

پیک سایه تطبیقی و داده‌محور در شبکه هوشمند انرژی الکتریکی با تحلیل داده‌های زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته

محسن کجوری نفت‌چالی^۱، 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 خواجه‌نصیرالدین طوسی - تهران - ایران - fereidunian@eetd.kntu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تهران - تهران - ایران - lesani@ut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روندی برای شناسایی بهترین گروه از مشترکین از منظر شرکت‌های خدماتی برای مشارکت در پیک سایه ارائه شده است. این روند مبتنی بر استفاده از داده‌های کنتورهای هوشمند در زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته، الگوریتم‌های داده‌کاوی و شناسایی الگو است. تحلیل‌ها حاکی از این نکته هستند که مشترکین با رفتارهای مصرفی متفاوت دارای تأثیرگذاری متفاوتی روی پیک بار مصرفی شبکه هستند. از این رو شناسایی الگوی مصرف و در نظر گرفتن شرایط شبکه از لحاظ توزیع مصرف‌کننده‌ها منجر به انتخاب بهترین گروه از آن‌ها برای این هدف می‌شود. بهترین انتخاب زمانی انجام می‌شود که بتوان با تحت تأثیر قرار دادن کم‌ترین تعداد مشترک، به پیک سایه و پروفیل بار هموار مورد انتظار دست‌یافت. نتایج تحلیل‌های صورت‌گرفته در این مقاله کارایی بسیار مناسب روند داده-محور پیشنهادی را تأیید می‌نمایند. این روند توانسته با کمک داده‌های تقریباً زمان واقعی روی مصرف مشترکین، اثرگذارترین گروه از آن‌ها را شناسایی و تعداد مشترکین درگیر در برنامه پیک سایه را کاهش دهد و همچنین پروفیل بار مطلوب را نیز حاصل نماید. در این میان، نقش داده‌های کنتورهای هوشمند با تفکیک مناسب مقادیر ثبت‌شده مصرف در این روش داده-محور بسیار مهم است. لازم به ذکر است که روش پیشنهادی روی یک مجموعه داده مصرف خانگی مربوط به کشور ایرلند که از طریق سایت ISSDA در اختیار قرار گرفته، پیاده شده است.

واژه‌های کلیدی: پیک سایه، داده‌کاوی، الگوی مصرفی مشترکین، الگوریتم داده‌محور، زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته.

Adaptive Data-Driven Peak Shaving in Smart Grid Electricity Energy by Advanced Metering Infrastructure Data Analytics

Mohsen kojury-naftchali¹, Alireza Fereidunian², Hamid Lesani³

1- SMRL, CIPCE, School of ECE, University of Tehran, Tehran, Iran, E-mail: kojury.savadkoohnaft@gmail.com

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran, E-mail: fereidunian@eetd.kntu.ac.ir

3- SMRL, CIPCE, School of ECE, University of Tehran, Tehran, Iran, E-mail: lesani@ut.ac.ir

Abstract: In this paper, a novel procedure is proposed to identify the most efficient group of customers for participating in the peak shaving from utility companies' point of view. This procedure is based on the smart meter data in advanced metering infrastructure (AMI), data mining and pattern recognition algorithms. Studies implies that customers with different consumption behaviors show different effects on the peak load. Consumption pattern recognition in addition to considering networks condition from consumers' distribution point of view culminates in the most efficient group of them for this aim. The most efficient selection is made when the expected load profile is achieved by affecting the least number of customer as possible. The analysis and results of this paper confirm effectiveness of the proposed data-driven method. This method is able to reduce the number of affected customers in a peak shaving program by identifying the most efficient group of customers in a near real-time data exchanging in the grid. It should be noted that, the proposed method is implemented on a real dataset related to the Irish anonymized households' consumption data which is provided from Irish Social Science Data Archive (ISSDA).

Keywords: Peak shaving, data-Mining, customers consumption behavior, data-driven algorithm, advanced metering infrastructure.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۸ و ۱۳۹۷/۱۱/۶ و ۱۳۹۷/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۶

نام نویسنده مسئول: علیرضا فریدونیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران، تهران، خ شریعتی، پل سیدخندان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

۱- مقدمه

از مسائلی 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]. این مسئله هم سبب افزایش نیاز به توسعه مراکز تولیدی شده و هم در برخی از ساعات شبانه‌روز 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 از جمله مدیریت سمت مصرف شده است [۲]. توجه به این نکته که در حدود ۴۰٪ از هزینه‌ها و بهره‌برداری‌ها در شبکه برق مربوط به بخش توزیع است [۳] و همچنین ظرفیت‌های بالقوه‌ای که این بخش برای برنامه‌های مدیریت انرژی داراست [۴] سبب توجه سهم قابل‌اعتنایی 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، ۶].

مرجع [۷] نیز به ارائه روشی برای مدیریت حضور مشترکین در برنامه پاسخ‌گویی بار می‌پردازد که در آن از قابلیت ماژول مدیریت بار مصرفی خانه در کنتورهای هوشمند استفاده شده است. از همین مدیریت مصرف مشترکین در مرجع [۸] برای هموار نمودن پروفیل‌های بار مصرفی شبکه و جلوگیری از جهش‌های ناگهانی در آن استفاده شده است. از جمله اهدافی که برنامه‌های مدیریت مصرف برای آن مورد استفاده قرار می‌گیرند مسئله پیک سایبی است. هدف این استراتژی تشویق مشترکین به مدیریت مصرف به‌ویژه برای ساعات پیک مصرف است که شبکه تحت فشار است.

تشویق درست مشترکین به مشارکت در برنامه‌های مدیریت سمت مصرف و پیک سایبی مستلزم شناسایی دقیق الگوی مصرفی ایشان است. مسلماً هزینه‌های مربوط به برق مصرفی و سازوکار بازار روی میزان و الگوی مصرفی مشترکین تأثیر دارد. همچنین برای پیاده‌سازی بهینه برنامه‌هایی همچون پیک سایبی رسیدن به عملکرد نزدیک به زمان واقعی بسیار مؤثر است که این نیاز نیز مستلزم وجود مجموعه داده‌های با دقت بالا و از گونه‌های موردنیاز است. 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 یک سو 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 است [۹].

توجه به استفاده از داده‌های کنتورهای هوشمند برای شناسایی رفتار مصرفی مشترکین در مطالعاتی از جمله مرجع [۱۰] مورد توجه قرار گرفته است. نکته‌ای که در مرجع [۱۰] 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 است. همچنین شناسایی الگوی مصرف مشترکین به منظور پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار مصرفی در مرجع [۱۱] و برای شناسایی تغییرات در رفتار مصرفی مشترکین در مرجع [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است. در مراجع [۱۳، ۱۴] 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. به طور مشابه، مرجع [۱۵] نیز از داده‌های کنتورهای هوشمند برای تعیین تعرفه‌های بهینه مصرفی در شبکه استفاده نموده است.

در رابطه با پیک سایبی نیز در مرجع [۱۶] یک توزیع مصرف در شبکه مصارف خانگی با فرض وجود سلول‌های خورشیدی در خانه و پیش‌بینی بار مصرفی با هدف پیک سایبی انجام گرفته است. در این مطالعه میزان تولید و مصرف این واحدها پیش‌بینی شده است. در مرجع [۱۷، ۱۸] پیک سایبی با کمک ذخیره‌سازها مورد بررسی قرار گرفته است. به این ترتیب که تعیین ظرفیت واحدهای ذخیره‌سازی برای عملکرد بهینه برای هدف پیک سایبی مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در مراجع [۱۹، ۲۰] از عملکرد بهینه باتری‌های ذخیره‌سازی به منظور پیک سایبی مناسب استفاده شده است. مرجع [۲۱، ۲۲] از خودروهای الکتریکی برای منظور پیک سایبی و همچنین کمینه نمودن تلفات در شبکه استفاده می‌نماید و مرجع [۲۳] نیز این خودروهای الکتریکی را در اتصال به خانه و شبکه در نظر گرفته است. در بحث پیاده‌سازی برنامه‌های مدیریت سمت مصرف از جمله پاسخ‌گویی بار نیز کارهای قابل قبولی انجام شده است. از جمله در [۳۴] که در آن عوامل مؤثر در پیاده‌سازی پاسخ‌گویی بار و همچنین مواردی که تحت تأثیر پیاده‌سازی این برنامه هستند مورد بررسی قرار گرفته و برای پیاده‌سازی پاسخ‌گویی بار به صورت بهینه این عوامل اولویت‌سنجی شده است. مرجع [۳۵] با استفاده از مفهوم کشسانی به پیاده‌سازی بهینه دو نوع از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار زمان استفاده و بحرانی می‌پردازد. همچنین [۳۶] نیز پیاده‌سازی پاسخ‌گویی بار را با در نظر گرفتن عکس‌العمل مشترکین به قیمت‌ها انجام می‌دهد. در واقع، در این مرجع به نقش رفتار مصرفی مشترکین در پاسخ‌گویی بار توجه شده است. در مراجع

نوآوری اصلی این مقاله بررسی ظرفیت‌های زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته برای شناسایی میزان استعداد گونه‌های رفتار مصرفی مختلف برای مشارکت در پیک‌سایبی پروفیل مصرفی شبکه است. این شناسایی در نتیجه‌ی تعریف معیار دقیقی برای خوشه‌بندی مناسب مشترکین حاصل می‌شود. تعریف و انتخاب درست این معیار نیز نوآوری دوم این مقاله است که به تفصیل در ادامه معرفی شده است. در این صورت می‌توان در هر شرایط با شناختی که نسبت به ویژگی‌های هر خوشه وجود دارد برای هر منظور مشخصی از خوشه با شرایط مناسب آن استفاده نمود. نوآوری سوم این مقاله نیز ارائه روندی تطبیقی برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌هاست. تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها از نکات بسیار تأثیرگذار در دقت عملکرد الگوریتم‌های خوشه‌بندی است چراکه تعداد کم یا زیاد خوشه‌ها هر دو مشکل‌ساز است.

همچنین لازم به ذکر است که در این مقاله شرایط به این صورت است که شناسایی الگوی مصرفی و خوشه‌بندی مشترکین بر مبنای الگوی مصرفی به صورت نزدیک به زمان واقعی و داده‌محور صورت می‌پذیرد و مدل-محور نیست. به این ترتیب، خوشه‌بندی در بازه‌های زمانی کوتاه انجام می‌گیرد و تغییرات در رفتار مصرفی مشترکین از مقایسه در الگوهای مصرفی و با استفاده از فرمول‌های اندازه‌گیری شباهت میان سری‌های زمانی صورت می‌پذیرد. این‌گونه نبوده که مطابق دیدگاه مدل-محور یک بار train انجام گیرد و طبق آن مدلی ساخته شود و با آن پیش‌بینی انجام شود. بلکه ارزیابی از میزان اثرگذاری مشترکین در برنامه مدیریت سمت مصرف بر اساس تحلیل‌هایی است که از خوشه‌بندی‌های متعدد در دوره شناسایی الگوی مصرفی انجام شده است. این نکته هم در عنوان مقاله مشخصاً بیان شده است و هم در صفحه ستون و سطر بدان تصریح شده است.

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 معیاری که برای طبقه‌بندی مشترکین برای مشارکت در پیک‌سایبی مورد استفاده قرار می‌گیرد معرفی شده‌اند. در قسمت (۴) نیز ضمن معرفی شبکه تست، روند تشریح شده در قسمت (۲) پیاده‌سازی و نتایج حاصله تحلیل شده است.

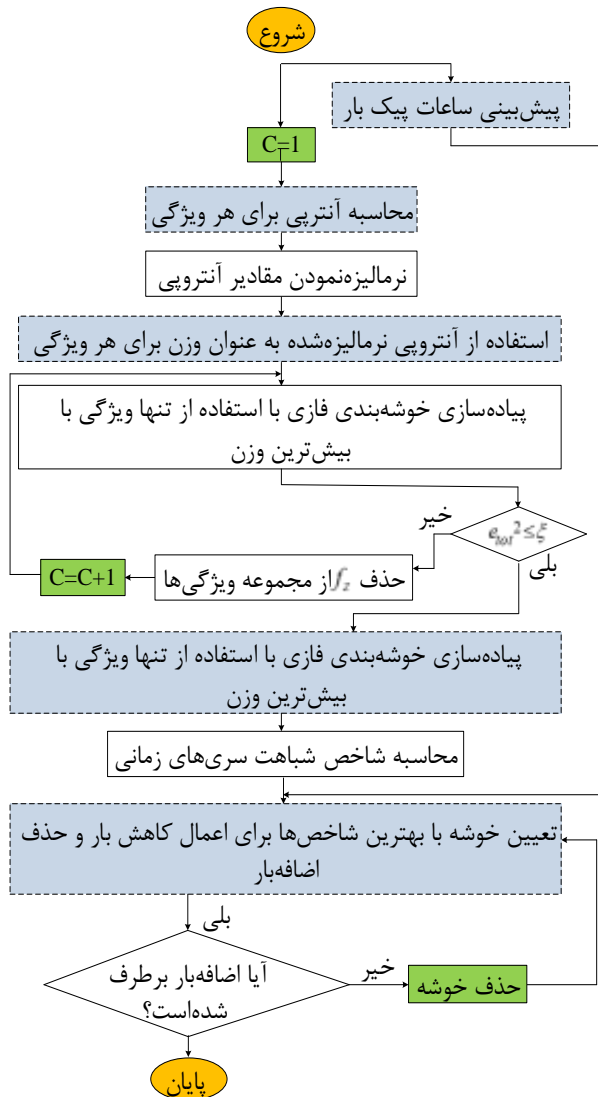
۲- روش‌شناسی

۲-۱- ساختار پیشنهادی

شکل (۱) روند پیاده‌سازی فرایند شناسایی مشترکین مستعد برای مشارکت در پیک‌سایبی را با جزئیات نشان می‌دهد. مطابق این شکل و پس از پیش‌پردازش داده‌ها، تعداد بهینه خوشه‌ها در قالب یک فرایند تکراری تعیین و همچنین عمل خوشه‌بندی نیز با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی انجام می‌شود. الگوی کار در روش پیشنهادی این است که در هر نوبت از پیک‌سایبی، یک خوشه (خوشه بهینه) که

[۳۷، ۳۸] نیز به ترتیب نقش پاسخگویی بار در توزیع بار اقتصادی و مدیریت انرژی پارکینگ برای خودروهای برقی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۲۴] پیک‌سایبی با تقسیم‌بندی وسایل در خوشه‌ها و همچنین استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی و با فرض وجود منابع تولید پراکنده در منازل انجام گرفته است. مرجع [۲۵] نیز روشی را ارائه نموده که به طور هم‌زمان یک سیستم مبتنی بر بازار با چند بازیگر و روش بهینه‌سازی توزیع شده را در نظر می‌گیرد. سیستم مبتنی بر بازار با چند بازیگر و روش بهینه‌سازی توزیع شده به ترتیب در مراجع [۲۶، ۲۷] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مرجع [۲۸] نیز با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز چند سطحی انرژی در ریز شبکه هدف پیک‌سایبی محقق شده است. همچنین مرجع [۲۹] پیک‌سایبی را با زمان‌بندی استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز الکتریکی پیک‌سایبی محقق می‌نماید. در این روش مسئله مربوط به قیدهای مدیریت دارایی در هنگام استفاده از این سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در نظر گرفته شده است. در مرجع [۳۰] پیک‌سایبی با شناسایی و مطالعه بارهای مختلف خانگی و زمان‌بندی بهینه آن‌ها انجام گرفته است. در این مطالعه با تقسیم‌بندی ساختمان‌ها بر اساس تعداد اتاق‌ها و فرض مدیریت مصرف وسایل خانگی مختلف هدف پیک‌سایبی محقق می‌شود.

در میان مقالاتی که تا به اینجا مورد بررسی قرار گرفته، مشاهده نشده که مطالعه‌ای روی استعداد سنجی مشترکین برای مشارکت در برنامه‌ی پیک‌سایبی انجام گرفته باشد. به این معنی که تمرکز مناسبی روی رفتارشناسی مشترکین در مصرف انجام گیرد و بر اساس شناسایی الگوی مصرفی مشترکین بتوان بهترین گروه از آن‌ها را برای مشارکت در پیک‌سایبی شناسایی و انتخاب نمود. این در حالی است که نویسندگان این مقاله معتقد هستند که شناسایی این استعدادها نقش بسیار مهمی در پیاده‌سازی موفق چنین برنامه‌هایی دارد. لازم به ذکر است که موضوع استعداد سنجی مشترکین در کارهای پیشین نویسندگان این مقاله نیز مورد توجه بوده است که در قسمت‌های آینده به آن‌ها اشاره شده است. چراکه مشترکین به علت الگوهای مصرفی مختلفی که دارند، دارای اثرگذاری متفاوتی روی میزان مصرف در ساعات پیک هستند. مطالعات نویسندگان این مقاله حاکی از آن است که اگر این شناسایی‌ها به‌درستی انجام گیرد قادر است تعداد مشترکین شرکت‌کننده در پیک‌سایبی را نیز کاهش دهد. همچنین انتخاب مشترکین مستعد نیز به گونه‌ای انجام می‌گیرد که کم‌ترین کاهش رفاه و فاصله از الگوی مصرفی معمول برای مشترک ایجاد شود. نتیجه این بحث این‌که وجود چنین فرایندی برای استعداد سنجی مشترکین گامی روبه‌جلو در پیاده‌سازی هرچه بهتر پیک‌سایبی است. در این مقاله، مشترکین بر اساس استعدادشان با هدف مشارکت در پیک‌سایبی خوشه‌بندی می‌شوند. به این ترتیب که الگوهای رفتاری (خوشه‌ها) گوناگون با میزان استعداد مختلف برای پیک‌سایبی بر اساس شناسایی و مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۱: نمودار روند فرایند پیشنهادی

رابطه (۱) فرمول اصلی آنتروپی (Ent_i) برای ویژگی i را نشان می‌دهد. در این رابطه، R_{ij} بیانگر میزان چگالی وزنی ویژگی i برای نمونه i و $\sum_{i=1}^m x_{ij}$ نیز مجموع مقادیر این ویژگی برای تمامی نمونه‌هاست. اگر تعداد نمونه‌ها N فرض شود، مقدار K با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. به این ترتیب، می‌توان با استفاده از رابطه (۱) به مقدار آنتروپی متناظر با ویژگی i دست یافت. از سوی دیگر، بیان شده که آنتروپی میزان عدم قطعیت یک متغیر را نشان می‌دهد، بر این اساس، رابطه (۴) بیانگر میزان اطمینان یا قطعیت به‌ازای یک ویژگی است که هر اندازه برای یک ویژگی مقداری بزرگ‌تر باشد یعنی تأثیر آن ویژگی در تصمیم‌گیری بیش‌تر است. در نهایت نیز برای امکان مقایسه راحت‌تر میان ویژگی‌ها با استفاده از رابطه (۵)، مقادیر d_i ها نرمالیزه می‌شود [۳۹، ۴۰].

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

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (2)$$

دارای بیش‌ترین استعداد برای پیک‌سایبی است انتخاب می‌شود. این انتخاب بر اساس شباهت سری‌های زمانی نماینده‌ی هر خوشه و همچنین سری زمانی مطلوب شبکه انجام می‌شود. همچنین لازم به توضیح است که روشی که برای تعیین وزن برای ویژگی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است از میان ویژگی‌های اولیه در نظر گرفته شده برای هر مشترک (نمونه) به آن‌هایی که دارای اثرگذاری بیش‌تری در تفکیک مشترکین هستند وزن بیش‌تری داده و بالعکس. بر این اساس، با اختصاص اوزان کم‌تر به ویژگی‌های با اثرگذاری کم‌تر عملاً اثر آن‌ها در نتایج کمینه‌شده که این تا حدود زیادی دغدغه تحت تأثیر قرار گرفتن نتیجه از جانب آن‌ها را برطرف می‌نماید. حتی علت عدم استفاده از الگوریتم‌های کاهش ابعاد داده نیز در این مقاله وجود همین روند پیشنهادی بوده است. همچنین لازم به ذکر است که در بخش پیش‌پردازش داده‌ها تدابیر از این دست وجود دارد. به علاوه، پس از پیاده‌سازی الگوریتم و بررسی ویژگی‌های مؤثرتر ملاحظه شده است که ویژگی‌هایی که در میان آن‌ها داده‌های پرت وجود داشته، نتوانسته‌اند وزن بالایی در تأثیرگذاری کسب نمایند. پس از انتخاب خوشه بهینه و اعمال کاهش بار روی آن اگر مشکل اضافه‌بار رفع شد که مسئله حل شده است، در غیر این صورت باید خوشه بهینه بعدی را انتخاب نموده و اعمال کاهش بار را تا جایی ادامه داد که پروفیل بار مناسب از دیدگاه شبکه حاصل شود. تشریح کامل‌تر روند پیشنهادی مستلزم آشنایی با مفاهیمی است که در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۲- آنتروپی

مطابق بحث تئوری اطلاعات، آنتروپی یک پیام ارسالی یا یک متغیر تصادفی، بیان‌گر میزان عدم قطعیت آن است. به این ترتیب که هر اندازه میزان آنتروپی پیام یا متغیری بیش‌تر باشد دارای عدم قطعیت بیش‌تری است و بالعکس. متغیر با میزان آنتروپی بالاتر به دلیل داشتن عدم قطعیت بیش‌تر در تصمیم‌گیری‌ها اثرگذاری کم‌تری دارد اما حاوی اطلاعات نادانسته بیش‌تری است [۳۱]. حال فرض می‌شود مجموعه‌ای از نمونه‌ها در اختیار است و هر کدام از این نمونه‌ها دارای ویژگی‌هایی هستند. با محاسبه کمیت آنتروپی برای هر کدام از این ویژگی‌ها می‌توان میزان قطعیت و اطلاعاتی که هر ویژگی برای نمونه‌ها فراهم می‌آورد را تعیین نمود. به عبارت دیگر، آنتروپی بیان می‌نماید که هر کدام از ویژگی‌ها تا چه اندازه‌ای روی افزایش اطلاعات ما نسبت به نمونه‌ها اثرگذاری دارند [۳۱]. مطابق این توضیح و با الهام از نکاتی که در مرجع [۶] مطرح شده و همچنین نگاهی که در آن به موضوع آنتروپی شده است می‌توان از آنتروپی در قالب یک فرایند تکراری که در این مقاله معرفی شده است به منظور شناسایی ویژگی‌های مهم‌تر و همچنین ایجاد خوشه‌های با قطعیت بالاتر در عمل خوشه‌بندی استفاده نمود.

ضرایب عضویت نمونه مشخص می‌شوند. هراندازه نمونه‌ی موردنظر به خوشه‌ای نزدیک‌تر باشد، ضریب عضویت این نمونه برای این خوشه دارای مقداری بزرگ‌تر است و بالعکس. تخصیص این ضرایب عضویت سبب ایجاد درک واقعی‌تری از توزیع نمونه‌ها در فضای ورودی می‌شود چراکه موارد فراوانی پیش می‌آید که یک نمونه به‌طور مطلق عضو خوشه‌ای خاص نیست و در بین چندین خوشه قرار دارد. به‌این‌ترتیب فرض اختصاص قطعی چنین نمونه‌ای به یک خوشه میزان خطا را بالا خواهد برد. به همین دلیل است که خوشه‌بندی فازی برای نشان‌دادن تصویر بهتری از وضعیت توزیع نمونه‌ها مناسب‌تر است.

لازم به ذکر است که مقدار ξ نیز با استفاده از میزان قطعیت در تخصیص یک نمونه به خوشه‌ها تعیین شده است. فرمول (۷) شاخصی برای ارزیابی دقت خوشه‌بندی فازی را ارائه می‌نماید [۳۲]. مطابق تعریف این شاخص و با فرض تخصیص هر نمونه به هر خوشه با میزان اطمینان حداقل ۹۰٪ یا به عبارتی ضریب عضویت ($m_{n,max}$) حداقل ۰/۹ مقدار ξ برای ارضاء قید رابطه (۶) مقدار برابر ۰/۴ به دست آمده است.

$$FCA = -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m_{n,max} \log(m_{n,max}) \quad (7)$$

۴-۲- شاخص شباهت سری‌های زمانی

مطابق نمودار روند شکل (۱)، شاخصی که برای تعیین پروفیل مصرف بهینه برای مشارکت در برنامه پیک سابی مورد استفاده قرار می‌گیرد شاخص شباهت سری‌های زمانی است. روش‌ها و شاخص‌های متفاوتی برای تعیین میزان شباهت سری‌های زمانی وجود دارد که در این مقاله از روش فاصله اقلیدسی استفاده شده است. فرمول فاصله اقلیدسی بین دو سری زمانی x_i, x_j در رابطه (۸) ارائه شده است که در این رابطه این توصیف، $x_{i,j}, x_{j,i}$ به ترتیب مقادیر سری‌های زمانی i, j در بازه زمانی t را نشان می‌دهد. طبعاً هراندازه اختلاف مقادیر این سری‌های زمانی کمتر باشد فاصله اقلیدسی مقدار کمتری داشته و دو سری زمانی دارای شباهت بیش‌تری به هم هستند. پیش‌تر بیان شده است که هدف تعیین شباهت میان سری زمانی بهینه از دید شبکه و سری‌های زمانی نماینده هر خوشه است. به‌این‌ترتیب خوشه‌ای از منظر این شاخص بهینه است که الگوی متوسط مصرف آن (پروفیل نماینده خوشه) دارای بیش‌ترین شباهت به الگوی موردنظر شبکه باشد.

$$w_{i,j} = \sqrt{\sum_{t=1}^T (x_{i,t} - x_{j,t})^2} \quad (8)$$

۳ - پیاده‌سازی

۱-۳- مطالعه موردی

برای ارزیابی روش پیشنهادی برای پیک سابی از یک مجموعه داده مربوط به مصرف انرژی الکتریکی ۱۲۰۰ مشترک در کشور ایرلند استفاده شده است. این‌ها داده‌های زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته

$$K = \frac{1}{\ln(N)} \quad (3)$$

$$d_j = 1 - Ent_j \quad (4)$$

$$\theta_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (5)$$

مطابق شکل (۱)، پس از آن‌که با استفاده از آنتروپی، ویژگی‌های با ارزش بالاتر برای تفکیک مشخص شدند، برای خوشه‌بندی از این مقادیر قطعیت نرمالیزه شده θ_j به‌عنوان وزن برای ویژگی‌ها استفاده می‌شود و به ویژگی‌های دارای اثرگذاری بیش‌تر وزن بیش‌تری تعلق می‌گیرد و بالعکس. این عمل سبب می‌شود که در عمل خوشه‌بندی، تفاوت‌های اساسی‌تر بیش‌تر به چشم آمده و منجر به یک فرایند خوشه‌بندی دقیق‌تری شود. لازم به ذکر است که میزان چگالی وزنی ویژگی معیار ضریبی بدون واحد است که با استفاده از رابطه (۵) در مقاله محاسبه شده و به هرکدام از معیارها تعلق می‌گیرد. هر معیاری که ضریب تعلق گرفته بدان بزرگ‌تر باشد برای تفکیک مشترکین دارای اثرگذاری و قدرت بیش‌تری است. با این کار در حقیقت معیارهای اثرگذارتر تقویت و معیارهای دیگر که دارای قدرت اثرگذاری کم‌تری هستند تضعیف می‌شوند. این درنهایت منتج به تفکیک و خوشه‌بندی مناسب‌تر مشترکین خواهد شد. حال عمل خوشه‌بندی با لحاظ نمودن یک خوشه و تنها ویژگی با بیش‌ترین آنتروپی (f_c) آغاز شده و در هر مرحله رابطه (۶) مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر قید موجود در آن ارضاء شد که همین تعداد خوشه کافی است اما چنانچه این اتفاق نیفتاد بر تعداد خوشه‌ها یک واحد افزوده شده و دومین ویژگی با بیش‌ترین مقدار آنتروپی انتخاب می‌شود. به‌این‌ترتیب در هر مرحله یک ویژگی جدید برای خوشه‌بندی به ویژگی‌های موجود اضافه می‌شود. زمانی که قید رابطه (۶) ارضاء شد، C نشان‌دهنده تعداد بهینه خوشه‌هاست. در این رابطه، e_{tot}^2 میزان خطای کل است که باید کمتر از مقدار آستانه ξ شود. این روش سبب تشکیل خوشه‌هایی با میزان دقت بالا شده که سبب افزایش قابلیت اطمینان پیک سابی در مرحله بعدی می‌شوند. لازم به ذکر است که در رابطه (۶)، نشان‌دهنده مقدار ویژگی f ام برای نمونه k ام در خوشه c ام و $cen_{c,f}$ نیز مقدار ویژگی f ام برای مرکز خوشه c ام است.

$$e_{tot}^2 = \sum_{c=1}^C \sum_{k=1}^{K_c} \sum_{f=1}^F (x_{c,k,f} - cen_{c,f})^2 \leq \xi \quad (6)$$

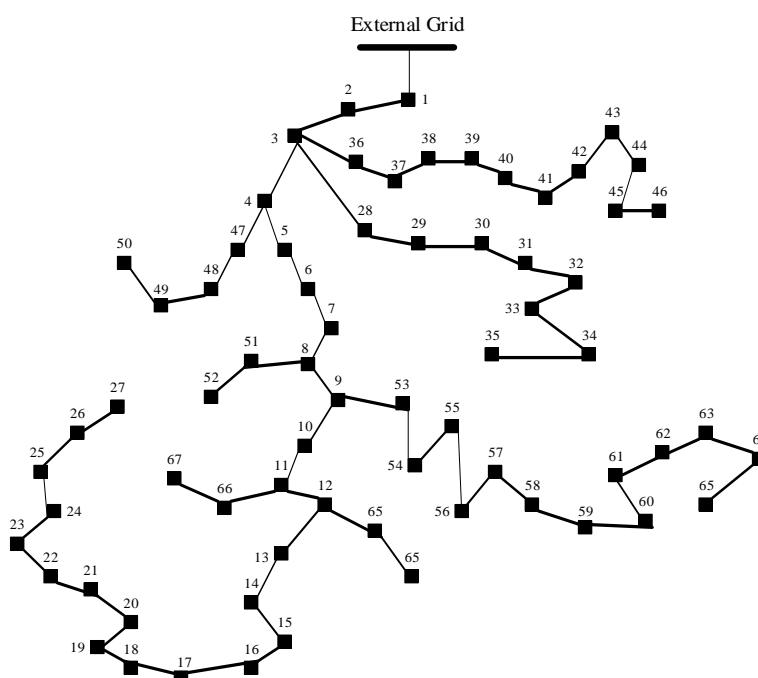
۳-۲- خوشه‌بندی فازی

در این روش خوشه‌بندی برخلاف روش‌های موجود دیگر مانند k -means که به‌صورت مطلق، یک نمونه را به خوشه‌ای خاص تخصیص می‌دهند، برای هر نمونه ضرایب عضویت در خوشه‌ها تعیین می‌شود. به این معنی که هر نمونه دارای فواصل مشخصی از مراکز خوشه تعیین شده است و به بعضی از آن‌ها نزدیک و از بعضی دیگر دور است. این نزدیکی و دوری نمونه‌ها به مراکز خوشه توسط ضرایبی تحت‌عنوان

مضافاً، برای چنین هدف وجود داده‌های مصرفی در بازه‌های زمانی کوتاه بسیار کاربردی و دارای دقت مناسبی برای اظهار نظر است. همچنین لازم به ذکر است که در پیاده‌سازی برنامه فرضیاتی در نظر گرفته شده است که مختصراً به این شرح است:

۱. داده‌های مصرفی مشترکین مربوط به دو سال است که از داده‌های سال اول برای شناسایی الگوها و ارائه روش و از داده‌های مصرفی سال دوم برای ارزیابی مورداستفاده قرار گرفته است.
۲. عمل پیک‌سازی به صورت مرحله‌ای پیاده‌سازی شده و در هر مرحله به اندازه ۱۰٪ از بار مصرفی هر کدام از خوشه‌ها در ساعات اوج مصرف کاسته شده است.
۳. میزان اضافه‌باری‌ها در ساعات پیک که قصد کاهش آن‌ها وجود دارد نیز چهار مقدار ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ در نظر گرفته شده است.

هستند که در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای ثبت شده‌اند. این تعداد مشترک در یک شبکه توزیع با تعداد ۶۷ باس پخش شده‌اند که شکل (۲) نشان‌دهنده آن است. در این مقاله داده‌های مصرفی مربوط به دو سال بررسی شده است که از داده‌های سال اول برای شناسایی و ارائه روش داده-محور و از داده‌های سال دوم برای ارزیابی روند پیشنهادی استفاده شده است. لازم به ذکر است که در این مقاله بنا به محدودیت در دسترسی به اطلاعات مربوط به دما، ایام تعطیل و... نویسندگان ناگزیر به اکتفا به همین مجموعه اطلاعات در دسترس شدند. به این ترتیب که پیک‌سازی تنها بر اساس الگوی مصرفی مشترکین انجام گرفته و برای این منظور نیز از داده‌های مصرفی مشترکین در بازه‌های زمانی مختلف استفاده شده است که عملاً تا حدود زیادی تأثیر عواملی مانند دما، ایام تعطیل و... در آن منعکس می‌شود. به این معنی که الگوی مصرفی مشترکین در ساعات مختلف شبانه‌روز برای روزهای کاری و تعطیل مشخصاً در پروفیل‌های مصرفی ایشان مشاهده می‌شود.

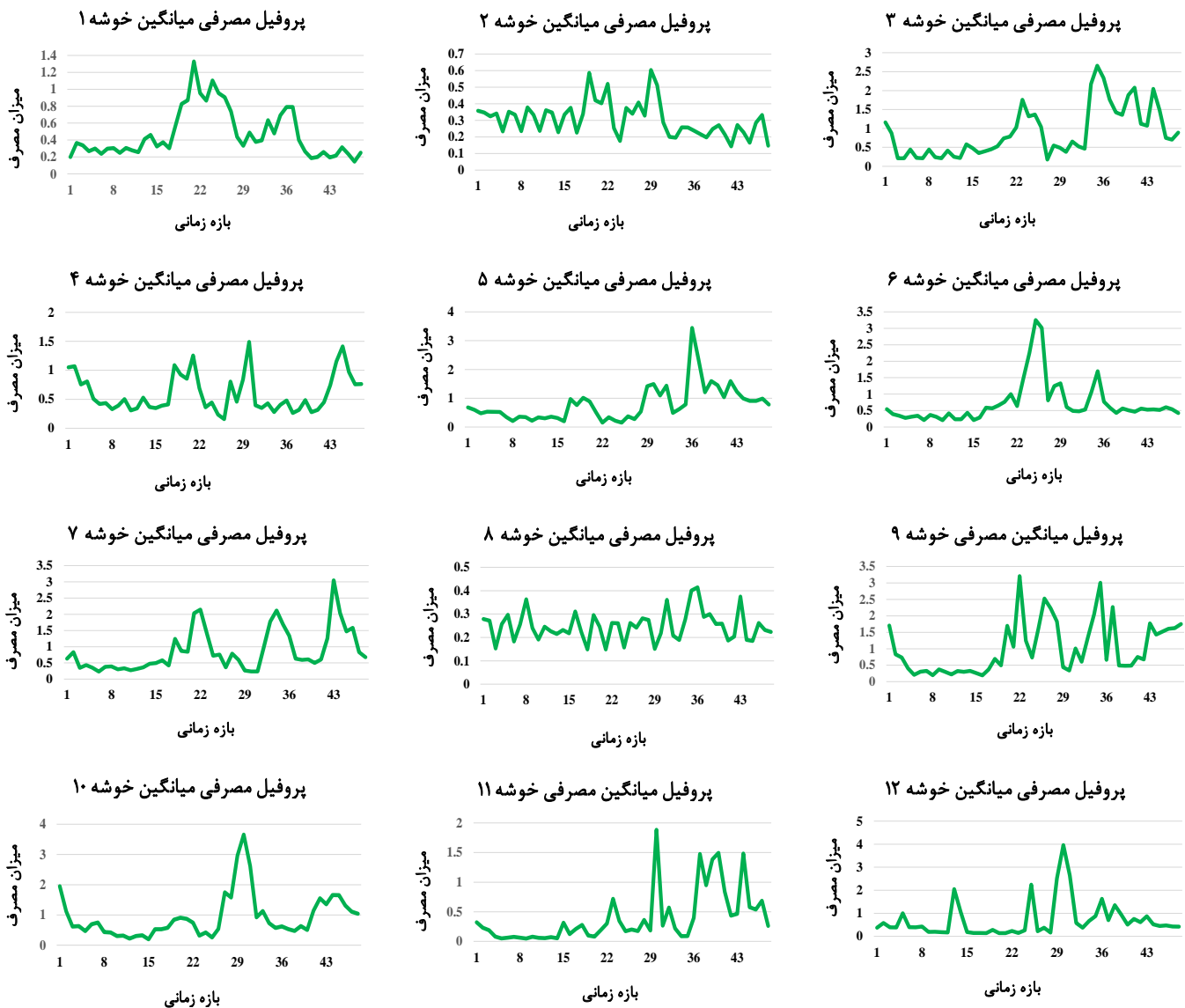


شکل ۲: شبکه تحت مطالعه

۲-۳- پیاده‌سازی پیک‌سازی و نتایج عددی

زمانی مصرف مشترکین پیاده‌سازی می‌شود نیاز دقت بسیار دقت بسیار بالایی دارد. این دقت را می‌توان با کمک داده‌های زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته به دست آورد. به این ترتیب در هر نوبت از خوشه‌بندی نیز می‌توان مستقیماً الگوهای مصرف میانگین مربوط به هر خوشه را به دست آورد. شکل (۳) یک نمونه از این خوشه‌بندی‌ها را برای یک بازه زمانی مشخص نشان می‌دهد که در آن پروفیل‌های مصرف نماینده هر خوشه رسم شده‌اند. چنین اندازه‌گیری‌ای را می‌توان برای هر دوره زمانی انجام داد. این در حقیقت همان کنترل نزدیک به زمان واقعی است که توسط AMI فراهم شده است و با آن پروفیل‌های مصرفی مشترکین در بازه‌های کوتاه زمانی ثبت می‌شود. سپس بر اساس قیود مورد نظر شبکه پروفیل بهینه از دیدگاه شبکه نیز

مطابق روند تشریح شده در قسمت (۲-۱)، پس از تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها و پیاده‌سازی خوشه‌بندی فازی می‌توان نماینده‌ی هر خوشه را تعیین نمود. تعداد بهینه خوشه‌ها با استفاده از فرایند تکراری معرفی شده، تعیین شده است که معادل ۱۲ خوشه است. طبیعتاً مشترکین تخصیص یافته به هر خوشه دارای الگوی مصرفی مشابهی هستند که متفاوت از الگوی مصرفی سایر خوشه‌هاست. این یعنی میزان شباهت آن‌ها به پروفیل بهینه از دیدگاه شبکه به یک اندازه نیست. علت تأکید روی داده‌های کنترهای هوشمند و AMI نیز همین است. از آنجایی که در این مقاله خوشه‌بندی مستقیماً روی سری‌های

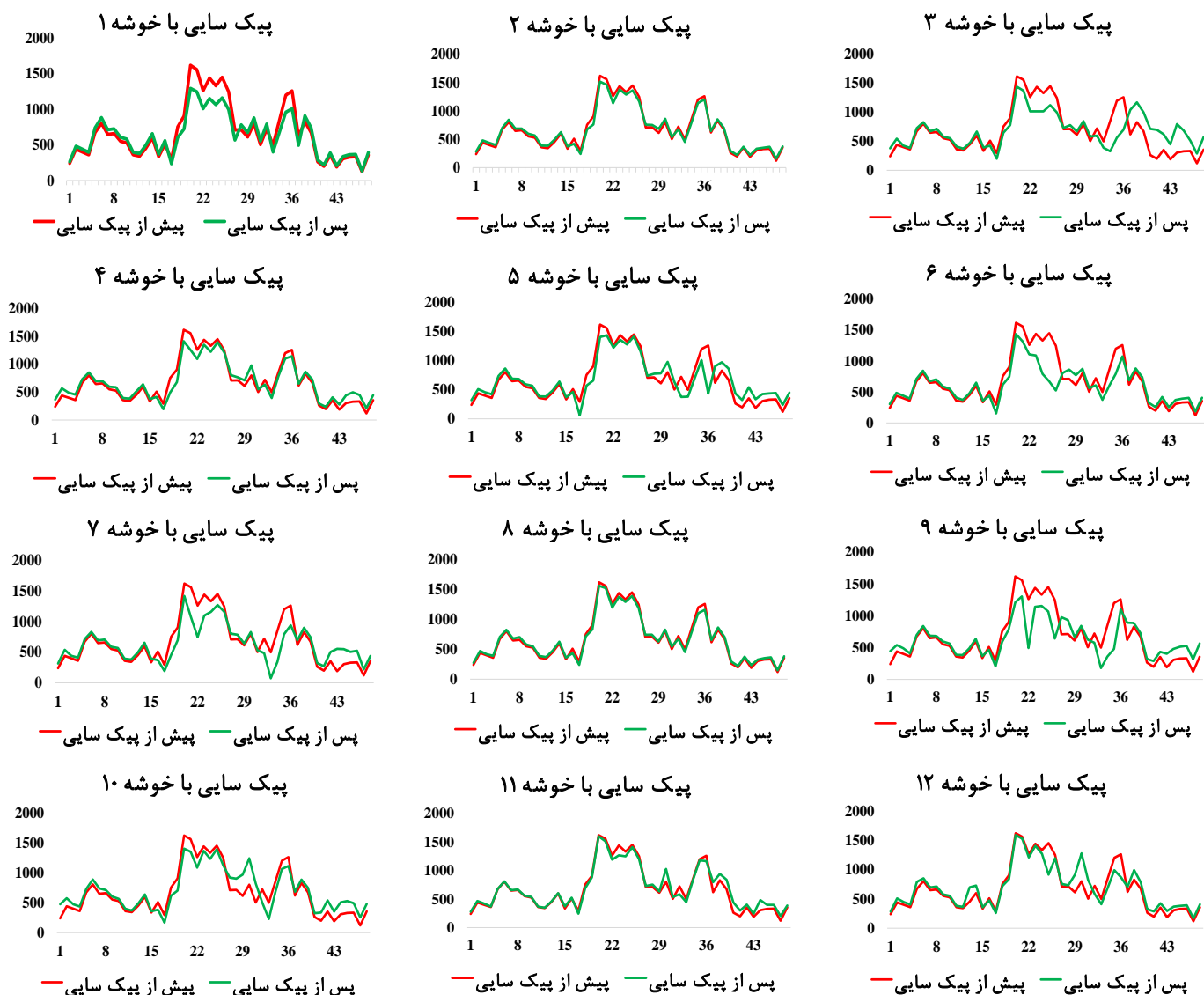


شکل ۳: پروفیل مصرفی مربوط به خوشه‌های مختلف برای پیش‌بینی پیک مصرفی با استفاده از داده‌های کنترهای هوشمند

اشاره شده که داده‌های مصرفی برای دو دوره زمانی (دو سال) مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ دوره اول برای شناسایی و استنتاج الگوها و دوره دوم برای ارزیابی روند استنتاجی. شکل‌های (۴) و (۵) دو پروفیل مصرفی برای شبکه در دو بازه زمانی مختلف را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهند که در هر کدام پروفیل قرمز رنگ پروفیل اصلی شبکه و بدون اعمال پیک سایبی و پروفیل سبز رنگ مربوط به حالت پس از اعمال پیک سایبی است. مشاهده می‌شود که کاهش مصرف در ساعات پیک مربوط به برخی از این خوشه‌ها تأثیر بسیار اندکی روی کاهش پیک بار در ساعات اوج مصرف داشته است که این به معنی استعداد و ظرفیت پایین این گونه‌های رفتاری برای پیک سایبی است. همچنین برخی از خوشه‌ها نیز با همان میزان درصد کاهش در مصرف اثرگذاری بسیار خوبی را روی کاهش پیک در ساعات اوج مصرف نشان داده‌اند. این یعنی این الگوهای رفتاری برای این پروفیل شبکه دارای ظرفیت بالایی

تعیین شده و با پروفیل‌های نماینده هر خوشه مقایسه می‌گردد. در نهایت بر اساس مجموعه ملاحظات، خوشه بهینه انتخاب می‌شود. خوشه بهینه خوشه‌ای است که با اعمال کم‌ترین تغییر در الگوی مصرفی اعضا آن می‌تواند بیش‌ترین کاهش را در مصرف ساعات پیک ایجاد نماید که این خوشه با استفاده از شاخص شباهت سری‌های زمانی تعیین می‌شود.

در مرحله پیاده‌سازی مشاهده شده است که اعمال پیک سایبی روی هر کدام از این خوشه‌ها دارای نتایج متفاوتی بوده است. این نتایج متفاوت گویای توانمندی خوشه‌ها یا به تعبیری گونه‌های رفتاری مختلف برای مشارکت در پیک سایبی در ساعات اوج مصرف است. برای ارزیابی دقیق عملکرد و اثرگذاری خوشه‌ها، عمل پیک سایبی به‌صورت مرحله‌ای پیاده‌سازی شده و در هر مرحله به‌اندازه ۱۰٪ از بار مصرفی هر کدام از خوشه‌ها در ساعات اوج مصرف کاسته شده است. پیش‌تر



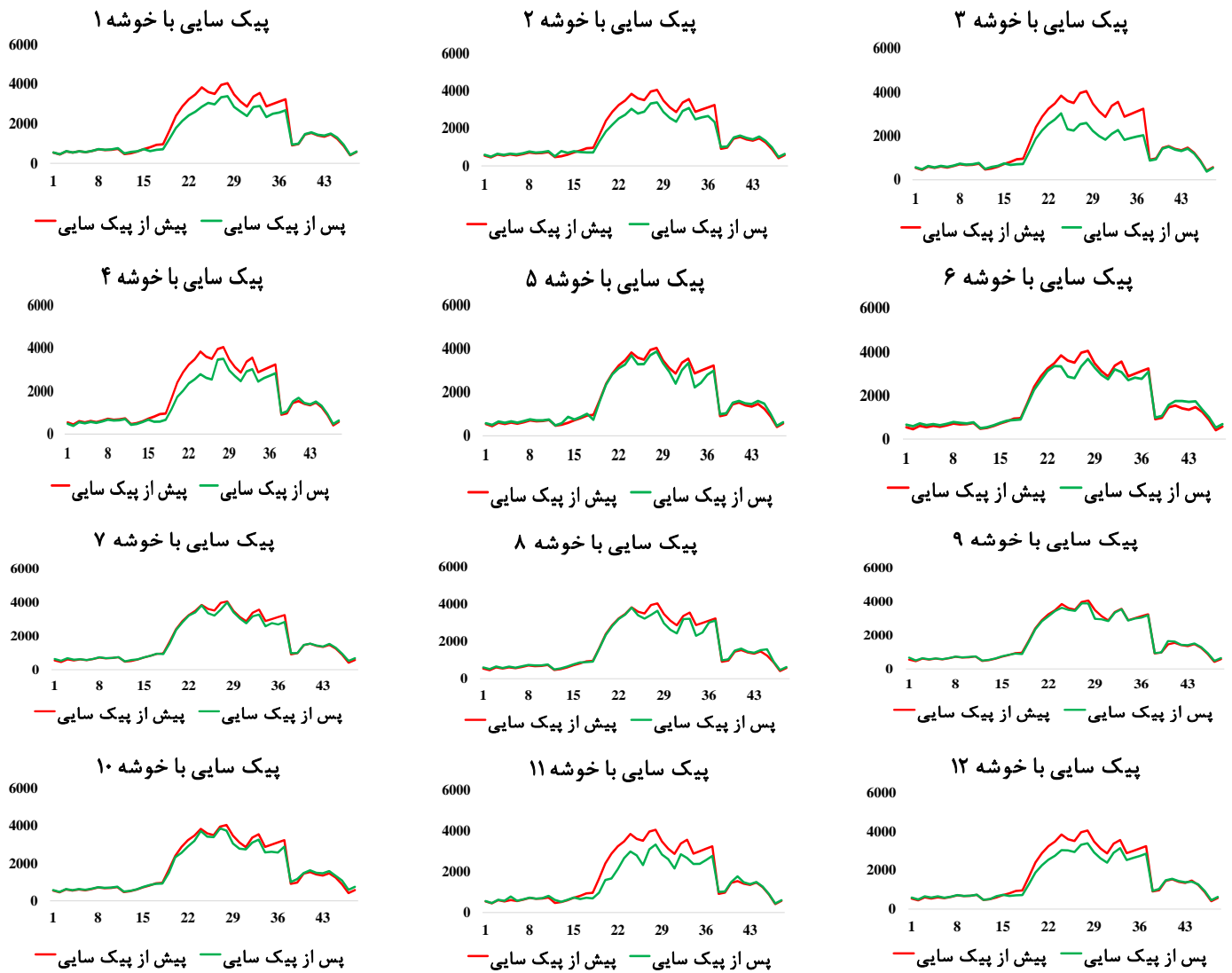
شکل ۴: نتیجه پیک سایی مربوط به خوشه‌های مختلف (نمونه اول)

تخمینی خوشه‌ها، درصد کاهش بار تخمینی شبکه به‌ازای ۱۰٪ کاهش بار پیک خوشه‌ها و همچنین استعداد مشاهده‌شده در نتیجه پیاده‌سازی پیک سایی در سال دوم است. توجه شود که میزان استعداد الگوهای مصرفی سال دوم برای خوشه‌های مختلف از نکات حاصل از پیاده‌سازی پیک سایی روی داده‌های سال اول به‌دست‌آمده است. مقادیر استعداد تخمینی و همچنین دقت تخمین‌ها گویای اثرگذاری بسیار خوب (دقتی از ۹۰٪ تا ۹۵٪) داده‌های کنتورهای هوشمند و همچنین روند داده-محور ارائه‌شده در این مقاله روی استعداد سنجی مشترکین برای پیک سایی است. باوجود چنین سازوکاری، شناسایی مستعدترین گروه از مشترکین برای هر دوره زمانی که مدنظر باشد به پیک سایی کمک قابل‌ملاحظه‌ای می‌نماید.

همچنین، برای مقایسه بهتر، با فرض در نظر گرفتن کاهش بار یکسان ۱۰٪ برای هر خوشه، یک بار با استفاده از روند تشریح شده و

برای پیک سایی هستند. مشاهده می‌شود که به‌عنوان مثال خوشه ۹ که در حالت اول دارای بیش‌ترین اثرگذاری بوده است، در حالت دوم دارای اثرگذاری نسبتاً پایینی است. یا خوشه ۱۱ که در حالت دوم دارای اثرگذاری بالایی است، در حالت اول ظرفیت پایینی نشان داده است. چنین تحلیلی دقیقی که نتیجه استفاده از داده‌های کنتورهای هوشمند است را می‌توان برای سایر خوشه‌ها نیز انجام داد.

در سال اول، پروفیل‌های مصرفی خوشه‌های مختلف بررسی شده و مقادیر درصد تغییرات انحراف استاندارد پروفیل‌های مصرفی و همچنین درصد کاهش اختلاف قله تا قعر این پروفیل‌ها پس از پیک سایی به‌ازای خوشه‌های مختلف اندازه‌گیری و مقایسه شده است. بر اساس همین نتایج و با استفاده از شاخص شباهت سری‌های زمانی، میزان استعداد گونه‌های رفتاری مختلف در مصرف برای مشارکت در پیک سایی تعیین شده است. جدول (۱) نشان‌دهنده‌ی میزان استعداد



شکل ۵: نتیجه پیک‌سایبی مربوط به خوشه‌های مختلف (نمونه دوم)

جدول (۱): نتایج اعمال پیک سایبی روی خوشه‌های مختلف (به‌ازای ۱۰٪)

شماره خوشه	شاخص استعداد تخمینی	اثرگذاری تخمینی	اثرگذاری مشاهده‌شده	دقت
۱	۰/۶۷۵	۶/۱۷۵	۶/۱۴۳	۹۵/۳۶
۲	۰/۳۷۷	۳/۱۷۷	۳/۱۴۱	۹۰/۷۵
۳	۰/۳۷۷	۳/۱۷۷	۳/۱۴۴	۹۱/۳۷
۴	۰/۵۲۹	۵/۱۲۹	۵/۱۴۶	۹۲/۳۸
۵	۰/۵۳۲	۵/۱۳۲	۴/۱۸۶	۹۱/۴۲
۶	۰/۷۸۹	۷/۱۸۹	۷/۱۲۶	۹۲/۰۶
۷	۰/۷۱۴	۷/۱۱۴	۶/۱۴۳	۹۰/۰۸
۸	۰/۲۴۶	۲/۱۴۶	۲/۱۳۲	۹۴/۵۱
۹	۰/۸۶۴	۲/۱۴۶	۷/۱۸۴	۹۰/۷۹
۱۰	۰/۴۹۷	۴/۱۹۷	۴/۱۵۶	۹۱/۷۷
۱۱	۰/۳۲۴	۳/۱۲۴	۳/۱۰۴	۹۴/۰۷

بار دیگر با انتخاب تصادفی مشترکین عمل پیک سایبی انجام می‌گیرد. میانگین تعداد مشترکین تحت تأثیر قرارگرفته در پیک سایبی یا به تعبیری مشترکینی که باید در پیک سایبی مشارکت نمایند و همچنین میزان اثرگذاری میانگین خوشه‌های مختلف در دو حالت بیان‌شده به‌دست‌آمده و نتیجه کلی این دو حالت در جداول (۵) - (۲) ارائه‌شده است.

این جداول به‌ازای اضافه‌بارهای ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ تعداد مشترکینی که برای کاهش بار تحت تأثیر قرارگرفته و همچنین میزان اثرگذاری متوسط آن‌ها را نشان می‌دهد. مطابق این جداول در حالت انتخاب تصادفی، هم تعداد میانگین مشترکینی که برای این منظور تحت تأثیر قرار می‌گیرند بیش‌تر است و هم میزان اثرگذاری مشاهده‌شده کم‌تر است. این مقادیر نیز تأییدکننده کارایی روند پیشنهادی برای استعداد سنجی الگوهای رفتاری مختلف و پیاده‌سازی پیک سایبی به شکلی بهینه است، گامی روبه‌جلو در جهت پیاده‌سازی برنامه‌های مدیریت سمت مصرف در شرایطی بهتر.

- [13] J. Kwac., J. Flora, and R. Rajagopal, "Household Energy Consumption Segmentation using Hourly data", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 5, Jan. 2014.
- [14] M.K.Nafchali, 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.
- [۱۵] م. کجوری، ع. فریدونیان، ح. لسانی، "استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی تطبیقی برای شناسایی الگوی مصرف مشترکین و تعیین تعرفه‌های بهینه مصرفی در شبکه برق"، پنجمین کنفرانس منطقهای سیرد، پژوهشگاه نیرو، دی‌ماه ۱۳۹۵
- [16] H.nishihara, I.Taniguchi, S.Kato, and M.Fukui, "A Real-Time Power Distribution based on Load/Generation Forecasting for Peak Shaving", 11th International Conference on New Circuits and Systems (NEWCAS), 2013 IEEE, Paris, France, 16-19 June 2013.
- [17] J. Dong, F. Gao, X. Guan, Q. Zhai, and J. Wu, "Storage Sizing with Peak Shaving Policy for Wind farm based on Cyclic Markov Chain Model", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol.8, pp. 978-989, Issue: 3, July 2017
- [18] A. Rahimi, M. Zarghami, M. Vaziri, S.Vadhva, "A Simple and Effective Approach for Peak Shaving Using Battery Storage Systems", North American Power Symposium (NAPS), 2013, Manhattan, KS, USA, 22-24 Sept. 2013
- [19] J. Zupancic, E.Lakic, T. Medved, and A. F. Gubina, "Advanced Peak Shaving Control Strategies for Battery Storage Operation in Low Voltage Distribution Network", PowerTech, 2017 IEEE Manchester, Manchester, united kingdom, 18-22 June 2017
- [20] Z. Taylor, H. Akhavan-Hejazi, E. Cortez, L. Alvarez, S. Ula, M. Barth, and H. Mohsenian-Rad, "Customer-Side SCADA-Assisted Large Battery Operation Optimization for Distribution Feeder Peak Load Shaving", IEEE Transactions on Smart Grid, 2017
- [21] S. Khatiri-Doost, M. Amirahmadi, "Peak Shaving and Power Losses Minimization by Coordination of Plug-in Electric Vehicles Charging and Discharging in Smart Grids", Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe), 2017 IEEE International Conference on, milan, italy, 6-9 June 2017, 11.08
- [22] Z. Wang, and S. Wang, "Grid Power Peak Shaving and Vally Filling Using Vehicle-to-Grid Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, pp. 1822-1829, 2013.
- [23] H. Turker, A. Hably, S. Bacha, "Housing Peak Shaving Algorithm (HPSA) with Plug-in Hybrid Electric Vehicles (phevs): Vehicle-to-Home (v2h) and Vehicle-to-Grid (v2g) Concepts", Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on, Istanbul, turkey, 13-17 May 2013
- [24] B. J. Claessens, S. Vandael, F.Ruelens, K. De Creamer, and B. Beusen, "Peak Shaving of a Heterogeneous Cluster of Residential Flexibility Carriers Using Reinforcement Learning", Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES, Lyngby, Denmark, 6-9 Oct. 2013.
- [25] F. Claessen, smart grid control, 1 sd, master thesis Utrecht university, 2012.
- [26] N. Leemput, F. Geth, B. Classens, J. Van Roy, R. Ponnette, and J. Driesen, "Acase Study of Coordinated electric Vehicle charging for Peak Shaving on a low Voltage Grid", in innovative smart grid technologies (ISGT Europe), 2012, 3rd IEEE PES International Conference AND Exhibition on 2012, pp. 1-7.
- [27] M. G. C. Bosman, Planning in Smart Grid, phd thesis university of twente, 2012
- [28] A. S. Hintz, K. Rajashekara, R. Prasanna, "Controller for Combined Peak-Load Shaving and Capacity Firming Utilizing Multiple Energy Storage Units in Microgrid", 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016
- [29] S. U. Agamah, L. Ekonomou, "Peak Demand Shaving and Load-Levelling Using a Combination of bin Packing and Subset Sum Algorithms for Electrical Energy Storage System Scheduling",

رگرسیون بردار پشتیبان محلی	%۱۰
روش پیشنهادی	%۳/۶

سپاس‌گزاری

نگارندگان این مقاله از پایگاه اطلاعاتی داده ISSDA ایرلند بابت در اختیار قرار دادن داده‌های مصرفی مشترکین و از سرکار خانم دکتر منا قاسمیان عضو محترم هیئت‌علمی دانشگاه شهید بهشتی، به علت ایجاد این ارتباط نهایت سپاس‌گزاری را دارند. همچنین خدمت هیئت محترم تحریریه نشریه مهندسی برق دانشگاه تبریز نیز از بابت همفکری سپاس فراوان تقدیم می‌دارند.

مراجع

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook, 2009, Available: <http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/WEO2009esEnglish.pdf>.
- [۲] ع. شهسواری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "رویکرد تقویت ترمیم گر به خودترمیم 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, October 1995.
- [5] 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>.
- [۶] ح. اعلمی، م. پارسا مقدم، غ. ر. یوسفی، "مدل‌سازی پاسخگویی بار مبتنی بر ضرایب حساسیت قیمتی تقاضا"، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، بهار ۱۳۸۹
- [7] A.Safdarman, M.Fotuhi-Firuzabad, M.Lehtonen, "A distributed algorithm for managing residential demand response in smart grid", IEEE trans, Industrial Informatics, Vol. 10, pp. 2385-2393, Nov. 2014.
- [8] A.Safdarman, M.Fotuhi-Firuzabad, M.Lehtonen, "optimal residential load management in smart grid: a decentralized framework", IEEE trans, smart grid, Vol. 7, pp. 1836-1845, Nov. 2016.
- [9] 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.
- [۱۰] م. کجوری نفت‌چالی، ح. لسانی، ع. فریدونیان، "داده‌کاوی در انباره داده زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تابستان ۱۳۹۵
- [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.
- [۱۲] 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

- [36] P. Teimourzadeh Baboli, M. Eghbal, M. Parsa Moghddam, H. Aalami, "Customer Behavior Based Demand Response Model", Power and Energy Society General Meeting, san diego, ca, usa, 22-26 july 2012
- [۳۷] ف. محمدی، ح. عبدی، ا. دهنوی، "مسئله توزیع بار اقتصادی هزینه-الودگی دینامیک همراه با برنامه پاسخگویی بار اضطراری بهینه تحت قیود اثر نقطه-دریچه و ذخیره چرخان"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵
- [۳۸] ج. جنتی، د. نظر پور، "مدیریت انرژی پارکینگ هوشمند خودروهای برقی در یک ریز شبکه با در نظر گرفتن اثرات برنامه پاسخگویی بار"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، تابستان ۹۶
- [39] Thomas M. Cover, Joy A. Thomas, "Elements of Information Theory", 2nd edition, Wiley, September, 2006
- [40] f. h. lotfi, r. fallahnejad, "imprecise shannon's entropy and multi attribute decision making", January 2010
- IET Science, Measurement & Technology, vol. 10, pp. 477-484, 2016
- [30] L. Chuan, D. M. K. K. Venkateswara, "Load Profiling of Singapore Buildings for Peak Shaving", 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2014
- [31] Thomas M. Cover, Joy A. Thomas, "Elements of Information Theory", 2nd edition, Wiley, September, 2006
- [32] K. L. Wu, M. S. Yang, "A Cluster Validity Index for Fuzzy Clustering", pattern recognition letters, pp. 1275-291, 2005
- [33] J. Han, M. Kamber (2006) "Data Mining concepts and techniques" 2nd edition, Morgan Kaufmann publisher.
- [34] H. Aalami, G. R. Yousefi, M. Parsa Moghadam, "A MADM-Based Support System for DR Program", 43rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). padova, Italy, 1-4 septamber 2008
- [35] H. Aalami, G. R. Yousefi, M. Parsa Moghadam, "Demand Response Model Considering EDRP and TOU Program", Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, il, usa, 21-24 april 2008.