

## مدل سازی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار با در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی

پیام تیمورزاده بابلی<sup>۱</sup>، استادیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه مازندران - بابلسر - ایران - p.teimourzadeh@umz.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، با استفاده از مفهوم زیان‌گریزی، مدل رفتاری مشترکان در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار پیشنهاد شده است. طبق تعریف، مفهوم زیان‌گریزی بیانگر این مسئله است که افراد به‌طور کلی ترجیح می‌دهند که مقدار کم‌تری ضرر کنند یا از دست بدهند تا اینکه بخواهند مقداری سود کنند یا چیزی به دست آورند. از طرفی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار نیز به دو دسته تشویق‌محور (برنامه‌هایی که مشترکان در ازای کاهش بار مصرفی خودشان در زمان اوج بار، تشویقی دریافت می‌کنند) و برنامه‌های تعرفه‌محور (برنامه‌هایی که مشترکان در زمان اوج بار، در معرض قیمت‌های بالا قرار می‌گیرند و مجبور به کاهش بار مصرفی خود می‌شوند. به عبارتی در این بازه زمانی جریمه می‌شوند یا زیان می‌کنند) تقسیم می‌شوند. لذا استفاده از مفهوم زیان‌گریزی در مدل‌سازی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار می‌تواند بسیار راهگشا باشد. مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده و با استفاده از داده‌های واقعی یک روز تابستانی در بازار نیوانگلند نتایج مورد بحث و تحلیل قرار گرفته است. به‌منظور نشان دادن میزان تأثیر مدل، نتایج در دو حالت با و بدون استفاده از مفهوم زیان‌گریزی به دست آمده و مقایسه‌ای بین آن‌ها صورت پذیرفته است. با استفاده از نتایج به دست آمده نشان داده شده است که در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی می‌تواند اولویت‌بندی اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را از دیدگاه نهاد مجری تغییر دهد.

**واژه‌های کلیدی:** اقتصاد رفتاری، پاسخ‌گویی بار، زیان‌گریزی، کشش قیمت-تقاضا.

## Demand Response Model Considering Loss Aversion Concept

P. Teimourzadeh Baboli<sup>1</sup>, Assistant Professor

1- Faculty of Engineering & Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran, Email: p.teimourzadeh@umz.ac.ir

**Abstract:** In this paper, a demand response (DR) model has been proposed based on the loss aversion concept. Loss aversion refers to people's tendency to strongly prefer avoiding losses to acquiring gains. Meanwhile, DR programs are classified into two main clusters: incentive-based programs (participated customers receive incentives) and price-based programs (participated customers in some periods are faced by high electricity price which is interpreted as loss for them). Regarding this matter, loss aversion concept is completely fitted for including in the DR model. MATLAB software is used to implement the proposed DR model. The data is extracted from New England ISO. Two different DR programs are considered for the numerical study, with and without consideration of the loss aversion. It is shown that the behavioral characteristics of the customers, loss-aversion in this case, is indispensable in the selection of the proper program.

**Keywords:** Behavioral economy, demand response, loss aversion, demand-price elasticity.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۲ و ۱۳۹۵/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۹

نام نویسنده مسئول: پیام تیمورزاده بابلی

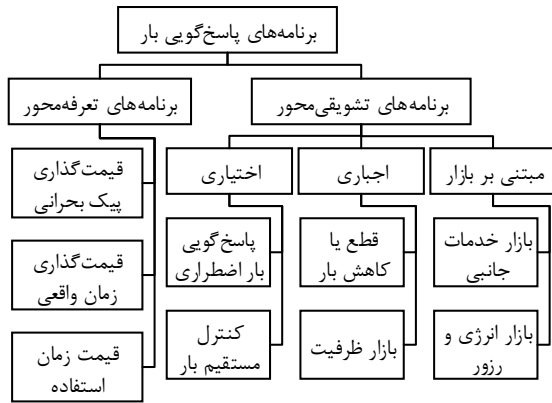
نشانی نویسنده مسئول: ایران - مازندران - بابلسر - پردیس دانشگاه مازندران - دانشکده فنی و مهندسی.

## ۱- مقدمه

اگرچه قیمت گذاری زمان واقعی با پویا کردن سمت مصرف منجر به افزایش رفاه اجتماعی می شود [۱]؛ اما مشترکان با مقیاس کوچک اطلاعات فنی و اقتصادی لازم جهت شرکت در بازار آزاد برق را ندارند. به همین دلیل سعی بر آن می شود که این مشترکان در معرض قیمت های بی ثبات بازار عمده فروشی برق قرار نگیرند [۲]. در چنین فضایی معمولاً خرده فروشان، برق را از بازار عمده فروشی خریداری نموده و تحت قراردادهایی با تعرفه ثابت به مشترکان با مقیاس کوچک می فروشند. بنابراین، مشترکان کوچک هیچ بازخوردی از قیمت های بالادست نداشته و الگوی مصرف انرژی الکتریکی آن ها صرفاً متأثر از تمایلات لحظه ای آن ها در استفاده از تجهیزات برقی است [۳]. از سویی دیگر مطالعات برنامه ریزی سیستم قدرت عموماً بر اساس اوج تقاضا بوده و اگر مقدار بار در بازه هایی غیر از زمان اوج بار، تفاوت فاحشی با مقدار آن در زمان اوج داشته باشد باعث می شود تا ضریب بهره برداری از تجهیزات شبکه پایین آمده و بهره وری سرمایه گذاری کم شود. یکی از راهکارهایی که می تواند باعث جابه جایی بار از زمان اوج به زمان های دیگر شده و در درازمدت منحنی بار را هموار نماید ایجاد تمایز قیمت برق بین ساعات اوج بار و غیر اوج بار است. یکی از متداول ترین سیاست های قیمتی اجرای قیمت گذاری زمان واقعی است.

اجرای برنامه قیمت گذاری زمان واقعی احتیاج به زیرساخت های مخابراتی و اطلاعاتی پیشرفته داشته و نیاز به سرمایه گذاری بالایی دارد [۴]. به همین دلیل شرکت های برق در قبال این سرمایه گذاری های هنگفت مقاومت می کنند. در کشور امریکا به علت پاسخ به مشکلات فنی، اقتصادی و زیست محیطی به سمت اجرای گسترده برنامه های پاسخ گویی بار رفته اند و سعی در محیا کردن مقدمات لازم برای اجرای آن برنامه ها می کنند. بر اساس گزارش هیئت تنظیم انرژی فدرال<sup>۱</sup> امریکا در سال ۲۰۱۰ میزان نفوذ زیرساخت اندازه گیری پیشرفته در حدود ۸/۷ درصد در میان مشترکان کوچک-اندازه بوده است [۴]. به واسطه توسعه فناوری های شبکه هوشمند نه تنها مقدمات لازم برای اجرای برنامه های پاسخ گویی بار فراهم می شود؛ بلکه ملزومات اجرای بسیاری از پروژه های دیگر نیز محقق می شود. به عنوان مثال، در پروژه MOD<sup>۲</sup> با تجمع و مدیریت یکپارچه خودروهای برقی، نقش فعال آن ها در طراحی و بهره برداری شهرهای آینده تشریح شده است [۵]. شرکت اکسل انرژی<sup>۳</sup> نیز به طور آزمایشی شهرکی را با زیرساخت های لازم شبکه هوشمند در شهر بولدر<sup>۴</sup> راه اندازی کرده است و در آن از برنامه قیمت گذاری زمان واقعی استفاده کرده است [۶]. همچنین شرکت های برق زیادی برنامه های این چنینی (از قبیل مطالعات امکان سنجی و بررسی فرصت ها و تهدیدهای گسترش زیرساخت های شبکه هوشمند) را با هدف اجرای برنامه های پاسخ گویی بار اجرا کرده اند [۷-۱۴].

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، برنامه های پاسخ گویی بار به دو دسته اصلی برنامه های تشویقی محور و برنامه های تعرفه محور تقسیم می شوند. هر دسته نیز به زیر بخش هایی تقسیم شده که به طور

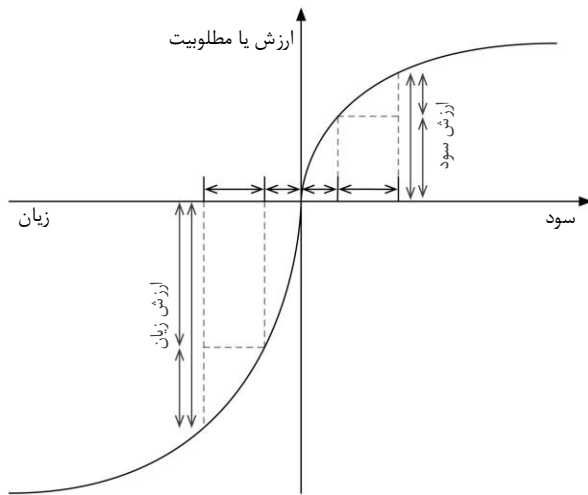


شکل ۱: دسته بندی برنامه های پاسخ گویی بار

کامل در مرجع [۱۵] توضیح داده شده اند. برنامه های تشویقی محور در گذشته عموماً بر روی مشترکان بزرگ صنعتی یا تجاری اجرا شده اما امروزه با توسعه فناوری های شبکه هوشمند بر روی مشترکان کوچک نیز اجرا می شوند [۱۶].

عکس العمل مشترکان در قبال اجرای برنامه های مختلف پاسخ گویی بار متفاوت است. بنابراین، مدل های ریاضی بسیاری به منظور تخمین عکس العمل مشترکان پیشنهاد شده است. در [۱۷] مدل پاسخ گویی بار با استفاده از مفهوم کشش قیمت-تقاضا<sup>۵</sup> ارائه شده است. کشش قیمت-تقاضا حساسیت تغییر تقاضای مشترکان در ازای تغییرات قیمت برق تعریف می شود [۱۸]. در [۱۷] تغییرات تقاضا نسبت به قیمت خطی در نظر گرفته شده و صرفاً برای یکی از برنامه های پاسخ گویی بار انجام شده است. به همین دلیل نویسندگان در [۱۹] نه تنها مدل ریاضی دیگر برنامه های پاسخ گویی بار را با استفاده از مفهوم کشش به دست آوردند، بلکه تغییرات غیر خطی تقاضا را نیز در نظر گرفتند. نویسندگان در [۲۰] علاوه بر موارد پیشین تمایلات و رفتار مشترکان و در نتیجه آن متفاوت بودن اجرای برنامه پاسخ گویی بار در زمان های مختلف را در نظر گرفته و با پیشنهاد یک مدل منعطف نقش زمان را نیز وارد مدل کردند. گروه دیگری از مدل سازی های برنامه های پاسخ گویی بار مبتنی بر روش های بهینه سازی است. نمونه بسیار خوبی که از این دسته از مدل سازی ها می توان اشاره کرد مرجع [۲۱] است. نویسندگان در [۲۱] عکس العمل مشترکان در قبال تغییرات قیمت را خطی فرض کرده و تغییرات بار را پس از اعمال قیمت های زمان واقعی تخمین می زنند. فرض اصلی در این نوع مدل سازی رفتار منطقی مشترکان بوده و تابع هدف مسئله، بیشینه سازی مطلوبیت و یا کمینه سازی هزینه تولید در نظر گرفته می شود.

نویسندگان در [۲۲] مطالعاتی را در حوزه روانشناسی و اقتصاد رفتاری انجام داده و نشان داده اند که مداخلات غیرمالی نیز می تواند به اندازه مشوق های مالی در تغییر الگوی مصرف مشترکان مؤثر باشد. در همین راستا، نکات بسیار مفیدی را در مبحث سیاست گذاری انرژی توصیه کرده اند. استفاده از پاداش و جریمه دو راهکاری است که می تواند در الگوی مصرف مشترکان تغییر ایجاد کند [۲۳]. گرچه هر دوی این راهکارها می تواند منجر به تغییر رفتار در کوتاه مدت شود اما تحقیقات



شکل ۲: شمای کلی تابع مطلوبیت

آن‌ها بر روی مشترکان داشته باشد. همچنین در این مقاله نشان داده می‌شود که تأثیر در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی در مدل‌سازی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به قدری چشم‌گیر است که حتی می‌تواند بر روی اولویت‌بندی اجرای این برنامه‌های از دیدگاه نهاد مجری اثرگذار باشد.

در این مقاله، ابتدا مدل ریاضی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار با در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی توضیح داده شده و تأثیر دو برنامه مختلف پاسخ‌گویی بار که یکی در دسته تشویقی محور بوده و دیگری در دسته تعرفه‌محور است بر منحنی بار مدل گشته و آثار متفاوت آن‌ها در کاهش اوج مصرف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به‌منظور بررسی تأثیر در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی در مدل‌سازی پاسخ‌گویی بار دو بار مدل اجرا شد. ابتدا مدل بدون در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی و سپس با در نظر گرفتن آن مفهوم تغییرات منحنی بار محاسبه شده و نتایج مورد بحث و ارزیابی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده در این مقاله اهمیت در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی را در طراحی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به وضوح نشان می‌دهد. ادامه مقاله به شرح زیر است:

در بخش دوم مفهوم زیان‌گریزی بیان شده و در بخش سوم مدل پاسخ‌گویی بار با در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی پیشنهاد می‌گردد. بخش چهارم اطلاعات مربوط به مطالعات عددی را ذکر کرده و بحث بر روی نتایج نیز در همین بخش عنوان می‌شود. نهایتاً در بخش پنجم مقاله جمع‌بندی می‌گردد.

## ۲- مفهوم زیان‌گریزی

بر اساس تحقیقات انجام‌شده در حوزه اقتصاد رفتاری به آن نتیجه رسیده‌اند که تأثیر زیان یا از دست دادن بر روی حس درونی فرد بسیار قوی‌تر از سود یا به دست آوردن است [۳۲]. به همین دلیل هنگامی که تابع مطلوبیت به‌طور کلی رسم می‌شود، شیب منحنی در قسمت زیان بیش‌تر از شیب در قسمت سود است. در نظریه‌های اقتصاد کلاسیک و همان‌طور که از برخورد عقلانی افراد نیز بر می‌آید همواره فرض می‌شود

نشان داده است که پاداش می‌تواند منجر به شکل‌گیری عادت در مشترکان نیز گردد [۲۴]. بر اساس همین قضیه نویسندگان در مرجع [۲۵] اشاره کردند که حتی اگر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تشویقی محوری که به صورت بلندمدت اجرا می‌شوند، دیگر اجرا نگردند پیش‌بینی می‌شود که بخش اعظمی از آثار مثبت اجرای آن برنامه‌ها در اثر شکل‌گیری عادت در مشترکان باقی خواهد ماند. در مرجع [۲۶] الگوی رفتاری در مصرف انرژی الکتریکی ۶۰۰ خانه در کشور سوئد مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس یافته‌های این تحقیق موارد بسیاری از تشویقی‌های غیرمالی که بر روی مصرف انرژی آن‌ها اثر دارد استخراج شده است. همچنین، مقالات بسیاری تأثیر قیمت برق را بر رفتار مشترکان به‌منظور کاهش مصرف انرژی مطالعه کرده‌اند و نتیجه حاصله بیانگر ارتباط تنگاتنگ میان مشوق‌های مالی و شاخصه‌های رفتاری مشترکان است [۲۸، ۲۷]. مطالعات ارزیابی تأثیر شاخصه‌های رفتاری مشترکان در طراحی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار هنوز در مراحل ابتدایی بوده و مطالعات در حوزه پاسخ‌گویی بار بیش‌تر معطوف به مسائل اقتصادی و فنی در بهره‌برداری از شبکه مانند کاهش قیمت و بهبود پایایی است. گرچه مطالعات بسیار ارزشمندی در زمینه مدل‌سازی ریاضی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار علی‌الخصوص در نظر گرفتن رفتار انسانی مشترکان انجام شده است، اما هنوز این قسمت به بلوغ نسبی نرسیده و توجه بیش‌تر محققان را می‌طلبد.

بر اساس مطالعات انجام‌شده در حوزه رفتارشناسی انسانی به این نتیجه رسیده‌اند که فرض یکسان بودن پاسخ مشترکان در قبال جریمه و پاداش صحیح نیست [۲۹]. در واقع این برخلاف فرض خطی بودن رفتار مشترکان در اقتصاد کلاسیک است. در این مقاله، تأثیر متفاوت عکس‌العمل مشترکان در قبال اجرای دو نوع متفاوت از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مدل می‌شود. در این مدل از مفهوم زیان‌گریزی<sup>۶</sup> که یکی از مدل‌های رفتار انسانی شناخته‌شده در حوزه علم روانشناسی است استفاده می‌شود. طبق تعریف، مفهوم زیان‌گریزی بیانگر این مسئله است که افراد به‌طور کلی ترجیح می‌دهند که مقدار کم‌تری ضرر کنند یا از دست بدهند تا اینکه بخواهند مقداری سود کنند یا چیزی به دست آورند [۳۰]. به‌عبارتی دیگر، در مباحث مالی-رفتاری ترس از ضرر محرک بسیار قوی‌تری نسبت به وسوسه سود است. در عموم مطالعاتی که انجام شده است ترس از ضرر از نظر روان‌شناختی تقریباً دو برابر قوی‌تر از وسوسه سود است [۳۱].

با توجه به موارد مطرح شده در این بخش نوآوری‌های کلیدی این مقاله را می‌توان مطابق با ذیل برشمرد:

- ۱- با استفاده از مفهوم زیان‌گریزی و وارد کردن آن در مدل‌سازی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار یک مدل مبتنی بر رفتار انسانی پیشنهاد شده است که آثار متفاوت برنامه‌های تشویقی محور و تعرفه‌محور را در نظر می‌گیرد.
- ۲- با در نظر گرفتن مدل پیشنهادی در این مقاله می‌توان انتظار داشت که نتایج حاصل از شبیه‌سازی مطابقت بیش‌تری با اجرای واقعی

که مقدار کشش قیمت-تقاضا،  $\rho_0$  قیمت اولیه برق پیش از اجرای برنامه پاسخ گویی بار،  $\rho$  قیمت برق پس از اجرای برنامه پاسخ گویی بار،  $d_0$  تقاضای اولیه مشترکان پیش از اجرای برنامه پاسخ گویی بار و  $d$  تقاضای مشترکان پس از اجرای برنامه پاسخ گویی بار است. هنگامی که قیمت برق در زمان های مختلف متفاوت باشد، بار ممکن است دو نوع واکنش نشان دهد. نخست آنکه بارهایی که نمی توانند در زمان جابه جا شوند و فقط می توانند روشن یا خاموش شوند (مانند بارهای روشنایی). این نوع واکنش بار در مقابل قیمت را حساسیت تک پریودی می نامند و به کشش آن، کشش خودی می گویند. مقدار این ضریب همواره نامثبت است، زیرا هنگامی که قیمت افزایش می یابد مقدار تقاضا در همان بازه زمانی نیز کم می شود. دوم آنکه، بارهایی که می توانند در زمان جابه جا شوند. یعنی مصرف می تواند از زمان اوج به زمان میان باری یا کم باری منتقل شود (مانند بارهای سرمایشی و گرمایشی و یا فرآیندی ...). این نوع واکنش بار در مقابل قیمت، حساسیت چند پریودی نامیده می شود و به کشش آن، کشش متقابل می گویند. این ضریب همواره نامنفی است، زیرا هنگامی که در یک بازه زمانی خاص قیمت افزایش می یابد در پی آن مقدار تقاضا در دیگر زمان ها افزایش پیدا می کند. در این مقاله، تغییرات بار در ۲۴ ساعت شبانه روز مد نظر بوده و بازه های زمانی تغییرات بار و قیمت برق، یک ساعت فرض شده است.

فرض می شود مشترکان به دلیل تغییر قیمت برق و یا دریافت تشویقی مصرف خود را از یک مقدار اولیه به مقدار جدید تغییر می دهند [۲۵].

$$\Delta d(i) = d_o(i) - d(i) \quad (2)$$

که  $d_o(i)$  مقدار بار سیستم پیش از اجرای برنامه پاسخ گویی بار،  $d(i)$  بار سیستم پس از اجرای برنامه پاسخ گویی بار و  $i$  اندیس شمارنده زمان است ( $i=1, 2, 3, \dots, 24$ ). میزان تشویقی پرداختی نیز عبارت است از:

$$P(\Delta d(i)) = \lambda A(i) \cdot \Delta d(i), \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (3)$$

که  $A(i)$  میزان تشویقی پرداختی به ازای کاهش ۱ کیلووات در ساعت  $-i$  ام است.  $A(i)$  در ساعات اوج مصرف مقداری مثبت داشته و در بقیه بازه های زمانی برابر با صفر است. از آنجا که در مفهوم زیان گزینی می دانیم که مشترکان به زیان بیش تر از مقدار مشابهی سود عکس العمل نشان می دهند. لذا درک مشترکان از تشویقی متفاوت بوده و انگیزه مثبتی که در آن ها ایجاد می شود مقداری کم تر از زیان متناظر با آن سود است. به عبارتی دیگر، اگر بخواهیم مفهوم زیان گزینی را مدل کنیم باید مقدار سود درک شده را کم تر از مقدار سود واقعی در نظر بگیریم. این مفهوم به صورت ضریب  $\lambda$  در مدل وارد شده که مقداری بزرگ تر از صفر و کم تر از یک دارد. گرچه مفهوم زیان گزینی به صورت اضافه کردن یک ضریب به مدل پاسخ گویی بار مدل شده است اما محاسبه و تعیین این ضریب برای مجموعه ای از مشترکان کار بسیار پیچیده ای است. از آنجا که این ضریب وابسته به تمایلات شخصی هر یک از مشترکان است لذا محاسبه این ضریب برای بخشی از مشترکان و تعمیم آن برای کل جامعه باید با دقت و حساسیت بالایی صورت پذیرد. همان طور که در

که مقدار برابری از سود یا زیان، مقدار یکسانی از انگیزه را ایجاد می کند. اما با در نظر گرفتن شاخصه های رفتار انسانی به این نتیجه رسیده اند که چنین فرضی در عمل واقع نمی شود. این یافته به قدری بنیادین بوده که روانشناسی به نام دنیل کانمن<sup>۲</sup> با مطرح کردن و تحلیل چنین مفهومی موفق به دریافت جایزه نوبل اقتصاد در سال ۲۰۰۲ شد.

شکل ۲ شمای کلی تابع مطلوبیت را نشان می دهد [۳۳]. در [۳۳] مدلی برای ریسک گزینی پیشنهاد شده و پارامترهای مدل از مشاهدات و انجام آزمایش بر روی جامعه نمونه استخراج شده است. مقدار زیان گزینی در شرایط با ریسک بالا و با ریسک پایین متفاوت بوده و لازم به ذکر است که شیب منحنی تابع مطلوبیت که مفهوم زیان گزینی نیز از آن به دست می آید، در شرایط با ریسک بالا بیش تر است.

در این مقاله، از هر دو دسته اصلی برنامه های پاسخ گویی بار که در شکل ۱ نشان داده شده، یک برنامه به عنوان نماینده دسته انتخاب شده است. از دسته برنامه های تعرفه محور، برنامه قیمت گذاری زمان واقعی<sup>۸</sup> (RTP) و از دسته برنامه های تشویقی محور، برنامه پاسخ گویی بار اضطراری یا تخفیف زمان اوج بار<sup>۹</sup> (PTR) انتخاب شده اند. دلیل انتخاب این برنامه ها متداول بودن آن ها در کل بازارهای برق دنیا است. مطابق با مطالعه انجام شده در [۱۹] اولویت اجرای این برنامه ها از دیدگاه کارایی بیش از دیگر برنامه ها در دسته خودشان است. در برنامه RTP قیمت برق در زمان های اوج مصرف بیش تر است و از دیدگاه مشترکان به صورت زیان دیده می شود. در این برنامه فرض شده است که قیمت های اعمال شده به مشترکان به طور ساعت به ساعت مطابق با متوسط ساعتی تغییرات قیمت برق بالادست تغییر می کند. در حالی که در برنامه PTR به مشترکانی که در زمان اوج مصرف، بارشان را کاهش دهند تشویقی پرداخت می شود که از دیدگاه مشترکان به صورت سود دیده می شود [۳۴]. لذا کاربرد مفهوم زیان گزینی برای این دو برنامه متفاوت بوده و هر دو قسمت سود و زیان منحنی استفاده می شود. در مرجع [۲۵] مدلی از تبعیض قیمت<sup>۱۰</sup> با در نظر گرفتن مفهوم زیان گزینی ارائه شده است. این مدل با هدف بیشینه سازی سود و همچنین طراحی قیمت گذاری پویا برای شرکت های برق می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

### ۳- مدل ریاضی

#### ۳-۱- مدل ریاضی پاسخ گویی بار

تقاضا برای یک کالا با کاهش قیمت آن افزایش می یابد و این تغییر عموماً خطی نیست. به این مفهوم کشش قیمت-تقاضا گفته می شود. به بیانی دیگر، کشش قیمت-تقاضا برابر است با تغییرات نسبی بار در ازای تغییرات نسبی قیمت [۳۶]. به منظور اندازه گیری این پدیده، منحنی تقاضای غیرخطی می تواند حول یک نقطه کار خطی فرض شده و حول آن نقطه کار مطابق با رابطه زیر نوشته شود [۳۶]:

$$E = \frac{\rho_0}{d_0} \cdot \frac{\partial d}{\partial \rho} \quad (1)$$

$$B(d(i)) = B_0(i) + \rho_0(i) \left[ d(i) - d_0(i) \right] \left\{ 1 + \frac{d(i) - d_0(i)}{2E(i).d_0(i)} \right\} \quad (14)$$

با در نظر گرفتن روابط (۱۴) و (۷):

$$\rho(i) + \lambda.A(i) = \rho_0(i) \left\{ 1 + \frac{d(i) - d_0(i)}{E(i).d_0(i)} \right\} \quad (15)$$

$$\rho(i) - \rho_0(i) + \lambda.A(i) = \rho_0(i) \cdot \frac{d(i) - d_0(i)}{E(i).d_0(i)} \quad (16)$$

که در این روابط  $d_0(i)$  تقاضای مشترک قبل از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار،  $B_0(i)$  مقدار درآمد ناشی از مصرف برق به اندازه  $d_0$  و  $\rho_0(i)$  قیمت برق قبل از قطع یا کاهش بار است. با ساده‌سازی رابطه (۱۶)، تابع مصرف مشترک به دست می‌آید.

$$d(i) = d_0(i) \left\{ 1 + \frac{E(i) [\rho(i) - \rho_0(i) + \lambda.A(i)]}{\rho_0(i)} \right\} \quad (17)$$

اگر کشش متقابل پیرو  $j$ -ام نسبت به پیروهای  $i$ -ام که مطابق با روابط زیر تعریف می‌شوند را نیز در نظر بگیریم، داریم:

$$E(i, j) = \frac{\rho_0(j)}{d_0(i)} \cdot \frac{\partial d(i)}{\partial \rho(j)} \quad (18)$$

$$\begin{cases} E(i, j) \leq 0 & \text{if } i = j \\ E(i, j) \geq 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (19)$$

در نهایت مدل جامع پاسخ‌گویی بار طبق رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$d(i) = d_0(i) + \sum_{j=1}^{24} E(i, j) \cdot \frac{d_0(j)}{\rho_0(j)} [\rho(i) - \rho_0(j) + \lambda.A(j)] \quad (20)$$

همان‌طور که در رابطه (۲۰) دیده می‌شود دو عامل اصلی می‌تواند دلیل تغییر بار در ساعات مختلف باشد. اولین عامل، تغییر در مقدار عددی  $A(j)$  است که بیانگر پرداخت تشویقی در ساعات اوج مصرف به‌منظور کاهش اوج بار است. مسلماً پارامتر  $A(j)$  فقط در برنامه PTR مقدار پیدا می‌کند و یافتن مقادیر بهینه  $A(j)$  در ساعات مختلف از مهم‌ترین عوامل در طراحی برنامه‌های PTR است. عامل دوم تأثیرگذار در مدل، تغییر در قیمت برق نسبت به حالت پایه آن است، به‌عبارتی دیگر در برخی از ساعات مانند ساعات اوج مصرف قیمت برق که با  $\rho(i)$  نشان داده می‌شود از قیمت متوسط برق (پیش از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار) که با  $\rho_0(i)$  نشان داده می‌شود، بیش‌تر می‌شود تا محرکی برای کاهش مصرف برق گردد. از طرفی دیگر، در زمان‌های کم‌باری قیمت برق بالاتر از قیمت متوسط برق در نظر گرفته می‌شود تا مشترکان در آن ساعات مقدار بار مصرفی خودشان را افزایش دهند. به‌عبارتی دیگر، تغییرات قیمت برق از مجموعه برنامه‌های تعرفه‌محور بوده و فقط در برنامه RTP معنی پیدا می‌کند و در واقع مهم‌ترین عامل در طراحی برنامه RTP یافتن مقادیر بهینه قیمت برق در هر ساعت یا  $\rho(i)$  است.

شکل ۲ نشان داده شده است، ابتدا باید تابع مطلوبیت برق برای هر یک از مشترکان به دست آید. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، این تابع یک تابع غیرخطی است که باید خطی گردد و شیب آن در قسمت سود و زیان محاسبه گردد. مفهوم زیان‌گریزی بیان می‌کند که شیب تابع مطلوبیت در قسمت زیان معمولاً بیش از شیب این تابع در قسمت سود است، لذا ضریب  $\lambda$  به صورت تقسیم مقدار عددی شیب تابع مطلوبیت خطی شده در قسمت سود بر شیب آن تابع در قسمت زیان تعریف می‌شود.

در محاسبه مدل ریاضی پاسخ‌گویی بار بایستی سود مشترک که از رابطه زیر محاسبه می‌شود، حداکثر شود [۲۵].

$$S(d(i)) = B(d(i)) - d(i) \cdot \rho(i) + P(\Delta d(i)) \quad (4)$$

که در آن  $S$  سود مشترک،  $B(d(i))$  درآمد مشترک ناشی از استفاده از برق در تولید کالا در ساعت  $i$ -ام و  $[d(i), \rho(i)]$  هزینه مشتری (توان مصرفی  $\times$  قیمت لحظه‌ای برق) است. برای بیشینه‌سازی سود مشترک، بایستی مشتق تابع سود را برابر با صفر قرار داد.

$$\frac{\partial S}{\partial d(i)} = \frac{\partial B(d(i))}{\partial d(i)} - \rho(i) + \frac{\partial P}{\partial d(i)} = 0 \quad (5)$$

بنابراین:

$$\frac{\partial B(d(i))}{\partial d(i)} - \rho(i) - \lambda.A(i) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial B(d(i))}{\partial d(i)} = \rho(i) + \lambda.A(i) \quad (7)$$

بسط تیلور تابع درآمد مشترک تا مرتبه دوم به صورت زیر حاصل می‌شود [۲۵]:

$$B(d(i)) = B(d_0(i)) + \frac{\partial B(d_0(i))}{\partial d(i)} \Delta d(i) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 B(d_0(i))}{\partial d^2(i)} (\Delta d(i))^2 \quad (8)$$

در شرایط اولیه تابع سود مشترک به صورت زیر است:

$$S_0(d(i)) = B(d_0(i)) - d_0(i) \cdot \rho_0(i) \quad (9)$$

$$\frac{\partial S_0}{\partial d(i)} = \frac{\partial B(d_0(i))}{\partial d(i)} - \rho_0(i) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial B(d_0(i))}{\partial d} = \rho \quad (11)$$

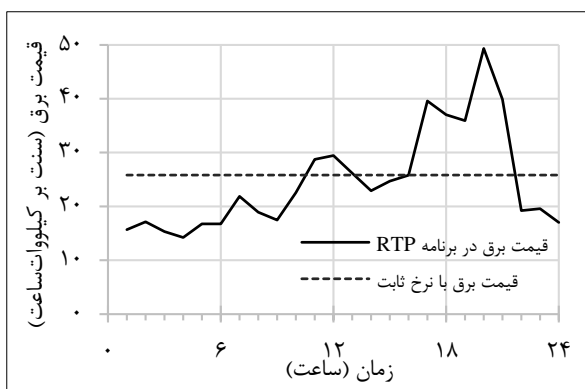
لذا داریم:

$$\frac{\partial^2 B}{\partial d^2} = \frac{\partial \rho}{\partial d} = \frac{1}{E} \frac{\rho_0}{D_0} \quad (12)$$

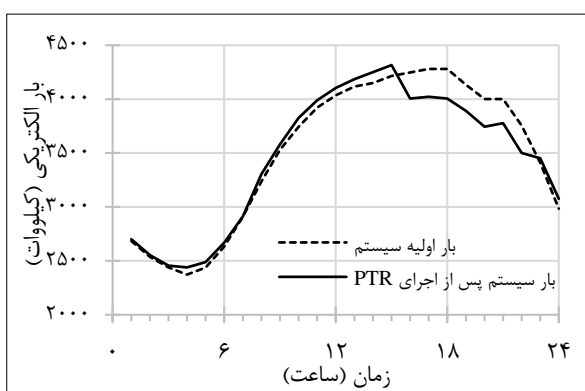
با جایگذاری روابط (۱۱) و (۱۲) در (۸) تابع درجه دوم درآمد مشترک به واسطه مصرف برق به دست می‌آید.

$$B(d(i)) = B(d_0(i)) + \rho_0(i) \Delta d(i) + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho_0(i)}{\partial d(i)} (\Delta d(i))^2 \quad (13)$$

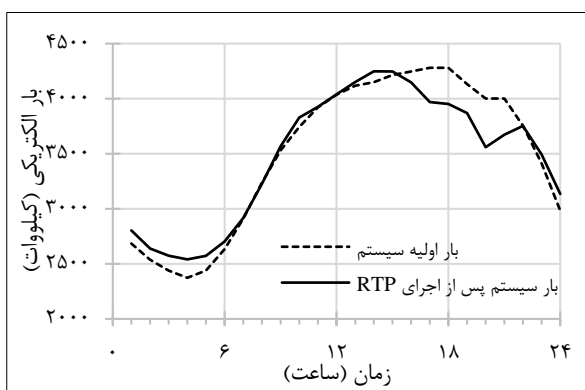
که به صورت رابطه (۱۴) می‌تواند خلاصه شود.



شکل ۳: قیمت برق پیش و پس از اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار



شکل ۴: منحنی بار سیستم پیش و پس از اجرای برنامه PTR



شکل ۵: منحنی بار سیستم پیش و پس از اجرای برنامه RTP

قیمت‌های لحظه‌ای نشان‌داده‌شده در شکل ۳ به مشترکان اعمال می‌گردد، لذا انتظار داریم که بار فقط در زمان‌هایی که قیمت برق در برنامه RTP از قیمت برق با نرخ ثابت بیشتر است، کاهش پیدا کند. این مسئله در شکل ۵ کاملاً مشهود است. در برنامه PTR دوره‌ای که در آن تشویقی پرداخت می‌شود نیز از ساعات ۱۶ تا ۲۲ تعیین شده است. در واقع بازه زمانی که برنامه PTR فعال می‌شود بر اساس قیمت برق تعیین شده است نه بر اساس مقدار منحنی بار. دلیل ارزان‌تر بودن قیمت برق در ساعات قبل از ۱۶ (درحالی‌که منحنی بار تقریباً در دوره اوج مصرف است) به دلیل نفوذ بالای سلول‌های خورشیدی در بازار نیوانگلند است. با دقت به منحنی‌های قیمت و بار مشهود است که با کاهش تولید سلول‌های خورشیدی از ساعات ۱۵ الی ۲۰ با اینکه بار تغییر عمده‌ای نمی‌کند ولی قیمت برق به شدت رو به افزایش است.

### ۳-۲- محاسبه بار پایه مشترکان

در برنامه PTR، مقدار تشویقی پرداختی در زمان اوج مصرف بر اساس مقدار بار کاهش‌یافته که همان تفاوت بار پایه<sup>۱۱</sup> با مقدار بار قابل اندازه‌گیری است، محاسبه می‌شود. بنابراین تخمین بار پایه مشترکان یا بار پیش از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار، بسیار حائز اهمیت بوده و در همین راستا روش‌های متعددی برای محاسبه این مفهوم پیشنهاد شده است. به عنوان مثال در [۳۷]، برخی از مدل‌های مرسوم در محاسبه تخمین بار پایه توضیح داده شد و همچنین مزایا و معایب هر کدام نسبت به مدل‌های دیگر بیان شده است. یکی از معروف‌ترین مدل‌های تخمین بار پایه موسوم به روش ۳-۵ است. برای محاسبه بار پایه در این روش منحنی بار ۵ روزی که بیش‌ترین شباهت را به روز مورد نظر داشتند (از نظر تغییرات دما، رطوبت، وزش باد، بارش و ...) انتخاب می‌شود. به‌منظور اینکه تخمین بدبینانه‌ای یا دست‌بالایی از بار پایه به دست آید از میان آن ۵ منحنی، ۳ منحنی که بیش‌ترین مقدار بار را دارند انتخاب شده و از آن ۳ منحنی میانگین گرفته می‌شود. این منحنی میانگین گرفته‌شده به عنوان بار پایه در روز مورد نظر، در نظر گرفته می‌شود [۳۷]. در این مقاله، از این روش برای تخمین بار پایه مشترکان استفاده شده است.

### ۴- مطالعات عددی

در این مقاله از اطلاعات بار ساعتی بازار نیوانگلند استفاده شده است [۳۸]. از مزایای استفاده از اطلاعات این بازار این است که اپراتور مستقل بازار<sup>۱۲</sup> (ISO) نیوانگلند نه تنها مقدار بار ساعتی را گزارش کرده بلکه مقدار قیمت برق ساعتی متناظر با آن بار را نیز در دسترس قرار می‌دهد. در این مطالعه از اطلاعات یک روز کاری در تابستان مورخ ۲۷ مرداد ۱۳۹۳ و قیمت‌های بازار لحظه‌ای متناظر آن روز به عنوان قیمت‌های فرض شده در برنامه RTP استفاده شده است.

شکل ۳ منحنی قیمت برق را برای برنامه RTP نشان می‌دهد. نرخ ثابت که همان قیمت برق پیش از اجرای برنامه RTP است برابر با متوسط قیمت لحظه‌ای که در برنامه RTP اعمال می‌شود، فرض شده است. این مقدار برابر با ۲۵/۸۳ سنت به دست آمد. همچنین فرض می‌کنیم که به ازای هر کیلووات ساعت کاهش بار در زمان اوج مصرف مبلغ ۱۴/۷۵ سنت در برنامه PTR پرداخت می‌شود. اما در برنامه RTP قیمت‌های بازار لحظه‌ای نشان‌داده‌شده در شکل ۳ به‌طور مستقیم اعمال می‌شوند. منحنی بار به سه بخش کم‌باری، میان‌باری و پرباری تقسیم شده است. دوره کم‌باری از ساعات ۱ الی ۹، دوره میان‌باری از ساعات ۱۰ الی ۱۵ و ۲۳ الی ۲۴ و دوره پرباری از ساعات ۱۶ الی ۲۲ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، بر اساس سیاست‌های بازار نیوانگلند بازه‌های زمانی کم‌باری، میان‌باری و پرباری با توجه به منحنی قیمت برق انتخاب می‌شوند. برای مقادیر کشش قیمت نسبت به تقاضا از اطلاعات بیان‌شده در [۳۶] استفاده شده است.

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نشان‌دهنده تغییر منحنی بار با اجرای برنامه‌های PTR و RTP هستند. از آنجا که در اثر اجرای برنامه RTP

جدول ۱: نتایج سناریوی اول (کاهش اوج بار)

سیاست قیمت‌گذاری	نرخ ثابت	RTP	PTR <sup>0</sup>	PTR <sup>LA</sup>
قیمت برق (\$/kWh)	۰/۲۵	متغیر	۰/۲۵	۰/۲۵
مقدار تشویقی پرداختی (\$/kWh)	-	-	۰/۱۵	۰/۱۵
درآمد کلی (\$) (۱۰۰٪)	۲۱۱۹۴۰۰	۲۱۱۹۴۰۰	۲۱۲۳۹۰۰	۲۰۹۹۸۰۰
کل انرژی مصرفی (kWh)	۸۳۶۵۵	۸۳۴۳۱	۸۳۱۲۵	۸۳۱۲۵
انرژی مصرفی در دوره اوج (kWh) (۱۰۰٪)	۲۸۵۶۸	۲۶۹۳۶	۲۶۹۳۶	۲۶۹۳۶
	(۹۴/۲۹٪)	(۹۴/۲۹٪)	(۹۴/۲۹٪)	(۹۴/۲۹٪)

جدول ۲: نتایج سناریوی دوم (تخصیص بودجه)

سیاست قیمت‌گذاری	نرخ ثابت	RTP	PTR <sup>0</sup>	PTR <sup>LA</sup>
قیمت برق (\$/kWh)	۰/۲۵	متغیر	۰/۲۵	۰/۲۵
مقدار تشویقی پرداختی (\$/kWh)	-	-	۰/۱۶	۰/۱۲
درآمد کلی (\$) (۱۰۰٪)	۲۱۱۹۴۰۰	۲۱۱۹۴۰۰	۲۱۱۹۴۰۰	۲۱۱۹۴۰۰
کل انرژی مصرفی (kWh)	۸۳۶۵۵	۸۳۴۳۱	۸۳۰۸۷	۸۳۲۲۸
انرژی مصرفی در دوره اوج (kWh) (۱۰۰٪)	۲۸۵۶۸	۲۶۹۳۶	۲۶۸۲۱	۲۷۲۵۵
	(۹۴/۲۹٪)	(۹۴/۲۹٪)	(۹۳/۸۹٪)	(۹۵/۴۰٪)

به‌منظور ارزیابی تأثیر در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی در نتایج اجرای برنامه PTR دو حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول (PTR<sup>0</sup>)، مفهوم زیان‌گریزی در مدل وارد نشده و نتایج بدون در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی به دست آمد. اما در حالت دوم (PTR<sup>LA</sup>)، مفهوم زیان‌گریزی نیز در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج نشان‌داده‌شده در جدول ۱ در اثر اجرای هر دو برنامه RTP و PTR درآمد نهاد مجری کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، هنگامی که هدف شرکت برق کاهش مقدار مشخصی از اوج بار است در اثر اجرای برنامه RTP باید زیانی را به اندازه ۴۲۲۰۰ دلار تحمل کند. این مقدار برابر با کاهش درآمد شرکت برق حاصل از فروش برق به مشترکان در یک روز به اندازه ۱/۹۵ درصد است. درحالی‌که در اثر اجرای برنامه PTR<sup>0</sup> (بدون مفهوم زیان‌گریزی) ضرر نهاد مجری تا اندازه ۳۷۷۰۰ دلار (معادل با ۱/۷۵ درصد از کل درآمد) کاهش می‌یابد و این نشان‌دهنده برتری برنامه PTR<sup>0</sup> نسبت به RTP است. اما هنگامی که مفهوم زیان‌گریزی نیز مدل می‌شود، نتایج برعکس شده و مشاهده می‌شود که در اثر اجرای برنامه PTR<sup>LA</sup> شرکت برق ضرری به اندازه ۶۱۸۰۰ دلار (معادل با ۲/۸۶ درصد از کل درآمد) می‌کند. در این حالت به‌طور مشخصی می‌توان نتیجه گرفت که برنامه RTP به PTR<sup>LA</sup> برتری دارد. همان‌طور که مشخص است در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی دید واقعی‌تری از مشترکان به ما می‌دهد و می‌توانیم تخمین صحیح‌تری از رفتار آن‌ها و نتایج حاصل از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار داشته باشیم. با استناد بر نتایج این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که اثر در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی تا حدی می‌تواند بالا باشد که بر روی اولویت‌بندی اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار نهاد مجری نیز تأثیرگذار باشد.

در سناریوی دوم، مقدار تشویقی پرداختی در برنامه PTR تا ۱۵/۸ سنت باید افزایش پیدا کند تا هزینه اجرای هر دو برنامه PTR و RTP

مشترکان بسته به نوع مصرف خود دو نوع عکس‌العمل در قبال اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار از خود نشان می‌دهند. بارهای تک‌پریودی (مانند روشنایی) بارهایی هستند که اگر در یک زمان به هر دلیلی قطع شوند یا کاهش یابند فایده‌ای ندارد که در بازه زمانی دیگری به مدار آیند. به عنوان مثال، اگر به دلیل گران بودن قیمت برق مشتری بخشی از منابع روشنایی موجود در منزل خود را در زمان سر شب روشن نکند، قطعاً آن چراغ‌ها را در نیمه شب که قیمت برق ارزان است نیز روشن نمی‌کند. طبق تعریف، بارهای تک‌پریودی بارهایی هستند که قابلیت جابجایی ندارند و بر روی مقدار درایه‌های قطری ماتریس کشتش تأثیرگذار هستند. اما بارهایی چندپریودی (مانند بارهای فرآیندی از قبیل استفاده از ماشین لباس‌شویی یا ظرف‌شویی) می‌توانند زمان مصرف خود را با در نظر گرفتن قیمت برق تعیین گردد. به‌عبارتی دیگر از بازه‌ای که قیمت برق بالاست به بازه‌هایی که قیمت برق پایین‌تر است منتقل شود. بارهای چندپریودی بر روی مقادیر درایه‌های غیرقطری ماتریس کشتش تأثیر می‌گذارند. اگر بارهای موجود در یک شبکه فقط شامل بارهای چندپریودی باشد، همواره انرژی کاهش‌یافته برابر با انرژی افزایش‌یافته است. اما در حالت کلی نمی‌توان چنین نتیجه‌ای را گرفت. لذا بارهای تک‌پریودی باعث این عدم بازیابی انرژی کاهش یافته یا این عدم تعادل در شکل‌های ۴ و ۵ هستند.

در این مقاله، به‌منظور هرچه بیش‌تر مشخص شدن تأثیر مفهوم زیان‌گریزی، شبیه‌سازی‌ها دو سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، هدف از اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار کاهش اوج مصرف تا حد مشخصی است. در این سناریو هدف رساندن اوج مصرف به مقدار ۱۶۳۲ کیلووات (برابر با ۵/۷۱ درصد کاهش نسبت به حالت پایه) است. از آنجا که قیمت ثابت پیش از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار برابر با میانگین قیمت در برنامه RTP در نظر گرفته شده است و با توجه به اینکه در اثر اجرای این برنامه مقداری از بار از زمان پرباری به زمان کم‌باری منتقل می‌شود، می‌توان انتظار داشت که با این سیاست قیمتی درآمد نهاد مجری کاهش خواهد یافت. مسلماً اگر نهاد مجری برنامه PTR را اجرا کرده و در زمان اوج مصرف به ازای کاهش بار مجبور به پرداخت تشویقی به مشترکان باشد، نیز متحمل هزینه خواهد شد. لذا در اثر اجرای هر دو برنامه RTP و PTR نهاد مجری باید هزینه پرداخت کند. بنابراین، از دیدگاه نهاد مجری برنامه پاسخ‌گویی باری از نظر اقتصادی کارآمدتر خواهد بود که همان مقدار کاهش اوج مصرف را با پرداخت هزینه کم‌تری در بر داشته باشد.

در سناریوی دوم فرض شده است که نهاد مجری مقدار بودجه مشخصی را برای اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اختصاص می‌دهد (همان‌طور که با واقعیت‌های اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در ایران مطابق است). هدف نهاد مجری انتخاب کارآمدترین برنامه است. اینک سؤال اینجاست که کدام‌یک از برنامه‌های RTP و PTR می‌تواند توجیه اقتصادی بیش‌تری داشته باشد.

[۲] نرگس پرهیزی، موسی مرزبند، سیدمازیا میرحسینی مقدم، بهنام محمدی ایواتلو، فاطمه آذری‌نژادیان، «پیاپی‌سازی عملی یک سیستم مدیریت انرژی برای یک ریزشبکه متصل به شبکه سراسری با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری چندبعدی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، صفحات ۴۰-۲۵، شماره ۴۶، ۱۳۹۵.

- [3] D. S. Kirschen, "Demand-side view of electricity markets," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 18, pp. 520-527, 2003.
- [4] Federal Energy Regulatory Commission (FERC) and (February 2011), *Assessment of Demand Response and Advanced Metering*, Staff report, [online], available: <http://goo.gl/rqtXm>.
- [5] K. Spieser, K. Treleaven, R. Zhang, E. Frazzoli, D. Morton and M. Pavone, "Toward a systematic approach to the design and evaluation of automated mobility-on-demand systems: A case study in Singapore," *In Road Vehicle Automation*, pp. 229-245, 2014.
- [6] F. Shariatzadeh, P. Mandal and A. K. Srivastava, "Demand response for sustainable energy systems: A review, application and implementation strategy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 343-350, 2015.
- [7] S. Buryk, D. Mead, S. Mourato and J. Torriti, "Investigating preferences for dynamic electricity tariffs: The effect of environmental and system benefit disclosure," *Energy Policy*, vol. 80, pp. 190-195, 2015.
- [8] A. Faruqi and S. Sergici, "Household response to dynamic pricing of electricity: a survey of 15 experiments," *Journal of Regulatory Economics*, vol. 38, pp. 193-225, 2010.
- [9] M. Marzband, N. Parhizi, M. Savaghebi and J. M. Guerrero, "Distributed smart decision-making for a multimicrogrid system based on a hierarchical interactive architecture," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 31, pp. 637-648, 2016.
- [10] M. Marzband, F. Azarnejadian, M. Savaghebi and J. M. Guerrero, "An optimal energy management system for islanded microgrids based on multiperiod artificial bee colony combined with markov chain," *IEEE Systems Journal*, vol. PP, pp. 1-11, 2015.
- [11] M. Marzband, E. Yousefnejad, A. Sumper and J. L. Domínguez-García, "Real time experimental implementation of optimum energy management system in standalone microgrid by using multi-layer ant colony optimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 75, pp. 265-274, 2016.
- [12] M. Marzband, M. Ghadimi, A. Sumper and J. L. Domínguez-García, "Experimental validation of a real-time energy management system using multi-period gravitational search algorithm for microgrids in islanded mode," *Applied energy*, vol. 128, pp. 164-174, 2014.
- [13] M. Marzband, N. Parhizi and J. Adabi, "Optimal energy management for stand-alone microgrids based on multi-period imperialist competition algorithm considering uncertainties: experimental validation," *International transactions on electrical energy systems*, 2015.
- [14] M. Marzband, A. Sumper, A. Ruiz-Álvarez, J. L. Domínguez-García and B. Tomoiagă, "Experimental evaluation of a real time energy management system for stand-alone microgrids in day-ahead markets," *Applied Energy*, vol. 106, pp. 365-376, 2013.
- [15] P. Teimourzadeh Baboli, M. Parsa Moghaddam and M. Eghbal, "Present status and future trends in enabling demand response programs," *In IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-6, 2011.

یکسان باشد و شرایطی به وجود آید تا بتوان تحلیل بهتری بر روی کارآمدی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و چگونگی تأثیر آن‌ها بر منحنی بار داشته باشیم. جدول ۲ نتایج اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را در سناریوی دوم نشان می‌دهد. اجرای برنامه RTP منجر به کاهش ۵/۷۱ درصدی از اوج بار شده و برنامه PTR<sup>0</sup> (بدون در نظر گرفتن مفهوم زیان‌گریزی) منجر به کاهش اوج مصرف تا ۶/۱۱ درصد می‌شود. این امر نشان‌دهنده کارآمدتر بودن برنامه PTR است. اما اگر برنامه PTR<sup>LA</sup> اجرا شده و مفهوم زیان‌گریزی نیز لحاظ گردد، مقدار کاهش اوج بار به ۴/۶ درصد می‌رسد که بیانگر کارآمدتر بودن برنامه RTP نسبت به PTR است.

## ۵- نتیجه‌گیری

با گسترش فناوری‌های شبکه هوشمند، نفوذ برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بیش‌تر شده و پیش‌بینی می‌شود با استفاده از این امکانات مقدمات ورود مشترکان بیش‌تری که اغلب آن‌ها کوچک‌اندازه هستند به این حوزه فراهم آید. در چنین محیطی که اندازه مشترکان کوچک ولی تعدادشان زیاد است، قطعاً می‌توان گفت که شاخصه‌های رفتار انسانی آن‌ها کاملاً مشهود می‌شود. همان‌طور که در این مقاله مطرح شد، تدوین یک سیاست قیمت‌گذاری بهینه و یا طراحی برنامه پاسخ‌گویی بار نیازمند تخمین دقیق رفتار مشترکان است. علی‌الخصوص اگر در محیطی مانند شبکه‌های هوشمند اجرا شوند که مشترکان کوچک‌اندازه اما زیادی در برنامه شرکت می‌کنند، اهمیت این مسئله دوچندان خواهد شد. در این مقاله، مفهوم زیان‌گریزی که مفهومی شناخته‌شده در حوزه اقتصاد رفتاری است، معرفی شد و مدل پاسخ‌گویی بار مبتنی بر زیان‌گریزی مشترکان پیشنهاد شده است. به‌منظور ارزیابی مدل پیشنهادی این مدل بر روی هر دو دسته اصلی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (تشویقی‌محور و تعرفه‌محور) پیاده‌سازی شد و نتایج مرتبط با آن‌ها استخراج شد. با استناد بر نتایج دریافتی مشاهده شد که نه‌تنها در نظر گرفتن شاخصه‌های رفتار انسانی مشترکان بر نتایج اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مهم بوده، بلکه این اثر تا حدی است که بر روی کارآمدی یک برنامه و برتری آن برنامه نسبت به برنامه دیگر تأثیر می‌گذارد. درواقع در نظر گرفتن رفتار انسانی مشترکان در مدل پاسخ‌گویی بار تخمین واقعی‌تری از پیاده‌سازی این برنامه‌ها داده و می‌بایست در اولویت‌بندی اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار کلیه نهادهای مجری اعم از شرکت‌های توزیع یا برق‌های منطقه‌ای مد نظر قرار بگیرد. کاربرد اصلی این چنین مدل‌هایی که چگونگی رفتار مشترکان را نیز تخمین می‌زنند بیش‌تر به منظور طراحی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و تعیین پارامترهای مرتبط با آن است.

## مراجع

- [1] S. Sen, S. Chanda, S. Sengupta and A. De, "Demand response governed swarm intelligent grid scheduling framework for social welfare," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, pp. 783-792, 2016.



- [28] T. Santarius, "Energy efficiency, human behavior, and economic growth: Challenges to cutting energy demand to sustainable levels," *In AIP Conference Proceedings*, 2015.
- [29] Z. Carmon and D. Ariely, "Focusing on the forgone: how value can appear so different to buyers and sellers," *Journal of Consumer Research*, vol. 27, pp. 360-370, 2000.
- [30] A. Tversky and D. Kahneman, "Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty," *Journal of Risk and Uncertainty*, vol. 5, pp. 297-323, 1992.
- [31] D. Kahneman and A. Tversky, "Choices, values, and frames," *American Psychologist*, vol. 39, p. 341, 1984.
- [32] A. Tversky and D. Kahneman, "Loss aversion in riskless choice: A reference-dependent model," *The Quarterly Journal of Economics*, pp. 1039-1061, 1991.
- [33] V. Köbberling and P. P. Wakker, "An index of loss aversion," *Journal of Economic Theory*, vol. 122, pp. 119-131, 2005.
- [۳۴] فرید محمدی، حمدی عبدی، احسان دهنوی، «حل مسئله توزیع بار اقتصادی هزینه آلودگی دینامیک همراه با برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری بهینه تحت قیود اثر نقطه-دریچه و ذخیره چرخان»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، صفحات ۳۵۶-۳۴۳، شماره ۴۶، ۱۳۹۵.
- [35] J. C. Carbajal and J. C. Ely, "A Model of price discrimination under loss aversion and state-contingent reference points," *Theoretical Economics*, 2013.
- [36] D. S. Kirschen, G. Strbac, P. Cumperayot and D. de Paiva Mendes, "Factoring the elasticity of demand in electricity prices," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 15, pp. 612-617, 2000.
- [37] P. Teimourzadeh Baboli, M. Shahparasti, M. Parsa Moghaddam, M. R. Haghifam and M. Mohamadian, "Energy management and operation modelling of hybrid AC-DC microgrid," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, pp. 1700 – 1711, 2014.
- [38] New England ISO zonal information and 2013 and 2014 SMD hourly data report, [online], available: <http://goo.gl/7h390w>.
- [16] S. R. Kuppanagari, R. Kannan, C. Chelmiss, A. S. Tehrani and V. K. Prasanna, "Optimal customer targeting for sustainable demand response in smart grids," *Procedia Computer Science*, vol. 80, pp. 324-334, 2016.
- [17] H. A. Aalami, M. Parsa Moghaddam and G. R. Yousefi, "Demand response modeling considering interruptible/curtailable loads and capacity market programs," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 243-250, 2010.
- [18] D. Kirschen and G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*, Wiley Online Library.
- [19] H. A. Aalami, M. Parsa Moghaddam and G. R. Yousefi, "Modeling and prioritizing demand response programs in power markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 426-435, 2010.
- [20] M. Parsa Moghaddam, A. Abdollahi and M. Rashidinejad, "Flexible demand response programs modeling in competitive electricity markets," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 3257-3269, 2011.
- [21] A. J. Conejo, J. M. Morales and L. Baringo, "Real-time demand response model," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, pp. 236-242, 2010.
- [22] H. Allcott and S. Mullainathan, "Behavioral science and energy policy," *Science*, vol. 327, pp. 1204-1205, 2010.
- [23] J. Luft, "Bonus and penalty incentives contract choice by employees," *Journal of Accounting and Economics*, vol. 18, pp. 181-206, 1994.
- [24] J. Dodson, "Relative values of reward and punishment in habit formation," *Psychobiology*, vol. 1, p. 231, 1917.
- [25] P. Teimourzadeh Baboli, M. Eghbal, M. Parsa Moghaddam and H. A. Aalami, "Customer behavior based demand response model," *In IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-7, 2012.
- [26] A. L. Lindén, A. Carlsson-Kanyama and B. Eriksson, "Efficient and inefficient aspects of residential energy behaviour: What are the policy instruments for change?," *Energy policy*, vol. 34, pp. 1918-1927, 2006.
- [27] A. Ramos, A. Gago, X. Labandeira and P. Linares, "The role of information for energy efficiency in the residential sector," *Energy Economics*, vol. 52, pp. S17-S29, 2015.

## زیر نویس‌ها

<sup>6</sup> Demand-price elasticity

<sup>7</sup> Daniel Kahneman

<sup>8</sup> Real time pricing

<sup>9</sup> Peak time rebate

<sup>10</sup> Price discrimination

<sup>11</sup> Customer Baseline Load

<sup>12</sup> Independent System Operator

<sup>1</sup> Federal energy regulatory commission

<sup>2</sup> Mobility-on-demand

<sup>3</sup> Xcel energy

<sup>4</sup> Boulder

<sup>5</sup> Loss aversion