

# ارایه روش جدید بارزدایی بهینه فرکانسی در محیط بازار رقابتی برق

میثم منتظری<sup>۱</sup>، مسعود رشیدی نژاد<sup>۲</sup>، امیر عبدالهی<sup>۳</sup>، روح الله فدایی نژاد<sup>۴</sup>، ابوالقاسم تیکداری<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۲/۸/۴

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۳/۱/۱۶

## چکیده:

مقاله حاضر به ارایه روشی جدید به منظور بارزدایی بهینه فرکانسی در سیستم قدرت با در نظر گرفتن بازار رقابتی برق می پردازد. در روش پیشنهادی کمترین میزان بارزدایی به منظور حفظ پایداری فرکانس سیستم و قرار گرفتن فرکانس حالت ماندگار سیستم در محدوده مجاز خود صورت می گیرد. همچنین تابع هدفی جدید به منظور بیشینه نمودن سود متصدیان تولید، کمینه نمودن هزینه گرفتگی خطوط و همچنین در نظر گرفتن جریمه ناشی از توان تامین نشده در هنگام بارزدایی فرکانسی در نظر گرفته شده است. از این رو، محل و مقدار بارزدایی بر روی هر یک از بارهای سیستم با استفاده از الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات تعیین می شود. با بهره گیری از روش پیشنهادی، هنگام وقوع پیشامد احتمالی در سیستم قدرت می توان علاوه بر حفظ امنیت سیستم، بیشترین سود بازیگران بازار را برای سیستم در نظر گرفت. شبیه سازی مساله بر روی سیستم ۳۹ باسه استاندارد تغییر یافته با در نظر گرفتن اطلاعات دینامیکی شبکه به منظور بارزدایی بهینه فرکانسی و در حضور بارهای حساس به قیمت صورت گرفته تا با انجام پخش بار بهینه اقتصادی در محیط بازار هوشمند نرم افزار مت پاور ۴،۱، بارزدایی ایمن و اقتصادی را در شبکه ایجاد نمود.

کلمات کلیدی:

بارزدایی فرکانسی، بازار رقابتی برق، بارهای قابل پخش و حساس به قیمت، تابع چند هدفی..

montazeri-meysam@yahoo.com  
mrashidi@uk.ac.ir  
a.abdollahi@uk.ac.ir  
rfadaein@ieee.org  
ikdari\_ghasem@yahoo.com

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته کرمان  
(۲) استاد دانشگاه شهید باهنر کرمان  
(۳) استادیار دانشگاه شهید باهنر کرمان  
(۴) استادیار دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته کرمان  
(۵) شرکت کرمان تابلو

## مقدمه

هدف اصلی برای سیستم‌های قدرت امروزی فراهم کردن توان مورد نیاز برای مشترکین با کمترین هزینه ممکن و سطح مطلوب قابلیت اطمینان می باشد. عمده این شبکه‌ها به واسطه عدم رشد متوازن شبکه‌های انتقال با بار مصرفی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها، به شدت در برابر رشد بار، کمبود تولید و بروز خطاهای متفاوت آسیب پذیر شده‌اند به نحوی که در خاموشی‌های سراسری اخیر در برخی کشورها ناپایداری ولتاژ و فرکانس دلیل اصلی قطعی بوده است [۱۷]. بارزدایی یکی از آخرین اقدامات کنترلی سیستم به منظور حفظ امنیت سیستم پس از وقوع یک پیشامد احتمالی در شبکه می باشد به طوری که با انجام بارزدایی بهینه و مناسب می توان از ناپایداری فرکانس و ولتاژ در شبکه جلوگیری نمود [۲].

طرح‌ها و الگوریتم‌های گوناگونی جهت بارزدایی فرکانسی و ولتاژی ارائه شده است [۲-۹-۱۱-۱۲-۱۵]. اغلب طرح‌های بارزدایی، طرح‌های مبتنی بر افت فرکانس هستند که مرتبط با جدا ساختن مقداری مشخص از بار در صورت کاهش فرکانس به مقداری پایین‌تر از آستانه فرکانسی سیستم می باشند [۱۱-۱۲-۱۸]. طرح‌های بارزدایی مبتنی بر افت ولتاژ به محافظت سیستم در برابر ناپایداری و افت شدید ولتاژ به کار می‌روند [۱-۲-۷].

عملکرد ایمن و اقتصادی سیستم‌های قدرت مستلزم ایجاد تعادل بین تولید و مصرف و همچنین در برداشتن بیشینه رفاه اجتماعی در شبکه می باشد. بنابراین، در یک سیستم قدرت علاوه بر عملکرد ایمن آن به عنوان هدف اصلی بهره برداران سیستم قدرت، سود بازیگران بازار برق مانند متصدیان تولید، متصدی انتقال و نیز مشتریان باید بیشینه شود [۳].

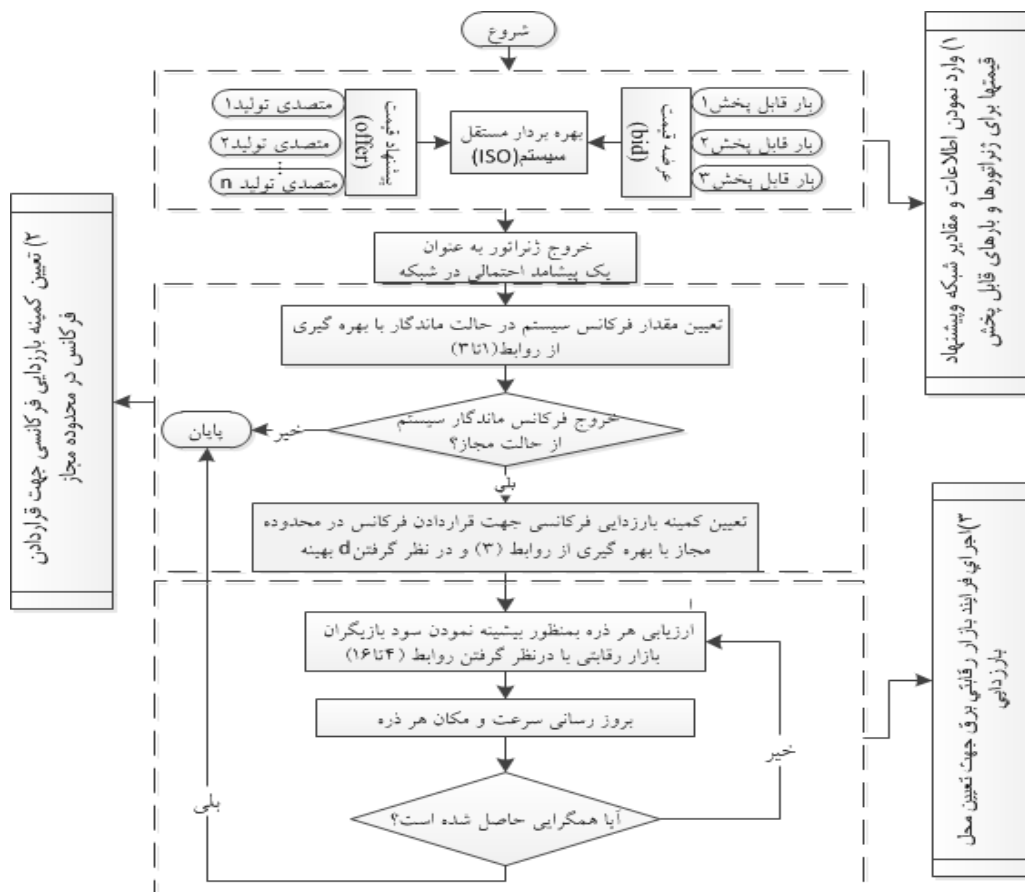
در یک محیط بازار رقابتی برق، سه نوع بار از دیدگاه اقتصادی می‌توان در نظر گرفت. بارهای ثابت، بارهای انعطاف‌پذیر و بارهای قابل پخش پاسخگو و حساس به قیمت. بارهای انعطاف‌پذیر می‌توانند از طریق یک اعلام پیشاپیش از بهره‌بردار مستقل سیستم به‌طور داوطلبانه از سیستم جدا گردند. نمونه این بارها بارهایی هستند که در کارخانه‌های بزرگ صنعتی در صورت فراهم بودن تولید اضافی وارد مدار می‌گردند و در صورت نیاز شبکه به جدا شدن آنها، از شبکه جدا می‌شوند. بارهای قابل پخش پاسخگو به قیمت نیز با توجه به شرایط اقتصادی حاکم بر بازار و پیشنهادهای آنها به صورت حساس به قیمت از شبکه جدا می‌گردند [۳].

در مقاله حاضر ابتدا در بخش ۱ به صورت کلی چارچوب پیشنهادی روش ارائه شده در مقاله شرح داده شده و سپس بخش ۱،۱ به ارائه پیشنهاد ژنراتورها و بارهای قابل پخش در محیط بازار رقابتی برق می‌پردازد. در بخش ۱،۲ بارزدایی بهینه فرکانسی در حالت ماندگار سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس با در نظر گرفتن اطلاعات دینامیکی شبکه، مقدار کمینه بارزدایی بعد از وقوع اغتشاش در سیستم به دست می‌آید به نحوی که با حفظ پایداری فرکانس سیستم و قرار گرفتن فرکانس سیستم در محدوده مجاز، مقدار کمینه بارزدایی ممکن برای سیستم در حالت ماندگار به دست می‌آید.

سپس در بخش ۱،۳ محل بارزدایی سیستم با در نظر گرفتن بیشینه سود بازیگران بازار برق شامل بیشینه سود متصدیان تولید و با در نظر گرفتن هزینه جریمه مربوط به عدم تامین بار مورد نیاز مصرف کنندگان سیستم و همچنین با در نظر گرفتن کمینه هزینه گرفتگی خطوط بدست می‌آید. در بخش چهارم مطالعات عددی روش ذکر شده بر روی سیستم ۳۹ باسه استاندارد IEEE تغییر یافته و با در نظر گرفتن بارهای قابل پخش و حساس به قیمت در بازار رقابتی برق به دست می‌آید و در نهایت، به تحلیل و بررسی نتایج بدست آمده از شبیه سازی روش ارائه شده پرداخته می شود.

### روند الگوریتم ارائه شده

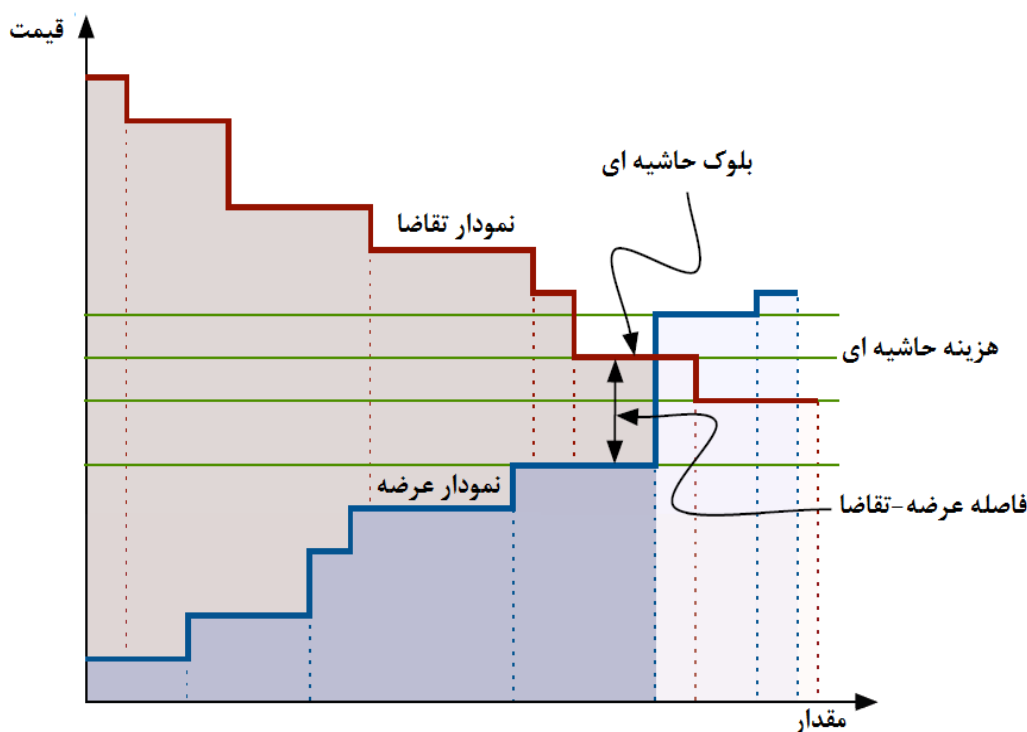
چارچوب کلی الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده به طوری که در ادامه بخش های این الگوریتم به صورت کامل شرح داده شده است.



شکل (۱) چارچوب پیشنهادی بارزدایی بهینه فرکانسی در محیط بازار رقابتی برق

### پیشنهاد قیمت‌ها برای ژنراتورها و بارهای قابل پخش

بهره بردار مستقل سیستم قدرت به عنوان متصدی بازار پیشنهاد متصدیان تولید در بلوک هایی به صورت صعودی و همچنین پیشنهادهای بارهای قابل پخش به عنوان بارهای پاسخگو به قیمت را در محیط بازار رقابتی برق دریافت می کند. بارهای قابل پخش پاسخگو به قیمت با توجه به شرایط اقتصادی بر بازار و پیشنهادهای آنها به صورت حساس به قیمت از شبکه جدا می گردند [۹]. بازار رقابتی ارائه شده در شکل (۲) بر اساس مزایده های دو طرفه می باشد که در آن پیشنهادهای متصدی تولید به صورت صعودی و پیشنهادهای بارهای قابل پخش به صورت نزولی مرتب می گردند و زمانی که دو منحنی یکدیگر را تلاقی می نمایند، قیمت تسویه بازار به دست می آید. سازوکار تسویه بازار در محیط بازار هوشمند نرم افزار مت پاور ۴،۱ با مرتب نمودن پیشنهادهای دو سمت عرضه و تقاضا آغاز می گردد. در یک بازار برق کارا و بر پایه مزایده های دوطرفه، پس از طی مرحله مرتب سازی پیشنهادهای دو سمت عرضه و تقاضا، مقدار برابری از هر بلوک پذیرفته می شود که این روند با پذیرفتن بالاترین پیشنهاد سمت عرضه و پایین ترین پیشنهاد سمت تقاضا آغاز می گردد و تا تمام شدن عرضه یا تقاضا و یا بیشتر شدن قیمت پیشنهاد سمت عرضه از سمت تقاضا پایان می یابد [۳].



شکل (۲) مزایده دوطرفه در ساختار بازار رقابتی برق

## تعیین بارزدایی بهینه فرکانسی

قبل از وقوع هر گونه پیشامد احتمالی در شبکه، سیستم متعادل است، به عبارت دیگر، مجموع توان تولیدی کل سیستم با مجموع بار مصرفی سیستم و با در نظر گرفتن تلفات، برابر می‌باشد. بنابراین، فرکانس سیستم در محدوده مجاز خود عمل می‌نماید.

وقوع هر گونه اغتشاش و پیشامد در شبکه می‌تواند باعث کاهش ظرفیت تولید شبکه شود و در نتیجه، افت فرکانس در شبکه را در برداشته باشد. برای اعمال حذف بار در سیستم مورد نظر ابتدا با بررسی اینکه وقوع یک پیشامد در شبکه چه تاثیری بر کاهش تولید سیستم دارد و سپس با در نظر گرفتن رزرو گردشی موجود در سیستم می‌توان بررسی نمود تا چه میزان این رزرو قادر به تولید توان از دست رفته می‌باشد و در صورت کافی بودن رزرو چرخان، نیاز به بارزدایی نمی‌باشد. در غیر این صورت، با در نظر گرفتن افت سرعت گاورنرهای سیستم و مقدار توان از دست رفته مقدار کاهش فرکانس طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]:

$$\Delta f^{PU} = -R_{eq} \cdot P_{L\Delta} \quad (۱)$$

افت سرعت گاورنرهای معادل سیستم با توجه به افت سرعت گاورنر هر یک از توربین‌ها ( $R_i$ ) بر حسب پریونیت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (۲)$$

بنابراین، فرکانس سیستم در حالت ماندگار سیستم به دست می‌آید و در صورتی که از مقدار حد فرکانس مجاز سیستم کمتر باشد، بارزدایی با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲، ۹، ۵]:

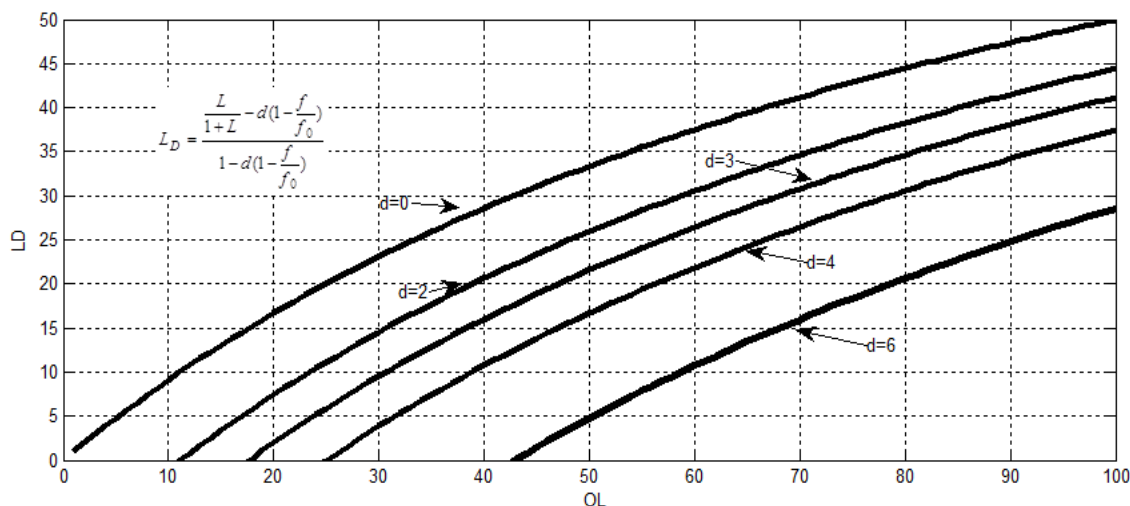
$$L_D = \frac{\frac{L}{1+L} - d(1 - \frac{f}{f_0})}{1 - d(1 - \frac{f}{f_0})} \quad (۳)$$

$f_0$  فرکانس نامی سیستم قدرت است که برابر ۶۰ هرتز در نظر گرفته می‌شود،  $f$  میزان فرکانس حالت ماندگار سیستم،  $L$  میزان اضافه بار بوجود آمده در سیستم ناشی از اغتشاش بوده که از نسبت مجموع توان تولیدی از دست رفته به مجموع توان تولیدی باقیمانده در شبکه به دست می‌آید.  $d$  ضریب کاهش بار است که مقدار آن وابسته به دامنه و نوع

اغتشاش می‌باشد که از مقدار صفر تا شش متغیر می‌باشد که این ارتباط برای یک سیستم نوعی در شکل (۳) نشان داده شده است [۵]. هرچه مقدار  $d$  کوچکتر باشد، مقدار کاهش فرکانسی سیستم کمتر ولی مقدار بارزدایی بیشتر می‌باشد. همچنین برای مقادیر  $d$  بیشتر دارای مقدار کمتر بارزدایی در شبکه، ولی دارای انحراف فرکانسی بیشتر می‌باشیم. بنابراین، جهت اینکه بتوان کمترین بارزدایی را در سیستم ایجاد نمود، بایستی تابع فوق بر اساس مقادیر متغیر  $d$  در بازه  $(0, 6)$  حداقل شود به این شرط که فرکانس سیستم در محدوده مجاز خود  $(59.8-60.2)$  قرار گیرد. بنابراین، با انجام بهینه‌سازی مناسب، کمترین میزان بارزدایی در سیستم فوق به دست می‌آید تا بتوان فرکانس سیستم را در محدوده مجاز خود قرار داد.

### تعیین محل بارزدایی با توجه به محیط بازار رقابتی برق

با توجه به تعیین مقدار کل بارزدایی در قسمت قبل جهت قرار گرفتن فرکانس در محدوده مجاز خود، میزان کل بارزدایی سیستم تعیین شده تا بتوان با تعیین محل مناسب بارزدایی، بیشینه سود بازیگران بازار برق از جمله بیشینه سود متصدیان تولید، هزینه جریمه پرداخت در صورت عدم تولید بار مورد نیاز مصرف کنندگان و همچنین کمینه نمودن هزینه گرفتگی خطوط پس از وقوع پیشامد احتمالی در سیستم را انجام داد. در ادامه، طرح بارزدایی حالت ماندگار سیستم قدرت مورد بررسی از یک تابع چند هدفه به منظور بهینه‌سازی یک مدل اقتصادی بارزدایی با ایجاد کمترین هزینه ممکن برای شرکت کنندگان در بازار برق در سیستم قدرت مورد بررسی استفاده می‌شود. به طوری که نقش بازیگران در بازار برق از جمله هزینه گرفتگی خطوط سود متصدیان تولید جریمه ناشی از توان تامین نشده بارها در هنگام بارزدایی لحاظ می‌شود.



شکل ۳) مقدار بارزدایی لازم در یک سیستم قدرت به ازای اضافه بارهای مختلف

در این مدل با استفاده از الگوریتم اجتماع پرندگان به منظور بارزدایی بهینه و با در نظر گرفتن بیشینه سود متصدیان تولید و همچنین با در نظر گرفتن کمینه هزینه گرفتگی خطوط در محیط بازار هوشمند نرم افزار مت پاور ۴،۱، این کار صورت می گیرد.

### تعیین هزینه گرفتگی خطوط

هنگامی که یک خروج در یک سیستم قدرت رخ می دهد، به علت ظرفیت ناکافی سیستم انتقال، هزینه گرفتگی ممکن است افزایش یابد. همچنین تأثیر گرفتگی بر روی قیمت تسویه بازار ممکن است منجر به تفاوت در قیمت های حاشیه ای محلی گردد. هزینه گرفتگی خطوط به عنوان حاصل ضرب اختلاف بین قیمت های حاشیه ای محلی در توان عبوری از خط دارای گرفتگی تعریف می گردد [۱۶].

$$f_1 = - \sum_{i \neq j}^{n_B} (\lambda_i - \lambda_j) P_{ij}, P_{ij} \geq 0 \quad (4)$$

$f_1$  برابر با هزینه گرفتگی خطوط انتقال بر حسب دلار بر ساعت می باشد و  $\lambda_i$  و  $\lambda_j$  بیانگر قیمت حاشیه ای محلی شینه های  $i$  و  $j$  بر حسب دلار بر مگاوات ساعت و  $P_{ij}$  برابر با مقدار توان عبوری از خط  $ij$  بر حسب مگاوات می باشد.

### سود متصدیان تولید با در نظر گرفتن جریمه ناشی از توان تامین نشده بارها

با اجرای طرح بارزدایی مبتنی بر بازار برق، هر متصدی تولید که ژنراتورهای مربوط به آن از سیستم قدرت جدا گردند ملزم به پرداخت هزینه های مقدار توان تامین نشده می باشد که به عنوان جریمه ای برای بارزدایی در نظر گرفته می شود. هزینه های مقدار توان تامین نشده ( $C_{EPNS}$ ) از حاصل ضرب مقدار مگاوات بار جدا شده از سیستم و هزینه حاشیه ای بارزدایی که توسط رابطه (۵) بیان گردیده است، به دست می آید:

$$LSMP_i^k = A_i^k LMP_i^k \quad (5)$$

که در این رابطه،  $A_i^k$  ضریبی است که به عنوان ضریب اهمیت بار شناخته می شود و به نوع بار که با  $k$  مشخص می گردد و مکان بار که با  $i$  مشخص می گردد، بستگی دارد. بنابراین، هزینه حاشیه ای بارزدایی بارهای مهم تر دارای مقدار بیشتری است که یک شاخص اقتصادی برای بهره بردار مستقل سیستم است که از بارزدایی با جریمه بالا جلوگیری نماید [۲]. در این مقاله، ضریب اهمیت بار  $A_i^k$  کلیه بارهای سیستم دو در نظر گرفته می شود ( $A_i^k = 2$ ).

بنابراین، سود متصدیان تولید از رابطه زیر به دست می آید:

$$f_2 = \sum_{i=1}^{n_G} R_{GENCO} - \sum_{i=1}^{n_G} C_{GENCO} - \sum_{i=1}^{n_B} C_{EPNS} \quad (6)$$

که در این رابطه،  $R_{GENCO}$  درآمد متصدی تولید بر حسب دلار بر ساعت،  $C_{GENCO}$  هزینه هر متصدی تولید بر حسب دلار بر ساعت و  $C_{EPNS}$  هزینه مقدار توان تأمین نشده بر حسب دلار بر ساعت می باشند.  $n_G$  و  $n_B$  به ترتیب برابر با تعداد متصدیان تولید و تعداد شینه‌های از سیستم می باشند که بار مصرفی بر روی آنها قرار دارد.

### الگوریتم PSO و تابع هدف مساله

الگوریتم PSO از جمله الگوریتم‌های تکاملی است که از مدل‌های واقعی در طبیعت الهام گرفته شده است. این الگوریتم با شروع از یک گروه از جواب‌های تصادفی برای یافتن جواب بهینه در فضای مساله با به روز کردن موقعیت ذرات به جستجو می پردازد. هر ذره به صورت چند بعدی با دو مقدار مشخص که معرف وضعیت مکانی و سرعت مربوط به بعد  $d$  از آن است تعریف می شود [۶]. در هر مرحله از حرکت جمعیت هر ذره با دو مقدار بهترین، به روز می شود. اولین مقدار، بهترین جواب از لحاظ شایستگی است که تاکنون برای هر ذره به طور جداگانه به دست آمده است. دومین مقدار، بهترین مقداری است که تاکنون توسط تمام ذره‌ها در میان جمعیت به دست آمده است. بعد از یافتن مقادیر هر ذره، سرعت و مکان جدید به دست می آید.

با توجه به مزایای الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات در مساله مورد نظر از جمله سریع بودن این روش بهینه سازی نسبت به سایر روش‌های بهینه سازی و عدم نیاز به عملیات سنگین ریاضی از جمله گرادیان گیری و در نتیجه برخورداری از بار محاسباتی قابل قبول و همگرایی نسبتاً سریع این روش نسبت به سایر روش‌های بهینه سازی می توان اشاره کرد و با توجه به اهمیت زمان در بحث بارزدایی خصوصاً بارزدایی فرکانسی که در مساله مورد نظر به آن پرداخته شده است می توان اهمیت این موضوع دو چندان گردد.

بنابراین، با در نظر گرفتن الگوریتم اجتماع ذرات، تابع هدف نهایی مساله به صورت زیر می باشد:

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_{i \text{ shed}} = L_D \quad (7)$$

$$\text{Maximize} \left\{ \sum w_1 \frac{f_1}{f_1^{\max}} + w_2 \frac{f_2}{f_2^{\max}} \right\} \quad (8)$$

که در این روابط  $L_D$  میزان کل بارزدایی لازم جهت حفظ پایداری فرکانسی در سیستم است که مجموع بارزدایی بر روی کل باس بارهای سیستم از قسمت قبل به دست می‌آید. ضرایب  $w_1$  و  $w_2$  با استفاده از دانش تخصصی و بر اساس تجربه تعیین می‌گردند.  $f_1^{\max}$  کمینه مقدار ممکن هزینه گرفتگی خطوط هنگام بارزدایی می‌باشد که با توجه به رابطه (۴) این مقدار به دست می‌آید و  $f_2^{\max}$  بیشترین سود قابل حصول برای هر متصدی تولید با در نظر گرفتن هزینه‌های ناشی از جریمه مقدار توان تأمین مرتبط با وقوع یک پیشامد در سیستم قدرت می‌باشد که با توجه به رابطه (۶) به دست می‌آید.

### محدودیت‌های مساله

محدودیت‌های بهره‌برداری این مساله بهینه‌سازی به صورت روابط (۷) تا (۱۴) می‌باشند:

$$P_{G,i}^c - (P_{D,i}^c - \Delta P_{D,i}^c) = \sum_{i=1}^{n_B} |V_i^c| |V_j^c| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i^c + \delta_j^c) \quad (9)$$

$$Q_{G,i}^c - (Q_{D,i}^c - \Delta Q_{D,i}^c) = - \sum_{i=1}^{n_B} |V_i^c| |V_j^c| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i^c + \delta_j^c) \quad (10)$$

که در این رابطه  $P_{G,i}^c$  و  $Q_{G,i}^c$  بیانگر توان حقیقی و توان راکتیو تولیدی ژنراتور در شینه  $i$ ام در حالت خروج یکی از اجزای سیستم قدرت و  $\Delta P_{D,i}^c$  و  $\Delta Q_{D,i}^c$  بیانگر مقدار حذف بار اکتیو و راکتیو در شینه  $i$ ام در حالت خروج یکی از اجزای سیستم قدرت بر حسب مگاوات و مگاوار،  $V_i^c$  ولتاژ شینه  $i$ ام در حالت خروج یکی از اجزای سیستم قدرت بر حسب ولت،  $Y_{ij}$  ادمیتانس خط  $ij$  بر حسب اهم،  $\theta_{ij}$  زاویه ادمیتانس خط  $ij$ ،  $\delta_i^c$  زاویه ولتاژ در شینه  $i$ ام در حالت خروج یکی از اجزای سیستم قدرت بر حسب ولت می‌باشند.

$$P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i}^c \leq P_{G,i}^{\max} \quad (11)$$

$$Q_{G,i}^{\min} \leq Q_{G,i}^c \leq Q_{G,i}^{\max} \quad (12)$$

که در این رابطه،  $P_{G,i}^{\min}$  و  $P_{G,i}^{\max}$ ،  $Q_{G,i}^{\min}$  و  $Q_{G,i}^{\max}$  به ترتیب بیانگر کمینه و بیشینه مقدار توان حقیقی و راکتیو تولیدی ژنراتور در شینه  $i$ ام بر حسب مگاوات و مگاوار هستند.

$$P_{D,i}^{\min} \leq P_{D,i}^c \leq P_{D,i}^n \quad (13)$$

که در این رابطه،  $P_{D,i}^{\min}$  کمینه مقدار بار تأمین شده توسط سیستم،  $P_{D,i}^n$  بیانگر توان حقیقی مورد نیاز بار در حالت کارکرد عادی در شینه  $i$  ام بر حسب مگاوات می‌باشد. مقدار بارزدایی بین مقدار قبل از وقوع و مقدار از پیش تعیین شده آن محدود گردیده است. این محدودیت توسط رابطه (۷) بیان شده است. بنابراین، بیشینه مقدار بارزدایی در شینه  $i$  ام برابر است با:

$$|S_{ij}^c| \leq |S_{ij}^{\max}| \quad (14)$$

$$P_{D,i}^c \leq P_{D,i}^n - P_{D,i}^{\min} \quad (15)$$

که در این رابطه،  $S_{ij}^c$  بیانگر توان عبوری ظاهری خط  $ij$  در حالت خروج یکی از اجزای سیستم قدرت بر حسب مگاوات آمپر،  $S_{ij}^{\max}$  بیانگر بیشینه توان عبوری ظاهری خط  $ij$  بر حسب مگاوات آمپر هستند.

$$|V_i^{\min}| \leq |V_i^c| \leq |V_i^{\max}| \quad (16)$$

که در این رابطه،  $V_i^{\min}$  بیانگر کمینه مقدار مجاز ولتاژ شینه  $i$  ام بر حسب ولت،  $V_i^{\max}$  بیانگر بیشینه مقدار مجاز ولتاژ شینه  $i$  ام بر حسب ولت می‌باشد [۱]. در نهایت، برای تعیین محل و مقدار بارزدایی در هر یک از بارهای شبکه از الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) استفاده می‌شود.

## مراحل و نتایج شبیه سازی

### مشخصات سیستم تحت مطالعه

جهت بررسی روش بارزدایی ذکر شده از سیستم ۳۹ شینه تغییر یافته استفاده شده است. دیاگرام تک خطی این سیستم به همراه مقدار عرضه و هزینه بارهای قابل پخش و حساس به قیمت در محیط بازار رقابتی برق در شکل (۴) آمده است. شبکه پیشنهادی دارای ۳۹ شین و ۴۶ خط انتقال می‌باشد. این شبکه شامل ۱۰ ژنراتور و ۲۱ بار شامل ۱۸ بار ثابت و ۳ بار قابل پخش و حساس به قیمت است که هریک از بارهای قابل پخش در باس‌های ۲۱،۳ و ۲۸ قرار دارد و در سه بلوک دارای مقادیر ۱۰ و ۲۰ و ۲۰ مگاوات و به ترتیب با هزینه ۱۰۰ و ۵۰ و ۲۰ دلار در بازار برق ارائه می‌شوند. در ابتدا، پیش از بارزدایی، تمام بلوک‌های بارهای قابل پخش در سیستم موجود می‌باشند. سپس بعد از بارزدایی با توجه به بیشینه سود بازیگران بازار برق، مقدار مورد نیاز بار از بارهای ثابت و بارهای حساس به قیمت جدا می‌شود.

میزان عرضه و پیشنهاد قیمت هریک از متصدیان تولید بازار برق رقابتی به صورت جدول (۱) می‌باشد. در شرایط نامی کل توان اکتیو سیستم برابر ۶۳۵۳ مگاوات و کل توان راکتیو سیستم برابر ۱۲۹۷ مگاوار می‌باشد. همچنین حداکثر ظرفیت تولید توان اکتیو سیستم نیز برابر ۷۰۱۹ مگاوات است. مجموع کل بار سیستم برابر ۶۳۰۵ مگاوات می‌باشد که شامل ۶۱۵۵ مگاوات بار ثابت و ۱۵۰ مگاوات بار قابل پخش می‌باشد به طوری که تمامی بارهای قابل پخش در شبکه حضور دارند. مقدار رزرو مطمئن سیستم به صورت ۹۰٪ کل ظرفیت رزرو شبکه در نظر گرفته شده است تا در هنگام وقوع مشکلات احتمالی ناشی از قیود تولید واحدها و انتقال خطوط، رزرو مطمئن در سیستم موجود باشد.

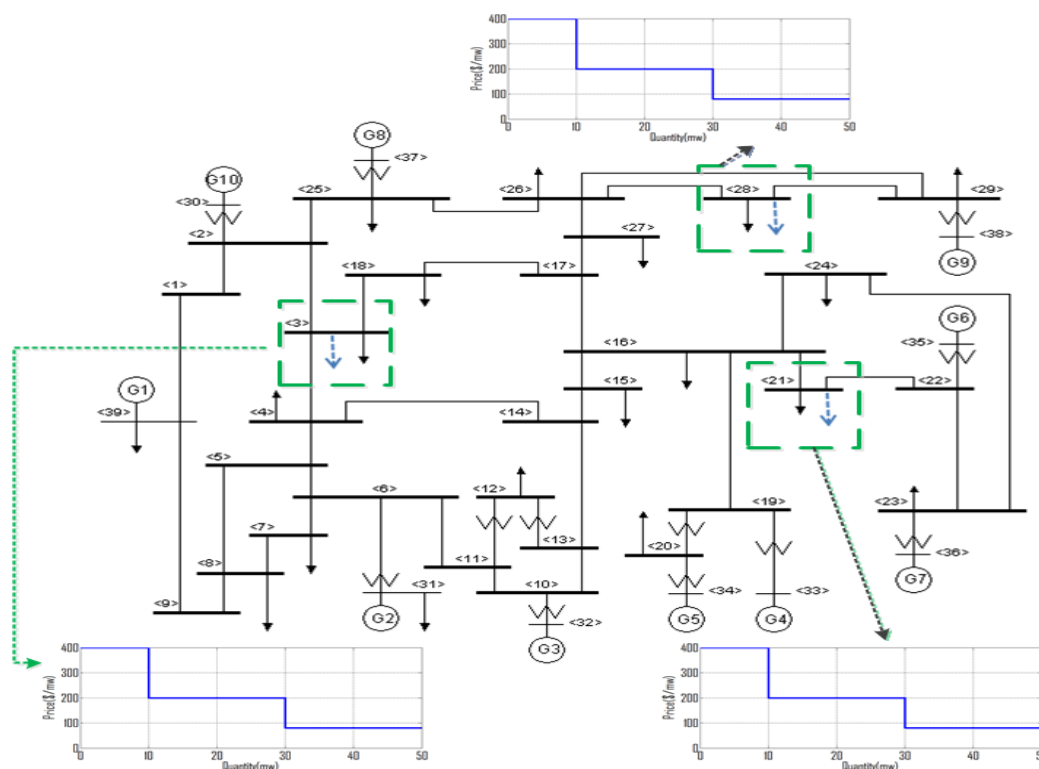
جدول (۱) قیمت‌ها و مقادیر پیشنهاد شده توسط متصدیان تولید

بلوک ۳		بلوک ۲		بلوک ۱		ژنراتور شماره (شینه)
د دلار بر مگاوات ساعت	مگاوات	د دلار بر مگاوات ساعت	مگاوات	د دلار بر مگاوات ساعت	مگاوات	
۹۰	۲۰۰	۴۴	۱۰۰	۲۰	۶۰	(۳۰)
۷۵	۳۰۰	۴۶	۲۰۰	۲۰	۱۸۰	(۳۱)
۶۰	۳۵۰	۴۸	۲۵۰	۲۰	۱۱۸	(۳۲)
۷۰	۳۰۰	۵۰	۲۰۰	۲۰	۱۸۰	(۳۳)
۶۵	۳۰۰	۴۵	۲۰۰	۲۰	۱۰۰	(۳۴)
۸۰	۳۵۰	۴۶	۲۵۰	۲۰	۱۴۸	(۳۵)
۷۵	۳۰۰	۵۵	۲۰۰	۲۰	۱۲۰	(۳۶)
۶۰	۳۰۰	۴۲	۲۰۰	۲۰	۱۴۳	(۳۷)
۷۰	۴۰۰	۵۵	۳۰۰	۲۰	۲۲۰	(۳۸)
۶۰	۴۵۰	۴۵	۳۵۰	۲۰	۲۵۰	(۳۹)

### وقوع پیشامد در شبکه و اجرای حذف بار بهینه فرکانسی

برای بررسی سیستم در شرایط بحرانی و انجام بارزدایی بهینه بحث شده به عنوان آخرین اقدام کنترلی سیستم به بررسی خروج ژنراتور واقع در باس ۳۸ که به عنوان یکی از بزرگترین ژنراتورهای سیستم عمل می‌کند می‌پردازیم. با توجه به خروج ژنراتور ۳۸ در سیستم قدرت مورد بررسی ۸۳۰ مگاوات توان از شبکه خارج شده و مقدار ثابت افت سرعت گاورنر توربین برای هریک از ژنراتورها مقدار ۰,۰۵ در نظر گرفته می‌شود [۱۲]. بنابراین، فرکانس حالت ماندگار سیستم با توجه به رابطه (۱-۳) برابر ۵۶,۴۶ هرتز خواهد شد. با توجه به اینکه بیشترین انحراف فرکانسی مجاز در حالت ماندگار ۰,۲ هرتز در نظر گرفته شده است، بنابراین، با در نظر گرفتن روش ارایه شده جهت قرار دادن فرکانس ماندگار در محدوده مجاز، کمترین میزان بارزدایی صورت می‌گیرد. بدین صورت که در ابتدا با در نظر گرفتن بیشترین مقدار  $d$ ، کمترین میزان

بارزدایی انجام می‌شود و سپس با توجه به هدف مساله که قرار دادن فرکانس سیستم در محدوده مجاز می‌باشد و با کاهش پله‌ای مقادیر  $d$  و به دست آوردن مقدار  $d$  بهینه بارزدایی صورت می‌گیرد تا فرکانس سیستم در محدوده مجاز خود (۵۹٫۸-۶۰) قرار گیرد. بنابراین با توجه به روش ارایه شده، با در نظر گرفتن مقدار  $d$  بهینه برای داشتن حداقل بارزدایی و قراردادن فرکانس ماندگار در محدوده مجاز، مقدار کمیته بارزدایی برابر ۱۹۴ مگاوات می‌باشد که در این حالت، فرکانس حالت ماندگار برابر ۵۸٫۰۵ هرتز خواهد شد.



شکل ۴) شبکه ۳۹ باسه استاندارد IEEE تغییر یافته با در نظر گرفتن بارهای قابل پخش و حساس به قیمت

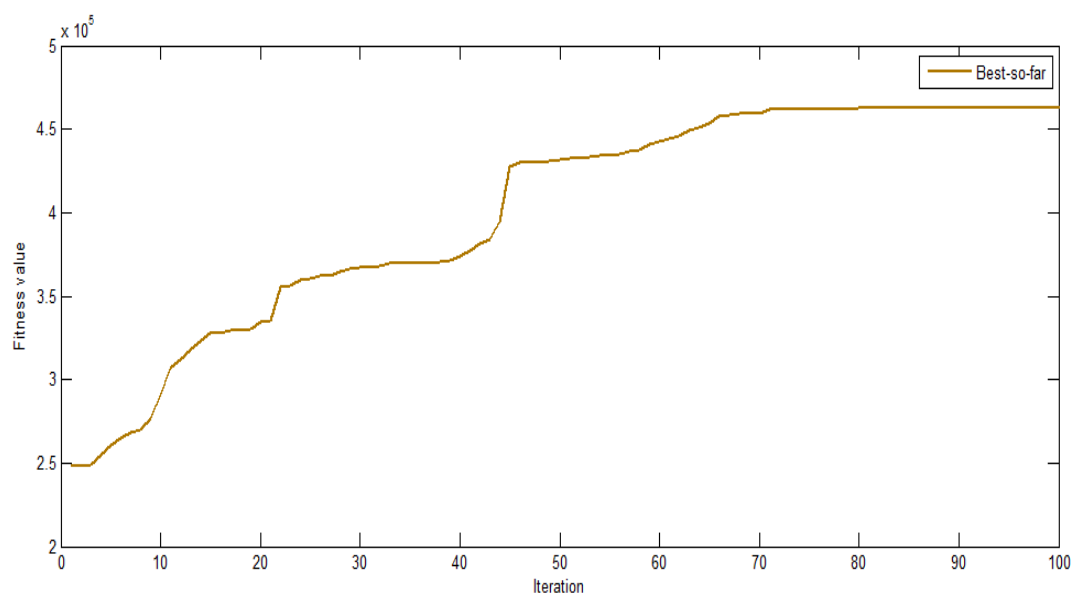
### تعیین محل بارزدایی با توجه به بیشینه سود تابع چند هدفی مساله

بنابراین با توجه به هدف مساله در این قسمت، بارزدایی بهینه بایستی به نحوی صورت گیرد که علاوه بر قرار دادن فرکانس سیستم در حد مجاز بیشینه، سود متصدیان تولید با در نظر گرفتن جریمه ناشی از عدم تولید بامورد نیاز مصرف کنندگان در بازار برق حاصل شود. بنابراین، با توجه به روابط بخش ۲٫۲ و شکل (۵) پس از اجرای تابع هدف مساله بعد از حدود ۸۰ مرحله تکرار، مقدار بهینه جواب به دست می‌آید. لذا پس از انجام بهینه سازی با در نظر گرفتن بیشینه سود

بازیگران بازار برق، مقدار هزینه گرفتگی خطوط در کل بازار برق برابر ۸۶۷۴ دلار بر ساعت و همچنین مجموع درآمد متصدیان تولید برابر ۵۳۴۱۹۰ دلار بر ساعت است که مجموع هزینه آن برابر ۳۲۵۷۲۷ دلار بر ساعت می‌باشد و در نهایت، مجموع سود این متصدیان تولید با در نظر گرفتن هزینه توان تامین نشده بار در هنگام بارزدایی برابر ۱۱۸۸۶۴ دلار بر ساعت است. از مجموع ۱۵۰ مگاوات بارهای قابل پخش و حساس به قیمت بعد از بارزدایی ۹۰ مگاوات از این بارها انتخاب می‌باشد به طوری که وضعیت هر یک از بارهای قابل پخش بعد از بارزدایی در جدول (۲) نمایش داده شده است. بنابراین، میزان کل بارزدایی (شامل بارهای ثابت و قابل پخش) بر روی هر یک از باس‌های سیستم به منظور ایجاد بیشینه سود بازیگران بازار برق و حفظ بازه مناسب فرکانسی سیستم طبق نمودار (۱) می‌باشد.

جدول (۲) پارامترهای الگوریتم PSO

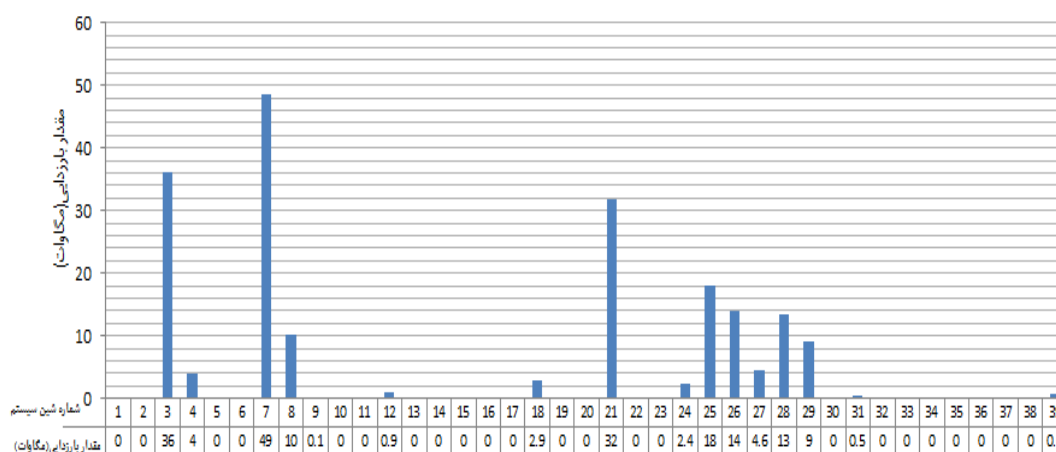
اندازه جمعیت (population size)	۸۰
پارامتر شناخت فردی (C <sub>1</sub> )	۲,۰۵
پارامتر شناخت اجتماعی (C <sub>2</sub> )	۲,۰۵
تعداد تکرارها	۱۰۰



شکل (۵) منحنی همگرایی الگوریتم PSO

جدول ۳) وضعیت بارهای قابل پخش بعد از خروج ژنراتور ۳۸

قیمت‌ها و مقادیر پخش شده در بازار برق / ارائه شده به بازار برق						بار (شماره شینه)
بلوک ۳		بلوک ۲		بلوک ۱		
دولار بر مگاوات ساعت	مگاوات	دولار بر مگاوات ساعت	مگاوات	دولار بر مگاوات ساعت	مگاوات	
-	۲۰	۹۰,۷۴	۲۰	۹۰,۷۴	۱۰	بار ۱
۸۰	۲۰	۲۰۰	۲۰	۴۰۰	۱۰	(۳)
-	۲۰	۸۹,۴۶	۲۰	۸۹,۴۶	۱۰	بار ۲
۸۰	۲۰	۲۰۰	۲۰	۴۰۰	۱۰	(۲۱)
-	۲۰	۹۳,۳۱	۲۰	۹۳,۳۱	۱۰	بار ۳
۸۰	۲۰	۲۰۰	۲۰	۴۰۰	۱۰	(۲۸)



نمودار ۱) میزان بارزدایی بهینه در هریک از باس‌های سیستم ۳۹ با سه پس از خروج ژنراتور واقع در باس ۳۸

### نتیجه گیری

در این مقاله به ارایه روشی جدید جهت بارزدایی فرکانسی در سیستم قدرت با در نظر گرفتن بازار رقابتی برق پرداخته شده است به نحوی که با در نظر گرفتن مقدار فرکانس ماندگار سیستم بعد از وقوع اغتشاش در سیستم قدرت، مقدار حذف بار کمینه به منظور قرار دادن فرکانس ماندگار سیستم در محدوده مجاز، محاسبه شده و سپس با در نظر گرفتن پارامترهای بازار رقابتی برق و در حضور بارهای قابل پخش و حساس به قیمت و قیمت‌های عرضه آنها در بازار برق و با در نظر گرفتن قیمت‌های پیشنهادی متصدیان تولید در بازار برق این کار صورت گرفته تا بتوان علاوه برداشتن سیستم امن از لحاظ قرار گرفتن فرکانس سیستم در محدوده مجاز، بیشترین سود برای متصدیان تولید با توجه به هزینه جریمه ناشی از

عدم تامین توان مورد نیاز مصرف کنندگان و کمترین هزینه گرفتگی خطوط را در سیستم ایجاد کرد. نهایتاً نتایج بر روی شبکه ۳۹ با سه استاندارد تغییر یافته انجام گرفت که نشان دهنده کارا بودن روش پیشنهادی چه از نظر ایجاد سیستم امن و مطمئن و چه از نظر اقتصادی و ایجاد بیشینه سود بازیگران برق در شبکه می‌باشد.

## منابع

- [1] S. Shah, S.M. Shahidehpour, (1989) "A heuristic approach to load shedding scheme", IEEE Transactions on Power Systems . 1421–1429.
- [2] M.M.Hosseini-Bioki, .Rashidinejad, R. Fadaienedjad and H.R. Esmailian(2012) "An application of PSO in Optimal Load Shedding Considering Voltage Stability".Global Conference on Power control and Optimization.
- [3] M.M.Hosseini-Bioki, M.Rashidinejad, A.Abdollahi, (2013) "An implementation of particle swarm optimization to evaluate optimal under-voltage load shedding in competitive electricity markets" Journal of Power Sources 242 122e131.
- [4] H. Bevrani, A. G. Tikdari, T. yama(2010) "An intelligent based power system load shedding design using voltage and frequency information." Int. Conf. on Modeling, Identification and Control ICMIC, Okayama, Japan.
- [5] H.E.Lokay and V.Burtnyk,( 1968)" Application of Underfrequency Relays for Automatic Load Shedding". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. pas-87.
- [6] Krause, T. and Andersson, G. Evaluating, (2006) "congestion management schemes in liberalized electricity markets using an agent-based simulator", in Power Engineering Society General Meeting,. IEEE, p. 8.
- [7] H. Seyedi, M. Sannaye-Pasand and M. R.Dadashzadeh, (2006)"Design and Simulation of an Adaptive Load Shedding Algorithm Using a Real Network", IEEE Power India Conference.
- [8] J. Mechenbier, A. Ellis, R. Curtner, S. Ranade,( 2004)" Design of an under voltage load shedding scheme", in: IEEE Power Engineering Society General Meeting, June, , pp. 1612–1619.
- [9] A.Saffarian, and M.Sanaye-Pasand, (2011) " Enhancement of Power System Stability Using Adaptive Combinational Load Shedding Methods", Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 26, pp. 1010 -1020,.
- [10] A. Abdollahi, M. P Moghaddam, M. Rashidinejad, and M. K. Sheikh-El-Eslami,(2012) "Investigation of Economic and Environmental-Driven Demand Response Measures Incorporating UC", Smart Grid, IEEE Transactions on, vol. 3, pp. 12-25.
- [11] M. sanaye Pasand, H.Seyedi(2007) " New centralized adaptive under frequency loadshedding algorithms. In: Large power engineering system" conference. p. 44–8.
- [12] R.Hooshmand, M. Moazzami, (2012) "Optimal design of adaptive under frequency load shedding using artificial neural networks in isolated power system". Electrical Power and Energy Systems 42 220–228.K. Elissa.

- [13] P. Wang, R. Billinton, (2000) "Optimum load-shedding technique to reduce the total customer interruption cost in a distribution system", IEE Proceeding Generation, Transmission and Distribution 147 . 51–56.
- [14] N. Higashi, and H. Iba,(2003)“Particle swarm optimization with Gaussian mutation”, Int. Swarm Intelligence Symposium, pp.72-9,.
- [15] Bevrani, H (2009) "Robust Power System Frequency Control Springer", New York, USA.
- [16] R. D.Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and R. J. Thomas,(2011) “MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, pp. 12-19.
- [17] M. Montazeri, H. Pourgharibshahi, M. Mohammadian.(2012)” Static voltage stability analysis of IRAN south-east power system using extended CPF method.” International Power system conference.Tehran-IRAN.
- [18] A.Ardiaty,D. ZhaoYang, (2011)“Under Voltage Load Shedding Utilizing Trajectory Sensitivity to Enhance Voltage Stability” Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Australasian.