ارائه رویکردی مقاوم و منعطف برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و عدم‌قطعیت‌های 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 ازجمله منابع انرژی تجدیدپذیر و عدم‌قطعیت‌های آن‌ها و همچنین عدم‌قطعیت‌های بار و قیمت انرژی، رویکردهای جدیدی برای برنامه‌ریزی شبکه توزیع باید پیشنهاد شود. در حقیقت ابزارهای برنامه‌ریزی به‌صورت مقاوم و انعطاف‌پذیر برای بررسی سیستم و مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌ها نیاز است. در این مقاله به‌منظور مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌ها، یک تحلیل سناریو پیشنهاد می‌شود و به‌منظور بررسی اثر عدم‌قطعیت‌ها در مدل پیشنهادی، شاخص‌های مناسبی ازجمله شاخص بیشینه پشیمانی به‌عنوان معیار مقاوم بودن پاسخ و بیشینه هزینه تطبیق به‌عنوان معیار انعطاف‌پذیری مورداستفاده قرار می‌گیرند. مدل پیشنهادی به‌صورت چندهدفه است که با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی بهبود یافته حل می‌شود و توسط روش تصمیم‌گیری فازی با توجه به معیارهای برنامه‌ریز جواب نهایی انتخاب می‌شود. به‌منظور نشان‌دادن کارایی مدل پیشنهادی، این مدل برروی 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 Rastgou[1], PhD Student; Jamal Moshtagh[2], Associate Professor; Salah Bahramara[3], 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 خواهندبود. عدم‌قطعیت‌ها سبب می‌شوند که طرح نهایی 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[1] و عدم‌قطعیت‌های 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 همان‌طورکه 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 [۱-۶] (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 عدم‌قطعیت‌ها نخواهندبود 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 عدم‌قطعیت‌ها 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 عدم‌قطعیت 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[2] (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 عدم‌قطعیت‌ها با بادرنظرگرفتن همه سناریوها مدل‌سازی کند و شاخص‌های ریسک نیز خود به‌عنوان توابع هدف در یک مساله چندهدفه وارد شوند. بنابراین مساله برنامه‌ریزی شبکه توزیع به عنوان یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه مدل می‌شود که بعضی از توابع هدف آن معیارها و شاخص‌های ریسک خواهندبود. 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 خواهندداشت. 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 درواقع 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 بادرنظرگرفتن عدم‌قطعیت‌ها به‌صورت یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه بادرنظرگرفتن شاخص‌های انعطاف‌پذیری و مقاوم‌بودن
- ارائه الگوریتم بهبودیافته جستجوی هارمونی با مرتب‌سازی نامغلوب[3] 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 عدم‌قطعیت‌ها و روش بهینه‌سازی و انتخاب جواب بهینه با استفاده از روش فازی آمده‌است. در بخش چهارم مدل پیشنهادی برروی شبکه‌های توزیع ۹

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

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 وDG	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	جهش 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.

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}\text{COL} &= \sum_{t\in\Omega^t}(1+\text{d})^{-t}\times(\text{Losses}^t\times C_B\times\pi_s), \\ \text{Losses}^t &= \sum_{\substack{i\in\Omega^{NB}\\ i\neq j}}\sum_{\substack{j\in\Omega^{NLB}\\ i\neq j}}\left(\frac{(|\text{V}_{t,i}|-|\text{V}_{t,j}|)^2}{|Z_{ij}|}\right)\times\cos\varphi.\end{aligned} \quad (۶)$$

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

$$\begin{aligned}\text{CPE} = \sum_{t\in\Omega^t}(1+\text{d})^{-t}\Bigg\{&\Bigg(\sum_{i\in\Omega^{NB}}\sum_{k\in\Omega^{DG}}\text{P}_{t,i,k}^{OP}\times C_B\times\sum_{e\in\Omega^{GE}}E_{k,m}^{DG}\Bigg) \\ &+\Bigg(\Big(\sum_{h\in\Omega^{EDS}}P_{t,h}^{PS}+\sum_{y\in\Omega^{CDS}}P_{t,y}^{PS}\Big)\times C_B\times\sum_{e\in\Omega^{GE}}E_m^G\Bigg)\Bigg\}.\end{aligned} \quad (۸)$$

در روابط (۱-۸) ، COF، CDS، ICD، OCD، COL، CPPو CPE به‌ترتیب هزینه احداث فیدر [۱]، احداث پست[۲]، سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده، تلفات [۱۴]، توان خریداری از شبکه و آلودگی می‌باشد. t/Ω^t، y/Ω^{CDS}، λ/Ω^F، $i,j/\Omega^{NB},\Omega^{NLB}$، $k,k'/\Omega^{DG}$، h/Ω^{EDS} و e/Ω^{GE} به‌ترتیب مجموعه و اندیس برای زمان، پست‌های توزیع کاندیدا، فیدرهای کاندیدا، کل شین‌ها و شین‌های بار، منابع DG، پست‌های موجود و گازهای تولیدی می‌باشند. همچنین $n_{t,\lambda}$ تعداد فیدری که باید احداث شود، $n_{t,y}$ تعداد پستی که باید احداث شود، C_k^{INV} هزینه سرمایه‌گذاری DG ام k، C_k^{OP} هزینه بهره‌برداری DG ام k، d نرخ بهره، C_B ظرفیت مبنا برحسب مگاولت آمپر، $P_{t,i,k}^{OP}$ توان تولیدی DG ام k در شین i در زمان t، $V_{t,i}$ ولتاژ شین i در زمان t، Z_{ij} امپدانس فیدر بین شین i و j، $\cos\varphi$ ضریب توان سیستم، π_s قیمت انرژی، $P_{\text{t,h}}^{PS}$ توان خریداری‌شده از پست h در زمان t، $P_{t,y}^{PS}$ توان خریداری‌شده از پست کاندید 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.

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

$$P_{t,i,k}^{OP} \times C_B \le P_k^{CAP} \quad \forall t \in \Omega^t,\ \forall i \in \Omega^N,\ \forall k \in \Omega^{DG} \tag{۹}$$

$$V_i^{\min} \le V_{t,i} \le V_i^{\max} \quad \forall t \in \Omega^t,\ \forall i \in \Omega^N \tag{۱۰}$$

$$P_{t,h}^{PS}, P_{t,y}^{PS} \le P_h^{PS-Max}, P_y^{PS-Max} \quad \forall t \in \Omega^t, \forall y \in \Omega^{CDS}, \forall h \in \Omega^{EDS} \tag{۱۱}$$

$$P_{t,ij}(n_{ij}^0 + n_{t,\lambda}) \times C_B \le P_{ij}^{\max} \quad \forall t \in \Omega^t,\ \underset{i \ne j}{\forall} i, j \in \Omega^N \tag{۱۲}$$

$$\{\sum_j \{P_{t,ji}(n_{ij}^0 + n_{t,\lambda}) - \text{Losses}_{ij}^t\} - \sum_j p_{t,ij}(n_{ij}^0 + n_{t,\lambda}) + \sum_k P_{t,i,k}^{OP}\} \times C_B = D_{t,i}, \tag{۱۳}$$
$$\forall t \in \Omega^t,\ \underset{i \ne j}{\forall} i \in \Omega^{NLB},\ \underset{i \ne j}{\forall} j \in \Omega^{NB}, \forall k \in \Omega^{DG}, \lambda \in \Omega^F.$$

$$\text{Radial structure of distribution network} = 1 \tag{۱۴}$$

که، P_k^{CAP} بیشینه ظرفیت تولیدی DG ام k، P_h^{SS-MAX} بیشینه ظرفیت پست ام h، P_{ij}^{MAX} بیشینه 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، $D_{t,i}$ میزان بار در شین i در زمان t، $V_i^{\max}, V_i^{\min}$ به‌ترتیب کمینه و بیشینه ولتاژ شین i می‌باشند.

۲-۲- بیشینه ریسک پشیمانی (معیار مقاوم‌بودن)

یکی از معروف‌ترین شاخص‌های ریسک، شاخص حداکثر پشیمانی است که به‌معنای 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	پشیمانی	بیشینه پشیمانی
	اول	دوم	در سناریو اول	در سناریو اول	طرح‌ها
(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. به‌عبارت‌دیگر این پاسخ فاصله نسبتاً کمی با پاسخ‌های بهینه سناریوهای مختلف دارد. با توجه به تابع هدف رابطه (۱)، میزان پشیمانی یک پاسخ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

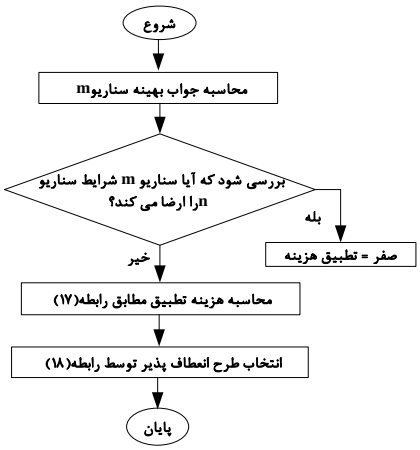
$$regret(X, s) = TSC(X, s) - TSC(\bar{X}, s) \tag{۱۵}$$

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

$$\underset{X}{Min}\ \underset{S}{Max}\left(regret(X, s)\right) \tag{۱۶}$$

۲-۳- بیشینه 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 مازاد هزینه سرمایه‌گذاری موردنیاز برای تبدیل آن طرح به طرحی است که کارایی آن حداقل برابر کارایی گزینه بهینه آن سناریو باشد. به‌عنوان مثال اگر چند سناریو موجود باشد و برنامه‌ریزی برای سناریو m انجام شود و در عمل سناریو n رخ دهد میزان هزینه مازادی که باید صرف شود تا شرایط سناریو n ارضا شود، هزینه تطبیق می‌باشد. لذا یکی از توابع هدف کمینه‌سازی بیشینه هزینه تطبیق $(AdjC)$ می‌باشد. در این مقاله میزان هزینه مازاد پیشنهادی تعداد DG که در شبکه باید گنجانده شود تعریف می‌شود و مطابق روابط (۱۷) و (۱۸) می‌باشدکه $s,m,n / \Omega^S$ بیانگر مجموعه و اندیس سناریوها می‌باشد. فلوچارت محاسبه هزینه تطبیق در شکل (۱) آمده‌است.

$$AdjC = \sum_{t \in \Omega^t} \sum_{i \in \Omega^{NB}} \sum_{k' \in \Omega^{DG}} (1+\mathrm{d})^{-t} \times (C_{k'}^{INV} \times C_B \times P_{t,i,k'}^{OP}) + 365 \times 24 \times \sum_{t \in \Omega^t} \sum_{i \in \Omega^{NB}} \sum_{k' \in \Omega^{DG}} (1+\mathrm{d})^{-t} \times (C_{k'}^{OP} \times C_B \times P_{t,i,k'}^{OP}). \tag{۱۷}$$

$$\min \max_{\substack{m,n \in \Omega^S \\ m \ne n}} AdjC(m,n). \tag{۱۸}$$

۳- روش حل

۳-۱- مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌ها

در این مقاله برای بررسی عدم‌قطعیت‌ها از تحلیل سناریو استفاده شده‌است. در این روش آینده توسط چند سناریو پیش‌بینی می‌شود و سپس برنامه‌ریزی به‌نحوی تعیین می‌گردد 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 تصمیم‌گیری می‌توان به یک پاسخ بهینه دست یافت که در همه سناریوها از کارایی مناسبی برخوردار باشد. منظور از سناریو یک آینده ممکن خواهدبود که در آن مقادیر پارامترهای غیرقطعی مشخص شده‌اند.

۳-۲- الگوریتم جستجوی هارمونی با مرتب‌سازی نامغلوب

اساس کار الگوریتم پیشنهادی به این‌صورت می‌باشد که در ابتدا محدوده متغیرها و پارامترهای الگوریتم ازجمله اندازه حافظه هارمونی[۵] (*HMS*) که تعداد بردارهای جواب را در حافظه هارمونی نشان می‌دهد، سرعت بررسی حافظه هارمونی[۶] (*HMCR*)، سرعت تنظیم قطعات[۷] (*PAR*) و بیشینه تعداد تکرارها یا شرط توقف، وارد می‌شوند. سپس به‌صورت تصادفی از محدوده مقادیر ممکن متغیرهای تصمیم مطابق رابطه (۱۹)، یک حافظه هارمونی مطابق رابطه (۲۰) تشکیل می‌شود.

$$x_{i,j} = x_j^{\min} + r_j \times (x_j^{\max} - x_j^{\min}) \quad i = 1,...,\mathrm{HMS}, \quad j = 1,...N \tag{۱۹}$$

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 & f(x^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 & f(x^2) \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{\mathrm{HMS}} & x_2^{\mathrm{HMS}} & \dots & x_n^{\mathrm{HMS}} & f(x^{\mathrm{HMS}}) \end{bmatrix} \tag{۲۰}$$

که، $x_j^{\min}$ و $x_j^{\max}$ 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 به‌دست‌آمده به‌ازای بردار اول می‌باشد. با استفاده از سه مکانیزم انتخاب تصادفی، بررسی حافظه و سرعت تنظیم قطعات، هارمونی جدید $x^{\mathrm{new}} = (x_1^{\mathrm{new}}, x_2^{\mathrm{new}}, ..., x_{\mathrm{HMS}}^{\mathrm{new}})$ تولید می‌شود که مطابق رابطه (۲۱) می‌باشد.

$$x^{\mathrm{new}} = \begin{cases} (x_1^{\mathrm{new}}, x_2^{\mathrm{new}}, ..., x_{\mathrm{HMS}}^{\mathrm{new}}) & \text{probability} = HMCR \\ x & \text{probability} = 1 - HMCR \end{cases} \tag{۲۱}$$

برای هر بردار باید امتحان شود که آیا تنظیم قطعات برروی آن انجام شود؟ اگر جواب "بله" بود با احتمال *PAR* مطابق رابطه (۲۲) همسایه‌های بالا و پایین نقطه به‌دست‌آمده را موردبررسی قرار می‌دهد.

$$x_j^{new} \leftrightarrow x_j^{new} \pm \mathrm{rand}() \times bw \tag{۲۲}$$

که *bw* پهنای بررسی و ()rand عددی تصادفی بین صفر و یک می‌باشد. اگر جواب منفی باشد، با احتمال *1-PAR* کاری انجام نمی‌دهد و اگر هارمونی جدید تولیدشده بهتر از بهترین هارمونی موجود در حافظه باشد، جایگزین آن می‌شود. گام سوم و چهارم آن‌قدر تکرار می‌شوند تا شرط توقف برآورده شود. شرط توقف همان تعداد تکرارها می‌باشد. در اصلاح الگوریتم به‌جای استفاده از مقادیر ثابت متغیرها، آن‌ها را به‌صورت وابسته به تکرار در نظر می‌گیرند. پارامترهای اصلاح‌شده مطابق روابط (۲۳) و (۲۴) می‌باشند.

$$\mathrm{PAR}(\mathrm{Itr}) = \mathrm{PAR}_{\min} + \frac{(\mathrm{PAR}_{\max} - \mathrm{PAR}_{\min})}{\mathrm{NI}} \times \mathrm{Itr} \tag{۲۳}$$

$$\mathrm{bw}(\mathrm{Itr}) = \mathrm{bw}_{\max} \times \mathrm{e}^{\left(\frac{\mathrm{Ln}\left(\frac{\mathrm{bw}_{\min}}{\mathrm{bw}_{\max}}\right)}{\mathrm{NI}} \times \mathrm{Itr} \right)} \tag{۲۴}$$

که، *PAR*(*Itr*) سرعت تنظیم قطعات در هر تکرار، $\mathrm{PAR}_{\min}$ و $\mathrm{PAR}_{\max}$ به‌ترتیب کمینه و بیشینه سرعت تنظیم قطعات، NI بیشینه تکرار درنظر گرفته‌شده، *bw*(*Itr*) پهنای باند در هر تکرار، $\mathrm{bw}_{\min}$ و $\mathrm{bw}_{\max}$ به‌ترتیب کمینه و بیشینه پهنای باند می‌باشد. در ابتدا یک مجموعه پاسخ به‌کمک حدس اولیه به‌دست می‌آید. روش کار الگوریتم مبتنی بر طبقه‌بندی پاسخ‌ها به چند سطح شبه‌بهینه می‌باشد. به‌این‌ترتیب که پاسخ‌های سطح اول در کل فضای پاسخ‌های ممکن، شبه‌بهینه باشند، پاسخ‌های سطح دوم در کل فضا به جز پاسخ‌های سطح اول، شبه‌بهینه باشند و به‌همین‌ترتیب این روند ادامه می‌یابد. پس از تقسیم‌بندی کلیه پاسخ‌ها به سطوح مختلف، پاسخ‌های متعلق به یک سطح، یک عدد دلخواه به‌عنوان برازندگی نسبت داده می‌شود. به سطح اول بزرگ‌ترین برازندگی و سپس به سایر سطوح به‌ترتیب برازندگی‌های کوچکتر اختصاص داده می‌شوند. معیار ثانویه‌ای که برای طبقه‌بندی و امتیازدهی جواب‌ها استفاده می‌شود فاصله ازدحامی می‌باشد، به‌نحوی که هرچه در همسایگی یک طرح، طرح‌های بیشتری حضور داشته باشند، برازندگی آن طرح کاهش می‌یابد. فرض شود که جواب‌های شبه‌بهینه $i-1$ و $i+1$ به‌ترتیب جواب‌های قبل و بعد جواب i می‌باشند دراین‌صورت فاصله ازدحامی جواب i مطابق رابطه (۲۵) می‌باشد.

$$d_i = d_i^1 + d_i^2,$$
$$d_i^1 = \frac{f_1(x_{i+1}) - f_1(x_{i-1})}{f_1^{\max} - f_1^{\min}},$$
$$d_i^2 = \frac{f_2(x_{i-1}) - f_2(x_{i+1})}{f_2^{\max} - f_2^{\min}}. \tag{۲۵}$$

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

۳-۳- روش تصمیم‌گیری فازی

در این روش به‌ازای هر تابع هدف، یک تابع عضویت تعریف می‌شود. مقدار این تابع عضویت برای یک پاسخ، نشان‌دهنده سطح رضایت‌مندی از آن می‌باشد. اگر مقدار تابع هدف در یک گزینه منجر به عضویت ۱ شود ($\mu_{f_i}(\bar{X}) = 1$) تصمیم‌گیرنده از آن پاسخ رضایت‌مندی کامل دارد و برعکس اگر مقدار یک تابع هدف در یک پاسخ منجر به عضویت

صفر شود ($\mu_{f_i}(\bar{X})=0$) تصمیم‌گیرنده از آن گزینه کاملاً ناراضی خواهدبود. در این مقاله از تابع خطی برای توابع عضویت استفاده‌شده که مطابق رابطه (۲۶) می‌باشد. پس از تعریف تابع عضویت با استفاده از روش حداقل‌سازی مجموع متریک اختلاف‌ها، مطابق رابطه (۲۷) می‌توان پاسخ نهایی را به‌دست آورد[۲۷].

$$\mu_{f_i}(\bar{X})=\begin{cases}0 & f_i(\bar{X})>f_i^{\max}\\ \dfrac{f_i^{\max}-f_i(\bar{X})}{f_i^{\max}-f_i^{\min}} & f_i^{\min}\le f_i(\bar{X})\le f_i^{\max}\\ 1 & f_i(\bar{X})<f_i^{\min}\end{cases} \quad (۲۶)$$

$$\min\sum\left|\mu_{r_i}-\mu_{f_i}(\bar{X})\right|^2 \quad (۲۷)$$

۳-۴- روش پیشنهادی

شکل (۲) نحوه کدگذاری در الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، در هارمونی اول در سال اول، در شین‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب باید ۱۲ و ۱۵ کیلووات سلول سوختی نصب شود. فلوچارت پیشنهادی، حل مدل پیشنهادی در شکل (۳) آمده‌است. در ابتدا *TSC* هر سناریو مطابق رابطه (۱) به‌صورت جداگانه توسط الگوریتم جستجوی هارمونی به‌صورت تک‌هدفه محاسبه می‌شود. سپس میزان شاخص پشیمانی و تطبیق هر سناریو مطابق فلوچارت شکل (۱) بررسی و طبق رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود. این جواب‌ها به‌عنوان جواب هارمونی اول، به الگوریتم داده می‌شوند. سپس توسط عملگرهای *HMCR*، *PAR* و *bw* هارمونی جدیدی از هارمونی قبلی تشکیل می‌گردد. و محاسبات برروی هارمونی جدید انجام می‌گیرد. این مراحل تا رسیدن به حداکثر تکرار الگوریتم، ادامه می‌یابد. درنهایت توسط روش تصمیم‌گیری فازی از بین جواب‌ها بهترین جواب مطابق خواسته‌های برنامه‌ریز انتخاب می‌شود.

۴- نتایج عددی

برای پیاده‌سازی استراتژی پیشنهادی، یک شبکه توزیع مطابق شکل (۴) به‌عنوان سیستم آزمون انتخاب شده‌است. این سیستم دارای ۹ شین می‌باشد که یک شین آن، پست توزیع ۱۳۲/۳۳ kV با ظرفیت ۴۰MVA و دیگر شین‌ها نقاط تغذیه بار می‌باشند. اطلاعات مربوط به خطوط در جدول (۳) آمده‌است و برنامه‌ریزی در بار پیک به‌ازای سناریوهای متفاوت انجام‌شده‌است [۲۸]. همچنین شش منبع DG شامل توربین بادی، سلول سوختی، میکروتوربین، موتور دیزلی، فتوولتاییک و توربین گازی مطابق جدول‌های (۴) و (۵) به‌کار گرفته شده‌است. توان خروجی توربین بادی (PW) و فتوولتاییک (PS) مطابق رابطه‌های (۲۸) و (۲۹) می‌باشد. که v و H به‌ترتیب سرعت باد و میزان تابش خورشید می‌باشند. با توجه به وضعیت شبکه، سه سناریو مختلف تعریف می‌شود:

$$PW^{(kW)}=\begin{cases}0 & 0\le v\le 4\\ 166.6(v-4) & 4<v\le 14\\ 1666 & 14<v\le 25\\ 0 & 25<v\end{cases} \quad (۲۸)$$

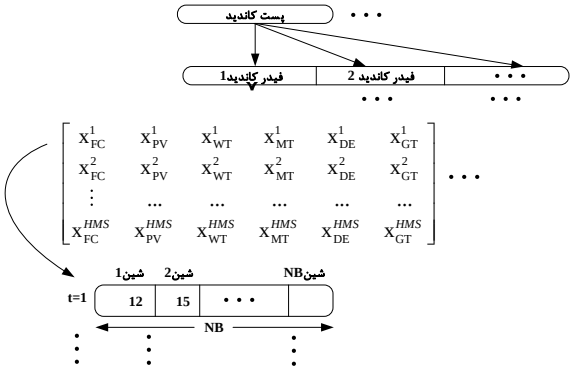
$$PS^{(kW)}=270\times 0.12\times H \quad (۲۹)$$

سناریو ۱: افزایش بار سالانه به‌میزان ۵٪، قیمت انرژی ۸۵ دلار بر مگاوات ساعت، اضافه‌شدن 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

سناریو۲: افزایش بار سالانه به‌میزان ۱۲٪، قیمت انرژی ۸۳ دلار بر مگاوات ساعت، اضافه‌شدن بار نقاط ۵ و ۶ در سال دوم، سرعت باد ۱۵ متربرثانیه و میزان تابش ۴ کیلووات بر مترمربع

سناریو۳: افزایش بار سالانه به‌میزان ۱۷٪، قیمت انرژی ۸۱ دلار بر مگاوات ساعت و اضافه‌شدن بار نقاط ۵ و ۶ در سال سوم، سرعت باد ۲۲ متربرثانیه و میزان تابش ۴/۵ کیلووات بر مترمربع

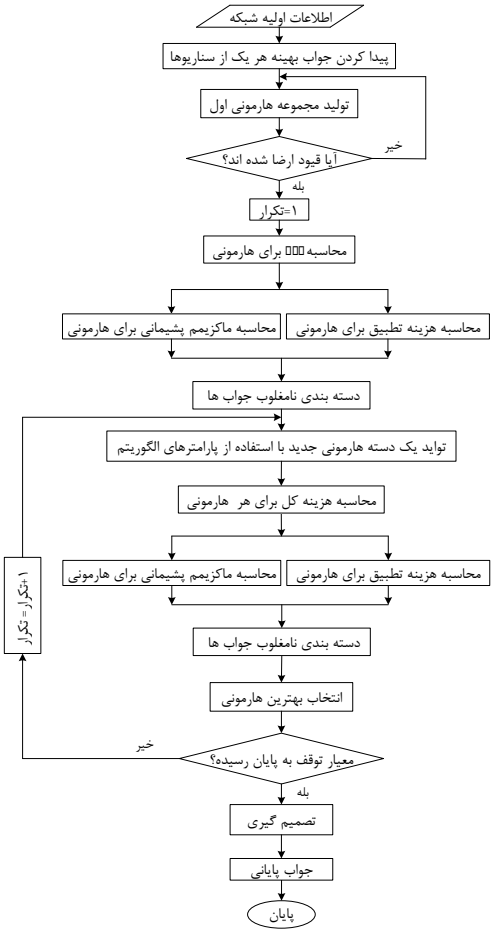
برای پیاده‌سازی الگوریتم لازم است که در ابتدا پاسخ بهینه هر سناریو به‌طور مستقل و با توجه به تابع هدف رابطه (۱) تعیین گردد. برای این منظور به‌ازای هر سناریو یک بهینه‌سازی با یک تابع هدف انجام‌شده



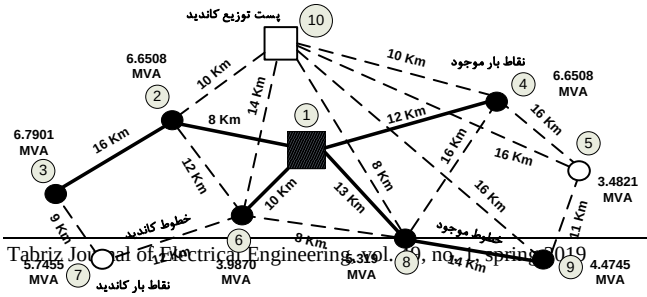
شکل ۲: نحوه کدگذاری جواب‌ها در الگوریتم پیشنهادی

که این بهینه‌سازی نیز با الگوریتم جستجوی هارمونی انجام شده‌است. در این حالت به‌منظور به‌دست‌آوردن بهترین عملکرد الگوریتم، آنالیز حساسیت برروی پارامترهای الگوریتم انجام شده‌است. لذا برای هر پارامتر، الگوریتم ۱۰ مرتبه اجرا و کمترین مقدار تابع هدف رابطه (۱) و میانگین آن‌ها در جدول‌های (۶-۸) آمده‌است. از جدول (۶) به‌ترتیب برای سناریوهای (۱-۳) دیده می‌شود که مقادیر بزرگ پارامتر *HMCR* سبب عملکرد بهتر الگوریتم در این مساله می‌شود. مطابق جدول (۶) بهترین مقادیر برای *HMS* و *HMCR* در این برای سناریوهای (۱-۳) به‌ترتیب برابر ۲۵ و ۰/۹۹ می‌باشد. در جدول (۷) آنالیز حساسیت برروی پارامتر PAR_{min} به ازای مقادیر *HMS* و *HMCR* به‌دست آمده از جدول (۶) انجام شده‌است و مشاهده می‌شود که برای سناریوهای (۱-۳)، این پارامتر برابر ۰/۰۱ می‌باشد. در جدول (۸) آنالیز حساسیت برروی پارامتر bw_{min} به‌ازای *HMS* و *HMCR* و PAR_{min} مربوط به هر سناریو که در جدول (۶) و (۷) محاسبه شد، آمده‌است. مطابق جدول

(۸) بهترین حالت به‌ازایbw_{min}=۰/۰۱ برای سناریوهای(۱-۳) به‌دست آمده‌است. در همه سناریوها مقدار پارامتر *pf* برابر ۱۰۰۰۰ [۲۹] دلار بر تن بر ساعت، ضریب توان ۰/۸، ولتاژ بیشینه و کمینه در هر شین به‌ترتیب ۰/۹۵ و ۱/۰۵ پریونیت و نرخ تورم ۳٪ درنظر گرفته شده‌است. مقادیر بهینه به‌دست‌آمده برای هر سناریو به‌طور مجزا در جدول‌های (۹-۱۱) آمده‌است. پس از محاسبه حل بهینه سناریوها برای رابطه (۱)، هزینه تطبیق برای هر یک از سناریوها محاسبه می‌شود. به‌عنوان‌مثال 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 غیراین‌صورت رابطه (۱۷) برای گسترش طرح سناریو اول به‌منظور ارضا سناریو دوم حل می‌شود. دلیل این امر این است که ممکن‌است 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 به‌منظور درک واضح‌تر برای سیستم آزمون نمونه در شکل (۵) آمده‌است. هزینه تطبیق برای هریک از سناریوها در جدول (۱۲) آمده‌است. با مقادیر *HMCR*،*HMS* ، PAR_{min} و bw_{min} به‌دست‌آمده از جدول‌های (۷)-(۹) و پس از ۱۰۰ تکرار ۱۵ جواب پارتو مطابق شکل (۶-الف) به‌دست 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. به‌عنوان مثال اگر حداکثر بودجه 300M$ باشد با توجه به شکل ۶(ج) حداکثر شاخص پشیمانی 107.26M$ خواهدبود. همچنین مطابق شکل ۶(ب) با همین بودجه حداکثر هزینه تطبیق برابر 107.26M$ خواهدبود. به‌عبارت‌دیگر با این محدودیت بودجه دردسترس، انعطاف‌پذیرترین پاسخ ممکن حداقل دارای هزینه تطبیقی برابر 107.26M$ خواهدبود. به‌این‌ترتیب 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% خواهدبود و انتخاب سطوح بالاتر غیرمنطقی می‌باشد. این فرآیند را می‌توان برای تعیین حداکثر سطح رضایت‌مندی شاخص مقاوم‌بودن نیز استفاده کرد. به‌این‌ترتیب برنامه‌ریز سیستم می‌تواند محدوده پاسخ‌های ممکن را با توجه به محدودیت‌هایی که با آن روبه‌رو است تعیین کند. بنابراین به‌منظور انتخاب جواب بهینه مطابق نظر و میل برنامه‌ریز، میزان سطح رضایت‌مندی هر یک از جواب‌های پارتو مطابق رابطه (۲۶) در جدول (۱۳) آمده‌است. بادرنظرگرفتن تابع عضویت ۷۰ درصد برای هزینه کل ، تابع عضویت ۷۰ درصد برای معیار مقاوم‌بودن و تابع عضویت ۷۰ درصد برای معیار انعطاف‌پذیری ، طبق رابطه (۲۷) و جدول (۱۳)، جواب پارتو شماره "۹" بهترین جواب 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 عدم‌قطعیت‌های غیرتصادفی، 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 نشان‌دادن کارایی، روش پیشنهادی با روش NSGA II مقایسه و در شکل (۶) نشان داده شده‌است. پارامترهای الگوریتم NSGA II به‌کاررفته مطابق جدول(۱۵) می‌باشد. برای مقایسه جواب‌های پارتو روش‌های چندهدفه از دو شاخص اندازه تنوع۸ و فاصله ایده‌آل میانگین۹ 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: فلوچارت حل مدل پیشنهادی



شکل ۴: سیستم آزمون نمونه ۹ شینه توزیع

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

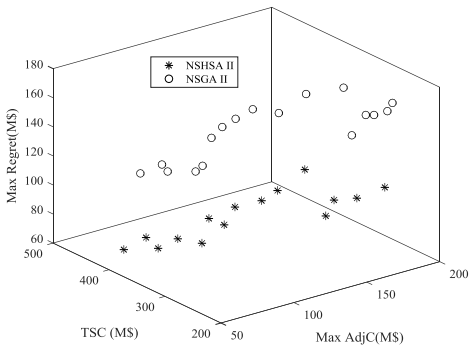
از شین (i)	به شین (j)	امپدانس	هزینه احداث (M$)	بیشینه توان عبوری (MW)
۱	۲	۰/۰۳۵۴	۰/۳۱	۶/۸
۱	۴	۰/۰۴۵۷	۰/۴۲	۶/۸
۱	۶	۰/۰۴۱۶	۰/۳۱	۴/۵
۱	۸	۰/۰۵۵۴	۰/۳۱	۵/۵
۲	۳	۰/۰۸۳۱	۰/۸۲	۱/۵
۸	۹	۰/۰۷۷۶	۰/۳۱	۱/۶
۳	۷	۰/۰۴۰۵	۰/۳۱	۱/۲
۶	۷	۰/۰۴۵۷	۰/۴۲	۱/۲
۲	۶	۰/۰۴۵۷	۰/۴۲	۱/۲
۶	۸	۰/۰۳۴۶	۰/۳۱	۱/۲
۴	۸	۰/۰۸۳۱	/۸۲	۱/۲
۴	۵	۰/۰۸۳۱	۰/۸۲	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 به‌کاررفته [۳۱]

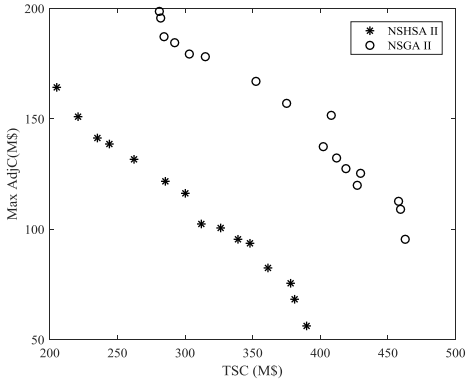
منبع	سایز واحد (kW)	محدودیت ظرفیت (kW)	هزینه سرمایه‌گذاری ($/kW)	هزینه بهره‌برداری ($/kWh)
موتور دیزلی	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰	۰/۰۴۵
سلول سوختی	۱۵۰۰	۳۰۰۰	۳۵۰۰	۰/۰۵۰
توربین گازی	۱۰۰۰	۴۰۰۰	۱۰۰۰	۰/۰۴۰
میکرو توربین	۲۰۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۰/۰۵۰
فتوولتاییک	۱۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰۰	۰/۰۰۵
توربین بادی	۱۰۰۰	۴۰۰۰	۴۵۰۰	۰/۰۱۰

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

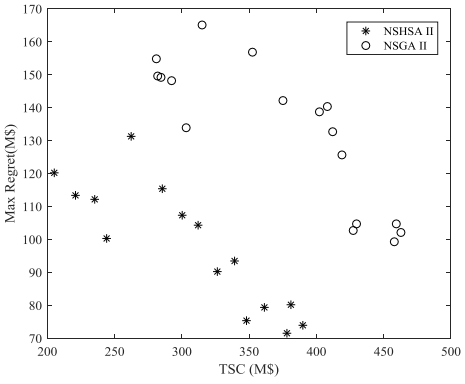
منبع	NO_X (kg/kWh)	SO_2 (kg/kWh)	CO_2 (kg/kWh)	CO (kg/kWh)	PM_{10} (kg/kWh)
DE	۰/۰۰۲۱۳	۰/۰۰۱۲۵	۰/۶۲۵	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۰۳۶
FC	۰/۰۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۰۲۴	۰/۴۴۷	۰/۰	۰/۰
GT	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۶۲۵	۰/۰۰۰۴۲	۰/۰۰۰۰۴۱
MT	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۳۷	۰/۷۲۵	۰/۰۰۰۴۷	۰/۰۰۰۰۴۱
PV	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
WT	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
شبکه	۰/۰۰۲۲۹۵۲	۰/۰۰۳۵۸۳۴	۰/۹۲۱۲۵	-	-



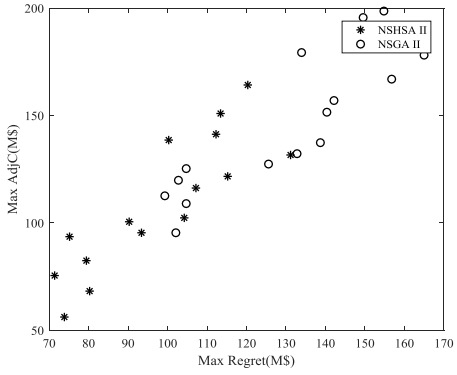
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

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

جدول ۶: تحلیل حساسیت برای پارامترهای HMS و HMCR به‌ازای PAR_{min}=۰/۴ و bw_{min}=۰/۱ در سناریوهای (۱)-(۳)

سناریو ۱

HMCR	HMS ۱۰		HMS ۲۵		HMS ۳۵		HMS ۵۰	
	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین
۰	۲/۳۶۲۷×۱۰^۸	۲/۳۴۳۴×۱۰^۸	۲/۳۶۲۱×۱۰^۸	۲/۳۶۳۲×۱۰^۸	۲/۳۶۳۰×۱۰^۸	۲/۳۶۴۷×۱۰^۸	۲/۳۶۴۸×۱۰^۸	۲/۳۶۵۶×۱۰^۸
۰/۳	۲/۳۴۱۸×۱۰^۸	۲/۳۴۲۸×۱۰^۸	۲/۳۴۱۱×۱۰^۸	۲/۳۴۲۸×۱۰^۸	۲/۳۴۱۷×۱۰^۸	۲/۳۴۲۹×۱۰^۸	۲/۳۴۰۵×۱۰^۸	۲/۳۴۱۲×۱۰^۸
۰/۶	۲/۳۳۴۸×۱۰^۸	۲/۳۳۵۴×۱۰^۸	۲/۳۳۴۵×۱۰^۸	۲/۳۳۶۱×۱۰^۸	۲/۳۳۷۱×۱۰^۸	۲/۳۳۸۴×۱۰^۸	۲/۳۳۸۵×۱۰^۸	۲/۳۳۹۳×۱۰^۸
۰/۹	۲/۳۲۵۱×۱۰^۸	۲/۳۲۶۳×۱۰^۸	۲/۳۲۴۷×۱۰^۸	۲/۳۲۵۸×۱۰^۸	۲/۳۲۹۵×۱۰^۸	۲/۳۳۰۶×۱۰^۸	۲/۳۳۲۸×۱۰^۸	۲/۳۳۳۲×۱۰^۸
۰/۹۹	۲/۳۲۳۱×۱۰^۸	۲/۳۲۳۷×۱۰^۸	**۲/۳۲۰۴×۱۰^۸**	**۲/۳۲۱۴×۱۰^۸**	۲/۳۲۴۸×۱۰^۸	۲/۳۲۵۷×۱۰^۸	۲/۳۳۱۴×۱۰^۸	۲/۳۳۲۷×۱۰^۸

سناریو ۲

HMCR	HMS ۱۰		HMS ۲۵		HMS ۳۵		HMS ۵۰	
	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین
۰	۴/۶۸۸۶×۱۰^۸	۴/۸۴۷۵×۱۰^۸	۴/۲۶۴۲×۱۰^۸	۴/۲۹۶۳×۱۰^۸	۴/۳۵۵۲×۱۰^۸	۴/۵۰۵۲×۱۰^۸	۴/۳۷۸۴×۱۰^۸	۴/۴۶۰۰×۱۰^۸
۰/۳	۴/۲۹۴۱×۱۰^۸	۴/۳۳۱۵×۱۰^۸	۳/۹۹۰۲×۱۰^۸	۴/۱۰۹۱×۱۰^۸	۴/۰۰۷۰×۱۰^۸	۴/۰۹۱۶×۱۰^۸	۴/۰۲۲۵×۱۰^۸	۴/۰۸۰۱×۱۰^۸
۰/۶	۳/۹۸۵۰×۱۰^۸	۴/۱۳۲۹×۱۰^۸	۳/۷۴۹۱×۱۰^۸	۳/۷۷۸۱×۱۰^۸	۳/۶۴۱۶×۱۰^۸	۳/۷۵۵۴×۱۰^۸	۳/۶۵۴۱×۱۰^۸	۳/۷۵۶۸×۱۰^۸
۰/۹	۳/۰۸۷۴×۱۰^۸	۳/۱۱۶۴×۱۰^۸	۳/۰۷۵۰×۱۰^۸	۳/۱۱۵۳×۱۰^۸	۳/۱۱۵۷×۱۰^۸	۳/۲۹۸۶×۱۰^۸	۳/۱۳۲۳×۱۰^۸	۳/۲۹۸۷×۱۰^۸
۰/۹۹	۲/۹۳۰۳×۱۰^۸	۳/۰۵۳۱×۱۰^۸	**۲/۸۵۳۲×۱۰^۸**	**۲/۹۲۳۰×۱۰^۸**	۲/۹۷۲۲×۱۰^۸	۳/۰۱۲۲×۱۰^۸	۳/۰۱۲۸×۱۰^۸	۳/۰۸۰۴×۱۰^۸

سناریو ۳

HMCR	HMS ۱۰		HMS ۲۵		HMS ۳۵		HMS ۵۰	
	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین
۰	۶/۵۷۵۵×۱۰^۸	۶/۷۹۸۳×۱۰^۸	۵/۹۸۰۳×۱۰^۸	۶/۰۲۵۳×۱۰^۸	۶/۱۰۷۹×۱۰^۸	۶/۳۱۸۲×۱۰^۸	۶/۱۴۰۴×۱۰^۸	۶/۲۵۴۸×۱۰^۸
۰/۳	۶/۰۲۲۲×۱۰^۸	۶/۰۷۴۷×۱۰^۸	۵/۵۹۵۹×۱۰^۸	۵/۷۶۲۷×۱۰^۸	۵/۶۱۹۶×۱۰^۸	۵/۷۳۸۲×۱۰^۸	۵/۶۴۱۳×۱۰^۸	۵/۷۲۲۱×۱۰^۸
۰/۶	۵/۵۸۸۷×۱۰^۸	۵/۷۹۶۱×۱۰^۸	۵/۲۵۷۸×۱۰^۸	۵/۲۹۸۶×۱۰^۸	۵/۱۰۷۱×۱۰^۸	۵/۲۶۶۷×۱۰^۸	۵/۱۲۴۷×۱۰^۸	۵/۲۶۸۶×۱۰^۸
۰/۹	۴/۳۲۹۹×۱۰^۸	۴/۳۷۰۶×۱۰^۸	۴/۳۱۲۵×۱۰^۸	۴/۳۶۹۰×۱۰^۸	۴/۳۶۹۶×۱۰^۸	۴/۶۲۶۱×۱۰^۸	۴/۳۹۲۸×۱۰^۸	۴/۶۲۶۲×۱۰^۸
۰/۹۹	۴/۱۰۹۶×۱۰^۸	۴/۲۸۱۷×۱۰^۸	**۴/۰۰۱۴×۱۰^۸**	**۴/۰۹۹۳×۱۰^۸**	۴/۱۶۸۳×۱۰^۸	۴/۲۲۴۴×۱۰^۸	۴/۲۲۵۳×۱۰^۸	۴/۳۲۰۰×۱۰^۸

جدول ۷: تحلیل حساسیت برای پارامتر PAR_{min} به‌ازای bw_{min}=۰/۱ و مقادیرHMS و HMCR به‌دست آمده از جدول (۶)

سناریو	PAR_{min} ۰/۰۰۱		۰/۰۱		۰/۱		۰/۵	
	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین	بهترین	میانگین
(۱)	۲/۱۸۱۱×۱۰^۸	۲/۱۸۱۹×۱۰^۸	**۲/۱۴۰۶×۱۰^۸**	**۲/۱۴۱۲×۱۰^۸**	۲/۲۶۳۱×۱۰^۸	۲/۲۶۳۶×۱۰^۸	۲/۳۲۱۵×۱۰^۸	۲/۳۲۱۹×۱۰^۸
(۲)	۲/۷۱۱۲×۱۰^۸	۲/۷۳۳۲×۱۰^۸	**۲/۶۹۱۲×۱۰^۸**	**۲/۷۳۱۱×۱۰^۸**	۲/۷۹۳۱×۱۰^۸	۲/۸۱۱۲×۱۰^۸	۲/۸۵۳۸×۱۰^۸	۲/۹۲۳۳×۱۰^۸
(۳)	۴/۹۴۰۶×۱۰^۸	۴/۹۴۱۸×۱۰^۸	**۳/۹۳۳۶×۱۰^۸**	**۴/۹۳۴۸×۱۰^۸**	۴/۹۴۷۴×۱۰^۸	۴/۹۶۰۲×۱۰^۸	۴/۰۰۱۸×۱۰^۸	۴/۰۹۹۴×۱۰^۸

جدول ۸: تحلیل حساسیت برای پارامتر bw_{min} به‌ازای PAR_{min} ، HMS و HMCR به‌دست 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)	۲/۰۹۱۱×۱۰^۸	۲/۰۹۱۸×۱۰^۸	**۲/۰۵۰۵×۱۰^۸**	**۲/۰۵۰۸×۱۰^۸**	۲/۱۴۰۶×۱۰^۸	۲/۱۴۱۲×۱۰^۸	۲/۱۸۰۲×۱۰^۸	۲/۱۸۰۹×۱۰^۸
(۲)	۲/۶۵۴۲×۱۰^۸	۲/۶۶۶۱×۱۰^۸	**۲/۶۲۸۸×۱۰^۸**	**۲/۶۳۳۱×۱۰^۸**	۲/۶۹۱۲×۱۰^۸	۲/۷۳۱۱×۱۰^۸	۲/۷۱۲۴×۱۰^۸	۲/۷۳۳۵×۱۰^۸
(۳)	۳/۹۰۲۵×۱۰^۸	۴/۹۰۳۱×۱۰^۸	**۳/۸۹۶۹×۱۰^۸**	**۳/۸۹۷۲×۱۰^۸**	۳/۹۳۳۶×۱۰^۸	۳/۹۳۴۸×۱۰^۸	۳/۹۵۶۳×۱۰^۸	۳/۹۵۶۸×۱۰^۸

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

شین	میزان تولید و مقدار	نوع، اندازه (kW) و مکان منابع تولید پراکنده					
	برنامه‌ریزی شده (kW)	توربین بادی	فتوولتاییک	سلول سوختی	میکرو توربین	توربین گازی	موتور دیزلی
۲	میزان تولید	۹۹۵	۱۰۰۰	-	-	۱۹۹۷	۱۹۹۳
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱×۱۰۰۰	۱۰×۱۰۰	-	-	۲×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰

۳	میزان تولید	۹۹۷	-	-	-	۳۹۹۷	۱۹۹۶
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱×۱۰۰۰	-	-	-	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۴	میزان تولید	۹۹۸	۵۰۸	-	-	۲۹۹۸	۱۹۹۶
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱×۱۰۰۰	۶×۱۰۰	-	-	۳×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۵	میزان تولید	۹۹۷	۱۹۹۸	-	-	۲۹۹۶	۱۹۹۸
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱×۱۰۰۰	۲۰×۱۰۰	-	-	۳×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۶	میزان تولید	-	۱۹۹۸	-	-	۳۹۹۵	۱۹۹۸
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	-	۲۰×۱۰۰	-	-	۳×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۷	میزان تولید	۱۹۹۶	۱۹۹۶	-	-	۱۹۹۷	۱۹۹۸
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۲×۱۰۰۰	۲۰×۱۰۰	-	-	۲×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۸	میزان تولید	-	۱۹۹۶	-	-	۱۹۹۴	۱۹۹۷
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	-	۲۰×۱۰۰	-	-	۲×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۹	میزان تولید	-	۱۹۹۷	-	-	۱۹۹۶	۱۹۹۸
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	-	۲۰×۱۰۰	-	-	۲×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰

۲۳/۲۴۵ :آلودگی (تن/ساعت) ۰ :هزینه احداث پست توزیع (M$) ۱۰۶/۰۱ : هزینه سرمایه‌گذاری (M$)

۰/۰۰۲۲۸۴ :تلفات (پریونیت) ۱/۸ :هزینه احداث فیدر(فیدر ۶-۷ و فیدر ۴-۵) ۹۴/۹۲: هزینه بهره‌برداری (M$)

۲۰۵/۰۵۵ :هزینه کل (M$) ۰ :هزینه توان خریداری‌شده از شبکه (M$)

جدول ۱۰: جواب بهینه تابع هدف رابطه (۱) برای سناریو۲

شین	میزان تولید و مقدار برنامه‌ریزی شده(kW)	نوع، اندازه (kW) و مکان منابع تولید پراکنده					
		توربین بادی	فتوولتاییک	سلول سوختی	میکرو توربین	توربین گازی	موتور دیزلی
۲	میزان تولید	۱۹۹۸	۱۹۹۵	-	-	۳۹۹۷	۱۹۶۵
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۲×۱۰۰۰	۲۰×۱۰۰	-	-	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۳	میزان تولید	۱۹۹۸	۹۹۸	-	-	۳۹۶۵	۱۹۹۸
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۲×۱۰۰۰	۱۰×۱۰۰	-	-	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۴	میزان تولید	۱۹۹۶	۳۶۷	-	-	۳۸۹۱	۱۹۸۵
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۲×۱۰۰۰	۴×۱۰۰	-	-	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۵	میزان تولید	۱۹۹۴	-	-	-	۳۸۹۳	۱۹۸۷
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۱×۱۰۰۰	-	-	-	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۶	میزان تولید	-	۹۹۶	-	۹۹۵	۳۹۹۴	۱۹۹۱
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	-	۱۰×۱۰۰	-	۵×۲۰۰	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۷	میزان تولید	۱۹۹۷	۹۹۳	-	۱۹۹۳	۳۹۹۶	۱۸۹۲
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۲×۱۰۰۰	۱۰×۱۰۰	-	۱۰×۲۰۰	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۸	میزان تولید	-	۹۹۴	-	-	۳۹۹۱	۱۹۹۶
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	-	۱۰×۱۰۰	-	-	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۹	میزان تولید	-	۱۹۹۴	-	-	۳۹۹۵	۱۸۸۲
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	-	۲۰×۱۰۰	-	-	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰

۳۲/۳۰۶ :آلودگی (تن/ساعت) ۰ :هزینه احداث پست توزیع (M$) ۱۳۰/۸۱ : هزینه سرمایه‌گذاری (M$)

۰/۰۰۲۶۹ :تلفات (پریونیت) ۱/۷۶ :هزینه احداث فیدر(فیدر ۶-۷ و فیدر ۴-۵) ۱۲۷/۰۴: هزینه بهره‌برداری (M$)

۲۶۲/۸۴۰۶ :هزینه کل (M$) ۰ :هزینه توان خریداری‌شده از شبکه (M$)

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

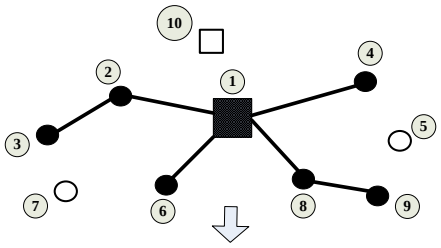
شین	میزان تولید و مقدار برنامه‌ریزی شده(kW)	نوع، اندازه (kW) و مکان منابع تولید پراکنده					
		توربین بادی	فتوولتاییک	سلول سوختی	میکرو توربین	توربین گازی	موتور دیزلی
۲	میزان تولید	۳۹۹۱	۱۹۹۸	-	۹۹۳	۳۹۹۸	۱۹۸۹
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۴×۱۰۰۰	۲۰×۱۰۰	-	۵×۲۰۰	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۳	میزان تولید	۳۹۸۷	۹۹۶	-	۸۸۲	۳۹۹۱	۱۹۹۹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

۵	میزان تولید	۳۹۹۶	-	-	-	۳۹۹۶	۱۹۹۳
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۴×۱۰۰۰	-	-	-	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۶	میزان تولید	-	۹۹۸	-	۹۸۵	۳۹۹۷	۱۹۹۷
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	-	۱۰×۱۰۰	-	۵×۲۰۰	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۷	میزان تولید	۱۸۹۶	۹۹۶	-	۱۹۶۳	۳۹۹۶	۱۹۹۸
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۲×۱۰۰۰	۱۰×۱۰۰	-	۱۰×۲۰۰	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۸	میزان تولید	۳۹۶۸	۹۹۷	-	۱۹۹۵	۳۹۹۳	۱۹۸۷
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۴×۱۰۰۰	۱۰×۱۰۰	-	۱۰×۲۰۰	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰
۹	میزان تولید	۱۹۸۷	۱۹۹۵	-	-	۳۹۹۸	۱۹۹۵
	ظرفیت برنامه‌ریزی شده	۲×۱۰۰۰	۲۰×۱۰۰	-	-	۴×۱۰۰۰	۲×۱۰۰۰

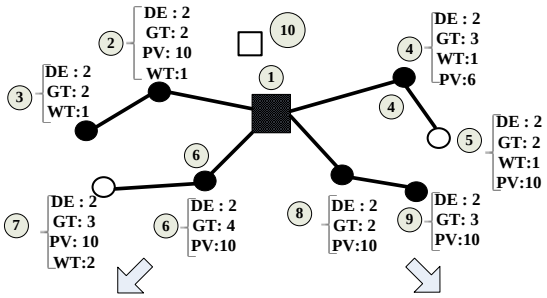
۳۴/۹۱۹ :آلودگی (تن/ساعت) ۰ :هزینه احداث پست توزیع (M$) ۲۰۹/۶۶ : هزینه سرمایه‌گذاری (M$)

۰/۰۰۲۸۴ :تلفات (پریونیت) ۱/۷۲ :هزینه احداث فیدر(احداث فیدر ۶-۷ و فیدر ۴-۵) ۱۷۴/۶۴: هزینه بهره‌برداری (M$)

۳۸۹/۶۱۸ :هزینه کل (M$) ۰ :هزینه توان خریداری شده از شبکه (M$)

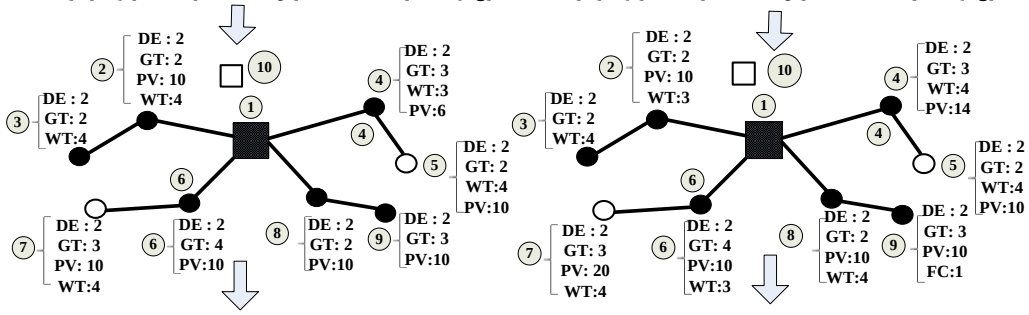


فرض شود سناریو 1 رخ دهد.آنگاه مساله بهینه سازی رابطه (1) با در نظر گرفتن قیود روابط (9)-(14) حل می شود .
طرح اولیه به قرار ذیل مطابق جدول (10) به دست می آید.



اگر طرح اولیه قیود و تابع هدف تحت سناریو 2 را ارضا نکند **اگر طرح اولیه قیود و تابع هدف تحت سناریو 3 را ارضا نکند**

طرح اولیه با رابطه (17) گسترش یافته تا شرایط سناریو 2 را ارضا کند **طرح اولیه با رابطه (17) گسترش یافته تا شرایط سناریو 3 را ارضا کند**



محاسبه هزینه تطبیق طرح اولیه طبق رابطه (17) تحت سناریو 2 **محاسبه هزینه تطبیق طرح اولیه طبق رابطه (17) تحت سناریو3**

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
$\mu_{f1}=\mu_{fSC}$ %	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
$\mu_{f2}=\mu_{\text{Max Regret}}$ %	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
$\mu_{f3}=\mu_{\text{Max AdjC}}$ %	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
$\sum_{i=1}^{3}\lvert 0.7-\mu_{fi}(X)\rvert^2$	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	نوع، اندازه (kW) و مکان منابع تولید پراکنده					
	برنامه‌ریزی شده (kW)	توربین بادی	فتوولتاییک	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

۲۴/۸۹۷ :آلودگی (تن/ساعت) ۰ :هزینه احداث پست توزیع ($M) ۱۴۰/۷۴ : هزینه سرمایه‌گذاری ($M)

۰/۰۰۲۸۴ :تلفات (پریونیت) ۱/۷۴۴ :هزینه احداث فیدر فیدر ۶-۷ و فیدر ۴-۵) ۱۸۰/۱۲: هزینه بهره‌برداری ($M)

۳۲۵/۰۹۴ :هزینه کل ($M) ۰ :هزینه توان خریداری‌شده از شبکه ($M)

جدول ۱۵: پارامترهای الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب

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

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

روش	$DM_{\text{TC, Max AdjC}}$	$DM_{\text{TC, Max Regret}}$	$DM_{\text{Max Regret, Max AdjC}}$	MID
NSIHSA-II	۰/۸۱۱۳	۰/۶۵۷۵	۰/۸۰۰۸	۰/۴۶۲۰
NSGA-II	۰/۶۵۱۵	۰/۵۵۹۱	۰/۶۵۴۷	۰/۵۹۲۸

$$\mathrm{DM}=\sqrt{\sum_{i=1}^{M}\left(\max_{j=1,\ldots,N_P}\{f_i^{\,j}\}-\min\{f_i^{\,j}\}\right)^2} \qquad (۳۰)$$

$$\mathrm{MID}=\frac{\sum_{j=1}^{N_P}C_j}{N_P},\quad C_j=\sqrt{\sum_{i=1}^{M}\left(f_i^{\,j}-f_{i,\mathrm{m}}\right)^2} \qquad (۳۱)$$

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. همان‌طورکه در جدول (۱۷) مشاهده می‌شود پارامترهای مذکور برای روش پیشنهادی بهتر از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب می‌باشد و درواقع کارایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. مدل پیشنهادی همچنین برروی 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 فتوولتاییک به‌کار گرفته شده‌است که اطلاعات مربوط به آن‌ها در جدول‌های (۴) و (۱۷) آمده‌است. مقدار پارامتر pf برابر ۱۰۰۰۰ دلار بر

تن بر ساعت، ضریب توان ۰/۹۵، ولتاژ بیشینه و کمینه در هر شین به‌ترتیب ۰/۹۵ و ۱/۰۵ پریونیت و نرخ تورم ۳٪ درنظر گرفته شده‌است. به‌منظور مقایسه برنامه‌ریزی برای یک سال صورت گرفته‌است. شش سناریو متفاوت مطابق ذیل برای این مورد مطالعاتی درنظر گرفته می‌شود:

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

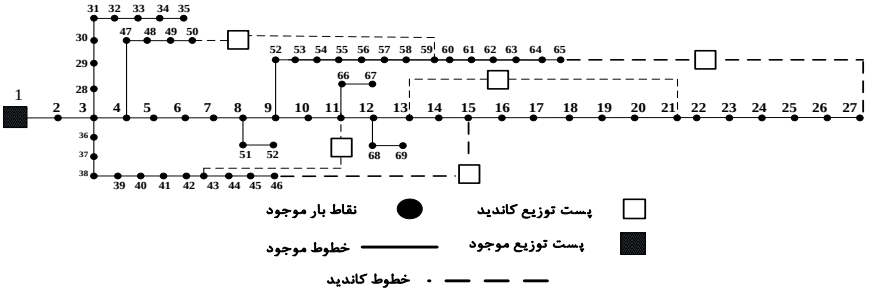
سناریو۲: افزایش بار سالانه به‌میزان ۴/۵٪، قیمت انرژی ۰/۰۷۲ دلار بر کیلووات‌ساعت، سرعت باد ۱۵ متربرثانیه و میزان تابش ۴ کیلووات بر مترمربع

سناریو۳: افزایش بار سالانه به‌میزان ۵٪، قیمت انرژی ۰/۰۶۸ دلار بر کیلووات‌ساعت، سرعت باد ۲۲ متربرثانیه و میزان تابش ۴/۵ کیلووات بر مترمربع

سناریو۴: افزایش بار سالانه به‌میزان ۷٪، قیمت انرژی ۰/۰۶۷ دلار بر کیلووات‌ساعت، سرعت باد ۱۰ متربرثانیه و میزان تابش ۳/۱ کیلووات بر مترمربع

سناریو۵: افزایش بار سالانه به‌میزان ۱۰٪، قیمت انرژی ۰/۰۷۱ دلار بر کیلووات‌ساعت، سرعت باد ۱۵ متربرثانیه و میزان تابش ۴ کیلووات بر مترمربع

سناریو۶: افزایش بار سالانه به‌میزان ۱۲٪، قیمت انرژی ۰/۰۷۴ دلار بر کیلووات‌ساعت، سرعت باد ۱۲ متربرثانیه و میزان تابش ۴/۵ کیلووات بر مترمربع



شکل ۷: سیستم آزمون نمونه ۶۹ شینه توزیع

با انجام تحلیل حساسیت برروی الگوریتم جستجوی هارمونی مقادیر پارامترهای HMS، HMCR ، PAR_{min} و bw_{min} به‌ترتیب ۳۵، ۰/۹۹،

جدول ۱۷: میزان آلودگی منابع به‌کاررفته 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	۰۰/۸	۱۵۹۶
فتوولتاییک	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 برنامه‌ریزی	-	-	۱×۵۰	-
۶۷	میزان تولید	-	-	۸۶	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	۲×۵۰	-
۴۴	میزان تولید	-	-	۵۴	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	۲×۵۰	-
۱۰	میزان تولید	-	-	۵۴	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	۲×۵۰	-
۳۴	میزان تولید	-	-	-	۷۷
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	-	۱×۱۵۰
۱۳	میزان تولید	-	-	-	۱۴۳
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	-	۱×۱۵۰
۲۸	میزان تولید	-	-	-	۹۵
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	-	۱×۱۵۰
۶۸	میزان تولید	-	-	-	۱۳۱
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	-	۱×۱۵۰
۹	میزان تولید	-	۵۹	-	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	۱×۱۰۰	-	-
۶۶	میزان تولید	-	۷۰	-	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	۱×۱۰۰	-	-
۴۳	میزان تولید	95	-	-	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	۱×۱۰۰	-	-	-
۱۹	میزان تولید	۹۱	-	-	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	۱×۱۰۰	-	-	-
۳/۶۱ : هزینه سرمایه‌گذاری (M$)					
۱/۸۶۸۳ : هزینه سرمایه‌گذاری (M$)					
۸۲۸۶/۳۱ : هزینه سرمایه‌گذاری (پوند)					
۰۳۵ /۱۳۸:تلفات (کیلووات)					
۰/۰ : هزینه احداث پست (M$)					
۰/۰ : هزینه احداث فیدر (M$)					
۲۲۴/۹۳: تلفات بدون درنظرگرفتن DG (کیلووات)					
۶/۳۸۹۵ :هزینه کل (M$)					

جدول ۱۹: هزینه تطبیق سناریوها در شبکه ۶۹ شینه

هزینه تطبیق	طرح توسعه اولیه					
(میلیون دلار)	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

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

جواب پارتو	μ_{TSC}	$\mu_{\text{Max AdjC}}$	$\mu_{\text{Max Regret}}$	$\sum_{i=1}^{3}\lvert\mu_{ri}-\mu_{fi}(X)\rvert^2$
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	۰/۰۲۳
۱۷	۰/۲۷۶۷	۰/۹۷۴۷	۰/۸۶۴۵	۰/۰۳۳۱
۱۸	۰/۲۲۴۲	۰/۹۸۰۷	۰/۸۷۳۷	۰/۰۴۶۹
۱۹	۰/۲۰۸۴	۰/۹۸۶۶	۰/۸۹۰۵	۰/۰۵۷۷
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 *HMCR*،*HMS* ، PAR_{min} و bw_{min} به‌دست آمده و پس از ۱۰۰ تکرار ۲۴ جواب پارتو مطابق شکل

(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 بادرنظرگرفتن تابع عضویت ۳۵ درصد برای هزینه کل (μ_{TC} %) ، تابع عضویت ۷۰ درصد برای معیار مقاوم‌بودن ($\mu_{f\,2}=\mu_{\text{Max Regret}}$ %) و تابع عضویت ۹۵ درصد برای معیار انعطاف‌پذیری ($\mu_{f\,3}=\mu_{\text{Max AdjC}}$ %)، 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 همان‌طورکه مشاهده می‌شود شاخص‌های الگوریتم پیشنهادی از الگوریتم NSGA-II بهتر می‌باشد. در جدول (۲۳) مدل و الگوریتم پیشنهادی با سایر مراجع مقایسه شده‌است و همان‌طورکه 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

	(کیلووات)	مکان منابع تولید پراکنده			
		WT	PV	FC	MT
۳۵	میزان تولید	-	-	۹	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	۱×۵۰	-
۶۷	میزان تولید	-	-	۸۶	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	۲×۵۰	-
۴۴	میزان تولید	-	-	۵۴	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	۲×۵۰	-
۱۰	میزان تولید	-	-	۵۴	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	۲×۵۰	-
۳۴	میزان تولید	-	-	-	۷۷
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	-	۱×۱۵۰
۱۳	میزان تولید	-	-	-	۱۴۳
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	-	۱×۱۵۰
۲۸	میزان تولید	-	-	-	۹۵
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	-	۱×۱۵۰
۶۸	میزان تولید	-	-	-	۱۳۱
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	-	-	۱×۱۵۰
۹	میزان تولید	-	۵۹	-	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	۱×۱۰۰	-	-
۶۶	میزان تولید	-	۷۰	-	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	-	۱×۱۰۰	-	-
۴۳	میزان تولید	95	-	-	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	۱×۱۰۰	-	-	-
۱۹	میزان تولید	۹۱	-	-	-
	ظرفیت برنامه‌ریزی	۱×۱۰۰	-	-	-

۳/۶۱ : هزینه سرمایه‌گذاری (M$)

۱/۸۶۸۳ : هزینه بهره‌برداری (M$)

۸۲۸۶/۳۱ : آلودگی (پوند)

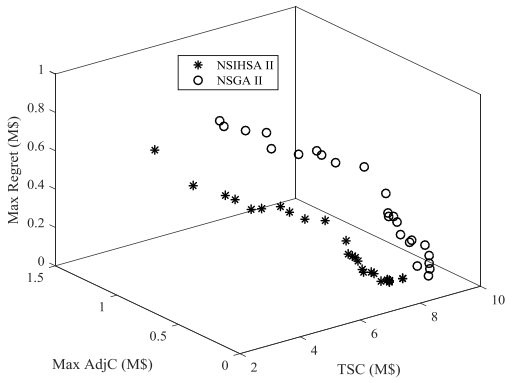
۰/۰۳۵ /۱۳۸:تلفات (کیلووات)

۰/۰ : هزینه احداث پست (M$)

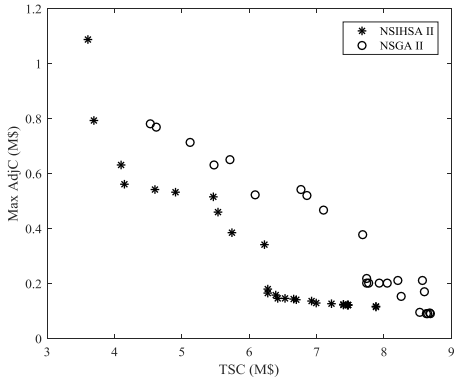
۰/۰ : هزینه احداث فیدر (M$)

۲۲۴/۹۳: تلفات بدون درنظرگرفتن DG (کیلووات)

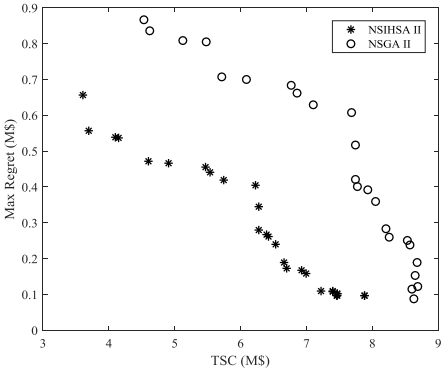
۶/۳۸۹۵ :هزینه کل (M$)



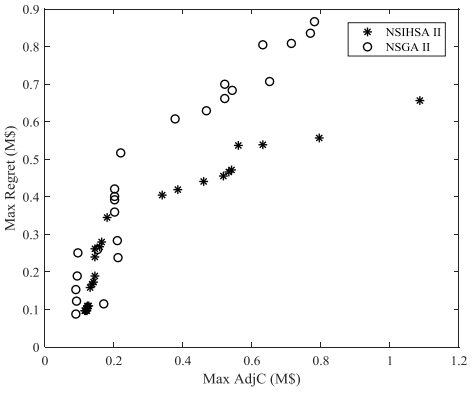
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

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

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

روش	$DM_{\text{TC, Max AdjC}}$	$DM_{\text{TC, Max Regret}}$	$DM_{\text{Max Regret, Max AdjC}}$	*MID*
NSIHSA-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	–	–

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نفوذ بالای منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع و وجود عدم‌قطعیت‌های مربوط به منابع تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، بار مصرفی و قیمت انرژی باید مدلی جامع برای برنامه‌ریزهای 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 عدم‌قطعیت‌ها 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 فیدرها و پست‌های توزیع متعاقب افزایش بار در حضور عدم‌قطعیت‌های 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. به‌منظور بررسی و اثر عدم‌قطعیت‌ها بر برنامه‌ریزی از دو شاخص بیشینه ریسک پشیمانی و هزینه تطبیق به‌عنوان توابع هدف استفاده شد تا درهنگام رخداد بدترین سناریو، برنامه‌ریزی به‌اندازه کافی مقاوم و منعطف باشد. درواقع یکی از مزیت‌های مدل پیشنهادی این است که با ارائه چندین طرح مناسب توسعه شبکه به‌جای ارائه یک طرح، توسط روش فازی امکان دخالت برنامه‌ریز سیستم به‌عنوان تصمیم‌گیرنده را با نیازمندی‌ها و اهداف کیفی (خواسته‌های ذهنی برنامه‌ریز) فراهم می‌کند. به عبارت بهتر برنامه‌ریز شبکه توزیع با بادرنظرگرفتن محدودیت‌های خود ازجمله بودجه دردسترس (موجود) می‌تواند طرحی را برنامه‌ریزی کند تا بیشترین رضایت‌مندی را داشته باشد. یعنی اینکه برنامه‌ریز به‌صورت واقعی در تصمیم‌گیری اثرگذار است و با توجه به شرایط شبکه و میزان بودجه می‌تواند تصمیم‌گیری کند. این مدل که در این مقاله ارائه شده‌است می‌تواند توسط معاونت‌های برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع در ایران و قسمت‌های مشابه در سایر کشورها به‌منظور توسعه شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده استفاده شود. مدل پیشنهادی، برروی 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 تابه‌حال ارائه شده‌اند جواب‌های بهتری را به‌دست 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

reactive capability and system uncertainties," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 3, no. 1, pp. 112-123, 2012.

[۵] سجاد نجفی روادانق و حامد خاتمی، «طراحی شبکه توزیع بهینه و مقاوم نسبت به عدم‌قطعیت برآورد بار ». مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۲، صفحه ۳۲۳-۳۳۲، تابستان ۱۳۹۵.

[۶] نبی طاهری، رحمت الله هوشمند و رضا همتی، « برنامه‌ریزی 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. Esmaeili, M. Sedighizadeh, 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 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, NRGA, 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.

زیرنویس‌ها

[1] Distributed generation (DG)
[2] Total cost (TC)
[3] Non-dominated sorting improved harmony search algorithm (NSIHSA)
[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)