

# پیکربندی بهینه شبکه توزیع توسط الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب با حضور نیروگاه‌های تولیدپراکنده

ماشالله طلاوری

دفتر مرکزی توسعه نیشکر و صنایع جانبی، اهواز، ایران

mashalatalavari@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۱

**چکیده:** تأمین منابع مورد نیاز برای برآورده کردن انرژی صنعت و به حداقل رساندن تأثیرات این منابع از عمده‌ترین چالش‌های کنونی صنعت برق است. یکی از راه‌حل‌های استراتژیک برای این چالش بازآرایی شبکه توزیع هوشمند است، در حالی که نه تنها کارایی را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه‌ها را نیز کاهش می‌دهد. ظهور نیروگاه‌های بزرگ منجر به منسوخ شدن ژنراتورهای کوچک برای تولید برق شد. با این حال، توسعه فن‌آوری‌های تولید برق در مقیاس کوچک و نظریه بازآرایی در صنعت برق، همراه با مشکلات زیست محیطی منجر به استفاده مجدد از این مولدها در صنعت برق شده است. با افزایش هزینه‌های انتقال و توزیع، DG می‌تواند برق را با قیمت مناسب‌تری برای مصرف‌کنندگان تأمین کند. در این سیستم‌ها، توان تولید شده توسط منابع DG کنترل می‌شود که می‌تواند با کنترل مناسب سوئیچ‌های شبکه توزیع، مشخصات ولتاژ را بهبود بخشد و تلفات شبکه را کاهش دهد. این مسائل عمدتاً در قالب یک مسئله بهینه‌سازی برای بهبود اهداف مورد نظر تجزیه و تحلیل می‌شوند. در این مقاله، مسئله بازآرایی در شبکه‌های توزیع با تعیین اندازه تولید توزیع شده برای به حداقل رساندن تلفات برق و بهبود مشخصات ولتاژ شبکه انجام می‌شود. از الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب برای حل مسئله بهینه‌سازی مورد نظر استفاده می‌شود. مطالعات بازآرایی تحت سیستم‌های ۳۳ و ۶۹ باسه انجام شده است. شبیه‌سازی‌های این مقاله با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** بازآرایی، الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب، منابع تولیدپراکنده، کاهش تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ

## ۱- مقدمه

روش‌های نوین بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع بازآرایی آنها در بهره‌برداری آنهاست. به این معنی که با تغییر شروط بهره‌برداری نظیر بروز اغتشاش و تغییر بارها، ساختار شبکه را بگونه‌ای تغییر دهیم که به لحاظ فنی و اقتصادی بهینه باشد، هدف‌های فنی و اقتصادی گوناگونی جهت بازآرایی شبکه‌های هوشمند توزیع مطرح گردید [4, 5]. از جمله هدف‌های اساسی بازآرایی، کاهش تلفات خطوط می‌باشد. باتوجه به تنوع و نیز کمبود ولتاژ در شبکه‌های توزیع، تلفات انرژی قابل توجهی در این شبکه‌ها وجود دارد. بازآرایی امکان دارد جهت متوازن کردن بارگذاری روی فیدرها انجام گردد. با وجود اینکه یک اغتشاش دائم بوجود آید، بازآرایی شبکه جهت بازگردانی خدمات‌دهی مشترکین و به حداقل‌سازی ناحیه‌های بی‌برق استفاده می‌شود، بهبود پروفیل ولتاژ، متعادل‌سازی بار، کاهش خاموشی‌های مشترکین و افزایش قابلیت اعتماد شبکه از دیگر هدف‌های آن هستند و تا کنون جهت بازآرایی شبکه‌های

بازآرایی شبکه‌های توزیع با هدف‌های متنوعی همچون کاهش تلفات توان خطوط انتقال، خدمات‌رسانی صحیح مشترکین و کمینه‌کردن ناحیه‌های بی‌برق، بهبود پروفایل ولتاژ، متعادل‌سازی بار، کاهش خاموشی‌ها و افزایش قابلیت اعتماد شبکه استفاده می‌شود. لذا می‌توان بازآرایی شبکه‌های توزیع را بعنوان یک مسئله بهینه‌سازی با هدف‌ها و محدودیت‌های گوناگون است و استحصال یک حل بهینه دقیق برای این مشکل است. تا به امروز راهکارهای گوناگونی برای بازآرایی شبکه‌های توزیع معرفی شده است [1-3].

باتوجه به تنوع شبکه‌های توزیع و نیز حجم زیاد انرژی توزیع‌شده آنها، تحقیقات و پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه بهره‌برداری مؤثر و اقتصادی از این سیستم‌ها سبب صرفه‌جویی عظیمی خواهد شد. یکی از

استفاده می‌شود. مطالعات بازآرایی تحت سیستم‌های ۳۳ و ۶۹ باسه انجام شده است.

## ۲- بازآرایی شبکه‌های توزیع

### ۲-۱- ماهیت و مفهوم بازآرایی

شبکه‌های توزیع عمدتاً بصورت رینگ باز طراحی شده و بصورت شعاعی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. شبکه‌های توزیع شعاعی دارای مزایای بارزی در مقایسه با شبکه‌های توزیع حلقوی دارند که پائین بودن جریان اتصال کوتاه و سادگی تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی از جمله آنها هستند. منتهای مراتب این شبکه‌ها به نسبت قابلیت اطمینان پایین‌تری دارند. بنابراین جهت بهره‌مندی از مزایای شبکه‌های شعاعی و همچنین حذف مشکلات آن، عملیات شبکه توزیع بایستی بنحوی باشد که بهره‌برداری از آن مقرون‌به‌صرفه باشد. با در نظر گرفتن اینکه محدودیت‌های زیر نیز رعایت شود.

- شعاعی ماندن شبکه توزیع
- تأمین توان کلیه مشترکین
- ایجاد هماهنگی بین رله‌های جریانی
- عدم ایجاد اضافه بار در ترانسفورماتورها و خطوط
- رعایت محدوده مجاز افت ولتاژ

از مشکلات اساسی در شبکه‌های توزیع مسئله تلفات خطوط است که عمده آن در خطوط شبکه‌های توزیع رخ می‌دهد. کاهش تلفات توان، بهبود شروط بهره‌برداری و استمرار برقرسانی عمدتاً هدف‌های شرکت‌های توزیع به شمار می‌روند. تصحیح ساختار شعاعی فیدهای توزیع بصورت گسسته باتغییر وضعیت کلیدها و انتقال بار از یک فیدر به دیگری بطور چشمگیری می‌تواند شروط بهره‌برداری را بهبود دهد.

بازآرایی در شبکه‌های توزیع از کاربردهای اساسی و بسیار مؤثر سیستم اتوماسیون است. ورودی آنها وضعیت بارها و کلیدها از جمله خطوط ارتباطی و تقسیم‌کننده‌ها و خروجی آنها وضعیت جدید کلیدها است، بنحوی که دستیابی به هدف‌های مورد مطالعه حاصل شود. مسئله بازآرایی شبکه توزیع به انجام عملیات بهینه‌سازی پیچیده برای یافتن ترکیب شعاعی در یک شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل بار شبکه اطلاق می‌شود بنحویکه رضایت هر دوی شرکت توزیع و مصرف‌کننده حاصل شود. به اینصورت هرچه تعداد کلیدها بیشتر شود امکان بازآرایی و بهبودی افزایش می‌یابد. باوجودیکه تلفات به حداقل رسانده می‌شود اما هزینه تجهیزات و بهره‌برداری در سیستم اتوماسیون بسیار افزایش می‌یابد.

### ۲-۲- اهداف و الزامات بازآرایی

تأمین تقاضای مشترکین با استفاده از یک روش صحیح و مقرون‌به‌صرفه، هدف مهم سیستم توان الکتریکی نوین می‌باشد. سیستم توزیع دارای بارهای متنوعی نظیر بارهای مسکونی، تجاری، صنعتی و غیره هستند

توزیع مورد توجه قرار گرفته‌اند [8-6]. در سیستم‌های توزیع مرسوم، بازآرایی بصورت فصلی انجام می‌گیرد. جهت تغییر ساختار این شبکه‌ها از کلیدها و جداسازهای دستی و خودکار استفاده می‌شود. اما تا به حال باتوجه به گرایش روزافزون به اتوماسیون شبکه‌های توزیع، کنترل کردن و تغییر ساختار این شبکه‌ها آسانتر می‌شود و بنابراین بازآرایی امکان دارد بصورت روزانه یا ساعتی و با بهره‌مندی از کلیدهای خودکار و کنترل از راه دور انجام شود.

شبکه توزیع الکتریکی بارهای متنوعی نظیر بارهای تجاری، مسکونی، صنعتی و غیره را تأمین می‌کند که بطور معمول برای تغییرات بار روزانه در یک محدوده وسیع است. با ازدیاد بارگذاری و بهره‌برداری از ساختار حاضر، احتمال وقوع فروپاشی ولتاژ در شبکه توزیع بصورت قابل توجهی افزایش خواهد یافت. بازآرایی شبکه سیستم توزیع پروسه تغییر ساختار توسط کلیدزنی سویچ‌ها جهت پیدا کردن ساختار عملکرد شعاعی که تلفات را کمینه می‌کند و سبب بهبود پایداری ولتاژ با وجود برآورده‌سازی محدودیت‌های عملکردی می‌شود. باتوجه به اینکه تعدد ترکیب‌های کلیدزنی در شبکه توزیع، بازآرایی شبکه یک مسئله بهینه‌سازی مشکل و پیچیده می‌باشد. بعلاوه، قید شعاعی بودن بطور معمول پیچیدگی مسئله را تشدید می‌کند [9, 10].

شبکه‌های توزیع بطور معمول دارای ساختار شعاعی با کلیدهای جداساز بسته و کلیدهای ارتباطی باز برای اتصال فیدها دارند که انتقال بار بین آنها را امکان‌پذیر می‌کند. با ازدیاد کلیدها در سیستم‌های توزیع بزرگ، تعداد ترکیب‌های بسیار زیادی هستند که می‌توانند پاسخگوی تقاضا باشند و لذا هر ترکیبی به ساختار و تلفات توان مربوط به خود منجر می‌شود. بازآرایی در سیستم‌های توزیع جهت پیدا کردن ساختار بهینه کلیدها است، به طوریکه تلفات به حداقل شده و محدودیت‌های بهره‌برداری حفظ شوند [11, 12].

بازآرایی شبکه یک روش کارآمد جهت بهبود کارایی سیستم بدون هیچگونه سرمایه‌گذاری مالی می‌باشد. با این وجود بازآرایی امکان دارد که قادر نباشد تلفات را کاهش دهد و نیز محدودیت‌های کیفیت توان را رعایت کند. لذا بازآرایی شبکه با قرار دادن خازن یا منابع تولیدپراکنده برای جهت دستیابی به عملکرد بهتر استفاده می‌شود. اخیراً، استفاده از منابع تولیدپراکنده DG یک راه‌حل کارآمد جهت جبران چالش‌های مطرح‌شده توسط نیروگاه‌های مرسوم شده است [13, 14].

با افزایش هزینه‌های انتقال و توزیع، DG می‌تواند برق را با قیمت مناسب‌تری برای مصرف‌کنندگان تأمین کند. در این سیستم‌ها، توان تولید شده توسط منابع DG کنترل می‌شود که می‌تواند با کنترل مناسب سویچ‌های شبکه توزیع، مشخصات ولتاژ را بهبود بخشد و تلفات شبکه را کاهش دهد. این مسائل عمدتاً در قالب یک مسئله بهینه‌سازی برای بهبود اهداف مورد نظر تجزیه و تحلیل می‌شوند. در این مقاله، مسئله بازآرایی در شبکه‌های توزیع با تعیین اندازه تولید توزیع شده برای به حداقل رساندن تلفات برق و بهبود مشخصات ولتاژ شبکه انجام می‌شود. از الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب برای حل مسأله بهینه‌سازی مورد نظر

اینکه خطای هر مرحله نسبت به مرحله قبل به حداقل مقدار شود. این روش برای محاسبه پخش بار فیدرهای توزیع شعاعی متعادل و نامتعادل مناسب می‌باشد.

### ۱-۳- فرموله کردن مسئله بهینه‌سازی

در حل مسئله بازآرایی می‌توان چهار تابع هدف اساسی کاهش توان تلفاتی، بهبود پروفیل ولتاژ، متعادل‌سازی بار و کاهش هزینه را در پروسه بهینه‌سازی جای داد. این توابع را می‌توان به یک تابع هدف نهایی تبدیل کرده و از یک معیار چندهدفگی استفاده شود. متغیرهای طرح مسئله بهینه‌سازی معرفی می‌شوند و سپس، هر تابع هدف و همچنین معیار چندهدف‌بود به تفصیل تشریح می‌شود.

تمامی سیستم‌های مهندسی را می‌توان با مجموعه‌ای از کمیت‌ها ارائه داد و بعضی از آن‌ها بصورت مجموعه متغیرها در فرآیند طراحی بعنوان متغیرهای طراحی ظاهر شوند. این متغیرها بصورت  $x_i = (i=1,2,\dots,n)$  ارائه شده و مجموعه متغیرهای طراحی نیز بصورت یک بردار طراحی  $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$  نشان داده می‌شود. همچنین، بردار کنترلی  $X$  می‌تواند بصورت زیر ارائه شود.

$$x = \begin{bmatrix} Tie_1, Tie_1, \dots, Tie_{N_{tie}}, Size_{G,1}, Size_{G,2}, \dots \\ Size_{G,N_{DG}}, PF_{G,1}, PF_{G,2}, \dots, PF_{G,N_{DG}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این رابطه  $Tie_i$  وضعیت تأمین کلید را نشان می‌دهد. یعنی: ۱=باز و ۰= بسته است.  $Size_{G,i}$  اندازه تأمین منبع تولید پراکنده نام و  $PF_{G,i}$  ضریب توان تأمین منبع تولید پراکنده است  $N_{DG}$  و  $N_{Tie}$  بیانگر تعداد کلیدهای بسته و تعداد منابع تولید پراکنده هستند.

### ۲-۳- تعیین توابع هدف

#### ۱-۲-۳- کاهش توان تلفاتی

تابع هدف تلفات اکتیو توان به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Min F_1(X) = \sum_{k=1}^{N_{Br}} R_k \times |I_k|^2 \quad (2)$$

جایی که  $I_k$  و  $R_k$  بترتیب جریان و مقاومت حقیقی شاخه‌ها می‌باشند، و تعداد شاخه‌ها با  $N_{Br}$  نمایش داده شده است. متغیر کنترلی مسئله نیز با  $X$  نشان داده می‌شود.

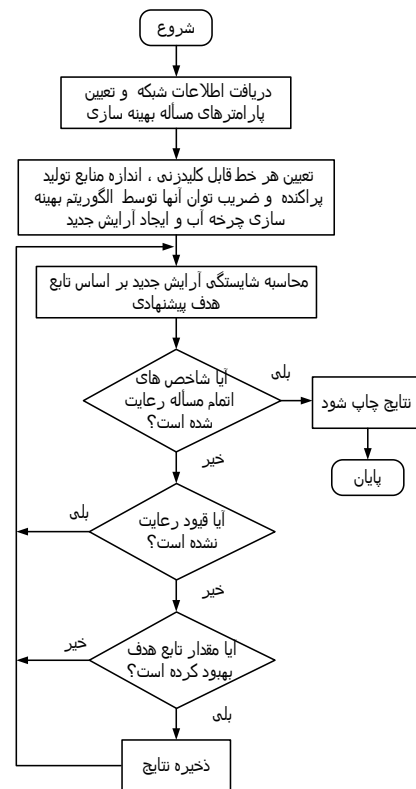
#### ۲-۲-۳- بهبود پروفیل ولتاژ

کمینه‌کردن این تابع هدف سبب نزدیک‌شدن مقادیر ولتاژ باس‌ها به مقدار مرجع یعنی ۱ پریونیت می‌شوند که در واقع پروفیل ولتاژ بهبود داده می‌شود.

$$Min F_2(X) = Max[|1 - V_{min}| \text{ and } |1 - V_{max}|] \quad (3)$$

جایی که،  $N$  بیانگر تعداد باس‌های شبکه،  $V_i$  ولتاژ تأمین باس هستند.

که بطور معمول دارای تغییرات بار روزانه در یک محدوده وسیعی هستند. ازدیاد بار و بهره‌برداری از ساختارهای موجود، احتمال فروپاشی ولتاژ در سیستم توزیع را بصورت قابل توجهی افزایش می‌دهد. براساس شروط مرسوم، شرکت‌های توزیع جهت کاهش تلفات توان سیستم بایستی در ترانسفورماتورها و فیدرها بارگذرای متعادل برقرار شود. از دیگر منظر، بهبود کیفیت توان نیز اهمیت خاصی پیدا کرده است. بارهای حساس منحصراً در شروط خطا می‌توانند در معرض افت ولتاژ و وقفه کمتری قرار گیرند. حتی با وجود شروط خطا، شرکت‌های توزیع یا تأمین توان الکتریکی بایستی اطمینان لازم را جهت کیفیت توان ارائه شده به صنایع و بارهای حساس ضمانت نمایند. لذا مسئله بازآرایی فیدر با هدف‌های متنوع در هر دوی شروط نرمال و غیر نرمال بسیار پیچیده می‌گردد. [15]



شکل (۱): فلوچارت مسأله بازآرایی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب

### ۳- مدل‌سازی مسئله بازآرایی بهینه

در اینجا مفاهیمی که در مسئله بازآرایی شبکه‌های توزیع بیان شد بصورت ریاضی ارائه می‌شود. در این خصوص فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی ضرورتاً انجام می‌شود. فلوچارت مسأله بازآرایی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب در شکل (۱) ارائه شده است.

لازم به ذکر است که روش پخش بار مبتنی بر جاروب پسر-پیشرو انجام گرفته است. در این روش بطور تکراری جریان یا شار خطوط و ولتاژ شینه‌ها محاسبه می‌شود. در جاروب پسر، تخمین‌های جریان یا شار از شین انتهایی به ابتدایی جمع می‌شوند و در جاروب پیشرو، نتایج جاروب پسر جهت تخمین ولتاژ استفاده می‌شوند. این پروسه ادامه می‌یابد تا

## ۳-۲-۳- متعادل کردن بار خطوط

این تابع جهت متعادل سازی بار خطوط ارائه شده است که میتوان به صورت زیر تعریف شود:

$$\text{Min } F_3(X) = \text{FBI}(X) = \sum_{k=1}^{N_{Br}} \left( \frac{I_k}{I_{average}} \right)^2 \quad (4)$$

جاییکه  $I_k$  و  $I_{average}$  بترتیب جریان عبوری و جریان متوسط هستند.

## ۳-۲-۴- کاهش هزینه

این تابع هدف نیز جهت تأمین هزینه توان می باشد که می توان به صورت زیر تعریف شود:

$$\text{Min } F_4(X) = P_s \times \text{Price}_s + \sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{G,i} \times \text{Price}_{G,i} \quad (5)$$

$P_s$  و  $P_{G,i}$  به ترتیب بیانگر توان اکتیو تولیدی لامین تولیدپراکنده و توان باس مبدأ هستند.  $\text{Price}_s$  و  $\text{Price}_{G,i}$  نیز بیانگر هزینه تأمین توان لامین تولیدپراکنده و هزینه تأمین توان باس مبدأ هستند.

## ۳-۳- شاخص چندهدفه بودن

می توان هر چهار تابع هدف را با تبدیل به یک تابع هدف نهایی بصورت همزمان کمینه کرد و بصورت زیر قابل ارائه است.

$$\text{Min } F_T(X) = \sum_{n=1}^4 w_n \times \frac{F_n - F_n^{\min}}{F_n^{\max} - F_n^{\min}} \quad (6)$$

در این رابطه،  $F_n^{\max}$  و  $F_n^{\min}$  حداقل و حداکثر مقادیر تابع هدف هستند، و  $w_n$  بیانگر ضریب وزنی توابع هدف هستند.

## ۳-۳-۱- قیود مسئله

## ✓ قید ولتاژ باسها

ولتاژ باسها بایستی در محدوده مشخصی قرار گیرد که به طور معمول ۵٪ انحراف از مقدار نامی مجاز می باشد.

$$V_{\min} < V_i < V_{\max} \quad (7)$$

## ✓ قید توان عبوری

توان عبوری خطوط از حد ماکزیمم خود نباید تجاوز کند.

$$\left| P_i^{\text{line}} \right| < P_{i,\max}^{\text{line}} \quad (8)$$

## ✓ قید ساختار شبکه

ساختار شبکه در هر شرایطی بایستی شعاعی بودن خود را حفظ کند.

## ۳-۴- الگوریتم های بهینه سازی

در راستای دستیابی به جوابهای دقیق مسئله بهینه سازی، می توان از الگوریتم های بهینه سازی متفاوتی استفاده کرد. هدف این الگوریتم ها ارائه راه حلی در چارچوب یک زمان قابل قبول می باشد که می تواند جهت حل مسئله مناسب باشد.

## ۳-۴-۱- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

در حقیقت این الگوریتم از رفتار اجتماعی حیوانات مثل حرکت دسته جمعی پرندگان و ماهی ها الهام گرفته است. پروسه اولیه این الگوریتم نیز با یک ماتریس جمعیت تصادفی اولیه آغاز شده و مشابه بسیاری از الگوریتم های تکاملی نظیر الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری می باشد. برعکس الگوریتم ژنتیک، این الگوریتم هیچ عملگر تکاملی مثل جهش و تقاطع ندارد. منتهای مراتب می توان گفت که این الگوریتم از جهاتی مشابه الگوریتم رقابت استعماری است. در این الگوریتم هر عنصر این جمعیت با یک ذره مشخص می شود. در حقیقت الگوریتم ازدحام ذرات از تعداد معینی ذرات تشکیل شده است که مقدار اولیه آن بطور تصادفی انتخاب می شوند [16].

در این الگوریتم موقعیت هر ذره  $s$  مشخص می شود و سرعت آن نیز با  $v$  نشان داده می شود. ازدحام ذرات، تابع هدفی خاص را بهینه کرده که هر ذره از بهترین مقدار خود تاکنون ( $pbest$ ) و موقعیت خود  $s$  اطلاع دارد. این اطلاعات از تجربیات هر ذره که در هر مرحله کسب کرده حاصل می شود. بعلاوه، هر ذره از بهترین مقدار خود را که تاکنون در جمعیت بدست آورده ( $gbest$ ) اطلاع دارد. این اطلاعات در مقایسه با نحوه عملکرد دیگر ذرات در این گروه در هر تکرار حاصل می شود. هر ذره در تلاش است تا موقعیت خود را با استفاده از اطلاعات زیر تنظیم کند:

موقعیت فعلی  $i$ ، سرعت فعلی  $v_i$ ،  $gbest$ ،  $pbest$ .

این اصلاح می تواند بامفهوم سرعت ارائه شود. سرعت هر ذره را می توان از معادله زیر کسب کرد:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 \text{rand}_1 \times (pbest_i - s_i^k) + c_2 \text{rand}_2 \times (gbest - s_i^k) \quad (9)$$

جایی که،  $v_i^k$  سرعت ذره  $i$  در امین تکرار  $k$ ،  $w$  تابع وزن و  $c_j$  ضریب وزنی می باشد.  $\text{rand}$  یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است و  $s_i^k$  موقعیت فعلی ذره  $i$  در امین تکرار  $k$ ،  $pbest_i$  نقطه  $i$  بوده و  $gbest$ ،  $gbest$  گروه می باشد.

موقعیت کنونی نقطه جستجو در فضای جواب را می توان با معادله زیر تنظیم کرد:

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (10)$$

الگوریتم ازدحام ذرات از نقاط جستجوی متعددی استفاده می کند، و نقاط جستجو تدریجاً به نقطه بهینه توسط  $pbest$  و  $gbest$  نزدیک خواهند شد.

## ۳-۴-۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، روشی جستجو جهت یافتن راه حلی بهینه برای مسائل بهینه سازی است. این الگوریتم نوعی خاص از الگوریتم های تکاملی می باشد که از روش های زیست شناسی فرگشتی مثل وراثت و جهش الگوبرداری می کند. برای اولین بار الگوریتم ژنتیک یا GA توسط جان هنری هالند پیشنهاد گردید که از اصول انتخاب طبیعی داروین جهت

$$\Delta_k = (2r_n)_{\varepsilon_m+1}^{-1} - 1 \quad \text{if } r_n < 0.5 \quad (18)$$

$$\Delta_k = 1 - (2(1-r_n))_{\varepsilon_m+1}^{-1} - 1 \quad \text{if } r_n \geq 0.5 \quad (19)$$

که در آن،  $r_n$  یک عدد تصادفی یکنواخت بین (۰، ۱) می باشد. همچنین،  $\varepsilon_m$  ضریب توزیع جهش می باشد.

### ۳-۴-۳- الگوریتم بهینه سازی چرخه آب

ساختار الگوریتم بهینه سازی چرخه آب از رفتار سیکلی آب در طبیعت الهام گیری شده است [19]. همانطوریکه می دانیم جوی ها و رودخانه ها از بلندی ها و کوه ها آب را به سمت دریاها روانه می کنند. در در مسیر حرکت این آب های روان، جوی ها و رودخانه ها آب را از باران جوی ها و رودخانه های دیگر جمع آوری می کنند. آب دریاچه ها و رودخانه ها و قتیکه گیاهان حین فرآیند تبخیر پس می دهند بخار می شود. بالا رفتن آب بخار شده در اتمسفر باعث تشکیل ابرها می شوند. ابرهای تشکیل یافته در اتمسفر سردتری تراکم یافته و آب را بصورت باران باز پس داده و جوی ها و رودخانه های جدید ایجاد می شوند [20].

#### ۳-۴-۳-۱- پروسه بهینه سازی چرخه آب

مانند الگوریتم های دیگر فوق ابتکاری، این الگوریتم پروسه بهینه سازی خود را با یک جمعیت اولیه که همان قطرات باران هستند، آغاز می کند و به واسطه آن باران یا تگرگ ایجاد می شود. بهترین قطرات باران بصورت دریا در نظر گرفته می شوند. تعدادی از قطرات خوب باران بعنوان رودخانه انتخاب شده و بقیه آنها بصورت جوی هایی که به رودخانه ها و یا بطور مستقیم به دریا می ریزند انتخاب می شوند.

#### ۳-۴-۳-۲- تولید جمعیت اولیه

در الگوریتم های ژنتیک و ازدحام ذرات عملگرهایی با نامهایی مثل مکان ذرات و کروموزوم وجود دارد که مقادیر متغیرهای مسئله را ایجاد می کنند. در الگوریتم بهینه سازی چرخه آب هر قطره باران با آرایه ای در نظر گرفته می شود. برای یک مسئله بهینه سازی  $N$  بعدی و برای یک راه حل بصورت زیر ارائه می شود:

$$\text{Raindrop} = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_N] \quad (20)$$

با در نظر گرفتن  $N_{pop}$  قطره، ماتریس قطرات باران را می توان بصورت زیر تعریف کرد:

$$\text{Raindrops} = \begin{bmatrix} \chi_1^1 & \chi_2^1 & \chi_3^1 & \dots & \chi_{N_{var}}^1 \\ \chi_1^2 & \chi_2^2 & \chi_3^2 & \dots & \chi_{N_{var}}^2 \\ \chi_1^3 & \chi_2^3 & \chi_3^3 & \dots & \chi_{N_{var}}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \chi_1^{N_{pop}} & \chi_2^{N_{pop}} & \chi_3^{N_{pop}} & \dots & \chi_{N_{var}}^{N_{pop}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

جایی که  $N_{pop}$  و  $N_{var}$  به ترتیب بیانگر تعداد قطرات باران و متغیرها هستند. در یک ماتریس تشکیل شده بصورت تصادفی، هر کدام از مقادیر  $[\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_N]$  می توانند به عنوان مقادیر واقعی یا بعنوان

دستیابی به فرمول بهینه برای پیش بینی کردن یا انطباق الگو بهره مند می شود. در کل این الگوریتم مبتنی بر تکرار می باشد که اکثر قسمت های آن بصورت فرآیندهای تصادفی انتخاب می شوند. این پروسه با جمعیت اولیه ای از جواب ها یا کروموزوم ها کار خود را شروع کرده و با استفاده از اپراتورهای تقاطع و جهش جواب های جدید تولید می شود و از بین جواب های تولید شده و کنونی، بهترین ها توسط تابع برازندگی انتخاب شده و جمعیت جدیدی ایجاد می شود. از نسلی به نسلی دیگر این جواب ها بهبود داده شده تا اینکه جواب نهایی بهینه حاصل شود [17]. دو عملگر اصلی برای این الگوریتم وجود دارد (تقاطع و جهش) که به شرح زیر توضیح داده می شوند:

#### ۳-۴-۲-۱- تقاطع

این عملگر یک روش باز آفرینی است که با ترکیب دو کروموزوم والدین دو کروموزوم بچه ایجاد می کند. با توجه به انتخاب طبیعی، احتمال تقاطع معمولاً بیشتر از جهش است. این عملگر می تواند بطور موثری الگوریتم ژنتیک را که به صورت زیر فرموله شده است، بهبود دهد [18]:

$$a_{1,k} = \frac{[(1-\gamma_k)p_{1,k} + (1+\gamma_k)p_{2,k}]}{2} \quad (11)$$

$$a_{2,k} = \frac{[(1+\gamma_k)p_{1,k} + (1-\gamma_k)p_{2,k}]}{2} \quad (12)$$

که در آن  $a_{i,k}$  نشان دهنده  $i$ th بچه با  $k$ امین مولفه است،  $p_{i,k}$  نشان دهنده والد منصوب است، و همچنین  $\gamma_k$  نشان دهنده نمونه تولید شده تصادفی است که با نمونه تصادفی یکنواخت  $u$  بین (۰، ۱) حاصل می شود که در زیر فرمول بندی شده اند:

$$p(\gamma) = \frac{[(\varepsilon_c + 1)\gamma^{\varepsilon_c}]}{2} \quad \text{if } 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (13)$$

$$p(\gamma) = \frac{[(\varepsilon_c + 1)\left(\frac{1}{\gamma^{\varepsilon_c + 2}}\right)]}{2} \quad \text{if } \gamma > 1 \quad (14)$$

$$\gamma(u) = \frac{1}{(2u)^{\varepsilon_c + 1}} \quad (15)$$

$$\gamma(u) = \frac{1}{(2(1-u))^{\varepsilon_c + 1}} \quad (16)$$

در صورتی که،  $\varepsilon_c$  عامل توزیع تقاطع را نشان می دهد.

#### ۳-۴-۲-۲- جهش

جهش معمولاً به عنوان یک عملگر پشتیبان شناخته می شود که تضمین می کند احتمال جستجو هرگز صفر نمی شود. از همگرایی با بهینه های محلی به جای بهینه اصلی جلوگیری می کند. جهش چند جمله ای را می توان به صورت زیر فرموله کرد:

$$c_k = p_k + (p_k^u - p_k^l)\Delta_k \quad (17)$$

جاییکه  $c_k$  و  $p_k$  به ترتیب نشانگر بچه و والدین هستند و همچنین  $p_{ku}$  و  $p_{kl}$  به ترتیب کران های بالا و پایین والد را نشان می دهند.  $\Delta_k$  یک انحراف کوچک را نشان می دهد:

ابرها ایجاد شده و این آب دوباره بصورت باران به زمین می‌بارد و رودخانه‌ها و جوی‌های جدیدی بوجود می‌آید که دوباره به دریا جریان می‌یابند. رابطه زیر مشخص می‌کند که فرآیند تبخیر و تشکیل باران اتفاق می‌افتند یا نه:

$$|\chi_{Sea}^i - \chi_{River}^i| < d_{max}, \quad i = 1, 2, \dots, (N_{sr} - 1) \quad (29)$$

$d_{max}$  یک مقدار کوچک نزدیک به صفر می‌باشد و عمق جستجو نزدیک دریا را کنترل می‌کند. هنگامیکه مقداری بزرگ از  $d_{max}$  در نظر گرفته می‌شود، شدت جستجو کم می‌شود، اما مقدار کوچک آن، باعث تقویت آن می‌شود. در صورتیکه مسافت بین دریا و رودخانه کمتر از  $d_{max}$  شود، رودخانه به دریا اتصال می‌یابد. لذا، فرآیند تبخیر صورت گرفته و فرآیند بارش اتفاق می‌افتد. طبق رابطه زیر، در پایان هر تکرار از مقدار  $d$  کاسته می‌شود:

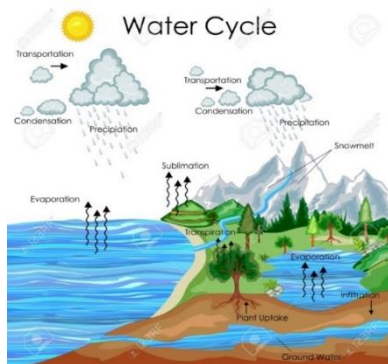
$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^i - \frac{d_{max}^i}{Max\ iteration} \quad (30)$$

### ۳-۴-۳-۵- فرآیند بارش

فرآیند بارش شبیه به اپراتور جهش در الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند. قطره‌های جدید باران تشکیل شده بصورت تصادفی، جوی‌های جدیدی را در نقاط مختلف بوجود می‌آورند. بهترین قطرات مجدداً در میان دیگر قطرات جدید به عنوان رودخانه‌ای که به دریا میریزد، انتخاب می‌شود. مابقی جوی‌های جدیدی هستند که به رودخانه یا بطور مستقیم به دریا جاری می‌شوند. برای جوی‌هایی که بطور مستقیم به دریا جاری می‌شوند، از رابطه جدیدی استفاده می‌شود که جستجوی در نزدیکی دریا را افزایش می‌دهد و نرخ همگرایی و محاسبات مربوط به این الگوریتم بهتر می‌شود:

$$\chi_{Stream}^{new} = \chi_{Sea} + \sqrt{U} \times rand(1, N_{var}) \quad (31)$$

جاییکه  $U$  انحراف استاندارد است و بیانگر مفهوم واریانس می‌باشد. مقدار  $U$  در واقع، رنج ناحیه جستجوی نزدیک دریا و  $randn$  عددی تصادفی باتوزیع نرمال می‌باشد. بهترین مقدار  $U$ ، برای  $U$  می‌باشد. درحالیکه برای مقادیر بزرگ، احتمال خروج از ناحیه امکان‌پذیر را افزایش می‌دهد و مقادیر کوچک، فضای جستجو و اکتشاف نزدیک دریا را کاهش می‌دهد. در شکل (۲) شماتیک کلی از عملکرد این الگوریتم به صورت تصویری شده است.



شکل (۲): شماتیک کلی از عملکرد الگوریتم چرخه آب

گروهی که از قبل تعیین گردید بترتیب برای مسائل پیوسته یا گسسته در نظر گرفته شوند. ارزش هرسطر یا برازندگی با استفاده از تابع هدف قابل ارائه می‌باشد:

$$F_i = F(x_1^i, x_2^i, \dots, x_{N_{var}}^i) \quad i = 1, 2, \dots, N_{pop} \quad (22)$$

بعد از تشکیل  $N_{pop}$  قطره باران، به تعداد  $N_{sr}$  عدد از بهترین آنها به عنوان رودخانه و دریا در نظر گرفته می‌شوند. قطرهای با بهترین مقدار تابع بعنوان دریا انتخاب شده و بقیه آنها بصورت جوی‌هایی که به رودخانه‌ها و یا بطور مستقیم به دریا می‌ریزند انتخاب می‌شوند.

$$N_{sr} = Number\ of\ Rivers + 1(Sea) \quad (23)$$

$$N_{Streams} = N_{pop} - N_{sr} \quad (24)$$

جوی‌ها با توجه به شدت جریان آبی که با استفاده از معادله زیر بدست می‌آید بعنوان رودخانه‌ها و دریاها در نظر گرفته می‌شوند.

$$N_{Sn} = round \left\{ \left| \frac{F_n}{\sum_{i=1}^{N_{sr}} F_i} \right| \times N_{Streams} \right\} \quad (25)$$

جایی که  $N_{Sn}$  تعداد جوی‌های جاری شده به رودخانه یا دریاهای مشخص

### ۳-۴-۳-۳- نحوه جاری شدن جوی‌ها به رودخانه یا دریا

حرکت یک جوی به طرف رودخانه‌ای مشخص در راستای مسیر ارتباطی بین آنها، با استفاده از یک مسافت انتخابی بصورت تصادفی اعمال می‌شود:

$$X \in (0, C \times d) \quad (26)$$

جاییکه  $C$  یک مقداری معین بین ۱ و ۲ می‌باشد، و  $d$  مسافت مابین جوی و رودخانه می‌باشد. در صورتیکه  $C > 1$ ، جوی‌ها این توانایی را خواهند داشت که در جهت‌های مختلفی به طرف رودخانه‌ها حرکت کنند. لذا،  $2$  می‌تواند بهترین مقدار برای  $C$  باشد. همچنین، این مفهوم می‌تواند جهت حرکت رودخانه‌ها به طرف دریا در نظر گرفته شود. لذا، میتوان وضعیت جدید جوی‌ها و رودخانه‌ها را بصورت زیر ارائه داد:

$$X_{Stream}^{i+1} = X_{Stream}^i + rand \times C \times (X_{River}^i - X_{Stream}^i) \quad (27)$$

$$X_{River}^{i+1} = X_{River}^i + rand \times C \times (X_{Sea}^i - X_{River}^i) \quad (28)$$

جایی که  $rand$  عددی است که بصورت تصادفی بین صفر و یک انتخاب می‌شود. در صورتیکه مقدار پاسخ هرکدام از جوی‌ها بهتر از رودخانه اتصال آن باشد، وضعیت آنها تغییر می‌یابد. بعبارتی، جوی تبدیل به رودخانه و رودخانه به جوی تبدیل می‌شود. وضعیت دریا و رودخانه نیز در صورتیکه رودخانه پاسخ بهتری از دریا داشته باشد، عوض می‌شوند.

### ۳-۴-۳-۴- شرایط تبخیر

نقش این فرآیند جهت ممانعت از به تله افتادن آن در بهینه محلی و همگرایی سریع بسیار مهم است. این فرآیند از روند تبخیر آب دریا و از تعرق گیاهان در هنگام فتوسنتز الهام گرفته شده است. از آب تبخیر شده

### ۳-۵- مسئله بازآرایی شبکه‌های توزیع مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب

پروژه بهینه‌سازی مسئله بازآرایی شبکه توزیع و تعیین مقدار منابع تولیدپراکنده را بصورت زیر می‌توان ارائه داد.

**مرحله ۱:** داده‌های ورودی که شامل اطلاعات شبکه و پارامترهای الگوریتم می‌باشند دریافت می‌شوند.

**مرحله ۲:** جمعیت اولیه با توجه به اطلاعات مرحله قبل ایجاد می‌شوند.

**مرحله ۳:** پخش بار بر اساس متغیرهای تصمیم‌گیری محاسبه می‌شوند.

**مرحله ۴:** توابع هدف جهت تولید جمعیت محاسبه می‌شوند.

**مرحله ۵:** قیود مسئله باتوجه به نتایج بدست آمده از پخش بار بررسی می‌شوند. با برآورده شدن قیود مسئله مرحله بعد انجام می‌شود، در غیر اینصورت ضریب جریمه برای توابع هدف در نظر گرفته می‌شود.

**مرحله ۶:** اعضای جمعیت بطور نزولی مرتب می‌شوند.

**مرحله ۷:** جمعیت به  $q$  زیرگروه تقسیم شده که هر زیرگروه  $F/q$  عضو را شامل می‌شود.

جاییکه  $q$  و  $F$  بترتیب بیانگر تعداد زیرگروه‌ها و تعداد کل جمعیت هستند.

**مرحله ۸:** تعیین بهترین پاسخ  $\lambda$  امین عضو، بهترین پاسخ برای  $\lambda$  امین زیر گروه و بهترین پاسخ در کل جمعیت هستند.

**مرحله ۹:** دریافت مقدار جدید  $\lambda$  امین عضو از  $\lambda$  امین زیرگروه براساس الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب

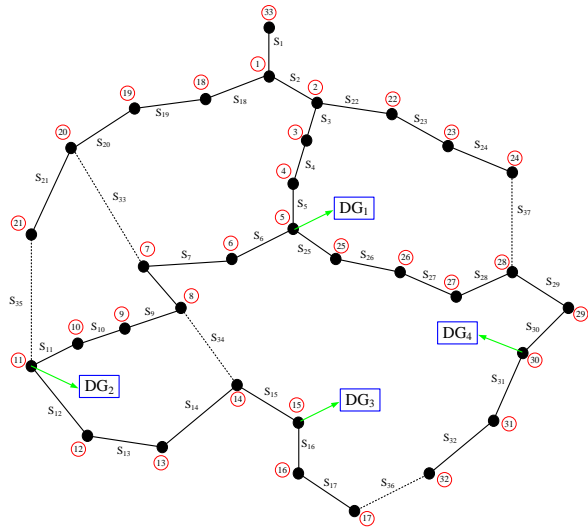
**مرحله ۱۰:** اعضای همه زیرگروه‌ها باهم ترکیب شده و مجدداً مرتب‌سازی صورت می‌پذیرد.

**مرحله ۱۱:** پروژه بهینه‌سازی بعد از تکراری معین به پایان می‌رسد.

### ۴- نتایج شبیه‌سازی

#### ۴-۱- معرفی شبکه‌های تحت مطالعه

اولین شبکه توزیع مورد مطالعه یک سیستم ۳۳ باسه با ۵ حلقه می‌باشد و ولتاژ نامی آن ۱۲/۶۶ کیلو ولت است. دیاگرام تک‌خطی این شبکه با حضور منابع تولیدپراکنده در شکل (۳) ارائه شده است. برای اولین وضعیت، کلیدهای خطوط ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷ باز در نظر گرفته می‌شود که بصورت نقطه چین نشان داده شده‌اند. مشخصات مربوط به منابع تولیدپراکنده‌ای که در این شبکه نصب شده‌اند در جدول (۱) داده شده‌اند.



شکل ۳: دیاگرام تک‌خطی شبکه توزیع ۳۳ باسه در حضور تولیدات پراکنده

جدول (۱): اطلاعات منابع تولید پراکنده نصب شده در شبکه ۳۳ باسه

ضریب توان	مکان	نوع DG	ظرفیت (KW)
۰,۹ پسفاز تا ۰,۹ پیشفاز	۵	پیل سوختی	۵۰۰
۰,۹ پسفاز تا ۰,۹ پیشفاز	۱۱	میکرو توربین	۳۰۰
۰,۹ پسفاز تا ۰,۹ پیشفاز	۱۵	دیزلی	۳۰۰
۰,۹ پسفاز تا ۰,۹ پیشفاز	۳۰	دیزلی	۳۰۰

دومین شبکه توزیع مورد مطالعه نیز یک سیستم ۶۹ باسه و ۱۱ حلقه می‌باشد و ولتاژ نامی آن ۱۱ kV است. دیاگرام تک‌خطی این شبکه با حضور منابع تولیدپراکنده در شکل (۳) ارائه شده است. کلیدهای باز در این شبکه مشخص می‌باشند. مشخصات مربوط به منابع تولیدپراکنده‌ای که در این شبکه نصب شده‌اند در جدول (۲) داده شده‌اند.

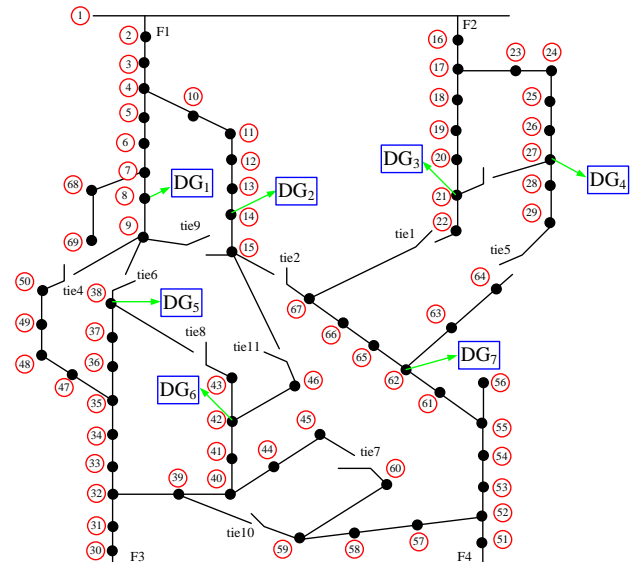
جدول (۲): مشخصات تولیدات نصب شده در شبکه ۶۹ باسه

قیمت (\$/KWh)	ضریب توان	مکان	نوع DG	ظرفیت (KW)
۰,۰۸۲	۰,۹ پسفاز تا ۰,۹ پیشفاز	۸ تا	پیل سوختی	۵۰۰
۰,۰۸۲	۰,۹ پسفاز تا ۰,۹ پیشفاز	۱۴ تا	پیل سوختی	۵۰۰
۰,۰۱۰	۰,۹ پسفاز تا ۰,۹ پیشفاز	۲۱ تا	دیزلی	۵۰۰
۰,۰۱۰	۰,۹ پسفاز تا ۰,۹ پیشفاز	۲۷ تا	دیزلی	۵۰۰
۰,۰۱۳	۰,۹ پسفاز تا ۰,۹ پیشفاز	۳۸ تا	میکرو توربین	۵۰۰
۰,۰۸۲	۰,۹ پسفاز تا ۰,۹ پیشفاز	۴۲ تا	پیل سوختی	۵۰۰
۰,۰۱۵	۰,۹ پسفاز تا ۰,۹ پیشفاز	۶۲ تا	احترافی	۵۰۰

در شکل‌ها واضح است که، هر سه الگوریتم توانسته اند که نقطه بهینه را استخراج کنند. منتها الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب به دلیل اپراتورهای منحصربه‌فرد آن نقطه بهینه را با سرعت بیشتری استخراج کند و همگرایی سریع‌تری نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات داشته باشد.

در این مرحله عملکرد این سه الگوریتم با حضور منابع تولیدپراکنده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این حالت در شبکه ۳۳ باسه، علاوه بر ۵ متغیر مربوط به خطوط، ۸ متغیر دیگر که مربوط به مقدار منابع تولیدپراکنده و ضریب توان آن‌ها می‌باشد به فضای جستجوگر بهینه‌سازی اضافه می‌شود. همانطوریکه از شکل (۷) مشاهده می‌شود، در این حالت الگوریتم ژنتیک نسبت به دیگر الگوریتم‌ها دیرتر به پاسخ بهینه رسیده است. منتها بوضوح به اثبات رسیده است که قابلیت الگوریتم چرخه آب در استخراج جواب بهینه و همگرایی سریع بسیار چشمگیر می‌باشد.

در شبکه ۶۹ باسه، تعداد متغیرهای مسئله و پیچیدگی آن افزایش می‌یابد و بهتر می‌توان قابلیت این سه الگوریتم را محک زد. منحنی همگرایی الگوریتم چرخه آب بهینه‌سازی تحت مطالعه با حضور منابع تولیدپراکنده در شکل (۸) ارائه شده است. مشابه حالت قبل کارایی الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب بنحو مطلوبی به اثبات رسیده است. هیچکدام از دو الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک نتوانسته‌اند همگرایی سریع و جواب‌های بهینه‌ای را استخراج کنند. ضمن اینکه الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به الگوریتم ژنتیک همگرایی سریع‌تری داشته است ولی جواب بدتری را استخراج کرده است.

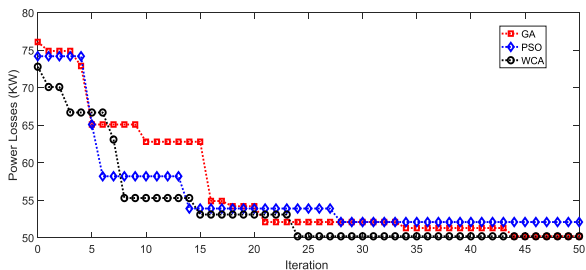


شکل (۴): دیاگرام تک‌خطی شبکه توزیع ۶۹ باسه در حضور تولیدات پراکنده  
مجموعه اول از متغیرهای تصمیم‌گیری، مربوط است به که از شبکه باید جدا شوند تا اینکه شبکه کماکان شعاعی بودن خود را حفظ کند. مجموعه دوم و سوم از متغیرهای تصمیم‌گیری، مقدار منابع تولیدپراکنده و ضریب توان آنهاست.

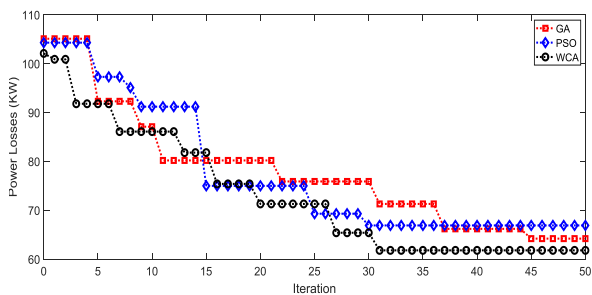
## ۴-۲- مقایسه نتایج الگوریتم‌ها

### ۴-۲-۱- کاهش تلفات توان

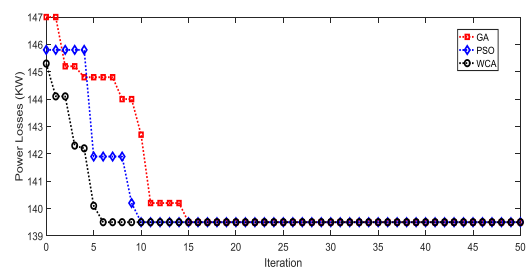
برای ارزیابی الگوریتم‌های GA، PSO و WCA، نتایج بدست آمده آنها جهت بهینه‌سازی تلفات توان برای هر دو شبکه با حضور وبدون حضور منابع تولیدپراکنده مقایسه می‌شوند. در شکل‌های زیر همگرایی هر سه الگوریتم برای دو شبکه تحت مطالعه جهت کاهش تلفات توان ارائه شده است. درحالت بدون حضور منابع تولیدپراکنده، شبکه ۳۳ باسه و ۶۹ باسه بترتیب پنج و ده متغیر تصادفی مربوطه کلیدها است.



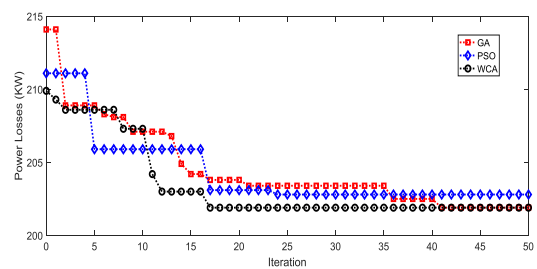
شکل (۷): همگرایی تابع توان تلفاتی در شبکه ۳۳ باسه با حضور منابع تولیدپراکنده



شکل (۸): همگرایی تابع توان تلفاتی در شبکه ۶۹ باسه بدون حضور منابع تولید پراکنده



شکل (۵): همگرایی تابع توان تلفاتی در شبکه ۳۳ باسه بدون حضور منابع تولیدپراکنده



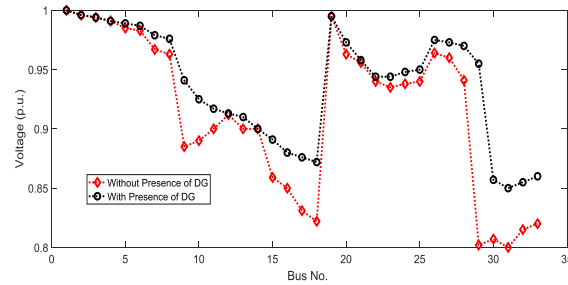
شکل (۶): همگرایی تابع توان تلفاتی در شبکه ۶۹ باسه بدون حضور منابع تولیدپراکنده

### ۴-۲-۲- بهبود پروفیل ولتاژ

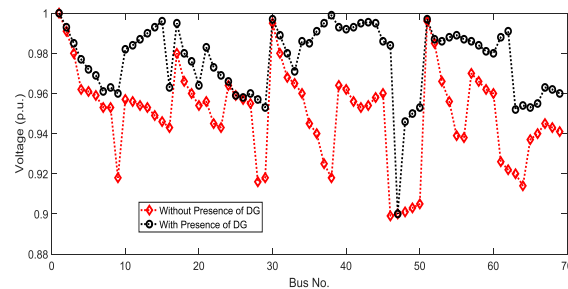
در این قسمت فرآیند بهینه‌سازی چرخه آب با حضور منابع تولید پراکنده و بدون حضور آنها در سیستم‌های ۳۳ باسه و ۶۹ باسه انجام می‌شود.



همانطوریکه که به وضوح قابل مشاهده است، پروفیل ولتاژ باسها بصورت قابل توجهی با حضور منابع تولید پراکنده بهبود داده شده است.



شکل (۹): پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ باس با و بدون حضور منابع تولید پراکنده



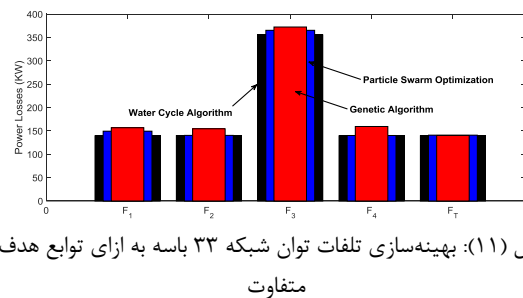
شکل (۱۰): پروفیل ولتاژ شبکه ۶۹ باس با و بدون حضور منابع تولید پراکنده

### ۳-۲-۴- مقایسه نتایج بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تمام

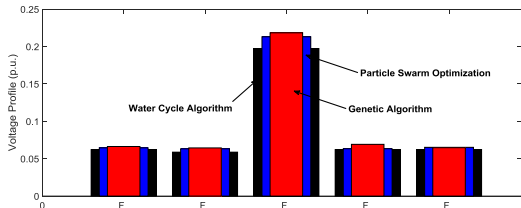
#### توابع هدف

در این مرحله مسئله بازاریابی شبکه هوشمند توزیع ۳۳ باس با در نظر گرفتن توابع هدف تعریف شده و مورد مطالعه یعنی: تلفات توان، پروفیل ولتاژ، تعادل ولتاژ و هزینه تأمین توان و مجموع آنها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. ضمن اینکه این مسئله بهینه‌سازی برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی چرخه آب، ازدحام ذرات و ژنتیک انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) آورده شده است. از این شکل‌ها بسیار بوضوح می‌توان مطالب زیر را نتیجه گرفت:

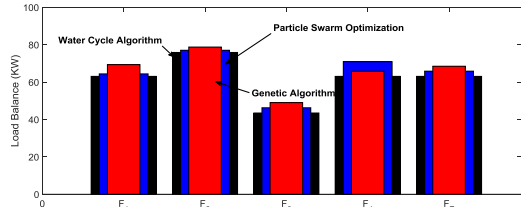
- ۱- تأثیر کلیدزنی بهینه در بازاریابی شبکه هوشمند توزیع
- ۲- افزایش قابلیت شبکه توزیع با حضور منابع تولید پراکنده در بهبود شاخص‌های تلفات توان، پروفیل ولتاژ، تعادل ولتاژ و هزینه تأمین توان
- ۳- انجام بهینه‌سازی دقیق و سریع و رسیدن به جواب بهینه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب در مقایسه با الگوریتم‌های ازدحام ذرات و ژنتیک



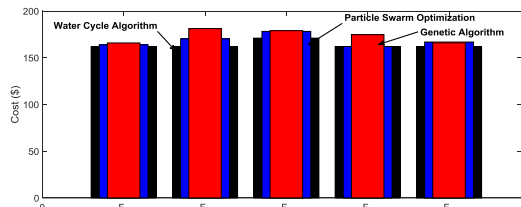
شکل (۱۱): بهینه‌سازی تلفات توان شبکه ۳۳ باس به ازای توابع هدف متفاوت



شکل (۱۲): بهینه‌سازی پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ باس به ازای توابع هدف متفاوت

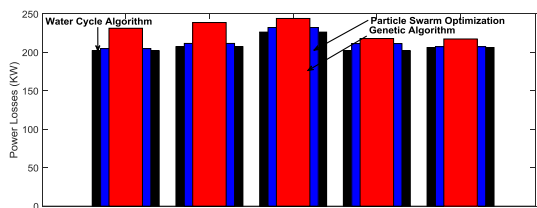


شکل (۱۳): بهینه‌سازی تعادل ولتاژ شبکه ۳۳ باس به ازای توابع هدف متفاوت

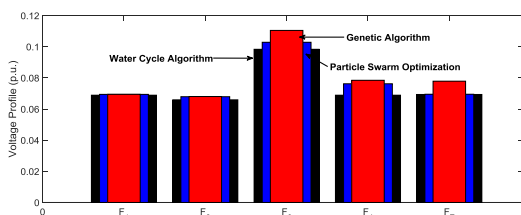


شکل (۱۴): بهینه‌سازی هزینه تأمین توان شبکه ۳۳ باس به ازای توابع هدف متفاوت

در این بخش مطالعات انجام شده در شبکه ۳۳ باس برای شبکه ۶۹ باس تکرار می‌شود. نتایج شبیه‌سازی حاصل از این شبکه در شکل‌های (۱۵) تا (۱۸) آورده شده است. پیداست که با کلیدزنی و بکارگیری بهینه منابع تولید پراکنده بنحو مطلوبی به اهداف مورد نظر یعنی: کاهش تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ، متعادل‌سازی ولتاژ و کاهش هزینه تأمین توان دست یافته‌ایم. ضمن اینکه با مقایسه‌ای که بین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چرخه آب، ازدحام ذرات و ژنتیک نیز انجام شد، به این نتیجه رسیدیم که الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب عملیات بهینه‌سازی بسیار بهتری به نسبت الگوریتم‌های ازدحام ذرات و ژنتیک داشته است.

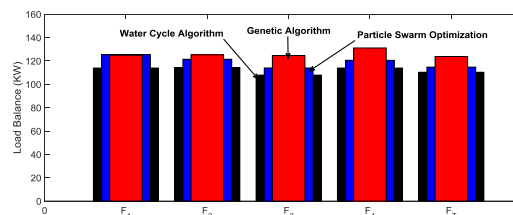


شکل (۱۵): بهینه‌سازی تلفات توان شبکه ۶۹ باس به ازای توابع هدف متفاوت

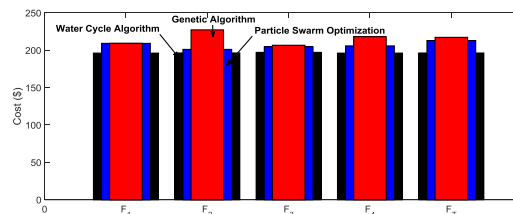


شکل (۱۶): بهینه‌سازی پروفیل ولتاژ شبکه ۶۹ باس به ازای توابع هدف متفاوت

- conditions”, *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 93, pp. 107310, 2021.
- [3] P. Rossoni, E. A. Belati, R. da S. Benedito, “A hybrid approach for optimization of electric power distributed networks with photovoltaic sources”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 211, pp. 108183, 2022.
- [4] E.J. de Oliveira, G.J. Rosseti, L.W. de Oliveira, F.V. Gomes and W. Peres, “New algorithm for reconfiguration and operating procedures in electric distribution systems”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 57, pp. 129–134, 2014.
- [5] A. Srinivasan, S. Devakirubakaran and B. Meenakshi Sundaram, “Mitigation of mismatch losses in solar PV system-Two-step reconfiguration approach”, *Solar Energy*, Vol. 206, pp. 640-654, 2020.
- [6] Pérez Abril, “NSGA-II phase balancing of primary distribution circuits by the reconnection of their circuit laterals and distribution transformers”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 109, pp. 1–7, 2014.
- [7] R. Pegado, Z. Ñaupari, Y. Molina and C. Castillo, “Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 169, pp. 206-213, 2019.
- [8] U. Raut and S. Mishra, “An improved Elitist–Jaya algorithm for simultaneous network reconfiguration and DG allocation in power distribution systems”, *Renewable Energy Focus*, Vol. 30, pp. 92-106, 2019.
- [9] A. Naderipour, A. Abdullah, M. H. Marzbali, S. A. Nowdeh, “An improved corona-virus herd immunity optimizer algorithm for network reconfiguration based on fuzzy multi-criteria approach”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 187, pp. 115914, 2022.
- [10] C. L. B. Silveira, A. Tabares, L. T. Faria, J. F. Franco, “Mathematical optimization versus Metaheuristic techniques: A performance comparison for reconfiguration of distribution systems”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 196, pp. 107272, 2021.
- [11] E.M. Moghaddam, M.R. Narimani, M.H. Khooban, A. Azizvahed and M.J. Sharifi, “Multi-objective distribution feeder reconfiguration to improve transient stability, minimize power loss and operation cost using an enhanced evolutionary algorithm at the presence of distributed generations”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 76, pp. 35–43, 2016.
- [12] D. L. Duan, X. D. Ling, X. Y. Wu and B. Zhong, “Reconfiguration of distribution network for loss reduction and reliability improvement based on an enhanced genetic algorithm”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 64, pp. 88-95, 2015.
- [13] Y. Qu, C. C. Liu, J. Xu, Y. Sun, S. Liao, D. Ke, “A global optimum flow pattern for feeder reconfiguration to minimize power losses of unbalanced distribution systems”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 131, pp. 107071, 2021.
- [14] R. Hooshmand and S.H. Soltani, “Simultaneous optimization of phase balancing and reconfiguration in distribution networks using BF–NM algorithm”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 41, pp. 76–86, 2012.
- [15] S. Essallah, A. Khedher, “Optimization of distribution system operation by network reconfiguration and DG integration using MPSO algorithm”, *Renewable Energy Focus*, Vol. 34, pp. 37-46, 2020.
- [16] O. Hasançebi, S. Çarbas, E. Dogan, F. Erdal and M. P. Saka, “Performance evaluation of metaheuristic search



شکل (۱۷): بهینه‌سازی تعادل ولتاژ شبکه ۶۹ با سه به ازای توابع هدف متفاوت



شکل (۱۸): بهینه‌سازی هزینه تأمین توان شبکه ۶۹ با سه به ازای توابع هدف متفاوت

## ۵- نتیجه‌گیری

به‌کارگیری منابع انرژی بازآرایی در شبکه‌های توزیع که بعنوان منابع تولیدپراکنده در نظر گرفته می‌شوند می‌تواند راهکار مناسبی جهت کاهش هزینه‌های تأمین توان، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری از انرژی باشد. در این پایان‌نامه در ابتدا به دنبال ارائه یک شبکه بازآرایی‌شده هوشمند توزیع بودیم که نقش تولیدات پراکنده در جهت رسیدن به این هدف بسیار پر رنگ بوده است. هدف کلی و اساسی این تحقیق کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ بوده است. ضمن اینکه در ادامه نیز توابع هدف دیگری همچون متعادل‌سازی ولتاژ و کاهش هزینه‌های تأمین توان نیز در نظر گرفته شد. در این راستا، مسئله بهینه‌سازی تعریف شده است که با استفاده از الگوریتم جدید و کارآمد چرخه آب حل شده است. جهت اثبات کارایی این الگوریتم، مسئله مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات و ژنتیک حل شد. ضمن اینکه مسئله بهینه‌سازی بازآرایی‌شده هوشمند توزیع تحت دو شبکه متفاوت ۳۳ باسه و ۶۹ باسه انجام شده است. بعد از انجام شبیه‌سازی‌های مربوطه و استخراج نتایج به این نتیجه رسیدیم که ابتدا با یک طرح کلیدزنی و بکارگیری بهینه منابع تولید پراکنده می‌توان بنحو مطلوبی تلفات توان را کاهش داده و همچنین پروفیل ولتاژ را بهبود دهیم ضمن اینکه متعادل‌سازی ولتاژ و کاهش هزینه‌ها نیز حاصل می‌شود. بعلاوه، تأثیر الگوریتم‌های کارآمد و جدید مثل الگوریتم چرخه آب در حل دقیق این مسئله بسیار چشمگیر است.

## مراجع

- [1] M. Babaei, R. Jafari-Marandi, S. Abdelwahed and J. Kluss, “A novel approach for real-time implementation of MVDC shipboard power system reconfiguration”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 100, pp. 240-252, 2018.
- [2] H. S. Ramadan, A. M. Helmi, “Optimal reconfiguration for vulnerable radial smart grids under uncertain operating

## رزومه



**ماشالله طلاوری** در رامهرمز متولد شده است. تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد شادگان سپری کرده است. هم اکنون دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت دانشگاه آزاد

اسلامی واحد ایذه می باشد. فعالیت های پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه کیفیت توان و بهره برداری از سیستم های قدرت است و در حال حاضر مهندس ناظر شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی می باشد. ایشان همچنین فعالیت های صنعتی متعددی در سطح استان با شرکت های برق منطقه ای و توزیع برق داشته است.

techniques in the optimum design of real size pin jointed structures", *Computers & Structures*, Vol. 87, No. 5-6, pp. 284-302, 2009.

- [17] T. Dede, S. Bekiroglu and Y. Ayvaz, "Weight minimization of trusses with genetic algorithm", *Applied Soft Computing*, Vol. 11, pp. 2565-2575, 2011.
- [18] S. Panda, S. C. Swain, P. K. Rautray, R. K. Malik and G. Panda, "Design and analysis of SSSC-based supplementary damping controller", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 18, pp. 1199-1213, 2010.
- [19] M. R. Esmaili, A. Khodabakhshian, R. Hooshmand and P. Siano, "A new coordinated design of sectionalizing scheme and load restoration process considering reliability of transmission system", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 102, pp. 23-37, 2018.
- [20] A. A. Heidari, R. A. Abbaspour, and A. R. Jordehi, "Gaussian bare-bones water cycle algorithm for optimal reactive power dispatch in electrical power systems", *Applied Soft Computing*, Vol. 57, pp. 657-671, 2017.

# Optimal distribution network configuration using water cycle optimization algorithm with presence of distributed generation power plants

Mashallah Talavari

Office of Sugarcane Development and By-Products Commercial Co, Ahvaz, Iran

mashalatalavari@gmail.com

**Abstract:** Providing the required resources to meet the energy demand of industry and minimizing the effects of these resources are the major current challenges of the electricity industry. One of the strategic solutions to this challenge is reconstruction of the smart distribution network, while not only increases the efficiency, but also reduces the costs. The advent of large power plants led to obsolescence of the small generators to generate electricity. However, the development of small-scale power generation technologies and the theory of reconstruction in the electricity industry, along with the environmental problems have led to the re-use of these generators in the electricity industry. By increasing the costs of transmitting and distributing, it is possible for DG to provide electricity for consumers with more affordable price. In these systems, the generated power by DG sources is controlled which can improve the voltage profile and reduce network losses with proper control of distribution network switches. These issues are mainly analyzed in the form of an optimization problem to improve the desired goals. In this paper, the problem of reconstruction in distribution networks is performed by determining the size of distributed generation to minimize the power losses and improve the network voltage profile. The desired optimization problem is solved by using the water cycle optimization algorithm. Reconstruction studies have been performed under the 33-bus and 69-bus systems. The simulations of this paper have been performed using MATLAB software.

**Keywords:** reconstruction, water cycle optimization algorithm, distributed generation resources, power loss reduction, voltage profile improvement.