



تعرفه زمان استفاده مبتنی بر مطالعات بار منطقه‌ای و قیمت انرژی

شقایق یوسفی، هادی مدقق، نسرين محدث

معاونت سیستم‌های اندازه‌گیری و شبکه هوشمند

سازمان بهره‌وری انرژی ایران (سابا)

تهران، ایران

sh.yousefi@gmail.com, modaghegh@saba.org.ir, mohades@tavanir.org.ir

برنامه TOU می‌تواند افزایش سود و بهره‌وری در دو سوی تولید و مصرف برق را به دنبال داشته باشد [۱]. طیف وسیعی از تحقیقات در حوزه برنامه‌های پاسخگویی بار به ویژه برنامه زمان استفاده در مجامع علمی مختلف به ثبت رسیده است. برخی از آنها به مسئله طراحی برنامه با رعایت قیود مختلف شبکه و مشترکین پرداخته‌اند [۲]. دسته دیگر نتایج پیاده‌سازی این برنامه برای گروهی از مشترکین را گزارش نموده‌اند [۳-۵] و برخی نیز به بهره‌برداری بهینه از سایر فن‌آوری‌های موجود با وجود تعرفه زمان استفاده پرداخته‌اند [۶ و ۷].

هم اکنون یک نوع از تعرفه زمان استفاده با نرخ‌های مشخص در تمامی کنتورهای چند زمانه کشور به عنوان تعرفه مصوب برای انرژی مصرفی در نظر گرفته می‌شود [۸]. همچنین شرکت‌های توزیع و برق منطقه‌ای می‌توانند ۴ ساعت از شبانه روز را به عنوان ساعات پرباری، ۱۲ ساعت میان‌باری و ۸ ساعت کم‌باری در نظر بگیرند. اما در اغلب استانهای کشور، تنظیمات پیش فرض کنتورها برای کلیه مشترکین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بر اساس مطالعات الگوی بار کشور، ساعات اوج بار در ایام مختلف سال بر ساعات اوج بار در تعرفه سه زمانه فعلی منطبق نیست و به عبارت دیگر، تعرفه برق از منحنی بار مصرفی و قیمت تمام شده انرژی فاصله گرفته که این عدم تطابق به کاهش کارایی تعرفه مذکور منجر شده است. اضافه پرداخت مصارف اوج بار و تخفیف مصارف کم‌باری نیز نتوانسته است مشوق خوبی برای اصلاح الگوی مصرف برق باشد. عدم تحقق اهداف مورد انتظار از تعرفه زمان استفاده در موارد دیگری نیز گزارش شده است. مرجع [۵] جابجایی مقدار قابل توجه بار به ساعات صبح، شکل‌گیری پیک صبحگاهی و افزایش انرژی مصرفی مشترکین علاوه بر عدم رفع تراکم بار پست‌ها در ساعات اوج بار عصر و کاهش درآمد فروش برق را از نتایج اجرای نوعی تعرفه TOU برای گروهی از مشترکین اعلام نموده است.

از سوی دیگر، اگر گروه‌های مختلف مشترکین مورد مطالعه قرار گیرند، مشاهده می‌شود که مشترکین گوناگون به شیوه‌های متفاوت و با اهداف گوناگونی از انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند. تفاوت در سبک مصرف به تفاوت

چکیده — تعرفه زمان استفاده یکی از انواع برنامه‌های پاسخگویی بار زمان‌محور است که برای مدیریت بار الکتریکی شبکه از طریق تغییر قیمت برق در ساعات اوج بار و غیر آن، بکار گرفته می‌شود. این مقاله، بخشی از تحقیقات انجام شده در زمینه پیاده‌سازی برنامه‌های پاسخگویی بار در کشور را ارائه می‌نماید که به تعرفه زمان استفاده مبتنی بر مطالعات بار منطقه‌ای و تغییرات قیمت انرژی می‌پردازد. تعرفه زمان استفاده پیشنهادی، بر مبنای اصلاح برنامه سه زمانه فعلی از منظر تنظیم ساعات اوج بار و کم‌باری و نیز تعرفه مختص هر بازه اما با رعایت قید عدم تغییر نرخ متوسط برق تنظیم شده است. در این طرح که به تصویب هیات مدیره محترم شرکت مادر تخصصی توانیر رسیده است، شرکت‌های توزیع و برق منطقه‌ای کشور بر اساس مطالعات بار گروه‌های مختلف مشترکین دیماندی خود، تعرفه زمان استفاده ویژه هر یک از گروه‌ها را طراحی و به عنوان تعرفه اختیاری جدید به مشترکین دیماندی با قدرت بیش از یک مگاوات پیشنهاد می‌نمایند.

واژه‌های کلیدی — پاسخگویی بار، تعرفه زمان استفاده، الگوی بار، اوج بار، کم‌باری، میان‌باری، مشترکین دیماندی

۱. مقدمه

یکی از ابزارهای مدیریت سمت تقاضا، اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار (DR) است که مجموعه‌ای از برنامه‌های زمان‌محور و تشویق‌محور را شامل می‌شود. پاسخگویی بار به انواع راهکارهای توافقدسازی مشترکین در جهت بهبود الگوی مصرف انرژی الکتریکی به منظور کاهش هزینه‌ها در دو بخش تولید و مصرف برق و نیز بهبود قابلیت اطمینان شبکه اطلاق می‌گردد. تعرفه زمان استفاده (TOU) نوعی از برنامه پاسخگویی بار زمان‌محور است که در آن، هزینه انرژی مصرفی اساس زمان مصرف، تعیین و دریافت می‌گردد. تعرفه زمان استفاده فراگیرترین نوع تعرفه در اغلب کشورهای دنیاست. طراحی مناسب

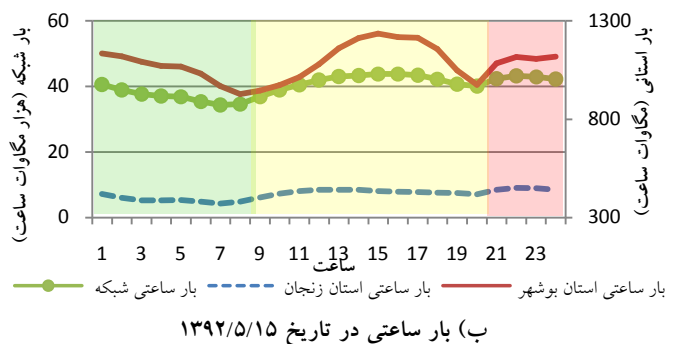
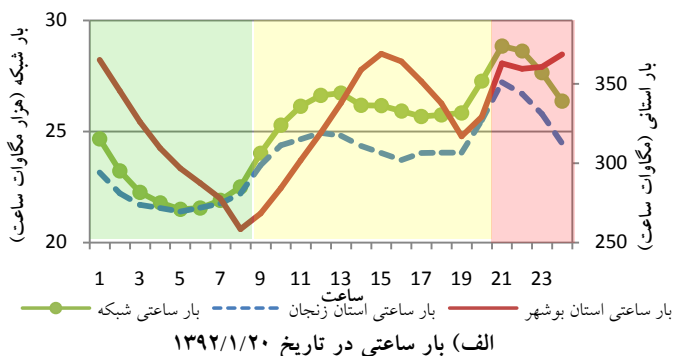
مشترکین بر اساس تنظیمات اولیه خود، میزان مصرف در بازه‌های سه‌گانه را منظور می‌کنند.

جدول ۱: زمان‌بندی برنامه TOU در کشور

بازه	شش ماهه اول سال	شش ماهه دوم سال
میان‌باری	۱۲ ساعت از ساعت ۸ تا ۲۰	۱۲ ساعت از ساعت ۵ تا ۱۷
اوج بار	۴ ساعت از ساعت ۲۰ تا ۲۴	۴ ساعت از ساعت ۱۷ تا ۲۱
کم‌باری	۸ ساعت از ساعت ۲۴ تا ۸	۸ ساعت از ساعت ۲۱ تا ۵

از سوی دیگر می‌توان ساعات واقعی اوج بار، کم‌باری و میان‌باری را بر اساس بار ساعتی شبکه بررسی نمود. شکل ۱ الگوی بار کل کشور و الگوی بار دو استان بوشهر و زنجان به عنوان مناطق پایلوت در سه روز از ماه‌های فروردین، مرداد و آذر و نیز تقسیم‌بندی ساعات TOU بر اساس جدول ۱ را نشان می‌دهد. ساعات اوج بار، کم‌باری و میان‌باری پیش فرض در برنامه TOU فعلی به ترتیب با رنگهای صورتی، سبز و زرد نشان داده شده‌اند.

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، تفاوت مشخصی بین ساعات اعلام شده TOU و تغییرات واقعی الگوی بار کشور وجود دارد. حتی اگر شرکت‌های توزیع برق کشور از اختیار عمل خود در تغییر ساعات TOU استفاده نمایند، فاصله زیادی با اهداف مورد انتظار تعرفه TOU باقی خواهد ماند. تفاوت بین الگوی مصرف در مناطق مختلف کشور و گاه فاصله قابل توجه بین الگوی کلی بار شبکه کشور با الگوی بار برخی استانها، نکته قابل توجه اما مغفول مانده برنامه TOU در کشور است (شکل ۱). مشاهده شکل ۱ چند نکته مهم را آشکار می‌سازد.



در منحنی بار مصرف کنندگان منجر می‌شود که به ناهمزمانی ساعات واقعی اوج بار و کم‌باری گروه‌های مختلف می‌انجامد. در همین راستا، سازمان بهره‌وری انرژی ایران (سابا) به عنوان نهاد متولی بهینه‌سازی مصرف انرژی در کشور، بر آن شده است تا پیشنهاد پیش‌رو مبنی بر ارائه تعرفه جدید TOU به مشترکین دیماندی را ارائه دهد. تعرفه زمان استفاده‌ای که در این مقاله پیشنهاد می‌شود، بر مبنای اصلاح برنامه سه زمانه فعلی از منظر تنظیم تعداد و شماره ساعات اوج بار و کم‌باری و نیز تعرفه مختص هر بازه اما با رعایت قید عدم تغییر نرخ متوسط برق تنظیم شده است. بر اساس پیشنهاد طرح شده، لازم است در هر منطقه از کشور متناسب با نوع مشترک و با توجه به تغییرات الگوی بار منطقه‌ای و قیمت انرژی برق، برنامه زمان استفاده و ویژه ای طراحی گردد. اما به منظور مدیریت بهینه بار سراسری شبکه لازم است تمامی طرح‌های تهیه‌شده برای این نوع تعرفه در شرکت‌های توزیع و برق منطقه‌ای به تایید مرجع ذیصلاح برسد تا هدف غایی مدیریت بار و انرژی در کشور محقق گردد. تعرفه زمان استفاده پیشنهادی، به تصویب هیات مدیره محترم شرکت توانیر رسیده است و از ابتدای سال ۱۳۹۴ به عنوان تعرفه جدید اختیاری به مشترکین دیماندی با قدرت بیش از یک مگاوات پیشنهاد می‌گردد.

در ادامه این مقاله، بخش ۲ به بررسی تعرفه زمان استفاده فعلی می‌پردازد. بخش ۳ تعرفه پیشنهادی مبتنی بر مطالعات بار و قیمت انرژی را تشریح می‌کند. بخش ۴ مطالعات عددی را ارائه می‌نماید و بخش ۵ نتایج بدست آمده را بیان می‌کند.

۲. تعرفه زمان استفاده فعلی

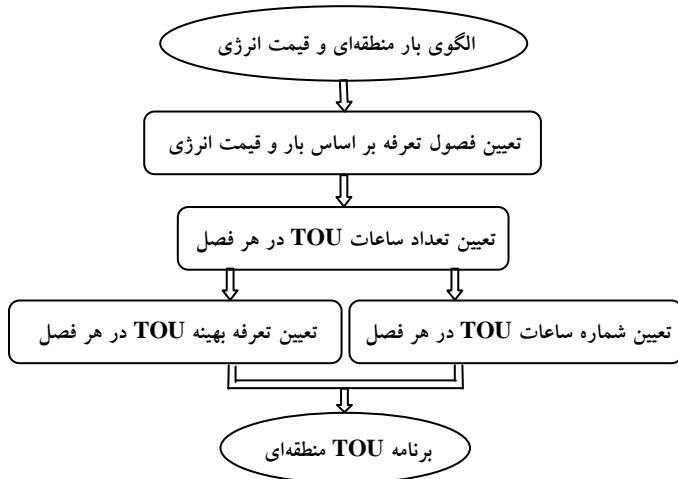
در برنامه پاسخگویی بار TOU، یکی از انواع برنامه‌های قیمت محور است که بر اساس زمان مصرف انرژی، تعرفه متغیری برای مشترکین در نظر می‌گیرد. منظور از زمان در این نوع از تعرفه، می‌تواند ساعات مختلف روز، روزهای متفاوت هفته و ایام متفاوت سال باشد. در برنامه TOU دو فاکتور تعیین کننده وجود دارد؛ بازه‌های زمانی و تعرفه اعلام شده برای هر بازه. در کشور ما، برنامه TOU طبق مصوبه وزارت محترم نیرو تحت عنوان "تعرفه‌های برق و شرایط عمومی آنها برای مشترکین تحت پوشش شرکت‌های برق منطقه‌ای و توزیع برق [۸]" به عنوان مشوقی برای اصلاح الگوی مصرف مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به تعرفه‌های مصوب برق برای کلیه مشترکین، اضافه پرداخت مصرف در ساعات اوج بار، دو برابر تخفیف مصرف در ساعات کم‌باری در نظر گرفته شده اما طول دوره کم‌باری، دو برابر طول اوج بار لحاظ شده است. جدول ۱ زمان‌بندی پیش فرض برنامه TOU در کشور به تفکیک شش ماهه اول و دوم سال را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که هیات مدیره شرکت‌های توزیع برق کشور در تغییر ساعات برنامه TOU اختیار عمل دارند اما در اغلب استانها، تغییری در این ساعات پیش فرض داده نشده و کننتورهای

۳. تعرفه زمان استفاده پیشنهادی

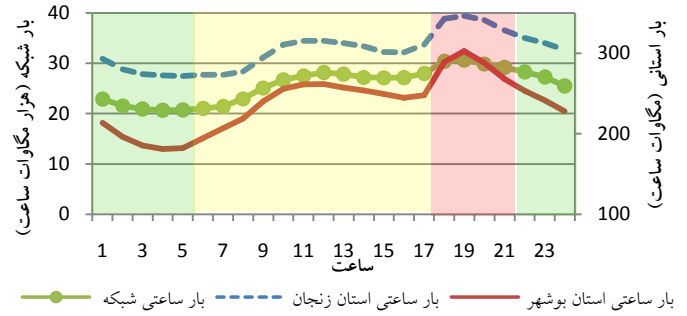
اجرای هر برنامه پاسخگویی بار، هدف خاصی را دنبال می‌کند. برخی از برنامه‌های DR برای پیک‌سایی، برخی با هدف تسطیح پروفیل بار و برخی به منظور کاهش انرژی مصرفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برنامه زمان‌محور TOU با اهداف پیک‌سایی، دره‌زدایی و در حالت کلی جابجایی بار مشترکین پیاده‌سازی می‌گردد. بنابراین تنظیم ساعات TOU باید با اوج بار و کم‌باری واقعی الگوی بار منطقه تطابق داشته باشد.

کنتورهایی که امکان ثبت بار ساعتی مشترک را دارند، می‌توانند در اجرای تعرفه پیشنهادی TOU مورد استفاده قرار گیرند. مشترکین دیماندی و نیز مشترکینی که به کنتورهای هوشمند مجهز می‌شوند، هیچ مشکلی در مشارکت در برنامه TOU ندارند. از همین رو، تعرفه جدید TOU در گام نخست به مشترکین دیماندی با قدرت بیش از یک مگاوات پیشنهاد می‌گردد. اما لازم به ذکر است که مشترکینی که از کنتورهای دیجیتال فعلی استفاده می‌کنند نیز می‌توانند در برنامه TOU پیشنهادی شرکت کنند. تغییر دوره‌ای تنظیمات ساعت اوج بار، میان‌باری و کم‌باری در کنتورهای دیجیتال، لازمه اجرای تعرفه جدید برای این دسته از مشترکین است. این تغییر می‌تواند توسط مأمورین قرائت کنتر که به صورت دوره‌ای برای ثبت مقادیر مصرف مراجعه می‌کنند، انجام گردد.

برای دستیابی به برنامه بهینه TOU لازم است هر دو بعد زمان و قیمت مورد توجه کافی قرار گیرد. از همین رو، ساختار پیشنهاد شده برای طراحی برنامه بهینه شامل طراحی ساعات بهینه TOU (تعداد ساعات اوج بار و ساعات کم‌باری و نیز شماره ساعات مذکور) و البته تعرفه بهینه این نوع برنامه می‌گردد. فرآیند کلی طراحی تعرفه پیشنهادی TOU در شکل ۲ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۲: فرآیند کلی طراحی برنامه TOU



پ) بار ساعتی در تاریخ ۱۳۹۲/۹/۲

شکل ۱: الگوی بار استان‌های بوشهر و زنجان در مقایسه با الگوی بار کشور اول آنکه در برخی از ایام سال، الگوی بار مناطقی از کشور با الگوی بار کل شبکه هم‌آهنگ و هم‌سو نیست. نمونه این مسئله در فروردین ماه بین بار استان بوشهر و بار شبکه دیده می‌شود. دوم آنکه در ایام گرم سال، روند تغییرات الگوی بار مناطق گرمسیر کشور انطباق بسیار واضحی با آهنگ حرکت الگوی بار کشور دارد (مانند بار مردادماه در شکل ۱-ب). این نکته با توجه به تاثیرپذیری بار شبکه از ادوات سرمایشی در ماه‌های گرم سال کاملاً موجه و منطقی است. مسئله آخر اینکه ممکن است بر خلاف روزهای گرم نیمه اول سال، در ایام سرد سال بار مناطق سردسیر از بار مناطق گرمسیر پیشی بگیرد اما آهنگ تغییرات بار مناطق و بار کل کشور تقریباً هم‌سو و هم‌جهت است. نمونه‌های نشان داده شده در شکل ۱، تنها به سه روز از سال و مقایسه بار دو استان با بار کل کشور می‌پردازد. اما مثال خوبی برای مقایسه بار مناطق و بار کلی شبکه است و با استفاده از داده‌های بار کشور، می‌توان نشان داد که در سایر استانها و سایر ایام سال نیز موارد مشابهی وجود دارد. از مقایسه بار مناطق دیگر کشور و بار کل شبکه در ایام مختلف سال به این نکته مهم دست می‌یابیم که نمی‌توان برای کل مناطق کشور و در تمامی ایام سال نسخه واحدی از برنامه زمان استفاده تجویز کرد. حتی بهتر است به جای تعریف دو سری ساعات TOU در دو نیمه سال، بنابر طبیعت الگوی بار هر منطقه برای تقسیم بندی ایام سال و دسته بندی آنها از نظر ساعات TOU تصمیم گرفت. این نکته، ضرورت تصمیم سازی محلی برای افزایش کارایی برنامه زمان استفاده و طراحی تعرفه TOU بر اساس مطالعات بار منطقه‌ای را آشکار می‌سازد. از سوی دیگر، سبک مصرف و نوع بهره‌مندی گروه‌های مختلف مشترکین از انرژی الکتریکی نیز متفاوت و متغیر است، به نحوی که بسیاری از اوقات، اوج بار گروهی از مشترکین با کم‌باری گروه دیگر هم‌زمان است. بنا بر این واقعیت، در صورتی می‌توان به بیشترین مزایا از پیاده‌سازی برنامه TOU جدید دست یافت که اختلاف ذاتی بارهای مختلف نیز مد نظر طراحان برنامه قرار گیرد و نه تنها بار مناطق، بلکه بار مشترکین مختلف نیز (به تفکیک نوع تعرفه) مستقل از یکدیگر مورد مطالعه قرار گیرد تا برنامه‌های جداگانه‌ای بدست آیند.

تعیین فصول تعرفه با توجه به الگوی بار منطقه‌ای و قیمت انرژی

برای تعیین ساعات بهینه TOU لازم است تغییرات الگوی بار منطقه و قیمت تمام شده انرژی در سال مورد بررسی قرار گیرد. ساعات بهینه TOU در کل سال، یکسان نیستند و بنابر الگوی مصرف انرژی تغییر می‌کنند. در این مرحله باید تغییرات قیمت برق و بار مشترکین را مورد بررسی قرار داد. می‌توان الگوی بار کل منطقه را به عنوان مرجع مطالعات در نظر گرفت که حاصل آن تنظیم برنامه TOU برای کلیه مشترکین منطقه خواهد بود. اما از سوی دیگر، تفاوت سبک مصرف در گروه‌های مختلف مشترکین یک منطقه نیز غیرقابل انکار است. اجرای کارآمدتر برنامه TOU در گروه تفکیک مشترکین با توجه به نوع تعرفه آنها و تنظیم برنامه خاص برای هر گروه از آنهاست. این امر، مستلزم آن است که تمامی مطالعاتی که در این بخش به آن اشاره می‌گردد برای گروه‌های مختلف مشترکین و با استفاده از الگوی بار نمونه آن‌ها انجام پذیرد و برای هر گروه برنامه TOU ویژه‌ای تدوین و به آنها پیشنهاد گردد.

اجرای برنامه TOU نیاز به تعریف دوره‌های هفتگی یا ماهانه دارد که در طول هر دوره، ساعات یکسانی به عنوان ساعات اجرای برنامه به مشترکین اعلام گردد. این دوره‌ها را فصول تعرفه می‌نامیم. به منظور تعیین ساعات بهینه باید فصول تعرفه برای گروه‌های مختلف مشترکین منطقه مشخص شوند. هر فصل تعرفه به دوره‌ای اطلاق می‌گردد که می‌توان برای کل داده‌های بار ساعتی آن مقدار میانگین و به تبع آن انحراف استاندارد داده‌ها از مقدار میانگین را تعریف نمود به شرطی که با انتخاب فصول تعرفه در سال، کمترین انحراف میانگین در کل سال حاصل گردد. بنابراین انتخاب فصول تعرفه به صورتی انجام می‌شود که داده‌های بار ساعتی هر فصل بیشترین نزدیکی و قرابت را با یکدیگر داشته باشند. به عبارت دیگر تغییر فصل تعرفه از فصلی به فصل دیگر نشان دهنده تغییرات قابل توجه در الگوی بار مشترکین منطقه می‌باشد که خود معلول تغییرات آب و هوا و سایر عوامل موثر بر بار الکتریکی می‌باشد.

فصول تعرفه را می‌توان به شکل چندین روز مشخص، چندین هفته مشخص و یا با استفاده از ماه‌ها تعیین نمود. بدون شک، تعیین فصول بر اساس شماره روزها، بیشترین دقت و تعیین آن‌ها با استفاده از ماه‌ها، کمترین دقت را به دنبال خواهد داشت. به منظور ایجاد تعادل بین دقت محاسبات در مرحله طراحی و سهولت پیروی از تعرفه پیشنهادی در زمان اجرا، فصول تعرفه بر اساس هفته‌ها تعیین می‌شوند. هرچند که شرکت‌های مجری TOU می‌توانند فصول تعرفه خود را با استفاده از ماه‌ها نیز تعیین نمایند.

سالیهای غیر کبیسه از ۸۷۵۶ ساعت، ۳۶۵ روز و یا ۵۲ هفته و یک روز تشکیل شده است. فرض کنیم کل سال به n فصل تعرفه تقسیم گردد. در اینصورت اگر S_i شماره هفته آغازین فصل تعرفه i ام باشد، S_{i+1} شماره هفته

آغازین فصل $(i+1)$ ام و در نتیجه نشان دهنده پایان فصل i ام خواهد بود. بنابراین روزهای قرار گرفته در فصل تعرفه i ام از روز شماره $[1 + 7(S_i - 1)]$ تا روز شماره $[7(S_{i+1} - 1)]$ سال خواهند بود که کل مقادیر بار ساعتی در این روزها به عنوان بار فصل i ام محسوب می‌شود. مقدار میانگین بار فصل i ام با توجه به (۱) بدست می‌آید.

$$m_i = \frac{1}{24[7(S_{i+1} - S_i)]} \sum_{d=[1+7(S_i-1)]}^{[7(S_{i+1}-1)]} \sum_{h=1}^{24} L(d, h) \quad (1)$$

که در (۱)، $L(d, h)$ مقدار بار گروهی از مشترکین منطقه در ساعت h ام از روز d ام سال می‌باشد. همچنین مقدار انحراف استاندارد مقادیر بار از میانگین m_i در فصل تعرفه i ام از (۲) تعیین می‌گردد.

$$S_i = \left[\frac{\sum_{d=[1+7(S_i-1)]}^{[7(S_{i+1}-1)]} \sum_{h=1}^{24} (L(d, h) - m_i)^2}{24[Z(S_{i+1} - S_i)] - 1} \right]^{1/2} \quad (2)$$

با استفاده از روابط بالا، مطالعه آماری ساده‌ای بر داده‌های بار منطقه در کل سال انجام می‌شود و مقادیر S_1 تا S_n برای تمامی گروه‌های مشترکین با شرط حداقل سازی انحراف استاندارد بار در کل سال بدست می‌آیند. بنابراین فصول تعرفه منطقه مشخص می‌گردند. در (۲) و (۱) به جای بار ساعتی $L(d, h)$ می‌توان از مقادیر بار بیشینه روزانه ($L_{max}(d)$) و یا بار کمینه روزانه ($L_{min}(d)$) استفاده نمود. در اینصورت فصول تعرفه به ترتیب بر اساس میانگین اوج بار روزانه و یا بر پایه میانگین کمترین بار روزانه تعیین می‌شوند. لازم است از الگوی بار منطقه‌ای در کنار تغییرات قیمت تمام شده برق به عنوان داده‌های ورودی این الگوریتم استفاده نمود. بنابراین علاوه بر مطالعه بار منطقه، در معادلات فوق از داده‌های قیمت $P(d, h)$ به جای $L(d, h)$ استفاده می‌شود تا از ترکیب مطالعات کامل بار و قیمت (بر اساس الگوریتم معرفی شده در این بخش) به برنامه زمان استفاده بهینه دست یافت.

تعیین ساعات TOU در هر فصل تعرفه

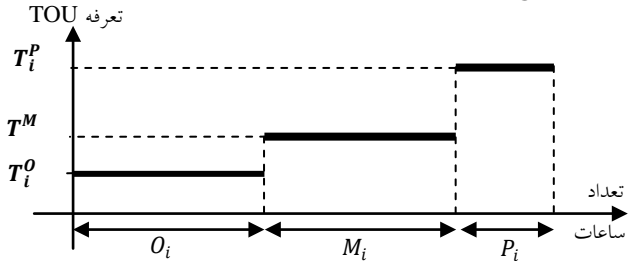
در هر روز از فصل تعرفه i ام، تعداد P_i ساعت اوج بار، M_i ساعت میان‌باری و O_i ساعت کم‌باری وجود دارند. بنابراین $P_i + M_i + O_i = 24$ خواهد بود. در شرایط حاضر، برنامه فعلی TOU با $P_i = 4$ ، $M_i = 12$ و $O_i = 8$ ساعت اجرا می‌گردد.

تعداد ساعات TOU

برای تصمیم‌گیری در مورد تعداد ساعات در هر بازه (P_i و M_i و O_i)، می‌توان تعداد ساعات شبانه روز که بار آنها بیشتر از $\alpha\%$ بار بیشینه روز است را به عنوان تعداد ساعات اوج بار در فصل تعرفه i ام در نظر گرفت. درصد α می‌تواند مقادیری همچون ۸۰٪، ۸۵٪، یا ۹۰٪ را اختیار کند. فرض کنیم P_i^d

تعیین تعرفه بهینه TOU

اختلاف هزینه ناشی از برنامه TOU می‌تواند پس از اعمال تعرفه ثابت (مستقل از زمان مصرف) مانند تعرفه پلکانی مشترکین مسکونی کشور، اجرا گردد. اما شکل اصلی اجرای برنامه TOU، تعریف تعرفه‌های برق بر اساس زمان استفاده از انرژی است -مانند تعرفه‌های غیر مسکونی- که در اینصورت، تعرفه‌های TOU مبنای محاسبه کل هزینه واقع می‌گردند. شکل ۳ نمونه‌ای از تعرفه TOU را نشان می‌دهد که بدون نیاز به تعرفه ثابت تعریف و اجرا می‌گردد. این نوع تعرفه برای مشترکین مصارف عمومی و تولیدی پیاده می‌شود.



شکل ۳: تعرفه TOU در هر روز از فصل تعرفه

در شکل ۳ مقادیر P_i ، M_i و O_i تعداد ساعات اوج بار، میان‌باری و کم‌باری در برنامه TOU مربوط به فصل تعرفه i ام را نشان می‌دهند. همچنین مبلغ تعرفه مصرف در ساعات اوج بار با T_i^P ریال در کیلووات ساعت، مبلغ تعرفه مصرف هم‌زمان با میان‌باری با نماد T^M ریال در کیلووات ساعت و مبلغ تعرفه برای مصارف هم‌زمان با کم‌باری با T_i^O ریال در کیلووات ساعت نشان داده شده‌اند. با توجه به یکسان بودن تعرفه میان‌باری در کل سال، مقدار T^M با تغییر فصل تعرفه تغییر نمی‌کند و به همین دلیل زیرنویس i ندارد. با توجه به شکل ۳، میزان اضافه پرداخت مصرف در ساعات اوج بار (G_i^P) و میزان تخفیف برای مصرف در ساعات کم‌باری (G_i^O) با استفاده از (۶) و (۷) بدست می‌آیند:

$$G_i^P = T_i^P - T^M \quad (۶)$$

$$G_i^O = T^M - T_i^O \quad (۷)$$

بر اساس (۶) و (۷)، میزان اضافه پرداخت و تخفیف TOU از مابه‌التفاوت تعرفه‌های TOU در ساعات غیر میان‌باری و تعرفه ساعات میان‌باری و البته بر حسب ریال در کیلووات ساعت بدست می‌آید.

برای تعیین تعرفه‌های بهینه TOU لازم است قید عدم تغییر نرخ متوسط برق رعایت گردد. این قید را می‌توان با اصل کلی برابری مساحت‌های زیر منحنی در نظر گرفت. این اصل از رابطه کلی هزینه مصرف برق استخراج شده است که یک رابطه پایه در تعرفه‌بندی برق محسوب می‌شود. این رابطه با فرض وجود چندین نوع تعرفه در کل ساعات افق زمانی مورد نظر، ارتباط خطی بین آنها را مشخص می‌کند. ساده شده رابطه هزینه در بحث تعرفه‌های زمان استفاده، با فرض عدم وجود هیچ نوع تعرفه‌بندی ثانویه دیگر در افق مورد نظر، اصل برابری مساحتهاست که در اینجا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تعداد ساعاتی در روز d ام از سال (واقع شده در فصل تعرفه i ام) باشد که بار آنها مساوی یا بیشتر از $\alpha\%$ اوج بار بیشینه همان روز است ((۳)).

$$L(d, h_j) \geq \frac{\alpha}{100} \times \max_k [L(d, h_k)]$$

$$d = \{[1 + 7(s_i - 1)], \dots, [7(s_{i+1} - 1)]\}$$

$$j = 1, 2, \dots, P_i^d, \quad k = 1, 2, \dots, 24 \quad (۳)$$

مشکل این روش در این است که حتی در یک فصل تعرفه، تعداد ساعات با بار بیش از $\alpha\%$ در کل روزهای فصل یکسان نیستند. یعنی مقادیر P_i^d با تغییر شماره روز (d) تغییر می‌کند. بنابراین لازم است تعداد ساعات باری که شامل این شرط می‌شوند در طول فصل تعرفه، مورد بررسی قرار گیرد و مقدار متوسط این تعداد انتخاب گردد:

$$P_i = \text{mean}(P_i^d)$$

$$d = \{[1 + 7(s_i - 1)], \dots, [7(s_{i+1} - 1)]\} \quad (۴)$$

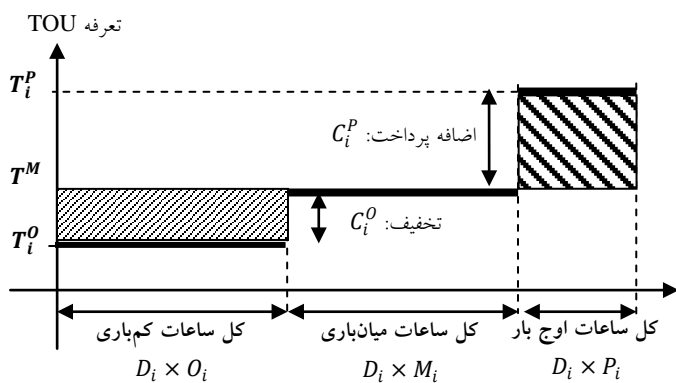
از سوی دیگر به منظور رعایت حال مشترکینی که داوطلب شرکت در این برنامه هستند، بهتر است تعداد ساعات اوج بار در هر فصل، از مقدار مشخصی کمتر باشد. یعنی $P_i \leq P_{max}$. در اینصورت با رعایت این قید، نزدیکترین عدد صحیح به مقدار متوسط تعداد ساعات اوج، به عنوان تعداد نهایی در نظر گرفته می‌شود. تعداد ساعات اوج بار و کم‌باری باید در قید (۵) نیز صدق کنند. در اینصورت تعداد ساعات میان‌باری در تمام سال، ۱۲ ساعت خواهد ماند.

$$P_i + O_i = 12 \quad (۵)$$

این قید در برنامه فعلی رعایت شده است (۴ ساعت اوج بار و ۸ ساعت کم‌باری در نظر گرفته شده است). بر اساس (۵) و عدد P_i که از (۴) بدست آمده است، مقدار O_i یعنی تعداد ساعات کم‌باری مشخص می‌گردد.

شماره ساعات TOU

برای تعیین شماره ساعات در هر فصل تعرفه لازم است رشته اعداد بار ساعتی مشترکین به ترتیب نزولی مرتب گردد و سپس P_i ساعت ابتدای رشته مرتب شده، به عنوان ساعات اوج بار اعلام گردد. از سوی دیگر O_i ساعت انتهایی این رشته، ساعات کم‌باری منطقه را نشان می‌دهند. اما شماره ساعاتی که ساعات اوج بار یا کم‌باری محسوب می‌شوند حتی در طول یک فصل تعرفه، تغییر می‌کنند و شناور هستند. از همین رو لازم است در هر فصل تعرفه شماره ساعات اوج و کم‌باری برای هر روز معلوم گردد و سپس شماره‌هایی که دارای بیشترین فراوانی در طول فصل هستند، انتخاب شوند. به عبارت دیگر، برای هر ساعت از شبانه روز، تعداد دفعاتی که در یک فصل تعرفه در گروه ساعات اوج قرار گرفته و نیز تعداد دفعاتی که این شماره ساعت در مجموعه ساعات کم بار واقع شده، شمرده می‌شود. سپس ساعاتی از شبانه روز که بیشتر از سایرین در اوج بوده‌اند به عنوان ساعات اوج بار و ساعاتی که بیشتر از سایرین در گروه کم‌باری بوده‌اند، به عنوان ساعات کم‌باری مشخص می‌گردند. نمونه عملی این راهکار در بخش مطالعات عددی تشریح شده است.



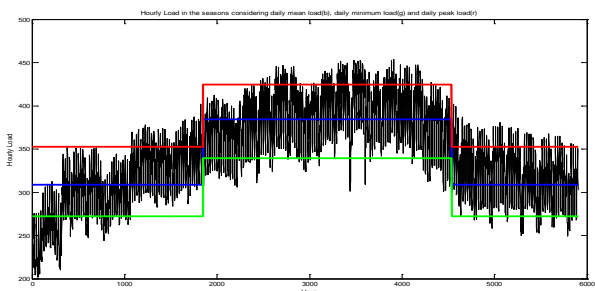
شکل ۴: مساحت‌ها در یکی از فصول تعرفه TOU

۴. مطالعات عددی

در این بخش، تعرفه TOU پیشنهادی با استفاده از الگوی بار استان زنجان و نیز قیمت انرژی در سال ۱۳۹۱ بر مبنای روش ارائه شده، طراحی می‌گردد. لازم به ذکر است که بر اساس آیین نامه تکمیلی تعرفه‌های برق که به تنوع بخشی به تعرفه‌ها می‌پردازد، شرکت‌های مجری می‌توانند برنامه TOU جدید را برای ماه‌های اول تا هشتم سال، در نظر بگیرند و نباید برنامه فعلی در ماه‌های نهم تا دوازدهم سال را تغییر دهند. از همین رو، با فرض انتخاب دو فصل تعرفه در طول هشت ماه ابتدای سال، نتایج مطالعات ارائه می‌گردند.

تعرفه TOU بر اساس مطالعات قیمت انرژی

اگر هدف، تعیین دو فصل تعرفه بر اساس الگوی بار در دوره ۸ ماهه ابتدای سال باشد، فصول تعرفه منتخب بر اساس بار بیشینه و متوسط روزانه مطابق با نتایج نمایش داده شده در شکل ۵ و جدول ۲ خواهند بود. در شکل ۵، مقدار متوسط فصلی بار بر اساس بار بیشینه با رنگ قرمز، مقدار متوسط فصلی بار بر اساس بار متوسط با رنگ آبی و مقدار متوسط فصلی بار بر اساس بار کمینه با رنگ سبز نمایش داده شده‌اند. جدول ۲ نشان می‌دهد که فصول تعرفه استان زنجان کاملاً بر هم منطبق هستند. در شکل ۵ نیز دیده می‌شود که هر سه نوع فصل تعرفه بر هم منطبق هستند. بر اساس داده‌های جدول ۲، در فصول تعرفه بیشینه، انحراف استاندارد کمتری وجود دارد.



شکل ۵: بار ساعتی و مقادیر متوسط بار فصلی در استان زنجان

فرض کنیم مقدار متوسط توان در ساعات کم‌باری فصل تعرفه i ام با نماد E_i^0 نشان داده شود و نماد E_i^P بیانگر مقدار متوسط توان در ساعات اوج بار در فصل تعرفه i ام باشد، طبق اصل کلی برابری مساحت‌های زیر منحنی TOU، اگر مقادیر مصرف در ساعات اوج بار و مصرف در ساعات کم‌باری با یکدیگر برابر باشند ($E_i^P = E_i^0$)، باید اثر برآیند ناشی از اعمال اضافه پرداخت در ساعات اوج بار و تخفیف مصارف کم‌باری صفر گردد و به عبارت دیگر مقادیر اضافه پرداخت و تخفیف با یکدیگر برابر باشند:

$$\sum_{i=1}^n C_i^0 \times O_i \times D_i \times E_i^0 = \sum_{i=1}^n C_i^P \times P_i \times D_i \times E_i^P$$

Subject to:

$$\forall i: E_i^0 = E_i^P \quad (8)$$

که در آن D_i تعداد روزهای فصل تعرفه i ام است. زبان ساده اصل فوق به

اینصورت خواهد بود که مجموع حاصلضرب اضافه پرداخت در کل تعداد ساعات اوج بار برای تمام روزهای فصول تعرفه با مجموع حاصلضرب تخفیف در کل تعداد ساعات کم‌باری برای تمام روزهای فصول تعرفه برابر گردد:

$$\sum_{i=1}^n C_i^0 \times O_i \times D_i = \sum_{i=1}^n C_i^P \times P_i \times D_i \quad (9)$$

قابل توجه است که تعداد ساعات کم باری یا اوج بار در افق زمانی

برنامه‌ریزی برای برنامه زمان استفاده محاسبه می‌شود. یعنی کل ساعات اوج بار در یک فصل تعرفه در (۹) قرار داده می‌شود و نه تعداد ساعات اوج بار در یک روز. برای تعیین تعرفه‌های TOU در فصول تعرفه مختلف مربوط به افق زمانی مورد نظر، باید همواره قید (۹) رعایت گردد. در شکل ۴، مساحت‌های مورد نظر برای یکی از فصول تعرفه برنامه TOU نشان داده شده است. برای تمامی فصول تعرفه دوره مورد نظر باید این مساحت‌ها در نظر گرفته شود و مجموع مساحت‌های ساعات اوج بار با مجموع مساحت‌های ساعات کم‌باری برابر باشد. علاوه بر قید بالا، به منظور رعایت حال مشترکینی که داوطلب شرکت در این برنامه هستند، بهتر است میزان تخفیف و اضافه پرداخت مصرف در ساعات TOU در هر فصل تعرفه، با رعایت سقف مشخصی تعیین گردند. بدین منظور می‌توان ضریب معینی برای رشد اضافه پرداخت و تخفیف برنامه TOU جدید نسبت به برنامه فعلی (منطبق با ارقام اشاره شده در [۸]) در نظر گرفت. برای مثال، شرکت‌های مجری موظف باشند میزان اضافه پرداخت مصرف در اوج بار را حداکثر تا ۳ برابر اضافه پرداخت فعلی در نظر بگیرند.

اما لازم است این نکته را مدنظر قرار دهند که افزایش اضافه پرداخت نباید مقدار تخفیف را به نحوی تغییر دهد که تعرفه مصرف در ساعات کم باری (T_i^0) به کمتر از صفر یعنی عددی منفی کاهش یابد. طبق آیین نامه و دستورالعمل تعرفه پیشنهادی TOU، شرکت‌های مجری برنامه TOU می‌توانند با استفاده از روش ارائه شده، برنامه TOU پیشنهادی خود را تنظیم و به مرجع ذیصلاح ارائه نمایند.

جدول ۲: انتخاب دو فصل تعرفه در استان زنجان

بر اساس بار متوسط روزانه			بر اساس بار بیشینه روزانه		
انحراف استاندارد	بار متوسط (MW)	فصول منتخب	انحراف استاندارد	بار متوسط (MW)	فصول منتخب
32/2	384/6	فصل اول: هفته ۱۲ تا ۲۷	18/3	424/8	فصل اول: هفته ۱۲ تا ۲۷
36/2	308/6	فصل دوم: هفته ۲۸ تا ۳۵ + هفته ۱ تا ۱۱	26/7	352/9	فصل دوم: هفته ۲۸ تا ۳۵ + هفته ۱ تا ۱۱

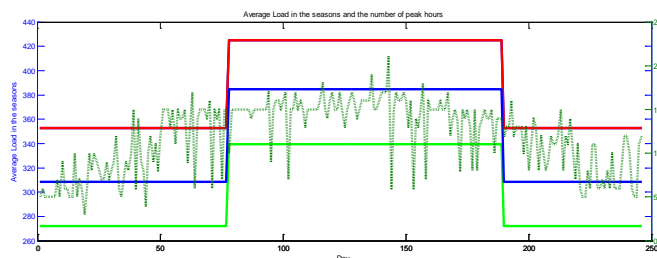
جدول ۳: تعداد ساعات TOU در هر فصل تعرفه

فصول منتخب	متوسط تعداد ساعات اوج	تعداد ساعات اوج (نزدیکترین عدد صحیح و با سقف مشخص)	تعداد ساعات کم‌باری
فصل اول	۹/۷	۸	۴
فصل دوم	۱۴/۶	۸	۴

بنابراین اگر ساعات دارای بار بیش از ۹۰٪ اوج بار روزانه را به عنوان ساعات اوج در نظر بگیریم، تعداد ساعات اوج در استان زنجان قابل توجه خواهد بود. اما با توجه به قید سقف تعداد ساعات اوج (۸ ساعت)، نمی‌توان بیش از این عدد برای ساعات اوج بار در نظر گرفت. بنابراین در استان زنجان بسیاری از ساعات اوج واقعی، در برنامه TOU مورد توجه واقع نمی‌شوند و تمرکز بر بارهای بالاتر از ۹۵٪ یا ۹۶٪ اوج بار خواهد بود.

تعیین ساعات TOU

برای تعیین ساعات TOU، ابتدا درصد α را مشخص می‌کنیم و سپس ساعات شبانه روز با بار بیش از $\alpha\%$ اوج بار روزانه را می‌یابیم. این ساعات در واقع ساعات اوج بار در هر روز از سال هستند. در اینجا $\alpha = 90$ را در نظر می‌گیریم. تغییرات بار متوسط فصلی (در سه نوع فصل تعرفه) و تغییرات تعداد ساعات با بار بیش از ۹۰٪ (مشمول ۳۳) را می‌توان در شکل ۶ مشاهده نمود. تغییرات تعداد ساعات اوج بار به صورت نقطه چین نشان داده شده است.



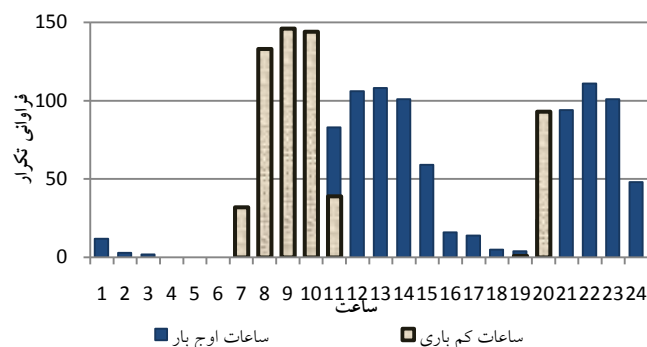
شکل ۶: بارهای متوسط فصلی و تعداد ساعات اوج بار استان زنجان

همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود، تعداد ساعات اوج بار (با بار بیش از ۹۰٪ اوج بار روزانه) در تمام دوره ۸ ماهه ابتدای سال متغیر است. از همین رو برای تعیین تعداد مشخصی برای ساعات اوج بار لازم است متوسط تعداد ساعات اوج در هر فصل در نظر گرفته شود. البته لازم به ذکر است که با توجه به هدف اجرای TOU یعنی تعدیل بار بیشینه منطقه، از فصول تعرفه منتخب بر اساس بار بیشینه استفاده می‌شود. همچنین باید نزدیکترین عدد صحیح به میانگین بدست آمده را به عنوان تعداد ساعات اوج بار در نظر گرفت. با قید حداکثر تعداد ساعات اوج بار و با توجه به موارد فوق، تعداد نهایی ساعات اوج بار مشخص خواهد شد و نیز با اعمال (۵)، تعداد ساعات کم‌باری در هر فصل تعرفه بدست می‌آید. این نتایج در جدول ۳ قابل مشاهده هستند. در جدول ۳ دیده می‌شود که متوسط تعداد ساعات اوج بار در استان زنجان بسیار بیشتر از سقف ۸ ساعت است. بار استان زنجان در مقایسه با بار مناطق گرمسیر، طبیعی هموار با جهش‌های کم دارد و بار ساعات مختلف شبانه روز در این استان، قرابت و شباهت خوبی به هم دارند.

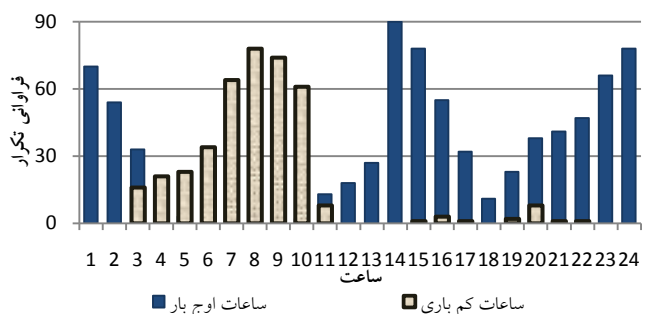
پس از مرتب ساختن رشته بارهای ساعتی در هر روز و با توجه به فراوانی تکرار هر ساعت در زمره ساعات TOU، شماره ساعات تعرفه را می‌یابیم. شکل ۷ و شکل ۸ فراوانی تکرار ساعات در گروه اوج بار یا کم‌باری را برای فصل اول و دوم بار استان زنجان نشان می‌دهند. طبق جدول ۳، در هر دو فصل استان زنجان باید ۸ ساعت اوج بار و ۴ ساعت کم‌باری در نظر بگیریم.

بر اساس داده‌های شکل ۷، بهترین ساعات اوج بار فصل اول استان زنجان، ساعات ۱۰ تا ۱۵ روز و ۲۰ تا ۲۳ شب هستند. ساعات مناسب کم‌باری نیز در این ایام، ساعات ۷ تا ۱۰ صبح و ۲۰ تا ۲۱ شب می‌باشند.

با توجه به شکل ۸، ساعات اوج بار فصل دوم استان زنجان، ساعات ۱۳ تا ۱۶ و ۲۱ تا ۲۲ بامداد هستند و ساعات کم‌باری نیز از ۶ تا ۱۰ صبح خواهند بود.



شکل ۷: فراوانی تکرار هر ساعت به عنوان ساعت TOU در فصل اول بار



شکل ۸: فراوانی تکرار هر ساعت به عنوان ساعت TOU در فصل دوم بار

تعرفه TOU بر اساس مطالعات قیمت انرژی

حداقل در تنظیم ساعات TOU، ملاحظات مربوط به بار محلی خود و آهنگ تغییرات آن در ایام مختلف سال را در نظر بگیرند. تعرفه زمان استفاده پیشنهاد شده در این مقاله بر اساس مطالعات بار منطقه‌ای و قیمت انرژی تنظیم می‌گردد و در گام نخست به عنوان یک تعرفه اختیاری جدید، کلیه مشترکین دیماندی با قدرت بیش از یک مگاوات را مخاطب قرار می‌دهد. بدون شک، اجرای بهینه برنامه TOU در مناطق مختلف کشور بدون در نظر گرفتن قیود مشخص تنظیم ساعات و تعرفه‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد و این دستاورد مهم تنها در سایه نظارت لایه حاکمیتی صنعت برق بر عملکرد شرکت‌های محلی میسر خواهد بود.

قدردانی

در اینجا لازم است از اعضای محترم کارگروه "پاسخگویی بار" در سازمان بهره‌وری انرژی ایران (سابا)، همکاران ارجمند شرکت توزیع برق استان زنجان و شرکت مهندسین مشاور موندکو که در به ثمر رسیدن این پژوهش نقش موثری داشتند، سپاسگزاری گردد.

منابع

- [1] L. Yang, C. Dong, C.L. Johnny Wan and C. To Ng, "Electricity time-of-use tariff with consumer behavior consideration," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 146, no. 2, pp. 402-410, December 2013.
- [2] B. Mozafari, M. Bashirvand, M. Nikzad, and S. Solaymani, "A SCUC-based approach to determine time-of-use tariffs," *11th Int. Conf. Environ. Elec. Eng. (EEEIC)*, pp.429,433, May 2012.
- [3] S.K.M. Shaikh and AA. Dharme, "Time of Use pricing - India, a case study," *Int. Conf. Power Sys. (ICPS)*, pp. 27-29, Dec. 2009.
- [4] M. Filippini, "Short- and long-run time-of-use price elasticities in Swiss residential electricity demand," *Energy Policy*, vol. 39, no. 10, pp. 5811-5817, 2011.
- [5] A. Torriti, "Price-based demand side management: Assessing the impacts of time-of-use tariffs on residential electricity demand and peak shifting in Northern Italy," *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 576-583, August 2012.
- [6] T. Leea and C. Chen, "Effects of Photovoltaic Generation System on the Contract Capacity Selection of Time-Of-Use Rate Industrial Users," *Int. Conf. Intell. Sys. Appl. Power Sys. (ISAP)*, pp. 5-8, Nov. 2007.
- [7] AK. Barnes, J.C. Balda, S.O. Geurin and A. Escobar-Mejia, "Optimal battery chemistry, capacity selection, charge/discharge schedule, and lifetime of energy storage under time-of-use pricing," *2nd IEEE PES Int. Conf. Innov. Smart Grid Tech. (ISGT Europe)*, pp. 5-7, Dec. 2011.

[۸] تعرفه‌های برق و شرایط عمومی آنها برای مشترکین تحت پوشش شرکت‌های برق منطقه‌ای و توزیع برق، وزارت نیرو، ۱۳۹۲. قابل دسترسی در: <http://tariff.moe.gov.ir>

قیمت تمام شده انرژی برای شرکت های توزیع در ساعات مختلف سال متغیر است. اگر با استفاده از مراحل برای طراحی برنامه TOU ذکر شد، تعرفه TOU جدید بر اساس تغییرات قیمت انرژی را برای ماه های ۱ تا ۸ سال با فرض دو فصل قیمت تعیین نماییم، نتایج نشان داده شده در جدول ۴ بدست می‌آیند.

جدول ۴: برنامه TOU استان زنجان بر اساس مطالعات قیمت انرژی

فصول منتخب	اوج بار	کم‌باری
فصل اول: هفته ۱۲ تا ۳۰	۵ ساعت: ۱۳ تا ۱۶ و ۲۰ تا ۲۲	۷ ساعت: ۱ تا ۸
فصل دوم: هفته ۳۱ تا ۳۵ + هفته ۱ تا ۱۱	۸ ساعت: ۱۱ تا ۱۴ و ۱۸ تا ۲۳	۴ ساعت: ۳ تا ۷

همانطور که در جدول ۳ و جدول ۴ دیده می‌شود، فصول سالانه بر اساس بار و قیمت ساعتی تقریباً هم‌زمان با هم هستند اما تعداد ساعات TOU و شماره ساعات در این دو نوع مطالعه با یکدیگر متفاوت است. بدیهی است که شرکت‌های توزیع می‌توانند یکی از این دو شکل برنامه زمان استفاده یا حالت میانه‌ای از این دو را برگزینند و به مشترکین خود اعلام نمایند. لازم به ذکر است که تفکیک گروه‌های مختلف مشترکین در مطالعات قیمت انرژی ممکن نیست چرا که قیمت تمام شده انرژی برای یک شرکت توزیع به مشترکینی که این انرژی را مصرف می‌کنند وابسته نیست. لذا بر خلاف برنامه زمان استفاده بر اساس مطالعات بار که می‌تواند برای گروه‌های مشترکین، متفاوت باشد، اگر برنامه بر اساس مطالعات قیمت تنظیم شده باشد، برای کلیه مشترکین یک منطقه یکسان خواهد بود.

۵. نتیجه گیری

به نظر می‌رسد تعرفه زمان استفاده فعلی نه تنها در مرحله اجرا به درستی پیاده نمی‌شود، بلکه در طراحی بازه‌های زمانی TOU و مقادیر تخفیف و اضافه پرداخت نیز نیاز به تجدیدنظر جدی دارد. عدم تطابق ساعات اختصاص اضافه پرداخت و ساعات واقعی اوج بار سبب می‌گردد مشترکین از مصرف در زمان غیر اوج خودداری نمایند و از سوی دیگر، اختصاص تخفیف به مصارف الکتریکی در ساعاتی که با ساعات واقعی کم‌باری مغایرت دارند، مشترکین را به مصرف بیشتر در غیر کم‌باری و احتمالاً افزایش سطح بار در ساعات واقعی اوج بار ترغیب می‌نماید. تفاوت آشکار در الگوی مصرف گروه‌های مختلف مشترکین نیز به کاهش سودمندی تعرفه TOU یکسان برای تمامی مشترکین شبکه منجر می‌شود.

به منظور ارتقاء سودمندی تعرفه زمان استفاده، بهتر است به جای استفاده از یک برنامه واحد در کل کشور، اختیار عمل در اجرای برنامه TOU به شرکت‌های برق منطقه‌ای و شرکت‌های توزیع برق کشور تفویض شود تا