

برنامه‌ریزی هماهنگ نصب منابع تولید پراکنده و توسعه شبکه توزیع در حضور نامعینی بار و قیمت انرژی

نبی طاهری^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، رحمت الله هوشمند^۲، استاد، رضا همتی^۳، دانشجوی دکتری

۱- گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان- ایران - taheri_nabi@yahoo.com

۲- گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه اصفهان- اصفهان- ایران - hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان- ایران - reza.hematti@eng.ui.ac.ir

چکیده: برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع، یکی از مهم‌ترین ابزار لازم در پاسخ به رشد تقاضا در سیستم قدرت است که با نصب یا تقویت تجهیزات صورت می‌پذیرد. در این مقاله، برنامه ریزی توسعه شبکه توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده با لحاظ نمودن بار و هزینه خرید انرژی به صورت نامعین در محیط بازار برق ارائه می‌گردد. برنامه‌ریزی پیشنهادی با هدف حداقل نمودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری سیستم صورت می‌پذیرد. برای حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی، از الگوریتم PSO^۱ استفاده شده است. همچنین در الگوریتم پیشنهادی، جهت وارد نمودن اثر نامعینی بار و هزینه خرید انرژی از شبیه‌سازی عددی مونت کارلو استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه‌های نمونه ۹ شینه و فیدر ۳۰۶۲ منطقه کیانپارس اهواز نشان دهنده توانایی روش پیشنهادی در توسعه شبکه توزیع می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع، تولید پراکنده، الگوریتم PSO، تابع توزیع احتمالاتی، نامعینی.

Distribution Network Expansion Planning and DG Placement in the Presence of Load and Price Uncertainties

N. Taheri¹, R. Hooshmand², R. Hemmati³

1, 2 & 3-Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran,

Abstract: Distribution network expansion planning (DNEP) is one of the most important tools to deal with the demand growth in power systems. DNEP is usually carried out through reinforcement or installation of new components. In this paper, DNEP is addressed in the presence of distributed generation (DG), considering load and price uncertainties under electricity market environment. The proposed planning aims at minimizing investment and operational costs simultaneously. The proposed planning is solved by PSO method. The uncertainties are also modeled as the probability distribution function (PDF) and Monte-Carlo simulation (MCS) is used to tackle with uncertainties in the programming. The proposed planning is carried out based on the 9-bus as well as Kianpars-Ahvaz test systems. The simulation results demonstrate the ability and effectiveness of the proposed planning to deal with uncertainties in the planning.

Keywords: Distribution Network Expansion Planning, Distributed Generation, Particle Swarm Optimization, Probability Distribution Function, Uncertainty.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۲/۴/۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۲/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۱۱/۱۴

نام نویسنده مسئول: رحمت الله هوشمند

نشانی نویسنده مسئول: ایران- اصفهان- خیابان هزار جریب- دانشگاه اصفهان - دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

مورد بررسی قرار گرفته است که در آن، محدوده توان راکتیو DGها مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته و ترکیب روش‌های هوشمند بهینه‌سازی برای مواجهه با نامعینی و حل مسئله به کار رفته است. از دیدگاه ریاضی، مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع، یک مسئله بهینه‌سازی مقید می‌باشد که با استفاده از روش‌های مختلفی حل شده است. از جمله روش‌های حل مبتنی بر تکنیک‌های ریاضی مانند برنامه‌ریزی خطی [۱۶] و روش‌های حل مبتنی بر روش‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک [۱۷]، کلونی زنبور عسل [۱۸] و PSO [۱۵] برای حل این مسئله به کار رفته‌اند.

در این مقاله، روشی جدید برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در حضور DG با وجود عدم قطعیت در بار و هزینه خرید انرژی ارائه می‌شود. برنامه‌ریزی با هدف حداقل نمودن هزینه خرید انرژی و تلفات انجام می‌شود. در این راستا، ابتدا برنامه‌ریزی بدون واحدهای تولید پراکنده انجام می‌شود. پروفیل بار سالیانه به صورت گسسته و در سه سطح کم‌باری، متوسط و پرباری لحاظ می‌شود و برای هر سطح بار، هزینه خرید انرژی متناسب با آن سطح بار در نظر گرفته می‌شود. سپس به منظور نشان دادن تاثیر حضور واحدهای تولید پراکنده، برنامه‌ریزی در حضور این واحدها انجام می‌شود. در ادامه، نامعینی بارها و قیمت انرژی در برنامه‌ریزی لحاظ می‌گردد. در این راستا، بار پیش‌بینی شده و هزینه خرید انرژی به صورت نامعین در نظر گرفته شده و با توابع PDF مدل‌سازی می‌گردند. در این مرحله، با تولید سناریوی تصادفی بر اساس روش مونت کارلو، نمونه‌برداری‌های متعدد از توابع PDF صورت می‌پذیرد و تابع هدف محاسبه می‌شود. این روند تا همگرا شدن فرآیند مونت کارلو ادامه می‌یابد. دو شبکه تست ۹ شینه و فیدر ۳۰۶۲ منطقه کیانپارس اهواز به عنوان شبکه‌های نمونه مورد بررسی قرار گرفته‌اند که شبکه تست دوم یک شبکه واقعی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با دیگر روش‌ها، بیانگر توانایی الگوریتم پیشنهادی در ایجاد برنامه‌ریزی مطلوب برای شبکه‌های توزیع است.

۲- فرمول‌بندی مساله

با توجه به آن که مساله توسعه شبکه‌های توزیع به صورت یک مساله بهینه‌سازی مقید است، لذا فرمول‌بندی مساله به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\text{Min } v = IC + OC \quad (1)$$

Subject to

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \quad (2)$$

$$0 \leq S_i^{SS} \leq S_{i-cap}^{SS} \quad (3)$$

$$S_j^{FD} \leq S_{j-cap}^{FD} \quad (4)$$

$$S_k^{DG} \leq S_{k-cap}^{DG} \quad (5)$$

$$\text{Radial structure} = 1 \quad (6)$$

بیان تابع هدف: در مجموعه بهینه‌سازی مقید ارائه شده، رابطه (۱) تابع هدف مسئله را نمایش می‌دهد و روابط (۲) تا (۶) قیدهای این مسئله

در دهه‌های اخیر به منظور بالا بردن بازده بهره‌برداری و تشویق سرمایه‌گذاران، صنعت برق دست‌خوش تغییرات اساسی از دید مدیریت و مالکیت گردیده است به طوری که برای ایجاد فضای رقابتی مناسب، بخش‌های مختلف سیستم قدرت از جمله تولید، انتقال و توزیع از هم مستقل گردیده‌اند. این تحولات از یک طرف، و عواملی مانند مشکلات احداث خطوط جدید از طرف دیگر، باعث افزایش استفاده از واحدهای تولیدی کوچک تحت عنوان تولیدات پراکنده (DG) گردیده است. تولید پراکنده به طور چشم‌گیری باعث انعطاف عملکرد شبکه شده و بر روی قیمت انرژی نیز تاثیر مثبتی گذاشته است. همچنین تولید پراکنده بر روی جنبه‌های مختلف شبکه مانند ولتاژ، قابلیت اعتماد، تلفات، پایداری و هزینه‌ها تاثیر مناسبی داشته است [۱].

اولین مسئله در استفاده از DG، مدل‌سازی DGها در مسئله پخش بار می‌باشد و بررسی این موضوع است که چگونه می‌توان در حضور DG، پخش بار سیستم قدرت یا سیستم توزیع را انجام داد. این موضوع در [۲] بررسی شده است و در این مرجع، نحوه پخش بار شبکه قدرت با حضور واحدهای تولید پراکنده مدل‌سازی و تشریح گردیده است به علاوه چندین مدل مفید برای DG در پخش بار تک‌فاز و سه‌فاز متعادل و نامتعادل ارائه شده است. همچنین DGها از دیدگاه‌های مختلفی مانند تاثیر DG در بازار انرژی [۳]، تاثیر DG در پایداری شبکه، ولتاژ و تلفات [۴]، پیکربندی مجدد سیستم توزیع با لحاظ نمودن اثر DGها [۵]، تاثیر DG بر روی جزیره‌ای شده شبکه [۶] و تاثیر DG بر روی قابلیت اعتماد شبکه [۷] مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته‌اند.

با توجه به مزیت‌های بیان شده برای DG، استفاده از خصوصیات DG در برنامه‌ریزی‌های مختلف سیستم قدرت نیز به سرعت گسترش یافته است. به طوری که سعی شده است با ترکیب DG در برنامه‌ریزی‌هایی از جمله برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع، به اهداف بهتر و مناسب‌تری دست یابند. برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع به معنای تعیین محل، ظرفیت، تعداد و زمان نصب خطوط و پست‌های جدید در شبکه توزیع می‌باشد [۸، ۹]. همچنین مرور کاملی بر روش‌ها و تکنیک‌های بکار رفته در برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در [۱۰، ۱۱] ارائه شده است. مدل‌سازی استاتیکی، یک مدل مرسوم در برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع می‌باشد که در [۱۲] ارائه شده است و در این مرجع، برنامه‌ریزی با حضور DG انجام می‌شود و نوع و محل خطوط مشخص گردیده است.

یک برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع چند سطحی در [۱۳] ارائه شده است. همچنین برنامه‌ریزی هماهنگ توسعه شبکه توزیع و DG برای حذف پیک بار در [۱۴] ارائه شده است که در این برنامه ریزی، هدف کاهش هزینه خطوط جدید، هزینه DGها و تلفات شبکه می‌باشد. تاثیر نامعینی‌ها بر برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع و DG در [۱۵]

می‌باشند. رابطه (۱) به عنوان تابع هدف، نشان دهنده هزینه طرح بر حسب دلار بر سال است. قسمت اول این تابع هدف، هزینه سالانه تجهیزات جدید نصب شده و ارتقا یافته IC می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$IC = C_{RF} \left(\sum_{i \in S} IC_i^{SS} \times XS_i + \sum_{j \in F} IC_j^{FD} \times XF_j + \sum_{k \in D} IC_k^{DG} \times S_k^{DG} \times XD_k \right) \quad (7)$$

در این رابطه، C_{RF} ضریب کاهش می‌باشد که جهت تبدیل هزینه‌ها به هزینه بر سال استفاده شده است. ایندکس‌های i ، j و k به ترتیب مربوط به پست‌های توزیع، فیدرها و منابع تولید پراکنده (DGها) می‌باشند. متغیرهای S ، F و D نیز به ترتیب بیان کننده تعداد پست‌های توزیع، فیدرها و DGهای شبکه می‌باشند. متغیر IC_i^{SS} هزینه نصب پست توزیع نام بر حسب دلار می‌باشد. متغیر XS_i نیز نشان دهنده وضعیت در مدار بودن یا نبودن پست توزیع نام می‌باشد که XS به صورت یک بردار حاوی متغیرهای ۰ و ۱ بیان می‌گردد. متغیر IC_j^{FD} هزینه نصب فیدر نام بر حسب دلار است و متغیر XF_j نیز نشان دهنده وضعیت در مدار بودن یا نبودن فیدر نام می‌باشد و XF نیز بردار حاوی متغیرهای ۰ و ۱ است. IC_k^{DG} هزینه نصب واحد تولید پراکنده نام بر حسب دلار بر مگاوات‌آمپر و S_k^{DG} ظرفیت واحد تولید پراکنده نام بر حسب مگاوات‌آمپر می‌باشد. متغیر XD_k نیز نشان دهنده وضعیت در مدار بودن یا نبودن واحد تولید پراکنده نام می‌باشد و XD نیز بردار حاوی متغیرهای ۰ و ۱ است که نشان دهنده در مدار بودن یا نبودن هر یک از واحدهای تولید پراکنده می‌باشد.

۳- مساله پخش بار به کار رفته

پخش بار برای شبکه توزیع، شامل دو مرحله جاروب رفت و جاروب برگشت می‌باشد. الف) جاروب برگشت: در این قسمت، توان عبوری از شاخه‌ها محاسبه می‌شوند که پس از شناسایی شینه‌های انتهایی، توان عبوری از شاخه‌ها طبق رابطه (۹) و توان شینه‌های شبکه طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شوند (تلفات در اولین تکرار صفر در نظر گرفته می‌شود).

$$S_{branch_n^k} = S_{node_i^k} + S_{load_n} + Loss_n^k \quad (9)$$

$$S_{node_M^k} = \sum_{n \in M} S_{branch_n^k} \quad (10)$$

که $S_{branch_n^k}$ توان عبوری از شاخه نام در تکرار نام، $S_{node_i^k}$ توان تزریقی به شینه نام در تکرار نام، S_{load_n} توان بار موجود روی شاخه نام و $Loss_n^k$ تلفات شاخه نام در تکرار نام می‌باشند. ب) جاروب رفت: در این قسمت، جریان شاخه‌ها و ولتاژ شینه‌ها محاسبه می‌شوند که ابتدا شینه‌های ابتدایی شبکه شناسایی می‌شوند. سپس جریان شاخه‌ها طبق رابطه زیر محاسبه می‌شوند.

$$I_n^k = \frac{S_{branch_i^k}}{V_i^k} \quad (11)$$

در این رابطه، C_{RF} ضریب کاهش می‌باشد که جهت تبدیل هزینه‌ها به هزینه بر سال استفاده شده است. ایندکس‌های i ، j و k به ترتیب مربوط به پست‌های توزیع، فیدرها و منابع تولید پراکنده (DGها) می‌باشند. متغیرهای S ، F و D نیز به ترتیب بیان کننده تعداد پست‌های توزیع، فیدرها و DGهای شبکه می‌باشند. متغیر IC_i^{SS} هزینه نصب پست توزیع نام بر حسب دلار می‌باشد. متغیر XS_i نیز نشان دهنده وضعیت در مدار بودن یا نبودن پست توزیع نام می‌باشد که XS به صورت یک بردار حاوی متغیرهای ۰ و ۱ بیان می‌گردد. متغیر IC_j^{FD} هزینه نصب فیدر نام بر حسب دلار است و متغیر XF_j نیز نشان دهنده وضعیت در مدار بودن یا نبودن فیدر نام می‌باشد و XF نیز بردار حاوی متغیرهای ۰ و ۱ است. IC_k^{DG} هزینه نصب واحد تولید پراکنده نام بر حسب دلار بر مگاوات‌آمپر و S_k^{DG} ظرفیت واحد تولید پراکنده نام بر حسب مگاوات‌آمپر می‌باشد. متغیر XD_k نیز نشان دهنده وضعیت در مدار بودن یا نبودن واحد تولید پراکنده نام می‌باشد و XD نیز بردار حاوی متغیرهای ۰ و ۱ است که نشان دهنده در مدار بودن یا نبودن هر یک از واحدهای تولید پراکنده می‌باشد.

$$OC = \sum_{t \in T} \left(\sum_{k \in D} OC_k^{DG} \times P_{k-t}^{DG} \times XD_k + \sum_{i \in S} EC_{i-t}^{SS} \times P_i^{SS} \right) \quad (8)$$

در این رابطه T_t دوره تامین بار بر حسب ساعت و OC_k^{DG} هزینه بهره‌برداری از نامین واحد تولید پراکنده بر حسب دلار بر مگاوات ساعت است. P_{k-t}^{DG} توان تولیدی نامین واحد تولید پراکنده در دوره زمانی نام بر حسب مگاوات، EC_{i-t}^{SS} هزینه خرید انرژی از پست توزیع در دوره زمانی نام بر حسب دلار بر مگاوات ساعت و P_i^{SS} توان تولیدی پست توزیع در دوره زمانی نام بر حسب مگاوات می‌باشد. با توجه به روابط ارائه شده، بردارهای XS ، XF و XD متغیرهای بهینه سازی این مسئله می‌باشند.

فرآیند روش پیشنهادی در برنامه‌ریزی چند مرحله‌ای بر مبنای برنامه‌ریزی پویا می‌باشد. این برنامه‌ریزی به دو فاز تقسیم می‌شود. در فاز اول، مدل مانا برای رسیدن به طرحی که بتواند بار مورد نیاز در انتهای سال مورد مطالعه (یعنی قسمتی از افق برنامه‌ریزی که به عنوان پله برنامه ریزی لحاظ شده است) را به روشی بهینه تامین کند، در نظر گرفته می‌شود. در این مرحله تمامی تجهیزات مورد نیاز برای تامین بار تا پایان سال مورد مطالعه در سیستم نصب می‌گردند. در فاز بعد اضافه شدن نقاط بار جدید و اثر رشد بار در طی افق برنامه‌ریزی به صورت پیوسته لحاظ می‌شود. بدین ترتیب که با توجه به اضافه شدن نقاط بار جدید و رشد بار سیستم و بر اساس تجهیزات موجود، ملزومات سیستم که می‌تواند شامل نصب تجهیز جدید یا ارتقا تجهیز موجود باشد به صورت بهینه تعیین شده و به سیستم اضافه می‌شوند. در پایان این دو فاز طرح بهینه ارائه می‌شود؛ لذا الگوریتم مورد استفاده برای برنامه‌ریزی چند مرحله‌ای به صورت زیر خلاصه می‌شود:

گام اول: تعیین دوره برنامه‌ریزی و تقسیم آن به پله‌های زمانی

گام دوم: تخمین میزان رشد بار برای نقاط بار مختلف و اضافه شدن نقاط بار جدید در دوره مورد مطالعه

گام سوم: حل مساله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO با همه تجهیزات موجود و کاندیدا که در نتیجه آن سیستم جهت تامین بار دوره مورد مطالعه تجهیز می‌شود.

گام چهارم: اگر تمامی دوره‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند به پایان برنامه‌ریزی رسیده است، در غیر این صورت به گام دوم برمی‌گردد.

۴-۱- نامعینی در بار و هزینه خرید انرژی

بارهای الکتریکی و هزینه خرید انرژی در شبکه‌های توزیع به دلیل عدم قطعیت در پیش‌بینی آن‌ها، با نامعینی همراه هستند؛ لذا در نظر گرفتن این نامعینی‌ها، باعث می‌شود تا طرح ارائه شده به نحوی مطلوب‌تر پاسخگوی نیاز شبکه در طول دوره برنامه‌ریزی باشد. وارد کردن این نامعینی‌ها در برنامه‌ریزی پیشنهادی، سبب ایجاد تغییر در طرح ارائه شده می‌شود. به منظور لحاظ نمودن اثر نامعینی در مسئله، از تکنیک تولید سناریو بر اساس روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌شود؛ لذا در این قسمت، روش تولید سناریو و شبیه‌سازی با روش مونت کارلو بیان می‌شود.

همان‌طور که بیان شد، معمولاً بارها و قیمت انرژی در سیستم قدرت با توابع PDF نرمال تخمین زده می‌شوند. البته، روش ارائه شده در این مقاله می‌تواند برای هر نوع توزیع احتمالاتی به کار رود. ولی از آن جایی که در اینجا بارها با توزیع احتمالاتی نرمال تخمین زده می‌شوند، لذا تمرکز بر روی این نوع توزیع احتمالاتی می‌باشد. فرض شود یکی از بارهای سیستم قدرت دارای تابع PDF نرمال با میانگین ۵۰ و انحراف معیار ۱۰ درصد باشد. چون تابع PDF فوق، پیوسته می‌باشد لذا احتمال وقوع هر نقطه بار را نشان نمی‌دهد، بلکه چگالی احتمال را نشان می‌دهد. برای این که احتمال وقوع سطح بار مختلف شبکه

که I_n^k جریان شاخه n ام در تکرار k ام و V_i^k ولتاژ شینه i ام در تکرار k ام می‌باشند. پس از محاسبه جریان شاخه‌ها، ولتاژ شینه‌ها طبق رابطه (۱۲) قابل محاسبه خواهند بود.

$$V_j^k = V_i^k - (Z_n \times I_n^k) \quad (12)$$

که Z_n امپدانس مربوط به شاخه n ام است. حال با داشتن ولتاژها و جریان‌ها، تلفات هر خط طبق رابطه (۱۳) قابل محاسبه خواهد بود.

$$Loss_n^k = (V_i^k - V_j^k) \times I_n^k \quad (13)$$

در این مرحله شرط همگرایی ولتاژ (e < error) که طبق رابطه (۱۴) تعریف شده است بررسی می‌شود.

$$e = \max(|V_j^k - V_j^{k-1}|) \quad (14)$$

در صورت برقراری این شرط، برنامه پخش بار به پایان رسیده است و در صورت عدم برقراری این شرط اطلاعات ولتاژ شینه‌ها و تلفات خطوط ذخیره شده و الگوریتم با اطلاعات جدید مجدداً تکرار می‌شود.

۳-۱- ورود واحدهای تولید پراکنده در پخش بار

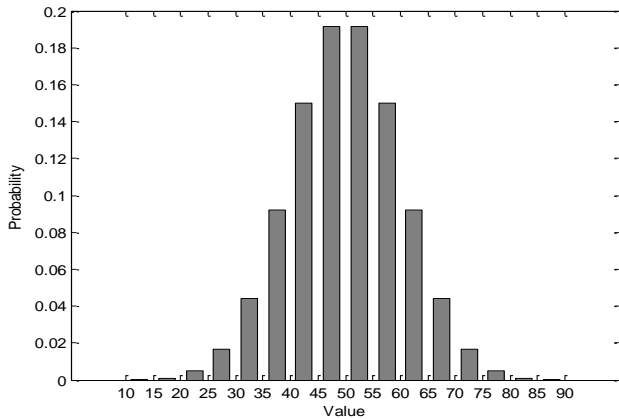
برای وارد کردن واحدهای تولید پراکنده به محاسبات پخش بار، این واحدها به دو صورت شینه PQ و PV مدل می‌شوند. شینه‌های PQ به صورت یک بار منفی در مدل وارد می‌شوند. اما برای شینه‌های PV از تکنیک جبران‌سازی که اصول آن در مرجع [۱۲] بیان شده، استفاده می‌شود. ایده پایه‌ای این روش این است که برای به دست آوردن ولتاژ در یک شینه PV، لازم است مقدار صحیح تزریق جریان راکتیو تولید شده توسط واحد تعیین شود. برای این منظور در هر شینه PV، ثابت‌ها برای ژنراتور، یعنی خروجی توان حقیقی (P) و دامنه ولتاژ (V) تعیین می‌شوند. سپس در الگوریتم پخش بار این شینه به صورت یک شینه PQ لحاظ شده و مقدار Q تزریقی آن محاسبه می‌شود.

۴- برنامه‌ریزی پیشنهادی توسعه شبکه توزیع

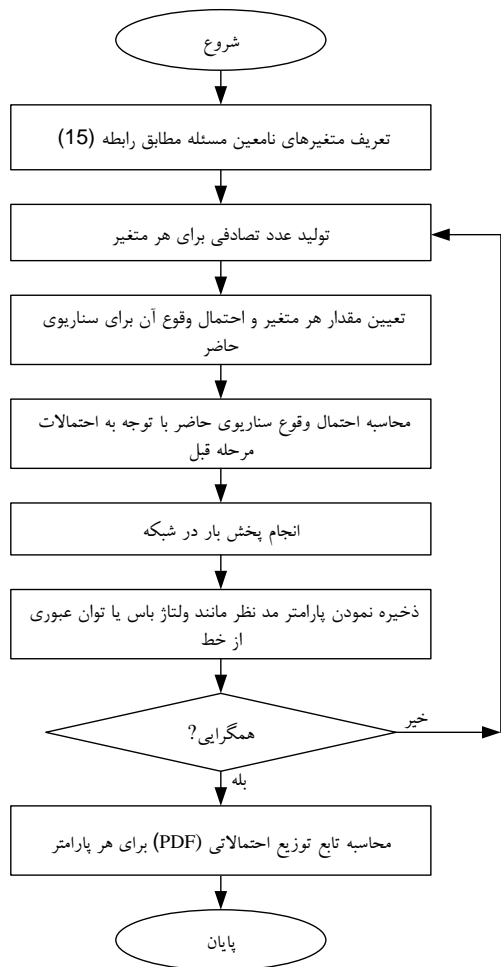
هدف از برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع، تامین بار درخواستی با کم‌ترین هزینه ممکن و رعایت قیود فنی حاکم بر سیستم می‌باشد. در این برنامه‌ریزی باید هزینه نصب و بهره‌برداری از پست‌های توزیع، خطوط توزیع و منابع تولید پراکنده با رعایت قیود فنی، حداقل شوند. متغیرهای برنامه‌ریزی شامل موارد زیر می‌باشند:

- گسترش ظرفیت پست‌های موجود
- ارتقا ظرفیت خطوط توزیع موجود
- مسیر و ظرفیت خطوط جدیدی که باید نصب شوند
- تعیین مکان و ظرفیت واحدهای تولید پراکنده که باید به سیستم اضافه شوند
- زمان نصب تجهیزات مورد نیاز سیستم با توجه به افق برنامه‌ریزی

سناریو حاوی یک مقدار و یک احتمال برای متغیر خروجی است. بنابراین می‌توان مقدار متغیر خروجی را بر حسب احتمالات رسم نمود که همان تابع توزیع PDF است. بنابراین، با روش مذکور، نامعینی ورودی در خروجی مسئله تاثیر داده می‌شود و هر متغیر خروجی نیز به صورت یک تابع PDF تبدیل می‌شود.



شکل (۱): تخمین بار با تابع توزیع نرمال ناپیوسته



شکل (۲): روند شبیه‌سازی در روش مونت کارلو

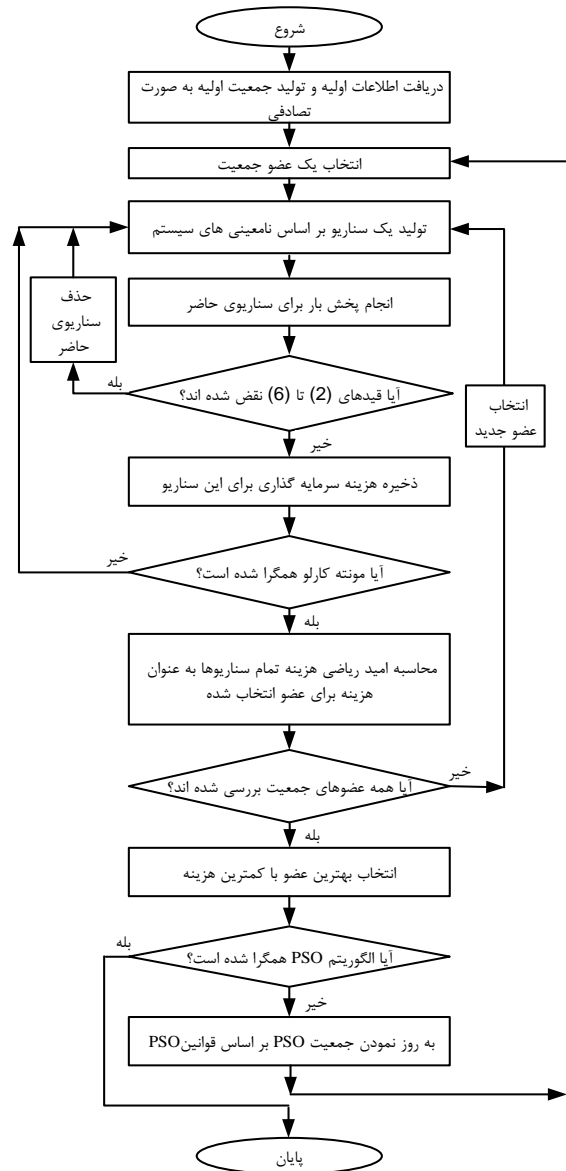
مشخص شود، باید تابع پیوسته با یک تابع نرمال ناپیوسته تخمین زده شود. در این تقریب زنی، هر چقدر پله‌های در نظر گرفته شده برای تقریب، کوچک‌تر باشند، خطای تقریب کم‌تر می‌باشد. به عنوان مثال، تابع نرمال فوق و تقریب آن با ۱۶ پله در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل (۱)، محور افقی مقدار بار و محور عمودی احتمال وقوع هر سطح بار می‌باشد؛ لذا می‌توان شکل (۱) را با رابطه (۱۵) نیز بیان نمود.

$$P = \begin{cases} p_1 & load = l_1 \\ p_2 & load = l_2 \\ \vdots & \\ p_n & load = l_n \end{cases} \quad (15)$$

در این رابطه، بردار P احتمالات وقوع سطوح مختلف بار را نمایش می‌دهد، که متغیرهای p_1 تا p_n به ترتیب بیان کننده احتمال وقوع سطوح بار l_1 تا l_n می‌باشند. بنابراین می‌توان هر یک از توابع نامعین موجود در مسئله را با یک معادله مانند رابطه فوق بیان نمود. بعد از تعریف نامعینی‌های مسئله، مرحله بعد تولید سناریو بر اساس این نامعینی‌ها می‌باشد. در این مرحله، یک عدد تصادفی برای هر متغیر نامعین بر مبنای تابع توزیع متغیر تولید می‌گردد. مثلاً تابع نرمال فوق دارای میانگین ۵۰ و انحراف معیار ۱۰ درصد می‌باشد، یک عدد تصادفی بر مبنای این توزیع نرمال، برای این متغیر تولید می‌شود. بعد از تولید عدد تصادفی، احتمال وقوع این سطح بار از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود. بنابراین در سناریوی حاضر، هم سطح بار و هم احتمال وقوع این سطح بار برای تمام بارهای شبکه می‌تواند محاسبه شود. همین روند برای سایر متغیرهای نامعین شبکه نیز به کار می‌رود تا در نهایت در هر سناریو، هر متغیر نامعینی با یک مقدار و یک احتمال وقوع، مشخص می‌شود. همچنین احتمال وقوع سناریو نیز با ضرب تک تک احتمالات محاسبه خواهد شد. روند شبیه‌سازی روش مونت کارلو در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل (۱) نشان داده شده است، ابتدا تمام متغیرهای نامعین بر اساس رابطه (۱۵) تعریف می‌شوند و سپس برای هر متغیر، یک عدد تصادفی تولید می‌شود و مقدار متغیر و احتمال وقوع آن، در هر سناریو تعیین می‌شود. سپس احتمال وقوع سناریوی حاضر محاسبه شده و در مرحله بعد، یک پخش بار در شبکه انجام می‌شود. بعد از پخش باری که برای سناریوی حاضر انجام شده است، پارامتر مد نظر برای مطالعه ذخیره می‌شود که مثلاً می‌تواند ولتاژ شینه یا توان عبوری از یک خط باشد. لازم به ذکر است که در این سناریو، هم توان عبوری از یک خط و هم احتمال وقوع این توان مشخص است. در مرحله بعد، همگرایی الگوریتم مونت کارلو چک می‌شود که می‌توان از واریانس خروجی به عنوان معیار همگرایی استفاده نمود. یعنی اگر واریانس خروجی از حد مشخصی کم‌تر شد، تکرار الگوریتم به پایان برسد. در صورتی که همگرایی به دست نیاید، الگوریتم، تکرار شده و سناریوی جدید تولید می‌شود. در نهایت با افزایش سناریوها، تعداد زیادی سناریو وجود دارد که هر

۴-۲- فلوجارت پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی جهت برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع با لحاظ نمودن بار و هزینه خرید انرژی به صورت نامعین، برای هر پله برنامه‌ریزی، در فلوجارت شکل (۱) ارائه شده است.



شکل (۳) : فلوجارت الگوریتم پیشنهادی توسعه شبکه

در این فلوجارت، ابتدا اطلاعات اولیه برنامه‌ریزی دریافت، و جمعیت اولیه الگوریتم PSO به صورت تصادفی تولید می‌شود. سپس یک عضو جمعیت، انتخاب می‌شود و برای عضو انتخاب شده، سناریویی از نامعینی بر اساس روش ارائه شده در قسمت قبل شکل (۱) تولید می‌شود. پس از آن برای سناریوی حاضر، پخش بار صورت می‌گیرد و قیدهای برنامه‌ریزی چک می‌شوند. اگر قیدی نقض شود، سناریوی حاضر حذف شده و سناریوی جدید تولید می‌شود. سپس هزینه سرمایه‌گذاری برای سناریوی حاضر ذخیره شده و همگرایی مونته‌کارلو

چک می‌شود. در صورت همگرا نشدن الگوریتم، تولید سناریو تا همگرایی ادامه پیدا می‌کند. سپس در مرحله بعد، امید ریاضی هزینه تمام سناریوها به عنوان هزینه عضو انتخاب شده از جمعیت، محاسبه می‌شود. همین فرآیند برای همه اعضای جمعیت تکرار می‌شود. در نهایت عضو با کمترین هزینه به عنوان بهترین عضو جمعیت انتخاب می‌شود. با بررسی معیار همگرایی الگوریتم PSO، در صورت همگرا نشدن خروجی، جمعیت اولیه تولید شده مطابق قوانین PSO به روز شده و الگوریتم از ابتدا تکرار می‌گردد.

۴-۳- الگوریتم PSO

الگوریتم PSO یک الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند می‌باشد که برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی با موفقیت به کار رفته است [۱۹]. این الگوریتم با یک جمعیت اولیه تصادفی شروع می‌شود که هر عضو جمعیت، ذره یا particle نامیده می‌شود. هر ذره با دو مقدار V_{id} و X_{id} که به ترتیب وضعیت مکانی و سرعت ذره شماره i هستند تعریف می‌شود. در هر مرحله از الگوریتم، هر ذره با دو مقدار به روز می‌شود. اولین مقدار، بهترین جوابی است که تاکنون برای هر ذره به طور جداگانه به دست آمده است که بهینه محلی نامیده می‌شود و با p_best نشان داده می‌شود. دومین مقدار، بهترین مقدار، است که تاکنون توسط تمام ذره‌ها به دست آمده است که بهینه کلی نامیده می‌شود و با g_best نشان داده می‌شود. بعد از یافتن این دو مقدار، هر ذره سرعت و مکان خود را طبق روابط زیر به روز می‌کند [۱۹]:

$$v_{id}(t+1) = w.v_{id}(t) + c_1.rand(p_best_{id} - x_{id}) + c_2.rand(g_best_d - x_{id}) \quad (16)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (17)$$

که w وزن اینرسی، c_1 و c_2 عوامل یادگیری (ضرایب شتاب نیز گفته می‌شوند) و $rand$ نیز یک عدد تصادفی در بازه (۰-۱) است.

۵- سیستم‌های تحت مطالعه

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی، یک شبکه توزیع ۹ شینه و یک شبکه توزیع واقعی ۷۲ شینه به عنوان سیستم‌های تست انتخاب شده‌اند که در ادامه معرفی می‌شوند.

۵-۱- سیستم ۹ شینه

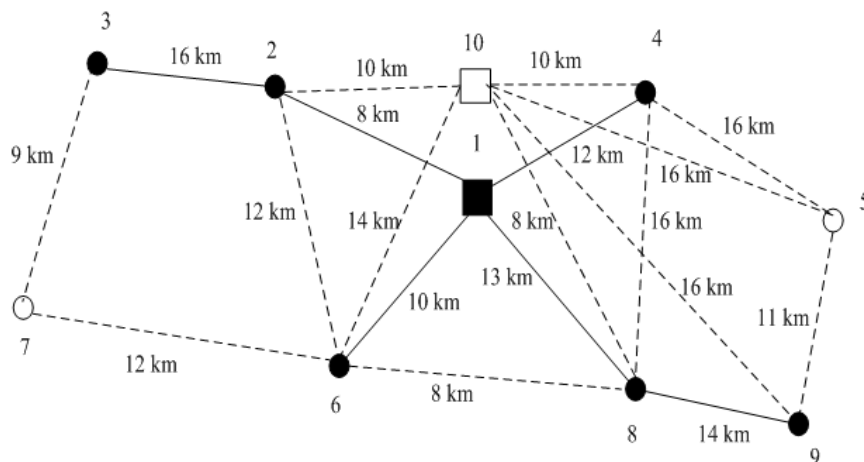
شبکه تست اول در شکل (۱) نشان داده شده است. این شبکه دارای ۹ شینه می‌باشد که یک شینه آن، پست توزیع و دیگر شینه‌ها نقاط تغذیه بار می‌باشند. در این سیستم، ولتاژ نامی ۳۳ kV است. سیستم اولیه دارای یک پست با ظرفیت ۴۰ MVA و یک پست کاندیدای دیگر با همین ظرفیت می‌باشد. این سیستم دارای ۶ خط موجود می‌باشد و ۷ خط نیز به عنوان کاندیدا جهت توسعه در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات فنی و اقتصادی هادی‌ها و دیگر اطلاعات فنی و اقتصادی سیستم مورد مطالعه در مرجع [۱۹] آورده شده است. این

شینه و ۷۲ فیدر است. فیدر اصلی از شینه ۱ تا ۲۴ دو مداره بوده و ادامه آن، یعنی از شینه ۲۴ تا ۷۲ قابلیت دو مداره شدن را دارا می‌باشد. نقاط مشکی رنگ به عنوان نقاط کاندیدا جهت اتصال واحدهای تولید پراکنده تا ظرفیت ۴ مگاوات آمپر و با پله‌های ۱ مگاوات آمپری در نظر گرفته شده‌اند. برای این شبکه، پنج شینه بار جدید در نظر گرفته می‌شود که طی سه دوره سه ساله به شبکه اضافه می‌شوند. این نقاط، می‌توانند به وسیله خطوط نشان داده شده در شکل (۲) به سیستم متصل شوند. اطلاعات مشخصات خطوط و نقاط بار موجود در مرجع [۲۰] ارائه شده است. همچنین اطلاعات نقاط بار و فیدرهای جدید در ضمیمه آورده شده است.

سیستم دارای دو افق برنامه‌ریزی است که اطلاعات نقاط بار آن در پیوست آورده شده است. رشد بار در هر پله ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است همه نقاط بار به عنوان کاندیدا برای نصب واحد تولید پراکنده در نظر گرفته شده‌اند. ظرفیت این واحدها از ۱ MVA تا ۴ MVA به صورت پله‌های ۱ MVA متغیر می‌باشد.

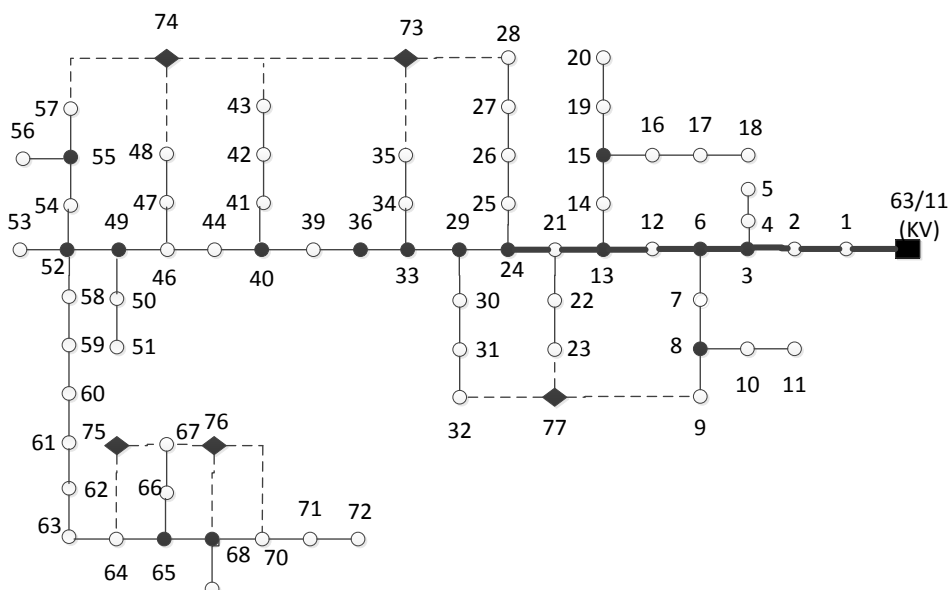
۵-۲- شبکه توزیع کیانپارس اهواز

به منظور نشان دادن توانایی روش پیشنهادی در برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع بزرگ‌تر، شبکه توزیع ۱۱ کیلوولت منطقه کیانپارس اهواز (فیدر ۳۰۶۲) به عنوان سیستم واقعی در نظر گرفته شده است. این سیستم که در شکل (۲) به نمایش در آمده است شامل یک پست توزیع، ۷۲



شکل (۴) : طرح اولیه سیستم ۹ شینه مورد مطالعه

■ پست توزیع موجود؛ □ پست توزیع کاندیدا؛ ● شینه بار موجود؛ ○ شینه بار جدید؛ — خط موجود؛ — خط کاندیدا



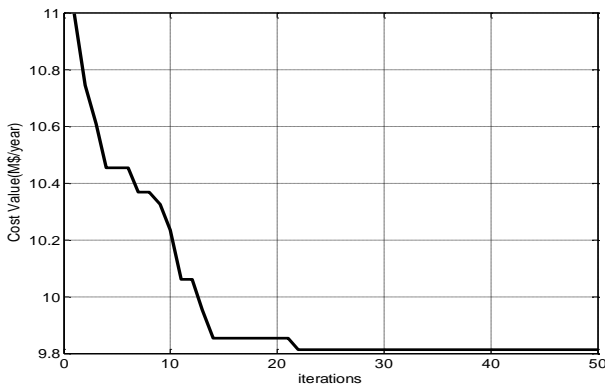
شکل (۲): شبکه توزیع ۱۱ کیلوولت منطقه کیانپارس اهواز به همراه نقاط بار جدید و فیدرهای کاندیدا

● شینه بار کاندیدا؛ ○ شینه بار موجود؛ ◀ شینه بار جدید؛ — خط تک مدار موجود؛ — خط دو مدار موجود؛ — خط کاندیدا

۶- نتایج شبیه‌سازی

۶-۱- شبکه توزیع نمونه ۹ شینه

برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع نشان می‌دهد. در شکل (۱) روند همگرایی الگوریتم PSO برای پله اول برنامه‌ریزی و عدم حضور واحدهای تولید پراکنده به عنوان نمونه آورده شده است.



شکل (۶) : روند همگرایی الگوریتم PSO برای پله اول برنامه‌ریزی

۶-۱-۲- برنامه‌ریزی پیشنهادی با حضور نامعینی‌ها

در این بخش برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع با در نظر گرفتن بار پیش‌بینی شده و قیمت انرژی به صورت نامعین صورت می‌پذیرد. پله اول: در این پله شینه بار ۷ به سیستم مورد مطالعه اضافه می‌شود. نتایج این پله با وجود نامعینی‌ها موجب پیشنهاد نصب خطوط و واحدهای تولید پراکنده جدید مطابق جدول (۱) می‌شود. پله دوم: در این پله شینه بار ۵ به سیستم مورد مطالعه اضافه می‌شود. اضافه شدن این شینه و نیز رشد بار نقاط موجود سبب می‌شود که الگوریتم پیشنهادی، نصب خطوط و واحدهای تولید پراکنده جدید را مطابق جدول (۲) پیشنهاد دهد.

همان‌طور که از جدول (۲) ملاحظه می‌شود، حضور این واحدها باعث بهبود پروفیل ولتاژ شده است. به نحوی که باعث شده است در پله اول انحراف از ولتاژ نامی از ۰/۰۳۳۳٪ در حالت عدم حضور واحدهای تولید پراکنده به ۰/۰۲۶۶٪ در حالت حضور این واحدها برسد. در پله دوم نیز انحراف از ولتاژ نامی از ۰/۰۴۰۳٪ در عدم حضور واحدهای تولید پراکنده به ۰/۰۳۱۰٪ در حضور این واحدها کاهش می‌یابد. هم‌چنین ملاحظه می‌شود در پله دوم به علت عدم پاسخگویی فیدرها، ولتاژ شینه ۵ از حد مجاز کم‌تر شده و عملاً طرح موجود پاسخگوی نیاز شبکه با رعایت قیود برنامه‌ریزی نیست، اما در حضور واحدهای تولید پراکنده این نقص برطرف شده است. در جدول (۳) مقایسه میانگین هزینه‌های برنامه‌ریزی در دو حالت حضور و عدم حضور واحدهای تولید پراکنده و وجود نامعینی بار و هزینه خرید انرژی به نمایش درآمده است. همان‌طور که از این جدول ملاحظه می‌شود در حضور واحدهای تولید پراکنده، هزینه سالانه سیستم در پله اول به میزان ۳/۳۶٪ و در پله دوم به میزان ۷/۶۱٪ در حالت حضور واحدهای تولید پراکنده نسبت به نبود آن‌ها کاهش داشته است. هم‌چنین در حضور واحدهای تولید پراکنده، هزینه تلفات انرژی سیستم در پله اول ۳٪ و در پله دوم ۵/۶۹٪ نسبت به حالت عدم حضور این واحدها کاهش یافته است.

در این بخش برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ۹ شینه در دو حالت حضور و عدم حضور واحدهای تولید پراکنده و در شرایط لحاظ نمودن بار و هزینه خرید انرژی به صورت معین و نامعین صورت می‌پذیرد و تاثیر حضور این واحدها در برنامه‌ریزی نشان داده می‌شود. برای این شبکه، دو افق برنامه‌ریزی با فاصله زمانی ۱۰ سال و افق نهایی ۳۰ سال در نظر گرفته شده است. رشد بار طبق پیوست در نظر گرفته شده است. برای بار، سه سطح کم‌باری، متوسط و پرباری در نظر گرفته شده است و هزینه خرید انرژی نیز متناسب با این سطوح در نظر گرفته شده است. پارامترهای نامعین با میانگین مقدار پیش‌بینی شده و انحراف معیار ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. هم‌چنین برای الگوریتم PSO استفاده شده، تعداد اعضای جامعه ۲۰۰ عضو، $c1=1.5$ و $c2=2.5$ در نظر گرفته شده است. معیار همگرایی الگوریتم، تکرار عضو انتخاب شده در حداقل ۲۰ تکرار متوالی است. برای هر مساله، الگوریتم ۱۰۰ بار اجرا می‌شود تا از انتخاب پاسخ بهینه اطمینان حاصل شود.

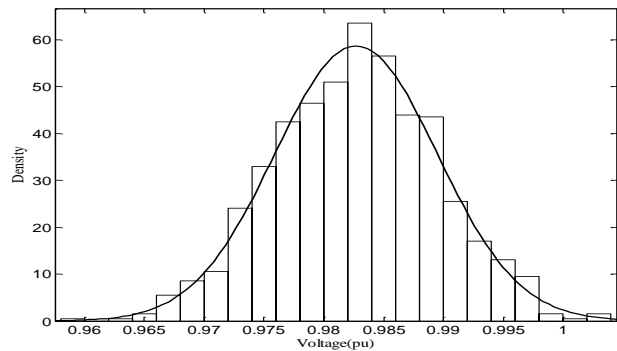
۶-۱-۱- برنامه‌ریزی بدون حضور نامعینی‌ها

پله اول: در این پله شینه بار ۷ به سیستم مورد مطالعه اضافه می‌شود. اضافه شدن این شینه بار در حضور و عدم حضور واحدهای تولید پراکنده موجب پیشنهاد نصب خطوط و واحدهای تولید پراکنده جدید مطابق جدول (۱) می‌شود. **پله دوم:** در این پله، شینه بار ۵ به سیستم مورد مطالعه اضافه می‌شود. اضافه شدن این شینه و نیز رشد بار نقاط موجود سبب می‌شود که الگوریتم پیشنهادی، نصب خطوط و واحدهای تولید پراکنده جدید را مطابق جدول (۱) پیشنهاد دهد.

در برنامه‌ریزی در عدم حضور واحدهای تولید پراکنده، طرح پیشنهادی در پایان پله دوم مشابه مرجع [۲۱] حاصل می‌شود. در حضور واحدهای DG، بر طبق جدول (۲) پروفیل ولتاژ بهبود یافته است به نحوی که در پله اول، حضور این واحدها باعث کاهش انحراف معیار از ولتاژ نامی از ۰/۰۳۳۳٪ به ۰/۰۲۵۹٪ شده است. در پله دوم نیز حضور این واحدها، انحراف از ولتاژ نامی را از ۰/۰۲۸۶٪ به ۰/۰۲۴۴٪ کاهش داده‌اند. لازم به ذکر است که شینه ۵ در پله دوم برنامه‌ریزی به شبکه اضافه می‌شود، به همین دلیل میزان ولتاژ این شینه در پله اول در جدول (۲) به صورت خط‌چین آورده شده است. مطابق با جدول (۳) ملاحظه می‌گردد هزینه سالانه برنامه‌ریزی در پله اول ۲/۷۱٪ و در پله دوم ۲/۶۸٪ در حالت حضور DG نسبت به حالت نبود آن کاهش داشته است. هزینه تلفات انرژی نیز در پله اول ۷/۵۹٪ و در پله دوم ۳/۲۲٪ در حالت حضور واحدهای تولید پراکنده نسبت به نبود آن‌ها کاهش داشته است. این موارد، مزیت حضور واحدهای DG را در

DG است، سطر دوم طرح پیشنهادی بدون DG است که نتایج این حالت با نتایج مرجع [۲۱] یکسان شده است و سطر سوم نیز مرجع [۱۹] می‌باشد. لازم به ذکر است که هدف از این جدول، نشان دادن برتری طرح پیشنهادی با وجود DG نسبت به دو طرح دیگر می‌باشد که در واقع هدف، نشان دادن اثر DG است. هم‌چنین نشان داده می‌شود که در حالت بدون DG و شرایط مشابه نیز، طرح پیشنهادی نتایج مشابهی با مرجع [۲۱] دارد ولی نسبت به مرجع [۱۹] نتایج بهتری ارائه می‌دهد. ملاحظه می‌شود طراح ارائه شده در این مرحله نسبت به طرح پیشنهادی دو روش ارائه شده در [۱۹، ۲۱]، موجب بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش بارگذاری خطوط و کاهش تلفات، با هزینه کمتر شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود طرح پیشنهادی مقاله در حالت عدم حضور واحدهای تولید پراکنده مشابه طرح پیشنهادی ارائه شده توسط مرجع [۲۱] می‌باشد.

بدیهی است که ولتاژهای نقاط بار نیز به صورت توابع احتمالاتی می‌باشد که در شکل (۷) ولتاژ شینه چهارم در عدم حضور واحدهای تولید پراکنده به عنوان نمونه آورده شده است.



شکل (۷) : ولتاژ شینه چهارم در پله اول برنامه‌ریزی

۳-۱-۶- مقایسه طرح پیشنهادی با نتایج دیگر مقالات در حالت عدم حضور نامعینی‌ها

به منظور نشان دادن توانایی روش بهینه‌سازی مورد استفاده، مقایسه نتایج حاصل از پله اول برنامه‌ریزی و حضور واحدهای تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم PSO و ژنتیک (GA) در جدول (۴) به نمایش در آمده است. همان طور که ملاحظه می‌شود در شرایط مشابه (تعداد اعضا و تعداد تکرار مشابه) الگوریتم PSO منجر به ارائه طرح با هزینه کمتر شده است.

در جدول (۵) مقایسه بین طرح پیشنهادی و طرح‌های بیان شده توسط مراجع [۱۹، ۲۱] صورت گرفته است. در ارتباط با این جدول باید گفت که جهت مقایسه، شرایط یکسان لحاظ شده است. یعنی همان گونه که در سطر دوم جدول (۵) بیان شده است، طرح پیشنهادی (بدون DG) و مرجع [۲۱] یعنی اینکه طرح پیشنهادی بدون DG در نظر گرفته شده است تا شرایط مشابهی با دیگر مراجع داشته باشد. جدول (۵) سه سطر دارد: سطر اول طرح پیشنهادی با

۴-۱-۶- مقایسه طرح پیشنهادی با نتایج دیگر مقالات در حضور نامعینی

به منظور نشان دادن اثر نامعینی در برنامه‌ریزی توسعه، نتایج ارائه شده در این مقاله با نتایج بخش قبل و دو مرجع [۱۹، ۲۱] مقایسه شده است که در این مراجع اثر نامعینی در نظر گرفته نشده است. نتایج مقایسه مذکور در جدول (۶) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود در افزایش ۲۰٪ بار، تلفات طرح ارائه شده توسط مقاله در حالت حضور نامعینی نسبت به طرح در عدم حضور نامعینی و مراجع [۱۹، ۲۱]، کاهش داشته است. هم‌چنین قیود ولتاژ و توان عبوری از خطوط در طرح‌های ارائه شده توسط این مقالات و طرح پیشنهادی مقاله در نبود نامعینی نقض شده‌اند. در کاهش ۲۰٪ بار نیز طرح پیشنهادی مقاله دارای تلفات کمتری نسبت به طرح‌های دیگر است.

جدول (۱) : اطلاعات خطوط و واحدهای تولید پراکنده اضافه شده پس از توسعه شبکه توزیع ۹ شینه

	عدم حضور نامعینی‌ها				حضور نامعینی‌ها			
	پله اول		پله دوم		پله اول		پله دوم	
	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG
خطوط اضافه شده جدید (شماره خط و نوع هادی استفاده شده)	۱ : ۷-۶	خط ۱ : ۷-۶	۱ : ۵-۴ ۲ : ۲-۱ ۲ : ۶-۱ ۱ : ۲-۱۰ ۲ : ۸-۱	۱ : ۵-۴	۱ : ۷-۶ ۲ : ۲-۱ ۲ : ۶-۱ ۲ : ۸-۱	خط ۱ : ۷-۶	۱ : ۵-۴ ۲ : ۳-۲ ۲ : ۴-۱ ۲ : ۹-۸ ۱ : ۲-۱۰	۱ : ۵-۴ ۲ : ۲-۱ ۲ : ۴-۱
DGهای اضافه شده	-	۲MW در شینه ۳ ۱MW در شینه ۷ ۲MW در شینه ۹	-	منبع ۳ مگاواتی در شینه‌های ۵، ۲ و ۸ منبع ۲ مگاواتی در شینه‌های ۴، ۶ و ۷ منبع ۱ مگاواتی در شینه ۳	-	۴ MW در شینه ۳ ۱ MW در شینه ۷ ۲ MW در شینه ۹	-	منبع ۳ مگاواتی در شینه ۴ منبع ۲ مگاواتی در شینه‌های ۲، ۵، ۷ و ۹ منبع ۱ مگاواتی در شینه‌های ۶ و ۸

جدول (۲): اطلاعات ولتاژ شینه‌ها پس از توسعه شبکه توزیع ۹ شینه

شماره شینه	عدم حضور نامعینی‌ها				حضور نامعینی‌ها			
	پله اول		پله دوم		پله اول		پله دوم	
	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۰/۹۷۸۵	۰/۹۸۰۱	۱	۰/۹۸۰۲	۰/۹۸۵۱	۰/۹۸۵۹	۱	۰/۹۸۷۰
۳	۰/۹۵۲۹	۰/۹۶۵۵	۰/۹۵۴۹	۰/۹۵۵۹	۰/۹۶۰۱	۰/۹۸۲۰	۰/۹۷۸۰	۰/۹۵۸۰
۴	۰/۹۸۱۱	۰/۹۸۱۱	۰/۹۶۸۴	۰/۹۸۴۰	۰/۹۸۲۲	۰/۹۸۳۵	۰/۹۶۱۰	۰/۹۸۰۰
۵	-	-	۰/۹۸۳۵	۰/۹۸۱۷	-	-	۰/۹۴۶۰	۰/۹۵۴۰
۶	۰/۹۷۹۰	۰/۹۸۱۶	۰/۹۸۵۰	۰/۹۸۵۱	۰/۹۸۱۰	۰/۹۸۵۲	۰/۹۸۰۰	۰/۹۸۳۰
۷	۰/۹۶۵۳	۰/۹۷۱۰	۰/۹۶۷۲	۰/۹۷۳۴	۰/۹۷۱۰	۰/۹۷۸۰	۰/۹۶۰۱	۰/۹۷۱۰
۸	۰/۹۶۹۲	۰/۹۷۶۱	۰/۹۸۰۳	۰/۹۸۳۷	۰/۹۸۳۰	۰/۹۸۰۰	۰/۹۷۳۰	۰/۹۷۴۰
۹	۰/۹۵۴۰	۰/۹۶۸۱	۰/۹۶۴۱	۰/۹۷۴۶	۰/۹۵۸۰	۰/۹۶۰۰	۰/۹۵۸۰	۰/۹۶۲۰

جدول (۳): اطلاعات هزینه‌های برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ۹ شینه

مورد هزینه	عدم حضور نامعینی‌ها				حضور نامعینی‌ها			
	پله اول		پله دوم		پله اول		پله دوم	
	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG
هزینه نصب فیدر (M\$)	۱/۲	۱/۲	۴/۸۸	۱/۶	۳/۶۸	۱/۲	۵/۷۶	۳/۲
هزینه نصب پست (M\$)	۰	۰	۰/۸	۰	۰	۰	۰/۸	۰
هزینه نصب DG (M\$)	۰	۱/۵۹	۰	۴/۱۳۴	۰	۲/۲۲۶	۰	۴/۱۳۴
هزینه سرمایه‌گذاری کل (M\$)	۱/۲	۲/۷۹	۵/۶۸	۵/۷۳۴	۳/۶۸	۳/۴۲۶	۶/۵۶	۷/۳۳۴
هزینه سالانه بهره‌برداری DG (M\$/year)	۰	۱/۰۲۹۸	۰	۵/۹۲۱۲	۰	۱/۸۱۵۷	۰	۴/۶۲۸۰
هزینه سالانه خرید انرژی از شبکه (M\$/year)	۹/۶۵۹۵	۸/۱۵۸۸	۱۱/۸۱۰۸	۵/۱۰۹۷	۹/۹۰۳۲	۷/۷۷۱۲	۱۲/۱۱۲۶	۶/۲۴۳۵
هزینه سالانه بهره‌برداری کل (M\$/year)	۹/۶۵۹۵	۹/۱۸۸۵	۱۱/۸۱۰۸	۱۱/۰۳۰۹	۹/۹۰۳۲	۹/۵۸۶۹	۱۲/۱۱۲۶	۱۰/۸۷۱۵
هزینه سالانه کل توسعه (M\$/year)	۹/۸۱۴	۹/۵۴۷۸	۱۲/۳۸۲۶	۱۲/۰۴۲۳	۱۰/۳۷۷۱	۱۰/۰۲۸	۱۲/۹۱۴۳	۱۱/۸۷۴۳
هزینه سالانه تلفات انرژی (M\$/year)	۰/۳۸۲	۰/۳۴۹	۰/۴۹۶	۰/۴۸۰	۰/۴۱۳	۰/۴۰۰	۰/۵۱۰	۰/۴۸۱

جدول (۴): مقایسه طرح پیشنهادی ارائه شده توسط الگوریتم‌های ژنتیک و PSO

الگوریتم مورد استفاده	خطوط اضافه شده	واحدهای تولید پراکنده اضافه شده	هزینه طرح (M\$/year)
PSO	۶-۷ : ۱	۳ شینه ۲MW در شینه ۳ ۷ شینه ۱MW در شینه ۷ ۲MW در شینه ۹	۹/۵۴۷۸
GA	۲-۱ : ۲ ۶-۷ : ۱	۳ شینه ۲MW در شینه ۳ ۱MW در شینه ۶ ۲MW در شینه ۹	۹/۸۵۸۶

جدول (۵): مقایسه طرح‌های نهایی مقاله و طرح‌های پیشنهادی ارائه شده در مراجع دیگر

روش	هزینه طرح نهایی (M\$/year)	تلفات طرح (PU)	انحراف از ولتاژ نامی	بیشترین بارگذاری خطوط
طرح پیشنهادی (با DG)	۱۲/۰۴۲۳	۰/۰۰۳۳۵	۰/۰۲۱۶	۱-۲ در خط ۱۸۳۷
طرح پیشنهادی (بدون DG) و مرجع [۲۱]	۱۲/۳۸۵۶	۰/۰۰۶۵۳	۰/۰۲۹۳	۱-۶ در خط ۱۸۸۳
مرجع [۱۹]	۱۳/۵۰۹	۰/۰۰۵۲۹	۰/۰۳۱۹	۱-۲ در خط ۱۸۵۷

جدول (۶): بررسی اثر تغییر بار بر روی طرح‌های پیشنهادی مقاله و طرح‌های ارائه شده در مراجع دیگر

	هزینه طرح نهایی (MS/year)	افزایش بار به میزان ۲۰٪			کاهش بار به میزان ۲۰٪		
		تلفات طرح (PU)	تعداد شینه‌های متجاوز از ولتاژ نامی	تعداد خطوط متجاوز از بار نامی	تلفات طرح (PU)	تعداد شینه‌های متجاوز از ولتاژ نامی	تعداد خطوط متجاوز از بار نامی
طرح پیشنهادی در حضور نامعینی‌ها	۱۱/۸۷۴۳	۰/۰۰۶۲۳	۰	۰	۰/۰۰۱۳۹	۰	۰
طرح پیشنهادی در نبود نامعینی‌ها	۱۲/۰۴۲۳	۰/۰۰۷۱۱	۱	۱	۰/۰۰۱۶۶	۰	۰
مرجع [۲۱]	۱۲/۳۸۵۶	۰/۰۰۸۵۷	۱	۲	۰/۰۰۴۷۲	۰	۰
مرجع [۱۹]	۱۳/۵۰۹	۰/۰۰۹۲۲	۲	۱	۰/۰۰۲۷۰	۰	۰

۶-۲-۲- برنامه‌ریزی پیشنهادی با حضور نامعینی‌ها

در این بخش نیز مانند بخش قبل برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع در دو حالت حضور و عدم حضور واحدهای تولید پراکنده با وجود نامعینی‌ها صورت می‌پذیرد.

پله اول: در این پله، نقاط بار ۷۳ و ۷۴ به سیستم مورد مطالعه اضافه می‌شوند. این نقاط می‌توانند از طریق خطوط نشان داده شده در شکل (۲) به سیستم متصل شوند. اضافه شدن این نقاط بار در حضور و عدم حضور واحدهای تولید پراکنده موجب پیشنهاد نصب خطوط و واحدهای تولید پراکنده جدید مطابق جدول (۷) می‌شود.

پله دوم: در این پله نقاط بار ۷۵ و ۷۶ به سیستم مورد مطالعه اضافه می‌شوند. رشد بار نقاط از یک سو و اضافه شدن نقاط بار جدید از سوی دیگر سبب می‌شود که الگوریتم نصب خطوط و واحدهای تولید پراکنده جدید را مطابق جدول (۷) پیشنهاد دهد.

پله سوم: در این پله شینه بار ۷۷ به سیستم مورد مطالعه اضافه می‌شود. نتایج حاصل از توسعه در این پله نیز در جدول (۷) آمده است.

در برنامه‌ریزی در عدم حضور واحدهای تولید پراکنده و در پایان پله سوم قیود برنامه‌ریزی به طور کامل رعایت نمی‌شوند. به نحوی که در برخی شینه‌ها مانند شینه ۷۶ شاهد افت ولتاژ بیش از حد مجاز هستیم که این ایراد در حضور واحدهای تولید پراکنده برطرف شده است. جدول (۸) کم‌ترین ولتاژ شبکه را در حضور و عدم حضور واحدهای تولید پراکنده نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر بهبود پروفیل ولتاژ در حالت حضور واحدهای تولید پراکنده نسبت به نبود آن‌ها است. جدول (۹) نیز هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه را نشان می‌دهد. در این جدول ملاحظه می‌شود حضور واحدهای تولید پراکنده، هزینه های بهره‌برداری از شبکه را به میزان ۲/۵٪ در پله اول، ۶/۳۰٪ در پله دوم و ۵/۶۴٪ در پله سوم کاهش داده است. همچنین هزینه تلفات انرژی در حضور این واحدها در پله اول ۲۸/۶۵٪، در پله دوم ۴۱/۷۵٪ و در پله سوم ۴۶/۳۰٪ نسبت به نبود آن‌ها کاهش یافته است. این موارد نشان می‌دهد حضور این واحدها در این شرایط نیز تاثیر مثبتی در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و تلفات انرژی بر طرح پیشنهادی دارد.

۶-۲-۱- شبکه توزیع ۷۲ شینه منطقه کیانپارس اهواز

در این قسمت، برنامه‌ریزی توسعه شبکه بر روی شبکه کیانپارس اهواز اجرا می‌شود. برای این شبکه سه افق برنامه‌ریزی با فاصله زمانی ۱۰ سال و افق نهایی ۳۰ سال در نظر گرفته شده است. رشد بار ۵٪ در نظر گرفته شده است و شرایط بهره‌برداری، مشخصات الگوریتم PSO و مونت کارلو همانند شبکه ۹ شینه در نظر گرفته شده است.

۶-۲-۱- برنامه ریزی بدون حضور نامعینی‌ها

پله اول: در این پله، نقاط بار ۷۳ و ۷۴ به سیستم مورد مطالعه اضافه می‌شوند. این نقاط می‌توانند از طریق خطوط نشان داده شده در شکل (۲) به سیستم متصل شوند. اضافه شدن این نقاط بار در حضور و عدم حضور واحدهای تولید پراکنده موجب پیشنهاد نصب خطوط و واحدهای تولید پراکنده جدید مطابق جدول (۷) می‌شود.

پله دوم: در این پله، نقاط بار ۷۵ و ۷۶ به سیستم مورد مطالعه اضافه می‌شوند. نتایج این پله نیز در جدول (۷) آمده است.

پله سوم: در این پله شینه بار ۷۷ به سیستم مورد مطالعه اضافه می‌شود. رشد بار نقاط موجود و اضافه شدن این شینه بار جدید به نصب خطوط و واحدهای تولید پراکنده جدید مطابق جدول (۷) می‌انجامد.

نتایج ارائه شده در جدول (۸) نشان دهنده بهبود پروفیل ولتاژ در حالت حضور واحدهای تولید پراکنده نسبت به حالت عدم حضور این واحدها است. همچنین جدول (۹) نشان دهنده کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه و نیز کاهش تلفات سیستم در حالت حضور واحدهای تولید پراکنده نسبت به عدم حضور آن‌ها است به نحوی که هزینه نهایی طرح با وجود DGها در پله اول ۰/۱۴٪، در پله دوم ۲/۴۶٪ و در پله سوم ۳/۴۸٪ نسبت به عدم حضور DGها کاهش داشته است. همچنین وجود DGها در شبکه باعث شده تا در برنامه‌ریزی، هزینه تلفات انرژی شبکه در پله اول ۳۲/۵۸٪، در پله دوم ۴۱/۵۱٪ و در پله سوم ۴۵/۲۸٪ نسبت به عدم حضور DGها کاهش یابد. این موارد نشان دهنده مزیت حضور واحدهای تولید پراکنده در توسعه شبکه توزیع نسبت به نبود آن‌ها است.

۶-۲-۳- مقایسه نتایج در حضور و عدم حضور نامعینی

همان طور که از جدول (۹) ملاحظه می‌شود میانگین هزینه‌های پیش‌بینی شده در حالت نامعینی پارامترها و عدم حضور واحدهای تولید پراکنده، ۱/۹۳٪ بیش‌تر از مقدار آن در حالت معینی پارامترها می‌باشد. بالاتر بودن اندک هزینه‌ها در این حالت نسبت به حالت

معینی بار، با توجه به تامین بار نامعین در آینده پذیرفتنی است. اما این مقدار در حضور واحدهای تولید پراکنده و حالت لحاظ نمودن نامعینی بار و قیمت انرژی، ۰/۹۵٪ کم‌تر از آن در حالت بدون نامعینی می‌باشد. ملاحظه می‌شود که در این حالت نیز حضور واحدهای تولید پراکنده موجب کاهش هزینه‌های برنامه‌ریزی شده است.

جدول (۷) : اطلاعات خطوط و واحدهای تولید پراکنده اضافه شده پس از توسعه شبکه توزیع ۷۲ شینه

	عدم حضور نامعینی‌ها						حضور نامعینی‌ها					
	پله اول		پله دوم		پله سوم		پله اول		پله دوم		پله سوم	
	بدون DG	DG با	بدون DG	DG با	بدون DG	DG با	بدون DG	DG با	بدون DG	DG با	بدون DG	DG با
خطوط اضافه شده جدید	۱	۱	۱۳	۱۳	۸	۹	۱	۱	۱۳	۱۳	۸	۹
خطوط دو مداره شده	-	-	۳۹-۳۶ ۴۰-۳۹ ۴۴-۴۰ ۴۶-۴۴ ۵۲-۴۹	-	۲۹-۲۴ ۳۳-۲۹ ۳۶-۳۳ ۴۹-۴۶	-	۲۹-۲۴ ۳۳-۲۹ ۳۶-۳۳ ۴۰-۳۹ ۶۳-۶۲	-	۳۹-۳۶ ۴۴-۴۰ ۴۶-۴۴ ۴۹-۴۶ ۵۲-۴۹ ۵۹-۵۸ ۶۰-۵۹ ۶۵-۶۴	-	۶۱-۶۰ ۶۲-۶۱ ۶۳-۶۲ ۶۴-۶۳ ۶۸-۶۵ ۷۰-۶۸ ۷۱-۷۰ ۷۲-۷۱	-
DGهای اضافه شده	-	۲ مگاوات در شینه ۶۵	-	۱ مگاوات در شینه ۵۲	-	۱ مگاوات در شینه‌های ۵۲ و ۴۹	-	۲ مگاوات در شینه ۶۵	-	۲ مگاوات در شینه ۵۲	-	-

جدول (۸) : اطلاعات ولتاژ شینه‌ها پس از توسعه شبکه توزیع ۷۲ شینه

	عدم حضور نامعینی‌ها				حضور نامعینی‌ها			
	بدون DG		با DG		بدون DG		با DG	
	کم‌ترین ولتاژ (pu)	شماره شینه	کم‌ترین ولتاژ (pu)	شماره شینه	کم‌ترین ولتاژ (pu)	شماره شینه	کم‌ترین ولتاژ (pu)	شماره شینه
پله اول	۰/۹۵۲۳	۶۹	۰/۹۶۳۱	۱۱	۰/۹۵۴۱	۶۹	۰/۹۶۲۹	۱۱
پله دوم	۰/۹۵۰۳	۷۶	۰/۹۶۰۳	۱۱	۰/۹۵۲۴	۷۶	۰/۹۵۹۰	۱۱
پله سوم	۰/۹۵۰۱	۷۶	۰/۹۶۰۳	۱۱	۰/۹۴۸۳	۷۶	۰/۹۵۷۶	۱۱

جدول (۹) : اطلاعات هزینه‌های برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع ۷۲ شینه

مورد هزینه	عدم حضور نامعینی‌ها						حضور نامعینی‌ها					
	پله اول		پله دوم		پله سوم		پله اول		پله دوم		پله سوم	
	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG	بدون DG	با DG
هزینه فیدر (M\$)	۰/۰۵۶	۰/۰۵۶	۰/۰۵۷	۰/۰۲۷	۰/۱۳۷	۰/۰۰۶	۰/۰۹۵	۰/۰۵۶	۰/۰۸۷	۰/۰۲۷	۰/۱۳۰	۰/۰۰۶
هزینه DG (M\$)	۰	۰/۶۳۶	۰	۰/۳۱۸	۰	۰/۶۳۶	۰	۰/۶۳۶	۰	۰/۶۳۶	۰	۰
هزینه سرمایه‌گذاری کل (M\$)	۰/۰۵۶	۰/۶۹۲	۰/۰۵۷	۰/۳۶۰	۰/۱۳۷	۰/۴۶۲	۰/۰۹۵	۰/۶۹۲	۰/۰۸۷	۰/۶۳۶	۰/۱۳۰	۰/۰۰۶
هزینه سالانه بهره‌برداری DG (M\$/year)	۰	۰/۵۱۵	۰	۰/۷۷۲	۰	۱/۲۸۷	۰	۰/۵۱۷	۰	۱/۰۳۴	۰	۱/۰۳۴
هزینه سالانه خرید انرژی از شبکه (M\$/year)	۳/۴۰۹	۲/۸۰۷	۳/۷۳۱	۲/۸۳۳	۴/۰۰۸	۲/۵۱۵	۳/۴۸۵	۲/۸۰۴	۳/۸۴۷	۲/۴۹۶	۴/۰۲۴	۲/۷۷۸
هزینه سالانه بهره‌برداری کل (M\$/year)	۳/۴۰۹	۳/۳۲۲	۳/۷۳۱	۳/۶۰۵	۴/۰۰۸	۳/۸۰۲	۳/۴۸۵	۳/۳۲۱	۳/۸۴۷	۳/۵۲۰	۴/۰۲۴	۳/۸۱۲
هزینه کل توسعه (M\$/year)	۳/۴۱۶	۳/۴۱۱	۳/۷۳۹	۳/۶۴۷	۴/۰۲۵	۳/۸۸۵	۳/۴۹۷	۳/۴۱۰	۳/۸۵۸	۳/۶۱۵	۴/۰۴۱	۳/۸۱۳
هزینه تلفات انرژی (M\$/year)	۰/۰۸۹	۰/۰۶۰	۰/۱۰۴	۰/۰۶۰	۰/۱۰۶	۰/۰۵۸	۰/۰۸۴	۰/۰۶۰	۰/۱۰۳	۰/۰۶۰	۰/۱۰۸	۰/۰۵۸

جدول (الف-۳): اطلاعات نقاط بار جدید شبکه توزیع

۱۱ کیلو ولت منطقه کیانپارس اهواز

پله اضافه شدن	بار (kW + j kVAR)	شینه جدید
۱	۱۸۰+۱۰۰j	۷۳
۲	۲۰۰+۱۱۰j	۷۴
۳	۲۸۰+۱۵۰j	۷۵
۴	۲۵۰+۱۳۰j	۷۶
۵	۲۳۰+۱۲۰j	۷۷

جدول (الف-۴): اطلاعات خطوط کاندیدا شبکه توزیع ۱۱ کیلوولت

منطقه کیانپارس اهواز

شماره خط	طول خط بر حسب متر
۱	۲۱۶
۲	۴۹۱
۳	۲۱۰
۴	۱۷۷
۵	۲۱۰
۶	۴۹۱
۷	۳۴۵
۸	۳۲۶
۹	۵۹
۱۰	۲۰۱
۱۱	۳۲۶
۱۲	۲۳۷
۱۳	۲۹
۱۴	۵۴۸
۱۵	۲۳۷

مراجع

- [1] T. Ackermann, G. Andersson and L. Söder, "Distributed generation: a definition," Electric Power Systems Research, Vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [2] U. Eminoglu and M. H. Hocaoglu, "A new power flow method for radial distribution systems including voltage dependent load models," Electric Power Systems Research, Vol. 76, pp. 106-114, 2005.
- [3] F.P. Vahl, R. Rüther and N. Casarotto Filho, "The influence of distributed generation penetration levels on energy markets," Energy Policy, Vol. 62, pp. 226-235, 2013.
- [4] M. Esmaili, E. C. Firozjaee and H. A. Shayanfar, "Optimal placement of distributed generations considering voltage stability and power losses with observing voltage-related constraints," Applied Energy, Vol. 113, pp. 1252-1260, 2014.
- [5] D. P. Bernardon, A. P. C. Mello, L. L. Pfischer, L. N. Canha, A. R. Abaide and A. A. B. Ferreira, "Real-time reconfiguration of distribution network with distributed generation," Electric Power Systems Research, Vol. 107, pp. 59-67, 2014.
- [6] A. Khamis, H. Shareef, E. Bizkevelci and T. Khatib, "A review of islanding detection techniques for renewable distributed generation systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 28, pp. 483-493, 2013.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، گسترش شبکه‌های توزیع با هدف حداقل سازی هزینه‌ها، شامل هزینه نصب و تجهیز پست‌ها و فیدرها، هزینه خرید انرژی از شبکه قدرت و هزینه نصب و بهره‌برداری DGها ارائه شد. در نظر گرفتن نامعینی در بار پیش‌بینی شده برای شینه‌ها، موجب می‌شود طرح ارائه شده برای شبکه توزیع، توانایی تامین بار به صورت استاندارد را داشته باشد. همچنین در نظر گرفتن نامعینی برای هزینه خرید انرژی، تخمین واقعی‌تری از هزینه‌های پیش روی گسترش شبکه توزیع را ارائه می‌دهد. به همین دلیل برنامه‌ریزی توسعه در حالت لحاظ نمودن این موارد به صورت نامعین صورت پذیرفت. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در هر دو حالت حضور و عدم حضور نامعینی، ملاحظه شد که حضور واحدهای تولید پراکنده موجب بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه و کاهش تلفات انرژی می‌شود. این مطلب بیانگر تاثیر مثبت حضور این واحدها در برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع می‌باشند.

ضمیمه

جدول (الف-۱): بارگذاری و هزینه خرید انرژی

برای سیستم ۹ شینه

هزینه خرید انرژی (\$/MW h)	تعداد ساعات (h)	درصد پیک بار	سطح بار
۷۰	۱۵۰۰	۱۰۰	پر باری
۴۹	۵۰۰۰	۷۰	بار نرمال
۳۵	۲۲۶۰	۵۰	کم باری

جدول (الف-۲): اطلاعات بار در دو افق برنامه‌ریزی سیستم ۹ شینه

شماره شینه	پیک تقاضا در انتهای پله اول (MVA)	پیک تقاضا در انتهای پله دوم (MVA)
۲	۶/۱۸۶۰	۶/۶۵۰۸
۳	۵/۴۸۰۰	۶/۷۹۰۱
۴	۶/۱۸۶۰	۶/۶۵۰۸
۵	-	۳/۴۸۲۱
۶	۳/۷۰۸۴	۳/۹۸۷۰
۷	۴/۴۳۰۶	۵/۷۴۵۵
۸	۴/۹۴۷۲	۵/۳۱۹۰
۹	۴/۱۶۱۸	۴/۴۷۴۵

- Transactions on Sustainable Energy, Vol. 3, pp. 112-123, 2012.
- [16] A. Sillaber, *Linear programming for electric power distribution system expansion planning: A dynamic expansion model for loop structured networks*, Springer Berlin Heidelberg, 1986.
- [17] E. G. Carrano, R. T. N. Cardoso, R. H. C. Takahashi, C. M. Fonseca and O. M. Neto, "Power distribution network expansion scheduling using dynamic programming genetic algorithm," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, Vol. 2, pp. 444-455, 2008.
- [18] A. M. El-Zonkoly, "Multistage expansion planning for distribution networks including unit commitment," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, Vol. 7, pp. 766-778, 2013.
- [19] H. Falaghi, C. Singh, M. R. Haghifam and M. Ramezani, "DG integrated multistage distribution system expansion planning," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 33, pp. 1489-1497, 2011.
- [20] M. Ataei and R.-A. Hooshmand, "Optimal capacitor placement in actual configuration and operational conditions of distribution systems using RCGA," *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 58, pp. 189-199, 2007.
- [21] V. Quintana, H. Temraz and K. Hipel, "Two-stage power system distribution planning algorithm," *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 140, pp. 17-29, 1993.
- [7] C. L. T. Borges, "An overview of reliability models and methods for distribution systems with renewable energy distributed generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 4008-4015, 2012.
- [8] M. Sedghi, M. Aliakbar-Golkar and M. R. Haghifam, "Distribution network expansion considering distributed generation and storage units using modified PSO algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 52, pp. 221-230, 2013.
- [9] S. N. Ravadanegh and R. G. Roshanagh, "On optimal multistage electric power distribution networks expansion planning," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 54, pp. 487-497, 2014.
- [10] F. H. P. Zamora, A. P. Cunha, J. C. Guaraldo, H. Kagan, M. R. Gouvea and E. Vicentini, "Advanced computational tool for analysing the impact of distributed generation on distribution systems planning," in: *Integration of Renewables into the Distribution Grid, CIRED 2012 Workshop*, 2012, pp. 1-4.
- [11] W. El-khattam, Y. Hegazy and M. Salama, "An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning", in: *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005, pp. 2392 Vol. 2393.
- [12] O. M. Mikic, "Mathematical dynamic model for long-term distribution system planning," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 1, pp. 34-40, 1986.
- [13] S. Haffner, L. F. A. Pereira, L. A. Pereira and L. S. Barreto, "Multistage model for distribution expansion planning with distributed generation; part ii: numerical results," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, pp. 924-929, 2008.
- [14] W. Ouyang, H. Cheng, X. Zhang and L. Yao, "Distribution network planning method considering distributed generation for peak cutting," *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp. 2394-2401, 2010.
- [15] Z. Kai, A. P. Agalgaonkar, K. M. Muttaqi and S. Perera, "Distribution system planning with incorporating dg reactive capability and system uncertainties," *IEEE*

زیر نویس‌ها

- ¹ Particle swarm optimization (PSO)
² Distributed generations (DG)
³ Probability distribution function (PDF)