

مدیریت انرژی نیروگاه مجازی بر پایه بهینه‌سازی مقاوم با پایش پیشامدهای ریزشبه‌تکی: مطالعه موردی خروج تکی خط

سهیل کعبه پهنه‌کلای^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مرتضی رحیمیان^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران - soheilkaabe@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران - morteza.rahimiyan@shahroodut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی مقاوم برای مدیریت انرژی نیروگاه مجازی شامل ایستگاه‌های خورشیدی، سیستم‌های ذخیره‌ساز و متقاضیان انرژی واقع در ریزشبه‌تکی برق ارائه می‌شود. در مدل بهینه‌سازی مقاوم، پارامترهای غیرقطعی قیمت انرژی و تولید توان خورشیدی به صورت بازه‌های اطمینان مدل‌سازی می‌شوند. از طرفی، با تجهیز ریزشبه‌تکی به فناوری شبکه هوشمند، امکان ارتباط دوسویه بین سیستم مدیریت انرژی و اجزای ریزشبه‌تکی و همچنین بین سیستم مدیریت انرژی و شبکه اصلی فراهم می‌شود. سیستم مدیریت انرژی با پایش وضعیت اجزای ریزشبه‌تکی و به‌روزرسانی اطلاعات مرتبط، تصمیم‌های مناسب را اتخاذ می‌کند. به این ترتیب، سیستم مدیریت انرژی به‌طور زمان-حقیقی از پیشامدهای ریزشبه‌تکی مانند خروج خطوط مطلع می‌گردد و تصمیم‌های اتخاذ شده در ارتباط با تبادل با شبکه اصلی، تولید توان خورشیدی و قطع یا جابه‌جایی بار را اصلاح می‌کند. بازه‌های اطمینان قیمت انرژی الکتریکی و تولید توان خورشیدی بر اساس اطلاعات واقعی جمع‌آوری شده از بازار برق نیوانگلند آمریکا پیش‌بینی می‌شوند. اثر دقت پیش‌بینی، وقوع پیشامد و سطح اطمینان بر عملکرد مدل بهینه‌سازی مقاوم در یک ریزشبه‌تکی برق هوشمند بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی، عملکرد خوب مدل بهینه‌سازی مقاوم را در مقایسه با یک روش قطعی مرسوم آشکار می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت انرژی، نیروگاه مجازی، شبکه هوشمند، بهینه‌سازی مقاوم، پیشامد.

Robust Optimization-based Energy Management of Virtual Power Plant by Monitoring Microgrid Contingencies: Single-Line Outage Case Study

S. Kaabe Pahne Kolaei¹, MSc Student; M. Rahimiyan², Associate Professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, Email: soheilkaabe@gmail.com

2- Faculty of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, Email: morteza.rahimiyan@shahroodut.ac.ir

Abstract: In this paper, a robust optimization model is proposed for energy management of a Virtual Power Plant (VPP) including solar power stations, energy storage facilities and demands interconnected within a microgrid. In the robust optimization model, the uncertain parameters of solar power production and energy prices are modelled as confidence intervals. On the other hand, equipped with smart grid technology, the two-way communication between the energy management system and microgrid components, as well as between the energy management system and main grid is possible. The energy management system can make decisions while monitoring conditions of microgrid components and updating available information. Thus, the energy management system is informed about microgrid contingencies in real-time, and modifies its decisions related to power traded with the main grid, solar power production and power load shedding or shifting. The confidence intervals of energy price and solar energy production are forecasted based on real-world historical data collected from the New England electricity market, US. Impact of forecast accuracy, contingency occurrence and confidence level on the performance of the robust optimization model is investigated. Simulation results indicate good performance of the robust optimization model compared with a conventional deterministic method.

Keywords: Energy management, virtual power plant, smart grid, robust optimization, contingency.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۰۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۰۴

نام نویسنده مسئول: مرتضی رحیمیان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شاهرود - بلوار دانشگاه - دانشگاه صنعتی شاهرود - دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

متقاضیان انرژی، بستری مناسب جهت بهره‌برداری کاراتر از نیروگاه مجازی را فراهم می‌آورد [۸، ۹].

در مرجع [۱۰] یک مدل قیمت‌دهی در بازار روز قبل و بازار تنظیم به‌منظور حداکثر کردن سود مورد انتظار نیروگاه مجازی ارائه شده است. مسئله قیمت‌دهی به‌صورت برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مدل شده است. در مرجع [۱۱] مدل بهینه‌سازی دوسطحی تصادفی جهت شرکت نیروگاه مجازی در بازار روز قبل معرفی شده است. تابع هدف مدل پیشنهادی، حداکثرسازی سود نیروگاه مجازی در بازار روز قبل و حداقل‌سازی هزینه‌های پیش‌بینی‌شده عدم تعادل زمان-حقیقی تولید و مصرف انرژی الکتریکی می‌باشد. در مرجع [۱۲] یک مدل بهینه‌سازی مقاوم دومرحله‌ای برای پیشنهاد قیمت نیروگاه مجازی در بازارهای روز قبل و زمان-حقیقی ارائه شده است. عملی بودن تصمیمات اتخاذشده و بهره‌برداری از زیرساخت شبکه هوشمند جهت غلبه بر عدم قطعیت‌ها از ویژگی‌های برجسته این روش است.

با توجه به تعریف نیروگاه مجازی، مدیریت انرژی آن را می‌توان در دو بخش مدیریت انرژی خانه‌های هوشمند و ریزشبکه‌های هوشمند تقسیم‌بندی کرد. بیش‌تر کارهای انجام‌شده در حوزه مدیریت انرژی خانه‌های هوشمند با توجه به مفهوم پاسخ‌گویی بار در مدیریت انرژی بر ارائه جدول زمان‌بندی استفاده از وسایل درون ساختمان تمرکز داشته‌اند. در حوزه ریزشبکه‌های هوشمند با توجه به نفوذ منابع تولید پراکنده، به‌ویژه منابع انرژی تجدیدپذیر، استفاده از سیستم‌های ذخیره و بارهای پاسخ‌گو به‌منظور مدیریت ماهیت متغیر تولید این منابع موردتوجه قرار گرفته است.

در مرجع [۱۳] مدلی برای مدیریت انرژی خانه هوشمند با استفاده از برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح به‌منظور کاهش هزینه‌ها و آلودگی ارائه شده است که می‌تواند در چهارچوب برنامه‌ریزی زمان-حقیقی، مؤلفه‌های یک خانه هوشمند شامل وسایل هوشمند، سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و تولیدات پراکنده را مدیریت نماید. در مرجع [۱۴] برنامه‌ریزی انرژی مصرف‌کنندگان خانگی دارای سیستم فتوولتائیک بدون استفاده از سیستم ذخیره‌ساز تحت سیاست‌های مختلف قیمت‌گذاری انجام شده است. الگوریتم مدیریت انرژی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی فرمول‌بندی شده است که در آن عدم قطعیت منبع خورشیدی به‌شبهه پیش‌بینی نقطه‌ای مدل شده است. در مرجع [۱۵] یک مدل ریاضی از نوع برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح به‌منظور حداقل کردن هزینه برق خانه هوشمند ارائه شده است. این خانه دارای تجهیزات خانگی قابل کنترل و مجهز به منابع ذخیره‌ساز و تجدیدپذیر می‌باشد.

با توجه به مفهوم بارهای پاسخ‌گو در مرجع [۱۶] مدلی برای مدیریت انرژی یک ریزشبکه هوشمند شامل بارهای پاسخ‌گو، منابع تولید پراکنده، باتری‌ها و خودروهای الکتریکی ارائه شده است. با استفاده از جابه‌جایی بار، تلاش می‌شود تا تراکم در خطوط برطرف شود. عدم قطعیت‌های موجود در قیمت انرژی الکتریکی و میزان تولید

مفهوم نیروگاه مجازی نخست در سال ۱۹۹۷ میلادی با اهداف رؤیت‌پذیری منابع تولید پراکنده، فراهم آوردن رابط مناسب برای مؤلفه‌های محلی، فعال‌سازی راهبردهای کنترل پراکنده و استفاده بهینه از ظرفیت موجود، ارائه شد [۱]. به مجموعه واحدهای تولید پراکنده، بارهای پاسخ‌گو و سیستم‌های ذخیره انرژی که به‌صورت یک نهاد واحد بهره‌برداری می‌شوند، نیروگاه مجازی می‌گویند. با توجه به مزایای منابع تولید پراکنده، بارهای پاسخ‌گو و سیستم ذخیره‌ساز انرژی، یک نیروگاه مجازی می‌تواند جایگزین مناسبی برای نیروگاه‌های مرسوم فسیلی باشد [۲].

نیاز به اصلاح، تغییر و جابه‌جایی مصرف انرژی الکتریکی، پاسخ‌گویی بار را به‌عنوان یک راهکار کارآمد موردتوجه قرار داده است. بار پاسخ‌گو اهداف امنیتی شبکه مانند حفظ تعادل، قابلیت اطمینان سیستم و مدیریت ریسک را از طریق کاهش و یا افزایش تقاضا در یک دوره زمانی کوتاه‌مدت و کاهش توسعه ظرفیت تولید و انتقال اضافی در یک دوره زمانی بلندمدت دنبال می‌کند. استفاده از بارهای پاسخ‌گو یک راهکار برای افزایش نفوذ و یکپارچه‌سازی منابع تولید پراکنده در سیستم قدرت در قالب نیروگاه مجازی و به‌عنوان ابزاری در جهت تسهیل مدیریت انرژی برای غلبه بر چالش‌های ناشی از ماهیت تصادفی منابع انرژی تجدیدپذیر مطرح است [۳، ۴].

مدیریت انرژی یک مفهوم عام و بسیار گسترده و شامل همه اقداماتی است که برای تضمین مصرف حداقل میزان انرژی در فعالیت‌های مختلف برنامه‌ریزی و اجرا می‌شود [۵]. تجارت، صنعت و سازمان‌ها در دو دهه اخیر تحت فشار زیاد اقتصادی و زیست‌محیطی بوده‌اند. رقابت اقتصادی در بازار جهانی و افزایش وضع قوانین و استانداردهای زیست‌محیطی به‌منظور کاهش آلاینده‌های آب‌وهوا مهم‌ترین عوامل لحاظ‌شده در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری همه سازمان‌ها بوده است. مدیریت انرژی یک ابزار مهم در کمک به نهادهای گوناگون برای کاهش هزینه‌ها در جهت برآورده کردن این اهداف ضروری به‌منظور بقا و موفقیت در بلندمدت است [۶، ۷].

مدیریت انرژی نیروگاه مجازی با چالش‌های اساسی مواجه است که موجب پیچیده شدن این موضوع می‌شوند. از جمله این چالش‌ها می‌توان به عدم قطعیت در میزان تولید، مصرف، قیمت انرژی و دسترس‌پذیری اجزای شبکه اشاره کرد. شبکه هوشمند توانایی سیستم مدیریت انرژی را در زمینه‌های غلبه بر عدم قطعیت‌ها، تجمیع منابع تجدیدپذیر، پاسخ‌گویی بار، پایش و کنترل شبکه افزایش می‌دهد. شبکه هوشمند با پایش و اندازه‌گیری پیوسته وضعیت بهره‌برداری شبکه، اطلاعات لحظه‌ای ارزشمندی از وضعیت شبکه مانند میزان تولید، مصرف، توان خطوط و دسترس‌پذیری مؤلفه‌های شبکه در اختیار بهره‌برداران قرار می‌دهد. همچنین با ایجاد ارتباط دوسویه میان سیستم مدیریت انرژی و کاربران ریزشبکه مانند تولیدکنندگان و

پراکنده تصادفی و قیمت انرژی، پارامترهای غیرقطعی در مدل مقاوم به صورت بازه‌های اطمینان مدل‌سازی می‌شوند.

با تجهیز ریزشبهه به فناوری شبکه هوشمند، امکان ارتباط دوسویه بین سیستم مدیریت انرژی و کاربران ریزشبهه و همچنین بین سیستم مدیریت انرژی و شبکه اصلی فراهم می‌شود. سیستم مدیریت انرژی با پایش وضعیت اجزای ریزشبهه و به‌روزرسانی اطلاعات مرتبط، تصمیم‌های مناسب را اتخاذ می‌کند. با در نظر گرفتن امکان وقوع پیشامد و تجهیز ریزشبهه به ابزارهای لازم برای قابلیت پایش وضعیت آن، اثر وقوع پیشامدها در یک ریزشبهه هوشمند بر مدیریت انرژی مقاوم و قطعی نیروگاه مجازی موردبررسی قرار می‌گیرد.

نوآوری‌های این مقاله عبارت‌اند از:

- الف- ارائه مدل‌های قطعی و مقاوم به‌منظور مدیریت انرژی نیروگاه مجازی با قابلیت پایش پیشامدهای ریزشبهه هوشمند (مانند خروج تکی و یا همزمان خطوط و منابع انرژی)؛
- ب- تحلیل اثرگذاری دقت پیش‌بینی، وقوع پیشامد و سطح اطمینان بر عملکرد مدل مقاوم؛
- ج- مقایسه عملکرد مدل‌های قطعی و مقاوم در یک مطالعه موردی واقع‌بینانه.

۲- مدل‌سازی ریاضی مسئله مدیریت انرژی

۲-۱- تشریح مسئله

نیروگاه مجازی شامل مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده و بارهای پاسخ‌گو است که در یک ریزشبهه مجهز به فناوری شبکه هوشمند واقع شده‌اند. بارهای پاسخ‌گو به‌عنوان متقاضیان انرژی مانند یک شهرک صنعتی، دانشکده‌های یک دانشگاه و یا یک ناحیه مسکونی می‌توانند در پاسخ به تغییر قیمت انرژی، مصرف انرژی خود را تغییر دهند.

مسئولیت تأمین انرژی متقاضیان بر عهده سیستم مدیریت انرژی می‌باشد. سیستم مدیریت انرژی می‌تواند انرژی موردنیاز متقاضیان را از طریق شبکه اصلی و ایستگاه‌های خورشیدی به‌عنوان منبع تولید پراکنده تصادفی تأمین نماید. در کنار هر یک از ایستگاه‌های خورشیدی یک سیستم ذخیره انرژی وجود دارد که سیستم مدیریت انرژی را قادر می‌سازد در مواقع مناسب، انرژی را ذخیره یا تولید کند. مجموعه بارهای پاسخ‌گو، منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره در قالب نیروگاه مجازی، قابلیت خرید انرژی از شبکه اصلی در ساعات ارزان‌قیمت انرژی و فروش به آن در ساعات گران را دارا می‌باشند.

فرض می‌شود نیروگاه مجازی در تعیین قیمت بازار نقشی ندارد و به‌عبارتی، پذیرنده قیمت انرژی لحاظ می‌شود. سیستم مدیریت انرژی با بازار عمده‌فروشی انرژی الکتریکی در ارتباط است و قیمت انرژی اعلام‌شده توسط شبکه اصلی به‌عنوان قیمت بازار در نظر گرفته می‌شود. نیروگاه مجازی مالک ایستگاه‌های خورشیدی است و بنابراین برای دریافت انرژی خورشیدی هزینه‌ای پرداخت نمی‌کند.

منابع انرژی نو به‌وسیله تعداد محدودی سناریو مدل‌سازی می‌شود. مسئله مدیریت انرژی به‌وسیله روش برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح مدل‌سازی می‌شود.

تأثیر استفاده از شبکه هوشمند بر روی سیستم مدیریت انرژی در مراجع [۱۷-۱۹] موردبررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۷] یک مسئله برنامه‌ریزی خطی برای مدیریت انرژی بار پاسخ‌گو ارائه شده است. با استفاده از فناوری شبکه هوشمند، سیستم مدیریت انرژی به‌طور ساعتی از قیمت شبکه آگاه و مصرف انرژی متقاضیان را که دارای قیودی همچون حداقل انرژی مصرف روزانه، محدودیت ساعتی افزایش و کاهش میزان انرژی مصرفی می‌باشد، بر اساس تابع منفعت آن، قیمت شبکه و پیش‌بینی وضعیت قیمت در ساعات پیش رو تعیین می‌کند. عدم قطعیت موجود در قیمت انرژی الکتریکی انرژی به‌وسیله روش بهینه‌سازی مقاوم مدل‌سازی می‌شود.

با توسعه مدل ارائه‌شده توسط [۱۷]، در مرجع [۱۸] سیستم مدیریت انرژی یک نیروگاه مجازی مطرح شده است. این نیروگاه شامل مجموعه بارهای پاسخ‌گو، منابع تولید پراکنده شامل مزارع بادی و سیستم‌های ذخیره‌ساز است که از طریق یک ریزشبهه به هم متصل می‌باشند. عدم قطعیت موجود در قیمت انرژی الکتریکی و تولید مزارع بادی به‌وسیله بهینه‌سازی مقاوم مدل‌سازی شده‌اند. برای پیاده‌سازی الگوریتم مدیریت انرژی از برنامه‌ریزی خطی و پخش بار بهینه مستقیم استفاده شده است. در مرجع [۱۹]، میزان اثرگذاری دقت پیش‌بینی و محدودیت‌های فنی شبکه بر مدیریت انرژی نیروگاه مجازی با و بدون حضور شبکه هوشمند بررسی شده است. محدودیت‌های سیستم ذخیره‌ساز، تولید تصادفی منابع پراکنده، قیود مربوط به شبکه انتقال انرژی و بارهای پاسخ‌گو در این مدل لحاظ شده‌اند. برای مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در قیمت انرژی الکتریکی و تولید ایستگاه‌های خورشیدی از روش پیش‌بینی نقطه‌ای استفاده شده است.

در تحقیقات بررسی شده به موضوع امکان وقوع پیشامد در مدیریت انرژی نیروگاه مجازی پرداخته نشده است. وقوع پیشامدهای مختلف مانند وقوع خرابی‌ها، حوادث طبیعی و غیرطبیعی می‌تواند اجزای شبکه مانند خطوط انتقال و منابع تولید انرژی را از دسترس خارج کند. به‌علت وجود محدودیت در تعداد خطوط انتقال و منابع تولید در ریزشبهه‌ها، همچنین شعاعی بودن نحوه اتصال خطوط در بعضی از آن‌ها، وقوع پیشامد و خروج مؤلفه‌های سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲۰].

در این مقاله، با توسعه مدل پیشنهادی در مرجع [۱۹] و افزودن امکان پایش پیشامد، در ابتدا یک مدل قطعی به‌منظور مدیریت انرژی نیروگاه مجازی ارائه می‌شود. در مدل قطعی از پیش‌بینی نقطه‌ای برای مدل‌سازی متغیرهای غیرقطعی استفاده شده است. سپس با استفاده از روش بهینه‌سازی مقاوم، یک مدل مقاوم برای مدیریت انرژی نیروگاه مجازی ارائه می‌شود. جهت غلبه بر عدم قطعیت تولید منابع تولید

حد بالای افزایش توان مصرفی متقاضی z	R_j^U	با استفاده از فناوری شبکه هوشمند، ارتباط دوسویه زمان-حقیقی
حد بالای کاهش توان مصرفی متقاضی z	R_j^P	میان سیستم مدیریت انرژی و کاربران در ریزشکبه (مانند متقاضیان و
باسی که خط k از آن خارج می‌شود	$o(k)$	منابع تأمین انرژی) وجود دارد. سیستم مدیریت انرژی اطلاعات مربوط
باسی که خط k به آن وارد می‌شود	$d(k)$	به تأمین‌کنندگان انرژی (شامل قیمت انرژی و میزان توان در دسترس)
محدودیت تبادل توان با شبکه اصلی در باس n	$P_n^{MG,max}$	را چندین دقیقه پیش از موعد تحویل انرژی دریافت می‌کند
ظرفیت خط k	$P_k^{L,max}$	(به‌عنوان مثال ۱۰ دقیقه [۱۸]). به‌طور هم‌زمان، متقاضیان مطابق با
حداقل توان مصرفی متقاضی z	$P_j^{D,min}$	تابع مطلوبیت ^۱ اطلاعات مربوط به مصرف در ساعات پیش رو (شامل
حداکثر توان مصرفی متقاضی z	$P_j^{D,max}$	میزان مصرف و سطح مطلوبیت) را برای سیستم مدیریت انرژی ارسال
حداقل انرژی قابل ذخیره در واحد ذخیره i	$E_i^{ST,min}$	می‌کنند.
حداکثر انرژی قابل ذخیره در واحد ذخیره i	$E_i^{ST,max}$	سیستم مدیریت انرژی مجهز به ابزار پیش‌بینی قیمت انرژی و
ضریب جریمه کاهش حداقل انرژی مصرفی روزانه و	F^{shed}	میزان توان در دسترس منابع تولید پراکنده در دوره‌های زمانی پیش
کاهش حداقل توان مصرفی		رو می‌باشد. بر پایه این اطلاعات، سیستم مدیریت انرژی میزان بهینه
پارامترهای غیرقطعی		مصرف، ذخیره و تبادل انرژی را برای هر دوره زمانی t و دوره‌های
قیمت انرژی شبکه اصلی در دوره زمانی h	C_h^{MG}	پس‌از آن تعیین می‌کند و تصمیمات اتخاذشده را چند دقیقه قبل از
توان در دسترس ایستگاه خورشیدی i در دوره زمانی h	$P_{i,h}^{SO}$	موعد تحویل انرژی برای متقاضیان و تأمین‌کنندگان انرژی ارسال
توان تولیدی ایستگاه خورشیدی i در دوره زمانی h	$P_{i,h}^{SO}$	می‌کند (به‌عنوان مثال ۵ دقیقه [۱۸]). این تصمیمات به‌گونه‌ای اتخاذ
توان مصرفی بار j در دوره زمانی h	$P_{j,h}^D$	می‌شوند که رفاه اجتماعی نیروگاه مجازی (شامل تفاضل هزینه تأمین
توان تأمین‌شده توسط واحد ذخیره‌ساز i در دوره زمانی h	$P_{i,h}^{ST,out}$	انرژی از درآمد متقاضیان) حداکثر شود. دقت شود که تنها تصمیمات
توان ذخیره‌شده توسط واحد ذخیره‌ساز i در دوره زمانی h	$P_{i,h}^{ST,in}$	اتخاذشده برای دوره زمانی t ، اجرایی می‌شوند و تصمیمات دوره‌های
توان فروخته‌شده به (منفی)/خریده‌شده از (مثبت) شبکه اصلی در دوره زمانی h	p_h^{MG}	بعدی تنها یک دید مناسب نسبت به آینده برای عملکرد بهتر در دوره
توان فروخته‌شده به (منفی)/خریده‌شده از (مثبت) شبکه اصلی در دوره زمانی h	$p_{n,h}^{MG}$	زمانی t به سیستم مدیریت انرژی می‌دهد.
توان تبدلی با شبکه اصلی که در مرحله تصمیم‌گیری دوره زمانی h تعیین می‌شود	$p_h^{MG,dec}$	اطلاعات مربوط به وضعیت دسترس‌پذیری مؤلفه‌های شبکه شامل
توان تبدلی با شبکه اصلی که در مرحله توزیع توان دوره زمانی h تعیین می‌شود	$p_h^{MG,dis}$	منابع تولید و خطوط انتقال مطابق با دوره زمانی برنامه‌ریزی در اختیار
توان انتقالی از خط k در دوره زمانی h	$p_{k,h}^L$	سیستم مدیریت انرژی قرار داده می‌شود. در صورت وقوع پیشامد،
انرژی خالص ذخیره‌شده در واحد ذخیره‌ساز i در دوره زمانی h	$e_{i,h}^{ST}$	سیستم مدیریت انرژی تصمیمات اتخاذشده در مرحله قبل را جهت
زاویه ولتاژ باسی که خط k به آن وارد می‌شود در دوره زمانی h	$\delta_{d(k),h}$	توزیع توان اصلاح می‌کند. فرض می‌شود که پیشامدهای ریزشکبه در
زاویه ولتاژ باسی که خط k از آن خارج می‌شود در دوره زمانی h	$\delta_{o(k),h}$	ابتدای دوره برنامه‌ریزی رخ دهند.
زاویه ولتاژ باس n در دوره زمانی h	$\delta_{n,h}$	۲-۲- نمادها و علائم
میزان انرژی کاهش‌یافته از حداقل انرژی مصرفی روزانه متقاضی z	$e_j^{D,shed}$	فهرست علائم و اختصارات استفاده‌شده در این مقاله به‌صورت زیر
میزان توان کاهش‌یافته از حداقل توان مصرفی متقاضی z در دوره زمانی h	$l_{j,h}^{shed}$	می‌باشد:
مجموعه باس‌ها	Ω^B	پارامترها
مجموعه باس‌های متصل به شبکه اصلی	Ω^{MG}	η_i^{out} بازده تبدیل انرژی خروجی از واحد ذخیره‌ساز i
		η_i^{in} بازده تبدیل انرژی ورودی به واحد ذخیره‌ساز i
		N_D تعداد متقاضیان در ارتباط با سیستم مدیریت انرژی
		N_{SO} تعداد ایستگاه‌های خورشیدی
		N_t تعداد دوره‌های زمانی در روز برنامه‌ریزی (۲۴، ۴۸، ۹۶ و ۲۸۸ به‌ترتیب برای دوره زمانی ۶۰، ۳۰، ۱۵ و ۵ دقیقه)
		X_k رآکتانس خط k
		$U_{j,h}^D$ تابع مطلوبیت متقاضی z در دوره زمانی h
		$E_j^{D,min}$ حداقل انرژی مصرفی موردنیاز روزانه متقاضی z
		α ضریب زمان (برحسب ساعت)

$$e_{i,h}^{ST} = e_{i,h-1}^{ST} + \eta_i^{in} p_{i,h}^{ST,in} \alpha - \frac{P_{i,h}^{ST,out}}{\eta_i^{out}}, \forall h \geq t, i \quad (14)$$

$$E_i^{ST,min} \leq e_{i,h}^{ST} \leq E_i^{ST,max}, \forall h \geq t, i \quad (15)$$

$$p_{i,t}^{SO} \leq \bar{P}_{i,t}^{SO}, \forall i \quad (16)$$

$$P_{i,h}^{SO} \leq \{P_{i,h}^{SO}\}, \forall h > t, i \quad (17)$$

$$P_{j,h}^D, P_{i,h}^{SO}, P_{i,h}^{ST,in}, P_{i,h}^{ST,out} \geq 0, \forall h \geq t, j, i \quad (18)$$

هدف سیستم مدیریت انرژی، بیشینه کردن سود نیروگاه مجازی است. بنابراین، تابع هدف (۱) به صورت کمینه‌سازی قرینه سود متقاضیان در دوره t و $N_t - t$ دوره بعدی تعریف شده است. برای کاهش حداقل انرژی مصرفی روزانه ($e_j^{D,shed}$) و کاهش حداقل توان مصرفی ($l_{j,h}^{shed}$) یک ضریب جریمه (F^{shed}) به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است تا میزان این کاهش کمترین مقدار ممکن باشد. یک متقاضی در روز نمی‌تواند از مقدار معینی انرژی کم‌تر مصرف کند که قید (۲) این محدودیت را اعمال می‌کند. قید (۳) محدودیت تغییر توان مصرفی متقاضیان در هر دوره را نشان می‌دهد و قید (۴) بیشینه و کمینه توان مصرفی آن‌ها را مشخص می‌سازد. قیود (۵)، (۶) و (۷) تعادل توان را به ترتیب در باس‌های متصل به شبکه اصلی، باس‌های دارای ایستگاه خورشیدی و واحد ذخیره و سایر باس‌ها برقرار می‌سازند. در معادله (۸) توان فروخته‌شده به (منفی) و یا خریده‌شده از (مثبت) شبکه اصلی به دست می‌آید. محدودیت تبادل توان با شبکه اصلی نیز در (۹) نشان داده شده است. با استفاده از رابطه (۱۰) توان انتقالی خطوط محاسبه می‌شود. قید (۱۱) محدودیت ظرفیت خطوط را اعمال می‌کند. قید (۱۲) زاویه ولتاژ باس‌ها را مشخص می‌کند و معادله (۱۳) زاویه ولتاژ باس مرجع را برابر صفر قرار می‌دهد. معادله (۱۴) میزان انرژی ذخیره‌شده در واحد ذخیره را نشان می‌دهد. میزان انرژی ذخیره‌شده در دوره فعلی از برآیند انرژی ذخیره‌شده در دوره قبل، انرژی واردشده ($p_{i,h}^{ST,in} \alpha$) و یا خارج‌شده ($p_{i,h}^{ST,out} \alpha$) از واحد ذخیره به دست می‌آید. ذخیره و یا تولید انرژی الکتریکی در باتری‌ها توسط فرآیندهای شیمیایی انجام می‌گیرد و پارامترهای η_i^{out} بازدهی این فرآیندها را نشان می‌دهند [۲۱]. همچنین واحد ذخیره دارای محدودیت ظرفیت و تولید انرژی الکتریکی است که قید (۱۵) محدودیت‌های این واحد را اعمال می‌نماید قیود (۱۶) و (۱۷) محدودیت توان خورشیدی در دسترس را برای هر ایستگاه خورشیدی به ترتیب در دوره t و $N_t - t$ دوره بعدی اعمال می‌کند. فرض بر این است که مقدار واقعی توان در دسترس ایستگاه خورشیدی در دوره t ($\bar{P}_{i,t}^{SO}$) مشخص است. ولی توان خورشیدی در دسترس برای $N_t - t$ دوره بعدی دارای عدم قطعیت است. همچنین در صورت عدم توانایی در استفاده از توان مازاد خورشیدی یا ذخیره آن، این قیود امکان قطع تولید توان مازاد را در اختیار سیستم مدیریت انرژی قرار می‌دهد. قید (۱۸) کران پایین متغیرهای نامنفی را اعمال می‌کند.

Ω^{SS} مجموعه باس‌های دارای ایستگاه‌های خورشیدی و

واحدهای ذخیره‌ساز

Θ_n^{SS} مجموعه واحدهای دارای تولید توان خورشیدی و واحد

ذخیره‌ساز واقع شده در باس n

Θ_n^D مجموعه متقاضیان واقع شده در باس n

وجود علامت‌های \sim ، $-$ ، \wedge و $\{ \}$ بر روی پارامترها و متغیرها

به ترتیب نشان‌دهنده مقدار واقعی، مقدار نامی متغیر تصادفی، اختلاف میان مقدار نامی متغیر تصادفی و کران بالا یا پایین بازه پیش‌بینی و مقدار پیش‌بینی روش نقطه‌ای می‌باشند. همچنین در فرمول‌بندی، متغیرهای تصمیم‌گیری با حروف کوچک و سایر پارامترها با حروف بزرگ لاتین نشان داده شده‌اند.

۳-۲- مدل قطعی

مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی برای تصمیم‌گیری در دوره t به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min}_{\Omega} \bar{C}_t^{MG} p_t^{MG} \alpha + \sum_{j=1}^{N_D} [l_{j,t}^{shed} \alpha] F^{shed} - \sum_{j=1}^{N_D} U_{j,t}^D (p_{j,t}^D \alpha) + \\ \sum_{h=t+1}^{N_t} \left[\{C_h^{MG}\} p_h^{MG} \alpha + \sum_{j=1}^{N_D} [l_{j,h}^{shed} \alpha] F^{shed} - \sum_{j=1}^{N_D} U_{j,h}^D (p_{j,h}^D \alpha) \right] \\ + \sum_{j=1}^{N_D} e_j^{D,shed} F^{shed} \end{aligned} \quad (1)$$

مقید به:

$$\sum_{h=1}^{t-1} \bar{P}_{j,h}^D \alpha + p_{j,t}^D \alpha + \sum_{h=t+1}^{N_t} p_{j,h}^D \alpha \geq (E_j^{D,min} - e_j^{D,shed}), \forall j \quad (2)$$

$$-R_j^D \leq p_{j,h}^D - p_{j,h-1}^D \leq R_j^U, \forall h \geq t, j \quad (3)$$

$$P_j^{D,min} - l_{j,h}^{shed} \leq p_{j,h}^D \leq P_j^{D,max}, \forall h \geq t, j \quad (4)$$

$$P_{n,h}^{MG} - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h}^L + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h}^L = \sum_{j \in \Theta_n^D} p_{j,h}^D, \forall h \geq t, n \in \Omega^{MG} \quad (5)$$

$$\sum_{i \in \Omega_n^{SS}} (P_{i,h}^{SO} + P_{i,h}^{ST,out}) - \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h}^L + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h}^L = \sum_{j \in \Theta_n^D} p_{j,h}^D + \sum_{i \in \Theta_n^{SS}} p_{i,h}^{ST,in}, \forall h \geq t, n \in \Omega^{SS} \quad (6)$$

$$- \sum_{k|o(k)=n} p_{k,h}^L + \sum_{k|d(k)=n} p_{k,h}^L = \sum_{j \in \Theta_n^D} p_{j,h}^D, \forall h \geq t, n \in \Omega^B \setminus n \in \Omega^{SS}, \Omega^{MG} \quad (7)$$

$$P_h^{MG} = \sum_{n \in \Omega^{MG}} P_{n,h}^{MG}, \forall h \geq t \quad (8)$$

$$-P_n^{MG,max} \leq P_{n,h}^{MG} \leq P_n^{MG,max}, \forall h \geq t, n \in \Omega^{MG} \quad (9)$$

$$P_{k,h}^L = \frac{1}{X_{k,h}} (\delta_{o(k),h} - \delta_{d(k),h}), \forall h \geq t \quad (10)$$

$$-P_{k,h}^{L,max} \leq p_{k,h}^L \leq P_{k,h}^{L,max}, \forall h \geq t \quad (11)$$

$$-\pi \leq \delta_{n,h} \leq \pi, \forall n \in \Omega^B, h \geq t \quad (12)$$

$$\delta_{n,h} = 0, \forall h \geq t, n : \text{reference bus} \quad (13)$$

۲-۴- مدل مقاوم

با استفاده از روش بهینه‌سازی مقاوم، مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی برای تصمیم‌گیری در دوره t به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \tilde{C}_t^{MG} p_t^{MG} \alpha + \sum_{j=1}^{N_D} [I_{j,t}^{shed} \alpha] F^{shed} - \sum_{j=1}^{N_D} U_{j,t}^D (p_{j,t}^D \alpha) + \\ & \sum_{h=t+1}^{24} \left[\tilde{C}_h^{MG} p_h^{MG} \alpha + \sum_{j=1}^{N_D} [I_{j,h}^{shed} \alpha] F^{shed} - \sum_{j=1}^{N_D} U_{j,h}^D (p_{j,h}^D \alpha) \right] \quad (19) \\ & + \sum_{j=1}^{N_D} e_j^{D,shed} F^{shed} + \Gamma^{MG} \varphi^{MG} + \sum_{h=t+1}^{24} \mu_h^{MG} \end{aligned}$$

مقید به:

$$\text{Constraints (1) - (16) and (18)} \quad (20)$$

$$p_{i,h}^{SO} + \Gamma_{i,h}^{SO} \varphi_{i,h}^{SO} + \mu_{i,h}^{SO} \leq \bar{P}_{i,h}^{SO}, \forall h > t, i \quad (21)$$

$$\varphi_{i,h}^{SO} + \mu_{i,h}^{SO} \geq \hat{P}_{i,h}^{SO} z_{i,h}^{SO}, \forall h > t, i \quad (22)$$

$$1 \leq z_{i,h}^{SO}, \forall h > t, i \quad (23)$$

$$\varphi_{i,h}^{SO}, \mu_{i,h}^{SO}, z_{i,h}^{SO} \geq 0, \forall h > t, i \quad (24)$$

$$\varphi^{MG} + \mu_h^{MG} \geq \hat{C}_h^{MG} z_h^{MG}, \forall h > t \quad (25)$$

$$-z_h^{MG} \leq p_h^{MG} \alpha \leq z_h^{MG}, \forall h > t \quad (26)$$

$$\varphi^{MG}, \mu_h^{MG}, z_h^{MG} \geq 0, \forall h > t \quad (27)$$

در مدل بهینه‌سازی مقاوم پارامترهای غیرقطعی قیمت انرژی الکتریکی و توان خورشیدی در دسترس به ترتیب در بازه اطمینان $[\bar{C}_h^{MG} - \hat{C}_h^{MG}, \bar{C}_h^{MG} + \hat{C}_h^{MG}]$ و $[\bar{P}_{i,h}^{SO} - \hat{P}_{i,h}^{SO}, \bar{P}_{i,h}^{SO} + \hat{P}_{i,h}^{SO}]$ تغییر می‌کنند که $\bar{P}_{i,h}^{SO}$ و \bar{C}_h^{MG} مقادیر نامی این پارامترها می‌باشند. تابع هدف (۱۹) و قیود (۲۵) تا (۲۷) کنترل عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی، و قیود (۲۱) تا (۲۴) کنترل عدم قطعیت توان خورشیدی در دسترس را به شیوه بهینه‌سازی مقاوم امکان‌پذیر می‌کند.

تابع هدف (۱۹) از سه بخش تشکیل شده است و به دنبال حداقل کردن بدترین شرایطی است که با توجه به داده‌های غیرقطعی ممکن است روی دهد. بخش اول مربوط به قرینه سود متقاضیان در دوره t می‌باشد. بخش دوم مقادیر نامی قرینه سود متقاضیان در دوره‌های پیش رو است که از مقدار متوسط پیش‌بینی قیمت بازار زمان حقیقی به دست می‌آید و بخش سوم مربوط به بدترین شرایط انحراف هزینه می‌باشد که نتیجه انحراف قیمت‌های بازار زمان حقیقی از مقادیر نامی است.

φ^{MG} و μ_h^{MG} متغیرهای دوگان مرتبط با عدم قطعیت قیمت انرژی و $\mu_{i,h}^{SO}$ و $\varphi_{i,h}^{SO}$ متغیرهای دوگان مرتبط با عدم قطعیت تولید توان خورشیدی هستند.

پارامترهای Γ^{MG} و $\Gamma_{i,h}^{SO}$ به منظور تنظیم درجه مقاومت پاسخ مسئله در مقابل عدم قطعیت‌های موجود در قیمت انرژی الکتریکی و تولید خورشیدی در دسترس استفاده شده‌اند. این دو پارامتر تعیین می‌کنند اثر انحراف چه تعداد از پارامترهای غیرقطعی از مقدار نامی آن‌ها بر پاسخ مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شوند. پارامتر Γ^{MG} می‌تواند مقداری در بازه $[0, N_t-t]$ اختیار کند. اگر این پارامتر صفر انتخاب شود، تأثیر انحراف قیمت انرژی الکتریکی از مقدار نامی آن بر روی تابع هدف نادیده گرفته می‌شود. اگر تحت یک تصمیم محتاطانه، کران بالای بازه انتخاب شود، تأثیر انحراف‌های همه قیمت‌ها بر روی تابع هدف منظور می‌شود.

$\Gamma_{i,h}^{SO}$ سطح محافظت قید (۱۷) را در برابر عدم قطعیت تولید توان خورشیدی در دسترس تعیین می‌کند. این پارامتر می‌تواند مقداری در بازه $[0, 1]$ اختیار کند. $z_{i,h}^{SO}$ و z_h^{MG} به عنوان متغیرهای کمکی به منظور خطی‌سازی مسئله استفاده شده‌اند. برای اطلاع از جزئیات بیشتر به [۲۲، ۱۸] مراجعه شود.

۳- مدل‌سازی عدم قطعیت

در این مقاله برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی و توان خورشیدی در دسترس از روش پیش‌بینی معرفی شده در مرجع [۱۹] استفاده شده است. در این روش پیش‌بینی، پارامترهای آماری متغیرهای تصادفی قیمت انرژی الکتریکی و توان خورشیدی در دسترس در هر دوره زمانی به دست می‌آیند.

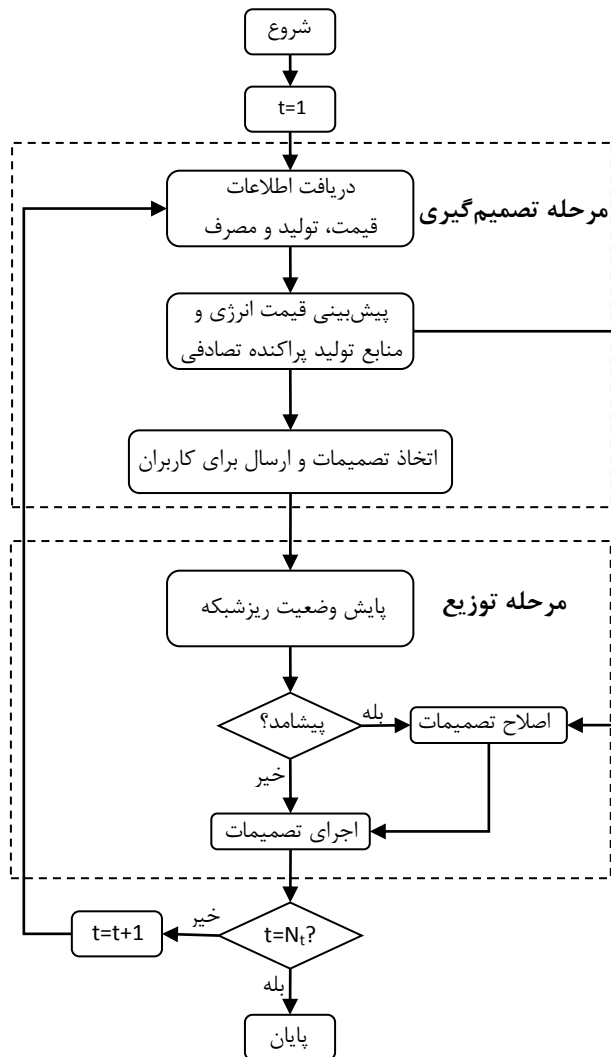
در مدل قطعی، با به کارگیری روش پیش‌بینی نقطه‌ای، امید ریاضی هر متغیر تصادفی در هر دوره زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل مقاوم، بازه اطمینان متغیرهای تصادفی در هر دوره زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بازه اطمینان هر متغیر تصادفی با تعیین مقادیر کران‌های بالا و پایین آن به کمک روش پیش‌بینی بازه‌ای و برای یک سطح اطمینان معلوم (مثلاً ۰/۹۵)، به دست می‌آید. با معلوم بودن پارامترهای آماری هر متغیر تصادفی، بازه اطمینان متناسب به گونه‌ای تعیین می‌شود که با احتمال معادل با سطح اطمینان معلوم (مثلاً ۰/۹۵)، دربرگیرنده سناریوهای محتمل باشد.

لازم به ذکر است، متغیرهای تصادفی را می‌توان با پیش‌بینی مبتنی بر تولید سناریو نیز مدل‌سازی کرد و از روش برنامه‌ریزی تصادفی جهت تصمیم‌گیری تحت شرایط عدم قطعیت استفاده نمود. برخی از معایب برنامه‌ریزی تصادفی به شرح زیر است [۲۲]:

۱. در شرایطی که تابع چگالی احتمال متغیر به صورت دقیق مشخص نیست، تولید سناریوها در عمل امکان‌پذیر نیست.
۲. اندازه مدل بهینه‌سازی به طور مستقیم تابعی از تعداد سناریوهاست که موجب می‌شود محاسبات بسیار زمان‌بر، دشوار و در برخی موارد ناممکن شود.

شرایط تحویل انرژی، اطلاعات مربوط در اختیار سیستم مدیریت انرژی قرار می‌گیرد و در مرحله توزیع توان آن خط یا منبع انرژی از ریزشکه حذف می‌شود. سیستم مدیریت انرژی در حداقل زمان ممکن تصمیمات مرحله قبل را اصلاح می‌نماید و تصمیمات جدید را برای تأمین‌کنندگان انرژی و متقاضیان ارسال می‌کند.

مطابق با شکل ۱، الگوریتم مدیریت انرژی ارائه شده دارای دو مرحله می‌باشد، در مرحله تصمیم‌گیری، تصمیمات مربوط به میزان تبادل توان با شبکه اصلی، مصرف انرژی متقاضیان، جابه‌جایی یا قطع بار، تولید توان خورشیدی و ذخیره یا مصرف انرژی واحدهای ذخیره‌ساز مشخص می‌شوند.



شکل ۱: الگوریتم مدیریت انرژی پیشنهادی

در مرحله توزیع توان، سیستم مدیریت انرژی با پایش وضعیت اجزای ریزشکه، مانند وضعیت دسترس‌پذیری آن‌ها، تصمیمات اتخاذ شده در مرحله قبل را با توجه به شرایط جدید بررسی می‌کند و در صورت نیاز آن‌ها را اصلاح و سپس اجرا می‌کند. با توجه به قیود (۲) و (۴)، سیستم مدیریت انرژی می‌تواند از ابزار جابه‌جایی یا قطع بار

۳. اگر مقدار واقعی پارامتر غیرقطعی با هیچ‌یک از سناریوها تطابق نداشته باشد، ممکن است پاسخ به‌دست‌آمده از حل برنامه‌ریزی تصادفی در عمل قابل اجرا نباشد.

بنابراین در این مقاله، مدل مقاوم جهت غلبه بر عدم قطعیت استفاده می‌شود. با انحراف مقدار واقعی پارامترهای غیرقطعی از مقدار نامی پیش‌بینی شده، همچنان پاسخ مسئله شدنی و قابل اجرا خواهد بود [۲۳].

۴- الگوریتم مدیریت انرژی

الگوریتم مدیریت انرژی برای برنامه‌ریزی نیروگاه مجازی در افق زمانی روزانه به‌صورت زیر است:

۱. قیمت انرژی و توان خورشیدی در دسترس در دوره‌های پیش از t ، برای سیستم مدیریت انرژی معلوم هستند. قیمت انرژی و میزان توان خورشیدی در دسترس در دوره t ، چندین دقیقه قبل از موعد تحویل انرژی توسط شبکه اصلی و ایستگاه‌های خورشیدی برای سیستم مدیریت انرژی ارسال می‌گردد (به‌عنوان مثال ۱۰ دقیقه [۱۸]). اما این پارامترها برای $N_t - t$ دوره پیش رو دارای عدم قطعیت می‌باشند. با استفاده از ابزار پیش‌بینی، قیمت انرژی و میزان تولید منابع تولید پراکنده در ساعات پیش رو تخمین زده می‌شود.

۲. متقاضیان بر اساس تابع مطلوبیت خود اطلاعات مربوط به مصرف (شامل میزان مصرف و سطح مطلوبیت) را چندین دقیقه قبل از موعد تحویل انرژی (به‌عنوان مثال ۱۰ دقیقه [۱۸]) در دوره t برای سیستم مدیریت انرژی ارسال می‌کنند.

۳. ساختار ریزشکه بر اساس آخرین اطلاعات در دسترس از فرآیند پایش در اختیار سیستم مدیریت انرژی قرار می‌گیرد.

۴. سیستم مدیریت انرژی میزان انرژی مصرفی هر متقاضی، میزان تبادل انرژی با شبکه اصلی، توان ایستگاه خورشیدی و سیستم ذخیره در دوره t و دوره‌های پس‌از آن را تعیین می‌کند. همچنین سیستم مدیریت انرژی مشخص می‌سازد که چه میزان انرژی به شبکه اصلی فروخته/از شبکه اصلی خریداری شود.

۵. تصمیمات اتخاذ شده مربوط به دوره t چند دقیقه قبل از تبادل انرژی (به‌عنوان مثال ۵ دقیقه [۱۸])، برای تأمین کنندگان انرژی و متقاضیان ارسال می‌شود.

۶. وضعیت شبکه مانند خروج خطوط انتقال و خروج واحدهای تولیدی توسط سیستم مدیریت انرژی پایش می‌شود.

۷. چنانچه در زمان تحویل انرژی، ساختار ریزشکه همان ساختار در نظر گرفته شده در مرحله تصمیم‌گیری باشد، تصمیمات اتخاذ شده در مرحله تصمیم‌گیری عیناً در مرحله توزیع توان اجرا می‌شوند. اما در صورت وقوع پیشامد در

خورشیدی در آن سال از ایستگاه خورشیدی دانشگاه هاروارد [۲۶] که در همان ناحیه واقع می‌باشد، گرفته شده است. اطلاعات مربوط به ویژگی‌های فنی و اقتصادی بارها به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های خورشیدی و واحدهای ذخیره‌ساز در جدول ۳ آمده است. مدل ارائه‌شده با استفاده از حل‌کننده CPLEX، در نرم‌افزار GAMS حل می‌شود.

وقوع پیشامدهای گوناگون می‌تواند وضعیت بهره‌برداری و سود نیروگاه مجازی را تحت تأثیر قرار دهد. این پیشامدها می‌توانند شامل خرابی و خروج خطوط انتقال انرژی و منابع تأمین انرژی باشد، با توجه به گزارش آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر آمریکا نرخ خروج اجباری ایستگاه‌های خورشیدی برابر صفر می‌باشد [۲۷]، بنابراین در شبیه‌سازی‌ها، تنها خروج خطوط انتقال انرژی در نظر گرفته می‌شود. قیمت انرژی الکتریکی بازار زمان-حقیقی دارای ماهیت بسیار متغیر می‌باشد و پیش‌بینی دقیق آن دشوار و پرهزینه است. به همین علت، دو روز مختلف در سال ۲۰۰۹ که قیمت انرژی دارای رفتار متفاوتی می‌باشد، انتخاب می‌شود. قیمت انرژی در روز ۱۰ اوت با دقت خوبی پیش‌بینی شده است، اما در روز ۲۱ اکتبر قیمت انرژی دارای تغییرات ناگهانی است که موجب می‌شود پیش‌بینی آن از دقت بالایی برخوردار نباشد. هدف از این کار بررسی عملکرد الگوریتم مدیریت انرژی ارائه‌شده در شرایط مختلف و نزدیک به واقعیت است. نمودار مربوط به قیمت واقعی انرژی الکتریکی در روزهای ۱۰ اوت و ۲۱ اکتبر سال ۲۰۰۹ و پیش‌بینی نقطه‌ای و بازه‌ای با سطوح اطمینان ۰/۵۵ و ۰/۹۵ در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. در شبیه‌سازی وقوع پیشامدها، فرض می‌شود که در این ریزشکته تنها امکان خروج یک مؤلفه از مدار وجود دارد و عضو خارج‌شده تا پایان روز مطالعه تعمیر نخواهد شد [۲۰].

به‌صورت داوطلبانه (کاهش توان مصرفی در محدوده اعلام‌شده توسط متقاضی) و یا غیرداوطلبانه (کاهش حداقل توان مصرفی و حداقل انرژی مصرفی روزانه اعلام‌شده توسط متقاضی) به‌منظور حفظ تعادل توان ریزشکته استفاده کند.

نیروگاه مجازی طرف قرارداد با شرکت توزیع می‌باشد. شرکت توزیع باید با کم‌ترین میزان انحراف تقاضای انرژی در بازارهای برق شرکت کند. با وقوع پیشامد ممکن است در مرحله توزیع توان نیروگاه مجازی نتواند به تعهدات خود در تبادل انرژی با شبکه اصلی عمل نماید. در این وضعیت شرکت توزیع به دو صورت با این انحراف برخورد می‌کند، اگر نیروگاه مجازی در حالت خرید از شبکه اصلی باشد و پیشامدی رخ دهد که منجر به انحراف از قرارداد شود، شرکت توزیع این امکان را به نیروگاه مجازی می‌دهد تا به میزان کم‌تر از مقدار توافق‌شده برق وارد نماید اما نیروگاه مجازی ملزم است که طبق میزان انرژی توافق‌شده به شرکت توزیع پول پرداخت کند $(C_h^{MG} p_h^{MG,dec})$.

$$0 \leq p_h^{MG,dis} \leq p_h^{MG,dec}, \forall h = t, \dots, N_t \quad (28)$$

اگر نیروگاه مجازی در حالت فروش به شبکه اصلی باشد، شرکت توزیع این امکان را به نیروگاه مجازی می‌دهد تا به میزان کم‌تر از مقدار توافق‌شده برق صادر نماید اما شرکت توزیع به دلیل وجود سیاست‌های تشویقی برای تولید انرژی و فروش آن، نیروگاه مجازی را جریمه نمی‌کند و طبق میزان انرژی فروخته‌شده به شبکه اصلی به نیروگاه مجازی پول پرداخت می‌کند $(C_h^{MG} p_h^{MG,dis})$. دقت شود که در اینجا فرض شده است که شرکت توزیع توانایی مدیریت عدم تعادل ایجادشده چه در حالت خرید و در حالت فروش را دارا می‌باشد.

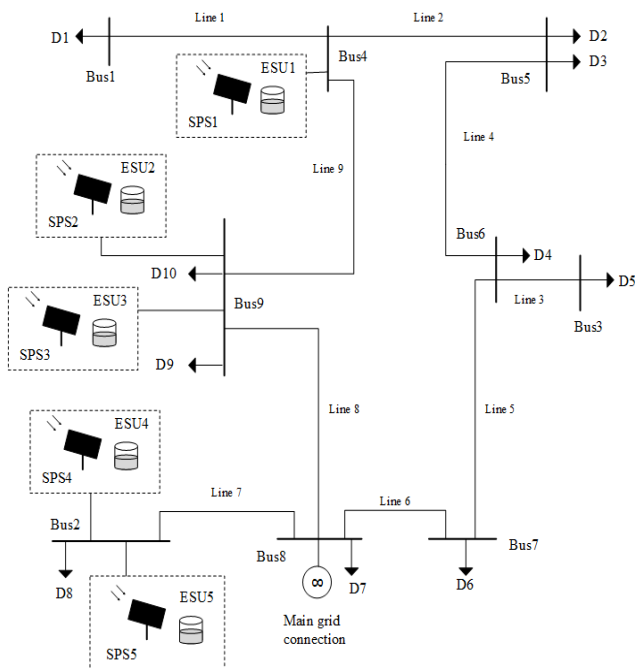
$$p_h^{MG,dec} \leq p_h^{MG,dis} \leq 0, \forall h = t, \dots, N_t \quad (29)$$

۵- مطالعه موردی

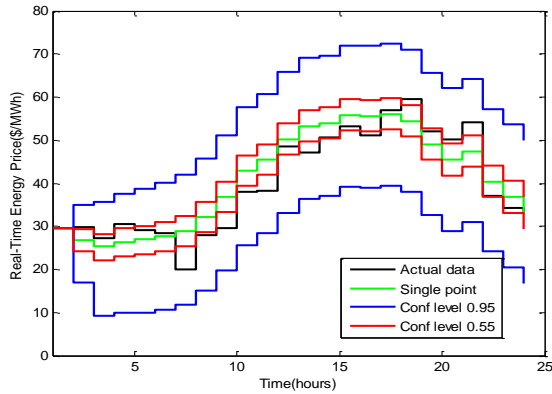
نیروگاه مجازی شبیه‌سازی‌شده دارای ۱۰ متقاضی، ۵ ایستگاه خورشیدی و واحد ذخیره انرژی می‌باشد که از طریق یک ریزشکته به یکدیگر متصل می‌باشند. شبکه استاندارد ۹ باس IEEE [۲۴] به‌عنوان ریزشکته نمونه مورد استفاده قرار گرفته است. این ریزشکته ساختار شعاعی-حلقوی دارد و خروج برخی از خطوط موجب می‌شود تا بخشی از سیستم از آن جدا و به‌صورت مستقل (حالت جزیره‌ای) بهره‌برداری شود. ساختار نیروگاه مجازی مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. نیروگاه مجازی از طریق باس ۸ به شبکه اصلی متصل است. ایستگاه‌های خورشیدی به همراه واحدهای ذخیره‌ساز در باس‌های ۲، ۴ و ۹ نصب شده‌اند و باس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب به‌وسیله خطوط انتقال ۱، ۳ و ۷ به سایر باس‌ها متصل هستند که در صورت بروز پیشامد برای این خطوط، این باس از بدنه اصلی جدا و ریزشکته به حالت جزیره‌ای بهره‌برداری می‌شود.

۵-۱- اطلاعات

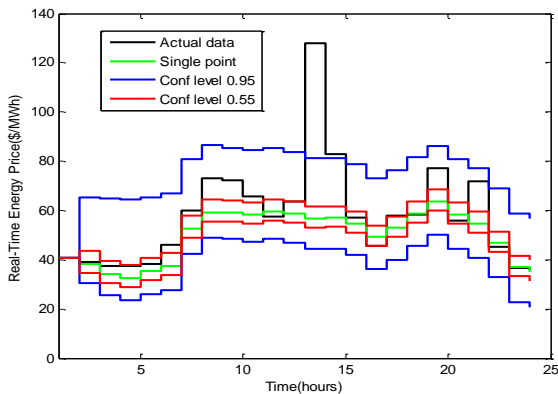
اطلاعات واقعی قیمت انرژی الکتریکی از بازار زمان-حقیقی ناحیه نیوانگلند آمریکا در سال ۲۰۰۹ [۲۵] و اطلاعات واقعی تابش و تولید



شکل ۲: ساختار نیروگاه مجازی مورد مطالعه



شکل ۳: قیمت انرژی الکتریکی در روز ۱۰ اوت سال ۲۰۰۹



شکل ۴: قیمت انرژی الکتریکی در روز ۲۱ اکتبر سال ۲۰۰۹

۵-۲- نتایج و بحث

به منظور مشاهده میزان و نحوه اثرگذاری پیشامدها بر سود نیروگاه مجازی، اثر وقوع پیشامدهای مختلف در ساعت ۶ دو روز مورد مطالعه در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است. با توجه به ضابطه وقوع $n-1$ پیشامد، در شبیه‌سازی‌ها، امکان وقوع خرابی تنها برای یکی از خطوط وجود دارد.

در هر ساعت، دو حالت امکان‌پذیر است، حالت اول این است که هیچ‌گونه خطایی رخ ندهد و وضعیت شبکه سالم باشد و حالت دوم دربرگیرنده وضعیت خرابی هر یک از خطوط می‌باشد. با توجه به این که ریز شبکه مورد مطالعه دارای ۹ خط انتقال انرژی می‌باشد، اثر خروج خط‌های ۱ تا ۹ در کنار وضعیت سالم شبکه نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که خروج هر یک از خطوط اثر متفاوتی بر سود نیروگاه مجازی می‌گذارند. در حالی که برخی از پیشامدها سود نیروگاه مجازی را به شدت کاهش می‌دهد، برخی دیگر منجر به افزایش سود آن می‌شود. از این خاصیت که ناشی از محدودیت‌های شبکه و پخش توان می‌باشد در کلیدزنی خطوط و بازآرایی سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود که خارج از بحث این تحقیق است. همچنین نتایج مؤید این نکته است که تغییرات ناگهانی قیمت انرژی، میزان تأثیر وقوع پیشامد بر نیروگاه مجازی را افزایش می‌دهد.

جدول ۱: اطلاعات فنی بارها

متقاضی	باس	حد بالا و پایین تغییرات توان [MWh/h]	بیشینه توان مصرفی ساعتی [MW]	کمینه توان مصرفی ساعتی [MW]	حداقل انرژی مصرفی روزانه [MWh]	توان مصرفی ابتدایی [MW]
۱	۱	۲۰۰	۲۰۰	۴۰	۱۰۵۶	۱۰۰
۲	۵	۱۰۰	۲۰۰	۴۰	۱۰۵۶	۱۰۰
۳	۵	۷۵	۱۵۰	۳۰	۷۹۲	۷۵
۴	۶	۱۰۰	۱۲۰	۲۴	۶۳۳/۶	۶۰
۵	۳	۱۵	۱۵	۱	۲۶/۴	۷/۵
۶	۷	۲۵	۲۵	۲	۵۲/۸	۱۲/۵
۷	۸	۱۵	۱۵	۱	۲۶/۴	۷/۵
۸	۲	۱۰۰	۱۰۰	۲۰	۵۲۸	۵۰
۹	۹	۴۰	۷۵	۱۵	۳۹۶	۳۷/۵
۱۰	۹	۷۰	۱۰۰	۲۰	۵۲۸	۵۰

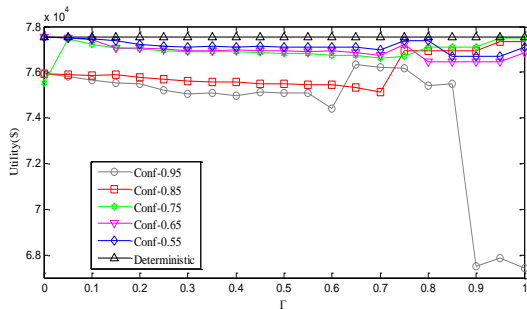
جدول ۲: اطلاعات بلوک‌های تابع مطلوبیت

متقاضی	بار [MW]	مطلوبیت [\$/MWh]
۱	۵۰، ۵۰، ۵۰، ۵۰	۳۵، ۴۵، ۵۲، ۵۵
۲	۵۰، ۵۰، ۵۰، ۵۰	۳۷، ۴۶، ۵۲، ۵۶
۳	۳۷/۵، ۳۷/۵، ۳۷/۵، ۳۷/۵	۳۷، ۴۴، ۵۰، ۵۴
۴	۳۰، ۳۰، ۳۰، ۳۰	۳۶، ۴۴، ۵۱، ۵۴
۵	۳/۷۵، ۳/۷۵، ۳/۷۵، ۳/۷۵	۳۳، ۳۶، ۴۱، ۴۴
۶	۶/۲۵، ۶/۲۵، ۶/۲۵، ۶/۲۵	۳۲، ۳۶، ۴۲، ۴۵
۷	۳/۷۵، ۳/۷۵، ۳/۷۵، ۳/۷۵	۳۳، ۳۶، ۴۱، ۴۴
۸	۲۵، ۲۵، ۲۵، ۲۵	۳۶، ۴۴، ۴۹، ۵۱
۹	۱۸/۷۵، ۱۸/۷۵، ۱۸/۷۵، ۱۸/۷۵	۳۷، ۴۳، ۴۸، ۵۱
۱۰	۲۵، ۲۵، ۲۵، ۲۵	۳۶، ۴۴، ۴۹، ۵۱

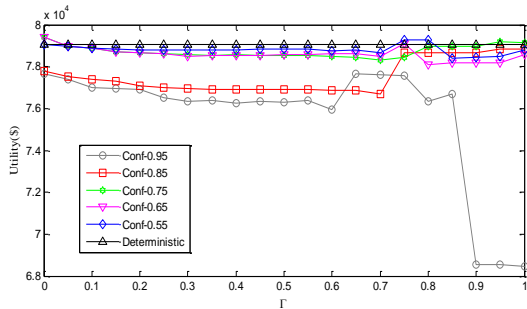
جدول ۳: اطلاعات ایستگاه‌های خورشیدی و واحدهای ذخیره

ایستگاه یا واحد	باس	ظرفیت ایستگاه خورشیدی [MW]	ظرفیت واحد ذخیره [MWh]	حداقل انرژی ذخیره شده در واحد ذخیره [MWh]	انرژی ذخیره شده در آخرین ساعت روز قبل [MWh]
۱	۴	۱۱۲/۵	۱۸۰	۱۸	۱۸
۲	۹	۷۵	۱۲۰	۱۲	۱۲
۳	۹	۵۶/۲۵	۹۰	۹	۹
۴	۸	۳۷/۵	۶۰	۶	۶
۵	۸	۱۸/۷۵	۳۰	۳	۳

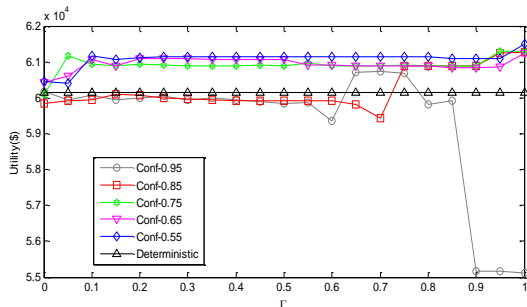
۱۲ نشان داده شده است که با توجه به تغییرات ناگهانی قیمت انرژی، این حساسیت افزایش می‌یابد. شکل‌های ۷ تا ۹ مربوط به روزی هستند که از پیش‌بینی مناسب قیمت انرژی برخوردار است. در این وضعیت، با افزایش سطح اطمینان، حساسیت سیستم مدیریت انرژی به درجه مقاومت افزایش می‌یابد. در سطوح اطمینان پایین‌تر در هر سه شکل میزان تغییر سود کم و تقریباً ثابت می‌باشد که به معنای حساسیت کم‌تر نسبت به تغییر Γ^{MG} می‌باشد. در سطح اطمینان بسیار بالا (سطح اطمینان ۰/۹۵)، با افزایش پارامتر Γ^{MG} نزدیک به ۱، سود شدیداً کاهش می‌یابد. زیرا این حالت محافظه‌کارترین حالت ممکن برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت انرژی می‌باشد.



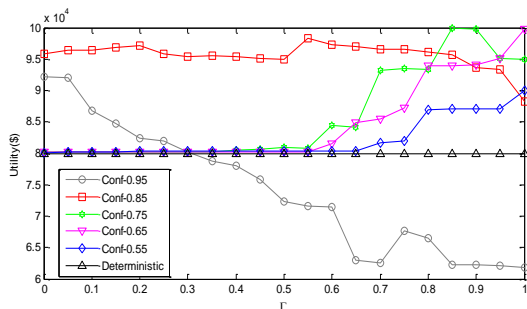
شکل ۷: سود VPP در وضعیت سالم ریزشکه روز ۱۰ اوت



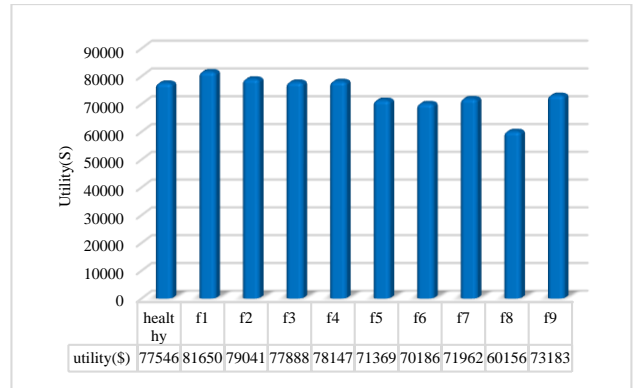
شکل ۸: سود VPP در خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۱۰ اوت



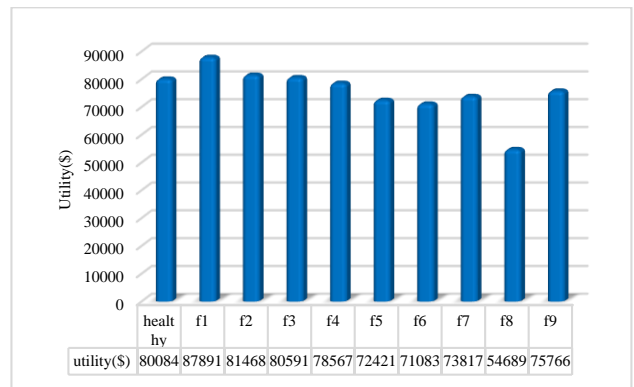
شکل ۹: سود VPP در خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ اوت



شکل ۱۰: سود VPP در وضعیت سالم ریزشکه روز ۲۱ اکتبر



شکل ۵: اثر خروج خطوط ریزشکه در ساعت ۶ بر سود نیروگاه مجازی در روز ۱۰ اوت در مدل قطعی



شکل ۶: اثر خروج خطوط ریزشکه در ساعت ۶ بر سود نیروگاه مجازی در روز ۲۱ اکتبر در مدل قطعی

به‌منظور بررسی اثر وقوع پیشامد، سطح اطمینان و درجه مقاومت نسبت به عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی بر سود نیروگاه مجازی در مدل مقاوم، خروج خط‌های ۲ و ۸ در ساعت ۶ و وضعیت سالم ریزشکه انتخاب شده‌اند. خط‌های ۲ و ۸ به ترتیب نماینده خطوطی هستند که خروج آن‌ها سود نیروگاه مجازی را افزایش و کاهش می‌دهد. درجه مقاومت نسبت به عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی در هر ساعت برنامه‌ریزی مقداری در بازه $[0, 24-t]$ است که این مقدار در ضرایب با گام‌های ۰/۰۵ در بازه $[0, 1]$ تغییر داده می‌شود. در برنامه‌ریزی در نظر گرفته شوند. هرچه این ضریب مقدار بیش‌تری اختیار شود، برنامه‌ریزی محافظه‌کارانه‌تر خواهد بود.

همچنین برای مقایسه، سود نیروگاه مجازی در مدل قطعی (استفاده از مقادیر پیش‌بینی نقطه‌ای برای مدل‌سازی پارامترهای غیرقطعی) نیز در شرایط یکسان محاسبه شده است. نتایج بررسی‌ها در شکل‌های ۷ تا ۱۲ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی‌ها درجه مقاومت نسبت به تغییر تولید خورشیدی برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

تفاوت موجود میان سود نیروگاه مجازی در خط‌های رخ داده در هر یک از دو روز به‌خوبی اهمیت وقوع پیشامد را نشان می‌دهد، نتایج تغییرات ۳۵-۲۰٪ را نشان می‌دهند که رقمی بسیار قابل توجه می‌باشد. حساسیت مدل مقاوم به تغییر مقدار درجه مقاومت در شکل‌های ۷ تا

عملکرد مدل مقاوم چشمگیر است به گونه‌ای که در اکثر وضعیت‌ها سود بیش‌تری نسبت به مدل قطعی به‌دست می‌آورد. نتایج نشان می‌دهند که انتخاب سطح اطمینان و درجه مقاومت مناسب در مدل مقاوم می‌تواند سود نیروگاه مجازی را در وضعیت‌های خروج خط ۲، خروج خط ۸ و سالم شبکه به‌ترتیب تا میزان ۰.۲۱٪، ۰.۱۷٪ و ۰.۲۴٪ افزایش دهد. به‌بیان‌دیگر تا این میزان ضرر ناشی از وقوع تغییر ناگهانی قیمت و همچنین ضرر وقوع پیشامد در این وضعیت‌ها را کاهش دهد. میزان حداکثر افزایش سود مدل مقاوم نسبت به مدل قطعی در وضعیت‌ها و سطوح اطمینان متفاوت در جدول ۴ ارائه شده است.

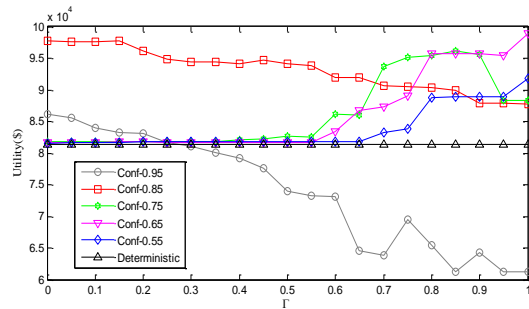
جدول ۴: افزایش سود مدل مقاوم در مقایسه با مدل قطعی (%)

سطح اطمینان					پیشامد
۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۹۵	
۰/۳	۰/۵	۰/۵	-۰/۲	-۱/۷	خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۱۰ اوت
۲/۲	۱/۸	۱/۹	۳/۱	۱	خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۱۰ اوت
-۰/۰۲	-۰/۲	-۰/۰۵	-۰/۲	-۱/۵	وضعیت سالم ریزش‌بکه در ۱۰ اوت
۱۳	۲۱	۱۸	۲۰	۵/۹	خروج خط ۲ ساعت ۶ در روز ۲۱ اکتبر
۱۷	۱۵	۱۲	۱۵	۹	خروج خط ۸ ساعت ۶ در روز ۲۱ اکتبر
۱۲/۶	۲۴/۸	۲۴	۲۳	۱۵	وضعیت سالم ریزش‌بکه در ۲۱ اکتبر

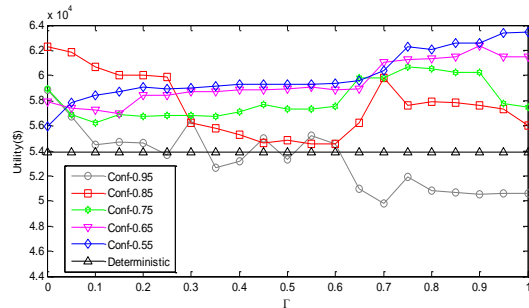
به‌منظور مقایسه بهتر عملکرد مدل‌های مقاوم و قطعی در هنگام وقوع پیشامدها، میانگین سود نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن خروج تکی همه خطوط ریزش‌بکه در ساعت‌های ۶ و ۱۲ روزهای مورد مطالعه، محاسبه شدند. سطح اطمینان ۰/۸۵ و پارامتر Γ^{MG} در مدل مقاوم ۰/۷۵ در نظر گرفته شده است. نتایج در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. این نتایج عملکرد مناسب مدل مقاوم را به‌ویژه در زمان تغییرات ناگهانی قیمت انرژی الکتریکی نشان می‌دهد.

جدول ۵: عملکرد مدل‌های قطعی و مقاوم در هنگام خروج تکی همه خطوط

زمان وقوع پیشامدها	میانگین سود مدل مقاوم (\$)	میانگین سود مدل قطعی (\$)	درصد افزایش سود مدل مقاوم
ساعت ۶ روز ۱۰ اوت	۷۳۷۰۱	۷۳۷۳۱	-۰/۰۰۰۴
ساعت ۱۲ روز ۱۰ اوت	۷۷۱۵۲	۷۷۶۸۱	-۰/۰۰۰۶
ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر	۸۹۰۹۲	۷۵۱۴۴	۱۸/۵۶
ساعت ۱۲ روز ۲۱ اکتبر	۹۰۷۴۴	۷۶۷۵۸	۱۸/۲۲



شکل ۱۱: سود VPP در خروج خط ۲ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر



شکل ۱۲: سود VPP در خروج خط ۸ در ساعت ۶ روز ۲۱ اکتبر

از سوی دیگر شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ حساسیت شدید سود را نسبت به تغییرات Γ^{MG} در وضعیتی که قیمت انرژی دارای تغییرات زیاد و پیش‌بینی نامناسب می‌باشد، نشان می‌دهد. در این وضعیت نیز مشابه روز دیگر، کاهش شدید سود در حالت‌های محافظه‌کارانه (سطوح اطمینان بالاتر) رخ می‌دهد و دامنه نوسان سود نیروگاه مجازی در سطوح اطمینان پایین‌تر، کوچک‌تر می‌باشد. با دقت بر اثر درجه مقاومت در یک سطح اطمینان مشخص بر سود نیروگاه مجازی، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد در نظر گرفتن بدترین حالت‌های قابل رخداد لزوماً سود نیروگاه مجازی کاهش یا افزایش نمی‌یابد و از یک روند مشخص پیروی نمی‌کند. همچنین با دقت بر اثر سطح اطمینان در یک درجه مقاومت مشخص، مشاهده می‌شود که در این وضعیت نیز لزوماً افزایش یا کاهش سطح اطمینان منجر به افزایش یا کاهش سود نیروگاه مجازی نمی‌شود. نتایج نشان می‌دهند هیچ الزامی وجود ندارد که یک سطح اطمینان و درجه مقاومت مناسب برای یک پیشامد در یک روز خاص، برای پیشامد در روز دیگر نیز مناسب باشد.

برای مقایسه، نتایج به‌دست‌آمده توسط مدل قطعی در وضعیت‌های مشابه (وقوع پیشامدهای یکسان) در شکل‌ها نمایش داده شده است که نتایج، عملکرد مناسب مدل مقاوم را تأیید می‌کند. با توجه به شکل‌های مربوط به روز ۱۰ اوت، نتایج نشان می‌دهند در وضعیتی که قیمت انرژی دارای تغییرات زیاد و ناگهانی نیست، هرچند که مدل مقاوم توانسته است در بعضی حالت‌ها، سود بیش‌تری به‌دست آورد، عملکرد دو برنامه تقریباً مشابه یکدیگر است. زیرا در این حالت مقادیر حاصل از پیش‌بینی نقطه‌ای در برنامه قطعی نزدیک به مقادیر واقعی می‌باشند. اما نتایج شکل‌های مربوط به روز ۲۱ اکتبر نشان می‌دهند در شرایطی که قیمت انرژی الکتریکی تغییرات ناگهانی را تجربه می‌کند،

مشابه این روند در روز ۲۱ اکتبر نیز دیده می‌شود، با این تفاوت که مدل قطعی به دلیل عدم پیش‌بینی مناسب تغییر ناگهانی قیمت انرژی در ساعت ۱۲، نتوانسته است در هیچ ساعتی انرژی الکتریکی را به شبکه اصلی بفروشد، در حالی که مدل مقاوم در ساعت ۱۲، حدود ۸۰ مگاوات ساعت انرژی به شبکه اصلی می‌فروشد. همچنین بار دیگر به میزان ۵ مگاوات ساعت در مدل قطعی انحراف از قرارداد مشاهده می‌شود ولی در مدل مقاوم انحرافی رخ نمی‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی مقاوم برای مدیریت انرژی نیروگاه مجازی ارائه شده است که با بهره‌مندی از فناوری شبکه هوشمند می‌تواند وضعیت اجزای ریزشبکه را پایش و اطلاعات مرتبط با آن‌ها را به‌روزرسانی کند. در صورت وقوع پیشامد، سیستم مدیریت انرژی به‌صورت زمان-حقیقی از آن مطلع گشته و تصمیمات مناسب را اتخاذ می‌کند. بر اساس اطلاعات واقعی تولید انرژی خورشیدی و قیمت انرژی الکتریکی بازار زمان-حقیقی، عملکرد مدل مقاوم و قطعی در دو روز از سال با رفتار متفاوت قیمت انرژی الکتریکی، با وقوع پیشامدهای مختلف و در سطوح اطمینان گوناگون بررسی شدند. مقایسه نتایج این نکات را روشن می‌سازد که:

۱. وقوع پیشامدهای ریزشبکه یک موضوع مهم می‌باشد و اثر قابل‌توجهی بر سود نیروگاه مجازی می‌گذارد و با توجه به محدودیت‌های ریزشبکه و پخش توان این اثر می‌تواند در جهت کاهش یا افزایش سود باشد.

۲. با بررسی سطوح اطمینان و درجه مقاومت نسبت به عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی در مدل مقاوم، مشخص شد این پارامترها بر سود نیروگاه مجازی اثرگذار هستند و اتخاذ سیاست‌های بسیار محافظه‌کارانه می‌تواند منجر به کاهش سود شود. همچنین یک سطح اطمینان و درجه مقاومت مناسب برای یک پیشامد، الزاماً برای پیشامدهای دیگر مناسب نیست.

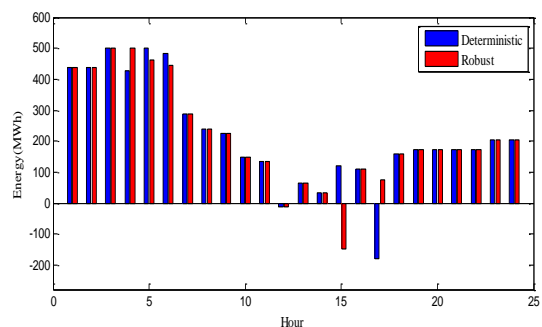
۳. تغییرات ناگهانی قیمت انرژی بر سود نیروگاه مجازی در هر دو مدل مقاوم و قطعی بسیار اثرگذار است و پیش‌بینی مناسب این تغییرات می‌تواند اثر زیان‌آور آن را بر سود نیروگاه مجازی تا حد قابل‌توجهی کاهش دهد.

۴. مدل مقاوم در هنگام قرارداد با شبکه اصلی میزان انرژی تبدیلی را به گونه‌ای تعیین می‌کند که نسبت به مدل قطعی، در صورت وقوع پیشامد، انحراف کم‌تری از میزان قرارداد رخ دهد.

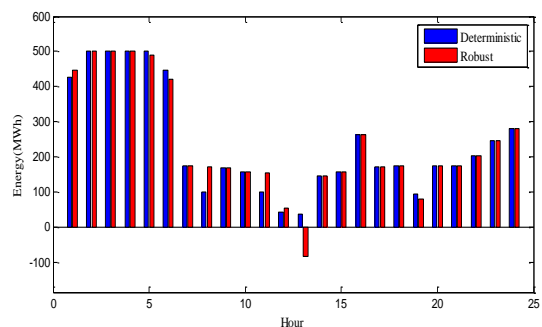
۵. الگوریتم‌های مدیریت انرژی با به‌کارگیری فناوری شبکه هوشمند، منابع تولید پراکنده و بارهای پاسخ‌گو به‌طور شایسته‌ای انرژی نیروگاه مجازی را در همه وضعیت‌های وقوع یا عدم وقوع پیشامد مدیریت می‌کنند.

۶. با انتخاب سطح اطمینان و درجه مقاومت مناسب می‌توان نیروگاه مجازی را به‌گونه‌ای مدیریت کرد که با غلبه بر وجود عدم

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ انرژی توافق‌شده برای مبادله با شبکه اصلی در مرحله تصمیم‌گیری در وضعیت وقوع پیشامد خروج خط ۸ در ساعت ۶ در این دو روز نمایش داده شده است. سطح اطمینان ۰/۸۵ برای مدل مقاوم انتخاب و $\Gamma^{MG} = 0$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، به‌صورت کلی در هر دو مدل، نیروگاه مجازی در ابتدای روز که قیمت انرژی الکتریکی پایین می‌باشد، به خرید انرژی از شبکه اصلی اقدام می‌کند، سپس در ساعات میانی روز که قیمت انرژی مقدار بالایی می‌باشد و تولید انرژی خورشیدی صورت می‌گیرد، نیروگاه مجازی با استفاده از تولید خورشیدی، کاهش میزان مصرف، آزادسازی انرژی ذخیره‌شده در واحدهای ذخیره، میزان انرژی خرید شده از شبکه اصلی را کاهش می‌دهد و در بعضی ساعات به آن انرژی می‌فروشد.



شکل ۱۳: انرژی توافق‌شده برای مبادله با شبکه اصلی در مدل قطعی و مقاوم در روز ۱۰ اوت



شکل ۱۴: انرژی توافق‌شده برای مبادله با شبکه اصلی در مدل قطعی و مقاوم در روز ۲۱ اکتبر

در ساعات انتهایی روز، قیمت نسبتاً بالای انرژی موجب می‌شود که نیروگاه مجازی به میزان کم‌تری نسبت به ساعات ابتدایی، از شبکه اصلی توان خریداری نماید. نکته موردتوجه در این شکل، میزان انرژی توافق شده با شبکه در ساعت وقوع پیشامد می‌باشد. در مدل مقاوم با توجه به سازوکار بهینه‌سازی مقاوم، میزان انرژی مبادله‌ای به‌گونه‌ای توافق می‌شود که در هنگام توزیع توان، انحراف کم‌تری در قرارداد نسبت به مدل قطعی رخ دهد. با توجه به وقوع پیشامد، مدل‌های مقاوم و قطعی به ترتیب به میزان ۳ و ۴۴ مگاوات ساعت از انرژی توافق‌شده انحراف داشته‌اند.

- قطعیته‌ها مانند میزان تولید منابع تولید پراکنده تصادفی، تغییرات ناگهانی قیمت انرژی و وقوع پیشامدهای ریزشبکه، دارای عملکرد مناسبی باشد.
- مراجع**
- [1] G. Chicco, and P. Mancarella, "Distributed multi-generation: a comprehensive view," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 535-551, 2009.
- [2] J. M. Morales, A. J. Conejo, H. Madsen, P. Pinson, and M. Zugno, *Integrating renewables in electricity markets: Operational problems*, vol. 205, Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] سعید عباس‌پور، کاظم زارع و بهنام محمدی ایواتلو، «ارزیابی جنبه‌های فنی و اقتصادی شبکه توزیع با هدف توسعه DG بر مبنای کاربرد مدیریت اکتیو در شبکه»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۴، شماره ۴، صفحات ۳۵-۴۵، ۱۳۹۳.
- [4] 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.
- [5] W. Kahlenborn, *DIN EN 16001: Energy Management Systems in Practice: A Guide for Companies and Organizations*, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2010.
- [6] W. C. Turner, and S. Doty, *Energy Management Handbook*, The Fairmont Press, Inc., 2007.
- [7] P. Antunes, P. Carreira, and M. M. da Silva, "Towards an energy management maturity model," *Energy Policy*, vol. 73, pp. 803-814, 2014.
- [8] R. Palma-Behnke, C. Benavides, F. Lanás, B. Severino, L. Reyes, J. Llanos, et al., "A microgrid energy management system based on the rolling horizon strategy," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 996-1006, 2013.
- [9] M. Marzband, N. Parhizi, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero, "Distributed smart decision-making for a multi-microgrid system based on a hierarchical interactive architecture," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 99, 2015.
- [10] H. Pandžić, J. M. Morales, A. J. Conejo, and I. Kuzle, "Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming," *Applied Energy*, vol. 105, pp. 282-292, 2013.
- [11] E. G. Kardakos, C. K. Simoglou, and A. G. Bakirtzis, "Optimal offering strategy of a virtual power plant: A stochastic bill approach," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, pp. 794-806, 2015.
- [12] M. Rahimiyan, and L. Baringo, "Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: A price-taker robust optimization approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, In Press, 2015.
- [13] M. C. Bozchalui, S. A. Hashmi, H. Hassen, C. Cañizares, and K. Bhattacharya, "Optimal operation of residential energy hubs in smart grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 1755-1766, 2012.
- [14] C. O. Adika, and L. Wang, "Autonomous appliance scheduling for household energy management," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 673-682, 2014.
- [۱۵] عباس محمدویسی و علیرضا حاتمی، «ارائه چارچوبی برای مدیریت انرژی خانه هوشمند: برنامه‌ریزی بهینه تجهیزات خانگی و برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۱، صفحات ۵۳-۶۶، ۱۳۹۴.
- [16] M. Lopez, S. De La Torre, S. Martín, and J. Aguado, "Demand-side management in smart grid operation considering electric vehicles load shifting and vehicle-to-grid support," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 689-698, 2015.
- [17] A. J. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo, "Real-time demand response model," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, pp. 236-242, 2010.
- [18] M. Rahimiyan, L. Baringo, and A. J. Conejo, "Energy management of a cluster of interconnected price-responsive demands," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, pp. 645-655, 2014.
- [19] S. Kaabe, M. Rahimiyan, and M. A. Latify, "Impact of forecast accuracy on energy management of a virtual power plant," *Smart Grid Conference (SGC)*, 2014.
- [20] F. Bouffard, F. D. Galiana, and A. J. Conejo, "Market-clearing with stochastic security-part I: formulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 1818-1826, 2005.
- [21] A. Andrijanovits, H. Hoimoja, and D. Vinnikov, "Comparative review of long-term energy storage technologies for renewable energy systems," *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 118, pp. 21-26, 2012.
- [22] D. Bertsimas, and M. Sim, "Robust discrete optimization and network flows," *Mathematical Programming*, vol. 98, pp. 49-71, 2003.
- [23] D. Bertsimas, and M. Sim, "The price of robustness," *Operations Research*, vol. 52, pp. 35-53, 2004.
- [24] O. Gomez, M. Rios, and G. Anders, "Reliability-based phasor measurement unit placement in power systems considering transmission line outages and channel limits," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, pp. 121-130, 2014.
- [25] *ISO New England*, US, Available online at: <http://www.isone.com/>.
- [26] *Harvard Green Campus Initiative*, US, Available online at: <http://www.sunviewer.net/portals/Harvard/>.
- [27] V. Black, "Cost and performance data for power generation technologies," *National Renewable Energy Laboratory*, Golden, CO, 2012.