ارتقاء بهره‌وری انرژی در شبکه هوشمند توزیع برق با استفاده از تکنولوژی اندازه‌گیری هوشمند در مدیریت مصرف انرژی

محسن کجوری نفت چالی[1] ، علیرضا فریدونیان[2]

۱- دانشگاه تهران، kojury.savadkoohnaft@gmail.com

۲- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، fereidunian@eetd.kntu.ac.ir

چکیده: در این مقاله نقش تکنولوژی اندازه‌گیری هوشمند در شبکه توزیع برق به عنوان مصداقی از سامانه های هوشمند انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف نیز عمدتاً این بوده که بررسی شود که این تکنولوژی چه کمکی به مساله‌ی بهینه‌سازی و مدیریت مصرف انرژی الکتریکی در شبکه برق هوشمند می‌نماید. برای این منظور سری‌های زمانی مصرف مشترکین مورد تحلیل قرار گرفته و با استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی و شناسایی الگو، مشترکین دارای رفتار مصرفی مشابه در یک دسته (خوشه) قرار می‌گیرند. براساس نوع رفتار مصرفی غالب در هر کدام از این خوشه‌ها و سیگنال‌های قیمتی در ساعات مختلف شبانه روز می‌توان برای هر خوشه، یک الگوی مصرف بهینه را پیشنهاد داد. همچنین با نظارت تقریباً زمان واقعی که به واسطه تکنولوژی اندازه‌گیری هوشمند فراهم شده است می‌توان هر تغییری در رفتار مصرفی مشترکین را شناسایی نمود. به این ترتیب هم میزان اثرگذاری مشترکین خوشه‌های مختلف روی کاهش مصرف انرژی در شبکه و هم میزان منفعت هر کدام از ایشان از کاهش هزینه‌ها در نتیجه اصلاح الگوی مصرف متفاوت خواهد بود. نتایج پیاده‌سازی این فرایند روی شبکه تست که مجموعه داده‌های کنتورهای هوشمند مربوط به مصرفی خانگی کشور ایرلند می‌باشد بسیار مطلوب بوده است. به‌گونه‌ای که در بیشتر موارد با ایجاد تغییرات جزئی در رفتار مصرفی مشترکین توانسته از مصرف در ساعات پرباری شبکه کاسته و هزینه انرژی مصرفی را نیز کاهش دهد. علاوه بر این، این ظرفیت مناسب تکنولوژی اندازه-گیری هوشمند کمک بسیار خوبی به اپراتورهای شبکه توزیع برای نظارت و بهره‌برداری بهینه از شبکه می‌نماید.

واژه های کلیدی: تکنولوژی اندازه‌گیری هوشمند، بهینه‌سازی مصرف انرژی، ماژول مصرف انرژی الکتریکی، مدیریت سمت مصرف

۱.مقدمه

یکی از مسائلی مهمی که امروزه به یکی از بزرگترین چالش-های صنعت برق تبدیل شده است موضوع افزایش قابل توجه در میزان مصرف انرژی الکتریکی و نیاز روزافزون به آن است [۱]. این مسئله هم سبب افزایش نیاز به توسعه مراکز تولیدی شده و هم در برخی از ساعات شبانه روز این افزایش مصرف بسیار بالا سبب ایجاد پیک مصرف روی برخی از خطوط و فیدرهای شبکه می‌گردد. بخشی از این مصرف بالا را می‌توان با توسعه واحدهای تولید جدید رفع نمود اما از لحاظ اقتصادی نمی‌توان تمامی این نیازها را از این طریق پوشش داد. همین مسئله سبب معرفی مفاهیمی ازجمله 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 مانند پاسخگویی بار در شکل‌های مختلف پیاده‌سازی با جابجا نمودن مصرف مشترکین در طول ساعات مختلف و یا کاهش میزان مصرف در ساعاتی خاص با بهره‌گیری از تجهیزات و وسایل با کارایی بیشتر و.... برای اهداف مختلفی از قبیل بهره‌برداری بهتر از شبکه، برنامه‌ریزی برای آینده و .... مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵] و [۶]. از جمله اهدافی که برنامه‌های مدیریت مصرف برای آن مورد استفاده قرار می‌گیرند مسئله پیک‌سایی است. هدف این استراتژی تشویق مشترکین به مدیریت مصرف به ویژه برای ساعات پیک مصرف است که شبکه تحت فشار می‌باشد. تشویق درست مشترکین به مشارکت در برنامه‌های مدیریت سمت مصرف و پیک‌سایی مستلزم شناسایی دقیق الگوی مصرفی ایشان است. مسلماً هزینه‌های مربوط به برق مصرفی و ساز و کار بازار روی میزان و الگوی مصرفی مشترکین اثرگذاری دارد. همچنین برای پیاده‌سازی بهینه برنامه‌هایی همچون پیک‌سایی رسیدن به عملکرد نزدیک به زمان واقعی بسیار موثر است که این نیاز نیز مستلزم وجود مجموعه داده‌های با دقت بالا و از گونه‌های مورد نیاز 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 ازجمله 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 [۷]. توجه به استفاده از داده‌های کنتورهای هوشمند برای شناسایی رفتار مصرفی مشترکین در مطالعاتی از جمله مرجع [۸] مورد توجه قرار گرفته است. نکته-ای که در مرجع [۸] مورد توجه قرار گرفته است استفاده از داده‌های AMI برای شناسایی رفتار مصرفی 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. همچنین شناسایی الگوی مصرف مشترکین به منظور پیش‌بینی کوتاه مدت بار مصرفی در مرجع [۹] و برای شناسایی تغییرات در رفتار مصرفی مشترکین در مرجع [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. در مراجع [۱۱] و [۱۲] نیز از ظرفیت داده‌های کنتورهای هوشمند به منظور شناسایی دقیق رفتار مصرفی مشترکین استفاده شده است. در این مطالعات از داده‌های سری زمانی مصرفی مشترکین استفاده شده که به طور مستقیم از کنتورهای هوشمند جمع‌آوری شده است. شناسایی گروه‌های مستعد از میان مشترکین برای مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار و بهره‌وری انرژی هدف این مطالعات بوده است. به‌طور مشابه، مرجع [۱۴] نیز از داده‌های کنتورهای هوشمند برای تعیین تعرفه‌های بهینه مصرفی در شبکه استفاده نموده است. با لحاظ نمودن حضور مشترکین در بازار باید بتوان در کنار

* Advanced Metering Infrastructure (AMI)

شناسایی الگوی مصرف ایشان حساسیت آنها را نسبت به تغییرات قیمت بازار را بررسی نمود. برای این منظور از کشسانی قیمت و تقاضا استفاده می‌شود. کشسانی نشان دهنده تغییرات

در تقاضا مشترکین در نتیجه تغییرات قیمت برق است [۱۵]. مرجع [۱۶] روشی برای تعیین ضرایب کشسانی برای مشترکین در شبکه توزیع را ارائه می‌نماید. در مرجع [۱۷] نیز کشسانی تقاضی مشترکین در شبکه با استفاده از روش حداقل مربعات تعیین شده است. از سوی دیگر ضرایب کشسانی در پیاده‌سازی برنامه‌های مدیریت مصرف نقشی قابل ملاحظه دارد. در مرجع [۱۸] از مدل کشسانی تقاضا برای برنامه پاسخگویی بار در شبکه و با در نظر گرفتن نقش خرده فروش‌ها استفاده شده است. مراجع [۲۰] و [۱۹] به تحلیل کشسانی بار در شبکه بازار تجدیدساختاریافته پرداخته‌اند. منافع حاصل از حضور مشترکین در بازار و تبادل اطلاعات میان آنها و شبکه در مرجع [۲۱] تحلیل شده است. در این حالت برای تعیین کشسانی از یک مدل آماری و با استفاده از داده‌های مصرفی وسایل مختلفی که در خانه مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده شده است. مرجع [۲۲] نیز از تاثیر ضرایب کشسانی قیمت و تقاضا در فرایند تعیین قیمت در بازار و قیمت‌دهی توسط واحدهای تولیدی مختلف بحث به میان می‌آورد. بر این اساس شرکت‌های تولیدی بالا استفاده از این ضرایب درک حجامع‌تر نسبت به شرایط مصرف در شبکه کسب نموده و سیگنال‌های قیمتی را با دقت بالاتری تعیین می‌نمایند. در مرجع [۲۳] نیز هزینه‌های تولید و مصرف برق برای هر دو سمت مصرف و تولید به ازای مقادیر مختلف ضرایب کشسانی تعیین شده است. لازم به ذکر است که در مرجع [۲۳] مقدار ضرایب کشسانی برای کل دوره‌ی زمانی ثابت در نظر گرفته شده است.

در این مقاله و با توجه به مطالعات انجام شده در این حوزه، از اطلاعات کنتورهای هوشمند در شبکه برق برای بهینه‌سازی مصرف انرژی مشترکین استفاده شده است. این اطلاعات دانش اپراتورها و دقت برنامه‌ریزهای شبکه برق را نسبت به رفتار مصرفی مشترکین افزایش داده و با اندازه‌گیری تقریباً زمان واقعی خود دقت تصمیمات اتخاذ شده را به طور محسوسی بالا می‌برد. همچنین فضای ارتباطی دوسویه ایجاد شده به مشترکین نیز این امکان را می‌دهد که با اطلاع از قیمت‌های مصرفی برق در شبکه بتوانند الگوی مصرفی بهینه‌ای را انتخاب نمایند تا هزینه‌های مصرفی‌شان کاهش یابد. همچنین می‌توان با تفکیک مشترکین براساس شباهت در الگوی مصرفی ایشان با استفاده از

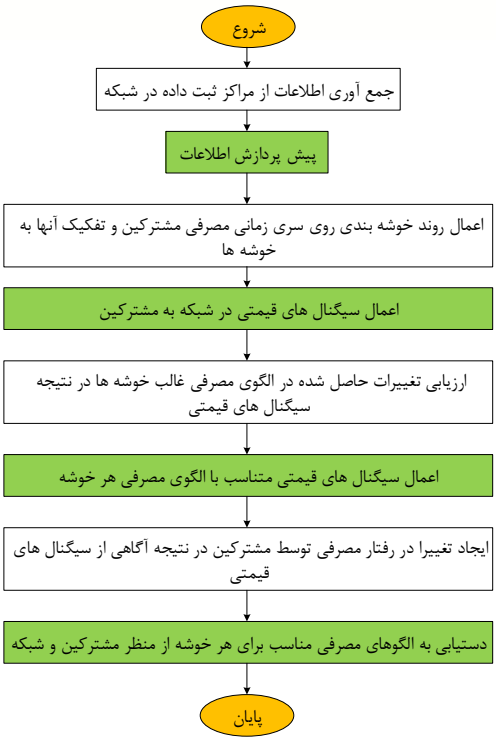
الگوریتم های شناسایی الگو، با هدف مدیریت سمت مصرف برای هر یک از خوشه‌های مصرفی، متناسب ترین الگوی مصرفی را برگزید. نتیجه چنین عملی علاوه بر صرفه‌جویی در زمان و بهینه‌سازی مصرف انرژی، لحاظ نمودن عدم قطعیت هایی ذاتی است که در پیش بینی رفتار مصرفی مشترکین وجود دارد. ترتیب ارائه سایر مطالب در این مقاله نیز به این صورت است: در قسمت (۲) روش و ساختار کلی پیشنهادی به همراه کاربرد الگوریتم‌های مختلف مورد استفاده در این مقاله ارائه شده است. در قسمت (۳) نیز شبکه تست معرفی شده و روند پیشنهادی روی آن پیاده‌سازی می‌شود. نتیجه‌گیری از نکات بیان شده نیز در بخش (۴) انجام می‌شود.

۱. روش شناسی

۱.۱. *ساختار پیشنهادی*

روندی که به منظور ارزیابی تاثیر استفاده از تکنولوژی هوشمند اندازه‌گیری در این مقاله ارائه شده در شکل (۱) نشان داده شده است. مطابق این نمودار روند، داده‌های مصرفی مشترکین توسط مراکز جمع‌آوری داده‌ها جمع‌آوری شده و دستورالعمل‌های مربوط به پیش‌پردازش داده ها روی آنها پیاده سازی می شود. مقادیر مصرفی برق مشترکین که در بازه های زمانی پشت سر هم ثبت شده است تشکیل یک سری زمانی را می دهد. این سری‌های زمانی مصرفی با استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی تفکیک شده و در خوشه‌های مختلفی قرار می‌گیرند. خوشه‌بندی باید به‌گونه‌ای انجام شود که اعضاء خوشه‌های تشکیل شده دارای بیشترین شباهت به یکدیگر و کمترین شباهت به اعضاء سایر خوشه‌ها باشند. در این مطالعه، سری زمانی مصرفی مشترکین خوشه‌بندی شده است، این یعنی اعضاء هر خوشه دارای رفتار مصرفی مشابه هم هستند. عمل خوشه بندی ما را قادر می سازد که برای هر خوشه یک پروفیل نماینده

تعیین نماییم که در حقیقت نماینده الگوی مصرفی آن خوشه است. با این عمل می توان تصمیمات مربوط به هر خوشه را براساس این پروفیل نماینده گرفت و از حجم بالای محاسبات مربوط به بررسی تمامی پروفیل‌های مصرفی اجتناب نمود.



شکل (۱) نمودار روند روش پیشنهادی

با کمک زیرساخت ارتباطاتی که توسط تکنولوژی اندازه‌گیری هوشمند فراهم شده است امکان مبادله اطلاعات در شبکه فراهم شده و مشترکین با آگاهی از سیگنال‌های قیمت برق برای ساعات مختلف شبانه‌روز می‌توانند مصرف خود را مدیریت نمایند به گونه‌ای که هم نیازهای روزانه ایشان برآورده شود و هم هزینه برق مصرفی آنها کاهش یابد. مطابق شکل (۱)، پس از خوشه-بندی سری های زمانی مصرفی، سیگنال های قیمتی به مشترکین در خوشه های مختلف اعلام شده و تغییرات حاصل شده در الگوی مصرفی مشترکین متعاقب اطلاع پیدا کردن از این قیمت ها ارزیابی می شود. براساس این تغییرات و یا به تعبیری عکس العمل ها از جانب مشترکین سیگنال های قیمتی متناسب با الگوی مصرفی هر خوشه تا حدودی اصلاح می شود. این در حالی است که مشترکین نیز الگوی مصرفی خود را متناسب با هزینه ها و سیگنال های قیمتی اصلاح می کنند. با اعمال سیگنال های قیمتی جدید، مشترکین الگوی مصرفی نهایی خود را براساس این سیگنال ها تنظیم می کنند که این الگوی مصرفی هم از منظر شبکه و هم از منظر مشترکین پروفیل مصرفی بهینه تلقی می گردد. به این ترتیب و با استفاده از روندی مشخص پروفیل بهینه مصرفی که متضمن صرفه جویی مناسب در مصرف انرژی توام با برآوردن نیازهای مشترکین است حاصل می گردد.

۱.۱. *خوشه‌بندی و شناسایی الگوی مصرفی مشترکین*

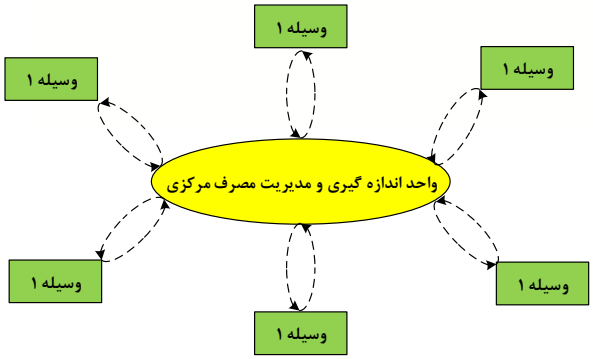
مطابق ادبیات علم داده‌کاوی، خوشه‌بندی عبارت است از قراردادن نمونه‌های مشابه از میان کل نمونه‌ها در یک خوشه. این فرایند باید به گونه‌ای انجام گیرد که اعضاء تخصیص یافته به هر خوشه دارای بیشترین شباهت به یکدیگر و کمترین شباهت به اعضاء تخصیص یافته به خوشه‌های دیگر باشند. این شباهت‌ها و تفاوت‌ها با مقایسه ویژگی‌های هر کدام از نمونه‌ها با یکدیگر صورت می‌پذیرد. به این معنی که برای هرکدام از نمونه‌ها ویژگی‌های یکسانی را اندازه‌گیری می‌نمایند و با مقایسه مجموع این ویژگی‌ها، نمونه‌های مشابه را شناسایی و در یک خوشه قرار می‌دهند. در این مقاله مشترکین شبکه توزیع نمونه هایی هستند که باید براساس شباهت در الگوی مصرفی‌شان تفکیک شوند. ویژگی‌های مشترکین نیز میزان مصرف انرژی الکتریکی آنها در بازه‌های زمانی ثبت داده‌های مصرف است. به این ترتیب که برای هر مشترک این داده‌های مصرفی ثبت و ضبط شده و تشابه پروفیل مصرفی حاصله برای مشترکین با هم مقایسه می‌شود. پیش‌تر اشاره شده که از ثبت داده‌های مصرفی مشترکین در بازه‌های زمانی مختلف سری زمانی مصرفی ایشان تشکیل می-شود که برای تعیین میزان شباهت آن با سری زمانی مصرفی مشترکین دیگر باید فاصله این سری های زمانی از هم اندازه-گیری شود. برای این منظور از فرمول فاصله اقلیدوسی استفاده می‌شود که در رابطه (۱) معرفی شده است. در این رابطه، $x_{i,n}$ مقدار مصرف در بازه زمانی nام برای مشترک iام و $x_{j,n}$ مقدار مصرف در بازه زمانی nام برای مشترک j ام را نشان می‌دهد و در نهایت $d_{i,j}$ فاصله میان این سری‌های زمانی می-باشد. هر اندازه فاصله اقلیدوسی دو سری زمانی از هم کمتر باشد این دو سری به هم نزدیک‌تر و شبیه‌تر هستند. با استفاده از این فرمول و روش خوشه‌بندی شناخته‌شده k-means در هر مرحله

از شناسایی الگو، عمل خوشه‌بندی سری‌های زمانی انجام می‌پذیرد. نتیجه چنین فرایندی تشکیل خوشه‌های مصرفی است که اعضاء هر خوشه دارای حداکثر شباهت به یکدیگر و حداقل شباهت به اعضاء سایر خوشه‌ها هستند. همچنین نماینده هر خوشه که میانگین الگوی مصرفی آن خوشه را دارد نیز در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این ترتیب از بار محاسباتی و زمانی نیز کاسته می‌شود.

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N} (x_{i,n} - x_{j,n})^2} \qquad (۱)$$

۱.۲. *واحد مدیریت مصرف انرژی*

در این مقاله مدیریت مصرف انرژی با استفاده از ظرفیت تکنولوژی اندازه‌گیری هوشمند انجام می‌گیرد. برای این منظور واحدی پیشنهاد می‌شود که قادر است براساس پروفیل‌های قیمتی اعلامی از سوی شبکه برق برای مشترکین، الگوی مصرفی را که از لحاظ هزینه بهینه باشد تعیین نماید. از آنجاییکه مشترکین در رفتار مصرفی با یکدیگر تفاوت‌هایی دارند، نمی‌توان انتظار داشت که دارای الگوی بهینه مصرف مشابهی باشند. این واحد از یک روز قبل مقادیر مصرف انرژی مشترک در ساعات مختلف شبانه روز را دریافت می‌نماید. سپس آن را با پروفیل قیمتی اعلام شده توسط شبکه برای آن روز مقایسه می‌نماید و به‌گونه‌ای مصارف را جابجا می‌نماید که مصرف در ساعات اوج و قیمت بالا کاهش یافته و به ساعات با هزینه کمتر منتقل شود. حال اگر مشترک مایل باشد می‌تواند این الگوی مصرفی را در پیش گرفته و از صرفه‌جویی حاصل از آن بهره‌مند شود. در غیر این صورت نیز می‌تواند از الگوی مصرفی بهینه پیشنهادی واحد مدیریت مصرف انرژی فاصله بگیرد که در این صورت باید هزینه بیشتری بپردازد. نکته مهم در این واحد ارتباط میان وسایل مختلف خانه و یک واحد مدیریت مصرف مرکزی است. وجود چنین زیرساخت ارتباطی سبب می‌شود که بتوان میان وسایلی که مصرف آنها در ساعات مشخص ضروری است و امکان کمی برای جابجایی مصرف در ساعات دیگر دارند و وسایل با امکان جابجایی مصرف راحت‌تر تمایز قائل شد. شکل (۲)، نحوه ارتباطات میان وسایل مختلف در یک خانه هوشمند با واحد مدیریت مصرف مصرف مرکزی را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود یک ارتباط دوسویه میان وسایل و واحد مدیریت مصرف مرکزی وجود دارد که براساس سیگنال‌های قیمتی برای هر کدام از وسایل برنامه مصرف بهینه مشخص می‌شود.



شکل (۲) ارتباط واحد مدیریت مصرف مرکزی و وسایل خانه هوشمند

۲. پیاده‌سازی

۲.۱. *مطالعه موردی*

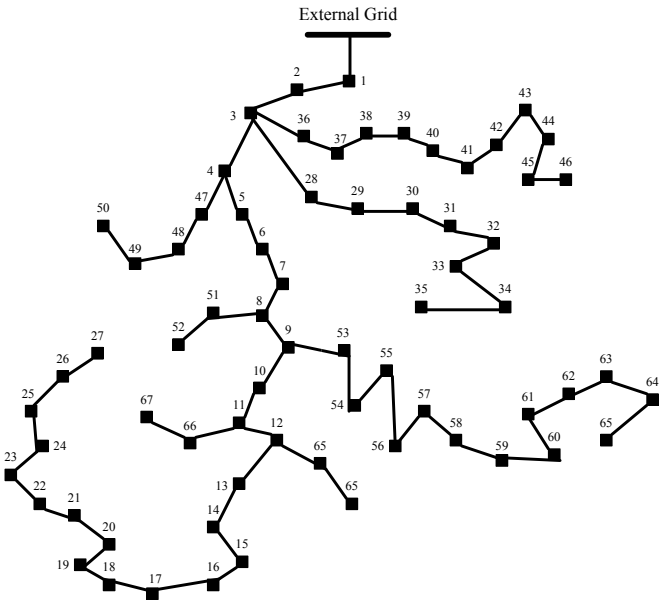
روند پیشنهادی در قسمت (۲) روی یک مجموعه داده مصرفی واقعی مربوط به ۱۰۰۰ نمونه مشترک خانگی در کشور ایرلند پیاده‌سازی شده است. داده‌های مصرفی مشترکین در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای ثبت شده است. به این ترتیب برای هرکدام از مشترکین در ۲۴ ساعت شبانه‌روز تعداد ۴۸ مقدار مصرف ثبت شده وجود دارد. این مقادیر سری‌های زمانی مصرفی مشترکین را تشکیل می‌دهد که مستقیماً در تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تعداد مشترک در یک شبکه توزیع ۶۹ باسه پخش شده‌اند که در شکل (۳) نشان داده شده است. مطالعه مورد نظر روی داده های مصرفی دو سال مشترکین انجام گرفته است تا تغییرات در رفتار مصرفی ایشان بهتر آشکار شود و نتایج تحلیل‌ها نیز دقیق تر و قابل اعتمادتر باشد.

۲.۲. *پیاده‌سازی و نتایج عددی*

پس از انجام فعالیت های مربوط به پیش پردازش داده ها، سری های زمانی اصلی برای پردازش نهایی به دست می آیند. این سری های زمانی با استفاده از روش خوشه بندی k-means به خوشه هایی تفکیک شده که تعداد بهینه خوشه ها در این مطالعه برابر با ۱۸ خوشه می باشد. نماینده هر خوشه در حقیقت نماینده تمامی اعضاء و الگوهای رفتاری تخصیص یافته به آن خوشه می‌باشد که تحلیل ها روی آن انجام می گیرد. این تحلیل

ها شامل ارزیابی تاثیر تکنولوژی اندازه گیری هوشمند روی بهینه سازی مصرف انرژی و صرفه جویی اقتصادی می باشد. به این ترتیب در جدول (۱)، میزان کاهش هزینه برق مشترکین به ازای مقادیر مختلف کاهش در مصرف آنها در سال اول گزارش شده است. از این جدول مشاهده می شود که به ازای درصد کاهش یکسان در مصرف، خوشه های رفتاری مختلف، کاهش هزینه های متفاوتی را تجربه می نمایند. نتیجه همین تحلیل برای سال دوم در جدول (۲) ارائه شده است. با مقایسه مقادیر این جدول با جدول (۱) به راحتی می‌توان مشاهده نمود که میزان کاهش هزینه های خوشه های مختلف نسبت به سال اول تغییراتی را نشان می دهد. برخی از خوشه ها در سال دوم نفع بیشتری از همان کاهش ۱۰٪ی در مصرف خود برده اند و برخی با کاهش منفعت مواجه شده اند. سیستم اندازه گیری هوشمند با قدرت نظارت بالایی که به عنوان یک سامانه هوشمند انرژی دارد این امکان را می دهد که تحلیل نمایند آیا این تغییرات در نتیجه تغییر نسبی در رفتار مصرفی مشترکین بوده یا عوامل دیگری سبب آن شده است. همچنین مشاهده می شود که با کاهش مصرف در پله های ۱۰٪ی برای مشترکین میزان کاهش هزینه ثابت باقی نمی ماند. این نکته مزیت بالای نظارت زمان واقعی حاصل از تکنولوژی اندازه گیری پیشرفته را برجسته می‌سازد. شکل های (۴) و (۵) نیز مقادیر مندرج در جداول (۱) و (۲) را به صورت نمودارهای ستونی نشان می دهند تا بتوان تغییرات را بهتر مشاهده نمود.

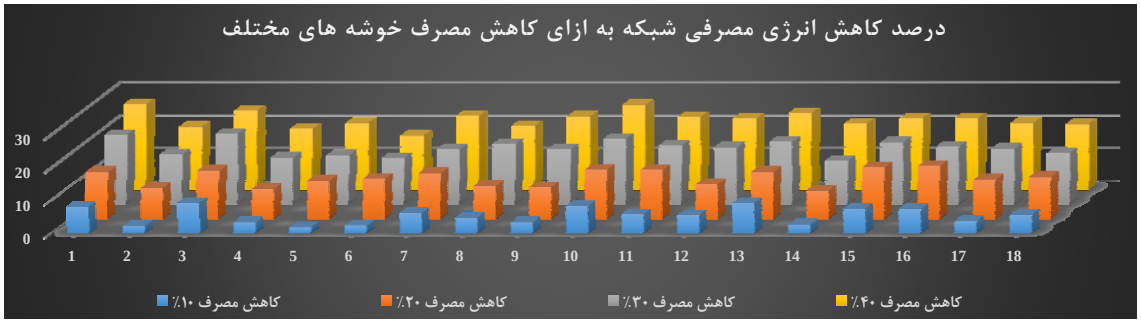
در جداول (۳) و (۴) نیز درصد کاهش انرژی مصرفی در شبکه به ازای مقادیر مختل کاهش مصرف انرژی در خوشه‌های مختلف برای دو سال را نشان می دهد. مطابق این مقادیر، به ازای کاهش یکسان ۱۰٪ در میزان مصرف خوشه ها، شبکه کاهش مصرف انرژی مختلفی را از خوشه ها دریافت می کند. این یعنی اثرگذاری خوشه های رفتاری مختلف روی کاهش میزان مصرف شبکه متفاوت است. مجدداً با مقایسه مقادیر این دو جدول می توان به تغییر ظرفیت خوشه های مختلف برای کاهش مصرف انرژی در شبکه پی برد. مشاهده می شود که میزان اثرگذاری برخی از خوشه ها در کاهش انرژی شبکه تغییر نموده است که تحلیل دقیق این تغییرات بواسطه سیستم اندازه گیری پیشرفته محقق شده است. شکل های (۶) و (۷) نیز نمودار میله‌ای مقادیر مندرج در جداول (۳) و (۴) را نشان می دهد تا بتوان این تغییرات را بهتر مشاهده نمود.



شکل (۳) شبکه توزیع ۶۹ باسه تحت تست

جدول ۱: درصد کاهش هزینه‌های خوشه‌های مختلف به ازای مقادیر مختلف کاهش مصرف انرژی الکتریکی (سال اول)

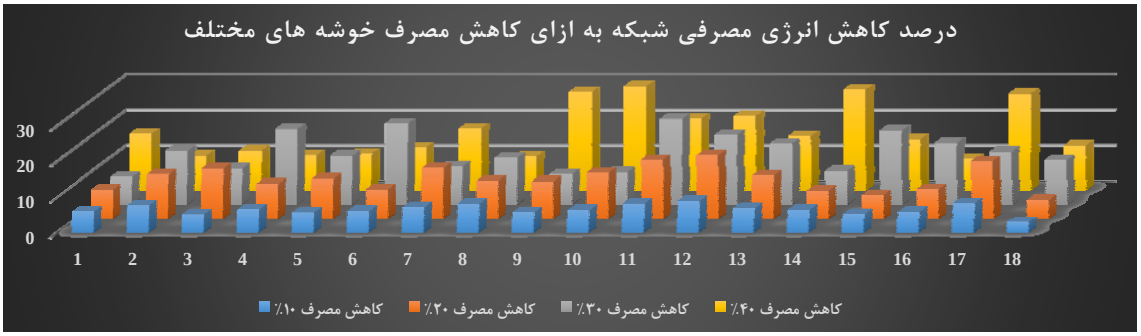
شماره خوشه	کاهش مصرف انرژی در شبکه با فرض تغییر مصرف ۱۰٪	کاهش مصرف انرژی در شبکه با فرض تغییر مصرف ۲۰٪	کاهش مصرف انرژی در شبکه با فرض تغییر مصرف ۳۰٪	کاهش مصرف انرژی در شبکه با فرض تغییر مصرف ۴۰٪
۱	۸.۱۴٪	۱۴.۳۴٪	۲۱.۲۲٪	۲۶.۱۶٪
۲	۲.۴۳٪	۹.۴۴٪	۱۵.۴٪	۱۹.۳۱٪
۳	۹.۲۹٪	۱۴.۷۷٪	۲۱.۵۱٪	۲۴.۲٪
۴	۳.۴۹٪	۹.۱۴٪	۱۴.۳۸٪	۱۸.۶۸٪
۵	۱.۹۶٪	۱۱.۶۷٪	۱۵.۰۱٪	۲۰.۳۹٪
۶	۲.۵۱٪	۱۲.۲۹٪	۱۴.۱۷٪	۱۶.۶۵٪
۷	۶.۱۶٪	۱۴.۰۳٪	۱۶.۹۱٪	۲۲.۶٪
۸	۴.۷۳٪	۱۰.۰۲٪	۱۸.۴۲٪	۱۹.۵۶٪
۹	۳.۵۱٪	۹.۶۸٪	۱۶.۸۸٪	۲۲.۴٪
۱۰	۸.۳٪	۱۵.۰۶٪	۲۰.۰۵٪	۲۵.۸۶٪
۱۱	۵.۸۲٪	۱۴.۹۲٪	۱۷.۹۳٪	۲۲.۳۲٪
۱۲	۵.۴۹٪	۱۰.۵۶٪	۱۷.۴۲٪	۲۱.۸۴٪
۱۳	۹.۱۷٪	۱۴.۳۸٪	۱۹.۲٪	۲۳.۴۶٪
۱۴	۲.۸۵٪	۸.۶۹٪	۱۳.۳۵٪	۲۰.۲۵٪
۱۵	۷.۵۷٪	۱۵.۸۱٪	۱۸.۹۲٪	۲۱.۷۸٪
۱۶	۷.۵۳٪	۱۶.۱۸٪	۱۷.۶۸٪	۲۱.۸۸٪
۱۷	۳.۸٪	۱۲.۰۳٪	۱۷.۰۲٪	۲۰.۴٪
۱۸	۵.۶۷٪	۱۲.۹۲٪	۱۵.۶۴٪	۲۰.۱۵٪



شکل (۴) درصد کاهش هزینه مشترکین در خوشه‌های مختلف به ازای مقادیر مختلف کاهش در مصرف (سال اول)

جدول ۲: درصد کاهش هزینه‌های خوشه‌های مختلف به ازای مقادیر مختلف کاهش مصرف انرژی الکتریکی (سال دوم)

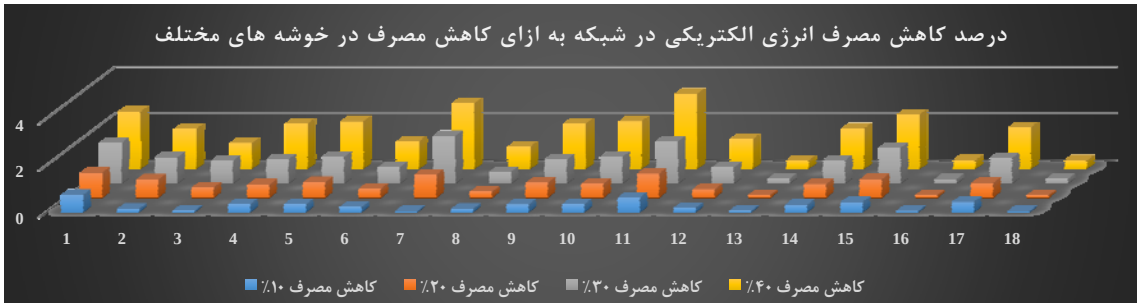
شماره خوشه	کاهش هزینه انرژی مشترک با فرض تغییر مصرف ۱۰٪	کاهش هزینه انرژی مشترک با فرض تغییر مصرف ۲۰٪	کاهش هزینه انرژی مشترک با فرض تغییر مصرف ۳۰٪	کاهش هزینه انرژی مشترک با فرض تغییر مصرف ۴۰٪
۱	۶.۱۹٪	۸.۲۶٪	۱۰.۷٪	۱۱.۸۳٪
۲	۷.۸۳٪	۱۲.۳۱٪	۱۵.۰۲٪	۹.۶۵٪
۳	۵.۳۵٪	۱۳.۹۸٪	۱۰.۰۲٪	۱۱.۱٪
۴	۶.۷۵٪	۹.۸۱٪	۲۱.۱۵٪	۹.۷٪
۵	۵.۸۵٪	۱۱.۱۱٪	۱۳.۶۱٪	۱۰.۲۶٪
۶	۶.۲۸٪	۸.۲۹٪	۲۲.۶۷٪	۱۲.۰۳٪
۷	۷.۳۴٪	۱۴.۱٪	۱۰.۶۴٪	۱۷.۳۵٪
۸	۸.۳۲٪	۱۰.۶۱٪	۱۳.۰۶٪	۹.۵٪
۹	۵.۹٪	۱۰.۴۵٪	۸.۵۱٪	۲۷.۵۶٪
۱۰	۶.۵۳٪	۱۲.۸۲٪	۸.۹۷٪	۲۹.۲٪
۱۱	۸.۳۵٪	۱۶.۳۶٪	۲۳.۹۹٪	۲۰.۱۳٪
۱۲	۹.۰۶٪	۱۷.۶۹٪	۱۹.۴۹٪	۲۰.۸٪
۱۳	۷.۱٪	۱۲.۰۲٪	۱۶.۹۹٪	۱۵.۲٪
۱۴	۶.۶۸٪	۷.۹۲٪	۹.۲۸٪	۲۸.۲۸٪
۱۵	۵.۳۷٪	۶.۷۱٪	۲۰.۷۲٪	۱۴.۳٪
۱۶	۶.۰۲٪	۸.۳۳٪	۱۷.۲۱٪	۸.۶۸٪
۱۷	۸.۳۹٪	۱۵.۹۵٪	۱۴.۷٪	۲۷.۱۱٪
۱۸	۳.۱۳٪	۵.۴۱٪	۱۲.۳۶٪	۱۲.۴۸٪



شکل (۵) درصد کاهش هزینه مشترکین در خوشه‌های مختلف به ازای مقادیر مختلف کاهش در مصرف (سال دوم)

جدول ۳: درصد کاهش مصرف انرژی در شبکه به ازای مقادیر مختلف کاهش مصرف انرژی خوشه‌های مختلف (سال اول)

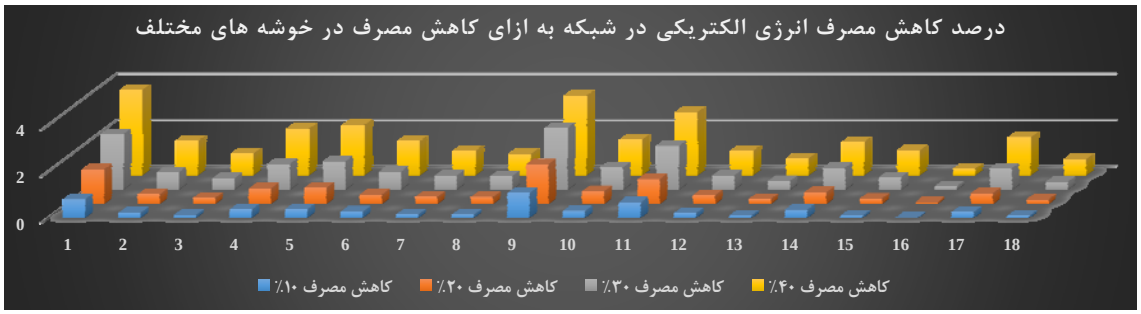
شماره خوشه	کاهش مصرف انرژی در شبکه با فرض تغییر مصرف ٪۱۰	کاهش مصرف انرژی در شبکه با فرض تغییر مصرف ٪۲۰	کاهش مصرف انرژی در شبکه با فرض تغییر مصرف ٪۳۰	کاهش مصرف انرژی در شبکه با فرض تغییر مصرف ٪۴۰
۱	۰.۷۶٪	۱.۰۹٪	۱.۷۶٪	۲.۴۹٪
۲	۰.۱۶٪	۰.۸٪	۱.۱۳٪	۱.۷۴٪
۳	۰.۰۸۵٪	۰.۴۶٪	۰.۹۸٪	۱.۱۳٪
۴	۰.۳۷٪	۰.۵۹٪	۱.۰۵٪	۱.۹۷٪
۵	۰.۳۶٪	۰.۶۹٪	۱.۱۵٪	۲.۰۶٪
۶	۰.۲۵٪	۰.۴۱٪	۰.۷۲٪	۱.۲۱٪
۷	۰.۰۷۳٪	۱.۰۱٪	۲.۰۴٪	۲.۸۴٪
۸	۰.۱۶٪	۰.۲۹٪	۰.۵۱٪	۰.۹۸٪
۹	۰.۳۵٪	۰.۶۷٪	۱.۰۴٪	۱.۹۷٪
۱۰	۰.۳۶٪	۰.۶۳٪	۱.۱۵٪	۲.۰۶٪
۱۱	۰.۶۵٪	۱.۰۵٪	۱.۸۲٪	۳.۲۴٪
۱۲	۰.۲۱٪	۰.۳۹٪	۰.۷۱٪	۱.۳۱٪
۱۳	۰.۰۸۶٪	۰.۱۴٪	۰.۲۳٪	۰.۳۹٪
۱۴	۰.۳۳٪	۰.۶۱٪	۱٪	۱.۷۶٪
۱۵	۰.۴۵٪	۰.۸۲٪	۱.۵۳٪	۲.۳۶٪
۱۶	۰.۰۷۹٪	۰.۱۳٪	۰.۲۱۲٪	۰.۴٪
۱۷	۰.۴۶٪	۰.۶۵٪	۱.۱٪	۱.۸۱٪
۱۸	۰.۰۷۱٪	۰.۱۲٪	۰.۲۱٪	۰.۳۹٪



شکل (۶) درصد کاهش انرژی الکتریکی مصرفی در شبکه به ازای مقادیر مختلف کاهش در مصرف در خوشه‌ها (سال اول)

جدول ۴: درصد کاهش مصرف انرژی در شبکه به ازای مقادیر مختلف کاهش مصرف انرژی خوشه‌های مختلف (سال دوم)

شماره خوشه	کاهش مصرف انرژی در شبکه با فرض تغییر مصرف ۱۰٪	کاهش مصرف انرژی در شبکه با فرض تغییر مصرف ۲۰٪	کاهش مصرف انرژی در شبکه با فرض تغییر مصرف ۳۰٪	کاهش مصرف انرژی در شبکه با فرض تغییر مصرف ۴۰٪
۱	۰.۸۱٪	۱.۴۹٪	۲.۴٪	۳.۷٪
۲	۰.۲۴٪	۰.۴۲٪	۰.۷۶٪	۱.۵٪
۳	۰.۱۵٪	۰.۲۷٪	۰.۵٪	۰.۹۶٪
۴	۰.۳۸٪	۰.۶۸۵	۱.۱۲٪	۲.۰۳٪
۵	۰.۳۹٪	۰.۷۱٪	۱.۲۳٪	۲.۱۹٪
۶	۰.۲۹٪	۰.۴۲٪	۰.۷۸٪	۱.۵٪
۷	۰.۱۷٪	۰.۳۲٪	۰.۶۱٪	۱.۰۸٪
۸	۰.۱۶٪	۰.۳۱٪	۰.۵۹٪	۰.۹۴٪
۹	۱.۰۵٪	۱.۷۱٪	۲.۶۷٪	۳.۴۵٪
۱۰	۰.۳۲٪	۰.۵۶٪	۰.۹۷٪	۱.۵۵٪
۱۱	۰.۶۸٪	۱.۰۸٪	۱.۸۹٪	۲.۷۴٪
۱۲	۰.۲۲٪	۰.۳۹٪	۰.۶۲٪	۱.۰۸٪
۱۳	۰.۱۲٪	۰.۲۱٪	۰.۳۸٪	۰.۷۵٪
۱۴	۰.۳۷٪	۰.۵٪	۰.۹۵٪	۱.۴۵٪
۱۵	۰.۱۲٪	۰.۲۳۵	۰.۵۴٪	۱.۰۸٪
۱۶	۰.۰۴۵٪	۰.۰۸٪	۰.۱۵٪	۰.۲۸٪
۱۷	۰.۲۸٪	۰.۴۷٪	۰.۹۱٪	۱.۶۶٪
۱۸	۰.۱۱٪	۰.۱۹٪	۰.۳۴٪	۰.۷۱٪



شکل (۷) درصد کاهش انرژی الکتریکی مصرفی در شبکه به ازای مقادیر مختلف کاهش در مصرف در خوشه‌ها (سال دوم)

۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله نقش تکنولوژی اندازه‌گیری هوشمند روی مدیریت و صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. ظرفیت بالای این تکنولوژی برای نظارت تقریباً زمان واقعی روی الگوی مصرفی مشترکین و همچنین امکان ایجاد بستر ارتباطی دوسویه میان بخش تولید و مصرف در شبکه برق نقشی بسزا در تحقق اهداف مدیریت انرژی در شبکه توزیع هوشمند دارد. این تکنولوژی امکان ایجاد یک سامانه هوشمند مدیریت مصرف انرژی در سطح شبکه توزیع را فراهم می‌آورد. در این مقاله دو ظرفیت این سامانه مورد بررسی قرار گرفت که یکی

کاهش مصرف انرژی الکتریکی مشترکین در شبکه بوده و دیگری کاهش هزینه‌های پرداختی ایشان به ازای کاهش در مصرف انرژی. نتایج گویای این مطلب هستند که در صورت اطلاع مشترکین از سیگنال‌های ساعتی قیمت‌ها و همچنین الگوی بهینه مورد نظر برای شبکه رفتار مصرفی خود را به‌گونه ای تغییر می دهند که هم پرداختی‌هایشان برای انرژی الکتریکی کاهش یابد و هم بار مصرفی شبکه در ساعات اوج مصرف تخفیف پیدا کند. همچنین نتایج گویای این نکته هستند که میزان اثرگذاری مشترکین روی این کاهش مصرف و بهره بردن از کاهش پرداختی‌ها یکسان نیست. نتایج مطالعات این مقاله نشان می‌دهد که این مقادیر برای برخی از خوشه‌ها بیشتر و برای خوشه‌های دیگر کمتر می‌باشد. از سوی دیگر میزان این مقادیر نیز ثابت نمی‌ماند و تغییر می‌کند که البته برای تعیین منشاء این تغییرات نیز می‌توان از تکنولوژی اندازه‌گیری هوشمند بهره مناسبی برد. در مجموع مطالعات و نتایج حاصل از این مقاله نشان می دهد که تکنولوژی اندازه گیری هوشمند ظرفیت بسیار خوبی برای مدیریت مصرف انرژی در شبکه هوشمند برق دارد.

قدردانی

نویسندگان این مقاله از سایت ISSDA برای در اختیار قرار دادن داده‌های مصرفی بدومن نام مشترکین نهایت سپاسگذاری را دارند. همچنین از سرکار خانم دکتر منا قاسمیان استادیار محترم دانشگاه شهید بهشتی برای ایجاد ارتباط بااین سایت نیز تشکر می‌نمایند.

۴- مراجع

[۱] International Energy Agency, World Energy Outlook, ۲۰۰۹, Available: http:// www.world energyoutlook.org/docs/weo ۲۰۰۹/ WEO ۲۰۰۹ es English.pdf.

ع. شهسواری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "رویکرد تقویت ترمیم-گر به خودترمیمی شبکه‌ی هوشمند با مدلسازی قابلیت اطمینان شبکه هوشمند"، دکتر ح. لسانی(راهنما)، ع. فریدونیان(مشاور)، دانشگاه تهران، ۱۳۹۲

[۲] A.Fereidunian, H.Lesani, C.Lucas, “Distribution System Reconfiguration Using Pattern Recognizer Neural Networks”, International Journal of Engineering (IJE), Vol. ۱۵, No. ۲, pp. ۱۳۵-۱۴۴, ۲۰۰۲.

[۳] W.Gellings, Clark, “The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities”, In Proc of the IEEE, Vol. ۷۳, No. ۱۰, October ۱۹۹۵.

[٤] U.S. Department of Energy, “Benefits of Demand Response in energy markets and recommendations for achieving them”, Report to the United State Congress, February ۲۰۰۶, available online: http://eetd.lbl.gov.

[٥] 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. ۱۰۴-۱۰۸, Aug. ۲۰۱۵.

ح. اعلمی، م. پارسا مقدم، غ. ر. یوسفی، "مدلسازی پاسخگویی بار مبتنی بر ضرایب حساسیت قیمتی تقاضا"، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، بهار ۱۳۸۹

م. کجوری نفت‌چالی، ح. لسانی، ع. فریدونیان، "داده‌کاوی در انباره داده زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تابستان ۱۳۹۵

[٦] M.spinoza, C.joie, R.belmanse, B.de moor, ‘’Short-term load forcasting, profile identification, and customer segmentation: a metodology based on time-series’’, IEEE Transactions on Power systems, Vol.۲۰. No.۳, AUGUST ۲۰۰۵.

م. کجوری نفت‌چالی، ع. فریدونیان، ح. لسانی، "شناسایی تغییرات در رفتار مصرفی مشترکین با استفاده از خوشه‌بندی فازی"، پنجمین کنفرانس شبکه‌های هوشمند(SGC ۲۰۱۶)، ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۹۴

[۷] J. Kwac,, J. Flora, and R. Rajagopal,’’Household Energy

Market", ۳rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA ۲۰۰۸

[۱۵] M.G.Lijesen, "The Real-Time Price Elasticity of Electricity ", ELSEVIER, Energy Economics ۲۹ (۲۰۰۷), pp. ۲۴۹-۲۵۸.

[۱۶] W. Yang, R.Yu, M.Nambiar, "Quantifying the Benefits to Consumers for Demand Response With a Statistical Elasticity Model", IET,۱۰ August ۲۰۱۳.

[۱۷] E. Bompard, Y. Ma, R. Napoli, and G. Abrate, "The demand elasticity impacts on the strategic bidding behavior of the electricity producers", IEEE Trans. Power Syst. , Vol. ۲۲, No. ۱, pp. ۱۸۸-۱۹۷, Feb. ۲۰۰۷.

[۱۸] P.R.Thimmapuram, J.Kim, "Consumers price elasticity of demand modeling with economic effects on electricity markets using an agent-based model", IEEE Transaction on smart grid, Vol.۴, No.۱, March ۲۰۱۳.

Consumption Segmentation using Hourly data", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. ۵, Jan. ۲۰۱۴.

[۸] M.K.Naftchali, A.Fereidunian, H.Lesani, "Identifying Susceptible Consumers for Demand Response and Energy Efficiency Policies by Time-Series Analysis and Supplementary Approaches", ۲۴th Iranian Conference Electric and Electronic (ICEE ۲۰۱۶), Shiraz, Iran, ۲۰۱۶.

[۹] J. Han, M. Kamber (۲۰۰۶) "Data Mining concepts and techniques" ۲nd edition, Morgan Kaufmann publisher.

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

[۱۰] D.S.Kirschen, G.Strbac, P.Cumperayot, and D.De paiva mendes, "Factoring the elasticity of demand in electricity prices", IEEE Transaction on power systems, Vol.۱۵, No.۲, May ۲۰۰۰.

[۱۱] V. Gomez, M. Chertkov, S. Backhaus, and H. J. Kappen, "Learning price-elasticity of smart consumers in power distribution systems", IEEE Smart Grid. Comm. Sep. ۲۰۱۲.

[۱۲] L. Xie, H. Zheng, "Demand Elasticity Analysis by Least Squares Support Vector Machine", ۶th International Congress on Image and Signal Processing (CISP ۲۰۱۳).

[۱۳] M.Babar, O.H.Nguyen, V.Cuk, I.G.Kamphuis, "The Development of Demand Elasticity Model for Demand Response in the Retail Market Environment", Power Tech, IEEE Eindhoven, pp. ۱-۶, June.۲۹- July.۲, ۲۰۱۵, ۲۰۱۵, Eindhoven.

[۱۴] Y. Wang, Y. Liu, S.Yu, "Load Elasticity Analysis in the Deregulated Electricity