

ارزیابی پتانسیل منابع سمت تقاضا در حضور تجهیزات سرمایشی و گرمایشی با استفاده از روش داده‌کاوی مبتنی بر الگوریتم طبقه‌بندی k-means

فاطمه شیبانی، مژگان ملاحسنی‌پور و هنگامه کشاورز

ارتباط دوطرفه بین تولیدکننده و مصرف‌کننده انرژی می‌پردازد [۱]. مشارکت مشترکین در برنامه‌ریزی‌های سیستم قدرت، تحت عنوان پاسخگویی تقاضا صورت می‌گیرد. پاسخگویی تقاضا، تغییر در الگوی مصرف انرژی توسط منابع سمت تقاضا در پاسخ به تغییر در قیمت برق یا پرداخت‌های تشویقی است که به منظور القای مصرف برق کمتر در زمان افزایش قیمت و یا کاهش قابلیت اطمینان سیستم تعریف شده است [۲]. پتانسیل منابع سمت تقاضا در برنامه‌ریزی سیستم و فعالیت‌های بازار حایز اهمیت می‌باشد [۳] و [۴] و می‌تواند منتج به کاهش هزینه‌ها [۵] و افزایش قابلیت اطمینان [۶] و [۷] شود. در این میان، شناسایی دقیق پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار در راستای برنامه‌ریزی سیستم قدرت ضروری است. تا کنون در بخش‌های مختلف مصرف، روش‌های متنوعی به منظور محاسبه پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار به کار گرفته شده که در ادامه به اختصار به آنها پرداخته می‌شود.

در [۸] و [۹]، پتانسیل منابع سمت تقاضا در بخش خانگی با توجه به ساختار شبکه، جریان عبوری و محدودیت‌های عملیاتی سیستم، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که میزان مشارکت مشترکین خانگی در برنامه‌های پاسخگویی بار وابسته به محل حضور مشترک در شبکه می‌باشد. در [۱۰] با استفاده از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف، یک مدل تحلیلی در راستای کنترل بهینه انرژی و همچنین تخمین ظرفیت بالقوه کاهش تقاضا بر اساس اطلاعات آنلاین سیستم‌های تولیدی معمول، در طول دوره پاسخگویی تقاضا ارائه شده است. در [۱۱]، یک مدل مبتنی بر به کارگیری ادوات هوشمند از جمله خودروی الکتریکی با قابلیت اتصال به شبکه، به منظور اصلاح منحنی بار ارائه گردیده که منتج به کاهش قیمت انرژی و تعدیل بار درخواستی شده است. در [۱۲]، تخمین پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار بر مبنای مقایسه نظیر به نظیر منحنی‌های بار روزانه در شرایط آب و هوایی مختلف انجام پذیرفته است. در این راستا به ازای کمینه و بیشینه دمای محیط، اختلاف کمینه و بیشینه مصرف در فصول گرم و سرد در سال‌های مختلف، معرف سطح پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا می‌باشد. واضح است که وسایل سرمایشی و گرمایشی، عواملی اثرگذار بر پتانسیل منابع پاسخگویی بار می‌باشند؛ زیرا حضور این وسایل در شبکه، سبب افزایش بارگذاری شبکه در ساعات پیک بار می‌گردد. در این راستا، کنترل هماهنگ تعداد زیادی از وسایل سرمایشی مسکونی برای دستیابی به کاهش تقاضای پیک، در [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است؛ لذا با بهره‌گیری از استراتژی مدل کاهش‌یافته و روش کنترلی پیش‌بینی مدل اقتصادی، جامعه به تغییرات قیمت انرژی در بازار عمده‌فروشی به طور مطلوب پاسخ می‌دهد. نتایج

چکیده: در بستر سیستم‌های قدرت هوشمند، تعیین پتانسیل منابع پاسخگویی تقاضا به علت اثرگذاری بر تمامی سیاست‌های تصمیم‌گیری حوزه انرژی حایز اهمیت است. در مقاله حاضر، پتانسیل منابع پاسخگویی تقاضا در حضور تجهیزات سرمایشی و گرمایشی، با استفاده از روش الگوریتم طبقه‌بندی k-means به عنوان یک روش داده‌کاوی، تعیین می‌شود. ابتدا داده‌های انرژی مصرفی در ساعات پیک دوره‌های گرم (بهار و تابستان) و دوره‌های سرد (پاییز و زمستان)، با توجه به تغییرات قیمت و دما، با استفاده از الگوریتم k-means در خوشه‌های مختلفی گروه‌بندی می‌شوند. خوشه‌هایی با امکان حضور وسایل سرمایشی و گرمایشی، انتخاب می‌شوند. سپس نمودار بازه اطمینان داده‌های انرژی مصرفی در خوشه‌های منتخب با توجه به تغییرات قیمت انرژی ترسیم می‌گردد. با توجه به فاصله کمینه و بیشینه در میانگین داده‌های موجود در آستانه بالا و آستانه متوسط نمودار بازه اطمینان، پتانسیل نامی منابع پاسخگویی تقاضا (بار انعطاف‌پذیر) به دست می‌آید. اطلاعات انرژی مصرفی، دما و قیمت انرژی شبکه برق BOSTON در یک افق زمانی شش‌ساله به منظور ارزیابی مدل پیشنهادی استفاده می‌شود.

کلیدواژه: انرژی مصرفی، پاسخگویی بار، داده‌کاوی، شبکه هوشمند، قیمت، تغییرات دمایی.

۱- مقدمه

شبکه‌های برق موجود در حالت کلی به صورت شاهراه‌های یک‌طرفه‌ای هستند که انرژی تولیدی را به مشترکین تحویل می‌دهند و امکان تبادل دوطرفه انرژی، اطلاعات و تصمیم‌گیری وجود ندارد. در چنین ساختاری، تأمین افزایش تقاضا به عهده نیروگاه‌های فسیلی متداول است که نتایجی از جمله بهره‌وری پایین‌تر، تولید هرچه بیشتر گازهای گلخانه‌ای و هزینه هنگفت تولید را در بر خواهند داشت. این چالش‌ها، منتج به تغییر ساختار کنونی سیستم قدرت و هوشمندسازی آن در راستای مدیریت کارآمد شده است. شبکه قدرت هوشمند با استفاده از تکنولوژی‌های مدرن به ایجاد

این مقاله در تاریخ ۱۶ مرداد ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۱ خرداد ماه ۱۴۰۱ بازنگری شد.

فاطمه شیبانی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، (email: ftm_sheibani@yahoo.com).

مژگان ملاحسنی‌پور (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، (email: m.mollahassani@ece.usb.ac.ir).
هنگامه کشاورز، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، (email: keshavarz@ece.usb.ac.ir).

گذشته، در تحقیق حاضر سعی بر ارائه ساختاری جامع تر به منظور تخمین پتانسیل منابع سمت تقاضا در فصول گرم و سرد سال از طریق مدیریت وسایل سرمایشی و گرمایشی وجود دارد.

مقاله پیش رو به صورت زیر ساختار یافته است: در بخش دوم، مکانیزم عملکردی مدل پیشنهادی مبتنی بر تکنیک داده کاوی در راستای شناسایی پتانسیل منابع پاسخگویی بار تشریح می‌گردد. در بخش سوم، کارایی مدل با استفاده از شبکه برق BOSTON مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در پایان نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی ارائه شده در این مقاله، به منظور تعیین پتانسیل منابع پاسخگویی بار مبتنی بر تغییرات الگوی مصرف انرژی، تغییرات دمایی و تغییر قیمت می‌باشد که در شکل ۱ نمایش داده شده است. مکانیزم عملکردی ساختار پیشنهادی مبتنی بر تکنیک داده کاوی مختصراً به شرح زیر می‌باشد.

ابتدا با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی k-means، داده‌های انرژی در ساعات پیک به تفکیک فصول گرم و فصول سرد، با توجه به تغییرات دمای محیط و قیمت انرژی بر مبنای آنتروپی کمینه و کیفیت بیشینه خوشه‌بندی می‌شوند. خوشه‌هایی مورد توجه هستند که در فصول سرد با کاهش دما یا در فصول گرم با افزایش دما، میزان توان مصرفی آنها افزایش پیدا می‌کند. این خوشه‌ها به ترتیب، امکان حضور وسایل گرمایشی و سرمایشی را در شبکه نشان می‌دهند. سپس عمل پیش‌پردازش داده‌های موجود در خوشه‌های منتخب با بهره‌گیری از نمودار جعبه‌ای انجام می‌پذیرد. اکنون نمودار بازه اطمینان خوشه‌های منتخب بر اساس تغییرات قیمت انرژی که شامل ۳ بخش آستانه بالا، آستانه متوسط و آستانه پایین می‌شود، برای هر ساعت از زمان‌های پیک شبکه در فصول گرم و سرد ترسیم می‌گردد. به منظور تعیین پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار، داده‌های موجود در آستانه بالا و آستانه متوسط مورد توجه قرار می‌گیرند. بنابراین میانگین بیشینه بارگذاری (آستانه بالا) و میانگین متوسط بارگذاری (آستانه متوسط) در ساعات‌های پیک فصول سرد و گرم سال به طور جداگانه محاسبه و ترسیم می‌گردد. در پایان با اعمال ضرایب مختلف به منحنی‌های به دست آمده، پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا در فصول سرد و گرم تعیین می‌گردد.

۲-۱ شناسایی داده‌های انرژی مصرفی حساس به دما و

قیمت با استفاده از الگوریتم k-means

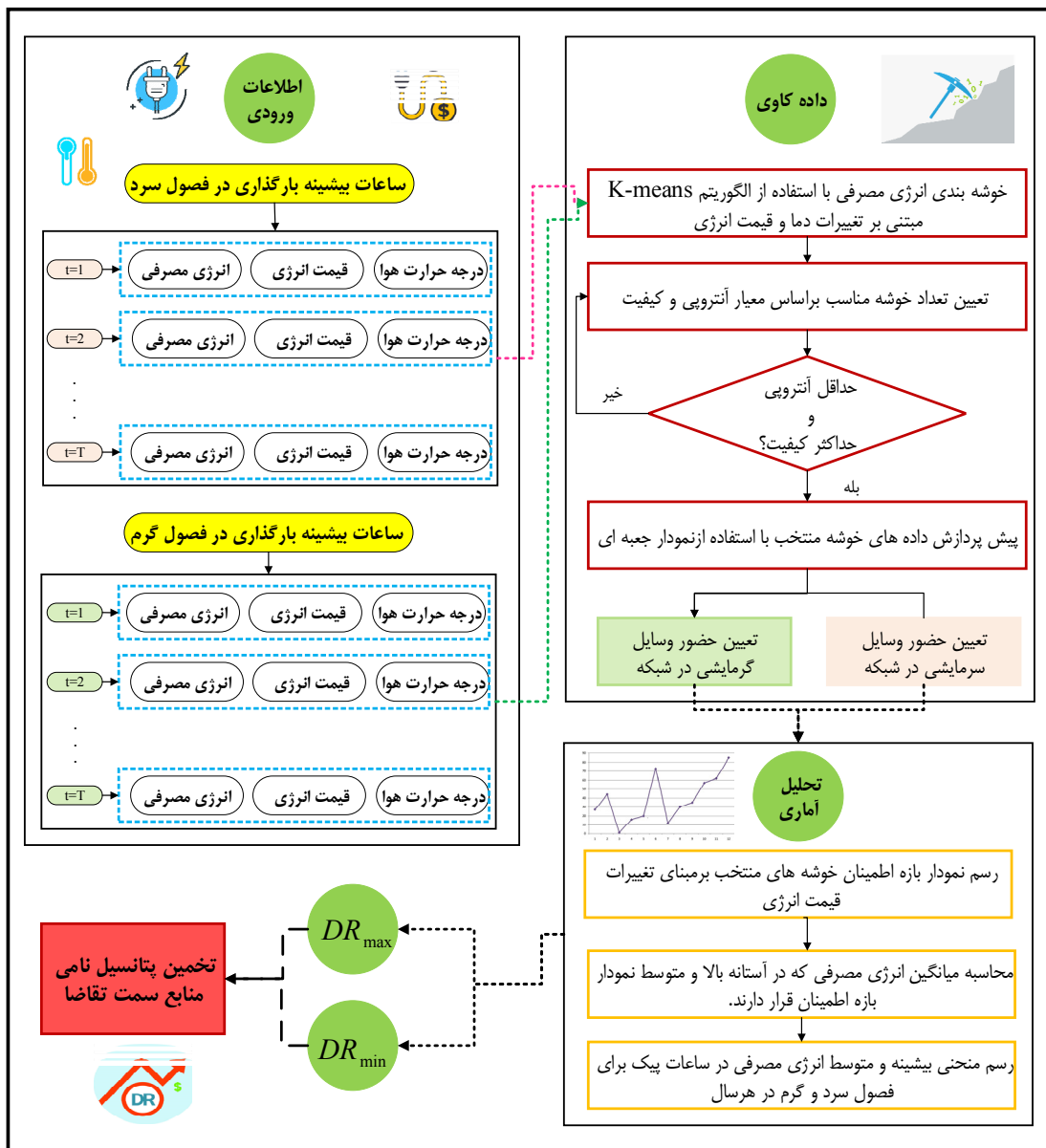
مقدار انرژی مصرفی با توجه به درجه حرارت محیط تغییر می‌کند، حال آن که میزان مصرف انرژی در یک بازه دمایی (دمای آسایش) تقریباً ثابت است. در فصول سرد سال با کاهش درجه حرارت محیط خارجی، به منظور گرم کردن محیط داخلی، میزان انرژی مصرفی اوج می‌گیرد. شکل ۲، رابطه بین انرژی مصرفی و نوسانات دمایی را در یک ساعت پیک نمونه از فصول سرد نشان می‌دهد. طبق شکل با کاهش دما، میزان انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. این نکته در فصول گرم سال نیز صادق است. در فصول گرم سال برای کاهش دمای محیط داخلی در مقایسه با دمای محیط خارجی، افزایش انرژی مصرفی دیده می‌شود. شکل ۳، ارتباط بین افزایش انرژی مصرفی و افزایش دما را در یک ساعت نمونه پیک در فصل گرم نشان می‌دهد.

همان گونه که قبلاً اشاره گردید، به منظور شناسایی پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار، به ارزیابی تغییرات انرژی مصرفی، درجه حرارت و

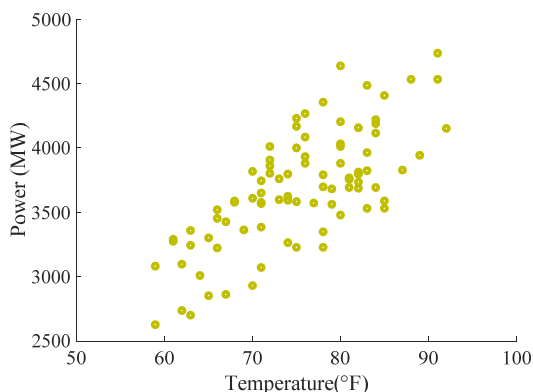
نشان می‌دهند که دسترسی آزاد جامعه به قیمت‌های پویا منتج به کاهش هزینه و کاهش تقاضای پیک می‌گردد. در [۱۴]، پتانسیل پاسخگویی بار وسایل سرمایشی مسکونی با استفاده از مدل حرارتی اتاق خاکستری خودآموز^۱ بررسی شده و نتایج حاکی از کاهش قابل ملاحظه توان مصرفی می‌باشند. در [۱۵]، پتانسیل مشارکت مشترکین صنعتی و تجاری شبکه برق دهلی در برنامه‌های پاسخگویی بار با توجه به میزان انرژی مصرفی و سیگنال‌های قیمتی، تعیین شده است. در [۱۶]، انرژی مصرفی مشترکین خانگی با استفاده از تقریب از پایین به بالا^۲ تعیین می‌شود؛ سپس با در نظر گرفتن برنامه‌های مبتنی بر کاهش بار و شیفت تقاضا در ساعات پیک مصرف، میزان پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار ارزیابی می‌شود. یکی از روش‌های مؤثر در برآورد پتانسیل نامی منابع پاسخگویی تقاضا، استفاده از تکنیک داده کاوی است. در [۱۷] با بهره‌گیری از یک تقریب آماری عصبی و ارزیابی داده‌های شبکه هوشمند استرالیا، پتانسیل منابع سمت تقاضا برآورد شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که انرژی مصرفی مشترکین شرکت‌کننده در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا با ۱۲٪ کاهش مواجه شده است. مرجع [۱۸] به تخمین اثرات رفتاری برنامه پاسخگویی بار در کاهش تقاضای بخش مسکونی، با استفاده از داده‌های مشاهداتی هوشمند بر مبنای تخمین گر Hodges-Lehmann پرداخته است. در [۱۹]، برآورد بار پایه با بهره‌گیری از تکنیک‌های داده کاوی k-means و SOM^۳ انجام پذیرفته است. از مقایسه تخمین حاصل شده و منحنی واقعی بار، پتانسیل منابع پاسخگویی بار تعیین می‌گردد. در [۲۰]، تخمین پتانسیل منابع پاسخگویی بار با استفاده از روش‌های داده کاوی صورت گرفته است، به طوری که با توجه به نگرش متفاوت مصرف‌کنندگان نسبت به برنامه‌های پاسخگویی تقاضا و سطح مشوق پرداختی، مشتریان بر مبنای الگوریتم OPTIC و KNN^۴ خوشه‌بندی می‌شوند.

با توجه به تحقیقات انجام شده، واضح است که پارامترهای انرژی مصرفی، قیمت انرژی و دمای محیط، عوامل مهمی در تعیین پتانسیل نامی منابع پاسخگویی تقاضا می‌باشند. در این میان، زمان حضور وسایل گرمایشی و سرمایشی در شبکه و برآورد پتانسیل قابل صرفه‌جویی از طریق مدیریت این منابع، ضروری است. همان گونه که بیان گردید، در [۱۳] به بررسی پتانسیل منابع سمت تقاضا در فصول گرم از طریق مدیریت وسایل سرمایشی در شبکه، پرداخته شده است؛ حال آن که توجه به تفاوت پتانسیل منابع سمت تقاضا در فصول گرم و سرد، ضروری و حایز اهمیت می‌باشد. در همین راستا در [۱۲]، اگرچه به تفاوت مذکور از طریق مقایسه منحنی‌های مصرف در فصول گرم و سرد به طور جداگانه در سال‌های مختلف پرداخته شده است، اما با کاستی‌هایی در روند تخمین مواجه است. از یک سو، عدم توجه به مسایلی از جمله تغییر در الگوی زندگی، رفاه اجتماعی و رشد جمعیت در سال‌های غیر متوالی مختلف، امری صحیح در روند تخمین ظرفیت منابع پاسخگویی تقاضا نیست. از سوی دیگر، مقایسه کمینه و بیشینه مصرف که صرفاً در زمان محدودی از روزهای سال رخ می‌دهند، عدم توجه به میزان بارگذاری متوسط شبکه، عدم توجه به آستانه دمای عملکردی وسایل سرمایشی و گرمایشی با توجه به شرایط محیطی، و قیمت انرژی از دیگر کاستی‌های تحقیقاتی مطالعه [۱۲] می‌باشند. بنابراین با توجه به خلأهای بیان شده در مطالعات

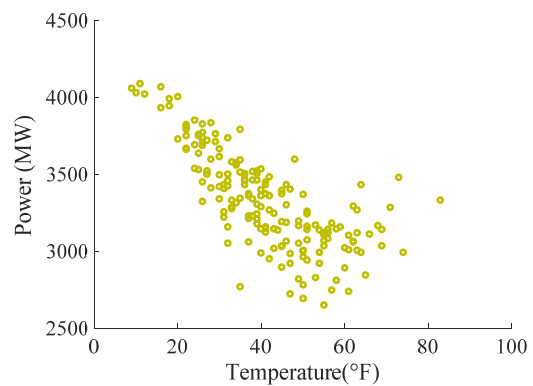
1. Self-Learning Grey-Box Room Thermal Model
2. Bottom Up
3. Self-Organizing Map
4. K-Nearest-Neighbor



شکل ۱: ساختار پیشنهادی شناسایی پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار با بهره‌گیری از روش k-means در یک سال نمونه.



شکل ۳: تغییرات توان مصرفی در مقابل تغییرات دما در فصول گرم.

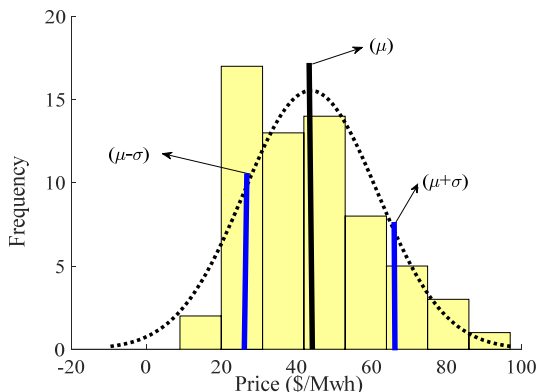
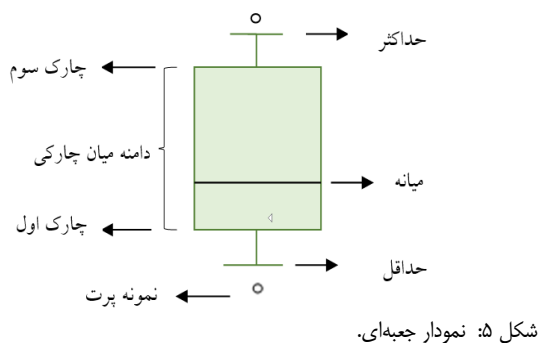


شکل ۴: تغییرات توان مصرفی در مقابل تغییرات دما در فصول سرد.

مسئله مورد نظر را بر مبنای الگوریتم k-means نشان می‌دهد. در (۱)، مقدار J بیانگر مربع فاصله نمونه داده‌ها از مراکز خوشه‌ها است. r_{nk} معرف تعلق/عدم تعلق نمونه n ام به خوشه k ام است و μ_k مرکز خوشه‌ها را نشان می‌دهد. پس از هر بار تکرار، مراکز خوشه‌ها به روز رسانی می‌شوند که μ_k^{new} بیانگر این امر است [۲۱]. بنابراین با استفاده

قیمت انرژی با استفاده از روش داده‌کاوی مبتنی بر الگوریتم خوشه‌بندی k-means پرداخته می‌شود. در الگوریتم k-means مطابق با شکل ۴، داده‌های موجود با هدف حداقل کردن مجموع مربع خطای گروه‌ها $(WGSSE)^1$ به k خوشه تقسیم‌بندی می‌شوند. رابطه (۱)، فرمول‌بندی

1. Within Groups Sum of Squared Errors



شکل ۶: نمودار بازه اطمینان متناسب با تغییرات قیمت انرژی در یک ساعت نمونه پیک.

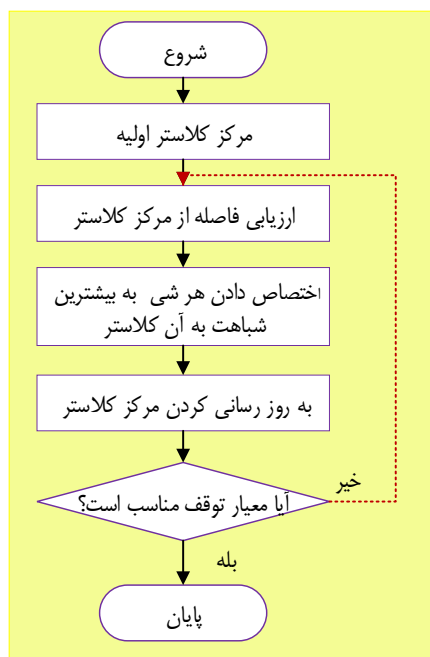
است. مشاهده می‌شود که بخش قابل توجهی از داده‌های انرژی مصرفی مرتبط با تغییرات قیمت انرژی، حدوداً ۷۰٪ در آستانه متوسط قرار می‌گیرند و بخش کوچکی، حدوداً ۱۵٪ در هر یک از آستانه‌های پایین و بالا قرار دارند. لازم به ذکر است که روابط ریاضی حاکم بر نمودار بازه اطمینان در (۲) بیان شده است. مطابق با (۲)، آستانه پایین، آستانه متوسط و آستانه بالا به ترتیب با علائم اختصاری T_L ، T_M و T_U نشان داده شده‌اند. μ و σ به ترتیب معرف مقدار میانگین و انحراف معیار داده‌ها می‌باشند و همچنین x_i معرف مقدار داده i ام و N نمایانگر تعداد داده‌ها است

$$T_L < (\mu - \sigma), (\mu - \sigma) < T_M < (\mu + \sigma), T_U < (\mu + \sigma)$$

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$$

همان گونه که قبلاً اشاره گردید، به منظور تعیین پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار، داده‌های موجود در آستانه بالا و آستانه متوسط مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. بنابراین در ابتدا با استفاده از روش‌های آماری، میانگین انرژی مصرفی در آستانه بالا و آستانه متوسط نمودار بازه اطمینان مربوط به هر ساعت پیک تعیین می‌گردد. سپس با مقایسه متوسط و بیشینه بارگذاری در تمامی ساعات پیک در فصول گرم و سرد سال، سطح بار انعطاف‌پذیر که به عنوان یک منبع مجازی سمت تقاضا است، قابل شناسایی می‌باشد. از طریق مدیریت و کنترل مناسب و بهینه میزان بار انعطاف‌پذیر که معرف پتانسیل منابع سمت تقاضا می‌باشد، هزینه‌های تحمیل‌شده به سیستم نیز کاهش می‌یابد. در شکل ۷، منحنی میانگین بیشینه و متوسط بارگذاری برای ناحیه عملکردی مشخص (سرمایشی/



شکل ۴: عملکرد الگوریتم k-means.

از الگوریتم k-means، در هر ساعت پیک از فصول سرد و گرم سال، داده‌های انرژی مصرفی با در نظر گرفتن تغییرات درجه حرارت محیط و قیمت انرژی مصرفی در k خوشه گروه‌بندی می‌شوند. در ساعات پیک فصول سرد، از k خوشه موجود، خوشه‌هایی با افزایش محسوس مصرف انرژی در مقایسه با تغییرات کاهش دما انتخاب می‌شوند، زیرا نشان‌دهنده حضور تجهیزات گرمایشی در شبکه هستند. به طور مشابه، در هر ساعت پیک از فصول گرم، خوشه‌هایی که روند انرژی مصرفی آنها متناسب با افزایش دما است انتخاب می‌شوند، زیرا فعالیت وسایل سرمایشی را نشان می‌دهند. طبق توضیحات ذکر شده، داده‌ها پس از خوشه‌بندی با استفاده از نمودار جعبه‌ای پیش‌پردازش می‌شوند (شکل ۵). طبق شکل، داده‌هایی که بالاتر از حداکثر و پایین‌تر از حداقل قرار دارند به عنوان نمونه پرت شناخته می‌شوند و قابل حذف هستند [۲۲]

$$J = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_{nk} \|x_n - \mu_k\|^2$$

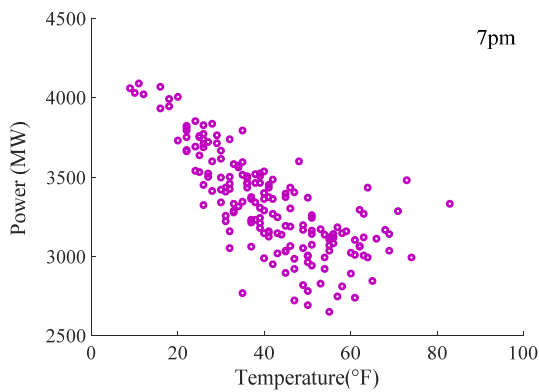
$$r_{nk} = \begin{cases} 1 & \text{if } k = \arg \min \|x_n - \mu_k\|^2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_k = \frac{\sum_n r_{nk} x_n}{\sum_n r_{nk}}$$

$$\mu_k^{new} = \mu_k^{old} + \eta(x_n - \mu_k^{old})$$

۲-۲ شناسایی پتانسیل منابع پاسخگویی بار بر مبنای تغییرات قیمت انرژی

در این قسمت با استفاده از نمودار بازه اطمینان^۱ و بر مبنای تغییرات قیمت انرژی، داده‌های خوشه‌های منتخب در ساعات پیک (فاز پیشین) به سه بخش آستانه بالا، آستانه متوسط و آستانه پایین تقسیم‌بندی می‌شوند. نمودار بازه اطمینان برای یک ساعت نمونه پیک در شکل ۶ ترسیم شده



شکل ۸: تغییرات توان مصرفی متناسب با نوسانات دمایی در ساعت ۷ بعد از ظهر سال ۲۰۱۶.

جدول ۲: کمینه و بیشینه پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار (%) در فصل‌های پاییز و زمستان.

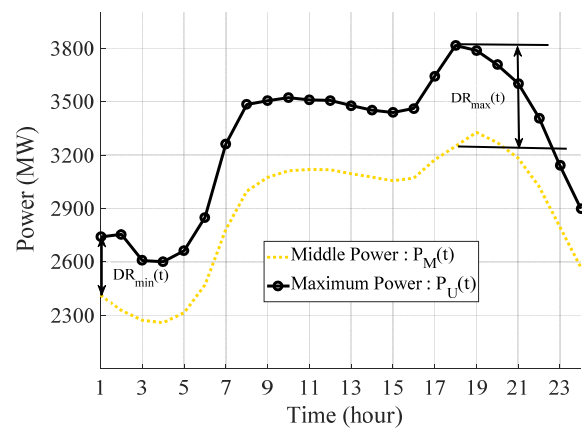
سال	DR_{min}	DR_{max}	میانگین
۲۰۱۱	٪۴	٪۱۰٫۴	٪۷٫۲
۲۰۱۲	٪۰٫۲	٪۲	٪۱٫۰۱
۲۰۱۳	٪۴٫۵	٪۹	٪۶٫۷
۲۰۱۴	٪۵٫۷	٪۱۴٫۴	٪۱۰
۲۰۱۵	٪۹	٪۱۳	٪۱۱
۲۰۱۶	٪۲	٪۷	٪۴٫۵

هر ساعت پیک از فصول سرد و در هر سال بر اساس الگوریتم k-means انجام می‌شود.

نمونه‌ای از خوشه‌بندی داده‌های انرژی مصرفی در ساعت ۶ بعد از ظهر در سال ۲۰۱۶ در شکل ۱۰ ترسیم شده است. با توجه به ماهیت داده‌های مصرف انرژی در منطقه BOSTON، تعداد خوشه‌ها (k) بین ۵ تا ۸ در نظر گرفته می‌شود، زیرا عملکرد اجرایی حداقل آنتروپی و حداکثر کیفیت مناسب می‌باشد. با توجه به شکل ۱۰، واضح است خوشه‌هایی که توان مصرفی آنها با کاهش دما افزایش می‌یابند، انتخاب می‌شوند و خوشه‌هایی نظیر خوشه زرد که با تغییرات دما، تغییرات انرژی مصرفی آنها ثابت است، حذف می‌شوند. اکنون عمل پیش‌پردازش داده‌های خوشه‌های منتخب با استفاده از نمودار جعبه‌ای در نرم‌افزار KNIME صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است در خوشه‌های منتخب ساعات پیک یادشده، وسایل گرمایشی در شبکه فعال می‌باشند. در پایان، میانگین داده‌های انرژی مصرفی که در آستانه بالا و آستانه متوسط نمودار بازه اطمینان تغییرات قیمتی قرار گرفته‌اند، محاسبه می‌شوند. این فرایند در تمامی سال‌های مورد مطالعه (۲۰۱۱ الی ۲۰۱۶) انجام شده است. منحنی میانگین بیشینه و متوسط بارگذاری برای فصول سرد در ساعات پیک ارائه شده در جدول ۱ به اختصار در سال‌های ابتدایی و انتهایی بازه مورد مطالعه در شکل ۱۱ رسم شده است.

اکنون با استفاده از (۳)، پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار در حضور وسایل گرمایشی محاسبه می‌شود. در شکل ۱۲، مقادیر نامی منابع سمت تقاضا نمایش داده شده است.

با توجه به مقادیر به دست آمده در شکل ۱۲ و میزان بار پیک شبکه BOSTON در هر سال، درصد پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار بر حسب پیک بار شبکه در جدول ۲ درج شده است. با توجه به نتایج جدول می‌توان نتیجه گرفت که حداقل پتانسیل مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا در محدوده ۰٫۰۲ الی ۰٫۰۹ درصدی قرار دارد؛



شکل ۷: منحنی‌های میانگین انرژی مصرفی در آستانه بالا و آستانه متوسط.

جدول ۱: ساعات پیک در فصل‌های مختلف در منطقه BOSTON.

فصل	صبح	بعد از ظهر	فصل	صبح	بعد از ظهر
بهار	۸-۹	۵-۸	پاییز	۸-۹	۴-۷
تابستان	-	۲-۶	زمستان	۸-۹	۴-۷

گرمایشی) ترسیم شده است. طبق شکل، $P_U(t)$ و $P_M(t)$ به ترتیب معرف توان مصرفی بیشینه و متوسط در زمان t هستند. طبق تعریف ارائه شده در [۱۲]، حداکثر پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار (DR_{max}) و حداقل پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار (DR_{min}) از طریق (۳) قابل محاسبه هستند. DR_{max} حداکثر فاصله بین دو منحنی و DR_{min} حداقل فاصله بین دو منحنی را نشان می‌دهد

$$DR_{max} = \max(P_U(t) - P_M(t))$$

$$DR_{min} = \min(P_U(t) - P_M(t))$$
(۳)

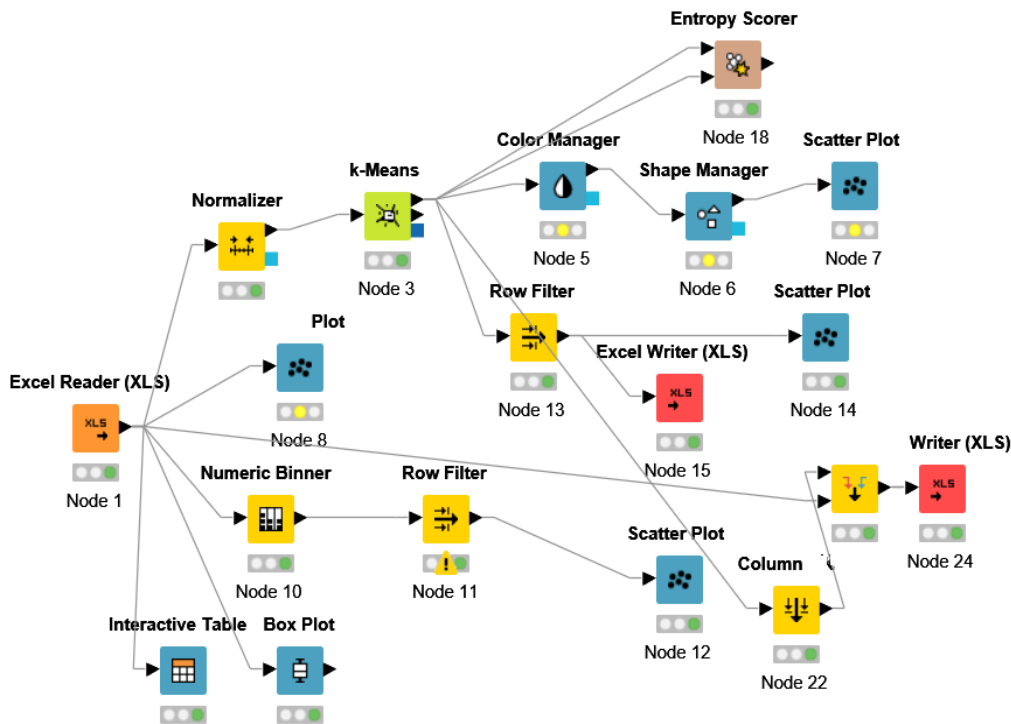
۳- مطالعه موردی و آنالیز نتایج

به منظور آنالیز و بررسی مدل پیشنهادی، اطلاعات دمایی، قیمت و انرژی مصرفی در هر ساعت از شبکه برق BOSTON در بازه زمانی ژانویه سال ۲۰۱۱ الی دسامبر سال ۲۰۱۶ استفاده می‌شود [۲۳]. در این راستا، پارامترهای ورودی به نرم‌افزارهای KNIME و MATLAB اعمال می‌شوند و در پایان، پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار در ساعات پیک فصول سرد و گرم سال، تعیین می‌گردد. اطلاعات مربوط به ساعات‌های پیک در فصل‌های مختلف سال در منطقه BOSTON در جدول ۱ درج شده است [۲۴].

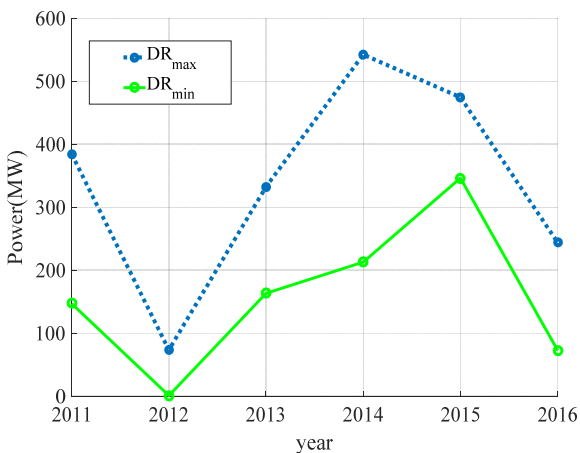
۳-۱ پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار در فصول سرد

وسایل گرمایشی در فصول سرد سال، نظیر زمستان و پاییز، نقش بسزایی در شناسایی پتانسیل منابع سمت تقاضا ایفا می‌کنند. در این بخش، به علت مشابهت ساعات پیک در فصل‌های پاییز و زمستان، داده‌های دمایی، قیمت و انرژی مصرفی در ساعات پیک دو فصل مذکور، به صورت هم‌زمان به مدل پیشنهادی اعمال می‌شوند. مثلاً اطلاعات داده‌های مربوط به ساعت ۷ بعد از ظهر فصل زمستان با اطلاعات داده‌های ساعت ۷ بعد از ظهر فصل پاییز با هم در نظر گرفته می‌شوند. ارتباط بین توان مصرفی و تغییرات دمایی در ساعت ۷ بعد از ظهر فصول سرد در سال ۲۰۱۶ در شکل ۸ نمایش داده شده است.

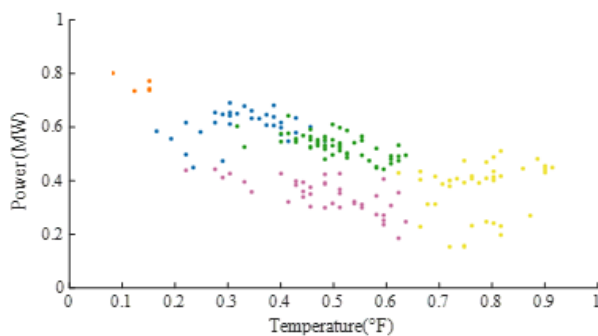
اکنون مطابق با شکل ۹ با بهره‌گیری از نودهای نرم‌افزار KNIME، خوشه‌بندی میزان انرژی مصرفی با توجه به تغییرات دمایی و قیمتی در



شکل ۹: شماتیک خوشه‌بندی (k-means) در نرم‌افزار KNIME.



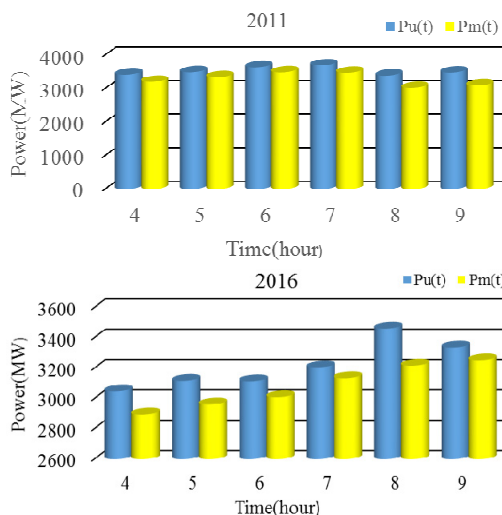
شکل ۱۲: پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار در فصول سرد در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶.



شکل ۱۰: خوشه‌بندی توان مصرفی در ساعت نمونه ۶ بعد از ظهر سال ۲۰۱۶ مبتنی بر روش k-means.

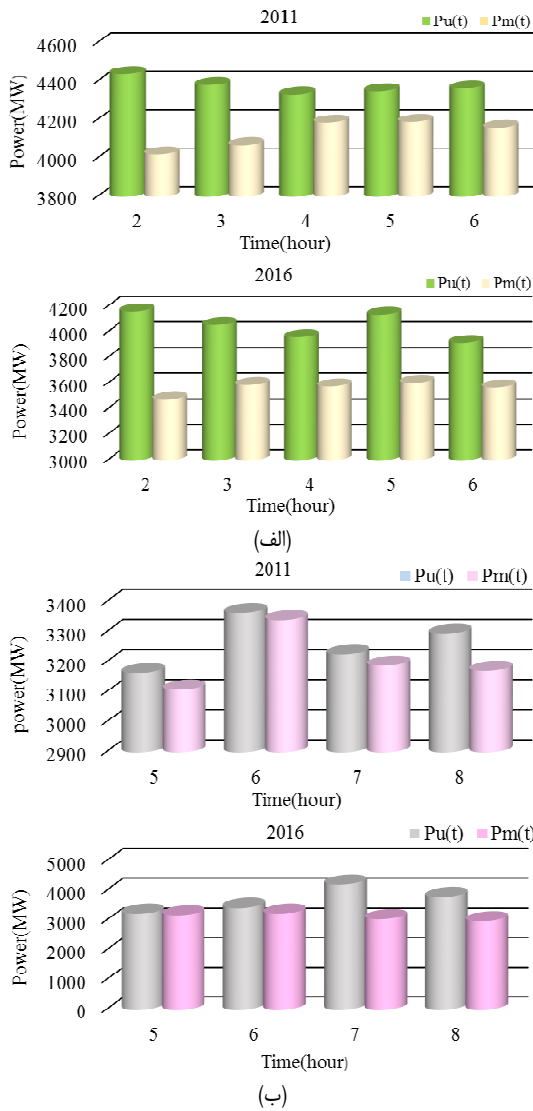
۳-۲ پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار در فصول گرم

همان گونه که قبلاً اشاره شد، حضور وسایل سرمایشی در شبکه، منتج به افزایش پیک بار در فصل‌های گرم سال (بهار و تابستان) می‌گردد. در این بخش، همانند بخش پیشین، با استفاده از داده‌های دما، قیمت و میزان مصرف، در ساعت‌های پیک فصول گرم به شناسایی پتانسیل منابع سمت تقاضا در حضور وسایل سرمایشی پرداخته می‌شود. بدین ترتیب، ساعات پیک در فصل تابستان (۲ تا ۶ بعد از ظهر) و فصل بهار (۵ تا ۸ بعد از ظهر)، به صورت مجزا با استفاده از نرم‌افزار KNIME بررسی می‌شوند. لازم به ذکر است که به علت افزایش عملکرد وسایل سرمایشی در ساعت‌های بعد از ظهر، از ساعت‌های پیک صبح در فصل بهار صرف نظر شده است. نمونه‌ای از افزایش انرژی مصرفی در مقایسه با تغییرات دما در فصل تابستان، ساعت ۲ بعد از ظهر سال ۲۰۱۶، در شکل ۱۳ دیده می‌شود. مشابه با حالت قبل، داده‌های انرژی مصرفی در هر یک از ساعات پیک در فصل گرم، باید با الگوریتم k-means خوشه‌بندی شوند.



شکل ۱۱: میانگین بیشینه و متوسط بارگذاری در ساعت‌های پیک فصول سرد.

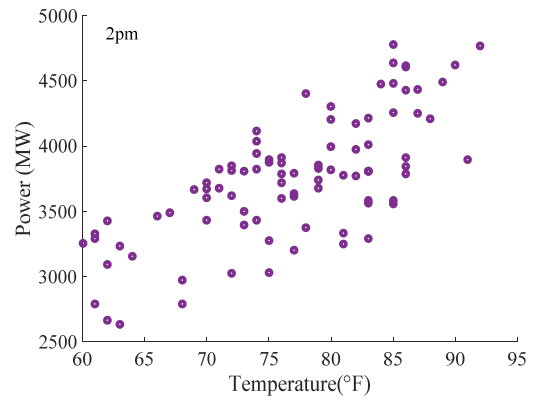
حال آن که حداکثر پتانسیل مشارکت مصرف‌کنندگان در این برنامه‌ها در بازه ۲ الی ۱۴/۴ درصدی نوسان دارد. همچنین بیشینه و کمینه پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار به ترتیب در سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۲ رخ می‌دهد.



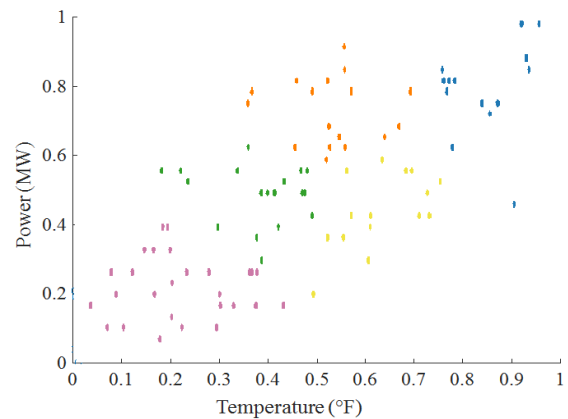
شکل ۱۵: میانگین بیشینه و متوسط بارگذاری در ساعات‌های پیک مختلف در فصول گرم، (الف) تابستان و (ب) بهار.

ترسیم شده است. همان گونه که در شکل مشخص است، می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف بین منحنی‌های بارگذاری بیشینه و متوسط در فصل تابستان نسبت به فصل بهار بیشتر می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که سطح بار انعطاف‌پذیر در فصل تابستان در مقایسه با فصل بهار بیشتر است. شکل ۱۶، پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار را در حضور وسایل سرمایشی در فصل تابستان و بهار در شش سال متوالی نشان می‌دهد. نتایج حاصل از بیشینه و کمینه درصد پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار بر حسب پیک بار شبکه BOSTON در فصول گرم، در سال‌های ۲۰۱۱ الی ۲۰۱۶ در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که میانگین بیشینه و کمینه منابع پاسخگویی تقاضا در فصل تابستان در بازه ۶/۲ الی ۱۲/۴۵ درصد و در فصل بهار در محدوده ۲/۲ الی ۲۲/۵ درصد در حال نوسان می‌باشد. مطابق با جدول ۳، متوسط مقادیر DR_{max} و DR_{min} در فصل تابستان نسبت به فصل بهار بیشتر است. این امر بیانگر حضور فعال‌تر وسایل سرمایشی در فصل تابستان در مقایسه با فصل بهار می‌باشد.

در پایان، مقایسه‌ای از نتایج به دست آمده در این تحقیق با مطالعه انجام‌شده در [۲۵] انجام می‌پذیرد. شایان ذکر است که به علت عدم دسترسی بودن اطلاعات مربوط به مدل‌های ارائه‌شده در سایر تحقیقات، امکان مقایسه فراهم نیست. در [۲۵]، شناسایی پتانسیل منابع سمت تقاضا



شکل ۱۳: تغییرات انرژی در حضور تغییرات دمایی در یک ساعت نمونه.



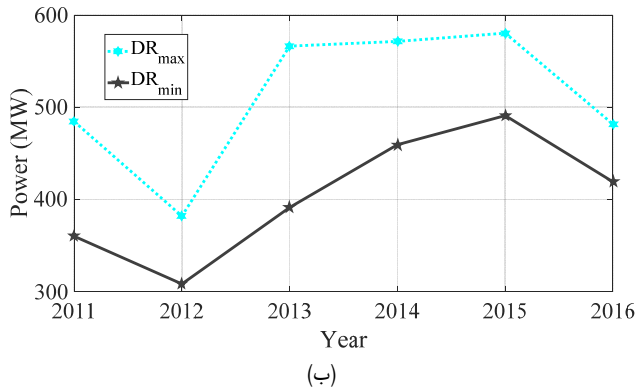
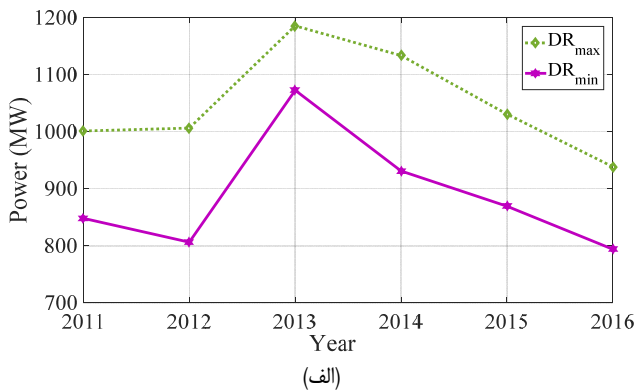
شکل ۱۴: خوشه‌بندی داده‌های مصرف انرژی در یک ساعت نمونه از فصل گرم مبتنی بر روش k-means.

جدول ۳: حداکثر و حداقل پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار (%) در فصل‌های بهار و تابستان.

فصل	سال	DR_{min}	DR_{max}	میانگین
تابستان	۲۰۱۱	٪۷	٪۱۱	٪۹
	۲۰۱۲	٪۳	٪۹٫۴	٪۶٫۲
	۲۰۱۳	٪۴٫۶	٪۱۰	٪۷٫۳
	۲۰۱۴	٪۱۳٫۵	٪۲۲٫۷	٪۱۸٫۱
	۲۰۱۵	٪۸٫۶	٪۱۵	٪۱۱٫۸
	۲۰۱۶	٪۸٫۴	٪۱۶٫۵	٪۱۲٫۴۵
بهار	۲۰۱۱	٪۴	٪۲۱	٪۲۲٫۵
	۲۰۱۲	٪۰٫۷	٪۳٫۷	٪۲٫۲
	۲۰۱۳	٪۱٫۶	٪۲٫۳	٪۱٫۹۵
	۲۰۱۴	٪۲	٪۶٫۸	٪۴٫۴
	۲۰۱۵	٪۱٫۶	٪۱۵	٪۸٫۳
	۲۰۱۶	٪۱٫۱	٪۲۷	٪۱۴٫۰۵

در شکل ۱۴، شمایی از خوشه‌بندی در ساعت ۵ بعد از ظهر سال ۲۰۱۶ نشان داده شده است. خوشه‌هایی که با افزایش دما انرژی آنها افزایش می‌یابد، حایز اهمیت هستند. فرایند خوشه‌بندی برای تمامی ساعات پیک در فصل‌های تابستان و بهار به صورت مجزا، مشابه با فصول سرد، در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ انجام می‌پذیرد.

پس از تعیین آستانه متوسط و آستانه بالای داده‌های انرژی مصرفی حساس به قیمت، در نمودار بازه اطمینان، میانگین بیشینه و متوسط بارگذاری در ساعات‌های مختلف پیک در فصل تابستان و فصل بهار تعیین می‌گردد. میانگین مقادیر ذکرشده در دو سال نمونه به اختصار در شکل ۱۵



شکل ۱۷: پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار شبکه برق BOSTON مبتنی بر الگوریتم MLL، (الف) فصول گرم و (ب) فصول سرد [۲۵].

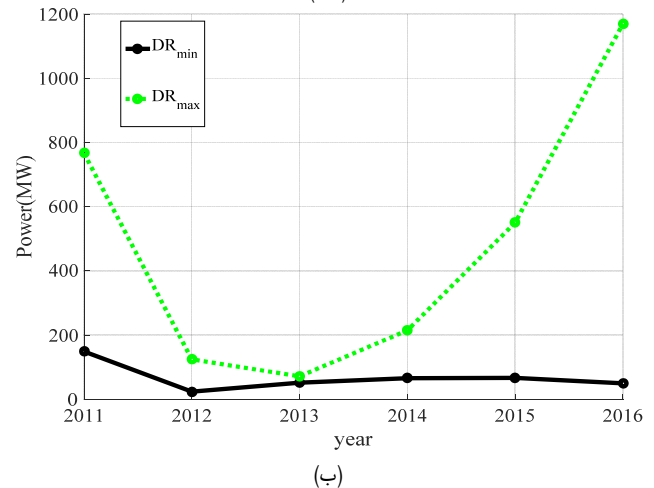
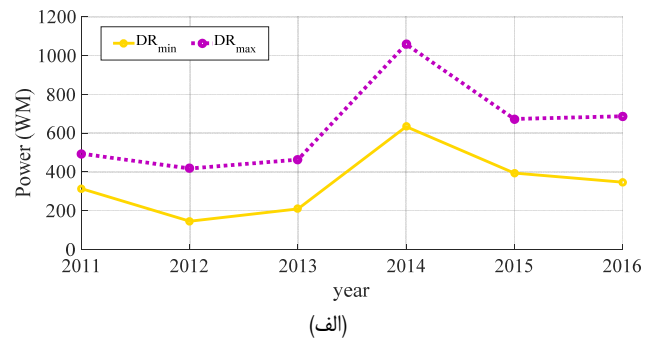
تا ۱۱٪ پیک بار در حال نوسان می‌باشد. همچنین ظرفیت منابع پاسخگویی بار در فصل‌های بهار و تابستان به طور میانگین بین ۲٪ تا ۲۲٫۵٪ و ۶٫۲٪ تا ۱۲٫۴۵٪ پیک بار، به ترتیب محاسبه شده است. واضح است که سهم مشارکت منابع پاسخگویی تقاضا در فصل تابستان در مقایسه با فصل بهار به علت حضور چشم‌گیرتر وسایل سرمایشی، قابل ملاحظه‌تر می‌باشد. بنابراین با مدیریت مناسب و بهینه وسایل سرمایشی و گرمایشی، علاوه بر کاهش پیک بارگذاری، هزینه‌های تحمیل شده به سیستم اعم از بهره‌برداری و برنامه‌ریزی کاهش خواهد یافت.

۵- فهرست علایم و اختصارات

در جدول ۴، علایم و اختصارات به کار رفته در مقاله آمده‌اند.

مراجع

- [1] R. Hassan and G. Radman, "Survey on smart grid," in *Proc. of the IEEE SoutheastCon 2010*, SoutheastCon'10, pp. 210-213, Concord, NC, USA, 18-21 Mar. 2010.
- [2] M. H. Albadi and E. F. El-Saadany, "Demand response in electricity markets: an overview," in *Proc. of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 5 pp., Tampa, FL, USA, 24-28 Jun. 2007.
- [3] F. Magnago, J. Alemany, and J. Lin, "Impact of demand response resources on unit commitment and dispatch in a day-ahead electricity market," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 68, pp. 142-149, Jun. 2015.
- [4] C. Bartusch and K. Alvehag, "Further exploring the potential of residential demand response programs in electricity distribution," *Applied Energy*, vol. 125, pp. 39-59, 15 Jul. 2014.
- [5] Z. Chen, L. Wu, and Y. Fu, "Real-time price-based demand response management for residential appliances via stochastic optimization and robust optimization," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1822-1831, Dec. 2012.
- [6] A. Moshari, A. Ebrahimi, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Short-term impacts of DR programs on reliability of wind integrated power systems considering demand-side uncertainties," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 2481-2490, May 2015.



شکل ۱۶: پتانسیل نامی پاسخگویی بار در فصول گرم در شش سال متوالی، (الف) تابستان و (ب) بهار.

با توجه به پارامترهای ورودی انرژی مصرفی و دمای شبکه برق BOSTON و اعمال آنها به الگوریتم بیشترین درستی (MLL)، انجام پذیرفته است. پتانسیل منابع سمت تقاضای به دست آمده در ساعات پیک در فصول گرم و سرد سال در [۲۵]، در شکل ۱۷ ترسیم شده است. با مقایسه شکل ۱۷ و شکل‌های ۱۲ و ۱۶ می‌توان نتیجه گرفت که نتایج به دست آمده در روش پیشنهادی در تحقیق حاضر، بسیار نزدیک به نتایج به دست آمده در [۲۵] است. لازم به ذکر است که اختلاف ایجادشده به علت عدم در نظرگیری اثرات پارامتر قیمت در الگوریتم MLL در [۲۵] است؛ حال آن که در مدل پیشنهادی در تحقیق حاضر، علاوه بر داده‌های انرژی مصرفی و دما، قیمت انرژی نیز به عنوان داده‌های ورودی به الگوریتم k-means در نظر گرفته شده است.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از تکنیک داده کاوی مبتنی بر الگوریتم k-means فعالیت یا عدم فعالیت وسایل سرمایشی و گرمایشی مبتنی بر تغییرات دمایی و قیمت انرژی مصرفی در ساعات پیک فصول گرم و سرد ارزیابی شده است. بدین منظور بر اساس فعالیت وسایل سرمایشی و گرمایشی و خوشه‌بندی مناسب داده‌های مصرف انرژی مبتنی بر تغییرات دمایی و قیمتی و همچنین استخراج نمودار بازه اطمینان بر مبنای تغییرات قیمت، پتانسیل منابع سمت تقاضا تعیین می‌گردد. لازم به ذکر است که پتانسیل منابع پاسخگویی بار با توجه به داده‌های آستانه متوسط و آستانه بالای نمودار بازه اطمینان و استفاده از شاخص‌های تعیین‌کننده حد فاصل کمینه و بیشینه داده‌های دو آستانه مذکور، شناسایی می‌شود. ساختار پیشنهادی ارائه شده با استفاده از اطلاعات شبکه برق BOSTON در طی ۶ سال متوالی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که ظرفیت منابع پاسخگویی بار برای فصول سرد به طور میانگین بین ۱٫۱٪

- [16] S. Gyamfi and S. Krumdieck, "Scenario analysis of residential demand response at network peak periods," *Electric Power Systems Research*, vol. 93, pp. 32-38, Dec. 2012.
- [17] O. Motlagh, G. Foliente, and G. Grozev, "Knowledge-mining the Australian smart grid smart city data: a statistical-neural approach to demand-response analysis," *Planning Support Systems and Smart Cities: Springer*, pp. 189-207, 2015.
- [18] D. P. Zhou, M. Balandat, and C. J. Tomlin, "Estimating treatment effects of a residential demand response program using non-experimental data," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Data Mining Workshops, ICDMW'17*, pp. 95-102, New Orleans, LA, USA, 18-21 Nov. 2017.
- [19] S. Park, S. Ryu, Y. Choi, and H. Kim, "A framework for baseline load estimation in demand response: data mining approach," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications, SmartGridComm'15*, pp. 638-643, Venice, Italy, 3-6 Nov. 2015.
- [20] Z. Luo, S. Hong, and Y. Ding, "A data mining-driven incentive-based demand response scheme for a virtual power plant," *Applied Energy*, vol. 239, pp. 549-559, 1 Apr. 2019.
- [21] dsp.ut.ac.ir/en/wpcontent/uploads/2015/09/S tatNLP-Lecture5 Clustering.pdf
- [22] J. Han, J. Pei, and M. Kamber, *Data Mining: Concepts and Techniques*, Elsevier, 2011.
- [23] -, *The Power Consumption Historical Data Boston Region*. Available at: <http://www.iso-ne.com>; [accessed 07.02.14].
- [24] Massachusetts Department of Energy Resources, *Clean Peak Energy Standard*, Available at: <https://www.mass.gov/service-details/clean-peak-energy-standard>.

[۲۵] ف. شیبانی، هد کشاورز و م. ملاحسنی پور، "تخمین پتانسیل منابع سمت تقاضا با توجه به تغییرات آب و هوایی"، *نشریه مهندسی و مدیریت انرژی*، سال ۱۱، شماره ۳، صص. ۶۶-۷۷، ۱۴۰۰.

فاطمه شیبانی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش مخابرات سیستم، به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ از دانشگاه مهندسی شهید نیکبخت زاهدان اخذ نمود. از سال ۱۳۹۹، دانشجوی دکتری مهندسی برق دانشگاه سیستان و بلوچستان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل شبکه‌های هوشمند، هوش مصنوعی و پردازش سیگنال می‌باشند.

مژگان ملاحسنی پور تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق گرایش سیستم‌های قدرت، به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۲، ۱۳۸۹، ۱۳۹۶ از دانشگاه شهید باهنر کرمان اخذ نمود. از سال ۱۳۹۶، استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سیستان و بلوچستان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، مدیریت انرژی، شبکه‌های هوشمند و بازار برق می‌باشند.

هنگامه کشاورز تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در دانشگاه فردوسی مشهد به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۶ و ۱۳۸۰ به پایان رساند. وی از سال ۱۳۸۰ به عنوان مربی در دانشگاه سیستان و بلوچستان مشغول به کار شد. سپس، مدرک دکتری مهندسی برق و کامپیوتر (با تخصص شبکه‌های بی‌سیم) را از دانشگاه واترلو، کانادا در سال ۱۳۸۸ اخذ نمود. وی در سال ۱۳۸۸ به مدت یک سال دوره پسادکتری را در دانشگاه منیتوبا، کانادا تحت راهنمایی پروفسور اکرام حسین گذراند. وی از سال ۱۳۸۹ به عنوان استادیار در دانشگاه سیستان و بلوچستان مجدد مشغول به کار شد و هم‌اکنون دانشیار گروه مهندسی مخابرات می‌باشد. زمینه‌های تخصصی پژوهشی ایشان لایه فیزیکی شبکه‌های بی‌سیم، سیستم‌های راداری، شبکه برق هوشمند و پردازش آرایه‌ای سیگنال‌ها در مخابرات صوتی زیرآب می‌باشد.

جدول ۴: فهرست علائم و اختصارات.

پارامتر	توضیح
DR	منابع سمت تقاضا
k	تعداد خوشه‌ها
J	مربع فاصله نمونه داده‌ها از مرکز خوشه‌ها
r_{nk}	تعلق/عدم تعلق نمونه n ام به خوشه k ام
μ_k	مرکز خوشه‌ها
μ_k^{new}	به روز رسانی مرکز خوشه‌ها
$\circ F$	درجه فارنهایت
N	تعداد داده‌ها
x_i	داده i ام
μ	میانگین
σ	انحراف معیار
T_L	آستانه پایین
T_M	آستانه متوسط
T_U	آستانه بالا
$P_u(t)$	توان مصرفی بیشینه
$P_M(t)$	توان مصرفی متوسط
DR_{max}	حداکثر پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار
DR_{min}	حداقل پتانسیل نامی منابع پاسخگویی بار

- [7] A. Tabandeh, A. Abdollahi, and M. Rashidinejad, "Reliability constrained congestion management with uncertain negawatt demand response firms considering repairable advanced metering infrastructures," *Energy*, vol. 104, pp. 213-228, 1 Jun. 2016.
- [8] N. Li, L. Chen, and S. H. Low, "Optimal demand response based on utility maximization in power networks," *Proc. of the IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 8 pp., Detroit, MI, USA, 24-28 Jul. 2011.
- [9] W. Shi, N. Li, X. Xie, C. C. Chu, and R. Gadh, "Optimal residential demand response in distribution networks," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 7, pp. 1441-1450, Jul. 2014.
- [10] Z. Sun and L. Li, "Potential capability estimation for real time electricity demand response of sustainable manufacturing systems using Markov Decision Process," *J. of Cleaner Production*, vol. 65, pp. 184-193, 15 Feb. 2014.
- [11] M. López, S. De La Torre, S. Martín, and J. Aguado, "Demand-side management in smart grid operation considering electric vehicles load shifting and vehicle-to-grid support," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 689-698, Jan. 2015.
- [12] V. M. Shiljkut and N. L. Rajakovic, "Demand response capacity estimation in various supply areas," *Energy*, vol. 92, pt. 3, pp. 476-486, 1 Dec. 2015.
- [13] W. J. Cole, et al., "Community-scale residential air conditioning control for effective grid management," *Applied Energy*, vol. 130, pp. 428-436, 1 Oct. 2014.
- [14] M. Hu, F. Xiao, and L. Wang, "Investigation of demand response potentials of residential air conditioners in smart grids using grey-box room thermal model," *Applied Energy*, vol. 207, pp. 324-335, 1 Dec. 2017.
- [15] R. Deshmukh, G. Ghatikar, R. Yin, G. G. Das, and S. K. Saha, "Estimation of potential and value of demand response for industrial and commercial consumers in Delhi," in *Proc. India Smart Grid Week, ISGW'15*, 7 pp., 2015.