

# جایابی بهینه کلیدها و منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع برق با استفاده از توابع عضویت فازی

مصطفی محمودی و محمود اوکاتی صادق

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران  
دانشیار گروه برق و الکترونیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۱

## چکیده

بازآرایی و نصب منابع تولید پراکنده از جمله روش‌هایی است که برای کاهش تلفات، بهبود پایداری ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع برق بکار می‌روند. این مقاله به بررسی جایابی بهینه کلیدهای شبکه توزیع و منابع تولید پراکنده به منظور بهبود قابلیت اطمینان، کاهش تلفات و بهبود پایداری ولتاژ و در نتیجه افزایش بارپذیری شبکه می‌پردازد. در این مقاله جهت بهبود پایداری ولتاژ، در مقایسه با شاخص بارگذاری حداکثر معروف به  $(\lambda_{max})$ ، شاخص دیگری بنام مقادیر منفرد ماتریس ژاکوبین نیز معرفی و کارآرایی این دو باهم مقایسه می‌شود. همچنین جهت کاهش محاسبات سنگین مربوط به قابلیت اطمینان از روش حداقل مجموعه انقطاع (کات ست) و از مدل احتمالاتی به منظور مدل‌سازی المان‌های سیستم توزیع استفاده شده است. منابع تولید پراکنده با ماهیت تصادفی و متغییر و بارهای سیستم بصورت (ادامه دارد)

عبارات و کلمات کلیدی: جایابی بهینه کلیدها، قابلیت اطمینان، پایداری ولتاژ، کلیدهای توزیع، تولید پراکنده، بهینه‌سازی چندهدفه

Email(s): mostafamahmoodi@pgs.usb.ac.ir, oukati@ece.usb.ac.ir.

۱۴۰۰ انجمن سیستم‌های فازی ایران

Mathematics Subject Classification (2010): 93C42

ساعتی و با ماهیت سه گانه مسکونی، تجاری و صنعتی در نظر گرفته شده و در نتیجه نتایج بازاریابی شبکه بصورت ساعتی بیان شده اند. باتوجه به توابع هدف متعدد الگوریتم بهینه سازی چندهدفه NSGA<sup>۲</sup> جهت بهینه سازی توابع هدف بکار گرفته شده و از روش عضویت توابع فازی جهت تعیین جواب بهینه استفاده میشود. نتایج شبیه سازی بر روی شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE انجام و کارائی، دقت و نقاط ضعف احتمالی روش پیشنهادی نشان داده شده است.

## ۱ مقدمه

برخلاف سیستم انتقال و فوق توزیع، سیستم توزیع دارای خصوصیات مانند افت ولتاژ بالاتر و ساختار شعاعی می باشد. نصب واحد های تولید پراکنده، به بهبود پروفایل ولتاژ و کاهش تلفات کمک می نمایند. [۹-۱۱]. بازاریابی شبکه از روشهای مرسوم جهت بهبود قابلیت اطمینان، کاهش تلفات و افزایش پایداری ولتاژ در شبکه های توزیع می باشد. بیلینتون و همکاران در مرجع [۱۰] در فرایند بازاریابی یک فرمول غیرخطی ناسازگار<sup>۱</sup> به منظور تعیین مکان و اندازه کلید جهت افزایش قابلیت اطمینان در سیستم توزیع شعاعی با توجه به هزینه های خاموشی، سرمایه گذاری و تعمیر و نگهداری ارائه دادند. در این مقاله به ارزیابی شاخص های SAIDI<sup>۲</sup> و ENS<sup>۳</sup> جهت تأیید الگوریتم بکار رفته در بهبود قابلیت اطمینان پرداخته شده است. در مراجع [۱۱] و [۱۲] به ترتیب از الگوریتم های جستجوی تفاضلی و ژنتیک چندجمعیه برای جایابی بهینه کلیدهای کنترل از راه دور<sup>۴</sup> استفاده شده است. قیمت این کلیدها بسیار بیشتر از کلیدهای معمولی بوده و همچنین نیازمند سیستم ارتباطی اند. اما استفاده از این کلیدها به علت کم کردن زمان بازگشت به شرایط نرمال بعد از رخداد خطا، باعث افزایش قابلیت اطمینان می شود به همین دلیل در مرجع [۱۲] برای کم کردن هزینه ها، از ترکیب کلیدهای معمولی و کلیدهای کنترل از راه دور استفاده شده است. این مقالات برای بهبود شاخص های SAIDI و ENS در ارزیابی قابلیت اطمینان راهکارهایی ارائه نموده اند. مرجع [۱۳] مسئله جایابی بهینه کلیدها را

<sup>1</sup> Non-linear, non-differentiable

<sup>2</sup> System Average Interruption Duration Index

<sup>3</sup> Energy Not Supplied

<sup>4</sup> Remote controllable switch

با احتمال عملکرد ناقص آنها مورد بررسی قرار داده و تاثیر عملکرد ناقص کلیدها بر فرایند جاییایی بهینه و تعداد آنها را نشان داده است.

در مرجع [۱۴] نویسندگان پس از برشمردن مزایا و معایب استفاده از DG ها در شبکه توزیع، به دنبال یک الگوریتم بهینه سازی چندهدفه برای جاییایی بهینه کلیدها و ریکلوزرها به منظور افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌باشند. در این مقاله، برای کاهش حجم محاسبات قابلیت اطمینان، دو شاخص جدید ارائه و برای انجام محاسبات از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. در روش مونت کارلو محاسبات قابلیت اطمینان بسیار زمانبر بوده و شبیه‌سازی ها در سیستم‌های واقعی و با تعداد المان‌های زیاد، بسیار وقت‌گیر می‌باشد. از این رو در مرجع [۱۵] روشی احتمالاتی موسوم به روش حداقل کات ست برای محاسبات قابلیت اطمینان ارائه شده است که باعث کوتاه شدن زمان محاسبات می‌شود.

در مرجع [۱۶] نویسندگان به جاییایی بهینه کلیدهای شبکه و DG<sup>۵</sup> برای افزایش بارپذیری می‌پردازند. در این مقاله با تغییراتی بر روی الگوریتم کلونی زنبور عسل، الگوریتم بهبود یافته‌ی DABC<sup>۶</sup> را برای رسیدن به هدف مذکور ارائه می‌دهند. برای ارزیابی کارایی الگوریتم بازآرایی و جاییایی DG پیشنهادی، شاخص‌های کیفیت بار (QLI)<sup>۷</sup>، انحراف ولتاژ (VDI)<sup>۸</sup>، بهبود پروفایل ولتاژ (VPI)<sup>۹</sup> و تعداد باس‌هایی که از محدوده مجاز ولتاژ تجاوز می‌کنند، بررسی شده و با سناریوهای مختلف سنجش می‌شوند.

از آنجائیکه بکارگیری روش بازآرایی و همچنین استفاده از منابع تولید پراکنده تنها منحصر به بهبود پروفایل ولتاژ و یا کاهش تلفات شبکه نمی‌باشند و سایر شاخص‌های بهره‌برداری مهم از جمله قابلیت اطمینان شبکه و پایداری ولتاژ و در نتیجه بارگذاری حداکثر شبکه رانیز می‌توانند بهبود ببخشند، در این مقاله علاوه بر تعیین نقاط بهینه نصب کلیدهای شبکه، استفاده از روش بازآرایی و نصب منابع تولید پراکنده جهت بهبود توأم اهداف فوق مدنظر می‌باشد. نویسندگان در مرجع [۱۷] به مقایسه روشهای بهینه سازی کلاسیک و روشهای فرابتکاری در حل مسئله باز آرائی شبکه پرداخته اند. نتیجه بررسی ها نشان می

<sup>5</sup> Distributed Generation

<sup>6</sup> Discrete artificial bee colony algorithm

<sup>7</sup> Quality Load Index

<sup>8</sup> Voltage Difference Index

<sup>9</sup> Voltage profile Index

دهد روشهای فراابتکاری از کارآرائی بهتری برخوردار بوده و روشهای کلاسیک تنها در شبکه های با ابعاد متوسط و کوچک به جواب های بهینه نائل می شوند. با توجه به اهداف متعدد و لزوم بهینه سازی آنها مسلماً نیاز به استفاده از روشهای بهینه سازی چندهدفه می باشد. به همین دلیل در این مقاله الگوریتم بهینه سازی چندهدفه ژنتیک رتبه بندی نامغلوب ۲NSGA<sup>۱۰</sup> جهت بهینه سازی اهداف فوق الذکر مورد استفاده قرار می گیرد. از آنجائیکه روشهایی همچون مونت کارلو حجم محاسبات مورد نیاز جهت بررسی قابلیت اطمینان شبکه را افزایش می دهند از روش حداقل کات ست جهت کاهش زمان محاسبات مورد نیاز استفاده شده است. همچنین جهت بررسی پایداری و لتاژ و یا بارگذاری حداکثر شبکه از شاخص بارگذاری حداکثر موسوم به  $\lambda_{max}$  استفاده می شود این روش علی رغم داشتن کارآرایی لازم حجم محاسبات را افزایش می دهد به همین دلیل، شاخص دیگری موسوم به مقادیر منفرد ماتریس ژاکوبین جهت بررسی پایداری و لتاژ مورد استفاده قرار گرفته و عملکرد این دو شاخص در بهبود پایداری و لتاژ مقایسه خواهند شد. توربین بادی بعنوان منبع تولید پراکنده با ماهیت متغییر و بارهای سیستم بصورت ساعتی و با ماهیت سه گانه مسکونی، تجاری و صنعتی در نظر گرفته شده اند. بنابراین نوآوری این مقاله را می توان به شرح ذیل خلاصه نمود:

- معرفی شاخص مقادیر منفرد ماتریس ژاکوبین جهت ارزیابی پایداری و لتاژ در شبکه های توزیع
- کاهش حجم محاسبات و زمان اجرای برنامه بهینه سازی در فرایند باز آرائی شبکه به منظور افزایش پایداری و لتاژ با استفاده از روش حداقل مجموع انقطاع (کات ست) و شاخص مقادیر منفرد ماتریس ژاکوبین
- تعیین تعداد و محل کلیدهای مورد نیاز در فرایند باز آرائی شبکه به هدف کاهش تلفات، افزایش قابلیت اطمینان و افزایش پایداری و لتاژ با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تولید پراکنده بادی.

<sup>10</sup> Nondominated Sorting Genetic Algorithm II

## ۲ مدلسازی و محاسبه قابلیت اطمینان

در این بخش به شرح مدلسازی مولفه های سیستم از دیدگاه قابلیت اطمینان، مدلسازی بار و منابع تولید پراکنده و همچنین روش محاسبه قابلیت اطمینان سیستم می پردازیم.

### ۱.۲ مدلسازی مولفه های سیستم

مولفه های سیستم مورد مطالعه عبارتند از ترانسفورماتور، مدارشکن، خطوط توزیع، شین، سوئیچ و منابع تولید پراکنده. دسترس پذیری مولفه ها از رابطه (۱) محاسبه می گردد [۱۸].

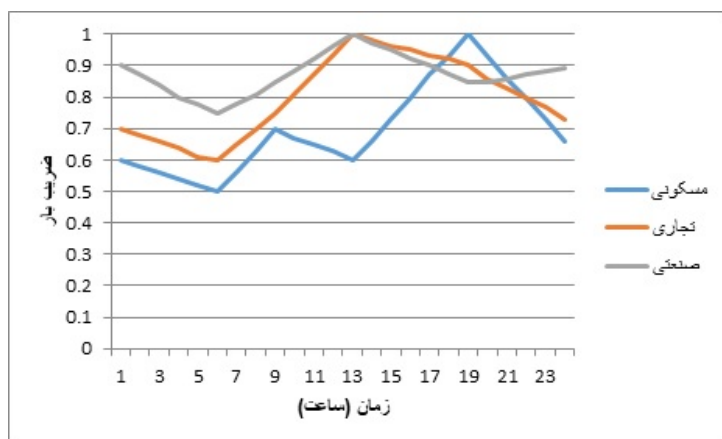
$$P = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{\sum_i 1/\lambda_i}{\sum_i 1/\lambda_i + \sum_i 1/\mu_i} \quad (1)$$

که در رابطه اخیر MTTF و MTTR به ترتیب زمان متوسط خرابی و زمان متوسط تعمیر میباشد.  $\mu$  و  $\lambda$  نیز نرخ خرابی و نرخ تعمیر پذیری را نشان می دهند.

### ۲.۲ مدلسازی بار

با افزایش بارهای غیرخطی و بار ترکیبی (خطی و غیر خطی) در سیستم قدرت، روش های مدلسازی بار که در سال های قبل به کار گرفته می شد، مانند مدل بار توان ثابت، از دقت کافی برخوردار نمی باشند.

در شکل (۱) با استفاده از مرجع [۱۹]، تغییرات ۲۴ ساعته بار برای سه نوع مصرف کننده مسکونی، تجاری و صنعتی نشان داده شده است. محور افقی نشان دهنده ضریب بار برای مصرف کننده های مسکونی، تجاری و صنعتی می باشد. برای مثال این شکل مقدار ضریب بار را برای بار مسکونی در ساعت ۹ عدد ۰/۷ نشان می دهد. این بدین معنی است که سهم بار مسکونی ۷۰٪ بار پیک سیستم مورد مطالعه است. همچنین مقدار ضریب بار برای بار تجاری در ساعت ۶ برابر با ۰/۶ و برای بار صنعتی در ساعت ۹ برابر با ۰/۸۵ می باشد و این هم بدین مفهوم است که در این ساعات سهم بار تجاری ۶۰٪ و سهم بار صنعتی ۸۵٪ بار پیک سیستم مورد مطالعه می باشد.



شکل ۱: منحنی بار روزانه

### ۳.۲ مدل‌سازی منابع تولید پراکنده

در این بخش مدلی برای توربین بادی به عنوان منبع تولید پراکنده ارائه شده است.

#### ۱.۳.۲ مدل‌سازی توان خروجی

در این مقاله از نیروگاه بادی بعنوان منبع تولید پراکنده استفاده شده است. توان خروجی توربین بادی از رابطه (۲) بدست می‌آید [۲۰]

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{cut-in} \\ \frac{1}{3} C_p \rho A V^3 & v_{cut-in} \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v < v_{cut-out} \\ 0 & v > v_{cut-out} \end{cases} \quad (2)$$

که در این رابطه  $P_w$  توان خروجی توربین بادی بر حسب وات،  $C_p$  ضریب بهره وری،  $\rho$  چگالی هوا، ( $Kg/m^3$ )،  $A$  مساحت ناحیه جاروب شده توسط توربین، ( $m^2$ )،  $V$  سرعت باد، ( $m/sec$ )،  $v_r$  سرعت نامی، و  $v_{cut-in}$  و  $v_{cut-out}$  به ترتیب حداقل و حداکثر سرعت بادی است که توربین در آن توانایی تولید برق را داراست و  $P_r$  توان نامی توربین بادی می‌باشد.

### ۲.۳.۲ مدل‌سازی قابلیت اطمینان

دسترس پذیری توان خروجی توربین بادی به دسترس پذیری مکانیکی (سلامت توربین) و سرعت باد بستگی دارد. دسترس پذیری مکانیکی با دو وضعیت در دسترس (UP) و خارج از دسترس (DOWN) مطابق شکل (۲) مدل می‌شود. در وضعیت "UP" توربین بادی قادر به تولید توان، با توجه به سرعت باد ورودی خود، خواهد بود. در وضعیت "DOWN" توربین قادر به تولید توان نخواهد بود. روش محاسبه دسترس پذیری در بخش ۱۰.۲ بیان شده است.



شکل ۲: دیاگرام فضای حالت برای توربین بادی [۲۰]

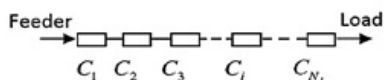
### ۴.۲ محاسبه قابلیت اطمینان

برای ارزیابی قابلیت اطمینان روش‌های متعددی معرفی شده است. این روش‌ها عمدتاً بر دو نوعند: روش‌های تحلیلی و روش‌های مشابه سازی. در روش‌های تحلیلی از مدل ریاضی و بیان مسئله در قالب فرمول‌های ریاضی استفاده می‌شود در حالیکه در روش‌های مشابه سازی برآورد شاخص‌های قابلیت اطمینان بر مبنای مشابه سازی فرآیندهای واقعی و مطالعه رفتارهای متغیر یک سیستم صورت می‌گیرد [۱۸].

یکی از روش‌هایی که در محاسبات قابلیت اطمینان کاربرد فراوانی دارد، روش شبیه سازی مونت کارلو می‌باشد. این روش و دیگر روش‌های این چنینی نیاز به حجم و زمان محاسبات زیادی دارند. لذا در شرایطی که تعداد مولفه‌های موجود در سیستم زیاد باشد، بهتر است از روش‌های موثر و کارآمد دیگر که نیاز به محاسبات گسترده ندارند استفاده شود. روشی که در این مقاله بکار می‌رود، روش حداقل مجموعه‌ی انقطاع یا مینیم کات‌ست می‌باشد. طبق تعریف حداقل کات‌ست به مجموعه کمترین عضوهایی که شکست همه آنها با هم موجب شکست کل سیستم می‌شود گفته می‌شود. بدین منظور باید همه کات‌ست‌های موجود در سیستم شناسایی شود. در [۲۱] یک روش برای تعیین

کاتست ها ارائه شده است.

مولفه های موجود در سیستم قدرت، بسته به نوع اتصالشان ممکن است کاتست هایی با مرتبه یک، دو و یا بالاتر ایجاد کنند. اما در سیستم توزیع پیش رو با توجه به ماهیت شعاعی شبکه، کاتست های ایجاد شده از مرتبه اول می باشد. شکل (۳) یک کاتست مرتبه اول را نشان می دهد. برای محاسبه نااطمینانی<sup>۱۱</sup> در این شبکه، ابتدا به محاسبه



شکل ۳: کاتست مرتبه اول

دسترس پذیری مولفه های سیستم با استفاده از روابط بخش ۱.۲ پرداخته می شود. اکنون زمان آن است که قابلیت اطمینان در نقاط بار بررسی شود. برای محاسبه نااطمینانی در نقطه بار از رابطه (۳) استفاده می شود.

$$Q_s = P\left(\bigcup C_i\right) \quad (۳)$$

که در این رابطه  $C_i$  مجموعه کاتست  $i$  ام و  $P(C_i)$  احتمال رخداد مجموعه کاتست  $i$  ام میباشد.

قابلیت اطمینان در نقطه بار از رابطه (۴) بدست می آید.

$$P = 1 - Q \quad (۴)$$

در نتیجه نااطمینانی برای کاتست مرتبه یک از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد.

$$Q_s = P\bigcup_{i=1}^{N_I} C_i = \sum_{i=1}^{N_I} P(C_i) - \sum_{i=1}^{N_I} \sum_{j=i+1}^{N_I} P(C_i \cap C_j) + \dots + (-1)^{N_I} P(C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_{N_I}) \quad (۵)$$

<sup>11</sup> Unreliability



بعد از محاسبه نااطمینانی در کاتست ها، نااطمینانی کل از رابطه ذیل محاسبه می شود:

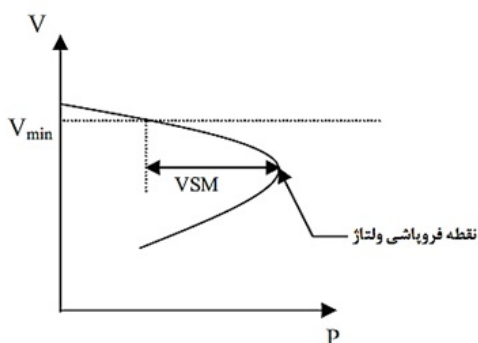
$$Q_{SA} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L Q_{i(\text{load point})} \quad (6)$$

که  $Q_{SA}$  میانگین نااطمینانی کل سیستم بوده و  $L$  تعداد نقاط بار سیستم می باشد.

### ۳ پایداری ولتاژ و بهبود بارپذیری

تعریف IEEE از پایداری ولتاژ عبارتست از توانایی یک سیستم قدرت در نگهداری ولتاژ دائمی در همه باس های سیستم بعد از بروز اغتشاش در شرایط مشخصی از بهره برداری. در شرایطی که بار مرتباً در حال افزایش باشد، ولتاژ به مرور کاهش می یابد تا سرانجام به خاموشی کامل منجر شود [۲۲]. بنابراین باید به دنبال یافتن نقطه ای بود که حداکثر بارپذیری قبل از فروپاشی ولتاژ را داراست. حداکثر بارپذیری یا حاشیه حداکثر بار سیستم به این صورت تعریف می شود: ”حداکثر افزایش بار سیستم قدرت از بار پایه تا زمانی که بی ثباتی ولتاژ مشاهده شود” [۱۶]. پایداری ولتاژ را معمولاً توسط نمودار P-V نمایش می دهند. شکل (۴) نقطه فروپاشی ولتاژ و حاشیه پایداری ولتاژ (VSM) را به تصویر می کشد. در ادامه دو معیار برای سنجش پایداری ولتاژ معرفی می گردد.

<sup>12</sup> Voltage Stability Margin



شکل ۴: نمودار  $P-V$  پایداری ولتاژ [۶]

### ۱.۳ ضریب بار پذیری سیستم

برای پیدا کردن حداکثر بارپذیری یا ضریب بارگذاری حداکثر سیستم ( $\lambda_{max}$ )، بار اکتیو و راکتیو را در تمام شین‌ها به صورت همزمان افزایش می‌دهیم. در این روش مقدار ضریب بار ( $\lambda$ ) بر طبق فرمول‌های (۷) و (۸) هر بار به اندازه ۱/۰ افزایش داده می‌شود تا جایی که در محاسبات پخش بار، عدم همگرایی پدید آید. ضریب بارگذاری در آستانه عدم همگرایی، همان ضریب بارگذاری حداکثر ( $\lambda_{max}$ ) می‌باشد [۱۶].

$$P_{new} = P_0 \times \lambda \quad (۷)$$

$$Q_{new} = Q_0 \times \lambda \quad (۸)$$

در این روابط  $P_0$  و  $Q_0$  به ترتیب بار اکتیو و راکتیو اولیه  $P_{new}$  و  $Q_{new}$  مقدار نهایی بار اکتیو و راکتیو شین‌ها می‌باشند. در این روش سرعت رسیدن به جواب بسیار پایین خواهد بود.

### ۲.۳ مقادیر منفرد ماتریس ژاکوبین

مقادیر ویژه ماتریس مربعی  $A$  مقادیر اسکالری هستند که به ازای آنها معادله زیر دارای پاسخ های غیر صفر برای بردار  $v$  خواهد بود:

$$Av = \lambda v \quad (۹)$$

در این صورت خواهیم داشت:

$$(A - \lambda I)v = 0 \quad (۱۰)$$

برای آنکه پاسخ های غیر صفر وجود داشته باشد لازم است رابطه ذیل برقرار باشد:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (۱۱)$$

از رابطه فوق مقادیر ویژه ماتریس  $A$  بدست می آید. جهت بدست آوردن مقادیر منفرد ماتریس  $A$  لازم است ابتدا مقادیر ویژه ماتریس  $A^T A$  محاسبه شود. که در آن  $A^T$  ماتریس ترانپوز  $A$  می باشد. مقادیر منفرد ماتریس  $A$  طبق تعریف برابر مجذور مقادیر ویژه ماتریس  $A^T A$  خواهند بود. حال، فرض شود  $J$  ماتریس ژاکوبین مربوط به معادلات پخش بار سیستم و  $\sigma$  کوچکترین مقدار منفرد ماتریس  $J$  باشد، در این صورت اگر مقدار  $\sigma$  برابر با صفر باشد ماتریس  $J$  منفرد خواهد بود. منفرد بودن ماتریس  $J$  در واقع بدین معنی است که ماتریس مذکور معکوس نخواهد داشت و در نتیجه معادلات پخش بار قابل حل کردن نمی باشند و یا به عبارتی راه حلی برای معادلات پخش بار وجود نخواهد داشت.

در مرجع [۲۳] نشان داده شده است که قبل از رسیدن به مرز پایداری ولتاژ، تمامی مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین غیر صفر و دارای قسمتهای حقیقی مثبت بوده و در نتیجه مقادیر منفرد ماتریس ژاکوبین

جایابی بهینه در شبکه توزیع برق با استفاده از توابع عضویت فازی \_\_\_\_\_ ۹۰

نیز حقیقی و مثبت می باشند. در صورتیکه سیستم به مرز پایداری ولتاژ نزدیک شود اندازه یکی از مقادیر ویژه و در نتیجه یکی از مقادیر منفرد ماتریس ژاکوبین به سمت صفر میل میکند. بنابراین کوچکترین مقدار منفرد ماتریس ژاکوبین میتواند به عنوان یکی از شاخص های نشان دهنده نزدیکی سیستم به مرز پایداری ولتاژ بکار رود. هرچه این مقدار به صفر نزدیکتر باشد سیستم به ناپایداری ولتاژ نزدیکتر است. لذا برای افزایش پایداری ولتاژ سیستم، کفایت کوچکترین مقدار منفرد موجود در ماتریس ژاکوبین را تا حداکثر مقدار ممکن، افزایش داد.

## ۴ بیان ریاضی مسئله

در این بخش به بررسی تابع هدف و همچنین قیودی که باید در مسئله لحاظ شود، پرداخته می شود.

### ۱.۴ تابع هدف

تابع هدف در این مسئله به صورت ترکیبی از تلفات شبکه، پایداری ولتاژ و شاخص های قابلیت اطمینان، به صورت زیر تعریف می شود:

$$F = \min(f_1 + f_2) + \max(f_3) \quad (12)$$

$$f_1 = k_1 \times P_{loss} \quad (13)$$

$$f_2 = k_2 \times ENS \quad (14)$$

مولفه سوم تابع هدف  $f_3$  می تواند به دو صورت  $f_{3a}$  و یا  $f_{3b}$  ذیل تعریف شود:

$$f_{3a} = k_3 \times \lambda_{max} \quad (15)$$

در این صورت از شاخص بارگذاری  $\lambda_{max}$  جهت ارزیابی پایداری ولتاژ استفاده می شود. این امر باعث خواهد شد حجم محاسبات بشدت افزایش یابد. در صورتیکه از شاخص مقادیر منفرد ماتریس ژاکوبین جهت ارزیابی پایداری ولتاژ استفاده شود تابع هدف سوم می تواند مطابق فرمول (۱۶) نوشته شود. در این صورت حجم محاسبات بطور قابل ملاحظه ای کاهش خواهد یافت.

$$f_{3b} = k_3 \times \min(\text{singular value of } J \text{ matrix}) \quad (16)$$

باتوجه به موارد ذکر شده تابع هدف نهائی که از ۳ جزء تشکیل شده است می تواند به دو شکل متفاوت بیان شود:

$$F_a = \min(f_1 + f_2) + \max(f_{3a})$$

$$F_b = \min(f_1 + f_2) + \max(f_{3b})$$

به طوریکه:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n R_i \frac{P_i + Q_i}{V_i^2} \quad \text{تلفات اکتیو سیستم}$$

$$ENS = \sum_{i=1}^l L_i(a) U_i \quad \text{انرژی تامین نشده توسط سیستم}$$

$$L_i(a) = L_i(p) \times F \quad (17)$$

$$U_i = Q_{SA} \times ۸۷۶۰ \quad (18)$$

$k_1, k_2, k_3$  ضرایب وزنی

$V_i$  ولتاژ نقطه بار  $i$  ام

$R_i$  مقاومت اهمی خط  $i$  ام

$P_i$  توان اکتیو خط  $i$  ام

$Q_i$  توان راکتیو خط  $i$  ام

$L_i(a)$  متوسط بار متصل به نقطه بار  $i$  ام

$L_i(p)$  پیک بار متصل به نقطه بار  $i$  ام

$down\ time$  زمان خروج سالیانه در نقطه بار  $i$  ام

$F$  ضریب بار

به منظور بررسی قابلیت های هریک از دو روش موسوم به  $\lambda_{max}$  و مقادیر منفرد ماتریس ژاکوبین این دو تابع هدف بهینه سازی شده و نتایج با هم مقایسه می شوند.

## ۲.۴ قیود

در تمام مراحل بهینه سازی، قیود زیر باید مد نظر باشند:

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (19)$$

$$n \leq n_{max} \quad (20)$$

که  $V_{max}$  و  $V_{min}$  محدوده مجاز ولتاژ برای هر شین می‌باشد و  $n$  تعداد منابع تولید پراکنده بوده و  $n_{max}$  حداکثر تعداد منابع تولید پراکنده قابل نصب در شبکه می‌باشد. همچنین باید شرط شعاعی بودن شبکه رعایت گردد و در نهایت باید بررسی شود که تمامی بارها توسط سیستم تأمین شوند.

## ۵ الگوریتم بهینه سازی

در این بخش الگوریتم بهینه سازی چند هدفه NSGA-II و کاربرد آن در مسئله‌ی بازآرایی و جایابی منابع تولید پراکنده شرح داده خواهد شد.

### ۱.۵ الگوریتم بهینه سازی ژنتیک رتبه بندی نامغلوب

الگوریتم فراابتکاری NSGA-II یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های فراابتکاری موجود برای حل مسائل بهینه سازی چند هدفه است و کارایی آن در حل مسائل مختلف، به اثبات رسیده است. در این بخش به شرح الگوریتم مذکور می‌پردازیم [۲۴]. این الگوریتم با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک هدفه معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده است که به جای یافتن بهترین جواب تک بعدی، دسته‌ای از بهترین جوابها را میدهد که با نام جبهه پارتو شناخته میشوند. این دو عملگر عبارتند از:

الف- عملگری که یک معیار برتری (رتبه) بر اساس مرتب سازی نامغلوب و جبهه بندی به اعضای جمعیت اختصاص میدهد.

ب- عملگری که تنوع جواب و پراکندگی آنها را در میان جوابهای با رتبه برابر حفظ میکند.

قبل از شرح الگوریتم، لازم است که مفهوم غلبه، مرتب سازی نامغلوب و مفهوم حفظ تنوع در جوابها، توضیح داده شود. برای دو بردار  $X_1$  و  $X_2$  بردار  $X_1$  بر بردار  $X_2$  غلبه می‌کند اگر و فقط اگر دو شرط زیر برقرار باشند:

اول اینکه  $X_1$  در هیچ یک از توابع هدف بدتر از  $X_2$  نباشد و دوم اینکه  $X_1$  حداقل در یکی از توابع هدف مطلقاً از  $X_2$  بهتر باشد.

زمانی که بحث از یک الگوریتم تک هدفه مطرح است، معیار برتری جوابها نسبت به یکدیگر ساده است، زیرا تنها یک تابع هدف مد نظر می‌باشد؛ به طور مثال در صورتی که مسئله مورد بحث یک مسئله کمینه سازی باشد، جوابی که کمترین مقدار تابع هدف را دارا باشد، بر سایر جوابها برتری دارد. اما زمانی که برای حل مسئله ای از یک الگوریتم چندهدفه استفاده میشود که حداقل دو تابع هدف مد نظر میباشد دیگر به آسانی نمیتوان در مورد برتری بعضی از جوابها نظر قطعی داد، زیرا در اکثر موارد، نقاطی یافت می‌شود که هیچ کدام بر دیگری برتری کامل ندارد و نمیتوان با مفهوم غلبه، دو به دو بین آنها مقایسه ای انجام داد، مگر اینکه تنظیمات خاصی از جانب طراحان مسئله، مد نظر باشد تا بتوان یک جواب را از بین جواب های بدست آمده، انتخاب کرد.

در این الگوریتم به هر جواب یک رتبه اختصاص داده می‌شود که بر اساس تعداد مغلوب شدن آنها نسبت به سایر نقاط محاسبه می‌گردد (بدین صورت که نقاطی که در جبهه اول قرار دارند و توسط هیچ کدام از جوابها مغلوب نشده اند، دارای رتبه یک و جوابهایی که فقط توسط (حداقل یکی از) جوابهای جبهه اول مغلوب میشوند، در جبهه دوم و رتبه دوم قرار می‌گیرند و ...). در پایان الگوریتم، نقاطی که بهترین رتبه یعنی رتبه یک را دارا باشند به عنوان مجموعه جواب یا نقاط جبهه پارتو انتخاب می‌شوند.

در این الگوریتم، به طور همزمان، نخبه گرائی و پراکندگی مورد توجه قرار می‌گیرد. در این روش ابتدا جمعیت فرزندان با استفاده از جمعیت والدین و به همان اندازه ( $N$ ) تولید می‌شود. این دو جمعیت ادغام شده و جمعیت جدیدی با تعداد اعضایی برابر با  $2N$  تولید می‌کنند. این جمعیت جدید با استفاده از رتبه بندی نامغلوب، مرتب شده و در نهایت، جمعیت جدید با  $N$  عضو از بهترین اعضا به وجود می‌آید.



## ۲.۵ انتخاب بهترین جواب با استفاده از توابع عضویت فازی

همانطور که بخش قبل عنوان شد، مسائل چندهدفه دارای چندین تابع هدف بوده که هر یک دارای جواب بهینه مخصوص خودش می باشد و امکان یافتن یک جواب بهینه که همزمان تمامی این توابع را بهینه کند، وجود ندارد. در این بخش به بررسی روشی می پردازیم که امکان یافتن بهترین جواب را خواهد داشت.

مسئله ای با سه تابع هدف  $OF_1$  و  $OF_2$  و  $OF_3$  مفروض است. بر اساس منطق فازی ابتدا برای توابع هدف، تابع عضویت فازی به صورت زیر تعریف می گردد.

$$\mu_n(x) = \begin{cases} 1 & \text{and } OF_n(x) \leq OF_n^{\min} \\ 0 & \text{and } OF_n(x) \geq OF_n^{\max} \\ \frac{OF_n^{\max} - OF_n(x)}{OF_n^{\max} - OF_n^{\min}} & \text{and } OF_n^{\min} < OF_n(x) < OF_n^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

در این رابطه  $OF_n$  و  $\mu_n$  به ترتیب مقدار  $n$  امین تابع هدف و تابع عضویت مربوط به آن می باشد. همچنین  $x$  بردار متغیرهای تصمیم می باشد. همچنین این روش نیازمند محاسبه  $OF_n^{\min}$  و  $OF_n^{\max}$  که مقدار رنج بالا و پایین هر یک از توابع هدف است، می باشد. برای این منظور محاسبه ی  $payoff\ table$  [۲۵] رایج ترین شیوه است. برای محاسبه  $payoff\ table$  مسئله به صورت سه مسئله ی بهینه سازی تک هدفه در نظر گرفته می شود. در هر حالت یکی از سطرهای  $payoff\ table$  به صورت زیر بدست می آید.

$$\begin{bmatrix} OF_1^*(x_1^*) & OF_2(x_1^*) & OF_3(x_1^*) \\ OF_1(x_2^*) & OF_2^*(x_2^*) & OF_3(x_2^*) \\ OF_1(x_3^*) & OF_2(x_3^*) & OF_3^*(x_3^*) \end{bmatrix} \quad (22)$$

در این رابطه،  $OF_n^*(x_n^*)$  بهترین جواب بهینه سازی تک هدفه تابع هدف  $OF_n$  می باشد. کمترین و بیشترین مقادیر  $n$  امین ستون  $payoff\ table$ ، محدوده ی تابع هدف  $OF_n$  را برای پیاده سازی روش فازی مورد نظر مشخص می کند. در این روش توابع

عضویتی که مورد محاسبه قرار می‌گیرند، توابعی پیوسته و یکنواخت هستند. آنچه از بحث‌های گذشته بر می‌آید این است که در مسائل بهینه سازی چند هدفه، مجموعه ای از جواب های غیرمغلوب بدست می‌آید که بعد از هر تکرار، در فضایی ذخیره سازی می‌شوند. راه‌حلهایی که در تکرار آخر بدست می‌آیند، راه‌حل‌های نهایی مسئله هستند. برای هر یک از این راه‌حل‌ها، تابع عضویت نرمال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu^k = \frac{\sum_{n=1}^{N_{obj}} w_n \times \mu_n(x_k)}{\sum_{k=1}^{N_{rep}} \sum_{n=1}^{N_{obj}} w_n \times \mu_n(x_k)} \quad (23)$$

که در رابطه فوق  $N_{obj}$  تعداد توابع هدف و  $N_{rep}$  تعداد راه‌حل‌های نامغلوب است که در فضای مخزن ذخیره شده‌اند. همچنین  $\mu^k$  تابع عضویت نرمال  $k$  امین راه‌حل نامغلوب و  $w_n$  ضریب وزنی تابع هدف  $n$  ام می‌باشند که با توجه به شرایط بهره‌برداری و اولویت‌های بهره‌بردار انتخاب می‌شود. در نهایت پاسخی مطلوب است که دارای  $\mu$  بزرگتری باشد [۲۶].

### ۳.۵ الگوریتم حل مسئله

از آنجائیکه هدف این مقاله بهینه‌سازی همزمان قابلیت اطمینان، تلفات و پایداری ولتاژ می‌باشد، لذا محاسبه پخش بار و عدم قابلیت اطمینان و حداکثر بارپذیری در شبکه بصورت هم زمان انجام می‌پذیرد. برای این منظور از الگوریتم NSGA-II استفاده می‌شود. ابتدا اطلاعات مربوط به شبکه، بار ساعتی و اطلاعات قابلیت اطمینان در مسئله وارد می‌شود. سپس به کمک الگوریتم بهینه سازی تعداد منابع تولید پراکنده و تغییر ساختار شبکه که با تغییر وضعیت کلیدهای موجود بدست می‌آید، برای هر ساعت و هر شین محاسبه شده و این کار تا جایی ادامه می‌یابد که جواب بهینه حاصل شود. محل کلید و اندازه و محل منابع تولید پراکنده در این الگوریتم تحت عنوان کرموزوم ها ( $X$ ) و با

توجه به فرمول زیر تعیین می‌گردد.

$$X = \left[ \overbrace{x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_{nbr}}^{DG \text{ مکان}} \ \overbrace{x_{nbr+1} \ x_{nbr+2} \ \dots \ x_{nbr+ntie}}^{\text{مکان کلید}} \right] \quad (24)$$

در این رابطه،  $x_1$  تا  $x_{nbr}$  مکان منابع تولید پراکنده را تعیین می‌کند. تعداد DG ها با توجه به قیدهای ذکر شده در بخش (۴-۲) تعیین می‌شود. این متغیرها می‌توانند اعدادی بین صفر (بدون DG) تا  $n_{max}$  باشند. همچنین  $x_{nbr+1}$  تا  $x_{nbr+ntie}$  مشخص‌کننده کلیدهایی هستند که باید در وضعیت باز قرار بگیرند.

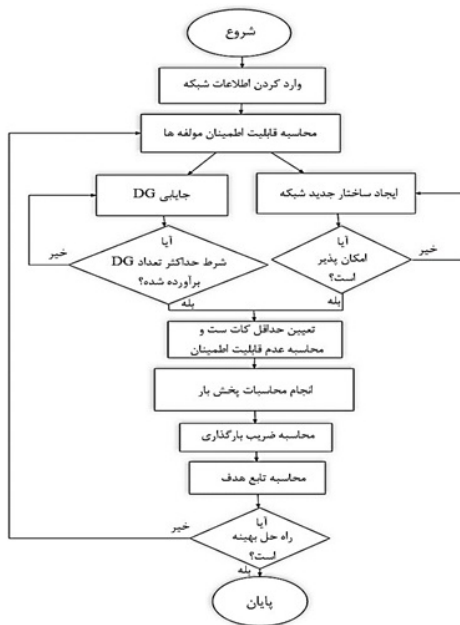
ntie ..(۵). *switchestieswitchessectionalizing.*

## ۶ شبیه‌سازی و نتایج

به منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، چهار سناریوی زیر بر روی سیستم ۳۳ باسه [۱۵] نشان داده شده در شکل (۶) شبیه سازی شده است.

- سناریوی اول: این حالت، حالت پایه است و در آن سیستم با ساختار اولیه بکار خود ادامه می‌دهد و هیچ منبع تولید پراکنده‌ای در شبکه موجود نمی‌باشد.
- سناریوی دوم: در این حالت منابع تولید پراکنده جایابی می‌شوند اما تغییری در وضعیت کلیدها رخ نمی‌دهد.
- سناریوی سوم: در این حالت سیستم بازاریابی شده اما هیچ منبع تولید پراکنده‌ای در شبکه موجود نمی‌باشد.
- سناریوی چهارم: در این حالت بازاریابی با توجه به نتایج سناریوی دوم و پس از آن انجام می‌شود.

سیستم ۳۳ باسه شامل یک ترانسفورماتور، مدارشکن، خطوط توزیع، شین‌ها و کلید می‌باشد. در ابتدا فرض می‌شود کلیدها در تمامی خطوط نصب شده‌اند. اطلاعات قابلیت اطمینان مولفه‌ها در جدول (۱) آمده است [۱۵]. همچنین اطلاعات مربوط به توربین



شکل ۵: روند نمای کلی الگوریتم پیشنهادی برای بازاریابی شبکه و جایابی DG

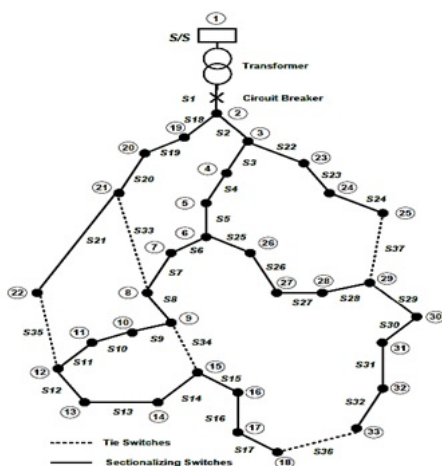
جدول ۱. اطلاعات قابلیت اطمینان مؤلفه‌ها

$\lambda_{eol}$	$r_m$	$\lambda_m$	$r_{f2}$	$r_{f1}$	$\lambda_{f2}$	$\lambda_{f1}$	مؤلفه
۰/۰۰۱	۱۶۸	۱	۱۴۴	۱۴۴	۰/۰۵۵۵۵	۰/۰۵۸۸۲	ترانسفورماتور
۰/۰۰۱	۱۲	۰/۴	۲۰	۲۰	۰/۱۴۲۸۷۵	۰/۱	مدار شکن
	۴	۰/۵				۰/۰۰۴۵	شین
	۲	۰/۲	۵	۵	۰/۱۳	۰/۱۳	خط توزیع
	۴	۰/۲۵	۵	۵	۰/۲	۰/۲	کلید

بادی در جدول (۲) شرح داده شده است [۲۰]. براساس آنچه در بخش‌های قبل توضیح داده شد، بار سیستم که در شکل (۱) ترسیم شده است، بصورت یک بار سه‌گانه بوده که در آن، باس‌های ۱ تا ۱۸ به عنوان مشترک مسکونی، باس‌های ۱۹ تا ۲۵ به عنوان مشترک صنعتی و باس‌های ۲۶ تا ۳۳ به عنوان مشترک تجاری در نظر گرفته شده است.

در این مدل،  $\lambda_f$  نرخ خرابی،  $r_f$  زمان بازیابی،  $\lambda_m$  نرخ مربوط به تعمیر و نگهداری<sup>۱۳</sup>،  $r_m$  زمان بازگشت به شبکه پس از تعمیر و نگهداری،  $\lambda_{eol}$  نرخ پایان عمر مولفه‌ها می‌باشد. زیرنویس‌های ۱ و ۲ نیز

<sup>13</sup> Maintenance



شکل ۶: دیاگرام تک خطی سیستم ۳۳ باسه

جدول ۲. اطلاعات توربین بادی

$v_{cut-in}$	۴ m/sec
$v_{cut-out}$	۲۵ m/sec
$v_r$	۱۳ m/sec
$P_r$	۱۰۰ kW
$\lambda$	۱۵۰۰ hr
$\mu$	۸۰ hr

به ترتیب شامل رویدادهای  $r_m$  اکتیو<sup>۱۴</sup> و پسیو<sup>۱۵</sup> می‌باشند. یک رویداد پسیو یک حالت شکست جزئی است که باعث خاموش شدن ادوات حفاظتی نمی‌شود و بنابراین بر مولفه های سالم باقی مانده تأثیر نمی‌گذارد. شبکه با تعمیر یا جایگزینی جزء شکست خورده بازسازی می‌شود. یک رویداد فعال به حالت خرابی گفته می‌شود که باعث می‌شود ادوات حفاظتی در اطراف جزء خراب، عمل کند و بنابراین می‌تواند باعث حذف سایر اجزاء و شاخه‌های سالم از سرویس شود. توضیحات کامل‌تر در مرجع [۱۵] بیان شده است.

در سناریوی دوم با توجه به اینکه بار شبکه در هر ساعت تغییر

<sup>14</sup> Active

<sup>15</sup> Passive

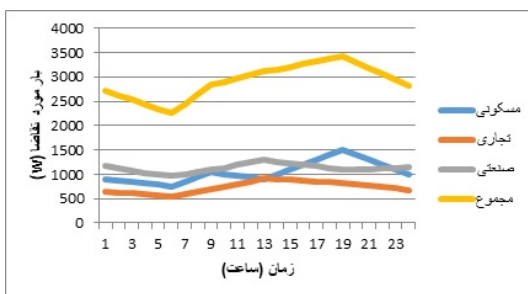
جدول ۳. نتایج حالت پایه (سناریوی یک)

Singular value	$\lambda_{max}$	ENS (kWhr)	کلیدهای باز	Down time (hr/year)	نااطمینانی	تلفات روزانه (kWhr)
۲/۵۷۸	۳/۴۱	۲۳۲۱۵/۸۶	۳۳.۳۴.۳۵.۳۶.۳۷	۱۵/۹۵	۰/۰۰۱۸۷۵	۲۳۳۹/۸۴

می‌کند جایابی منابع تولید پراکنده در ساعت پیک بار کلی شبکه (بدترین شرایط بهره‌برداری) بررسی می‌گردد. دلیل این کار این است که جایابی و تغییر مکان منابع تولید پراکنده در هر ساعت از شبانه‌روز، بین باس‌های مختلف از نظر عملی و اقتصادی معقول نیست. همچنین در سناریوی چهارم از نتایج بدست آمده از جایابی منابع تولید پراکنده در سناریوی دوم استفاده می‌شود.

پس از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی بر سیستم مورد مطالعه به منظور کسب اطلاعات اولیه و بدون هیچ‌گونه تغییری در سیستم مورد مطالعه (سناریوی یکم)، نتایج موجود در جدول (۳) بدست می‌آید.

مقدار  $\lambda_{max}$  یا همان ضریب بارگذاری بیانگر این واقعیت می‌باشد که این سیستم توانایی آن را دارد که باری با  $41/3$  برابر بار فعلی را بدون اینکه فروپاشی و لتاژ اتفاق افتد، تأمین کند. شکل (۷) نشان‌دهنده مجموع بار مورد تقاضای مشترکین سه‌گانه در هر ساعت بر حسب وات می‌باشد و همانطور که از شکل دیده می‌شود، اوج بار مجموع در ساعت ۱۹ اتفاق می‌افتد. لذا جایابی منابع تولید پراکنده در ساعت ۱۹ انجام می‌شود. جدول (۴) نتایج حاصل از جایابی منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد.



شکل ۷: مجموع بار اکتیو مورد تقاضا برای مشترکین مسکونی، تجاری، صنعتی و بار مجموع

جدول ۴. نتایج حاصل از سناریوی دوم

Singular value	$\lambda_{max}$	ENS (kWhr)	کلیدهای باز	Down time (hr/year)	نااطمینانی	DG محل نصب	تلفات روزانه (kWhr)
۲/۷۹۸	۳/۷۷۱	۱۶۵۱۱/۷	۳۳.۳۳۴.۳۵.۳۶.۳۷	۱۱/۸۲	۰/۰۰۱۳۵	شین‌های ۳۳.۱۸	۲۵۸۰/۶

جدول ۵. نتایج حاصل از بازاریابی به صورت ساعت به ساعت برای سناریوی سوم  
بدر نظر گرفتن تابع هدف  $F_a$

$\lambda_{max}$	کلیدهای باز	نااطمینانی	تلفات بعد بازاریابی (kW)	تلفات قبل بازاریابی (kW)	ساعت
۵/۱	۱۰.۷.۱۳.۳۶.۲۸	۰/۰۰۱۱۰۵۲۹	۷۵/۴۶۲	۷۵/۴۶۲	۱
۵/۴	۱۰.۷.۱۴.۳۲.۲۸	۰/۰۰۱۱۱۱۴	۶۸/۳۱۷۵	۸۵/۸	۲
۵/۴	۱۰.۷.۱۴.۳۲.۲۸	۰/۰۰۱۱۱۱۴	۶۳/۸۲۲۱	۸۰/۱۴	۳
۵/۴	۱۰.۷.۱۴.۳۲.۲۸	۰/۰۰۱۱۱۱۴	۵۸/۹۳۳۹	۷۴/۲۹	۴
۵/۴	۱۰.۷.۱۴.۳۲.۲۸	۰/۰۰۱۱۱۱۴	۵۴/۵۶۷۴	۶۸/۲۸	۵
۵/۴	۱۰.۷.۱۴.۳۲.۲۸	۰/۰۰۱۱۱۱۴	۵۱/۳۰۵۹	۶۴/۳۹	۶
۴/۹	۹.۷.۱۴.۳۲.۳۷	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۵۶/۷۰۲۱	۷۶/۵۹	۷
۴/۹	۱۱.۷.۱۴.۳۲.۳۷	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۶۷/۰۳۴۱	۹۱/۱۱	۸
۴/۹	۹.۷.۱۴.۳۲.۳۷	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۷۷/۴۶۰۴	۹۱/۶۷	۹
۵/۱	۹.۶.۱۴.۳۲.۳۷	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۸۳/۶۹۹۹	۱۰۷/۵۴	۱۰
۵/۱	۹.۶.۱۴.۳۲.۳۷	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۹۰/۳۴۱۴	۱۲۱/۶۵	۱۱
۵/۱	۹.۶.۱۴.۳۲.۳۷	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۹۷/۴۸۱۷	۱۳۰/۲۷	۱۲
۵/۱	۹.۶.۱۴.۳۱.۳۷	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۱۰۵/۶۰۴	۱۳۹/۷۴	۱۳
۵/۱	۹.۶.۱۴.۳۲.۳۷	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۱۰۶/۲۲۸	۱۴۲/۸۷	۱۴
۵/۱	۹.۶.۱۴.۳۲.۳۷	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۱۰۸/۵۰۳	۱۴۸/۲۸	۱۵
۵/۳	۹.۷.۱۴.۳۲.۲۸	۰/۰۰۱۱۱۷۵۲	۱۱۱/۶۰۱	۱۵۵/۲۵	۱۶
۵/۳	۹.۷.۱۴.۳۲.۲۸	۰/۰۰۱۱۱۷۵۲	۱۱۳/۰۶۹	۱۶۱/۵۱	۱۷
۵/۴	۱۰.۷.۱۴.۳۲.۲	۰/۰۰۱۱۱۱۴	۱۱۴/۹۸۱	۱۶۷/۸۳	۱۸
۵/۳	۹.۷.۱۴.۳۲.۲۸	۰/۰۰۱۱۱۷۵۲	۱۱۶/۳۸۹	۱۷۴/۹۵	۱۹
۵/۳	۹.۷.۱۴.۳۲.۲۸	۰/۰۰۱۱۱۷۵۲	۱۰۶/۵۷۷	۱۵۶/۵۳	۲۰
۵/۴	۱۰.۷.۱۴.۳۲.۲	۰/۰۰۱۱۱۱۴	۹۹/۴۸۶۵	۱۴۱/۴۳	۲۱
۵/۳	۹.۷.۱۴.۳۲.۲۸	۰/۰۰۱۱۱۷۵۲	۹۲/۴۵۹۸	۱۲۸/۷	۲۲
۴/۹	۹.۷.۱۴.۳۲.۳۷	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۸۲/۹۳۱۹	۱۱۵/۴۶	۲۳
۴/۹	۹.۷.۱۴.۳۲.۳۷	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۷۴/۶۵۹۸	۱۰۱/۸۶	۲۴

شین‌های شماره ۱۸ و ۳۳ به علت دوری از منبع، دارای افت ولتاژ شدیدتری در بین سایر شین‌ها می باشند لذا بهترین کاندید برای نصب منابع تولید پراکنده، همین شین‌ها خواهند بود. شایان ذکر است نتایج حاصل از این سناریو جهت بهینه‌سازی توابع هدف  $F_a$  و  $F_b$  به یک جواب واحد منتج می‌شود. در ادامه به بررسی سناریوی سوم می‌پردازیم. نتایج حاصل از این سناریو جهت بهینه‌سازی تابع هدف  $F_a$  در جدول (۵) و نتایج جهت بهینه‌سازی تابع هدف  $F_b$  در جدول (۶) بیان شده است.

جدول ۶. نتایج حاصل از بازاریابی به صورت ساعت به ساعت برای سناریوی سوم  
 بادر نظر گرفتن تابع هدف  $F_b$

ساعت	تلفات قبل بازاریابی (kW)	تلفات بعد بازاریابی (kW)	نا اطمینانی	کلیدهای باز	Singular value	ماکزیمم بارپذیری
۱	۹۱/۶۷	۶۹/۹۰۹۵	۰/۰۰۱۲۰۳۰۹	۹۰.۷.۱۴.۳۶.۳۷	۲۳/۱۷	۴/۶
۲	۸۵/۸	۶۷/۶۲۹۹	۰/۰۰۱۲۲۷۵۴	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۳۷	۴۰/۷۴	۴/۲۶
۳	۸۰/۱۴	۶۳/۲۳۴۹	۰/۰۰۱۲۲۷۵۴	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۳۷	۴۰/۷۴	۴/۲۶
۴	۷۴/۲۹	۵۸/۵۹۸۸	۰/۰۰۱۲۲۷۵۴	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۳۷	۴۰/۷۴	۴/۲۶
۵	۶۸/۳۸	۵۴/۰۶۲۳	۰/۰۰۱۲۲۱۴۲	۱۰.۷.۱۴.۱۷.۳۷	۳۸/۱۱	۴/۲۶
۶	۶۴/۳۹	۵۰/۹۸۷۹	۰/۰۰۱۲۲۷۵۴	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۳۷	۴۰/۷۴	۴/۲۶
۷	۷۶/۵۹	۵۹/۸۴۰۶	۰/۰۰۱۲۲۷۵۴	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۳۷	۴۰/۷۴	۴/۲۶
۸	۹۱/۱۱	۷۰/۰۸۴۳	۰/۰۰۱۲۲۷۵۴	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۳۷	۴۰/۷۴	۴/۲۶
۹	۹۱/۶۷	۸۱/۶۸۹۳	۰/۰۰۱۲۲۷۵۴	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۳۷	۴۰/۷۴	۴/۲۶
۱۰	۱۰۷/۵۴	۸۵/۰۰۰۱	۰/۰۰۱۲۰۳۰۹	۹۰.۷.۱۴.۳۶.۳۷	۲۳/۱۷	۴/۶
۱۱	۱۲۱/۶۵	۹۶/۱۴۴۳	۰/۰۰۱۲۲۷۵۴	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۳۷	۲۹/۹۵	۴/۴۲
۱۲	۱۳۰/۲۷	۱۱۲/۲۷۷	۰/۰۰۱۲۲۷۵۴	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۳۷	۲۹/۹۵	۴/۴۲
۱۳	۱۳۹/۷۴	۱۰۶/۲۱۶	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۹۰.۷.۱۴.۳۲.۳۷	۱۲/۴۹۰۳	۴/۸۸
۱۴	۱۴۲/۸۷	۱۰۶/۳۹۶	۰/۰۰۱۱۹۰۸۶	۹۰.۷.۱۴.۳۲.۳۷	۱۲/۴۹۰۳	۴/۸۸
۱۵	۱۴۸/۲۸	۱۱۲/۸۵۵	۰/۰۰۱۱۱۱۱۴	۹۰.۷.۱۴.۳۶.۳۸	۲۳/۲۱	۴/۶
۱۶	۱۵۵/۲۵	۱۱۳/۹۳۶	۰/۰۰۱۱۱۱۱۴	۹۰.۷.۱۴.۳۶.۳۸	۲۳/۲۱	۴/۶
۱۷	۱۶۱/۵۱	۱۱۴/۹۱۶	۰/۰۰۱۱۱۱۱۴	۹۰.۷.۱۴.۳۶.۳۸	۲۳/۲۱	۴/۶
۱۸	۱۶۷/۸۳	۱۱۹/۳۰۳	۰/۰۰۱۱۱۷۵۲	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۲۸	۴۱/۳۷	۴/۶۹
۱۹	۱۷۴/۹۵	۱۲۰/۵۴۹	۰/۰۰۱۱۱۷۵۲	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۲۸	۴۱/۳۷	۴/۶۹
۲۰	۱۵۶/۵۳	۱۱۰/۸۳۲	۰/۰۰۱۱۱۱۱۴	۱۰.۷.۱۴.۳۲.۳۸	۳۸/۵۶	۵/۲۵
۲۱	۱۴۱/۴۳	۱۰۳/۰۷۹	۰/۰۰۱۱۱۷۵۲	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۲۸	۴۱/۳۷	۴/۶۹
۲۲	۱۲۸/۷	۹۵/۴۸۶۷	۰/۰۰۱۲۲۷۵۴	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۳۷	۴۰/۷۴	۴/۲۶
۲۳	۱۱۵/۴۶	۸۷/۳۹۶۴	۰/۰۰۱۲۲۷۵۴	۹۰.۷.۱۴.۱۷.۳۷	۴۰/۷۴	۴/۲۶
۲۴	۱۰۱/۸۶	۷۶/۱۲۷۲	۰/۰۰۱۱۱۱۱۴	۹۰.۷.۱۴.۳۶.۳۸	۲۳/۲۱	۴/۶

جدول ۷. نتایج کلی حاصل از سناریوی سوم برای توابع هدف  $F_b$  و  $F_a$

تابع هدف	(kWhr) تلفات روزانه	Down time (hr/year)	ENS (kWhr)	حد اقل مقدار ضریب بارپذیری
$F_a$	۲۰۷۷/۶۲	۱۰/۰۶۴	۱۴۶۴۸/۳۱	۴/۹
$F_b$	۲۱۳۶/۵۷	۱۰/۳۷	۱۵۰۹۹/۷۲	۴/۲۶

نتایج کلی بعد از تغییر ساختار در طی ۲۴ ساعت به منظور بهینه سازی توابع هدف  $F_a$  و  $F_b$  در جدول (۷) بارائه شده است.

نتایج حاصل از سناریوی چهارم جهت بهینه سازی تابع هدف  $F_a$  در جدول (۸) و نتایج بهینه سازی تابع هدف  $F_b$  در جدول (۹) بیان شده است. همانطور که بیان شد، در این سناریو از نتایج حاصل از سناریوی دوم استفاده شده است و منابع تولید پراکنده در شین های ۱۸ و ۳۳ نصب می گردند.

نتایج کلی بعد از تغییر ساختار در طی ۲۴ ساعت به منظور بهینه سازی توابع هدف  $F_a$  و  $F_b$  در جدول (۱۰) بیان شده است.



جدول ۸. نتایج حاصل از بازاریابی به صورت ساعت به ساعت برای سناریوی چهارم برای

تابع هدف  $F_a$

ساعت	تلفات قبل بازاریابی (kW)	تلفات بعد بازاریابی (kW)	نا اطمینانی	کلیدهای باز	$\lambda_{max}$
۱	۹۱/۶۷	۷۴/۳۳۸۵	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۲	۸۵/۸	۶۹/۵۹۸۶	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۳	۸۰/۱۴	۶۵/۰۲۵۱	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۴	۷۴/۲۹	۶۱/۷۶۸۷	۰/۰۰۱۰۰۰۱۱۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۱۷.۲۸	۵/۲
۵	۶۸/۳۸	۵۳/۷۶۶۴	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۶	۶۴/۳۹	۴۷/۷۸۷۳	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۷	۷۶/۵۹	۵۱/۷۸۶۵	۰/۰۰۱۰۰۰۱۱۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۱۷.۲۸	۵/۲
۸	۹۱/۱۱	۶۰/۷۷۱۵	۰/۰۰۱۰۰۰۱۱۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۱۷.۲۸	۵/۲
۹	۹۱/۶۷	۷۰/۸۶۳	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۱۰	۱۰۷/۵۴	۷۶/۷۷۸	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۱۱	۱۲۱/۶۵	۷۶/۰۶۸	۰/۰۰۱۱۳۲۶۶	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۱.۳۷	۵/۱
۱۲	۱۳۰/۲۷	۸۵/۶۱۹۲	۰/۰۰۱۰۸۳۷۶	۹۰.۷۰.۱۴.۳۱.۲۸	۵/۲
۱۳	۱۳۹/۷۴	۸۹/۳۰۶۵	۰/۰۰۱۱۳۲۶۶	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۱.۳۷	۵/۱
۱۴	۱۴۲/۸۷	۱۰۰/۹۱۳	۰/۰۰۱۰۰۰۶۸۳	۹۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۱۵	۱۴۸/۲۸	۹۴/۸۹۹۳	۰/۰۰۱۰۷۷۶۵	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۱.۲۸	۵/۱
۱۶	۱۵۵/۲۵	۱۱۴/۲۴۳	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۱۷	۱۶۱/۵۱	۱۱۵/۲۸۸	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۱۸	۱۶۷/۸۳	۱۱۵/۸۳	۰/۰۰۱۰۰۰۶۸۳	۹۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۱۹	۱۷۴/۹۵	۱۰۴/۲۰۸	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۲۰	۱۵۶/۵۳	۹۵/۱۵۷۳	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۲۱	۱۴۱/۴۳	۸۸/۲۶۷	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۲۲	۱۲۸/۷	۸۲/۳۴۴۱	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۲۳	۱۱۵/۴۶	۸۱/۰۵۵	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴
۲۴	۱۰۱/۸۶	۷۹/۷۹۹۵	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۵/۴

جدول ۹. نتایج حاصل از بازاریابی به صورت ساعت به ساعت برای سناریوی چهارم برای

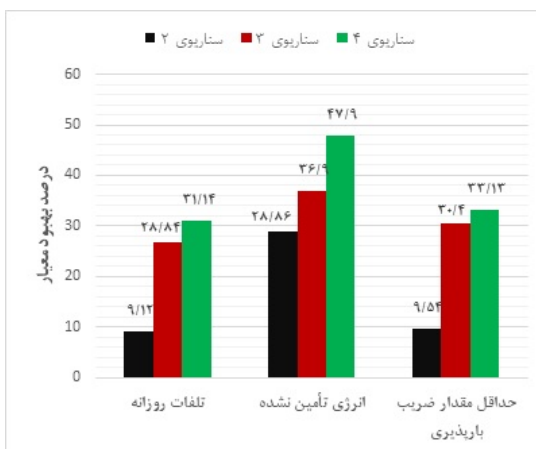
تابع هدف  $F_b$

ساعت	تلفات قبل بازاریابی (kW)	تلفات بعد بازاریابی (kW)	نا اطمینانی	کلیدهای باز	Singular value	ماکزیمم پارامتری
۲	۸۵/۸	۶۵/۶۵۱۲	۰/۰۰۱۰۰۷۴۱۹	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۳۷	۲۱/۴۱	۴/۹
۳	۸۰/۱۴	۶۱/۳۸۵۵	۰/۰۰۱۰۰۷۴۱۹	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۳۷	۲۱/۴۱	۴/۹
۴	۷۴/۲۹	۶۰/۰۱۸۷	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۲۱/۴۴	۵/۲۸
۵	۶۸/۳۸	۵۳/۷۶۶۴	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۲۱/۴۴	۵/۲۸
۶	۶۴/۳۹	۴۷/۷۸۷۳	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۲۱/۴۴	۵/۲۸
۷	۷۶/۵۹	۵۱/۷۸۶۵	۰/۰۰۱۰۰۰۱۱۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۱۷.۲۸	۳۸/۶	۵/۲
۸	۹۱/۱۱	۶۰/۷۷۱۵	۰/۰۰۱۰۰۰۱۱۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۱۷.۲۸	۳۸/۶	۵/۲
۹	۹۱/۶۷	۷۱/۱۵۸۹	۰/۰۰۱۰۰۰۱۱۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۱۷.۲۸	۳۸/۶	۵/۲
۱۰	۱۰۷/۵۴	۷۶/۷۷۸	۰/۰۰۱۰۰۰۱۱۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۱۷.۲۸	۳۸/۶	۵/۲
۱۱	۱۲۱/۶۵	۸۶/۳۰۶۵	۰/۰۰۱۰۰۰۱۱۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۱۷.۲۸	۳۸/۶	۵/۲
۱۲	۱۳۰/۲۷	۸۲/۳۴۸۹	۰/۰۰۱۱۳۲۶۶	۹۰.۷۰.۱۴.۳۱.۳۷	۵/۸۵	۵/۰۳
۱۳	۱۳۹/۷۴	۸۸/۹۵۱۸	۰/۰۰۱۱۳۸۷۷	۹۰.۷۰.۱۴.۳۱.۳۷	۶/۷۵	۵/۰۳
۱۴	۱۴۲/۸۷	۸۹/۶۵۲۴	۰/۰۰۱۱۳۸۷۷	۹۰.۷۰.۱۴.۳۱.۳۷	۶/۷۵	۵/۰۳
۱۵	۱۴۸/۲۸	۹۴/۴۲۹۷	۰/۰۰۱۰۰۸۳۷۶	۹۰.۷۰.۱۴.۳۱.۲۸	۶/۷۵	۵/۱۴
۱۶	۱۵۵/۲۵	۱۱۴/۲۴۳	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۲۱/۴۴	۵/۲۸
۱۷	۱۶۱/۵۱	۱۱۴/۹۱۶	۰/۰۰۱۰۰۰۶۸۳	۹۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۲۴/۳	۵/۲۷
۱۸	۱۶۷/۸۳	۱۱۵/۸۳	۰/۰۰۱۰۰۰۶۸۳	۹۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۲۴/۳	۵/۲۷
۱۹	۱۷۴/۹۵	۱۰۵/۵۰۱	۰/۰۰۱۰۰۰۱۱۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۱۷.۲۸	۳۸/۶	۵/۲
۲۰	۱۵۶/۵۳	۹۶/۲۳۸۴	۰/۰۰۱۰۰۰۱۱۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۱۷.۲۸	۳۸/۶	۵/۲
۲۱	۱۴۱/۴۳	۸۹/۱۳۰۵	۰/۰۰۱۰۰۰۱۱۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۱۷.۲۸	۳۸/۶	۵/۲
۲۲	۱۲۸/۷	۸۲/۳۴۴۱	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۲۱/۴۴	۵/۲۸
۲۳	۱۱۵/۴۶	۸۱/۰۵۵	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۲۱/۴۴	۵/۲۸
۲۴	۱۰۱/۸۶	۷۹/۷۹۹۵	۰/۰۰۱۰۰۰۷۱	۱۰۰.۷۰.۱۴.۳۶.۲۸	۲۱/۴۴	۵/۲۸

جدول ۱۰. نتایج کلی حاصل از سناریوی چهارم برای توابع هدف  $F_b$  و  $F_a$

تابع هدف	تلفات روزانه (kWhr)	Down time (hr/year)	ENS (kWhr)	حداقل مقدار ضریب بارپذیری
$F_a$	۱۹۵۵/۴۹	۸/۹۲	۱۲۰۹۴/۶	۵/۱
$F_b$	۱۹۳۸/۰۳	۹/۰۱	۱۲۲۱۸/۱۸	۴/۹

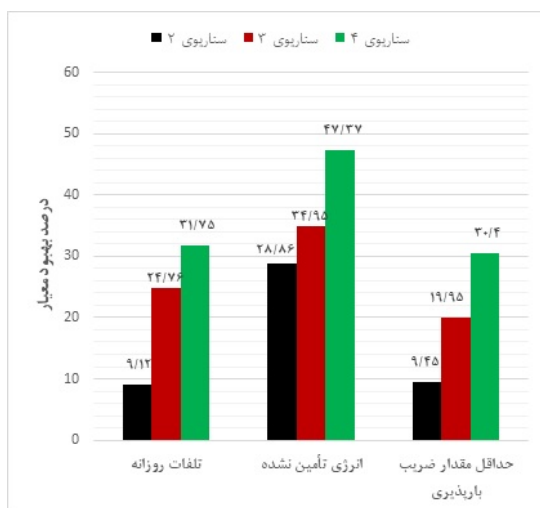
شکل (۸) و (۹) به ترتیب تأثیر روش پیشنهاد شده در سناریوهای مختلف بر شاخص‌های تعریف شده را بادر نظر گرفتن توابع هدف  $F_b$  و  $F_a$  نمایش می‌دهند.



شکل ۸: تأثیر روش پیشنهادی بر شاخص‌های تعریف شده بادر نظر گرفتن تابع هدف  $F_a$

از مقایسه نمودارها به وضوح مشخص است که تابع هدف  $F_a$  جواب‌های بهتری نسبت به تابع هدف  $F_b$  تولید می‌کند. استفاده از معیار مقادیر منفرد (singular value) به عنوان تابع هدف، فقط در سناریوی چهارم، باعث تلفات کمتری نسبت به  $\lambda_{max}$  می‌شود. اما سرعت همگرایی آن بسیار بیشتر از حالتی است که  $\lambda_{max}$  به عنوان تابع هدف انتخاب می‌شود. دلیل این اختلاف این است که در محاسبه  $\lambda_{max}$  در هر تکرار نیاز به افزایش ضریب بار و محاسبه پخش بار است. اما در محاسبه مقادیر منفرد (singular value) احتیاجی به محاسبات پخش بار نیست و فقط کافیسیت یکبار ماتریس ژاکوبین محاسبه شده و بازآرایی به نحوی انجام شود که کمترین مقدار منفرد ماتریس ژاکوبین، بیشینه گردد.

از نکات مهم دیگر اینکه، هنگام استفاده از  $\lambda_{max}$  به عنوان یکی از ارکان تابع هدف تعداد



شکل ۹:  $F_b$  تأثیر روش پیشنهادی بر شاخص‌های تعریف شده با در نظر گرفتن تابع هدف

جدول (۱۰) آرایش‌های مختلف حاصل از بهینه‌سازی توابع هدف و  $F_a$  و  $F_b$

تابع هدف $F_b$	تابع هدف $F_a$	ردیف
۱۰،۷،۱۴،۳۶،۳۷	۱۰،۷،۱۴،۳۶،۲۸	۱
۱۰،۷،۱۴،۳۶،۲۸	۱۰،۷،۱۴،۱۷،۲۸	۲
۱۰،۷،۱۴،۱۷،۲۸	۱۰،۷،۱۴،۳۱،۳۷	۳
۱۰،۷،۱۴،۳۱،۳۷	۹،۷،۱۴،۳۱،۲۸	۴
۹،۷،۱۴،۳۱،۳۷	۹،۷،۱۴،۳۶،۲۸	۵
۹،۷،۱۴،۳۶،۲۸	۱۰،۷،۱۴،۳۱،۲۸	۶
۱۰،۷،۱۴،۱۷،۲۸	—	۷

تغییر وضعیت کلیدها در مسئله بازآرایی کمتر از زمانی است که در آن مقادیر منفرد (singular value) یکی از ارکان تابع هدف باشد. به عنوان مثال در سناریوی چهارم و برای تابع هدف  $F_a$ ، ۶ آرایش مختلف و برای تابع هدف  $F_b$ ، ۷ آرایش مختلف برای شبکه به دست می‌آید. آرایش‌های مختلف حاصل از بهینه‌سازی توابع هدف  $F_b$  و  $F_a$  در جدول (۱۰) داده شده‌اند.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی توابع هدف  $F_b$  و  $F_a$  در طول شبانه‌روز نشان می‌دهد که فقط از ۹ کلید با شماره‌های ۷ و ۹ و ۱۰ و ۱۴ و ۱۷ و ۲۸ و ۳۱ و ۳۶ و ۳۷ استفاده شده

جدول ۱۱. نتایج حاصل از سناریوی چهارم با استفاده از ۹ کلید در شبکه (تابع هدف  $F_a$ )

حداقل مقدار ضریب بارپذیری	ENS (kWhr)	Down time (hr/year)	تلفات روزانه (kWhr)
۵/۱	۶۳۵۱/۹۸	۴/۶۹	۱۹۵۵/۴۹

است. همانطور که واضح است، برخی از کلیدها به هیچ وجه در مسئله بازاریابی شرکت نداشته‌اند و می‌توان آنها را از شبکه حذف کرد و فقط ۹ کلید مذکور را در شبکه جایگذاری نمود. این کار سبب کاهش هزینه های مربوط به خرید و نگهداری کلیدها شده و همچنین قابلیت اطمینان در شبکه را افزایش می‌دهد. جدول (۱۱) نتایج حاصل از سناریوی چهارم را به منظور بهینه سازی تابع هدف  $F_a$  در صورتیکه تنها از ۹ کلید فوق در شبکه استفاده شود نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار،  $ENS$ ،  $72/64\%$  در مقایسه با سناریوی نخست بهبود یافته است.

## ۷ نتیجه‌گیری

این مقاله ضمن آنکه به موضوع بازاریابی و جایابی منابع تولید پراکنده به هدف بهبود قابلیت اطمینان، تلفات توان و همچنین بارپذیری شبکه پرداخته روشی موثر جهت تعیین تعداد بهینه کلید های شبکه و محل نصب آنها را نیز ارائه داده است. جهت افزایش سرعت همگرایی و درعین حال بدست آوردن جوابهای قابل قبول از معیار مقادیر منفرد ماتریس ژاکوبین در فرایند بهینه سازی پایداری ولتاژ استفاده شده است. درمقابل، استفاده از معیار  $\lambda_{max}$  به جواب های بهینه تری می انجامد اما حجم محاسبات و در نتیجه مدت زمان همگرایی را افزایش می دهد. در این مقاله از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک رتبه بندی نامغلوب NSGA-II جهت بهینه سازی چندهدفه و از منطق فازی برای انتخاب بهترین جواب، از بین جواب های تولید شده استفاده شده است. برای بررسی کارائی الگوریتم پیشنهادی، سناریوهای مختلفی با استفاده از شبکه ۳۳ باسه IEEE پیاده سازی شد. روش پیشنهادی در این مقاله، تعداد بهینه کلید های مورد نیاز در شبکه جهت انجام بازاریابی و محل نصب آنها را بدست می دهد. بهینه سازی تعداد کلید ها به کاهش هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری می انجامد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد که جایابی

بهینه منابع تولید پراکنده و کلیدهای توزیع با استفاده از روش پیشنهادی اساسی‌ترین فاکتورهای سیستم توزیع، یعنی قابلیت اطمینان، تلفات توان و پایداری ولتاژ را بهبود می‌بخشد. همچنین با توجه به اینکه در پایان هر سناریو، حداکثر بارپذیری محاسبه و گزارش می‌شود، می‌توان ادعا کرد که این سیستم تا سال‌های آتی و بدون نیاز به نصب منابع بیشتر، جوابگوی تأمین نیاز مصرف‌کنندگان، با در نظر گرفتن رشد سالیانه‌ی بار و بدون فروپاشی ولتاژ می‌باشد.

## مراجع

- [1] Singh, A. and Parida, S., 2015. A novel hybrid approach to allocate renewable energy sources in distribution system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 10, pp.1-11.
- [2] Tsikalakis, A. and Hatziargyriou, N., Environmental benefits of distributed generation with and without emissions trading. *Energy Policy*, 35(6) (2007), pp.3395-3409.
- [3] Khyati D. Mistry, Ranjit Roy, 2014. Enhancement of loading capacity of distribution system through distributed generator placement considering technoeconomic benefits with load growth, *Electr. Power Energy Syst.* 54, 505–515.
- [4] Duong Quoc Hung, Nadarajah Mithulananthan, 2013. Multiple distributed generator placement in primary distribution networks for loss reduction, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 60 (4), 1700–1708.
- [5] Al Abri, R., El-Saadany, E. and Atwa, Y., 2013. Optimal Placement and Sizing Method to Improve the Voltage Stability Margin in a Distribution System Using Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(1), pp.326-334.

- [6] Esmaili, M., 2013. Placement of minimum distributed generation units observing power losses and voltage stability with network constraints, *IET Gen. Transm. Distrib.* 7 (8), 813–821.
- [7] Hung Duong Quoc, N. Mithulananthan, Kwang Y. Lee, 2014. Optimal placement of dispatchable and nondispatchable renewable DG units in distribution networks for minimizing energy loss, *Electr. Power Energy Syst.* 55, 179–186
- [8] Silva, N., Fuinhas, J. and Koengkan, M., 2021. Assessing the advancement of new renewable energy sources in Latin American and Caribbean countries. *Energy*, 237, p.121611.
- [9] Sai Kiran, R. and Suresh Reddy, S., 2021. A mixed integer optimization model for reliability indices enhancement in Micro-grid system with renewable generation and energy storage. *Materials Today: Proceedings*.
- [10] Billinton, R. and Jonnavithula, S., 1996. Optimal switching device placement in radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(3), pp.1646-1651.
- [11] Ray, S., Bhattacharjee, S. and Bhattacharya, A., 2018. Optimal allocation of remote control switches in radial distribution network for reliability improvement. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(3), pp.403-414.
- [12] Alves, H. and de Sousa, R., 2014. A Multi-Population Genetic Algorithm to Solve Multi-Objective Remote Switches Allocation Problem in Distribution Networks, *Computational Intelligence for Engineering Solutions (CIES)*, pp. 155 – 162.
- [13] Khani, M. and Safdarian, A., 2020. Effect of sectionalizing switches malfunction probability on optimal switches placement in distribution networks. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 119, p.105973.

- [14] Pombo, A.V., Murta-Pina, J., Pires, V.F, 2016. 'A multiobjective placement of switching devices in distribution networks incorporating distributed energy resources', *Electr. Power Syst. Res.*, vol.130, pp. 34–45.
- [15] Amanulla, B., Saikat Chakrabarti, and S. N. Singh. 2012. "Reconfiguration of power distribution systems considering reliability and power loss." *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no.2, pp. 918-926.
- [16] Aman, M., Jasmon, G., Mokhlis, H. and Bakar, A., 2016. Optimum tie switches allocation and DG placement based on maximisation of system loadability using discrete artificial bee colony algorithm. *IET Generation, Transmission Distribution*, 10(10), pp.2277-2284.
- [17] Silveira, C., Tabares, A., Faria, L. and Franco, J., 2021. Mathematical optimization versus Metaheuristic techniques: A performance comparison for reconfiguration of distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 196, p.107272.
- [18] Billinton, R. and Allen, R." *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques* "2nd Edition, Plenum Press, New York, 1996.
- [19] Chen, Kening, et al. 2016. "A method to evaluate total supply capability of distribution systems considering network reconfiguration and daily load curves." *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 2096-2104,
- [20] Sulaeman, Samer, et al., 2014. An analytical method for constructing a probabilistic model of a wind farm. *PES General Meeting, Conference Exposition, IEEE*, pp. 1-5,
- [21] Allan, R., Billinton, R. and De Oliveira, M., 1976. An Efficient Algorithm for Deducing the Minimal Cuts and Reliability Indices of a General Network Configuration. *IEEE Transactions on Reliability*, R-25(4), pp.226-233.

- [22] Kundur, P., "power system stability and control", MC GRAW Hill, 1994.
- [23] Van Cutson, T. and Vournas, C. 1998. "Voltage stability of electric power system", Kluwer Academic publishers.
- [24] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyerivan, T., 2002. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), pp.182-197.
- [25] Aghaei, J., Amjady, N. and Shayanfar, H., 2011. Multi-objective electricity market clearing considering dynamic security by lexicographic optimization and augmented epsilon constraint method. Applied Soft Computing, 11(4), pp.3846-3858.
- [26] Niknam, T., Taheri, S., Aghaei, J., Tabatabaei, S. and Nayeripour, M., 2011. A modified honey bee mating optimization algorithm for multiobjective placement of renewable energy resources. Applied Energy, 88(12), pp.4817-4830.