

تاریخ دریافت: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۵ مرداد ۱۴۰۲ صفحات ۳۰ الی ۶۲

طراحی ساختار تعرفه‌ای برق مصرفی صنایع به منظور مدیریت اوج بار شبکه با تاکید بر مدل‌سازی عامل بنیان

رسول منصوری بیدکانی*

کارشناسی ارشد دانشگاه تهران، asoolmansouri77@gmail.com

عباس ندایی

کارشناسی ارشد دانشگاه تهران، abbasnedaei@ut.ac.ir

امیر علی سیف‌الدین

استادیار دانشگاه تهران، saifoddin@ut.ac.ir

چکیده: رشد روز افزون مصرف برق طی سالیان اخیر موجب شده است تا مدیریت تقاضای آن به موضوعی حیاتی در حوزه انرژی تبدیل شود. یکی از بازیگران مهم در عرصه مصرف برق صنایع هستند که لزوم بیش‌ازپیش توجه به این عرصه را می‌طلبد. در سال ۱۳۹۹ میزان مصرف برق کشور در حوزه صنعت ۳۴.۷ درصد بوده است، بنابراین انجام اقداماتی که شامل تغییر در رفتار مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی در بخش صنعتی شود، به‌ویژه در ایام پیک مصرف مورد نیاز خواهد بود. براساس تجارب جهانی، می‌توان انتظار داشت با بازنگری در ساختارهای تعرفه‌ای بخش صنعتی، الگوی مصرف در این بخش اصلاح شود. در این پژوهش یک ساختار تعرفه‌گذاری جدید با جایگزینی بسته‌های قیمتی - مقداری به جای تعرفه ثابت در زمان اوج مصرف پیشنهاد شده است همچنین برای سنجش اثربخشی ساختارهای تعرفه‌ای پیشنهادی، نتایج حاصل از آن برای یک شهرک صنعتی با ۶۲ مشترک در مازندران با رویکرد عامل بنیان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی نشان داد می‌توان با اعمال این ساختار به مشترکین، میانگین تقاضای اوج بار را ۲/۵۷٪ الی ۹/۵۱٪ کاهش داد.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی عامل بنیان، ساختار تعرفه‌ای، پیک شبکه برق، مدیریت مصرف انرژی، رفتار مصرف‌کنندگان

* نویسنده مسئول

مقدمه

در سالیان اخیر همگام با افزایش مصرف انرژی در کشورهای جهان، تولید انرژی در برخی از ایام سال نتوانسته است پاسخگوی تقاضای مصرفی باشد. این مسئله سبب شده است که علاوه بر ساخت نیروگاه‌های جدید، بر روی مدیریت مصرف انرژی^۱ نیز تأکید شود. طبق آمارهای جهانی مصرف انرژی در ایران چندین برابر بیشتر از کشورهای توسعه‌یافته است (وزارت نیرو، ۱۳۹۷). از طرفی حدود ۳۵ درصد از مصرف برق کشور، در بخش صنعتی صورت می‌گیرد (وزارت نیرو، ۱۳۹۹)، لذا مشترکین صنعتی به دلیل سهم و اهمیت بالایی که از مصرف برق دارند، اصلی‌ترین گزینه جهت اصلاح الگوی مصرف^۲ می‌باشند.

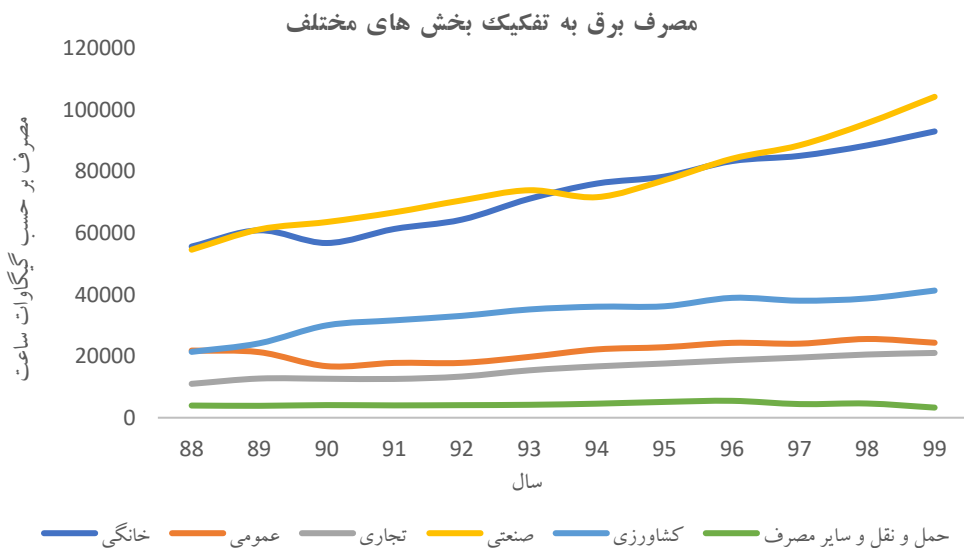
ادبیات موضوع

مطابق با آمار وزارت نیرو، تقریباً تمامی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۹، میزان تقاضای مصرفی در روزهای بحرانی سال بیش از حداکثر توان تولید شبکه بوده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۹). همچنین مطابق با ترازنامه انرژی، وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، در نمودار ۱ جزئیات مصرف برق در طی سال‌های ۱۳۸۸ الی ۱۳۹۹ آورده شده است. مطابق با نمودار شکل ۱ مصرف برق در سال ۱۳۸۸ در مجموع ۱۶۸۴۳۸ گیگاوات ساعت بوده است که در سال ۱۳۹۹ به ۲۸۷۳۷۸ گیگاوات ساعت رسیده است. این موضوع بیانگر رشد روزافزون مصرف برق در کشور می‌باشد به طوری که به طور میانگین هر ساله در حدود ۱۰ درصد به مصرف برق کشور افزوده شده است.

از طرفی دیگر مصرف برق در بخشی صنعتی نیز در نمودار شکل ۱ قابل توجه است. در سال ۱۳۸۸ مصرف برق در بخش صنعتی ۵۴۶۰۵ گیگاوات ساعت بوده است در حالی که این عدد در سال ۱۳۹۹ به ۱۰۴۲۹۶ گیگاوات ساعت رسیده است که نشانگر آن است که مصرف برق در بخش صنعتی از سال ۱۳۸۸ الی ۱۳۹۹ در حدود دوبرابر شده است. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با رشد قابل توجه مصرف برق در بخش صنعتی انتظار می‌رود که این روند در سال‌های آتی نیز ادامه‌دار باشد، از طرفی اگر تمام ظرفیت نیروگاهی کشور برای تأمین حداکثر توان تولید برق مورد نیاز کشور به کار گرفته شود، علاوه بر این که امنیت تولید برق کاهش می‌یابد، نیروگاه‌ها و تأسیسات برق نیز

^۱ Energy consumption management

^۲ Consumption pattern



شکل ۱. نمودار مصرف برق به تفکیک بخش‌های مختلف (وزارت نیرو، ۱۳۹۹)

زودتر فرسوده می‌شوند (سیف‌الدین & سراج، ۱۳۹۹)، لذا با توجه به سهم قابل توجه حوزه صنعت، لزوم توجه هر چه بیشتر بر مدیریت مصرف برق در بخش صنعتی امری ضروری است.

اقتصاددانان معتقدند که تغییر قیمت‌ها روش مناسب برای ترغیب مصرف‌کنندگان در مصرف بهینه انرژی هستند، لذا برای جلوگیری بحران قطعی برق در ساعات پیک شبکه، توجه به شیوه‌های جدید تعرفه‌گذاری ضروری به نظر می‌رسد. در درازمدت ایجاد تعرفه‌های مختلف برای مصرف برق سبب بالاتر رفتن بهره‌وری انرژی مصرفی می‌گردد. همچنین در کوتاه‌مدت، برخی از مشتریان امکان کاهش مصرف خود و یا انتقال این مصرف به ساعات کم باری را دارا هستند (Strbac, ۱۹۹۶).

یک ساختار تعرفه‌ای مجموعه‌ای از قوانین و روش‌هاست که با در نظر گرفتن اطلاعات مربوطه به وضعیت مصرف انرژی، برای مشترکین صورت حساب صادر می‌کند؛ بنابراین قیمت برق با توجه به مجموع اطلاعات از وضعیت مصرف مشترکین و الگوریتم محاسبه صورت حساب تعیین می‌شود. قیمت یکی از اصلی‌ترین متغیرها در شکل‌دهی به رفتار مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان است؛ بنابراین

مکانیزم تعرفه‌گذاری ایزاری ایده‌آل برای هماهنگی عرضه و تقاضا می‌باشد. محصول صنعت برق نیز مانند سایر کالاها در چرخه عرضه و تقاضا قرار دارد و در یک بازار بدون حضور عوامل حاشیه‌ای قوی، قیمت آن بر اساس تعادل بین عرضه و تقاضا تعیین می‌گردد. بررسی نظام تعرفه‌گذاری قیمت اوج بار در اکثر کشورها نشان می‌دهد که می‌توان غالب نظام‌های تعرفه‌گذاری برق در این کشورها را به ۴ دسته کلی تقسیم کرد (وزارت نیرو، ۱۳۹۵):

- روش زمان استفاده^۱ (*TOU*): در این روش زمان استفاده به سه قسمت کم‌باری، میان‌باری و اوج بار تقسیم شده و قیمت برق نیز در هر زمان متفاوت است.
- روش قیمت لحظه‌ای واقعی^۲ (*RTP*): در این روش، قیمت‌گذاری واقعی بر اساس تقاضای مشترکین تعیین می‌شود؛ بنابراین در طول روز، قیمت‌های برق دائماً در حال تغییر هستند که ممکن است حتی در هر چند دقیقه نیز متفاوت باشند.
- قیمت بحرانی اوج بار^۳ (*CPP*): در این روش برخی از روزهای سال به عنوان روز بحرانی به مشترکین اعلام می‌شود و در این روزها ممکن است قیمت زمان اوج بار نسبت به زمان معمولی تا ۶ برابر نیز افزایش یابد.
- تخفیف کاهش اوج بار^۴ (*PTR*): در این روش بر خلاف روش‌های قبلی به جای جریمه یا افزایش قیمت برق، به مشترکینی که مقدار مصرف برق خود را در زمان اوج بار کاهش بدهند تخفیف قیمتی داده خواهد شد.

قیمت و تعرفه‌گذاری برق از اهمیت زیادی برخوردار می‌گردد؛ به‌نحوی که کمبود امکانات تولید، باید از طریق تعدیل منحنی تقاضا جبران شود. همچنین در صورتی که ساختار و سازمان تعرفه‌ای به گونه‌ای اعمال شود که مصرف‌کننده تشویق به تغییر الگوی مصرف خود، کاهش آن در ساعات اوج مصرف و افزایش آن در کم‌باری شود، هزینه‌های عرضه کاسته خواهند شد. (صبوری، ۱۳۹۵).

^۱ Time Of Using

^۲ Real Time Pricing

^۳ Critical Peak Pricing

^۴ Peak Time Rebates

پیشنه پژوهش

در داخل کشور پژوهش و تحقیقات محدودی بر روی این موضوعات انجام شده است. غالب پژوهش‌های انجام شده نیز بر روی قیمت‌گذاری برق خانگی تمرکز دارند. در همین راستا هوشمند و خلیل‌زاده جهت مدیریت مصرف‌کننده‌ها یک الگوریتم قیمت‌گذاری زمان واقعی^۱ بر اساس بازار برق شبکه ارائه دادند. الگوریتم قیمت‌گذاری زمان واقعی ارائه شده تعامل بین مشترکین و تولیدکننده را مدیریت کرده و مصرف بهینه‌ای که منجر به حداکثر شدن تابع رفاه مشترکین می‌شود را می‌یابد. با استفاده از یک ساختار دوطرفه، تولیدکننده، قیمت انرژی را به مشترکین اعلام کرده و هر مشترک بر اساس قیمت اعلام شده مقدار مصرف خود را در مقدار بهینه تنظیم کرده و سپس مقدار مصرف به‌روز شده را به تولیدکننده اعلام می‌کند. تولیدکننده نیز مقدار تولید خود را تنظیم کرده و قیمت جدید را برای بازه زمانی بعدی اعلام می‌کند. نتایج نشان می‌دهد به علت افزایش چند برابری قیمت در پیک، گروهی از مشترکین خود را تحت فشار و اجبار قرار داده و از مصرف خود به میزان قابل توجهی کم کرده و لذا مقدار عددی متوسط رفاه آن‌ها منفی شده است (هوشمند & خلیل‌زاده، ۱۳۹۶).

در پژوهشی دیگر ده نوری و همکاران با استفاده از یک مدل تلفیقی برنامه پاسخگویی بار زمان استفاده (TOU) و مسئله توزیع بار اقتصادی هزینه-آلودگی دینامیک (DEED) نرخ قیمت بهینه در دوره‌های مختلف را با استفاده از الگوریتم رانش تصادفی انبوه ذرات به صورت همزمان تعیین می‌کند. (ده نوری، عبدی، & محمدی، ۱۴۰۲) همچنین شریفی در پژوهشی دیگر با در نظر گرفتن برنامه‌های DSM^۲ تشویق مشترکین با استفاده از تعرفه‌های مختلف را طرح ریزی می‌کند و به بهینه‌سازی الگوی مصرف برق، زمان استفاده از آن و همچنین تاثیر آن بر روی منحنی بار روزانه می‌پردازد. (شریفی، ۱۴۰۲)

همچنین در ادامه این پژوهش‌ها سیف‌الدین و همکاران (سیف‌الدین & سراج، ۱۳۹۹) به طراحی یک ساختار تعرفه‌ای مبتنی بر بسته‌های قیمتی-مقداری برای پیک سایه مصرف در ایام پیک مصرف برای مشترکین خانگی پرداخته‌اند. در این پژوهش با توجه به زیرساخت‌ها و طرح‌های در حال اجرای

^۱ Real Time Pricing

^۲ Demand Side Management

کشور، ساختار تعرفه ای جدیدی که به صورت ترکیبی از برنامه پاسخگویی بار زمان استفاده و ماکسیم تقاضا می باشد، پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی اعمال این تعرفه به مشترکین برق خانگی برای سه ماه خرداد، تیر و مرداد نشان می دهد که می توان میانگین تقاضای اوج بار را تا ۶/۱۵ درصد کاهش داد. در ادامه پژوهش با افزایش تعداد بسته‌های انرژی عرضه شده به مشترکین از ۶ به ۹ در مدل، مشخص شد ترجیحات مصرف کننده به سمت افزایش هزینه و مصرف انرژی می رود؛ که این مساله در نهایت منجر می شود میانگین تقاضای اوج بار در این دوره تنها ۳/۷۵ درصد کاهش یابد.

در عرصه بین‌المللی مطالعات جامع و کامل تری صورت گرفته است، در پژوهشی پراسانا و همکاران (۲۰۱۸) به ارائه ساختار تعرفه‌ای در دو قالب زیر کوشیده‌اند:

- ساختار تعرفه‌ای بخش خانگی به نام بلوک افزایش PT
- صرفه‌جویی در مصرف ESFIT

در ساختار PT مصرف کنندگان در صورت عدم رعایت سقف مصرف جریمه می شوند؛ اما در ساختار تعرفه‌ای ESFIT جایزه‌هایی در هنگام کاستن مقدار مشخصی از میزان مصرف برای مشترکین اعمال می‌گردد. نحوه تأثیرگذاری این تعرفه‌ها توسط دو فاکتور "کشش انگیزشی" و "کشش قیمتی" که در روابط ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند ارزیابی می‌گردد:

$$PE = \frac{(Q2 - Q1) / Q1}{(P2 - P1) / P1} \quad (1)$$

$$IE = \frac{(Q2 - Q1) / Q1}{I / P_1} \quad (2)$$

Q_۱: مصرف پیش از اعمال ساختار تعرفه‌ای KWH

Q_۲: مصرف پس از اعمال ساختار تعرفه‌ای KWH

P_۱: قیمت برق پیش از اعمال ساختار تعرفه‌ای بر حسب واحد پولی به‌ازای هر KWH

P_۲: قیمت برق پس از اعمال ساختار تعرفه‌ای بر حسب واحد پولی به‌ازای هر KWH

۱: میزان پاداش برای کاهش مصرف بر حسب واحد پولی به‌ازای هر KWH

با ارزیابی فاکتورهای ذکر شده در ۵ کشور ایالت متحده، کانادا، ژاپن، آلمان و سوئیس مشخص گردید که مجموعاً میزان تأثیر ساختار تعرفه‌ای بر پایه جریمه (PT) بیشتر از سیستم بر پایه تشویق (ESFIT) است. در ادامه آشکار شد که تعرفه پلکانی افزایشی بیشترین تأثیر را در کشور آلمان دارا است؛ همچنین موفق‌ترین برنامه ESFIT اجرا شده نیز در کشور آمریکا بود. در این پژوهش در آخر پیشنهاد شده است که جهت تأثیرگذاری هرچه بیشتر ساختارهای تعرفه‌ای، لازم است مکانیزمی "تشویقی/جریمه‌ای" داشته باشد تا مشترکان را در صورت وصول به میزان مشخصی از صرفه‌جویی تشویق، و در صورت عدم دستیابی به آن جریمه نماید.

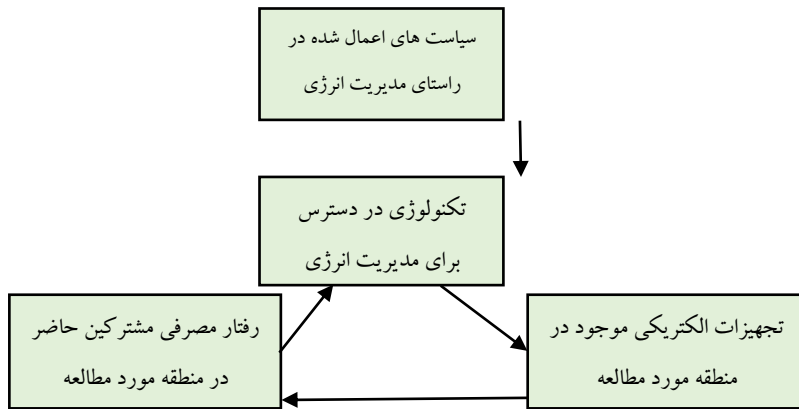
در پژوهش جاها حسن (۲۰۲۳) و همکاران بهینه‌سازی بار ساختمان تجاری از طریق سیستم ذخیره‌سازی انرژی باتری (BESS) و منابع تجدیدپذیر برای به حداقل رساندن هزینه صورت حساب تعرفه‌های مختلف بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که نوع تعرفه می‌تواند تأثیر زیادی بر هزینه‌ها و صرفه‌جویی داشته باشد. همچنین در پژوهشی دیگر واناپینیت و همکاران (۲۰۲۲) ساختارهای مختلف نرخ انرژی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که با تغییر تعرفه‌ها می‌توان تقاضای برق را ۲۰ درصد تغییر داد و سطوح خدماتی بالا تا متوسط را در مقایسه با پتانسیل‌های فنی ارائه کرد.

در پژوهش دیگری لین و همکاران (۲۰۱۶) در سال ۲۰۱۶ به مدل‌سازی عامل‌بنیان مصرف برق در ساختمان اداری تحت ساختار تعرفه‌ای پلکانی پرداختند. در این پژوهش در ابتدا به شبیه‌سازی الگوی مصرف برق ساختمان اداری در کشور چین پرداخته شد. در ادامه با تعریف یک فاکتور جداگانه برای عامل مصرف‌کننده تحت عنوان "آگاهی نسبت به صرفه‌جویی در انرژی" که به صورت یک تابع از تغییرات قیمتی تعریف می‌گردد پژوهش ادامه یافت. در نهایت پلکان‌های مصرف انرژی در ساختار تعرفه‌ای پلکانی افزایشی بررسی شده و کشش قیمتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مطالعات تایال و اورز (۲۰۱۸) در زمینه تأثیر مدل تعرفه‌گذاری برق بر رفتار مصرفی مشترکین می‌باشد. آن‌ها جهت اصلاح ساختار تعرفه‌گذاری برق در بخش غربی استرالیا، طی مطالعه‌ای به ارزیابی رفتار مصرف‌کنندگان برق و قیمت‌گذاری‌های متفاوت برق خانگی پرداختند.

در نهایت یک ساختار تعرفه‌ای جدید که ترکیبی از روش‌های قیمت‌گذاری ماکزیمم تقاضا و زمان استفاده به‌دست آمده است. از سال ۲۰۱۸ این ساختار تعرفه‌ای برای مشترکین شرکت "هوریزون پاور" به‌صورت آزمایشی اعمال می‌شود (Econ, ۲۰۱۸) که در این طرح خرید برق به صورت "بسته محور" انجام می‌شود.

همچنین ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی بر روی پروفایل بار دانشگاه ناتینگهام در کشور انگلیستان کار نموده و به شبیه‌سازی پروفایل بار پرداختند. در همین راستا نوع رفتار مصرف‌کنندگان، تکنولوژی مدیریت انرژی، تجهیزات الکتریکی و سیاست‌های اتخاذ شده برای مدیریت انرژی به عنوان ارکان مهم سیستم چند عاملی در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ نحوه تعامل این عامل‌ها با یکدیگر و همچنین نوع عملکرد هر یک به تصویر کشیده شده است. در قدم بعدی با در نظر گرفتن مدل ایجاد شده، اثربخشی تصمیمات گوناگون مدیریت انرژی قابل پیاده‌سازی در مجموعه بر چگونگی مصرف برق ارزیابی، و پیشنهادهای جهت افزایش بهره‌وری انرژی در مجموعه بیان شده است.



شکل ۲. مولفه‌های تاثیرگذار در مصرف انرژی مجتمع طبق مدل ژانگ و همکاران

مدلسازی عامل بنیان بررسی می‌شود. دلیل اصلی استفاده از مدل عامل بنیان در این پژوهش قابلیت‌هایی از جمله مدل کردن ارتباط بین اعضا و خصوصیات رفتاری مصرف‌کنندگان می‌باشد. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که در تحقیقات اخیر این موارد کمتر مورد توجه قرار گرفته است، بنابراین مدلسازی عامل بنیان می‌تواند راهکاری موثر در این راستا ارائه کند. در ادامه بعد از ارزیابی و پایش داده‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف بسته‌های قیمتی - مقداری، تعداد ۱۲ حالت مختلف پیشنهاد می‌شود و نتایج حاصل از هر حالت با نمودارهایی به نمایش درمی‌آید. **جدول ۱** مزایا و محدودیت‌های مدل ارائه شده در مقایسه با سایر روش‌های انجام شده در این زمینه را نشان می‌دهد.

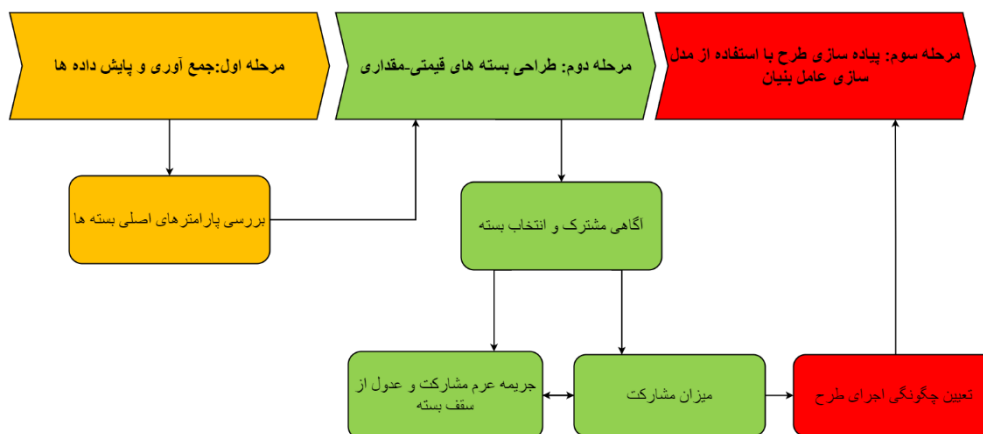
جدول ۱. مزایا و محدودیت‌های مدل پژوهش (منبع: یافته‌های پژوهش)

محدودیت‌ها	مزایا
از آنجا که مدل پدیده‌ها و سیستمها را در سطح جزئیات مدلسازی میکنند، اغلب شامل متغیرهای متعددی هستند که باید به دقت تنظیم شوند. اما از منظر علمی برای تعداد پارامترها محدودیت وجود دارد.	این مدلسازی اخذ پدیده برآیند را در نظر می‌گیرد بدین معنی که در مدل یک الگوی پایدار ماکروسکوپی تعریف میشود که از تعاملات محلی اجزاء شکل میگیرد.
بسیاری از رفتارهایی که در چنین مدل ریاضی ارائه میگردد، به ندرت در دنیای واقعی مشاهده میشوند. بنابراین پیچیده کردن بیش از اندازه مدل با هدف نزدیکتر نمودن آن به سیستم واقعی، ممکن است منجر به نتیجه معکوس گردد	مدل سازی ارائه شده از هر روش مدلسازی دیگری بیشتر به واقعیت وابسته است و از این رو ذاتا برای شبیه سازی افراد و اشیاء به صورت بسیار واقعی مناسب است.
	این مدلسازی رفتارها را بر اساس تعاملت مورد نظر در فاصله و جهات خاص تنظیم می‌کند.

روش‌شناسی

هدف این پژوهش طراحی بسته‌های قیمتی - مقداری و ارزیابی عملکرد این بسته‌ها است، در همین راستا ابتدا یک شهرک صنعتی با ۶۲ مشترک در مازندران به‌عنوان محدوده مطالعاتی در نظر گرفته شده است، سپس داده‌های مربوط به ماه‌های خرداد، تیر و مرداد که در سال‌های اخیر بیشترین پیک شبکه را به خود اختصاص داده‌اند برای شهرک صنعتی مورد ارزیابی و پایش قرار گرفته و با توجه به این داده‌ها جهت دستیابی به بسته‌های قیمتی - مقداری انرژی به تدوین پارامترهای تشکیل‌دهنده آن پرداخته می‌شود. در این مرحله پارامترهای مشخص‌کننده بسته‌ها از جمله مدت بسته‌ها، تعداد بسته‌ها، قیمت و اندازه بسته‌ها و همچنین جریمه عدم مشارکت در طرح و جریمه عدول از مقدار سقف بسته‌ها طراحی می‌گردد، لازم به ذکر است که میزان مشارکت اولیه در این طرح نیز که بر نتایج اثرگذار است در نظر گرفته شده است. در نهایت با متغیر در نظر گرفتن سه پارامتر اندازه بسته‌ها، قیمت بسته‌ها و میزان مشارکت اولیه، ۱۲ مدل مختلف بسته‌های قیمتی - مقداری پیشنهاد شده است. در قدم بعدی با استفاده از یک مدل عامل بنیان و پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار متلب به بررسی اثرگذاری این ۱۲ حالت پرداخته شده است و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

فلوچارت مفهومی پژوهش، چگونگی انجام مراحل و تأثیر پارامترها بر یکدیگر در شکل ۳ آمده است:



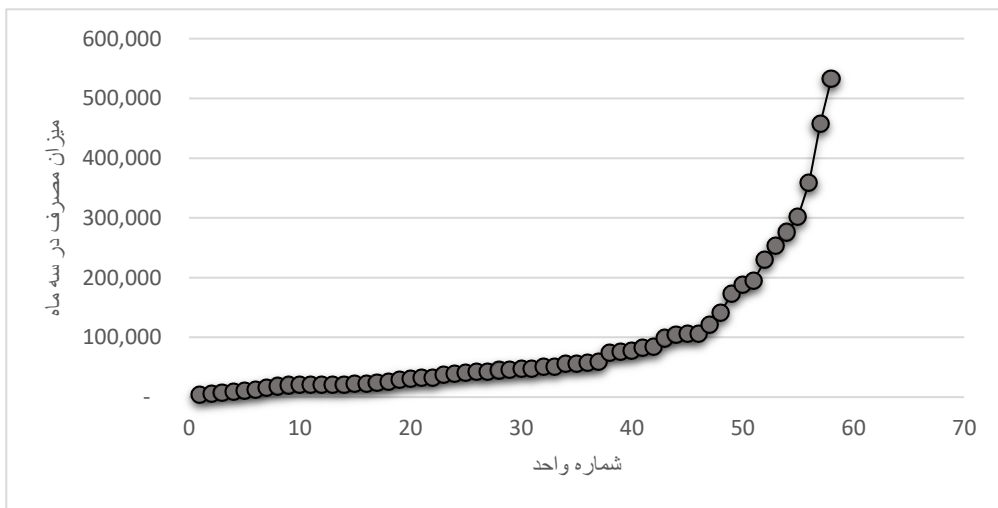
شکل ۳. دیاگرام مفهومی پژوهش (منبع: یافته‌های پژوهش)

داده‌های پژوهش

ابتدا اطلاعات مصرف این ۶۲ مشترک به صورت ساعتی و برای ۳ ماه خرداد، تیر و مرداد سال ۹۸ بررسی شد و میزان مصرف میانگین ماهیانه به کیلووات ساعت به دست آمده است. با توجه به تنوع زیاد در میزان داده‌های مصرف برق، جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر در پژوهش با حذف داده‌های غیرمنطقی توزیع داده‌ها همگون‌سازی شده است. نمودار توزیع داده‌ها به صورت نمودار شکل ۳ خواهد بود.

همان‌طور که در نمودار شکل ۴ مشخص است، نزدیک به ۵۰ واحد از مصرف‌کنندگان، مصرف میانگین ماهانه کمتر از ۲۰۰۰۰۰ کیلووات ساعت داشته‌اند و تنها ۸ مورد مصرفی بیش از این مقدار (نهایتاً تا ۵۳۲۰۰۰ کیلووات ساعت) دارا هستند.

در این پژوهش جهت طراحی دقیق تعرفه‌گذاری نرخ برق لازم است تا بازه هدف محدود شود، به طوری که بتوان بسته‌های قیمتی - مقداری معقول تعریف کرد. از آنجاکه کاهش میزان مصرف واحدهای بزرگ امری پیچیده‌تر است، هدف‌گذاری این طرح بر روی واحدهای صنعتی با مصرف کمتر خواهد بود؛ لذا بازه هدف مصرفی شرکت‌کنندگان در این طرح بین ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ کیلووات ساعت در نظر گرفته می‌شود. تعداد این مشترکین برابر با ۵۱ واحد خواهد بود.



شکل ۴. نمودار توزیع مصرف در واحدهای شهرک صنعتی مازندران (منبع: یافته‌های پژوهش)

فرایند طراحی ساختار تعرفه‌ای پیشنهادی

مدل پیشنهادی تعرفه‌گذاری برق در صنایع به صورت متفاوتی در نظر گرفته می‌شود. در مدل این پژوهش با در نظر گرفتن بسته‌های قیمتی - مقداری سعی در کنترل مصرف برق مشترکین صنعتی می‌شود. بسته‌های قیمتی - مقداری از چهار پارامتر اصلی "قیمت"، "اندازه بسته"، "تعداد بسته‌ها" و "فاصله بین بسته‌ها" تشکیل می‌شوند.

در مدل بسته‌های قیمتی - مقداری انرژی نیز همین شیوه پیاده خواهد شد. بسته‌های انرژی با اندازه انرژی متفاوت و با قیمت‌های متفاوت به فروش گذاشته خواهد شد. مشترک مناسب با عملکرد قبلی خود و نیاز خود متناسب‌ترین بسته را انتخاب خواهد کرد. این بسته‌ها طوری طراحی می‌گردد که هم میزان مصرف مشترک در پیک را کنترل کند و کاهش دهد و در عین حال مشترک بهای کمتری را بپردازد.

باتوجه به نکات گفته شده در بالا ساختار تعرفه‌ای برای مصرف صنعتی مطابق با روابط زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$Y = P + C_{off-peak} \times P' \quad C'_{on-peak} < X \quad (3)$$

Y بیانگر بهای تمام شده مصرف برق مشترک صنعتی است. P بهای بسته قیمتی - مقداری است. $C_{off-peak}$ نیز بیانگر میزان مصرف مشترک در ساعات غیر پیک بوده و نهایتاً P' بیانگر بهای مصرف برق در ساعات غیر پیک می‌باشد. در صورتی که مشترک قصد مصرف مقدار بیشتری برق داشته باشد می‌تواند بسته قیمتی - مقداری بالاتری را خریداری کند:

$$Y = P_2 + C_{off-peak} \times P' \quad X < C'_{on-peak} < X_2 \quad (4)$$

و این روند می‌تواند تا بسته‌های بالاتری ادامه یابد.

باعرضه این بسته‌ها مشترک صنعتی با سه خروجی مواجه خواهد شد:

۱. مشترک بسته‌ای را انتخاب و تهیه نماید و در طول عمر آن بسته میزان مصرف مشترک از مقدار بسته فزونی نیابد.

۲. مشترک بسته‌ای را انتخاب و تهیه نماید و در طول عمر آن بسته میزان مصرف مشترک از مقدار بسته فزونی یابد.

۳. مشترک بسته‌ای را انتخاب نکند و به شیوه سنتی تعرفه برق او مورد محاسبه قرار گیرد.

باتوجه به اینکه نحوه محاسبه مصرف برق صنعتی از رویکرد پلکانی پیروی نمی‌کند و تنها تعرفه برق در ایام کم باری، میان باری و پر باری متفاوت است می‌توان با طراحی بسته‌های قیمتی - مقدار مناسب مشترک را به استفاده از این بسته‌ها تشویق کرد و می‌توان مورد سوم رو نادیده گرفت.

همان‌طور که گفته شد این بسته‌ها از ۴ پارامتر تشکیل شده‌اند. برای وصول به هدف کاهش انرژی طراحی این بسته‌ها باید طوری باشد که مشترک مجاب به کاهش مصرف خود در ایام پیک شود. در زیر به بررسی این ۴ پارامتر پرداخته خواهد شد سپس پارامترهای مهم دیگری نظیر «میزان مشارکت» و «جرایم طرح» که روی نتیجه اجرای طرح تعرفه‌گذاری تأثیر دارند بررسی خواهد شد.

مدت بسته

این بسته‌ها متناسب با استراتژی در پیش گرفته شده می‌تواند ساعتی، روزانه، هفتگی، ماهانه و یا حتی فصلی باشد. هر از این مدت‌ها می‌تواند خروجی متفاوتی را به دنبال خواهد داشت. جهت انتخاب بهترین مدت بسته‌های قیمتی - مقدار از روش *TOPSIS* استفاده می‌گردد. در **جدول** باتوجه به معیارهای تأثیرگذار مقایسه‌ای بین مدت بسته‌های مختلف شده است، همچنین بسته به اهمیت هر معیار وزن آن در جدول آمده است.

قیمت و مقدار مصرف

قیمت و مقدار مصرف یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین بسته‌های قیمتی - مقدار است. این دو پارامتر در ارتباط با هم بوده و تعیین یکی بر روی دیگری اثرگذار است.

جدول ۲. مقایسه کیفی بین مدت بسته‌های مختلف (منبع: یافته‌های پژوهش)

مقایسه مدت بسته‌ها					وزن هر معیار	معیارهای تأثیرگذار بر مدت بسته
فصلی	ماهانه	هفتگی	روزانه	ساعتی		
**	**	*	*	-	***	امکان‌پذیری و وجود زیرساخت فنی
**	**	*	*	-	**	قابل‌مدیریت و برنامه‌ریزی
*	**	**	*	*	**	بهره‌وری در کاهش مصرف در ایام پیک
-	*	*	**	**	*	جزئی و دقیق
**	**	*	*	*	***	وجود اطلاعات آماری

در تعیین قیمت و مقدار بسته‌ها در راستای ترغیب مصرف‌کنندگان به مشارکت در طرح و کاهش مصرف مشترکین لازم است دو نکته زیر مدنظر قرار گیرد:

- ۱- قیمت بسته نسبت به بهای محاسبه شده در حالت عادی برای مشترک ارجحیت داشته باشد.
- ۲- با افزایش مقدار بسته لازم است تا قیمت آن با نسبت بیشتری افزایش یابد. به زبان ریاضی:

$$\frac{P_2}{P_1} > \frac{X_2}{X_1} \quad (5)$$

با در نظر گرفتن این ۲ نکته سه حالت برای سقف مجاز مصرف و دو حالت برای قیمت در نظر گرفته می‌شود که در مجموع منجر به ایجاد ۶ مدل مختلف می‌شود:

• سقف مجاز مصرف:

حالت ۱، توزیع متوازن: در مدل اول توزیع اندازه بسته‌ها بین ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ کیلووات‌ساعت نسبتاً برابر است. به طوری که ۶ بسته کمتر از ۱۰۰۰۰۰ کیلووات‌ساعت و ۶ بسته بیشتر از آن هستند.

حالت ۲، تمرکز بر روی شروع: در مدل دوم فاصله بین بسته‌ها در سمت شروع بسته‌ها یعنی ۱۰۰۰۰ کیلووات‌ساعت بیشتر است، به طوری که ۸ بسته از ۱۲ بسته کمتر از ۱۰۰۰۰۰ کیلووات‌ساعت هستند.

حالت ۳، تمرکز بر روی پایان: در مدل سوم برعکس مدل دوم فاصله بین بسته‌ها در سمت پایان بسته‌ها یعنی ۲۰۰۰۰۰ کیلووات‌ساعت بیشتر است، به طوری که ۸ بسته از ۱۲ بسته بیشتر از ۱۰۰۰۰۰ کیلووات‌ساعت هستند.

• قیمت بسته:

برای قیمت نیز در هر مدل سقف مجاز مصرف دو مدل قیمتی در نظر گرفته شده است.

حالت ۱، افزایش قیمت نسبتاً تصاعدی: افزایش قیمت بسته‌ها تا حدودی تصاعدی در نظر گرفته شده‌اند.

حالت ۲، افزایش قیمت کاملاً تصاعدی: در مدل دوم نسبت افزایش قیمت در بسته‌ها نسبت به مدل اول بیشتر در نظر گرفته شده است.

در مجموع ۶ مدل به صورت **جدول** در نظر گرفته شده است. در ادامه نتایج این ۶ مدل به وسیله مدل عامل بنیان بررسی می‌گردد.

تعداد و فاصله بسته‌های انرژی

با توجه به ظرفیت و تولید صنایع مختلف، واحدهای مختلف در بخش صنعت می‌توانند میزان مصرف بسیار متفاوتی داشته باشند. این موضوع ارزیابی و تحلیل تعرفه‌گذاری در واحدهای صنعتی را بسیار پیچیده می‌کند و ارائه یک مدل واحد برای تمام تولیدی‌ها را مختل می‌کند. در این راستا همانطور که ذکر شد لازم است تا محدوده خاصی از صنایع در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گیرند. مطابق با تعرفه‌گذاری‌های وزارت نیرو در سال ۹۸ مشترکین صنعتی به دو دسته با قدرت بیش از ۳۰ کیلووات و با قدرت کمتر از ۳۰ کیلووات طبقه‌بندی شده‌اند (تعرفه، قوانین و مقررات فروش برق، ۱۳۹۸). در این پژوهش نیز مشترکین با قدرت ۳۰ کیلووات و کمتر مورد هدف‌گذاری قرار می‌گیرند که بیانگر مشترکین صنعتی کوچک و متوسط می‌باشد.

جدول ۳. مدل‌های پیشنهادی برای بسته‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای مقدار مصرف و قیمت (منبع: یافته‌های پژوهش)

۲۰	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲	۱۰	۸۰	۶۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱	سقف مجاز مصرف (هزار کیلووات ساعت در ماه)	توزیع متوازن سقف مجاز مصرف
۲۱	۱۷	۱۴	۱۲	۱۰	۸	۶/۵	۵	۳	۲/۵	۱/۵	۱	ضریب قیمتی ۱ نسبت به کوچک‌ترین بسته	
۲۹	۲۳	۱۹	۱۶	۱۳	۱۰	۸	۶	۳/۵	۳	۱/۶	۱	ضریب قیمتی ۲ نسبت به کوچک‌ترین بسته	
۲۰	۱۷	۱۴	۱۱	۸۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱	۱	سقف مجاز مصرف (هزار کیلووات ساعت در ماه)	توزیع تمرکز روی شروع سقف مجاز
۲۲	۱۸	۱۴/۵	۱۱/۵	۹	۷	۵/۵	۴/۲	۳	۲	۱/۲	۱	ضریب قیمتی ۱	

												نسبت به کوچکات رین بسته
												ضریب قیمتی ۲ نسبت به کوچکات رین بسته
	۳۱	۲۵	۲۰	۱۶	۱۲/ ۵	۹/۵	۷	۵	۳/ ۵	۲/ ۲	۱/ ۳	۱
												سقف مجاز مصرف (هزار) کیلووات‌سا عت در (ماه)
	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۳	۱۰	۸	۵	۳	۱
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵
												ضریب قیمتی ۱ نسبت به کوچکات رین بسته
	۲۳	۲۰/ ۵	۱۸	۱۶	۱۴	۱۲/ ۵	۱۰	۸	۶	۳/ ۵	۲	۱
												ضریب قیمتی ۲ نسبت به کوچکات رین بسته
	۳۲	۲۸	۲۴/ ۵	۲۱	۱۸	۱۶/ ۵	۱۳/ ۵	۱۰	۷	۴/ ۵	۲/ ۵	۱

توزیع تمرکز بر روی پایان سقف مجاز مصرف

در طراحی تعداد بسته‌های انرژی باید در نظر داشت که فاصله میزان مصرف مشترک در سال قبل نزدیک به بسته خریداری شده باشد. اگر این فاصله زیاد باشد مشترک را متمایل به خرید بسته با اندازه بیشتر می‌کند و این موضوع در نهایت باعث افزایش مصرف این مشترک خواهد شد. این موضوع لزوم کاهش فاصله بین بسته‌ها را نشان می‌دهد، از طرفی اگر تعداد بسته‌ها خیلی زیاد شود، علاوه بر سردرگم شدن مشترک در تهیه بسته مدنظر، باعث کاهش بهره‌وری در برنامه کاهش پیک مصرف خواهد شد. این موضوع لزوم افزایش فاصله بین بسته‌ها را نشان می‌دهد، بنابراین جهت انتخاب مناسب‌ترین فاصله بین بسته‌ها لازم است تا هر دو موضوع مطرح شده لحاظ شود و این فاصله هر دو هدف را تأمین کند.

باتوجه به گستردگی بازه مصرفی در نظر گرفته شده برای مشترکین صنعتی از ۱۰،۰۰۰ تا ۲۰۰،۰۰۰، تعیین تعداد دقیق بسته‌ها امری مهم است. چهار نمونه بسته پیشنهادی با تعداد ۸ و ۱۲ و ۱۶ و ۲۰ برای این کار پیش‌بینی شده است. برای انتخاب بهترین گزینه از روش تاپسیس استفاده می‌شود. در **جدول** باتوجه به معیارهای تأثیرگذار، تعداد بسته‌های پیشنهادی به صورت کیفی مقایسه شده است، همچنین بسته به اهمیت هر معیار وزن آن در جدول آمده است.

جدول ۴. مقایسه کیفی بین مدت‌های مختلف بسته‌های قیمتی-مقداری و وزن عوامل موثر بر تعداد بسته‌ها (منبع: یافته‌های پژوهش)

مقایسه تعداد بسته‌ها				وزن معیارهای تأثیرگذار	عوامل تأثیرگذار بر تعداد بسته‌ها
۲۰ بسته	۱۶ بسته	۱۲ بسته	۸ بسته		
***	**	**	*	**	تمایل به خرید بسته با مقدار کمتر
*	**	**	***	**	بیشترین کاهش مصرف
*	**	***	**	*	عدم سردرگمی مصرف‌کننده
*	*	**	**	*	قابل مدیریت و برنامه‌ریزی

جریمه عدم مشارکت و جریمه عدول از مقدار سقف بسته

بخشی از مشترکین به دلایل مختلف در بدو اجرای طرح در آن شرکت نمی‌کنند. این موضوع می‌تواند ناشی از عدم اطلاع‌رسانی دقیق، عدم وجود انگیزه کافی برای ورود به طرح جدید و ... باشد. لذا برای افزایش مشارکت در اجرای این طرح لازم است تا جریمه‌ای برای مشترکینی که در طرح شرکت نمی‌کنند در نظر گرفته شود.

در این پژوهش جریمه عدم مشارکت بدین صورت در نظر گرفته می‌شود که اگر مشتری در تعرفه پیشنهادی مشارکت نکند، مصرف برق مطابق تعرفه قبلی و با اعمال میزان مشخصی درصد افزایش قیمت محاسبه خواهد شد. این میزان مشخص در این پژوهش ۳۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.

بخش دیگری از مشترکین وجود دارند که در طرح مشارکت می‌کنند اما نمی‌توانند سقف مجاز بسته خریداری شده را رعایت کنند و از آن میزان عدول خواهند کرد. جهت جلوگیری از این اتفاق لازم است جریمه‌ای جهت عدول از مقدار مجاز بسته خریداری شده در نظر گرفته شود.

در این پژوهش جریمه عدول از سقف بسته بدین صورت در نظر گرفته می‌شود که اگر مشتری از سقف مجاز بسته خریداری شده عدول کند، ما به تفاوت مصرف برق نسبت به سقف مصرف متناسب با تعرفه‌ای بالاتر از تعرفه آزاد مورد محاسبه قرار می‌گردد. این میزان جریمه ۲۰ درصد بالاتر از تعرفه آزاد در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است، میزان این جریمه‌ها می‌تواند متفاوت با میزان در نظر گرفته لحاظ شود که نتایج متفاوتی حاصل خواهد شد.

میزان مشارکت اولیه

میزان مشارکت اولیه در این طرح می‌تواند در نتایج حاصل از اعمال این تعرفه‌گذاری اثرگذار باشد. این بدان معنی است که بخشی از مشترکین به دلیل کاستی‌های تبلیغات و اطلاع‌رسانی از طرح جدید باخبر نخواهند شد و روند قبلی را ادامه خواهند داد. در مصارف خانگی این تأثیر به مراتب بیشتر است، چرا که اطلاع‌رسانی تعرفه‌گذاری جدید در میان مشترکین خانگی امری دشوارتر و زمان‌برتر است.

باتوجه به اینکه میزان مشارکت اولیه در مصارف صنعتی اطمینان‌پذیری بیشتری از مصارف خانگی دارد لذا در این پژوهش این متغیر در حالت خوش‌بینانه ۶۰٪ و در حالت بدبینانه ۳۰٪ در نظر گرفته می‌شود و نتایج بر این مبنا به دست می‌آید و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. به‌مروزرمان و با اجرای این طرح میزان مشارکت افزایش یافته و به درصدهای بالاتر خواهد رسید.

برنامه‌نویسی و پیاده‌سازی مدل عامل بنیان در محیط نرم‌افزاری

باتوجه به تدوین یک ساختار تعرفه‌ای جدید مبتنی بر بسته‌های قیمتی - مقداری لازم است با مدل‌سازی عرضه این بسته‌ها به مشترکین به پیش‌بینی رفتار مشترکین در قبال این ساختار تعرفه‌ای جدید پردازیم. همان‌طور که مشخص است در این مدل‌سازی این مشترکین صنعتی هستند که در مدل‌سازی وارد شده و رفتار آن‌ها ارزیابی می‌گردد. باتوجه به اینکه مشترکین صنعتی موجودیت‌هایی هوشمند، مختار و مستقل هستند لذا استفاده از مدل‌سازی عامل بنیان در این پژوهش منطقی است و در این پژوهش از این شیوه استفاده می‌گردد. به‌طور کلی می‌توان مزیت استفاده از مدل‌سازی عامل بنیان در این پژوهش را نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی، قدرتمند بودن این روش در مدل‌سازی موجودیت‌های هوشمند و اجتماعی دانست.

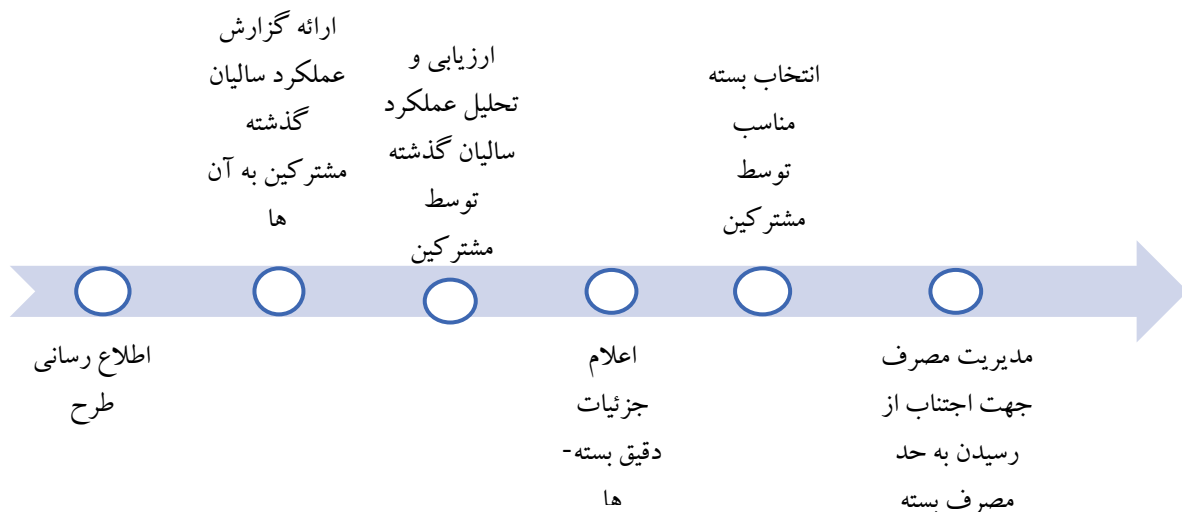
برای طراحی یک مدل عامل بنیان، ابتدا باید عناصر اساسی سیستم واقعی شناسایی شده و سپس مشابه همان عناصر، عامل‌هایی در مدل شبیه‌سازی ایجاد شود. به هر یک از این عوامل، می‌توان مشخصات جدیدی را اختصاص داد. برای مثال هر مشترک در بازار برق، دارای سابقه مصرف، سطح مالی، آگاهی نسبت به مسئله مدیریت انرژی و ... منحصر به فرد است که در مدل‌سازی عامل بنیان باید برای هر عامل به‌طور جداگانه تعریف شود. پس از آن به تعریف متغیرها یا ثابت‌های عمومی در مدل پرداخته خواهد شد؛ متغیرهای تعریف شده، به‌صورت سراسری و عمومی بوده و توسط عوامل در دسترس هستند و می‌توانند در هر نقطه از یک مدل استفاده شوند. روند ساخت یک مدل عامل بنیان شامل پاسخ‌دادن به سؤالات زیر است:

۱. کدامین یک از اجزای واقعیت برای مدل موردنظر مهم هستند؟ این اجزا به‌عنوان عامل در مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته خواهند شد.

۲. آیا بین اجزای واقعیت ارتباط معناداری وجود دارد؟ لازم است تا ارتباط بین این اجزا مشخص گردد.
 ۳. آیا فضایی که اجزای واقعیت در آن قرار گرفته‌اند اهمیت دارد؟ در صورت جواب مثبت، فضای مدل (چندبعدی یا گسسته) و مکان قرارگیری اجزا در فضا معین می‌گردند.
 ۴. رویدادهای مهم در عامل شناسایی خواهند شد. این رویدادها می‌تواند از خارج به یک عامل مورد تحمیل قرار گیرند و یا آن‌ها حوادث درون عاملی، به وجود آمده از پویایی خود عامل هستند؟
 ۵. آیا عامل‌ها با یکدیگر در ارتباط هستند؟ اگر بله برای طراحی الگوهای ارتباطی می‌توان از نمودار توالی پیام استفاده کرد.
 ۶. آیا اطلاعاتی داخل عامل موجود است که لازم باشد بین همه عوامل به اشتراک گذاشته شود؟
 ۷. انتظار می‌رود چه نتایجی از مدل به دست آید؟ بر مبنای نتایجی که انتظار می‌رود شاخص‌های لازم تعریف می‌گردند (سیف‌الدین & سراج، ۱۳۹۹).
- در این پژوهش عامل متشکل از مشترکین صنعتی است که هدف کاهش مصرف آن‌ها در زمان پیک مصرف است و محیط بازار فروش برق به مشترکین صنعتی است. در واقع هر یک از عامل‌ها می‌توانند در این محیط به انتخاب بسته موردنظر خود پردازند و یا در صورت عدم ورود به این طرح جریمه شوند.
- جهت شبیه‌سازی عامل بنیان در این پژوهش، نحوه عملکرد اجزای مدل، سازوکار تصمیم‌گیری و تعامل میان عامل‌ها با توجه به مدل مفهومی عامل بنیان در پژوهش سیف‌الدین و همکاران (سیف‌الدین & سراج، ۱۳۹۹) برای پارامترهای بررسی شده در این پژوهش در محیط نرم افزار متلب پیاده‌سازی شده است. در ادامه چگونگی پیاده‌سازی این طرح و مفهوم آگاهی مشترک که در مدل‌سازی به کار رفته است شرح داده می‌شود.

چگونگی پیاده‌سازی طرح از منظر مدیریتی

در شکل ۵ مسیر پیاده‌سازی این طرح از منظر مدیریتی به تصویر کشیده شده است:



شکل ۵. چگونگی پیاده‌سازی طرح از منظر مدیریتی

جهت انتخاب صحیح بسته توسط مشترک لازم است تا مشترک روند و چگونگی مصرف خود در سالیان گذشته را بداند. به همین جهت لازم است وزارت نیرو گزارش عملکرد دقیق و ساعتی مشترکین را برای حداقل ۳ سال گذشته در اختیار آن‌ها قرار دهد. هم‌زمان لازم است تا کلیات طرح به اطلاع عموم مشترکین برسد.

در قدم بعدی مشترکین با ارزیابی و تحلیل مصرف خود در سالیان گذشته نسبت به ورود یا عدم ورود به این طرح تصمیم‌گیری خواهند کرد. لازم است تا وزارت نیرو در این مرحله اقدام به دریافت بازخورد از مشترکین و اعمال آن در طراحی بسته‌های انرژی قیمتی - مقداری خود نماید و در نهایت جزئیات دقیق این بسته‌ها را منتشر کند. مشترکین با کسب اطلاع از جزئیات بسته‌ها نسبت به انتخاب بسته موردنظر خود خواهند کرد. با توجه به اینکه بسته‌ها طوری طراحی شده‌اند که مشترک به کاهش مصرف خود متمایل گردد این مشترک در طول ماه سعی در مدیریت مصرف خود جهت اجتناب از رسیدن به حد مصرف بسته خواهد داشت.

آگاهی مشترک^۱

با در نظر گرفتن نتیجه ذکر شده در بخش قبل لازم است تا پارامتری به‌عنوان پارامتر "آگاهی مشترک" تعریف شود. در اجرای هر طرحی در ابتدا عده‌ای مشارکت نمی‌کنند و یا مشارکت نموده اما نمی‌توانند رفتار خود را مطابق با طرح کنترل نمایند. با گذر زمان و پدیدار شدن اثرات طرح پیاده‌سازی شده، سایر مشترکین نیز به طرح پیوسته و یا رفتار خود را مطابق با مدل پیشنهادی طرح تنظیم خواهند کرد.

برای در نظر گرفتن این موضوع در مدل‌سازی این پژوهش متغیری به نام آگاهی مشترک با نماد M تعریف می‌گردد. این پارامتر نشان‌دهنده آگاهی هر مشترک نسبت به مسئله بهینه‌سازی و مدیریت انرژی است که مستقیماً بر رفتار مشترک اثرگذار خواهد بود و میزان و نحوه مشارکت مشترکین در این طرح را مشخص خواهد کرد. در تعامل با این پارامتر مشترکین به دودسته طبقه‌بندی خواهند شد:

$M < M'$: در این صورت مشترک در ساختار تعرفه‌ای جدید مشارکت نخواهد کرد

$M > M'$: در این صورت مشترک در ساختار تعرفه‌ای جدید مشارکت خواهد کرد

M' نقطه‌ای بحرانی است که مرز بین مشارکت مشترکین را مشخص خواهد کرد.

در این پژوهش M تنها وابسته به قیمت در نظر گرفته خواهد شد. با در نظر گرفتن این فرض مطابق با نتایج پژوهش‌های مختلف مقدار M از رابطه زیر دست می‌آید که عددی بین ۰ تا ۱۰۰ خواهد بود (Zhang, Siebers, & Aickelin, (Lin, Wang, Wang, & Wennerstern, ۲۰۱۶) (Maya Sopha, A.Klöckner, & G.Hertwich, ۲۰۱۱).

$$M = M_0 + [(100 - M_0) \times \frac{\Delta P}{P_0} \times \alpha] \quad (6)$$

M : آگاهی از بهینه‌سازی مصرف انرژی پس از اعمال تعرفه جدید

M_0 : آگاهی مشترک نسبت به بهینه‌سازی مصرف انرژی پیش از تغییرات قیمتی یا تعرفه‌ای

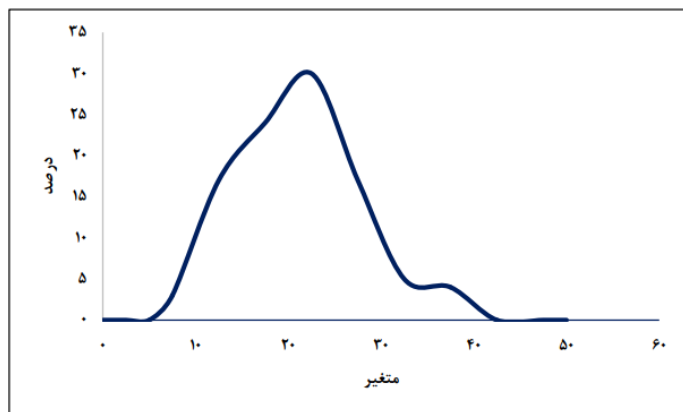
^۱ Share awareness

P: قیمت اولیه واحد انرژی

α : ثابتی بین ۰ تا ۱ که نشان‌دهنده عدم تأثیر یکسان افزایش قیمت هر واحد انرژی بر تغییرات مصرفی مشتریان

M_0 : به طور معمول وابسته به دو عامل تبلیغات و نسبت قیمت انرژی به درآمد سرانه اعضای جامعه است.

اینک برای تخمین توزیع متغیر M_0 در مرحله اول فرض می‌شود که این M_0 تنها وابسته به قیمت است و این قیمت است که میانگین متغیر M_0 را جابه‌جا می‌کند. با مقایسه درآمد سرانه ایران با سایر مناطق مورد مطالعه در پژوهش‌های دیگر مورد M_0 با یک توزیع نرمال با میانگین ۱۶/۵ به کل جامعه مشتریان صنعتی اختصاص داده خواهد شد. از آن جایی که اطلاع‌رسانی در میزان ورود به طرح اثرگذار است، با در نظر گرفتن اثر تبلیغات در کنار متغیر هزینه منحنی توزیع نرمال M_0 به صورت شکل ۶ خواهد بود.



شکل ۶. توزیع متغیر M_0 ، وابسته به قیمت و تبلیغات مشتریان (Lin, Wang, Wang, & Wennerstern, ۲۰۱۶)

در نهایت همان‌طور که گفته شد اگر متغیر M مشترک‌کی بیش از مقدار مشخصی باشد این مشترک در طرح جدید مشارکت خواهد کرد و اگر کمتر از این میزان باشد این مشترک در طرح مشارکت نخواهد داشت که در این حالت با اعمال P درصد جریمه، متغیر M مشترک افزایش خواهد یافت و احتمال مشارکت او در دوره‌های بعدی افزایش خواهد یافت (سیف‌الدین & سراج، ۱۳۹۹).

نتایج و تجزیه و تحلیل داده‌ها

در بخش قبل به بیان روش تحقیق پرداخته شد و فرایند طراحی ساختار تعرفه‌ای پیشنهادی به صورت مبسوط شرح داده شد. در همین خلال به تشریح مدت بسته‌های قیمتی-مقداری، تعداد و فاصله بسته‌های انرژی پرداخته شد. در نهایت با مدل‌سازی حالت‌های مختلف با استفاده از مدل‌سازی عامل‌بنیان، نتایج حاصل از هر مدل آورده شده است.

نتایج طراحی بسته‌های قیمتی - مقداری

همان‌طور که در قسمت‌های قبل گفته شد، برای تعیین مدت بسته، تعداد بسته‌ها و فاصله بین بسته‌ها از روش تاپسیس استفاده شده است. در این روش با توجه به ماتریس‌های تصمیم اشاره شده در بخش‌های قبل، این محاسبات صورت گرفته است.

- تعیین مدت بسته

با انجام محاسبات شاخص شباهت برای هر معیار تأثیرگذار بر مدت بسته‌ها به دست آمده است، هرچه قدر این شاخص به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان از برتری آن گزینه می‌دهد. با توجه به نتیجه روش *TOPSIS* بسته ماهانه با شاخص شباهت ۰/۵۹ بهترین گزینه است؛ لذا در این پژوهش مدت‌زمان بسته قیمتی - مقداری انرژی به صورت ماهانه در نظر گرفته می‌شود.

- تعیین تعداد و فاصله انرژی

با توجه به روش تاپسیس، شاخص شباهت برای معیارهای موردنظر به دست آمد. با توجه به نتیجه روش تاپسیس تعداد بسته ۱۲ با شاخص شباهت ۰/۵۷ بهترین گزینه می‌باشد؛ لذا در این پژوهش تعداد بسته قیمتی - مقداری انرژی ۱۲ عدد در نظر گرفته می‌شود. جمع‌بندی طراحی بسته‌های قیمتی - مقداری پیشنهادی در **جدول ۵** نشان داده شده است.

متغیرهای بازه اعمال طرح، مدت بسته، تعداد و فاصله بین بسته‌ها، جریمه عدم مشارکت و جریمه عدول از مقدار سقف بسته ثابت و سه متغیر اندازه (سقف مجاز) بسته، قیمت بسته و میزان مشارکت اولیه متغیر در نظر گرفته‌اند.

جدول ۵. جمع بندی طراحی بسته های قیمتی - مقداری پیشنهادی (منبع: یافته های پژوهش)

عنوان	مقدار	ثابت/متغیر	روش انتخاب
بازه اعمال طرح	۱۰ تا ۲۰۰ هزار کیلووات ساعت	ثابت	تحلیل داده
مدت بسته	۱ ماه	ثابت	روش TOPSIS
تعداد و فاصله بین بسته‌ها	۱۲ بسته	ثابت	روش TOPSIS
اندازه (سقف مجاز) بسته	۳ مدل مختلف	متغیر	پیشنهادی
قیمت بسته	۲ مدل مختلف	متغیر	محاسبه - پیشنهادی
جریمه عدم مشارکت	۳۰ درصد	ثابت	پیشنهادی
جریمه عدول از مقدار سقف بسته	۲۰ درصد	ثابت	پیشنهادی
میزان مشارکت اولیه	۶۰ درصد	متغیر	پیشنهادی
	۳۰ درصد		

اندازه (سقف مجاز) بسته دارای ۳ حالت، قیمت بسته دارای دو حالت و میزان مشارکت اولیه نیز دارای دو حالت است لذا در نهایت ۱۲ خروجی متفاوت به دست خواهد آمد.

مدل مفهومی تشریح شده در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و در ادامه نتایج حاصل از ۱۲ حالت پیشنهادی آورده خواهد شد. لازم به ذکر است همان‌طور که گفته شد، در هر ۱۲ بسته پارامترهای «بازه اعمال طرح»، «مدت بسته»، «تعداد بسته»، «جریمه عدم مشارکت» و «جریمه عدول از سقف بسته» ثابت هستند و سه پارامتر «سقف مجاز مصرف»، «قیمت بسته» و «مشارکت اولیه» نیز متغیر خواهند که جزئیات آن در هر حالت آورده شده است. ۱۲ حالت پیشنهادی را می‌توان به شرح **جدول ۶** خلاصه کرد.

جدول ۶. مشخصات ۱۲ مدل تعرفه‌گذاری مختلف پیشنهادی (منبع: یافته‌های پژوهش)

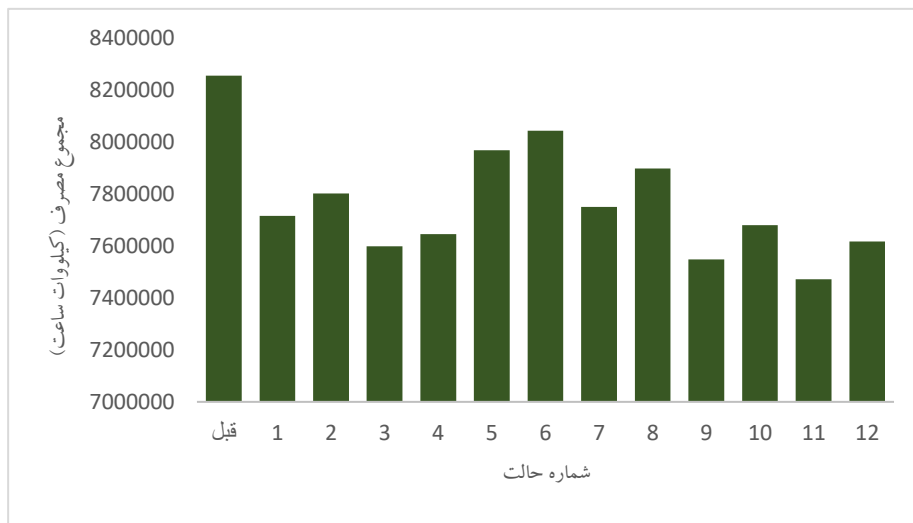
حالت	سقف مجاز مصرف	قیمت بسته	مشارکت اولیه	پارامترهای ثابت
۱	توزیع متوازن	نسبتاً تصاعدی	٪۳۰	بازه اعمال طرح: ۱۰ الی ۲۰۰ هزار کیلووات‌ساعت
۲	توزیع متوازن	نسبتاً تصاعدی	٪۶۰	مدت بسته: ۱ ماه
۳	توزیع متوازن	کاملاً تصاعدی	٪۳۰	تعداد بسته‌ها: ۱۲ بسته
۴	توزیع متوازن	کاملاً تصاعدی	٪۶۰	
۵	تمرکز بر روی شروع	نسبتاً تصاعدی	٪۳۰	جریمه عدم مشارکت: ۳۰ درصد
۶	تمرکز بر روی شروع	نسبتاً تصاعدی	٪۶۰	
۷	تمرکز بر روی شروع	کاملاً تصاعدی	٪۳۰	جریمه عدول از مقدار سقف بسته: ۲۰ درصد
۸	تمرکز بر روی شروع	کاملاً تصاعدی	٪۶۰	
۹	تمرکز بر روی پایان	نسبتاً تصاعدی	٪۳۰	
۱۰	تمرکز بر روی پایان	نسبتاً تصاعدی	٪۶۰	
۱۱	تمرکز بر روی پایان	کاملاً تصاعدی	٪۳۰	
۱۲	تمرکز بر روی پایان	کاملاً تصاعدی	٪۶۰	

شبیه‌سازی ساختارهای تعرفه‌ای پیشنهادی با استفاده از مدل‌سازی عامل بنیان

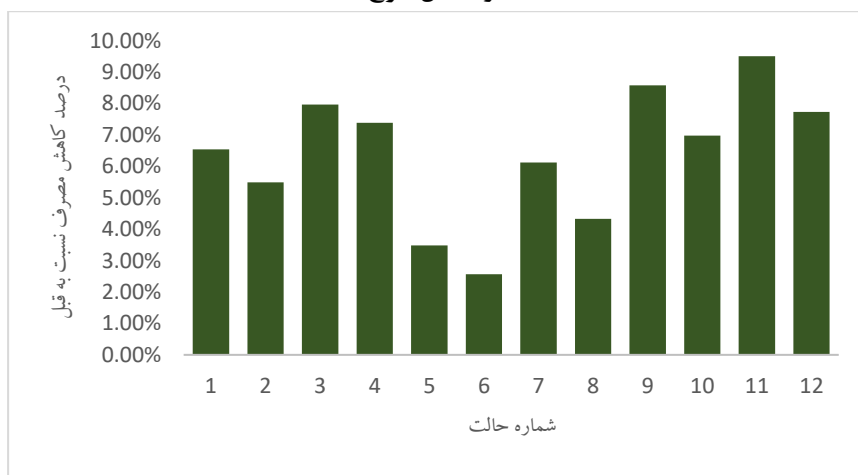
با پیاده‌سازی طرح‌های پیشنهادی تعرفه‌گذاری و پیش‌بینی و ارزیابی نتایج آن در جامعه می‌توان بهره‌وری اثر بخشی تدوین تعرفه‌های جدید را افزایش داد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۱۲ حالت پیشنهاد شده در مدل عامل بنیان که در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد نتایج مصرف به صورت نمودار شکل ۷ به دست آمده است و مصرف انرژی در مجموع سه ماه خرداد، تیر و مرداد به نمایش درآمده است.

با نگاهی به نمودار بالا می‌توان این نکته را دریافت که اعمال طرح‌های تعرفه‌گذاری می‌تواند بخشی از میزان مصرف در بخش صنعتی در ساعات پیک را کاهش دهد.

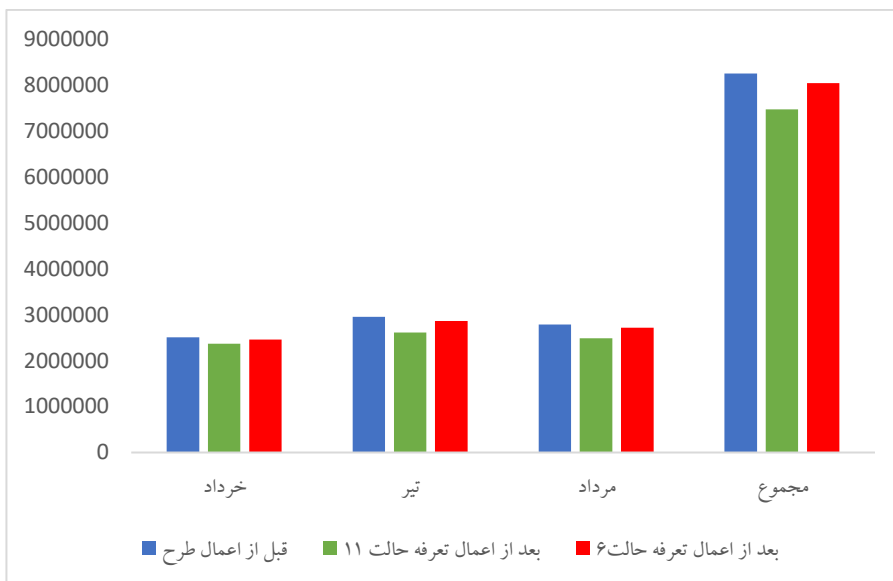
همچنین در شکل ۸ درصد کاهش مصرف در ۱۲ حالت تعرفه‌گذاری پیشنهادی نسبت به قبل از اعمال طرح در مجموع ماه‌های خرداد، تیر و مردادماه به‌نمایش درآمده است.



شکل ۷. مجموع مصرف برق سه ماه خرداد، تیر و مرداد در ۱۲ حالت پیشنهادی در مقایسه با قبل از اعمال طرح



شکل ۸. نمودار درصد کاهش مصرف در ۱۲ حالت تعرفه‌گذاری پیشنهادی نسبت به قبل از اعمال طرح در مجموع ماه‌های خرداد، تیر و مرداد



شکل ۹. میزان مصرف برق طی سه ماه مورد مطالعه برای تعرفه‌های با بیشترین و کمترین کاهش مصرف برق

با توجه به این نمودار می‌توان این نکته را دریافت که اعمال طرح‌های تعرفه‌گذاری می‌تواند بخشی از میزان مصرف در بخش صنعتی در ساعات پیک را کاهش دهد. شکل ۹ میزان مصرف در طی سه ماه مورد مطالعه را برای بهترین و بدترین حالت تعرفه نشان می‌دهد، همان‌طور که در این شکل مشخص است مجموع میانگین بیشترین کاهش مصرف در حالت ۱۱ ام با ۹/۵۱٪ کاهش و مجموع میانگین کمترین کاهش مصرف در حالت ۶ ام با ۲/۵۷٪ کاهش اتفاق می‌افتد.

همان‌طور که پیشتر ذکر شد بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته حول تعرفه‌گذاری برق برای مشترکین خانگی است. در این پژوهش یکی از مواردی که نسبت به عموم پژوهش‌های مربوطه متفاوت است تمرکز بر روی تعرفه‌گذاری برای بخش صنعتی است. همچنین مدل‌سازی عامل بنیان که در این پژوهش از آن استفاده شده است مفهومی نسبتاً جدید بوده و کمتر کسی در ارزیابی اثر بخشی تعرفه‌گذاری‌های جدید از آن استفاده کرده است. در نمودار شکل‌های فوق مشاهده می‌شود اهمیت مدل-

سازی عامل بنیان در بررسی اثرگذاری و نتایج حاصل از پیاده‌سازی تعرفه‌گذاری‌های جدید بسیار چشمگیر است.

همچنین با ارزیابی این ۱۲ حالت می‌توان به نتایج زیر رسید:

- میزان مشارکت اولیه ۳۰٪ از میزان مشارکت اولیه ۶۰٪ درصد کاهش مصرف بیشتری را به دنبال دارد.
- مدل قیمتی با افزایش کاملاً تصاعدی قیمت بسته‌ها نسبت به افزایش نسبتاً تصاعدی قیمت بسته‌ها درصد کاهش مصرف بیشتری را به دنبال دارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع تمرکز بر روی پایان سقف مجاز مصرف نسبت به توزیع متوازن سقف مجاز مصرف و همچنین توزیع تمرکز بر روی شروع سقف مجاز مصرف درصد کاهش مصرف بیشتری را به دنبال دارد. لازم به ذکر است که یکی دیگر از جنبه‌های نوآوری که در این پژوهش لحاظ شده متفاوت در نظر گرفتن میزان مشارکت اولیه و ارزیابی اثر بخشی آن در نتایج نهایی است.

جمع‌بندی

باتوجه به رشد روزافزون نیاز به انرژی الکتریکی و همچنین محدودیت‌های پیشرو در تولید برق، لازم است تا میزان مصرف برق مدیریت گردد. در کشور ایران در سال ۱۳۹۹ میزان مصرف برق در حوزه صنعت ۳۴/۷ درصد بوده است. این موضوع نشانگر اثرگذاری چشمگیر بخش صنعت بر میزان مصرف برق است؛ بنابراین اقداماتی که شامل تغییر در رفتار مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی در بخش صنعتی شود، موردنیاز خواهد بود. به همین جهت در راستای تجربیات جهانی، می‌توان انتظار داشت با بازنگری در ساختارهای تعرفه‌ای بخش صنعتی، الگوی مصرف در این بخش اصلاح شود. هدف اصلی و کلی این پژوهش بررسی امکان کاهش تقاضا در زمان‌های اوج بار و تغییر الگوی مصرف مشترکین برق صنعتی در اثر تغییر ساختار تعرفه‌ای است.

در این پژوهش یک ساختار تعرفه‌گذاری جدید با جایگزینی بسته‌های قیمتی - مقداری به‌جای تعرفه ثابت در زمان اوج مصرف برای مصارف صنعتی پیشنهاد شد و به جهت سنجش اثربخشی این ساختار

پیشنهادی، در بخش دوم این پژوهش با طراحی یک مدل عامل بنیان، تأثیر و نتایج حاصل از آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در پژوهش فوق جهت دستیابی به بسته‌های قیمتی - مقداری انرژی به تدوین پارامترهای تشکیل‌دهنده آن پرداخته شد. در قدم اول محدوده هدف اعمال طرح جدید با آنالیز داده-های ۶۲ واحد صنعتی در یک شهرک صنعتی در مازندران مشخص گردید. محدوده هدف طرح در این پژوهش بین مشترکینی با مصرف ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ کیلووات‌ساعت در نظر گرفته شد. قدم بعدی تعیین مدت بسته بود که با استفاده از روش *TOPSIS* مدت بسته به صورت ماهانه انتخاب گردید. سپس نوبت به تعیین تعداد بسته‌های انرژی رسید که مجدداً با استفاده از روش *TOPSIS* تعداد بسته‌ها ۱۲ عدد انتخاب گردید. مرحله بعدی تعیین قیمت و اندازه بسته‌ها بود. این دو پارامتر به صورت متغیر در نظر گرفته شد به گونه‌ای که برای اندازه بسته‌ها ۳ حالت و برای قیمت نیز ۲ حالت پیشنهاد گردید. همچنین جهت تکمیل ساختار تعرفه‌گذاری جدید علاوه بر تعیین مشخصات بسته‌ها، جریمه عدم مشارکت در طرح به مقدار ۳۰٪ تعرفه ثابت و همچنین جریمه عدول از مقدار سقف بسته‌ها به میزان ۲۰٪ تعرفه ثابت در نظر گرفته شد. در نهایت پارامتر میزان مشارکت اولیه در دو پیشنهاد ۳۰ درصدی و ۶۰ درصدی ارائه گردید. نهایتاً ۱۲ ساختار تعرفه‌گذاری مختلف پیشنهاد گردیده است.

در بخش دوم پژوهش با شبیه‌سازی ساختارهای تعرفه‌ای پیشنهادی با استفاده از مدل‌سازی عامل بنیان نتایج هر یک از این ساختارها پیش‌بینی گردید. لازم به ذکر است این شبیه‌سازی برای سه ماه خرداد، تیر و مرداد انجام شد که مصرف انرژی در این ۳ ماه در بیشترین حالت است. نتایج نشان می‌دهد درصد کاهش مصرف نسبت به پیش از اعمال طرح مطابق با ساختارهای ذکر شده از ۲/۵۷٪ تا ۹/۵۱٪ متغیر است که بیشترین کاهش مصرف مربوط به ساختار تعرفه‌ای ۱۱ است. این نتایج بیانگر اثر بخشی ساختار تعرفه‌ای جدید طراحی شده و اهمیت مدل‌سازی عامل بنیان در بررسی این ساختار تعرفه‌ای است. نتایج فوق همچنین نشان می‌دهد که میزان مشارکت ۳۰ درصدی مشترکان در طرح بیشترین کاهش مصرف را به دنبال خواهد داشت.

در ادامه برای پژوهش‌های آینده موضوعات زیر پیشنهاد می‌شود:

۱. با توجه به این که ساختار تعرفه‌گذاری در این پژوهش بر روی مشترکین صنعتی با میزان مصرف کم و متوسط متمرکز گردید، می‌توان طی پژوهش‌های دیگری محدوده هدف را

به سایر مشترکین از جمله مشترکین صنعتی با میزان مصرف زیاد و یا مشترکین تجاری، کشاورزی و غیره تغییر داد و نتایج را ارزیابی و تحلیل نمود.

۲. در این پژوهش با طراحی ساختار تعرفه‌ای از دید مشترک به مساله نگاه شد. میتوان با طراحی مدلی دیگر در همین راستا، از دید وزارت نیرو (شرکت مجری طرح) به این مساله نگاه کرد.

۳. مراجع

- ده نوری، ا.، عبدی، ح.، & محمدی، ف. (۱۴۰۲). مدلسازی بهینه برنامه پاسخگویی بار زمان استفاده (TOU) مسئله توزیع بار اقتصادی هزینه آلودگی دینامیک (DEED فصلنامه کهریا، دوره ۱۰ شماره ۳۹.
- سیف‌الدین، ا.، & سراج، ح. (۱۳۹۹). مدیریت تقاضای برق خانگی با اصلاح ساختار تعرفه‌ها: رویکرد مدلسازی عامل‌بنیان. فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، ۶ (۴): ۸۰-۴۷.
- شریفی، ز. (۱۴۰۲). برنامه ریزی و اجرای برنامه های مدیریت سمت تقاضا در شرکت توزیع نیروی برق شیراز. فصلنامه کهریا، دوره ۱۰ شماره ۳۹.
- صبوری، ع. (۱۳۹۵). طراحی بهینه برنامه پاسخگویی بار قیمت گذاری زمان استفاده با توجه به مشخصات بار. پژوهشکده فنی و مهندسی - دانشگاه حکیم سبزواری - وزارت علوم، تحقیقات و فناوری.
- هوشمند، ه.، & خلیل زاده، ا. (۱۳۹۶). ارایه الگوریتم قیمت گذاری زمان واقعی جهت مدیریت مصرف کننده ها بر اساس بازار برق شبکه. پنجمین کنفرانس بین المللی تحقیقات نوین پژوهشی در مهندسی و تکنولوژی.
- وزارت نیرو. (۱۳۹۵). مدلسازی مدیریت بار و انرژی در سیستم هوشمند اندازه‌گیری ایرانمفاهیم پاسخگویی بار. سازمان بهره وری انرژی ایران.
- وزارت نیرو. (۱۳۹۷). آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه مدیریت راهبردی. شرکت مادر تخصصی توانیر.
- وزارت نیرو. (۱۳۹۸). تعرفه، قوانین و مقررات فروش برق.
- وزارت نیرو. (۱۳۹۹). آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژه مدیریت راهبردی. شرکت مادر تخصصی توانیر.

Econ, B. C. (۲۰۱۸). *The impact of tariff structure changes on energy vulnerable households*. Work Horiz Power.

Jahid Hasan, A., Fernando Enriquez-Contreras, L., Yusuf, J., & Ula, S. (۲۰۲۳). A universal optimization framework for commercial building loads using DERs from

utility tariff perspective with tariff change impacts analysis. *Energy reports*, ۶۰۸۸-۶۱۰۱.

Lin, H., Wang, Q., Wang, Y., Wennerstern, R., & sun, Q. (۲۰۱۶). Agent-based Modeling of Electricity Consumption in an Office Building under a Tiered Pricing Mechanism. *Energy Procedia*, 104, ۳۲۹-۳۳۵.

Maya Sopa, B., A.Klöckner, C., & G.Hertwich, E. (۲۰۱۱). Exploring policy options for a transition to sustainable heating system diffusion using an agent-based simulation. *Energy Policy*, 39(۵), ۲۷۲۲-۲۷۲۹.

Prasana, A., Mahmoodi, J., Brosch, T., & Patel, M. (۲۰۱۸). Recent experiences with tariffs for saving electricity in households. *Energy Policy*, 115, ۵۱۴-۵۲۲.

Strbac, G., Ahmed, S., & Kirschen, D. (۱۹۹۶). Load management services in post-contingency control. *Fourth International Conference on Power System Control and Management (Conf. Publ. No. 421)*.

Tayala, D., & Evers, U. (۲۰۱۸). Consumer preferences and electricity pricing reform in Western Australia. *Utilities Policy*, 54, ۱۱۵-۱۲۴.

Wanapinit, N., Thomsen, J., & Weidlich, A. (۲۰۲۲). Find the balance: How do electricity tariffs incentivize different system services from demand response? *Sustainable Energy, Grids and Networks*, ۱۰۰۹۴۸.

Zhang, T., Siebers, P.-O., & Aickelin, U. (۲۰۱۱). Modelling electricity consumption in office buildings: An agent based approach. *Energy and Buildings*, 43(۱۰), ۲۸۸۲-۲۸۹۲..