

## ارائه روشی تطبیقی مبتنی بر تئوری گراف برای ارزیابی میزان اثربخشی مشتری در نتیجه مشارکت در پاسخگویی بار

محسن کجوری نفت چالی<sup>1</sup>، کارشناسی ارشد، علیرضا فریدونیان<sup>2</sup>، استادیار، حمید لسانی<sup>3</sup>، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

Kojury.savadkoohnaft@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران

fereidunian@eetd.kntu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران - تهران- ایران

lesani@ut.ac.ir

**چکیده:** هدف این مقاله ارائه روشی روندی کارآمد به منظور دسته بندی و رده بندی مشتریان در شبکه توزیع از جنبه میزان اثربخشی آنها در نتیجه مشارکت در برنامه پاسخگویی بار است. این چالشی است که علی رغم انجام مطالعات قابل ملاحظه در زمینه پاسخگویی بار مغفول مانده است. به ویژه این چالش زمانی برجسته تر می شود که به تاثیر پاسخگویی بار در بهره وری و مدیریت انرژی در شبکه برق توجه شود. همچنین تاکید می شود که نویسندگان این مقاله دارند توجه به قابلیت ها و داده هایی است که توسط زیرساخت اندازه گیری پیشرفته (AMI) در اختیار قرار می گیرد و کارایی مناسبی که روی پیاده سازی برنامه های مدیریت سمت مصرف دارد. ابزار این دسته بندی، علاوه بر تکنیک های معمول مورد استفاده در پردازش داده، ترکیبی از الگوریتم های خوشه بندی طیفی، تئوری گراف و همچنین مفهوم آنتروپی می باشد. این مقاله دارای دو بخش است، در بخش اول، مشتریان با اثربخشی بالاتر شناسایی شده و مدل ها و الگوهایی برای شناسایی آنها ساخته می شود. در این بخش در دو فاز با استفاده از ویژگی هایی که برای هر کدام از مشتریان در نظر گرفته می شود، با پیاده سازی پاسخگویی بار، دسته بندی توسط خوشه بندی طیفی و تئوری گراف انجام می گیرد. در بخش دوم نیز مدل های ساخته شده مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای ارزیابی روند پیشنهادی از یک مجموعه داده مصرفی واقعی AMI مربوط به کشور ایرلند استفاده شده است. نتایج مربوط به پیاده سازی پاسخگویی بار نشان می دهد که رده بندی مشتریان براساس میزان اثربخشی آنها به طور قابل قبولی انجام گرفته است.

**واژه های کلیدی:** مدیریت سمت مصرف، پاسخگویی بار، زیرساخت اندازه گیری پیشرفته (AMI)، داده کاوی، تئوری گراف، خوشه بندی طیفی

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۲

نام نویسنده مسئول: علیرضا فریدونیان

نشانی نویسنده مسئول: تهران، بزرگراه رسالت، سید خندان، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

## ۱- مقدمه

بیشتر در رابطه با این فناوری در مراجع [۵] و [۶] تشریح شده است که می‌توان به آنها مراجعه نمود.

از نکاتی که تا اینجا بدانها اشاره شده است برداشت می‌شود که در نگاه جدید به شبکه برق، مشترکین عهده‌دار مسئولیت‌های قابل اعتنایی هستند. این موضوع الزام توجه به آنها و شناسایی الگوی رفتاری آنها به عنوان عضوی فعال از فضای بازار برق را توجیه می‌نماید. از جمله مقالاتی که تحلیل رفتار مصرفی مشترکین را مورد توجه قرار داده‌اند می‌توان به مرجع [۹] اشاره نمود که با استفاده از الگوریتم‌های داده-کاوی و شناسایی الگو، روندی برای شناسایی تغییرات در الگوی رفتار مصرفی مشترکین ارائه نموده است. مرجع [۱۲] نیز با استفاده از یک روند ساختاریافته و استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی و داده‌های دقیق ساعتی مصرف، شناسایی رفتار مصرفی مشترکین را انجام داده است. همچنین مرجع [۱۱] که از دانش حاصل از شناسایی الگوی مصرف مشترکین برای پیش‌بینی بار کوتاه-مدت استفاده نموده است. در این میان نکته‌ای که در مرجع [۱۲] مورد توجه قرار گرفته است نوع مصرف مشترکینی است که در برنامه‌های پاسخگویی بار مشارکت می‌نمایند. اعتقاد بر این است که این موضوع تا حدود زیادی روی موفقیت این برنامه‌ها اثرگذار می‌باشد.

اعتقاد نویسندگان این مقاله این است که تمامی مشترکینی که در برنامه‌ی پاسخگویی بار مشارکت می‌نمایند دارای میزان اثرپذیری و کارایی یکسانی در پیاده‌سازی آن نمی‌باشند و همچنین همه‌ی مشارکت‌کنندگان در این برنامه نیز به یک اندازه از آن منتفع نمی‌شوند. این موضوع برخاسته از گونه‌های رفتاری مختلفی است که از مشترکین مشاهده می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهند که علی‌رغم تحقیق و بررسی‌های متعددی که در زمینه مفاهیم مرتبط با پاسخگویی بار صورت پذیرفته است، کمتر مطالعاتی مناسب و جامع در رابطه با ارزیابی میزان اثرپذیری مشترکین برای مشارکت در پاسخگویی بار انجام شده است [۱۰].

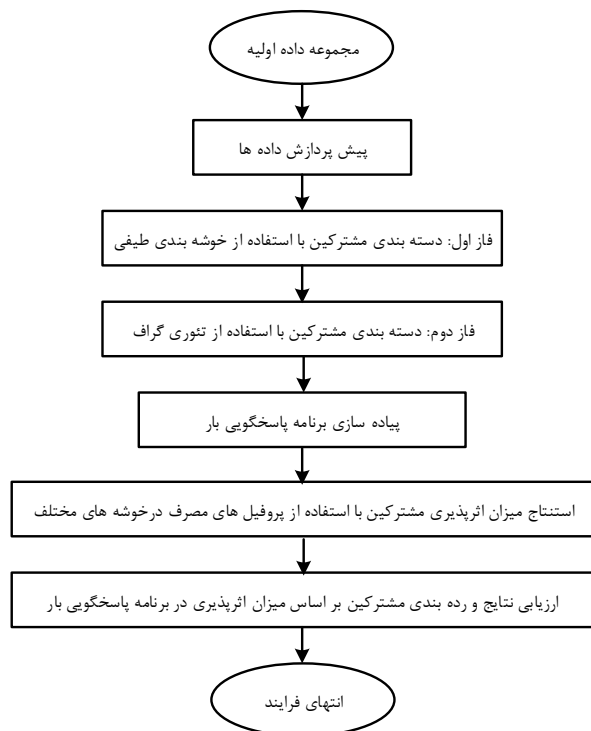
در این مقاله از الگوریتم خوشه‌بندی طیفی و همچنین تئوری گراف برای دسته‌بندی مشترکین استفاده شده که جزئیات مربوط به چنین انتخابی در متن مقاله مورد اشاره قرار گرفته است. در این زمینه، مرجع [۱۵] به معرفی الگوریتم خوشه‌بندی طیفی می‌پردازد که از آن برای نظارت بر شبکه استفاده شده است. نکته‌ی دیگر بحث تئوری گراف است که این موضوع نیز در مرجع [۱۶] مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۱۷] به بررسی ظرفیت‌های خوشه‌بندی طیفی برای شناسایی الگوی مصرف مشترکن و دسته‌بندی آنها می‌پردازد. در همین راستا مراجع [۱۸] و [۱۹] به موارد استفاده از ایده تئوری گراف و خوشه-بندی طیفی و مرجع [۲۰] نیز به استفاده از آنتروپی در بحث پردازش تصویر اشاره نموده‌اند. در نهایت از آنجاییکه در مفاهیم مرتبط با شناسایی الگو مفهوم داده‌کاوی نقشی برجسته دارد لازم است با اصول آن آشنا شد که برای این مورد مرجع [۱۳]، مرجع کاملی است.

یکی از نکات مهمی که امروزه به یکی از بزرگترین چالش‌های صنعت برق تبدیل شده است موضوع افزایش قابل توجه در میزان مصرف انرژی الکتریکی و نیاز روزافزون به آن است [۱]. بخشی از این نیازها با توسعه مراکز تولیدی رفع شده اما از لحاظ اقتصادی نمی‌توان تمامی این نیازها را از این طریق پوشش داد. همین مسئله سبب معرفی مفاهیمی از جمله مدیریت سمت مصرف شده است [۴]. توجه به این نکته که در حدود ۴۰٪ از هزینه‌ها و بهره‌برداری‌ها در شبکه برق مربوط به بخش توزیع است [۲] و همچنین ظرفیت‌های بالقوه‌ای که این بخش برای برنامه‌های مدیریت انرژی داراست [۳] سبب توجه سهم قابل اعتنایی از مطالعات به این بخش از شبکه شده است. برنامه‌های مدیریت سمت مصرف با جابجا نمودن مصرف مشترکین در طول ساعات مختلف و یا کاهش میزان مصرف در ساعاتی خاص یا بهره‌گیری از تجهیزات و وسایل با کارایی بیشتر و... برای اهداف مختلفی از قبیل افزایش بهره‌وری در صنعت برق، بهره‌برداری بهتر از شبکه، برنامه‌ریزی برای آینده و... مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از جمله معروف‌ترین و کاربردی‌ترین این برنامه‌ها، پاسخگویی بار است که در دو شکل پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت و مبتنی بر زمان پیاده‌سازی می‌شود [۷]. از گونه‌های مختلف این برنامه، آثار پیاده‌سازی آنها و سایر مطالب مرتبط با آن نکات قابل قبولی در مقالات مختلف بیان شده است. در این میان می‌توان به مراجع [۷] و [۸] اشاره نمود که شکل‌های مختلف برنامه پاسخگویی بار را معرفی و آثار پیاده‌سازی آن را بررسی نموده‌اند. نکته‌ای که نباید از آن غافل بود اینکه ورود مشترکین به معادلات شبکه و بازار نیازمند وجود زیرساخت ارتباطی مناسبی است که قادر باشد ارتباط دوسویه مناسبی را میان هر کدام از بخش‌های شبکه ایجاد نماید. همچنین مطابق ادبیات مفهوم پاسخگویی بار، مسلم است که پیاده‌سازی مناسب آن و رسیدن به عملکرد نزدیک به زمان واقعی مستلزم وجود مجموعه داده‌های با دقت بالا و از گونه‌های مختلف می‌باشد. درک این نیاز در سال‌های اخیر منتج به طراحی، معرفی و پیاده‌سازی زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته\* (AMI) شده است. AMI با ایجاد یک بستر ارتباطی دوسویه میان مصرف‌کنندگان، تولیدکنندگان و همچنین سایر قطب‌ها و فعالان فضای بازار برق کنونی امکان پیاده‌سازی برنامه‌های گوناگون از جمله برنامه‌های مدیریت مصرف را به شکلی مطلوب فراهم آورده است. اغلب چنین برنامه‌هایی از یکسو نیازمند تبادل اطلاعات با دقت و سرعت بالا و از سوی دیگر تبادل داده‌های جدید فراتر از داده‌های سنتی در سطح شبکه هستند که حاصل فضای جدید بازار برق است. AMI برای هردوی این نیازها راهکاری قابل قبول می‌باشد. اطلاعات با جزئیات

\* Advanced Metering Infrastructure (AMI)

اتصال دهنده جهتدار هستند ولی مواردی هم هست که دارای جهت نمی‌باشند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در برخی مطالعات از تئوری



شکل (۱): نمودار روند روش پیشنهادی

گراف برای مدل سازی شبکه قدرت استفاده شده است. به این ترتیب که رئوس گراف به عنوان واحدها و متغیرهای شبکه و شاخه‌ها نیز به عنوان خطوط اتصال دهنده این واحدها در نظر گرفته شده‌اند. در این مقاله نیز از چنین گرافی استفاده شده است که به صورت  $G=(V, E)$  نشان داده می‌شود و در آن  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  مجموعه رئوس و ماتریس  $E$  مجموعه شاخه‌های میان این رئوس را نشان می‌دهد. نکته مهم در بحث گراف، تعیین اوزان روی شاخه‌هاست.

$$w_{i,j} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (x_{i,n} - x_{j,n})^2} \quad (1)$$

این اوزان بیانگر هزینه جابجایی از یک راس به راس دیگر می‌باشد. به این ترتیب، طبیعتاً بیشتر بودن این اوزان هم‌ارز با فاصله بیشتر میان این رئوس از نقطه نظر شاخص مورد نظر در مطالعه‌ی مربوطه می‌باشد. حال اگر فرض نماییم که در این مقاله رئوس گراف متناظر با مشترکین و شاخص مورد نظر نیز شباهت الگوی مصرفی ایشان باشد، به این ترتیب، وزن شاخه میان دو مشترک (گره) که دارای پروفیل مصرفی متفاوتتری هستند مقدار بیشتری خواهد بود و برعکس. در این مقاله از اصل داده‌های مصرفی در سری زمانی مصرف مشترکین در ۲۴ ساعت به عنوان ویژگی برای ایشان استفاده می‌شود. با این توصیف، رابطه (۱) برای محاسبه فاصله میان دو گره در نظر گرفته شده است. در این رابطه،  $x_{i,n}$  مقدار ویژگی  $n$ ام (مصرف در بازه زمانی  $n$ ) برای

به‌طور کلی در این مقاله، هدف ارائه‌ی روندی کارآمد برای دسته‌بندی مشترکین از لحاظ میزان اثرپذیری آنها از شرکت در برنامه پاسخگویی بار با ایجاد تغییر در الگوی مصرفشان است. برای این منظور، منفعت کسب شده توسط مشترکین مورد بررسی قرار گرفته است. نکته‌ی دیگر، ابزار مورد استفاده برای این منظور است. الگوهای مختلفی که در رفتار مصرفی مشترکین مشاهده می‌شود و همچنین ظرفیت‌هایی که الگوریتم‌های خوشه‌بندی طیفی و تئوری گراف دارند سبب جلب توجه نویسندگان این مقاله به این الگوریتم‌ها شده است. مزیت این الگوریتم‌ها علاوه بر قدرت دسته‌بندی مناسب، این است که گروهی از موثرترین شاخص‌ها را برای تمایز میان مشترکین مشخص می‌نمایند. این نکته در بخش‌های آینده بیشتر تشریح خواهد شد.

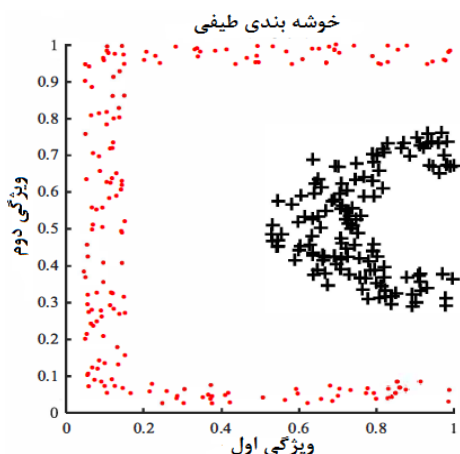
## ۲- روش شناسی

### ۱-۲- ساختار روش پیشنهادی

پیشتر اشاره شده است که هدف در این مقاله دسته‌بندی و رده‌بندی مشترکین براساس میزان اثرپذیری آنها در نتیجه‌ی مشارکت در برنامه پاسخگویی بار است. برای بالا بردن کیفیت روند، این دسته‌بندی در دو فاز انجام می‌شود. شکل (۱) روند کلی فرایند پیشنهادی برای این منظور را نشان می‌دهد که مطابق آن در مرحله‌ی اول، پس از پیاده‌سازی فرایند پیش پردازش داده‌های اولیه [۱۳]، مجموعه داده‌های مصرفی اصلی برای پردازش حاصل می‌شود. سپس خوشه‌بندی طیفی روی نمونه‌ها انجام شده و آنها را به خوشه‌های مربوطه تخصیص می‌دهد. در ادامه برای دسته‌بندی کامل‌تر از تئوری گراف و مفهوم آنتروپی استفاده شده تا تخصیص اعضا به خوشه‌ها با اطمینان بالاتری انجام شود. نتیجه‌ی این عمل به‌ویژه با استفاده از مفهوم آنتروپی و اصل داده‌های مصرفی به عنوان ویژگی، دسته‌بندی مشترکین با دقت بالا می‌باشد. پس از آن و با پیاده‌سازی برنامه پاسخگویی بار روی اعضا هر خوشه به‌طور جداگانه، میزان انتفاع آنها در نتیجه‌ی مشارکت در این برنامه مشخص می‌شود. در واقع، نتیجه پیاده‌سازی پاسخگویی بار ارزیابی نکاتی است که در مورد اثرپذیری مشترکین در فازهای تشریح شده به دست آمده است. جزئیات بیشتر در رابطه با پیاده‌سازی فرایند تشریح‌شده در قسمت‌های بعدی و پس از آشنایی با مفاهیم مورد نیاز بیان خواهد شد.

### ۲-۲- تئوری گراف

تئوری گراف ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی است که تشریح کامل جزئیات آن مورد توجه این مقاله نیست. اما اگر بخواهیم به‌طور مختصر بدان اشاره نماییم، گراف، مجموعه‌ای از رئوس (گره‌ها) است که توسط تعدادی شاخه به هم متصل شده‌اند. هر کدام از این گره‌ها یک متغیر هستند و اوزان روی شاخه‌های اتصال دهنده آنها نیز در حقیقت هزینه انتقال از یک گره به گره دیگر می‌باشد. معمولاً شاخه‌های



شکل (۳): خوشه بندی نمونه‌ها با استفاده از روش خوشه بندی طیفی [۱۵]

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$$

ورودی: مجموعه داده‌های اولیه

$$x_n = \{x_{n,1}, x_{n,2}, \dots, x_{n,m}\}$$

خروجی: برجسب‌های داده‌ها  $C = \{c_{x_1}, c_{x_2}, \dots, c_{x_N}\}$

۱: تعدادا بهینه خوشه‌ها تعیین شود (C) با استفاده از شاخص davise-bouldin

$$A = e^{-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}} \quad (A): \text{تعیین ماتریس همبستگی}$$

$$D_{ij} = \sum_{j=1}^N A_{ij}, i = 1, \dots, N \quad (D): \text{تعیین ماتریس قطری}$$

$$L = D^{-\frac{1}{2}} A D^{-\frac{1}{2}} \quad (L): \text{تعیین لاپلاسیان}$$

۵: گزینش تعداد (C) بردار ویژه با بزرگترین مقادیر ویژه و ویژه متناظر:

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_c\} = \begin{pmatrix} e_{1,1} & \dots & e_{1,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{i,1} & \dots & e_{i,i} \end{pmatrix}$$

$$E_{ij} = \frac{E_{ij}}{\left(\sum_{j=1}^N E_{ij}^2\right)^{\frac{1}{2}}}, (E): \text{نرمالیزه نمودن ماتریس}$$

۷: خوشه بندی ماتریس (E) با استفاده از روش خوشه بندی فازی (هر سطر از یک نقطه داده تصور می‌شود)

۸: برجسب نقطه داده از خروجی خوشه بندی فازی حاصل می‌شود

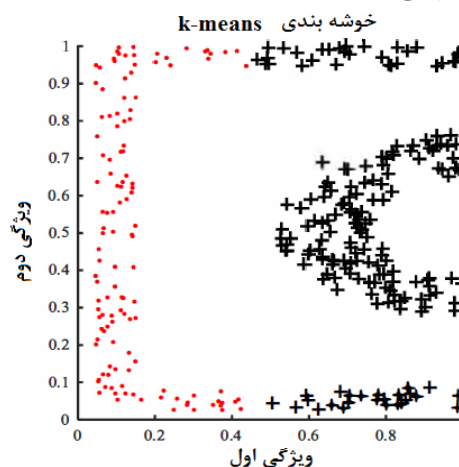
شکل (۴): روند خوشه بندی طیفی

از این اشکال به وضوح ملاحظه می‌شود که توانایی الگوریتم k-means در مقایسه با روش خوشه بندی طیفی برای فضاهای با چینش نمونه‌های این چنینی کمتر می‌باشد. این نکته سبب توجه نویسندگان این مقاله به الگوریتم‌های مبتنی بر مقادیر ویژه (Spectrum) و با مبنای تئوری گراف شده است که در قسمت ۲-۴ بیشتر با آنها آشنا می‌شویم. نکته مهم دیگری که در رابطه با خوشه بندی طیفی مطرح است توانایی ذاتی این روش در شناسایی ویژگی‌های اثرگذارتر در میان تمامی ویژگی‌های تعریف شده برای مشترکین است. مشخص شدن ویژگی‌های مهم تر و به تعبیری کاهش ابعاد داده به ویژه با افزایش قابل ملاحظه‌ای

مشترک  $i$  ام و  $x_{j,n}$  مقدار ویژگی  $n$  ام برای مشترک  $j$  ام را نشان می‌دهد و در نهایت  $W_{i,j}$  مقدار وزن میان این مشترکین می‌باشد. در قسمت‌های بعدی با کاربرد تئوری گراف و محاسبات مربوط به آن در پیاده سازی خوشه بندی طیفی بیشتر آشنا خواهیم شد.

## ۲-۳- ضرورت استفاده از خوشه بندی طیفی

خوشه بندی عبارت است از قرار دادن نمونه‌ها در خوشه‌های مختلف به گونه‌ای که نمونه‌های تخصیص یافته به هر خوشه دارای بیشترین شباهت به یکدیگر و کمترین شباهت به نمونه‌های تخصیص یافته به خوشه‌های دیگر باشند [۱۳]. با این هدف، روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای خوشه بندی نمونه‌ها ارائه شده که جزئیات کامل آن در مرجع [۱۳] ارائه شده است. در این میان الگوریتم k-means دارای شناخته شدگی بیشتری نسبت به سایر الگوریتم‌هاست که با تخصیص اولیه تعدادی مرکز خوشه و مفهوم فاصله شعاعی و به روز رسانی مراکز خوشه‌ها عمل دسته بندی نمونه‌ها را انجام می‌دهد. اما در این میان زمانی شرایطی پیش می‌آید که توزیع نمونه‌ها در فضای ورودی به گونه‌ای است که با ایده‌ی الگوریتم k-means نمی‌توان به دسته بندی مناسبی برای آن دست یافت. به عنوان مثال، شکل‌های (۲) و (۳) گونه‌ای از توزیع نمونه‌ها در فضای ورودی را نشان می‌دهد که دسته بندی آنها با استفاده از الگوریتم‌های k-means و خوشه بندی طیفی انجام گرفته است.



شکل (۲): خوشه بندی نمونه‌ها با استفاده از روش k-means [۱۵]

تعیین نمود. همین اهمیت سبب شده تا در این مقاله روندی دوفازی و تطبیقی برای تعیین خوشه‌های بهینه ارائه شود.

که در حجم داده‌ها در نتیجه‌ی ورود AMI ایجاد می‌شود و چالاش کلان داده‌ها<sup>†</sup> دارای اهمیت بالایی می‌باشد.

## ۴-۲- تئوری خوشه‌بندی طیفی

الگوریتم خوشه‌بندی طیفی برخلاف روش‌های مرسوم خوشه‌بندی، با استفاده از تئوری گراف و مقادیر ویژه‌ی ماتریس لاپلاسیان، دسته‌بندی نمونه‌ها را انجام می‌دهد. با این فرض که نمونه‌ها رئوس یک گراف را تشکیل دهند و شاخه‌ها و اوزان آنها نیز طبق نکته بیان شده در تئوری گراف تعیین شود، می‌توان گراف متناظر با مشترکین را تشکیل داد. توضیح کامل‌تر این الگوریتم در مرجع [۱۰] ارائه شده و در اینجا شرح ریاضی مختصری از مراحل پیاده‌سازی آن در شکل (۴) تشریح شده است. مطابق این توضیح، این‌طور تصور می‌شود که تعدادی نمونه اولیه داریم که هرکدام دارای تعدادی ویژگی (بعد) هستند و قرار است در خوشه‌هایی قرار گیرند. در مرحله‌ی بعد باید تعداد خوشه‌ها تعیین شود که در این مقاله برای این منظور از شاخص Davise-Bouldin استفاده شده و رابطه (۲) نشان‌دهنده فرمول این شاخص می‌باشد [۱۱].

در این رابطه،  $S(Q_K)$  میانگین فاصله درون خوشه‌ی  $Q_K$  و  $d(Q_j, Q_l)$  فاصله بین خوشه‌های  $Q_j$  و  $Q_l$  و  $N_c$  نیز برابر با تعداد بهینه خوشه‌ها می‌باشد. جزئیات کاملتر مربوط به مفهوم و روند محاسبه این شاخص در مرجع [۱۱] ارائه شده است و اینجا از پرداختن به آن صرف‌نظر می‌شود. در مرحله‌ی بعد باید ماتریس‌های همبستگی و لاپلاسیان را مطابق فرمول‌های بیان شده به دست آورد. در ادامه و پس از تعیین مقادیر ویژه ماتریس  $L$  باید این مقادیر را نرمالیزه نمود. در انتها با فرض اینکه هر سطری از ماتریس  $L$  نشان‌دهنده‌ی یک نمونه است، باید با استفاده از خوشه‌بندی فازی، عمل خوشه‌بندی نمونه‌ها را انجام داد. لازم به ذکر است که تشریح کامل جزئیات مربوط به خوشه‌بندی فازی در مرجع [۹] ارائه شده است. نتیجه‌ی این خوشه‌بندی تعلق برچسب‌هایی به هر کدام از نمونه‌هاست که خوشه‌ی آنها را تعیین می‌نماید.

$$DB = \frac{1}{N_c} \sum_{j=1}^{N_c} \max_{l \neq j} \frac{S(Q_j) + S(Q_l)}{d(Q_j, Q_l)} \quad (2)$$

## ۳- دسته‌بندی مشترکین

در این قسمت به‌طور دقیق‌تر فرایندهای مرتبط با دسته‌بندی و رده‌بندی مشترکین بر اساس میزان اثرپذیری‌شان در برنامه‌ی پاسخگویی بار تشریح می‌شود. روند پیشنهادی کلی برای این منظور در شکل (۵) نشان داده شده است که در قسمت‌های آینده با جزئیات بدان پرداخته می‌شود. نکته منطقی که اعتقاد نویسندگان این مقاله نیز می‌باشد این است که بتوان تعداد بهینه خوشه‌ها را با استفاده از موثرترین شاخص‌ها

<sup>†</sup> Big Data

نرخ تغییر شاخص  $\Theta(S)$  به کمتر از ۵٪ برسد. لازم به ذکر است که مقدار ۵٪ نیز براساس سعی و خطا و مقایسه نتایج و خروجی‌های خوشه‌بندی فازی به دست آمده است.

$$d_i = w_{ii} = \sum_{j=1}^N w_{ij} \quad (3)$$

$$L_n = D^{-1/2} L D^{-1/2} \quad (4)$$

$$[L_n]_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } i = j \\ \frac{-w_{ij}}{\sqrt{d_i} \sqrt{d_j}}, & \text{if } i \neq j, (i, j) \in E \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu(S) = \sum_{i \in S} d_i \quad (6)$$

$$\eta(S) = \sum_{i \in S, j \notin S} w_{ij} \quad (7)$$

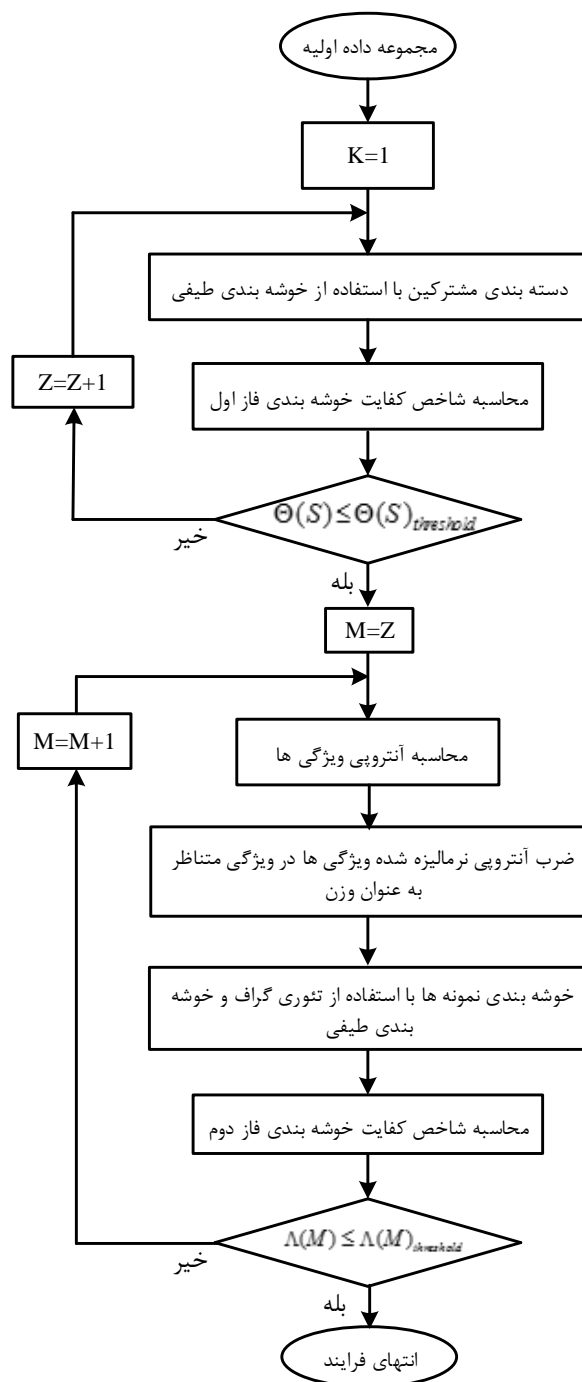
$$\Theta(S) = \frac{\eta(S)}{\mu(S)} \quad (8)$$

### ۲-۳- فاز دوم دسته‌بندی با استفاده از تئوری گراف و مفهوم آنتروپی

در این فاز با استفاده از مفهوم تئوری گراف که پیشتر اصول اولیه آن مورد اشاره قرار گرفته و همچنین مفهوم آنتروپی، فرایند تفکیک تشریح شده در فاز قبل تکمیل می‌شود. لازم است که در رابطه با نقش آنتروپی و چگونگی کاربرد آن برای تخصیص وزن به هر یک از ویژگی‌ها در این قسمت توضیحاتی ارائه شود.

مطابق نکاتی که در بحث تئوری اطلاعات مطرح است، آنتروپی یک پیام ارسالی یا یک متغیر تصادفی، بیانگر میزان عدم قطعیت آن است. به این ترتیب که هر اندازه میزان آنتروپی آن بیشتر باشد یعنی دارای عدم قطعیت بیشتری است و برعکس. چنین متغیری گرچه دارای حجم بالاتری از اطلاعات نادانسته برای ماست اما در تصمیم‌گیری دارای اثرگذاری کمتری می‌باشد. مطابق این توضیح و همچنین با الهام از نکاتی که در رابطه با پاسخگویی بار در مراجع [۷] و [۱۲] مطرح شده، و همچنین نگاهی که در مرجع [۷] به موضوع آنتروپی شده است می‌توان این چنین بیان نمود که ویژگی‌هایی در تصمیم‌گیری‌های مربوط به پاسخگویی بار موثرتر هستند که دارای آنتروپی کمتر یا قطعیت بالاتری باشند. در حقیقت محاسبه‌ی شاخص آنتروپی برای شناسایی میزان اثرگذاری این ویژگی‌ها کمک‌کننده می‌باشد.

رابطه (۹) فرمول اصلی آنتروپی ( $Ent_j$ ) برای ویژگی  $j$  را نشان می‌دهد. در این رابطه،  $R_{ij}$  بیانگر میزان چگالی وزنی ویژگی  $j$  برای



شکل (۵): نمودار روند جزئی فرایند معرفی شده برای دسته‌بندی مشترکین

تراکم هر خوشه است که به صورت نسبت میانگین فاصله‌ی درون خوشه‌ای به میانگین فاصله‌ی بین خوشه‌ای تعریف می‌شود. هر اندازه که مقدار این شاخص کوچکتر باشد به معنی خوشه‌بندی با کیفیت بالاتر است و برعکس. با این فرض، حالت مطلوب‌تر متناظر با زمانی است که صورت کسر که بیانگر مجموع فواصل اعضاء هر خوشه از یکدیگر است مقدار کم‌تر و مخرج کسر که بیانگر مجموع فواصل اعضاء هر خوشه از اعضاء سایر خوشه‌هاست مقدار بیشتری باشد. در این مطالعه روند افزایش تعداد خوشه‌ها ( $Z$ ) تا جایی ادامه می‌یابد که



متفاوت از  $\Theta(S)$  مورد استفاده قرار می‌گیرد که در روابط (۱۸)-(۱۴) نحوه محاسبه آن ارائه شده است. برای این شاخص نیز مانند  $\Theta(S)$ ، هر اندازه مقادیر کوچکتر باشد شرایط مطلوب‌تر است. با استفاده از برچسب‌هایی که به هر نمونه در نتیجه‌ی خوشه‌بندی طیفی در فاز قبل تعلق گرفته است، فرایند تعیین تعداد خوشه‌های بهینه آغاز می‌شود. برای محاسبه شاخص جدید  $\Lambda(M)$ ، در رابطه (۱۸)،  $\Psi_k$  یک بردار  $1 \times N$  می‌باشد که بیانگر برچسب تعلق گرفته به هر نمونه در نتیجه‌ی آخرین خوشه‌بندی انجام گرفته می‌باشد و همچنین  $\gamma$  نیز ضریب این برچسب‌هاست که همان ضرایب عضویت خوشه‌بندی فازی هستند. همچنین در رابطه (۱۸)،  $\lambda_k$  بیانگر بردار تفکیک  $1 \times N$  است که برای حالتی که  $i$  امین نمونه در  $k$  امین خوشه باشد  $\lambda_{ik} = 1$  می‌باشد و برای حالتی که  $i$  امین نمونه در  $k$  امین خوشه نباشد  $\lambda_{ik} = 0$  می‌باشد. همچنین  $R$  و  $W$  نیز هر دو ماتریس‌های  $N \times N$  هستند و  $D$  نیز یک ماتریس قطری است که اعضا روی قطر اصلی  $(i, i)$  آن برابر مجموع مقادیر  $i$  امین سطر ماتریس  $W$  می‌باشد که این نکته در رابطه (۱۸) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در رابطه (۱۸)، نشانگر تعداد خوشه‌هاست.

$$w_{ij} = \exp(-\theta_1 \|f_{1,i} - f_{1,j}\| - \theta_2 \|f_{2,i} - f_{2,j}\| - \dots - \theta_{r-1} \|f_{r-1,i} - f_{r-1,j}\| - \theta_r \|f_{r,i} - f_{r,j}\|) \quad (14)$$

$$\Pi_k = \gamma [I - (1 - \gamma)]^{-1} \Psi_k \quad (15)$$

$$R = D^{-1} W \quad (16)$$

$$d_{ii} = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (17)$$

$$\Lambda(M) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k^T \Pi \lambda_k}{\lambda_k^T D \lambda_k} \quad (18)$$

#### ۴- پیاده‌سازی

##### ۴-۱- مطالعه موردی

در این مقاله از اطلاعات مربوط به یک شبکه‌ی توزیع واقعی با تعداد ۷۶۰ نمونه از مشترکین خانگی کشور ایرلند استفاده شده است. این داده‌های مصرفی برای مدت یکسال و با فاصله زمانی ۳۰ دقیقه‌ای ثبت شده‌اند. این یعنی برای هر مشترک در هر ۲۴ ساعت تعداد ۴۸ نمونه ثبت شده داریم. این یکسال به دو دوره‌ی شش‌ماهه تقسیم می‌شود که در شش‌ماه اول شناسایی و مدل‌سازی و در شش‌ماه دوم ارزیابی روند و مدل صورت می‌پذیرد.

نمونه‌ی  $i$  و  $x_{ij}$  نیز مجموع مقادیر این ویژگی برای تمامی نمونه‌هاست. اگر تعداد نمونه‌ها را  $N$  فرض نماییم، مقدار  $K$  با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. به این ترتیب، می‌توان با استفاده از رابطه (۹) به مقدار آنتروپی متناظر با ویژگی  $j$  ام دست یافت. از سوی دیگر بیان شده که آنتروپی میزان عدم قطعیت یک متغیر را نشان می‌دهد، بر این اساس، رابطه (۱۲) بیانگر میزان اطمینان به ازای یک ویژگی است که هر اندازه برای یک ویژگی دارای مقداری بزرگتر باشد یعنی تاثیر آن ویژگی در تصمیم‌گیری بیشتر است. در نهایت نیز برای امکان مقایسه راحت‌تر میان ویژگی‌ها با استفاده از رابطه (۱۳)، مقادیر  $d_j$ ها نرمالیزه می‌شود.

$$Ent_j = -K \sum_{i=1}^m R_{ij} \ln R_{ij} \quad (9)$$

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (10)$$

$$K = \frac{1}{\ln(N)} \quad (11)$$

$$d_j = 1 - Ent_j \quad (12)$$

$$\theta_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (13)$$

در ادامه پس از آنکه با استفاده از آنتروپی، ویژگی‌های با ارزش بالاتر برای تفکیک مشخص شدند، برای خوشه‌بندی از این مقادیر قطعیت نرمالیزه شده ( $\theta_j$ ) به عنوان وزن برای ویژگی‌ها استفاده می‌شود. به این ترتیب به ویژگی‌های دارای اثرگذاری بیشتر وزن بیشتری تعلق می‌گیرد و برعکس. این عمل سبب می‌شود که در عمل خوشه‌بندی، تفاوت‌های اساسی‌تر بیشتر به چشم آمده و منجر به یک فرایند خوشه‌بندی دقیق‌تر شود. روابط (۱۴) چگونگی تخصیص اوزان به ویژگی‌های مختلف را بیان می‌نمایند. در رابطه (۱۴)، ضرایب  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r$ ، مقادیر نرمالیزه شده‌ی اوزان ویژگی‌ها در تصمیم‌گیری و دسته‌بندی مشترکین است. در همین راستا، به عنوان نمونه، شکل (۶) میزان اهمیت ویژگی‌ها را که از این طریق محاسبه شده است را برای دسته‌بندی مشترکین نشان می‌دهد. در این شکل هر ویژگی که دارای آنتروپی کمتری باشد نقش موثرتری در تصمیم‌گیری ایفا می‌نماید.

در این فاز و پس از لحاظ نمودن مفهوم آنتروپی، ویژگی‌های موثرتر برای خوشه‌بندی مشترکین شناسایی شده و وزن‌های مناسب به هر کدام از آنها تخصیص یافته است. اعمال این اوزان به ویژگی‌های مربوط به مشترکین شرایط جدیدی را ایجاد نموده است که حال باید مشخص شود که با وضعیت جدید تعداد بهینه خوشه‌ها چه تعدادی می‌باشد. برای این منظور نیز در قالب فرایندی تطبیقی، شاخصی

بندی در دو فاز و با فرض وجود اوزان. منحنی‌های رسم‌شده در شکل (۸) گویای مقادیر کمتر  $\Lambda(M)$  به‌ازای حالت سوم هستند که این بیانگر عملکرد بهتر حالت پیشنهادی در این مقاله نسبت به دو حالت دیگر است. در نهایت و با استفاده از دو فاز طراحی شده برای دسته-بندی، تعداد ۱۶ خوشه به عنوان تعداد خوشه‌های بهینه نهایی تعیین شده‌اند.

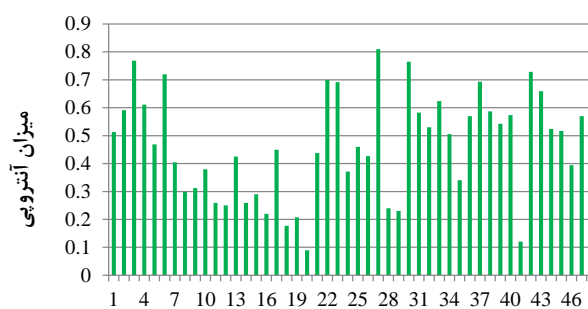
### ۳-۴- پیاده‌سازی پاسخگویی بار و نتایج آن

این بخش از مقاله مربوط به پیاده‌سازی برنامه پاسخگویی بار و ارزیابی میزان کارایی دسته‌بندی صورت گرفته می‌باشد. برای این منظور فرض می‌شود که تمامی مشترکین در این برنامه مشارکت نمایند و در

جدول (۲): میزان کاهش هزینه مشترکین (شش ماهه دوم)

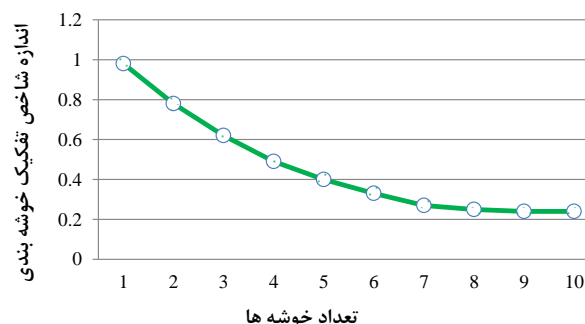
تعداد خوشه	مشارکت 10%	مشارکت 20%	مشارکت 30%	مشارکت 40%	مشارکت 50%
1	4.53%	6.85%	8.56%	13.31%	16.07%
2	5.84%	10.06%	9.93%	14.77%	17.34%
3	7.29%	11.37%	12.7%	16.74%	19.52%
4	9.17%	12.51%	14.42%	17.8%	20.75%
5	10.02%	13.87%	15.61%	18.93%	21.88%
6	12.17%	14.38%	17.32%	21.02%	23.49%
7	13.69%	16.87%	18.66%	22.57%	25.11%
8	15.07%	17.95%	20.21%	23.65%	26.24%
9	16.98%	19.12%	21.36%	25.71%	28.33%
10	18.53%	21.02%	23.19%	26.92%	30.17%
11	19.51%	22.69%	24.61%	28.09%	32.15%
12	20.64%	23.99%	26.16%	30.68%	33.64%
13	22.13%	25.32%	28.09%	31.89%	35.11%
14	23.74%	27.05%	29.16%	33.06%	36.42%
15	25.04%	28.26%	30.29%	34.22%	38.26%
16	27.43%	30.35%	31.18%	35.75%	39.71%

ساعات اوج مصرف با پله‌های ۱۰٪ از میزان مصرف خود کاسته و این مصارف را به ساعات کم‌باری منتقل نمایند. در هر نوبت از پیاده‌سازی پاسخگویی بار، فرض می‌شود که تنها اعضا یک خوشه مشارکت می‌نمایند. پس از پیاده‌سازی برنامه با بررسی داده‌های مصرفی شش ماه اول، جدول (۱) حاصل شده است که نشان‌دهنده میزان منفعت مشترکین خوشه‌های مختلف در نتیجه‌ی شرکت در پاسخگویی بار از دیدگاه کاهش هزینه‌ی پرداختی می‌باشد. البته در این جدول خوشه‌ها به ترتیب افزایش میزان اثرپذیری و منفعت اعضا مرتب شده‌اند. از آنجایی که دسته‌بندی مشترکین در این مقاله به‌صورت دقیق و با وزن-دهی به ویژگی‌های مشترکین که همان اصل داده‌های مصرفی هستند صورت پذیرفته است، باید از روی این نتایج به دست آمده الگوی رفتاری غالب مشترکین در خوشه‌ها را استخراج نمود. بررسی الگوی مصرفی غالب مشترکین هر خوشه و مقایسه‌ی آن با الگوی بهینه از دیدگاه شبکه که با در نظر گرفتن سیگنال‌های قیمت متناظر با کمترین هزینه برای مشترک به دست آمده است منتج به منحنی‌های میانگین اختلاف پروفیل مصرفی مشترکین و پروفیل بهینه شبکه شده است. میزان این اختلافات در شکل (۹) برای هر ۱۶ خوشه نشان داده شده است. تحلیل نتایج در این مقاله مطابق شکل (۹) بیان می‌نماید

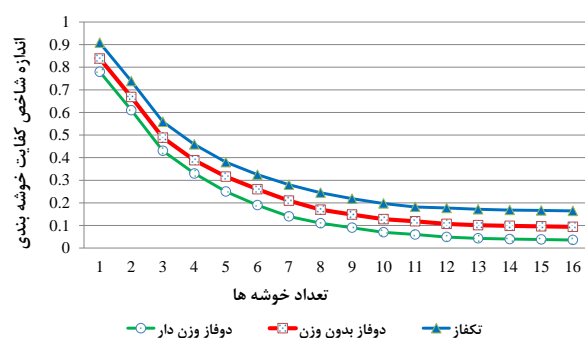


ویژگی‌ها

شکل (۶): آنتروپی متوسط خوشه‌ها برای یک بازه‌ی زمانی مطالعه



شکل (۷): شاخص تفکیک خوشه‌ها در فاز اول



شکل (۸): مقایسه شاخص کفایت خوشه‌بندی در فاز دوم برای روش‌های مختلف

### ۲-۴- نتایج دسته‌بندی

تا به این قسمت روند دسته‌بندی مشترکین در دو فاز معرفی شده است. شکل (۷) مقدار شاخص  $\Theta(S)$  در فاز اول را برحسب تعداد خوشه‌ها نشان می‌دهد. طبق فرض تغییرات کمتر از ۵٪ برای این شاخص  $\Theta(S)$  که در قسمت (۳-۱) بیان شده، در نهایت تعداد ۱۰ خوشه به عنوان تعداد خوشه‌های بهینه فاز اول تعیین شده است.

همچنین شکل (۸) مقادیر شاخص ارزیابی فاز دوم  $\Lambda(M)$  را برحسب تعداد خوشه‌ها و به‌ازای سه حالت مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل زمانی که دسته‌بندی در دو فاز و به صورت وزن‌دار انجام می‌گیرد مقادیر کوچکتری برای شاخص  $\Lambda(M)$  حاصل می‌شود. این حالات سه‌گانه برای ارزیابی عینی‌تر روند پیشنهادی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. این حالات مختلف عبارت‌اند از: دسته‌بندی در یک‌فاز (تنها فاز اول)، دسته‌بندی در دو فاز و بدون وزن و همچنین دسته-



جدول (۱): میزان کاهش هزینه مشترکین (شش ماهه اول)

تعداد خوشه	مشارکت 10%	مشارکت 20%	مشارکت 30%	مشارکت 40%	مشارکت 50%
1	7.13%	9.98%	12.13%	16.15%	19.33%
2	8.77%	11.62%	13.77%	17.79%	20.97%
3	9.89%	12.74%	14.89%	18.91%	22.09%
4	10.98%	13.83%	15.98%	20%	23.18%
5	12.21%	15.26%	17.21%	21.23%	24.41%
6	13.36%	16.21%	18.36%	22.38%	25.56%
7	15.03%	17.88%	20.03%	24.05%	27.23%
8	16.23%	19.08%	21.23%	25.25%	28.43%
9	18.05%	20.9%	23.05%	27.07%	30.25%
10	19.67%	22.12%	24.27%	28.29%	31.47%
11	20.99%	23.84%	25.99%	30.01%	33.19%
12	22.56%	25.41%	27.56%	31.76%	34.76%
13	23.88%	26.73%	29.88%	32.9%	35.88%
14	25.07%	27.92%	31.07%	34.09%	37.97%
15	26.59%	29.84%	32.59%	35.61%	39.79%
16	29.08%	31.93%	34.08%	37.1%	41.78%

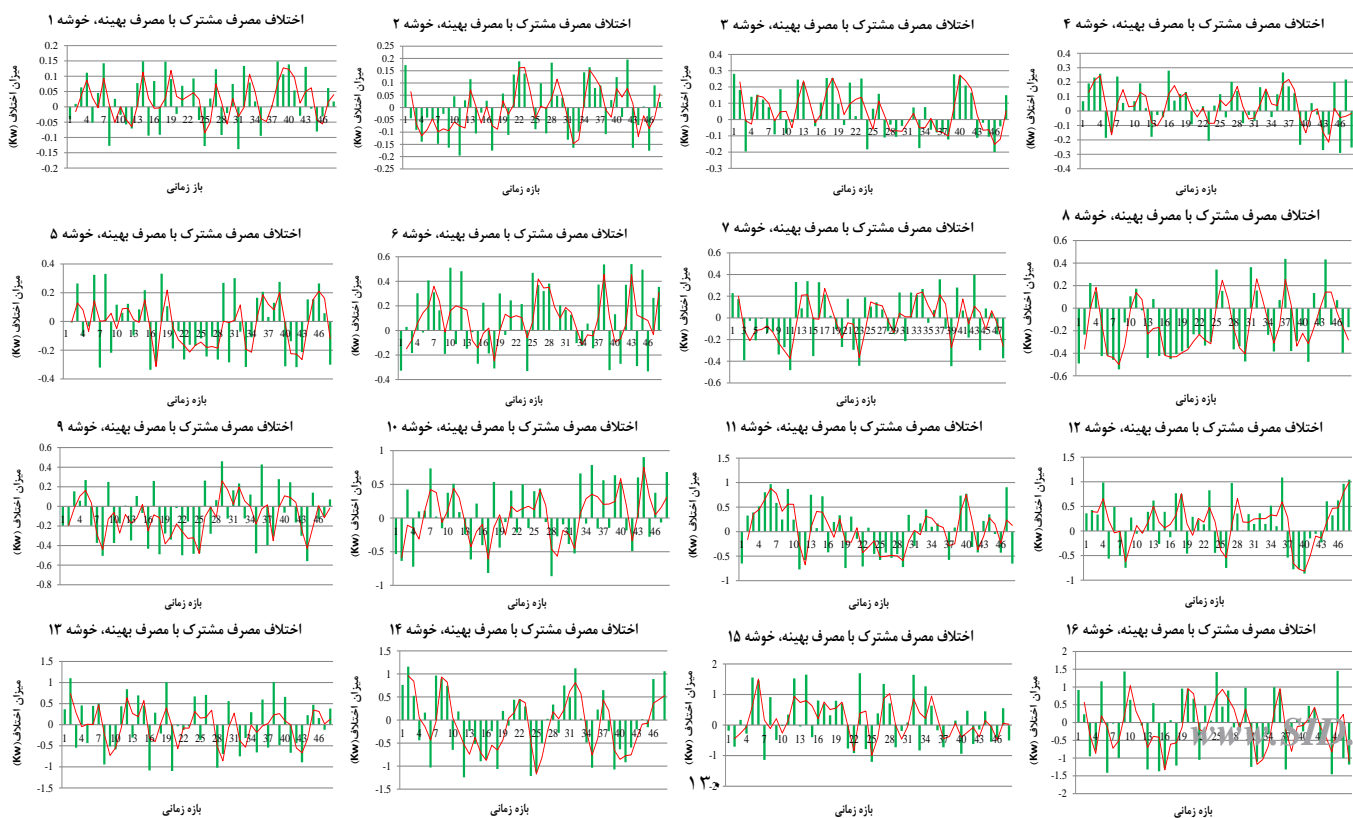
بار) باشد، دقت تصمیمات اخذ شده را به میزان قابل ملاحظه‌ای بالا خواهد برد.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش شده است تا بتوان به نحوی مشترکین را از لحاظ میزان اثرپذیری‌شان در نتیجه مشارکت در برنامه پاسخگویی بار دسته‌بندی نمود. برای این منظور الگوریتم‌های شناسایی الگو و داده‌کاوی با مفاهیم مرتبط با بهره‌وری انرژی، پاسخگویی بار و بازار برق در قالب یک فرایند تطبیقی پیشنهادی ترکیب شده است. نتیجه نهایی تحلیل انجام گرفته در این مقاله گویای توانمندی فرایند ارائه شده برای شناسایی اثرگذارترین ویژگی‌ها در سری زمانی مصرف مشترکین می‌باشد. خروجی این تحلیل، تشکیل خوشه‌هایی از مشترکین با الگوهای مصرفی مختلف است که هر کدام دارای میزان اثرپذیری و کسب منفعت متفاوتی از مشارکت در برنامه پاسخگویی بار هستند. به این

که آن دسته از مشترکینی که در الگوی مصرفی‌شان دارای اختلاف زیادی با الگوی مصرف بهینه از دید شبکه باشند، منفعت بیشتری از مشارکت در این برنامه خواهند برد. به همین ترتیب، مشترکینی که در الگوی مصرفی غالب خود دارای اختلاف کمی با پروفیل بهینه هستند، با تغییر کمی در الگوی مصرف به الگوی بهینه خواهند رسید. این مشترکین به‌طور معمول رفتار مصرفی نزدیک به حالت بهینه دارند و طبیعتاً منفعت کسب شده در اثر این تغییر کم الگوی مصرفی نیز کمتر خواهد بود. با در نظر گرفتن این نکته و الگوهای غالب مصرفی برای خوشه‌های مختلف، پاسخگویی بار برای شش ماه دوم پیاده‌سازی شده و نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. اطلاعات گزارش شده در جدول (۲) اگرچه از لحاظ اندازه اندکی با جدول (۱) تفاوت دارند اما اصل استدلال شش ماه اول در جدول (۱) را تایید می‌نمایند. این یعنی معیار بیان شده در بخش اول برای تعیین اثرپذیرترین گروه مشترکین در پاسخگویی بار کارایی مناسبی را نشان می‌دهد.

توجه شود که از آنجایی که افزایش دقت در خوشه‌بندی در نتیجه‌ی افزایش تمرکز روی اصل پروفیل مصرفی است، نتایج استخراج‌شده از پروفیل‌های مصرف نیز دارای اطمینان بالایی می‌باشد. در حقیقت تاکید اصلی نویسندگان این مقاله روی ارائه‌ی روندی برای دسته‌بندی دقیق‌تر مشترکین می‌باشد که خود از شناسایی ویژگی‌های اثرگذارتر در دسته‌بندی حاصل می‌شود. از طرفی، هر اندازه دسته‌بندی دقیق‌تر باشد، اظهار نظر در رابطه با پاسخگویی بار که مستقیماً تحت تاثیر پروفیل مصرفی مشترک است با اطمینان بیشتری قابل انجام است. چرا که مطالعات صورت گرفته در این مقاله نشان می‌دهد که برنامه پاسخگویی بار شدیداً تحت تاثیر تغییرات در الگوی رفتار مصرفی مشترکین می‌باشد. در یک بیان کلی روند شناسایی الگوی مصرفی مشترکین اگر متناسب با هدف مشخص شده (اثرپذیری در پاسخگویی



شکل (۹): اختلاف پروفیل مصرف میانگین خوشه‌ها با پروفیل مصرف بهینه

- [11] M. spinoza, C. joie, R. belmanse, B. de moor, "Short-term Load Forecasting, Profile Identification, and Customer Segmentation: A Methodology Based on Time-Series", IEEE Transactions on Power systems, Vol.20. No.3, AUGUST 2005.
- [12] J. Kwac., J. Flora, and R. Rajagopal, "Household Energy Consumption Segmentation using Hourly data", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 5, Jan. 2014.
- [13] J. Han, M. Kamber (2006) "Data Mining concepts and techniques" 2nd edition, Morgan Kaufmann publisher.
- [14] M.K.Naftchali, A.Fereidunian, H.Lesani, "Identifying Susceptible Consumers for Demand Response and Energy Efficiency Policies by Time-Series Analysis and Supplementary Approaches", 24<sup>th</sup> Iranian Conference Electric and Electronic (ICEE 2016), Shiraz, Iran, 2016.
- [15] R. j. Sanchez-Garcia, M. Fennelly, S. Norris, N. Wright, G. Niblo, J. Brodzki, J. Bialek, "Hierarchical; Spectral Clustering of Power Grids", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 29, No. 5, September. 2014.
- [16] M. Owhadi-Kareshk, R. Mohammad, T. Akbarzadeh, "Spectral Clustering-Based Classification", 5th international Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), Mashhad, Iran, Oct. 2015.
- [17] م. کجوری، ع. فریدونیان، ح. لسانی، "استفاده از الگوریتم خوشبندی طیفی برای شناسایی الگوی مصرف مشترکین و تعیین تعرفه‌های بهینه مصرفی در شبکه برق"، پنجمین کنفرانس منطقه‌ای سیرد، پژوهشگاه نیرو، دی‌ماه ۱۳۹۵
- [18] S. Zhu, X. Zhu, Q. Luo, "Graph Theory Based Image Segmentation", 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP), Hangzhou, China, 2013.
- [19] W. K. Lai, I. M. Khan, G. S. Poh, "Weighted Entropy-Based Measure for Image Segmentation", International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, pp. 1261-1267, Kuching, Sarawak, Malaysia, 2012.
- [20] H. Zhang, J. E. Fritts, and S. A. Goldman, "An Entropy-Based Objective Evaluation Method for Image Segmentation", Proceedings of the SPIE, Vol. 5307, pp. 38-49, San Jose, California, United States, 2003.

ترتیب، مشترکینی که در سری زمانی مصرف خود فاصله‌ی بیشتری با الگوی مصرف بهینه دارند منفعت بیشتری از مشارکت در برنامه پاسخگویی بار خواهند برد و برعکس.

## سپاسگزاری

در این بخش، نگارندگان این مقاله از پایگاه اطلاعاتی داده ISSDA<sup>‡</sup> کشور ایرلند از بابت در اختیار قرار دادن داده‌های مصرفی مشترکین نهایت تشکر را دارند. همچنین از سرکار خانم دکتر مناس قاسمیان عضو محترم هیات علمی دانشگاه شهید بهشتی، به علت ایجاد ارتباط به منظور اخذ داده‌های مصرفی مشترکین شبکه ایرلند و آقای مهندس حامد برزمینی نهایت سپاسگزاری را دارند.

## مراجع

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook, 2009, Available: [http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo\\_2009/](http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo_2009/) WEO 2009 es English.pdf.
- [2] ع. شهسواری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "رویکرد تقویت ترمیم‌گر به خودترمیمی شبکه‌ی هوشمند با مدل‌سازی قابلیت اطمینان شبکه هوشمند"، دکتر ح. لسانی (راهنما)، ع. فریدونیان (مشاور)، دانشگاه تهران، ۱۳۹۲
- [3] A.Fereidunian, H.Lesani, C.Lucas, "Distribution System Reconfiguration Using Pattern Recognizer Neural Networks", International Journal of Engineering (IJE), Vol. 15, No. 2, pp. 135-144, 2002.
- [4] W.Gellings, Clark, "The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities", In Proc of the IEEE, Vol. 73, No. 10, Palo Alto, CA, USA, October 1995.
- [5] R. Rashed-Mohassel, A. Fung, F. Mohammadi, K. Raahemifar, "A survey on Advanced Metering Infrastructure", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 63, pp. 473-484, 2014.
- [6] S. Roy, B. Bedanta, S. Dawnee, "Advanced Metering Infrastructure for Real-time Load Management in a Smart Grid", International Conf, Power and Advanced Control Engineering (ICPACE), Bangalore, pp. 104-108, Aug. 2015.
- [7] U.S. Department of Energy, "Benefits of Demand Response in Energy Markets and Recommendations for Achieving them", Report to the United State Congress, February 2006, available online: <http://eetd.lbl.gov>.
- [8] ح. اعلمی، م. پارسا مقدم، غ. ر. یوسفی، "مدلسازی پاسخگویی بار مبتنی بر ضرایب حساسیت قیمتی تقاضا"، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، بهار ۱۳۸۹
- [9] م. کجوری نفت‌چالی، ع. فریدونیان، ح. لسانی، "شناسایی تغییرات در رفتار مصرفی مشترکین با استفاده از خوشه‌بندی فازی"، پنجمین کنفرانس شبکه‌های هوشمند (SGC 2016)، ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۹۴
- [10] م. کجوری نفت‌چالی، ح. لسانی، ع. فریدونیان، "داده‌کوی در انباره داده زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تابستان ۱۳۹۵