

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۲۴

تخمین پتانسیل منابع سمت تقاضا با توجه به تغییرات آب و هوایی

فاطمه شیبانی^۱، هنگامه کشاورز^{۲*}، مژگان ملاحسنی پور^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

ftm_sheibani@yahoo.com

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

keshavarz@ece.usb.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

m.mollahassani@ece.usb.ac.ir

چکیده: در بستر شبکه‌های هوشمند الکتریکی، بهره‌گیری از منابع سمت تقاضا (منابع پاسخ‌گویی بار)، مدیریت مناسب‌تر تقاضای روزافزون انرژی و همچنین کاهش چشمگیر هزینه‌های متحمل‌شده سیستم را فراهم می‌آورد. تعیین پتانسیل منابع سمت تقاضا به‌علت اثرگذاری بر برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت تا بلندمدت سیستم قدرت، حائز اهمیت است. مقاله حاضر، به ارائه ساختاری دومارحله‌ای به‌منظور شناسایی پتانسیل نامی منابع پاسخ‌گویی تقاضا، بر مبنای تغییرات الگوی مصرف انرژی و تغییرات دمایی در افق زمانی سالیانه می‌پردازد. در مرحله اول، با استفاده از روش تخمین نمونه، آستانه دمایی عملکرد وسایل سرمایشی و گرمایشی تعیین می‌شود. در مرحله دوم، بر اساس آستانه عملکردی وسایل سرمایشی و گرمایشی، داده‌های مصرف انرژی به دو بخش تفکیک می‌شوند؛ سپس با اعمال ضرایب مختلف به منحنی تقاضا متوسط روزانه و منحنی تقاضا برابری روزانه، میزان بار انعطاف‌پذیر (پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا) تعیین می‌شود. در پایان، با آنالیز آماری پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا به‌دست‌آمده در سال‌های مختلف، پتانسیل نامی منابع مجازی سمت تقاضا در فصول گرم و سرد مشخص می‌گردد. ساختار پیشنهادی، با استفاده از داده‌های مصرف انرژی و داده‌های دمایی شهر BOSTON مورد ارزیابی قرار می‌گیرد؛ نتایج حاکی از میزان تفاوت در پتانسیل نامی با توجه به تغییرات دوره‌ای دماست.

واژه‌های کلیدی: انرژی مصرفی، پاسخ‌گویی تقاضا، تغییرات دمایی، شبکه هوشمند.

بر بهبود پارامترهای اقتصادی [۴]، زیست‌محیطی [۵] و قابلیت اطمینان [۶] پرداخته شده است. در این میان، شناسایی دقیق‌تر پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا در راستای برنامه‌ریزی هرچه کامل‌تر سیستم قدرت حائز اهمیت است. تاکنون روش‌های مختلفی که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود، به‌منظور محاسبه پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا به کار گرفته شده است [۷-۱۹]. در مرجع [۷]، با استفاده از تقریب از پایین به بالا، انرژی مصرفی مصرف‌کنندگان خانگی در یک منطقه مشخص تخمین زده می‌شود؛ سپس با در نظر گرفتن طرح‌های متنوع کاهش تقاضا و شیفت تقاضا در ساعت‌های اوج مصرف، میزان پتانسیل نامی داوطلبانه منابع سمت تقاضا محاسبه می‌شود. در مرجع [۸]، با استفاده از ساختاری پویا، به مدیریت انرژی مصرفی بارهای قابل کنترل در هریک از مشترکین خانگی پرداخته شده است. با استفاده از تقریب پایین به بالا، تخمین دقیقی از پتانسیل منابع قابل کنترل خانگی از جمله خودروهای برقی، با هدف کمیته‌سازی هزینه پرداختی مشترک خانگی انجام شده است. همچنین نشان داده شده است که قیمت متغیر با زمان انرژی مصرفی، انگیزه مناسبی برای مصرف‌کننده در برنامه‌ریزی بهینه ایجاد می‌کند. در مرجع [۹]، با اعمال برنامه بهینه‌سازی مدیریت بار خانگی و استفاده از خودرو الکتریکی ترکیبی قابل اتصال به شبکه، سبب اصلاح مصرف برق و هزینه‌ها، در ساعات اوج بار می‌شود. نتایج نشان می‌دهد ارائه برنامه بهینه‌سازی تا ۲۲٪ هزینه پرداختی کاهش می‌یابد. در مرجع [۱۰]، با تحلیل اطلاعات مصرف انرژی و سیگنال‌های قیمتی برای یک مکان پایلوت در شبکه، پتانسیل مشارکت مصرف‌کنندگان صنعتی و تجاری شبکه برق دهلی در برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا، تخمین زده شده است. همچنین با استفاده از میزان اثرگذاری برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا بر کاهش قیمت انرژی در بازار برق، ارزش منابع سمت تقاضا تعیین شده است. در مرجع [۱۱-۱۲]، برنامه‌ریزی منابع سمت تولید و منابع پاسخ‌گویی تقاضا به‌نحوی انجام شده است که قیود مرتبط به بهره‌برداری در شبکه توزیع لحاظ شده است؛ درحالی‌که میزان مشارکت مشترکین خانگی در برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا وابسته به محل حضور مشترک در شبکه است. در مرجع [۱۳]، اثرات سیگنال‌های پاسخ‌گویی تقاضا بر تغییر الگو مصرف، با استفاده از مدل‌های متنوع بازگشتی از جمله بازگشتی^۲ خطی ساده و بازگشتی خطی چندگانه بررسی شده است. با توجه به عملکرد مشترکین در پاسخ به سیگنال‌های ارسالی، پتانسیل منابع سمت تقاضا تعیین و

تغییر ساختار کنونی سیستم قدرت و هوشمندسازی آن در راستای مدیریت بهتر و رفع مشکلاتی از جمله تبادل یک‌طرفه اطلاعات از سمت تولید به مصرف، عدم قابلیت به‌کارگیری مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌ریزی و عدم به‌کارگیری مناسب منابع تولید پراکنده حائز اهمیت است. شبکه قدرت هوشمند به‌معنای بهره‌گیری از تکنولوژی‌های مدرن به‌منظور برقراری ارتباط دوجانبه بین مصرف‌کننده و تأمین‌کننده توان الکتریکی است. این شبکه‌ها امکان کنترل برخط تمام تجهیزات و ادوات سیستم قدرت را در راستای بهبود کارایی سیستم، امنیت انتقال، انعطاف‌پذیری و بهبود وضعیت بهره‌برداری دارند. در این شبکه‌ها به‌منظور مدیریت مؤثر، تبادل اطلاعات سمت مصرف و تولید و همچنین ردیابی و کشف خطا، مجموعه‌ای از ادوات هوشمند شامل سنسورها و کنتورهای پیشرفته، ماهواره‌ها و شبکه‌های کامپیوتری به کار گرفته می‌شوند. کنتورهای هوشمند از طریق در اختیار قرار دادن اطلاعات مربوط به قیمت‌های خرید و فروش انرژی، علاوه بر آزادی انتخاب، قابلیت مبادله توان را برای مشترکین فراهم می‌کنند و منتج به کاهش هزینه تأمین انرژی می‌شوند. در این میان، مشارکت مشترکین در برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت [۱] تا بلندمدت [۲] سیستم قدرت، که در سایه مفهومی با عنوان «پاسخ‌گویی بار» صورت می‌گیرد، به لطف قابلیت‌هایی که هوشمندسازی شبکه‌های قدرت در اختیار قرار می‌دهند، تحقق می‌پذیرد. پاسخ‌گویی تقاضا را می‌توان ایجاد تغییر در مصرف برق توسط مشترکین از حالت طبیعی مصرف آن‌ها در پاسخ به تغییرات قیمت برق در طول زمان تعریف کرد. انجمن انرژی آمریکا، پاسخ‌گویی تقاضا را تغییر در الگوی مصرف انرژی توسط مصرف‌کنندگان، در پاسخ به تغییر قیمت برق در طول زمان، یا تشویق به عدم مصرف در زمان افزایش قیمت، یا زمان کاهش قابلیت اطمینان معرفی کرده است. برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به دو دسته کلی برنامه‌های تشویقی محور و برنامه‌های تعرفه زمانی تقسیم می‌شوند. برنامه‌های تشویقی محور با پرداخت تشویق به مشتریان و یا اجرای طرح جریمه در قبال پیروی کردن از قراردادها، تغییرات دلخواه و مطلوب منحنی بار را فراهم می‌آورند. در برنامه‌های تعرفه زمانی، برخلاف برنامه‌های تشویقی، مصرف‌کنندگان تشویق به کاهش مصرف برق نمی‌شوند؛ بلکه با اعمال مناسب قیمت‌گذاری برق، مصرف‌کنندگان به سمتی حرکت خواهند کرد که مدنظر تولیدکنندگان یا گردانندگان بازار باشد [۳]. در مطالعات و برنامه‌ریزی‌های سیستم قدرت، به بررسی اثرات منابع سمت تقاضا

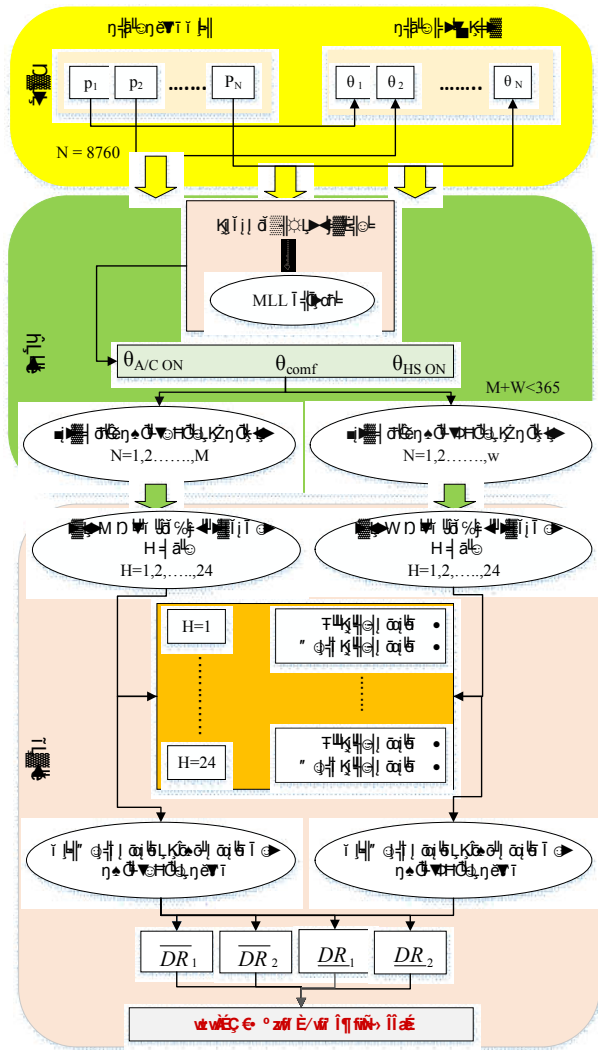
تعیین شده، دمای محیط و شیب دمایی، پتانسیل منابع سمت تقاضا مشترک محاسبه می‌شود. در مرجع [۱۹]، با ارائه یک ساختار مبتنی بر تغییرات مصرف انرژی، در روز مشخصی از دو سال، پتانسیل منابع سمت تقاضا تعیین می‌شود. ابتدا به‌ازای کمینه و بیشینه دمای محیط، منحنی‌های مصرف انرژی در دو سال در فصول گرم/سرد تعیین می‌شود؛ سپس با توجه به اختلاف بیشینه و کمینه مصرف و با معرفی چهار پارامتر، کمینه و بیشینه پتانسیل منابع سمت تقاضا تعیین می‌گردد.

همان گونه که از مرور مطالعات مشخص شد، استفاده از اطلاعات مصرف انرژی و دمای محیط، عامل مهمی در تعیین پتانسیل منابع سمت تقاضاست. در این میان، زمان حضور وسایل گرمایشی/سرمایشی در شبکه با توجه به آستانه دمای عملکردی آن‌ها و برآورد پتانسیل قابل صرفه‌جویی از طریق مدیریت این منابع، ضروری است. در مرجع [۱۸]، صرفاً اثرات حضور وسایل سرمایشی در شبکه با توجه به آستانه دمای عملکردی مورد ارزیابی قرار گرفته و در نتیجه، پتانسیل پاسخ‌گویی تقاضا در فصول گرم تعیین شده است. حال آنکه توجه به تفاوت پتانسیل منابع پاسخ‌گویی بار، در فصول گرم و سرد حائز اهمیت است. در مرجع [۱۹]، اگرچه به تفاوت پتانسیل منابع پاسخ‌گویی در فصول سرد و گرم توجه شده است، بی‌توجهی به مسائلی از جمله تغییر الگوی زندگی، رفاه اجتماعی، رشد جمعیت و همچنین مقایسه کمینه و بیشینه مصرف در سال‌های غیرمتوالی با اختلاف بازه زمانی هفت سال، تخمین صحیحی از ظرفیت این منابع صورت نمی‌پذیرد. از سوی دیگر، مقایسه کمینه مصرف و بیشینه مصرف که صرفاً در تعداد محدودی از روزهای سال رخ می‌دهند و بی‌توجهی به میزان بارگذاری متوسط شبکه و همچنین بی‌توجهی به آستانه دمای عملکردی وسایل سرمایشی/گرمایشی در شبکه، از دیگر خلأهای تحقیقاتی مطالعه [۱۹] است. بنابراین طبق موارد مذکور، در مقاله حاضر، با ارائه ساختاری جامع‌تر، به تخمین پتانسیل منابع پاسخ‌گویی تقاضا در فصول گرم و سرد پرداخته می‌شود. ساختار دومرحله‌ای ارائه‌شده در مقاله حاضر مبتنی بر تغییرات الگوی مصرف انرژی و تغییرات دمایی است که در آن ضمن توجه به تفاوت پتانسیل منابع پاسخ‌گویی تقاضا در فصول سرد و گرم، آستانه دما عملکردی وسایل گرمایشی/سرمایشی، و همچنین میانگین بارگذاری متوسط شبکه نیز لحاظ شده‌اند. در مرحله اول، با استفاده از روش تخمین نمونه، آستانه دمایی عملکردی وسایل گرمایشی/سرمایشی تعیین می‌شود. در مرحله دوم، بر اساس آستانه دمایی

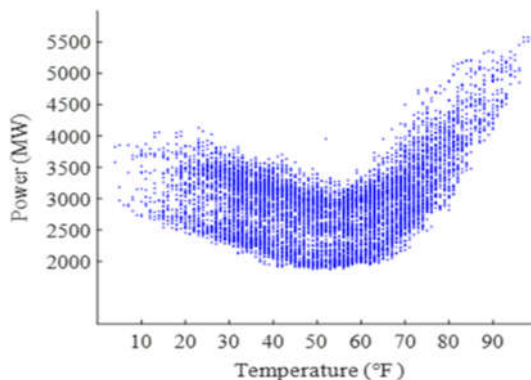
نشان داده شده است که اطلاعات هرچه بیشتر درباره مصرف‌کنندگان، لزوماً به معنای تخمین دقیق‌تر نیست. در مرجع [۱۴]، اثرات مشارکت منابع سمت تقاضا و منابع تولید پراکنده، بر کاهش پیک بار شبکه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در اینجا با توجه به عملکرد متفاوت مصرف‌کنندگان در پاسخ به میزان مشوق پرداختی و بهره‌گیری از تکنیک‌های داده‌کاوی نظیر الگوریتم OPTIC^۱ و KNN^۲، مشترکین دسته‌بندی می‌شوند؛ سپس با توجه به میزان پتانسیل منابع سمت تقاضا تخمین زده شده، برنامه‌ریزی شبکه با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری انجام می‌شود. نشان داده شده است که با توجه به الگوی مشوق پرداختی، گروه‌بندی مشترکین تغییر خواهد کرد و منتج به تغییرات در پتانسیل منابع پاسخ‌گویی تقاضا خواهد شد. در مرجع [۱۵]، با توجه به تخمین بار پایه با استفاده از روش‌های داده‌کاوی SOM^۳ و K-means^۴ و مقایسه آن با پروفیل واقعی بار، پتانسیل منابع سمت تقاضا تعیین شده است. با استفاده از روش‌های داده‌کاوی، الگوهای بارگذاری تخمین زده مشابه با الگوهای بارگذاری روزانه در حضور برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، شناسایی می‌شوند. در مرجع [۱۶]، با تمرکز بر میزان مصرف وسایل سرمایشی/گرمایشی مجهز به ترموستات قابل کنترل، میزان مشارکت مصرف‌کنندگان خانگی در برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا تعیین می‌شود. از طریق ارسال سیگنال‌های قیمت زمان واقعی به مرکز کنترل ترموستات، نحوه عملکرد این وسایل مدیریت می‌شود. در نتیجه مدیریت مصرف، میزان بار مصرفی شبکه در ساعات اوج و میزان پرداختی مشترکین خانگی کاهش می‌یابد. در مرجع [۱۷]، میزان کاهش پیک بار را، که معرف پتانسیل منابع سمت تقاضاست، از طریق برنامه‌های متنوع کنترل مستقیم بار سرمایشی/گرمایشی خانگی تعیین می‌شود. در اینجا به منظور مدیریت بار و تعیین پتانسیل منابع سمت تقاضا، روش‌های متفاوت بازگشتی چندگانه و بازگشتی سری زمانی استفاده شده است که لزوماً نتایج یکسانی را در زمان انتخابی (روز/ساعت) ندارند. در مرجع [۱۸]، پتانسیل پاسخ‌گویی تقاضا در بخش خانگی با استفاده از داده‌های مصرف انرژی تخمین زده شده است. در ابتدا با به‌کارگیری الگوریتم حداکثر درست‌نمایی^۴ (MLL) آستانه دمایی عملکردی وسایل سرمایشی تخمین زده شده است؛ سپس با توجه به داده‌های تجمع‌یافته، شیب دمایی و درجه حرارت مرتبط با عملکرد وسایل سرمایشی تعیین می‌گردد و در نهایت با توجه به درجه حرارت

1. Ordering Points to Identify the Clustering
2. K-Nearest-Neighbor
3. Self-Organizing Map
4. Maximum Likelihood

افزایش انرژی، در زمان‌های کاهش چشمگیر دما نیز صادق است. در شکل (۲)، میزان توان مصرفی ساعتی در یک سال با توجه به تغییرات دمایی، در منطقه نمونه ترسیم شده است. بنابراین با توجه به تغییرات مصرف انرژی در مقایسه با تغییرات دما، و به تبع آن حضور وسایل سرمایشی و گرمایشی در شبکه برق، پتانسیل منابع سمت تقاضا قابل تخمین است.



شکل (۱): طرح‌واره ساختار پیشنهادی مسئله تخمین پتانسیل نامی



شکل (۲): تغییرات انرژی مصرفی در مقایسه با تغییرات دمایی در منطقه نمونه

وسایل گرمایشی / سرمایشی، داده‌های مصرف انرژی به دو بخش تفکیک می‌شوند. سپس با توجه به آنالیز آماری، میانگینی از متوسط بارگذاری روزانه و میانگینی از بارگذاری بیشینه در حضور وسایل گرمایشی / سرمایشی به دست می‌آید. با اعمال ضرایبی، تغییرات دو منحنی مذکور در هر بخش آنالیز می‌شود؛ که معرف پتانسیل نامی منابع سمت تقاضاست. در پایان، با استفاده از روش‌های آماری و آنالیز ظرفیت‌های نامی منابع سمت تقاضا در افق زمانی چندساله، پتانسیل نامی منابع مجازی سمت تقاضا در یک منطقه مشخص می‌شود. مقاله پیش رو بدین صورت ساختار یافته است: ساختار پیشنهادی در خصوص شناسایی پتانسیل منابع سمت تقاضا در بخش ۲ به تفصیل بیان شده است. بخش ۳ نتایج شبیه‌سازی بر روی داده‌های مصرف انرژی و داده‌های دمایی شهر BOSTON را نشان می‌دهد، در پایان، نتیجه بحث در بخش ۴ ارائه شده است.

۲. ساختار پیشنهادی تعیین پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا

همان‌گونه که در مقدمه مقاله اشاره شد، روش‌های متنوعی به‌منظور شناسایی پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا وجود دارد که عمدتاً مبتنی بر تغییرات الگو مصرف انرژی با توجه به تغییرات دمایی هستند. در شکل (۱)، ساختاری دو مرحله‌ای به‌منظور تعیین پتانسیل منابع سمت تقاضا بر مبنای تغییرات الگوی مصرف انرژی و نوسانات دما ارائه شده است. در مرحله اول، آستانه دمایی عملکرد وسایل سرمایشی^۱ (A/C) و گرمایشی^۲ (HS) مشخص می‌شود. در مرحله دوم، بر اساس آستانه عملکردی وسایل گرمایشی و سرمایشی و به‌کارگیری ضرایب مختلف، تغییرات منحنی تقاضا متوسط با منحنی تقاضا پرباری آنالیز می‌شود؛ نتایج حاصل معرف میزان بار انعطاف‌پذیر (پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا) است.

۱.۲. مرحله اول: تعیین آستانه دمایی عملکرد وسایل سرمایشی و گرمایشی

میزان مصرف انرژی الکتریکی با توجه به تغییرات آب‌وهوایی تغییر می‌یابد و تغییرات مصرف انرژی در یک محدوده مشخص دمایی (محدوده آسایش)، تقریباً ثابت است؛ حال آنکه در فصول گرم سال، با افزایش درجه‌حرارت محیط، به‌منظور خنک‌سازی محیط داخلی و کاهش دمای ساختمان، میزان مصرف انرژی افزایش می‌یابد؛ این

1. Air Conditioning
2. Heat Storage

θ_{conf} دمای آسایش، θ_{conf}^{min} به ترتیب بیشینه و کمینه دمای قابل تحمل هستند.

$$\theta_{conf}^{min} < \theta_{conf} < \theta_{conf}^{max} \quad (2)$$

$$\theta_{HS}(t) < \theta_{conf}^{min} \quad (3)$$

با توجه به مشخص شدن آستانه دمای عملکرد وسایل سرمایشی و گرمایشی در هر فصل، داده‌های موجود مصرف انرژی به دو بخش تقسیم می‌شوند؛ لذا پتانسیل نامی مشارکت منابع سمت تقاضا در هر دوره، متناسب با تغییرات آب‌وهوایی انجام می‌پذیرد که در ادامه به تفصیل به آن پرداخته می‌شود.

۲.۲. مرحله دوم: تعیین پتانسیل منابع سمت تقاضا متناسب با تغییرات دمایی

در این مرحله، داده‌های تفکیک‌شده در هر بخش (بخش عملکردی وسایل سرمایشی، بخش عملکردی وسایل گرمایشی)، با استفاده از نمودار بازه اطمینان به سه ناحیه تقسیم می‌شوند. نمودار بازه اطمینان در هر بخش عملکردی (گرمایشی / سرمایشی)، بر اساس میزان مصرف انرژی روزانه داده‌های موجود در هر ساعت به دست می‌آید. برای مثال اگر داده‌های روزانه موجود در بخش عملکرد وسایل سرمایشی برابر با ۱۰۰۰ روز باشد، می‌بایستی ۲۴ نمودار بازه اطمینان با توجه به ۱۰۰۰ نمونه موجود ترسیم گردد. در شکل (۴)، نمودار بازه اطمینان مربوط به یک ساعت نمونه در یک بخش عملکردی، سرمایشی یا گرمایشی، ترسیم شده است. نمودار بازه اطمینان توان مصرفی در هر ساعت بر اساس رابطه (۴) تعیین می‌شود؛ T_M ، T_L و T_U ، به ترتیب معرف آستانه پایین، آستانه متوسط و آستانه بالای داده‌ها هستند. مقدار میانگین و مقدار انحراف معیار داده‌ها با μ و σ نشان داده شده‌اند؛ همچنین x_i نشان‌دهنده مقدار داده i ام و N نمایانگر تعداد نمونه‌هاست.

$$T_L < (\mu - \sigma); (\mu - \sigma) < T_M < (\mu + \sigma); T_U > (\mu + \sigma).$$

where :

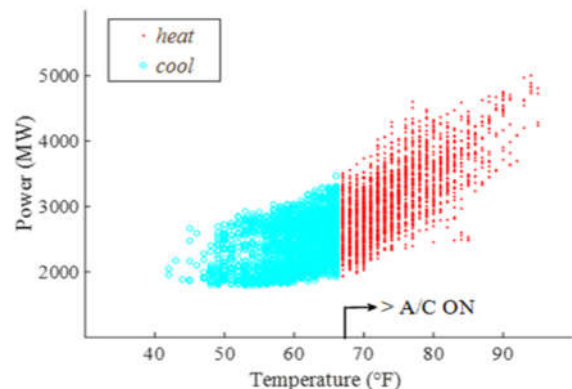
$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (4)$$

عموماً بیش از ۷۰٪ تغییرات مصرف توان در یک ساعت در یک محدوده مشخص (آستانه متوسط نمودار بازه اطمینان) قرار می‌گیرند و فقط بخش کوچکی از این تغییرات در آستانه بالای نمودار بازه اطمینان (حدود ۱۵٪) دسته‌بندی می‌شوند؛ حال آنکه با مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخ‌گویی تقاضا، می‌توان این افزایش مصرف را که فقط در تعداد روزهای محدودی از سال رخ می‌دهد، پوشش داد و از تحمیل هزینه‌های مازاد به سیستم قدرت جلوگیری

بر اساس مدل بازگشتی و منحنی توان-دما منطقی، آستانه دمایی که در آن وسایل سرمایشی فعال می‌شوند، قابل تشخیص است. با توجه به شکل (۲) مشخص است که در تمامی روزهایی که متوسط دما بیش از ۵۵ درجه فارنهایت است، منحنی انرژی مصرفی دارای شیب افزایشی قابل توجهی با توجه به تغییرات دمایی دارد؛ لذا با به‌کارگیری الگوریتم‌های کلاس‌بندی و الگوریتم تقریب حداکثر درست‌نمایی (MLL)، می‌توان آستانه دمایی فعالیت وسایل سرمایشی بر اساس رابطه (۱) تخمین زد [۱۷]. در رابطه (۱)، $N(e_i; 0, \sigma^2)$ مقدار تابع چگالی احتمال مقدار خطا برای مشاهده در لحظه t با میانگین خطا صفر و واریانس σ^2 است. f_{dg} بخشی از زمان است که در آن فعالیت A/C تخمین زده می‌شود. $f_{>cp}$ بخشی از زمان بالای cp تغییرات نقطه‌ای آستانه روشن شدن وسایل A/C، c_i شاخص دسترسی به وسایل سرمایشی، T_i درجه‌حرارت خارجی است.

$$LL_i = \log(N(e_i; 0, \sigma^2)) + \begin{cases} \log\left(\frac{f_{dg}}{f_{>cp}}\right); & c_i = 1 \\ \log\left(1 - \frac{f_{dg}}{f_{>cp}}\right); & c_i = 0 \quad T_i > cp \\ \log(1); & T_i \leq cp \end{cases} \quad (1)$$

با توجه به میزان مصرف انرژی در روزهای گرم منحنی توان-دمای داده‌شده شکل (۲) و به‌کارگیری الگوریتم MLL، آستانه دمایی عملکرد A/C برابر با ۶۸ درجه فارنهایت می‌باشد که در شکل (۳) ترسیم شده است. همان‌گونه که در شکل (۳) مشخص است، داده‌های مصرف انرژی در بخش سمت راست، به دو قسمت تقسیم شده‌اند؛ داده‌های آبی‌رنگ نمایانگر عدم فعالیت A/C و داده‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده حضور وسایل A/C در شبکه برق هستند.



شکل (۳): آستانه دمایی فعالیت وسایل سرمایشی بر مبنای الگوریتم MLL

در صورتی که محدوده دمای آسایش مصرف‌کننده به صورت رابطه (۲) تعیین شود، آستانه دمایی عملکرد وسایل گرمایشی، $\theta_{HS}(t)$ ، به صورت رابطه (۳) قابل تعریف است. در رابطه (۲)،

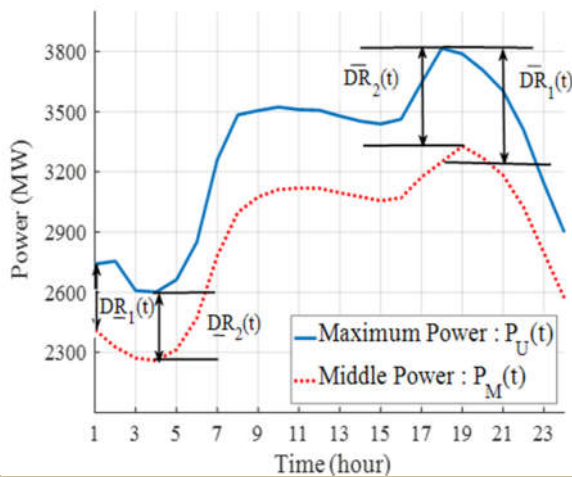
منحنی $P_U(t)$ و $P_M(t)$ می‌باشد. تمامی پارامترهای تعریف‌شده در روابط (۵) تا (۸) در شکل (۵) نشان داده شده‌اند [۱۹].

$$\overline{DR}_1 = \max(P_U(t) - P_M(t)) \quad (5)$$

$$\overline{DR}_2 = \max(P_U(t)) - \max(P_M(t)) \quad (6)$$

$$\underline{DR}_1 = \min(P_U(t) - P_M(t)) \quad (7)$$

$$\underline{DR}_2 = \min(P_U(t)) - \min(P_M(t)) \quad (8)$$



شکل (۵): منحنی‌های میانگین توان مصرفی روزانه در شرایط بارگذاری متوسط و بیشینه

به منظور حذف وابستگی‌های ناسازگار، کاهش افزونگی و بهبود کارایی، ظرفیت‌های کمینه و بیشینه محاسبه‌شده منابع پاسخ‌گویی تقاضا، طبق رابطه (۹) نرمالیزه می‌شوند. مقادیر نرمالیزه‌شده کمینه و بیشینه پتانسیل منابع پاسخ‌گویی تقاضا، به ترتیب با \overline{DR}^n و \underline{DR}^n نشان داده شده‌اند. در رابطه (۹)، i کوچک‌ترین مقدار صحیح است به گونه‌ای که مقدار نرمالیزه‌شده کمتر از یک باشد [۲۰].

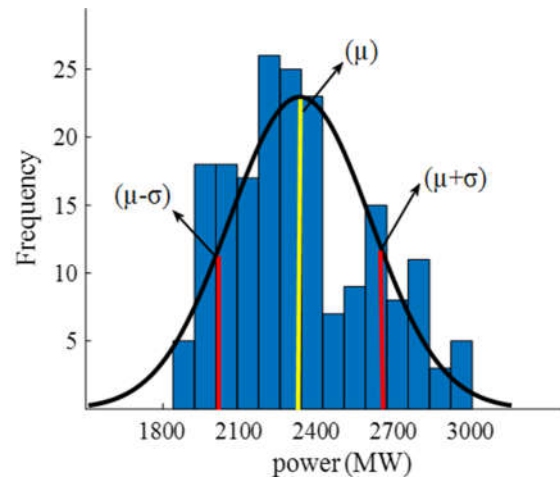
$$\overline{DR}_j^n = \frac{\overline{DR}_j}{10^i} \quad \& \quad \underline{DR}_j^n = \frac{\underline{DR}_j}{10^i}; \quad \text{where: } j = 1, 2 \quad (9)$$

$$\max(|DR^n|) < 1$$

۳. نتایج شبیه‌سازی

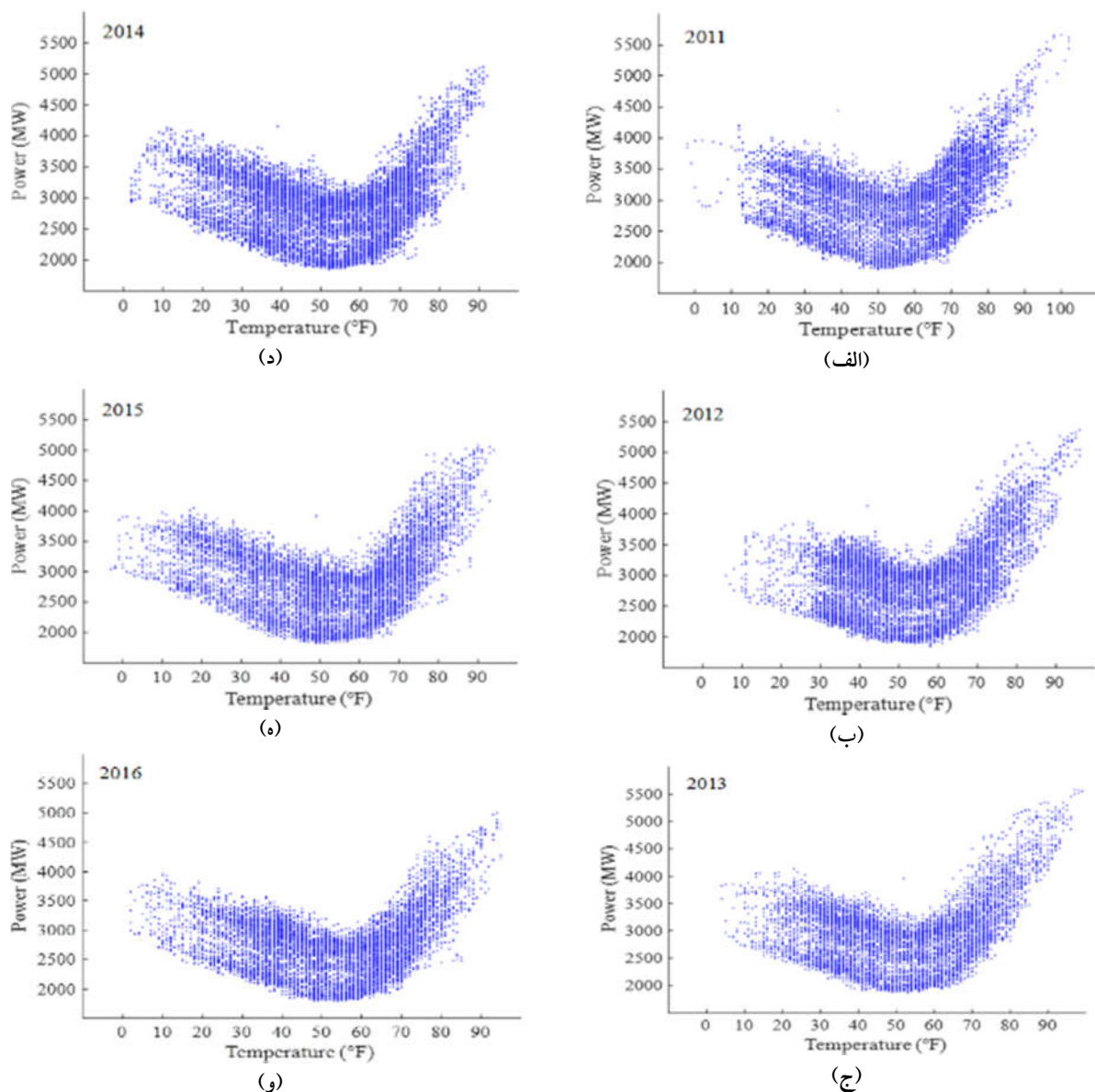
به منظور شبیه‌سازی مسئله تخمین پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا در دوره سرد و گرم سال، از اطلاعات دمایی و انرژی مصرفی شهر BOSTON در بازه زمانی ژانویه سال ۲۰۱۱ تا دسامبر سال ۲۰۱۶ استفاده شده است [۲۱]. منحنی تغییرات انرژی مصرفی در مقایسه با تغییرات دمایی در شش سال ذکر شده در شکل (۶) ترسیم شده است.

کرد؛ لذا با مقایسه منحنی بار روزانه مربوط به آستانه متوسط و آستانه بالا، پتانسیل نامی منابع پاسخ‌گویی تقاضا که به عنوان یک منبع مجازی تولید تلقی می‌شود، قابل محاسبه است. بنابراین با میانگین‌گیری از داده‌های موجود در آستانه‌های نمودار بازه اطمینان در هر ساعت، منحنی بار میانگین روزانه، مرتبط با آستانه متوسط و آستانه بالا در هریک از بخش‌های عملکردی وسایل سرمایشی/گرمایشی به دست می‌آید.



شکل (۶): نمودار بازه اطمینان توان مصرفی در یک ساعت نمونه از بخش عملکردی سرمایشی/گرمایشی

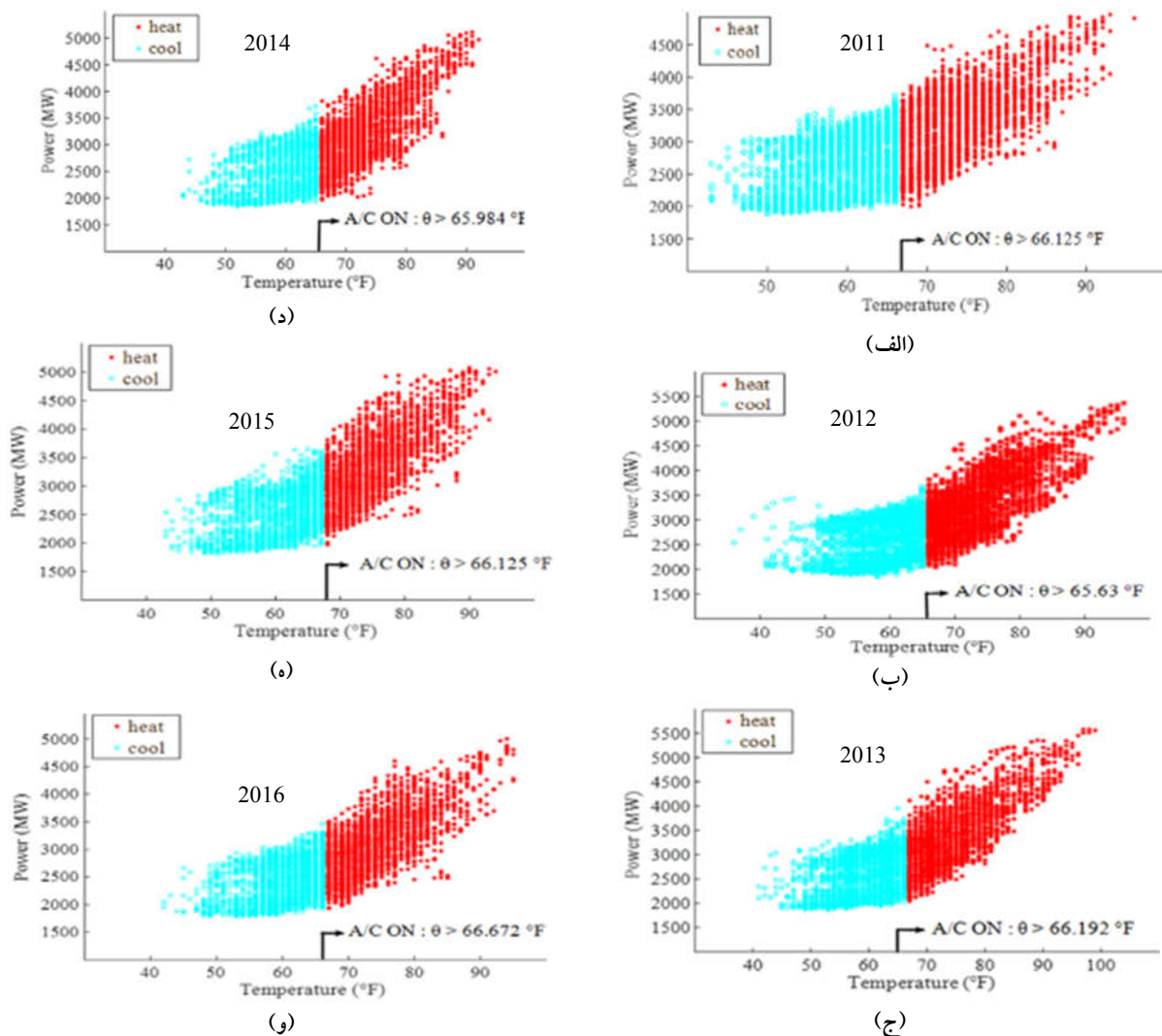
در شکل (۵)، منحنی‌های متوسط بار روزانه در آستانه بالا (بارگذاری بیشینه) و آستانه متوسط (بارگذاری متوسط) برای ناحیه عملکردی مشخص (سرمایشی/گرمایشی) ترسیم شده است. سطح بین دو منحنی مذکور، معرف توان مصرفی مازاد در روزهای محدودی از سال است که در نتیجه فراهم ساختن دمای آسایش توسط وسایل گرمایشی یا سرمایشی مصرف می‌شود؛ که با مدیریت و کنترل مناسب این میزان مصرف، می‌توان به عنوان منابع مجازی سمت تقاضا از آن بهره‌برداری کرد. بنابراین طبق تعریف ارائه‌شده، بیشینه پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا، \overline{DR} و کمینه پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا، \underline{DR} به ترتیب از طریق روابط (۵) تا (۸) قابل محاسبه است. توان مصرفی در زمان مشخص t در منحنی‌های بارگذاری بیشینه و متوسط، به ترتیب با $P_U(t)$ و $P_M(t)$ نشان داده شده‌اند. رابطه (۵) معرف بیشینه فاصله بین دو منحنی بار متوسط و بار بیشینه است. در رابطه (۶)، ظرفیت نامی منابع سمت تقاضا با توجه به اختلاف پیک بار در دو منحنی $P_U(t)$ و $P_M(t)$ به دست می‌آید که لزوماً در یک زمان مشخص رخ نخواهد داد. به طور مشابه، رابطه (۷) معرف کمینه فاصله بین دو منحنی بار متوسط و بار بیشینه است و رابطه (۸)، نشان‌دهنده اختلاف حداقل بارگذاری در دو



شکل (۶): رابطه بین توان مصرفی و درجه حرارت هوا برای شش سال متوالی: (الف) سال ۲۰۱۱، (ب) سال ۲۰۱۲، (ج) سال ۲۰۱۳، (د) سال ۲۰۱۴، (ه) سال ۲۰۱۵، (و) سال ۲۰۱۶

سرمایشی فعال هستند. با توجه به رابطه (۱)، آستانه دمایی روشن شدن وسایل سرمایشی در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶، در جدول (۱) درج شده است. طبق آستانه دمایی روشن شدن وسایل سرمایشی در هر سال، محدوده دمای آسایش بین ۵۵ تا ۶۶ درجه فارنهایت تعریف شده است. بنابراین، دمای پایین‌تر از ۵۵ درجه فارنهایت به‌عنوان آستانه دمایی عملکرد وسایل گرمایشی در نظر گرفته می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، روزهایی از سال که دمای آن بالاتر از ۵۵ درجه فارنهایت است، شیب دمایی مناسب‌تری را نسبت به سایر نقاط دمایی دارد. بنابراین این روزها برای تخمین فعالیت وسایل سرمایشی انتخاب می‌شوند. با استفاده از الگوریتم‌های کلاس‌بندی و الگوریتم تقریب حداکثر درست‌نمایی (MLL)، آستانه دمایی فعالیت وسایل سرمایشی در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ تخمین زده می‌شود که در شکل (۷) قابل مشاهده است. بر اساس شکل (۷)، نقاط آبی‌رنگ نمایانگر عدم فعالیت وسایل سرمایشی و نقاط قرمز رنگ نشان‌دهنده زمانی است که وسایل



شکل (۷): نتایج تقریب استفاده‌شده برای تخمین آستانه دمایی فعالیت وسایل سرمایشی در بازه زمانی شش سال: (الف) سال ۲۰۱۱، (ب) سال ۲۰۱۲، (ج) سال ۲۰۱۳، (د) سال ۲۰۱۴، (ه) سال ۲۰۱۵، (و) سال ۲۰۱۶

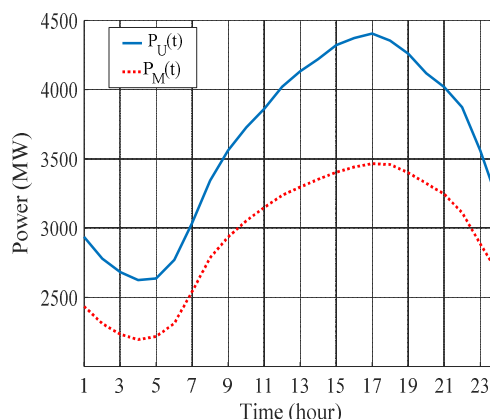
جدول (۱) درج شده است. با توجه به تعداد روزهای کارکرد وسایل سرمایشی و گرمایشی، نمودار بازه اطمینان ساعتی برای هر گروه ترسیم می‌شود. بر اساس نمودار بازه اطمینان ساعتی به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که به‌صورت تقریبی ۱۷٪ داده‌های انرژی مصرفی در آستانه پایین، به‌صورت مشابه ۱۷٪ از داده‌ها در آستانه بالا و ۶۶٪ آن‌ها در آستانه میانه قرار دارند. سپس میانگین داده‌های موجود در آستانه بالا و آستانه متوسط در هر ساعت، به‌عنوان میزان مصرف بیشینه و متوسط در آن ساعت مدنظر قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، پروفیل بارگذاری متوسط و پروفیل بارگذاری بیشینه برای دو فصل گرم و سرد قابل ترسیم هستند. برای نمونه، پروفیل بارگذاری متوسط و پروفیل بارگذاری بیشینه در فصول گرم سال ۲۰۱۶ (حضور وسایل سرمایشی در شبکه) و فصول سرد سال

جدول (۱): آستانه دمایی و روزهای کارکرد در سال‌های مختلف

سال	زمان کارکرد (روز)		دمای عملکرد وسایل سرمایشی (فارنهایت)
	وسایل گرمایشی	وسایل سرمایشی	
۲۰۱۱	۱۶۶	۱۲۱	۶۶/۱۲
۲۰۱۲	۱۷۰	۱۲۸	۶۵/۶۳
۲۰۱۳	۱۸۴	۱۱۹	۶۶/۱۹
۲۰۱۴	۱۹۰	۱۲۰	۶۵/۹۸
۲۰۱۵	۱۹۱	۱۲۹	۶۶/۱۲
۲۰۱۶	۱۸۳	۱۱۶	۶۶/۶۷

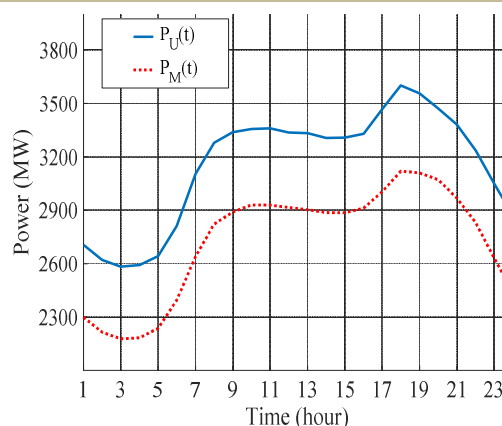
تعداد روزهای فعالیت وسایل سرمایشی و گرمایشی با توجه به آستانه دمایی عملکرد وسایل سرمایشی و دمای آسایش نیز در

۲۰۱۶ (حضور وسایل سرمایشی در شبکه)، به ترتیب در شکل (۸) و شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۸): پروفیل تقریب زده شده بارگذاری بیشینه و متوسط در حضور

A/C در سال ۲۰۱۶



شکل (۹): پروفیل تقریب زده شده بارگذاری بیشینه و متوسط در حضور

HS در سال ۲۰۱۶

همان گونه که در شکل نشان داده شده، منحنی آبی رنگ پروفیل بار روزانه بیشینه و منحنی قرمز رنگ پروفیل بار روزانه میانگین را نشان می‌دهند. فضای بین این دو منحنی معرف توان مصرفی مازاد است که از طریق مدیریت و کنترل می‌توان از آن‌ها تحت عنوان ظرفیت بالقوه منابع سمت تقاضا بهره‌برداری کرد. پس از تعیین منحنی‌های بارگذاری متوسط و بارگذاری بیشینه در سال‌های مختلف و به‌کارگیری روابط (۵) تا (۸)، پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا برای فصول گرم و سرد در هر سال تعیین می‌شود؛ سپس با استفاده از دو روش متفاوت آماری که در ادامه توضیح داده می‌شوند، نتایج مربوط به ظرفیت‌های سالانه منابع سمت تقاضا آنالیز می‌گردند و ظرفیت نهایی آن‌ها در منطقه مشخص می‌شود.

• در روش اول، پس از محاسبه مقادیر \overline{DR}_1 ، \overline{DR}_2 ، \overline{DR}_1 و \overline{DR}_2 در هر سال، واریانس تمامی ۴ پارامتر محاسبه می‌شود؛ هر دسته از اطلاعات که واریانس

کمتری داشته باشد، به‌عنوان ظرفیت نهایی تعیین می‌شود.

• در روش دوم، میانگین آماری از مقادیر \overline{DR}_1 ، \overline{DR}_2 ،

\overline{DR}_1 و \overline{DR}_2 ، در هر سال صورت می‌پذیرد. سپس با

توجه به مقدار میانگین، ظرفیت نهایی تعیین می‌شود.

در ادامه، با توجه به توضیحات مندرج در بالا، به شناسایی

پتانسیل منابع سمت تقاضا در فصول گرم و سرد پرداخته می‌شود.

۳.۱. پتانسیل منابع سمت تقاضا در حضور HS

با توجه به نمودار مصرف انرژی متوسط و بیشینه در فصول سرد سال‌های مختلف، ظرفیت‌های کمینه و بیشینه منابع پاسخ‌گویی تقاضا (\overline{DR}_1 ، \overline{DR}_2 ، \overline{DR}_1 و \overline{DR}_2) در هر سال محاسبه می‌شوند که

در شکل (۱۰) به‌صورت نقطه‌به‌نقطه آورده شده‌اند. با توجه به شکل

می‌توان نتیجه گرفت که کمترین و بیشترین سطح مرتبط با پتانسیل

منابع سمت تقاضا، به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵ رخ می‌دهد.

بر اساس روش کمینه واریانس (روش اول)، پارامتر \overline{DR}_1 به‌عنوان

پتانسیل نهایی منابع سمت تقاضا در حضور وسایل گرمایشی در

منطقه انتخاب می‌شود که پتانسیلی را معادل با ۵۸۰ مگاوات (معادل

با ۱۵٪ بار پیک) فراهم می‌آورد. بر اساس روش میانگین (روش

دوم)، تغییرات ظرفیت در بازه ۳۳۰ تا ۵۴۵ مگاواتی قرار می‌گیرد که

به‌طور متوسط، ظرفیت ۱۲٪ از بار پیک را برای منابع پاسخ‌گویی

تقاضا فراهم می‌آورد؛ بنابراین در فصول سرد سال، ظرفیتی معادل با

۱۵-۱۲ درصدی پیک بار از طریق مدیریت وسایل گرمایشی به

دست می‌آید. شایان ذکر است که در شکل (۱۱)، ظرفیت‌های کمینه

و بیشینه منابع پاسخ‌گویی تقاضا در سال‌های مختلف به‌صورت

نرمالیزه شده ترسیم شده است.

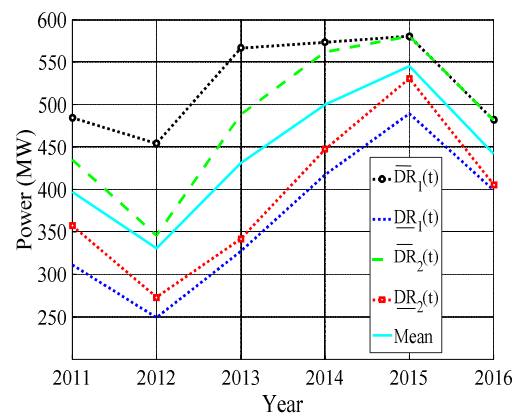
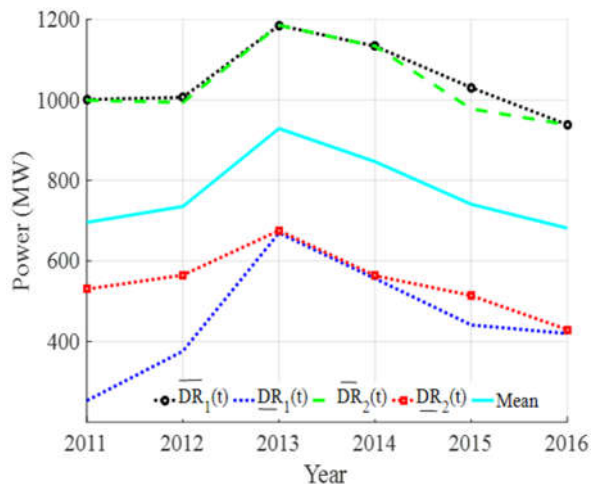
۳.۲. پتانسیل منابع سمت تقاضا در حضور A/C

مشابه با حالت قبل، با توجه به نمودار مصرف انرژی متوسط و

بیشینه در فصول گرم، ظرفیت‌های کمینه و بیشینه منابع پاسخ‌گویی

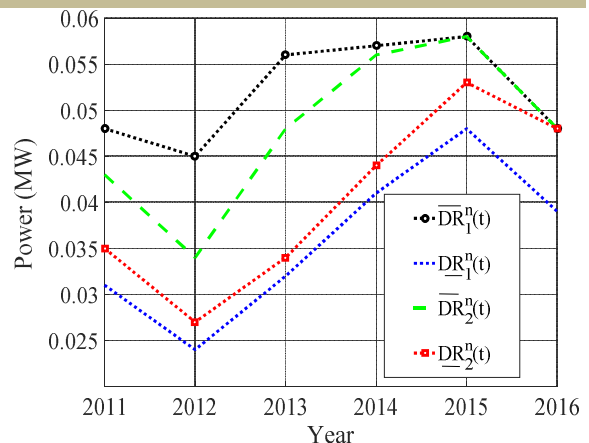
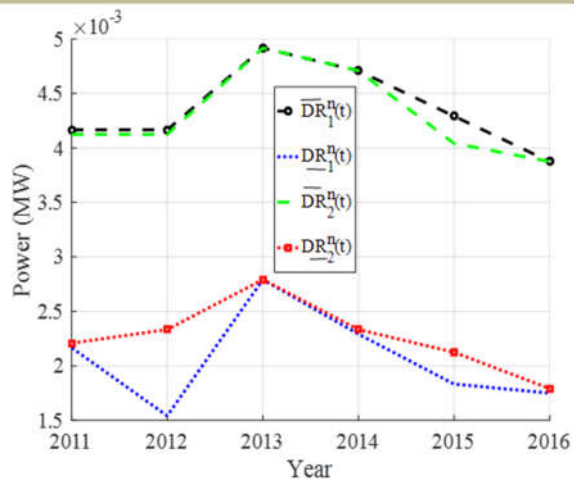
تقاضا در هر سال محاسبه می‌شوند که در شکل (۱۲) ترسیم شده‌اند؛

مقادیر نرمالیزه شده آن‌ها در شکل (۱۳) آورده شده است.



شکل (۱۰): پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا در حضور HS در سال‌های مختلف

شکل (۱۲): پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا در حضور A/C در سال‌های مختلف



شکل (۱۱): پتانسیل نرمالیزه‌شده نامی منابع سمت تقاضا در حضور HS در سال‌های مختلف

شکل (۱۳): پتانسیل نرمالیزه‌شده نامی منابع سمت تقاضا در حضور A/C در سال‌های مختلف

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به تأثیرپذیری برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت تا بلندمدت سیستم قدرت، از منابع پاسخ‌گویی تقاضا، شناسایی ظرفیت نامی این منابع در فصول مختلف سال حائز اهمیت است؛ درحالی‌که در مطالعات سیستم قدرت، پتانسیل این منابع در طول سال ثابت فرض می‌شود. بنابراین در مقاله حاضر، به‌منظور تخمین پتانسیل منابع پاسخ‌گویی تقاضا، ساختاری دومارحله‌ای بر مبنای تغییرات الگوی مصرف انرژی در مقایسه با تغییرات دمایی در طول سال ارائه شده است. در ابتدا با استفاده از الگوریتم حداکثر درست‌نمایی آستانه دمایی عملکرد وسایل گرمایشی/سرمایشی تعیین می‌شود؛ سپس با توجه به آنالیز منحنی‌های بارگذاری متوسط روزانه و بارگذاری بیشینه روزانه در حضور وسایل گرمایشی/سرمایشی، ظرفیت منابع پاسخ‌گویی تقاضا تعیین می‌شود. در چهارچوب پیشنهادی، به تفاوت

با توجه به شکل (۱۲) مشخص است که بیشینه پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا یعنی \overline{DR}_1 و \overline{DR}_2 دارای مقادیر نزدیک به هم در طی سال‌های متوالی هستند. بر اساس روش کمیته واریانس، پارامتر \underline{DR}_2 به‌عنوان پتانسیل نهایی منابع سمت تقاضا در حضور وسایل سرمایشی در منطقه انتخاب می‌شود که پتانسیلی معادل با ۶۷۵ مگاوات را فراهم می‌آورد. بر اساس روش میانگین، تغییرات ظرفیت در بازه ۶۹۵ تا ۹۳۰ مگاواتی قرار می‌گیرد که به‌طور متوسط، ظرفیت ۱۷/۵٪ از بار پیک را برای منابع پاسخ‌گویی تقاضا فراهم می‌آورد؛ بنابراین در فصول گرم سال، ظرفیتی معادل با ۱۴/۵-۱۷/۵ درصدی پیک بار از طریق مدیریت وسایل سرمایشی به دست می‌آید.

فهرست علائم

پارامتر	توضیح
DR	منابع سمت تقاضا
A/C	وسایل سرمایشی
HS	وسایل گرمایشی
$^{\circ}F$	درجه فارنهایت
θ_{HS}	آستانه دمایی عملکرد وسایل گرمایشی
θ_{conf}	دمای آسایش
θ_{conf}^{max}	بیشینه دمای آسایش
θ_{conf}^{min}	کمینه دمای آسایش
μ	میانگین
σ	انحراف معیار
T_L	آستانه پایین
T_M	آستانه متوسط
T_U	آستانه بالا
$P_u(t)$	بارگذاری بیشینه
$P_M(t)$	بارگذاری متوسط
\overline{DR}	بیشینه پتانسیل منابع سمت تقاضا
\underline{DR}	کمینه پتانسیل منابع سمت تقاضا
\overline{DR}^n	نرمالیزه شده بیشینه پتانسیل منابع سمت تقاضا
\underline{DR}^n	نرمالیزه شده کمینه پتانسیل منابع سمت تقاضا

الگوی رفتاری مشترکین در فصول گرم و سرد سال توجه شده که منتج به تفاوت در پتانسیل منابع پاسخ‌گویی تقاضا در این دوره‌ها شده است. همچنین به منظور مقایسه بهتر مصرف انرژی در روزهای مختلف دوره‌های سرد و گرم سال، میانگینی آماری از الگوی بارگذاری شبکه در حالت‌های میان‌باری و پرباری در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های شبکه برق BOSTON پیاده‌سازی شده است. نشان داده شده است که در فصول گرم سال، ظرفیتی معادل با ۱۴/۵٪ تا ۱۷/۵٪ پیک بار از طریق مدیریت وسایل سرمایشی و در فصول سرد سال، ظرفیتی معادل با ۱۲٪ تا ۱۵٪ پیک بار از طریق مدیریت وسایل گرمایشی برای پتانسیل منابع سمت تقاضا فراهم تخمین زده شده است. میزان تغییرات بیان‌شده در ظرفیت‌های منابع پاسخ‌گویی تقاضا در هریک از دوره‌های سرد و گرم، به علت الگوی رفتاری متفاوت مشترکین در ماه‌های مختلف دوره‌های سرد یا گرم است. پس واضح است که در صورت کوچک نمودن بازه مورد بررسی، فصلی یا ماهانه، محدوده پتانسیل نامی منابع سمت تقاضا با دقت بیشتری به دست خواهد آمد. همچنین در صورت دسترسی به اطلاعاتی از جمله قیمت و میزان مشوق پرداختی، ظرفیت این منابع به صورت دقیق‌تری به دست خواهد آمد.

مراجع

- [1] Khodaei, A., Shahidehpour, M. and Bahramirad, S., "SCUC with hourly demand response considering intertemporal load characteristics", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 3, pp. 564-571, 2011.
- [2] Hajebrahimi, A., Abdollahi, A. and Rashidinejad, M., "Probabilistic multiobjective transmission expansion planning incorporating demand response resources and large-scale distant wind farms", IEEE Systems Journal, Vol. 11, No. 2, pp. 1170-1181, 2017.
- [3] Staff, F., "Assessment of demand response and advanced metering", Federal Energy Regulatory Commission, Docket AD-06-2-000, 2006.
- [4] Abdollahi, A., Moghaddam, M. P., Rashidinejad, M. and Sheikh-El-Eslami, M. K., "Investigation of economic and environmental-driven demand response measures incorporating UC", IEEE transactions on smart grid, Vol. 3, No. 1, pp. 12-25, 2012.
- [5] Nojavan, S., Majidi, M., Najafi-Ghalelou, A., Ghahramani, M. and Zare, K., "A cost-emission model for fuel cell/PV/battery hybrid energy system in the presence of demand response program: ϵ -constraint method and fuzzy satisfying approach", Energy Conversion and Management, Vol. 138, pp. 383-392, 2017.
- [6] Mollahassani-Pour, M., Rashidinejad, M. and Pourakbari-Kasmaei, M., "Environmentally constrained reliability-based generation maintenance scheduling considering demand-side management", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 13, No. 7, pp. 1153-1163, 2018.
- [7] Gyamfi, S., and Krumdieck, S., "Scenario analysis of residential demand response at network peak periods", Electric Power Systems Research, Vol. 93, pp. 32-38, 2012.
- [8] Muratori, M. and Rizzoni, G., "Residential demand response: Dynamic energy management and time-varying electricity pricing", IEEE Transactions on Power systems, Vol. 31, No. 2, pp. 1108-1117, 2016.
- [9] تقی‌خانی، محمدعلی، ماندگارنیک، محسن، «تأثیر خانه‌های هوشمند در مدیریت و کاهش مصرف انرژی الکتریکی»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، سال نهم، شماره ۲، صفحه ۸۵-۷۴، ۱۳۹۸.
- [10] Deshmukh, R., Ghatikar, G., Yin, R., Das, G. G. and Saha, S. K., "Estimation of potential and value of demand response for industrial and commercial consumers in Delhi", 2015.
- [11] Li, N., Chen, L. and Low, S. H., "Optimal demand response based on utility maximization in power networks", in 2011 IEEE power and energy society general meeting, 2011, pp. 1-8: IEEE.
- [12] Shi, W., Li, N., Xie, X., Chu, C.-C. and Gadh, R., "Optimal residential demand response in distribution networks", IEEE journal on selected areas in communications, Vol. 32, No. 7, pp. 1441-1450, 2014.
- [13] Li, P. and Zhang, B., "Linear estimation of treatment effects in demand response: An experimental design approach", arXiv preprint arXiv:1706.09835, 2017.
- [14] Luo, Z., Hong, S. and Ding, Y., "A data mining-driven incentive-based demand response scheme for a virtual power plant", Applied Energy, Vol. 239, pp. 549-559, 2019.
- [15] Park, S., Ryu, S., Choi, Y. and Kim, H., "A framework

- for baseline load estimation in demand response: Data mining approach*", in 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2014, pp. 638-643: IEEE.
- [16] Chanana, S. and Arora, M., "*Demand response from residential air conditioning load using a programmable communication thermostat*", International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering, Vol. 7, No. 12, pp. 1-7, 2013.
- [17] Newsham, G. R., Birt, B. J. and Rowlands, I. H., "*A comparison of four methods to evaluate the effect of a utility residential air-conditioner load control program on peak electricity use*", Energy Policy, Vol. 39, No. 10, pp. 6376-6389, 2011.
- [18] Dyson, M. E., Borgeson, S. D., Tabone, M. D. and Callaway, D. S., "*Using smart meter data to estimate demand response potential, with application to solar energy integration*", Energy Policy, Vol. 73, pp. 607-619, 2014.
- [19] Shiljkut, V. M. and Rajakovic, N. L., "*Demand response capacity estimation in various supply areas*", Energy, Vol. 92, pp. 476-486, 2015.
- [20] Han, J., Pei, J. and Kamber, M., "*Data mining: concepts and techniques*", Elsevier, 2011.
- [21] The power consumption historical data Boston region available at: <http://www.iso-ne.com>; [accessed 07.02.14].