نشریه علمی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال دوازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰؛ ص ۱۸۴- ۱۶۹

علمی- پژوهشی

تحلیل رویکرد تأمین انرژی مشترکین در بازار خرده‌فروشی برق در حضور برنامه‌های پاسخگویی بار با هدف افزایش امنیت انرژی

کوروش آپرناک[۱]، سودابه سلیمانی[۲*]، فرامرز فقیهی[۳]، سید بابک مظفری[٤]

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، ۲- دانشیار، ۳- استادیار،

٤- دانشیار، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۵)

چکیده

امروزه امنیت انرژی به‌طور فزاینده‌ای در سامانه‌های قدرت به‌خصوص سامانه‌های قدرت تجدید ساختاریافته با تغییر قوانین و مقررات حیاتی شده است و همچنین اهمیت امنیت انرژی با رویکرد پدافند نوین از دیدگاه اپراتور سیستم مستقل افزایش یافته است. بنابراین بین امنیت انرژی از دیدگاه پدافند، تأمین انرژی و اقتصاد انرژی رابطه تنگاتنگی برقرار است. در سامانه‌های قدرت تجدید ساختاریافته و با توجه به بهره‌وری اقتصادی می‌توان تأمین انرژی مصرف‌کننده را بر مبنای مدیریت سمت تقاضا و برنامه‌های پاسخگویی بار در محدوده قابل قبولی مدیریت کرد. در این مقاله شاخص امنیت انرژی قبل و بعد از اجرای پاسخگویی بار در محیط اقتصادی سامانه قدرت معرفی می‌شود. از سوی دیگر ، یک راه‌حل کامل برای امنیت انرژی ، تأمین انرژی و بهینه‌سازی مصرف انرژی بر مبنای رویکردی ترکیبی ارائه شده است. در این راستا، مطالعه امنیت تأمین انرژی در حضور خرده‌فروش بازار برق و با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری‌های مختلف انجام شده است. در نهایت مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در نرم‌افزار GAMS توسط حل‌کننده CONOPT اجرا خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: امنیت انرژی، تأمین انرژی الکتریکی، پاسخگویی بار، خرده‌فروش بازار برق، پدافند سامانه‌های قدرت نوین

Analysis of Consumer Energy Supply Approach in the Electricity Retail Market in the Presence of Demand Response Programs with the Aim of Energy Security Enhancement

K. Apornak, S. Soleymani[*], F. Faghihi, S. B. Mozafari
Islamic Azad University, Tehran
(Received: 14/03/2020; Accepted: 15/05/2021)

Abstract

Nowadays, with the revision in the rules and regulations of the restructured power systems, the energy security has become crucial. From the independent system operator (ISO) point of view, in the advanced defense approach also, the energy security has gained more importance. Thus, there is a close relationship between energy security via passive defense approach, energy supply and energy economy. In restructured power systems the customer energy supply can be managed in an acceptable limitation based on the demand-side management and demand response programs considering economic efficiency. In this paper, the energy security index before and after demand response is introduced in the economic environment of the power system. On the other hand, a comprehensive solution for energy security, energy supply and energy consumption, is also presented on the basis of the optimization hybrid approach. In this regard, a study of energy the supply security in the presence of power retail market, regarding different pricing methods is carried out. Finally, the mixed integer programming (MIP) model is implemented in GAMS software via the CONOPT solver.

Keywords: Energy Security, Electrical Energy Supply, Demand Response, Electricity Retailer, Advanced Power Systems' Defense

[*]Corresponding Author E-mail: S.Soleymani@srbiau.ac.ir

۱- مقدمه

از مهم‌ترین و اصلی‌ترین نیازهای مشترکین امروزی سهولت دسترسی به انرژی الکتریکی است، در این میان کوتاهی در تأمین و برقراری این نیاز می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری مانند خاموشی گسترده به همراه داشته باشد. در حال حاضر، تقاضای برق به‌سرعت در حال افزایش است، به‌طور غیرمستقیم رشد تولید برق و سامانه‌های انتقال، بازسازی سامانه قدرت و فاکتورهای دیگر باعث افزایش بیش‌ازحد بار شبکه‌های برق موجود گردیده و در پی آن حاشیه پایداری این شبکه‌ها کاهش پیدا کرده است. از طرفی در سال‌های اخیر با رشد میزان تقاضای برق، حرکت سامانه‌های قدرت سنتی به سمت سامانه‌های قدرت تجدید ساختاریافته آغاز شده و مقررات‌زدایی در صنعت برق به شکل جدی شروع‌شده است به‌طوری‌که بتوان با واقعی نمودن قیمت‌ها و تعرفه‌های برق ضمن متعادل‌سازی عرضه و تقاضا، مسئله امنیت و تأمین انرژی را تا حد زیادی حل نمود. با ایجاد بازارهای رقابتی جهت بهره‌برداری ایمن و عاری از هرگونه تبعیض از این سیستم و همچنین افزایش امنیت تأمین انرژی، تأسیس نهادی مستقل به‌عنوان بهره‌بردار شبکه ضروری دیده می‌شد. به‌این‌ترتیب ISO[1] یا بهره‌بردار مستقل سامانه عهده‌دار چنین مسئولیت مهمی گردید، که البته این نهاد از وظایف دیگری نیز برخوردار است. رفته‌رفته پس از تجدید ساختار و مقررات‌زدایی در صنعت برق، این موضوع به اثبات رسید که در صورت کوچک نگه‌داشتن تفاوت بین اوج بار و کم باری تا حد ممکن، کار آیی و بازدهی این صنعت بیش‌ازپیش خواهد شد و مسئله تأمین و امنیت انرژی بهتر حل خواهد شد [۱]. بهره‌برداری بهینه و قابل‌اطمینان از سیستم قدرت در زمان حقیقی مستلزم تعادل بهینه میان عرضه و تقاضا است، به‌گونه‌ای که امنیت انرژی نیز درگرو شناخت مناسب میزان تقاضا است [۲]. عامل کاهش نوسانات قیمت، میانگین پایین قیمت برق برای مصرف‌کننده، مشارکت مصرف‌کننده در بازار عمده‌فروشی بوده، همچنین از طرفی حضور و مشارکت مصرف‌کننده در بازار عمده‌فروشی سبب کاهش نوسانات قیمت و میانگین قیمت‌های پرداختی از طرف مشترکین خواهد شد. با حضور و مشارکت مصرف‌کننده ضمن شناخت دقیق عرضه‌کننده از تقاضا می‌توان تا حد قابل قبولی خطرپذیری عدم تأمین انرژی را کاهش داد [۳]. پاسخگویی بار[2] به توانایی مشترکین یا تأمین‌کنندگان برق به در تطبیق دادن میان تقاضا در هر نقطه زمانی بر مبنای اطلاعات واقعی در همان لحظه زمانی، تلقی می‌شود، بر این مبنا برنامه پاسخگویی بار موفق، برنامه‌ای معرفی‌شده که در عین مسطح و صاف کردن میزان تقاضا و مصرف در طی روز، سبب کاهش میزان مصرف و اجبار مصرف‌کننده به کاهش میزان مصرف خود نشود. همواره پاسخگویی بار به‌عنوان یک ابزار امنیتی در تأمین مناسب انرژی در سامانه قدرت تعریف شده است که بر مبنای آن می‌توان از دیدگاه پدافندی- امنیتی مسئله تأمین برق را تا حد قابل قبولی حل نمود [۴]. مسئله حداکثرسازی سود در میان‌مدت با در نظر گرفتن خطرپذیری که خرده‌فروش[3] در جهت امنیت تأمین انرژی با آن روبروست مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد، همچنین می‌توان از تابع احتمال توزیع به‌منظور مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت و بار استفاده نمود [۵]. برای حل مسئله تصمیم‌گیری خرده‌فروش در بازار برق در میان‌مدت توابع هدفی ازجمله دستیابی به ارزش سود مورد انتظار، دستیابی به حد پایین خطرپذیری در جهت افزایش امنیت تأمین انرژی، انجام محاسبات مربوط به خطرپذیری در جهت اجازه خرده‌فروش در تعیین سطح بهینه مشارکت این نهاد در قراردادهای مختلف بازار برق ضمن دستیابی به قیمت بهینه فروش انرژی از طرف خرده‌فروش به مصرف‌کننده مورد نظر بوده است [۶]. رویکرد برنامه‌ریزی دوسطحی به‌منظور حل مسئله تصمیم‌گیری میان‌مدت که خرده‌فروش بازار برق با آن روبروست در قراردادهای حوضچه و آتی بازار برق نیز مطرح می‌گردد. در این‌گونه مسائل ضمن مطالعات خطرپذیری دستیابی به حداکثرسازی سود مورد انتظار نیز تعیین می‌گردد. بر این اساس خرده‌فروش به دنبال حضور بهینه خود در بازار برق ضمن کمینه‌سازی عدم تأمین انرژی مشترکین است. عدم قطعیت‌های ناشی از بازار حوضچه نیز بر اساس سناریوهای منتخب و تأمین مناسب امنیت انرژی مدل‌سازی خواهند شد [۷]. مدل‌سازی از دید خرده‌فروش به‌منظور ترغیب کردن مصرف‌کنندگانی که در برنامه‌های قیمت‌گذاری زمان استفاده شرکت کردند و می‌خواهند با جابجایی بار مصرف خود را از ساعات اوج به غیر اوج مصرف انتقال دهند نیز ازجمله تصمیم‌گیری‌های اصلی خرده‌فروش جهت حضور در بازار برق است. در این‌گونه مدل‌ها میزان خطرپذیری با معیار CVaR[4] اندازه‌گیری می‌شود. در این‌گونه مسائل بهینه‌سازی روشی کارآمد و عقلانی برای خرده‌فروشانی که طی بازارحوضچه[5] و قراردادهای دوجانبه[6] با مصرف‌کننده به توافق می‌رسند و قصد دارند مصرف‌کننده را به جابجایی بارهای خود ترغیب کنند ارائه می‌شود [۸]. منافع ناشی از برنامه‌های قیمت‌گذاری زمان لحظه‌ای برای کل مشترکین بازار برق و مشترکینی که در بازار خرده‌فروشی شرکت کردند با ارائه یک مدل آماری مبتنی بر پاسخ بار نیز در مطالعات متداول است، اساس این مدل‌های ارائه شده بر مبنای کشش تقاضا[7] از سمت

[1] Independent System Operator
[2] Demand Response
[3] Retailer
[4] Conditional Value at Risk
[5] Pool Market
[6] Bilateral Contract
[7] Demand Elasticity

مصرف‌کنندگان هست. در این‌گونه مدل‌های پیشنهادی ارائه شده منافع اقتصادی ناشی از پاسخ بار برای مصرف‌کنندگانی که در بازار خرده‌فروشی حضور دارند مورد بررسی قرار می‌گیرد [۹]. مطالعات برنامه‌ریزی بهینه به‌منظور شارژ / دشارژ تجهیزات ذخیره‌ساز در جهت بیشینه‌سازی سود حاصل از تأمین برق برای مصرف‌کننده نیز در سال‌های اخیر مورد توجه محققین بوده است. این‌گونه مدل‌ها بر مبنای انعطاف‌پذیری و پاسخگویی از طرف مصرف است به‌گونه‌ای که این پاسخگویی بار سبب بهینه‌سازی مدل و برنامه‌ریزی شارژ / دشارژ این تجهیزات می‌شود و سبب تأمین مناسب تقاضای مشترکین در محیط اقتصادی خواهد شد [۱۰]. این‌گونه مطالعات می‌تواند با در نظر گرفتن بارهای جابجاپذیر بازمان ضمن قیود مربوط به تنظیمات سطوح مصرف و تقاضا به بررسی راهبرد پیشنهادهی خرید انرژی از بازار برق مورد مطالعه قرار گیرد، در این نوع مطالعه مصرف‌کننده با کشش‌های تقاضایی مختلف وارد برنامه‌های پاسخگویی بار شده و اقدام به جابجایی بار خود از ساعات غیر مطلوب به ساعات مطلوب می‌کند [۱۱]. راهکارها و رویکردهای جدیدی نیز به‌منظور مدل‌سازی عدم قطعیت برای خرده‌فروش به‌منظور بیشینه‌سازی سود این نهاد ارائه‌شده است، به‌منظور مطالعه جامع این عدم قطعیت‌ها مدیریت خطرپذیری در سطوح مختلف و تعامل خرده‌فروش با بازار عمده‌فروشی نیز می‌تواند خرده‌فروش را در تعیین تصمیم دقیق و بهینه کمک نماید [۱۲]. ازجمله برنامه‌ریزی‌های بهینه در موضوع مورد نظر جهت تصمیم بهینه خرده‌فروش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مبتنی بر در نظرگیری عدم قطعیت‌ها و تصادفی بودن به‌منظور تعیین قیمت بهینه فروش انرژی و همچنین سیاست خرید برق از بالادست توسط خرده‌فروش است [۱۳]. همچنین در ساختارهای جدید سامانه قدرت خرده‌فروش ممکن است صاحب ریزشبکه نیز باشد، تعیین راهبرد قیمت‌گذاری و بهره‌برداری با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخگویی بار برای خرده‌فروش صاحب ریزشبکه بر مبنای رویکرد سامانه‌های انرژی تجمیع یافته (مجتمع) ازجمله روش‌های بهینه جهت تصمیم‌گیری خرده‌فروش در این زمینه است که سبب کاهش هزینه‌های خرده‌فروشی که صاحب ریزشبکه است خواهد شد [۱۴]. تعیین چارچوب کاری برای تصمیم‌گیری خرده‌فروش به‌منظور تعیین بهینه قیمت فروش برق و مدیریت پرتفولیو قراردادهای مختلف در راستای تأمین تقاضای موردنیاز نیز از منظر امنیت شبکه‌های انرژی‌رسانی در سامانه‌های سنتی قدرت و تجدید ساختاریافته بسیار حیاتی است [۱۵]. بر همین اساس مهم‌ترین بخش‌های پدافند غیرعامل در شبکه‌های انرژی، بررسی آسیب‌های محتمل بر روی این شبکه‌ها است که چالش‌های پیشرو در این موضوع همواره موردتوجه محققین قرارگرفته است [۱۶]. در این راستا جهت تأمین و تداوم انرژی‌رسانی به مراکز حساس استفاده از مفهوم پدافند غیرعامل در سال‌های اخیر اهمیت پیدا نموده است. با توجه به نظریه‌های مطرح‌شده در زمینه مفهوم پدافند غیرعامل دشمن همواره تلاش می‌کند تا مراکز ثقل کشور مورد تهاجم را شناسایی کرده و به‌منظور از بین بردن حیات یک کشور باید به این نقاط حمله کند. ازاین‌رو دشمن همواره در تلاش است تا با حمله مستقیم به مراکز نظامی یا نیروگاه‌ها و خطوط انتقال، انرژی موردنیاز مراکز را از دسترس خارج کند پس باید این نقاط راهبردی شناسایی‌شده و اثرات انهدام هر یک از این نقاط بررسی شود. معمولاً در مطالعات، مراکز نظامی و پادگان‌ها به‌صورت یک ریزشبکه در نظر گرفته می‌شود تا آخرین گام در زنجیره تأمین انرژی به بارها را داشته باشند. بنابراین، در نظر گرفتن ملاحظات پدافند غیرعامل در بهره‌برداری و طراحی این سامانه‌های انرژی امری ضروری محسوب می‌شود [۱۷]. مدل‌های نوینی نیز بر مبنای نظریه بازی ارائه شده است که این مدل ارائه‌شده مبتنی بر تصمیم‌گیری مصرف‌کنندگان و رقابت با یکدیگر است به‌گونه‌ای که رقابت بین مصرف‌کنندگان در مدیریت مصرف سبب بهره‌مندی بیشتر آن‌ها از منافع مالی اقتصادی مدیریت سمت تقاضا شده و خرده‌فروشان نیز در قبال این رفتار مشترکین با خطرپذیری قابل‌قبول و مطمئن‌تری وارد بازار شوند [۱۸]. همچنین در رویکردهای جدید مدل‌های اقتصادی بارهای پاسخگو به‌گونه‌ای تعریف می‌شوند که این مدل‌ها وابسته به کشش قیمتی و همچنین تابع منفعت و سود مصرف‌کننده است. در این مدل‌ها راهکار تعامل مصرف‌کننده‌ای که حاضر به شرکت در برنامه پاسخگویی بار شده با خرده‌فروش موردبررسی و مطالعه قرارگرفته و برای آن راهبردهای پیشنهادی ارائه شده است [۱۹]. برخی پژوهش‌های دیگر در راستای تأمین امنیت انرژی و مفاهیم مرتبط به آن در سامانه‌های قدرت مسائلی را مطرح نموده‌اند؛ در این پژوهش‌ها شاخص تاب‌آوری در راستای اهداف پدافند غیرعامل استفاده می‌شود تا از امنیت انرژی موردنیاز یک مرکز نظامی برآورد دقیقی را مورد مطالعه قرار دهد [۲۰]. ارائه شاخص‌هایی برای ارزیابی امنیت شبکه قدرت بعد از حملات تروریستی بر روی تجهیزات شبکه با استفاده از تئوری مجموعه فازی نیز برخی دیگر از مطالعات امنیت انرژی را شامل می‌شود [۲۱]. به‌طورکلی جهت مطالعات امنیت انرژی لازم است رویکردهای مختلف در بررسی آسیب‌پذیری شبکه‌های برق را ارائه و دسته‌بندی شود، این رویکردها برنامه‌ریزان شبکه کمک می‌کند تا در توسعه و بهره‌برداری شبکه، جنبه‌های مختلف تحلیل آسیب‌پذیری را در تصمیم‌گیری خود لحاظ کنند [۲۲]. برخی تحقیقات در این راستا با هدف طراحی بهینه و اجرای عملی یک سامانه انرژی تجدید پذیر ترکیبی در یک پایگاه نمونه با در نظر گرفتن عدم قطعیت شرایط آب و هوایی ارائه می‌شود، نتایج مطالعات این تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از سامانه‌های انرژی تجدید پذیر باعث کاهش

هزینه‌های تأمین انرژی پایگاه به‌صورت چشمگیری خواهد شد [۲۳]. در سال‌های اخیر مسئله تأمین امنیت انرژی از دیدگاه پدافندی- امنیتی نیز از منظر مسائل جایابی و مکان‌یابی مطرح شده است. بر همین اساس به جهت افزایش دقت و سرعت، به‌جای استفاده از الگوریتم‌های مرسوم و متداول تک هدفه همچون الگوریتم ژنتیک، الگوریتم اجتماع ذرات، الگوریتم کلونی مورچه و ... ، از یک برنامه چند هدفه جهت بهینه‌سازی، مکان‌یابی و تعیین ظرفیت منابع تولید پراکنده در سامانه قدرت استفاده شده است [۲۴]. همچنین برای ارزیابی امنیت شبکه‌های هوشمند روش‌هایی نیز مبتنی بر نظریه بازی‌ها ارائه شده است، در این روش، با استفاده از روش‌های مدیریت خطرپذیری و ترکیب آن با اقدامات حفاظتی، امنیت سامانه مورد ارزیابی قرار گرفته و درنهایت مناسب‌ترین راهبردها به‌منظور مقابله با حملات تروریستی برای کاهش خطرپذیری و افزایش امنیت تأمین انرژی پیشنهاد خواهد شد [۲۵]. یکی دیگر از روشهای جدید امنیت سامانه‌های قدرت انتخاب آسیب‌پذیرترین شین عملیاتی با استفاده از فن تخمین حالت است. براساس این روش قسمتی از شبکه که تخریب اطلاعات در آن بخش بیشترین آسیب را به شبکه وارد می‌کند مشخص می‌شود [۲۶]. از دیدگاهی دیگر برنامه‌های پاسخگویی بار در سال‌های اخیر علاوه بر کارکرد در زمینه مدیریت مصرف انرژی به عنوان روشی در جهت افزایش امنیت و تداوم برق‌رسانی سامانه‌های قدرت مورد استفاده قرار گرفته است، بر این اساس برنامه‌های پاسخگویی بار اضطراری مبتنی بر مدل احتمالی برای تخمین برون‌رفت واحدها متأثر از عوامل مختلف در شرایط جنگی، طی سناریوهای متعدد، مدل موردنظر، در قالب یک مسئله بهینه‌سازی قابل طرح و پیاده‌سازی است [۲۷].

مطالعه حاضر با ارائه مدلی جامع مبتنی بر پاسخگویی بار در سامانه‌های قدرت تجدید ساختاریافته مسئله تامین و امنیت انرژی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. از آنجایی که توسعه بازارهای برق در سامانه‌های قدرت کنونی امری اجتناب ناپذیر است، لازم است مطالعات گسترده‌ای در زمینه امنیت انرژی در این فضا صورت گیرد. در این مقاله با رویکرد پدافند نوین و در سامانه‌های قدرت نوین مسئله ارزش امنیت تأمین برق مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مسئله موردمطالعه شاخص‌های خطرپذیری، قراردادها در بازار برق، قیمت‌های برق و ... مورد نظر است. در این راستا شاخص‌هایی برای مسئله امنیت تأمین انرژی معرفی شده است. در بررسی مسئله موردنظر پاسخگویی بار در سامانه قدرت و مدل‌سازی اقتصادی مربوط به محیط اقتصادی سامانه قدرت وابسته به مسئله تأمین و امنیت انرژی در نظر گرفته‌شده است. برمبنای شاخص‌های معرفی شده و مدل‌سازی‌های مربوطه جهت امنیت تأمین انرژی بر مبنای پاسخگویی بار، پدافندی نوین جهت افزایش امنیت تأمین انرژی ارائه خواهد شد. همچنین در این مقاله تجدید ساختار در سامانه‌های قدرت ضمن در نظر گرفتن تعرفه‌های مختلف پاسخگویی بار نیز در نمونه مطالعاتی لحاظ شده است. شاخص‌های تاثیرگذار بر خطرپذیری نیز جهت کارآیی مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

از نگاهی دیگر مدل جدید پیشنهادی به منظور افزایش امنیت تامین انرژی در بازار خرده‌فروشی براساس روشهای قیمت- محور پاسخگویی بار ارائه شده است. در مدل ارائه شده به منظور واقعی‌تر کردن مسئله و بهبود حداکثری امنیت تامین انرژی مدل‌سازی‌هایی از جمله مدل‌سازی کشش قیمتی مشترکین و مدل‌سازی منافع خرده‌فروش بازار برق انجام شده است. تمامی مدل‌سازی‌های صورت گرفته براساس حضور و مشارکت مشترکین در برنامه‌های پاسخگویی بار انجام شده است. همچنین در این مطالعه شاخص جدید تحت عنوان " ارزش امنیت تأمین انرژی" با رویکردی پدافندی در سامانه‌های قدرت نوین معرفی شده است. این شاخص جدید براساس دو حالت قبل و بعد از پاسخگویی بار جهت تحلیل مسئله امنیت تامین انرژی تحلیل و مورد ارزیابی قرار گرفته اند.

نتایج شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط [1] که توسط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS و با حل‌کننده CONOPT اجرا شده حاکی از تأثیر بسزای پاسخگویی بار در افزایش میزان ارزش امنیت تأمین انرژی در محیط اقتصادی سامانه قدرت است به‌گونه‌ای که با اجرای طرح پیشنهادی ضمن دستیابی توأمان خرده‌فروش و مصرف‌کننده به اهداف خود ، امنیت تأمین انرژی در وضعیت مطلوبی قرار گرفته و اپراتور مستقل سیستم دستور به اجرای بازار می‌دهد.

۲- تأمین امنیت انرژی در محیط اقتصادی سامانه قدرت

صنعت برق سال‌ها به‌صورت یک ساختار انحصاری تنظیم شد و به‌صورت نظارتی مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفت. در ساختار انحصاری وظیفه تولید، انتقال و توزیع برق در هر منطقه بر عهده شرکت‌های ادغام‌شده عمودی یا به اختصار VIU [2] است. بهره‌وری پایین نیروی کار، کیفیت پایین خدمات و ....ازجمله مشکلاتی است که کشورهای درحال‌توسعه در این صنعت کم و بیش تجربه نموده‌اند. در بازار برق، خرده‌فروش، برق را از بازار عمده‌فروشی خریداری کرده و آن را به مشترکین نهایی می‌فروشد. در سمت عرضه، خرده‌فروش میزان تقاضا را از طریق حوضچه‌های برق تامین می‌کند. قیمت‌های حوضچه برق همواره متغیر و در حال تغییر می‌باشند، از این‌رو خرده‌فروش با عدم قطعیت روبروست. معیار ارزیابی خطرپذیری نیز در مباحث خرده‌فروشی مهم و ضروری به

[1] Mixed Integer Programming
[2] Vertically Integrated Utility

شمار آید. وجود بازار خرده‌فروشی در انرژی الکتریکی و همچنین گزینه‌های مختلف برای مصرف‌کنندگان نهایی ضمن حضور آن‌ها در بازار برق همگی در جهت رسیدن به اهداف مورد انتظار در برنامه تجدید ساختار در صنعت برق از ضروریات اساسی است. شکل (۳) در این مقاله به‌عنوان بیانگر سازوکار امنیت تأمین انرژی توسط نهاد خرده‌فروشی بازار برق ارائه می‌گردد ؛ بر اساس این شکل، خرده‌فروش ضمن تبادل توان، انرژی و اطلاعات موردنیاز با منابع مقیاس کوچک تولید انرژی و نهادهای جدید اقتصادمحور سامانه قدرت و بر اساس تعرفه‌های برق پاسخگویی بار(پاسخ بار) که در این مقاله از نوع قیمت محور هستند، میزان مصرف مشترکین را کنترل نموده و به عبارتی مسئله امنیت تأمین انرژی در وهله اول تا حد قابل قبولی مدیریت می‌گردد. پاسخگویی بار همواره به‌عنوان یک راهکار و سازوکار مؤثر به‌منظور تعامل بین مشترکین یک خرده‌فروش و سایر شرکت‌کنندگان در بازار معرفی‌شده است. پاسخگویی بار می‌تواند به‌عنوان یک پاسخ مناسب از طرف مصرف‌کننده در قبال تغییرات قیمت در بازار عمده‌فروشی و یا به خطر افتادن میزان قابلیت اطمینان سیستم، معرفی گردد، در ضمن پاسخگویی بار می‌تواند در قالب یک عامل مشوق نیز مصرف‌کننده را وارد برنامه‌های مدیریت مصرف نماید. برنامه‌های پاسخگویی بار همچنین توسط اپراتورهای مستقل سیستم به‌عنوان یک منبع مناسب برای سرویس‌های مهم ازجمله ظرفیت، انرژی و سرویس‌های جانبی مورداستفاده قرار می‌گیرد. برنامه‌های پاسخگویی بار قابل‌گسترش از مشترکین تجاری بزرگ، صنعتی بزرگ به مشترکین خرد و کوچک دارد و سبب ارتباط و تعامل میان گروه‌های مختلف مشترکین و سایر شرکت‌کنندگان بازار خواهد شد. شکل (۴) نیز روندنمایی از کار ارائه‌شده توسط مقاله را برای تحلیل مسئله امنیت تأمین انرژی در محیط اقتصادی سامانه قدرت و در دو حالت حضور و عدم حضور پاسخگویی بار نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، ابتدا بر مبنای شاخص معرفی‌شده در مقاله برای ارزش امنیت تأمین انرژی قبل از پاسخگویی بار وضعیت امنیت تأمین انرژی موردبررسی قرار می‌گیرد و بهره‌بردار مستقل سامانه درباره بازار تصمیم خواهد گرفت، در ادامه پس از شاخص ارائه‌شده مربوط به بعد از اجرای پاسخگویی بار، وضعیت امنیت تأمین انرژی موردبررسی قرار خواهد گرفت و در انتها بازار زمانی توسط بهره‌بردار مستقل سامانه اجرا خواهد شد که این شاخص در مطلوب‌ترین حالت خود قرار داشته باشد.

۲-۱- معرفی، مدل‌سازی، فرمولاسیون مسئله و ارزش‌گذاری امنیت تأمین انرژی بر اساس پاسخگویی بار

در ابتدا فرمول‌بندی سود خرده‌فروش طبق روابط (۱ و ۲) صورت می‌گیرد، بدین‌صورت که سود خرده‌فروش عبارت خواهد بود از تفاضل میزان درآمد ناشی از فروش انرژی به مشترک و هزینه‌های ناشی از خرید انرژی در طی قراردادهای دوجانبه و POOL:

$$F_0=\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_J}\lambda_{jt}^{c}P_{jt}^{c}L_t^{C}-\sum_{b=1}^{N_B}\lambda_b^{B}P_b^{B}L_b^{B}-\sum_{\omega=1}^{N_\omega}\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{r\in\theta_{tr}}\pi_\omega\lambda_{r\omega}^{P}L_r^{P}(\sum_{j=1}^{N_J}P_{jt}^{C}-\sum_{b\in\Omega_{rb}}P_b^{B}) \quad (۱)$$

$$F_L=\sum_{\omega=1}^{N_\omega}\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_J}\pi_\omega(\lambda_{jt}^{C}+\Delta\lambda_{jt}^{C})\times(P_{jt}^{C}+\Delta P_{jt\omega}^{C})L_t^{C}-\sum_{b=1}^{N_B}\lambda_b^{B}P_b^{B}L_b^{B}+\sum_{\omega=1}^{N_W}\sum_{r=1}^{N_R}\pi_\omega\lambda_{r\omega}^{P}L_r^{P}\sum_{b\in\Omega_{rb}}P_b^{B}-\sum_{\omega=1}^{N_\omega}\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{r\in\theta_{tr}}\pi_\omega\lambda_{r\omega}^{P}L_r^{P}\sum_{j=1}^{N_J}(P_{jt}^{C}+\Delta P_{jt\omega}^{C}) \quad (۲)$$

هدف خرده‌فروش بیشینه نمودن تغییرات سود (ΔF) که ناشی از اصلاح قیمت فروش بوده است، می‌باشد ($\Delta F=F_L-F_0$)، تابع هدفی که مدنظر خرده‌فروش است بر طبق رابطه (۳) بیان می‌گردد:

$$\Delta F=\sum_{\omega=1}^{N_\omega}\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_J}\pi_\omega(1-E_{jt\omega})\,\Delta\lambda_{jt}^{c}P_{jt}^{c}L_t^{C}-\sum_{\omega=1}^{N_\omega}\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_J}\pi_\omega\frac{E_{jt\omega}P_{jt}^{C}L_t^{C}}{\lambda_{jt}^{c}}(\Delta\lambda_{jt}^{c})^2+\sum_{\omega=1}^{N_\omega}\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{r\in\Theta_{tr}}\sum_{j=1}^{N_J}\pi_\omega\frac{E_{jt\omega}P_{jt}^{C}}{\lambda_{jt}^{c}}L_r^{P}\lambda_{r\omega}^{P}\Delta\lambda_{jt}^{c} \quad (۳)$$

در رابطه فوق $E_{jt\omega}$ کشش- الاستیسیته‌ای که ناشی از تغییرات قیمت فروش است طبق رابطه (۴) برای مشترک تعریف گردد:

$$E_{jt\omega}=\frac{-\Delta P_{jt\omega}^{C}/P_{jt}^{C}}{\Delta\lambda_{jt}^{C}/\lambda_{jt}^{C}} \quad (۴)$$

در ادامه فرمولاسیون مربوط به تأمین انرژی و همچنین ارزش امنیت تأمین انرژی بر اساس برازش منحنی‌ها و شاخص‌های امنیت انرژی به‌صورت زیر پیشنهاد و ارائه می‌گردد، رابطه (۵) مربوط به شرایطی است که خرده‌فروش بدون اعمال برنامه‌های پاسخگویی بار به مصرف‌کننده اقدام به برنامه‌ریزی می‌کند، بنابراین ارزش امنیت تأمین انرژی[1] قبل از اجرای برنامه پاسخگویی بار بر اساس رابطه (۵) پیشنهاد می‌گردد:

$$\mathrm{SOES}=\sum_{\omega=1}^{N_\omega}\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_J}\pi_\omega(1-\alpha)\frac{D}{C_\alpha} \quad (۵)$$

بدون اجرای برنامه پاسخگویی بار به دلیل کاهش یافتن تأمین امینت انرژی، بهره‌بردار مستقل سامانه اجازه اجرای بازار را به‌دلیل عدم رعایت قیود امنیتی نخواهد داد. حال خرده‌فروش با اجرای برنامه پاسخگویی بار به عبارتی به دنبال روشی است که هم به نفع خود باشد، هم بتواند مصرف‌کننده را متقاعد به برنامه‌ریزی مدنظر

[1] Security of Energy Supply

خود نماید و هم امنیت تأمین انرژی از نگاه بهره‌بردار مستقل سامانه را به‌خوبی اجرا نماید در این مقاله در سه حالت قیمت‌گذاری با تعرفه ثابت، قیمت‌گذاری زمان استفاده و قیمت‌گذاری زمان- واقعی نتایج حاصل از سود خرده‌فروش در کنار ارزش امنیت تأمین انرژی در محیط اقتصادی سامانه قدرت و در حضور خرده‌فروش موردبررسی قرارگرفته است. در این سه حالت که به عبارتی هرکدام به‌نوعی بیانگر نفوذ برنامه‌های پاسخ بار می‌باشند، توأماً میزان ارزش امنیت تأمین انرژی در کنار سود خرده‌فروش افزایش قابل‌توجهی نسبت به حالتی که برنامه پاسخ بار اجرانشده بود و خرده‌فروش صرفاً به دنبال حداکثر سازی سود خود بود، دیده می‌شود. با اجرای این برنامه‌ها و افزایش ارزش امنیت تأمین انرژی، بهره‌بردار مستقل سامانه نیز از نگاه امنیت اجرای بازار را بلامانع خواهد دانست و در این حالت برنامه‌ریزی خرده‌فروش در جهت حداکثر سازی سود خود را مغایر با امنیت تأمین انرژی نمی‌بینند. ازاین‌رو ارزش امنیت تأمین انرژی بعد از اجرای برنامه پاسخگویی بار با استفاده از رابطه (۶) پیشنهاد می‌گردد:

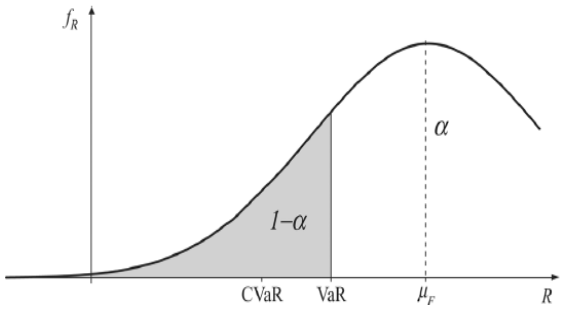
$$SOES = \sum_{\omega=1}^{N_\omega}\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_J}\pi_\omega\,(2\gamma_{PEAK}+\gamma_{OFFPEAK})\Delta F \qquad (۶)$$

به عبارتی در معادله پیشنهادشده (۶)، میزان مشارکت در ساعات اوج دو برابر ساعات غیر اوج فرض شده که همین موضوع سبب افزایش ارزش امنیت تأمین انرژی نیز خواهد شد. همچنین با استفاده از شاخص امید ریاضی سود و معرفی این شاخص (β) هدف مسئله به سمت بهینه‌سازی سود خرده‌فروش در کنار این شاخص بوده و تابع بهینه‌سازی که در رابطه (۷) نیز نشان داده‌شده است، این رابطه از دو قسمت تشکیل‌شده است، سود مورد انتظار برای خرده‌فروش و حاصل‌ضرب CVaR و β ، این رابطه به‌عنوان دیگر تابع هدف معرفی‌شده در مسئله، به نرم‌افزار شناسانده شده و بیشینه خواهد گشت:

$$\text{ObjVal: } \beta\,(\textstyle\sum_{\omega=1}^{N_\omega}\pi_\omega R_\omega) + (1\text{-}\beta)\ \text{CVaR} \qquad (۷)$$

۲-۲- مدل‌سازی خطرپذیری خرده‌فروش در مسئله امنیت تأمین انرژی

برای مدل‌سازی خطرپذیری خرده‌فروش از معیار " ارزش در معیار خطرپذیری" استفاده‌شده است، ارزش در معیار خطرپذیری از خانواده معیارهای اندازه‌گیری خطرپذیری نامطلوب است. این شاخص حداکثر خسارت انتظاری یک پرتفولیو(یا بدترین زیان ممکن) را برای یک افق زمانی مشخص با توجه به یک فاصله اطمینان معین بیان می‌کند. حداکثر خسارت ممکن یک پرتفولیو (VaR) با توجه به تابع چگالی خسارت که با f نمایش داده می‌شود، اندازه‌گیری می‌گردد. ارزش در معرض خطرپذیری در حقیقت چندک تابع f در سطوح بحرانی (۰/۰۵ و ۰/۰۱= α) است. این مفهوم در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱. نمایش گرافیکی VaR و CVaR.

همچنین " ارزش درخطر معرض شرطی" نیز به این صورت تعریف می‌گردد: CVaR در سطح اطمینان α می‌تواند به‌صورت سود مورد انتظار آن دسته از سناریوها تعریف شود که در پایین‌دست انتهایی منحنی توزیع سود قرار دارند. برای مثال تمامی سناریوهایی که میزان سود آن‌ها کوچک‌تر یا مساوی α- ۱ توزیع سود شکل (۱) است.

به‌طور معمول میزان CVaR از حل مسئله بهینه‌سازی روابط (۱۰- ۸) به‌دست می‌آید [۲۸]:

$$CVaR = Maximize_{\xi,new} \quad \xi - \frac{1}{1-\alpha}\sum_{\omega=1}^{N_\omega}\pi_\omega u_\omega \qquad (۸)$$

$$u_\omega \geq \xi - R_\omega \qquad \forall\omega \qquad (۹)$$

$$\forall\omega \quad u_\omega \geq 0, \qquad (۱۰)$$

۱) تابع هدف مرتبط با خطرپذیری رابطه(۱۱) که بایستی بیشینه گردد، دربرگیرنده CVaR سود در سطح اطمینان α است.

۲) قید (۱۲) بیانگر این موضوع است که انرژی مصرفی توسط مشترک در یک ماه را نمی‌توان تغییر و اصلاح نمود و فقط جابجایی مصرف (بار) بین دوره‌های زمانی مختلف قابل‌قبول است. به‌عبارتی‌دیگر این قید درباره امنیت تأمین انرژی مشترک بحث خواهد کرد و به‌گونه‌ای تضمینی در جهت تأمین انرژی مشترک است.

۳) قید (۱۳) بیانگر این است که میزان پرداختی هیچ مشترکی قابل‌افزایش نیست، قسمت اول رابطه بیانگر میزان پرداختی مشترک پس از اصلاح قیمت بوده درحالی‌که قسمت دوم رابطه بیانگر میزان پرداخت اولیه مشترک است.

۴) قید(۱۴) بیانگر این است که قیمت فروش انرژی پس از اصلاح نباید منفی باشد.

۵) رابطه (۱۵) نیز عنوان سود خرده‌فروش تعریف می‌گردد.

$$\underset{\Delta\lambda_{jt}^{C}\ \forall j,t,\xi,u_{\omega}\ \ \forall\omega}{Maximize} \quad \xi-\frac{1}{1-\alpha}\sum_{\omega=1}^{N_{\omega}}\pi_{\omega}u_{\omega} \qquad (۱۱)$$

رابطه (۱۱) با توجه به مجموعه قیود زیر معنی پیدا خواهد کرد:

$$-\sum_{\epsilon\Lambda_{tm}}\frac{E_{jt\omega}P_{jt}^{c}L_{t}^{C}}{\lambda_{jt}^{c}}\Delta\lambda_{jt}^{c}=0; \qquad \forall j,\forall m,\forall\omega \qquad (۱۲)$$

$$-\sum_{t=1}^{N_T}\lambda_{jt}^{c}P_{jt}^{c}L_{t}^{C}\le 0; \qquad \forall j,\forall\omega \qquad (۱۳)$$

$$\lambda_{jt}^{C}+\Delta\lambda_{jt}^{C}\ge 0; \qquad \forall j,\forall t \qquad (۱۴)$$

$$\begin{aligned}R_{\omega}&=\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_J}(1-E_{jt\omega})\Delta\lambda_{jt}^{c}P_{jt}^{c}L_{t}^{C}\\&-\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{j=1}^{N_J}\frac{E_{jt\omega}P_{jt}^{c}L_{t}^{C}}{\lambda_{jt}^{c}}(\Delta\lambda_{jt}^{c})^{2}\\&+\sum_{t=1}^{N_T}\sum_{r\epsilon\Theta_{tr}}\sum_{j=1}^{N_J}\frac{E_{jt\omega}P_{jt}^{c}}{\lambda_{jt}^{c}}L_{r}^{P}\lambda_{r\omega}^{P}\Delta\lambda_{jt}^{c};\ \forall\omega\end{aligned} \qquad (۱۵)$$

۲-۳- اطلاعات ورودی در مسئله موردمطالعه

در این قسمت اطلاعات و داده‌های مربوط به تحقیق موردمطالعه ارائه‌شده است

۱. مدت‌زمان عملکرد خرده‌فروش در بازار برق در طی قرارداد دوجانبه یک ماه در نظر گرفته‌شده است.

۲. قیمت‌های ساعتی بازار و قرارداد POOL در ۶ بلوک زمانی در نظر گرفته‌شده است.

۳. خرده‌فروش، برق را به ۱۰۰ مشترک که شامل سه گروه مختلف است می‌فروشد، این سه گروه به لحاظ ۱) قیمت فروش، ۲) الگوی مصرف، ۳) نحوه پاسخ به قیمت پیشنهادی خرده‌فروش(کشش مشترک)؛ با یکدیگر دارای تشابهاتی هستند.

۴. سه نوع از مشترکین شامل ۸۴ مشترک خانگی، ۱۲ مشترک تجاری و ۴ مشترک صنعتی می‌باشند.

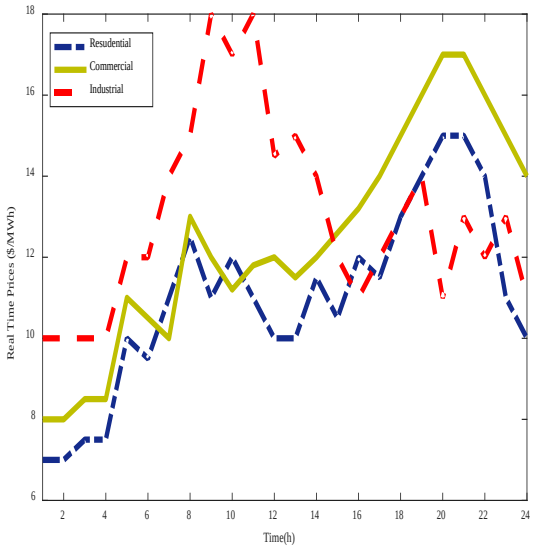
میزان مصرف انرژی مشترکین در ساعات اوج و غیر اوج به ترتیب برای مشترکین خانگی ۳/۶ kW و ۲/۹ kW ، ۶۰ kW و ۴۹ kW برای مشترکین تجاری و ۳۳۰۰ kW و ۲۰۰۰ kW برای مشترکین صنعتی در نظر گرفته‌شده است، در جدول (۱) میزان مصرف انرژی برای مشترکین و در جدول (۲) قیمت فروش انرژی برای گروه‌های مختلف مشترکین نمایش داده‌شده است، شکل(۲) نیز قیمت‌های زمان لحظه‌ای برای مشترکین مورد مطالعه از طرف خرده‌فروش را نشان می‌دهد.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به میزان مصرف مشترکین

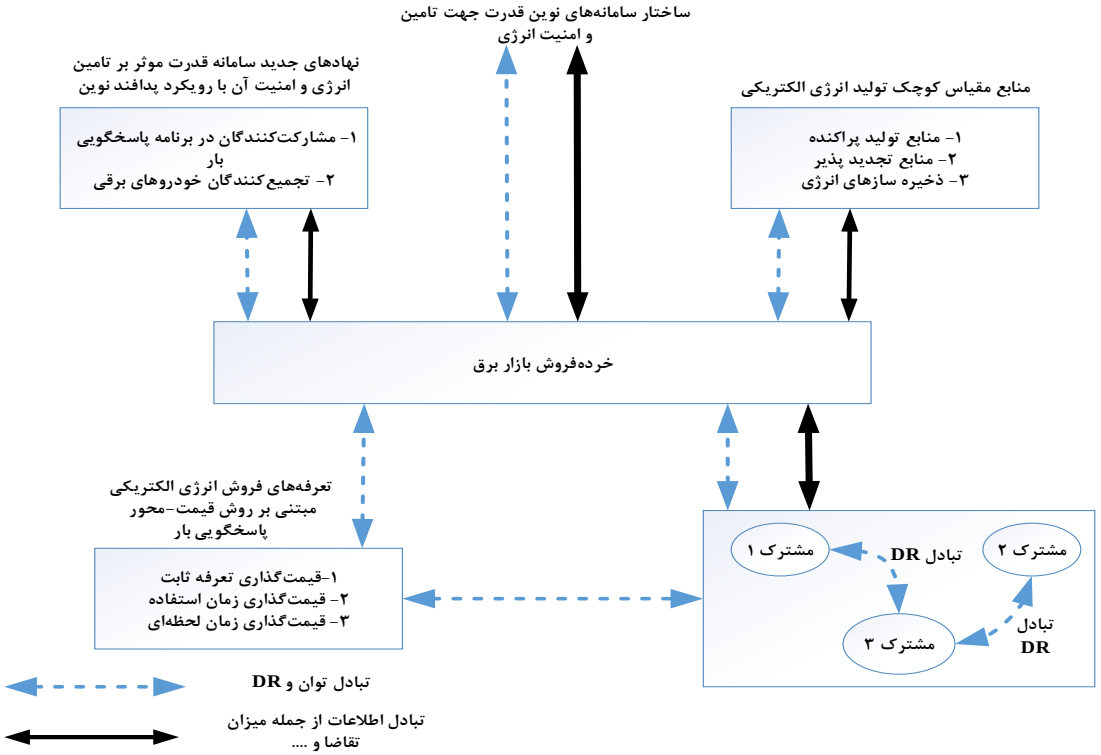
نوع مشترک	مصرف در ساعت اوج (کیلووات)	مصرف در ساعت غیر اوج (کیلووات)
خانگی	۳۰۲/۴ kW	۲۴۳/۶ kW
تجاری	۷۲۰ kW	۵۸۸ kW
صنعتی	۱۳۲۰۰ kW	۸۰۰۰ kW
مجموع	۱۴۲۲۲ kW	۸۸۳۱/۶ kW

جدول ۲. قیمت فروش انرژی برای گروه‌های مختلف مشترکین

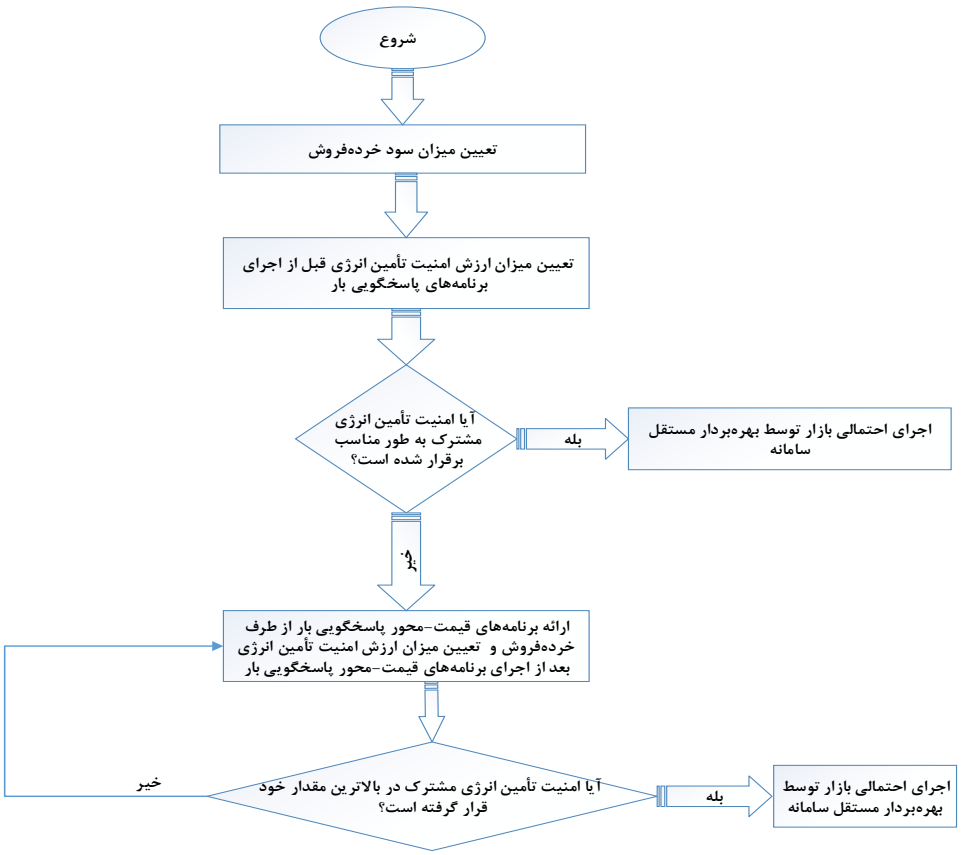
نوع مشترک	قیمت فروش در ساعات اوج (دلار/ مگاوات ساعت)	قیمت فروش در ساعات غیر اوج (دلار/ مگاوات ساعت)
خانگی	۹۴	۸۸
تجاری	۸۸	۸۲
صنعتی	۸۰	۷۳



شکل ۲. قیمت‌های زمان لحظه‌ای برای مشترکین مورد مطالعه



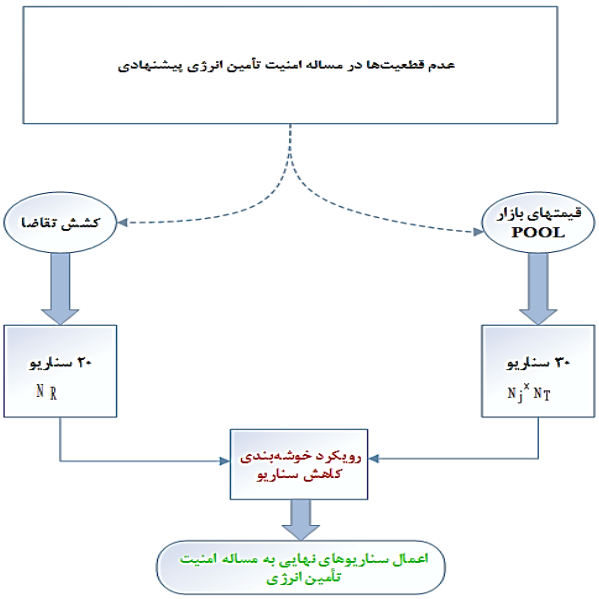
شکل ۳. امنیت تأمین برق در حضور خرده‌فروش بازار برق



شکل ۴. روند تحلیل مسئله امنیت تأمین انرژی مقاله در محیط بازار برق و پاسخگویی بار

۲-۴- عدم قطعیت و مدل‌سازی آن در مسئله پیش‌رو

در مسئله پیش‌رو، مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها بر مبنای روش فازی- تصادفی و مبتنی بر سناریو صورت گرفته است. عدم قطعیت‌ها شامل دو مورد است، قیمت‌های بازار POOL و میزان کشش مشترکین. تعداد ۲۰ سناریو برای مدل‌سازی عدم قطعیت کشش مشترکین و تعداد ۳۰ سناریو برای مدل‌سازی عدم قطعیت در قیمت‌های بازار POOL در نظر گرفته شده است. سناریوهای کشش مشترکین براساس توزیع نرمال با یک مقدار متوسط و یک مقدار انحراف از معیار تولید می‌شوند. در شکل (۵) به‌طور مفهومی عدم قطعیت‌های مورد نظر در مسئله این مقاله ذکر شده است. براساس این شکل، به میزان N_R سناریو برای کشش تقاضا و $N_R \times N_T$ سناریو برای قیمت‌های بازار POOL تولید شده است [۳۲- ۲۹]. در انتها با رویکرد جدید خوشه‌بندی، عملیات کاهش سناریو اعمال می‌شود [۳۳].



شکل ۵. مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در مسئله امنیت تأمین انرژی

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار GAMS توسط حل‌کننده CONOPT و با RAM 8 انجام شده است [۳۴]. زمان شبیه‌سازی در نرم‌افزار نیز ۳۶۰۰ s به‌منظور دستیابی به بهینه‌ترین پاسخ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که اشاره شد قیمت فروش انرژی در هر ساعت از شبانه‌روز بر مبنای قیمت‌گذاری زمان استفاده در جدول (۲) نشان داده‌شده است. قیمت تعرفه ثابت نیز میانگینی از قیمت در ساعات اوج و غیر اوج برای هرکدام از مشترکین در نظر گرفته‌شده است. شیوه قیمت‌گذاری زمان لحظه‌ای نیز بر مبنای اطلاعات بازار NORDPOOL فرض شده است. ۶ بلوک زمانی اشاره شده نیز به‌صورت "شنبه تا چهارشنبه اوج"، " شنبه تا چهارشنبه غیر اوج"، "پنج‌شنبه اوج"، "پنج‌شنبه غیر اوج"، جمعه اوج" و "جمعه غیر اوج" در نظر گرفته‌شده است. ساعات اوج نیز ۹ صبح تا ۹ شب و ساعات غیر اوج از ۹ شب تا ۹ صبح فرض شده است.

در نمودار شکل (۶) نیز ارتباط میان ضرایب مختلف α (خطرپذیری خرده‌فروش) و امنیت مصرف‌کننده در تأمین انرژی نشان داده‌شده است؛ در واقع در این نمودار با افزایش α از ۰/۸ امنیت مصرف‌کننده در قبال تأمین انرژی کاهش می‌یابد زیرا که خرده‌فروش در α =۰/۹۵ به دنبال افزایش میزان سود خود از طریق افزایش تقاضا مشترک در ساعات اوج مصرف که گران‌تر است می‌باشد، با این رویه میزان اوج مصرف به‌شدت افزایش خواهد یافت و بنابراین احتمال عدم تأمین انرژی مشترکین نیز بالا خواهد رفت، ازاین‌رو نهاد مستقل بازار، برنامه اجرای بازار را در جهت افزایش ارزش امنیت تأمین انرژی مشترک مورد بازنگری قرار می‌دهد. این نمودار نیز به عبارتی وضعیت تأمین انرژی مشترک را قبل از اجرای پاسخگویی بار نشان می‌دهد، طبق رابطه (۵) و با در نظر گرفتن C_α = ۱ برای α =۰/۸ و D = ۲۴۴۰ به‌عنوان نمونه‌ای از تقاضا از طرف مشترک مقدار SOES یا همان شاخص ارزش امنیت تأمین انرژی به میزان ۴۸۸ خواهد بود، در این نمودار برای سایر مقادیر α نیز وضعیت امنیت مورد انتظار جهت تأمین انرژی نیز نشان داده‌شده است. به عبارتی در این نمودار نیز خرده‌فروش بدون در نظر گرفتن امنیت تأمین مشترکین، اقدام به برنامه‌ریزی در جهت حداکثرسازی سود خود نموده است. در این نمودار با افزایش α یا به عبارتی افزایش خطرپذیری خرده‌فروش در جهت حداکثر سازی سود خود در بازار برق، ارزش تأمین انرژی از دید اپراتور مستقل سیستم به‌منظور اجرای بازار، کاهش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر در α =۰/۸ که خرده فروش نسبت به α =۰/۹۵ خطرپذیری کمتری متقبل می‌شود و احتمال حداکثر شدن سود کمتری را نیز دارد، مسئله ارزش تأمین انرژی مشترکین از دید بهره‌بردار مستقل سامانه به‌طور مناسب‌تری مدیریت و حل‌شده است. C_α درواقع تناسبی معکوس با خطرپذیری α از دید خرده‌فروش دارد و با کاهش یافتن α افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر با افزایش α، خرده‌فروش انتظار سود بیشتری خواهد داشت اما این افزایش سبب کاهش ضریب C_α که همان ارزش امنیت تأمین انرژی مشترک خواهد شد، می‌گردد.

نمودار شکل (۷) به‌عبارتی ارتباط میان ارزش تأمین انرژی از نگاه بهره‌بردار مستقل سامانه و ارزش امنیت تأمین انرژی در مقادیر مختلف خطرپذیری α است. واضح است در حضور بهره‌بردار مستقل سامانه به‌منظور اجرای بازار، مسئله امنیت و خطرپذیری تأمین انرژی به‌گونه‌ای مدیریت می‌شود که مشترک با کمترین

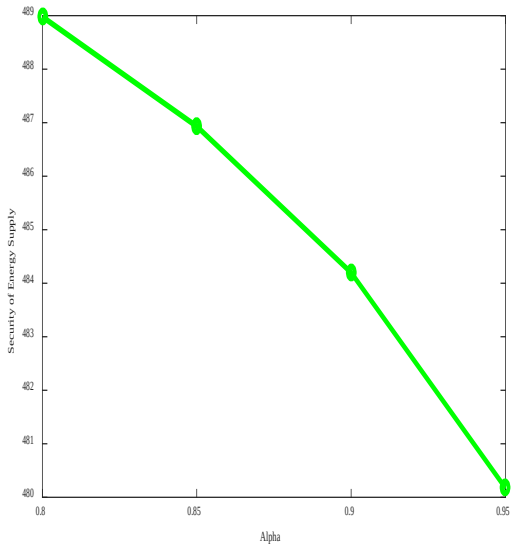
عدم تأمین روبرو شود. به‌عبارت‌دیگر زمانی خطرپذیری مورد انتظار جهت امنیت انرژی از دید مشترکین به‌خوبی مدیریت می‌شود که بهره‌بردار مستقل سامانه بتواند با ورود به مسئله برنامه‌ریزی خرده‌فروش ضمن تأمین منافع خرده‌فروش مسئله امنیت انرژی را حل کند. براساس این نمودار با افزایش α از ۰/۸ تا ۰/۹۵ میزان ارزش تأمین انرژی از نگاه اپراتور مستقل سیستم کاهش می‌یابد، بنابراین با مدیریت مناسب خطرپذیری و تعیین مقدار مناسب سطح اطمینان α می‌توان مسئله تأمین انرژی و ارزش امنیت انرژی را جهت اجرای بازار به‌خوبی مدیریت نمود.

نمودار شکل (۸) نیز بیانگر تغییرات فاکتور وزنی امید ریاضی سود برحسب CVaR است، بر این اساس، با افزایش β، میزان CVaR کاهش خواهد یافت، و طبق رابطه (۷-۱۰) ، با کاهش سطح اطمینان α، تغییرات قیمتی از سوی خرده‌فروش افزایش بیشتر خواهد شد و درنتیجه جابجایی بار از سوی مشترک نیز افزایش می‌یابد. به عبارتی با افزایش β خطرپذیری تأمین انرژی برای مشترک مدیریت شده است و عدم تأمین انرژی با برنامه مناسب پاسخ بار با افزایش شاخص β کمتر شده است. به‌بیان‌دیگر در این حالت با یک برنامه ساده پاسخ بار از نوع جابجایی بار مسئله تأمین انرژی در کنار سود مناسب برای خرده‌فروش به‌طور هم‌زمان حاصل شده است.

بر اساس نمودار شکل (۹) نیز با افزایش میزان β ، میزان CVaR مرتبط با سود خرده‌فروش کاهش یافته و میزان سود مورد انتظار خرده‌فروش که بر اساس رابطه (۱۵) بیان گردیده است افزایش خواهد یافت. بر طبق این نمودار نیز با کاهش میزان CVaR، طبق رابطه (۷ -۱۰) میزان α نیز کاهش خواهد یافت، با کاهش میزان α تغییرات قیمت اعمالی از سوی خرده‌فروش افزایش خواهد یافت که این افزایش تغییرات قیمتی سبب پاسخ مناسب از سمت مصرف‌کننده و جابجایی بار خواهد شد. به عبارتی با یک برنامه جابجایی بار از سمت مصرف‌کننده به‌طور هم‌زمان منافع خرده‌فروش و مصرف‌کننده تأمین خواهد شد و اپراتور مستقل سیستم نیز وضعیت ارزش امنیت تأمین انرژی را در این حالت جهت اجرای بازار مناسب می‌داند چراکه به‌عنوان نهادی مستقل به دنبال تأمین منافع بازیگران باهدف تأمین انرژی است.

جداول (۵- ۳) نیز به‌نوعی دیگر بیانگر نتایج حاصل از اجرای پاسخگویی بار و عدم اجرای پاسخگویی بار بر میزان سود خرده‌فروش و ارزش امنیت تأمین انرژی است. جدول (۳) که قیمت‌گذاری تعرفه ثابت را نشان می‌دهد به معنای عدم اجرای پاسخگویی بار بوده و جدول (۴ و ۵) که به‌ترتیب برای قیمت‌گذاری زمان استفاده و زمان لحظه‌ای است به معنای اجرای پاسخگویی بار است. به عبارتی بر اساس جدول (۴ و ۵) می‌توان در محیط اقتصادی سامانه قدرت که محیط مقررات‌زدایی و تجدید ساختاریافته شده است مسئله امنیت تأمین انرژی را حل و مدیریت نمود. بر این اساس در هر دو نوع قیمت‌گذاری زمان استفاده و زمان لحظه‌ای هر چه مشارکت و پاسخگویی مصرف‌کننده در ساعات اوج بیشتر شود، سود خرده‌فروش و ارزش امنیت تأمین انرژی نیز بیشتر خواهد شود. در این صورت بهره‌بردار مستقل سامانه بازار را به لحاظ قیود امنیتی مناسب دانسته و بازار را اجرا خواهد نمود.

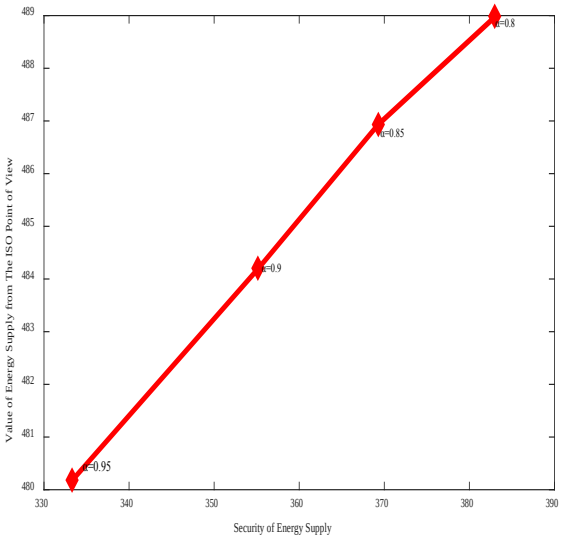
در جداول (۴ و ۵) مشارکت در ساعات اوج پاسخگویی بار همان γ_{PEAK} و مشارکت در ساعات غیر اوج پاسخگویی بار همان $\gamma_{OFFPEAK}$ در رابطه پیشنهادی (۶) است. به ازای $\gamma_{PEAK}=1$ و $\gamma_{OFFPEAK}=0$ در کنار افزایش میزان سود خرده‌فروش، ارزش امنیت تأمین انرژی نیز از نگاه پدافندی به مسئله امنیت انرژی افزایش‌یافته است. به‌طور خاص جدول(۳) بیانگر میزان سود خرده‌فروش و ارزش امنیت تأمین انرژی در حالت تعرفه قیمت‌گذاری ثابت است در تعرفه قیمت‌گذاری ثابت قیمت انرژی در تمام ساعات شبانه‌روز یکسان بوده و تفاوت قیمتی میان ساعات اوج و غیر اوج وجود ندارد، ازاین‌رو پاسخگویی بار و مشارکت مصرف‌کننده در پاسخگویی بار نیز مفهومی نخواهد داشت. این جدول به ازای ده سناریوی منتخب که بالاترین میزان سود خرده‌فروش و بالاترین مقدار ارزش امنیت تأمین انرژی در آن‌ها ایجادشده است تنظیم گردیده است. در این حالت که پاسخگویی بار وجود ندارد و مشترک تمایزی بین ساعات اوج مصرف و غیر اوج مصرف قائل نمی‌شود طبیعی است که میزان قابل توجهی برای سود خرده‌فروش و ارزش امنیت تأمین انرژی وجود نخواهد داشت.



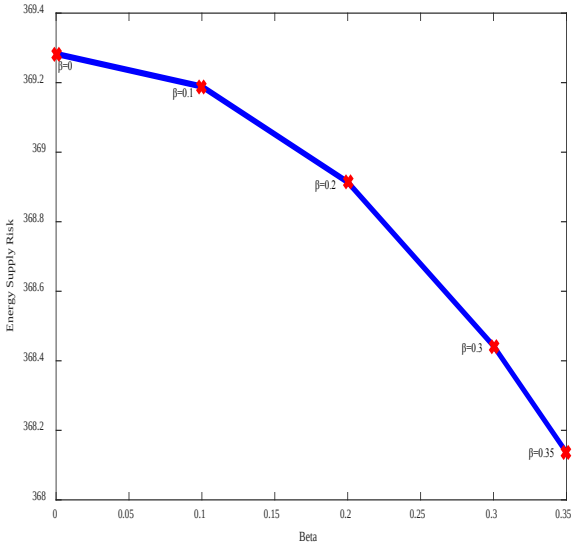
شکل ۶. امنیت مورد انتظار جهت تأمین انرژی مشترک برحسب شاخص α مؤثر در خطرپذیری

جدول ۳. سود خرده‌فروش و امنیت تأمین انرژی با تعرفه قیمت ثابت

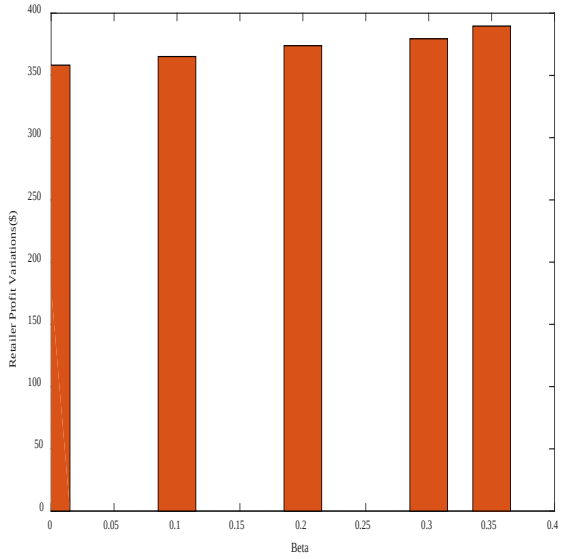
ارزش میزان امنیت تأمین انرژی مشترک	متوسط سود خرده‌فروش (دلار)	ده سناریوی منتخب
۳۰۲۱/۳۱۶	۱۵۱۰/۶۵۸	۱
۲۷۹۳/۱۲۲۶	۱۵۰۹/۷۹۶	۲
۲۶۴۱/۰۱۶	۱۵۰۹/۱۵۲	۳
۲۴۹۰/۳۸۷۹	۱۵۰۹/۳۲۶	۴
۲۳۳۸/۵۶۴۰۵	۱۵۰۸/۷۵۱	۵
۲۱۷۶/۶۳۲۷	۱۵۰۱/۱۲۶	۶
۲۰۱۹/۱۲۰۷۵	۱۴۹۵/۶۴۵	۷
۱۸۶۱/۰۸	۱۴۸۸/۸۶۴	۸
۱۷۱۱/۷۱۹۸	۱۴۸۸/۴۵۲	۹
۱۴۸۸/۴۵۲	۱۴۸۸/۴۵۲	۱۰



شکل ۷. خطرپذیری امنیت انرژی برحسب امنیت تأمین انرژی



شکل ۸. خطرپذیری تأمین انرژی مشترک برحسب شاخص β معرفی‌شده



شکل ۹. تغییرات سود متأثر از تأمین انرژی برحسب شاخص β معرفی‌شده

جدول (۴) بیانگر میزان سود خرده‌فروش و ارزش امنیت تأمین انرژی مشترکین در ضرایب مختلف مشارکت در پاسخگویی بار بر اساس قیمت‌گذاری زمان استفاده است، در قیمت‌گذاری زمان استفاده معمولاً قیمت انرژی در زمان‌های شبانه‌روز به دو صورت تقسیم می‌شود؛ اوج بار، میان باری و کم باری یا اوج بار و کم باری. بنابراین مشترکین با آگاهی از قیمت‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز میزان مصرف خود را مدیریت می‌کنند. میزان متوسط سود خرده‌فروش و همچنین ارزش امنیت تأمین انرژی نسبت به حالتی که پاسخگویی بار استفاده نشده بود ازجمله قیمت‌گذاری تعرفه ثابت که در جدول (۳) نشان داده‌شده بود به میزان قابل توجهی افزایش‌یافته است. نکته قابل‌توجه افزایش تمامی ۱۰ حالت در این جدول نسبت به جدول قیمت‌گذاری با تعرفه ثابت است که بیانگر تأثیر چشمگیر پاسخگویی بار بر سود خرده‌فروش و ارزش امنیت تأمین انرژی است. در جدول (۴) در حالت اول که مشارکت در ساعات اوج یک و غیر اوج صفر است، افزایش ۳/۲۸٪ در میزان ارزش امنیت تأمین انرژی نسبت به حالت اول تعرفه قیمت‌گذاری ثابت مشاهده می‌شود. در این حالت همچنین میزان سود خرده‌فروش نیز ۳/۳۱٪ نسبت به حالت اول قیمت‌گذاری تعرفه ثابت افزایش‌یافته است.

جدول ۴. سود خرده‌فروش و ارزش امنیت تأمین انرژی با تعرفه قیمت‌گذاری زمان استفاده پاسخگویی بار

ارزش میزان امنیت تأمین انرژی مشترک	متوسط سود خرده‌فروش (دلار)	مشارکت در ساعات غیر اوج پاسخ بار	مشارکت در ساعات اوج پاسخ بار	حالات مختلف ضرایب وزن‌دهی
۳۱۲۰/۳	۱۵۶۰/۱۵۴	۰	۱	۱
۲۸۸۵/۶	۱۵۵۹/۸۳۳	۰/۱۵	۰/۸۵	۲
۲۷۲۸/۲	۱۵۵۸/۹۸۳	۰/۲۵	۰/۷۵	۳
۲۵۷۰/۴	۱۵۵۷/۸۴۷	۰/۳۵	۰/۶۵	۴
۲۴۱۲	۱۵۵۶/۱۷	۰/۴۵	۰/۵۵	۵
۲۲۴۷/۸	۱۵۵۰/۲۴۸	۰/۵۵	۰/۴۵	۶
۲۰۷۳	۱۵۳۵/۵۶۵	۰/۶۵	۰/۳۵	۷
۱۸۹۰/۲	۱۵۱۲/۱۸۷	۰/۷۵	۰/۲۵	۸
۱۷۳۹	۱۵۱۲/۱۸۷	۰/۸۵	۰/۱۵	۹
۱۵۱۲/۱	۱۵۱۲/۱۸۷	۱	۰	۱۰

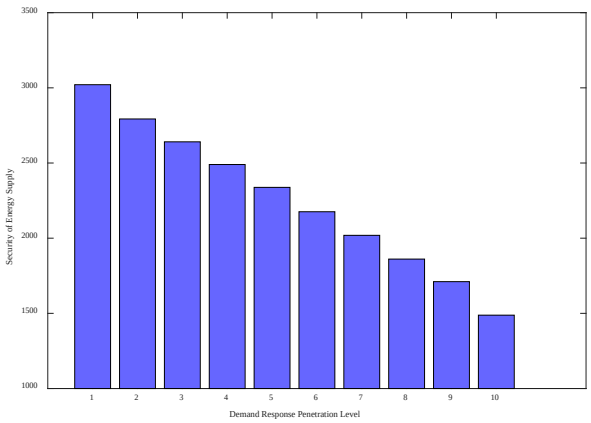
جدول (۵) نیز بیانگر میزان سود خرده‌فروش و ارزش امنیت تأمین انرژی مشترکین در ضرایب مختلف مشارکت در پاسخگویی بار بر اساس قیمت‌گذاری زمان لحظه‌ای است، در این روش قیمت‌گذاری برق، قیمت بر اساس تقاضای مشترکین ارائه می‌شود؛ بنابراین در طول روز، قیمت‌های برق دائماً در حال تغییر هستند که ممکن است حتی در هر چند دقیقه نیز متفاوت باشند. بر اساس جدول (۵)، در حالت اول که مشارکت در ساعات اوج یک و غیر اوج صفر است، میزان ارزش امنیت تأمین انرژی و سود خرده‌فروش نسبت به حالت اول تعرفه قیمت‌گذاری زمان استفاده (جدول ۴) به ترتیب ۱/۸۹٪ و ۱/۸۶٪ افزایش مشاهده می‌شود. همچنین میزان افزایش ارزش امنیت تأمین انرژی و سود خرده‌فروش در حالت اول قیمت‌گذاری زمان لحظه‌ای (وجود پاسخگویی بار) نسبت به حالت اول تعرفه ثابت (عدم وجود پاسخگویی بار) نیز به‌ترتیب ۵/۲۳٪ و ۵/۲۴٪ است.

۳-۱- امنیت تامین انرژی بدون در نظرگرفتن برنامه پاسخگویی بار

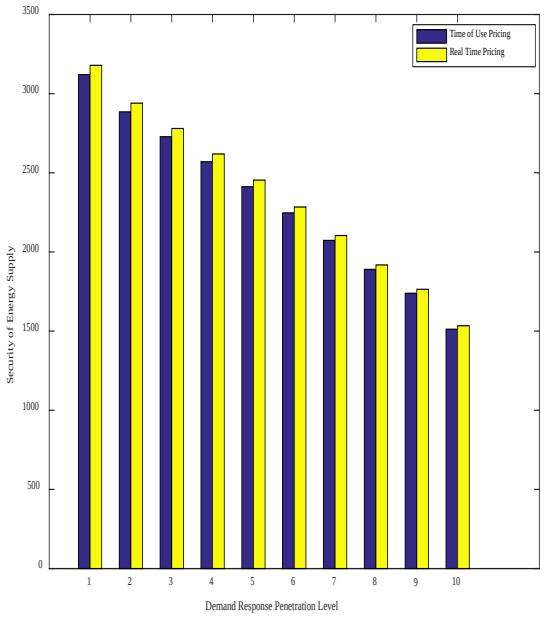
شکل (۱۰) نشانگر امنیت تامین انرژی بدون در نظرگرفتن پاسخگویی بار است. مقصود از عدم حضور برنامه پاسخگویی بار، استفاده از روش قیمت‌گذاری ثابت بوده که ارزش میزان امنیت تامین انرژی مشترک در این حالت در جدول (۳) نیز آورده شد.

جدول ۵. سود خرده‌فروش و ارزش امنیت تأمین انرژی با تعرفه قیمت‌گذاری زمان لحظه‌ای پاسخگویی بار

ارزش میزان امنیت تأمین انرژی مشترک	متوسط سود خرده‌فروش (دلار)	مشارکت در ساعات غیر اوج پاسخ بار	مشارکت در ساعات اوج پاسخ بار	حالات مختلف ضرایب وزن‌دهی
۳۱۷۹/۷	۱۵۸۹/۸۷۹	۰	۱	۱
۲۹۴۰/۹	۱۵۸۹/۷۲۷	۰/۱۵	۰/۸۵	۲
۲۷۸۰/۹	۱۵۸۹/۰۹	۰/۲۵	۰/۷۵	۳
۲۶۱۹/۸	۱۵۸۷/۷۶۷	۰/۳۵	۰/۶۵	۴
۲۴۵۴/۲	۱۵۸۳/۳۸۶	۰/۴۵	۰/۵۵	۵
۲۲۸۴/۹	۱۵۷۵/۸۴۳	۰/۵۵	۰/۴۵	۶
۲۱۰۴/۷	۱۵۵۹/۱۰۲	۰/۶۵	۰/۳۵	۷
۱۹۱۸/۳	۱۵۳۴/۶۴۴	۰/۷۵	۰/۲۵	۸
۱۷۶۴/۸	۱۵۳۴/۶۳۱	۰/۸۵	۰/۱۵	۹
۱۵۳۴/۶	۱۵۳۴/۶۳۱	۱	۰	۱۰



شکل ۱۰. ارزش امنیت تأمین انرژی بدون حضور برنامه‌های پاسخگویی بار



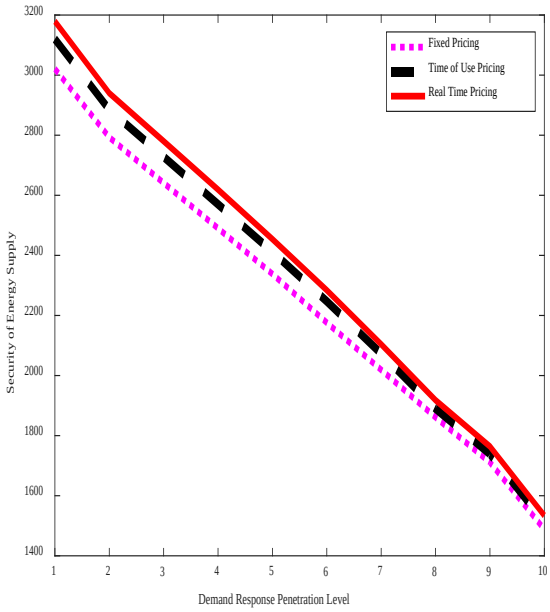
شکل ۱۱. ارزش امنیت تأمین انرژی در حضور برنامه‌های پاسخگویی بار

۳-۲- امنیت تامین انرژی با در نظرگرفتن برنامه‌های پاسخگویی بار

شکل (۱۱) نیز نشانگر امنیت تامین انرژی در حضور دو نوع از برنامه‌های پاسخگویی بار است. روش قیمت‌گذاری زمان استفاده و روش قیمت‌گذاری زمان لحظه‌ای که ارزش میزان امنیت تامین انرژی مشترک در این دو حالت به‌ترتیب در جدول‌های (۴ و ۵) ذکر شد.

۳-۳- تحلیل نهایی تأثیر نفوذ برنامه‌های پاسخگویی بار بر امنیت تأمین انرژی

در ادامه؛ شکل (۱۲) بیانگر میزان ارزش امنیت تأمین انرژی در حضور و عدم حضور روش‌های پاسخگویی بار در سامانه قدرت تجدید ساختاریافته است. این شکل که در واقع تجمیع دو بخش (۳-۱ و ۳-۲) است براساس سطوح نفوذ برنامه‌های پاسخگویی بار یا به عبارتی مشارکت مصرف‌کنندگان در ساعات اوج و غیراوج که در جداول (۵- ۳) نیز به آن‌ها اشاره شد، تنظیم شده است. سطح اول بیشترین مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار و سطح دهم کمترین مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار است. براساس این شکل، در حالت قیمت‌گذاری تعرفه ثابت، برنامه پاسخگویی باری وجود نداشته و میزان ارزش امنیت انرژی در پایین‌ترین مقدار خود قرار دارد چراکه مشترکین و خرده‌فروشان در محیط اقتصادی سامانه قدرت بدون تعامل با یکدیگر حرکت کرده و بنا بر هر دلیلی ممکن است میزان عرضه و تقاضا در این محیط اقتصادی دچار عدم تعادل شود و تأثیر غیرقابل جبرانی بر روی امنیت سامانه قدرت بگذارد. در دو حالت دیگر که پاسخگویی بار اعمال شده است، به دلیل آنکه روش قیمت‌گذاری زمان لحظه‌ای منعکس‌کننده قیمت‌های واقعی بازار برق بوده و شرایط را به طور برخط منعکس می‌کند، ارتباط میان خرده‌فروش و مشترکین در محیط اقتصادی سامانه قدرت بیشتر برقرار شده و بنابراین مشترک و خرده‌فروش با تعامل مناسبی اقدام به فعالیت در محیط اقتصادی سامانه قدرت خواهند کرد. در چنین محیطی میزان ارزش امنیت تأمین انرژی نیز در مقادیر بالاتری بوده و نتایج حاکی از بالاترین سطح از امنیت انرژی در این روش قیمت‌گذاری نسبت به قیمت‌گذاری زمان استفاده دارد، چراکه در قیمت‌گذاری زمان استفاده فقط برخی ساعات خاص و زمان‌های اوج و غیراوج در نگاه بازیگران پررنگ خواهند بود و منعکس‌کننده تمام شرایط واقعی بازار برق نخواهد بود، ازاین‌رو در این حالت نیز امنیت تأمین انرژی در سطح پایین‌تری نسبت روش قیمت‌گذاری زمان لحظه‌ای خواهد بود. ازاین‌رو رویکرد مبتنی بر پاسخگویی بار و استفاده از روش قیمت‌گذاری زمان لحظه‌ای در بازار برق به‌عنوان پدافندی نوین در جهت تأمین امنیت انرژی مشترکین در سامانه‌های قدرت نوین به کار گرفته می‌شود و این رویکرد نوین به‌طور هم‌زمان منافع تمام بازیگران را در سامانه‌های قدرت نوین برآورده می‌کند.



شکل ۱۲. ارزش امنیت تأمین انرژی در حضور و عدم حضور پاسخگویی بار

۴- نتیجه‌گیری

تجدید ساختار و گسترش روزافزون رویکرد اقتصادی در سامانه قدرت سبب ایجاد تغییراتی در مقررات حاکم بر این شبکه‌ها شده است. امنیت برق به در دسترس بودن مقدار مناسبی از عرضه انرژی جهت تأمین نمودن میزان تقاضای انرژی مشترکین تعبیر می‌شود. از جمله مسائلی که در راستای ایجاد محیط اقتصادی

سامانه قدرت باید مورد توجه قرار گیرد، مسئله امنیت تأمین انرژی است. در این مقاله بر اساس پاسخگویی بار و حضور مشترک در برنامه‌های قیمت- محور پاسخگویی بار به‌طور هم‌زمان مسئله حداکثرسازی سود خرده‌فروش بازار برق در کنار حداکثرسازی ارزش امنیت تأمین انرژی مصرف‌کننده مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مسائل امنیت انرژی، تأمین انرژی و خطرپذیری خرده‌فروش در شرایطی که پاسخگویی بار اعمال نشده است مورد مطالعه قرار گرفت. در حالتی که صرفاً خرده‌فروش به‌دنبال حداکثرسازی سود خود است و مسائل پاسخگویی بار نیز اعمال نشده است، مسئله امنیت تأمین انرژی به‌خوبی مدیریت نشده و اپراتور مستقل سیستم مانع از اجرای بازار خواهد شد، اما در حالتی که برنامه‌های پاسخگویی بار مورد توجه قرارگرفته است و خرده‌فروش مصرف‌کننده را به حضور در این برنامه‌ها ترغیب می‌کند، به‌طور هم‌زمان مسئله حداکثرسازی سود خرده‌فروش و ارزش امنیت تأمین انرژی حل شده و مشکلی نیز بابت اجرای بازار ازنظر اپراتور مستقل سیستم وجود ندارد. در این مقاله ضمن معرفی و ارائه شاخص ارزش امنیت تأمین انرژی قبل و بعد از اجرای پاسخگویی بار، شاخص‌های سود خرده‌فروش و ارزش امنیت تأمین انرژی در شرایط حضور و عدم حضور پاسخگویی بار مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی‌که قیمت‌گذاری زمان لحظه‌ای نسبت به قیمت‌گذاری زمان استفاده و قیمت‌گذاری با تعرفه ثابت واقعی‌تر بوده و مشخص‌کننده شرایط واقعی تعرفه‌ها در بازار برق است، سود خرده‌فروش در کنار ارزش امنیت تأمین انرژی نسبت به دو حالت دیگر مقدار بیشتری داشته و مشترکین و خرده‌فروشان بازار برق با مشارکت در این نوع برنامه می‌توانند به اهداف خود برسند؛ در کنار این هدف بازار برق نیز مشکلی بابت تأمین و رویکرد امنیت انرژی نخواهد داشت. همچنین براین اساس اپراتور مستقل سیستم یا بهره‌بردار مستقل سامانه که وظیفه تأمین امنیت در بازار را دارد نیز با رصد وضعیت ارزش امنیت تأمین انرژی قبل و بعد از اجرای پاسخگویی، دستور به اجرای بازار می‌دهد که در این مقاله بر مبنای روش قیمت‌گذاری زمان واقعی، هم‌زمان با افزایش سود خرده‌فروش، ارزش امنیت تأمین انرژی نیز نسبت به دو حالت دیگر بیشتر شده و بازار اجرا خواهد شد.

۵- مرجع‌ها

[1] Albadi, M. H.; Saadanye, F. “A Summary of Demand Response in Electricity Markets”; Elec. Power Syst. Res. 2008, 78, 1989–1996.

[2] Sale, H.; Grande, O. S. “Demand Response from Household Customers: Experiences from a Pilot Study in Norway”; IEEE Trans. Smart Grid 2011, 2, 102–109.

[3] Sezgen, O.; Goldman, C. A.; Krishnarao, P. “Option Value of Electricity Demand Response”; Energy 2007, 32, 108–119.

[4] Zhang, C.; Fan, L.; Tian, Y.; Yang, S. “Optimal Credit Period and Lot Size Policies for A Retailer at Risk of Customer Default Under Two-Echelon Partial Trade Credit”; IEEE ACCESS 2018, 6, 54295-54309.

[5] Gabriel, S. A.; Conejo, A. J.; Plazas, M. A.; Balakrishnan, S. “Optimal Price and Quantity Determination for Retail Electric Power Contracts”; IEEE Trans. Power Syst. 2006, 21, 180–187.

[6] Ahmadi, A.; Charwand, M.; Aghaei, J. “Risk-Constrained Optimal Strategy for Retailer Forward Contract Portfolio”; Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2013, 53, 704-713.

[7] Carrión, M.; José, M. A.; Conejo, A. J. “A Bi-Level Stochastic Programming Approach for Retailer Futures Market Trading”; IEEE Trans. Power Syst. 2009, 24, 1446–1456.

[8] García-Bertrand, R. “Sale Prices Setting Tool for Retailers”; IEEE Trans. Smart Grid 2013, 4, 1-8.

[9] Yang, W.; Yu, R.; Nambiar, M. “Quantifying the Benefits to Consumers for Demand Response with A Statistical Elasticity Model”; IET Gener. Transm. Dis. 2014, 8, 503-515.

[10] Fang, X.; Li, F.; Wei, Y.; Cui, H. “Strategic Scheduling of Energy Storage for Load Serving Entities in Locational Marginal Pricing Market”; IET Gener. Transm. Dis. 2016, 10, 1258-1267.

[11] Kohansal, M.; Mohsenian Rad, H. “Price-Maker Economic Bidding in Two-Settlement Pool-Based Markets: The Case of Time-Shiftable Loads”; IEEE Trans. Power Syst. 2016, 31, 695-705.

[12] Charwand, M.; Gitizadeh, M.; Siano, P. “A New Active Portfolio Risk Management for an Electricity Retailer Based on A Drawdown Risk Preference”; Energy 2017, 118, 387–398.

[13] Hatami, A. R.; Seifi, H.; Sheikh-El-Eslami, M. K. “Optimal Selling Price and Energy Procurement Strategies for a Retailer in an Electricity Market”; Elec. Power Syst. Res. 2009, 79, 246-254.

[14] Jin, M.; Feng, W.; Marnay, C.; Spanos, C. “Microgrid to Enable Optimal Distributed Energy Retail and End-User Demand Response”; Appl. Energy 2018, 210, 1321-1335.

[15] Hatami, A. R.; Seifi, H.; Sheikh-El-Eslami, M. K. “A Stochastic-Based Decision-Making Framework for an Electricity Retailer: Time-of-Use Pricing and Electricity Portfolio Optimization”; IEEE Trans. Power Syst. 2011, 26, 1808-1816.

[16] Hussain, A.; Bui, V. H.; Kim, H. M. “A Resilient and Privacy-Preserving Energy Management Strategy for Networked Microgrids”; IEEE. Trans. Smart Grid 2018, 9, 2127-2139.

[17] Ghaffarpour, R.; Moradi, S.; Ranjbar, A. M. “Optimal Energy Design for Combined Use of Electricity and Gas Systems with Consideration of Reliability Index”; J. Eng. Energy Manag. 2017, 25, 2-19

[18] Pal, S.; Thakur, S.; Kumar, R.; Panigrahi, B. K. “A Strategical Game Theoretic Based Demand Response Model for Residential Consumers in a Fair Environment”; Elec. Power Syst. Res. 2018, 97, 201-210.

[19] Aalami, H. A.; Moghaddam, M. P.; Yousefi, G. R. “Modeling and Prioritizing Demand Response Programs in Power Markets”; Elec. Power Syst. Res. 2010, 80, 426-435.

[20] Zamani Gargari, M.; Ghaffarpour, R. “Increasing Energy Security by Using the Concept of Resiliency in Multi-Energy Infrastructures”; Adv. Defence Sci. & Technol. 2020, 10, 419-432 (In Persian).

[21] Gaffarpour, R.; Pourmusa, A. A.; Ranjbar, A. M. “Presenting an Index for Evaluation of Power Network Security Using Fuzzy Set Theory”; Adv. Defence Sci. & Technol. 2016, 7, 289-304 (In Persian).

[22] Sayydipour, S.; Ghaffarpour, R.; Ranjbar, A. M. “A Review on Vulnerability Analysis of Electric Grid: Approaches, Models, and Solution Methods”; Adv. Defence Sci. & Technol. 2018, 9, 11-28 (In Persian).

[23] Ghaffarpour, R.; Zamanian, S.; Khanahmadi, A.; VahidPakdel, M. J. “Optimal Planning and Implementation of Remote Areas Energy Provision’s System Considering Uncertainty”; Adv. Defence Sci. & Technol. 2019, 10, 243-250 (In Persian).

[24] Alizadeh Pahlavani, M. R.; Khosravi, M. “Presentation of a Practical Approach in Planning and Placement of Distributed Generation Sources Based on Multi-Objective Genetic Algorithms”; Adv. Defence Sci. & Technol. 2018, 9, 181-190 (In Persian).

[25] Biringer, B. “Risk Assessment Methodology for Electric Power Transmission, RAM-T SM”; Proc. IEEE Int. Carnahan Conf. Security Technol. 2004, 99-105.

[26] Tayebi, A. H.; Sharifi, R.; Salemi, A. H.; Faghihi, F. “Presentation of an Algorithm for Identification of the Most Vulnerable Bus in Electric Smart Grid through Cyber-Attack Based on State Estimation”; Adv. Defence Sci. & Technol. 2020, 4, 391-401 (In Persian).

[27] Ghaffarpour, R.; Zarei, E.; Khan Ahmadi, A.; Alami, H. “Smart Demand Response of the Electrical Load to Increase the Continuity of Load Meeting under War Condition”; Adv. Defence Sci. & Technol. 2020, 2, 1-21 (In Persian).

[28] Zhang, Y.; Wang, J.; Ding, T.; Wang, X. “Conditional “Value at Risk-Based Stochastic Unit Commitment Considering the Uncertainty of Wind Power Generation”; IET Gener. Transm. Dis. 2018, 12, 482-489.

[29] Dupačová, J.; Consigli, G.; Wallace, S. W. “Scenarios for Multistage Stochastic Programs”; Ann. Oper. Res. 2000, 100, 25–53.

[30] Olsson, M.; Soder, L. “Generation of Regulating Power Price Scenarios”; Int. Conf. Probabilistic Methods Appl. Power Syst. 2004, 26-31.

[31] Høyland, K.; Kaut, M.; Wallace, S. W. “A Heuristic for Moment-Matching Scenario Generation”; Comput. Optim. Appl. 2003, 24, 169-185.

[32] Høyland, K.; Wallace, S. W. “Generating Scenario Trees for Multistage Decision Problems”; Manage. Sci. 2001, 47, 295–307.

[33] Hu, J.; Li, H. “A New Clustering Approach for Scenario Reduction in Multi-Stochastic Variable Programming”; IEEE Trans. Power Syst. 2019, 34, 3813-3825.

[34] https://www.gams.com/latest/docs/S_CONOPT.html

پیوست:

جدول ۱. علائم به‌کاررفته در روابط اشاره‌شده در مقاله.

F_0	بیانگر سود خرده‌فروش قبل از جابجایی بار است، واحد آن برحسب دلار می‌باشد.
t	شاخصی است که بیانگر دوره‌های زمانی است که در آن‌ها می‌توان با مشترک قرارداد بست.
N_T	تعداد دوره‌های زمانی به‌منظور مبادله و داد و ستد با مشترک.
j	شاخصی است که بیانگر مشترکین است.
N_j	بیانگر تعداد کل مشترکین است.
λ_{jt}^{c}	قیمت انرژی برای مشترک j برای دوره زمانی t (دلار/مگاوات ساعت)
P_{jt}^{c}	توان قرارداد شده با مشترک j برای دوره زمانی t (مگاوات)
L_t^C	تعداد ساعات دوره زمانی t(ساعت)
b	شاخصی است مرتبط با بازه‌های زمانی که در آن بازه‌ها می‌توان از طریق قرارداد دوجانبه با مشترک تبادلات انرژی را انجام داد.
N_B	تعداد دوره‌های زمانی مربوط به تبادل انرژی با مصرف‌کننده از طریق قرارداد دوجانبه
λ_b^B	قیمت مربوط به قرارداد دوجانبه‌ای که خرده‌فروش با شرکت‌های تولیدکننده انرژی در دوره زمانی b امضا نموده است (دلار/ مگاوات ساعت)
P_b^B	توان خریداری‌شده در طی قرارداد دوجانبه در دوره زمانی b (مگاوات)
L_b^B	تعداد ساعات دوره زمانی b (ساعت)
r	شاخصی است مرتبط با بازه‌های زمانی که در آن بازه‌ها می‌توان از طریق POOL با مشترک تبادلات انرژی را انجام داد.
θ_{tr}	مجموعه دوره‌های زمانی r مرتبط با دوره زمانی t
$\lambda_{r\omega}^{P}$	قیمت POOL برای دوره زمانی r و سناریو ω (دلار/مگاوات ساعت)
L_r^P	تعداد ساعات دوره زمانی r (ساعت)
Ω_{rb}	مجموعه دوره‌های زمانی b مرتبط با دوره زمانی r
F_L	بیانگر سود خرده‌فروش پس از جابجایی بار است، واحد آن نیز برحسب دلار می‌باشد.
$\Delta\lambda_{jt}^{C}$	افزایش یا کاهش قیمت انرژی برای مشترک j در دوره زمانی t (دلار/مگاوات ساعت)
$\Delta P_{jt\omega}^{C}$	افزایش یا کاهش انرژی مصرف‌شده توسط مشترک j در دوره زمانی t و سناریو ω (مگاوات)
N_R	تعداد دوره‌های زمانی مربوط به تبادل انرژی با مصرف‌کننده از طریق قرارداد POOL
SOES	شاخص معرفی‌شده در مقاله به‌عنوان ارزش امنیت تأمین انرژی
D	میزان نمونه‌ای از تقاضای مشترکین
C_α	شاخص تأثیرگذار در شاخص ارزش امنیت تأمین انرژی قبل از پاسخگویی بار
α	سطح اطمینان خطرپذیری
γ_{PEAK}	مشارکت مصرف‌کننده در ساعات اوج پاسخگویی بار، تأثیرگذار در شاخص ارزش امنیت تأمین انرژی بعد از اجرای پاسخگویی بار
$\gamma_{OFFPEAK}$	مشارکت مصرف‌کننده در ساعات غیراوج پاسخگویی بار، تأثیرگذار در شاخص ارزش امنیت تأمین انرژی بعد از اجرای پاسخگویی بار
ΔF	تفاوت سود خرده‌فروش قبل و بعد از جابجایی بار (دلار)
ω	سناریوهای تعریف‌شده
N_ω	تعداد سناریوهای تعریف‌شده
π_ω	احتمال رخداد سناریو ω
β	فاکتور وزنی به منظور مدل‌سازی و ارتباط بین میزان سود و CVaR
u_ω	متغیر کمکی مثبت
ξ	شاخص ارزش در معیار خطرپذیری
R_ω	سود خرده‌فروش در صورت رخداد سناریو ω
Λ_{tm}	مجموعه دوره‌های زمانی t مرتبط با دوره زمانی m
m	ماه‌های مورد مطالعه مربوطه به قراردادها در نمونه مطالعاتی
$E_{jt\omega}$	الاستیسیته یا کشش مشترک برای مشترک j در دوره زمانی t و سناریو ω