

# الگوریتمی جدید برای جزیره‌بندی کنترل‌شده سیستم‌های قدرت مبتنی بر خوشه‌بندی طیفی مقید

کاوه نادری<sup>۱</sup> علی حسامی نقشبندی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی- دانشگاه کردستان- سنندج- ایران

[ka.naderi@eng.uok.ac.ir](mailto:ka.naderi@eng.uok.ac.ir)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی- دانشگاه کردستان- سنندج- ایران

[hesami@uok.ac.ir](mailto:hesami@uok.ac.ir)

چکیده: در این مقاله الگوریتمی جدید مبتنی بر خوشه‌بندی طیفی مقید به منظور جزیره‌بندی کنترل‌شده سیستم‌های قدرت ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی توابع هدف اختلال در شارش توان خطوط انتقال و عدم تعادل بار- تولید در جزیره‌ها را کمینه می‌کند و به ترتیب منجر به تضمین پایداری گذرا در جزیره‌ها و انجام حداقل اقدامات لازم در رابطه با بازیگریبندی سیستم انتقال، برنامه‌ریزی مجدد تولید و حذف بار می‌گردد. این الگوریتم کلیه فضای حل را جستجو کرده و ضمن امکان‌سنجی تمامی کاندیداهای طرح جزیره‌بندی، طرح‌های عملی را شناسایی و سپس مورد بهینه را گزینش و اجرا می‌نماید، به علاوه به منظور اجتناب از وقوع جزیره‌بندی غیر عمدی، قابلیت تشخیص و تفکیک اغتشاشات مهم و غیرمهم را داشته و ضمن ایجاد حداقل تعداد جزیره‌ها، زمان و هزینه اجرای طرح جزیره‌بندی را کاهش می‌دهد. شبیه‌سازی‌های زمانی انجام شده بر روی سیستم ۳۹ شینه IEEE در محیط نرم-افزاری MATLAB و به وسیله جعبه‌ابزار PST نشان‌دهنده کارآیی روش پیشنهادی می‌باشد.

**کلیدی:** جزیره‌بندی کنترل‌شده، خوشه‌بندی طیفی مقید، هم‌نوایی ژنراتورها، اختلال در شارش توان، عدم تعادل بار- تولید، کات‌ست‌های گراف شبکه.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علی حسامی نقشبندی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- سنندج- بلوار پاسداران- دانشگاه کردستان- دانشکده مهندسی- گروه مهندسی برق

## ۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت امروزی نزدیک به حاشیه امنیتی و حد پایداری‌شان بهره‌برداری می‌شوند. در مواجهه با چنین شبکه‌ای رخداد یک پیشامد نسبتاً شدید، سیستم را از حالت پایدار خارج می‌نماید و در صورت فقدان اقدامات کنترلی مناسب، کل یا بخش عمده‌ای از سیستم دچار خاموشی شود. هنگامی که از دست رفتن یکپارچگی سیستم قدرت در پی وقوع اغتشاشات بزرگ غیرقابل اجتناب باشد، جزیره‌بندی عمدی می‌تواند تبعات رخدادها و هزینه خاموشی‌ها را محدود نماید.

جزیره‌بندی کنترل‌شده، آخرین راه حل بعد از رخداد اغتشاشات بزرگ در سیستم قدرت ناحیه وسیع می‌باشد. به‌منظور پیشگیری از فروپاشی غیرعمد شبکه انتقال، مرکز کنترل آن را طی فرآیندی کنترل‌شده تفکیک می‌نماید، به‌طوری که بارهای حائز اهمیت حفظ و ضمن قابلیت اطمینان لازم، توسط ژنراتورهای محلی پایدار تغذیه می‌شوند.

اخیراً یک استراتژی جزیره‌بندی جدید با استفاده از داده‌های به-هنگام واحدهای اندازه‌گیری فازوری بر روی شبکه قدرت مرکزی چین اعمال شده است [۱]، که به‌وسیله معیار انرژی پتانسیل شاخه، شرایط خارج‌ازگام را تشخیص می‌دهد. الگوریتم‌های جستجوی اول عمق و اول پهنا به‌منظور یافتن حل جزیره‌بندی با گروه‌های ژنراتوری هم‌نوا با حداقل عدم تعادل توان در [۲] استفاده شده است. روش خوشه‌بندی طیفی و روش‌های  $K$ -means در [۳] و [۴] برای یافتن حل جزیره بندی جهت حداقل کردن اختلال در شارش توان پیشنهاد شده‌است که هر دوی این روش‌ها راندمان محاسباتی بالایی دارند اما مسئله هم‌نوایی ژنراتورها را در نظر نمی‌گیرند [۵]، سادگی پیاده‌سازی و سرعت از مزایای این الگوریتم است، حال آنکه اهمیت انتخاب نقاط اولیه و حساسیت به نویز از معایب این روش‌ها می‌باشد. نادیده گرفتن هم‌نوایی ژنراتورها به‌معنای این است که پایداری جزیره‌ها تضمین نخواهد شد. در [۸]-[۶] یک الگوریتم خوشه‌بندی طیفی دومرحله‌ای جدید ارائه شده است که گروه‌های ژنراتوری در آن به‌وسیله خوشه‌بندی طیفی نرم‌الیزه تعیین می‌شوند. این الگوریتم در واقع یک مسئله بهینه‌سازی است که تابع هدف آن اختلال در شارش توان بوده که بایستی حداقل گردد و قید مهم لحاظ شده در مسئله، موضوع هم‌نوایی ژنراتورهای موجود در یک جزیره است، عیب این روش عدم توجه به تعادل توان در جزیره‌ها و اقدامات لازم در رابطه با

بازپیکربندی سیستم انتقال، برنامه‌ریزی مجدد تولید و حذف بار می‌باشد. تاکنون مطالعاتی در رابطه با کاربرد سیستم‌های اندازه‌گیری فازوری به‌منظور کشف و تعیین جزیره‌بندی سیستم‌های قدرت به‌هم پیوسته و بزرگ انجام شده است [۸]، [۹]. علاوه بر مکان، زمان مناسب اجرای طرح جزیره بندی موضوع مهم دیگری است که می‌تواند به-صورت خارج‌ازخط، برخط و به‌هنگام مطالعه شود؛ این موضوع در

مرجع [۱۱] با استفاده از روش فازی-عصبی و ضمن توجه به قید هم-نوایی آرام و نیز در [۱۲] با رویکرد روش‌شناسی بر اساس ریسک بررسی شده‌است. استفاده از پیش‌بینی شرایط خارج‌ازگام در مورد نوسانات بین ناحیه‌ای راه‌حلی دیگر است که تاکنون در ارتباط با زمان مناسب طرح جزیره‌بندی مطالعه شده است [۱۳]. از طرف دیگر در رابطه با تشخیص خطوط انتقالی که در هنگام اجرای طرح جزیره‌بندی بایستی قطع گردند، الگوریتم‌های بهینه‌سازی از جمله نگاشت خود-سازمان، ازدحام ذرات و ... راهکارهایی موثر به‌نظر می‌رسند [۱۴]. جزیره‌بندی کنترل‌شده بر اساس ملاحظات مربوط به تعادل توان‌های اکتیو و راکتیو در مرجع [۱۵] مورد مطالعه قرار گرفته‌است و همچنین در [۱۶] یک الگوریتم جزیره‌بندی بر اساس گراف کاهش‌یافته چند-سطحی به‌منظور جزیره‌بندی کنترل‌شده پیشنهاد شده‌است. اخیراً مطالعاتی در ارتباط با ترکیب مفاهیم نظریه گراف و هم‌نوایی آرام، صورت گرفته است [۱۷]. با مروری بر روش‌های مختلف جزیره‌بندی، مبتنی بر درخت‌های تصمیم، خوشه‌بندی طیفی و اتصالات ضعیف مزایا و معایب هر کدام از روش‌ها مشخص می‌شود [۱۸] و با توجه به شرایط شبکه قدرت می‌توان طرح مناسب را انتخاب کرد.

در این مقاله یک الگوریتم جدید بر اساس مفهوم هم‌نوایی آرام ژنراتورها مبتنی بر خوشه‌بندی طیفی مقید پیشنهاد شده‌است که در آن قید اصلی مسئله، هم‌نوایی مجموعه ژنراتورهای واقع در یک جزیره بوده و توابع هدفی که در فرآیند این الگوریتم کمینه می‌شوند، اختلال در شارش توان خطوط انتقال و عدم تعادل بار-تولید در جزیره‌ها می‌باشند. این تحقیق ضمن حل یک مسئله بهینه‌سازی دو تابع هدفه، تمامی فضای حل را جهت یافتن کاندیداهای ممکن و بهینه طرح جزیره‌بندی جستجو می‌کند. تمامی ترکیبات ممکن بردارهای ویژه را در نظر گرفته و با توجه به توابع هدف و قید هم‌نوایی ژنراتور و دو قید دیگر (همسایگی و مجاورت) ترکیبات بهینه را می‌یابد. علاوه بر موارد فوق‌الذکر، دو قید همسایگی و مجاورت علاوه بر قید هم‌نوایی آرام که از مفاهیم مربوط به نظریه گراف و خوشه‌بندی استخراج شده و در اینجا در بحث جزیره بندی کنترل‌شده استفاده شده‌اند. در ادامه سناریوهای مختلفی نیز بررسی خواهند شد.

سایر بخش‌های این مقاله بدین شرح سازماندهی شده‌اند: در بخش دوم مقدماتی از نظریه گراف‌ها، مفهوم هم‌نوایی ژنراتورها و خوشه‌بندی طیفی مقید آورده شده است. سپس الگوریتم پیشنهادی در بخش سوم به تفصیل معرفی و تشریح شده و اجزاء سیستم قدرت شامل ژنراتورها و خطوط انتقال به‌منظور مطالعه رفتار استاتیکی و دینامیکی مدل‌سازی می‌شوند. کارآمدی الگوریتم پیشنهادی با انجام شبیه‌سازی‌های زمانی تحت شرایط عادی و خطا دار بر روی شبکه ۳۹ شینه IEEE در محیط نرم‌افزاری متلب و همچنین جعبه ابزار PST در بخش چهارم بررسی شده است. بخش پنجم نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

## ۲- مفاهیم اساسی

### ۲-۱- ژنراتورهای هم‌نوا

بر اساس معادله نوسان خطی شده کلاسیک ژنراتور، ضمن صرف نظر از میرایی، مدل دینامیکی خطی مرتبه دوم یک سیستم قدرت با  $m$  ژنراتور را می‌توان به فرم ماتریسی زیر نوشت [۲۱]:

$$\ddot{X} = AX \quad (1)$$

که در آن  $X = [\Delta\delta_1, \dots, \Delta\delta_m]^T$  و  $\Delta\delta$  انحراف زاویه‌ی ژنراتور از نقطه‌ی کار حالت ماندگار  $\delta_0$  می‌باشد و  $A$  ماتریس حالت سیستم است. بر اساس نظریه هم‌نوایی آرام، جدا کردن ژنراتور به دو گروه، معادل است با تقسیم قراردادی ماتریس  $A$  به دو زیر ماتریس  $A_{11}$  و  $A_{22}$  که زیرسیستم‌های  $G_1$  و  $G_2$  را نشان می‌دهند. این روند در رابطه (۲) آورده شده است [۲۲]:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

مجموع نرُم‌های فروبنیوس قطره‌های فرعی زیر ماتریس‌های  $A_{11}$  و  $A_{22}$  می‌تواند برای تعریف اتصال دینامیکی  $S$  بین زیرسیستم‌های  $G_1$  و  $G_2$  استفاده شود [۲۲]:

$$S = \|A_{12}\| + \|A_{21}\| \quad (3)$$

در این سناریو اگر فرض شود که تعادل توان‌راکتیو با جبران‌سازهای محلی قابل کنترل است، می‌توان اثرات توان‌راکتیو و دامنه‌ی ولتاژ شینه را نادیده گرفت. بنابراین می‌توان معادله‌ی (۳) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$S = \sum_{j \in V_{G_2}} \sum_{i \in V_{G_1}} \left( \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} \cdot \left( \frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \right) \quad (4)$$

که در آن  $\partial P_{ij} / \partial \delta_{ij}$  ضرایب سنکرون‌سازی هستند و  $H_i$  ثابت اینرسی  $i$  امین ژنراتور می‌باشد. بنابراین، مسئله یافتن گروه‌های ژنراتوری هم‌نوا معادل است با مسئله بهینه‌سازی یافتن ضعیف‌ترین اتصال دینامیکی بین گروه‌های مختلف ژنراتورها:

$$\min S = \min_{V_{G_1}, V_{G_2} \subset V_G} \left( \sum_{j \in V_{G_2}} \sum_{i \in V_{G_1}} \left( \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} \cdot \left( \frac{1}{H_i} + \frac{1}{H_j} \right) \right) \right) \quad (5)$$

### ۲-۲- توابع هدف اختلال در شارش توان و عدم تعادل

#### بار- تولید

هر دو تابع هدف اختلال در شارش توان خطوط انتقال و عدم تعادل بار-تولید در جزیره‌ها، می‌توانند به‌عنوان توابع هدف جزیره‌بندی کنترل‌شده مورد استفاده قرار بگیرند که هرکدام مزایا و معایب خاص خود را دارند [۱۹،۲۰]، که به ترتیب با معادلات (۶) و (۷) تعریف می‌شوند:

$$\min_{V_1, V_2 \subset V} \left( \sum_{i \in V_1, j \in V_2} P_{ij} \right) \quad (6)$$

$$\min_{V_1, V_2 \subset V} \left( \sum_{i \in V_1, j \in V_2} |P_{ij}| \right) \quad (7)$$

که در آن  $P_{ij}$  مقدار شارش توان اکتیو در خط انتقال بین گره  $i$  و  $j$  را نشان می‌دهد. در نظر گرفتن اختلال در شارش توان خطوط انتقال به عنوان تابع هدف، جزایری را ایجاد می‌کند که با الگوی توان- جریان حالت بدون اغتشاش کمترین تفاوت را دارند. این ویژگی تابع هدف در مورد هریک از جزیره‌ها، پایداری حالت گذرا را بهبود بخشیده، امکان اضافه‌بار خطوط انتقال را کاهش داده و امر بازگردانی سیستم را به حالت اولیه تسهیل می‌نماید [۲۴]. این در حالی است که استفاده از عدم تعادل بار-تولید در جزیره‌ها به‌عنوان تابع هدف، باعث ایجاد جزایری با سطح بار-تولید متوازن شده که این ویژگی، هزینه کنترل تولید و حذف بار در هر یک از جزیره‌ها را به حداقل می‌رساند. از آنجایی که پایداری سیستم در پی جزیره‌بندی بسیار حائز اهمیت است و جزیره‌ای با حاشیه پایداری منفی و توازن بار- تولید مناسب، متلاشی خواهد شد اما یک جزیره با حاشیه پایداری مثبت و تعادل بار- تولید ضعیف را می‌توان از طریق تزریق توان پایدار نمود، لذا بایستی از نقطه نظر طراح، پایداری گذرا بیشتر از تعادل بار-تولید مورد توجه قرار گیرد.

### ۲-۳- نظریه گراف

هر گراف  $G$  زوج مرتبی مانند  $(V, E)$  است که در آن  $V$  مجموعه‌ای متناهی و ناتهی است و  $E$  زیرمجموعه‌ای از تمام زیرمجموعه‌های دو عضوی  $V$  می‌باشد. اعضای  $V$  را رأس‌های  $G$  و اعضای  $E$  را یال‌های  $G$  می‌نامیم [۲۵]. گراف دوبخشی گرافی است که بتوان مجموعه رئوس آن را به دو مجموعه‌ی  $X$  و  $Y$  چنان افراز نمود که هر یال آن دارای یک انتها در  $X$  و یک انتها در  $Y$  باشد، به گونه‌ای که هیچ دور آسی در  $X$  یا در  $Y$  با هم مجاور نباشند. یال‌ها بر دو نوع ساده و جهت‌دار هستند، که هر کدام در جای خود کاربردهای بسیاری دارد. جهت‌دار کردن یک گراف یعنی نسبت دادن جهت به هر یال آن گراف. هرگاه بین دو رأس متمایز از یک گراف بیش از یک یال وجود داشته باشد، آن را یک گراف چندگانه می‌گوییم. منظور از افراز یک مجموعه چون  $A$  به چند مجموعه، تقسیم مجموعه‌ی  $A$  به چند مجموعه ناتهی دیگر است که باهم اشتراکی نداشته باشند و اجتماع همه آن‌ها برابر مجموعه  $A$  باشد. در اینجا اگر  $V$  به‌عنوان مجموعه رئوس باشد افراز  $V$  به دو مجموعه ناتهی  $X$  و  $Y$  به این صورت است که:

$$X \cup Y = V, \quad X \cap Y = \emptyset \quad (8)$$

### ۲-۴- قواعد الگوریتم خوشه‌بندی طیفی

تجزیه و تحلیل خوشه‌ای، روشی برای گروه‌بندی داده‌ها یا مشاهدات با توجه به شباهت یا درجه نزدیکی آن‌ها است. نخست معیار شباهت یا

نزدیکی داده‌ها تعیین می‌گردد، در ادامه روش تجزیه و تحلیل خوشه-ای انتخاب شده و در مورد تعداد خوشه‌ها تصمیم‌گیری می‌شود، در نهایت نتایج گروه‌بندی تفسیر می‌شود. از جمله روش‌های خوشه‌بندی ناحیه‌ای می‌توان به  $K$ -means و  $K$ -medoids اشاره کرد. الگوریتم  $K$ -means فضای مسئله را به  $K$  زیر مجموعه غیرتهی تقسیم کرده و سپس نقطه میانگین خوشه‌ها را محاسبه می‌کند، هر نقطه به خوشه‌ای که نزدیکترین نقطه میانگین را به آن دارد اختصاص داده می‌شود. سادگی پیاده‌سازی و سرعت از مزیت‌های این الگوریتم است [۲۶]، [۲۷]. الگوریتم  $K$ -medoids نقاطی را که در وسط هر خوشه هستند را به عنوان مراکز خوشه در نظر می‌گیرد. این الگوریتم پیچیدگی محاسباتی بالاتری دارد اما نسبت به نویز مقاوم‌تر بوده و در مورد پایگاه‌های داده‌ای بزرگ عملکرد مناسب‌تری دارد [۲۷]، [۲۸]. در این بخش، دو نوع خوشه‌بندی طیفی نرمالیزه و غیرنرمالیزه معرفی می‌شوند:

### ۲-۴-۱- خوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه

خوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه، بر اساس ماتریس لاپلاسی  $L$ ، گره‌ها را به دو زیرمجموعه تقسیم می‌کند. این ماتریس برای گراف  $G$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L = D - W \quad (9)$$

که در آن  $D$  یک ماتریس قطری است که عناصر روی قطر اصلی آن  $d_{ii}$  مجموع وزن همه کمان‌های متصل به گره  $i$  می‌باشند. با این تعریف، ماتریس وزن کمان‌ها ( $W$ ) و ماتریس لاپلاسی ( $L$ ) هر دو برای هر گراف غیرجهت دار، متقارن هستند. الگوریتم خوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه، برای موارد دو بخشی، می‌تواند با استفاده از مراحل زیر اجرا شود:

محاسبه دو بردار ویژه اول  $v_1, v_2$  برای ماتریس  $L$ .

(۲) تشکیل ماتریس  $J$  که  $J \in R^{n \times 2}$  ماتریسی است که بردارهای  $v_1, v_2$  را به صورت ستونی ذخیره می‌کند.  $y_i \in R^2$  بردار متناظر با  $i$  امین سطر  $J$  می‌باشد.

(۳) تقسیم گره‌های  $y_i \in R^2$  به خوشه‌های  $c_1, c_2$  با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی مانند  $k$ -medoids و یا  $k$ -means [۲۹].

متأسفانه، برای دوبخشیکردن گراف با استفاده از خوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه، اغلب از روش ساده‌ی جدا کردن یک گره از بقیه گراف استفاده می‌شود، واضح است که این راه‌حل برای مسائل جزیره‌سازی قابل قبول نمی‌باشد.

### ۲-۴-۲- خوشه‌بندی طیفی نرمالیزه

این روش از مجموع وزن گره‌های موجود در هر زیرگراف، به عنوان شرط تعادل استفاده می‌کند تا مانع از وقوع مشکل مطرح‌شده در

خوشه‌بندی طیفی غیرنرمالیزه شود. این مسئله سبب تعریف برش نرمال ( $Ncut$ ) [۳۰] می‌گردد:

$$Ncut(V_1, V_2) = \frac{cut(V_1, V_2)}{weig(V_1)} + \frac{cut(V_1, V_2)}{weig(V_2)} \quad (10)$$

که در آن  $weig(V_1) = \sum_{i \in V_1} D_i$ ، مجموع همه وزن‌های گره‌های  $G_1$  می‌باشد.  $weig(V_2)$  مشابه همین تعریف در مورد  $G_2$  وجود دارد. استفاده از وزن گره‌ها به عنوان شرط تعادل، احتمال ایجاد یک زیرگراف با وزن‌های خیلی کوچک را ضعیف می‌کند. روش خوشه‌بندی طیفی نرمالیزه می‌تواند برای تقسیم گراف با  $Ncut$  کمینه استفاده شود. برای موارد دو بخشی، این امر را می‌توان با مراحل زیر به دست آورد [۳۰] و [۳۱]:

(۱) محاسبه‌ی دو بردار ویژه‌ی اول  $v_1, v_2$  برای مسئله کلی  $Lv = \lambda Dv$ .

(۲) تشکیل ماتریس  $J$  که  $J \in R^{n \times 2}$  ماتریسی است که بردارهای  $v_1, v_2$  را به صورت ستونی ذخیره می‌کند.  $y_i \in R^2$  بردار متناظر با  $i$  امین سطر  $J$  می‌باشد.

(۳) تقسیم گره‌های  $y_i \in R^2$  به خوشه‌های  $c_1, c_2$  با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی مانند  $k$ -medoids و یا  $k$ -means.

### ۳- مدلسازی و معرفی الگوریتم پیشنهادی

در مرحله اول الگوریتم، به کمک روش پیشنهادی ژنراتورهای هم‌نوا گروه‌بندی می‌شوند. سپس این گروه از گره‌های ژنراتوری به عنوان قید برای مرحله دوم الگوریتم جزیره‌بندی کنترل شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس در مرحله دوم از الگوریتم، گراف استاتیکی  $G_s$  با استفاده از داده‌های توان-جریان ساخته می‌شود. این گراف شامل همه گره‌ها و وزن کمان‌هایی است که به عنوان مقدار مطلق توان اکتیو مبادله شده بین گره‌های  $i$  و  $j$  تعریف شده‌اند. سپس گره‌ها با استفاده از خوشه‌بندی طیفی مقید گروه‌بندی خواهند شد تا مسئله بهینه‌سازی مطرح‌شده را حل کنند. روندنمای الگوریتم پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است.

### ۳-۱- گراف دینامیکی

گروه‌های ژنراتوری هم‌نوا در سیستم قدرت در نظر گرفته شده را می‌توان با تشکیل یک گراف که نشان‌دهنده اتصال دینامیکی بین گره‌های ژنراتوری است (گراف دینامیکی)، به دست آورد. سپس خوشه‌بندی طیفی نرمالیزه جهت گروه‌بندی گره‌های ژنراتوری بر اساس دینامیک اتصالات شان به این گراف اعمال می‌شود. در اینجا قید اصلی مسئله شناسایی ژنراتورهای هم‌نوا است.

گراف دینامیکی  $G_D(V_D, E_D, W_D)$  را می‌توان برای  $m$  گره ژنراتوری با تعریف ماتریس لاپلاسی  $L_D$  زیر تشکیل داد [۸]:

$$M = \text{diag}(2H_1 / \omega_0, 2H_2 / \omega_0, \dots, 2H_m / \omega_0) \quad (13)$$

که در آن  $M$  ماتریس اینرسی است.

بنابراین اولین مرحله از الگوریتم به صورت زیر اجرا می شود:

(۱) تشکیل گراف دینامیکی  $G_D$  که فقط شامل گره های ژنراتوری می باشد. وزن کمان های این گراف نیز با  $\partial P_{ij} / \partial \delta_{ij}$  برابر است.

(۲) محاسبه دو بردار ویژه اول  $v_1, v_2$  برای مسئله کلی  $Lv = \lambda Dv$ .

(۳) تشکیل ماتریس  $J \in R^{n \times 2}$  که ماتریسی است که بردارهای  $v_1, v_2$  را به صورت ستونی ذخیره می کند.  $y_i \in R^2$  بردار متناظر با  $i$  امین سطر  $J$  می باشد.

(۴) تقسیم گره های  $y_i \in R^2$  به زیرگروه های  $V_{G1}$  و  $V_{G2}$  با استفاده از الگوریتم خوشه بندی  $k$ -medoids.

(۵) انتخاب  $V_{G1}$  و  $V_{G2}$  به عنوان گره های گراف دینامیکی جدید و بازگشت به مرحله اول.

### ۳-۲- گراف استاتیکی

در این مرحله الگوریتم ضمن در نظر گرفتن قید گروه های هم نوای ژنراتوری و گراف دینامیکی به دست آمده از مرحله قبل، با هدف کمینه کردن اختلال شارش توان خطوط انتقال، با استفاده از خوشه بندی طیفی مقید گره های غیرتولیدی سیستم را خوشه بندی نموده و هر یک را براساس دستور  $K$ -medoids به گره های ژنراتوری اختصاص می دهد و در نتیجه گراف استاتیکی سیستم قدرت را به دست می آورد. حداقل کردن تابع هدف اول یعنی اختلال در شارش توان خطوط انتقال ضمن حفظ گروه های هم نوای ژنراتوری مسئله اصلی در این مرحله است.

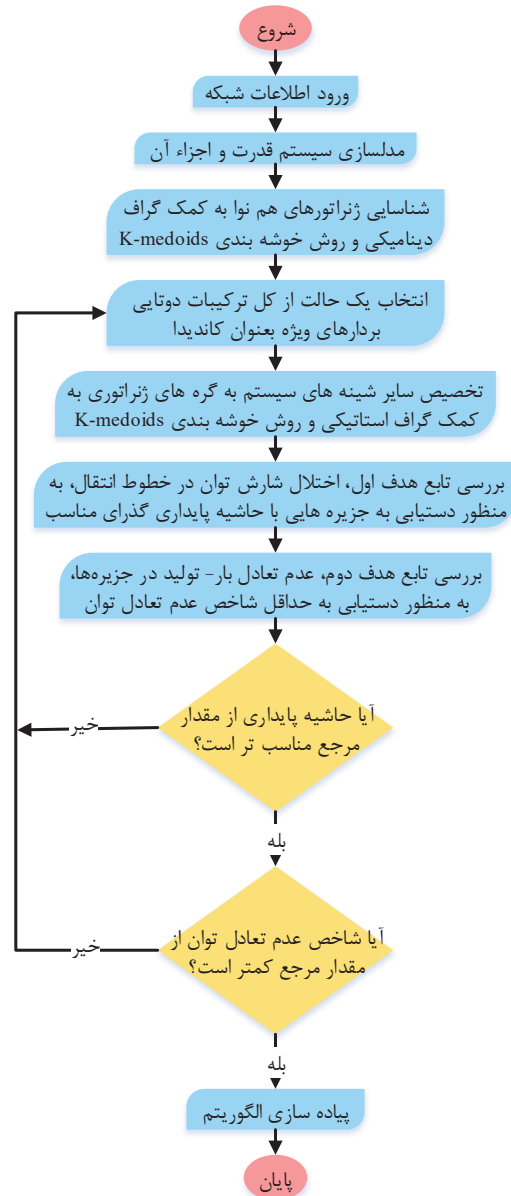
گراف استاتیکی  $G_S(V_S, E_S, W_S)$  را می توان براساس سیستم قدرتیبا  $n$  گره با استفاده از داده جریان- توان تشکیل داد تا به کمک آن تبادل توان اکتیو بین گره ها را بتوان توصیف نمود.

برای تولید گراف بدون جهت متقارن که برای کاربردهای خوشه بندی طیفی نیاز است، باید موضوع تلفات درونسیستم را نیز در نظر گرفت. برای تضمین متقارن بودن ماتریس  $W_S$ ، المان های آن به صورت  $(|P_{ij}| + |P_{ji}|) / 2$  تعریف می شوند.

ماتریس لاپلاسیان  $L_S$  برای گراف استاتیکی  $G_S$  را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$[L_S]_{ij} = \begin{cases} -\sum_{l=1, l \neq i}^n [L_S]_{il} & \text{if } i = j \\ \frac{|P_{ij}| + |P_{ji}|}{2} = -|V_i| |V_j| B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (14)$$

که در آن ماتریس حاصل از درایه های موهمی ماتریس ادیتمتانس شبکه است. شایان ذکر است که گروه های ژنراتوری به دست آمده در مرحله اول، به عنوان قیدهایی در مرحله دوم الگوریتم لحاظ می شوند [۷].



شکل (۱): روندنمای الگوریتم پیشنهادی

$$[L_D]_{ij} = \begin{cases} -\sum_{l=1, l \neq i}^m [L_D]_{il} & \text{if } i = j \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} = -|V_i| |V_j| B'_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (11)$$

که در آن  $B'_{ij}$  بخش موهمی ماتریس ادیتمتانس شبکه است که به گره های ژنراتوری کاهش می یابد [۲۱]. وزن کمان های گراف دینامیکی  $G_D$  که اتصال دینامیکی بین گره های ژنراتور را توصیف می کند، به عنوان ضریب سنکرون سازی  $\partial P_{ij} / \partial \delta_{ij}$  تعریف می شوند.

با استفاده از ماتریس لاپلاسیان  $L_D$ ، مدل دینامیک خطی درجه دوم سیستم قدرت با  $m$  ژنراتور به صورت زیر نوشته می شود [۲۱]:

$$M\ddot{X} = L_D X \quad (12)$$

قید هم نوایی ژنراتوری به صورت جفت-هوشمند، شامل اتصالات ضروری و اتصالات غیرمجاز بوده که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

(۱) قید اتصالات ضروری: تمام گره‌های ژنراتوری که در مرحله اول در یک گروه قرار داشتند، باید در مرحله دوم به هم متصل شوند.

(۲) قید اتصالات غیرمجاز: گره‌های ژنراتوری که در مرحله اول در دو گروه متفاوت قرار داشتند، نمی‌توانند در مرحله دوم به هم متصل شوند. خوشه‌بندی طیفی مقید یک روش کارآمد برای حل مسائل خوشه‌بندی با قیدهای جفت-هوشمند می‌باشد. می‌توان با تصحیح زیرفضای راه‌حل با استفاده از ماتریس تصویر، قیدهای جفت-هوشمند را لحاظ کرد [۷]. بدون از دست دادن کلیت مسئله، می‌توان فرض کرد که اولین گروه  $m_1$  تایی از گره‌ها، متعلق به خوشه  $C_1$  و  $m_2$  گره بعدی متعلق به خوشه  $C_2$  می‌باشند، سپس ماتریس تصویر  $U$  به صورت زیر تعریف می‌شود [۷]:

$$U = \begin{pmatrix} 1_{m_1} & 1_{m_1} & 0_{m_1 \times (n-m)} \\ 1_{m_2} & -1_{m_2} & 0_{m_2 \times (n-m)} \\ 1_{(n-m)} & 0_{(n-m)} & I_{(m-n) \times (n-m)} \end{pmatrix} \quad (15)$$

که در آن  $I$  ماتریس واحد است و  $1$  بردار ستونی با درایه‌های  $1$  است و  $0$  ماتریس یا بردار صفر می‌باشد. به این ترتیب، زیر فضای راه‌حل از یک فضای  $n$  بعدی به یک فضای  $(n-m+2)$  بعدی تصویر می‌شود که  $(m = m_1 + m_2)$  می‌باشد. همه گره‌های موجود در یک خوشه‌ی یکسان در فضای  $n$  بعدی، دارای یک گره معادل در فضای  $(n-m+2)$  بعدی می‌باشند تا قیود جفت-هوشمند تحقق یابند. حال می‌توان خوشه‌بندی طیفی مقید را به گراف استاتیکی  $G_S$  اعمال کرد تا کاتست‌هایی با کمترین اختلال در شارش توان یافت شوند که بتوانند قیدهای گروه‌بندی ژنراتورهای تولیدشده در مرحله اول الگوریتم را تحقق بخشند. بنابراین مرحله دوم الگوریتم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

(۱) تشکیل گراف استاتیکی  $G_S$  از همه گره‌ها؛ وزن کمان‌ها به صورت  $(|P_{ij}| + |P_{ji}|) / 2$  تعریف می‌شوند.

(۲) تشکیل ماتریس تصویر  $U$  بر اساس نتایج گروه‌بندی ژنراتورها.

(۳) محاسبه ویدو بردار ویژه اول  $v_1, v_2$  برای مسئله کلی  $U^T L_S U v = \lambda U^T U v$ .

(۴) تشکیل ماتریس  $J$  که  $J \in R^{n \times 2}$  که بردارهای  $U_{v_1}, U_{v_2}$  را به صورت ستونی ذخیره می‌کند.  $y_i \in R^2$  بردار متناظر با  $i$  آمین سطر  $J$  می‌باشد.

(۵) تقسیم گره‌های  $y_i \in R^2$  به خوشه‌های  $V_1$  و  $V_2$  با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی  $k$ -medoids.

(۶) انتخاب  $V_1$  یا  $V_2$  به عنوان مجموعه‌ی گره‌های گراف استاتیکی جدید و بازگشت به مرحله اول.

### ۳-۳- یافتن کاندیدهای عملی طرح جزیره بندی

در تخصیص شینه‌های سیستم به مجموعه ژنراتورهای هم‌نوا، پس از تشکیل گراف استاتیکی و محاسبه مقادیر ویژه ماتریس  $L_S$  همواره در مقالات و مطالعات قبلی اشاره شده است که دو مقدار ویژه نخست انتخاب شده و براساس آن‌ها بردارهای ویژه متناظر بدست آمده و در فرآیند خوشه‌بندی شینه‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه تمامی ترکیب‌های دوتایی ممکن از بردارهای ویژه در نظر گرفته شده و براساس هر کدام از ترکیب‌ها، خوشه‌بندی طیفی پیاده‌سازی شده و نهایت جزیره‌های مطلوب بدست آمده‌اند. تمامی نتایج حاصل از فرآیند خوشه‌بندی، ترکیب‌های ممکن نمی‌باشند، چرا که در جزیره‌بندی باید تمامی شینه‌ها در زیرگراف‌های نهایی به دست آمده حضور داشته باشند. بنابراین، مشاهده می‌شود روش‌های پیشنهادی در این زمینه مشکل دیگری نیز دارند که الگوریتم همواره منجر به پاسخ صحیح نمی‌گردد. پس به منظور اصلاح روند و برای شناسایی و حذف ترکیب‌های غیرممکن دو قانون زیر معرفی شده است:

(۱) اصل هم‌جواری برای شینه‌های در حال تخصیص باید رعایت گردد. در واقع در صورتی می‌توان یک شینه را به یک گروه از ژنراتورهای هم‌نوا تخصیص داد که آن شینه با یک ژنراتور از همان گروه و یا یک شینه دیگر در شبکه مورد نظر ارتباط داشته باشد.

(۲) در صورت یکسان بودن فاصله از دو ژنراتور در حالت تخصیص شینه‌ها، ژنراتوری انتخاب می‌گردد که حداقل یک شینه مشترک در همسایگی شینه مورد نظر داشته باشد.

براساس دو قاعده معرفی شده فوق، حالت‌های غیرممکن شناسایی و ترکیب‌های ممکن نهایی برای جزیره‌بندی بدست آورده می‌شوند.

### ۳-۴- تابع هدف دوم (عدم تعادل بار - تولید)

پس از دست‌یابی به ترکیب‌های ممکن برای جزیره‌بندی سیستم، باید حالت بهینه را از بین ترکیب‌های موجود تعیین گردد. بدین منظور در این مطالعه روشی مبتنی بر میزان تعادل توان تولیدی و مصرفی در جزیره‌ها ایجاد شده مطرح شده است. در این روش، شاخصی تحت عنوان شاخص عدم تامین بار مطابق رابطه (۱۶) تعریف شده است.

$$a_{ij} = \frac{P_{i, served}^j}{P_{i, total}^j} \quad (16)$$

در این رابطه  $P_{i, served}^j$  میزان توان تامین شده در جزیره  $i$  ام در ترکیب ممکن  $j$  ام،  $P_{i, total}^j$  میزان کل بار در جزیره  $i$  ام در ترکیب ممکن  $j$  ام و  $a_{ij}$  شاخص عدم تامین بار در جزیره  $i$  ام در ترکیب ممکن  $j$  ام می‌باشند. بنابراین، هر ترکیبی که کوچک‌ترین شاخص خاموشی بار را داشته باشد، به عنوان ترکیب بهینه در نظر گرفته می‌شود.



#### ۴- شبیه سازی و مطالعات عددی

در ادامه نتایج حاصل از پیاده سازی روش پیشنهادی بر روی سیستم ۳۹ شینه با ۱۰ ژنراتور ارائه می گردد. اطلاعات مربوط به این سیستم در مراجع [۳۶]-[۳۳] ارائه شده است. نخست به منظور دستیابی به گراف دینامیکی این سیستم، پس از محاسبه ماتریس لاپلاسین خواهیم داشت:

$$(L_D - \lambda M) v = 0 \rightarrow |L_D - \lambda M| = 0 \rightarrow \lambda = 98.686, -3.3979e-16, -76.786, -23.983, -7.6823, 3.0688, 35.187, 8.3574, 24.928, -115.4 \quad (17)$$

$$[L_D - \lambda_1 M] v_1 = 0 \rightarrow v_1 = \begin{bmatrix} 0.000042233723645 \\ -0.000953605665423 \\ 0.000652745616318 \\ -0.046460496898016 \\ 0.045490643914213 \\ -0.003440638503733 \\ 0.003996181212920 \\ 0.002549847132071 \\ 0.002370894352212 \\ 0.000021439527304 \end{bmatrix}; [L_D - \lambda_2 M] v_2 = 0 \rightarrow v_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$y_1 = [0.000042233723645 \quad 1]; y_2 = [-0.000953605665423 \quad 1]; y_3 = [0.000652745616318 \quad 1]; y_4 = [-0.046460496898016 \quad 1]; y_5 = [0.045490643914213 \quad 1]; y_6 = [-0.003440638503733 \quad 1]; y_7 = [0.003996181212920 \quad 1]; y_8 = [0.002549847132071 \quad 1]; y_9 = [0.002370894352212 \quad 1]; y_{10} = [0.000021439527304 \quad 1];$$

ابتدا فرض می شود که بردارهای  $y_1$  و  $y_4$  به عنوان مراکز خوشه ها انتخاب شوند. بنابراین کافی است فاصله بردارهای دیگر نسبت به آنها تعیین شود که در جدول ۱ ارائه شده است. مشاهده می شود که زیرگراف های دینامیکی سیستم برابرند با  $\{1\}$  و  $\{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ . معیار فاصله بر اساس روش  $k$ -medoids بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$d_{ij} = |y_i(1) - y_j(1)| + |y_i(2) - y_j(2)|, i \neq j, i, j = 1, 2, 3 \quad (18)$$

جدول (۱): نتایج الگوریتم  $k$ -medoids با در نظر گرفتن گره های ۱ و ۴

به عنوان  $medoid$  ها

مراکز خوشه ها	$c_1 = 1$	$c_2 = 4$
فاصله گره ژنراتور ۲ تا	۱/۰۰۱	۰/۰۴۵۵
فاصله گره ژنراتور ۳ تا	۰/۰۰۰۶	۰/۰۴۷۱
فاصله گره ژنراتور ۵ تا	۰/۰۴۵۴	۰/۰۹۲۰
فاصله گره ژنراتور ۶ تا	۰/۰۰۳۵	۰/۰۴۳
فاصله گره ژنراتور ۷ تا	۱/۰۰۴	۰/۰۵۰۵
فاصله گره ژنراتور ۸ تا	۰/۰۰۲۵	۰/۰۴۹۰

فاصله گره ژنراتور ۹ تا	۰/۰۰۲۳	۰/۰۴۸۸
فاصله گره ژنراتور ۱۰ تا	۱	۰/۰۴۶۵

حال باید زیرگراف دوم را نیز با رویکردی مشابه خوشه بندی نمود. برای این منظور، بایستی ماتریس لاپلاسین  $L_D$  را که برای آن، گره نخست حذف شده است را تعیین نمود:

$$y_1 = [-0.0013 \quad 0.0291], y_2 = [0.0007 \quad 0.0183], y_3 = [-0.0566 \quad 0.0024], y_4 = [0.0550 \quad 0.0063], y_5 = [-0.0040 \quad 0.0062], y_6 = [0.0051 \quad 0.0223], y_7 = [0.0047 \quad -0.0325], y_8 = [0.0028 \quad -0.0310], y_9 = [0 \quad -0.0170], \quad (19)$$

با توجه به ساختار شبکه و بررسی  $medoid$  های مختلف،  $medoid$  های نهایی را می توان گره ژنراتور ۲ و گره ژنراتور ۱۰ در نظر گرفت. بر اساس الگوریتم مذکور، فاصله سایر گره ها تا  $medoid$  های مذکور در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): نتایج الگوریتم  $k$ -medoids با در نظر گرفتن گره های ۲ و ۱۰

به عنوان  $medoid$  ها

مراکز خوشه ها	$c_1 = 2$	$c_2 = 10$
فاصله گره ژنراتور ۳ تا	۰/۰۲۱۶	۰/۰۳۶۰
فاصله گره ژنراتور ۴ تا	۰/۰۵۸۹	۰/۰۷۵۸
فاصله گره ژنراتور ۵ تا	۰/۰۶۳۹	۰/۰۷۸۳
فاصله گره ژنراتور ۶ تا	۰/۰۱۰۲	۰/۰۲۷۱
فاصله گره ژنراتور ۷ تا	۰/۰۳۹۹	۰/۰۴۴۳
فاصله گره ژنراتور ۸ تا	۰/۰۳۷۲	۰/۰۲۰۲
فاصله گره ژنراتور ۹ تا	۰/۰۳۳۸	۰/۰۱۶۹

بر اساس جدول ۲، گره های ژنراتوری ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ متعلق به خوشه  $medoid$  شماره ۲ و گره های ژنراتوری ۸ و ۹ متعلق به  $medoid$  شماره ۱۰ هستند. بنابراین، زیرگراف های نهایی گراف دینامیکی که منجر به تشکیل گروه های ژنراتوری هم نوا می شود، در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول (۳): گروه های ژنراتوری تشکیل شده در مرحله نخست برای

سیستم قدرت ۳۹ شینه

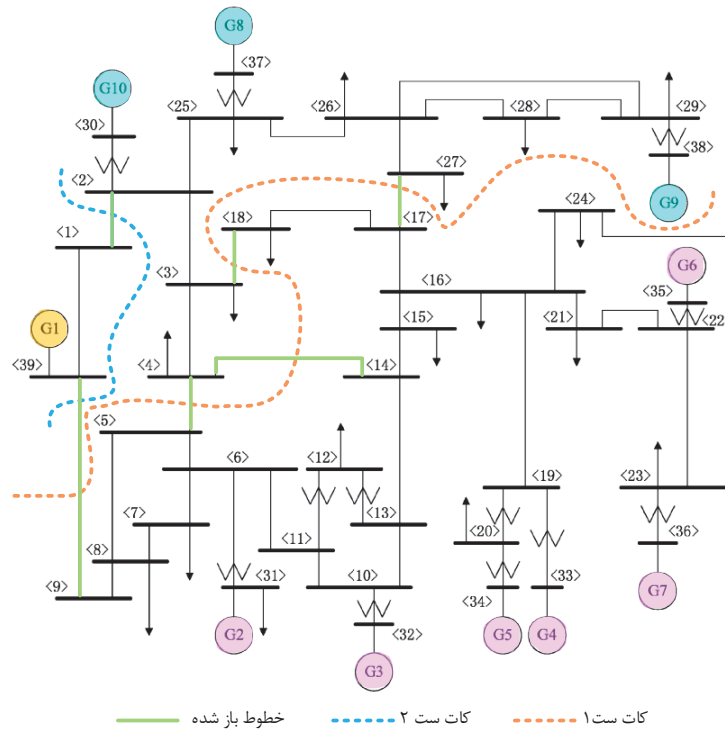
گروه اول	گروه دوم	گروه سوم
{۲,۳,۴,۵,۶,۷}	{۸,۹,۱۰}	{۱}

در ادامه گراف استاتیکی شبکه به دست می آید، بر اساس جدول ۳، به هریک از خوشه های مورد نظر، تعدادی از شینه ها تعلق پیدا می کنند که در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول (۴): زیرگراف‌های استاتیکی نهایی

خوشه	شینه‌های تعلق یافته به هر خوشه
$c_1 = \{30, 37, 28\}$	$\{2, 3, 4, 25, 26, 27, 28, 29\}$

$c_2 = \{39\}$	$\{1\}$
$c_3 = \{31, 32, 33, 34, 35, 36\}$	$\{5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24\}$



شکل (۲): نمایی از کات‌ست‌های ایجاد شده برای جزیره‌بندی سیستم قدرت ۳۹ شینه

همان‌طور

در

که

فصل سوم اشاره شد، انتخاب هر ترکیب خاص از بردارهای ویژه منجر به جزیره‌بندی متفاوت خواهد شد. از این رو، مطابق مطالب ذکر شده در فصل قبل، پس از دستیابی به بردارهای ویژه به‌ازای تمامی ترکیب‌های دوتایی ممکن از بردارهای ویژه به‌دست آمده، جزیره‌بندی صورت گرفته و نتایج به‌دست می‌آیند. سپس، ضریب تعادل توان تولیدی و توان مصرفی برای هر حالت محاسبه می‌گردد و در نهایت براساس نتایج حاصل، آن طرح جزیره‌بندی که کم‌ترین میزان ضریب عدم تأمین توان را داشته باشد، به‌عنوان ترکیب بهینه ممکن برای جزیره‌بندی انتخاب می‌گردد. در ابتدا هم‌نوایی ژنراتورها بررسی شده و متناسب با گراف دینامیکی به‌دست آمده ترکیب‌های مختلف برای تخصیص بقیه شینه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

ممکن که میزان خاموشی بارها در آن‌ها حداقل می‌باشد را برای سیستم ۳۹ شینه نشان می‌دهد. در این حالت نیز چون شرایط اولیه دامنه و فاز ولتاژ در طی فرآیند بهینه‌سازی تغییر نمی‌کند، بنابراین ترکیب‌های هم‌نوای ژنراتورها مانند حالت قبل و در سه گروه شامل گروه اول متشکل از ژنراتورهای موجود در شینه‌های ۳۷، ۳۸ و ۳۰، گروه دوم شامل ژنراتور موجود در شینه ۳۹ و گروه سوم متشکل از ژنراتورهای موجود در شینه‌های ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴ و ۳۵ خواهد بود. در جدول ۵ ترکیب‌های اختصاص یافته برای سایر شینه‌ها ارائه شده است.

جدول (۵): جزیره‌بندی سیستم ۳۹ شینه به‌ازای بردارهای ویژه

مختلف

(\*) بردارهای ویژه - (\*\* درصد عدم تأمین بار)

شینه	ساختار جزیره‌بندی	درصد عدم تأمین بار
۱	$\{1, 9, 22, 23, 24, 27\}$ $\{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 25\}$ $\{12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 26, 28, 29\}$	۳۰ و ۲۸
۲	$\{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 25\}$ $\{1, 9, 10, 12, 22, 23, 26, 27\}$ $\{11, 13, 18, 21, 24, 28, 29\}$	۳۱ و ۱۲

روند فوق بر روی سیستم ۳۹ شینه پیاده‌سازی می‌شود. در این حالت ۳۸ بردار ویژه در سیستم وجود خواهد داشت که به ۷۰۳ حالت مختلف می‌توان یک ترکیب دوتایی از این مجموعه انتخاب کرد. بنابراین، باید ۷۰۳ ترکیب مختلف از جزیره‌بندی به‌دست آمده و به‌ازای تمامی حالات پخش بار صورت گرفته و درصد عدم تأمین بار به‌ازای هر حالت به‌دست می‌آید. جدول ۵ نتایج به‌دست آمده برای ۵ ترکیب





۲/۵	{۱.۹.۱۰.۱۱.۲۲.۲۳.۲۴.۲۷}	۲۶ و ۲۵	۳
	{۲.۳.۴.۵.۶.۷.۸.۲۵}		
	{۱۱.۱۲.۱۴.۱۵.۱۶.۱۷.۱۸.۱۹.۲۰.۲۱.۲۶.۲۸.۲۹}		
۳	{۱.۲۲.۲۳.۲۴.۲۷}	۲۷ و ۲۵	۴
	{۲.۳.۴.۵.۶.۷.۸.۹.۱۰.۱۱.۱۳.۱۴.۱۵}		
	{۱۲.۱۶.۱۷.۱۸.۱۹.۲۰.۲۱.۲۵.۲۶.۲۸.۲۹}		
۴/۳	{۱.۹.۲۲.۲۳.۲۴.۲۷.۲۸.۲۹}	۱۱ و ۲	۵
	{۲.۳.۴.۵.۶.۷.۸.۱۰.۱۱.۱۳.۲۵.۲۶}		
	{۱۲.۱۴.۱۵.۱۶.۱۷.۱۸.۱۹.۲۰.۲۱}		

جدول (۶): زیرگراف‌های استاتیکی نهایی در سناریو اول

خوشه	شینه‌های تعلق یافته به هر خوشه
$c_1 = \{37, 38, 30\}$	{۲.۳.۴.۵.۷.۸.۱۴.۱۵.۱۶ ۱۷.۲۰.۲۵.۲۶.۲۷.۲۸.۲۹}
$c_2 = \{39\}$	{۱.۹}
$c_3 = \{31, 32, 33, 34, 35, 36\}$	{۶.۱۰.۱۱.۱۲.۱۳.۱۸ ۱۹.۲۱.۲۲.۲۳.۲۴}

#### ۴-۲- سناریو دوم: افزایش دامنه ولتاژ

در این سناریو افزایش دامنه ولتاژ از حد مجاز که در این مطالعه برابر با ۱/۰۵ پریونیت می‌باشد، مورد مطالعه قرار گرفته است. اغلب افزایش دامنه ولتاژ در سیستم در شرایط کم‌باری و طی بازه شب رخ می‌دهد. در چنین شرایطی در صورتی که مشکل به موقع شناسایی و برطرف نگردد، رله‌های اضافه ولتاژ تریپ داده و در این حالت جزیره‌بندی کنترل شده راهکاری موثر برای جلوگیری از فروپاشی سیستم خواهد بود. در سناریو اول فرض شده است که ولتاژ تمام شینه‌های غیرژنراتوری ۱۰ درصد افزایش یافته است. در این سناریو جزیره‌بندی کنترل شده مطابق جدول ۷ و شکل ۴ به دست خواهد آمد.

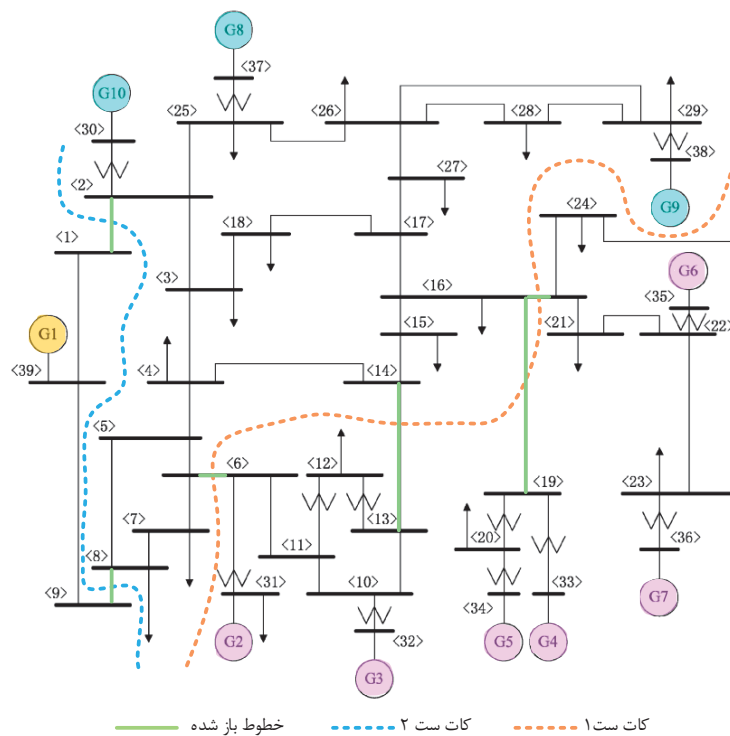
مشاهده می‌گردد که در این حالت نیز ترکیب ژنراتورهای هم‌نوا به دلیل ذکر شده در بخش قبل تغییر نکرده است. اما توجه به چند نکته ضروری به نظر می‌رسد. نخست آن‌که در این حالت عملاً تمامی باس‌ها بین دو گروه ژنراتوری هم‌نوا که پایدارتر بوده و توانایی جبران کمبودهای یکدیگر را دارند، تقسیم شده‌اند. ژنراتور ۱ موجود در باس ۳۹ به دلیل اینکه در یک ناحیه دیگر واقع شده و فاصله زیادی با ژنراتورهای دیگر دارد، عملاً در حالت خطای افزایش ولتاژ، فقط بار محلی خود را تأمین می‌کند. دلیل دیگر مجزا شدن ژنراتور ۱ این است که این ژنراتور کوچک بوده و ثابت اینرسی کوچکی دارد که موجب می‌گردد در مقابل خطا آسیب‌پذیرتر باشد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که در حالت افزایش ولتاژ سیستم واکنش شدیدتری را نشان داده و پایداری سیستم بیشتر در معرض فروپاشی قرار گیرد، چرا که افزایش ولتاژ موجب افزایش سطح توان راکتیو، اشغال ظرفیت خطوط انتقال و عمل کردن تجهیزات حفاظتی در سیستم خواهد شد. بنابراین، در چنین شرایطی سعی شده است سیستم به نحوی جزیره‌بندی گردد که پایدارترین ترکیب ممکن به دست آید.

شبکه مستعد فروپاشی خواهد شد.

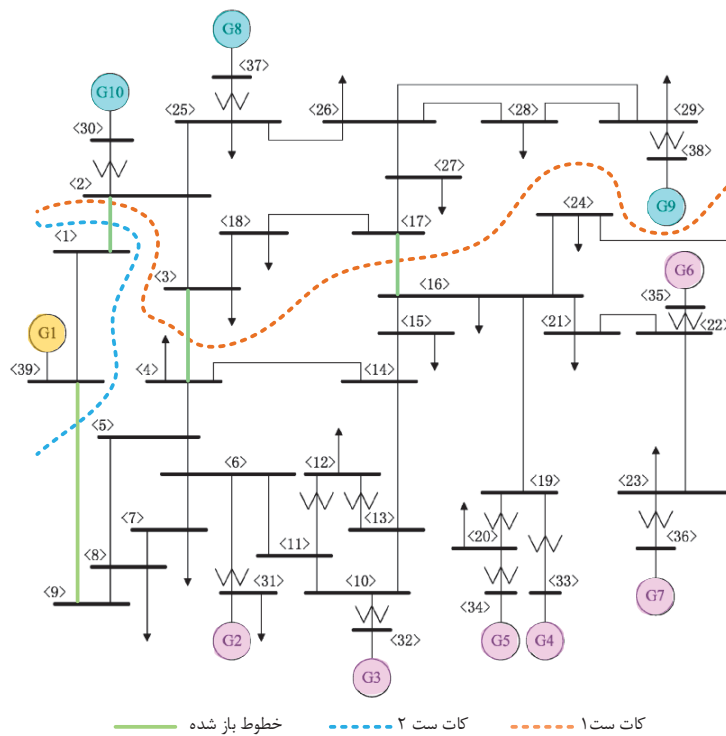
در این حالت ۷۸ ترکیب ممکن وجود دارد که به کمک قواعد معرفی شده در بخش قبل شناسایی و تعیین شده‌اند. پس از دست‌یابی به ترکیب‌های ممکن از جزیره‌بندی سیستم ۳۹ شینه، در هر کدام از حالات، پخش بار اجرا شده و میزان عدم تأمین بار بر حسب درصد به دست آمده است. براساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که ترکیب نخست در جدول ۵ منجر به حالت بهینه جزیره‌بندی از نقطه نظر پایداری گذرا و کم‌ترین میزان خاموشی در سیستم پس از جزیره‌بندی برای سیستم ۳۹ شینه خواهد شد. مشاهده می‌شود که نتیجه به دست آمده در بخش قبل برای جزیره‌بندی، حالت بهینه نبوده است.

#### ۴-۱- سناریوی اول: کاهش دامنه ولتاژ

طرح جزیره‌بندی پیشنهادی بایستی علاوه بر شرایط بهره‌برداری عادی در شرایط غیرعادی و خطادار نیز عملکرد مطلوب داشته باشد. در این سناریو مسئله کاهش دامنه ولتاژ شینه‌های سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. این رخداد ممکن است که در اثر عوامل مختلف از قبیل افزایش میزان مصرف، پیک پیش‌بینی نشده، خرابی خازن‌های موجود در سیستم، کاهش سطح توان راکتیو تولیدی در سیستم و عوامل مختلف دیگر ایجاد گردد. در این حالت ولتاژ مربوط به تمامی شینه‌های غیرتولیدی ۱۰ درصد کاهش یافته است. در این حالت جزیره‌بندی کنترل شده مطابق جدول ۶ و شکل ۳ به دست می‌آید. مشاهده می‌گردد که کاهش سطح دامنه ولتاژ در شینه‌های سیستم موجب تغییر در ترکیب ژنراتورهای هم‌نوا نمی‌گردد. این امر ناشی از این موضوع است که عملاً ولتاژ شینه‌های ژنراتوری به کمک تولید یا تزریق توان راکتیو در حد مطلوب نگه داشته می‌شود. ولی از سوی دیگر، به دلیل تغییر در سطوح ولتاژ شینه‌ها میزان شارش توان در خطوط مختلف تغییر کرده و این امر موجب می‌گردد شینه‌های تعلق گرفته به هر مجموعه از ژنراتورهای هم‌نوا نسبت به حالت قبل تغییر کند.



شکل (۳): نمایی از کاتست‌های ایجاد شده برای جزیره‌بندی سیستم قدرت ۳۹ شینه در سناریو اول



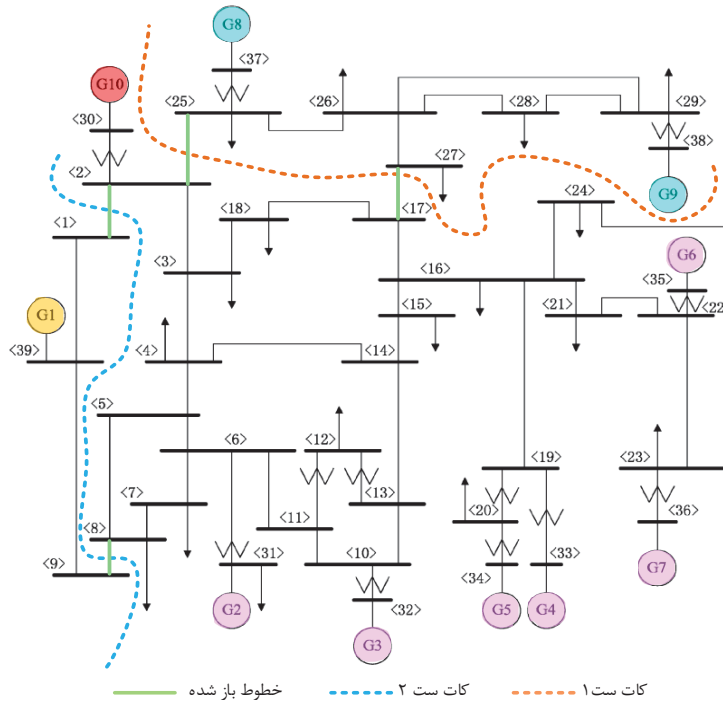
شکل (۴): نمایی از کاتست‌های ایجاد شده برای جزیره‌بندی سیستم قدرت ۳۹ شینه در سناریو دوم

جدول (۷): زیرگراف‌های استاتیکی نهایی در سناریو دوم

شبه‌های تعلق یافته به هر خوشه	خوشه
{۲,۳,۴,۱۱,۱۳,۱۷,۲۰, ۲۴,۲۵,۲۶,۲۸,۲۹}	$c_1 = \{۳۷,۳۸,۳۰\}$
{۱}	$c_2 = \{۳۹\}$
{۵,۶,۷,۸,۹,۱۰,۱۲,۱۴, ۱۵,۱۶,۱۸,۱۹,۲۱,۲۲}	$c_2 = \{۳۱,۳۲,۳۳, ۳۴,۳۵,۳۶\}$

### ۴-۳- سناریو سوم: خروج ژنراتور

در این سناریو خروج ژنراتور شماره ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است. ژنراتور ۱۰ به این دلیل انتخاب شده است که بزرگ‌ترین ژنراتور موجود در سیستم می‌باشد و خروج آن می‌تواند موجب وقوع تغییرات مختلفی گردد. نتایج مربوط به جزیره‌بندی سیستم در این حالت در جدول ۸ و شکل ۵ آورده شده است.



شکل (۵): نمایی از کات‌ست‌های ایجاد شده برای جزیره‌بندی سیستم قدرت ۳۹ شینه در سناریو سوم

ترکیب ژنراتورهای هم‌نوا و هم‌باس‌های تعلق گرفته به هر زیرگراف تغییر پیدا کرده است.

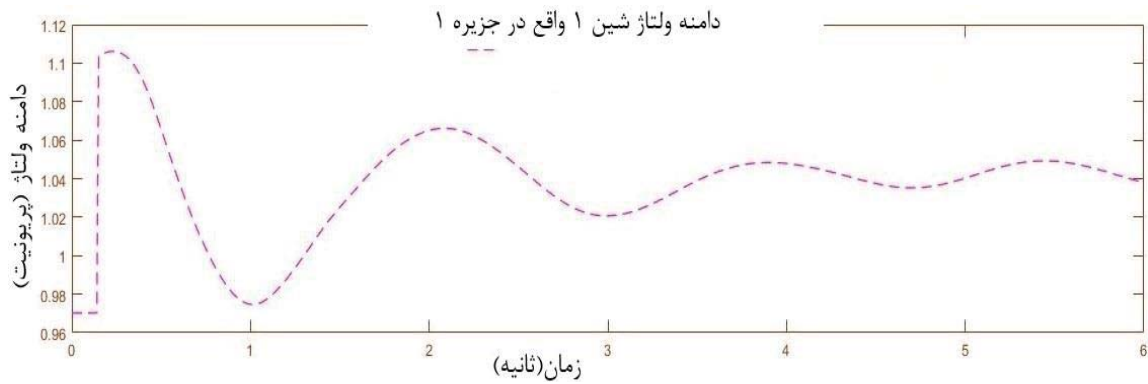
### ۴-۴- شبیه‌سازی زمانی

در این بخش مطالعات شبیه‌سازی حوزه زمان بر روی سیستم آزمون ۳۹ شینه براساس ترکیب جزیره‌بندی بهینه به‌دست آمده صورت گرفته است. شبیه‌سازی زمانی در محیط نرم‌افزاری MATLAB و به کمک جعبه‌ابزار PST صورت گرفته است.

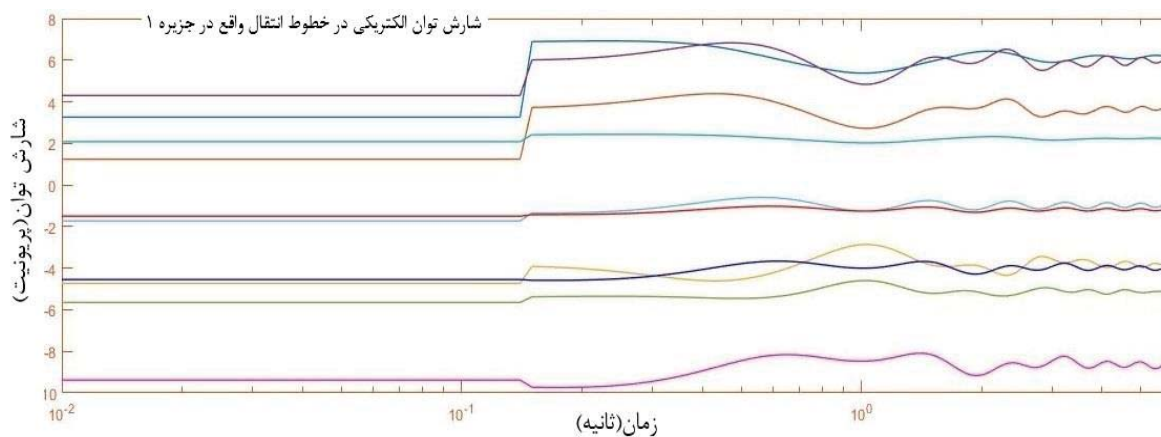
جدول (۸): زیرگراف‌های استاتیکی نهایی در سناریو سوم

شبه‌های تعلق یافته به هر خوشه	خوشه
{۱,۹}	$c_1 = \{۳۹\}$
{۲,۳,۴,۵,۶,۷,۸,۱۰, ۱۱,۱۳,۱۴,۲۴,۲۶,۲۷}	$c_2 = \{۳۷,۳۸\}$
{۱۲,۱۵,۱۶,۱۷,۱۸,۱۹, ۲۰,۲۱,۲۲,۲۳,۲۸,۲۹}	$c_2 = \{۳۰,۳۱,۳۲,۳۳, ۳۴,۳۵,۳۶\}$

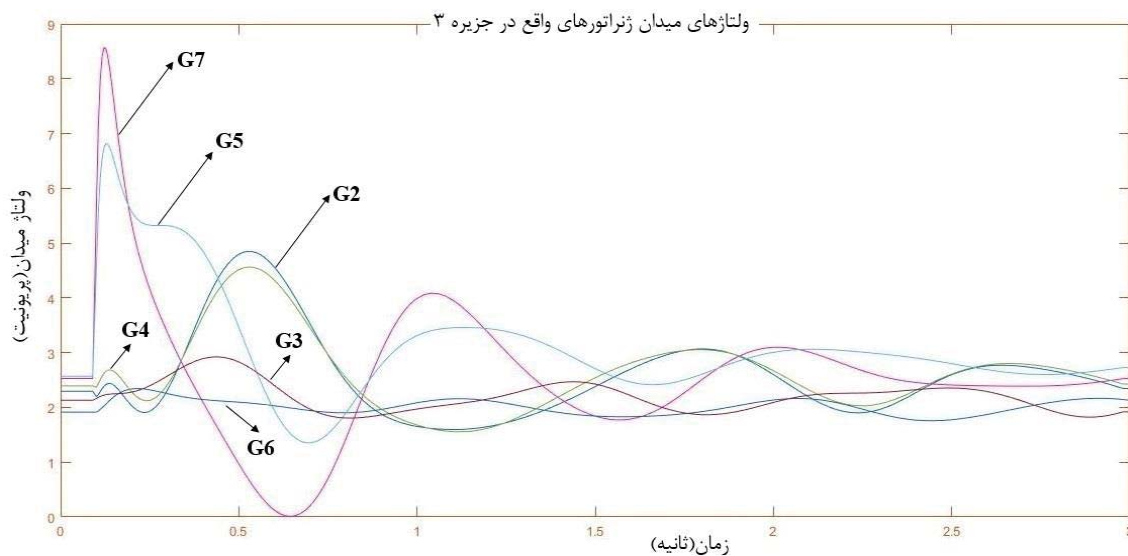
نتایج نشان می‌دهد که در این حالت نیز الگوریتم پیشنهادی به‌خوبی و به‌صورت کنترل‌شده‌ای سیستم‌قدرت را جزیره‌بندی می‌کند. در حالت خروج ژنراتور چون هم سطح ولتاژ و هم زاویه  $\delta$  تغییر می‌کند، هم



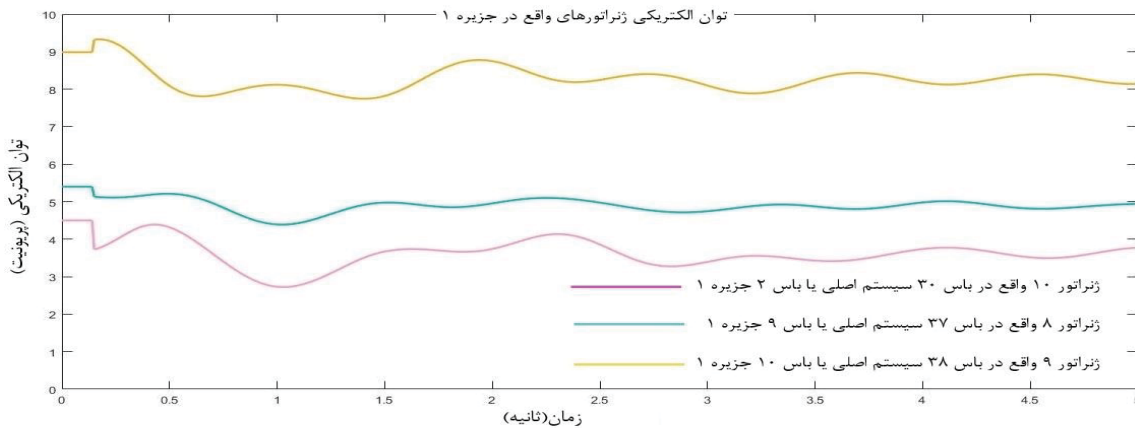
شکل (۶): دامنه ولتاژ شینه شماره ۱ در جزیره شماره ۱ در لحظه بعد از جزیره بندی



شکل (۷): شارش توان در خطوط جزیره ۱ قبل و بعد از جزیره بندی



شکل (۸): میرا شدن نوسانات ولتاژهای میدان ژنراتورهای جزیره ۳ در لحظه بعد از جزیره بندی



شکل (۹): توان‌های تولیدی ژنراتورهای جزیره ۱ در لحظه بعد از جزیره بندی

اهداف فوق‌الذکر را در نظر نگرفته است. از این رو این مطالعه با انجام این کار اقدامات متعاقب مورد نیاز در رابطه با بازپیکربندی سیستم انتقال، برنامه‌ریزی مجدد تولید و حذف بار را حداقل می‌کند و جزایری با سطح پایداری گذرای بالاتر و کیفیت مناسب‌تری از لحاظ تعادل بار-تولید را ایجاد می‌نماید. در واقع علاوه بر بهبود نتایج خروجی، هر دو تابع هدف مرسوم در فرآیند جزیره‌بندی در نظر گرفته شده‌اند، که این امر فرآیند سنکرون‌سازی هر یک از جزیره‌ها پس از رفع خطا و نیز بازگردانی مجدد سیستم به حالت اولیه را تسهیل می‌نماید. در این مطالعه روندی مبتنی بر بهینه‌سازی برای انتخاب بردارهای ویژه ماتریس لاپلاسیان ارائه گردید که منجر به انتخاب جزیره‌بندی بهینه از بین ترکیب‌های ممکن شد. در نهایت با پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم آزمون ۳۹ شینه IEEE تحت شرایط عادی و خطادار، کارایی و اعتبار روش پیشنهادی سنجیده شد. شبیه‌سازی‌های زمانی انجام شده در محیط MATLAB و همچنین به‌وسیله جعبه‌ابزار PST نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی می‌باشد.

## فهرست مراجع

- [۱] اسدی ح، صنایع‌پسند م، داورپناه م، معرفی یک روش جدید برای تخمین به هنگام ناپایداری ولتاژ در شبکه‌های قدرت بر مبنای حفاظت گسترده شبکه، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۴ (۲): ۳-۱۳، ۱۳۸۶.
- [2] Shao, D., Xu, Y., Xi, J., Zhang, S., Wang, Y., He, C., "Controlled Islanding Strategy of Central China Power Grid Based on Branch Potential Energy," IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, pp. 1792-1796, Oct. 2016.
- [3] Wang, X., "Slow coherency grouping based islanding using minimal cut sets and generator coherency index tracing using the continuation method," Ph.D. dissertation, Iowa State Univ., Ames, 2005.
- [4] Hao, L., Rosenwald, G. W., Jung, J., Liu, C. C., "Strategic power infrastructure defense," Proc. IEEE, vol. 93, no. 5, pp. 918-933, May 2005.
- [5] Peiravi, A., Ildarabadi R., "A fast algorithm for intentional islanding of power systems using the multilevel kernel k-means approach," J. Appl. Sci., vol. 9, no. 12, pp. 2247-2255, 2009.

لازم به ذکر است که جعبه ابزار PST یک بسته کنترل و شبیه‌سازی بر اساس نرم‌افزار متلب می‌باشد که در مطالعات سیستم‌های قدرت همچون تحلیل انواع پایداری، مباحث مختلف خطا، پخش بار و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۲].

سیستم‌های قدرت ناحیه وسیع به دنبال وقوع خطا، با نوساناتی در فرکانس، زاویه روتور، ولتاژ و ... مواجه می‌شوند. که متناسب با نوع و شدت خطا، سیستم قدرت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. جزیره‌بندی کنترل شده سیستم‌های قدرت که عموماً متعاقب وقوع اختلالی در شبکه انجام می‌شود، در هنگام پیاده‌سازی با نوساناتی در پارامترهای مختلف شبکه همراه خواهد بود که در صورت مناسب بودن طرح جزیره‌بندی، کلیه این نوسانات پس از مدت زمان کوتاهی میرا شده و سیستم به یک نقطه تعادل ثانویه می‌رسد. در این بخش با توجه به شکل‌های ۹-۶ پاسخ زمانی شبکه قدرت به طرح جزیره‌بندی پیشنهادی مطالعه شده است. اعتبار و صحت عملکرد این الگوریتم با انجام شبیه‌سازی‌های زمانی در ارتباط با توان‌های انتقالی از خطوط، دامنه ولتاژ شینه‌ها، ولتاژهای میدان و ... بررسی گردیده است. میل نمودن زیرسیستم‌های جزیره‌ای بعد از طی دوره‌های زیرگذرا و گذرای کوتاه‌بیه یک حالت ماندگار و وضعیت تعادل جدید نشان دهنده اعتبار و کارایی طرح پیشنهادی است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برخی از نواقص و معایب روش‌های قبلی بر طرف و ایده‌های جدیدی برای بهبود نتایج و تشکیل جزیره‌های بهینه ارائه گردید. روش خوشه‌بندی طیفی معرفی شده در مطالعات گذشته صرفاً بر پایه افزایش سطح پایداری گذرا در سیستم اجرا می‌شد. هر چند در شرایط بحرانی، در ابتدا هدف حفظ پایداری گذرا در سیستم می‌باشد اما در مرحله بعد توجه به ایجاد جزیره‌هایی متعادل از لحاظ بار-تولید باعث ایجاد زیرسیستم‌هایی بهینه از دیدگاه‌های مختلفی از جمله توجیه اقتصادی طرح، وقوع حداقل خاموشی‌ها، تسهیل در امر بازگردانی سیستم و ... می‌شود. تاکنون هیچ طرحی به‌صورت هم‌زمان

- [22] Lamba, S. S., Nath, R., "Coherency identification by the method of weak coupling," *Elect. Power Energy Syst.*, vol. 7, no. 4, pp. 233–242, Oct. 1985.
- [23] Sun, K., Zheng, D., Lu, Q., "Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 912–922, May 2003.
- [24] Henner, V. E., "A network separation scheme for emergency control," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 109–114, 1980.
- [25] Diestel, R., "Graph Theory," Springer-Verlag (2005)
- [26] A. M. Bagirov, J. Ugon, and D. Webb, "Fast modified global k-means algorithm for incremental cluster construction," *Pattern Recognition*, 2011 vol. 44, pp. 866–876.
- [27] Arbin, N., Zafirah Mokhtar, N., Suhailayani Suhaimi, N., Othman, Z., "Comparative Analysis between K-Means and K-Medoids for Statistical Clustering," in *Third International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation*, 2015.
- [28] Zadegan, S. M. R., Mirzaie, M., Sadoughi, F., "Ranked k-medoids: A Fast and Accurate Rank-based Partitioning Algorithm for Clustering Large Datasets," in *Knoldge Based Systems*, 2013, vol. 39, pp. 133–143.
- [29] Theodoridis, S., Koutroumba, K., "Pattern Recognition," 4th ed. New York: Academic, 2008.
- [30] Shi, J., Malik, J., "Normalized cuts and image segmentation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 22, no. 8, pp. 888–905, Aug. 2000.
- [31] Luxburg, U. V., "A tutorial on spectral clustering," *Statist. Comput.*, vol. 17, no. 4, pp. 395–416, Dec. 2007.
- [32] Chow, J. H., Cheung, K. W., "A toolbox for power system dynamics and control engineering education and research," *IEEE Trans. On Power Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 1559–1564, 1992.
- [33] Ramos, R. A., et al., "IEEE PES Technical Report TR-18: Benchmark Systems for Small-Signal Stability Analysis and Control," IEEE PES Resource Center, 2015
- [34] Canizares, C., et al., "Benchmark systems for small signal stability analysis and control," IEEE PES Technical Report-TR18, 2015. [Online] <http://resourcecenter.ieee.org/pes/product/technical-publications/PESTR18>
- [35] Singh, A. K., Pal, B. C., "Report on the 68-Bus, 16-Machine, 5-Area System, IEEE PES Task Force on Benchmark Systems for Stability Controls," 3 Dec. 2013. [Online] <http://eioc.pnnl.gov/benchmark/ieeess/index.htm>
- [36] Canizares, C., et al., "Benchmark Models for Analysis and Control of Small Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, Early Access Article, May 2016.
- [6] Peiravi, A., Ildarabadi R., "Comparison of computational requirements for spectral and kernel k-means bisection of power system," *Australian J. Basic Appl. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 2366–2388, 2009.
- [7] Ding, L., Gonzalez-Longatt, F. M., Wall, P., Terzija, V., "Two-Step Spectral Clustering Controlled Islanding Algorithm," vol. 28, no. 1, Feb. 2013.
- [8] Ding, L., Terzija, V., "A new controlled islanding algorithm based on spectral clustering," in *Proc. 4th IEEE Int. Conf. Electric Utility Deregulation, Restructuring, and Power Technology (DRPT2011)*, Weihai, China, Jul. 2011.
- [9] Quiros-Tortos, J., Sánchez-García, R., Brodzki, J., Bialek, J., "Constrained spectral clustering-based methodology for intentional controlled islanding of large-scale power systems," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 9, no. 1, pp. 31–42, January 2015.
- [۱۰] حسین پور م.ج.، پروین ح.، انتخاب خوشه‌های اولیه به کمک الگوریتم‌های هوشمند برای مشارکت در خوشه‌بندی ترکیبی، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳ (۲): ۱۶۳–۱۸۴، ۱۳۹۵.
- [11] Lin, Z., et al., "Application of Wide Area Measurement Systems to Islanding Detection of Bulk Power Systems," vol. 28, no. 2, May 2013.
- [12] Franco, R., Sena, C., Taranto, G. N., Giusto, A., "Using Synchrophasors for Controlled Islanding—A Prospective Application for the Uruguayan Power System," vol. 28, no. 2, May 2013.
- [13] Isazadeh, G., Khodabakhshian, A., Gholipour, E., "New intelligent controlled islanding scheme in large interconnected power system," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 16, pp. 2686–2696, Nov. 2015.
- [14] Fernandez-Porras, P., Panteli, M., Quirós-Tortos, J., "A Risk-Based Methodology for Defining the Time of Intentional Controlled Islanding," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, pp. 828–832, Oct. 2015.
- [15] Aghamohammadi, M. R., Salimian, M., "Intelligent Out of Step Predictor for Inter Area Oscillations Using Speed-Acceleration Criterion as a Time Matching for Controlled Islanding," *IEEE Trans on Smart Grid*, Sept. 2016.
- [16] Trakas, D. N., Voumvoulakis, E. M., Hatzigrygiou, N. D., "Controlled Islanding of Power Networks Using Machine Learning Algorithm," *MedPower*, pp. 1–6, NOV. 2014.
- [17] Li, J., Liu, C., Schneider, K. P., "Controlled Partitioning of a Power Network Considering Real and Reactive Power Balance," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 261–269, Dec. 2010.
- [18] Wang, C., Zhang, B., Li, P., Shu, J., Cheng, L., Hao, Z., Bo, Z., "Power System Islanding Based on Multilevel Reduced Graph Partitioning Algorithm," *UPEC 43rd International Universities Power Engineering Conference*, pp. 1–6, Sept. 2008.
- [19] O, G., A, R. M., "Real time identification of coherent groups for controlled islanding based on graph theory," *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9(8): 748–758.
- [20] Wang, T., Ding, L., Yin, S., Liu, J., Jia, Y., Zhang, D., "Dynamic performance comparison of different controlled islanding methods," *International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, pp. 1363–1367, Nov. 2015.
- [21] Chow, J. H., "Time-Scale Modeling of Dynamic Networks With Application to Power Systems," New York: Springer-Verlag, 1982.