

ارائه روشی تطبیقی مبتنی بر تئوری گراف برای ارزیابی میزان اثربازی اثربازی مشترکین در نتیجه مشارکت در پاسخگویی بار

محسن کجوری نفت‌چالی^۱، کارشناسی ارشد، علیرضا فریدونیان^۲، استادیار، حمید لسانی^۳، 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 روندی کارآمد به منظور دسته‌بندی و رده‌بندی مشترکین در شبکه توزیع از جنبه میزان اثربازی آنها در نتیجه‌ی مشارکت در برنامه پاسخگویی بار است. این چالشی است که علی‌رغم انجام مطالعات قابل ملاحظه در زمینه پاسخگویی بار مغفول مانده است. به ویژه این چالش زمانی برجسته‌تر می‌شود که به تاثیر پاسخگویی بار در بهره‌وری و مدیریت انرژی در شبکه برق توجه شود. همچنین تاکیدی که نویسنده‌گان این مقاله دارند توجه به قابلیت‌ها و داده‌هایی است که توسط زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته (AMI) در اختیار قرار می‌گیرد و کارایی مناسبی که روی پیاده‌سازی برنامه‌های مدیریت سمت مصرف دارد. ابزار این دسته‌بندی، علاوه بر تکنیک‌های معمول مورد استفاده در پردازش داده، ترکیبی از الگوریتم‌های خوش‌بندی طیفی، تئوری گراف و همچنین مفهوم آنتروپی می‌باشد. این مقاله دارای دو بخش است، در بخش اول، مشترکین با اثربازی بالاتر شناسایی شده و مدل‌ها و الگوهایی برای شناسایی آنها ساخته می‌شود. در این بخش در دو فاز با استفاده از ویژگی‌هایی که برای هر کدام از مشترکین در نظر گرفته می‌شود، با پیاده‌سازی پاسخگویی بار، دسته‌بندی توسط خوش‌بندی طیفی و تئوری گراف انجام می‌گیرد. در بخش دوم نیز مدل‌های ساخته شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای ارزیابی روند پیشنهادی از یک مجموعه داده مصرفی واقعی AMI مربوط به کشور ایرلند استفاده شده است. نتایج مربوط به پیاده‌سازی پاسخگویی بار نشان می‌دهد که رده‌بندی مشترکین براساس میزان اثربازی آنها به طور قابل قبولی انجام گرفته است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت سمت مصرف، پاسخگویی بار، زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته (AMI)، داده‌کاوی، تئوری گراف، خوش‌بندی طیفی

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول : علیرضا فریدونیان

نشانی نویسنده‌ی 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 بروداشت می‌شود که در نگاه جدید به شبکه برق، مشترکین عهده‌دار مستولیت‌های قابل اعتنایی هستند. این موضوع الزام توجه به آنها و شناسایی الگوی رفتاری آنها به عنوان عضوی فعل 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 داده-کاوی 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 موقفيت این برنامه‌ها اثرگذار می‌باشد.

اعتقاد نویسندگان این مقاله این است که تمامی مشترکینی که در برنامه‌ی پاسخگویی بار مشارکت می‌نمایند دارای میزان اثربازی 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 اثربازی مشترکین برای مشارکت در پاسخگویی بار انجام شده است [۱۰].

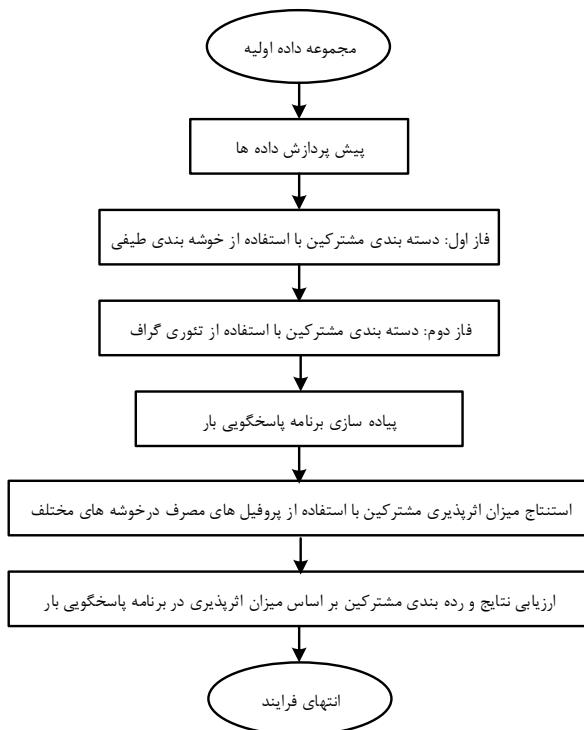
در این مقاله از الگوریتم خوشبندی طیفی و همچنین تئوری گراف برای دسته‌بندی مشترکین استفاده شده که جزئیات مربوط به چنین انتخابی در متن مقاله مورد اشاره قرار گرفته است. در این زمینه، مرجع [۱۵] به معرفی الگوریتم خوشبندی طیفی می‌پردازد که از آن برای نظرات بر شبکه استفاده شده است. نکته‌ی دیگر بحث تئوری گراف است که این موضوع نیز در مرجع [۱۶] مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۱۷] به بررسی ظرفیت‌های خوشبندی 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 خوشبندی طیفی و مرجع [۲۰] نیز به استفاده از آنچه‌ایکه در مفاهیم مرتبط با تصویر اشاره نموده‌اند. در نهایت از آنچه‌ایکه 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 روزافرونه 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 دارد است [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 ساعتی خاص یا بهره‌گیری از تجهیزات و وسائل 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 مرجع [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 هرکدام 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 مدل‌سازی شبکه قدرت استفاده شده است. به این ترتیب که رئوس گراف به عنوان واحد 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 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ نشان داده می‌شود و در آن $G = (V, E)$ مجموعه رئوس و ماتریس E مجموعه شاخه‌های میان این رئوس را نشان می‌دهد. نکته مهم در بحث گراف، تعیین اوزان روی شاخه‌هاست.

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

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 (مصرف در بازه زمانی n) برای

بهطور کلی در این مقاله، هدف ارائه‌ی روندی کارآمد برای دسته‌بندی مشترکین از لحاظ میزان اثربداری آنها از شرکت در برنامه پاسخگویی باز با ایجاد تغییر در الگوی مصروفشان 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 خوشبندی طیفی و تئوری گراف دارند سبب جلب توجه نویسنده‌گان این مقاله به این الگوریتم‌ها شده است. مزیت این الگوریتم‌ها علاوه بر قدرت دسته‌بندی مناسب، این است که گروهی از موثرترین شاخص‌ها را برای تمايز میان مشترکین مشخص می‌نمایند. این نکته در بخش‌های آینده بیشتر تشریح خواهد شد.

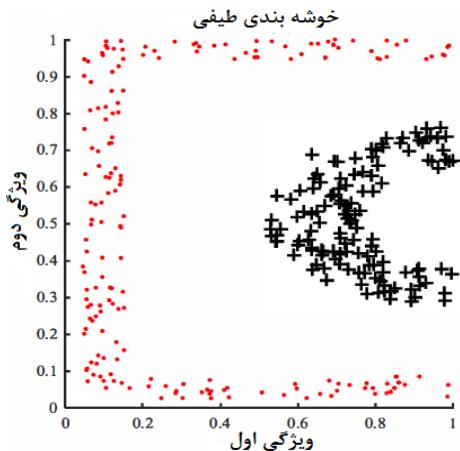
۲- روش‌شناسی

۲-۱- ساختار روش پیشنهادی

پیشتر اشاره شده است که هدف در این مقاله دسته‌بندی و رده‌بندی مشترکین براساس میزان اثربداری آنها در نتیجه‌ی مشارکت در برنامه پاسخگویی باز 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 پیش‌پردازش داده‌های اولیه [۱۳]، مجموعه داده‌های مصرفی اصلی برای پردازش حاصل می‌شود. سپس خوشبندی طیفی روی نمونه‌ها انجام شده و آنها را به خوشبندی مربوطه تخصیص می‌دهد. در ادامه برای دسته‌بندی کامل‌تر از تئوری گراف و مفهوم آنتروپی استفاده شده تا تخصیص اعضاء به خوشبندی با اطمینان بالاتری انجام شود. نتیجه‌ی این عمل به ویژگی دسته‌بندی مشترکین با دقیقت بالا می‌باشد. پس از آن و با پیاده‌سازی برنامه پاسخگویی باز روی اعضاء هر خوشبندی به طور جداگانه، میزان انتفاع آنها در نتیجه‌ی مشارکت در این برنامه مشخص می‌شود. در واقع، نتیجه‌ی پیاده‌سازی پاسخگویی باز ارزیابی نکاتی است که در مورد اثربداری مشترکین در فازهای تشریح شده به دست آمده است. جزئیات بیشتر در رابطه با پیاده‌سازی فرایند تشریح شده 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 به طور 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 دهنده‌ی آنها نیز در حقیقت هزینه انتقال از یک گره به یک دیگر می‌باشد. عموماً شاخه‌های



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

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

ورودی: مجموعه داده‌های اولیه

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

$$C = \{c_{x_1}, c_{x_2}, \dots, c_{x_N}\}$$

خروجی: برچسب‌های داده‌ها

: تعداداً بهینه خوشبندی تعیین شود (C) با استفاده از شاخص davise-bouldin

$$A = e^{-\frac{\|x_i - x_j\|}{2\sigma^2}} : (A)$$

$$D_{ii} = \sum_{j=1}^N A_{ij}, i = 1, \dots, N : (D)$$

$$L = D^{-\frac{1}{2}} A D^{-\frac{1}{2}}$$

: تعیین لاپلاسین:

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

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

$$6: \text{نرمالیزه نمودن ماتریس } (E) : E_{ij} = \frac{E_{ij}}{\left(\sum_{j=1}^N E_{ij}^2\right)^{\frac{1}{2}}}$$

۷: خوشبندی ماتریس (E) با استفاده از روش خوشبندی فازی (هر سطری از یک نقطه داده تصور می‌شود)

۸: برچسب نقطه داده از خروجی خوشبندی فازی حاصل می‌شود

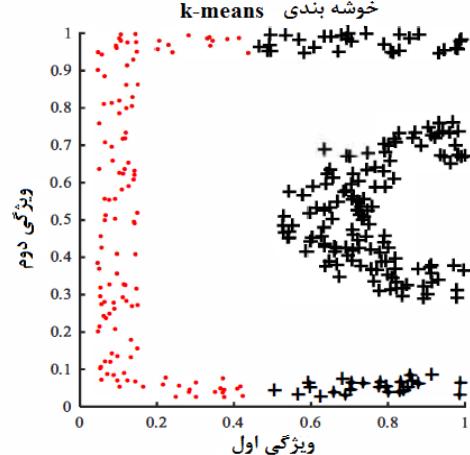
شکل (۴): روند خوشبندی طیفی

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

مشترک N 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 پیاده‌سازی خوشبندی طیفی بیشتر آشنا خواهیم شد.

۲-۳-۲- ضرورت استفاده از خوشبندی طیفی

خوشبندی عبارت است از قرار دادن نمونه‌ها در خوشبندی مختلف به گونه‌ای که نمونه‌های تخصیص یافته به هر خوشبندی دارای بیشترین شباهت به یکدیگر و کمترین شباهت به نمونه‌های تخصیص یافته به خوشبندی دیگر باشند [۱۳]. با این هدف، روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای خوشبندی 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 الگوریتم‌های است که با تخصیص اولیه تعدادی مرکز خوشبندی و مفهوم فاصله شعاعی و به روز رسانی مراکز خوشبندی عمل دسته‌بندی 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 دسته‌بندی مناسبی برای آن دست یافت. به عنوان مثال، شکل‌های (۲) و (۳) گونه‌ای از توزیع نمونه‌ها در فضای ورودی را نشان می‌دهد که دسته‌بندی آنها با استفاده از الگوریتم‌های k-means و خوشبندی طیفی انجام گرفته است.



شکل (۲): خوشبندی 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 چالش کلان داده‌ها[†] دارای اهمیت بالایی می‌باشد.

۱-۳- فاز اول دسته‌بندی با استفاده از خوشبندی طیفی

در اولین فاز برای خوشبندی مشترکین از الگوریتم خوشبندی طیفی استفاده می‌شود. برای پیاده‌سازی این الگوریتم باید تعداد خوشه‌ها در اولین مرحله از پیش تعیین شود که برای این منظور از شاخص Davise-Bouldin استفاده شده است. پس از یک مرحله پیاده‌سازی خوشبندی، در ادامه‌ی مسیر برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها در قالب یک روش تطبیقی از شاخص دیگری ($S(\Theta)$) استفاده می‌شود که روند محاسبه آن در معادلات (۸)-(۳) تشریح شده است. این شاخص نشان‌دهنده‌ی میزان تفکیک خوشه‌ها از یکدیگر و همچنین

۴-۲- تئوری خوشبندی طیفی

الگوریتم خوشبندی طیفی برخلاف روش‌های مرسوم خوشبندی، با استفاده از تئوری گراف و مقادیر ویژه‌ی ماتریس لاپلاسین، دسته‌بندی نمونه‌ها را انجام می‌دهد. با این فرض که نمونه‌ها رؤوس یک گراف را تشکیل دهنند 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 هر کدام دارای تعداد ادی 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 لاپلاسین 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 انتهای فرض اینکه هر سطری از ماتریس L نشان‌دهنده‌ی یک نمونه است، باید با استفاده از خوشبندی فازی، عمل خوشبندی نمونه‌ها را انجام داد. لازم به ذکر است که تشریح کامل جزئیات مربوط به خوشبندی فازی در مرجع [۹] ارائه شده است. نتیجه‌ی این خوشبندی تعلق برچسب‌هایی به هر کدام از نمونه‌هاست که خوشی 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 نویسنده‌گان این مقاله نیز می‌باشد این است که بتوان تعداد بهینه خوشه‌ها را با استفاده از موثرترین شاخص‌ها

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

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

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

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

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

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

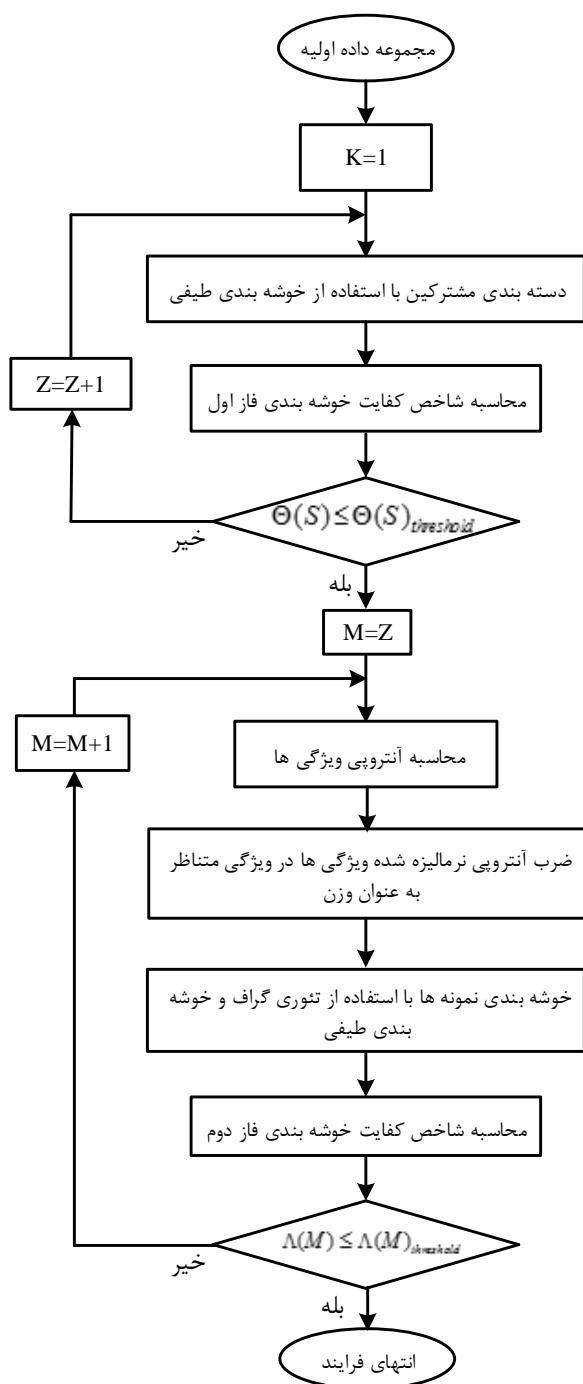
$$\Theta(S) = \frac{\eta(S)}{\mu(S)} \quad (8)$$

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 پایام 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 بر عکس، 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 محاسبه شاخص آنتروپی برای شناسایی میزان اثرگذاری این ویژگی‌ها کمک کننده می‌باشد.

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



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

تراکم هر خوشه است که به صورت نسبت میانگین فاصله‌ی درون خوشه‌ای به میانگین فاصله‌ی بین خوشه‌ای تعريف می‌شود. هر اندازه که مقدار این شاخص کوچکتر باشد به معنی خوشبندی با کیفیت بالاتر است و بر عکس، 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 خوشه‌های است مقدار بیشتری باشد. در این مطالعه روند افزایش تعداد خوشه‌ها (Z) تا جایی ادامه می‌یابد که

متفاوت از (S) مورد استفاده قرار می‌گیرد که در روابط (۱۸)-(۱۴) نحوه محاسبه آن ارائه شده است. برای این شاخص نیز مانند (S) هر اندازه مقادیر کوچکتر باشد شرایط مطلوبتر است. با استفاده از برچسب‌هایی که به هر نمونه در نتیجه خوشبندی طیفی در فاز قبل تعلق گرفته است، فرایند تعیین تعداد خوشبندی‌های بهینه آغاز می‌شود. برای محاسبه شاخص جدید (M) ، در رابطه (۱۸)، Ψ یک بردار $N \times 1$ می‌باشد که بیانگر برچسب تعلق گرفته به هر نمونه در نتیجه‌ی آخرین خوشبندی انجام گرفته می‌باشد و همچنین γ نیز ضریب این برچسب‌هاست که همان ضرایب عضویت خوشبندی فازی هستند. همچنین در رابطه (۱۸)، λ_k بیانگر بردار تفکیک $1 \times N$ است که برای حالتی که i امین نمونه در k امین خوشبندی باشد $= \lambda_{ik}$ می‌باشد و برای حالتی که i امین نمونه در k امین خوشبندی باشد $= 0$ می‌باشد. همچنین R و W نیز هردو ماتریس‌های $N \times N$ هستند و D نیز یک ماتریس قطری است که اعضاء 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 خوشبندی‌هاست.

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

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

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

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

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

۴- پیاده‌سازی

۴-۱- مطالعه موردي

در این مقاله از اطلاعات مربوط به یک شبکه‌ی توزیع واقعی با تعداد ۷۶۰ نمونه از مشترکین خانگی کشور ایراند 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 ششم‌ماهه 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 نمونه‌های j است. 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 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 خوشبندی از این مقادیر قطعیت نرمالیزه شده (θ_j) به عنوان وزن برای ویژگی‌ها استفاده می‌شود. به این ترتیب به ویژگی‌های دارای اثربخشی بیشتر وزن بیشتری تعلق می‌گیرد و برعکس. این عمل سبب می‌شود که در عمل خوشبندی، تفاوت‌های اساسی‌تر بیشتر به چشم آمده و منجر به یک فرایند خوشبندی دقیق‌تر شود. روابطه (۱۴) چگونگی تخصیص اوزان به ویژگی‌های مختلف را بیان می‌نماید. در رابطه (۱۴) ضرایب $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r$ ، مقادیر نرمالیزه شده اوزان ویژگی‌ها در تضمیم‌گیری 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 خوشبندی 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 خوشبندی چه تعدادی می‌باشد. برای این منظور نیز در قالب فرایندی تطبیقی، شاخصی

بندی در دو فاز و با فرض وجود اوزان. منحنی‌های رسم شده در شکل (۸) گویای مقادیر کمتر (M/Δ) بهایزی 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 خوش به عنوان تعداد خوش‌های بهینه نهایی تعیین شده‌اند.

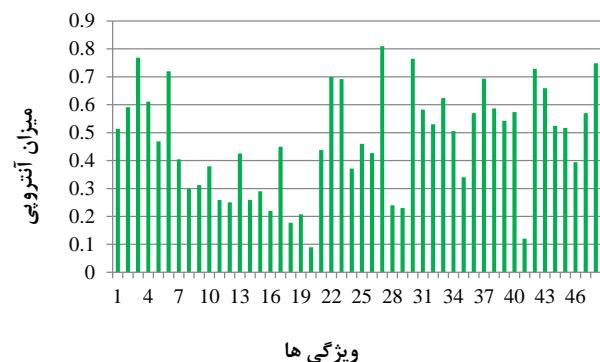
۴-۳-۴- پیاده‌سازی پاسخگویی بار و نتایج آن

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)

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

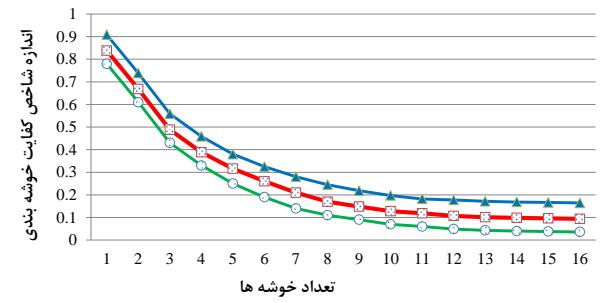
ساعات اوج مصرف با پله‌های ۱۰٪ از میزان مصرف خود کاسته و این مصارف را به ساعات کمباری منتقل نمایند. در هر نوبت از پیاده‌سازی پاسخگویی بار، فرض می‌شود که تنها اعضاء یک خوش مشارکت می‌نمایند. پس از پیاده‌سازی برنامه با بررسی داده‌های مصرفی شش ماه اول، جدول (۱) حاصل شده است که نشان‌دهنده میزان منفعت مشترکین خوش‌های مختلف در نتیجه‌ی شرکت در پاسخگویی بار از دیدگاه کاهش هزینه‌ی پرداختی می‌باشد. البته در این جدول خوش‌ها به ترتیب افزایش میزان اثربداری و منفعت اعضا‌شان مرتب شده‌اند. از آنجایی که دسته‌بندی مشترکین در این مقاله به صورت دقیق و با وزن‌دهی 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 خوش‌ها را استخراج نمود. بررسی الگوی مصرفی غالب مشترکین هر خوش 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 خوش نشان داده شده است. تحلیل نتایج در این مقاله مطابق شکل (۹) بیان می‌نماید



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



شکل (۷): شاخص تفکیک خوش‌ها در فاز اول



شکل (۸): مقایسه شاخص کفايت خوش‌بندی در فاز دوم برای روش‌های مختلف

۴-۲- نتایج دسته‌بندی

تا به این قسمت روند دسته‌بندی مشترکین در دو فاز معرفی شده است. شکل (۷) مقدار شاخص (S/Θ) در فاز اول را بر حسب تعداد خوش‌ها نشان می‌دهد. طبق فرض تغییرات کمتر از ۵٪ برای این شاخص (S/Θ) که در قسمت (۳-۱) بیان شده، در نهایت تعداد خوش‌های بهینه فاز اول تعیین شده است. همچنین شکل (۸) مقادیر شاخص ارزیابی فاز دوم (M/Δ) را بر حسب تعداد خوش‌ها و به ازای سه حالت مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل زمانی که دسته‌بندی در دو فاز و به صورت وزن دار انجام می‌گیرد مقادیر کوچکتری برای شاخص (M/Δ) حاصل می‌شود. این حالات سه‌گانه برای ارزیابی عینی تر روند پیشنهادی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. این حالات مختلف عبارت‌اند از: دسته‌بندی در یک‌فاز (تنهایا فاز اول)، دسته‌بندی در دو فاز و بدون وزن و همچنین دسته-

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

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

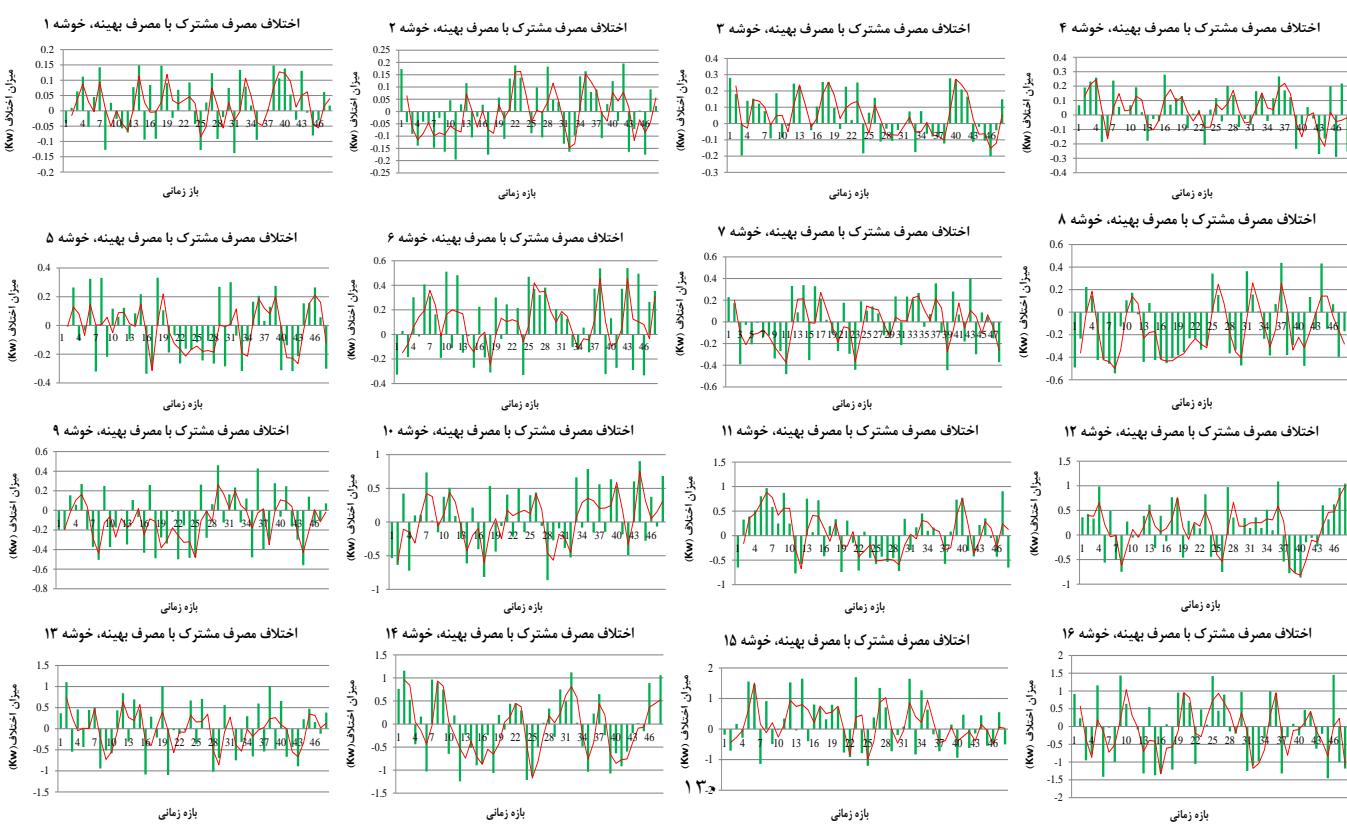
بار) باشد، دقت تصمیمات اخذ شده را به میزان قابل ملاحظه‌ای بالا خواهد برد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش شده است تا بتوان به نحوی مشترکین را از لحاظ میزان اثرپذیری‌شان در نتیجه مشارکت در برنامه پاسخگویی باز دسته-بندی نمود. برای این منظور الگوریتم‌های شناسایی الگو و داده‌کاوی با مفاهیم مرتبط با بهره‌وری انرژی، پاسخگویی باز 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 خوش‌هایی از الگوهای مصرفی مختلف است که هر کدام دارای میزان اثرپذیری و کسب منفعت متفاوتی از مشارکت در برنامه پاسخگویی باز 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 مشترکات 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 بهینه خواهند رسید. این مشترکین به طور 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 خوش‌های مختلف، پاسخگویی باز برای شش ماه دوم پیاده‌سازی شده و نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. اطلاعات گزارش شده در جدول (۲) اگرچه از لحاظ اندازه‌اندکی با جدول (۱) تفاوت دارند اما اصل استدلال شش ماهه اول در جدول (۱) را تایید می‌نمایند. این یعنی معیار بیان شده در بخش اول برای تعیین اثرپذیرترین گروه مشترکین در پاسخگویی باز کارایی مناسبی را نشان می‌دهد.

توجه شود که از آنجایی که افزایش دقت در خوش‌بندی در نتیجه‌ی افزایش تمرکز روی اصل پروفیل مصرفی است، نتایج استخراج شده از پروفیل‌های مصرف نیز دارای اطمینان بالایی می‌باشد. در حقیقت تاکید اصلی نویسنده‌گان 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 باز 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 باز شدیداً تحت تاثیر تغییرات در الگوی رفتار مصرفی مشترکین می‌باشد. در یک بیان کلی روند شناسایی الگوی مصرف مشترکین اگر متناسب با هدف مشخص شده (اثرپذیری در پاسخگویی



شکل (۹): اختلاف پروفیل مصرف میانگین خوش‌های 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", 24th 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.
- [۱۷] م. کجوری، ع. فریدونیان، ح. لسانی، "استفاده از الگوریتم خوشبندی طیفی برای شناسایی الگوی مصرف مشترکین و تعیین تعریفهای بهینه مصرفی در شبکه برق"، پنجمین کنفرانس منطقه‌ای سیرد، پژوهشگاه نیرو، دی ماه 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 بر عکس.

سپاسگزاری

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

مراجع

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook, 2009, Available: http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo_2009_es_English.pdf.
- [۲] ع. شهسواری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "رویکرد تقویت ترمیم گر به خودترمیمی شبکه‌ی هوشمند با مدلسازی قابلیت اطمینان شبکه هوشمند"، دکتر ح. لسانی(راهنمای)، 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>.
- [۸] ح. اعلمی، م. پارسا مقدم، غ. ر. یوسفی، "مدلسازی پاسخگویی بار مبتنی بر ضرایب حساسیت قیمتی تقاضا"، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، بهار ۱۳۸۹
- [۹] م. کجوری نفت‌چالی، ع. فریدونیان، ح. لسانی، "شناسایی تغییرات در رفتار مصرفی مشترکین با استفاده از خوشبندی فازی"، پنجمین کنفرانس شبکه‌های هوشمند(SGC 2016)، ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۹۴
- [۱۰] م. کجوری نفت‌چالی، ح. لسانی، ع. فریدونیان، "داده‌کاوی در انباره داده زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تابستان ۱۳۹۵