰ | (۱) ۰/۲ | ۰ | (۱) ۰/۲ | (۶) ۰/۳ | (۱) ۰/۴ | ۰ | (۱) ۰/۴ | (۵) ۰/۱ |
| | ۳۸ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | (۱۰) ۰/۱ |
| هزینه‌های شبکه ($M) | بهره‌برداری DG | ۰ | ۳/۱۴۲۸ | ۰/۱۳۵۲ | ۴/۱۲۴۹ | ۰/۰۶۱۱ | ۳/۹۲۸۳ | ۰/۰۶۹۳ | ۳/۹۱۴۰ | ۰/۰۳۲۹ |
| | نصب DG | ۰ | ۱/۱۹۹۹ | ۰/۵۲۸۷ | ۰/۱۲۰۲ | ۰/۱۰۸۳ | ۰/۱۱۴۴ | ۰/۱۱۴۳ | ۰/۱۱۷۷ | ۰/۱۰۳۵ |
| | خرید برق | ۲۷/۹۸۰۹ | ۸/۸۵۶۴ | | ۸/۴۶۰۳ | | ۸/۷۰۳۳ | | ۸/۹۸۷۱ | |
| | ارتقاء خطوط | ۸/۵۲۳۲ | ۵/۴۰۸۲ | | ۱۳/۱۷۵۵ | | ۸/۳۲۴۴ | | ۱۲/۱۵۴۱ | |
| | نصب ترانس | ۰/۰۰۲۲۳ | ۰ | | ۰ | | ۰ | | ۰ | |
| مجموع هزینه‌ها | | ۳۶/۵۰۶۳ | **۱۹/۲۷۱۴** | | ۲۶/۰۵۰۲ | | ۲۱/۲۵۴۳ | | **۲۵/۳۰۹۳** | |
| درصد کاهش | | – | **۴۷٪/۲۱۰۷** | | ۲۸٪/۶۴۱۶ | | ۴۱٪/۷۷۹۹ | | **۳۰٪/۶۷۱۴** | |
| تلفات (MW) | | ۲/۵۲۸۶ | ۰/۸۱۷۳ | | **۰/۶۸۳۰** | | ۰/۸۱۵۶ | | **۰/۷۱۴۵** | |
| درصد کاهش | | – | ۶۷٪/۶۸ | | **۷۲٪/۹۸۹۰** | | ۶۷٪/۷۴ | | **۷۱٪/۷۴۳** | |
| هزینه انرژی تامین نشده ($M) | | ۰/۸۸۴۵ | ۰/۸۷۹۵ | | ۰/۸۸۳۹ | | **۰/۷۰۳۵** | | **۰/۸۸۳۱** | |
| درصد کاهش | | – | ۰٪/۵۶۵۲ | | ۰٪/۰۶۷۸ | | **۲۰٪/۴۶۳** | | **۰٪/۱۵۸۲** | |

تغییرات جبران شوند. هم چنین در این حالت، مقدار تابع هدف نسبت به حالت برنامه‌ریزی بدون عدم‌قطعیت‌ها افزایش یافته است. از جدول ۶ ملاحضه می‌شود که مقدار تلفات شبکه در مقایسه با حالت برنامه-ریزی با داده‌های قطعی کاهش بیشتری داشته است. در حالت برنامه-ریزی با تابع هدف شاخص پدافند غیرعامل علی‌رغم تغییر در مکان و ظرفیت منابع تولید پراکنده، هزینه‌های شبکه و مقدار تلفات نسبت به حالت برنامه‌ریزی با داده‌های قطعی، مقدار هزینه انرژی تامین نشده تغییری نکرده است. در این حالت میزان مشارکت منابع تولید پراکنده مرسوم بیشتر از منابع تجدیدپذیر است. این امر به دلیل ماهیت تصادفی و عدم‌قطعیت موجود در میزان تولید منابع تجدیدپذیر می-باشد. در جدول ۷ تاثیر مقادیر مختلف پارامتر $\alpha$ روی نتایج بدست آمده است. با افزایش مقدار $\alpha$ تابع هدف افزایش یافته و نیز میزان نفوذ توربین‌های بادی نیز بیشتر می‌شود. در واقع با افزایش مقدار $\alpha$ شدت سختگیری مسئله برای ارضا شدن قیود بیشتر شده و لذا توان بیشتری از توربین‌های بادی وارد شبکه می‌شوند تا میزان نوسانات و تغییرات کنترل شود. جدول ۸ نیز تاثیر پارامتر $\beta$ روی نتایج را نشان می‌دهد.

**جدول (۷): کمینه‌سازی هزینه‌ها برای مقادیر مختلف $\alpha$ ($\beta$=0.9)**

| $\alpha$ | مجموع هزینه‌ها ($M) | مجموع توان توربین‌های بادی (MW) |
|---|---|---|
| ۰/۸ | ۱۸/۸۷۶۶ | ۰/۴ |
| ۰/۹ | ۱۹/۲۷۱۴ | ۰/۴ |
| ۰/۹۵ | ۱۹/۹۹۴۰ | ۰/۵ |
| ۱ | ۲۰/۵۲۲۸ | ۱ |

**جدول (۸): کمینه‌سازی هزینه‌ها برای مقادیر مختلف $\beta$ ($\alpha$=0.9)**

| $\beta$ | مجموع هزینه‌ها ($M) | مجموع توان توربین‌های بادی (MW) |
|---|---|---|
| ۰/۸ | ۱۷/۷۶۱۳ | ۰/۵ |
| ۰/۹ | ۱۹/۲۷۱۴ | ۰/۴ |
| ۰/۹۵ | ۲۰/۲۶۹۵ | ۱ |
| ۱ | ۲۲/۱۹۱۵ | ۱ |

## ۴-۶- برنامه‌ریزی غیرقطعی چندهدفه

در این بخش مدل برنامه‌ریزیِ چندهدفه فرمول‌بندی شده برای برنامه‌ریزی توسعه منابع تولید پراکنده را برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع مورد مطالعه با درنظر گرفتن هر سه تابع هدف و با درنظرگرفتن داده‌های غیرقطعی مورد استفاده قرار خواهیم داد. در شکل ۶ مجموعه جواب‌های بدست آمده از حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه غیرقطعی نشان داده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی ۴۰ جواب به عنوان جواب‌های بهینه مسئله ارائه داده است. در جدول ۶ نیز جواب بهینه بدست آمده برای مسئله چندهدفه غیرقطعی نشان داده شده است.

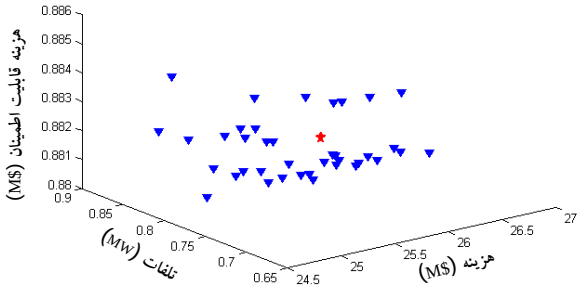
## ۷- نتیجه‌گیری

شبکه‌های هوشمند انرژی ایده جدیدی است که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه مهندسین و محققین صنعت برق قرار گرفته است،



[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.1 Spring 2018




**شکل (۶): جواب‌های پارتو مسئله غیرقطعی چندهدفه**

می‌تواند با هدف ارتقا شاخص‌های پدافند غیرعامل اجرا گردیده و ضریب امنیت شبکه‌های برق را افزایش دهد. توانایی به‌کارگیری انواع منابع تولید پراکنده و ذخیره‌ای یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های عملکردی این نوع شبکه‌ها است. نصب و راه‌اندازی منابع تولید پراکنده در نزدیکی مراکز حیاتی، حساس و مهم نظامی و غیرنظامی و استفاده از شبکه‌های زیرزمینی توزیع برق از جمله اقداماتی است که می‌توان برای ارتقاء شاخص مهم پراکندگی پدافند غیرعامل انجام داد.

در این مقاله مدلی جدید برای برنامه‌ریزی توسعه منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع برق هوشمند در یک افق ده ساله با درنظر گرفتن ملاحظات پدافند غیرعامل ارائه شد. در مدل پیشنهادی منابع تولید پراکنده به‌عنوان پشتیبان برای تأمین انرژیِ مراکز حیاتی، حساس و مهم نظامی و غیرنظامی کشور در شرایط وقوع بحران مطرح شدند. مدل برنامه‌ریزی به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مطرح شد. برای نشان دادن تأثیر منابع تولید پراکنده در شرایط قطعی شبکه در اثر خطاهای مختلف، از شاخص انرژی تأمین نشده (ENS) که در مطالعات قابلیت‌اطمینان شبکه‌های قدرت بکار می‌رود، استفاده شد. درکنار بهینه‌سازی و ارتقاء شاخص پدافند غیرعامل، کمینه‌سازی هزینه‌ها و کاهش تلفات به‌عنوان اهداف دیگر مسئله بهینه‌سازی درنظر گرفته شدند. از الگوریتم بهینه‌سازی تراکم ذرات چندهدفه که توانایی بهینه‌سازی چند تابع هدف به‌صورت همزمان را دارد، برای حل مدل برنامه‌ریزی استفاده گردید. متغیرهای مسئله شامل مکان و ظرفیت نصب منابع تولید پراکنده می‌باشند. متغیر دیگر مسئله بهترین زمان نصب این منابع در شبکه است. ظرفیت این واحدها بایستی به‌گونه‌ای تعیین شود که در صورت بروز هرگونه خرابی در سیستم تولید، سیستم انتقال و یا پست فوق توزیع و در نتیجه قطع انرژی، بار مراکز حیاتی، حساس و مهم تامین شوند. هم‌چنین، ارتقاء ظرفیت خطوط شبکه و بهترین زمان برای اینکار به‌عنوان گزینه دیگر توسعه شبکه و جزء متغیرهای مسئله درنظر گرفته شده است. برای دستیابی به جواب‌های بهینه و به‌منظور در نظر گرفتن شرایط واقعی حاکم بر شبکه‌های توزیع برق، عدم‌قطعیت موجود در میزان تولید این منابع و نیز عدم‌قطعیت بار مصرفی شبکه در مدل برنامه‌ریزی با استفاده از روش CCP لحاظ شد.

مدل پیشنهادی برای برنامه‌ریزی یک شبکه توزیع هوشمند ۳۸ شینه مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفت. مشاهده گردید که پس از نصب منابع تولید پراکنده میزان انرژی تأمین نشده بارهای حیاتی، حساس و مهم کاهش یافته و شاخص‌های قابلیت‌اطمینان شبکه افزایش چشمگیری نسبت به حالت قبل از نصب این منابع دارد. در واقع نتایج حاصل نشان‌دهنده تأثیر حضور این منابع و کاهش مدت‌زمان خاموشی و در نتیجه به‌حداقل رساندن آسیب وارده به این مراکز است. هم‌چنین نتایج شبیه‌سازی حاکی از تاثیر قابل ملاحضه حضور منابع تولید پراکنده روی هزینه‌ها و تلفات شبکه توزیع است.

## مراجع


[1] R. Gaffarpour, Y. Hashemi, and M. Ehsan, "Involving Defensive Approach in Unit Commitment Scheduling and Presenting Probability Model of Plants Inaccessibility," Advanced Defence Sci. & Tech., vol. 5, pp. 231-246, 2015.

[2] H. Alami, "Effect of Demand Response Programs on Power System Security in Emergencies Considering Passive Defense Criteria," Passive Defence Quarterly, vol. 5, pp. 63-74, 2014.

[3] H. A. Aalami and H. Ramezani, "Presentation of a New Algorithm for the Operation of DG Resources in Electrical Interconnection Grids over the Critical Conditions," Passive Defence Sci. & Tech. , vol. 3, pp. 231-241, 2012.

[4] X. Fang, S. Misra, G. Xue, and D. Yang, "Smart Grid – The New and Improved Power Grid: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, pp. 944 - 980, 2012.

[5] H. Falaghi, C. Singh, M.-R. Haghifam, and M. Ramezani, "DG integrated multistage distribution system expansion planning," Int. J. Elect. Power Energy Syst. , vol. 33 pp. 1489-1497, 2011.

[6] W. El-Khattam, Y. G .Hegazy, and M. M. A. Salama, "An Integrated Distributed Generation Optimization Model for Distribution System Planning," IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, pp. 1158-1165, May 2005.

[7] R. Ebrahimi, M. Ehsan, and H. Nouri, "A profit-centric strategy for distributed generation planning considering time varying voltage dependent load demand," Int. J. Elect. Power Energy Syst. , vol. 44 pp. 168-178, 2013.

[8] E. Naderi, H. Seifi, and M. S. Sepasian, "A Dynamic Approach for Distribution System Planning Considering Distributed Generation," IEEE Trans. Power Del., vol. 27, pp. 1313-1322, Jul 2012.

[۹] مهدی پرویزی مساعد، فرید فرمانی، امجد انوری مقدم، اشکان رحیمی کیان، حسن منصف "جایابی و تعیین اندازه بهینه و چندهدفه مولدهای انرژی تجدیدپذیر در یک شبکه توزیع با در نظرگرفتن مدل بار"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۲، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۴.

[۱۰] بهنام نامور بهرغانی، محمد آقا شفیعی، معین ابوالقاسمی، محمد مرادی دالوند، محمد احمدیان "تعیین اندازه بهینه منابع تولید پراکنده ریزشبکه مستقل از شبکه جهت تامین بارهای الکتریکی و حرارتی با درنظر گرفتن تاثیر هزینه های سرمایه گذاری، بهره برداری و زیست محیطی، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۲، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۴.


[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol15 No.1 Spring2018

Transactions on Power Systems, vol. 25, pp. 360-370, 2010.

[26] V. Vahidinasab, "Optimal distributed energy resources planning in a competitive electricity market: Multiobjective optimization and probabilistic design," Renew. Energy vol. 66, pp.354-363, 2014.

[27] B. Jeddi, R. Ghaffarpour, and R. Dashti, "Distributed Generation Resources Planning in Electrical Distribution Networks Based on Passive Defense Considerations," Passive Defence Quarterly, vol. 6, pp. 45-56, 2015.

## زیرنویس‌ها

[1] Static approach
[2] Dynamic approach
[3] Meta-Heuristic
[4] Chance Constrained Programming
[5] Multi-objective particle swarm optimization
[6] Energy not supplied
[7] Decision variables
[8] Pareto solutions
[9] Non-dominated
[10] Meta-heuristic
[11] Confidence level
[12] Weibull
[13] Shape index
[14] Scale index
[15] Rayleigh
[16] fuzzy decision making

[11] N. Khalesi, N. Rezaei, and M. R. Haghifam, "DG allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement," Int. J. Elect. Power Energy Syst. , vol. 33, pp. 288–295, 2011.

[12] M. F. Shaaban, Y. M. Atwa, and E. F. El-Saadany, "DG Allocation for Benefit Maximization in Distribution Networks," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, pp. 639 - 649, May 2013.

[13] N. Khalesi, N. Rezaei, and M.-R. Haghifam, "DG allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement," Electrical Power and Energy Systems vol. 33, pp. 288–295, 2011.

[۱۴] سعید سلیمانی، شهرام جدید "بهره برداری بهینه شبکه توزیع هوشمند در حضور منابع تولید پراکنده"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۳، شماره ۳، بهار و تابستان ۱۳۹۵.

[15] Z. Moravej and A. Akhlaghi, "A novel approach based on cuckoo search for DG allocation in distribution network," Int. J. Elect. Power Energy Syst. , vol. 44 pp. 672-679, 2013.

[16] B. Liu, Theory and Practice of Uncertain Programming, Third ed.: http://orsc.edu.cn/liu/up.pdf.

[17] Z. Liu, F. Wen, and G. Ledwich, "Optimal Siting and Sizing of Distributed Generators in Distribution Systems Considering Uncertainties," IEEE Trans. Power Del., vol. 26, pp. 2541-2551, 2011.

[18] V. A. Evangelopoulos and P. S. Georgilakis, "Optimal distributed generation placement under uncertainties based on point estimate method embedded genetic algorithm," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 8, pp. 389-400, 2014.

[19] M. S. Gazizadeh, "Some useful points on implementation of samrt grids in Iran," Journal of NAB, Abbaspour College of Technology, vol. 18, 2013.

[20] G. Siam and R. Mohhammadi, "Passive Defense Improvement Considerations in Planning and Management of Strategic Urban Facilities Using Smart Generation, Transmission and Distribution of Power Electricity," presented at the 6th Congress Association Geopolitics of Iran, Mashhad, 2013.

[21] I.-S. Bae and J.-O. Kim, "Reliability Evaluation of Distributed Generation Based on Operation Mode," IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, pp. 785-790, May 2007.

[22] V. Vahidinasab and S. Jadid, "Joint economic and emission dispatch in energy markets: A multiobjective mathematical programming approach," Energy, vol. 35 pp. 1497–1504, 2010.

[23] C. A. C .Coello, G. T. Pulido, and M. S. Lechuga, "Handling multiple objectives with particle swarm optimization," IEEE Trans Evol Comput, vol. 8, pp. 256-279, 2004.

[24] N. Yang, C. W. Yu, F. Wen, and C. Y. Chung, "An investigation of reactive power planning based on chance constrained programming," Electrical Power and Energy Systems, vol. 29, pp. 650–656, 2007.

[25] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization," IEEE

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.1.9 ]