

ارائه رویکردی مقاوم و منعطف برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و عدم قطعیت‌های بار، قیمت انرژی و منابع تجدیدپذیر

عبداله راستگو^۱، دانشجو دکتری؛ جمال مشتاق^۲، دانشیار؛ صلاح بهرام‌آرا^۳، استادیار

۱- گروه مهندسی برق-دانشکده مهندسی -دانشگاه کردستان-سنندج - ایران - abdollah.rastgo@gmail.com

۲- گروه مهندسی برق-دانشکده مهندسی -دانشگاه کردستان-سنندج- ایران - j.moshtagh@uok.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق-واحد سنندج -دانشگاه آزاد اسلامی-سنندج- ایران - s_bahramara@yahoo.com

چکیده: برنامه‌ریزی شبکه توزیع یکی از موضوعات مهم در برنامه‌ریزی سیستم قدرت است که مهمترین هدف آن تأمین بار الکتریکی شبکه در یک افق زمانی مشخص با کمترین هزینه است. با حضور منابع تولید پراکنده از جمله منابع انرژی تجدیدپذیر و عدم قطعیت‌های آن‌ها و همچنین عدم قطعیت‌های بار و قیمت انرژی، رویکردهای جدیدی برای برنامه‌ریزی شبکه توزیع باید پیشنهاد شود. در حقیقت ابزارهای برنامه‌ریزی به صورت مقاوم و انعطاف‌پذیر برای بررسی سیستم و مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها نیاز است. در این مقاله به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، یک تحلیل سناریو پیشنهاد می‌شود و به منظور بررسی اثر عدم قطعیت‌ها در مدل پیشنهادی، شاخص‌های مناسبی از جمله شاخص بیشینه پشیمانی به عنوان معیار مقاوم بودن پاسخ و بیشینه هزینه تطبیق به عنوان معیار انعطاف‌پذیری مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل پیشنهادی به صورت چندهدفه است که با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی بهبود یافته حل می‌شود و توسط روش تصمیم‌گیری فازی با توجه به معیارهای برنامه‌ریزی جواب نهایی انتخاب می‌شود. به منظور نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی، این مدل بر روی سیستم‌های آزمون ۹ و ۶۹ شینه شعاعی استاندارد پیاده‌سازی شده و نتایج نشان می‌دهد که یک طرح مقاوم و منعطف برای شبکه می‌تواند تأثیر به‌سزایی در هزینه‌ها داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی شبکه توزیع، تحلیل سناریو، تصمیم‌گیری فازی، شاخص پشیمانی، هزینه تطبیق.

A Robust and Flexible Approach for Distribution Expansion Planning in the Presence of Distributed Generations and the Uncertainties Associated with Demand, Energy Price and Renewable Resources

Abdollah Rastgou¹, PhD Student; Jamal Moshtagh², Associate Professor; Salah Bahramara³, Assistant Professor

1- Department of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: abdollah.rastgo@gmail.com

2- Department of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: j.moshtagh@uok.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran, Email: s_bahramara@yahoo.com

Abstract: Distribution expansion planning is one of the most important issues in power system the main objective of which is to meet the demand at minimum operating costs. Due to the uncertain nature of renewable-based distributed generators (DGs) as well as uncertainties of the network, new approaches should be proposed to take into account these uncertainties. Indeed, more robust and flexible planning methods are needed in order to deal with the aforementioned uncertainties. Therefore, in this paper a scenario-based approach is proposed to model the uncertainties. Moreover, to consider the effect of the uncertainties in the model, appropriate indices consisting of maximum regret as robustness criterion and maximum adjustment cost as flexibility criterion are employed. The proposed model is a multi-objective optimization one that is solved using an improved version of non-dominated sorting harmony search algorithm. Furthermore, a fuzzy decision-making analysis tagged with planner criteria is applied in order to obtain the global optimal solution. To show the effectiveness of the proposed model, it is applied to a radial nine-node distribution system. The results indicate that the operating costs, in the presence of different types of DGs and uncertainties, are significantly affected by the proposed approach.

Keywords: distribution network planning, scenario analysis, fuzzy decision-making, regret index, adjustment cost.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۷

نام نویسنده مسئول: جمال مشتاق

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سنندج - بلوار پاسداران - دانشگاه کردستان - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

۱-۱- پیش‌زمینه و اهداف

هدف از برنامه‌ریزی شبکه توزیع، تأمین توان مصرفی شبکه به‌صورت اقتصادی می‌باشد، درحالی‌که قیود فنی شبکه در محدوده مجاز خود باقی بمانند. این برنامه‌ریزی می‌تواند به‌صورت استاتیک و یا دینامیک باشد. در برنامه‌ریزی استاتیک زمان‌بندی در نظر گرفته نمی‌شود، درحالی‌که در برنامه‌ریزی دینامیک زمان‌بندی مسائل و توابع هدف به‌کار گرفته می‌شود. باید توجه داشت که مبنای کلیه مدل‌های برنامه‌ریزی اطلاعاتی است که به کمک روش‌های پیش‌بینی تخمین زده می‌شوند. ازجمله رشد بار الکتریکی که خود وابسته به پارامترهای بسیاری ازجمله رشد اقتصادی، قیمت انرژی و ... می‌باشد. بنابراین پارامترهایی که با تخمین به‌دست آمده‌اند و به‌عنوان اطلاعات ورودی به یک مساله برنامه‌ریزی وارد می‌شوند، همواره با عدم قطعیت و ابهام مواجه خواهند بود. عدم قطعیت‌ها سبب می‌شوند که طرح‌هایی توسعه همواره با ریسک‌های فنی و اقتصادی مواجه باشند. ریسک فنی به این معنا است که به‌دلیل تغییرات پیش‌بینی‌نشده در اطلاعات ورودی، شاخص‌های فنی شبکه در حد مطلوب خود قرار نگیرند. بنابراین هدف از این مقاله ارائه طرحی مقاوم و منعطف برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده^۱ و عدم قطعیت‌های ناشی از بار الکتریکی، قیمت انرژی و منابع تجدیدپذیر می‌باشد.

۱-۲- مرور ادبیات و نوآوری

در جدول (۱) خلاصه‌ای از مطالعات انجام‌شده در ارتباط با برنامه‌ریزی شبکه توزیع آمده‌است و همان‌طور که مشاهده می‌شود با هدف یافتن طرح‌هایی که عدم قطعیت‌ها در اطلاعات ورودی را در مساله لحاظ کند، روش‌های مختلفی جهت مدل‌سازی ارائه شده‌است. در خصوص این روش‌ها نکته مهم آن است که روش انتخاب‌شده با توجه به ماهیت و خصوصیات عدم قطعیت‌ها باید دارای کارایی مناسب باشد. به‌عنوان مثال تغییرات کوچک بار را می‌توان به‌راحتی به کمک روش‌های احتمالی [۶-۱] (روش‌های مونت کارلو، تخمین دونقطه‌ای و روش‌های مبتنی بر توابع توزیع احتمالی) مدل‌سازی کرد. در مقابل اگر رشد بار دارای روندهای متفاوتی باشد دیگر روش‌های احتمالی ابزار مناسبی برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها نخواهند بود زیرا که این روش‌ها در شرایطی که تغییرات پارامترها کوچک باشند کارایی خواهند داشت و دیگر نمی‌توان به کمک یک تابع توزیع احتمال مدل‌سازی را انجام داد. اگر عدم قطعیت‌ها به‌صورت نامعین باشند یعنی نتوان برای آن‌ها تابع توزیع احتمالی در نظر گرفت در این‌گونه موارد از روشی تحت عنوان تحلیل سناریو استفاده می‌شود که قادر است تغییرات عمده در اطلاعات ورودی را به‌راحتی مدل‌سازی کند. بنابراین در این مقاله عدم قطعیت در بار الکتریکی، قیمت انرژی و توان خروجی منابع تجدیدپذیر به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته می‌شوند. در این مقاله هدف، ارائه مدلی است که بتواند به‌طور هم‌زمان توابع هدف برنامه‌ریزی شبکه

توزیع در قالب هزینه کل^۲ (هزینه احداث پست‌های توزیع و فیدرها، هزینه تلفات، هزینه توان خریداری‌شده از شبکه، هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده و آلودگی ناشی از آن‌ها) و ریسک ناشی از عدم قطعیت‌ها با بادر نظر گرفتن همه سناریوها مدل‌سازی کند و شاخص‌های ریسک نیز خود به‌عنوان توابع هدف در یک مساله چندهدفه وارد شوند. بنابراین مساله برنامه‌ریزی شبکه توزیع به‌عنوان یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه مدل می‌شود که بعضی از توابع هدف آن معیارها و شاخص‌های ریسک خواهند بود. فضای جستجو به‌صورت ترکیب همه سناریوها در نظر گرفته می‌شود و تحلیل سناریو در داخل فرآیند بهینه‌سازی انجام‌شده و جواب‌های پارتو (شبه‌بهینه) نهایی دارای کارایی مناسبی در همه سناریوها خواهند داشت. مهم‌ترین مزیت مدل پیشنهادی این است که این مدل قادر است رابطه بین ریسک و هزینه سرمایه‌گذاری را با یافتن پاسخ‌های پارتو استخراج کند. به این ترتیب برنامه‌ریز قادر است که دقیقاً نسبت افزایش هزینه و نتیجه آن یعنی کاهش ریسک را تعیین کند که امکان تحلیل هزینه-فایده و به تبع آن تصمیم‌گیری مناسب‌تری را فراهم می‌کند. در کنار تابع هزینه کل از شاخص بیشینه پشیمانی به‌عنوان معیار مقاوم‌بودن استفاده شده‌است که در واقع این معیار، بهترین پاسخ را پاسخی می‌داند که در بدترین شرایط (وقوع بدترین سناریو) کمترین پشیمانی (کمترین فاصله تا نقطه بهینه بدترین سناریو) را داشته باشد و همچنین در کنار آن شاخص با اهمیت دیگری به نام معیار انعطاف‌پذیری پیشنهاد می‌شود و از نظر آن یک طرح با انعطاف‌پذیری بالا طرحی است که با کمترین هزینه بتوان آن‌را با سناریوهای مختلف تطبیق داد. به‌عبارتی یک طرح انعطاف‌پذیر را می‌توان با تغییرات اندک تبدیل به یک طرح شبه‌بهینه در سناریوهای مختلف کرد. به‌طور خلاصه نوآوری‌های این مقاله به شرح ذیل می‌باشند:

- مدل‌سازی هم‌زمان مساله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع و منابع تولید پراکنده با بادر نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها به‌صورت یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه بادر نظر گرفتن شاخص‌های انعطاف‌پذیری و مقاوم‌بودن
- ارائه الگوریتم بهبودیافته جستجوی هارمونی با مرتب‌سازی نامغلوب^۳ برای حل مدل ارائه‌شده چندهدفه غیرخطی آمیخته عدد صحیح
- به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری فازی به‌منظور انتخاب جواب نهایی از بین جواب‌های پارتو مطابق نظر برنامه‌ریز

۱-۳- سازمان‌دهی مقاله

در بخش دوم این مقاله، مدل‌سازی ریاضی پیشنهادی، توابع هدف و قیود فنی شبکه به‌همراه معرفی و مدل‌سازی ریاضی شاخص‌های ریسک پیشنهادی آمده‌است. در بخش سوم مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و روش بهینه‌سازی و انتخاب جواب بهینه با استفاده از روش فازی آمده‌است. در بخش چهارم مدل پیشنهادی بر روی شبکه‌های توزیع ۹

و ۶۹ شینه شعاعی استاندارد پیاده‌سازی شده‌است و نتایج به‌دست در نهایت، نتیجه‌گیری از این مقاله در بخش ۵ آمده‌است. آمده با الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب^۴ مقایسه می‌شود و

جدول ۱: مقایسه مطالعات گذشته در ارتباط با برنامه‌ریزی شبکه توزیع

مرجع	استاتیک/دینامیک	روش مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌ها	معیار انعطاف‌پذیری	معیار مقاوم بودن	متغیر	تابع هدف	روش حل
[۱]	استاتیک	مونت کارلو	--	--	جایابی فیدر	تلفات و انحراف ولتاژ	ژنتیک
[۲]	دینامیک	تخمین دو نقطه‌ای	--	--	جایابی پست و DG	هزینه DG	جستجوی گروهی
[۳]	دینامیک	تابع توزیع احتمالی	--	--	جایابی فیدر و DG	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری	ژنتیک
[۴]	استاتیک	تابع توزیع احتمالی	--	--	جایابی DG	شاخص پایداری ولتاژ	تجمع ذرات
[۵]	استاتیک	مونت کارلو	--	--	جایابی فیدر	هزینه سرمایه‌گذاری فیدر و تلفات	رقابت استعماری
[۶]	استاتیک	مونت کارلو	--	--	جایابی فیدر و DG	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری	تجمع ذرات
[۷]	استاتیک	فازی	--	--	مکان و سایز DG	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری	ژنتیک
[۸]	دینامیک	--	--	--	جایابی پست، فیدر و DG	هزینه DG و پست‌ها	ژنتیک
[۹]	دینامیک	تحلیل سناریو	--	--	جایابی پست، فیدر و DG	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری	ریاضی
[۱۰]	استاتیک	--	--	--	جایابی پست، فیدر و DG	هزینه DG	--
[۱۱]	دینامیک	تحلیل سناریو	--	--	جایابی پست، فیدر و DG	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری	ژنتیک
[۱۲]	دینامیک	تحلیل سناریو	--	--	جایابی پست، فیدر و DG	سود	کلونی مورچگان
[۱۳]	استاتیک	--	--	--	جایابی پست، فیدر و DG	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری	ریاضی
[۱۴]	استاتیک	تحلیل سناریو	--	--	جایابی فیدر و DG	هزینه تلفات و DG	ژنتیک
[۱۵]	دینامیک	تحلیل سناریو	--	--	جایابی DG	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری	ریاضی
[۱۶]	استاتیک	--	--	--	جایابی DG	تلفات و انحراف ولتاژ	گرگ خاکستری
[۱۷]	استاتیک	--	--	--	جایابی DG	هزینه تلفات و بهره‌برداری	چپش قورباغه
[۱۸]	استاتیک	فازی	--	--	جایابی پست، فیدر و DG	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری	انفجار بزرگ
[۱۹]	استاتیک	--	--	--	جایابی فیدر	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری	ریاضی
[۲۰]	استاتیک	--	--	--	جایابی DG	هزینه سرمایه‌گذاری و مدیریت انرژی	جستجوی گرانشی
[۲۱]	استاتیک	--	--	--	جایابی DG	مدیریت انرژی	جستجوی درونی
[۲۲]	دینامیک	--	--	--	جایابی پست و فیدر	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری	ریاضی
[۲۳]	استاتیک	تحلیل سناریو	--	--	جایابی DG	بیشینه سود	ریاضی
[۲۴]	استاتیک	--	--	--	جایابی DG	مدیریت انرژی	ریاضی-فازی
این مقاله	دینامیک	تحلیل سناریو	بررسی شده	بررسی شده	جایابی پست، فیدر و DG	هزینه کل، مقاوم بودن و تطبیق‌پذیری	جستجوی هارمونی چندهدفه

۲- فرمول‌بندی توابع هدف

۲-۱- تابع هدف هزینه کل

تابع هدف هزینه کل مطابق رابطه (۱) می‌باشد.

$$CPE = \sum_{t \in \Omega^t} (1+d)^{-t} \left\{ \left(\sum_{i \in \Omega^{NB}} \sum_{k \in \Omega^{DG}} P_{t,i,k}^{OP} \times C_B \times \sum_{e \in \Omega^{GE}} E_{k,m}^{DG} \right) + \left(\sum_{h \in \Omega^{EDS}} P_{t,h}^{PS} + \sum_{y \in \Omega^{CDS}} P_{t,y} \right) \times C_B \times \sum_{e \in \Omega^{GE}} E_m^G \right\} \quad (۸)$$

در روابط $(\lambda-1)$ ، COF ، CDS ، ICD ، COL ، $OCDS$ ، ICD ، CDS ، COF ، $(\lambda-1)$ و روابط CPE و CPP به‌ترتیب هزینه احداث فیدر [۱]، احداث پست [۲]، سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده، تلفات [۱۴]، توان خریداری از شبکه و آلودگی می‌باشد. λ/Ω^F ، y/Ω^{CDS} ، t/Ω^t ، e/Ω^{GE} و h/Ω^{EDS} ، $k,k'/\Omega^{DG}$ ، $i,j/\Omega^{NB}$ ، Ω^{NLB} مجموعه و اندیس برای زمان، پست‌های توزیع کاندیدا، فیدرهای کاندیدا، کل شین‌ها و شین‌های بار، منابع DG، پست‌های موجود و گازهای تولیدی می‌باشند. همچنین $n_{r,\lambda}$ تعداد فیدری که باید احداث شود، $n_{t,y}$ تعداد پستی که باید احداث شود، C_k^{INV} هزینه سرمایه‌گذاری DG k ، C_k^{OP} هزینه بهره‌برداری DG k ، d نرخ بهره، C_B ظرفیت مبنا برحسب مگاوات آمپر، $P_{t,i,k}^{OP}$ توان تولیدی DG k ام در شین i در زمان t ، ولتاژ شین i در زمان t ، Z_{ij} امپدانس فیدر بین شین i و j ، $\cos \phi$ ضریب توان سیستم، π_s قیمت انرژی، $P_{t,h}^{PS}$ توان خریداری شده از پست h در زمان t ، $P_{t,y}^{PS}$ توان خریداری شده از پست y در زمان t ، C_λ هزینه احداث فیدر، C_y هزینه احداث پست، $E_{k,m}^{DG}$ و E_m^G میزان آلودگی ناشی از DGها و شبکه می‌باشند.

$$\text{Min TC} = \text{COF} + \text{CDS} + \text{ICD} + 365 \times 24 \times \{ \text{OCDS} + \text{COL} + \text{CPP} + \text{pf} \times \text{CPE} \}. \quad (۱)$$

$$\text{COF} = \sum_{t \in \Omega^t} \sum_{\lambda \in \Omega^F} (1+d)^{-t} \times (C_\lambda \times n_{t,\lambda}). \quad (۲)$$

$$\text{CDS} = \sum_{t \in \Omega^t} \sum_{y \in \Omega^{CDS}} (1+d)^{-t} \times (C_y \times n_{t,y}). \quad (۳)$$

$$\text{ICD} = \sum_{t \in \Omega^t} \sum_{i \in \Omega^N} \sum_{k \in \Omega^{DG}} (1+d)^{-t} \times (C_k^{INV} \times C_B \times P_{t,i,k}^{OP}). \quad (۴)$$

$$\text{OCDS} = \sum_{t \in \Omega^t} \sum_{i \in \Omega^N} \sum_{k \in \Omega^{DG}} (1+d)^{-t} \times (C_k^{OP} \times C_B \times P_{t,i,k}^{OP}). \quad (۵)$$

$$\text{COL} = \sum_{t \in \Omega^t} (1+d)^{-t} \times (\text{Losses}^t \times C_B \times \pi_s), \quad (۶)$$

$$\text{Losses}^t = \sum_{\substack{i \in \Omega^{NB} \\ i \neq j}} \sum_{\substack{j \in \Omega^{NLB} \\ i \neq j}} \left(\frac{(|V_{t,i}| - |V_{t,j}|)^2}{|Z_{ij}|} \right) \times \cos \phi.$$

$$\text{CPP} = \sum_{t \in \Omega^t} (1+d)^{-t} \times \left(\sum_{h \in \Omega^{EDS}} P_{t,h}^{PS} + \sum_{y \in \Omega^{CDS}} P_{t,y}^{PS} \right) \times C_B \times \pi_s. \quad (۷)$$

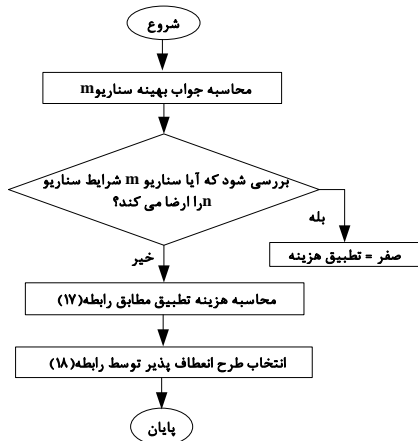
$$regret(X, s) = TSC(X, s) - TSC(\bar{X}, s) \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، \bar{X} پاسخ بهینه سناریوی s می‌باشد. بنابراین تابع هدف دوم الگوریتم پیشنهادی به صورت رابطه (۱۶) تعریف می‌شود:

$$\min_X \max_S (regret(X, s)) \quad (16)$$

۳-۲- پیشینه هزینه تطبیق (معیار انعطاف‌پذیری)

یک طرح با انعطاف‌پذیری بالا طرحی است که با کمترین هزینه بتوان آن را با سناریوهای مختلف تطبیق داد [۲۶]. یک طرح انعطاف‌پذیر را می‌توان با تغییرات اندک تبدیل به یک طرح شبه‌بهینه



شکل ۱: روند محاسبه هزینه تطبیق

در سناریوهای

مختلف کرد. در الگوریتم پیشنهادی، برای تعریف معیار انعطاف‌پذیری ابتدا مفهومی با عنوان هزینه تطبیق تعریف می‌شود که عبارت است از میزان مزاد هزینه سرمایه‌گذاری موردنیاز برای تبدیل آن طرح به طرحی است که کارایی آن حداقل برابر کارایی گزینه بهینه آن سناریو باشد. به عنوان مثال اگر چند سناریو موجود باشد و برنامه‌ریزی برای سناریو m انجام شود و در عمل سناریو n رخ دهد میزان هزینه مزادی که باید صرف شود تا شرایط سناریو n ارضا شود، هزینه تطبیق می‌باشد. لذا یکی از توابع هدف کمینه‌سازی پیشینه هزینه تطبیق ($AdjC$) می‌باشد. در این مقاله میزان هزینه مزاد پیشنهادی تعداد DG که در شبکه باید گنجانده شود تعریف می‌شود و مطابق روابط (۱۷) و (۱۸) می‌باشد که $s, m, n \in \Omega^S$ بیانگر مجموعه و اندیس سناریوها می‌باشد. فلوجارت محاسبه هزینه تطبیق در شکل (۱) آمده‌است.

$$AdjC = \sum_{t \in \Omega^t} \sum_{i \in \Omega^{NB}} \sum_{k' \in \Omega^{DG}} (1+d)^{-t} \times (C_{k'}^{INV} \times C_B \times P_{t,i,k'}^{OP}) + 365 \times 24 \times \sum_{t \in \Omega^t} \sum_{i \in \Omega^{NB}} \sum_{k' \in \Omega^{DG}} (1+d)^{-t} \times (C_{k'}^{OP} \times C_B \times P_{t,i,k'}^{OP}) \quad (17)$$

$$\min_{m, n \in \Omega^S} \max_{m \neq n} AdjC(m, n) \quad (18)$$

۳- روش حل

۳-۱- مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها

قیود بهینه‌سازی شامل ظرفیت DG در سیستم، محدودیت ولتاژ، ظرفیت پست‌ها، ظرفیت فیدرها، تعادل توان و شعاعی بودن می‌باشند که به ترتیب در روابط (۹) تا (۱۴) آمده‌است.

$$P_{t,i,k}^{OP} \times C_B \leq P_k^{CAP} \quad \forall t \in \Omega^t, \forall i \in \Omega^N, \forall k \in \Omega^{DG} \quad (9)$$

$$V_i^{Min} \leq V_{t,i} \leq V_i^{Max} \quad \forall t \in \Omega^t, \forall i \in \Omega^N \quad (10)$$

$$P_{t,h}^{PS}, P_{t,y}^{PS} \leq P_h^{PS-Max}, P_y^{PS-Max} \quad \forall t \in \Omega^t, \forall y \in \Omega^{CDS}, \forall h \in \Omega^{EDS} \quad (11)$$

$$P_{t,ij} (n_{ij}^0 + n_{t,\lambda}) \times C_B \leq P_{ij}^{Max} \quad \forall t \in \Omega^t, \forall i, j \in \Omega^N \quad (12)$$

$$\left\{ \sum_j \{ P_{t,ij} (n_{ij}^0 + n_{t,\lambda}) - Losses'_{ij} \} - \sum_j P_{t,ij} (n_{ij}^0 + n_{t,\lambda}) + \sum_k P_{t,ik}^{OP} \right\} \times C_B = D_{t,i}, \quad (13)$$

$$\forall t \in \Omega^t, \forall i \in \Omega^{NLB}, \forall j \in \Omega^{NB}, \forall k \in \Omega^{DG}, \lambda \in \Omega^F.$$

$$\text{Radial structure of distribution network} = 1 \quad (14)$$

که، P_k^{CAP} پیشینه ظرفیت تولیدی DG k ام، P_h^{SS-MAX} پیشینه ظرفیت پست h ام، P_{ij}^{MAX} پیشینه توان عبوری بین شین i و j ، $P_{t,ij}$ توان عبوری از شین i به j در زمان t ، n_{ij}^0 تعداد خطوط موجود بین شین i و j ، $D_{i,i}$ میزان بار در شین i در زمان t ، V_i^{max}, V_i^{min} به ترتیب کمینه و بیشینه ولتاژ شین i می‌باشند.

۳-۲- پیشینه ریسک پشیمانی (معیار مقاوم‌بودن)

یکی از معروف‌ترین شاخص‌های ریسک، شاخص حداکثر پشیمانی است که به معنای حداکثر فاصله یک طرح تا پاسخ‌های بهینه سناریوها می‌باشد که این فاصله به پشیمانی معروف است [۲۵]. برای توضیح این شاخص مثالی عددی آورده می‌شود. فرض شود مقادیر تابع هدف طرح‌ها به‌ازای دو سناریوی موجود به شرح جدول (۲) باشد.

جدول ۲: مقادیر تابع هدف طرح‌ها در هر سناریو

طرح	سناریو		پشیمانی		پیشینه پشیمانی طرح‌ها
	اول	دوم	در سناریو اول	در سناریو اول	
(۱)	۱۰	۷۰	۱۰-۱۰=۰	۷۰-۸=۶۲	۶۲
(۲)	۳۰	۴۵	۳۰-۱۰=۲۰	۴۵-۸=۳۷	۳۷
(۳)	۶۰	۲۰	۶۰-۱۰=۵۰	۲۰-۸=۱۲	۵۰
(۴)	۸۰	۸	۸۰-۱۰=۷۰	۸-۸=۰	۷۰

با توجه به جدول (۲)، پاسخ بهینه سناریو اول، طرح اول و پاسخ بهینه سناریو دوم طرح چهارم است. برای تعیین پشیمانی هر طرح باید مقدار تابع هدف آن از مقدار تابع هدف پاسخ بهینه هر سناریو کسر شود. مطابق جدول (۲)، حداقل حداکثر پشیمانی متعلق به طرح دوم بوده و این طرح از نظر شاخص ریسک حداکثر پشیمانی بهترین پاسخ است. این معیار بهترین پاسخ را پاسخی می‌داند که در وقوع بدترین سناریو، کمترین پشیمانی را داشته باشد. پایین‌بودن پشیمانی، به آن معناست که این پاسخ در برابر وقوع سناریوهای مختلف مقاوم است و تغییرات نسبتاً کوچکی در کارایی آن ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر این پاسخ فاصله نسبتاً کمی با پاسخ‌های بهینه سناریوهای مختلف دارد. با توجه به تابع هدف رابطه (۱)، میزان پشیمانی یک پاسخ به صورت زیر تعریف می‌شود:

به صورت وابسته به تکرار در نظر می گیرند. پارامترهای اصلاح شده مطابق روابط (۲۳) و (۲۴) می باشند.

$$PAR(Itr) = PAR_{min} + \frac{(PAR_{max} - PAR_{min})}{NI} \times Itr \quad (23)$$

$$bw(Itr) = bw_{max} \times e^{\left(\frac{\ln\left(\frac{bw_{min}}{bw_{max}}\right) \times Itr}{NI} \right)} \quad (24)$$

که، $PAR(Itr)$ سرعت تنظیم قطعات در هر تکرار، PAR_{max} و PAR_{min} به ترتیب کمینه و بیشینه سرعت تنظیم قطعات، NI بیشینه تکرار در نظر گرفته شده، $bw(Itr)$ پهنای باند در هر تکرار، bw_{max} و bw_{min} به ترتیب کمینه و بیشینه پهنای باند می باشد. در ابتدا یک مجموعه پاسخ به کمک حدس اولیه به دست می آید. روش کار الگوریتم مبتنی بر طبقه بندی پاسخها به چند سطح شبه بهینه می باشد. به این ترتیب که پاسخهای سطح اول در کل فضای پاسخهای ممکن، شبه بهینه باشند، پاسخهای سطح دوم در کل فضا به جز پاسخهای سطح اول، شبه بهینه باشند و به همین ترتیب این روند ادامه می یابد. پس از تقسیم بندی کلیه پاسخها به سطوح مختلف، پاسخهای متعلق به یک سطح، یک عدد دلخواه به عنوان برازندگی نسبت داده می شود. به سطح اول بزرگترین برازندگی و سپس به سایر سطوح به ترتیب برازندگیهای کوچکتر اختصاص داده می شوند. معیار ثانویه ای که برای طبقه بندی و امتیازدهی جوابها استفاده می شود فاصله ازدحامی می باشد، به نحوی که هرچه در همسایگی یک طرح، طرحهای بیشتری حضور داشته باشند، برازندگی آن طرح کاهش می یابد. فرض شود که جوابهای شبه بهینه $i-1$ و $i+1$ به ترتیب جوابهای قبل و بعد جواب i می باشند در این صورت فاصله ازدحامی جواب i مطابق رابطه (۲۵) می باشد.

$$d_i = d_i^1 + d_i^2, \quad (25)$$

$$d_i^1 = \frac{f_1(x_{i+1}) - f_1(x_{i-1})}{f_1^{max} - f_1^{min}},$$

$$d_i^2 = \frac{f_2(x_{i-1}) - f_2(x_{i+1})}{f_2^{max} - f_2^{min}}.$$

در یک رقابت دودویی جواب i برتر از جواب j می باشد اگر رتبه (رنک) i از رتبه j کمتر باشد و اینکه اگر جواب i دارای رتبه مساوی با j باشد آن گاه جواب i برتر از جواب j می باشد اگر فاصله ازدحامی جواب i بیشتر از فاصله ازدحامی جواب j باشد ($d_i > d_j$). پس از رتبه بندی و فرآیند فاصله ازدحامی، هارمونی جدیدی از طرحها تشکیل می گردد.

۳-۳- روش تصمیم گیری فازی

در این روش به ازای هر تابع هدف، یک تابع عضویت تعریف می شود. مقدار این تابع عضویت برای یک پاسخ، نشان دهنده سطح رضایت مندی از آن می باشد. اگر مقدار تابع هدف در یک گزینه منجر به عضویت ۱ شود ($\mu_{f_i}(\bar{X}) = 1$) تصمیم گیرنده از آن پاسخ رضایت مندی کامل دارد و برعکس اگر مقدار یک تابع هدف در یک پاسخ منجر به عضویت

در این مقاله برای بررسی عدم قطعیتها از تحلیل سناریو استفاده شده است. در این روش آینده توسط چند سناریو پیش بینی می شود و سپس برنامه ریزی به نحوی تعیین می گردد که در همه سناریوها کارایی نسبتاً مناسبی داشته باشد. بنابراین به کمک بررسی هر یک از سناریوها و پاسخ بهینه آنها و به کمک روشهای تصمیم گیری می توان به یک پاسخ بهینه دست یافت که در همه سناریوها از کارایی مناسبی برخوردار باشد. منظور از سناریو یک آینده ممکن خواهد بود که در آن مقادیر پارامترهای غیرقطعی مشخص شده اند.

۳-۲- الگوریتم جستجوی هارمونی با مرتب سازی نامغلوب

اساس کار الگوریتم پیشنهادی به این صورت می باشد که در ابتدا محدوده متغیرها و پارامترهای الگوریتم از جمله اندازه حافظه هارمونی^۵ (HMS) که تعداد بردارهای جواب را در حافظه هارمونی نشان می دهد، سرعت بررسی حافظه هارمونی^۶ ($HMCR$)، سرعت تنظیم قطعات^۷ (PAR) و بیشینه تعداد تکرارها یا شرط توقف، وارد می شوند. سپس به صورت تصادفی از محدوده مقادیر ممکن متغیرهای تصمیم مطابق رابطه (۱۹)، یک حافظه هارمونی مطابق رابطه (۲۰) تشکیل می شود.

$$x_{i,j} = x_j^{min} + r_j \times (x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (19)$$

$$i = 1, \dots, HMS, \quad j = 1, \dots, N$$

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 & f(x^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 & f(x^2) \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_n^{HMS} & f(x^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

که، x_j^{max} و x_j^{min} مقادیر کمینه و بیشینه متغیر j ، r_j یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ با تابع توزیع چگالی احتمال یکنواخت، HM ماتریس حافظه هارمونی، $f(x^1)$ مقدار تابع هدف به دست آمده به ازای بردار اول می باشد. با استفاده از سه مکانیزم انتخاب تصادفی، بررسی حافظه و سرعت تنظیم قطعات، هارمونی جدید $x^{new} = (x_1^{new}, x_2^{new}, \dots, x_{HMS}^{new})$ مطابق رابطه (۲۱) می باشد.

$$x^{new} = \begin{cases} (x_1^{new}, x_2^{new}, \dots, x_{HMS}^{new}) & \text{probability} = HMCR \\ x & \text{probability} = 1 - HMCR \end{cases} \quad (21)$$

برای هر بردار باید امتحان شود که آیا تنظیم قطعات بروی آن انجام شود؟ اگر جواب "بله" بود با احتمال PAR مطابق رابطه (۲۲) همسایه های بالا و پایین نقطه به دست آمده را مورد بررسی قرار می دهد.

$$x_j^{new} \leftrightarrow x_j^{new} \pm \text{rand}() \times bw \quad (22)$$

که bw پهنای بررسی و $\text{rand}()$ عددی تصادفی بین صفر و یک می باشد. اگر جواب منفی باشد، با احتمال $I-PAR$ کاری انجام نمی دهد و اگر هارمونی جدید تولید شده بهتر از بهترین هارمونی موجود در حافظه باشد، جایگزین آن می شود. گام سوم و چهارم آن قدر تکرار می شوند تا شرط توقف برآورده شود. شرط توقف همان تعداد تکرارها می باشد. در اصلاح الگوریتم به جای استفاده از مقادیر ثابت متغیرها، آنها را

$$PW^{(kW)} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq 4 \\ 166.6(v-4) & 4 < v \leq 14 \\ 1666 & 14 < v \leq 25 \\ 0 & 25 < v \end{cases} \quad (28)$$

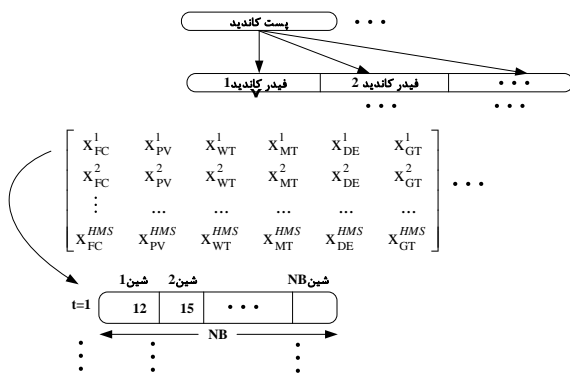
$$PS^{(kW)} = 270 \times 0.12 \times H \quad (29)$$

سناریو ۱: افزایش بار سالانه به میزان ۵٪، قیمت انرژی ۸۵ دلار بر مگاوات ساعت، اضافه شدن بار نقاط ۵ و ۶ در سال اول، میزان آلودگی کمتر ۲۵ تن بر ساعت، سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه و میزان تابش ۳/۱ کیلووات بر متر مربع

سناریو ۲: افزایش بار سالانه به میزان ۱۲٪، قیمت انرژی ۸۳ دلار بر مگاوات ساعت، اضافه شدن بار نقاط ۵ و ۶ در سال دوم، سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه و میزان تابش ۴ کیلووات بر متر مربع

سناریو ۳: افزایش بار سالانه به میزان ۱۷٪، قیمت انرژی ۸۱ دلار بر مگاوات ساعت و اضافه شدن بار نقاط ۵ و ۶ در سال سوم، سرعت باد ۲۲ متر بر ثانیه و میزان تابش ۴/۵ کیلووات بر متر مربع

برای پیاده سازی الگوریتم لازم است که در ابتدا پاسخ بهینه هر سناریو به طور مستقل و با توجه به تابع هدف رابطه (۱) تعیین گردد. برای این منظور به ازای هر سناریو یک بهینه سازی با یک تابع هدف انجام شده



شکل ۲: نحوه کدگذاری جوابها در الگوریتم پیشنهادی

که این بهینه سازی نیز با الگوریتم جستجوی هارمونی انجام شده است. در این حالت به منظور به دست آوردن بهترین عملکرد الگوریتم، آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای الگوریتم انجام شده است. لذا برای هر پارامتر، الگوریتم ۱۰ مرتبه اجرا و کمترین مقدار تابع هدف رابطه (۱) و میانگین آن‌ها در جدول‌های (۶-۸) آمده است. از جدول (۶) به ترتیب برای سناریوهای (۱-۳) دیده می شود که مقادیر بزرگ پارامتر $HMCR$ سبب عملکرد بهتر الگوریتم در این مساله می شود. مطابق جدول (۶)

بهترین مقادیر برای HMS و $HMCR$ در این برای سناریوهای (۱-۳) به ترتیب برابر ۲۵ و ۰/۹۹ می باشد. در جدول (۷) آنالیز حساسیت بر روی پارامتر PAR_{min} به ازای مقادیر HMS و $HMCR$ به دست آمده از جدول (۶) انجام شده است و مشاهده می شود که برای سناریوهای (۱-۳)، این پارامتر برابر ۰/۰۱ می باشد. در جدول (۸) آنالیز حساسیت بر روی پارامتر bw_{min} به ازای HMS و $HMCR$ مربوط به هر سناریو که در جدول (۶) و (۷) محاسبه شد، آمده است. مطابق جدول

صفر شود ($\mu_{f_i}(\bar{X})=0$) تصمیم گیرنده از آن گزینه کاملاً ناراضی خواهد بود. در این مقاله از تابع خطی برای توابع عضویت استفاده شده که مطابق رابطه (۲۶) می باشد. پس از تعریف تابع عضویت با استفاده از روش حداقل سازی مجموع متریک اختلافها، مطابق رابطه (۲۷) می توان پاسخ نهایی را به دست آورد [۲۷].

$$\mu_{f_i}(\bar{X}) = \begin{cases} 0 & f_i(\bar{X}) > f_i^{\max} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i(\bar{X})}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} \leq f_i(\bar{X}) \leq f_i^{\max} \\ 1 & f_i(\bar{X}) < f_i^{\min} \end{cases} \quad (26)$$

$$\min \sum |\mu_{r_i} - \mu_{f_i}(\bar{X})|^2 \quad (27)$$

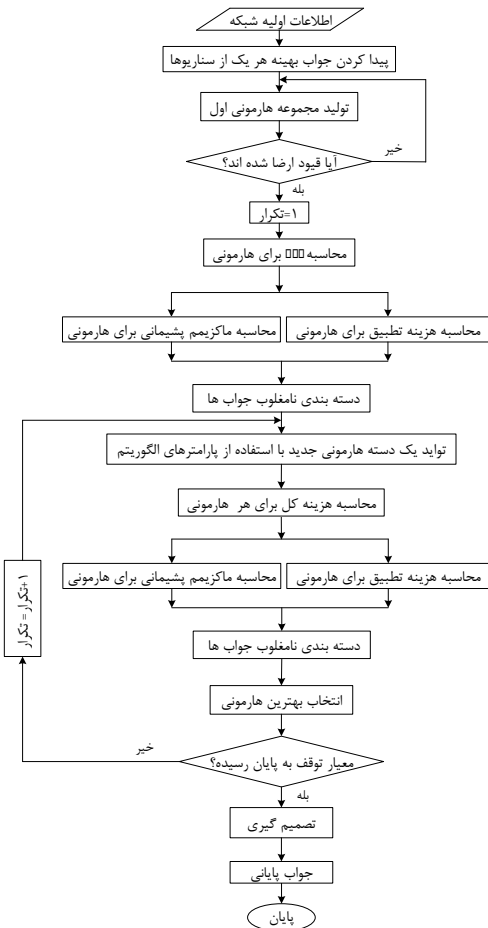
۴-۳ روش پیشنهادی

شکل (۲) نحوه کدگذاری در الگوریتم پیشنهادی را نشان می دهد. به عنوان مثال، در هارمونی اول در سال اول، در شین های ۱ و ۲ به ترتیب باید ۱۲ و ۱۵ کیلووات سلول سوختی نصب شود. فلوجارت پیشنهادی، حل مدل پیشنهادی در شکل (۳) آمده است. در ابتدا TSC هر سناریو مطابق رابطه (۱) به صورت جداگانه توسط الگوریتم جستجوی هارمونی به صورت تک هدفه محاسبه می شود. سپس میزان شاخص پشیمانی و تطبیق هر سناریو مطابق فلوجارت شکل (۱) بررسی و طبق رابطه (۱۷) محاسبه می شود. این جوابها به عنوان جواب هارمونی اول، به الگوریتم داده می شوند. سپس توسط عملگرهای $HMCR$ ، PAR و bw هارمونی جدیدی از هارمونی قبلی تشکیل می گردد. و محاسبات بر روی هارمونی جدید انجام می گیرد. این مراحل تا رسیدن به حداکثر تکرار الگوریتم، ادامه می یابد. در نهایت توسط روش تصمیم گیری فازی از بین جوابها بهترین جواب مطابق خواسته های برنامه ریز انتخاب می شود.

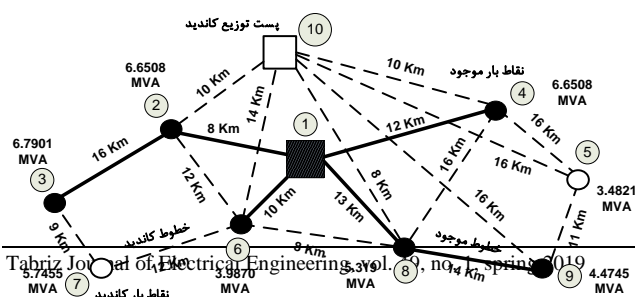
۴-۴ نتایج عددی

برای پیاده سازی استراتژی پیشنهادی، یک شبکه توزیع مطابق شکل (۴) به عنوان سیستم آزمون انتخاب شده است. این سیستم دارای ۹ شین می باشد که یک شین آن، پست توزیع ۱۳۲/۳۳ kV با ظرفیت ۴۰ MVA و دیگر شینها نقاط تغذیه بار می باشند. اطلاعات مربوط به خطوط در جدول (۳) آمده است و برنامه ریزی در بار پیک به ازای سناریوهای متفاوت انجام شده است [۲۸]. همچنین شش منبع DG شامل توربین بادی، سلول سوختی، میکروتوربین، موتور دیزلی، فتوولتاییک و توربین گازی مطابق جدول های (۴) و (۵) به کار گرفته شده است. توان خروجی توربین بادی (PW) و فتوولتاییک (PS) مطابق رابطه های (۲۸) و (۲۹) می باشد. که v و H به ترتیب سرعت باد و میزان تابش خورشید می باشند. با توجه به وضعیت شبکه، سه سناریو مختلف تعریف می شود:

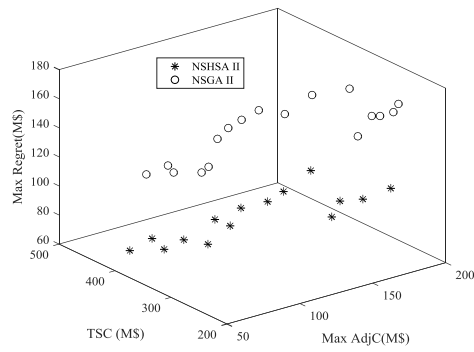
می‌باشد که می‌تواند همه خواسته‌های برنامه‌ریز را با توجه به سطوح رضایتمندی، ارضا کند. جواب بهینه پارتو شماره "۹" در جدول (۱۴) آمده‌است. مزیت اصلی مدل پیشنهادی این است که برنامه‌ریز سیستم می‌تواند مطابق معیارها و محدودیت‌های خود ضمن توجه به عدم قطعیت‌های غیر تصادفی، جواب بهینه را از بین جواب‌های پارتو انتخاب کند. در واقع برنامه‌ریز این اختیار را دارد که با توجه به محدودیت‌های سرمایه‌گذاری، ریسک حاصل از سرمایه‌گذاری خود را نیز در نظر بگیرد. برای نشان دادن کارایی، روش پیشنهادی با روش NSGA II مقایسه و در شکل (۶) نشان داده شده‌است. پارامترهای الگوریتم NSGA II به کاررفته مطابق جدول (۱۵) می‌باشد. برای مقایسه جواب‌های پارتو روش‌های چندهدفه از دو شاخص اندازه تنوع ۸ و فاصله ایده‌آل میانگین ۹ استفاده می‌شود [۳۳]. شاخص اول مطابق رابطه (۳۰) نشان‌دهنده تنوع جواب می‌باشد که هرچه این شاخص بزرگتر باشد تنوع بهتر می‌باشد و شاخص دوم مطابق رابطه (۳۱) کیفیت جواب‌ها در نزدیکی به جواب بهینه میانگین را نشان می‌دهد و هرچه این مقدار کوچکتر باشد کیفیت جواب‌های پارتو بهتر است.



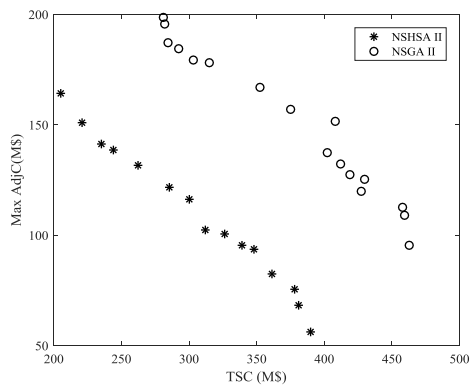
شکل ۳: فلوجارت حل مدل پیشنهادی



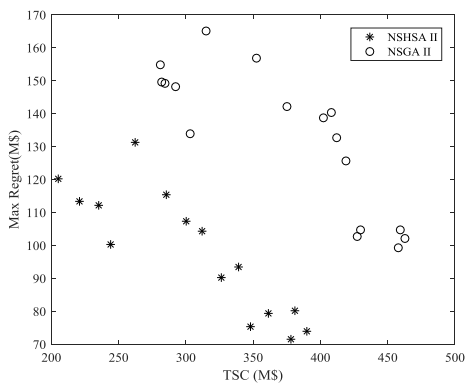
(۸) بهترین حالت به ازای $bw_{min}=0.1$ برای سناریوهای (۱-۳) به دست آمده‌است. در همه سناریوها مقدار پارامتر pf برابر 10000 [۲۹] دلار بر تن بر ساعت، ضریب توان 0.8 ، ولتاژ بیشینه و کمینه در هر شین به ترتیب 0.95 و 1.05 پریونیت و نرخ تورم 3% در نظر گرفته شده‌است. مقادیر بهینه به دست آمده برای هر سناریو به طور مجزا در جدول‌های (۹-۱۱) آمده‌است. پس از محاسبه حل بهینه سناریوها برای رابطه (۱)، هزینه تطبیق برای هر یک از سناریوها محاسبه می‌شود. به عنوان مثال طرح بهینه برای سناریو اول تحت سناریو دوم بررسی می‌شود. اگر طرح سناریو اول شرایط سناریو دوم را ارضا کرد، آنگاه هزینه تطبیق برابر صفر می‌شود در غیر این صورت رابطه (۱۷) برای گسترش طرح سناریو اول به منظور ارضا سناریو دوم حل می‌شود. دلیل این امر این است که ممکن است برنامه‌ریزی شبکه برای سناریو اول انجام شود و در عمل سناریو دوم رخ دهد لذا طرح نهایی باید به اندازه کافی انعطاف‌پذیر باشد که به اندازه کافی شرایط سناریو دوم را نیز ارضا کند. روند محاسبه هزینه تطبیق به منظور درک واضح‌تر برای سیستم آزمون نمونه در شکل (۵) آمده‌است. هزینه تطبیق برای هر یک از سناریوها در جدول (۱۲) آمده‌است. با مقادیر HMS ، HMC ، PAR_{min} و bw_{min} به دست آمده از جدول‌های (۷-۹) و پس از 100 تکرار 15 جواب پارتو مطابق شکل (۶-الف) به دست آمده‌اند که برای نمایش و تحلیل بهتر در دو بعد مطابق شکل‌های (۶-ب)، (۶-پ) و (۶-ت) نشان داده شده‌اند. با استفاده از رابطه بین هزینه کل و شاخص‌های ریسک، برنامه‌ریز می‌تواند با توجه به بودجه در دسترس و یا سایر محدودیت‌ها، مقادیر رضایتمندی خود را در فرآیند تصمیم‌گیری به شکل منطقی انتخاب کند. به عنوان مثال اگر حداکثر بودجه $300M\$$ باشد با توجه به شکل (۶-ج) حداکثر شاخص پیشمندی $107.26M\$$ خواهد بود. همچنین مطابق شکل (۶-ب) با همین بودجه حداکثر هزینه تطبیق برابر $107.26M\$$ خواهد بود. به عبارت دیگر با این محدودیت بودجه در دسترس، انعطاف‌پذیرترین پاسخ ممکن حداقل دارای هزینه تطبیقی برابر $107.26M\$$ خواهد بود. به این ترتیب و با توجه به مقادیر حداقل و حداکثر شاخص انعطاف‌پذیری، مطابق رابطه (۲۶)، بیشترین رضایتمندی برابر $(131.23 - 71.43) / (131.23 - 107.26)$ یا 40% خواهد بود و انتخاب سطوح بالاتر غیر منطقی می‌باشد. این فرآیند را می‌توان برای تعیین حداکثر سطح رضایتمندی شاخص مقاوم بودن نیز استفاده کرد. به این ترتیب برنامه‌ریز سیستم می‌تواند محدوده پاسخ‌های ممکن را با توجه به محدودیت‌هایی که با آن روبرو است تعیین کند. بنابراین به منظور انتخاب جواب بهینه مطابق نظر و میل برنامه‌ریز، میزان سطح رضایتمندی هر یک از جواب‌های پارتو مطابق رابطه (۲۶) در جدول (۱۳) آمده‌است. با در نظر گرفتن تابع عضویت 70% برای هزینه کل، تابع عضویت 70% درصد برای معیار مقاوم بودن و تابع عضویت 70% درصد برای معیار انعطاف‌پذیری، طبق رابطه (۲۷) و جدول (۱۳)، جواب پارتو شماره "۹" بهترین جواب



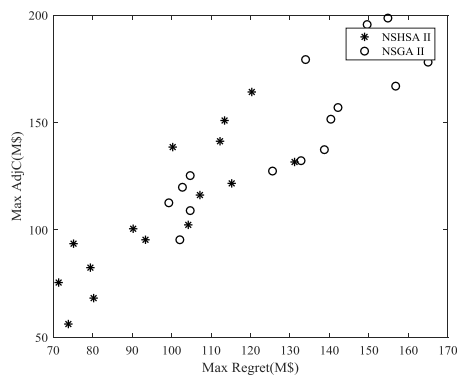
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۶: جواب‌های پارتو در توابع هدف مختلف در شبکه ۹ شینه

شکل ۴: سیستم آزمون نمونه ۹ شینه توزیع

جدول ۳: اطلاعات مربوط به خطوط شبکه آزمون نمونه [۳۰]

از شین (i)	به شین (j)	امپدانس	هزینه احداث (M\$)	بیشینه توان عبوری (MW)
۱	۲	۰/۰۲۵۴	۰/۳۱	۶/۸
۱	۴	۰/۰۴۵۷	۰/۴۲	۶/۸
۱	۶	۰/۰۴۱۶	۰/۳۱	۴/۵
۱	۸	۰/۰۵۵۴	۰/۳۱	۵/۵
۲	۳	۰/۰۸۳۱	۰/۸۲	۱/۵
۸	۹	۰/۰۷۷۶	۰/۳۱	۱/۶
۳	۷	۰/۰۴۰۵	۰/۳۱	۱/۲
۶	۷	۰/۰۴۵۷	۰/۴۲	۱/۲
۲	۶	۰/۰۴۵۷	۰/۴۲	۱/۲
۶	۸	۰/۰۳۴۶	۰/۳۱	۱/۲
۴	۸	۰/۰۸۳۱	۰/۸۲	۱/۲
۴	۵	۰/۰۸۳۱	۰/۸۲	۱/۲
۵	۹	۰/۰۴۴۳	۰/۳۱	۱/۲
۱۰	۲	۰/۰۴۱۶	۰/۳۱	۱
۱۰	۶	۰/۰۷۷۶	۰/۶۳	۱
۱۰	۴	۰/۰۴۱۶	۰/۳۱	۱
۱۰	۵	۰/۰۸۳۱	۰/۸۲	۱
۱۰	۸	۰/۰۳۴۶	۰/۳۱	۱
۱۰	۹	۰/۰۸۳۱	۰/۸۲	۱

جدول ۴: سایز و هزینه منابع DG به کاررفته [۳۱]

منبع	سایز واحد (kW)	محدودیت ظرفیت (kW)	هزینه سرمایه‌گذاری (\$/kW)	هزینه بهره‌برداری (\$/kWh)
موتور دیزلی	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰	۰/۰۴۵
سلول سوختی	۱۵۰۰	۳۰۰۰	۳۵۰۰	۰/۰۵۰
توربین گازی	۱۰۰۰	۴۰۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۴۰
میکرو توربین	۲۰۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۰/۰۵۰
فتوولتائیک	۱۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰۰	۰/۰۰۵
توربین بادی	۱۰۰۰	۴۰۰۰	۴۵۰۰	۰/۰۱۰

جدول ۵: میزان آلودگی منابع به کاررفته در سیستم ۹ شینه [۳۲]

منبع	NO _x (kg/kWh)	SO ₂ (kg/kWh)	CO ₂ (kg/kWh)	CO (kg/kWh)	PM ₁₀ (kg/kWh)
DE	۰/۰۰۲۱۳	۰/۰۰۱۲۵	۰/۶۲۵	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۰۳۶
FC	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۲۴	۰/۴۴۷	۰/۰	۰/۰
GT	۰/۰۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۶۲۵	۰/۰۰۰۴۲	۰/۰۰۰۰۴۱
MT	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۳۷	۰/۷۲۵	۰/۰۰۰۴۷	۰/۰۰۰۰۴۱
PV	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
WT	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
شبکه	۰/۰۰۲۲۹۵۲	۰/۰۰۳۵۸۳۴	۰/۹۲۱۲۵	-	-

جدول ۶: تحلیل حساسیت برای پارامترهای HMS و HMCR به ازای $PAR_{min}=0/4$ و $bw_{min}=0/1$ در سناریوهای (۱) - (۳)

سناریو ۱	HMS							
	۱۰		۲۵		۳۵		۵۰	
	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین
۰	$2/3627 \times 10^4$	$2/3434 \times 10^4$	$2/3621 \times 10^4$	$2/3632 \times 10^4$	$2/363 \times 10^4$	$2/3647 \times 10^4$	$2/3648 \times 10^4$	$2/3656 \times 10^4$
۰/۳	$2/3418 \times 10^4$	$2/3428 \times 10^4$	$2/3411 \times 10^4$	$2/3428 \times 10^4$	$2/3417 \times 10^4$	$2/3429 \times 10^4$	$2/3405 \times 10^4$	$2/3412 \times 10^4$
۰/۶	$2/3348 \times 10^4$	$2/3354 \times 10^4$	$2/3345 \times 10^4$	$2/3361 \times 10^4$	$2/3371 \times 10^4$	$2/3384 \times 10^4$	$2/3385 \times 10^4$	$2/3393 \times 10^4$
۰/۹	$2/3251 \times 10^4$	$2/3263 \times 10^4$	$2/3247 \times 10^4$	$2/3258 \times 10^4$	$2/3295 \times 10^4$	$2/3306 \times 10^4$	$2/3228 \times 10^4$	$2/3232 \times 10^4$
۰/۹۹	$2/3221 \times 10^4$	$2/3227 \times 10^4$	$2/3204 \times 10^4$	$2/3214 \times 10^4$	$2/3248 \times 10^4$	$2/3257 \times 10^4$	$2/3214 \times 10^4$	$2/3227 \times 10^4$

سناریو ۲	HMS							
	۱۰		۲۵		۳۵		۵۰	
	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین
۰	$4/6886 \times 10^4$	$4/8475 \times 10^4$	$4/2642 \times 10^4$	$4/2963 \times 10^4$	$4/3552 \times 10^4$	$4/5052 \times 10^4$	$4/3784 \times 10^4$	$4/4600 \times 10^4$
۰/۳	$4/2941 \times 10^4$	$4/3315 \times 10^4$	$3/9902 \times 10^4$	$4/1091 \times 10^4$	$4/0070 \times 10^4$	$4/0916 \times 10^4$	$4/0225 \times 10^4$	$4/0810 \times 10^4$
۰/۶	$3/9850 \times 10^4$	$4/1329 \times 10^4$	$3/7491 \times 10^4$	$3/7781 \times 10^4$	$3/6416 \times 10^4$	$3/7554 \times 10^4$	$3/6541 \times 10^4$	$3/7588 \times 10^4$
۰/۹	$3/0874 \times 10^4$	$3/1164 \times 10^4$	$3/0750 \times 10^4$	$3/1153 \times 10^4$	$3/1157 \times 10^4$	$3/2986 \times 10^4$	$3/1323 \times 10^4$	$3/2997 \times 10^4$
۰/۹۹	$2/9303 \times 10^4$	$3/0521 \times 10^4$	$2/8532 \times 10^4$	$2/9230 \times 10^4$	$2/9722 \times 10^4$	$3/0122 \times 10^4$	$3/0128 \times 10^4$	$3/0804 \times 10^4$

سناریو ۳	HMS							
	۱۰		۲۵		۳۵		۵۰	
	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین
۰	$6/5755 \times 10^4$	$6/7983 \times 10^4$	$5/9803 \times 10^4$	$6/0253 \times 10^4$	$6/1079 \times 10^4$	$6/3182 \times 10^4$	$6/1404 \times 10^4$	$6/2548 \times 10^4$
۰/۳	$6/0222 \times 10^4$	$6/0747 \times 10^4$	$5/5959 \times 10^4$	$5/7627 \times 10^4$	$5/6196 \times 10^4$	$5/7382 \times 10^4$	$5/6413 \times 10^4$	$5/7221 \times 10^4$
۰/۶	$5/5887 \times 10^4$	$5/7961 \times 10^4$	$5/2578 \times 10^4$	$5/2986 \times 10^4$	$5/1071 \times 10^4$	$5/2667 \times 10^4$	$5/1247 \times 10^4$	$5/2686 \times 10^4$
۰/۹	$4/3299 \times 10^4$	$4/3706 \times 10^4$	$4/3125 \times 10^4$	$4/3690 \times 10^4$	$4/3696 \times 10^4$	$4/6261 \times 10^4$	$4/3928 \times 10^4$	$4/6262 \times 10^4$
۰/۹۹	$4/1096 \times 10^4$	$4/2817 \times 10^4$	$4/0014 \times 10^4$	$4/0993 \times 10^4$	$4/1683 \times 10^4$	$4/2244 \times 10^4$	$4/2253 \times 10^4$	$4/3200 \times 10^4$

جدول ۷: تحلیل حساسیت برای پارامتر PAR_{min} به ازای $bw_{min}=0/1$ و مقادیر HMS و HMCR به دست آمده از جدول (۶)

سناریو	PAR_{min}							
	۰/۰۰۱		۰/۰۱		۰/۱		۰/۵	
	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین
(۱)	$2/1811 \times 10^4$	$2/1819 \times 10^4$	$2/1406 \times 10^4$	$2/1412 \times 10^4$	$2/2631 \times 10^4$	$2/2636 \times 10^4$	$2/3215 \times 10^4$	$2/3219 \times 10^4$
(۲)	$2/7112 \times 10^4$	$2/7332 \times 10^4$	$2/6912 \times 10^4$	$2/7311 \times 10^4$	$2/7931 \times 10^4$	$2/8112 \times 10^4$	$2/8538 \times 10^4$	$2/9233 \times 10^4$
(۳)	$4/9406 \times 10^4$	$4/9418 \times 10^4$	$2/9336 \times 10^4$	$4/9348 \times 10^4$	$4/9474 \times 10^4$	$4/9602 \times 10^4$	$4/0018 \times 10^4$	$4/0994 \times 10^4$

جدول ۸: تحلیل حساسیت برای پارامتر bw_{min} به ازای PAR_{min} ، HMS و HMCR به دست آمده از جدول (۶) و جدول (۷)

سناریو	bw_{min}							
	۰/۰۰۰۱		۰/۰۱		۰/۱		۰/۵	
	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین
(۱)	$2/0911 \times 10^4$	$2/0918 \times 10^4$	$2/0505 \times 10^4$	$2/0508 \times 10^4$	$2/1406 \times 10^4$	$2/1412 \times 10^4$	$2/1802 \times 10^4$	$2/1809 \times 10^4$
(۲)	$2/6542 \times 10^4$	$2/6661 \times 10^4$	$2/6288 \times 10^4$	$2/6331 \times 10^4$	$2/6912 \times 10^4$	$2/7311 \times 10^4$	$2/7124 \times 10^4$	$2/7335 \times 10^4$
(۳)	$3/9025 \times 10^4$	$4/9031 \times 10^4$	$3/8969 \times 10^4$	$3/8972 \times 10^4$	$3/9336 \times 10^4$	$3/9348 \times 10^4$	$3/9563 \times 10^4$	$3/9588 \times 10^4$

جدول ۹: جواب بهینه تابع هدف رابطه (۱) برای سناریو ۱

شین	میزان تولید و مقدار برنامه ریزی شده (kW)	نوع، اندازه (kW) و مکان منابع تولید پراکنده				
		توربین بادی	فتوولتاییک	سلول سوختی	میکرو توربین	توربین گازی
۲	میزان تولید	۹۹۵	۱۰۰۰	-	-	۱۹۹۷
	ظرفیت برنامه ریزی شده	1×1000	10×100	-	-	2×1000

۳	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۹۹۷ ۱×۱۰۰۰	- -	- -	- -	۳۹۹۷ ۴×۱۰۰۰	۱۹۹۶ ۲×۱۰۰۰
۴	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۹۹۸ ۱×۱۰۰۰	۵۰۸ ۶×۱۰۰	- -	- -	۲۹۹۸ ۳×۱۰۰۰	۱۹۹۶ ۲×۱۰۰۰
۵	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۹۹۷ ۱×۱۰۰۰	۱۹۹۸ ۲۰×۱۰۰	- -	- -	۲۹۹۶ ۳×۱۰۰۰	۱۹۹۸ ۲×۱۰۰۰
۶	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	- -	۱۹۹۸ ۲۰×۱۰۰	- -	- -	۳۹۹۵ ۳×۱۰۰۰	۱۹۹۸ ۲×۱۰۰۰
۷	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱۹۹۶ ۲×۱۰۰۰	۱۹۹۶ ۲۰×۱۰۰	- -	- -	۱۹۹۷ ۲×۱۰۰۰	۱۹۹۸ ۲×۱۰۰۰
۸	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	- -	۱۹۹۶ ۲۰×۱۰۰	- -	- -	۱۹۹۴ ۲×۱۰۰۰	۱۹۹۷ ۲×۱۰۰۰
۹	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	- -	۱۹۹۷ ۲۰×۱۰۰	- -	- -	۱۹۹۶ ۲×۱۰۰۰	۱۹۹۸ ۲×۱۰۰۰
۲۳/۲۴۵: آلودگی (تن/ساعت) • هزینه احداث پست توزیع (MS) ۱۰۶/۰۱ : هزینه سرمایه‌گذاری (MS) ۰/۰۰۲۲۸۴ : تلفات (پرونیوت) ۱/۸ : هزینه احداث فیدر(فیدر ۶-۷ و فیدر ۴-۵) ۹۴/۹۲ : هزینه بهره‌برداری (MS) ۲۰۵/۰۵۵ : هزینه کل (MS) • هزینه توان خریداری‌شده از شبکه (MS)							

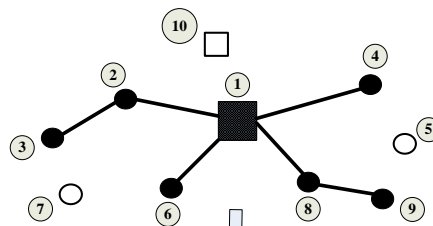
جدول ۱۰: جواب بهینه تابع هدف رابطه (۱) برای سناریو ۲

شین	میزان تولید و مقدار برنامه‌ریزی شده (kW)	نوع، اندازه (kW) و مکان منابع تولید پراکنده					
		توربین بادی	فتولتاییک	سلول سوختی	میکرو توربین	توربین گازی	موتور دیزلی
۲	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱۹۹۸ ۲×۱۰۰۰	۱۹۹۵ ۲۰×۱۰۰	- -	- -	۳۹۹۷ ۴×۱۰۰۰	۱۹۶۵ ۲×۱۰۰۰
۳	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱۹۹۸ ۲×۱۰۰۰	۹۹۸ ۱۰×۱۰۰	- -	- -	۳۹۶۵ ۴×۱۰۰۰	۱۹۹۸ ۲×۱۰۰۰
۴	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱۹۹۶ ۲×۱۰۰۰	۳۶۷ ۴×۱۰۰	- -	- -	۳۸۹۱ ۴×۱۰۰۰	۱۹۸۵ ۲×۱۰۰۰
۵	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱۹۹۴ ۱×۱۰۰۰	- -	- -	- -	۳۸۹۳ ۴×۱۰۰۰	۱۹۸۷ ۲×۱۰۰۰
۶	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	- -	۹۹۶ ۱۰×۱۰۰	- -	۹۹۵ ۵×۲۰۰	۳۹۹۴ ۴×۱۰۰۰	۱۹۹۱ ۲×۱۰۰۰
۷	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱۹۹۷ ۲×۱۰۰۰	۹۹۳ ۱۰×۱۰۰	- -	۱۹۹۳ ۱۰×۲۰۰	۳۹۹۶ ۴×۱۰۰۰	۱۸۹۲ ۲×۱۰۰۰
۸	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	- -	۹۹۴ ۱۰×۱۰۰	- -	- -	۳۹۹۱ ۴×۱۰۰۰	۱۹۹۶ ۲×۱۰۰۰
۹	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	- -	۱۹۹۴ ۲۰×۱۰۰	- -	- -	۳۹۹۵ ۴×۱۰۰۰	۱۸۸۲ ۲×۱۰۰۰
۳۲/۳۰۶: آلودگی (تن/ساعت) • هزینه احداث پست توزیع (MS) ۱۳۰/۸۱ : هزینه سرمایه‌گذاری (MS) ۰/۰۰۲۶۹ : تلفات (پرونیوت) ۱/۷۶ : هزینه احداث فیدر(فیدر ۶-۷ و فیدر ۴-۵) ۱۲۷/۰۴ : هزینه بهره‌برداری (MS) ۲۶۲/۸۴۰۶ : هزینه کل (MS) • هزینه توان خریداری‌شده از شبکه (MS)							

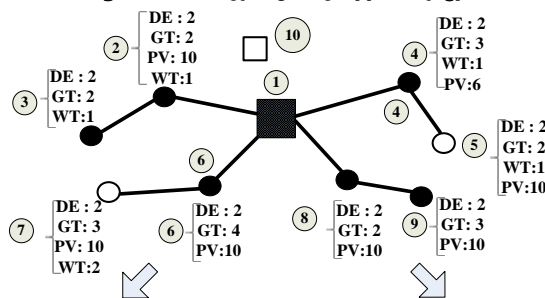
جدول ۱۱: جواب بهینه تابع هدف رابطه (۱) برای سناریو ۳

شین	میزان تولید و مقدار برنامه‌ریزی شده (kW)	نوع، اندازه (kW) و مکان منابع تولید پراکنده					
		توربین بادی	فتولتاییک	سلول سوختی	میکرو توربین	توربین گازی	موتور دیزلی
۲	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۳۹۹۱ ۴×۱۰۰۰	۱۹۹۸ ۲۰×۱۰۰	- -	۹۹۳ ۵×۲۰۰	۳۹۹۸ ۴×۱۰۰۰	۱۹۸۹ ۲×۱۰۰۰
۳	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۳۹۸۷ ۴×۱۰۰۰	۹۹۶ ۱۰×۱۰۰	- -	۸۸۲ ۳×۳۰۰	۳۹۹۱ ۴×۱۰۰۰	۱۹۹۹ ۲×۱۰۰۰
۴	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱۹۹۸ ۲×۱۰۰۰	۳۹۳ ۴×۱۰۰	- -	- -	۳۹۸۷ ۴×۱۰۰۰	۱۹۹۶ ۲×۱۰۰۰

۵	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۳۹۹۶ ۴×۱۰۰۰	- -	- -	- -	۳۹۹۶ ۴×۱۰۰۰	۱۹۹۳ ۲×۱۰۰۰
۶	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	- -	۹۹۸ ۱۰×۱۰۰	- -	۹۸۵ ۵×۲۰۰	۳۹۹۷ ۴×۱۰۰۰	۱۹۹۷ ۲×۱۰۰۰
۷	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱۸۹۶ ۲×۱۰۰۰	۹۹۶ ۱۰×۱۰۰	- -	۱۹۶۳ ۱۰×۲۰۰	۳۹۹۶ ۴×۱۰۰۰	۱۹۹۸ ۲×۱۰۰۰
۸	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۳۹۶۸ ۴×۱۰۰۰	۹۹۷ ۱۰×۱۰۰	- -	۱۹۹۵ ۱۰×۲۰۰	۳۹۹۳ ۴×۱۰۰۰	۱۹۸۷ ۲×۱۰۰۰
۹	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱۹۸۷ ۲×۱۰۰۰	۱۹۹۵ ۲۰×۱۰۰	- -	- -	۳۹۹۸ ۴×۱۰۰۰	۱۹۹۵ ۲×۱۰۰۰
		* هزینه احداث پست توزیع (MS)			آلودگی (تن/ساعت): ۳۴/۹۱۹		
		* هزینه سرمایه‌گذاری (MS): ۲۰۹/۶۶			هزینه احداث فیدر (احداث فیدر ۶-۷ و فیدر ۴-۵): ۱/۷۲		
		* هزینه بهره‌برداری (MS): ۱۷۴/۶۴			تلفات (پرونیوت): ۰/۰۰۲۸۴		
		* هزینه توان خریداری شده از شبکه (MS): ۰			* هزینه کل (MS): ۳۸۹/۶۱۸		



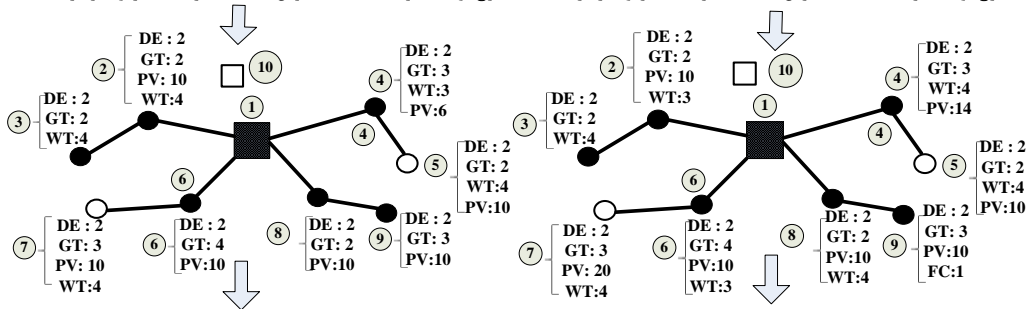
فرض شود سناریو ۱ رخ دهد. آنگاه مساله بهینه سازی رابطه (۱) با در نظر گرفتن قیود روابط (۹)-(۱۴) حل می شود. طرح اولیه به قرار ذیل مطابق جدول (۱۰) به دست می آید.



اگر طرح اولیه قیود و تابع هدف تحت سناریو ۲ را ارضا نکند

اگر طرح اولیه قیود و تابع هدف تحت سناریو ۳ را ارضا نکند

طرح اولیه با رابطه (۱۷) گسترش یافته تا شرایط سناریو ۳ را ارضا کند



محاسبه هزینه تطبیق طرح اولیه طبق رابطه (۱۷) تحت سناریو ۲

محاسبه هزینه تطبیق طرح اولیه طبق رابطه (۱۷) تحت سناریو ۳

جدول ۱۲: هزینه تطبیق سناریوها

هزینه تطبیق (میلیون دلار)	طرح‌های توسعه		
	طرح سناریو ۱	طرح سناریو ۲	طرح سناریو ۳
هزینه تطبیق سناریو ۱	۰	۸۵/۵	۱۶۴/۲۵
هزینه تطبیق سناریو ۲	۴۰/۵۶	۰	۱۳۵/۲۱
هزینه تطبیق سناریو ۳	۵۶/۱۲	۵۶/۱	۰

جدول ۱۳: تابع عضویت هر یک از جواب‌های پارتو

جواب پارتو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
$\mu_{f_1} = \mu_{f_{SC}} \%$	۱۰۰	۹۱/۳	۸۳/۷	۷۸/۷	۶۸/۹	۵۶/۵	۴۸/۵	۴۱/۹	۳۴/۵	۲۷/۴	۲۲/۵	۱۵/۵	۶/۳	۴/۷	۰/۰
$\mu_{f_2} = \mu_{Max\ Regret} \%$	۱۸/۴	۲۹/۹	۳۱/۷	۵۱/۶	۰/۰	۲۶/۶	۱۳/۳	۴۵/۰	۶۸/۶	۶۳/۲	۹۳/۶	۸۶/۷	۱۰۰	۸۵/۲	۹۵/۹
$\mu_{f_3} = \mu_{Max\ AdjC} \%$	۰/۰	۱۲/۲	۲۱/۳	۲۳/۶	۳۰/۱	۳۹/۴	۴۴/۴	۵۷/۱	۵۹	۶۳/۷	۶۵/۳	۷۵/۷	۸۲/۲	۸۸/۷	۱۰۰
$\sum_{i=1}^3 0.7 - \mu_{f_i}(X) ^2$	۰/۸۴	۰/۵۴	۰/۴۰	۰/۲۵	۰/۶۴	۰/۲۹	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۵۱	۰/۴۸	۰/۶۴

جدول ۱۴: نتایج جواب بهینه در جواب پارتو شماره "۹" در شبکه ۹ شینه

شین	میزان تولید و مقدار برنامه‌ریزی شده (kW)	نوع، اندازه (kW) و مکان منابع تولید پراکنده					
		توربین بادی	فتوولتائیک	سلول سوختی	میکرو توربین	توربین گازی	موتور دیزلی
۲	میزان تولید	۳۸۸۷	۱۹۶۲	-	-	۱۹۹۷	۱۹۹۵
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۴×۱۰۰۰	۲۰×۱۰۰	-	-	۲×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۳	میزان تولید	۳۸۸۵	۱۸۸۹	-	-	۱۹۹۵	۱۹۹۸
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۴×۱۰۰۰	۲۰×۱۰۰	-	-	۲×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۴	میزان تولید	۳۹۹۶	۱۹۸۷	-	-	۱۹۸۷	۱۹۹۷
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۴×۱۰۰۰	۲۰×۱۰۰	-	-	۲×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۵	میزان تولید	۳۹۸۴	-	-	-	۲۹۹۸	۱۹۹۷
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۴×۱۰۰۰	-	-	-	۳×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۶	میزان تولید	-	۱۹۷۵	-	-	۲۹۶۸	۱۹۹۸
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	-	۲۰×۱۰۰	-	-	۳×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۷	میزان تولید	۱۹۸۶	۱۹۶۳	-	۱۹۸۷	۱۹۹۵	۱۹۹۸
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۲×۱۰۰۰	۲۰×۱۰۰	-	۱۰×۲۰۰	۲×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۸	میزان تولید	۳۹۶۸	۹۸۷	-	۱۹۹۶	۱۹۹۷	۱۹۹۸
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۴×۱۰۰۰	۱۰×۱۰۰	-	۱۰×۲۰۰	۲×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۹	میزان تولید	۲۸۹۶	۱۹۶۵	-	-	۲۹۸۱	۱۹۹۶
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۳×۱۰۰۰	۲۰×۱۰۰	-	-	۳×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰

* هزینه احداث پست توزیع (MS) : ۱۴۰/۷۴
 * هزینه احداث فیدر ۶-۷ و فیدر ۴-۵ : ۱/۷۴۴
 * هزینه کل (MS) : ۳۲۵/۰۹۴
 * هزینه سرمایه‌گذاری (MS) : ۱۴۰/۷۴
 * هزینه بهره‌برداری (MS) : ۱۸۰/۱۲
 * تلفات (پریونیت) : ۰/۰۰۲۸۴
 * هزینه توان خریداری شده از شبکه (MS) : ۰

جدول ۱۵: پارامترهای الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب

بیشینه تکرار	جمعیت اولیه	Crossover rate	Mutation rate
۱۰۰	۵۰	۰/۸	۰/۴

جدول ۱۶: مقایسه پارامترهای اندازه تنوع و فاصله ایده‌آل میانگین در شبکه ۹ شینه

روش	DM TC, Max AdjC	DM TC, Max Regret	DM Max Regret, Max AdjC	MID
NSIHS-A-II	۰/۸۱۱۳	۰/۶۵۷۵	۰/۸۰۰۸	۰/۴۶۲۰
NSGA-II	۰/۶۵۱۵	۰/۵۵۹۱	۰/۶۵۴۷	۰/۵۹۲۸

(۱۷) مشاهده می‌شود پارامترهای مذکور برای روش پیشنهادی بهتر از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب می‌باشد و در واقع کارایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. مدل پیشنهادی همچنین بر روی شبکه ۶۹ شینه شعاعی توزیع IEEE پیاده‌سازی شده‌است. خطوط و پست‌های موجود و کاندیدا در شکل (۷) نشان داده شده‌است. اطلاعات کامل مربوط به این سیستم در [۳۴] آمده‌است. در این شبیه‌سازی چهار منبع تولید پراکنده شامل توربین بادی، سلول سوختی، میکروتوربین و فتوولتائیک به کار گرفته شده‌است که اطلاعات مربوط به آن‌ها در جدول‌های (۴) و (۱۷) آمده‌است. مقدار پارامتر pf برابر ۱۰۰۰۰ دلار بر

$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^M \left(\max_{j=1, \dots, N_p} \{f_i^j\} - \min \{f_i^j\} \right)^2} \quad (30)$$

$$MID = \frac{\sum_{j=1}^{N_p} C_j}{N_p}, \quad C_j = \sqrt{\sum_{i=1}^M (f_i^j - f_{i,m})^2} \quad (31)$$

که، N_p تعداد جواب‌های پارتو، M تعداد تعداد توابع هدف، f_i^j مقدار تابع هدف i به‌ازای جواب j و $f_{i,m}$ مقدار میانگین جواب‌های پارتو تابع هدف i می‌باشد. در جدول (۱۶) مقایسه جواب‌های روش پیشنهادی با الگوریتم NSGA II آمده‌است. همان‌طور که در جدول

سناریو ۳: افزایش بار سالانه به میزان ۵٪، قیمت انرژی ۰/۰۶۸ دلار بر کیلووات ساعت، سرعت باد ۲۲ متربرثانیه و میزان تابش ۴/۵ کیلووات بر مترمربع

سناریو ۴: افزایش بار سالانه به میزان ۷٪، قیمت انرژی ۰/۰۶۷ دلار بر کیلووات ساعت، سرعت باد ۱۰ متربرثانیه و میزان تابش ۳/۱ کیلووات بر مترمربع

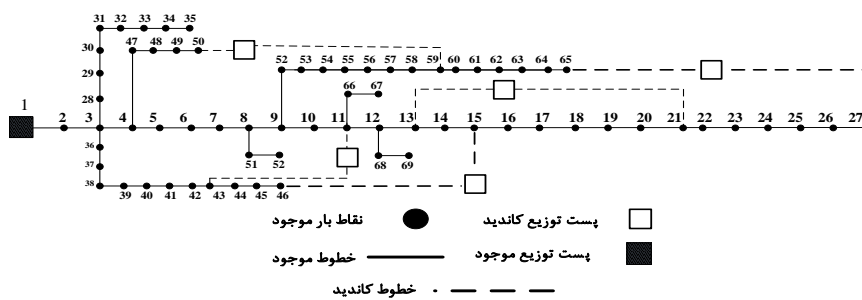
سناریو ۵: افزایش بار سالانه به میزان ۱۰٪، قیمت انرژی ۰/۰۷۱ دلار بر کیلووات ساعت، سرعت باد ۱۵ متربرثانیه و میزان تابش ۴ کیلووات بر مترمربع

سناریو ۶: افزایش بار سالانه به میزان ۱۲٪، قیمت انرژی ۰/۰۷۴ دلار بر کیلووات ساعت، سرعت باد ۱۲ متربرثانیه و میزان تابش ۴/۵ کیلووات بر مترمربع

تن بر ساعت، ضریب توان ۰/۹۵، ولتاژ بیشینه و کمینه در هر شین به ترتیب ۰/۹۵ و ۱/۰۵ پریونیت و نرخ تورم ۳٪ در نظر گرفته شده است. به منظور مقایسه برنامه ریزی برای یک سال صورت گرفته است. شش سناریو متفاوت مطابق ذیل برای این مورد مطالعاتی در نظر گرفته می شود:

سناریو ۱: افزایش بار سالانه به میزان ۳٪، قیمت انرژی ۰/۰۷ دلار بر کیلووات ساعت، سرعت باد ۱۱ متربرثانیه و میزان تابش ۳/۲ کیلووات بر مترمربع

سناریو ۲: افزایش بار سالانه به میزان ۴/۵٪، قیمت انرژی ۰/۰۷۲ دلار بر کیلووات ساعت، سرعت باد ۱۵ متربرثانیه و میزان تابش ۴ کیلووات بر مترمربع



شکل ۷: سیستم آزمون نمونه ۶۹ شینه توزیع

۲۸	میزان تولید	-	-	-	۹۵
	ظرفیت برنامه ریزی	-	-	-	۱×۱۵۰
۶۸	میزان تولید	-	-	-	۱۳۱
	ظرفیت برنامه ریزی	-	-	-	۱×۱۵۰
۹	میزان تولید	-	۵۹	-	-
	ظرفیت برنامه ریزی	-	۱×۱۰۰	-	-
۶۶	میزان تولید	-	۷۰	-	-
	ظرفیت برنامه ریزی	-	۱×۱۰۰	-	-
۴۳	میزان تولید	۹۵	-	-	-
	ظرفیت برنامه ریزی	۱×۱۰۰	-	-	-
۱۹	میزان تولید	۹۱	-	-	-
	ظرفیت برنامه ریزی	۱×۱۰۰	-	-	-
(MS) : هزینه سرمایه گذاری (۳/۶۱) (MS) : هزینه سرمایه گذاری (۱/۸۶۸۳) (پوند) : هزینه سرمایه گذاری (۸۲۸۶/۳۱) (کیلووات) : تلفات (۱۳۸ / ۰/۳۵) (MS) : هزینه احداث پست (۰/۰) (MS) : هزینه احداث فیدر (۰/۰) (کیلووات) : تلفات بدون در نظر گرفتن DG (۲۲۴/۹۳) (MS) : هزینه کل (۶/۳۸۹۵)					

جدول ۱۹: هزینه تطبیق سناریوها در شبکه ۶۹ شینه

هزینه تطبیق (میلیون دلار)	طرح توسعه اولیه					
	طرح ۱	طرح ۲	طرح ۳	طرح ۴	طرح ۵	طرح ۶
سناریو ۱	۰/۰	۰/۲۸۳۶	۰/۴۴۸۲	۰/۹۹۳۲	۱/۵۳۶۵	۲/۱۵۲۵
سناریو ۲	۰/۰	۰/۰	۰/۱۵۶۳	۰/۷۱۶۵	۱/۲۵۳۳	۱/۸۶۰۳
سناریو ۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۵۵۲۵	۱/۰۹۲	۱/۷۰۷۲
سناریو ۴	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱۸۹۳	۱/۱۸۴۵
سناریو ۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۶۰۳۳
سناریو ۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰

با انجام تحلیل حساسیت بر روی الگوریتم جستجوی هارمونی مقادیر پارامترهای HMS, HMCR, PAR_{min} و bw_{min} به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۳۵، ۰/۹۹

جدول ۱۷: میزان آلودگی منابع به کاررفته در شبکه ۶۹ شینه [۳۰]

منبع	NO _x (lb/MW)	SO ₂ (lb/MW)	CO ₂ (lb/MW)
سلول سوختی	۱/۱۵	۰/۰۰۸	۱۱۰۸
میکروتوربین	۰/۴۴	۰/۰۸	۱۵۹۶
فتوولتائیک	۰/۰	۰/۰	۰/۰
توربین بادی	۰/۰	۰/۰	۰/۰
شبکه	۰/۰۰۲۲۹۵۲	۰/۰۰۳۵۸۳۴	۰/۹۲۱۲۵

جدول ۱۸: نتایج جواب بهینه در هر سناریو در شبکه ۶۹ شینه

شین	میزان توان (کیلووات)	نوع، اندازه (kW) و مکان منابع تولید پراکنده			
		WT	PV	FC	MT
۳۵	میزان تولید	-	-	۹	-
	ظرفیت برنامه ریزی	-	-	۱×۵۰	-
۶۷	میزان تولید	-	-	۸۶	-
	ظرفیت برنامه ریزی	-	-	۲×۵۰	-
۴۴	میزان تولید	-	-	۵۴	-
	ظرفیت برنامه ریزی	-	-	۲×۵۰	-
۱۰	میزان تولید	-	-	۵۴	-
	ظرفیت برنامه ریزی	-	-	۲×۵۰	-
۳۴	میزان تولید	-	-	-	۷۷
	ظرفیت برنامه ریزی	-	-	-	۱×۱۵۰
۱۳	میزان تولید	-	-	-	۱۴۲
	ظرفیت برنامه ریزی	-	-	-	۱×۱۵۰

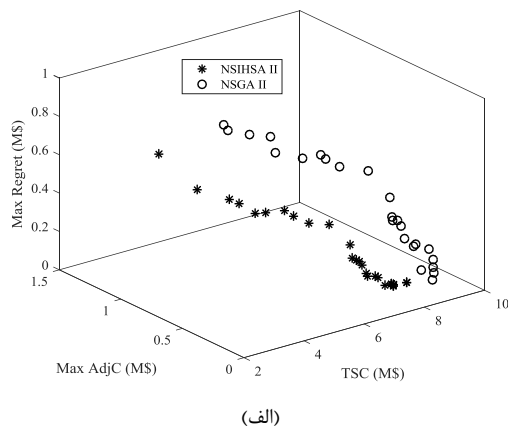
	(کیلووات)	مکان منابع تولید پراکنده			
		WT	PV	FC	MT
۳۵	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	۹ ۱×۵۰	-
۶۷	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	۸۶ ۲×۵۰	-
۴۴	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	۵۴ ۲×۵۰	-
۱۰	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	۵۴ ۲×۵۰	-
۳۴	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	-	۷۷ ۱×۱۵۰
۱۳	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	-	۱۴۳ ۱×۱۵۰
۲۸	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	-	۹۵ ۱×۱۵۰
۶۸	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	-	۱۳۱ ۱×۱۵۰
۹	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی	-	۵۹ ۱×۱۰۰	-	-
۶۶	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی	-	۷۰ ۱×۱۰۰	-	-
۴۳	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی	۹۵ ۱×۱۰۰	-	-	-
۱۹	میزان تولید ظرفیت برنامه‌ریزی	۹۱ ۱×۱۰۰	-	-	-

(MS) : ۳/۶۱ هزینه سرمایه‌گذاری
 (MS) : ۱/۸۶۸۳ هزینه بهره‌برداری
 (پوند) : ۸۲۸۶۳۱ آلودگی
 (کیلووات) : ۱۳۸ / ۰۳۵ تلفات
 (MS) : ۰/۰ هزینه احداث پست
 (MS) : ۰/۰ هزینه احداث فیدر
 (کیلووات) : ۲۲۴/۹۳ تلفات بدون در نظر گرفتن DG
 (MS) : ۶/۳۸۹۵ هزینه کل

جدول ۲۰: تابع عضویت هر یک از جواب‌های پارتو در شبکه ۶۹ شینه

جواب پارتو	μ_{TSC}	$\mu_{Max AdjC}$	$\mu_{Max Regret}$	$\sum_{i=1}^3 \mu_{f_i} - \mu_{f_i}(X) ^2$
۱	۱	۰/۰	۰/۰	۱/۸۱۵
۲	۰/۹۸۱۴	۰/۳۰۲۳	۰/۱۷۸۳	۱/۰۹۰۳
۳	۰/۸۸۵۶	۰/۴۷۰۲	۰/۲۰۲۹	۰/۷۵۷۲
۴	۰/۸۷۵۵	۰/۵۴۳۳	۰/۲۱۴۲	۰/۶۷۷۵
۵	۰/۷۶۹۵	۰/۵۶۳	۰/۳۳۱۵	۰/۴۶۱۵
۶	۰/۶۹۷۶	۰/۵۷۱۳	۰/۳۴۰۸	۰/۳۹۳۳
۷	۰/۵۶۵۴	۰/۵۸۸۶	۰/۳۶۰۴	۰/۲۹۲۳
۸	۰/۵۴۸۷	۰/۶۴۶۴	۰/۳۸۵۳	۰/۲۳۰۷
۹	۰/۵۰۱۴	۰/۷۲۳۴	۰/۴۲۳۳	۰/۱۵۰۹
۱۰	۰/۳۸۷۴	۰/۷۶۹۶	۰/۴۵۰۸	۰/۰۹۶
۱۱	۰/۳۷۶۷	۰/۹۳۵۷	۰/۵۵۶۹	۰/۰۲۱۴
۱۲	۰/۳۷۶۵	۰/۹۵۱۴	۰/۶۷۲۳	۰/۰۰۱۵
۱۳	۰/۳۵	۰/۹۵۷۳	۰/۶۹۵۶	۰/۰۰۰۱
۱۴	۰/۳۴۱۴	۰/۹۷۱۲	۰/۷۰۵۸	۰/۰۰۰۶
۱۵	۰/۳۱۷۶	۰/۹۷۱۲	۰/۷۴۵۴	۰/۰۰۳۶
۱۶	۰/۲۸۶۵	۰/۹۷۱۹	۰/۸۳۶	۰/۰۰۲۳
۱۷	۰/۲۷۶۷	۰/۹۷۴۷	۰/۸۶۴۵	۰/۰۰۳۳۱
۱۸	۰/۲۲۴۲	۰/۹۸۰۷	۰/۸۷۳۷	۰/۰۰۴۶۹
۱۹	۰/۲۰۸۴	۰/۹۸۶۶	۰/۸۹۰۵	۰/۰۰۵۷۷
۲۰	۰/۱۵۶۳	۰/۹۹۰۷	۰/۹۷۷	۰/۱۱۵۹
۲۱	۰/۱۱۵	۰/۹۹۳۸	۰/۹۷۸	۰/۱۳۴۴
۲۲	۰/۰۹۸۹	۰/۹۹۵۱	۰/۹۹۱۸	۰/۱۵۰۲
۲۳	۰/۰۹۸۹	۰/۹۹۵۱	۰/۹۹۹۳	۰/۱۵۴۶
۲۴	۰/۰	۱/۰	۱/۰	۰/۲۱۵

۰/۰۱ و ۰/۰۱ به‌دست آمدند. نتایج جداگانه هر سناریو و هزینه تطبیق در جدول‌های (۱۸) و (۱۹) آمده‌است. با مقادیر HMS ، HMC ، PAR_{min} و bw_{min} به‌دست آمده و پس از ۱۰۰ تکرار ۲۴ جواب پارتو مطابق شکل



(الف) (۸-الف) به‌دست آمده‌اند که برای نمایش و تحلیل بهتر در دو بعد مطابق شکل‌های (۸-ب)، (۸-پ) و (۸-ت) نشان داده شده‌اند. با بدر نظر گرفتن تابع عضویت ۳۵ درصد برای هزینه کل (μ_{TC})، تابع عضویت ۷۰ درصد برای معیار مقاوم‌بودن ($\mu_{f_2} = \mu_{Max Regret}$) و تابع عضویت ۹۵ درصد برای معیار انعطاف‌پذیری ($\mu_{f_3} = \mu_{Max AdjC}$)، طبق رابطه (۲۷) و جدول (۲۰)، جواب پارتو "۱۳" بهترین جواب می‌باشد که همه خواسته‌های برنامه‌ریز را با توجه به سطوح رضایت‌مندی، ارضا می‌کند. جواب بهینه پارتو شماره "۱۳" در جدول (۲۱) آمده‌است. نتایج مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم NSGA-II با همان پارامترهای جدول (۱۵)، در جدول (۲۲) آمده‌است و همان‌طور که مشاهده می‌شود شاخص‌های الگوریتم پیشنهادی از الگوریتم NSGA-II بهتر می‌باشد. در جدول (۲۳) مدل و الگوریتم پیشنهادی با سایر مراجع مقایسه شده‌است و همان‌طور که مشاهده می‌شود معیارها و عملکرد مدل پیشنهادی بهتر می‌باشد.

جدول ۲۱: نتایج جواب بهینه پارتو شماره "۱۳" در شبکه ۶۹ شینه

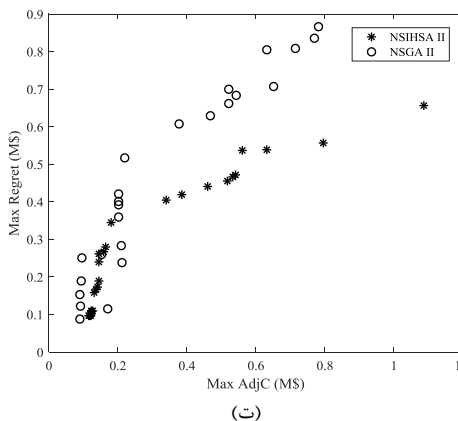
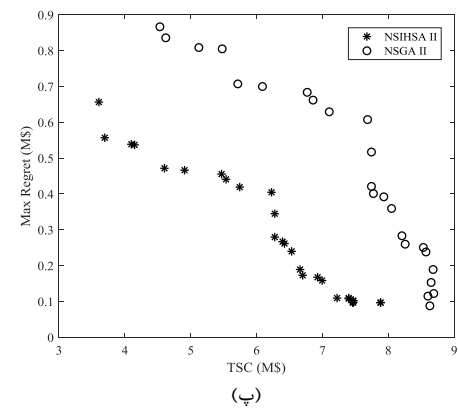
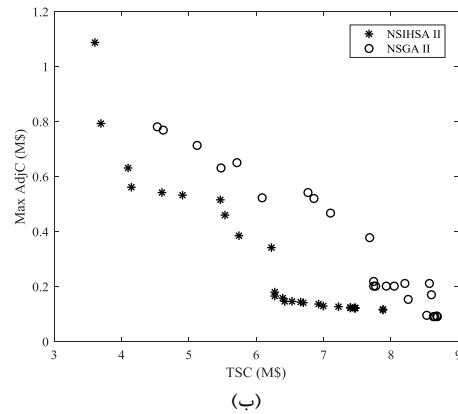
نوع، اندازه (kW) و	میزان توان	شین
--------------------	------------	-----

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نفوذ بالای منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع و وجود عدم قطعیت‌های مربوط به منابع تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، بار مصرفی و قیمت انرژی باید مدلی جامع برای برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع ارائه شود که با توجه به سناریوهای مختلف طرحی را اجرا کنند که از لحاظ هزینه کمترین هزینه را داشته باشد و در مقابل عدم قطعیت‌ها و شرایطی که در آینده رخ می‌دهد از مقاومت و انعطاف‌پذیری کافی برخوردار باشد. بنابراین در این مقاله، چارچوبی چندهدفه برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع مبتنی بر منابع تولید پراکنده، توسعه فیدها و پست‌های توزیع متعاقب افزایش بار در حضور عدم قطعیت‌های بار الکتریکی، قیمت انرژی و منابع تجدیدپذیر انرژی ارائه شد. تابع هدف هزینه کل شامل حداقل‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری، تلفات، خرید انرژی از شبکه و همچنین آلودگی می‌باشد. به منظور بررسی و اثر عدم قطعیت‌ها بر برنامه‌ریزی از دو شاخص بیشینه ریسک پشیمانی و هزینه تطبیق به عنوان توابع هدف استفاده شد تا در هنگام رخداد بدترین سناریو، برنامه‌ریزی به اندازه کافی مقاوم و منعطف باشد. در واقع یکی از مزیت‌های مدل پیشنهادی این است که با ارائه چندین طرح مناسب توسعه شبکه به جای ارائه یک طرح، توسط روش فازی امکان دخالت برنامه‌ریز سیستم به عنوان تصمیم‌گیرنده را با نیازمندی‌ها و اهداف کیفی (خواسته‌های ذهنی برنامه‌ریز) فراهم می‌کند. به عبارت بهتر برنامه‌ریز شبکه توزیع با بادر نظر گرفتن محدودیت‌های خود از جمله بودجه در دسترس (موجود) می‌تواند طرحی را برنامه‌ریزی کند تا بیشترین رضایت‌مندی را داشته باشد. یعنی اینکه برنامه‌ریز به صورت واقعی در تصمیم‌گیری اثرگذار است و با توجه به شرایط شبکه و میزان بودجه می‌تواند تصمیم‌گیری کند. این مدل که در این مقاله ارائه شده است می‌تواند توسط معاونت‌های برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع در ایران و قسمت‌های مشابه در سایر کشورها به منظور توسعه شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده استفاده شود. مدل پیشنهادی، بررسی شبکه‌های آزمون ۹ و ۶۹ باس شعاعی برای سناریوهای مختلف پیاده‌سازی و نشان داده شد که مدل ارائه‌شده و روش حل آن از روش‌هایی که تا به حال ارائه شده‌اند جواب‌های بهتری را به دست می‌آورد.

مراجع

- [1] H. Mori and T. Yoshida, "An efficient multi-objective memetic algorithm for uncertainties in distribution network expansion planning," in Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE, 2009, pp. 1-6.
- [2] S. N. Ravadanegh, N. Jahanyari, A. Amini, and N. Taghizadeghan, "Smart distribution grid multistage expansion planning under load forecasting uncertainty," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 5, pp. 1136-1144, 2016.
- [3] A. Zidan, M. F. Shaaban, and E. F. El-Saadany, "Long-term multi-objective distribution network planning by DG allocation and feeders' reconfiguration," Electric Power Systems Research, vol. 105, pp. 95-104, 2013.
- [4] K. Zou, A. P. Agalgaonkar, K. M. Muttaqi, and S. Perera, "Distribution system planning with incorporating DG



شکل ۸: جواب‌های پارتو در توابع هدف مختلف در شبکه ۶۹ شینه

جدول ۲۲: مقایسه پارامترهای DM و MID در شبکه ۶۹ شینه

روش	DM TC, Max AdjC	DM TC, Max Regret	DM Max Regret, Max AdjC	MID
NSHSA-II	۱/۰۴۴۰	۱/۲۶۰۹	۱/۰۱۸۰	۰/۵۹۰۵
NSGA-II	۱/۰۰۶۱	۱/۲۳۳۹	۱/۰۱۰۲	۰/۷۲۳۴

جدول ۲۳: مقایسه مدل پیشنهادی با سایر مراجع

روش	هزینه کل (M\$)	آلودگی (پوند)	تلفات (kW)	معیار مقاوم بودن	معیار انعطاف‌پذیری
پیشنهادی	۶/۳۹	۸۲۳۹/۳۱	۱۳۸/۰۳۵	٪۷۰	٪۹۵
SFLA-DE [۱۷]	۶/۹	۸۶۲۲/۰۲	۱۴۳/۱۱۹	-	-
MSFLA [۱۷]	۷/۲	۸۷۱۳/۴۱	۱۵۶/۰۴	-	-
SFLA [۱۷]	۷/۸۳	۸۹۲۰/۳۳	۱۷۳/۶۲	-	-
PSO [۳۵]	۷/۸۸	۸۹۸۲/۱۴	۱۷۵	-	-
GA [۳۶]	۷/۹۶	۹۰۴۲/۷۳	۱۷۵/۷۱	-	-

- incorporating fuel cell and electrolyzer," *Energy and Buildings*, vol. 102, pp. 406-416, 2015.
- [21] M. Rouholamini and M. Mohammadian, "Heuristic-based power management of a grid-connected hybrid energy system combined with hydrogen storage," *Renewable Energy*, vol. 96, pp. 354-365, 2016.
- [22] A. Tabares, J. F. Franco, M. Lavorato, and M. J. Rider, "Multistage Long-Term Expansion Planning of Electrical Distribution Systems Considering Multiple Alternatives," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 1900-1914, 2016.
- [23] M. Asensio, P. M. de Quevedo, G. Munoz-Delgado, and J. Contreras, "Joint Distribution Network and Renewable Energy Expansion Planning considering Demand Response and Energy Storage- Part I: Stochastic Programming Model," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016.
- [24] M. Rouholamini, M. Mohammadian, C. Wang, and A. A. Gharaveisi, "Optimal fuzzy-based power management for real time application in a hybrid generation system," *IET Renewable Power Generation*, 2017.
- [25] Y. Y. Haimes, *Risk modeling, assessment, and management*. John Wiley & Sons, 2015.
- [26] J. H. Zhao, Z. Y. Dong, P. Lindsay, and K. P. Wong, "Flexible transmission expansion planning with uncertainties in an electricity market," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 479-488, 2009.
- [27] S. Sakawa and H. Yano, "An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective nonlinear programming problems with fuzzy parameters," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 221-238, 1989.
- [28] S. N. Ravadanegh, N. Jahanyari, A. Amini, and N. Taghizadeghan, "Smart distribution grid multistage expansion planning under load forecasting uncertainty," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 5, pp. 1136-1144, 2016.
- [29] M. Rahmani-Andebili, "Nonlinear demand response programs for residential customers with nonlinear behavioral models," *Energy and Buildings*, vol. 119, pp. 352-362, 2016.
- [30] V. Quintana, H. Temraz, and K. Hipel, "Two-stage power system distribution planning algorithm," in *IEE Proceedings (Generation, Transmission and Distribution)*, 1993, vol. 140, no. 1, pp. 17-29.
- [31] International Energy Agency (IEA). *Distributed generation in liberalized electricity markets*. Paris: IEA; 2002.
- [32] Strachan ND, Farrell AE. *Emissions from distributed generation. Carnegie Mellon electricity industry center (CEIC) working paper*. http://wpweb2.tepper.cmu.edu/ceic/pdfs/CEIC_02_04.pdf
- [33] M. Rabiee, M. Zandieh, and P. Ramezani, "Bi-objective partial flexible job shop scheduling problem: NSGA-II, NPGA, MOGA and PAES approaches," *International Journal of Production Research*, vol. 50, no. 24, pp. 7327-7342, 2012.
- [34] J. Savier and D. Das, "Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp. 2473-2480, 2007.
- [35] T. Niknam, H. D. Mojarrad, and M. Nayeripour, "A new fuzzy adaptive particle swarm optimization for non-smooth economic dispatch," *Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 1764-1778, 2010.
- [36] H.-H. Chang, "Genetic algorithms and non-intrusive energy management system based economic dispatch for cogeneration units," *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 181-190, 2011.
- reactive capability and system uncertainties," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 112-123, 2012.
- [5] سجاد نجفی روادانق و حامد خاتمی، «طراحی شبکه توزیع بهینه و مقاوم نسبت به عدم قطعیت برآورد بار». *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۲، صفحه ۳۲۳-۳۳۲، تابستان ۱۳۹۵.
- [6] نبی طاهری، رحمت الله هوشمند و رضا همتی، «برنامه ریزی هماهنگ نصب منابع تولید پراکنده و توسعه شبکه توزیع در حضور نامعینی بار و قیمت انرژی». *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۴، شماره ۱، صفحه ۴۴-۵۶، زمستان ۱۳۹۲.
- [7] M. Haghifam, H. Falaghi, and O. Malik, "Risk-based distributed generation placement," *IET Generation Transmission and Distribution*, vol. 2, no. 2, pp. 252-260, 2008.
- [8] E. Naderi, H. Seifi, and M. S. Sepasian, "A dynamic approach for distribution system planning considering distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1313-1322, 2012.
- [9] G. Muñoz-Delgado, J. Contreras, and J. M. Arroyo, "Multistage generation and network expansion planning in distribution systems considering uncertainty and reliability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 3715-3728, 2016.
- [10] G. Celli, E. Ghiani, G. Soma, and F. Pilo: *Planning of reliable active distribution systems*: in Proc. CIGRE 2012, 2012, pp. 1-12.
- [11] M. S. Nazar, M. R. Haghifam, and M. Nažar, "A scenario driven multiobjective Primary-Secondary Distribution System Expansion Planning algorithm in the presence of wholesale-retail market," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 40, no. 1, pp. 29-45, 2012.
- [12] S. Favuzza, G. Graditi, M. G. Ippolito, and E. R. Sanseverino, "Optimal electrical distribution systems reinforcement planning using gas micro turbines by dynamic ant colony search algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 580-587, 2007.
- [13] H. Xing, H. Cheng, Y. Zhang, and P. Zeng, "Active distribution network expansion planning integrating dispersed energy storage systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 3, pp. 638-644, 2016.
- [14] V. F. Martins and C. L. Borges, "Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 2164-2172, 2011.
- [15] S. F. Santos et al., "Novel Multi-Stage Stochastic DG Investment Planning with Recourse," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 164-178, 2017.
- [16] U. Sultana, A. B. Khairuddin, A. Mokhtar, N. Zareen, and B. Sultana, "Grey wolf optimizer based placement and sizing of multiple distributed generation in the distribution system," *Energy*, vol. 111, pp. 525-536, 2016.
- [17] H. Doagou-Mojarrad, G. Gharehpetian, H. Rastegar, and J. Olamaei, "Optimal placement and sizing of DG (distributed generation) units in distribution networks by novel hybrid evolutionary algorithm," *Energy*, vol. 54, pp. 129-138, 2013.
- [18] M. Esmaili, M. Sedighzadeh, and M. Esmaili, "Multi-objective optimal reconfiguration and DG (Distributed Generation) power allocation in distribution networks using Big Bang-Big Crunch algorithm considering load uncertainty," *Energy*, vol. 103, pp. 86-99, 2016.
- [19] R. R. Gonçalves, J. F. Franco, and M. J. Rider, "Short-term expansion planning of radial electrical distribution systems using mixed-integer linear programming," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 3, pp. 256-266, 2014.
- [20] M. Rouholamini and M. Mohammadian, "Energy management of a grid-tied residential-scale hybrid renewable generation system

⁴ Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA)

⁵ Harmony memory size (HMS)

⁶ Harmony memory consideration rate (HMCR)

⁷ Pitch adjustment rate (PAR)

⁸ Diversification metric (DM)

⁹ Mean ideal distance (MID)

¹ Distributed generation (DG)

² Total cost (TC)

³ Non-dominated sorting improved harmony search algorithm (NSIHS)