

جایابی و تعیین ظرفیت بهینه تولیدات پراکنده و خازن با استفاده از الگوریتم چندهدفه کلونی زنبور مصنوعی اصلاح شده با در نظر گرفتن مدل های مختلف بار افشین لشکرآرا^۱، میلاد کفایت^۲، جمشید آقایی^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی برق قدرت - دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول - دزفول - ایران

Lashkarara@iust.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، گروه مهندسی برق قدرت - دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول - دزفول - ایران

Milad.kefayat@gmail.com

۳- استادیار، گروه مهندسی برق قدرت - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران

Aghaei@sutech.ac.ir

چکیده

امروزه با توجه به توسعه شبکه های توزیع و افزایش تقاضای برق، استفاده از منابع تولید پراکنده و بانک های خازنی به موازات هم افزایش یافته است. در این مقاله، الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی اصلاح شده به منظور بهینه سازی هم زمان جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده و خازن پیشنهاد شده است که با هدف کاهش تلفات، انحراف از ولتاژ، هزینه و بهبود شاخص پایداری ولتاژ با در نظر گرفتن مدل های مختلف بوده است. در الگوریتم طراحی شده، عامل های جست و جوگر، مسیر حرکت خود را با استفاده از راه حل های به دست آمده اصلاح می کنند و عملگرهای تکاملی تقاطع و جهش به گسترش جواب کمک می کنند. همچنین به منظور بهینه سازی چندهدفه از یک آرشیو خارجی، جهت ذخیره جواب نامغلوب و از منطق فازی، جهت یافتن بهینه ترین حالت در میان پاسخ های پارتو به دست آمده، استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه ۶۹ شینه IEEE پیاده سازی شده و نتایج حاصل از این روش، تجزیه و تحلیل شده است. نتایج شبیه سازی، کارایی و عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی را در مقایسه با روش های دیگر نشان می دهد.

واژه های کلیدی: الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، بهینه سازی چندهدفه، پایداری ولتاژ، تولید پراکنده، خازن، بهینه پارتو.

۱- مقدمه

شبکه توزیع به دلیل مشکلات حفاظتی و کنترلی، بیشتر به صورت شعاعی انجام می گیرد. این عوامل باعث افزایش بیشتر افت ولتاژ، تلفات، عدم تعادل بار و کاهش پایداری ولتاژ و ... می شود. استفاده از مولدهای مقیاس کوچکی که به صورت مستقیم به شبکه های توزیع و یا مصرف کنندگان محلی متصل می شوند، از ایجاد نیروگاه ها، خطوط انتقال و توزیع جدید جلوگیری می کنند [۱]. همچنین کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، افزایش ظرفیت خطوط، افزایش قابلیت اطمینان و پایداری سیستم از جمله مزایای سیستمی و نصب

افزایش روز افزون تقاضای بار موجب توسعه هرچه بیشتر شبکه های توزیع شده است. همچنین بهره برداری از

^۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۰۳/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۵/۰۲/۲۱

نام نویسنده مسئول : افشین لشکرآرا

نشانی نویسنده مسئول : ایران - دزفول - دانشگاه آزاد اسلامی

واحد دزفول - گروه مهندسی برق قدرت

رفتار کلی سیستم استفاده شوند. برای مثال، در مرجع [۸, ۷] از روش "rule ۲/۳" به منظور جایابی و مقداربندی بهینه خازن و تولیدات پراکنده به ترتیب استفاده شده است. این روش برای تجزیه و تحلیل بارهای غیرهمسان در شبکه توزیع مناسب نیست. در مرجع [۳] از روش آنالیز حساسیت برای جایابی همزمان خازن و تولیدات پراکنده با هدف کاهش تلفات استفاده شده است.

معمولاً روش‌های ریاضی قادر به رسیدن به بهترین جواب هستند. در مرجع [۹] از روش برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح به منظور جایابی و تعیین مقدار بهینه خازن استفاده شده است؛ اما به مسئله پایداری و لثاژ که امری ضروری در کنترل توان راکتیو است پرداخته نشده است. همچنین از روش مذکور در مرجع [۱۰] به منظور بهینه‌سازی تولیدات پراکنده با توجه به کاهش تلفات بهره‌گیری شده است. جایابی بهینه خازن در مرجع [۱۱] با استفاده از روش جست‌وجوی مستقیم^۳ (DSA) جهت کاهش تلفات، هزینه و بهبود و لثاژ سیستم پیاده‌سازی شده است؛ اما روش‌های ریاضی عموماً عملکرد مناسبی در بهینه‌سازی شبکه‌های بزرگ از خود نشان نمی‌دهند.

با ظهور روش‌های تکاملی در مسائل بهینه‌سازی و توانایی غلبه بر اشکالات دو روش گفته‌شده، استقبال گسترده‌ای از این روش‌ها به عمل آمده است. الگوریتم‌های به کار گرفته شده در روش‌های تکاملی به گونه‌ای است که از طریق یک روند پیوسته تکرارپذیر متغیرهای تابع هدف به سمت نقاط بهینه هدایت می‌شوند. در [۱۲] از الگوریتم آموزش و یادگیری اصلاح‌شده^۴ (MTLBO) به منظور جایابی و مقداربندی منابع تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات، بهره‌گیری شده است؛ اما بهینه‌سازی به صورت تک هدفه تمام نیازهای بهره‌بردار را برآورده نمی‌کند. در [۱۳] از الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف بار به منظور جایابی مولدهای مقیاس کوچک استفاده شده است؛ با این حال تابع هزینه در نظر گرفته نشده است. خازن‌ها معمولاً به صورت ترکیبی از بانک‌های خازنی ثابت و متغیر استفاده می‌شوند، که اندازه بانک‌های خازنی ثابت به مقدار متوسط بار راکتیو بستگی دارد [۴]. نویسندگان در مراجع مختلف، توابع هدف متفاوتی مانند

منابع تولید پراکنده^۱ در شبکه‌های توزیع هستند [۲]. کنترل توان راکتیو یکی از مسائل عملی در مهندسی برق است. بی‌توجهی به این امر مهم و ضروری باعث ایجاد مشکلاتی در پایداری شبکه و تغییرات شدید و لثاژ می‌شود. در بیشتر شبکه‌های توزیع، استفاده از ادواتی مانند موتور و ترانسفورماتور باعث پس‌فاز شدن ضریب توان شده است که این امر منجر به کاهش ظرفیت قابل استفاده شده است [۳]. توجه به بهره‌برداری همزمان مصرف‌کنندگان از توان اکتیو و راکتیو، تمایل به کاهش هزینه‌ها و نیاز به افزایش و بهبود کیفیت توان باعث شده است تا اکثر کشورهای صنعتی و پیشرفته دنیا روزبه‌روز در حال گسترش جبران‌کننده‌های توان راکتیو مانند بانک‌های خازنی در کنار دیگر منابع انرژی باشند. منابع تولید پراکنده‌ای مانند نیروگاه‌های بادی دو سو تغذیه و نیروگاه‌های خورشیدی، قابلیت تولید توان اکتیو و راکتیو را دارا هستند؛ اما استفاده گسترده این تجهیزات به دلیل محدودیت در ظرفیت قابل نصب، زیادبودن هزینه نصب ادوات مبتنی بر الکترونیک قدرت در مقایسه با خازن و عدم قطعیت موجود در باد و خورشید همواره با چالش است. این عوامل باعث اهمیت بانک‌های خازنی به‌عنوان تأمین‌کننده بخشی از توان راکتیو شده است [۴].

استفاده مناسب از منابع تولید پراکنده و بانک‌های خازنی وابسته به تعیین محل و ظرفیت مناسب این ادوات است. در سال‌های اخیر پژوهشگران الگوریتم‌های بهینه‌سازی متنوعی را جهت انتخاب مناسب‌ترین محل نصب این ادوات پیشنهاد داده‌اند. با بررسی پژوهش‌های انجام‌شده می‌توان آن‌ها را به سه دسته تقسیم بندی کرد [۵]: الف) جایابی و مقداربندی بهینه خازن؛ ب) جایابی و مقداربندی بهینه تولیدات پراکنده؛ ج) جایابی و مقداربندی بهینه خازن و تولیدات پراکنده. بررسی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که روش‌های مختلف ارائه‌شده در این دسته‌ها را می‌توان براساس نوع روش به کار گرفته شده برای بهینه‌سازی تابع هدف، به سه دسته کلی روش‌های آنالیزی، عددی و تکاملی تقسیم‌بندی کرد [۶].

به‌طور کلی روش‌های آنالیزی از لحاظ پیاده‌سازی، ساده و دارای سرعت همگرایی مناسب هستند؛ اما به دلیل استفاده از ساده‌سازی در فرضیات مسئله نمی‌توانند به منظور بررسی

دارد، از این رو، توصیف دقیق بار اهمیت زیادی خواهد داشت. بنابراین مدل‌های مختلف بار شامل ثابت، صنعتی، تجاری و مسکونی در انجام بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی یکی از روش‌های توانا در رسیدن به جواب‌های خوب و نزدیک به بهینه سراسری است. به هر حال، در این الگوریتم به دلیل روش جست‌وجوی آن، نارسایی‌هایی هم وجود دارد: از جمله اینکه از نظر اکتشافی خوب، اما از نظر بهره‌برداری، نامطلوب است. در این مقاله به منظور متوازن‌سازی کشف راه حل و رسیدن به جواب‌های بهتر، معادله جست‌وجو اصلاح شده است و متناسب با ارزش توابع هدف به کار گرفته شده است. همچنین جهت تعادل میان اکتشاف، بهره‌برداری و بهبود همگرایی از عملگرهای تقاطع و جهش استفاده شده است. نتایج به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های ازدحام ذرات [۱۴، ۱۹]، ژنتیک [۱۶]، جست‌وجوی مستقیم [۱۱]، آموزش و یادگیری [۱۲]، [۱۶] کارایی این روش را به اثبات می‌رساند.

در این مقاله ابتدا مسئله و توصیف توابع هدف مطرح شده است و در ادامه پس از بررسی مدل‌های مختلف بار، الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی و اصلاح شده آن بیان شده است. در بخش هفتم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی روی شبکه استاندارد بررسی، تجزیه و تحلیل شده است و در نهایت نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده و نتیجه‌گیری شده است.

۲- فرمول‌بندی مسئله

۲-۱- شاخص تلفات

تلفات در خطوط و سایر اجزاء شبکه، متناسب با نسبت مجذور جریان است. نصب منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع می‌تواند بار را در محل، تأمین کنند؛ در نتیجه منابع تولید پراکنده می‌تواند نقش بسزایی در کاهش تلفات داشته باشد. این تأثیر خصوصاً در مواقع پیک بار مشهود است [۱۵، ۲۰].

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{n_{br}} I_i^2 R_i \quad (1)$$

$$F_1(X) = \min(P_{loss}) \quad (2)$$

کاهش تلفات، هزینه نصب، بهبود پروفیل ولتاژ، افزایش پایداری و ... را پیشنهاد داده‌اند. همچنین روش‌های متفاوتی برای حل مسئله جایابی و مقداربندی خازن نیز مطرح شده است: الگوریتم‌های ازدحام ذرات^۵ [۱۴]، ژنتیک^۶ (GA) [۱۵] و آموزش و یادگیری^۷ (TLBO) [۱۶]. در [۵] اثرات نصب تولیدات پراکنده و خازن در شبکه توزیع به منظور بهینه‌سازی تلفات، پروفیل و پایداری ولتاژ، تعادل بار با استفاده از الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری و ژنتیک پرداخته شده است. در [۱۷] بهینه‌سازی از منظرهای متفاوت تلفات، هزینه و پایداری ولتاژ با استفاده از الگوریتم بهبودیافته ژنتیک بررسی شده است. همان‌گونه که می‌دانیم بار در شبکه‌های توزیع ثابت نیست و با توجه به مصرف کنندگان تغییرپذیر است؛ اما در مقالات [۵] و [۱۷] تغییرات بار بررسی نشده است. در مرجع [۱۸] با روشی ابداعی از ترکیب جست‌وجوی محلی و الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف به جایابی و مقداربندی برای بهینه‌سازی تلفات، ولتاژ و تلفات انرژی پرداخته شده است؛ اما این الگوریتم‌ها برای انتخاب جواب بهینه از روش وزنی استفاده می‌کنند که این امر جواب‌های به دست آمده برای بهره‌برداران را محدود می‌کند.

در این مقاله جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده و خازن در شبکه‌های توزیع با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی اصلاح شده^۸ مطالعه شده است. به منظور بررسی تأثیر ترکیب منابع (تولیدات پراکنده و خازن) مسئله بهینه‌سازی در چهار حالت: اتصال بهینه تولیدات پراکنده با قابلیت تولید توان اکتیو، خازن، تولیدات پراکنده با قابلیت تولید اکتیو و راکتیو و سپس به صورت ترکیبی ارزیابی شده است. این روش بهینه‌سازی با در نظر گرفتن توابع هدف کاهش تلفات، انحراف ولتاژ، هزینه و بهبود شاخص پایداری ولتاژ پیاده‌سازی شده است. به منظور بهینه‌سازی چندهدفه از بهینه‌پارو بهره‌گیری شده است. در این روش مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه در هر تکرار در یک آرشیو خارجی ذخیره و به تکرار بعد منتقل می‌شود. سپس از روش فازی به منظور انتخاب جواب نهایی استفاده شده است. با توجه به اینکه بهره‌برداری مناسب سیستم قدرت در حالت مانا به بررسی تغییرات احتمالی بار مصرفی بستگی

که I_i و R_i جریان و مقاومت هر شاخه هستند.

۲-۲- شاخص انحراف از ولتاژ

انحراف از ولتاژ که یکی از پارامترهای مطرح در بحث کیفیت توان است را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۲۱]:

$$VD = \sum_{i=1}^{n_{bus}} |1 - V_i| \quad (۳)$$

$$F_2(X) = \min(VD) \quad (۴)$$

در روابط بالا V_i ولتاژ شین i ام و n_{bus} تعداد کل شین‌ها است.

۲-۳- شاخص پایداری ولتاژ

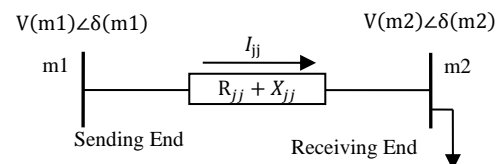
یکی از مسائل مهم در عرضه برق، حفظ و بهبود پایداری ولتاژ است. در شبکه‌های توزیع، عوامل مختلفی مانند افزایش بیش از حد توان مصرفی بارها، عملکرد نامناسب تغییردهنده تپ ترانس‌ها، قطعی خطوط و بسیاری موارد دیگر می‌توانند باعث ناپایداری ولتاژ در هر یک از نقاط شبکه شوند. مطالعات و بررسی‌ها نشان می‌دهد که نصب منابع تولید پراکنده و خازن می‌تواند باعث افزایش پایداری ولتاژ در این شبکه‌ها شود. در همین راستا می‌توان مطابق با نتایج پخش بار برای شناسایی حساس‌ترین شین شبکه از روابط (۵) و (۶) استفاده کرد [۲۲].

$$SI(m2) = |V(m1)|^4 - 4[P(m2)X_{jj} - Q(m2)R_{jj}]^2 \quad (۵)$$

$$-4[P(m2)R_{jj} + Q(m2)X_{jj}]|V(m1)|^2 \quad (۶)$$

$$F_3(X) = \min\left(\frac{1}{SI(m2)}\right)$$

که در آن $SI(m2)$ شاخص پایداری ولتاژ مربوط به شین $m2$ است. $V(m1)$ ولتاژ شین $m1$ ، $P(m2)$ و $Q(m2)$ کل توان اکتیو و راکتیو بار مصرفی مربوط به شین $m2$ در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): شبکه نمونه یک سیستم توزیع شعاعی

۲-۴- شاخص هزینه

یکی از اهداف اصلی در مسئله نصب تجهیزات جدید،

علاوه بر افزایش کیفیت سرویس دهی در سیستم‌های توزیع، کاهش هزینه‌های نیروسانی است. به همین منظور، ارزیابی اقتصادی تولیدات پراکنده و خازن در شبکه توزیع در زمینه‌های نصب، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیر امری لازم و ضروری است. تابع هزینه با در نظر گرفتن مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر براساس ادوات شبکه تعیین می‌شود. هزینه نصب خازن به صورت زیر تعریف پذیر است [۱۸]:

$$C_{Cap} = \sum_{i=1}^{n_{sc}} K_{cni} Q_{cni} + K_{dni} \quad (۷)$$

$$Q_{cni} = L Q_0 \quad (۸)$$

که در آن K_{cni} هزینه سالانه تزریق توان راکتیو، K_{dni} هزینه تعمیر خازن، Q_0 کوچک‌ترین ظرفیت خازن قابل نصب و L عدد طبیعی در نظر گرفته شده است. در رابطه (۹) هزینه نصب تولیدات پراکنده به صورت مجموع ادوات نصب شده بیان می‌شود:

$$C_{IDG} = \sum_{i=1}^{n_{DG}} C_{DGni} K_{IDG} \quad (۹)$$

که در آن C_{DGni} حداکثر ظرفیت انتخابی تولید پراکنده، K_{IDG} هزینه سرمایه‌گذاری و n_{DG} تعداد منابع است. همچنین هزینه بهره‌برداری و نگهداری به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$C_{O\&M\ DG} = \sum_{y=1}^{n_{yr}} \sum_{i=1}^{n_{DG}} PW^y P_{gni} K_{EDGT} \quad (۱۰)$$

$$PW = \frac{1 + InfR}{1 + IntR} \quad (۱۱)$$

که در آن P_{gni} توان اکتیو خروجی منبع در شین i ام، K_{EDGT} هزینه بهره‌برداری و نگهداری تولید پراکنده، T دوره بهره‌برداری، n_{yr} دوره برنامه‌ریزی، $IntR$ نرخ بهره و $InfR$ نرخ تورم است. هزینه خریداری برق از منبع اصلی به صورت زیر بیان می‌شود [۵]:

$$C_{SS} = \sum_{y=1}^{n_{yr}} PW^y k_{ss} (Real(V_{ss} I_{inj}^*)) T \quad (۱۲)$$

که در آن k_{ss} بهاء انرژی در بازار، V_{ss} ولتاژ نامی شین منبع، I_{inj} جریان تزریقی از شین منبع در نظر گرفته شده است. در نهایت پس از نصب منابع تولید پراکنده و خازن هزینه کل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{Total} = C_{SS} + C_{IDG} + C_{O\&M\ DG} + C_{Cap} \quad (۱۳)$$

باشد؛ بنابراین توصیف دقیق بار اهمیت زیادی خواهد داشت. در این مدل تابع توان اکتیو و راکتیو بار به صورت نماهای مختلفی از ولتاژ و ضرایبی از تغییرات فرکانس تغییر می کند که به صورت کلی زیر بیان می شود [۲۳]:

$$P_i = P_{oi} V_i^\alpha (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (20)$$

$$Q_i = Q_{oi} V_i^\beta (1 + K_{qf} \Delta f) \quad (21)$$

که در آن P_i و Q_i توان اکتیو و راکتیو در شین i ام، P_{oi} و Q_{oi} نقطه بهره برداری اکتیو و راکتیو در شین i ام، V_i ولتاژ شین i ام، α و β ضرایب مدل بار، K_{pf} و K_{qf} ضرایب حساسیت فرکانس بیان می شود. چنانچه در روابط بالا حساسیت فرکانسی مطرح نباشد، مدل بار استاتیک رابطه توان و ولتاژ به فرم زیر در نظر گرفته شده است:

$$P_i = P_{oi} V_i^\alpha \quad (22)$$

$$Q_i = Q_{oi} V_i^\beta \quad (23)$$

در مدل توان ثابت و در معادلات پخش بار عموماً $\alpha = \beta = 0$ در نظر گرفته می شود. مقادیر این ضرایب برای بارهای مختلف در جدول (۱) بیان شده است [۱۳].

جدول (۱): مدل های مختلف بار [۱۳]

مدل بار	α	β
ثابت	۰	۰
صنعتی	۰٫۱۸	۶٫۰۰
مسکونی	۰٫۹۲	۴٫۰۴
تجاری	۱٫۵۱	۳٫۴

۴- الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی

Karaboga، اولین بار در سال ۲۰۰۵ الگوریتم زنبور عسل مصنوعی را برای حل مسائل ریاضی معرفی کرد. الگوریتم الهام گرفته شده از رفتار زنبورهای عسل در هنگام جست و جو برای منابع غذایی است. در این روش هر جواب، نشان دهنده یک منطقه غذایی بالقوه و کیفیت جواب، معادل با کیفیت آن منبع غذایی است. کلونی زنبور مصنوعی از سه نوع زنبور: کارگر، جست و جوگر و پیش آهنگ تشکیل

$$F_4(X) = \min(C_{Total}) \quad (14)$$

۲-۵- قیود مسئله بهینه سازی

در بهینه سازی، قیود پخش بار به عنوان قیود مساوی و قیود ولتاژ و توان به عنوان قیود نامساوی در نظر گرفته شده است [۱۹]:

$$P_i = \sum_{j=1}^{n_{bus}} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (15)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n_{bus}} V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (16)$$

که در آن V_i و δ_i اندازه و زاویه ولتاژ در شین i ام، P_i و Q_i به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شین i ام هستند. ولتاژ هر شین باید در محدوده مجاز قرار داشته باشد [۳].

$$V_{min} \leq V \leq V_{max} \quad (17)$$

توان تولیدی هر منبع بین مقدار بیشینه و کمینه در نظر گرفته شده است.

$$P_{gn}^{min} \leq P_{gni} \leq P_{gn}^{max} \quad (18)$$

$$Q_{cn}^{min} \leq Q_{cni} \leq Q_{cn}^{max} \quad (19)$$

که P_{gn}^{max} بیشترین و P_{gn}^{min} کمترین توان تولیدی تولیدات پراکنده در نظر گرفته شده است.

۳- مدل های مختلف بار

در شبکه توزیع، عموماً بار در بردارنده مشترکان تجاری، صنعتی و مسکونی هستند. با توجه به تفاوت مصرف در این مشترکان برای هر نوع مشترک، نیازمند بررسی الگوی خاصی است. بنابراین در نظر گرفتن بار با مقدار ثابت در شبکه توزیع می تواند نتایج نادرستی را همراه داشته باشد. همچنین شبکه های توزیع معمولاً به صورت شعاعی طراحی می شوند که هیچ ژنراتوری در سمت بار وجود ندارد. بنابراین وجود ژنراتور در شبکه توزیع روی توان جاری شده و شرایط ولتاژ بار و تجهیزات شبکه تأثیر می گذارد و این می تواند روی پارامترهای عملکردی سیستم، تأثیر داشته

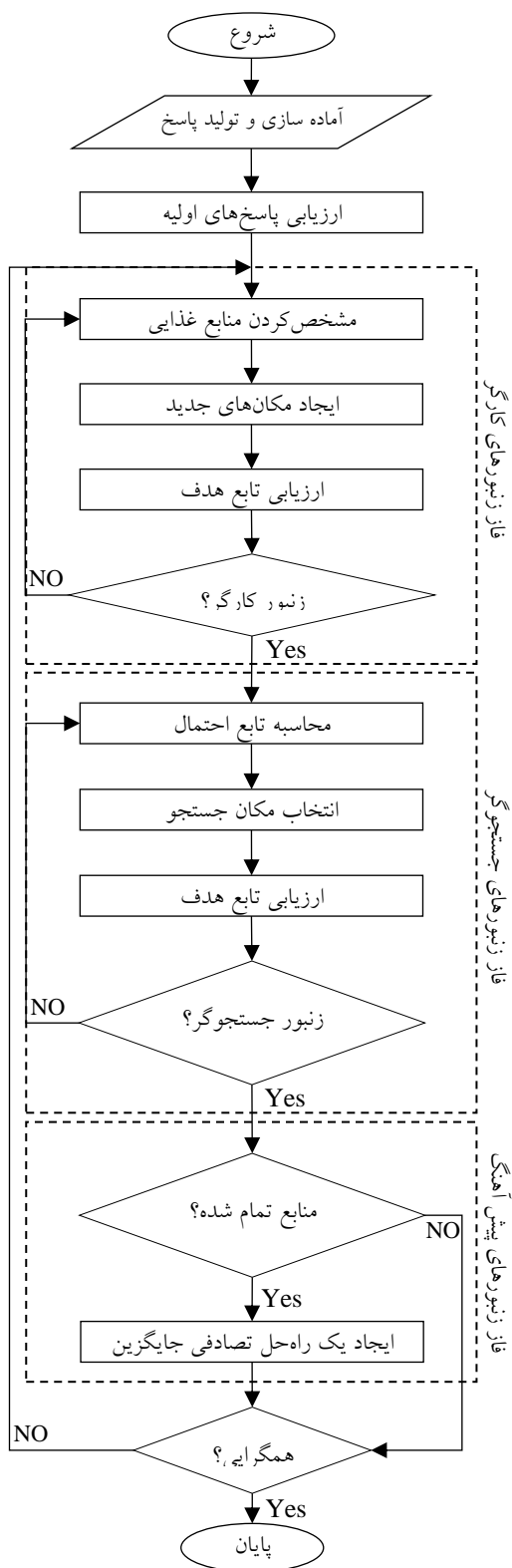
شده است. زنبورهایی که در ابتدا وظیفه بهره‌برداری از منابع غذایی را دارند، زنبورهای کارگر هستند که بدون توجه به مطلوبیت هر کدام از منابع غذایی صرفاً منبع غذایی را جست‌وجو می‌کنند. هر زنبور کارگر مطابق با رابطه (۲۴) از مکان فعلی x_{ij} به موقعیت جدید v_{ij} می‌رود [۲۴].

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (24)$$

که در آن ϕ_{ij} عددی تصادفی بین $[-1, 1]$ است. زنبورهای عسل از یک سیستم ارتباطی پیچیده استفاده می‌کنند و ارتباط بین زنبورها با زبان رقص انجام می‌شود. این رقص که به نام رقص چرخشی شناخته می‌شود، اطلاعات مربوط به جهت منبع غذایی (نسبت به کندو)، فاصله و کیفیت را به زنبورهای دیگر انتقال می‌دهد. این سیستم آن‌ها را قادر می‌سازد اطلاعاتی لازم درمورد غذایی موجود در خارج از کندو به دست آورند. زنبورهای جست‌وجوگر درحالی‌که زنبورهای کارگر مشغول پایش فضا هستند، در کندو حضور دارند و با بازگشت زنبورهای کارگر، اطلاعات مربوط به منابع غذایی را دریافت می‌کنند. زنبورهای جست‌وجوگر از میان مکان‌های موجود طبق کیفیت آن مکان انتخاب می‌کنند؛ یعنی جواب‌های بهتر زنبورهای بیشتری را به خود جذب می‌کنند. دیاگرام شکل (۲) این روند بهینه‌سازی الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی را بیان می‌کند.

زنبورها به منظور انتخاب یک منبع غذایی خاص با توجه به ارزش آن منبع از رابطه (۲۵) بهره می‌برند [۱۳].

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{j=1}^{SN} fit_j} \quad (25)$$



شکل (۲): الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی

هوشمندی بیشتری انجام می‌شود و از همگرایی زودرس جلوگیری می‌شود.

$$w_{ij}^k \propto e^{-\alpha \frac{f(x_i^k)}{f(x_{best}^k)}} \quad (28)$$

که در رابطه بالا k شماره تکرار، α ضریب، $f(x_{best}^k)$ مقدار تابع هزینه در تکرار k ام است. در این رابطه با کاهش هزینه منبع غذایی انتخاب شده بین سایر هزینه‌های منابع غذایی موجود، میزان تأثیرپذیری حرکت بعدی از نقطه بهینه در حرکت بعدی نیز افزایش می‌یابد و بالعکس با افزایش هزینه، مقدار این تأثیر نیز کم می‌شود.

۵-۲- عملگر تقاطع

عملگر تقاطع جهت فعال‌سازی فرآیند تکاملی در جهت افزایش احتمال موفقیت در فضای جست‌وجو و ترکیب راه حل‌ها برای ایجاد راه‌حل‌های بهتر است [۲۶]. اگر x_1 و x_2 دو راه‌حل با n متغیر باشند. با استفاده از تقاطع راه‌حل‌های جدید y_1 و y_2 به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$y_1 = \alpha x_1 + (1 - \alpha)x_2 \quad (29)$$

$$y_2 = \alpha x_2 + (1 - \alpha)x_1 \quad (30)$$

که در آن $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ اعداد تصادفی بین صفر و یک هستند.

۵-۳- عملگر جهش

به منظور فراخوانی مجدد اطلاعات از دست‌رفته در جمعیت و ایجاد حرکت در فضای جست‌وجو از عملگر جهش به صورت زیر استفاده شده است [۲۷].

$$P_m = (1 + \frac{\text{currentgen}}{\text{totalgen}}) \frac{5}{\text{mutrate}} \quad (31)$$

$$\text{mutrange} = P_m (x_{\min} - x_{\max}) \quad (32)$$

$$ub = \text{particle} + \text{mutrange} \quad (33)$$

$$lb = \text{particle} - \text{mutrange} \quad (34)$$

حال ub و lb با حد بالا x_{\max} و پایین x_{\min} تعریف شده برای متغیر x مقایسه می‌شوند. اگر ub بیشتر از حد بالا و یا lb کمتر از حد پایین باشند، حد بالا و پایین جایگزین آن‌ها می‌شوند.

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f(x_i)} f(x_i) \geq 0 \\ 1 + |f(x_i)| f(x_i) < 0 \end{cases} \quad (26)$$

که fit_i مقدار برازندگی منبع غذایی جست‌وجو شده توسط زنبورهای کارگر و $f(x_i)$ مقدار تابع هزینه است. پس از آنکه تمام زنبورهای جست‌وجوگر در منابع توزیع شدند، منابع بررسی می‌شوند. در صورتی که یک منبع پایان پذیرد و یا کیفیت یک منبع غذایی مناسب نباشد، آنگاه آن منبع به عنوان منبع تمام‌شده در نظر گرفته می‌شود [۲۵]. بدین معنی است که در یک بهینه محلی قرار داریم، بنابراین آن نقطه حذف می‌شود و یک نقطه جدید به صورت تصادفی تولید می‌شود. این رفتار بدین صورت مدل می‌شود که زنبور پیش‌آهنگ یک جست‌وجوی تصادفی را در قلمرو مسئله به منظور ایجاد پاسخ جدید انجام خواهد داد. هدف از این کار رسیدن به پاسخ بهتر در فضای جست‌وجو است [۵].

۵-۵- کلونی زنبور مصنوعی اصلاح شده

تاکنون نسخه‌های مختلفی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی از رفتار گروهی زنبورها برگرفته شده است. الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی مانند بسیاری از الگوریتم‌های تکاملی به دلیل استفاده از یک مکانیزم جست‌وجوی محلی، فاقد توانایی برای یک جست‌وجوی عمومی خوب در فضای مسئله است. از این رو، امکان دورشدن از جواب بهینه عمومی و همگرایی زودرس وجود دارد.

۵-۱- اصلاح معادله جست‌وجو

در این مقاله پیشنهاد شده است با استفاده از ضریب w_{ij} حرکت زنبورهای کارگر و جست‌وجوگر به صورت تطبیقی تنظیم شده و متناسب با ارزش منبع غذایی پیدا شده در مرحله قبل باشد [۲۴]. در الگوریتم طراحی شده از معادله جست‌وجوی اصلاح شده برای هدایت عامل‌های جست‌وجوگر در فضای جست‌وجو به سمت منطقه بهینه استفاده شده است؛ در نتیجه می‌توان رابطه (۲۴) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$v_{ij} = x_{ij} + w_{ij} \phi_{ij} (x_{ij} - x_{kj}) \quad (27)$$

بدین وسیله حرکت زنبورها به سمت نقاط بهینه با

استفاده شده است. در آرشیو خارجی، جواب‌های غیر مغلوب براساس مقدار ازدحام جواب‌ها مرتب می‌شوند. آنگاه در هر مرحله از چند جواب آرشیو با استفاده از چرخه رولت براساس ازدحام ذرات، یکی به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود تا زنبورها جست‌وجوگر از آن به‌عنوان منبع غذایی هدف استفاده کنند.

۶-۲- انتخاب جواب با استفاده از منطق فازی

در این گونه از مسائل برخلاف مسائل بهینه‌سازی تک هدفه و به خاطر وجود چند هدف متعارض به جای تنها یک جواب، درنهایت مجموعه‌ای از جواب‌ها حاصل می‌شود؛ درنتیجه برای به‌دست‌آوردن بهترین جواب از میان جبهه پارتو، باید آن‌ها را براساس یک معیاری یکسان با درنظرگرفتن اهمیت هر شاخص مرتب کرد. بدین منظور یک منطق فازی پیشنهاد می‌شود. تابع عضویت روش فازی پیشنهادی به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$F_i(X) = \begin{cases} 1 & f_i(X) \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i(X)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} \leq f_i(X) \leq f_i^{\max} \\ 0 & f_i(X) \geq f_i^{\max} \end{cases} \quad (39)$$

$$G_i(X) = (F_i(X))^{-1} \quad (40)$$

که در آن f_i^{\max} و f_i^{\min} تابع هدف مد نظر در حالت بهینه‌سازی تک‌هدفه و کار عادی شبکه است. برای دستیابی به جواب مطلوب از میان جواب‌های فازی شده با توجه به کیفیت و اولویت بهره‌برداری از رابطه (۴۱) استفاده شده است.

$$F(X) = \min \sum_{i=1}^4 k_i G_i(X) \quad (41)$$

$$k_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^4 k_i = 1 \quad (42)$$

که در رابطه بالا k_i ضرایب ثابتی هستند که بیانگر میزان تأثیر و اهمیت هر یک از شاخص‌ها در جست‌وجوی محل نصب و ظرفیت بهینه منابع هستند. مزایای روش استفاده‌شده در مقایسه با روش‌های مشابه تصمیم‌گیری چند شاخصه، آن

$$\text{particle} = \text{realrandom}(\text{lb}, \text{ub}) \quad (35)$$

که particle موقعیت زنبور جدید از یک توزیع یکنواخت به دست می‌آید.

۵-۴- اصلاح تابع احتمال

برای تقویت بیشتر توانایی بهره‌برداری الگوریتم معادله (۲۵) به‌صورت زیر اصلاح شده است [۲۸]:

$$p_i = \frac{0.9 \times \text{fit}_i}{\text{fit}_{\text{best}}} + 0.1 \quad (36)$$

۶-۶- بهینه‌سازی چندهدفه

۶-۱- انتخاب پاسخ بهینه فراگیر

مسئله بهینه‌سازی درحقیقت یافتن پاسخ یا پاسخ‌هایی مناسب بر روی یک مجموعه از گزینه‌های امکان‌پذیر با هدف بهینه‌سازی شاخص یا شاخص‌های مسئله است. در حالت چندهدفه با یک فضای برداری ترتیب‌ناپذیر مواجه هستیم که این امر گزینش پاسخ مناسب را با مشکل مواجه می‌کند. در چنین شرایطی معمولاً مسئله بیش از یک جواب بهینه خواهد داشت که به آن‌ها جواب‌های بهینه پارتو گفته می‌شود [۲۱]. به همین منظور، برای یافتن پاسخ بهینه از مفهوم غلبگی استفاده می‌شود. در این مفهوم X_1 زمانی X_2 را مغلوب می‌کند که $f_i(X_2)$ از هیچ نظر بهتر از $f_i(X_1)$ نباشد و $f_i(X_1)$ دست‌کم از یک نظر اکیداً بهتر از $f_i(X_2)$ باشد [۲۰].

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}: f_i(X_1) \leq f_i(X_2) \quad (37)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}: f_j(X_1) < f_j(X_2) \quad (38)$$

در این حالت یک عضو بر عضو دیگر غلبه می‌یابد و آن را حذف می‌کند. در اینجا از یک آرشیو خارجی برای نگهداری جواب‌های غیر مغلوب استفاده شده است. استفاده از آرشیو خارجی برای جلوگیری از نابودی راه حل‌های مغلوب‌نشده و انتقال بهترین راه‌حل‌ها به نسل بعد

است. برای اثبات کارایی روش پیشنهادی، نتایج حاصل از آن‌ها با جواب‌های تولیدشده الگوریتم ازدحام ذرات توسعه یافته^۹ (IPSO) و آموزش و یادگیری اصلاح‌شده در جدول (۲) مقایسه شده است. در حالت استفاده از یک منبع با توجه به اینکه مسئله دارای پیچیدگی کمتری است، هر دو الگوریتم دارای جواب‌های تقریباً یکسان هستند. در شبیه سازی‌های انجام‌شده، تعداد تکرار ۱۰۰ و تعداد ذرات ۷۰ در نظر گرفته شده است.

است که در صورتی که هدف از بعضی معیارهای تصمیم‌گیری کاهش و یا افزایش آن‌ها باشد، این روش را به آسانی می‌توان پیاده‌سازی کرد. مهم‌تر اینکه چون نتایج به دست آمده در تابع هدف بین صفر و یک قرار داده می‌شوند، می‌توان به راحتی با دیگر شاخص‌ها مقایسه شوند و واحدهای در نظر گرفته شده برای توابع هدف در بهینه‌سازی و انتخاب جواب از میان جواب‌های ذخیره‌شده در آرشیو خارجی بی تأثیر خواهد بود.

جدول (۲): مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های دیگر

تعداد منابع	الگوریتم	محل (شین)	ظرفیت (MW)	تلفات (MW)
۱	IPSO[۱۹]	۶۱	۱,۹۰۴۲	۰,۰۸۳۲۵۹
	MTLBO[۱۲]	۶۱	۱,۸۱۹۷	۰,۰۸۳۳۲۳
	MABC	۶۱	۱,۸۷۲۶	۰,۰۸۳۱۸۹
۲	IPSO[۱۹]	۲۱	۰,۳۲۲۰	۰,۰۷۵۳۲۵
		۶۱	۱,۵۸۲۰	
	MTLBO[۱۲]	۱۷	۰,۵۱۹۷	۰,۰۷۱۷۷۶
		۶۱	۱,۷۳۲۰	
	MABC	۱۷	۰,۵۳۱۲	۰,۰۷۱۶۵۶
		۶۱	۱,۷۸۱۵	
۳	IPSO[۱۹]	۲۱	۰,۳۲۴۰	۰,۰۷۴۷۷۷
		۶۱	۱,۲۷۸۰	
		۶۴	۰,۳۰۱۰	
	MTLBO[۱۲]	۱۱	۰,۴۹۳۸	۰,۰۶۹۵۳۹
		۱۸	۰,۳۷۸۴	
		۶۱	۱,۶۷۲۵	
	MABC	۱۱	۰,۵۲۴۸	۰,۰۶۹۴۰۸
		۱۸	۰,۳۸۰۱	
		۶۱	۱,۷۱۹۰	

در حالت اول، ابتدا برای هر یک از توابع الگوریتم به صورت تک‌هدفه اجرا شده است که نتایج بهینه‌سازی تک‌هدفه در جدول (۳)، ارائه شده است. در ستون اول جدول، شماره تابع بهینه‌سازی شده نمایش داده شده است.

۷- نتایج شبیه‌سازی

در مسئله جایابی و مقداربندی بهینه، هدف، تعیین محلی برای قراردادن عنصر مورد استفاده به منظور حصول بیشترین بهبود در توابع مورد استفاده ضمن برقراری قیود مربوطه است. از آنجایی که شبکه‌های توزیع غالباً شعاعی هستند، بنابراین شبکه توزیع استاندارد ۶۹ شینه IEEE که دارای ۶۹ شین و ۶۸ شاخه است، آزمایش می‌شود. پارامترهای این شبکه با تقاضای توان ۲,۶۹۴۱ مگاوار و ۳,۸۰۱۹ مگاوات در مرجع [۱۲] داده شده‌اند. مطابق نتایج پخش بار در شرایط اولیه بهره‌برداری شبکه دارای توان اکتیو ۰,۲۲۵ مگاوات و انحراف ولتاژ ۱,۸۳۶۴ است.

همان‌طور که پیش از این اشاره شد در شبیه‌سازی این شبکه، سه حالت مختلف بررسی شده است که در هر سه حالت ۴ مدل بار تعریف شده بررسی شده است.

حالت اول (Case 1): جایابی و مقداربندی بهینه تولیدات پراکنده؛

حالت دوم (Case 2): جایابی و مقداربندی بهینه خازن؛

حالت سوم (Case 3): جایابی و مقداربندی بهینه تولیدات پراکنده تولیدکننده توان اکتیو و راکتیو؛

حالت چهارم (Case 4): جایابی و تعیین ظرفیت بهینه تولیدات پراکنده و خازن به صورت هم‌زمان.

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم در بهینه‌سازی روش پیشنهادی با در نظر گرفتن تعداد منابع متفاوت، اجرا شده

جدول (۳): بهینه‌سازی تک‌هدفه در حالت اول

R	محل	ظرفیت (MW)	$F_1(X)$ (MW)	$F_2(X)$ (p.u)	$F_3(X)$ (p.u)	$F_4(X)$ (M\$)
۱	۱۱	۰,۵۲۶۸	۰,۰۶۹۴	۰,۴۴۹۱	۱,۰۸۸۷	۸,۱۱۱۲
	۱۸	۰,۳۸۰۱				
	۶۱	۱,۷۱۹۰				
۲	۱۶	۰,۶۲۰۹	۰,۰۸۸۵	۰,۰۶۱۷	۱,۰۲۳۵	۷,۵۲۹۸
	۵۴	۱,۱۹۸۵				
	۶۳	۲,۰۰۰۰				
۳	۲۲	۰,۸۸۳۸	۰,۰۹۴۸	۰,۲۵۵۶	۱,۰۲۳۴	۷,۵۰۲۱
	۵۶	۱,۲۶۴۷				
	۶۱	۱,۷۴۸۲				
۴	۱۲	۰,۷۹۸۹	۰,۰۷۲۷	۰,۶۲۵۰	۱,۱۰۹۸	۷,۴۷۰۴
	۴۹	۱,۴۷۳۵				
	۶۱	۱,۶۰۲۲				

جدول (۴): ضرایب توابع هدف در سناریوهای مختلف

ضریب وزنی	k_1	k_2	k_3	k_4
اول	۰,۶	۰,۱	۰,۱	۰,۲
دوم	۰,۱	۰,۶	۰,۱	۰,۲
سوم	۰,۱	۰,۱	۰,۱	۰,۷

با توجه به اینکه در این روش تنظیم پارامترها به‌منظور گزینش جواب در اختیار بهره‌بردار سیستم است، در نتیجه می‌توان به راحتی حساسیت مسئله را نسبت به بعضی توابع هدف مورد نیاز با توجه به نظر بهره‌برداران سیستم قدرت افزایش داد که اثرات این افزایش بر جواب بهینه حالت اول با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف بار در جدول (۵) مشخص است. در این حالت مشاهده می‌شود با تغییرات در ضرایب وزنی، تغییراتی در جواب‌ها حاصل می‌شود. برای مثال، سناریو اول، تلفات کمتری نسبت به دیگر سناریوها به ازای تمام مدل‌های بار دارد. براین اساس، با توجه به اهمیت هر شاخص می‌توان جواب مناسب را از میان مجموعه جواب پارتو به دست آورد؛ اما به‌طور کلی در این حالت بهتر است با استفاده مناسب از دانش اپراتور، پارامترها را تنظیم کرد. نتایج به‌دست‌آمده از جدول (۶) نشانگر آن است که با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی اصلاح‌شده (MABC) در بهینه‌سازی خازن به ترتیب، مقدار ۱۰۵۰۰، ۶۳۶۰، ۸۸۰ و ۲۳۰ وات نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، ازدحام ذرات (PSO)، جست‌وجوی مستقیم (DSA) و آموزش و یادگیری اصلاح‌شده (TLBO) کاهش بیشتری حاصل می‌شود.

در بهینه‌سازی تک‌هدفه هدف از حل مسئله بهبود یک شاخص یگانه است که مقدار کمینه یا بیشینه آن با کیفیت پاسخ، رابطه مستقیم دارد؛ اما همان‌طور که انتظار می‌رود بهبود یک شاخص به‌صورت تک‌هدفه نمی‌تواند باعث بهبود دیگر پارامترهای سیستم شود. برای مثال با بهبود شاخص پایداری ولتاژ هزینه به مقدار چشمگیری افزایش پیدا کرده است. داده‌های مربوط به ستون آخر جدول از مجموع برق خریداری‌شده، هزینه احداث و بهره‌برداری تولیدات پراکنده است.

در بهینه‌سازی به کمک مجموعه جواب پارتو علاوه بر انتخاب بهترین جواب، تأکیدهای مختلفی را می‌تواند بر روی انتخاب جواب‌های بهینه به وجود آورد. به‌منظور بررسی جواب‌های متفاوت در روش بهینه‌سازی چندهدفه ۳ سناریو مختلف با در نظر گرفتن مقادیر وزنی متفاوت برای تابع هدف در جدول (۴) بیان شده است.

جدول (۵): بهینه‌سازی چندهدفه در حالت اول با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف بار

$F_4(X)$ (M\$)	$F_3(X)$ (p.u)	$F_2(X)$ (p.u)	$F_1(X)$ (MW)	ظرفیت (MW)			محل نصب			سناریو	مدل بار
۷,۵۳۷۹	۱,۰۷۶۴	۰,۳۲۷۹	۰,۰۷۵۱	۱,۸۰۴۰	۱,۰۶۲۲	۰,۸۸۶۸	۶۱	۳۷	۱۴	۱	۱
۷,۵۷۶۵	۱,۰۵۱۱	۰,۱۴۸۹	۰,۰۷۸۹	۱,۸۱۷۱	۱,۰۳۶۶	۰,۸۳۹۳	۶۱	۵۱	۱۴	۲	
۷,۴۸۵۹	۱,۱۱۴۴	۰,۶۸۱۳	۰,۰۷۵۳	۱,۶۱۱۴	۰,۳۵۷۰	۱,۸۸۶۱	۶۲	۲۱	۵	۳	
۷,۴۶۵۵	۱,۰۷۷۰	۰,۳۴۰۳	۰,۰۶۲۹	۱,۷۳۳۵	۱,۳۵۸۹	۰,۷۳۰۵	۶۲	۵۰	۱۶	۱	۲
۷,۵۲۸۹	۱,۰۲۳۵	۰,۱۴۴۵	۰,۰۷۹۸	۱,۹۷۴۴	۱,۰۷۹۴	۰,۷۲۷۵	۶۲	۵۱	۱۸	۲	
۷,۴۵۴۹	۱,۰۶۷۰	۰,۲۷۷۹	۰,۰۶۵۹	۱,۸۳۰۱	۱,۲۲۸۰	۰,۷۹۹۷	۶۱	۴۷	۱۸	۳	
۷,۴۶۹۳	۱,۰۵۹۵	۰,۲۸۸۲	۰,۰۶۸۵	۱,۹۰۵۹	۱,۱۸۱۶	۰,۶۶۹۴	۶۱	۳۶	۲۰	۱	۳
۷,۵۰۸۲	۱,۰۲۳۱	۰,۱۱۹۲	۰,۰۸۳۹	۲,۰۰۰۰	۱,۱۳۷۵	۰,۶۸۲۹	۶۲	۵۳	۱۹	۲	
۷,۴۳۹۵	۱,۰۷۳۶	۰,۳۳۲۶	۰,۰۷۰۲	۱,۷۷۴۱	۱,۲۱۶۹	۰,۸۲۲۹	۶۱	۴۸	۲۲	۳	
۷,۴۵۸۴	۱,۰۶۵۹	۰,۲۹۳۴	۰,۰۶۸۶	۱,۸۴۶۶	۱,۱۷۹۹	۰,۶۷۵۹	۶۱	۴۸	۲۱	۱	۴
۷,۵۲۱۴	۱,۰۴۲۱	۰,۱۹۲۸	۰,۰۷۶۲	۱,۸۷۴۸	۰,۶۷۰۴	۱,۱۴۴۶	۶۱	۲۴	۷	۲	
۷,۴۱۹۵	۱,۰۷۹۰	۰,۳۳۴۸	۰,۰۷۱۳	۱,۷۳۲۹	۱,۲۶۹۲	۰,۷۶۲۲	۶۱	۳۷	۲۴	۳	

جدول (۶): مقایسه روش پیشنهادی با دیگر روش‌ها

تعداد منابع	الگوریتم بهینه‌سازی	محل (شین)	ظرفیت (MVar)	تلفات (MW)
۱	GA[۱۶]	۵۹	۱۰۰	۰,۱۵۶۶۲
		۶۱	۷۰۰	
		۶۴	۸۰۰	
۲	PSO[۱۴]	۴۶	۲۴۱	۰,۱۵۲۴۸
		۴۷	۳۶۵	
۳	DSA[۱۱]	۱۵	۴۵۰	۰,۱۴۷۰۰
		۶۰	۴۵۰	
		۶۱	۹۰۰	
۴	TLBO[۱۶]	۱۲	۶۰۰	۰,۱۴۶۳۵
		۶۱	۱۰۵۰	
۵	MABC	۱۷	۳۵۰	۰,۱۴۶۱۲
		۶۱	۱۰۰۰	
		۶۴	۲۵۰	

جدول (۷): بهینه‌سازی تک‌هدفه در حالت دوم

$F_4(X)$ (M\$)	$F_3(X)$ (p.u)	$F_2(X)$ (p.u)	$F_1(X)$ (MW)	ظرفیت (KVar)	محل	R
۷,۷۲۱۷	۱,۳۲۷۹	۱,۴۱۱۴	۰,۱۴۶۱	۳۵۰	۱۷	۱
				۱۰۰۰	۶۱	
				۲۵۰	۶۴	
۷,۹۹۴۳	۱,۳۱۲۳	۱,۰۱۰۹	۰,۲۸۲۷	۱۰۰۰	۲۰	۲
				۱۰۰۰	۲۵	
				۱۰۰۰	۶۴	
۷,۹۵۵۳	۱,۱۹۸۳	۱,۱۶۸۶	۰,۲۶۲۸	۱۰۰۰	۶۱	۳
				۱۰۰۰	۶۲	
				۱۰۰۰	۶۴	
۷,۷۲۱۷	۱,۳۲۷۹	۱,۴۱۱۴	۰,۱۴۶۱	۳۵۰	۱۷	۴
				۱۰۰۰	۶۱	
				۲۵۰	۶۴	

نتایج حاصل از شبیه‌سازی چندهدفه به ازای حالت دوم در جدول (۸) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در انواع مدل‌های بار، سیستم در شرایط یکسان استفاده از تولیدات پراکنده، نسبت به خازن، درصد تلفات کاهش بیشتری دارند.

در جدول (۷) نتایج حاصل از جایابی و مقدار یابی بهینه تک‌هدفه خازن نمایش داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود پراکندگی این تولیدات می‌تواند تأثیر آن‌ها را در سیستم بیشتر کند. برنامه‌ریزی سیستم با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف بار متفاوت خواهد بود که در نظر گرفتن این شرایط به همراه هزینه جاری منابع می‌تواند در کاهش هزینه واحدهای سرمایه‌گذاری نقش چشم‌گیری داشته باشد.

جدول (۸): بهینه‌سازی چندهدفه در حالت دوم با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف بار

مدل بار	سناریو	محل نصب			ظرفیت (KVar)			$F_1(X)$ (MW)	$F_2(X)$ (p.u)	$F_3(X)$ (p.u)	$F_4(X)$ (M\$)
		۱۷	۵۸	۶۲	۴۰۰	۵۵۰	۹۰۰				
۱	۱	۱۷	۵۸	۶۲	۴۰۰	۵۵۰	۹۰۰	۰,۱۴۷۷	۱,۳۶۲۳	۱,۳۲۳۲	۷,۷۲۵۸
	۲	۱۹	۵۸	۶۲	۶۵۰	۹۵۰	۹۰۰	۰,۱۶۱۵	۱,۲۰۴۶	۱,۲۹۳۳	۷,۷۵۵۴
	۳	۱۷	۵۹	۶۲	۴۰۰	۵۵۰	۸۰۰	۰,۱۴۷۳	۱,۳۸۲۴	۱,۳۲۹۷	۷,۷۲۴۷
۲	۱	۱۸	۵۴	۶۱	۳۰۰	۴۰۰	۸۰۰	۰,۱۴۲۰	۱,۳۴۹۰	۱,۳۲۰۵	۷,۶۶۴۴
	۲	۱۸	۵۷	۶۲	۱۰۰۰	۷۵۰	۶۵۰	۰,۱۷۱۱	۱,۱۰۶۵	۱,۲۹۱۶	۷,۷۳۰۱
	۳	۱۸	۵۴	۶۱	۳۰۰	۴۰۰	۸۰۰	۰,۱۴۲۰	۱,۳۴۹۰	۱,۳۲۰۵	۷,۶۶۴۴
۳	۱	۱۸	۵۵	۶۱	۳۵۰	۲۰۰	۸۰۰	۰,۱۳۰۸	۱,۳۴۰۵	۱,۳۱۵۹	۷,۴۴۹۱
	۲	۱۷	۶۰	۶۴	۸۰۰	۸۰۰	۶۰۰	۰,۱۴۹۹	۱,۱۲۷۰	۱,۲۶۸۱	۷,۵۱۹۲
	۳	۱۹	۵۳	۶۱	۲۵۰	۲۵۰	۸۰۰	۰,۱۳۰۸	۱,۳۶۵۱	۱,۳۱۸۲	۷,۴۴۶۵
۴	۱	۱۹	۶۱	۶۳	۳۰۰	۷۵۰	۲۵۰	۰,۱۲۲۸	۱,۳۱۵۶	۱,۲۹۷۵	۷,۲۹۹۲
	۲	۲۲	۵۱	۶۲	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۷۰۰	۰,۱۵۴۵	۱,۰۶۳۹	۱,۲۹۴۹	۷,۳۹۰۵
	۳	۱۷	۵۴	۶۱	۲۰۰	۳۰۰	۷۰۰	۰,۱۲۴۴	۱,۳۶۷۵	۱,۳۱۵۶	۷,۲۸۵۳

جدول (۹) نتیجه جایابی و مقدار یابی بهینه تولیدات پراکنده با قابلیت تولید توان اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهد.

جدول (۱۱): بهینه‌سازی چندهدفه در حالت سوم با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف بار

مدل بار	سناریو	ظرفیت (MVar)		
۱	۱	۰,۷۰۳۳	۰,۶۶۴۳	۰,۹۶۸۳
	۲	۰,۷۱۶۶	۰,۶۷۷۰	۰,۹۵۰۳
	۳	۰,۶۷۶۴	۰,۶۳۷۹	۰,۹۳۱۶
۲	۱	۰,۴۳۷۶	۰,۶۰۷۳	۰,۹۸۳۱
	۲	۰,۴۶۸۲	۰,۶۲۷۶	۰,۹۶۴۵
	۳	۰,۴۴۸۱	۰,۵۲۷۶	۰,۸۷۴۳
۳	۱	۰,۴۸۸۶	۰,۶۴۷۲	۰,۹۲۱۹
	۲	۰,۵۳۴۴	۰,۶۲۴۵	۰,۹۳۰۳
	۳	۰,۵۰۵۲	۰,۷۷۹۲	۰,۹۳۰۴
۴	۱	۰,۴۷۹۲	۰,۴۵۱۷	۰,۸۰۶۷
	۲	۰,۵۹۹۲	۰,۵۰۴۳	۰,۷۳۳۹
	۳	۰,۵۲۵۴	۰,۴۵۳۰	۰,۸۰۲۹

جدول (۹): بهینه‌سازی تک‌هدفه در حالت سوم

R	محل و ظرفیت DG				مقدار
	محل	ظرفیت (MVar)	F_1	F_2	
۱	۱۷	۰,۵۲۲۰	۰,۲۸۹۳	۰,۱۲۵۴	F_1
	۶۱	۱,۴۴۳۸	۰,۲۳۳۰	۱,۰۲۳۳	F_2
	۶۴	۱,۰۰۰۰	۰,۲۳۳۰	۱,۰۲۳۳	F_3
	۱۷	۰,۳۵۳۸	۰,۲۳۳۰	۱,۰۲۳۳	F_4
۲	۱۹	۰,۳۸۴۱	۱,۷۴۸۳	۰,۰۵۸۷	F_1
	۵۳	۰,۶۱۸۶	۱,۷۴۸۳	۰,۰۵۸۷	F_2
	۶۲	۰,۳۸۴۱	۱,۷۴۸۳	۰,۰۵۸۷	F_3
	۶۲	۰,۳۸۴۱	۱,۷۴۸۳	۰,۰۵۸۷	F_4
۳	۱۷	۰,۷۲۵۸	۱,۷۲۲۳	۰,۱۷۶۱	F_1
	۶۱	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۶۱	F_2
	۶۱	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۶۱	F_3
	۶۱	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۶۱	F_4
۴	۱۲	۱,۰۳۰۶	۱,۷۲۸۳	۰,۰۰۸۹	F_1
	۴۹	۱,۰۳۰۶	۱,۷۲۸۳	۰,۰۰۸۹	F_2
	۶۲	۱,۰۳۰۶	۱,۷۲۸۳	۰,۰۰۸۹	F_3
	۶۲	۱,۰۳۰۶	۱,۷۲۸۳	۰,۰۰۸۹	F_4

در صورتی که واحدهای تولید پراکنده در حالت پیش فاز کار کنند، علاوه بر انجام وظیفه اصلی‌شان که تولید توان اکتیو است، با تولید توان راکتیو، نقش خازن را هم ایفا خواهند کرد. بدین صورت علاوه بر تأمین بار اکتیو در محل، به تأمین بار راکتیو نیز پرداخته خواهد شد. جدول (۱۰) نتیجه بهینه‌سازی چندهدفه تولیدات پراکنده را با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف بار نشان می‌دهد. در جدول (۱۱) منابع تولید پراکنده، توان راکتیو تولید شده را نمایش داده است.

جدول (۱۰): بهینه‌سازی چندهدفه در حالت سوم با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف بار

$F_4(X)$ (M\$)	$F_3(X)$ (p.u)	$F_2(X)$ (p.u)	$F_1(X)$ (MW)	ظرفیت (MW)			محل نصب			سناریو	مدل بار
				۱	۲	۳	۱	۲	۳		
۷,۴۸۴۸	۱,۰۰۶۲	۰,۰۶۱۴	۰,۰۱۰۹	۱,۸۰۰۶	۰,۸۹۰۶	۰,۹۲۲۶	۶۱	۴۹	۱۳	۱	۱
۷,۴۷۹۴	۱,۰۰۶۲	۰,۰۶۱۹	۰,۰۱۱۷	۱,۸۰۰۲	۰,۸۹۵۲	۰,۹۳۱۷	۶۱	۴۹	۱۳	۲	
۷,۴۲۳۰	۱,۰۰۶۲	۰,۱۱۰۶	۰,۰۱۵۹	۱,۹۸۱۷	۰,۸۵۹۳	۰,۹۱۰۶	۶۲	۴۹	۱۳	۳	
۷,۴۳۷۶	۱,۰۱۲۶	۰,۱۱۵۷	۰,۰۰۸۷	۱,۸۰۷۲	۱,۲۱۹۹	۰,۶۸۸۰	۶۱	۴۹	۱۵	۱	۲
۷,۴۷۰۳	۱,۰۰۷۹	۰,۰۶۴۳	۰,۰۱۲۷	۱,۷۸۲۴	۰,۸۹۳۴	۰,۹۷۳۲	۶۲	۵۰	۱۳	۲	
۷,۴۲۱۰	۱,۰۱۰۹	۰,۱۵۷۵	۰,۰۱۵۵	۱,۹۸۰۱	۱,۱۰۱۱	۰,۶۷۷۶	۶۲	۵۰	۱۸	۳	
۷,۳۹۶۵	۱,۰۱۱۷	۰,۱۲۷۲	۰,۰۱۰۵	۱,۸۶۰۶	۱,۲۴۷۹	۰,۶۷۹۴	۶۱	۴۹	۱۶	۱	۳
۷,۴۰۲۴	۱,۰۱۶۲	۰,۱۰۱۰	۰,۰۰۹۸	۱,۸۳۵۹	۱,۳۵۵۷	۰,۵۷۰۱	۶۱	۴۹	۱۶	۲	
۷,۳۹۲۱	۱,۰۰۸۰	۰,۱۵۹۳	۰,۰۱۱۴	۱,۸۴۴۶	۱,۲۰۵۰	۰,۷۵۷۶	۶۱	۴۹	۱۶	۳	
۷,۳۹۰۸	۱,۰۲۷۱	۰,۱۱۱۰	۰,۰۱۶۷	۱,۶۹۸۰	۱,۰۴۳۴	۱,۰۰۹۵	۶۱	۳۷	۱۳	۱	۴
۷,۴۲۴۲	۱,۰۲۲۹	۰,۰۸۰۲	۰,۰۲۲۱	۱,۹۵۳۱	۰,۸۴۸۸	۰,۹۷۶۱	۶۱	۳۹	۱۳	۲	
۷,۳۵۳۱	۱,۰۵۶۵	۰,۲۹۰۹	۰,۰۲۶۳	۱,۶۹۵۳	۱,۰۴۸۶	۱,۰۳۴۶	۶۰	۳۷	۱۱	۳	

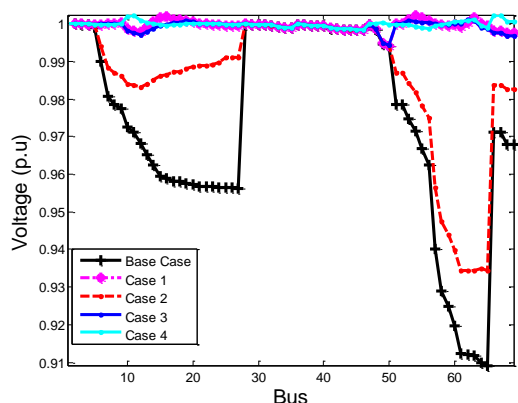
جدول (۱۲): بهینه‌سازی تک‌هدفه در حالت چهارم

مقدار	محل و ظرفیت DG و خازن					R
	F_1	F_2	F_3	F_4	محل	
۰,۰۰۵۸	F_1	۶۱	۴۹	۱۷	محل	۱ خازن
۰,۱۱۶۵	F_2	۱,۷۴۲۸	۰,۸۲۰۸	۰,۵۲۶۰	ظرفیت	
۱,۰۲۲۵	F_3	۶۲	۶۱	۱۸	محل	
۷,۷۵۳۹	F_4	۶۰۰	۶۵۰	۳۵۰	ظرفیت	
۰,۰۸۶۸	F_1	۶۳	۶۱	۱۱	محل	۲ خازن
۰,۰۳۷۴	F_2	۰,۸۰۸۶	۱,۳۵۰۸	۰,۹۸۶۵	ظرفیت	
۱,۰۰۶۲	F_3	۴۹	۲۳	۱۹	محل	
۷,۸۸۵۰	F_4	۹۵۰	۶۵۰	۵۰۰	ظرفیت	
۰,۱۵۲۹	F_1	۶۳	۵۷	۲۰	محل	۳ خازن
۰,۵۰۰۴	F_2	۱,۷۰۶۸	۱,۰۶۸۵	۱,۱۷۹۵	ظرفیت	
۱,۰۰۰۸	F_3	۴۹	۴۴	۳۵	محل	
۷,۵۹۸۵	F_4	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	ظرفیت	
۰,۰۱۲۹	F_1	۶۱	۴۹	۱۱	محل	۴ خازن
۰,۲۵۵۲	F_2	۱,۳۲۶۹	۱,۱۷۵۸	۱,۳۱۲۱	ظرفیت	
۱,۰۵۳۴	F_3	۶۲	۶۱	۱۸	محل	
۷,۳۹۱۷	F_4	۴۵۰	۷۵۰	۳۵۰	ظرفیت	

همان طور که از نتایج مشهود است، به‌کارگیری منابع تولید پراکنده و خازن با هر یک از اهداف اشاره‌شده می‌تواند بر شاخص‌های سیستمی و غیرسیستمی مانند هزینه تأثیرات متفاوتی بگذارد. در چنین شرایطی مطالعه و برنامه‌ریزی ترکیبی دو حالت در تعیین بهینه در شبکه‌های توزیع بااهمیت است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی تک‌هدفه حالت چهارم برای چهار شاخص مورد بحث در جدول (۱۲) ارائه شده است. مطابق با نتایج، بیشترین بهبود مقادیر تک‌هدفه شاخص‌ها به ازای به‌کارگیری الگوریتم ترکیبی استخراج شده است. مطالعه نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهبود مقادیر تک‌هدفه نسبت به حالت‌های قبل تفاوت چشمگیری پیدا کرده است؛ البته با توجه به نتایج، استنباط می‌شود که در حالت چهارم مجموع ظرفیت خازن استفاده‌شده نسبت به حالت دوم کاهش چشم‌گیری داشته است. این امر به‌طور مستقیم در هزینه و اشغال خطوط سیستم تأثیرگذار خواهد بود.

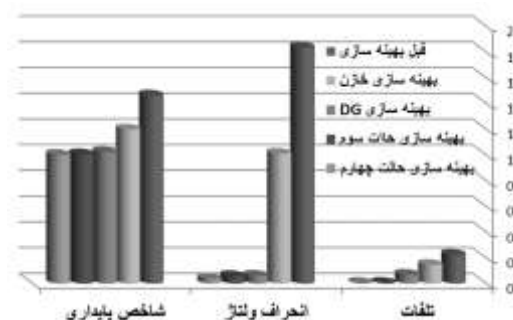
شکل (۳) نمای کلی نتایج نهایی توابع هدف در بهینه‌سازی تک‌هدفه در سه حالت پیشنهادی بهینه‌سازی و بهره‌برداری از شبکه در حالت عادی که در این مقاله استفاده شده است، نشان می‌دهد. بیشترین بهبود هر سه شاخص به ازای حالت چهارم حاصل شده است. تأثیر بیشتر تولیدات پراکنده بر برخی شاخص‌ها مانند تلفات و بویژه انحراف

قبل و بعد از بهینه‌سازی بررسی شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در حالت اولیه کمترین ولتاژ مربوط به شین ۶۵ به مقدار ۰,۹۰۹۲ است. با توجه به نتایج پروفیل ولتاژ در حالت چهارم بهترین وضعیت را دارد. در این حالت کمترین ولتاژ، مربوط به شین ۴۵ به مقدار ۰,۹۹۸۵ و بیشترین ولتاژ مربوط به شین ۱۱ به مقدار ۱,۰۰۲۴ است.



شکل (۴): اثر حالات بهینه‌سازی بر شاخص انحراف ولتاژ

ولتاژ که همواره از دغدغه‌های اصلی بهره‌برداران سیستم قدرت بوده، کاملاً نمایان است.



شکل (۳): مقایسه بهینه‌سازی تک‌هدفه.

به‌طوری‌که در این شرایط، شاخص تلفات، انحراف ولتاژ، پایداری ولتاژ و هزینه نسبت به حالت اولیه شبکه به ترتیب حدود ۹۷,۴۲، ۹۷,۹۶ و ۳۱,۶۱ درصد بهبود یافته است. به‌طورکلی منابع تولید پراکنده به دلیل تأمین بار در نزدیک مشترک و کاهش ظرفیت اشغال‌شده، خطوط شبکه می‌تواند به‌طور چشم‌گیری در کاهش تلفات شبکه تأثیرگذار باشد.

در شکل (۴) مقایسه شاخص انحراف از ولتاژ شبکه در

جدول (۱۳): بهینه‌سازی چندهدفه در حالت چهارم با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف بار

مدل بار	سناریو	محل نصب	ظرفیت (MW)	$F_1(X)$ (MW)	$F_2(X)$ (p.u)	$F_3(X)$ (p.u)	$F_4(X)$ (M\$)
۱	۱	۱۴	۰,۸۷۰۸	۱,۰۶۵۴	۰,۰۱۵۲	۱,۰۰۸۹	۷,۴۱۰۵
	۲	۱۴	۰,۸۶۸۵	۱,۰۹۷۷	۰,۰۱۷۴	۱,۰۰۶۶	۷,۴۰۸۷
	۳	۱۴	۰,۸۶۱۹	۱,۰۹۷۳	۰,۰۱۶۵	۱,۰۰۸۹	۷,۴۰۲۴
۲	۱	۱۶	۰,۵۸۲۲	۱,۳۱۶۳	۰,۰۰۸۷	۱,۰۱۵۵	۷,۴۳۶۰
	۲	۱۶	۰,۶۳۱۴	۱,۳۶۲۳	۰,۰۱۰۶	۱,۰۱۷۸	۷,۳۹۳۱
	۳	۱۶	۰,۶۳۱۴	۱,۳۶۲۳	۰,۰۱۰۶	۱,۰۱۷۸	۷,۳۹۳۱
۳	۱	۲۰	۰,۶۳۳۲	۱,۳۷۱۲	۰,۰۱۳۱	۱,۰۲۲۸	۷,۳۹۳۱
	۲	۱۳	۱,۱۳۶۸	۰,۹۹۴۱	۰,۰۲۱۳	۱,۰۲۲۹	۷,۴۳۰۱
	۳	۲۰	۰,۶۳۸۳	۱,۳۷۲۹	۰,۰۱۴۵	۱,۰۲۲۹	۷,۳۸۹۶
۴	۱	۱۱	۰,۷۵۹۲	۱,۳۳۰۳	۰,۰۱۴۶	۱,۰۷۱۳	۷,۳۸۹۷
	۲	۱۳	۱,۰۶۵۷	۰,۶۴۱۰	۰,۰۱۸۹	۱,۰۲۴۹	۷,۶۱۷۶
	۳	۳۸	۰,۶۵۲۴	۱,۶۷۲۳	۰,۰۳۸۹	۱,۰۱۸۹	۷,۳۷۹۴

الکتریکی و بهره‌برداری به دست آورد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از مفاهیم اساسی بهینه‌سازی چند هدفه، روش جدیدی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور مصنوعی اصلاح‌شده برای جایابی و مقداربایی بهینه تولیدات پراکنده و خازن در شبکه توزیع ارائه شده است. با توجه به نتایج، توانایی الگوریتم جدید در بهینه‌سازی به اثبات رسید. در این روش با به‌کارگیری عملگرهای تقاطع و جهش، شرایط حل مسئله بهبود داده شده است. همچنین حرکت زنبورها به‌صورت تطبیقی تنظیم شده است و بدین وسیله جست‌وجو با هوشمندی بیشتری انجام گرفته است و از همگرایی زودرس جلوگیری شده است. روش پیشنهادی با توابع هدف تلفات، انحراف از ولتاژ، شاخص پایداری و هزینه بر روی شبکه ۶۹ شینه IEEE به‌صورت تک‌هدفه و چندهدفه پیاده‌سازی شده است. همچنین به‌منظور گزینش جواب میان جواب‌های پارتو از منطق فازی با در نظر گرفتن ضریب تأثیر متفاوت در توابع هدف استفاده شده است. این روش این امکان را برای بهره‌برداران سیستم فراهم می‌کند که با توجه به شرایط شبکه به انتخاب ضریب تأثیر مناسب منجر شود. همچنین از نتایج می‌توان به این نتیجه رسید که تخصیص خازن به تنهایی می‌تواند باعث بهبود ولتاژ شود؛ اما به اندازه‌ای که انتظار می‌رفت باعث بهبود تلفات نمی‌شود. از سوی دیگر، با توجه به هزینه تولیدات پراکنده نسبت به خازن، تخصیص ترکیبی می‌تواند تلفات توان را کاهش دهد و همچنین باعث بهبود هرچه بیشتر ولتاژ با توجه به هزینه سیستم شود؛ در نتیجه اگر تولیدات پراکنده به‌صورت ترکیبی با خازن استفاده شود، می‌تواند بهبود چشمگیری در پارامترهای شبکه داشته باشد. شبیه‌سازی‌ها نشان از کارآمدی این روش بهینه‌سازی با در نظر گرفتن انواع بارها خصوصاً ثابت، صنعتی، تجاری و مسکونی در بهبود شاخص‌ها دارد؛ در نتیجه، ترکیب این توابع ضمن کاهش هزینه‌های تولید باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کیفیت برق در شبکه‌های توزیع خواهد شد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی چندهدفه به ازای حالت چهارم در جدول (۱۳) و (۱۴) بیان شده است که در جدول (۱۳) نتایج بهینه‌سازی، ظرفیت و محل تولیدات پراکنده و در جدول (۱۴) ظرفیت و محل خازن‌ها نمایش داده شده است.

جدول (۱۴): بهینه‌سازی چندهدفه در حالت چهارم با

در نظر گرفتن مدل‌های مختلف بار

مدل بار	سناریو	محل نصب			ظرفیت (KVar)		
		۶۱	۵۲	۴۹	۶۰۰	۶۰۰	۱۰۰۰
۱	۱	۶۱	۵۲	۴۹	۶۰۰	۶۰۰	۱۰۰۰
	۲	۶۱	۵۴	۴۹	۶۵۰	۸۵۰	
	۳	۶۱	۵۵	۴۹	۷۰۰	۸۵۰	
۲	۱	۶۲	۵۹	۲۳	۴۰۰	۶۵۰	۶۰۰
	۲	۶۲	۵۹	۲۳	۲۰۰	۶۵۰	۶۰۰
	۳	۶۲	۵۹	۲۳	۲۰۰	۶۵۰	۶۰۰
۳	۱	۶۱	۵۵	۱۲	۵۵۰	۸۵۰	۹۰۰
	۲	۶۱	۶۰	۴۰	۴۰۰	۶۵۰	۷۵۰
	۳	۶۱	۵۵	۲۹	۵۵۰	۸۰۰	۹۰۰
۴	۱	۶۱	۴۰	۱۲	۴۰۰	۵۵۰	۸۵۰
	۲	۶۲	۵۶	۳۹	۵۵۰	۷۰۰	۸۰۰
	۳	۶۳	۴۸	۴۷	۳۰۰	۹۵۰	۸۵۰

نتایج، این نکته را بیان می‌کند که استفاده ترکیبی منابع با وجود داشتن هزینه احداث، دارای هزینه کل مناسب‌تری نسبت به دیگر حالات است. با توجه به جدول (۱۳) نتایج بیان‌شده در سه سناریو بیان می‌کند که به دلیل قابلیت انعطاف روش بهینه‌سازی پیشنهادی، با توجه به اولویت‌های بهره‌بردار، سیستم می‌تواند انتخاب‌های گوناگونی را در گزینش تابع هدف در اختیار اپراتور قرار دهد.

با بررسی و دقت در نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که به‌کارگیری مولدهای مقیاس کوچک در کنار خازن می‌تواند باعث افزایش کارایی منابع تولید پراکنده شود. این استراتژی در وهله اول با هدف حداکثر بهینه‌سازی شاخص‌های سیستم صورت گرفته است که البته این موضوع با در نظر گرفتن هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری منابع و مصرف برق از لحاظ اقتصادی و فنی توجیه‌پذیر است. بی‌گمان چنین امری را می‌توان فقط در سایه یک بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن شاخص‌های مختلف

مراجع

- systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 42, pp. 24-30, 2012.
- [12] Martín García, J. A., Gil Mena, A. J., "Optimal distributed generation location and size using a modified teaching-learning based optimization algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 50, pp. 65-75, 2013.
- [13] Mohandas, N., Balamurugan, R., Lakshminarasimman, L., "Optimal location and sizing of real power DG units to improve the voltage stability in the distribution system using ABC algorithm united with chaos," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 66, pp. 41-52, 2015.
- [14] Prakash, K., Sydulu, M., "Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems," in: *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1-5.
- [15] Lesani, H., Mazhari, M., Karamie, E., "A Multi-Objective Capacitor Placement within Restructured Distribution Networks via Probabilistic Modeling of Risk Imposed by Customers Reliability of Service," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 6. No.1, pp. 15-28, 2015.
- [16] Sultana, S., Roy, P. K., "Optimal capacitor placement in radial distribution systems using teaching learning based optimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 54, pp. 387-398, 2014.
- [17] Esmaeilian, H. R., Darijany, O., Mohammadian, M., "Optimal placement and sizing of DG units and capacitors simultaneously in radial distribution networks based on the voltage stability security margin," *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, Vol. 7, pp. 1-14, 2013.
- [18] Sajjadi, S. M., Haghifam, M.-R., Salehi, J., "Simultaneous placement of distributed generation and capacitors in distribution networks considering voltage stability index," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 46, pp. 366-375, 2013.
- [19] AlRashidi, M. R., AlHajri, M. F., "Optimal planning of multiple distributed generation sources in distribution networks: A new approach," *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 3301-3308, 2011.
- [20] Niknam, T., Taheri, S. I., Aghaei, J., Tabatabaei, S., Nayeripour, M., "A modified honey bee mating optimization algorithm for multiobjective placement of renewable energy resources," *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 4817-4830, 2011.
- [21] Bijami, E., "Placement of distributed generation using Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) in south of Kerman," *Computational*
- [1] Viral, R., Khatod, D. K., "Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 5146-5165, 2012.
- [2] Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R., D'haeseleer, W., "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy Policy*, Vol. 33, pp. 787-798, 2005.
- [3] Gopiya Naik, S., Khatod, D. K., Sharma, M. P., "Optimal allocation of combined DG and capacitor for real power loss minimization in distribution networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 53, pp. 967-973, 2013.
- [4] Aman, M. M., Jasmon, G. B., Bakar, A. H. A., Mokhlis, H., Karimi, M., "Optimum shunt capacitor placement in distribution system—A review and comparative study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 30, pp. 429-439, 2014.
- [5] Moradi, M. H., Zeinalzadeh, A., Mohammadi, Y., Abedini, M., "An efficient hybrid method for solving the optimal siting and sizing problem of DG and shunt capacitor banks simultaneously based on imperialist competitive algorithm and genetic algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 54, pp. 101-111, 2014.
- [6] Georgilakis, P. S., Hatziargyriou, N. D., "Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, pp. 3420-3428, 2013.
- [7] Lee, S. H., Grainger, J. J., "Optimum Placement of Fixed and Switched Capacitors on Primary Distribution Feeders," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, pp. 345-352, 1981.
- [8] Willis, H. L., "Analytical methods and rules of thumb for modeling DG-distribution interaction," in *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2000. *IEEE*, 2000, pp. 1643-1644 vol. 3.
- [9] Khodr, H. M., Olsina F. G., Jesus, P. M. D. O.-D., Yusta, J. M., "Maximum savings approach for location and sizing of capacitors in distribution systems," *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, pp. 1192-1203, 2008.
- [10] Atwa, Y. M., El-Saadany, E. F., Salama, M. M. A., Seethapathy, R., "Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, pp. 360-370, 2010.
- [11] Ramalinga Raju, M., Ramachandra Murthy, K. V. S., Ravindra, K., "Direct search algorithm for capacitive compensation in radial distribution

- [25] Azari nejadayan, F., Mirhosseini-Moghaddam, M., Marzband, M., Parhizi, N., "Optimal energy management system in grid connected Microgrid integrated with distributed generation by using the multi-period artificial bee colony," Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 5. No.3, pp. 1-14, 2014.
- [26] Alshamlan, H. M., Badr, G. H., Alohal, Y. A., "Genetic Bee Colony (GBC) algorithm: A new gene selection method for microarray cancer classification," Computational Biology and Chemistry, Vol. 56, pp. 49-60, 2015.
- [27] Coello, C. A. C., Pulido, G. T., Lechuga, M. S., "Handling multiple objectives with particle swarm optimization", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 8, pp. 256-279, 2004.
- [28] Jadhav, H. T., Roy, R., "Gbest guided artificial bee colony algorithm for environmental/economic dispatch considering wind power," Expert Systems with Applications, Vol. 40, pp. 6385-6399, 2013.
- Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 5. No.3, pp. 81-108, 2014.
- [22] Kefayat, M., Lashkar Ara, A., Nabavi Niaki, S. A., "A hybrid of ant colony optimization and artificial bee colony algorithm for probabilistic optimal placement and sizing of distributed energy resources," Energy Conversion and Management, vol. 92, pp. 149-161, 2015.
- [23] Nayeripour, M., Mahboubi-Moghaddam, E., Aghaei, J., Azizi-Vahed, A., "Multi-objective placement and sizing of DGs in distribution networks ensuring transient stability using hybrid evolutionary algorithm," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 25, pp. 759-767, 2013.
- [24] Akbari, R., Hedayatzadeh, R., Ziarati, K., Hassanizadeh, B., "A multi-objective artificial bee colony algorithm," Swarm and Evolutionary Computation, vol. 2, pp. 39-52, 2012.

¹ Distributed generation (DG)

² Capacitor (Cap)

³ Direct search algorithm (DSA)

⁴ Modified teaching-learning based optimization (MTLBO)

⁵ Particle swarm optimization (PSO)

⁶ Genetic algorithm (GA)

⁷ Teaching-learning based optimization (TLBO)

⁸ Modified artificial bee colony algorithm (MABC)

⁹ Improved particle swarm optimization algorithm (IPSO)

