مدل پاسخ بار الکتریکی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی

میثم خجسته[1] شهرام جدید[2]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم‌وصنعت- تهران- ایران
Khojasteh@iust.ac.ir
۲- استاد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم‌وصنعت- تهران- ایران
Jadid@iust.ac.ir

چکیده: یکی از راه‌های مفید و موثر برای بهبود عملکرد بازارهای برق و افزایش سطح راندمان آنها، استفاده از برنامه‌های پاسخ بار است. در بازارهای برق پیشرفته دنیا، سیاست‌گذاران صنعت برق با پیشنهاد برنامه‌های مختلف پاسخ بار به مصرف‌کنندگان این امکان را به آنها می‌دهند که به قیمت انرژی در بازار عمده‌فروشی پاسخ داده و مصرف خود را با متناسب با نوسانات قیمت تغییر دهند. به این ترتیب مشترکین صنعت برق توانایی آنرا خواهند داشت در تعیین قیمت کالای مصرفی خود تاثیرگذار باشند. از طرفی بهره‌بردار مستقل سیستم نیز می‌تواند با استفاده از برنامه‌های پاسخ بار، ضمن بهبود عملکرد فنی سیستم تحت کنترل خود و حفظ امنیت آن، جهش‌های قیمت در بازار عمده‌فروشی را کاهش داده و از بروز پدیده قدرت بازار جلوگیری نماید. به طور کلی برنامه‌های پاسخ بار را می‌توان به دو دسته برنامه‌های مبتنی زمان و برنامه‌های مبتنی بر مشوق تقسیم‌بندی نمود. یکی از عوامل مهمی که بر روی میزان مصرف انرژی مشترکین صنعت برق تاثیر فراوانی دارد، قیمت انرژی است. عموماً مشترکین با افزایش قیمت انرژی، میزان مصرف خود را کاهش داده و بالعکس با کاهش قیمت میزان انرژی میزان مصرف خود را افزایش می‌دهند. اما مسئله‌ای که باید به آن توجه نمود این است که قیمت انرژی در بازار عمده‌فروشی همراه با عدم قطعیت است، از اینرو نمی‌توان آنرا بصورت دقیق تعیین نمود. در این مقاله مدل تصادفی برای پاسخ بار ارائه شده است که در آن مشوق‌ها و جرایم وضع شده توسط قانون‌گذار برای برنامه پاسخ‌بار، در نظر گرفته شده است. همچنین ریسک ناشی از عدم قطعیت قیمت انرژی در بازار عمده فروشی نیز بوسیله شاخص *CVaR* مدل‌سازی شده است. در انتها عملکرد مدل پیشنهادی از طریق یک نمونه عددی مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج بدست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی تصادفی، پاسخ بار، عدم‌قطعیت قیمت، ریسک.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۰۷/۲۹
تاریخ پذیریش مشروط: ۹۲/۸/۲۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۱۰/۸
نام نویسنده‌ی مسئول: شهرام جدید
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – نارمک – دانشگاه علم و صنعت –دانشکده مهندسی برق

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

۱- مقدمه

در بازارهای رقابتی تمامی کالاها، مصرف‌کنندگان این امکان را خواهند داشت که در تعیین قیمت مبادله آن کالا موثر باشند. تاثیرگذاری مصرف‌کنندگان بر روی قیمت به این صورت خواهد بود که در هنگام افزایش قیمت کالای معینی, با کاهش تقاضای خود قیمت آنرا کاهش می‌دهند. یکی از مسائلی که مسئولین صنعت برق در ساختار سنتی با آن مواجه بودند این بود که چرا مشترکین نباید در تعیین قیمت کالای مصرفی خود که همان انرژی الکتریکی است، دخیل باشند. در بازارهای برق اولیه نیز رقابت فقط در سمت تولید بود و مصرف‌کنندگان نهایی نسبت به قیمت انرژی انعطاف‌ناپذیر[۱] بودند. در این ساختار، قیمت انرژی الکتریکی برای مشترکین نهایی در ساعات و شرایط مختلف (نظیر پرباری، میان‌باری، کم‌باری و...) یکسان بود. از اینرو مشترکین انگیزه‌ای برای کاهش مصرف خود در ساعات پیک بار نداشتند. با پیشرفت علم تجدیدساختار و بازارهای برق در کشورهای مختلف دنیا، قانونگذاران به این فکر افتادند که با وضع برنامه‌های پاسخ بار، امکان مشارکت مصرف‌کنندگان را در بازارهای رقابتی فراهم آورند. در بازارهای برق رقابتی کامل, مشترکین‌نهایی این توانایی را خواهند داشت که با در تعیین قیمت انرژی الکتریکی مصرفی خود تاثیرگذار باشند.

در اکثر بازارهای برق، روش تسویه با تمامی تولیدکنندگان براساس قیمت تسویه بازار یا MCP[۲] است. در ساعات پیک بار، بهره‌بردار مجبور است که برای تامین بار شبکه تحت کنترل خود از ژنراتورهایی استفاده کند که عمدتاً قیمت حدی بالاتری دارند. این امر موجب بالا رفتن MCP می‌شود، بنابراین هزینه متوسط سرشکن شده که باید توسط مشترکین به ازای هر کیلووات ساعت مصرف پرداخت شود، افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی می‌توان با استفاده از برنامه‌های پاسخ بار ضمن کاستن MCP، هزینه صورت‌حساب برق مشترکین را کاهش داد. همچنین در پاره‌ای از شرایط ممکن بهره‌بردار مستقل به علت محدودیت‌های شبکه ملزم به خرید از تولیدکننده خاصی باشد. در چنین شرایطی تولیدکننده مذکور می‌تواند با استفاده از محدودیت شبکه، اعمال قدرت بازار[۳] نموده و با پیشنهاد قیمت فروش بالاتر، MCP بازار را افزایش دهد. بهره‌بردار مستقل شبکه در چنین مواقعی می‌تواند با استفاده از برنامه‌های پاسخ بار از بروز پدیده قدرت بازار جلوگیری نماید.

بر اساس تعریف دپارتمان انرژی آمریکا، پاسخ بار به برنامه یا تعرفه‌ای اطلاق می‌شود که مصرف‌کننده نهایی را تشویق می‌نماید تا مصرف خود را براساس قیمت انرژی تغییر دهد و یا در هنگام به خطر افتادن قابلیت‌اطمینان و امنیت شبکه، مصرف خود را کاهش دهد [۱]. در مراجع مختلف مدل‌های متفاوتی برای پاسخ بار ارائه شده است، اما بطورکلی برنامه‌های پاسخ بار را می‌توان به دو دسته مبتنی بر مشوق و مبتنی بر زمان تقسیم نمود. در برنامه‌های مبتنی بر مشوق، جرایم و مشوق‌های معینی برای مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخ‌بار به آنها پرداخت می‌شود. برنامه‌های مبتنی بر زمان شامل قراردادهای دینامیک و متغیر با زمانی است که به متقاضیان مشارکت در برنامه پاسخ بار پیشنهاد می‌شود.

در [۲]، مدل پاسخ باری براساس انعطاف‌پذیری مشتریان نسبت به قیمت و با استفاده از مفهوم تابع سود مشترکین یا CBF[۴] پیشنهاد شده است. در مدل پیشنهاد شده در این مرجع از روش AHP[۵] برای اولویت‌بندی برنامه‌های مختلف پاسخ‌بار پیشنهادی استفاده شده است. این برنامه‌ها شامل کنترل بار مستقیم، بارهای قابل قطع، برنامه‌های بازار ظرفیت و... می‌باشد. ضعف مدل پیشنهادی در چشم‌پوشی از نوسانات قیمت انرژی است. همانگونه که پیشتر اشاره شد، قیمت بازار عمده‌فروشی شامل عدم قطعیت است و نوسانات فراوانی دارد. از اینرو نمی‌توان قیمت انرژی را بصورت قطعی تعیین نمود.

در مراجع مختلف، مدل‌های تجربی فراوانی برای پاسخ‌بار پیشنهاد شده است. در [۳]، تاثیر پنج مدل تجربی سود مصرف‌کنندگان که شامل مدل‌های خطی، هیپربولیک، توانی، لگاریتمی و نمایی است، بر روی قیمت بهینه مصرف انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مرجع از دو تابع هدف سود تولیدکنندگان انرژی و رفاه اجتماعی[۶] در بهینه‌سازی‌ها استفاده شده است. در مدل پیشنهادی در این مرجع، مشوق و جریمه‌ای برای مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه پاسخ‌بار ارائه نشده است و در مدل پیشنهادی صرفاً سود و هزینه تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان از مصرف انرژی لحاظ شده است. این در حالی است که مصرف‌کنندگان بدون پرداخت مشوق، انگیزه‌ای برای مشارکت در برنامه‌های پاسخ‌بار نخواهند داشت.

مدل پاسخ‌بار پیشنهادی در [۴] براساس بهره‌وری شبکه توزیع، سود شرکت‌های توزیع و مباحث مدیریت سرمایه است. ضرایب بهره‌وری که در این مرجع برای پاسخ‌بار تعریف شده است، از دیدگاه سیاست‌گذار و سرمایه‌گذار شبکه بوده و به مسائلی نظیر کاهش تلفات شبکه توزیع توجه دارد. یکی از اهداف برنامه‌های پاسخ‌بار این است که با ایجاد مشوق‌هایی برای مصرف‌کنندگان، به آنها انگیزه لازم برای اصلاح الگوی مصرف خود به منظور

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

بهبود عملکرد شبکه قدرت داده شود. اما در مدل پیشنهاد شده در این مرجع، مصرف‌کنندگان انگیزه‌ای برای مشارکت در برنامه-های پاسخ‌بار نخواهند داشت. به نظر می‌رسد که کاربرد مدل پیشنهادی بیشتر در برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت است و در زمینه بهره‌برداری از شبکه، کاربرد چندانی ندارد.

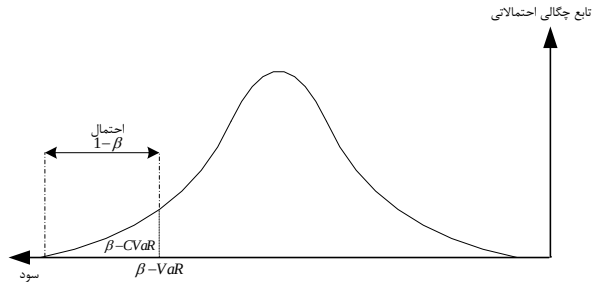
تابع هدف مورد استفاده در مدل پاسخ‌بار پیشنهاد شده در [۵] براساس سود بدست آمده توسط مشتریان از مصرف‌انرژی و هزینه پرداختی برای خرید انرژی می‌باشد. همچنین در این مدل، برای قیمت انرژی یک محدوده معین در نظر گرفته شده است و میزان بار براساس احتمال وقوع هر سناریو و به منظور بیشینه کردن سود مصرف‌کنندگان محاسبه می‌شود. در این مدل فقط به احتمال وقوع سناریوهای مختلف قیمت انرژی توجه شده و از میزان تاثیر آن بر روی تابع هدف چشم‌پوشی شده است. باید توجه نمود که در پاره‌ای از موارد ممکن است احتمال وقوع یک سناریو قیمت پایین باشد اما پیامدها و ضرر مالی ناشی از وقوع آن سناریو قابل توجه باشد. بنابراین چشم‌پوشی از تاثیر سناریوهای قیمت بر روی تابع هدف یکی از ایرادهای این مدل است.

در [۶] مدل پاسخ‌باری براساس دو برنامه بار قابل قطع و برنامه بازار ظرفیت پیشنهاد شده است. در تابع هدف پیشنهادی در این مرجع سود مشترکین برنامه پاسخ بار براساس عایدی حاصل از مصرف انرژی، هزینه خرید انرژی توسط مشترکین و جرایم و مشوق‌های شرکت در برنامه پاسخ بار در نظر گرفته شده است. سپس میزان مصرف مشترکین به نحوی تعیین شده است که سود آنها بیشینه شود. مشوق‌ها و جرایم برنامه پاسخ بار از طریق ضرایب جریمه و تشویق و بصورت ورودی در تابع هدف در نظر گرفته شده است. همچنین قیمت خرید انرژی ثابت بوده و از نوسانات آن چشم‌پوشی شده است. باید متذکر شد که امروزه در بسیاری از بازارهای دنیا، مشوق‌ها و جرایم در برنامه پاسخ بار براساس قیمت انرژی تعیین می‌شود و نمی‌توان آنها را بصورت قطعی تعیین نمود.

در برخی از مراجع نیز به مطالعه مباحث مرتبط به پاسخ‌بار پرداخته شده است. به عنوان نمونه در [۷] به تاثیر پاسخ‌بار بر روی برنامه‌ریزی واحدهای تولید و امنیت شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است. مرجع [۸] نیز به مطالعه تاثیر پاسخ‌بار بر روی رزرو چرخان شبکه پرداخته است. مطالعات انجام شده بیانگر این است که در آینده‌ای نزدیک می‌توان خدمات جانبی را بعنوان یک کالا در بازار رقابتی مبادله نمود. بدین منظور در مرجع [۹] مدلی برای تبادل پاسخ بار و تعیین راهبرد بهینه قیمت‌دهی فروشندگان و خریداران این خدمات در بازار ارائه شده است.

یکی از مسائل بسیار مهم در تعیین میزان مصرف مشترکین صنعت برق، قیمت انرژی است. اما مسئله‌ای که باید به آن توجه نمود این است که قیمت انرژی در بازار عمده‌فروشی با نوسان همراه است و نمی‌توان آنرا بصورت قطعی تعیین نمود. بنابراین باید عدم‌قطعیت قیمت انرژی در برنامه‌ریزی پاسخ بار در نظر گرفته شود. روش‌های مختلفی برای حل مسائل همراه عدم-قطعیت پیشنهاد شده است اما پرکاربردترین و مناسب‌ترین روش، استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی می‌باشد. در برنامه‌ریزی تصادفی، ابتدا سناریوهای مختلف ناشی از پارامتر شامل‌قطعیت (که در اینجا قیمت انرژی است) با در نظر گرفتن احتمال وقوع آنها تولید می‌شوند. در صورت بالا بودن حجم سناریوهای تولید شده می‌توان با استفاده از روش‌های کاهش سناریو، تعداد آنها را کاهش داد. سپس تاثیر این سناریوها بر روی تابع هدف مسئله مورد بررسی قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری ریسک مالی نقش مهمی در مسائل بهینه‌سازی همراه با عدم‌قطعیت دارد. ریسک مالی در واقع برابر با میزان ضرر و یا کاهش سود در اثر وقوع سناریوهای مختلف است. ارزش در معرض ریسک (VaR[۷]) و ارزش در معرض ریسک مشروط ($CVaR$[۸]) دو روش پرکاربرد اندازه‌گیری ریسک در مسائل بهینه‌سازی اقتصادی است. VaR بیانگر این است که در T روز آینده، β درصد اطمینان داریم قطعاً بیشتر از مبلغ VaR متحمل زیان نخواهیم شد و یا بالعکس سود کمتر از VaR نخواهد شد (T افق زمانی برنامه‌ریزی و β برابر با میزان قطعیت وقوع VaR است و سطح اطمینان[۹] نامیده می-شود). بنابراین در مسائلی که تابع هدف محاسبه ریسک ضرر یا هزینه است، شاخص VaR را کمینه می‌کنند و بالعکس، در مسائلی که تابع هدف ریسک سود است شاخص VaR را بیشینه می‌کنند. یکی از شروط استفاده از روش VaR این است که توزیع احتمالاتی متغیر شامل عدم‌قطعیت باید براساس الگوی توزیع نرمال باشد، در غیر اینصورت تضمینی وجود ندارد که جواب حاصله صحیح باشد. باید توجه نمود که توزیع احتمالاتی قیمت انرژی در بازار عمده‌فروشی لزوماً نرمال نیست. از اینرو محققین از شاخص دیگری به نام $CVaR$ استفاده می‌کنند. $CVaR$ بیانگر مقدار زیانی است که در T روز آینده، به ازای $100\times(1-\beta)$ بدترین حالت (قسمت سمت چپ شکل (۱)) رخ می‌دهد[۱۰]. توضیحات تکمیلی در مورد نحوه محاسبه این شاخص در ادامه این مقاله ارائه خواهد شد.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]



شکل (۱): مفهوم گرافیکی شاخص‌های *VaR* و *CVaR*

در این مقاله مدلی برای پاسخ‌بار مشترکین صنعت برق با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی ارائه شده است که هدف آن بیشینه‌سازی سود مشترکین با در نظرگرفتن ریسک ناشی از عدم‌قطعیت قیمت انرژی است. در برنامه پاسخ‌بار ارائه شده، علاوه بر در نظر گرفتن مشوق‌ها و جرایم شرکت در برنامه پاسخ‌بار، عدم‌قطعیت قیمت انرژی از طریق روش $CVaR$ مدل شده است. در واقع برنامه پاسخ‌بار ارائه شده، توازنی بین سود مشترکین از مصرف-انرژی و ریسک ناشی از عدم‌قطعیت قیمت ارائه می‌کند. باید متذکر شد که در این مقاله فرض شده است که تمامی مشترکین، انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را از یک تامین‌کننده انرژی می‌خرند.

در ادامه این مقاله و در بخش دوم، اصول برنامه پاسخ‌بار و جرایم و مشوق‌های مربوطه تشریح شده است. در بخش سوم، نحوه اندازه‌گیری ریسک مربوط به عدم‌قطعیت قیمت انرژی و تابع هدف پیشنهادی ارائه شده است. در بخش چهارم، عملکرد مدل ارائه شده بر روی یک نمونه عددی مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصله مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت و در بخش پنجم، نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- مدل پاسخ بار

یکی از مفاهیم پرکاربرد در مدیریت مصرف، انعطاف‌پذیری بار نسبت به قیمت است. انعطاف‌پذیری بار بصورت حساسیت بار نسبت به تغییرات قیمت انرژی در بازه زمانی معین تعریف می-شود. انعطاف‌پذیری بار در هر ساعت نسبت به تغییرات قیمت در آن ساعت منفی است، یعنی با افزایش قیمت، بار کاهش و با کاهش قیمت، بار افزایش می‌یابد. رابطه انعطاف‌پذیری بار-قیمت در ساعت i و تحت سناریو ω بصورت زیر است:

$$E(i,\omega)=E_i(\omega)=\frac{\rho_i^*(\omega)}{d_i^*(\omega)}\frac{\Delta d_i(\omega)}{\Delta\rho_i(\omega)} \quad (۱)$$

که در آن $\Delta d_i(\omega)$ و $\Delta\rho_i(\omega)$ به ترتیب تغییرات بار و قیمت در ساعت i و تحت سناریو ω و $d_i^*(\omega)$ و $\rho_i^*(\omega)$ برابر با مقادیر بار و قیمت مرجع هستند.

اگر سطح بار مشترکین، قبل و بعد از اجرای برنامه پاسخ‌بار پیشنهادی به ترتیب برابر با $d_i^*(\omega)$ و $d_i(\omega)$ باشند، تاثیر برنامه پاسخ‌بار بر روی سطح بار مشترکین برابر است با:

$$\Delta d_i(\omega)=d_i^*(\omega)-d_i(\omega) \quad (۲)$$

در این مقاله فرض می‌شود که تغییرات بار($\Delta d_i(\omega)$) همواره مثبت و کوچکتر یا مساوی مقدار تعیین شده در قرارداد کاهش بار است. سیاست‌گذاران صنعت برق باید همواره مشوق‌های مالی را برای مشترکین به منظور مشارکت در برنامه پاسخ بار ایجاد کنند. در بازارهای برق دنیا، طرح‌های متفاوتی برای پرداخت مشوق به مشترکین به منظور مشارکت در برنامه پاسخ‌بار وجود دارد که جامع‌ترین آنها، طرحی است که در بازار PJM به مشترکین پرداخت می‌شود. در این طرح، میزان مشوق پاسخ بار پرداخت شده به مشترکین براساس قیمت تسویه بازار و میزان کاهش بار است. در این طرح، سطح قیمتی به نام TP[۱۰] معرفی می‌شود که در این مقاله با LMP^* مشخص داده شده است. اگر قیمت تسویه بازار در ساعت i و تحت سناریو ω با $\rho_i(\omega)$ مشخص شود، مشوق پرداختی به مشترکین به ازای هر مگاوات کاهش بار در ساعت i برابر است با [۱۱]:

$$\pi_i(\omega)=\begin{cases}\rho_i(\omega) & LMP^*\le\rho_i(\omega)\\ \rho_i(\omega)-GT & GT<\rho_i(\omega)<LMP^*\\ 0 & \rho_i(\omega)\le GT\end{cases} \quad (۳)$$

که در آن GT[۱۱] برابر با مجموع هزینه‌های اجزاء شبکه‌های تولید، انتقال و توزیع است که بصورت سالیانه به ازای مشترکین مختلف تعیین می‌شود. ایده طرح پاسخ‌بار در بازار PJM اینگونه است که در صورتیکه قیمت انرژی در بازار عمده‌فروشی از حد معینی (که توسط قانونگذار تعیین می‌شود) بالاتر باشد، مشوق بیشتری به مشترکین برای کاهش بار داده می‌شود. در صورتیکه قیمت انرژی در بازار عمده‌فروشی پایین‌تر از حد معین و بیشتر از هزینه‌های ثابت اجزاء شبکه تولید، انتقال و توزیع باشد، مشوق کمتری به مشترکین پرداخت می‌شود. در نهایت اگر قیمت انرژی کمتر از هزینه‌های ثابت اجزاء شبکه تولید، انتقال و توزیع باشد، چون کاهش بار مشترکین منجر به از مدار خارج کردن برخی از واحدهای تولید و تحمیل هزینه به بهره‌بردار شبکه می‌شود، مشوقی به مشترکین پرداخت نمی‌شود.

اگر سطح مشارکت مشترکین در برنامه پاسخ‌بار در ساعت i برابر با IC_i باشد، مشترک موظف است که در ساعت i ام، بار خود را به میزان IC_i کاهش دهد. در صورتیکه میزان کاهش بار مشترک کمتر از IC_i باشد، مشترک به ازای $(IC_i-\Delta d_i(\omega))$ جریمه خواهد شد. با فرض اینکه میزان جریمه به ازای هر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

مگاوات ساعت تخطی از میزان قرارداد کاهش بار، برابر با pen_i باشد، کل جریمه تخصیص یافته به مشترک به ازای تخطی از برنامه پاسخ بار برابر است با [۶]:

$$PEN(\Delta d_i(\omega)) = pen_i \times (IC_i - \Delta d_i(\omega)) \qquad (۴)$$

در مراجع مختلف نظیر [۳] توابع مختلفی برای محاسبه عایدی مشترکین در اثر مصرف انرژی پیشنهاد شده است. ساده‌ترین، رایج‌ترین و پرکاربردترین مدلی که برای محاسبه عایدی مشترکین در اثر مصرف پیشنهاد شده است، مدل درجه دوم می‌باشد که از مدل خطی بار بدست می‌آید.

(۵)

$$INC(d_i(\omega)) = B_i^*(\omega) + \rho_i^*(\omega)[d_i(\omega) - d_i^*(\omega)]\left\{1 + \frac{d_i(\omega) - d_i^*(\omega)}{2E_{ii}(\omega)d_i^*(\omega)}\right\}$$

که در آن $B_i^*(\omega)$، معرف عایدی مشترک در ساعت i ام و تحت سناریو ω، با در نظر گرفتن میزان بار اولیه $d_i^*(\omega)$است. بنابراین تابع سود مشترکین با در نظر گرفتن عایدی، هزینه لازم برای خرید بار مصرفی، مشوق دریافتی بابت کاهش بار و جریمه کاهش بار برابر است با:

$$PRF_i(\omega) = \begin{cases} *\ for\ LMP^* \le \rho_i(\omega)\ \&\ \forall\omega, \forall i: \\ \quad INC(d_i(\omega)) - d_i(\omega).\rho_i(\omega) + \\ \quad \rho_i(\omega).\Delta d_i(\omega) - PEN(\Delta d_i(\omega)); \\ *\ for\ GT < \rho_i(\omega) < LMP^*\ \&\ \forall\omega, \forall i: \\ \quad INC(d_i(\omega)) - d_i(\omega).\rho_i(\omega) + \\ \quad (\rho_i(\omega) - GT).\Delta d_i(\omega) - PEN(\Delta d_i(\omega)); \\ *\ for\ \rho_i(\omega) \le GT\ \&\ \forall\omega, \forall i \\ \quad INC(d_i(\omega)) - d_i(\omega).\rho_i(\omega) - \\ \quad PEN(\Delta d_i(\omega)); \end{cases} \qquad (۶)$$

۳- اندازه‌گیری ریسک

همانگونه که در بخش اول اشاره شد، VaR و $CVaR$ دو روش متداول در اندازه‌گیری ریسک ناشی از عدم‌قطعیت در مسائل بهینه‌سازی اقتصادی هستند. یکی از پارامترهای اساسی در اندازه‌گیری این دو شاخص، سطح اطمینان است. بازه تغییرات سطح اطمینان معمولاً بین ۰/۹ تا ۰/۹۹ است. اگر سطح اطمینان برابر ۰/۹۵ باشد، به این معنی است که در ۹۵٪ سناریوها، بیشینه ضرر مورد انتظار مشترکین کمتر از VaR (و یا سود مشترکین بیشتر از VaR است)و در ۵٪ سناریوها، بیشینه ضرر مشترکین بیشتر از VaR است (و یا سود مشترکین کمتر از VaR است). برخی از مشکلات VaR (نظیر اینکه تابع توزیع احتمالاتی پارامتر شامل عدم‌قطعیت حتماً باید نرمال باشد)، محققین را بر آن داشت که از شاخص دیگری بنام $CVaR$ استفاده نمایند. اگر سطح اطمینان برابر با ۰/۹۵ فرض شود، $CVaR$ بدین معنی است که در ۵٪ بدترین حالت، سود مشترک کمتر از VaR نخواهد بود. تابع خطی و گسسته‌ای که برای $CVaR$ پیشنهاد می‌کنند بصورت زیر است:

$$Maximize_{\zeta_i, \gamma(\omega)} \quad \zeta_i - \frac{1}{1-\beta_i}\sum_{\omega=1}^{N_\omega}\pi_i(\omega)\gamma_i(\omega) \qquad (۷)$$

با توجه به اینکه:

$$\begin{aligned} &\zeta_i \le PRF_i(\omega) + \gamma_i(\omega); \quad \forall\omega, \forall i \\ &\gamma_i(\omega) \ge 0 \quad ; \quad \forall\omega, \forall i \end{aligned} \qquad (۸)$$

که در آن N_ω برابر با تعداد سناریوهاست. شاخص VaR در ساعت iام در رابطه ۷ با ζ_i نمایش داده شده است. $\pi_i(\omega)$ برابر با احتمال وقوع سناریو ω در ساعت iام و $\gamma_i(\omega)$ متغیری است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

اگر سود در سناریو ω و ساعت iام بزرگتر از ζ_i باشد، $\gamma_i(\omega)$ برابر با صفر است. در غیر اینصورت $\gamma_i(\omega)$ برابر با تفاضل ζ_i و $PRF_i(\omega)$ است.

با توجه به توضیحات ارائه شده در این بخش می‌توان تابع هدف ارائه شده در رابطه (۶) را با در نظر گرفتن ریسک بازنویسی نمود. بنابراین تابع هدف پیشنهادی برای برنامه پاسخ بار شامل دو قسمت است. قسمت اول که بیانگر سود مشترکین برنامه پاسخ بار است که شامل عایدی مشتریان از خرید انرژی، هزینه لازم برای خرید انرژی، جریمه‌ها و مشوق‌های دریافتی برای شرکت در برنامه پاسخ بار است. قسمت دوم شامل اندازه‌گیری ریسک مربوط به تغییرات سود مشترکین است. شاخص اندازه-گیری ریسک در تابع هدف، در ضریب وزنی α ضرب می‌شود ($0 \le \alpha \le \infty$).ضریب وزنی αدر واقع بیانگر توازن بین سود مشترک و شاخص اندازه‌گیری ریسک می‌باشد. مشترکین ریسک گریز ضریب وزنی α بزرگتری را انتخاب می‌کنند، به این ترتیب دستیابی به سود کمتر را با ریسک کمتر می‌پذیرند. در مقابل مشترکین ریسک‌پذیر ضریب وزنی αکوچکتری را انتخاب می-کنند، یعنی ریسک بیشتری می‌کنند تا سود بیشتری بدست آورند. بنابراین تعیین مقدار این شاخص بستگی به نوع مشترک دارد. در این مقاله، مقدار این شاخص بصورت معلوم فرض می-شود.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

با توجه به توضیحات ارائه شده، تابع سود مشترکین برنامه پاسخ بار برابر است با:

(۹)

$$Maximize_{d_i}$$
$$\sum_{i=1}^{24}\sum_{\omega=1}^{N_\omega}\gamma_i(\omega)\times[INC(d_i(\omega))-d_i(\omega).\rho_i(\omega)+\pi_i(\omega).\Delta d_i(\omega)-PEN(\Delta d_i(\omega))]$$
$$+\alpha\times\sum_{i=1}^{24}(\zeta_i-\frac{1}{1-\beta_i}\sum_{\omega=1}^{N_\omega}\pi_i(\omega)\gamma_i(\omega));\qquad \forall\omega,\forall i$$

در مدل پیشنهادی فرض شده است که میزان کاهش بار مصرف-کنندگان در ساعات مختلف محدود باشد یعنی:

$$\Delta d_i(\omega)\le\Delta d_{i,\max} \qquad (۱۰)$$

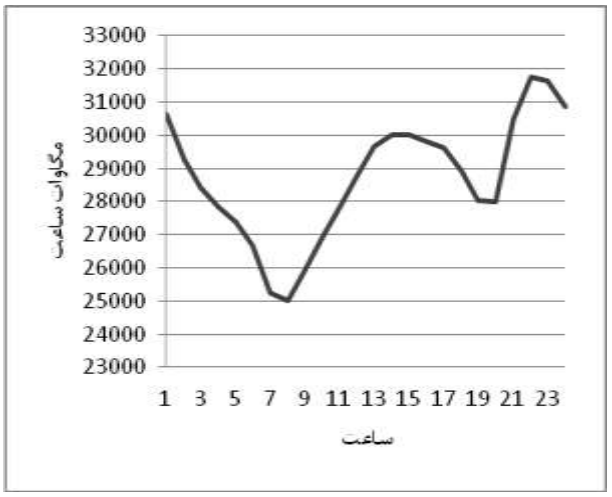
در ادامه به بررسی عملکرد مدل پیشنهادی و تفسیر نتایج بدست آمده بر روی یک مثال عددی پرداخته می‌شود.

۴- نتایج شبیه‌سازی

همانگونه که پیشتر اشاره شد، قیمت انرژی در بازار عمده‌فروشی مهمترین منبع عدم‌قطعیتی است که مصرف‌کنندگان با آن روبرو هستند. در این مقاله نیز قیمت انرژی به عنوان متغیر تصادفی در نظیر گرفته شده است. در مراجع مختلف روش‌های متفاوتی برای تولید سناریوهای مربوط به متغیر شامل عدم‌قطعیت ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به سری‌های زمانی، شبکه عصبی، مدل GARCH[۱۲]، مدل ورودی-خروجی مارکوف و روش‌های هوشمند اشاره کرد [۱۲]. در صورتیکه تعداد سناریوهای تولید شده زیاد باشد، می‌توان از تکنیک‌های کاهش سناریو نظیر فاصله کانتروویچ استفاده نمود.

در روش کانتروویچ، شاخص تصمیم‌گیری در مورد حذف یک سناریو فاصله کانتروویچ نامیده می‌شود. شاخص فاصله کانتروویچ برابر حاصلضرب فاصله سناریو کاندید حذف شدن تا هر یک از سناریوهای دیگر، در احتمال وقوع سناریو کاندید حذف است. با توجه به اینکه یک سناریو متشکل از چندین قیمت است (در این مقاله هر سناریو متشکل از ۲۴ قیمت برای ۲۴ ساعت شبانه‌روز است)، فاصله بین دو سناریو براساس نُرم بیان می‌شود. علت ضرب نمودن فاصله دو سناریو در احتمال وقوع آن این است که ممکن است فاصله بین دو سناریو کوچک باشد اما به دلیل احتمال بالای وقوع سناریو، حذف آن تاثیر زیادی بر روی نتایج مطالعات داشته باشد. در صورتیکه فاصله کانتروویچ دو سناریو از حد معینی کوچکتر باشد (این مقدار هرچه بزرگتر باشد، سناریوهای بیشتری حذف شده و در نتیجه سرعت شبیه سازی افزایش و دقت آن کاهش خواهد یافت)، دو سناریو با هم ترکیب شده و احتمال وقوع سناریو جدید برابر مجموع احتمال دو سناریو خواهد بود. روش فاصله کانتروویچ به دو دسته پسرو و پیشرو تقسیم می‌شود. در روش پیشرو در هر مرحله سناریو حذف شده انتخاب می‌شود و در روش پسرو در هر مرحله سناریویی که باید باقی بماند انتخاب می‌شود (در این مقاله از روش پیشرو استفاده شده است) [۱۳].

به منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی از یک مثال عددی که برگرفته از میزان بار و قیمت انرژی در اردیبهشت ۱۳۹۱ می-باشد، استفاده شده است. شکل (۲)، بیانگر منحنی بار شبکه سراسری برق ایران در تاریخ ۹۱/۰۲/۲۹ است [۱۴]. این منحنی بار در واقع بیانگر مقدار اولیه بار بدون اجرای برنامه پاسخ بار (d_i^*)است.

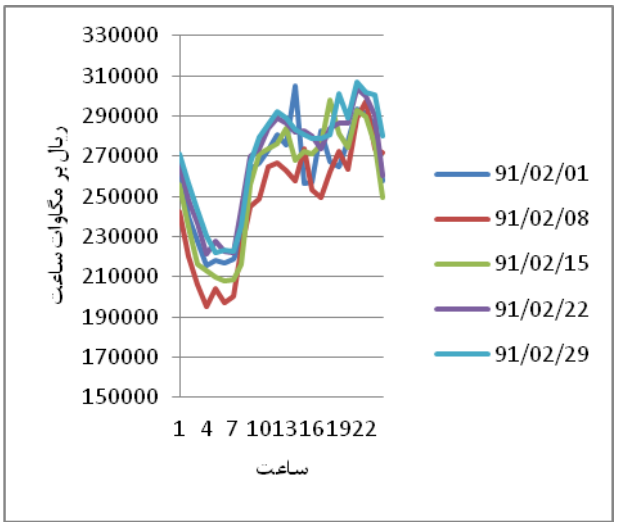


شکل (۲): منحنی باز روزانه در تاریخ ۹۱/۰۲/۲۹

همچنین شکل (۳)، قیمت متوسط انرژی را در بازار عمده‌فروشی ایران در تاریخ‌های ۹۱/۰۲/۰۱، ۹۱/۰۲/۰۸، ۹۱/۰۲/۱۵، ۹۱/۰۲/۲۲ و ۹۱/۰۲/۲۹ نشان می‌دهد[۱۴]. شکل (۴) مقدار کمینه، متوسط و بیشینه قیمت انرژی در شکل (۳) را در ساعات مختلف روز ارائه می‌نماید. در این مقاله درخت سناریو قیمت شامل ۲۴ دوره زمانی (۲۴ ساعت یک روز) است. احتمال و میزان قیمت بازار روی هر گره درخت در این دوره‌های زمانی بصورت زیر است:

- با احتمال ۰/۲۵ قیمت بازار برابر مقدار بیشینه است.
- با احتمال ۰/۵۰ قیمت بازار برابر مقدار متوسط است
- با احتمال ۰/۲۵ قیمت بازار برابر مقدار کمینه است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]



شکل (۳): منحنی تغییرات قیمت انرژی

شکل (۵)، بیانگر درخت سناریو است که در آن نقاط قرمزرنگ معرف حالت قیمت‌های بیشینه، نقاط آبی رنگ معرف حالت قیمت‌های متوسط و نقاط سبزرنگ معرف حالت قیمت‌های کمینه است. البته باید یادآوری نمود که هدف این مقاله پیش-بینی دقیق قیمت نیست. تعداد کل سناریوها برابر (۳^۲۴=۲۸۲۴۲۹۵۳۶۴۸۱) می‌باشد. بررسی تمامی این سناریوها بسیار وقت‌گیر است به ناچار باید از تکنیک کاهش سناریو استفاده نمود. همانگونه که پیشتر اشاره شد، در این مقاله از روش کاهش سناریو براساس فاصله کانترووِیچ استفاده شده است. الگوریتم حل مسئله بصورت زیر است:

۱) ابتدا سناریوهای قیمت تولید می‌شود.

۲) سپس سناریوها کاهش می‌یابد.

۳) سناریو اول قیمت انتخاب می‌شود (k=1).

۴) به ازای سناریو قیمت، مقدار بهینه بار بگونه‌ای تعیین می-شود که تابع هدف (۶) بیشینه شود.

۵) بررسی می‌شود که آیا جواب بدست آمده در $1-\beta$ درصد سناریوها موجب می‌شود که سود از مقدار معینی (VaR که با ζ نمایش داده شده است) بیشتر شود؟ اگر جواب مثبت باشد، مقدار تابع هدف (۹) به ازای مقدار بهینه بار سناریو k محاسبه می‌شود، در غیر اینصورت به سراغ سناریو بعدی میرویم (k=k+1).

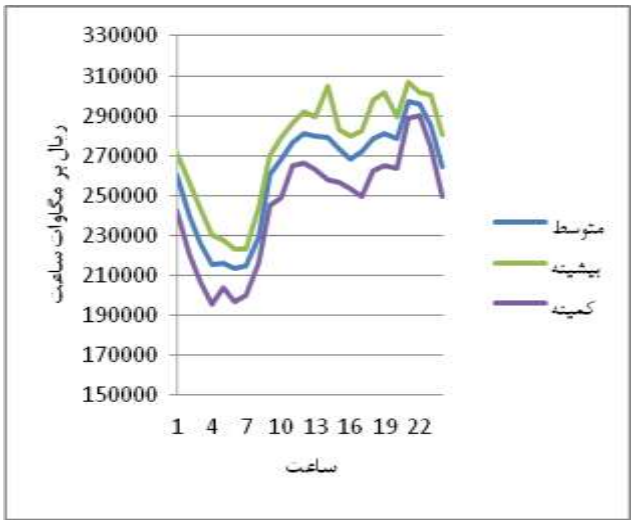
۶) آیا $k \le N_\omega$ است؟ در صورت مثبت بودن جواب به مرحله باز (۴) گردید. در غیر اینصورت به مرحله بعدی بروید.

۷) مقدار بهینه باری که به ازای آن تابع هدف (۹)، بیشینه است، بعنوان جواب مسئله انتخاب می‌شود. صفر بودن تابع هدف (۹) بدین معنی است که مسئله به ازای مقادیر β و ζ مفروضه جواب بهینه ندارد.

در این مقاله فرض می‌شود که مقدار جریمه برنامه‌پاسخ بار برای مصرف‌کنندگان برابر ۹۰۰۰۰ ریال بر مگاوات ساعت و هزینه ثابت تجهیزات تولید، انتقال و توزیع برابر ۳۵۰۰۰ ریال بر مگاوات ساعت و LMP^* برابر ۲۷۰۰۰۰ ریال بر مگاوات ساعت باشد [۱۱]. همچنین انعطاف‌پذیری بار نسبت به قیمت برای تمامی ساعات برابر ۰/۱۰- می‌باشد. شکل‌های (۶) و (۷)، نتایج شبیه‌سازی را برای سه سناریو نشان می‌دهند، که عبارتند از:

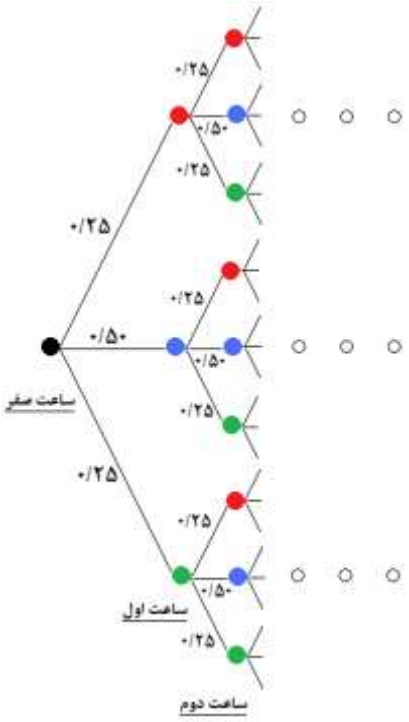
- سناریو۱: ضریب وزنی α، برابر صفر است.
- سناریو۲: ضریب وزنی α، برابر ۱۰ است.
- سناریو۳: ضریب وزنی α، برابر ۱است.

سناریو اول به منظور مقایسه و بررسی عملکرد مدل ارائه شده است. در این سناریو از عدم قطعیت قیمت چشم‌پوشی شده است و قیمت انرژی بصورت قطعی در نظر گرفته شده است. همچنین ضرایب تشویقی مشارکت در برنامه کاهش بار بصورت ثابت (براساس قیمت انرژی) در نظر گرفته شده است. روند نتایج بدست آمده در این سناریو مشابه نتایج مدل ارائه شده در [۶] می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود در حالتی که ریسک ناشی از تغییرات قیمت در نظر گرفته نمی‌شود (سناریو ۱)، میزان کاهش بار بیشتر است. زیرا با توجه به اینکه مشوق پرداختی ناشی از مشارکت مشترکین در برنامه پاسخ بار براساس قیمت انرژی است و قیمت انرژی در هر ساعت برابر با بیشینه قیمت در آن ساعت در نظر گرفته شده است، مشترکین انگیزه مالی بیشتری برای مشارکت در برنامه پاسخ بار خواهند داشت.



شکل (۴): منحنی مقادیر متوسط، بیشینه و کمینه قیمت انرژی

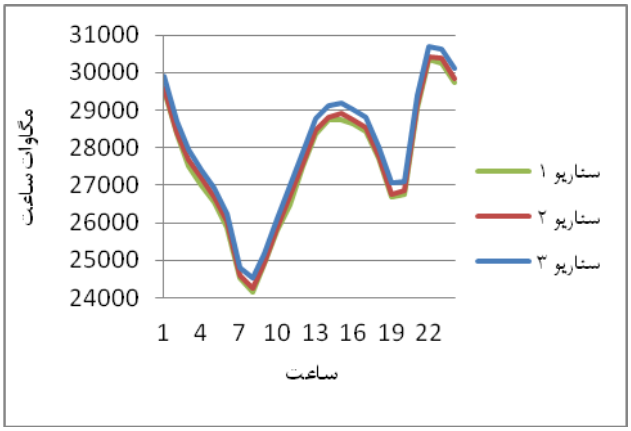
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]



شکل (۵): درخت سناریو قیمت انرژی

همانگونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، با کاهش ضریب‌وزنی α میزان مشارکت مشترکین در برنامه پاسخ بار افزایش می‌یابد و تغییرات بار مصرفی مشترکین نسبت به بار اولیه بیشتر می‌شود. زیرا با افزایش ضریب α،ریسک‌پذیری مشترکین کمتر شده و تمایل کمتری برای شرکت در برنامه پاسخ‌بار خواهند داشت.

همچنین در شکل (۷) مشاهده می‌شود که کاهش بار در ساعات پیک بیشتر است، زیرا در این ساعات قیمت انرژی بالاتر بوده و مشترکین بنا به رابطه (۳)، تشویق مالی بیشتری برای مشارکت در برنامه پاسخ بار خواهند داشت. از اینرو با هدف کسب سود بیشتر از برنامه پاسخ‌بار، مصرف خود را به بیشتر کاهش می‌دهند.



شکل (۶): منحنی بار مشترکین پس از اجرای برنامه پاسخ بار

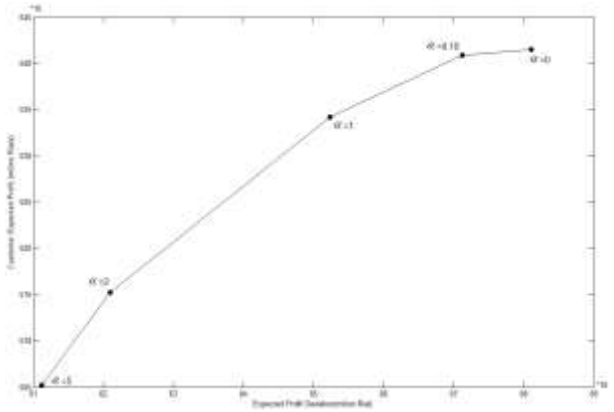


شکل (۷): میزان کاهش بار مشترکین پس از اجرای برنامه پاسخ بار

شکل (۸)، بیانگر سود بدست آمده توسط مشترکین در اثر شرکت در برنامه‌پاسخ بار بر حسب میزان انحراف سود، به ازای مقادیر مختلف ضریب وزنی ریسک است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب وزنی میزان ریسک‌پذیری مشترکین کمتر می‌شود، بنابراین مشارکت کمتری در برنامه پاسخ بار داشته و سود کمتری بدست می‌آورند.

البته همانگونه که مشاهده می‌شود، با کاهش ضریب وزنی ریسک، اگرچه سود مصرف‌کنندگان افزایش می‌یابد، اما میزان انحراف سود از مقدار مورد انتظار نیز افزایش می‌یابد. این در حالی است که اگر چه سود مصرف‌کنندگان ریسک‌گریز کمتر است اما میزان انحراف سود آنها از مقدار مورد انتظار نیز پایین‌تر بوده و در نتیجه مقدار پیش‌بینی شده سود قابل‌اطمینان‌تر است. بنابر نتایج شبیه‌سازی، افزایش ۱۱/۴۳ درصدی میزان انحراف سود باعث افزایش ۷/۱۸ درصدی سود مورد انتظار مشترکین می‌شود.

تعیین میزان ضریب وزنی ریسک بستگی رفتار مشترک برنامه پاسخ بار در رویارویی با ریسک دارد.



شکل۸: تغییرات سود مورد انتظار مشترکین بر حسب مقدار انحراف سود به ازای مقادیر مختلف ضریب وزنی ریسک

در جدول (۱)، سود مورد انتظار مشترکین برنامه پاسخ‌بار به ازای مقادیر مختلف ضریب وزنی ریسک (α) و سطح اطمینان (β)

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

ارائه شده است. همانگونه که انتظار می‌رود با افزایش هر یک از ضرایب ، مقدار سود مورد انتظار مشترکین کاهش می‌یابد.

جدول (۱): مقدار سود مورد انتظار مشترکین برنامه پاسخ بار به ازای مقادیر مختلف ضرایب α و β (برحسب میلیون ریال)

	$\alpha=0$	$\alpha=1$	$\alpha=5$
$\beta=0.93$	۶۱۱۸/۳	۶۰۴۳/۲	۵۷۳۲/۶
$\beta=0.95$	۵۴۱۵/۴	۵۳۴۲/۱	۵۰۵۲/۳
$\beta=0.97$	۵۱۱۲/۸	۵۰۲۷/۲	۴۶۸۱/۵

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی بر مبنای برنامه‌ریزی تصادفی برای پاسخ‌بار ارائه شد که در آن علاوه بر مشوق‌ها و جریمه‌های تعیین شده توسط قانون‌گذار، ریسک ناشی از عدم‌قطعیت قیمت نیز دیده شده است. همانگونه که نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد، با افزایش سطح‌اطمینان، ریسک‌پذیری مشترکین بیشتر شده و مشارکت بیشتری در برنامه پاسخ‌بار خواهند داشت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که یکی دیگر از عوامل موثر بر میزان مشارکت در برنامه پاسخ‌بار، ضریب وزنی ریسک است. مشترکین ریسک‌پذیر ضریب وزنی کوچکتری را انتخاب می‌کنند از اینرو تاثیر قسمت ریسک در تابع هدف کاهش می‌یابد. از اینرو مشارکت بیشتری در برنامه پاسخ بار خواهند داشت. برعکس مشترکین ریسک‌گریز، با انتخاب ضریب‌وزنی بالاتر، مشارکت کمتری در برنامه پاسخ‌بار خواهند داشت.

مراجع

[1] US Department of Energy, *Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them. Report to the United States Congress*, February 2006, accessed in September 2010, Available from: http://eetd.lbl.gov/EA/EMS/reports/congress-252d.pdf

[2] Aalami, H.A., Parsa Moghaddam, M., Yousefi, G.R., *"Modeling and prioritizing demand response programs in power markets"* Electric Power Systems Research, Vol. 80, pp. 426–435, 2009.

[3] Yusta, J.M., Khodr, H. M., Urdaneta, A. j., *"Optimal pricing of default customers in electrical distribution systems: Effect behavior performance of demand response models"* Electric Power Systems Research, Vol. 77, pp. 548-558, 2007.

[4] Dashti, R., Afsharnia, S., *"Demand response regulation modeling based on distribution system asset efficiency"* Electric Power Systems Research, Vol. 81, pp. 667-676, 2011.

[5] Conejo, A. J., Morales, J. M., Baringo, L., *"Real-time demand response model"* IEEE Transaction on Smart Grid, Vol.1, No.3, pp. 236-242, December 2010.

[6] Alami, H. A., Parsa Moghaddam, M., Yousefi, G. R., *"Demand response modeling considering I/C loads and capacity market programs"* Applied Energy, Vol. 87, pp. 243-250, 2010.

[7] Parvania, M., Fotuhi-Firuzabad, M., *"Demand response scheduling by stochastic SCUC"* IEEE Transaction on Smart Grid, Vol. 1, No. 1, pp. 89-98, June 2010.

[8] Rochlin, C., *"The Alchemy of demand response: Turning demand into supply"* The Electricity Journal, Vol.22, No. 9, pp. 10-25, November 2009.

[9] Arasteh, H.R., Parsa Moghadam, M., Sheikh-El-Eslam, M.K., Shafie-Khah, M. *"Bidding strategy in demand response exchange market"* Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 10, No. 2, pp. 1-9, Fall & Winter 2013.

[10] Rockafellar, R. T., Uryasev, S., *"Conditional value-at-risk for general loss distributions"* J. Bank. Fin., Vol. 26, No. 7, pp. 1443–1471, Jul. 2002.

[11] Walawalkar, R., Blumsack, S., Apt, J., Fernands, S., *"An economic welfare analysis of demand response in the PJM electricity market"* Energy Policy, Vol. 36, pp. 3692-3702, 2008.

[12] Weron, R., *Modeling and Forecasting Electricity Loads and Prices: A Statistical Approach*, New York: Wiley, 2006.

[13] Growe-Kuska, N., Heitsch, H., Romisch, W., *"Scenario Reduction and Scenario Tree Construction for Power Management Problems"* IEEE Power Tech Conference Proceedings, vol. 3, Bologna, 2003.

[۱۴] شرکت مدیریت شبکه، آمار روزانه قیمت انرژی و بار مصرف، www.igmc.ir

زیرنویس‌ها

[1] Inelastic
[2] Market Clearing Price
[3] Market Power
[4] Customer Benefit Function
[5] Analytical Hierarchy Process
[6] Social Welfare
[7] Value-at-Risk
[8] Conditional Value-at-Risk
[9] Confidence Level
[10] Trigger Point
[11] Generation and Transmission Cost
[12] Generalized Auto Regressive Conditional Heteroskedasticity

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol12- No.1 Spring & Summer 2015
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]