Archive of SID

# پیک سایی 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 سایی ارائه‌شده است. این روند مبتنی‌بر 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. ازاین‌رو شناسایی الگوی مصرف و در نظر گرفتن شرایط شبکه ازلحاظ 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 سایی 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 سایی 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 قرارگرفته، پیاده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** پیک سایی، 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-naftchali[1], Alireza Fereidunian[2], Hamid Lesani[3]

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 ۱۳۹۷/۱۱/۶و 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

www.SID.ir

Archive of SID

## ۱ -مقدمه

از مسائلی مهمی که امروزه به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های صنعت برق تبدیل‌شده است موضوع افزایش قابل‌توجه 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 ازلحاظ اقتصادی نمی‌توان تمامی این نیازها را از این طریق پوشش داد. همین مسئله سبب معرفی مفاهیمی ازجمله مدیریت سمت مصرف‌شده 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 .... مورداستفاده 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 استفاده‌شده است. از همین مدیریت مصرف مشترکین در مرجع [۸] برای هموار نمودن پروفیل‌های بار مصرفی شبکه و جلوگیری از جهش‌های ناگهانی در آن استفاده‌شده است. ازجمله اهدافی که برنامه‌های مدیریت مصرف برای آن مورداستفاده قرار می‌گیرند مسئله پیک سایی است. هدف این استراتژی تشویق مشترکین به مدیریت مصرف به‌ویژه برای ساعات پیک مصرف است که شبکه تحت‌فشار است.

تشویق درست مشترکین به مشارکت در برنامه‌های مدیریت سمت مصرف و پیک سایی 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 سایی 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 ازجمله برنامه‌های مدیریت مصرف را به شکلی مطلوب فراهم آورده است. اغلب چنین برنامه‌هایی از یک‌سو نیازمند تبادل اطلاعات با دقت و سرعت‌بالا 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 قابل‌قبول است [۹].

توجه به استفاده از داده‌های کنتورهای هوشمند برای شناسایی رفتار مصرفی مشترکین در مطالعاتی ازجمله مرجع [۱۰] موردتوجه قرارگرفته است. نکته‌ای که در مرجع [۱۰] موردتوجه قرارگرفته 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 به‌منظور پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار مصرفی در مرجع [۱۱] و برای شناسایی تغییرات در رفتار مصرفی مشترکین در مرجع [۱۲] موردبررسی قرارگرفته است. در مراجع [۱۳،۱۴] نیز از ظرفیت داده‌های کنتورهای هوشمند به‌منظور شناسایی دقیق رفتار مصرفی مشترکین استفاده‌شده است. در این مطالعات از داده‌های سری زمانی مصرفی مشترکین استفاده‌شده که به‌طور مستقیم از کنتورهای هوشمند جمع‌آوری‌شده است. شناسایی گروه‌های مستعد از میان مشترکین برای مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و بهره‌وری انرژی هدف این مطالعات بوده است. به‌طور مشابه، مرجع [۱۵] نیز از داده‌های کنتورهای هوشمند برای تعیین تعرفه‌های بهینه مصرفی در شبکه استفاده نموده است.

در رابطه با پیک سایی 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 سایی انجام‌گرفته است. در این مطالعه میزان تولید و مصرف این واحدها پیش‌بینی‌شده است. در مرجع [۱۷، ۱۸] پیک سایی با کمک ذخیره‌سازها موردبررسی قرارگرفته است. به‌این‌ترتیب که تعیین ظرفیت واحدهای ذخیره‌سازی برای عملکرد بهینه برای هدف پیک سایی موردتوجه قرارگرفته است. همچنین در مراجع [۱۹، ۲۰] از عملکرد بهینه باطری‌های ذخیره‌سازی به‌منظور پیک سایی مناسب استفاده‌شده است. مرجع [۲۱، ۲۲] از خودروهای الکتریکی برای منظور پیک سایی و همچنین کمینه‌نمودن 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 ازجمله پاسخ‌گویی بار نیز کارهای قابل‌قبولی انجام‌شده است. ازجمله در [۳۴] که در آن عوامل مؤثر در پیاده‌سازی پاسخ‌گویی بار و همچنین مواردی که تحت تأثیر پیاده‌سازی این برنامه هستند موردبررسی قرارگرفته و برای پیاده‌سازی پاسخ‌گویی بار به‌صورت 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. درواقع، در این مرجع به نقش رفتار مصرفی مشترکین در پاسخ‌گویی بار توجه شده است. در مراجع

www.SID.ir

Archive of SID

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

در میان مقالاتی که تا به اینجا موردبررسی قرارگرفته، مشاهده نشده که مطالعه‌ای روی استعداد سنجی مشترکین برای مشارکت در برنامه‌ی پیک سایی انجام‌گرفته 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 پیک سایی 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 موردتوجه بوده است که در قسمت‌های آینده به آن‌ها اشاره‌شده 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 پیک سایی را نیز کاهش دهد. همچنین انتخاب مشترکین مستعد نیز به‌گونه‌ای 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 پیک سایی است.

در این مقاله، مشترکین بر اساس استعدادشان با هدف مشارکت در پیک سایی خوشه‌بندی می‌شوند. به‌این‌ترتیب که الگوهای رفتاری (خوشه‌ها) گوناگون با میزان استعداد مختلف برای پیک سایی بر اساس شناسایی و مورداستفاده قرار می‌گیرند.

نوآوری اصلی این مقاله بررسی ظرفیت‌های زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته برای شناسایی میزان استعداد گونه‌های رفتار مصرفی مختلف برای مشارکت در پیک سایی پروفیل مصرفی شبکه است. این شناسایی درنتیجه‌ی تعریف معیار دقیقی برای خوشه‌بندی مناسب مشترکین حاصل می‌شود. تعریف و انتخاب درست این معیار نیز نوآوری دوم این مقاله است که به‌تفصیل در ادامه معرفی‌شده 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 به‌صورت نزدیک به زمان واقعی و داده‌محور صورت می‌پذیرد و مدل- محور نیست. به‌این‌ترتیب، 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 انجام‌شده است. این نکته هم در عنوان مقاله مشخصاً بیان‌شده است و هم در صفحه ستون و سطر بدان تصریح‌شده است.

ترتیب ارائه سایر مطالب در این مقاله نیز به این صورت است: در قسمت (۲) روش و ساختار کلی پیشنهادی به‌همراه کاربرد الگوریتم‌های مختلف مورداستفاده در این مقاله ارائه‌شده است. در قسمت (۳) نیز معیاری که برای طبقه‌بندی مشترکین برای مشارکت در پیک سایی مورداستفاده قرار می‌گیرد معرفی‌شده‌اند. در قسمت (۴) نیز ضمن معرفی شبکه تست، روند تشریح شده در قسمت (۲) پیاده‌سازی و نتایج حاصله تحلیل‌شده است.

## ۲ -روش‌شناسی

### ۲-۱- ساختار پیشنهادی

شکل (۱) روند پیاده‌سازی فرایند شناسایی مشترکین مستعد برای مشارکت در پیک سایی 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 پیک سایی، یک خوشه (خوشه بهینه) که

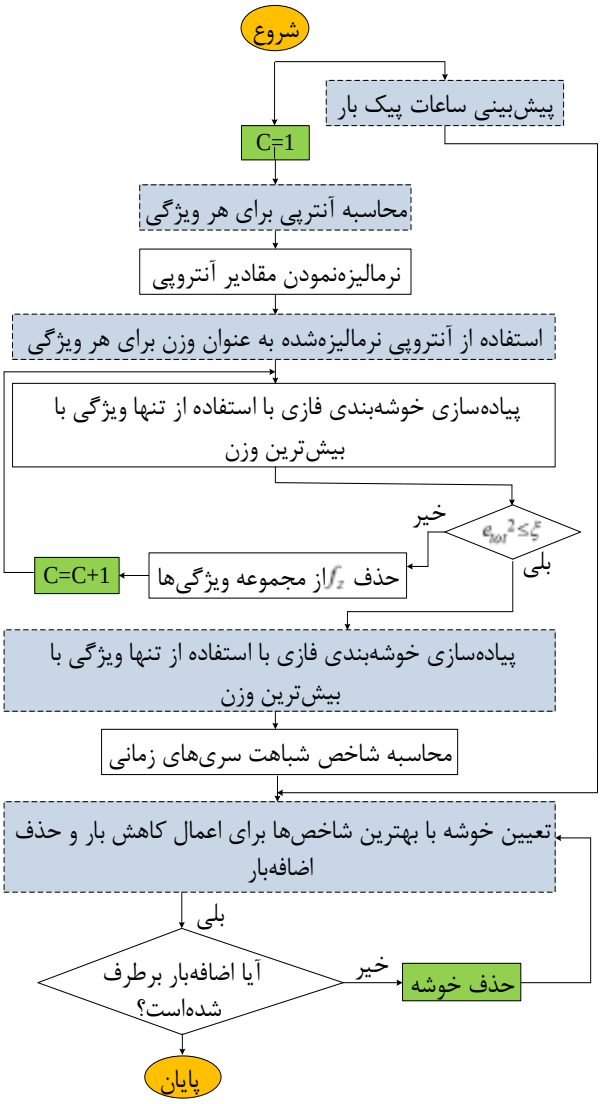
www.SID.ir

Archive of SID

دارای بیش‌ترین استعداد برای پیک سایی 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 مورداستفاده قرارگرفته است از میان ویژگی‌های اولیه در نظر گرفته‌شده 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 ازاین‌دست وجود دارد. به‌علاوه، 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 حل‌شده 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 موردبررسی قرار می‌گیرند.

### ۲-۲-آنتروپی

مطابق بحث تئوری اطلاعات، آنتروپی یک پیام ارسالی یا یک متغیر تصادفی، بیان‌گر میزان عدم‌قطعیت آن است. به‌این‌ترتیب که هراندازه میزان آنتروپی پیام یا متغیری بیش‌تر باشد دارای عدم‌قطعیت بیش‌تری است و بلعکس. متغیر با میزان آنتروپی بالاتر به دلیل داشتن عدم‌قطعیت بیش‌تر در تصمیم‌گیری‌ها اثرگذاری کم‌تری دارد اما حاوی اطلاعات نادانسته بیش‌تری است [۳۱]. حال فرض می‌شود مجموعه‌ای از نمونه‌ها در اختیار است و هرکدام از این نمونه‌ها دارای ویژگی‌هایی هستند. با محاسبه کمیت آنتروپی برای هرکدام از این ویژگی‌ها می‌توان میزان قطعیت و اطلاعاتی که هر ویژگی برای نمونه‌ها فراهم می‌آورد را تعیین نمود. به‌عبارت‌دیگر، آنتروپی بیان می‌نماید که هرکدام 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] مطرح‌شده و همچنین نگاهی که در آن به موضوع آنتروپی شده است می‌توان از آنتروپی در قالب یک فرایند تکراری که در این مقاله معرفی‌شده است به‌منظور شناسایی ویژگی‌های مهم‌تر و همچنین ایجاد خوشه‌های با قطعیت بالاتر در عمل خوشه‌بندی استفاده نمود.




**شکل ۱: نمودار روند فرایند پیشنهادی**

رابطه (۱) فرمول اصلی آنتروپی ($Ent_j$) برای ویژگی $j$ را نشان می‌دهد. در این رابطه، $R_{ij}$ بیانگر میزان چگالی وزنی ویژگی $j$ برای نمونه‌ی $i$ 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. به‌این‌ترتیب، می‌توان با استفاده از رابطه (۱) به مقدار آنتروپی متناظر با ویژگی $j$ ام دست‌یافت. از سوی دیگر، بیان‌شده که آنتروپی میزان عدم‌قطعیت یک متغیر را نشان می‌دهد، بر این اساس، رابطه (۴) بیانگر میزان اطمینان یا قطعیت به‌ازای یک ویژگی است که هراندازه برای یک ویژگی مقداری بزرگ‌تر باشد یعنی تأثیر آن ویژگی در تصمیم‌گیری بیش‌تر است. درنهایت نیز برای امکان مقایسه راحت‌تر میان ویژگی‌ها با استفاده از رابطه (۵)، مقادیر $d_j$ها نرمالیزه می‌شود [۴۰،۳۹].

$$Ent_j = -K \sum_{i=1}^{m} R_{ij} \ln R_{ij} \qquad (۱)$$

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \qquad (۲)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$K = \frac{1}{\ln(N)} \quad (۳)$$

$$d_j = 1 - Ent_j \quad (۴)$$

$$\theta_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{m} d_j} \quad (۵)$$

مطابق شکل (۱)، پس از آن‌که با استفاده از آنتروپی، ویژگی‌های با ارزش بالاتر برای تفکیک مشخص شدند، برای خوشه‌بندی از این مقادیر قطعیت نرمالیزه‌شده $\theta_j$ به‌عنوان وزن برای ویژگی‌ها استفاده می‌شود و به ویژگی‌های دارای اثرگذاری بیش‌تر وزن بیش‌تری تعلق می‌گیرد و بلعکس. 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 محاسبه‌شده و به هرکدام از معیارها تعلق می‌گیرد. هر معیاری که ضریب تعلق‌گرفته 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 لحاظ‌نمودن یک خوشه و تنها ویژگی با بیش‌ترین آنتروپی ( $f_z$ ) آغازشده و در هر مرحله رابطه (۶) موردبررسی 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 افزوده‌شده 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، $e^2_{tot}$، میزان خطای کل است که باید کمتر از مقدار آستانه $\xi$ شود. این روش سبب تشکیل خوشه‌هایی با میزان دقت بالا شده که سبب افزایش قابلیت اطمینان پیک سایی 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.

$$e^2_{tot} = \sum_{c=1}^{C}\sum_{k=1}^{K_c}\sum_{f=1}^{F}(x_{c,k,f} - cen_{c,f})^2 \le \xi \quad (۶)$$

### 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 تعیین‌شده است و به بعضی از آن‌ها نزدیک و از بعضی دیگر دور است. این نزدیکی و دوری نمونه‌ها به مراکز خوشه توسط ضرایبی تحت‌عنوان 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 $\xi$ نیز با استفاده از میزان قطعیت در تخصیص یک نمونه به خوشه‌ها تعیین‌شده 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 به‌عبارتی ضریب عضویت( $m_{n,\max}$ ) حداقل ۰/۹ مقدار $\xi$ برای ارضاء قید رابطه (۶) مقدار برابر ۰/۰۴ به‌دست‌آمده است.

$$FCA = -\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} m_{n,\max}\log(m_{n,\max}) \quad (۷)$$

### ۳-۴- شاخص شباهت سری‌های زمانی

مطابق نمودار روند شکل (۱)، شاخصی که برای تعیین پروفیل مصرف بهینه برای مشارکت در برنامه پیک سایی مورداستفاده 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 استفاده‌شده است. فرمول فاصله اقلیدسی بین دو سری زمانی $x_i, x_j$ در رابطه (۸) ارائه‌شده است که در این رابطه $t = \{1,2,...,T\}$ مجموعه نقاط بازه‌های زمانی را نشان می‌دهد [۲۹]. با این توصیف، $x_{i,t}, x_{j,t}$ به‌ترتیب 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 بیان‌شده 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.

$$w_{i,j} = \sqrt{\sum_{t=1}^{T}(x_{i,t} - x_{j,t})^2} \quad (۸)$$

## ۳ - پیاده‌سازی

### ۳-۱- مطالعه موردی

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

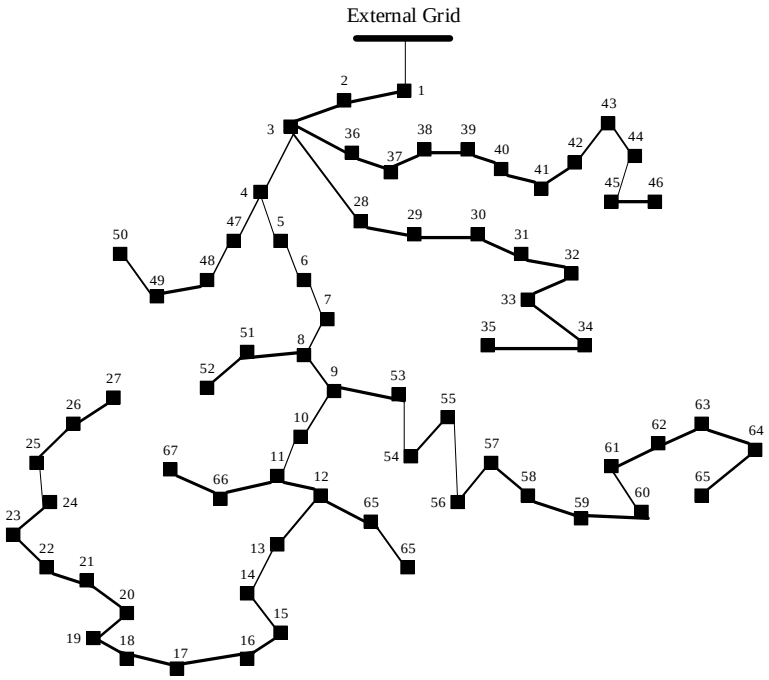
www.SID.ir

Archive of SID

هستند که در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای ثبت‌شده‌اند. این تعداد مشترک در یک شبکه توزیع با تعداد ۶۷ باس پخش‌شده‌اند که شکل (۲) نشان‌دهنده آن است. در این مقاله داده‌های مصرفی مربوط به دو سال بررسی‌شده است که از داده‌های سال اول برای شناسایی و ارائه روش داده-محور و از داده‌های سال دوم برای ارزیابی روند پیشنهادی استفاده‌شده 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. به‌این‌ترتیب که پیک سایی تنها بر اساس الگوی مصرفی مشترکین انجام‌گرفته و برای این منظور نیز از داده‌های مصرفی مشترکین در بازه‌های زمانی مختلف استفاده‌شده 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.

مضافاً، برای چنین هدف وجود داده‌های مصرفی در بازه‌های زمانی کوتاه بسیار کاربردی و دارای دقت مناسبی برای اظهارنظر است. همچنین لازم به ذکر است که در پیاده‌سازی برنامه فرضیاتی در نظر گرفته‌شده 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 قرارگرفته است.
۲. عمل پیک سایی به‌صورت مرحله‌ای پیاده‌سازی شده و در هر مرحله به‌اندازه ۱۰٪ از بار مصرفی هرکدام 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 گرفته‌شده است.



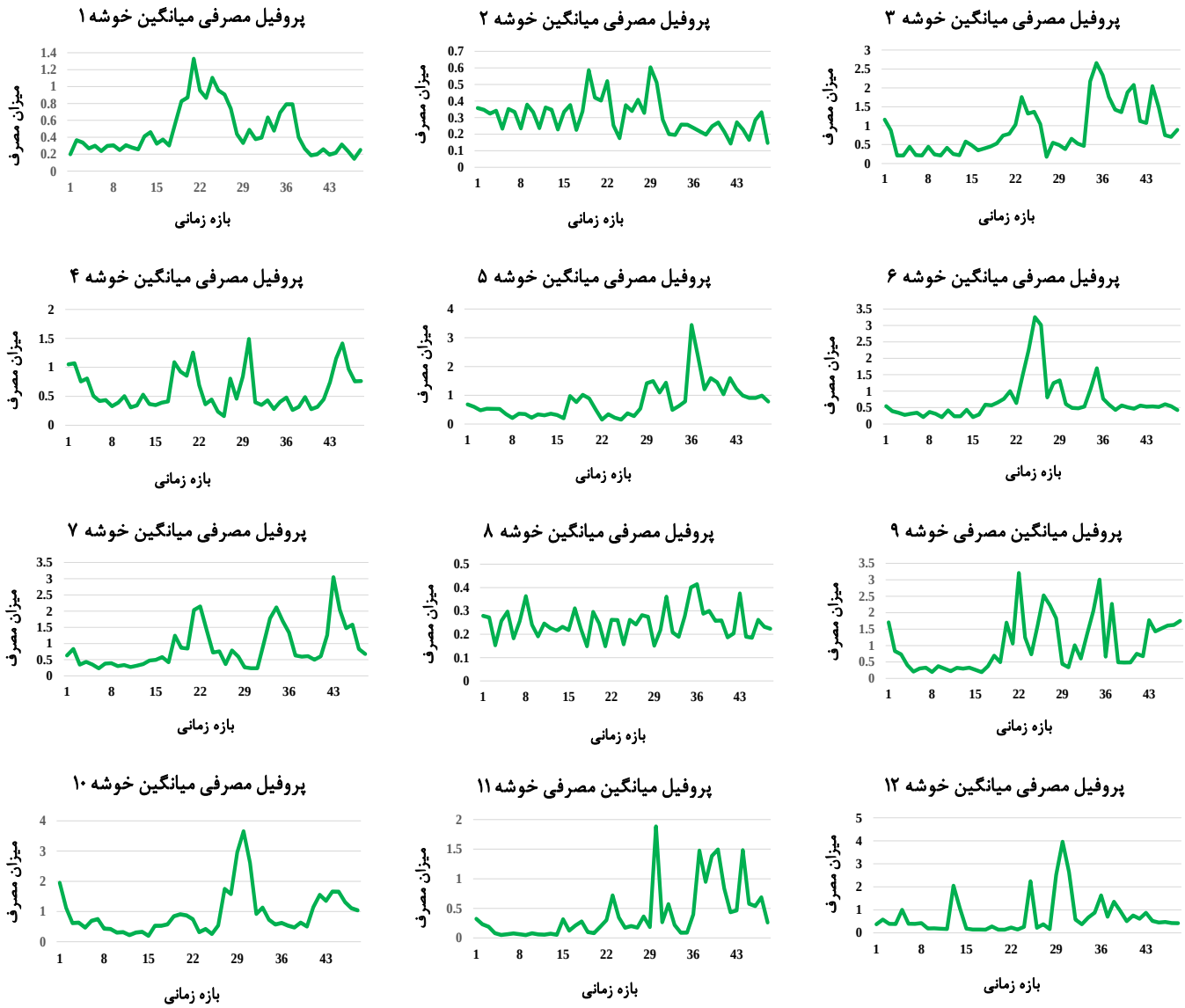

**شکل ۲: شبکه تحت مطالعه**

### ۲-۳- پیاده‌سازی پیک سایی و نتایج عددی

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 معرفی‌شده، تعیین‌شده است که معادل ۱۲ خوشه است. طبیعتاً مشترکین تخصیص‌یافته 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 کنتورهای هوشمند و AMI نیز همین است. ازآنجایی‌که در این مقاله خوشه‌بندی مستقیماً روی سری‌های زمانی مصرف مشترکین پیاده‌سازی می‌شود نیاز دقت بسیار بالایی دارد. این دقت را می‌توان با کمک داده‌های زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته به دست آورد. به‌این‌ترتیب 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 فراهم‌شده است و با آن پروفیل‌های مصرفی مشترکین در بازه‌های کوتاه زمانی ثبت می‌شود. سپس بر اساس قیود موردنظر شبکه پروفیل بهینه از دیدگاه شبکه نیز

www.SID.ir

Archive of SID



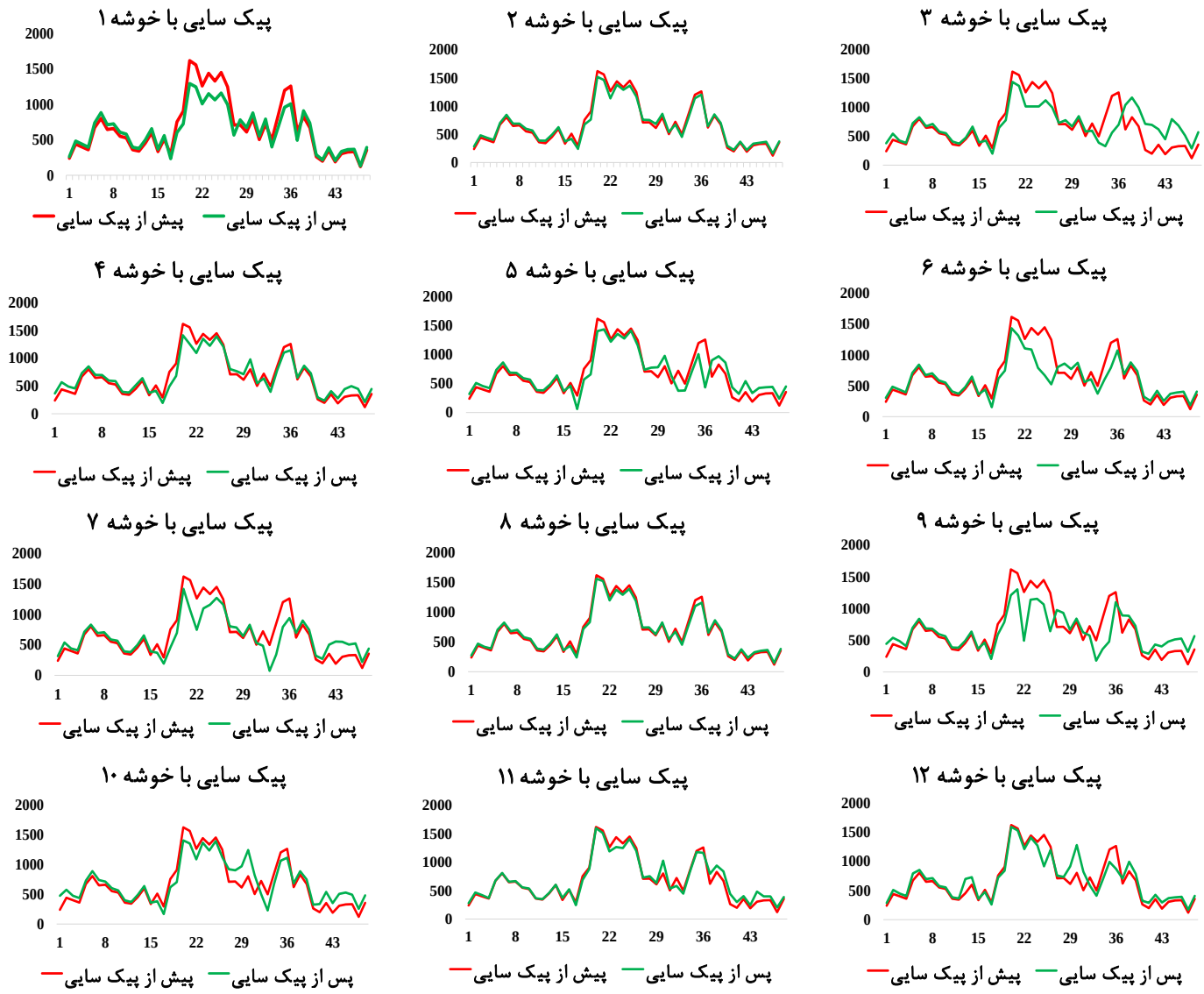

**شکل۳: پروفیل مصرفی مربوط به خوشه‌های مختلف برای پیش‌بینی پیک مصرفی با استفاده از داده‌های کنتورهای هوشمند**

تعیین‌شده و با پروفیل‌های نماینده هر خوشه مقایسه می‌گردد. درنهایت بر اساس مجموعه ملاحظات، خوشه بهینه انتخاب می‌شود. خوشه بهینه خوشه‌ای است که با اعمال کم‌ترین تغییر در الگوی مصرفی اعضاء 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 مشاهده‌شده است که اعمال پیک سایی روی هرکدام از این خوشه‌ها دارای نتایج متفاوتی بوده است. این نتایج متفاوت گویای توانمندی خوشه‌ها یا به تعبیری گونه‌های رفتاری مختلف برای مشارکت در پیک سایی در ساعات اوج مصرف است. برای ارزیابی دقیق عملکرد و اثرگذاری خوشه‌ها، عمل پیک سایی به‌صورت مرحله‌ای پیاده‌سازی‌شده و در هر مرحله به‌اندازه ۱۰٪ از بار مصرفی هرکدام از خوشه‌ها در ساعات اوج مصرف کاسته شده است. پیش‌تر اشاره‌شده که داده‌های مصرفی برای دو دوره زمانی (دو سال) موردبررسی قرارگرفته‌اند؛ 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 هرکدام پروفیل قرمزرنگ پروفیل اصلی شبکه و بدون اعمال پیک سایی و پروفیل سبزرنگ مربوط به حالت پس از اعمال پیک سایی 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 سایی 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

www.SID.ir

Archive of SID




**شکل۴: نتیجه پیک‌سایی مربوط به خوشه‌های مختلف (نمونه اول)**

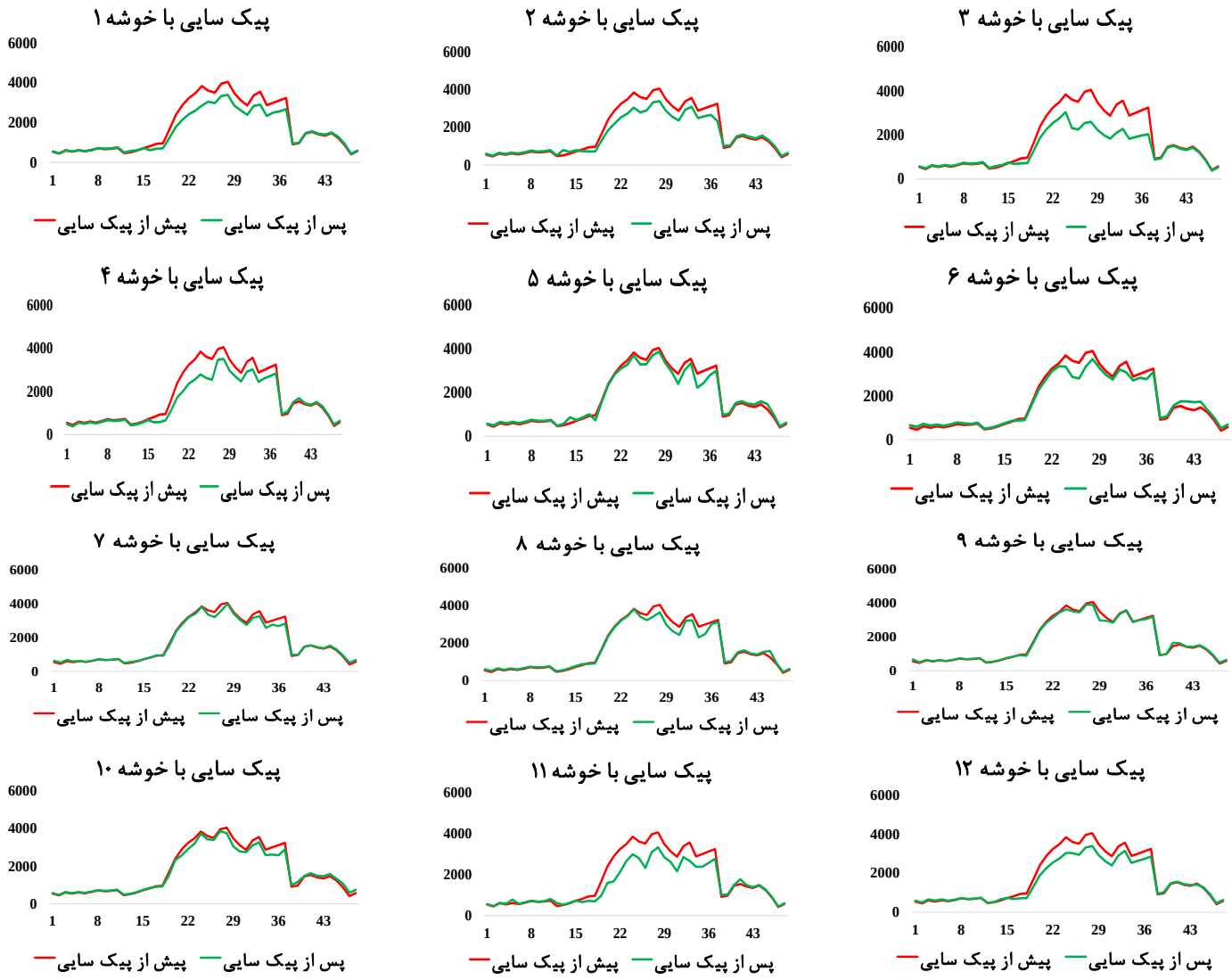
برای پیک سایی هستند. مشاهده می‌شود که به‌عنوان‌مثال خوشه ۹ که در برای پیک سایی در حالت اول دارای بیش‌ترین اثرگذاری بوده است، در حالت دوم دارای اثرگذاری نسبتاً پایینی است. یا خوشه ۱۱ که در حالت دوم دارای اثرگذاری بالایی است، در حالت اول ظرفیت پایینی نشان داده است. چنین تحلیلی دقیقی که نتیجه استفاده از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

در سال اول، پروفیل‌های مصرفی خوشه‌های مختلف بررسی‌شده 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 تعیین‌شده است. جدول (۱) نشان‌دهنده‌ی میزان استعداد تخمینی خوشه‌ها، درصد کاهش بار تخمینی شبکه به‌ازای ۱۰٪ کاهش بار پیک خوشه‌ها و همچنین استعداد مشاهده‌شده درنتیجه 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

www.SID.ir

Archive of SID




**شکل۵: نتیجه پیک‌سایی مربوط به خوشه‌های مختلف (نمونه دوم)**

بار دیگر با انتخاب تصادفی مشترکین عمل پیک سایی انجام می‌گیرد. میانگین تعداد مشترکین تحت تأثیر قرارگرفته در پیک سایی یا به تعبیری مشترکینی که باید در پیک سایی 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 اضافه‌باری‌های 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 سایی به شکلی بهینه است، گامی روبه‌جلو در جهت پیاده‌سازی برنامه‌های مدیریت سمت مصرف در شرایطی بهتر.

**جدول (۱): نتایج اعمال پیک سایی روی خوشه‌های مختلف (به‌ازای ۱۰٪ کاهش بار پیک)**

| شماره خوشه | شاخص استعداد تخمینی | اثرگذاری تخمینی | اثرگذاری مشاهده‌شده | دقت |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰/۶۷۵ | ۶٪/۷۵ | ۶٪/۴۳ | ۹۵٪/۳۶ |
| ۲ | ۰/۳۷۷ | ۳٪/۷۷ | ۳٪/۴۱ | ۹۰٪/۵ |
| ۳ | ۰/۳۷۷ | ۳٪/۷۷ | ۳٪/۴۴ | ۹۱٪/۳۷ |
| ۴ | ۰/۵۲۹ | ۵٪/۲۹ | ۵٪/۴۶ | ۹۲٪/۳۸ |
| ۵ | ۰/۵۳۲ | ۵٪/۳۲ | ۴٪/۸۶ | ۹۱٪/۴۲ |
| ۶ | ۰/۷۸۹ | ۷٪/۸۹ | ۷٪/۲۶ | ۹۲٪/۰۶ |
| ۷ | ۰/۷۱۴ | ۷٪/۱۴ | ۶٪/۴۳ | ۹۰٪/۰۸ |
| ۸ | ۰/۲۴۶ | ۲٪/۴۶ | ۲٪/۳۲ | ۹۴٪/۵۱ |
| ۹ | ۰/۸۶۴ | ۲٪/۴۶ | ۷٪/۸۴ | ۹۰٪/۷۹ |
| ۱۰ | ۰/۴۹۷ | ۴٪/۹۷ | ۴٪/۵۶ | ۹۱٪/۷۷ |
| ۱۱ | ۰/۳۲۴ | ۳٪/۲۴ | ۳٪/۰۴ | ۹۴٪/۰۷ |

www.SID.ir

Archive of SID

| | | | |
|---|---|---|---|
| ۹۱٪/۸ | ۴٪/۲۳ | ۰/۴۶۱ | ۱۲ |

همچنین در جدول (۶) باس‌هایی که در پیک سایی مشارکت دارند مشخص‌شده است. به‌این‌ترتیب که در پرانتز جلوی شماره باس تعداد مشترکین مشارکت‌کننده از آن باس مشخص‌شده است. برای ارزیابی میزان دقت و مؤثر بودن روش پیشنهادی که روشی داده- محور است، نتایج آن دو مورد از روش‌های مدل- محور که دقت مناسبی دارند نیز مقایسه شده است. از آنجایی‌که میزان اثرگذاری بر اساس شباهت الگوی مصرفی مشترکین خوشه‌ها با پروفیل بهینه از منظر شبکه تعیین می‌شود، از معیار فاصله اقلیدسی استفاده‌شده است و درصد اختلاف سری زمانی مصرفی مشترک و سری زمانی بهینه از منظر شبکه با آن اندازه‌گیری شده است. نتایج این مقایسه‌ها در جدول (۷) ارائه‌شده است. همان‌گونه‌که مشاهده می‌شود در این جدول در کنار روش پیشنهادی، از روش‌های رگرسیون وزنی محلی و رگرسیون بردار پشتیبان محلی استفاده‌شده است. نتایج حاکی از درصد خطا و اختلاف کم‌تر درنتیجه استفاده از روش پیشنهادی هستند که این به معنی کارایی بالاتر این روش در مقایسه با روش‌های مدل- محور است.

## ۴ -نتیجه‌گیری

در این مقاله ظرفیتی که داده‌های کنتورهای هوشمند برای پیک سایی بهتر در شبکه برق در اختیار قرار می‌دهند موردبررسی قرارگرفته است. این هدف با شناسایی بهترین گروه از مشترکین برای مشارکت در این برنامه انجام‌شده است. به‌این‌ترتیب که با کمک الگوریتم‌های شناسایی الگو و تعریف و استفاده از ویژگی‌های مناسب برای مشترکین، بهترین گروه آن‌ها برای این منظور گزینش‌شده‌اند. نتایج پیاده‌سازی پیک سایی گویای عملکرد مناسب روند پیشنهادی است. به‌این‌ترتیب که میزان اثرگذاری برای گروهی از مشترکین که روند پیشنهادی، آن‌ها را مستعد تشخیص داده است نسبت به سایر مشترکین بیش‌تر بوده است. این در حالی است که برای زمانی که کاهش بار در ساعات پیک بدون برنامه خاصی انجام می‌گیرد و انتخاب مشترکین تصادفی است میزان این اثرگذاری کم‌تر است. لازم به ذکر است که این میزان اثرگذاری در شرایطی به‌دست‌آمده که تعداد مشترکین درگیر در این برنامه نیز در حالت استعداد سنجی کمتر از حالت انتخاب تصادفی بوده است.

تحلیل انجام‌گرفته در این مقاله نشان داده است که با استفاده از داده‌های کنتورهای هوشمند که امکان تبادل اطلاعات مصرف در شبکه به‌صورت تقریباً زمان واقعی را فراهم آورده است، شناسایی الگوی مصرفی مشترکین با دقت و اطمینان بسیار بالاتری انجام می‌گیرد. در چنین شرایطی پیاده‌سازی برنامه‌های مدیریت مصرف انرژی در شبکه نیز به شکلی مطلوب‌تر صورت می‌پذیرد. اثر چنین زیرساختی زمانی برجسته‌تر می‌شود که نقش پررنگ مشترکین در چنین برنامه‌های در نظر گرفته شود. شناسایی رفتار مصرفی مشترکین از ضروریات پیاده‌سازی برنامه‌های مدیریت مصرف ازجمله پیک سایی است که در این مقاله موردبررسی قرارگرفته و دارای نتایج قابل‌قبولی نیز بوده است.

**جدول (۲): ارزیابی پیک سایی با روش پیشنهادی، اضافه‌بار ۵٪**

| میزان اثرگذاری میانگین | تعداد مشترکین تحت تأثیر | روش انتخاب |
|---|---|---|
| ۹٪/۱ | ۱۱۶ | مبتنی‌بر روند پیشنهادی |
| ۲٪/۴ | ۲۲۳ | تصادفی |

**جدول (۳): ارزیابی پیک سایی با روش پیشنهادی، اضافه‌بار ۱۰٪**

| میزان اثرگذاری میانگین | تعداد مشترکین تحت تأثیر | روش انتخاب |
|---|---|---|
| ۷٪/۸ | ۱۴۲ | مبتنی‌بر روند پیشنهادی |
| ۲٪/۶ | ۳۰۲ | تصادفی |

**جدول (۴): ارزیابی پیک سایی با روش پیشنهادی، اضافه‌بار ۱۵٪**

| میزان اثرگذاری میانگین | تعداد مشترکین تحت تأثیر | روش انتخاب |
|---|---|---|
| ۱۳٪/۱ | ۱۸۹ | مبتنی‌بر روند پیشنهادی |
| ۴٪/۳ | ۴۳۲ | تصادفی |

**جدول (۵): ارزیابی پیک سایی با روش پیشنهادی، اضافه‌بار ۲۰٪**

| میزان اثرگذاری میانگین | تعداد مشترکین تحت تأثیر | روش انتخاب |
|---|---|---|
| ۱۷/۴% | ۲۲۸ | مبتنی‌بر روند پیشنهادی |
| ۶/۱% | ۵۲۷ | تصادفی |

**جدول (۶): باس‌ها و تعداد مشترکین هر باس مشارکت‌کننده در برنامه پیک سایی**

| شماره باس‌ها و تعداد مشترکین در هر باس | درصد اضافه‌باری |
|---|---|
| ۲(۱۰), ۴(۷), ۴۷(۳), ۵(۵), ۵۱(۱۱), ۹(۴), ۵۵(۹), ۵۹(۱), ۱۵(۱۴), ۲۷(۱۳), ۳۲(۸), ۴۴(۶), ۶۳(۱۷), ۶۱(۳), ۲۹(۳), ۳۸(۲۱), ۲۱(۱۷), ۲۶(۱۳) | ۵٪ (روش پیشنهادی) |
| ۱(۲), ۴(۳), ۹(۷), ۱۱(۱۰), ۱۷(۴), ۱۹(۳), ۲۲(۱), ۲۸(۱۷), ۳۱(۱۰), ۳۳(۲۱), ۳۷(۲), ۴۱(۵), ۴۹(۲), ۵۵(۱۷), ۵۹(۱۲), ۶۴(۲۴), ۶۷(۱۹), ۴۰(۱۳), ۱۵(۱۱), ۱۲(۷), ۲۵(۸), ۳۵(۱۰), ۴۴(۲), ۵۰(۹), ۵۱(۲), ۵۲(۲) | ۵٪ (روش تصادف) |
| ۲(۱۰), ۴(۷), ۴۷(۳), ۵(۵), ۵۱(۱۱), ۹(۴), ۵۵(۹), ۵۹(۱), ۱۵(۱۴), ۲۷(۱۳), ۳۲(۸), ۴۴(۶), ۶۳(۱۷), ۶۱(۳), ۲۹(۳), ۳۸(۲۱), ۲۱(۵), ۲۶(۱۳) | ۱۰٪ (روش پیشنهادی) |
| ۲(۱۱), ۷(۷), ۸(۲۰), ۹(۱۴), ۱۱(۳), ۱۵(۱۲), ۱۸(۱), ۲۱(۱۴), ۲۲(۱۷), ۲۵(۸), ۳۴(۶), ۳۶(۶), ۳۹(۱۱), ۴۱(۱۲), ۴۵ (۱۳), ۴۷(۹), ۴۳(۳), ۵۲(۷), ۵۵(۹), ۵۹(۹), ۶۱(۱۱), ۶۳(۱۶), ۶۵(۶), ۶۸(۲۶), ۶۹(۱), ۱۳(۲), ۲۰(۱۹), ۳(۲۴), ۱۷(۵) | ۱۰٪ (روش تصادف) |
| ۲(۱۰), ۴(۷), ۴۷(۳), ۵(۵), ۵۱(۱۱), ۹(۴), ۵۵(۹), ۵۹(۱), ۱۵(۱۴), ۲۷(۱۳), ۳۲(۸), ۴۴(۶), ۶۳(۱۷), ۶۱(۳), ۲۹(۳), ۳۸(۲۱), ۲۱(۵), ۲۶(۱۳), ۵۰(7), ۳۵(۸), ۴۱(۳), ۶۰(۷), ۶۴(۹) | ۱۵٪ (روش پیشنهادی) |
| ۱(۲), ۳(۷), ۴(۱۷), ۷(۹), ۱۰(۲۱), ۱۲(۱۳), ۱۵(۱۴), ۱۶(۱۰), ۲۰(۷), ۲۳(۱), ۲۵(۸), ۲۷(۱۴), ۳۰(۱۴), ۳۴(۱۸), ۳۷(۲۰), ۳۹(۱۷), ۴۱(۶), ۴۴(۱۵), ۴۷(۵), ۵۰(۲۴), ۵۲(۱۷), ۵۳(4), ۵۵(۳),۵۷(۱۳), ۶۰(۲۰), ۶۱(۲۷), ۶۵(۱۵), ۶۶(۱۳), ۶۷(۱۲), ۶۸(۲), ۶۹(۱), ۵۴(۱۴), ۶(۱۹), ۱۱(۳), ۲۱(۱۱), ۲۸(۲۱), ۴۲(۹) | ۱۵٪ (روش تصادف) |
| ۲(۱۰), ۴(۷), ۴۷(۳), ۵(۵), ۵۱(۱۱), ۹(۴), ۵۵(۹), ۵۹(۱), ۱۵(۱۴), ۲۷(۱۳), ۳۲(۸), ۴۴(۶), ۶۳(17), ۶۱(۳), ۲۹(۳), ۳۸(۲۱), ۲۱(۵), ۲۶(۱۳), ۵۰(۷), ۳۵(۸), ۴۱(۳), ۶۰(۷), ۶۴(۹), ۶(۳), ۱۷(۱۳), ۱۴(۴), ۱۱(۱), ۸(۶), ۱۹(۳), ۷(۹) | ۲۰٪ (روش پیشنهادی) |
| ۱(۱۲), ۳(۱۳), ۴(۱), ۵(۹), ۷(۱), ۹(۷), ۱۲(۴), ۱۴(۱۵), ۱۷(۵), ۱۸(۱), ۲۰(۱۱), ۲۲(۱۳), ۲۳(۱۷), ۲۴(۲۳), ۲۵(۱۲), ۲۷(۵), ۳۰(۲۰), ۳۱(۱۹), ۳۳(۷), ۳۴(۱), ۳۵(۳), ۳۷(۱۳), ۴۰(۲۴), ۴۱(۱۸), ۴۳(۱۹), ۴۴(۲۰), ۴۷(۱۷), ۴۸(۷), ۵۰(۱۱), ۵۲(۱), ۵۵(۶), ۵۶(۱۴), ۵۹(۱), ۶۰(۲), ۶۱(۱۰), ۶۲(۱۶), ۶۴(۱۷), ۶۵(۱۹), ۶۷(۲۶), ۶۸(۵), ۶۹(۱۰), ۸(۸), ۱۶(۱۸), ۲۸(۱۴), ۸(۲۳), ۲(۲۹), ۲۱(۳), ۵۷(۱۳) | ۲۰٪ (روش تصادف) |

**جدول (۷): نتایج مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌ها**

| روش‌ها | درصد اختلاف |
|---|---|
| رگرسیون وزنی محلی | %۱۲ |

www.SID.ir

Archive of SID

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

## 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.world energyoutlook.org/docs/weo 2009/ WEO 2009 es English.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.Safdarian, 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.Safdarian, 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 forcasting, profile identification, and customer segmentation: a metodology 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

[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.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.

[۱۵] م. کجوری، ع. فریدونیان، ح. لسانی، " استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی طیفی 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 (EEEIC / 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 thesisuniversity 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",

www.SID.ir

Archive of SID

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 208.

[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- آلودگی دینامیک همراه با برنامه پاسخگویی بار اضطراری بهینه تحت قیود اثر نقطه-دریچه و ذخیره چرخان"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد۴۶، شماره۱، بهار۱۳۹۵

[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، جلد۴۷، شماره۲، تابستان۹۶

[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

www.SID.ir