

## کاهش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان در بازار ظرفیت با بکارگیری منابع مبتنی بر مدیریت مصرف

حسن جلیلی<sup>۱</sup>، محمد کاظم شیخ‌الاسلامی<sup>۲</sup>، محسن پارسامقدم<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

[h.jalili@modares.ac.ir](mailto:h.jalili@modares.ac.ir)<sup>1</sup>, [aleslam@modares.ac.ir](mailto:aleslam@modares.ac.ir)<sup>2</sup>, [parsa@modares.ac.ir](mailto:parsa@modares.ac.ir)<sup>3</sup>

**چکیده:** بازار ظرفیت یکی از موفق‌ترین سازوکارهای تامین کفایت سیستم قدرت است که در آن واحدهای تولیدی، ظرفیت خود را به صورت رقابتی به فروش می‌رسانند. هزینه‌های قابل توجه سرمایه‌گذاری، دوره‌های ساخت طولانی‌مدت و کمبود رقابت کافی میان واحدهای تولیدی در برخی از بخش‌های شبکه، از جمله دلایلی هستند که بکارگیری منابع مبتنی بر مدیریت مصرف در بازار ظرفیت را توجیه می‌کنند. از اینرو در این مقاله تلاش شده است تا با بکارگیری منابع مذکور در بازار ظرفیت از قدرت بازار تولیدکنندگان و هزینه‌های قابلیت‌اطمینان شبکه کاسته شود. هزینه‌های قابلیت‌اطمینان به صورت مجموع هزینه‌های پرداختی به تولیدکنندگان متناسب با قیمت ظرفیت در شین و هزینه پرداختی به بارهای مشارکت‌کننده در بازار ظرفیت به ازای میزان مشارکت آنها محاسبه شده است. علاوه بر این، میزان قدرت بازار بازیگران نیز با بهره‌گیری از شاخص MRCI سنجیده شده است. روش پیشنهادی در شبکه ۵۷ شین استاندارد IEEE مورد آزمون قرار گرفته و نتایج گزارش شده است.

**واژه‌های کلیدی:** بازار ظرفیت، بکارگیری منابع مبتنی بر مدیریت مصرف، قدرت بازار، هزینه‌های قابلیت‌اطمینان

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۹/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۶

نام نویسنده مسئول: دکتر محمد کاظم شیخ‌الاسلامی

نشانی نویسنده مسئول: تهران - بزرگراه جلال آل احمد - پل نصر - دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

## ۱- مقدمه

بازار ظرفیت علاوه بر ظرفیت نیروگاه‌ها، برنامه‌های مدیریت و کنترل بار (منابع مبتنی بر مدیریت مصرف) نیز به عنوان راهکار مکمل در تامین ظرفیت می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. از اینرو با انعقاد قراردادهای بلندمدت با شرکت‌های توزیع و صنایع بزرگ به منظور کاهش یا قطع بار آنها برای تضمین تامین ظرفیت، می‌توان از هزینه‌های هنگفت ساخت نیروگاه‌ها کاسته و شاخص‌های مطلوب قابلیت‌اطمینان را نیز تحقق بخشید [۲]. حضور بار در بازار ظرفیت مزایای زیر را به دنبال خواهد داشت:

- افزایش تعداد رقبا و در نتیجه افزایش کارایی بازار ظرفیت.
- ایجاد رقابت کافی و در نتیجه آن کاهش هزینه‌های ظرفیت در مناطقی که خطوط ارتباطی آنها دچار تراکم است.
- همواره در دسترس بودن منابع ظرفیت بار بر خلاف منابع ظرفیت تولید که دارای دوره‌های زمانی طولانی‌مدت ساخت هستند.
- کم‌تر بودن هزینه‌های ثابت مشارکت بار در بازار ظرفیت نسبت به هزینه‌های ثابت سمت تولید و در نتیجه آن کاهش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان.

از سوی دیگر یکی از مسائل مهمی که بهره‌بردار شبکه باید به آن توجه ویژه داشته باشد وجود قدرت بازار است. قدرت بازار وقتی بوجود می‌آید که یک تولیدکننده توانایی تغییر قیمت را فراتر از حد رقابتی آن و در مدت نسبتاً طولانی، به نفع خود داشته باشد [۳]. این توانایی در بازار ظرفیت زمانی رخ می‌دهد که مسیرهای انتقال در بخشی از سیستم دچار تراکم شود و بهره‌بردار مستقل سیستم مجبور به خرید بخشی از ظرفیت یک تولیدکننده خاص باشد.

تحقیقات بسیار گسترده‌ای در زمینه بکارگیری بار در مدیریت سیستم قدرت و همچنین مدیریت تراکم صورت گرفته است. در زمینه بکارگیری بار مراجع [۴-۵] به ارزیابی تاثیر بکارگیری برنامه‌های پاسخگویی بار در کاهش تلفات پرداخته‌اند. در این مراجع با استفاده از انتقال بار به زمان‌های کم‌باری از تلفات خطوط شبکه در پرباری کاسته شده است. در مرجع [۶] تاثیر برنامه‌های پاسخگویی بار بر قابلیت اطمینان سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این مقاله حاکی از تاثیر مثبت پاسخگویی بار بر قابلیت اطمینان سیستم است. مراجع [۷-۹] اثر برنامه‌های پاسخگویی بار بر تامین رزرو چرخان را از دو دیدگاه اقتصادی و قابلیت اطمینان مورد ارزیابی قرار داده‌اند. هزینه رزرو به عنوان شاخص دیدگاه اقتصادی و شاخص‌های EENS<sup>۱</sup> و LOLP<sup>۲</sup> به عنوان شاخص‌های قابلیت اطمینان در دو سناریوی اجرای برنامه پاسخگویی بار و عدم اجرای آن با هم مقایسه شده‌اند. نتیجه-

سرمایه‌گذاران به منظور توسعه سرمایه‌گذاری در توسعه تولید نیاز به کسب درآمد به منظور پوشش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ثابت و کسب سود دارند. این درآمد در طول سال گاهی منجر به پوشش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ثابت آنها نمی‌شود، از اینرو در زمان‌های اوج بار، قیمت برق جهش‌های شدیدی را تجربه خواهد کرد. از طرفی از آنجا که این افزایش قیمت نارضایتی مشترکین را به دنبال دارد، ممکن است با عکس‌العمل مشترکین این افزایش قیمت محقق نشده و منجر به کاهش انگیزه در سرمایه‌گذاری در توسعه تولید و قابلیت اطمینان سیستم شود. از اینرو سرمایه‌گذاری در توسعه تولید نیاز به محرک‌هایی دارد تا با پوشش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ثابت سرمایه‌گذاران زمینه برای بهبود قابلیت‌اطمینان سیستم و تامین بار فراهم شود. بنابراین پایایی سیستم نیازمند فراهم‌شدن محرک‌های لازم به منظور توسعه سرمایه‌گذاری در تولید است که از این محرک‌ها به عنوان سازوکارهای ظرفیت نام برده می‌شود [۱]. تعریفی که از ظرفیت در مرجع [۲] ارائه شده است عبارتست از "مجموع میزان مگاوات نصب‌شده آماده توسط نیروگاه‌ها با لحاظ‌کردن مسئله تعمیرات و مگاوات قابل پیش‌بینی برای نصب در بازه زمانی بلندمدت". بنابراین باید برنامه‌ریزی لازم برای تامین ظرفیت مورد نیاز برای تامین بار با شاخص مناسب قابلیت‌اطمینان و از طریق سازوکارهای رقابتی انجام گیرد، بطوریکه بهره‌بردار شبکه برای اجرای بازار انرژی با مشکل خاصی روبرو نشده و با ارائه انواع خدمات جانبی بتواند امنیت شبکه را به لحاظ تامین انرژی حفظ کند. بنابراین مقدار مطلوب ظرفیت باید حداقل برابر با مجموع پیک بار در بازه زمانی مورد نظر و مقدار حاشیه ذخیره برنامه‌ریزی شده باشد، بطوریکه علاوه بر تامین بار، شاخص قابلیت‌اطمینان شبکه نیز ارضا گردد.

همانطور که می‌دانیم احداث و بهره‌برداری از نیروگاه‌ها، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ثابت بسیار بالایی را به سرمایه‌گذاران تحمیل می‌کند، که این هزینه‌ها عمدتاً بدون جبران باقی می‌مانند. از اینرو انگیزه‌های مالی موجود در سازوکار ظرفیت باید به گونه‌ای باشد که سرمایه‌گذاران به بازگشت هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ثابت خود امیدوار باشند. در واقع سازوکار ظرفیت باید به گونه‌ای طراحی شود که زمینه‌های لازم برای بازگشت این هزینه‌ها فراهم شود [۲]. یکی از این سازوکارها که در بازارهای واقعی نیز اجرا شده است، بازار ظرفیت است که در آن نیروگاه‌ها ظرفیت‌های مد نظر خود را به صورت رقابتی به بهره‌بردار سیستم ارائه می‌دهند. به دلیل طولانی‌مدت بودن احداث نیروگاه‌ها، در

می‌گویند که لازم است تا آن واحد برای برقراری تمام قیود شبکه تولید کند. مسئله بدست آوردن ظرفیت اجباراً در مدار شبکه را می‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی کرد [۳].

$$\text{Min } F = \sum_{i=1}^n P_{MR_i} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } e^T (P_g - P_d) = 0 \quad (2)$$

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (3)$$

$$-Pl_{\max} \leq F(P_g - P_d) \leq Pl_{\max} \quad (4)$$

در روابط (۱) تا (۴)  $P_{MR_i}$  میزان ظرفیت اجباراً در مدار ژنراتور  $i$  است، به عبارت دیگر این میزان ظرفیت، ظرفیتی است که در صورتیکه توسط ژنراتور  $i$  تولید نشود، بار تامین نشده یا قیود شبکه نقض خواهند شد. بنابراین هدف، کاهش میزان ظرفیت ژنراتورهایی است که شبکه برای برقرار ماندن قیودش به آنها وابسته است. این میزان ظرفیت، نشان دهنده قدرت بازار ژنراتورهای شبکه است. ماتریس  $e$  برداری با عناصر یک،  $P_g$  بردار توان تولیدی در شین‌های مختلف،  $P_d$  بردار توان مصرفی در شین‌های مختلف،  $Pl_{\max}$  بردار حداکثر توان انتقالی مجاز برای خطوط و  $F$  ماتریس ضرایب توزیع<sup>۸</sup> می‌باشد. رابطه (۲) قید برابری تولید و مصرف کل در شبکه، رابطه (۳) قید توان تولیدی واحدها و رابطه (۴) قید توان انتقالی خطوط را نشان می‌دهند. این مسئله از نوع برنامه‌ریزی خطی<sup>۹</sup> است و به سادگی با استفاده از روش‌های موجود قابل حل می‌باشد. واحدهای اجباراً در مدار به منظور تامین ظرفیت مورد نظر بهره‌بردار شبکه، معمولاً قیمت بیشتری نسبت به قیمت رقابتی ظرفیت، به بهره‌بردار شبکه تحمیل می‌کنند [۱۷]. منحنی قیمت‌دهی واحدهای دارای قدرت بازار در این مقاله مطابق شکل (۱) است که بیشتر از قیمت رقابتی ظرفیت است.

### ۳- مدل‌سازی بکارگیری بار در بازار ظرفیت

در این مقاله بکارگیری بار در بازار ظرفیت به صورت کاهش استاتیکی بار در شین‌های شبکه مدل شده است. بکارگیری بار در بازار ظرفیت دارای دو اثر کاهش بر هزینه‌های قابلیت‌اطمینان است؛ کاهش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان با کاهش قیمت رقابتی ظرفیت و کاهش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان با کاهش قدرت بازار در بازار ظرفیت. با توجه به شکل (۲)، رابطه (۵) کاهش قیمت رقابتی ظرفیت در بازار ظرفیت در اثر کاهش بار را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه هدف مقاله نشان‌دادن حداقل میزان صرفه‌جویی در هزینه‌های قابلیت‌اطمینان با بکارگیری بار

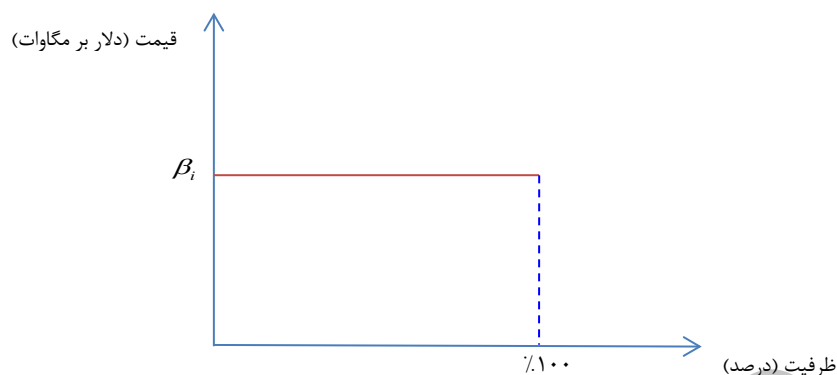
گیری‌ها نقش برنامه‌های پاسخگویی بار در بازارهای رقابتی را به خوبی نشان می‌دهند. در تمامی سناریوها وجود برنامه‌های پاسخگویی بار باعث بهبود شرایط شده است. علاوه بر برنامه‌های پاسخگویی بار<sup>۳</sup> به مدیریت تراکم نیز در مراجع اشاره شده است که در زیر آورده شده است.

در زمینه مدیریت تراکم نیز مرجع [۱۰] به بررسی تاثیر حضور منابع تولید پراکنده در مدیریت تراکم پرداخته است و تاثیر مثبت این منابع، در کاهش تراکم خطوط انتقال در این مرجع به اثبات رسیده است. مراجع [۱۱-۱۲] با استفاده از برنامه‌ریزی مجدد واحدها به مدیریت تراکم پرداخته‌اند. در مرجع [۱۱] با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی به یافتن بهترین برنامه‌ریزی مجدد، به منظور مدیریت تراکم با کمترین انحراف از برنامه‌ریزی قبلی پرداخته شده است. در مرجع [۱۲] نیز برنامه‌ریزی مجدد توان‌های اکتیو و راکتیو به منظور مدیریت تراکم صورت گرفته است. در مرجع [۱۳] با استفاده از ادوات FACTS<sup>۴</sup> و قطع بار در بازار قراردادهای دوجانبه به مدیریت تراکم و کاهش هزینه‌های برق پرداخته‌اند. در مراجع [۱۴-۱۶] نیز مکان بهینه نصب ادوات FACTS به منظور مدیریت تراکم در شبکه برق، معرفی شده است.

در این مقاله به عنوان نوآوری کوشیده شده است تا با استفاده از بکارگیری منابع مبتنی بر مدیریت مصرف، راهکاری برای کاهش قدرت بازار در بازار ظرفیت پیشنهاد و از قیمت ظرفیت و هزینه‌های قابلیت‌اطمینان کاسته شود. در بخش ۲ شاخص ظرفیت اجباراً در مدار<sup>۵</sup>، به منظور محاسبه قدرت بازار توان اکتیو معرفی شده است. بخش ۳ به معرفی و مدل‌سازی بکارگیری بار در شبکه برای کاهش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان پرداخته است. روش حل مسئله، مطالعه موردی، نتایج شبیه‌سازی‌ها و نتیجه‌گیری نیز به ترتیب در بخش‌های ۴ تا ۷ بیان شده است.

### ۲- شاخص ظرفیت اجباراً در مدار

در این مقاله برای محاسبه افزایش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان فراتر از حد رقابتی آن، از شاخص بازار محور قدرت بازار استفاده شده است. این قدرت معمولاً در زمانهایی اتفاق می‌افتد که بهره‌بردار مستقل سیستم برای برقراری قیود شبکه، مجبور به خرید بخشی از توان یک یا چند واحد تولیدی باشد. در این تحقیق برای اندازه‌گیری قدرت بازار از شاخص ظرفیت اجباراً در مدار استفاده شده است. از جمله مزایای این شاخص نسبت به شاخص‌های HHI<sup>۶</sup> و LI<sup>۷</sup> اینست که این شاخص تغییرات سیستم و شرایط مختلف بار را در محاسبه قدرت بازار لحاظ می‌کند. ظرفیت اجباراً در مدار یک واحد، به حداقل توان اکتیو تولیدی

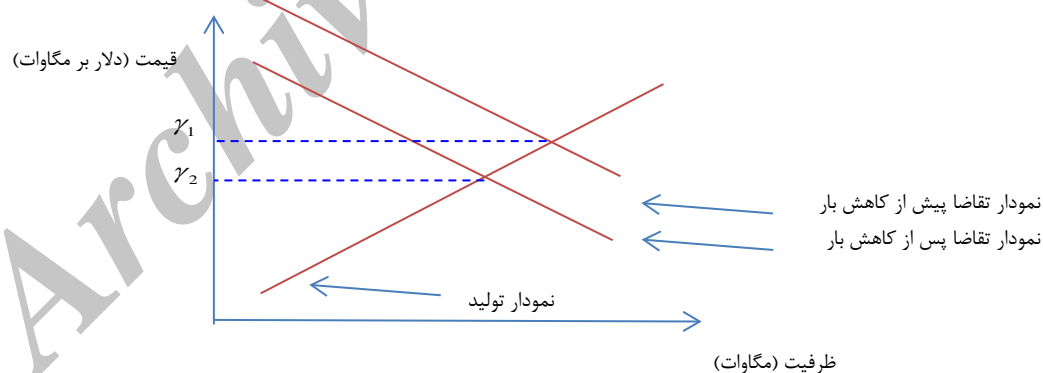


شکل ۱. منحنی قیمت‌دهی واحدهای دارای قدرت بازار در بازار ظرفیت

در این رابطه  $\gamma_2$  قیمت رقابتی ظرفیت پس از بکارگیری بار،  $\gamma_1$  قیمت رقابتی ظرفیت پیش از بکارگیری بار،  $P_{DSM}$  ظرفیت بار به منظور مشارکت در بازار ظرفیت و  $P_{Load}$  کل بار شبکه است. میزان کاهش قدرت بازار در بازار ظرفیت نیز با استفاده از روابط (۱) تا (۴) قابل محاسبه است.

است، درصد کاهش قیمت در اثر کاهش بار با درصد کاهش بار برابر و حداقل قیمت پیشنهادی سمت بار نیز بیشتر از قیمت رقابتی ظرفیت در نظر گرفته شده است.

$$\gamma_2 = \gamma_1 \left(1 - \frac{P_{DSM}}{P_{Load}}\right) \quad (5)$$

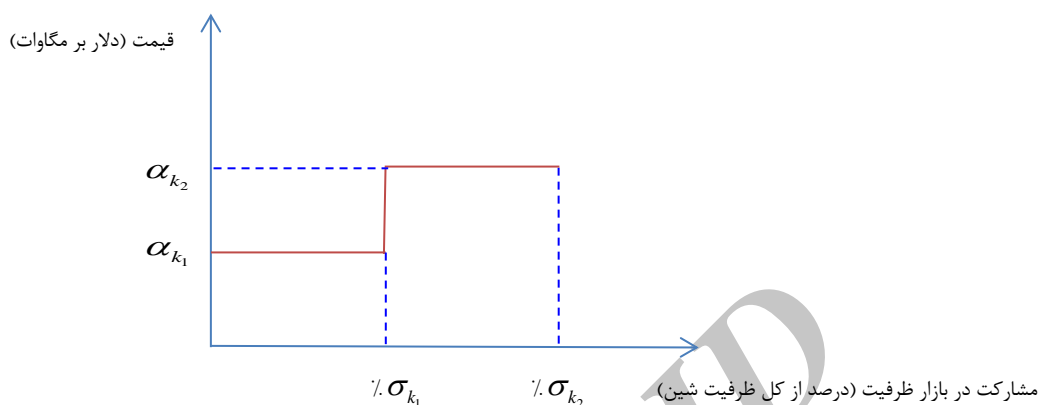


شکل ۲. کاهش قیمت رقابتی ظرفیت در بازار ظرفیت با کاهش بار

پاسخگویی به ظرفیت درخواستی، تعمیرات و نگهداری تجهیزات نصب‌شده و هزینه‌های اولیه برنامه‌های بازدهی انرژی نظیر عایق‌سازی حرارتی-برودتی ساختمان‌ها یا هزینه افزایش کارایی فرایندهای صنعتی است. هدف سمت تقاضا از مشارکت در بازار ظرفیت، علاوه بر پوشش هزینه‌های اولیه و ثابت خود، کسب حداکثر سود است اما از آنجا که این هدف با رونق کسب و کار در توسعه

با توجه به اینکه هر چه مشارکت بار در بازار ظرفیت بیشتر باشد از رفاه آنها کاسته شده و هزینه‌های آنها نیز افزایش خواهد یافت، قیمت پیشنهادی آنها به صورت شکل (۳) و افزایشی در نظر گرفته شده است. مشارکت بار در بازار ظرفیت به دو صورت بازدهی انرژی و پاسخگویی بار می‌تواند صورت گیرد که شامل هزینه‌های اولیه و ثابت نظیر هزینه بکارگیری سیستم‌های مخابراتی، ایجاد اتوماسیون در

تولید که یکی از اهداف ایجاد بازار ظرفیت است در تناقض است، در بردار مستقل سیستم محدود و بالاتر از قیمت رقابتی ظرفیت این مقاله قیمت پیشنهادی سمت تقاضا در بازار ظرفیت توسط بهره- تولیدکنندگان در نظر گرفته شده است.



شکل ۳. قیمت پیشنهادی ظرفیت بار  $k$  ام به منظور مشارکت در بازار ظرفیت

بازار ظرفیت همانطور که می‌دانیم محل خرید و فروش ظرفیت است. تامین ظرفیت پیشنهادی خود برای بهره‌بردار مستقل سیستم می- فروشندگان ظرفیت تولیدکنندگان توان و بارها و خریدار ظرفیت نیز بهره‌بردار مستقل سیستم است. در بازار ظرفیت بر عکس آنچه که در بازار ذخیره رخ می‌دهد، هدف از خرید و فروش ظرفیت، تولید توان نیست بلکه تنها اطمینان از وجود ظرفیت مورد نیاز مصرف‌کنندگان، برای اطمینان از کفایت سیستم در تامین بار است. هر چند که این بازار منجر به تولید توان نمی‌شود اما قابلیت ارائه‌دهندگان ظرفیت در

تامین ظرفیت پیشنهادی خود برای بهره‌بردار مستقل سیستم می- بایست اثبات شود تا بهره‌بردار مستقل سیستم اطمینان حاصل کند که فروشنده ظرفیت توانایی ارائه ظرفیت پیشنهادی خود را دارد. در این مقاله قیمت‌گذاری بازار ظرفیت از نوع یکنواخت [۱۸] و دوره اجرای این بازار همانند بازار PJM<sup>۱</sup>، سه سال در نظر گرفته شده است [۱۹-۲۰]. هزینه قابلیت‌اطمینان از دیدگاه بهره‌بردار مستقل سیستم از روابط (۶) تا (۸) محاسبه شده است.

$$CC = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot P_{MR_i} + \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot P_{DSM_k} + \gamma_1 \cdot \left(1 - \frac{P_{DSM}}{P_{Load}}\right) \cdot (P_{Load} + P_{Loss} - P_{MR} - P_{DSM}) \quad (6)$$

$$P_{MR} = \sum_{i=1}^n P_{MR_i} \quad (7)$$

$$P_{DSM} = \sum_{k=1}^n P_{DSM_k} \quad (8)$$

در این روابط  $i$  مجموعه تولیدکنندگانی است که دارای قدرت بازار هستند،  $P_{MR_i}$  ظرفیت دارای قدرت بازار این واحدها و قیمت پیشنهادی آنها برای ظرفیت خود مطابق شکل (۱) است. میزان

$$Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max} \quad (9)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (10)$$

ظرفیت دارای قدرت بازار واحدها نیز از روابط (۱) تا (۴) قابل محاسبه است.  $k$  مجموعه بارهایی است که در بازار ظرفیت شرکت می‌کنند،  $P_{DSM_k}$  ظرفیت پیشنهادی آنها و قیمت پیشنهادی آنها

تولیدکنندگان با حفظ قیود مسئله قادر به تامین بخشی از بار شبکه نباشند، تولیدکننده مذکور به میزان بار تامین نشده دارای قدرت بازار است. مطابق با همین روش مجموع قدرت بازار تمامی تولیدکنندگان محاسبه و به عنوان قدرت بازار شبکه نامیده می‌شود. انتخاب شین مناسب به منظور بکارگیری بار در مرحله قبل، سبب کاهش قدرت بازار شبکه خواهد شد. در ادامه با تعیین قیمت پیشنهادی هر یک از واحدهای دارای قدرت بازار از جدول (۲)، به محاسبه مبلغ پرداختی از سوی بهره‌بردار شبکه به واحدهای دارای قدرت بازار می‌پردازیم. مجموع مبلغ پرداختی از سوی بهره‌بردار مستقل شبکه به واحدهای دارای قدرت بازار برابر با مجموع حاصلضرب قیمت پیشنهادی این واحدها در میزان ظرفیت دارای قدرت بازار آنهاست. در گام بعد قیمت پیشنهادی بار به منظور مشارکت در بازار ظرفیت با استفاده از جدول (۳) تعیین شده و با استفاده از آن مبلغ پرداختی از سوی بهره‌بردار شبکه به بارهای مشارکت‌کننده در بازار ظرفیت محاسبه می‌شود. مجموع مبلغ پرداختی از سوی بهره‌بردار مستقل شبکه به بارهای مشارکت‌کننده در بازار ظرفیت برابر با مجموع حاصلضرب قیمت پیشنهادی این بارها در میزان ظرفیت مشارکت آنهاست. به هر میزان که ظرفیت بارهای مشارکت‌کننده در بازار ظرفیت در کاهش قدرت بازار شبکه و قیمت رقابتی موثر باشد، از آنها خریداری خواهد شد. قیمت رقابتی ظرفیت نیز پس از مشارکت بار با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شده و با استفاده از آن مبلغ پرداختی از سوی بهره‌بردار شبکه به واحدهای رقابتی تعیین می‌شود. مجموع مبلغ پرداختی از سوی بهره‌بردار مستقل شبکه به واحدهای رقابتی برابر با مجموع حاصلضرب قیمت رقابتی ظرفیت پس از مشارکت بار در توان تامین نشده است. توان تامین نشده نیز از تفاضل مجموع بار شبکه و تلفات با مجموع بار مشارکت‌کننده در بازار ظرفیت و توان دارای قدرت بازار محاسبه می‌شود. در نهایت با استفاده از رابطه (۶) هزینه قابلیت-اطمینان به دست خواهد آمد. این رابطه مجموع مبلغ پرداختی از سوی بهره‌بردار مستقل سیستم به واحدهای رقابتی، واحدهای دارای قدرت بازار و بارهای مشارکت‌کننده در بازار ظرفیت را نشان می‌دهد.

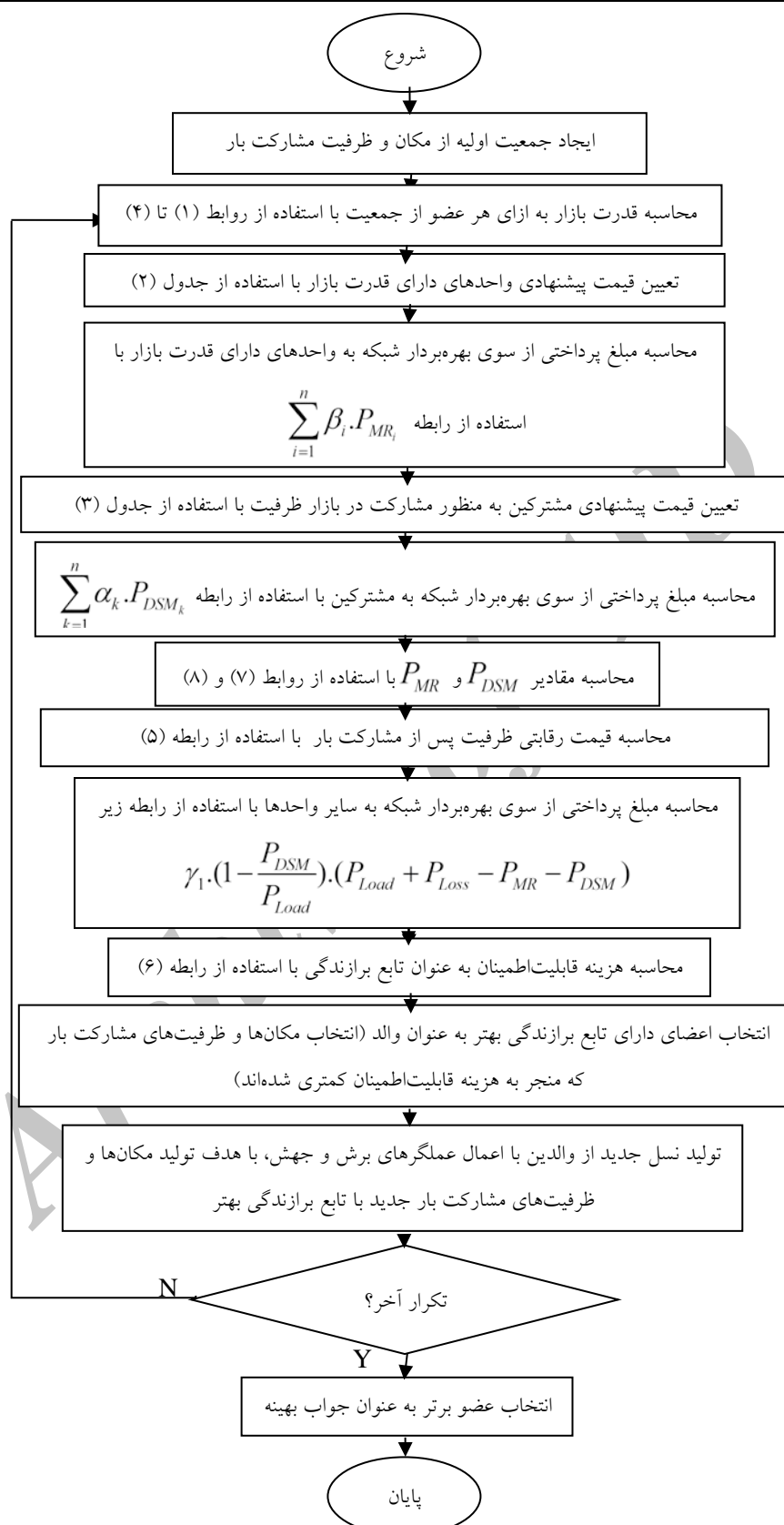
$$0 \leq P_{DSM_k} \leq \frac{\sigma_{k_2}}{100} \cdot P_{Load_k} \quad (11)$$

$$\alpha_{k_1} \geq \gamma_1 \quad (12)$$

رابطه (۹) قید توان راکتیو تولیدی واحدها، رابطه (۱۰) قید ولتاژ شین‌ها، رابطه (۱۱) قید مشارکت بار شین‌ها و رابطه (۱۲) قید پیشنهاد قیمت ظرفیت بار شین‌ها در بازار ظرفیت را نشان می‌دهند. به دلیل اینکه در بازار ظرفیت کفایت سیستم تامین می‌شود و عبارت دیگر می‌بایست بازای توان مصرفی شبکه، قابلیت تولید توان در شبکه تضمین شود، میزان ارائه ظرفیت بار شین‌ها توسط رابطه (۱۱) به  $\sigma_{k_2}$  درصد از بار کل آن شین محدود شده است تا ضمانت تولید بازای ظرفیت پیشنهادی وجود داشته باشد. از سوی دیگر با توجه به اینکه یکی از اهداف بازار ظرفیت پوشش هزینه‌های ثابت واحدهای تولیدی به منظور حفظ انگیزه آنها برای توسعه تولید است، قیمت پیشنهادی مصرف‌کنندگان توسط رابطه (۱۲) محدود شده است تا مشارکت آنها از رونق فضای کسب و کار در توسعه تولید نکاهد.

#### ۴- روش حل مسئله

روندنامای حل مسئله در شکل (۴) ارائه شده است. مطابق با روندنامای حل مسئله، ابتدا جمعیت اولیه را ایجاد می‌کنیم. جمعیت اولیه شامل مجموعه‌ای است که هر عضو آن دارای دو عدد است که بیان‌کننده مکان و ظرفیت مشخصی برای بکارگیری بار در بازار ظرفیت است، به عبارت دیگر عدد اول هر عضو از جمعیت بیان‌کننده شین بکارگیری بار و عدد دوم بیان‌کننده درصد ظرفیت ارائه شده توسط بار نسبت به کل ظرفیت شین به منظور مشارکت در بازار ظرفیت است. در روند حل مسئله انتخاب هر یک از این اعضا به مفهوم بکارگیری درصد مشخصی از ظرفیت هر شین به منظور مشارکت در بازار ظرفیت است. در قدم بعد با حل معادلات (۱) تا (۴) به محاسبه قدرت بازار تولیدکنندگان شبکه می‌پردازیم. به منظور محاسبه قدرت بازار هر یک از تولیدکنندگان، توان تولیدی آن تولیدکننده را صفر کرده و توانایی بقیه تولیدکنندگان در تامین بار شبکه با حفظ قیود مسئله را ارزیابی می‌کنیم. در صورتیکه بقیه



شکل ۴: روندنمای حل مسئله

شامل یک یا چند مکان و ظرفیت بهینه مشارکت بار در بازار ظرفیت باشد. از آنجایی که محاسبات به صورت پروبیت انجام می‌شود مقدار توان مرجع ۱۰۰ مگاوات آمپر در نظر گرفته شده است.

### ۵- مطالعه موردی

شبکه مورد مطالعه، شبکه ۵۷ شین استاندارد IEEE است. مشخصات الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این مقاله در جدول (۱) و سایر مشخصات این مسئله نیز در جداول (۲) و (۳) آورده شده است. قیمت رقابتی ظرفیت ( $\gamma_1$ ) نیز ۱۲ دلار در نظر گرفته شده است.

سپس الگوریتم ژنتیک در ادامه روند بهینه‌سازی، اعضای برتر (عضایی که مقدار تابع هدف کمتری داشته باشند) را به عنوان والد انتخاب کرده و با اعمال عملگرهای برش و جهش فرزندان را ایجاد می‌کند. در این مرحله در صورتی که نسل به اندازه کافی بهبود یافته باشد (آخرین تکرار باشد) برنامه پایان یافته و عضو برتر به عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شود، در غیر این صورت با محاسبه مقادیر توابع هدف نسل جدید، به بهبود نسل ادامه می‌دهیم. جواب بهینه شامل مکان‌ها و ظرفیت‌های مشارکت باری است که منجر به کمترین میزان هزینه قابلیت‌اطمینان در شبکه شده‌اند. این جواب ممکن است

جدول ۱: مشخصات الگوریتم ژنتیک استفاده شده

| ورودی‌های الگوریتم      | خروجی‌های الگوریتم                  | تعداد جمعیت اولیه |
|-------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| مکان و ظرفیت مشارکت بار | مکان، ظرفیت و قیمت بهینه مشارکت بار | ۱۲۰               |
| تعداد تکرار نسل         | احتمال برش                          | احتمال جهش        |
| ۸۰ بار                  | ۱                                   | ۴ درصد            |

جدول ۲: مشخصات قیمت‌دهی واحدهای دارای قدرت بازار در بازار ظرفیت

| شماره واحد      | $\beta_i$ (دلار بر مگاوات) |
|-----------------|----------------------------|
| واحد ۱ (شین ۱)  | ۱۶                         |
| واحد ۲ (شین ۲)  | ۱۶٫۱                       |
| واحد ۳ (شین ۳)  | ۱۶٫۲                       |
| واحد ۴ (شین ۶)  | ۱۶٫۳                       |
| واحد ۵ (شین ۸)  | ۱۶٫۴                       |
| واحد ۶ (شین ۹)  | ۱۶٫۵                       |
| واحد ۷ (شین ۱۲) | ۱۶٫۶                       |

جدول ۳: مشخصات قیمت‌دهی بار به منظور مشارکت در بازار ظرفیت

| شماره شین مشترکین | $\alpha_{k_1}$ (دلار بر مگاوات) | $\alpha_{k_2}$ (دلار بر مگاوات) | $\sigma_{k_1}$ (درصد مشارکت) | $\sigma_{k_2}$ (درصد مشارکت) |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| شین‌های ۱ تا ۲۰   | ۱۲٫۱                            | ۱۵                              | ۵                            | ۱۰                           |
| شین‌های ۲۰ تا ۴۰  | ۱۲٫۱                            | ۱۴                              | ۵                            | ۱۰                           |
| شین‌های ۴۰ تا ۵۷  | ۱۲٫۱                            | ۱۷                              | ۵                            | ۱۰                           |

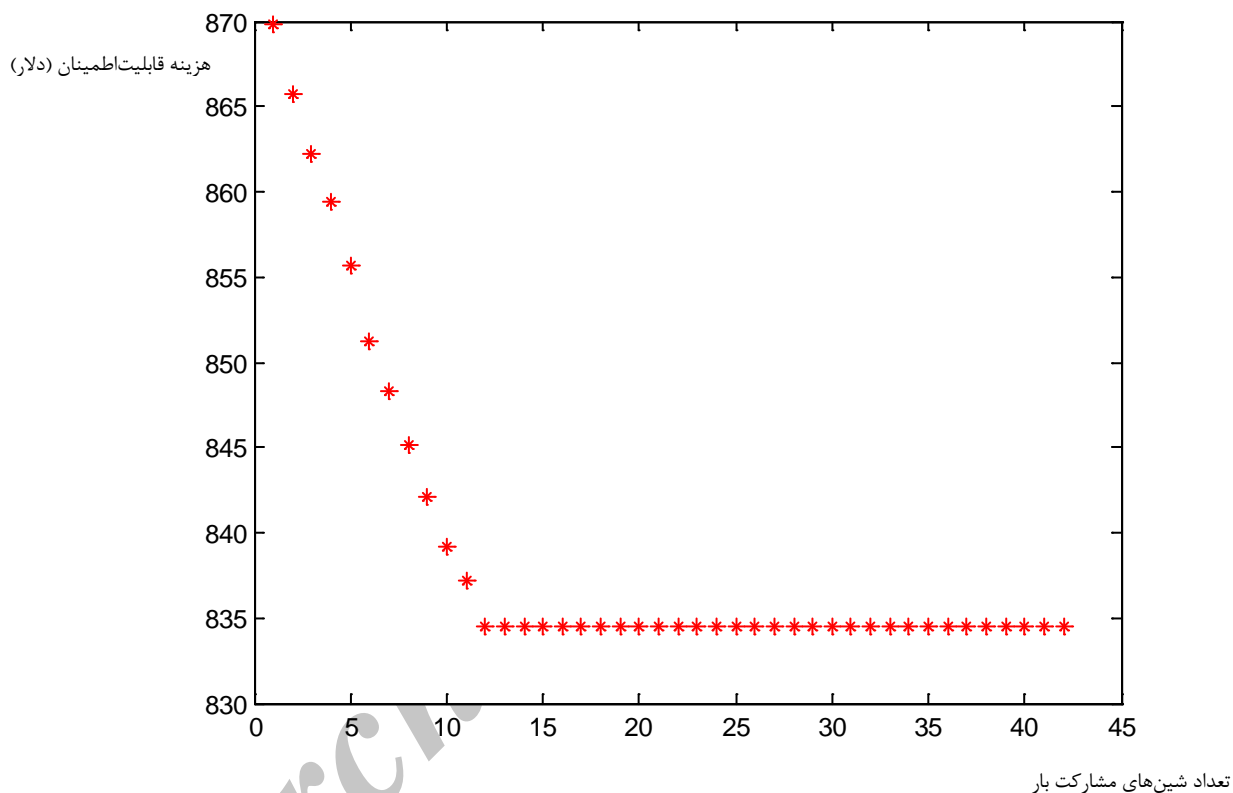
است. شبکه ۵۷ شین استاندارد IEEE دارای ۴۲ شین بار است. به منظور تعیین تعداد بهینه مشارکت بار موثر در کاهش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان، مکان و ظرفیت بهینه این مشارکت‌ها را به ترتیب

### ۶- نتایج شبیه‌سازی‌ها

همانطور که بیان شد هدف این مقاله تعیین مشارکت بار بهینه به منظور کاهش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان سیستم و قیمت ظرفیت



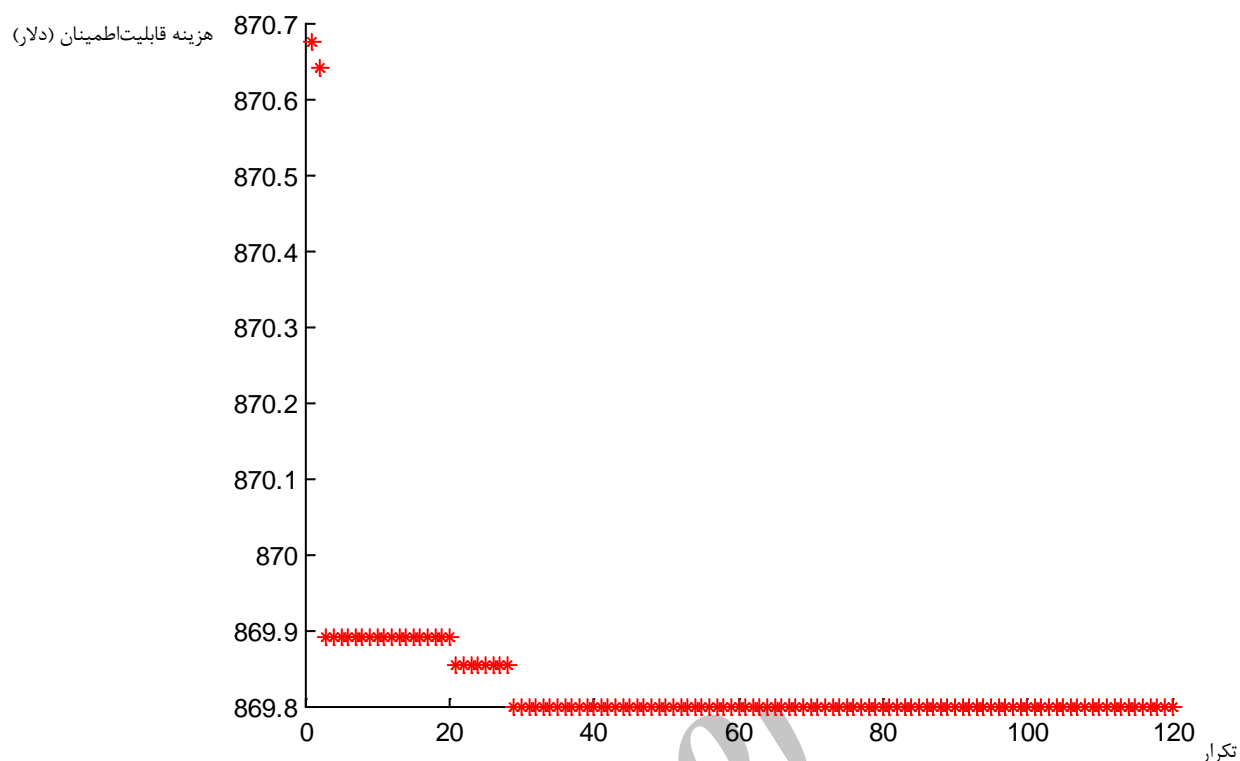
برای ۱ تا ۴۲ مورد پیاده‌سازی تعیین می‌کنیم. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با پیاده‌سازی مشارکت بار در ۱۲ شین هزینه‌های قابلیت‌اطمینان کاهش یافت اما پیاده‌سازی این مشارکت در بیش از ۱۲ شین سبب افزایش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان شد، که با توجه به اینکه در شبیه‌سازی‌ها هدف یافتن مکان و ظرفیت بهینه مشارکت بار به منظور دستیابی به کمترین هزینه قابلیت‌اطمینان است، نتایج پیاده‌سازی این برنامه‌ها در ۱۳ تا ۴۲ شین به منظور کمینه‌سازی هزینه نیز، همانند پیاده‌سازی در ۱۲ شین شد. این نتایج در جداول (۴) تا (۶) و شکل‌های (۵) تا (۷) آورده شده است.



شکل ۵: مشارکت بار با هدف کاهش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان در ۱ تا ۴۲ شین شبکه ۵۷ شین IEEE به صورت همزمان

جدول ۴: هزینه قابلیت‌اطمینان به ازای مشارکت بار در ۱ تا ۴۲ شین شبکه ۵۷ شین IEEE

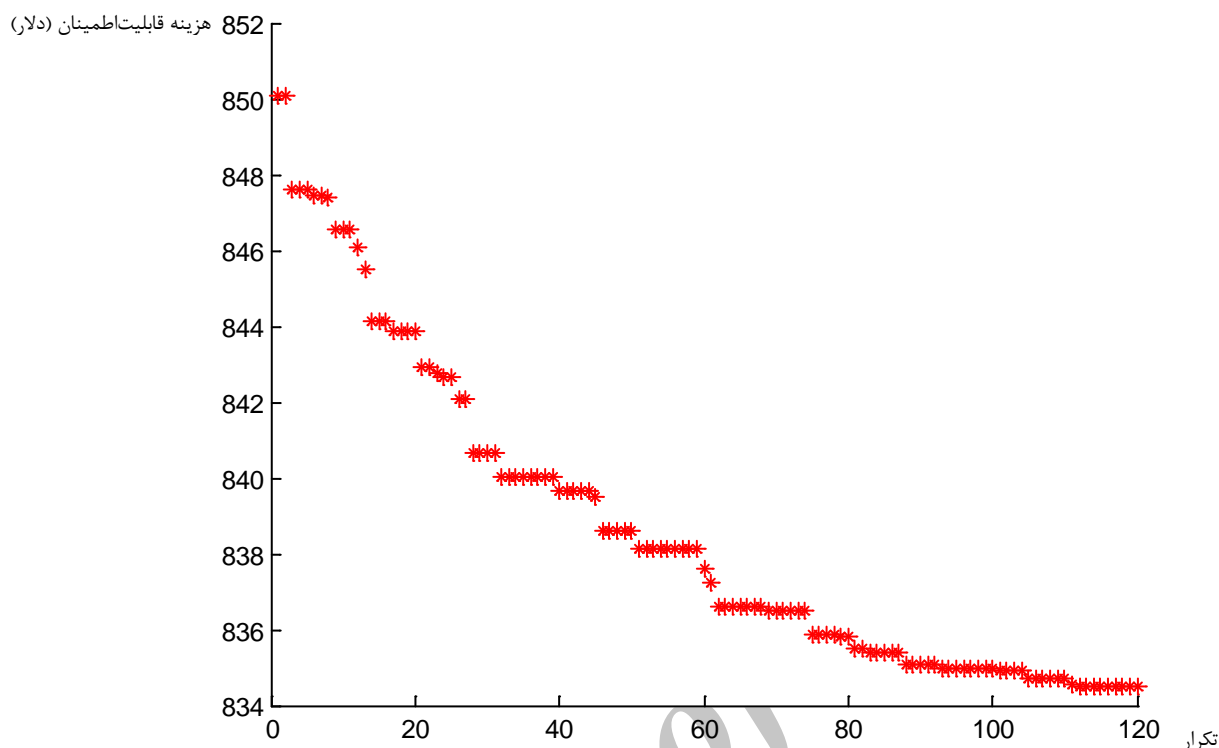
| شماره شین            | ۱        | ۲        | ۳        | ۴        | ۵        | ۶        | ۷        | ۸        | ۹        |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| هزینه قابلیت‌اطمینان | ۸۶۹/۸۰۱۳ | ۸۶۵/۶۹۱۳ | ۸۶۲/۲۶۵۲ | ۸۵۹/۳۶۴۷ | ۸۵۵/۷۰۱۱ | ۸۵۱/۳۸۰۶ | ۸۴۸/۲۴۸۱ | ۸۴۵/۱۸۱۹ | ۸۴۲/۰۹۹۸ |
| شماره شین            | ۱۰       | ۱۱       | ۱۲       | ۱۳       | ....     | ۴۲       |          |          |          |
| هزینه قابلیت‌اطمینان | ۸۳۹/۱۴۲۲ | ۸۳۷/۱۴۸۶ | ۸۳۴/۴۸۷۶ | ۸۳۴/۴۸۷۶ | ....     | ۸۳۴/۴۸۷۶ |          |          |          |



شکل ۶: کاهش هزینه قابلیت اطمینان بر اثر مشارکت بار در یک شین شبکه ۵۷ شین IEEE

جدول ۵: نتایج تعیین مشارکت بار بهینه با هدف کاهش هزینه‌های قابلیت اطمینان در یک شین شبکه ۵۷ شین IEEE

| شماره شین  | میزان مشارکت بار بهینه (درصد)                       | قیمت مشارکت بار بهینه (دلار بر مگاوات) |
|--|---|--|
| ۸  | ۱۰  | ۱۵                                     |
| میزان هزینه تمام شده ظرفیت پس از مشارکت بار (دلار) | میزان هزینه تمام شده ظرفیت پیش از مشارکت بار (دلار) |  |
| ۸۶۹/۸۰۱۳   | ۸۷۴/۱۶۴۵  |  |



شکل ۷: کاهش هزینه قابلیت‌اطمینان بر اثر مشارکت بار در ۱۲ شین شبکه ۵۷ شین IEEE

جدول ۶: نتایج تعیین مشارکت بار بهینه با هدف کاهش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان در ۱۲ شین شبکه ۵۷ شین IEEE

| شماره شین                              | ۱۹   | ۱۲   | ۳۵   | ۲۳   | ۲۰   | ۳۸   |
|--|------|------|------|------|------|------|
| میزان مشارکت بار بهینه (درصد)          | ۹/۷۸ | ۸/۹۰ | ۹/۲۲ | ۷/۶۱ | ۹/۷۱ | ۸/۴۹ |
| قیمت مشارکت بار بهینه (دلار بر مگاوات) | ۱۵   | ۱۵   | ۱۴   | ۱۴   | ۱۵   | ۱۴   |
| شماره شین                              | ۳۲   | ۲۹   | ۲۵   | ۳۳   | ۲۷   | ۸    |
| میزان مشارکت بار بهینه (درصد)          | ۹/۷۰ | ۹/۵۰ | ۹/۸۵ | ۹/۶۷ | ۹/۹۳ | ۹/۹۴ |
| قیمت مشارکت بار بهینه (دلار بر مگاوات) | ۱۴   | ۱۴   | ۱۴   | ۱۴   | ۱۴   | ۱۵   |

مشارکت بار در شبکه و همچنین میزان صرفه‌جویی ناشی از بکارگیری بار در شبکه را نشان می‌دهند.

### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله مکان، ظرفیت و قیمت بهینه مشارکت بار با هدف کاهش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان و قیمت ظرفیت از دیدگاه بهره‌بردار مستقل سیستم، با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین شد. مشارکت بار به دو صورت بر هزینه‌های قابلیت‌اطمینان تاثیرگذار است. این

نتایج بکارگیری مشارکت بار در ۱ تا ۴۲ شین شبکه ۵۷ شین IEEE در شکل (۵) و جدول (۴) بیان شد. همانطور که در شکل (۵) مشخص است با بکارگیری این مشارکت در ۱۲ شین، هزینه‌های ظرفیت کاهش یافت، بنابراین این ۱۲ شین مشارکت بار به عنوان تعداد بهینه مشارکت بار تعیین شد. به عنوان دو نمونه، نتایج پیاده‌سازی ۱ و ۱۲ مشارکت بار در شبکه به عنوان حداقل و حداکثر مشارکت بار، به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) و جداول (۵) و (۶) آورده شد. این شکل‌ها و جداول، مکان‌ها و ظرفیت‌های بهینه

[8] G. Artac, D. Flynn, B. Kladnik, M. Pantos, A. F. Gubina, R. Golob, "A new method for determination the demand response offer function," *Electric Power Systems Research*, vol. 100, pp. 55-64, July. 2013.

[9] E. Shayesteh, A. Yousefi, M. P. Moghaddam, "A probabilistic risk based approach for spinning reserve provision using day ahead demand response program," *Energy*, vol. 35, Issue. 5, pp. 1655-1663, May. 2010.

[10] J. Liu, M. M. A. Salama, R. R. Mansour, "Identify the Impact of Distributed Resources on Congestion Management," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 20, pp. 1998-2005, 2005.

[11] S. Dutta, S. P. Singh, "Optimal Rescheduling of Generators for Congestion Management Based on Particle Swarm Optimization," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 23, pp. 1560-1569, 2008.

[12] A. Kumar, S. C. Srivastava, S. N. Singh, "A Zonal Congestion Management Approach Using Real and Reactive Power Rescheduling," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 19, pp. 554-562, 2004.

[13] V. Zamani Farahani, A. Kazemi, A. Biglari Majd, "Congestion Management in Bilateral Based Power Market by FACTS Devices and Load Curtailments," *IEEE Power India Conference*, 2006.

[14] S. N. Singh, A. K. David, "Congestion Management by Optimizing FACTS Device Location," *International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 23-28, 2000.

[15] M. Mandala, C. P. Gupta, "Congestion Management by Optimal Placement of FACTS Device," *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, pp. 1-7, 2010.

[16] M. Joorabian, M. Saniei, H. Sepahvand, "Location and Parameters Setting of TCSC for Congestion Management in Deregulated Electricity Market," *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 2185-2190, 2011.

[17] F. A. Wolak, J. Bushnell, "Reliability must-run contracts for the California electricity market," Prepared for the Market Surveillance Committee of the California ISO, 1999.

[18] S. B. Sarookolaee, S. H. Elyas, A. A. Foroud, "A Reformed Capacity Subscription Market in Restructured Power Systems," *IEEE PES Innovative Grid Technologies*, pp. 1-6, 2011.

[19] Ying Xiao; Yen-Yu Lee; Bresler, F.S.; Bastian, J.; Engle, A., "Integration of Demand Resource into PJM capacity market incremental auction," *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE*, pp. 1,5, 21-25 July 2013

[20] A. Ott, "PJM capacity market overview," 2013.

مشارکت از یک سو با کاهش بار در شین‌ها سبب کاهش قیمت رقابتی ظرفیت و از سوی دیگر با کاهش قدرت بازار، سبب کاهش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان شده است. با بکارگیری مشارکت بار در ۱ تا ۱۲ شین شبکه ۵۷ شین IEEE هزینه‌های قابلیت‌اطمینان به میزان ۰/۵ تا ۴/۵ درصد کاهش یافت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مشارکت بار در شین‌های بیشتر، سبب افزایش هزینه‌های قابلیت‌اطمینان خواهد شد، بنابراین حد بهینه اجرای این برنامه‌ها ۱۲ شین از ۴۲ شین بار شبکه ۵۷ شین IEEE است.

قیمت ظرفیت با میزان تمایل بار برای شرکت در بازار ظرفیت ارتباط تنگاتنگی دارد که با ایجاد آگاهی در مشترکین، کاهش قیمت‌های پیشنهادی آنها و توسعه مشارکت بار در بازار ظرفیت می‌توان آن را به مقادیر بیشتری نیز کاهش داد. از سوی دیگر با مشارکت بار در بازار ظرفیت، تجارت جدیدی برای مشترکین راه‌اندازی شد که با کسب درآمد، سبب رضایتمندی آنها خواهد شد.

## مراجع

[1] D. S. Kirschen, G. Strbac, *Fundamentals of power system economics*, John Wiley & Sons Ltd, ISBN: 0-470-84572-4, 2004.

[2] J. Pfeifenberger, K. Spees, and A. Schumacher, "A comparison of PJM's RPM with alternative energy and capacity market designs," A white paper from Brattle Group prepared for PJM Interconnection L. L. C., Sep. 2009.

[3] P. Wang, Y. Xiao, Y. Ding, "Nodal Market Power Assessment in Electricity Markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 1373-1379, 2004.

[4] A. Nourai, V. I. Kogan, C. M. Schafer, "Load leveling reduces T&D line losses," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, Issue. 4, 2008.

[5] R. Shaw, M. Attree, T. Jackson, M. Kay, "The value of reducing distribution losses by domestic load shifting: a network perspective," *Energy Policy*, vol. 37, Issue. 8, pp. 3159-3167, 2009.

[6] R. Azami, A. F. Frad, "Impact of demand response programs on system and nodal reliability of a deregulated power system," *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*, 2008.

[7] D. Wang, S. Parkinson, W. Miao, H. Jia, C. Crawford, N. Djilali, "Hierarchical market integration of responsive loads as spinning reserve," *Applied Energy*, vol. 104, pp. 229-236, 2013.

## پانوشتها

- <sup>1</sup> Expected Energy Not Supplied
- <sup>2</sup> Loss Of Load Probability
- <sup>3</sup> Demand Response
- <sup>4</sup> Flexible AC Transmission Systems
- <sup>5</sup> Must Run Capacity Index (MRCI)
- <sup>6</sup> Herfindahl-Hirschman Index
- <sup>7</sup> Lerner Index
- <sup>8</sup> Distribution Factors Matrix
- <sup>9</sup> Linear Programming
- <sup>10</sup> Pennsylvania-new Jersey-Maryland

Archive of SID