





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

مدیریت انرژی نیروگاه مجازی در بازارهای انرژی

تحت شرایط پیشامد

نگارنده:

الهه غنائی

استاد راهنما:

دکتر مرتضی رحیمیان

مهر ۱۳۹۹

شماره: ۱۷۶۱، ۱۰۰
تاریخ: ۹۹، ۷، ۱۵

باسمه تعالی



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای الهه غنائی با شماره دانشجویی ۹۶۱۱۳۴ رشته مهندسی برق-قدرت گرایش (سیستم های قدرت) تحت عنوان: مدیریت انرژی نیروگاه مجازی در بازارهای انرژی تحت شرایط پیشامد که در تاریخ ۹۹/۷/۱۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	☒ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۷
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☒ نظری ☐ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مرتضی رحیمیان	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید میثم سیدبرزگر	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مجتبی شیوایی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر محسن اصیلی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا احمدی فرد

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به:

پدر و مادر عزیز و مهربانم

که در سختی ها و دشواری های زندگی، همواره یاور و دلسوز و خداکار

و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند.

تشکر و قدردانی

پاس خدای را که سخنوران، دستوران و بنانندگان، شمر دن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را کمزاردن نتوانند.

از پدر و سوز و مادر خداکارم، این دو معلم بزرگوار، که بهواره برکت های و درشتی من قلم عفو کشیده و گریانه از کنار غفلت هایم گذشته اند. آن ها که در تمام عرصه های زندگی یار و یاور می

بی چشم داشت برای من بوده اند و با حمایت های خود در محیطی مطلوب، آراش روحی و آسایش فکری لازم را فراهم نموده اند تا مراتب تحصیلی و پیمان نامه خود را به نحو احسن به

اتمام برسانم؛

از استاد شایسته، جناب آقای دکتر رحیمیان، که در کمال سه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از پیچ لگی در این عرصه برای من دریغ نمودند و زحمت راهپیمایی این رساله را به عهده گرفتند

و بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

اللهه غنائی

مهر ۱۳۹۹

تعهد نامه

اینجانب الهه غنائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق قدرت گرایش سیستم های قدرت، دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه مدیریت انرژی نیروگاه مجازی در بازارهای انرژی تحت

شرایط پیشامد، تحت راهنمایی جناب آقای دکتر مرتضی رحیمیان متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «*Shahrood University of Technology*» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده فارسی:

در این پایان نامه، مسئله‌ی مدیریت انرژی نیروگاه مجازی در بازارهای انرژی، توسط یک مدل مقاوم-تصادفی مدل سازی می گردد. اجزای نیروگاه مجازی واحدهای تولید تجدیدپذیر، واحد تولید حرارتی، سیستم ذخیره ساز انرژی و متقاضیان پاسخ گو به قیمت می باشند که توسط یک شبکه‌ی الکتریکی مجهز به فناوری شبکه هوشمند به یکدیگر متصل شده اند. هم چنین نیروگاه مجازی به عنوان یک نهاد در بازارهای روز پیش رو و زمان حقیقی شرکت می نماید. عدم قطعیت های در نظر گرفته شده در این مسئله میزان تولید واحد تجدیدپذیر، قیمت بازارها و دسترس پذیری اجزای نیروگاه مجازی هستند. به منظور مهار عدم قطعیت تولید واحد تجدیدپذیر از روش مبتنی بر بازه اطمینان و در مورد عدم قطعیت قیمت بازارها و دسترس پذیری اجزای شبکه از روش مبتنی بر سناریو استفاده شده است. روش ارائه شده در دو شبکه انتقال ۵ و ۲۴ باس پیاده سازی شده است و نتایج، عملکرد مناسب و قابلیت اجرایی تصمیم های اتخاذ شده را در شرایط پیشامد نشان می دهند.

کلمات کلیدی: مدیریت انرژی، نیروگاه مجازی، برنامه ریزی مقاوم-تصادفی، پیشامد.

فهرست مطالب

۱	فصل اول
۲	۱-۱- انگیزه تحقیق
۳	۲-۱- هدف تحقیق
۴	۳-۱- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه
۵	فصل دوم
۶	۱-۲- مقدمه
۶	۲-۲- نیروگاه مجازی
۸	۳-۲- شبکه هوشمند
۸	۴-۲- مدیریت انرژی
۹	۵-۲- مروری بر کارهای گذشته
۱۳	۶-۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۵	فصل سوم
۱۶	۱-۳- مقدمه
۱۶	۲-۳- تشریح مسئله
۱۷	۳-۳- فرضیات
۱۸	۴-۳- جریان اطلاعات و تصمیم‌سازی
۲۰	۵-۳- مدل‌سازی عدم قطعیت
۲۰	۳-۵-۱- قیمت بازار روز پیش‌رو
۲۰	۳-۵-۲- قیمت بازار زمان حقیقی

۲۰	۳-۵-۳- تولید انرژی تجدیدپذیر
۲۰	۳-۵-۴- پیشامدهای اجزای نیروگاه مجازی
۲۶	۳-۶- فهرست علائم و اختصارات
۲۹	۳-۷- مدل مقاوم تصادفی
۲۹	۱-۳-۷- مرحله اول؛ روز پیش‌رو
۳۷	۳-۷-۲- مرحله دوم؛ زمان حقیقی
۴۲	۳-۸- جمع‌بندی
۴۳	فصل چهارم
۴۴	۴-۱- مقدمه
۴۴	۴-۲- تولید سناریو و بازه پیش‌بینی
۴۴	۴-۲-۱- تولید سناریو قیمت بازار روز پیش‌رو
۴۶	۴-۲-۲- تولید سناریو قیمت بازار زمان حقیقی
۴۷	۴-۲-۳- تولید بازه پیش‌بینی توان تولیدی واحد تجدیدپذیر
۴۹	۴-۳-۳- اطلاعات مطالعه موردی یک: شبکه ۵ باس
۴۹	۱-۴-۳-۴- اطلاعات فنی و اقتصادی نیروگاه مجازی
۵۲	۴-۴- طرح شبیه‌سازی
۵۳	۴-۵- نتایج تصمیم‌سازی در بازار روز پیش‌رو
۵۳	۴-۵-۱- اثر در نظر گرفتن وقوع پیشامد
۵۷	۴-۵-۲- اثر تغییر ضریب ریسک‌گریزی و درجه مقاومت
۶۷	۴-۶-۶- نتایج مرحله زمان حقیقی
۶۷	۴-۶-۱- وقوع پیشامد واحد تولیدی حرارتی
۷۰	۴-۶-۲- وقوع پیشامد خط

۷۳	۳-۶-۴- اثر زمان وقوع پیشامد
۷۷	۷-۴- اطلاعات مطالعه موردی دو: شبکه ۲۴ باس
۷۸	۸-۴- نتایج تصمیم‌سازی در بازار روز پیش‌رو
۷۹	۴-۸-۱- اثر در نظر گرفتن وقوع پیشامد
۸۰	۴-۸-۲- اثر تغییر ضریب ریسک‌گریزی
۸۳	۴-۹- نتایج مرحله زمان حقیقی
۸۳	۴-۹-۱- وقوع پیشامد واحد تولیدی حرارتی
۸۶	۴-۱۰- جمع‌بندی
۸۷	فصل نهم
۸۸	۵-۱- مقدمه
۸۸	۵-۲- نتیجه‌ها
۹۰	۵-۳- پیشنهادها
۹۱	پیوست ۱
۹۴	پیوست ۲
۹۵	مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۳-۱- روندنمای مرحله روز پیش‌رو ۱۹
- شکل ۳-۲- روندنمای مرحله زمان حقیقی ۲۰
- شکل ۳-۳- درخت سناریو تصمیم‌سازی بر اساس دیدگاه مرحله روز پیش‌رو ۲۲
- شکل ۴-۱- سناریوهای قیمت بازار روز پیش‌رو ۴۵
- شکل ۴-۲- پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای و مقدار واقعی قیمت بازار روز پیش‌رو ۴۵
- شکل ۴-۳- سناریوهای کاهش یافته قیمت بازار روز پیش‌رو ۴۵
- شکل ۴-۴- سناریوهای تفاضل قیمت بازارها ۴۶
- شکل ۴-۵- سناریوهای کاهش یافته تفاضل قیمت بازارها در مرحله اول ۴۶
- شکل ۴-۶- سناریوهای قیمت بازار زمان حقیقی ۴۷
- شکل ۴-۷- سناریوهای کاهش یافته قیمت بازار زمان حقیقی ۴۷
- شکل ۴-۸- بازه پیش‌بینی توان واحد تجدیدپذیر در مرحله اول ۴۸
- شکل ۴-۹- بازه پیش‌بینی توان واحد تجدیدپذیر برای مرحله دوم در اولین دوره زمانی ۴۸
- شکل ۴-۱۰- شبکه نیروگاه مجازی مطالعه موردی یک (مرجع [۳۵]) ۴۹
- شکل ۴-۱۱- منحنی توان- قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در ساعت ۱ ۵۳
- شکل ۴-۱۲- منحنی توان- قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در ساعت ۱۴ ۵۴
- شکل ۴-۱۳- منحنی توان- قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در ساعت ۱۷ ۵۴
- شکل ۴-۱۴- منحنی توان- قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در ساعت ۲۴ ۵۴
- شکل ۴-۱۵- امید ریاضی منحنی توان پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در حالت پایه و پیشامد ۵۵
- شکل ۴-۱۶- منحنی توان پذیرفته شده در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد ۵۵
- شکل ۴-۱۷- منحنی کل توان مبادله شده در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد ۵۶

- شکل ۴-۱۸- سود مورد انتظار - $CVar$ در شرایط پایه و پیشامد ۵۷
- شکل ۴-۱۹- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیشرو در شرایط پایه ساعت ۱ ۵۸
- شکل ۴-۲۰- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیشرو در شرایط پایه ساعت ۵ ۵۹
- شکل ۴-۲۱- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیشرو در شرایط پایه ساعت ۱۴ ۵۹
- شکل ۴-۲۲- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیشرو در شرایط پایه ساعت ۱۷ ۶۰
- شکل ۴-۲۳- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیشرو در شرایط پایه ساعت ۲۴ ۶۰
- شکل ۴-۲۴- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیشرو در شرایط پیشامد ساعت ۱ ۶۱
- شکل ۴-۲۵- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیشرو در شرایط پیشامد ساعت ۵ ۶۲
- شکل ۴-۲۶- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیشرو در شرایط پیشامد ساعت ۱۴ ۶۲
- شکل ۴-۲۷- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیشرو در شرایط پیشامد ساعت ۱۷ ۶۳
- شکل ۴-۲۸- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیشرو در شرایط پیشامد ساعت ۲۴ ۶۴
- شکل ۴-۲۹- منحنی توان پذیرفته شده در بازار روز پیشرو با در شرایط پایه ۶۴
- شکل ۴-۳۰- منحنی توان پذیرفته شده در بازار روز پیشرو با در شرایط پیشامد ۶۵
- شکل ۴-۳۱- منحنی توان پذیرفته شده در شرایط پایه بر حسب درجه مقاومت ۶۵
- شکل ۴-۳۲- منحنی توان پذیرفته شده در شرایط پیشامد بر حسب درجه مقاومت ۶۶
- شکل ۴-۳۳- منحنی کل توان مبادله شده در بازار روز پیشرو در شرایط پایه بر حسب ضریب ریسک -
گزیزی و درجه مقاومت ۶۶
- شکل ۴-۳۴- منحنی کل توان مبادله شده در بازار روز پیشرو در حالت پیشامد بر حسب ضریب ریسک -
گزیزی و درجه مقاومت ۶۷
- شکل ۴-۳۵- منحنی مصرف کل متقاضیان در پیشامد واحد تولید حرارتی ۶۸
- شکل ۴-۳۶- منحنی انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز در شرایط پیشامد واحد تولید حرارتی ۶۸
- شکل ۴-۳۷- منحنی توان مبادله شده با شبکه اصلی در شرایط پیشامد واحد تولید حرارتی ۶۹

- شکل ۴-۳۸- منحنی توان واحد تجدیدپذیر در شرایط پیشامد واحد تولید حرارتی ۶۹
- شکل ۴-۳۹- منحنی مصرف کل متقاضیان در شرایط پیشامد خط ۷۰
- شکل ۴-۴۰- منحنی انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز در شرایط پیشامد خط ۷۱
- شکل ۴-۴۱- منحنی توان تولیدی واحد حرارتی در شرایط پیشامد خط ۷۲
- شکل ۴-۴۲- منحنی توان مبادله شده با شبکه اصلی در شرایط پیشامد خط ۷۲
- شکل ۴-۴۳- منحنی توان واحد تجدیدپذیر در شرایط پیشامد خط ۷۳
- شکل ۴-۴۴- منحنی کل سود واقعی روزانه در ساعات پیشامد واحد تولیدی حرارتی ۷۴
- شکل ۴-۴۵- منحنی توان تامین نشده در ساعات خروج واحد تولیدی حرارتی ۷۵
- شکل ۴-۴۶- منحنی سود روزانه در ساعات مختلف خروج خط ۳ ۷۶
- شکل ۴-۴۷- منحنی تجمعی توان-قیمت واحدهای تولید حرارتی ۷۸
- شکل ۴-۴۸- منحنی امید ریاضی پیشنهاد توان در شرایط پایه و پیشامد ۷۹
- شکل ۴-۴۹- منحنی توان-قیمت پذیرفته شده در بازار روز پیش رو در شرایط پایه و پیشامد ۷۹
- شکل ۴-۵۰- منحنی امید ریاضی پیشنهاد توان در شرایط پایه به ازای ضریب ریسک گریزی ۸۱
- شکل ۴-۵۱- منحنی امید ریاضی پیشنهاد توان در شرایط پیشامد به ازای ضریب ریسک گریزی. ۸۱
- شکل ۴-۵۲- منحنی امید ریاضی توان-قیمت پذیرفته شده به ازای ضریب ریسک گریزی ۸۲
- شکل ۴-۵۳- کل توان مبادله شده با شبکه اصلی در شرایط پیشامد ۸۴
- شکل ۴-۵۴- کل توان تولیدی واحدهای حرارتی در شرایط پیشامد ۸۴
- شکل ۴-۵۵- کل انرژی ذخیره شده در ذخیره سازها در شرایط پیشامد ۸۵
- شکل ۴-۵۶- منحنی مصرف کل متقاضیان در شرایط پیشامد ۸۵
- شکل پ ۱-۲- تابع چگالی احتمال سود ۹۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ - مروری بر مراجع موجود ۱۴
- جدول ۱-۴ - مشخصات فنی متقاضیان شبکه ۵۰
- جدول ۲-۴ - تابع مطلوبیت متقاضیان نیروگاه مجازی ۵۰
- جدول ۳-۴ - مشخصات خطوط انتقال (مرجع [۳۵]) ۵۱
- جدول ۴-۴ - اطلاعات فنی و اقتصادی واحدهای تولیدی حرارتی ۷۷
- جدول ۵-۴ - مقدار $CvaR$ و سود موردانتظار بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در شرایط پایه ۸۲
- جدول ۶-۴ - مقدار $CvaR$ و سود موردانتظار بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در شرایط پیشامد ۸۳

فصل اول

پیش‌گفتار

۱-۱- انگیزه تحقیق

در سال‌های گذشته، سطح نفوذ منابع تولید پراکنده به سرعت در حال افزایش است که این امر چالشی بزرگ برای بهره‌برداری سیستم‌های قدرت ایجاد نموده است. از طرف دیگر، مقدار تولید منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، به عنوان مثال واحدهای خورشیدی و بادی متغیر و نامشخص است که بهره‌برداری بازارهای برق را مشکل می‌سازد. به دلیل این‌که، تولید انرژی تجدیدپذیر ممکن است در زمان تحویل انرژی از مقدار برنامه‌ریزی منحرف شود. یک راه‌حل مناسب، ترکیب این منابع تولید با سیستم‌های ذخیره‌ساز و بارهای انعطاف‌پذیر است. در این زمینه می‌توان به مفهوم نیروگاه مجازی^۱ اشاره نمود. یک نیروگاه مجازی به عنوان مجموعه‌ای از واحدهای تولیدی، سیستم‌های ذخیره‌ساز و متقاضیان انرژی معرفی می‌گردد که با هدف بهینه‌سازی دارایی‌های انرژی به صورت یک نهاد واحد بهره‌برداری می‌شوند.

با توجه به مشکلات نفوذ منابع تولید پراکنده فسیلی مانند آلودگی محیط‌زیست و افزایش روزافزون قیمت سوخت‌های فسیلی، میزان مشارکت منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر در تولید انرژی افزایش یافته است. میزان تولید منابع تجدیدپذیر متغیر می‌باشد و امکان انحراف از میزان پیش‌بینی شده وجود دارد. به منظور مقابله با انحراف تولید منابع تجدیدپذیر و وقوع پیشامد از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی استفاده می‌شود. انرژی در سیستم ذخیره‌ساز در ساعاتی که قیمت انرژی پایین است ذخیره می‌گردد و انرژی ذخیره‌شده در ساعاتی که قیمت انرژی بالا می‌باشد، تخلیه می‌شود. به منظور افزایش سود، بارهای پاسخ‌گو به قیمت نیز با توجه به قیمت بازار انرژی، میزان مصرف خود را تغییر می‌دهند. بنابراین، بهره‌برداری یکپارچه منابع تولید پراکنده، میزان و زمان ذخیره و تخلیه انرژی در سیستم ذخیره‌ساز و مصرف متقاضیان پاسخ‌گو امری پیچیده می‌باشد.

نیروگاه مجازی برای مدیریت انرژی با چالش‌های اساسی رو به رو است که می‌توان به عدم قطعیت مقدار تولید واحدهای تجدیدپذیر، قیمت در بازارهای انرژی، مقدار مصرف متقاضیان و دسترس‌پذیری

¹ Virtual Power Plant(VPP)

اجزای نیروگاه مجازی اشاره نمود. نیروگاه مجازی به منظور شرکت در بازارهای انرژی باید از عدم قطعیت‌ها شناخت یابد. بنابراین، مدل‌سازی این عدم قطعیت‌ها و پیش‌بینی آن‌ها باید در مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی در نظر گرفته شوند. منابع تولید انرژی و خطوط انتقال نیز ممکن است از دسترس خارج شوند. وقوع این پیشامدها مقدار توان تولیدی و انتقالی از خطوط را تغییر می‌دهد که این امر می‌تواند سطح امنیت و سود نیروگاه مجازی را تحت تاثیر قرار دهد.

۲-۱- هدف تحقیق

هدف از انجام این تحقیق، مدیریت انرژی نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن احتمال خروج اجزای آن است. در این راستا، مدل‌سازی دواجرله‌ای مقاوم-تصادفی برای مسئله مدیریت انرژی یک نیروگاه مجازی شامل مجموعه‌ای از واحدهای تولید حرارتی، منابع تولید تجدیدپذیر، بارهای پاسخ‌گو به قیمت و سیستم ذخیره‌ساز انرژی انجام می‌گردد. نیروگاه مجازی با پیشنهاددهی استراتژیک در بازار روز پیش‌رو شرکت می‌کند، در حالیکه در بازار زمان حقیقی صرفاً یک انحراف‌دهنده^۱ است. عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده در مسئله مدیریت انرژی مقدار توان تولیدی واحدهای تجدیدپذیر، قیمت‌های بازار و دسترس‌پذیری اجزای نیروگاه مجازی است. به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت‌های بازار و دسترس‌پذیری المان‌های نیروگاه مجازی از روش مبتنی بر سناریو و برای مدل‌سازی عدم قطعیت توان تولیدی تجدیدپذیر از روش مبتنی بر بازه اطمینان استفاده می‌گردد. در این تحقیق تاثیر وقوع پیشامد بر تصمیم‌سازی در بازارهای انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سوالات اساسی که این پایان‌نامه با هدف پاسخ‌گویی به آن‌ها طراحی شده است، به شرح زیر است:

- عدم قطعیت‌های قیمت بازارهای انرژی و دسترس‌پذیری اجزای نیروگاه مجازی چگونه مدل‌سازی می‌شوند؟

¹ Deviator

- تاثیر وقوع پیشامد بر مدیریت انرژی نیروگاه مجازی چیست؟
- در نظر گرفتن احتمال وقوع پیشامد چه تاثیری بر شاخص $CVaR$ و سود مورد انتظار دارد؟
- در نظر گرفتن احتمال وقوع پیشامد چه تاثیری بر پیشنهادی استراتژیک در بازار روز پیشرو دارد؟
- اثر میزان درجه مقاومت و ریسک‌گریزی بر مدیریت انرژی و پیشنهادی استراتژیک چگونه است؟

۱-۳- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

سایر فصل‌های این پایان‌نامه به شرح زیر است:

در فصل دوم، سابقه موضوع مدیریت انرژی نیروگاه مجازی مورد بحث قرار خواهد گرفت. در ابتدا مفهوم نیروگاه مجازی و اجزای آن‌ها مانند منابع تولید پراکنده، بارهای پاسخ‌گو به قیمت، شبکه هوشمند و عدم قطعیت‌های موجود در نیروگاه مجازی تشریح می‌شود، سپس اهمیت موضوع مدیریت انرژی و در نظر گرفتن شرایط پیشامد و کارهای انجام‌شده در این حوزه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل سوم، در ابتدا الگوریتم مدیریت انرژی نیروگاه مجازی تشریح می‌شود. عدم قطعیت‌های قیمت بازارهای انرژی، تولید انرژی تجدیدپذیر و دسترس‌پذیری اجزای نیروگاه مجازی مدل‌سازی می‌شود. در نهایت، مسئله مدیریت انرژی به صورت مدل بهینه‌سازی مقاوم-تصادفی فرمول‌بندی می‌شود. در فصل چهارم، شبیه‌سازی مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی برای دو مطالعه موردی انجام می‌شود. در فصل پنجم، نتایج جمع‌بندی و پیشنهادهایی نیز برای ادامه تحقیق ارائه می‌گردد.

فصل دوم

مروری بر کارهای انجام شده

۲-۱- مقدمه

با بروز مشکلات زیست‌محیطی بخش انرژی، میزان سطح نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی و توربین‌های بادی، دائما در حال افزایش است. اگرچه عدم قطعیت در پیش‌بینی، بهره‌برداری ایمن را به مخاطره انداخته است ولی استفاده از فناوری‌های شبکه هوشمند، مانند کنترل‌های هوشمند، فناوری‌های پیشرفته ارتباطی، سیستم‌های شبیه‌سازی و کنترل خودکار زمان حقیقی فرصت‌های بیشتری را برای شرکت در بازار انرژی ایجاد نموده است که این امر هم‌چنین مشکلاتی برای بهره‌برداران سیستم به وجود می‌آورد. بنابراین، مدیریت و کنترل تعداد زیادی از منابع تولید پراکنده در سیستم‌های قدرت چالش‌برانگیز خواهد بود. یک راه‌حل مناسب برای این مشکل بهره‌برداری یکپارچه دارایی‌های تولید و مصرف در قالب مفهوم نیروگاه مجازی می‌باشد.

در این فصل، در ابتدا مفهوم نیروگاه مجازی توضیح داده می‌شود. سپس در مورد اجزای نیروگاه مجازی و سیستم مدیریت انرژی هوشمند بحث می‌شود. در نهایت کارهای انجام شده در حیطه مدیریت انرژی نیروگاه مجازی نقد و بررسی می‌شوند.

۲-۲- نیروگاه مجازی

مفهوم نیروگاه مجازی، بهره‌برداری یکپارچه از دارایی‌های تولید و مصرف به صورت یک نهاد واحد است. در حقیقت، نیروگاه مجازی ظرفیت منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و بارهای پاسخ‌گو به قیمت را به منظور تجارت در بازار انرژی و یا ارائه خدمات پشتیبانی تجمیع می‌نماید [۱] - [۴].

نیروگاه‌های مجازی به دو نوع فنی و تجاری تقسیم‌بندی می‌شوند. در نیروگاه مجازی تجاری، تجمیع واحدها با اهداف جنبه‌های تجاری انجام می‌شود و اثرات شبکه بر روی آن در نظر گرفته نمی‌شود، در حالی که این اثرات در نیروگاه مجازی فنی حائز اهمیت است. تفاوت‌هایی اساسی میان ریزشبکه و

نیروگاه مجازی وجود دارد. ریزشبه معمولاً فقط در بازار انرژی خرده‌فروشی شرکت می‌کند، در حالی که نیروگاه مجازی می‌تواند به عنوان پلی به سوی بازار عمده‌فروشی در نظر گرفته شود. ریزشبه‌ها با موانع قانونی و سیاسی روبرو هستند، در حالی که هم‌اکنون نیروگاه‌های مجازی می‌توانند براساس ساختار فعلی و تعرفه‌های قانونی بهره‌برداری شوند. ریزشبه می‌تواند خود را از شبکه اصلی جدا نماید، در حالی که در نیروگاه مجازی این نوع شرایط پیشامد توصیه نمی‌گردد. ریزشبه معمولاً به سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی نیاز دارد. با این حال، وجود یا عدم وجود سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در نیروگاه مجازی امکان‌پذیر است. ریزشبه به فناوری‌های سخت‌افزاری مانند اینورترهای هوشمند و سوئیچ‌ها وابسته می‌باشد، در حالی که نیروگاه مجازی به شدت به اندازه‌گیری هوشمند و فناوری اطلاعات وابسته است. ریزشبه شامل مجموعه‌ای ثابت از منابع انرژی در یک منطقه جغرافیایی محدود است ولی نیروگاه مجازی می‌تواند طیف گسترده‌ای از منابع را در مناطق جغرافیایی بزرگ ترکیب نماید و با آنها مطابقت داشته باشد [۴].

نفوذ منابع تولید پراکنده در سیستم‌های قدرت به سرعت در حال افزایش است، بنابراین در نظر گرفتن بهبود عملکرد سیستم‌های دارای این منابع بسیار ضروری به نظر می‌رسد [۵]. بر این اساس، پیشرفت مسیرهای جدید برای مدیریت تولید و تأمین زیرساخت مناسب برای مشارکت در بازارهای برق حائز اهمیت است. یک روش مناسب برای در نظر گرفتن این موارد استفاده از مفهوم نیروگاه مجازی است [۶]. متقاضیان پاسخ‌گو به قیمت، الگوی مصرف خود را به منظور بهبود قابلیت اطمینان شبکه و خصوصاً در ساعات اوج مصرف تغییر می‌دهند. این متقاضیان به سیستم مدیریت انرژی به غلبه بر چالش‌های ناشی از عدم قطعیت‌های موجود کمک می‌نمایند [۷] و [۸]. از آنجا که هزینه قیمت برق در ساعات مختلف شبانه‌روز تفاوت‌های بسیاری دارد، بنابراین ایده ذخیره‌سازی انرژی در ساعاتی که قیمت برق ارزان است و استفاده از انرژی ذخیره‌شده در ساعاتی که قیمت برق گران می‌باشد، پیشنهاد شده است. سیستم ذخیره‌ساز انرژی راه‌حلی جهت افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر، قابلیت اطمینان و پیک‌زدایی است.

۲-۳- شبکه هوشمند

فناوری‌های شبکه هوشمند قابلیت کنترل منابع تولید پراکنده را تسهیل می‌نمایند. تاکنون برای دستیابی به روش بهینه نفوذ واحدهای تولید پراکنده در مفهوم شبکه‌های هوشمند، تحقیقات قابل‌توجهی انجام شده است. در میان همه، پاسخ تقاضا^۱ و ذخیره‌ساز انرژی، مهم‌ترین عامل استقرار شبکه هوشمند بوده است، زیرا ترکیب آنها در سمت تقاضا می‌تواند چالش‌های نفوذ مقیاس بزرگ منابع تولید پراکنده را کاهش دهد و همچنین قابلیت اطمینان سیستم را بهبود بخشد. از آنجا که یک نیروگاه مجازی می‌تواند در بازارهای برق شرکت نماید، ضروری است که مالک نیروگاه مجازی بتواند استراتژی پیش-نهاددهی بهینه را تعیین کند تا سود خود را به حداکثر برساند [۹] و [۱۰].

۲-۴- مدیریت انرژی

مدیریت انرژی ابزاری مهم در کمک به نهادهای مختلف در جهت کاهش هزینه‌ها می‌باشد. نیروگاه مجازی با چالش‌هایی روبرو است که مدیریت انرژی آن را پیچیده می‌کند. این چالش‌ها عدم قطعیت در تولید، مصرف، قیمت انرژی و در دسترس بودن اجزای شبکه هستند. شبکه هوشمند توانایی سیستم مدیریت انرژی را در زمینه‌های غلبه بر عدم قطعیت‌ها، پاسخ‌گویی بار، نظارت و کنترل شبکه افزایش می‌دهد.

نیروگاه مجازی می‌تواند به صورت یک تجمیع‌کننده انرژی در بازارهای روز پیش‌رو و زمان حقیقی شرکت نماید. زمانی که نیروگاه مجازی، پیشنهادات قیمت-توان خود را در بازار انرژی روز پیش‌رو ارائه می‌نماید، پیش‌بینی دقیق میزان انرژی تجدیدپذیر از یک روز قبل دشوار است. [۱۱] و [۱۲]. مسئله پیشنهاددهی نیروگاه مجازی اغلب یک مسئله چندمرحله‌ای است. به عنوان مثال، نیروگاه مجازی باید پیشنهادات قیمت-توان را برای بازار برق و وضعیت واحدهای تولید حرارتی خود را از یک روز قبل بدون

¹ Demand Response

دانستن خروجی واقعی انرژی تجدیدپذیر و قیمت بازار زمان حقیقی تعیین کند. بنابراین، چگونگی هماهنگی این موارد در روند تصمیم‌سازی سیستم مدیریت انرژی بسیار چالش‌برانگیز است. [۱۰]، [۱۱] و [۱۲].

۲-۵- مروری بر کارهای گذشته

نیروگاه مجازی قادر است هم به عنوان تأمین‌کننده برق و هم به عنوان مصرف‌کننده رفتار نماید و پیشنهاد خرید و فروش خود را در بازار عمده‌فروشی انرژی ارائه دهد. مشارکت نیروگاه مجازی در بازارهای انرژی در چندین کار تحقیقاتی ارائه شده است.

در مرجع [۹]، یک مدل بهینه‌سازی سه مرحله‌ای تصادفی دوسطحی برای پیشنهاددهی بهینه یک نیروگاه مجازی تجاری شامل منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و مجموعه‌ای از مصرف‌کنندگان با هدف بیشینه‌سازی سود ارائه شده است. مدل پیشنهادی نیروگاه مجازی را قادر می‌سازد تا در بازار روز پیش‌رو به عنوان یک قیمت‌ساز^۱ عمل نماید و در عین حال هزینه‌های عدم تعادل بازار زمان حقیقی را به حداقل برساند. عدم قطعیت‌های تولید بادی و قیمت‌های بازار با سناریو مدل شده‌اند.

در مرجع [۱۵]، رویکردی جدید برای پیشنهاددهی استراتژیک نیروگاه مجازی ارائه می‌دهد که در بازارهای انرژی روز پیش‌رو و زمان حقیقی شرکت می‌کند. نیروگاه مجازی شامل یک واحد تولید متداول^۲، یک واحد تولید بادی، ذخیره‌ساز انرژی و متقاضیان انعطاف‌پذیر است که برای بهینه‌سازی منابع انرژی خود در بازارهای روز پیش‌رو و زمان حقیقی شرکت می‌کنند. عدم قطعیت‌های تولید انرژی باد و قیمت‌های بازار به ترتیب، با استفاده از بازه اطمینان و سناریو مدل می‌گردند.

مساله پیشنهاددهی استراتژیک دومرحله‌ای یک نیروگاه مجازی دارای واحد تولید بادی، بارهای

¹ Price Maker

² Conventional Power Plant

پاسخگو و واحد ذخیره‌سازی انرژی با استفاده از روش بهینه‌سازی مقاوم در مرجع [۱۶]، مدل‌سازی شده است. این نیروگاه مجازی مجهز به شبکه هوشمند در بازارهای روز پیش‌رو و زمان‌حقیقی شرکت می‌نماید. در مرحله اول، نیروگاه مجازی برای شرکت در بازار روز پیش‌رو تصمیم‌سازی می‌کند و پس از آن که برنامه‌ریزی واقعی در مرحله اول مشخص شد، نیروگاه مجازی در مرحله دوم برای شرکت در بازار زمان‌حقیقی هر ساعت از روز برنامه‌ریزی می‌نماید. در این مرجع فرض شده است که نیروگاه مجازی قیمت‌پذیر^۱ است. عدم قطعیت‌های تولید بادی و قیمت انرژی در بازارهای روز پیش‌رو و زمان‌حقیقی توسط بازه اطمینان مدل شده‌اند.

در مرجع [۱۷]، مقایسه‌ای در مورد مدل‌های مدیریت انرژی زمان‌حقیقی یک نیروگاه مجازی که شامل یک واحد تولید بادی، یک واحد ذخیره‌سازی انرژی و تعدادی متقاضی انعطاف‌پذیر است، انجام می‌شود. عدم قطعیت‌های تولید بادی و قیمت بازار زمان‌حقیقی با استفاده از سه نوع مدل تصادفی، مقاوم و مقاوم-تصادفی مدل‌سازی شده‌اند.

با استفاده از یک رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای، یک مدل پیشنهاددهی بهینه در مرجع [۱۸]، برای شرکت نیروگاه مجازی در بازار انرژی و رزرو چرخان ارائه شده است. از شاخص $CvaR$ ^۲ برای کنترل ریسک تغییرپذیری سود استفاده می‌گردد. عدم قطعیت‌های مربوط به تولید انرژی تجدیدپذیر، مصرف بار، خدمات رزرو و همچنین قیمت در بازار روز پیش‌رو، بازار رزرو چرخان و بازار زمان‌حقیقی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مقاله چگونگی تغییر سود نیروگاه مجازی تحت تأثیر ریسک‌پذیری و مشارکت در بازار زمان‌حقیقی را ارزیابی می‌نماید. برای این منظور، نقش یکپارچه‌سازی و روند تبادلات انرژی و رزرو تحت هر دو سیستم تک‌قیمتی و دو قیمت‌ی بحث قرار می‌گردد.

در مرجع [۳]، روشی جامع برای مسئله مدیریت انرژی بهینه نیروگاه مجازی مبتنی بر شاخص ریسک $CvaR$ با در نظر گرفتن پاسخ تقاضا و عدم قطعیت‌ها پیشنهاد می‌شود. هدف از حل مسئله به حداقل

¹ Price Taker

² Conditional Value-at-risk (CvaR)

رساندن هزینه‌های بهره‌برداری نیروگاه مجازی می‌باشد. در این مقاله یک رویکرد برنامه‌نویسی تصادفی دومرحله‌ای برای در نظر گرفتن عدم قطعیت توان خروجی واحدهای تجدیدپذیر، بار پاسخ تقاضا و قیمت برق اتخاذ می‌گردد.

در مرجع [۱۹]، یک مدل جدید برای مسئله برنامه‌ریزی روز پیش‌رو یک نیروگاه مجازی که در هر دو بازار انرژی و رزرو شرکت می‌نماید، ارائه شده است. نیروگاه مجازی شامل واحدهای تولید متداول، سیستم ذخیره‌ساز انرژی، واحد تولید بادی و بارهای انعطاف پذیر می‌باشد. نیروگاه مجازی به عنوان یک نهاد واحد به منظور استفاده بهینه از منابع انرژی، در بازارهای انرژی و رزرو شرکت می‌نماید. در مدل پیشنهادی عدم قطعیت تولید بادی و رزرو توسط روش بازه اطمینان و عدم قطعیت در قیمت بازار به کمک سناریو مدل‌سازی می‌گردد.

در مرجع [۲۰]، یک مدل دیسپچ متمرکز نیروگاه مجازی برای مشارکت منابع تولید پراکنده در بازار روز پیش‌رو معرفی شده است. به منظور کاهش اثرات جانبی نفوذ منابع تولید پراکنده، مدل بهینه‌سازی استراتژی پیشنهاددهی نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن بار پاسخ‌گو و عدم قطعیت منابع تولید پراکنده پیشنهاد شده است. عدم قطعیت تولید منابع پراکنده و قیمت بازار توسط سناریو مدل‌سازی گردیده‌اند.

عدم قطعیت دسترس‌پذیری امان‌های نیروگاه مجازی می‌تواند تصمیمات سیستم مدیریت انرژی را تحت تاثیر قرار دهد. در مرجع [۶]، مدیریت انرژی یک نیروگاه مجازی صنعتی در شرایط پیشامد $N-1$ و بدون آن بررسی گردیده است. نیروگاه مجازی هم‌چنین در بازارهای روز پیش‌رو و میان‌روز شرکت می‌نماید. عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده شامل تولید بادی و قیمت‌های بازار روز پیش‌رو، میان‌روز و دسترس‌پذیری خطوط انتقال می‌باشند. تولید سناریو برای پوشش عدم قطعیت‌ها با استفاده از توابع توزیع احتمالی نرمال و ویبال^۱ تحت روش مونت کارلو انجام شده است. خروج خط به صورت یک سناریو مدل‌سازی شده است. تابع هدف مسئله حداکثر نمودن سود همراه با کاهش قطع بار و یافتن بهترین

¹ Weibull

برنامه پاسخ تقاضا در شرایط پیشامد با در نظر گرفتن شاخص $CvaR$ است.

در مرجع [۲۱]، یک روش تصادفی مبتنی بر ریسک برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت انرژی و رزرو یک نیروگاه مجازی به همراه مشارکت پاسخ تقاضا ارائه شده است. نیروگاه مجازی شامل چندین واحد تولیدی قابل دیسپچ، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، واحدهای تولید بادی و بارهای انعطاف‌پذیر است. روش برنامه‌ریزی پیشنهادی به صورت یک برنامه تصادفی مبتنی بر ریسک برای حداکثر نمودن سود نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید بادی و قیمت در بازارهای برق و همچنین شرایط پیشامد $N-1$ فرمول‌بندی گردیده است. در این مرجع پیشامد خروج تک-خط و واحد ذخیره‌ساز در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، تأثیر ریسک‌پذیری در تصمیم‌سازی نیروگاه مجازی در پیشنهادی توان و خدمات رزرو موردنیاز با استفاده از شاخص $CvaR$ بررسی می‌شود. عدم قطعیت‌های تولید بادی، قیمت در بازارهای انرژی روز پیش‌رو و زمان حقیقی و وقوع پیشامد تحت روش مونت کارلو توسط سناریو مدل‌سازی گردیده‌اند. در طرح پیشنهادی، برنامه‌ریزی انرژی و رزرو را با و بدون شرکت متقاضیان در برنامه‌های پاسخ تقاضا مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرجع [۱۴]، مسئله مدیریت انرژی زمان حقیقی، توسط مدل تصادفی مقاوم مدل‌سازی گردیده است. این نیروگاه مجازی شامل ایستگاه‌های خورشیدی، واحدهای ذخیره‌ساز و متقاضیان پاسخ‌گو است که توسط یک ریزشبه به یک‌دیگر متصل گردیده‌اند. عدم قطعیت قیمت انرژی و تولید خورشیدی به کمک روش بازه اطمینان و دسترس‌پذیری المان‌های ریزشبه توسط سناریو مدل‌سازی شده‌اند. در این مرجع پیشامد $N-1$ برای خطوط انتقال در نظر گرفته شده است.

در مرجع [۲۲]، یک مدل تصادفی برای مدل‌سازی مسئله مدیریت انرژی زمان حقیقی نیروگاه مجازی، ارائه گردیده است. اجزای نیروگاه مجازی شامل منابع تولید پراکنده (ایستگاه خورشیدی و واحد تولیدی حرارتی)، واحدهای ذخیره‌سازی انرژی و متقاضیان پاسخ‌گو به قیمت می‌باشند که توسط یک ریزشبه به یک‌دیگر متصل گردیده‌اند. علاوه بر این، قابلیت تبادل انرژی با شبکه‌ی اصلی در نظر گرفته شده

است. مدل پیشنهادی با برنامه‌ریزی انرژی و ظرفیت رزرو چرخان، امنیت سیستم را در سطح مناسبی تضمین می‌نماید. عدم قطعیت‌های مقدار تولید توان خورشیدی و قیمت در بازار زمان حقیقی با استفاده از روش پیش‌بینی نقطه‌ای مدل‌سازی شده‌اند. به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت دسترس‌پذیری المان‌های شبکه از روش تولید سناریو استفاده گردیده است. در این مرجع پیشامد $N-1$ برای خطوط انتقال و واحد تولیدی حرارتی در نظر گرفته شده است.

۲-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل مفاهیم مدیریت انرژی، نیروگاه مجازی و فناوری‌های به‌کار گرفته شده در آن‌ها معرفی گردیدند و در ادامه کارهای انجام گرفته در این حوزه بررسی شدند.

در جدول (۱-۲) مروری بر مراجع موجود در زمینه مدیریت انرژی نیروگاه مجازی انجام شده است. رنگ خاکستری در بخش شرکت در بازار نشان می‌دهد که پیشنهادی استراتژیک در این بازارهای انرژی انجام شده است. با توجه به جدول (۱-۲) در اکثر کارهای انجام شده، مدیریت انرژی و پیشنهادی استراتژیک در بازارهای انرژی بدون در نظر گرفتن وقوع پیشامد بررسی شده‌اند. در مراجع [۳]، [۶]، [۷]، [۱۷]، [۱۸]، [۲۱] و [۲۶] شاخص مدیریت ریسک $CVaR$ در نظر گرفته شده است. در مراجع [۱۷]، [۱۹] و [۲۵] عدم قطعیت به صورت مقاوم-تصادفی مدل‌سازی شده است ولی در هیچ‌کدام وقوع پیشامد مورد بررسی قرار نگرفته است. در مراجع [۶] وقوع پیشامد خط به صورت یک تک سناریو مدل گردیده و در مرجع [۲۱] وقوع پیشامد خط و ذخیره‌ساز بررسی شده است، در حالی که وقوع پیشامد واحد تولید حرارتی در نظر گرفته نشده است و مدل‌سازی عدم قطعیت به صورت تصادفی با روش مونت‌کارلو انجام شده است که با روش مقاوم-تصادفی در این تحقیق تفاوت دارد.

جدول ۱-۲- مروری بر مراجع موجود

مدل عدم قطعیت		CVaR	نوع پیشامد			۱ _{DR}	رذرو	شرکت در بازار		عدم قطعیت		اجزای نیروگاه مجازی					مرجع
^۱ R	^۱ S		TU	SS	⁵ L			DA	RT	قیمت بازار	⁴ RG	TU [*]	² SS	PV	WT		
✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	[۱]	
✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[۳]	
✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	[۴]	
✗	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	[۶]	
✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	[۷]	
✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	[۸]	
✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	[۱۰]	
✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	[۱۵]	
✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	[۱۶]	
✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	[۱۷]	
✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	[۱۸]	
✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	[۱۹]	
✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	[۲۰]	
✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	[۲۱]	
✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	[۲۳]	
✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	[۲۴]	
✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	[۲۵]	
✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	[۲۶]	
✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	[۲۷]	
✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	[۲۸]	
✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	این تحقیق	

¹ Demand Response (DR)

² Storge System(SS)

³ Thermal Unit(TU)

⁴ Renewable Energy (RG)

⁵ Line(L)

⁶ Stochastic(S)

⁷ Robust(R)

فصل سوم

مدل سازی مسئله مدیریت انرژی

نیروگاه مجازی

۳-۱- مقدمه

در این فصل، مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی تشریح و مدل عدم قطعیت پیشنهادی ارائه می‌شود. قیمت در بازارهای روز پیش‌رو و زمان حقیقی و همچنین دسترس‌پذیری امان‌های نیروگاه مجازی با استفاده از سناریو مدل می‌شوند. تولید واحد تجدیدپذیر نیز با کمک روش بازه اطمینان مدل می‌گردد. بر این اساس، مسئله مدیریت انرژی به صورت مدل بهینه‌سازی مقاوم-تصادفی فرمول‌بندی می‌شود.

۳-۲- تشریح مسئله

مسئله، مدیریت انرژی یک نیروگاه مجازی است که شامل مجموعه‌ای از واحد تولید حرارتی، واحد تولید تجدیدپذیر، سیستم ذخیره‌ساز انرژی و متقاضیان پاسخ‌گو به قیمت است. اجزای نیروگاه مجازی توسط یک شبکه الکتریکی به یک‌دیگر متصل شده‌اند. متقاضیان پاسخ‌گو با توجه به قیمت انرژی می‌توانند بسته به میزان مطلوبیت، مصرف خود را تغییر دهند. سیستم مدیریت انرژی در ساعاتی که قیمت بازار پایین است توان را از شبکه اصلی خریداری می‌نماید و سیستم ذخیره‌ساز، شارژ می‌شود. در ساعاتی که قیمت بازار بالا است انرژی را به شبکه اصلی می‌فروشد و انرژی ذخیره‌شده در سیستم ذخیره‌ساز تخلیه می‌گردد. سیستم مدیریت انرژی به ابزار فناوری شبکه هوشمند مجهز است و می‌تواند اطلاعات را به صورت زمان حقیقی دریافت و ارسال کند. نیروگاه مجازی در بازارهای روز پیش‌رو و زمان حقیقی شرکت می‌نماید و برنامه‌ریزی اجزای نیروگاه مجازی با توجه به ویژگی‌های فنی و اقتصادی انجام می‌گردد. هدف اصلی مسئله مدیریت انرژی حداکثر نمودن سود نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن قیود فنی و اقتصادی واحدهای آن و سیستم قدرت است. به منظور افزایش سود، بارهای پاسخ‌گو به قیمت نیز در ساعاتی که قیمت در بازار انرژی بالا است، میزان مصرف خود را کاهش می‌دهند. هماهنگی و بهره‌برداری یک‌پارچه منابع تولید پراکنده، زمان و میزان ذخیره و تخلیه انرژی سیستم ذخیره‌ساز و مصرف متقاضیان پاسخ‌گو توسط سیستم مدیریت انرژی انجام می‌شود.

در مدیریت انرژی نیروگاه مجازی عدم قطعیت مقدار تولید واحدهای تجدیدپذیر، قیمت در بازارهای انرژی و دسترس پذیری اجزای نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده است. نیروگاه مجازی به منظور شرکت در بازارهای انرژی باید از عدم قطعیت‌ها شناخت یابد.

بنابراین، برنامه‌ریزی سیستم مدیریت انرژی در دو مرحله صورت می‌گیرد: (۱) سیستم مدیریت انرژی اطلاعات واحدهای تولید انرژی و قیمت بازارهای روز پیش‌رو و زمان حقیقی را دریافت می‌نماید و با توجه به این اطلاعات برنامه‌ریزی واحدهای خود را برای هر ساعت از روز انجام می‌دهد و پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو را برای هر ساعت از روز تعیین می‌نماید. در این مرحله وضعیت روشن و یا خاموش بودن واحد تولید حرارتی برای تمام ساعات روز بعد مشخص می‌شود. (۲) بازار روز پیش‌رو تسویه شده است، نیروگاه مجازی دیسپچ دارایی‌های تولید و مصرف را با استفاده از اطلاعات به‌روزشده واحدهای تولیدی، قیمت بازار و آرایش نیروگاه مجازی انجام می‌دهد.

۳-۳- فرضیات

مسئله مدیریت انرژی در چارچوب فرضیات زیر تعریف می‌شود:

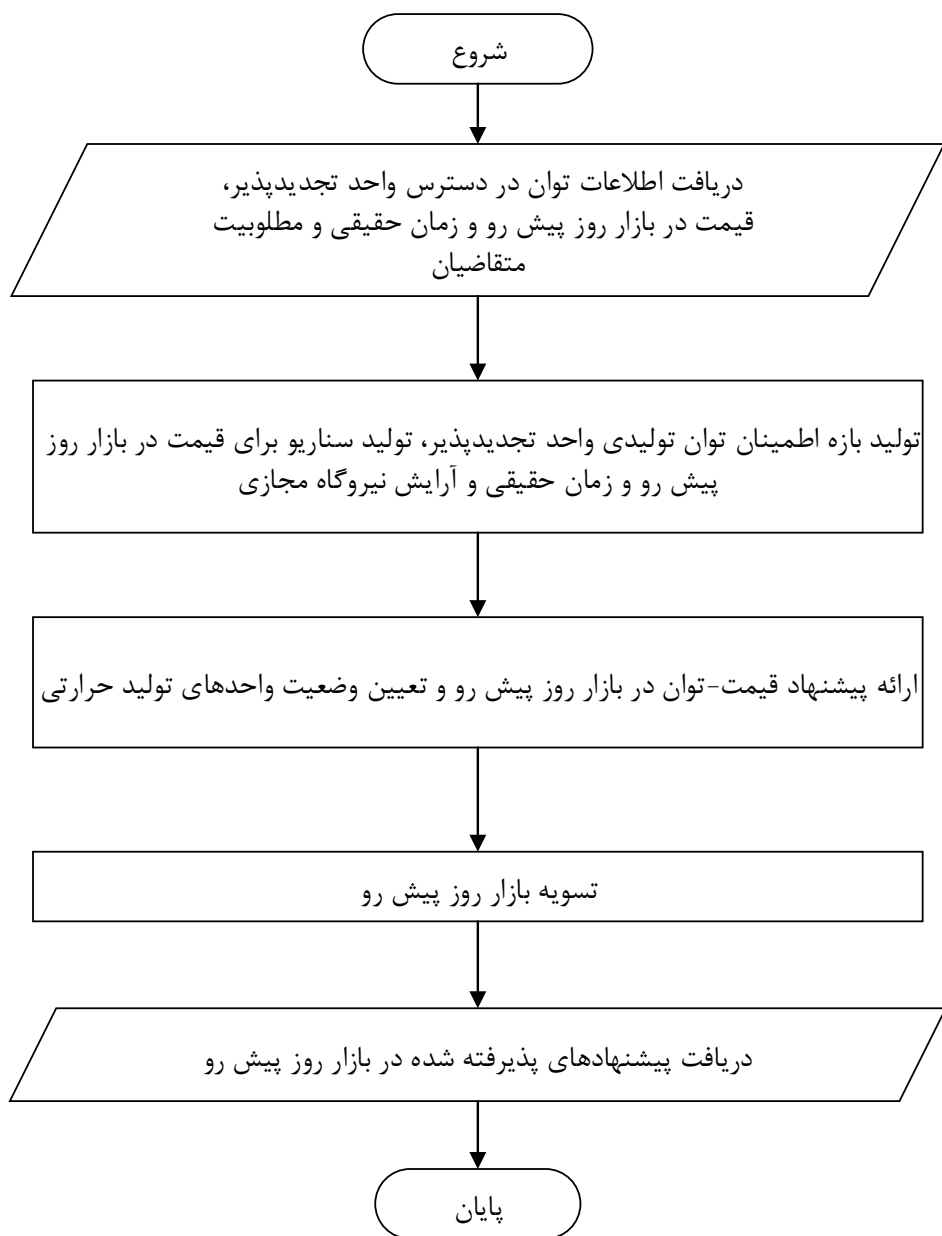
- نیروگاه مجازی مالک دارایی‌های تولید است.
- نیروگاه مجازی قیمت‌پذیر است و توانایی اثرگذاری بر قیمت بازار برق را ندارد.
- هزینه بهره‌برداری واحدهای تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز صفر فرض می‌شود.
- سیستم مدیریت انرژی قبل از تصمیم‌سازی در هر بازه زمانی، نزدیک به آن بازه از حداکثر توان در دسترس واحد تجدیدپذیر آگاهی می‌یابد.
- قیمت بازار زمان حقیقی در هر ساعت منتشر می‌شود.
- دوره زمانی برنامه‌ریزی بررسی شده ۲۴ ساعت یک روز است.
- صرفاً احتمال خروج خطوط و واحدهای حرارتی در نظر گرفته شده است.

۳-۴- جریان اطلاعات و تصمیم‌سازی

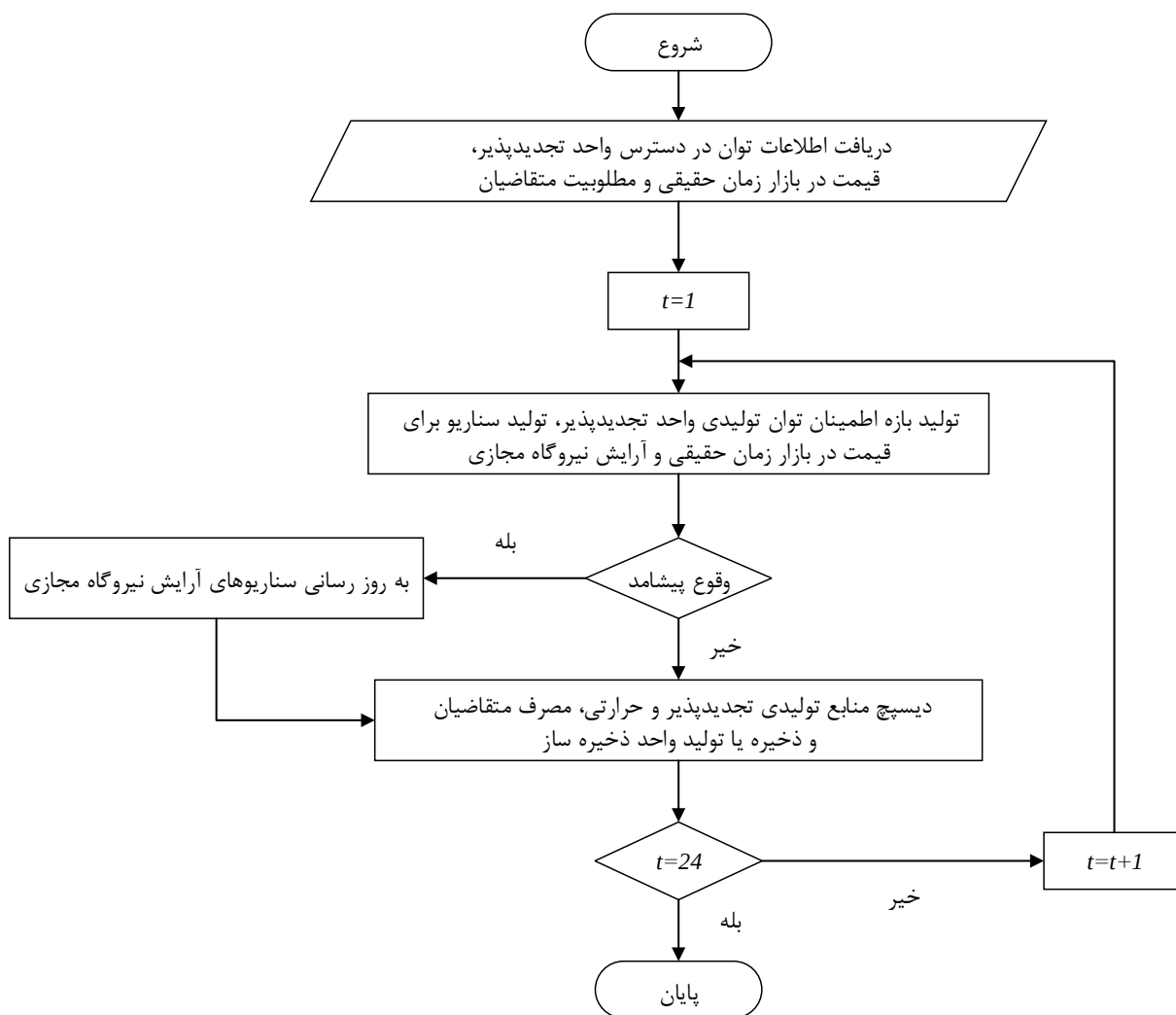
در مرحله برنامه‌ریزی روز پیش‌رو، سیستم مدیریت انرژی، در ساعت ۱۰ صبح اطلاعات گذشته مرتبط با میزان تولید واحدهای تجدیدپذیر، قیمت بازار روز پیش‌رو و بازار زمان حقیقی را دریافت می‌کند. البته لازم به ذکر است، اطلاعات قیمت بازار روز پیش‌رو در همان روز ($D-1$) موجود است. بنابراین، پیش‌بینی قیمت بازار روز پیش‌رو فقط برای ۲۴ ساعت روز (D) انجام می‌شود. قیمت بازار زمان حقیقی و تولید در دسترس واحد تجدیدپذیر نیز تا ساعت ۱۰ صبح روز ($D-1$) موجود است و پیش‌بینی برای روز (D) انجام می‌شود. عدم قطعیت آرایش نیروگاه مجازی ناشی از خروج تصادفی خطوط و واحد تولیدی حرارتی نیز در ۲۴ ساعت آینده مدل‌سازی می‌شود. در شکل (۱-۳) روندنمای مرحله روز پیش‌رو نمایش داده شده است.

در مرحله برنامه‌ریزی زمان حقیقی برای روز (D)، بازار روز پیش‌رو تسویه شده است. بنابراین، اطلاعات قیمت بازار روز پیش‌رو در ۲۴ ساعت در روز (D) در اختیار سیستم مدیریت انرژی قرار می‌گیرد. سیستم مدیریت انرژی چند دقیقه قبل از دیسپچ واحدها در دوره زمانی پیش‌رو، اطلاعات قیمت بازار زمان حقیقی، تولید واحد تجدیدپذیر و آرایش نیروگاه مجازی در دوره زمانی فعلی را دریافت می‌کند. سپس، برای دوره زمانی پیش‌رو و ساعات باقی‌مانده از روز آن‌ها را پیش‌بینی می‌نماید. این فرآیند در هر دوره زمانی قبل از تحویل توان تکرار می‌شود.

سیستم مدیریت انرژی قبل از توزیع توان اطلاعات آرایش نیروگاه مجازی و قیمت بازار زمان حقیقی را دریافت می‌کند، بنابراین از وقوع یا عدم‌وقوع پیشامد آگاهی می‌یابد. سیستم مدیریت انرژی بر اساس شرایط آرایش نیروگاه مجازی، تصمیمات خود را شامل تولید منابع، مصرف متقاضیان و میزان ذخیره/تولید واحد ذخیره‌ساز اتخاذ می‌کند. در شکل (۳-۲) روندنمای مرحله زمان حقیقی ترسیم شده است.



شکل ۳-۱- روندنمای مرحله روز پیش‌رو



شکل ۳-۲ - روندنمای مرحله زمان حقیقی

۳-۵- مدل سازی عدم قطعیت

در زمان تصمیم سازی، سیستم مدیریت انرژی نیروگاه مجازی با متغیرهای غیرقطعی مواجه می شود. در این تحقیق، قیمت انرژی در بازارهای روز پیش رو و زمان حقیقی، میزان تولید واحد تجدیدپذیر و آرایش نیروگاه مجازی، متغیرهای غیرقطعی هستند.

جهت مدل سازی عدم قطعیت ها از ساختار ترکیبی سناریو و بازه اطمینان استفاده می شود. متغیرهای غیرقطعی قیمت بازار روز پیش رو، قیمت بازار زمان حقیقی و آرایش نیروگاه مجازی به صورت مجموعه ای از

سناریوها نمایش داده می‌شود. درحالی‌که متغیر غیرقطعی تولید تجدیدپذیر به صورت بازه اطمینان نشان داده می‌شود.

بر اساس ساختار مدل‌سازی عدم قطعیت، تصمیم‌سازی در بازار روز پیش‌رو توسط سیستم مدیریت انرژی بر اساس دیدگاه زیر صورت می‌گیرد:

- سیستم مدیریت انرژی، در بازار روز پیش‌رو تصمیم‌سازی می‌کند. در فرآیند تصمیم‌سازی، امید ریاضی سود به ازای مجموعه سناریوهای محتمل قیمت بازار روز پیش‌رو، قیمت بازار زمان حقیقی و آرایش نیروگاه مجازی و پیش‌بینی بدترین سناریوی تولید در دسترس واحد تجدیدپذیر حداکثرسازی می‌شود. در نتیجه تسویه بازار روز پیش‌رو، میزان خرید/فروش نیروگاه مجازی در بازار روز پیش‌رو و وضعیت روشن/خاموش بودن واحد حرارتی تعیین می‌شود.

- باتوجه به این‌که تصمیم‌سازی در بازار روز پیش‌رو (مرحله اول) قبل از وقوع سناریو ω انجام می‌شود، این تصمیم‌ها مستقل از سناریو مذکور هستند. به عبارتی، این تصمیم‌ها از نوع "اینجا و اکنون" هستند.

- چنانچه سناریو ω محقق شود، قیمت بازار روز پیش‌رو، قیمت بازار زمان حقیقی و آرایش نیروگاه مجازی مشخص می‌شود.

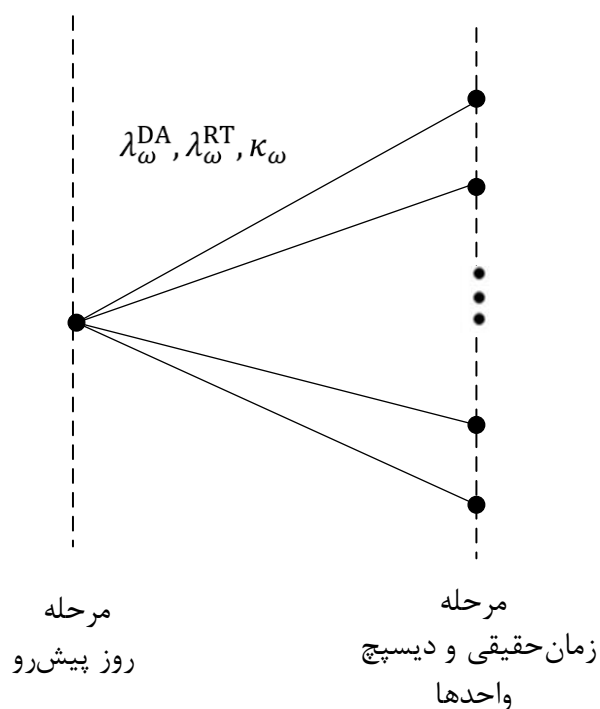
- سیستم مدیریت انرژی در مرحله زمان حقیقی و دیسپچ برای توزیع توان تصمیم‌سازی می‌کند. در نتیجه آن میزان تبادل با بازار زمان حقیقی، میزان تولید منابع، مصرف متقاضیان و میزان ذخیره/تولید واحد ذخیره‌ساز در آن ساعت تعیین می‌شود.

- باتوجه به اینکه تصمیم‌سازی در بازار زمان حقیقی بعد از وقوع سناریو ω انجام می‌شود، این تصمیم‌ها وابسته به سناریوی مذکور هستند. به عبارتی، این تصمیم‌ها از نوع "صبر کن و ببین"^۲ هستند.

¹ Here And Now

² Wait And See

بر اساس دیدگاه تصمیم‌سازی در بازار روز پیش‌رو، درخت سناریو تصمیم‌سازی در بازار روز پیش‌رو در شکل (۳-۳) ترسیم شده است.



شکل ۳-۳- درخت سناریو تصمیم‌سازی در بازار روز پیش‌رو

بر اساس ساختار مدل‌سازی عدم قطعیت، تصمیم‌سازی در بازار زمان حقیقی و دیسپیچ توسط سیستم مدیریت انرژی بر اساس دیدگاه زیر صورت می‌گیرد: t

- سیستم مدیریت انرژی در مرحله زمان حقیقی و دیسپیچ برای توزیع توان در دوره زمانی t تصمیم‌سازی می‌کند. در فرآیند تصمیم‌سازی، امید ریاضی سود به ازای مجموعه سناریوهای محتمل قیمت بازار زمان حقیقی و آرایش نیروگاه مجازی و پیش‌بینی بدترین سناریوی تولید در دسترس واحد تجدیدپذیر در بازه زمانی $[t+1, T]$ حداکثرسازی می‌شود. در نتیجه آن میزان تولید منابع، مصرف متقاضیان و میزان ذخیره/تولید واحد ذخیره‌ساز در دوره زمانی t تعیین می‌شود.

- قیمت بازار روز پیش‌رو، قیمت بازار زمان حقیقی و آرایش نیروگاه مجازی در دوره زمانی t معلوم فرض می‌شود. چنانچه سناریو ω محقق شود، قیمت بازار روز پیش‌رو، قیمت بازار زمان حقیقی و آرایش نیروگاه مجازی در بازه زمانی $[t+1, T]$ مشخص می‌شود.
- باتوجه به اینکه تصمیم‌سازی در بازار زمان حقیقی در دوره زمانی t ، قبل از وقوع سناریو ω انجام می‌شود، این تصمیم‌ها از نوع "اینجا و اکنون" هستند.

۳-۵-۱- قیمت بازار روز پیش‌رو

قیمت انرژی در بازار روز پیش‌رو در تصمیم‌سازی مرحله اول نامعلوم است. برای پیش‌بینی آن در ساعت ۱۰ صبح روز $(D-1)$ ، اطلاعات قیمت تا پایان روز فعلی در دسترس است و پیش‌بینی برای ۲۴ ساعت روز (D) به روش زیر انجام می‌پذیرد:

اطلاعات قیمت از سه ماه گذشته تا ۱۰ صبح به‌عنوان اطلاعات تاریخی برای پیش‌بینی قیمت دریافت می‌شود. سپس بر روی سری زمانی به‌دست‌آمده مدل آریمای مناسب اجرا می‌شود. با استفاده از خطاهای باقی‌مانده که توسط اعداد تصادفی به دست آمده‌اند، سناریوهای قیمت بازار روز پیش‌رو حاصل می‌شود.

۳-۵-۲- قیمت بازار زمان حقیقی

به دلیل همبستگی قابل‌توجه بین قیمت‌های بازار روز پیش‌رو و بازار زمان حقیقی، برای پیش‌بینی قیمت بازار زمان حقیقی، از اطلاعات قیمت بازار روز پیش‌رو استفاده می‌شود. با استفاده از اطلاعات گذشته قیمت انرژی روز پیش‌رو، پیش‌بینی دقیق‌تری از قیمت بازار زمان حقیقی حاصل می‌شود [۱۶].

برای پیش‌بینی قیمت بازار زمان حقیقی در ساعت ۱۰ صبح، ابتدا اطلاعات قیمت بازار روز پیش‌رو که تا پایان روز در دسترس است و اطلاعات قیمت بازار زمان حقیقی که تا ساعت ۱۰ موجود است دریافت می‌شود. سپس یک مدل آریمای مناسب بر روی اختلاف اطلاعات گذشته قیمت‌های بازار زمان حقیقی و قیمت بازار روز پیش‌رو اجرا می‌شود.

مقادیر پیش‌بینی شده قیمت‌های بازار زمان حقیقی برای هر ساعت با جمع اختلاف متناظر آن ساعت با قیمت بازار روز پیش‌رو حاصل می‌شود [۱۶].

$$\{\lambda_h^{RT}\} = \lambda_h^{DA} + \varepsilon_h^{RT} \quad (۱-۳)$$

۳-۵-۳- تولید انرژی تجدیدپذیر

برای مدل‌سازی عدم قطعیت تولید انرژی خورشیدی از روش ترکیبی فازی-آریما استفاده شده است [۱۶]. روش پیش‌بینی به صورت زیر است:

اطلاعات تابش و توان انرژی خورشیدی روزهای گذشته تا ساعت ۱۰ صبح روز $(D-1)$ دریافت می‌شود. توان تولیدی خورشیدی تابعی از میزان تابش خورشید است. مدل فازی بر روی اطلاعات گذشته تابش خورشید اجرا می‌شود.

با محاسبه اختلاف بین مقدار واقعی تولید توان خورشیدی در دسترس و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل فازی خطای باقی‌مانده محاسبه می‌شود، سپس یک مدل آریمای مناسب بر روی این خطای باقی‌مانده اجرا می‌شود. مقدار توان پیش‌بینی شده خورشیدی برای ساعات پیش‌رو، از جمع توان خورشیدی از روش فازی و خطاهای باقی‌مانده (اختلافات) پیش‌بینی شده توسط مدل آریما به دست می‌آید. بر اساس یک سطح اطمینان معلوم، بازه اطمینان توان خورشیدی برای ساعات پیش‌رو تولید می‌شود.

۳-۵-۴- پیشامدهای اجزای نیروگاه مجازی

به منظور مدل‌سازی پیشامدهای اجزای نیروگاه مجازی از مدل‌سازی تصادفی مبتنی بر سناریو استفاده می‌شود. پیشامدهای سیستم شامل خروج واحد تولید حرارتی و یا خطوط است. با در اختیار داشتن پارامترهای نرخ خرابی (λ) و نرخ تعمیرات (μ) برای هر جزء نیروگاه مجازی، احتمال در دسترس بودن (P^A) یا در دسترس نبودن (P^U) اجزای نیروگاه مجازی در ساعت t به صورت زیر قابل محاسبه است. با استفاده از این اطلاعات، احتمال تحقق هر آرایش نیروگاه مجازی به دست می‌آید [۲۹].

$$P^A = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} \quad (2-3)$$

$$P^U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\mu + \lambda)t} \quad (3-3)$$

به عنوان مثال، فرض کنید صرفاً مجموعه آرایش‌های از نوع پیشامد $(N-1)$ موردنظر باشد.

در ضمن فرض کنید در صورت خروج هر جزء نیروگاه مجازی، امکان تعمیر آن‌ها تا پایان دوره برنامه‌ریزی وجود ندارد. بنابراین $\mu = 0$ در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه احتمال دسترس‌پذیری تجهیزات سیستم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P^A = e^{-\lambda t} \quad (4-3)$$

احتمال وقوع پیشامد K در دوره زمانی τ از معادله (5-3) محاسبه می‌شود.

$$P[A(K, \tau)] = e^{-\lambda_K \tau} (e^{\lambda_K} - 1) \quad (5-3)$$

احتمال اینکه در طول دوره برنامه‌ریزی پیشامد K رخ ندهد از معادله (6-3) محاسبه می‌شود.

$$P[B(K)] = e^{-\lambda_K T} \quad (6-3)$$

لازم به ذکر است که T طول دوره برنامه‌ریزی است. احتمال این که در طول روز برنامه‌ریزی، پیشامد K رخ ندهد و تمام اجزای نیروگاه مجازی در طول دوره برنامه‌ریزی T در دسترس باشند از ضرب احتمالات $P[B(K)]$ توسط رابطه (7-3) به دست می‌آید:

$$P_0 = \prod_{K=1}^K P[B(K)] = \prod_{K=1}^K e^{-\lambda_K T} \quad (7-3)$$

احتمال اینکه پیشامد K در طول دوره زمانی τ رخ دهد و در تمام طول دوره برنامه‌ریزی دیگر اجزای نیروگاه مجازی در دسترس باشند، از رابطه (8-3) محاسبه می‌شود:

$$P(K, \tau) = P[A(K, \tau)] \prod_{\substack{y=1 \\ y \neq K}}^K P[B(y)] = e^{-\lambda_K \tau} (e^{\lambda_K} - 1) \prod_{\substack{y=1 \\ y \neq K}}^K e^{-\lambda_y T} \quad (8-3)$$

با توجه به این که پیشامدهای همزمان در نظر گرفته نشده است، مجموع احتمالات P و P_0 برابر یک نیست، بنابراین احتمالات باید نرمالایز شوند. برای این منظور، احتمال وقوع هر پیشامد بر مجموع احتمالات تقسیم می شود.

$$P(\kappa, \tau) = \frac{P(\kappa, \tau)}{\sum_{\kappa} P(\kappa, \tau) + P_0} \quad (9-3)$$

$$P_0 = \frac{P_0}{\sum_{\kappa} P(\kappa, \tau) + P_0}$$

۳-۶- فهرست علائم و اختصارات

فهرست علائم و اختصارات مورد استفاده در این تحقیق به شرح ذیل است.

الف) شاخص ها

عنوان	علامت	عنوان	علامت
شاخص متقاضیان انرژی الکتریکی	j	شاخص واحد تولید حرارتی	g
شاخص خط انتقال	k	شاخص زمان	h, t, τ
شاخص سناریو	ω	شاخص واحد تولید تجدیدپذیر و ذخیره ساز	i
		شاخص پیشامد	κ

ب) پارامترها

عنوان	پارامتر	عنوان	پارامتر
حداقل توان تولید واحد حرارتی g	$\underline{P}_g^T$	حداقل توان مصرفی متقاضی j در ساعت h	$\underline{P}_{j,h}^D$
حداکثر توان تولید واحد حرارتی g	$\overline{P}_g^T$	حداکثر توان مصرفی متقاضی j در ساعت h	$\overline{P}_{j,h}^D$
حد بالای افزایش توان تولید واحد حرارتی g	RU_g^T	حد بالای کاهش توان مصرفی متقاضی j	RD_j^D

RU_j^D	حد بالای افزایش توان مصرفی متقاضی j	RD_g^T	حد بالای کاهش توان واحد حرارتی g
$U_{j,h}^D$	تابع مطلوبیت متقاضی j در ساعت h	$C_g^{T,U}$	هزینه روشن شدن واحد حرارتی g
$F^{D,sh}$	ضریب جریمه کاهش حداقل انرژی مصرفی روزانه و حداقل توان مصرفی ساعتی متقاضیان	$C_g^{T,D}$	هزینه خاموش شدن واحد حرارتی g
$\underline{E}_j^D$	حداقل انرژی روزانه مصرفی مورد نیاز متقاضی j	$C_{g,h}^T$	هزینه تولید انرژی واحد حرارتی g در ساعت h
$\bar{P}_{i,h}^R$	توان تولیدی در دسترس واحد تجدیدپذیر i در ساعت h	η_i^{S-}	بازده تبدیل انرژی خروجی از واحد ذخیره ساز i
$\bar{E}_i^S$	حداکثر انرژی الکتریکی قابل ذخیره در واحد ذخیره ساز i	$\bar{P}_n^M$	محدودیت تبادل توان با شبکه اصلی در باس n
$\bar{P}^{VPP+}$	حداکثر خرید توان نیروگاه مجازی از شبکه اصلی	$\bar{P}^{VPP-}$	حداکثر فروش توان نیروگاه مجازی به شبکه اصلی
$\underline{E}_i^S$	حداقل انرژی قابل ذخیره در واحد ذخیره ساز i	$\bar{P}_k^L$	ظرفیت خط k
$\bar{P}_i^{S+}$	حداکثر توان ورودی به واحد ذخیره ساز i	X_k	راکتانس خط k
$\bar{P}_i^{S-}$	حداکثر توان خروجی از واحد ذخیره ساز i	α	ضریب تبدیل توان به انرژی
η_i^{S+}	بازده تبدیل انرژی ورودی به واحد ذخیره ساز i		

ج) متغیرهای پیوسته

متغیر	عنوان	متغیر	عنوان
-------	-------	-------	-------

توان ورودی واحد ذخیره‌ساز i در ساعت h	$p_{i,h}^{S+}$	توان مصرفی متقاضی j در ساعت h	$p_{j,h}^D$
توان خروجی واحد ذخیره‌ساز i در ساعت h	$p_{i,h}^{S-}$	توان تأمین نشده متقاضی j در ساعت h	$p_{j,h}^{D,sh}$
توان فروخته شده (منفی) به/خریداری شده (مثبت) از شبکه اصلی در ساعت h در باس n	$p_{n,h}^M$	انرژی تأمین نشده روزانه متقاضی j	$e_j^{D,sh}$
توان فروخته شده (منفی) به/خریداری شده (مثبت) از شبکه اصلی در بازار روز پیش‌رو در ساعت h	p_h^{DA}	توان تولیدی واحد حرارتی g در ساعت h	$p_{g,h}^T$
توان فروخته شده (منفی) به/خریداری - شده (مثبت) از شبکه اصلی در بازار زمان حقیقی در ساعت h	p_h^{RT}	هزینه روشن شدن واحد حرارتی g در ساعت h	$c_{g,h}^{T,U}$
توان انتقالی از خط k در ساعت h	$p_{k,h}^L$	هزینه خاموش شدن واحد حرارتی g در ساعت h	$c_{g,h}^{T,D}$
زاویه ولتاژ باس n در ساعت h	$\delta_{n,h}$	انرژی ذخیره شده در واحد ذخیره‌ساز i در ساعت h	$e_{i,h}^S$

(د) متغیرهای تصادفی

عنوان	متغیر	عنوان	متغیر
قیمت بازار زمان حقیقی در ساعت h	λ_h^{RT}	قیمت بازار روز پیش‌رو در ساعت h	λ_h^{DA}
توان تولیدی در دسترس واحد تجدیدپذیر i در ساعت h	$p_{i,h}^R$	ساختار نیروگاه مجازی در ساعت h	κ_h

(ه) متغیرهای باینری

عنوان	متغیر	عنوان	متغیر
متغیر باینری که اگر واحد ذخیره‌ساز i در ساعت h در حال ذخیره باشد برابر ۱ است.	$u_{i,h}^S$	متغیر باینری که اگر واحد حرارتی g در ساعت h در حال تولید باشد برابر ۱ است.	$u_{g,h}^T$

و) مجموعه‌ها

عنوان	علامت	عنوان	علامت
مجموعه واحدهای ذخیره‌ساز	Ω^S	مجموعه باس‌ها	Ω^N
در نیروگاه مجازی			
مجموعه واحدهای ذخیره‌ساز	Ω_n^S	مجموعه خطوط	Ω^L
واقع در باس n			
مجموعه متقاضیان واقع در باس	Ω_n^D	مجموعه متقاضیان در نیروگاه	Ω^D
n		مجازی	
مجموعه واحدهای تجدیدپذیر	Ω^R	مجموعه باس‌های متصل به شبکه	Ω^M
در نیروگاه مجازی		اصلی	
مجموعه واحدهای تجدیدپذیر	Ω_n^R	مجموعه واحدهای حرارتی در	Ω^T
واقع در باس n		نیروگاه مجازی	
		مجموعه واحدهای حرارتی واقع	Ω_n^T
		در باس n	

ز) علائم

عنوان	علامت	عنوان	علامت
مقدار واقعی معلوم‌شده	$\wedge$	امید ریاضی مقدار متغیر	$\{ \}$
حداقل مقدار پارامتر	$\underline{X}$	حداکثر مقدار پارامتر	$\overline{X}$

۳-۷- مدل مقاوم تصادفی

بر اساس مدل عدم قطعیت، مدل مقاوم-تصادفی برای مدیریت انرژی نیروگاه مجازی ارائه می‌شود. عدم-قطعیت‌های قیمت بازارهای روز پیش‌رو، قیمت بازار زمان حقیقی و دسترس‌پذیری المان‌های نیروگاه مجازی با استفاده از تولید سناریو و عدم قطعیت تولید واحد تجدیدپذیر با کمک روش پیش‌بینی بازه اطمینان مدل‌سازی می‌شوند.

۳-۷-۱- مرحله اول؛ روز پیش‌رو

در مرحله اول، سیستم مدیریت انرژی در بازار روز پیش‌رو شرکت می‌کند. تابع هدف (۳-۱۰)،

حداکثرسازی مجموع امید ریاضی سود و شاخص ریسک $CVaR$ موزون با پارامتر نامنفی β است. به ازای $\beta=0$ امید ریاضی سود حداکثر می‌شود. با افزایش β ، شاخص ریسک در تابع هدف اثرگذارتر می‌شود.

$$Max \left[\sum_{\omega} \rho_{\omega} \zeta_{\omega} + \beta CVaR \right] \quad (10-3)$$

متغیر ζ_{ω} سود کل را به ازای تحقق هر سناریو است که بر اساس قید (3-11) محاسبه می‌شود و شامل 5 مولفه است که به صورت زیر تشریح می‌شوند:

۱. مولفه $\sum_{j \in \Omega^D} U_{jh}^D p_{jh}^D(\omega) \alpha$ مطلوبیت متقاضیان را در هر ساعت به ازای تحقق هر سناریو محاسبه می‌نماید.

۲. مولفه $F^{D,sh} p_{jh}^{D,sh}(\omega) \alpha$ هزینه قطع بار ساعتی متقاضیان است که ضریب جریمه بزرگی به منظور حداقل نمودن قطع بار در نظر گرفته شده است.

۳. مولفه $\sum_{g \in \Omega^T} (C_{gh}^T p_{gh}^T(\omega) \alpha + c_{gh}^{T,U} + c_{gh}^{T,D})$ هزینه تولید انرژی واحدهای تولید حرارتی در هر ساعت به علاوه هزینه روشن شدن و خاموش شدن واحدهای تولید حرارتی می‌باشد.

۴. مولفه $\alpha \lambda_h^{DA}(\omega) p_h^{DA} - \alpha \lambda_h^{RT}(\omega) p_h^{RT}(\omega)$ هزینه و درآمد حاصل از خرید و فروش انرژی در بازار روز پیش‌رو و بازار زمان حقیقی را محاسبه می‌کند.

۵. مولفه $F^{D,sh} \sum_{j \in \Omega^D} e_j^{D,sh}(\omega)$ حداقل انرژی تامین نشده روزانه متقاضیان است که ضریب جریمه بزرگی به منظور حداقل نمودن آن در نظر گرفته شده است.

$$\zeta_{\omega} = \left[\sum_{h=1}^{24} \left[\sum_{j \in \Omega^D} U_{jh}^D p_{jh}^D(\omega) \alpha - F^{D,sh} p_{jh}^{D,sh}(\omega) \alpha \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_{g \in \Omega^T} (C_{gh}^T p_{gh}^T(\omega) \alpha + c_{gh}^{T,U} + c_{gh}^{T,D}) - \alpha \lambda_h^{DA}(\omega) p_h^{DA} \right. \right. \\ \left. \left. - \alpha \lambda_h^{RT}(\omega) p_h^{RT}(\omega) \right] \right. \\ \left. - F^{D,sh} \sum_{j \in \Omega^D} e_j^{D,sh}(\omega) \right] \quad \forall h, j, \omega \quad (11-3)$$

با توجه به همبستگی قابل توجه قیمت بازار زمان حقیقی و بازار روز پیش‌رو، قیمت بازار زمان حقیقی را می‌توان به صورت معادله (۱۲-۳) نوشت [۱۶]. بنابراین، متغیر ζ_{ω} به صورت قید (۱۳-۳) بازنویسی می‌شود.

$$\lambda_h^{RT}(\omega) = \varepsilon_h^{RT}(\omega) + \lambda_h^{DA}(\omega) \quad (12-3)$$

$$\zeta_{\omega} = \left[\sum_{h=1}^{24} \left[\sum_{j \in \Omega^D} U_{jh}^D p_{jh}^D(\omega) \alpha - F^{D,sh} p_{jh}^{D,sh}(\omega) \alpha \right. \right. \\ \left. \left. - \sum_{g \in \Omega^T} (C_{gh}^T p_{gh}^T(\omega) \alpha + c_{gh}^{T,U} + c_{gh}^{T,D}) \right. \right. \\ \left. \left. - \alpha \lambda_h^{DA}(\omega) (p_h^{DA} + p_h^{RT}(\omega)) - \alpha \varepsilon_h^{RT}(\omega) p_h^{RT}(\omega) \right] \right. \\ \left. - F^{D,sh} \sum_{j \in \Omega^D} e_j^{D,sh}(\omega) \right] \quad \forall h, j, \omega \quad (3-13)$$

قیود (۱۴-۳) تا (۱۶-۳) شاخص $CVaR$ را در سطح اطمینان φ به صورت خطی نمایش می‌دهند. شاخص $CVaR$ توسط قید (۱۴-۳) محاسبه می‌شود. با افزایش مقدار φ سطح اطمینان ریسک‌گریزی افزایش می‌یابد. قید (۳-۱۵) نشان می‌دهد که در هر سناریو، شاخص $CVaR$ باید از مجموع سود و متغیر کمکی کمتر باشد. قید (۱۶-۳) تضمین می‌نماید که متغیر کمکی مقداری نامنفی باشد.

$$CVaR = \xi - \frac{1}{1-\varphi} \sum_{\omega} \rho_{\omega} \mu_{\omega} \quad \forall \omega \quad (14-3)$$

$$\xi \leq \zeta_{\omega} + \mu_{\omega} \quad \forall \omega \quad (15-3)$$

$$\mu_{\omega} \geq 0 \quad \forall \omega \quad (16-3)$$

الف) قیود متقاضیان

میزان تغییر ساعتی توان مصرفی هر متقاضی توسط قید (۱۷-۳) محدود می‌شود.

$$-RD_j^D \leq p_{jh}^D(\omega) - p_{jh-1}^D(\omega) \leq RU_j^D \quad \forall h, j, \omega \quad (17-3)$$

قید (۱۸-۳) بیان می‌نماید که حد بالای مصرف هر متقاضی، حداکثر توان مصرفی آن است و برای حد پایین آن، مقدار توان تأمین نشده‌ی متقاضی از حداقل انرژی مصرفی آن کم می‌شود.

$$\underline{P}_{jh}^D - p_{jh}^{D,sh}(\omega) \leq p_{jh}^D(\omega) \leq \overline{P}_{jh}^D \quad \forall h, j, \omega \quad (18-3)$$

قید (۱۹-۳) بیان می‌کند که میزان مصرف هر متقاضی در طول روز باید بیشتر از حداقل انرژی مصرفی روزانه منهای انرژی تأمین نشده‌ی روزانه باشد. قید (۲۰-۳) تضمین می‌نماید که میزان توان تأمین نشده هر متقاضی کم‌تر از حداقل توان مصرفی آن باشد. قید (۲۱-۳) حداقل انرژی مصرفی روزانه برای هر متقاضی را محدود می‌نماید.

$$\sum_{h=1}^{24} ap_{jh}^D(\omega) \geq \underline{E}_j^D - e_j^{D,sh}(\omega) \quad \forall j, \omega \quad (19-3)$$

$$0 \leq p_{jh}^{D,sh}(\omega) \leq \underline{P}_{jh}^D \quad \forall h, j, \omega \quad (20-3)$$

$$0 \leq e_j^{D,sh}(\omega) \leq \underline{E}_j^D \quad \forall j, \omega \quad (21-3)$$

ب) قیود واحدهای تولید تجدیدپذیر

با استفاده روش بهینه‌سازی مقاوم مطرح‌شده در مراجع [۳۰] و [۳۱] که در پیوست آمده است، عدم‌قطعیت تولید خورشیدی به صورت قیود (۲۲-۳) تا (۲۵-۳) مدل می‌شوند.

$\eta(\omega)$ و $v(\omega)$ متغیرهای دوگان مرتبط با تولید انرژی تجدیدپذیر هستند. پارامتر $\Gamma(i, h)$ برای تعیین درجه مقاومت پاسخ مسئله در برابر عدم‌قطعیت میزان تولید انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود. این پارامتر می‌تواند مقداری در بازه $[0, 1]$ اختیار کند. $y_h^R(\omega)$ به عنوان متغیر کمکی برای خطی‌سازی مسئله استفاده شده است.

$$p_{ih}^R(\omega) + \Gamma(i, h)v(\omega) + \eta(\omega) \leq \frac{1}{2}(\bar{P}_{ih}^R + \underline{P}_{jh}^R) \quad \forall h, i, \omega \quad (22-3)$$

$$v(\omega) + \eta(\omega) \leq \frac{1}{2}(\bar{P}_{ih}^R - \underline{P}_{ih}^R)y_h^R(\omega) \quad \forall h, i, \omega \quad (23-3)$$

$$y_h^R(\omega) \geq 1 \quad \forall h, i, \omega \quad (24-3)$$

$$v(\omega), \eta(\omega), y_h^R(\omega), p_{ih}^R(\omega) \geq 0 \quad \forall h, i, \omega \quad (25-3)$$

ج) قیود واحدهای تولید حرارتی

میزان تغییرات تولید واحد حرارتی در هر ساعت توسط قید (۲۶-۳) محدود می‌شود.

$$-RD_g^T \leq p_{gh}^T(\omega) - p_{gh-1}^T(\omega) \leq RU_g^T \quad \forall h, g, \omega \quad (26-3)$$

قید (۲۷-۳) میزان تولید هر واحد حرارتی را محدود می‌کند.

$$u_{gh}^T \underline{P}_{g,h}^T(\omega) \leq p_{gh}^T(\omega) \leq u_{gh}^T \bar{P}_{g,h}^T(\omega) \quad \forall h, g, \omega \quad (27-3)$$

محدودیت هزینه‌های روشن و خاموش شدن واحدهای حرارتی توسط قیدهای (۲۸-۳) و (۲۹-۳) اعمال می‌شود.

$$(u_{gh}^T - u_{gh-1}^T) C_g^{T,U} \leq c_{gh}^{T,U} \quad \forall h, g \quad (28-3)$$

$$(u_{gh-1}^T - u_{gh}^T) C_g^{T,D} \leq c_{gh}^{T,D} \quad \forall h, g \quad (29-3)$$

$$c_{gh}^{T,U}, c_{gh}^{T,D} \geq 0 \quad \forall h, g \quad (30-3)$$

د) قیود واحدهای ذخیره‌ساز انرژی

معادله (۳۱-۳) مقدار انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز در هر ساعت را تعیین می‌کند که در آن مقدار انرژی خروجی از مجموع مقدار انرژی موجود در ساعت قبل و مقدار انرژی ورودی کم می‌شود. ذخیره انرژی و تخلیه انرژی در ذخیره‌ساز با تلفاتی همراه است که (η_i^+) و (η_i^-) به ترتیب مربوط به بازده ورودی و خروجی باتری هستند.

$$e_{ih}^S(\omega) = e_{ih-1}^S(\omega) + \eta_i^{S+} p_{ih}^{S+}(\omega) \alpha - \frac{p_{ih}^{S-}(\omega) \alpha}{\eta_i^{S-}} \quad \forall h, i, \omega \quad (31-3)$$

محدودیت ذخیره و تخلیه واحد ذخیره‌ساز و غیرهمزمانی ذخیره و تخلیه آن توسط قیود (۳۲-۳) و (۳۳-۳) تضمین می‌شود.

$$0 \leq p_{ih}^{S+}(\omega) \leq u_{ih}^S(\omega) \bar{P}_i^{S+}(\omega) \quad \forall h, i, \omega \quad (32-3)$$

$$0 \leq p_{ih}^{S-}(\omega) \leq (1 - u_{ih}^S(\omega)) \bar{P}_i^{S-}(\omega) \quad \forall h, i, \omega \quad (33-3)$$

محدودیت ذخیره انرژی در واحدهای ذخیره‌ساز توسط قید (۳۴-۳) در نظر گرفته می‌شود.

$$\underline{E}_i^S \leq e_{ih}^S(\omega) \leq \bar{E}_i^S \quad \forall h, i, \omega \quad (34-3)$$

ه) قیود برنامه ریزی شبکه اصلی

مجموع مقدار توان خریداری شده از/فروخته شده به شبکه اصلی در بازارهای روز پیش رو و زمان حقیقی در هر ساعت برابر با مقدار توان خریداری شده از/فروخته شده به شبکه در باس های متصل به شبکه اصلی است که از معادله (35-3) به دست می آید.

$$p_h^{DA} + p_h^{RT}(\omega) = \sum_{n \in \Omega^M} p_{nh}^M(\omega) \quad \forall h, \omega \quad (35-3)$$

قید (36-3) خرید/فروش توان از/به شبکه اصلی در باس های متصل به شبکه اصلی را محدود می کند.

$$-\underline{P}_n^M \leq p_{nh}^M(\omega) \leq \bar{P}_n^M \quad \forall h, \omega, n \in \Omega^M \quad (36-3)$$

قید (37-3) تبادل توان بازار روز پیش رو را محدود می کند.

$$\bar{P}^{VPP-} \leq p_h^{DA} \leq \bar{P}^{VPP+} \quad \forall h, n \in \Omega^M \quad (37-3)$$

قید (38-3) تبادل توان بازار روز پیش رو و زمان حقیقی را محدود می کند.

$$\bar{P}^{VPP-} \leq p_h^{DA} + p_h^{RT}(\omega) \leq \bar{P}^{VPP+} \quad \forall h, \omega, n \in \Omega^M \quad (38-3)$$

و) قیود تعادل توان در نیروگاه مجازی

معادله (39-3) تعادل توان در نیروگاه مجازی برای باس های متصل به شبکه اصلی را بیان می کند. معادله

(40-3) تعادل توان در نیروگاه مجازی را برای همه ی باس ها به غیر از باس های متصل به شبکه اصلی بیان می کند.

$$\begin{aligned}
& p_{nh}^M(\omega) + \sum_{i \in \Omega_n^R} p_{ih}^R(\omega) + \sum_{i \in \Omega_n^S} p_{ih}^{S-}(\omega) + \sum_{g \in \Omega_n^T} p_{gh}^T(\omega) \\
& - \sum_{k \mid o(k)=n} p_{kh}^L(\omega) + \sum_{k \mid d(k)=n} p_{kh}^L(\omega) \quad \forall h, \omega, n \in \Omega^M \quad (39-3) \\
& = \sum_{j \in \Omega_n^D} p_{jh}^D(\omega) + \sum_{i \in \Omega_n^S} p_{ih}^{S+}(\omega)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i \in \Omega_n^R} p_{ih}^R(\omega) + \sum_{i \in \Omega_n^S} p_{ih}^{S-}(\omega) + \sum_{g \in \Omega_n^T} p_{gh}^T(\omega) \\
& - \sum_{k \mid o(k)=n} p_{kh}^L(\omega) \quad \forall h, \omega, n \in \Omega^N \setminus n \in \Omega^M \quad (40-3) \\
& + \sum_{k \mid d(k)=n} p_{kh}^L(\omega) \\
& = \sum_{j \in \Omega_n^D} p_{jh}^D(\omega) + \sum_{i \in \Omega_n^S} p_{ih}^{S+}(\omega)
\end{aligned}$$

توان عبوری از خطوط از رابطه (3-41) به دست می آید.

$$p_{kh}^L(\omega) = B_k(\omega) (\delta_{o(k)h}(\omega) - \delta_{d(k)h}(\omega)) \quad \forall h, k, \omega \quad (41-3)$$

قید (3-42) توان عبوری از خطوط را محدود می کند که حداکثر مقدار آن باید از ظرفیت خط کمتر باشد.

$$-\bar{P}_k^L(\omega) \leq p_{kh}^L(\omega) \leq \bar{P}_k^L(\omega) \quad \forall h, k, \omega \quad (42-3)$$

روابط (3-43) و (3-44) به ترتیب محدودیت زاویه ولتاژ باس و مقدار زاویه ولتاژ باس مرجع را بیان می نمایند.

$$-\pi \leq \delta_{nh}(\omega) \leq \pi \quad \forall h, \omega, n \in \Omega^N \quad (43-3)$$

$$\delta_{nh}(\omega) = 0 \quad \forall h, \omega, n: \text{Reference bus} \quad (44-3)$$

۳-۷-۲- مرحله دوم؛ زمان حقیقی

در این بخش، مدل مقاوم-تصادفی مدیریت انرژی نیروگاه مجازی در مرحله دوم جهت تعیین تبادل با بازار زمان حقیقی و دیسپچ توان و مصرف ارائه می‌شود. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌های ناشی از تولید تجدیدپذیر از روش بازه اطمینان استفاده می‌شود. عدم قطعیت قیمت بازار زمان حقیقی و دسترس‌پذیری اجزای نیروگاه مجازی نیز به کمک سناریو مدل‌سازی می‌شوند. در مرحله دوم فرض شده است که سیستم مدیریت انرژی در زمان تصمیم‌سازی برای دوره زمانی t از اطلاعات مقدار توان تولیدی واحد تجدیدپذیر، قیمت بازار زمان حقیقی و وضعیت اجزای نیروگاه مجازی در آن ساعت و ساعات قبل از آن مطلع است. در حالی که این اطلاعات برای دوره زمانی $t-24$ معلوم نیست. قید (۳-۴۵) تابع هدف مرحله دوم را نشان می‌دهد.

$$\text{Max} \left[\sum_{\omega} \rho_{\omega} \zeta_{\omega} + \beta \text{CVaR} \right] \quad (۳-۴۵)$$

قید (۳-۴۶) سود موردانتظار را محاسبه می‌کند و از دو بخش تشکیل شده است. در بخش اول، سود به ازای تحقق هر سناریو در دوره زمانی t و در بخش دوم برای دوره زمانی $t-24$ محاسبه می‌شود. در دوره زمانی t قیمت بازار زمان حقیقی معلوم است.

$$\begin{aligned} \zeta_{\omega} = & \sum_{j \in \Omega^D} U_{jt}^D p_{jt}^D(\omega) \alpha - F^{D,sh} p_{jt}^{D,sh}(\omega) \alpha - \sum_{g \in \Omega^T} (C_{gt}^T p_{gt}^T(\omega) \alpha) - \alpha \hat{\lambda}_t^{RT} p_t^{RT}(\omega) \\ & + \sum_{h=t+1}^{24} \left[\sum_{j \in \Omega^D} U_{jh}^D p_{jh}^D(\omega) \alpha - F^{D,sh} p_{jh}^{D,sh}(\omega) \alpha \right. \\ & \left. - \sum_{g \in \Omega^T} (C_{gh}^T p_{gh}^T(\omega) \alpha) - \alpha \lambda_h^{RT}(\omega) p_h^{RT}(\omega) \right] \\ & - F^{D,sh} \sum_{j \in \Omega^D} e_j^{D,sh}(\omega) \end{aligned} \quad (۳-۴۶)$$

$$\text{CVaR} = \xi - \frac{1}{1-\varphi} \sum_Y \rho_{\omega} \mu_{\omega} \quad \forall \omega \quad (۳-۴۷)$$

$$\xi \leq \zeta_{\omega} + \mu_{\omega} \quad \forall \omega \quad (۳-۴۸)$$

$$\mu_{\omega} \geq 0 \quad \forall \omega \quad (49-3)$$

الف) قیود متقاضیان

$$-RD_j^D \leq p_{jh}^D(\omega) - p_{jh-1}^D(\omega) \leq RU_j^D \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (50-3)$$

$$\underline{P}_{jh}^D - p_{jh}^{D,sh}(\omega) \leq p_{jh}^D(\omega) \leq \bar{P}_{jh}^D \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (51-3)$$

قید (۵۲-۳) بیان می‌کند که میزان مصرف هر مصرف‌کننده در طول روز باید بیشتر از حداقل انرژی مصرفی روزانه منهای انرژی تأمین نشده‌ی روزانه باشد. در این قید مقدار انرژی مصرفی متقاضیان برای دوره زمانی پیش از t معلوم است و مقدار آن برای دوره زمانی t تعیین می‌شود. سیستم مدیریت انرژی برای دوره زمانی پس از t نیز تخمینی از انرژی مصرفی ارائه می‌دهد که این تخمین در هر دوره زمانی به‌روز می‌شود.

$$\sum_{h=1}^{t-1} \alpha \hat{p}_{jh}^D + \sum_{h=t}^{24} \alpha p_{jh}^D(\omega) \geq \underline{E}_j^D - e_j^{D,sh}(\omega) \quad \forall j, \omega \quad (52-3)$$

$$0 \leq p_{jh}^{D,sh}(\omega) \leq \underline{P}_{jh}^D \quad \forall h \geq t, j, \omega \quad (53-3)$$

$$0 \leq e_j^{D,sh}(\omega) \leq \underline{E}_j^D \quad \forall j, \omega \quad (54-3)$$

$$p_{jh}^D(\omega) = p_{jh}^D(\omega') \quad h = t, \forall j, \omega, \omega' \quad (55-3)$$

$$p_{jh}^{D,sh}(\omega) = p_{jh}^{D,sh}(\omega') \quad h = t, \forall j, \omega, \omega' \quad (56-3)$$

معادلات (۵۵-۳) و (۵۶-۳) قیود پیش‌بینی‌ناپذیری هستند. این قیود تضمین می‌کنند که در زمان توزیع

توان برای دوره زمانی t ، سیستم مدیریت انرژی تصمیم‌سازی واحدی داشته باشد.

ب) قیود واحدهای تولید تجدیدپذیر

قیود (۵۷-۳) و (۵۸-۳) به ترتیب، محدودیت توان تولیدی واحدهای تجدیدپذیر را در دوره زمانی t و دوره زمانی $t-24$ اعمال می‌کنند. در قید (۵۷-۳) حداکثر توان در دسترس واحد تجدیدپذیر در دوره زمانی t معلوم فرض شده است.

$$p_{ih}^R(\omega) \leq \hat{P}_{ih}^R \quad h = t, \forall i, \omega \quad (57-3)$$

$$p_{ih}^R(\omega) + \Gamma(i, h)v(\omega) + \eta(\omega) \leq \frac{1}{2}(\bar{P}_{ih}^R + \underline{P}_{jh}^R) \quad \forall h > t, i, \omega \quad (58-3)$$

$$v(\omega) + \eta(\omega) \leq \frac{1}{2}(\bar{P}_{ih}^R - \underline{P}_{ih}^R)y_h^R(\omega) \quad \forall h > t, i, \omega \quad (59-3)$$

$$y_h^R(\omega) \geq 1 \quad \forall h > t, i, \omega \quad (60-3)$$

$$v(\omega), \eta(\omega), y_h^R(\omega), p_{ih}^R(\omega) \geq 0 \quad \forall h > t, i, \omega \quad (61-3)$$

$$p_{ih}^R(\omega) = p_{ih}^R(\omega') \quad h = t, \forall j, \omega, \omega' \quad (62-3)$$

معادله (۶۲-۳) قید پیش‌بینی‌ناپذیری مربوط به توان تولیدی واحد تجدیدپذیر است.

ج) قیود واحدهای تولید حرارتی

$$-RD_g^T \leq p_{gh}^T(\omega) - p_{gh-1}^T(\omega) \leq RU_g^T \quad \forall h \geq t, g, \omega \quad (63-3)$$

$$\hat{u}_{gh}^T \underline{P}_{g,h}^T(\omega) \leq p_{gh}^T(\omega) \leq \hat{u}_{gh}^T \bar{P}_{g,h}^T(\omega) \quad \forall h \geq t, g, \omega \quad (64-3)$$

$$p_{gh}^T(\omega) = p_{gh}^T(\omega') \quad h = t, \forall j, \omega, \omega' \quad (۶۵-۳)$$

معادله (۶۵-۳) قید پیش‌بینی‌ناپذیری مربوط به توان تولیدی واحد حرارتی است.

د) قیود واحدهای ذخیره‌ساز انرژی

$$e_{ih}^S(\omega) = e_{ih-1}^S(\omega) + \eta_i^{S+} p_{ih}^{S+}(\omega) \alpha - \frac{p_{ih}^{S-}(\omega) \alpha}{\eta_i^{S-}} \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (۶۶-۳)$$

$$0 \leq p_{ih}^{S+}(\omega) \leq u_{ih}^S(\omega) \bar{P}_i^{S+}(\omega) \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (۶۷-۳)$$

$$0 \leq p_{ih}^{S-}(\omega) \leq (1 - u_{ih}^S(\omega)) \bar{P}_i^{S-}(\omega) \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (۶۸-۳)$$

$$\underline{E}_i^S \leq e_{ih}^S(\omega) \leq \bar{E}_i^S \quad \forall h \geq t, i, \omega \quad (۶۹-۳)$$

$$u_{ih}^S(\omega) = u_{ih}^S(\omega') \quad h = t, \forall i, \omega, \omega' \quad (۷۰-۳)$$

$$p_{ih}^{S+}(\omega) = p_{ih}^{S+}(\omega') \quad h = t, \forall i, \omega, \omega' \quad (۷۱-۳)$$

$$p_{ih}^{S-}(\omega) = p_{ih}^{S-}(\omega') \quad h = t, \forall i, \omega, \omega' \quad (۷۲-۳)$$

معادلات (۷۰-۳) و (۷۱-۳) و (۷۲-۳) قیود پیش‌بینی‌ناپذیری هستند.

ه) قیود برنامه‌ریزی شبکه اصلی

$$\hat{p}_h^{DA} + p_h^{RT}(\omega) = \sum_{n \in \Omega^M} p_{nh}^M(\omega) \quad \forall h \geq t, \omega \quad (۷۳-۳)$$

$$-\underline{P}_n^M \leq p_{nh}^M(\omega) \leq \bar{P}_n^M \quad \forall h \geq t, \omega, n \in \Omega^M \quad (۷۴-۳)$$

$$\bar{P}^{VPP-} \leq \hat{p}_h^{DA} + p_h^{RT}(\omega) \leq \bar{P}^{VPP+} \quad \forall h \geq t, \omega \quad (۷۵-۳)$$

$$p_h^{RT}(\omega) = p_h^{RT}(\omega') \quad h = t, \forall \omega, \omega' \quad (۷۶-۳)$$

(و) قیود تعادل توان در نیروگاه مجازی

$$\begin{aligned} p_{nh}^M(\omega) + \sum_{i \in \Omega_n^R} p_{ih}^R(\omega) + \sum_{i \in \Omega_n^S} p_{ih}^{S-}(\omega) + \sum_{g \in \Omega_n^T} p_{gh}^T(\omega) \\ - \sum_{k \mid o(k)=n} p_{kh}^L(\omega) + \sum_{k \mid d(k)=n} p_{kh}^L(\omega) \\ = \sum_{j \in \Omega_n^D} p_{jh}^D(\omega) + \sum_{i \in \Omega_n^S} p_{ih}^{S+}(\omega) \end{aligned} \quad \forall h \geq t, \omega, n \in \Omega^M \quad (۷۷-۳)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \Omega_n^R} p_{ih}^R(\omega) + \sum_{i \in \Omega_n^S} p_{ih}^{S-}(\omega) + \sum_{g \in \Omega_n^T} p_{gh}^T(\omega) \\ - \sum_{k \mid o(k)=n} p_{kh}^L(\omega) \\ + \sum_{k \mid d(k)=n} p_{kh}^L(\omega) \\ = \sum_{j \in \Omega_n^D} p_{jh}^D(\omega) + \sum_{i \in \Omega_n^S} p_{ih}^{S+}(\omega) \end{aligned} \quad \forall h \geq t, \omega, n \in \Omega^N \setminus n \in \Omega^M \quad (۷۸-۳)$$

$$p_{kh}^L(\omega) = B_k(\omega) (\delta_{o(k)h}(\omega) - \delta_{d(k)h}(\omega)) \quad \forall h \geq t, k, \omega \quad (۷۹-۳)$$

$$-\bar{P}_k^L(\omega) \leq p_{kh}^L(\omega) \leq \bar{P}_k^L(\omega) \quad \forall h \geq t, k, \omega \quad (۸۰-۳)$$

$$-\pi \leq \delta_{nh}(\omega) \leq \pi \quad \forall h \geq t, \omega, n \in \Omega^N \quad (۸۱-۳)$$

$$\delta_{nh}(\omega) = 0 \quad \forall h \geq t, \omega, n: \text{Reference bus} \quad (۸۲-۳)$$

۳-۸- جمع‌بندی

در این فصل، به تشریح مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی تحت شرایط پیشامد پرداخته شد و عدم قطعیت‌های موجود در مسئله به صورت سناریو و بازه اطمینان مدل‌سازی شدند. بر این اساس مدل عدم قطعیت مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی به صورت مدل بهینه‌سازی مقاوم-تصادفی فرمول‌بندی شد.

فصل چهارم

شبیه سازی

۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا به تولید سناریو قیمت بازار روز پیش‌رو و قیمت بازار زمان حقیقی و بازه پیش‌بینی تولید توان تجدیدپذیر پرداخته می‌شود و پیاده‌سازی عدم قطعیت دسترس‌پذیری اجزای نیروگاه مجازی در شبیه‌سازی شرح داده خواهد شد. دو مطالعه موردی برای مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی ارائه می‌گردد. در ابتدا، اطلاعات فنی-اقتصادی و اطلاعات مرتبط با متغیرهای عدم قطعیت ارائه می‌شود. سپس در بخش‌های بعدی نتایج شبیه‌سازی برای شرایط مختلف پایه و وقوع پیشامد ارائه و مقایسه می‌شوند. در نهایت نتیجه‌گیری از مباحث فصل بیان می‌گردد.

۴-۲- تولید سناریو و بازه پیش‌بینی

برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها از اطلاعات گذشته استفاده می‌شود. در این تحقیق، مطالعه موردی بر روی بازار ناحیه نیوانگلند در سال ۲۰۰۹ انجام می‌شود. اطلاعات گذشته قیمت‌های بازار که از مرجع [۳۲] اخذ شده‌اند. پیش‌بینی برای روز ۲۷/۶/۲۰۰۹ انجام می‌شود.

برای اطلاعات مربوط به تولید توان تجدیدپذیر از سایت دانشگاه هاروارد استفاده شده است [۳۳]. اطلاعات شامل میزان تابش خورشید و تولید توان خورشیدی است. برای انجام پیش‌بینی از روش ترکیبی فازی-آریماس استفاده می‌شود.

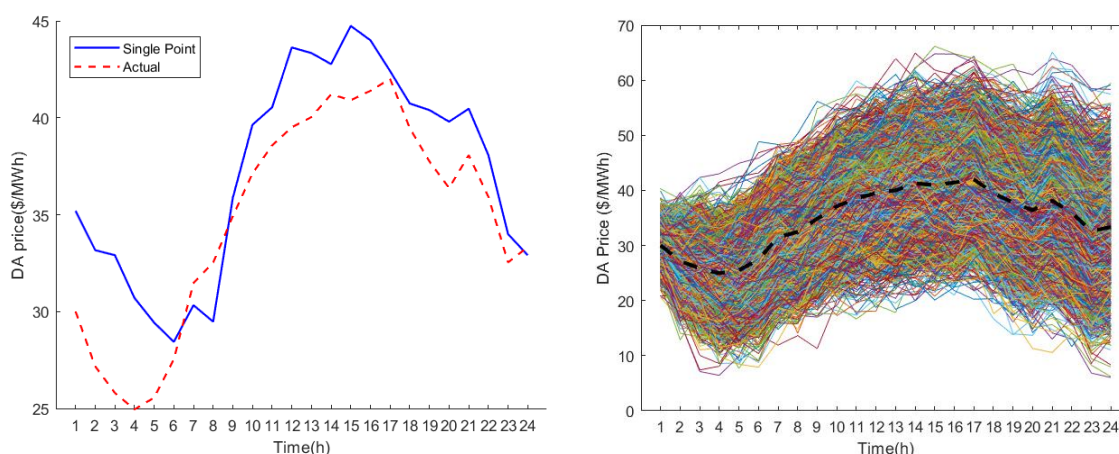
۴-۲-۱- تولید سناریو قیمت بازار روز پیش‌رو

برای انتخاب مدل مناسب پیش‌بینی قیمت بازار روز پیش‌رو با انتقال اطلاعات خطاهای نرمالایزشده به محیط نرم‌افزار SPSS، مدل پیشنهادی به صورت $ARIMA(1,1,3)(2,1,2)_{24}$ انتخاب می‌گردد.

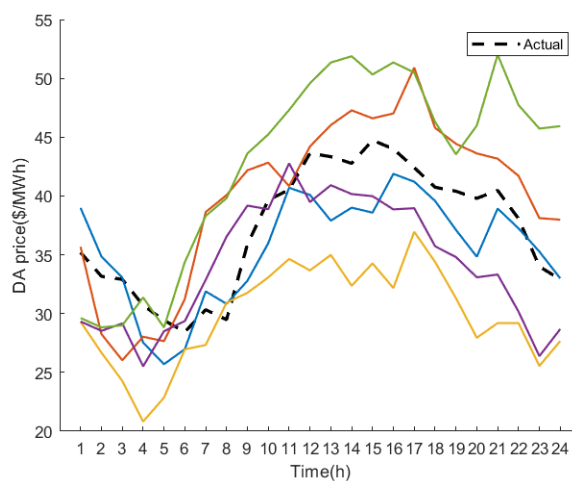
با استفاده از اعداد تصادفی حاصل از یک توزیع احتمالی پیش‌بینی، تعداد ۵۰۰۰ سناریو تولید می‌شود. سپس تعداد آن‌ها را به ۵ سناریو کاهش می‌یابد. تعداد زیاد سناریوها در مدل برنامه‌نویسی تصادفی بار محاسباتی زیادی تحمیل می‌نماید. بنابراین، به کارگیری روش‌های کاهش سناریو ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق،

برای کاهش تعداد مجموعه سناریوی اولیه، از یک روش کاهش سناریو سریع [۳۴] استفاده شده است. این روش با حفظ اطلاعات ضروری موجود در مجموعه سناریوی اولیه، به یک مجموعه سناریوی کاهش یافته دست می‌یابد. به این ترتیب، در این روش کاهش سناریو، توزیع احتمالی مجموعه سناریو کاهش یافته به اندازه کافی به توزیع احتمالی مجموعه سناریوی اولیه نزدیک می‌باشد.

در شکل (۱-۴) سناریوهای قیمت بازار روز پیش‌رو ترسیم شده‌اند. منحنی خط‌چین پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای را نشان می‌دهد. در شکل (۲-۴) پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای و مقدار واقعی قیمت بازار روز پیش‌رو و شکل (۳-۴) سناریوهای کاهش یافته قیمت بازار روز پیش‌رو ترسیم گردیده‌اند.



شکل ۱-۴- سناریوهای قیمت بازار روز پیش‌رو شکل ۲-۴- پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای و مقدار واقعی قیمت بازار روز پیش‌رو



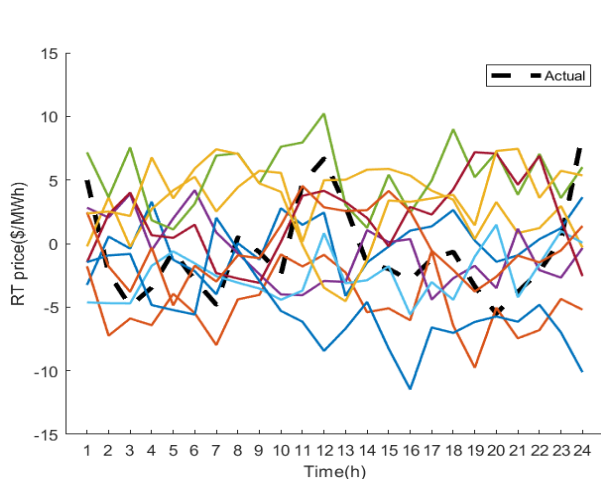
شکل ۳-۴- سناریوهای کاهش یافته قیمت بازار روز پیش‌رو

۴-۲-۲- تولید سناریو قیمت بازار زمان حقیقی

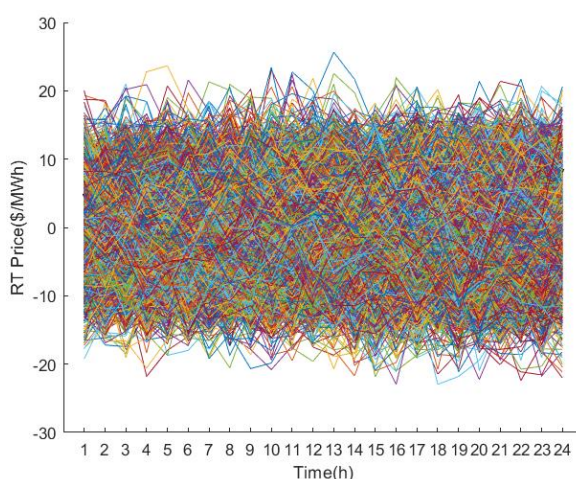
به دلیل همبستگی قیمت بازار زمان حقیقی و بازار روز پیشرو، مدل آریمای مناسب بر روی اختلاف قیمت بازار زمان حقیقی و بازار روز پیشرو اجرا می‌شود. مدل آریمای پیشنهادی به صورت $ARIMA(3,1,1)(0,0,0)_{24}$ انتخاب می‌گردد.

الف) تولید سناریو در مرحله اول

در این مرحله تعداد ۵۰۰۰ سناریو برای اختلاف قیمت بازار زمان حقیقی و بازار روز پیشرو تولید می‌شود. سپس تعداد آن‌ها به ۱۰ سناریو کاهش می‌یابد. در شکل (۴-۴) سناریوهای اختلاف قیمت بازارها در مرحله اول ترسیم شده‌اند. شکل (۴-۵) سناریوهای کاهش یافته تفاضل قیمت بازارها در مرحله اول را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵- سناریوهای کاهش یافته اختلاف قیمت بازارها

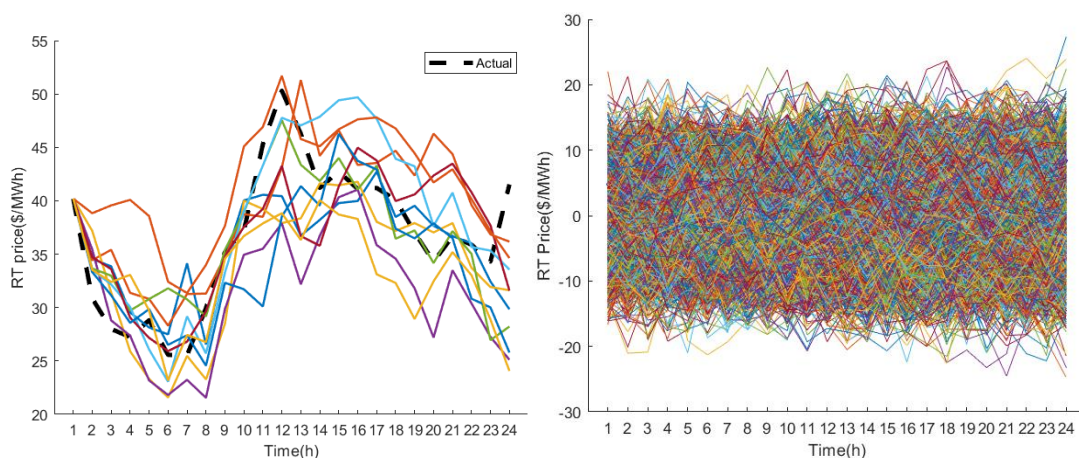


شکل ۴-۴- سناریوهای اختلاف قیمت بازارها

ب) تولید سناریو در مرحله دوم

در این مرحله، تعداد ۵۰۰۰ سناریو در هر ساعت برای اختلاف قیمت بازار زمان حقیقی و بازار روز پیشرو تولید می‌گردد. قیمت بازار زمان حقیقی از مجموع اختلاف قیمت بازارها و قیمت در بازار روز پیشرو حاصل می‌شود. تعداد کل سناریوهای قیمت بازار زمان حقیقی به ۱۰ سناریو کاهش می‌یابد. در شکل (۴-۶) سناریوهای

قیمت بازارهای زمان حقیقی در اولین بازه زمانی از مرحله دوم ترسیم شده‌اند. شکل (۷-۴) سناریوهای کاهش - یافته قیمت بازار زمان حقیقی در اولین بازه زمانی از مرحله دوم را نشان می‌دهد.



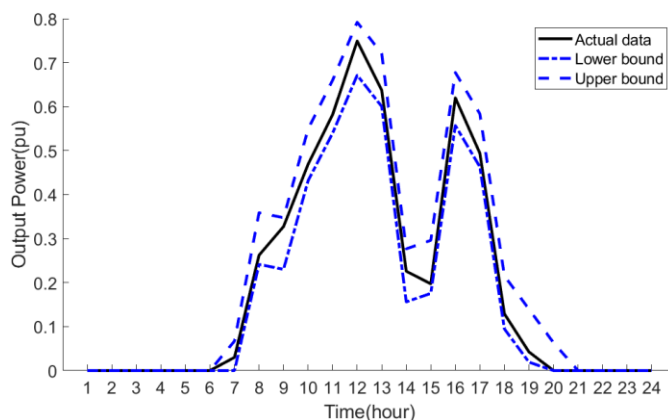
شکل ۷-۴ - سناریوهای کاهش یافته قیمت بازار زمان حقیقی

۴-۲-۳- تولید بازه پیش‌بینی توان تولیدی واحد تجدیدپذیر

برای بازه پیش‌بینی توان تولیدی واحد تجدیدپذیر از روش ترکیبی فازی-آریما استفاده می‌شود. مدل مناسب آریما به صورت $ARIMA(1,0,1)(2,1,2)_{24}$ انتخاب می‌گردد.

الف) تولید بازه اطمینان در مرحله اول

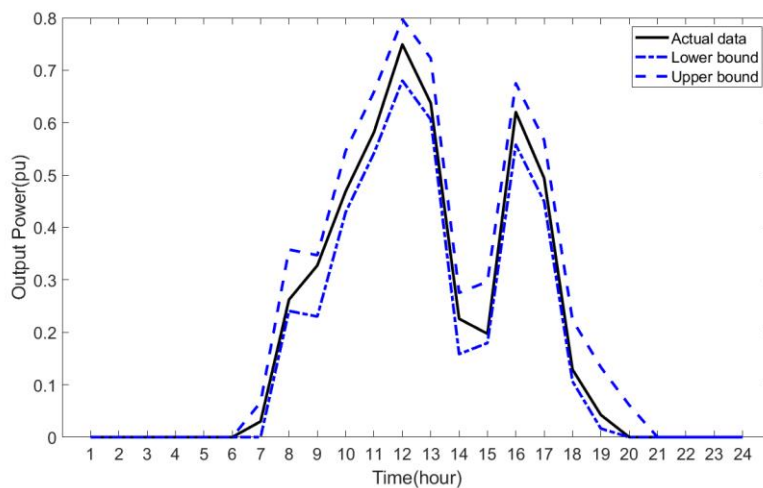
در این مرحله، بازه پیش‌بینی برای توان تولیدی تجدیدپذیر با سطح اطمینان ۰/۹۵ تولید می‌شود. در شکل (۸-۴) بازه پیش‌بینی توان تولیدی واحد تجدیدپذیر برای مرحله اول ترسیم گردیده است.



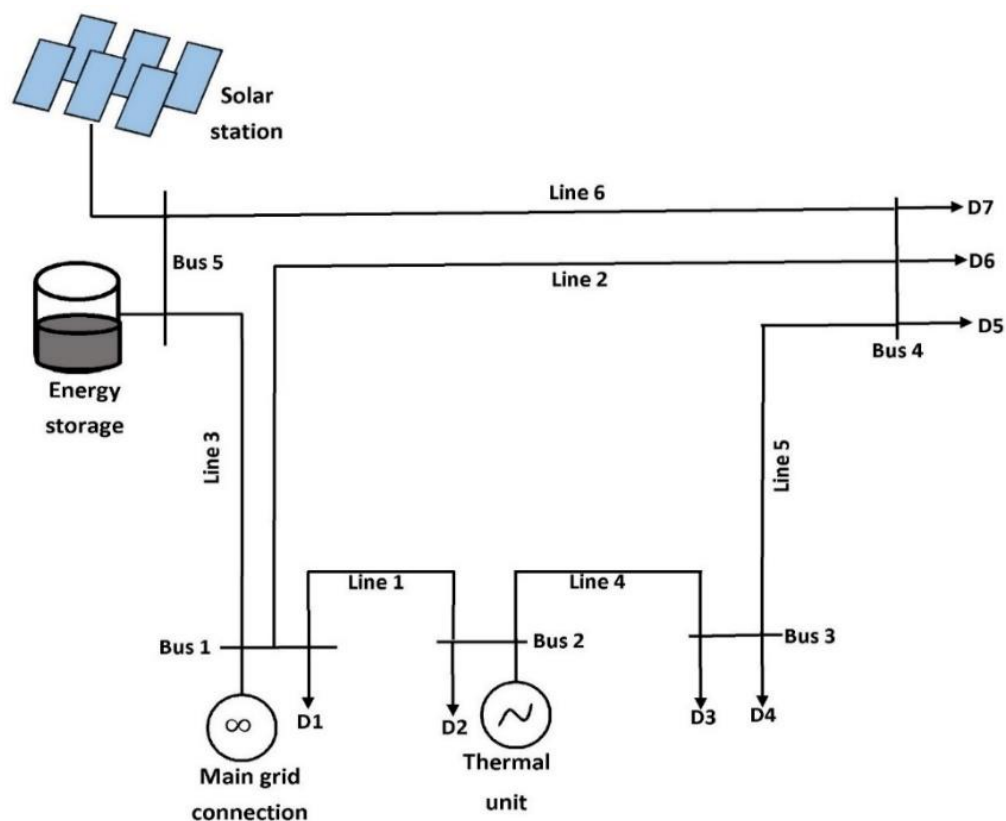
شکل ۴-۸- بازه پیش‌بینی توان تولیدی واحد تجدیدپذیر در مرحله اول

ب) تولید بازه اطمینان در مرحله دوم

در این مرحله برای هر دوره زمانی، بازه پیش‌بینی توان تولیدی تجدیدپذیر با سطح اطمینان ۰/۹۵ تولید می‌شود. در شکل (۴-۹) بازه پیش‌بینی توان تولیدی واحد تجدیدپذیر برای مرحله دوم در اولین دوره زمانی ترسیم گردیده است.



شکل ۴-۹- بازه پیش‌بینی توان تولیدی واحد تجدیدپذیر برای مرحله دوم در اولین دوره زمانی



شکل ۴-۱۰- شبکه نیروگاه مجازی مطالعه موردی یک (مرجع [۳۵])

۴-۳- اطلاعات مطالعه موردی یک: شبکه ۵ باس

نیروگاه مجازی در این مورد مطالعه دارای ۷ متقاضی، ۱ واحد تولیدی حرارتی، ۱ واحد تولیدی تجدیدپذیر و یک سیستم ذخیره‌ساز است که از طریق یک شبکه الکتریکی کوچک به یکدیگر متصل شده‌اند. شبکه ۵ باس به عنوان شبکه نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. آرایش نیروگاه مجازی در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است.

شبکه از طریق باس ۱ به شبکه اصلی متصل است.

۴-۳-۱- اطلاعات فنی و اقتصادی نیروگاه مجازی

الف) متقاضیان

نیروگاه مجازی در این مورد مطالعه دارای ۷ متقاضی انرژی است. مشخصات این متقاضیان شامل حداقل و حداکثر توان مصرفی ساعتی، حداکثر افزایش و کاهش ساعتی توان، حداقل انرژی مصرفی روزانه، توان مصرفی

در حالت اولیه و نیز مکان قرارگیری هر یک از متقاضیان در جدول (۴-۱) درج گردیده است.

جدول ۴-۱- مشخصات فنی متقاضیان شبکه

متقاضی	باس	حداقل انرژی مصرفی روزانه [MWh]	حداکثر افزایش ساعتی توان [MW/h]	حداکثر کاهش ساعتی توان [MW/h]	توان مصرفی اولیه [MW]
۱	۱	۱۸۹۱/۴۵	۱۰	۹	۵۷
۲	۲	۱۸۹۱/۴۵	۱۰	۹	۵۷
۳	۳	۲۴۵/۵۷۵	۲	۱	۴/۷۵
۴	۳	۲۴۵/۵۷۵	۲	۱	۴/۷۵
۵	۴	۳۷۰/۹۷۵	۴	۳	۹/۵
۶	۴	۴۶۵/۰۲۵	۴	۳	۹/۵
۷	۴	۱۸۹۱/۴۵	۱۰	۹	۵۷

متقاضیان پاسخگو به قیمت باتوجه به تغییرات قیمت انرژی می‌توانند با تغییر مطلوبیت خود مقدار مصرف-شان را تغییر دهند. مطلوبیت متقاضیان انرژی در جدول ارائه شده است. مقدار توان در هر بلوک ۲۵٪ حداکثر توان مصرفی هر متقاضی است. در جدول (۴-۲) تابع مطلوبیت متقاضیان نیروگاه مجازی درج شده است.

جدول ۴-۲- تابع مطلوبیت متقاضیان نیروگاه مجازی

متقاضی	مطلوبیت [\$/MW]
۱	۶۰، ۵۵، ۴۳، ۴۰
۲	۶۰، ۵۵، ۴۳، ۴۰
۳	۵۸، ۵۳، ۴۱، ۳۸
۴	۵۸، ۵۳، ۴۱، ۳۸
۵	۵۴، ۵۰، ۴۲، ۳۹
۶	۵۴، ۵۰، ۴۲، ۳۹
۷	۶۰، ۵۵، ۴۳، ۴۰

در این مسئله، تغییر مطلوبیت بار به صورت زیر انجام می‌پذیرد:

- برای مطلوبیت متقاضیان ۱ تا ۴، از ساعت ۱ تا ۸ در ۱ ضرب می‌شود (تغییری نمی‌کند)، از ساعت ۹ تا ۱۶ نیز بدون تغییر باقی می‌ماند، اما از ساعت ۱۷ تا ۲۴ در ۱/۱ ضرب می‌شود.
- برای مطلوبیت متقاضیان ۵ تا ۷، از ساعت ۱ تا ۸ در ۱ ضرب می‌شود، از ساعت ۹ تا ۱۶ در ۰/۹ ضرب می‌شود و در بقیه ساعات روز یعنی از ۱۷ تا ۲۴ در ۱ ضرب می‌شود.

ب) خطوط شبکه

مشخصات خطوط شبکه در جدول (۳-۴) درج شده است.

جدول ۳-۴- مشخصات خطوط انتقال (مرجع [۳۵])

شماره خط	از باس	به باس	ظرفیت [MW]	راکتانس [PU]
۱	۱	۲	۱۱۲	۰/۰۲۸۱
۲	۱	۴	۷۰	۰/۰۳۰۴
۳	۱	۵	۱۸۰	۰/۰۰۶۴
۴	۲	۳	۱۶۰	۰/۰۱۰۸
۵	۳	۴	۱۰۸	۰/۰۲۹۷
۶	۴	۵	۱۰۸	۰/۰۲۹۷

محدودیت تبادل با شبکه ۳۵۰ مگاوات فرض شده است. نرخ خروج برای خطوط انتقال برابر ۰/۰۰۰۱ و برای واحد حرارتی ۰/۰۰۲ در نظر گرفته شده است.

پ) واحدهای تولیدی

ظرفیت واحد تولیدی حرارتی ۳۵۰ مگاوات است و حداکثر کاهش و افزایش ساعتی توان آن ۸۰ مگاوات است. حداقل توان تولیدی این واحد نیز ۸۰ مگاوات است. هزینه روشن شدن و خاموش شدن واحد تولیدی حرارتی به ترتیب، ۵۰۰ و ۱۰۰ دلار است. ظرفیت واحد تولیدی تجدیدپذیر ۳۰۰ مگاوات است.

ت) سیستم ذخیره‌ساز

ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز ۲۵۰ مگاوات است. حداقل انرژی ذخیره‌شده در سیستم ذخیره‌ساز ۵۰ مگاوات می‌باشد. بازه تبدیل انرژی خروجی و ورودی سیستم ذخیره‌ساز ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

ث) پیشامدهای نیروگاه مجازی

برای تولید سناریوهای پیشامد نیروگاه مجازی، ابتدا شبیه‌سازی برای شرایطی که پیشامد برای هر خط از مجموعه خطوط نیروگاه مجازی رخ می‌دهد، انجام می‌شود تا خطوطی که وقوع پیشامد آن‌ها بیش‌ترین تاثیر را بر سود نیروگاه مجازی و بار قطع‌شده دارند، شناسایی شوند. سناریوهای پیشامد نیروگاه مجازی برای این خطوط و واحد تولید حرارتی تولید می‌شوند. در این مطالعه موردی سناریوهای پیشامد نیروگاه مجازی برای خط ۳ و واحد تولید حرارتی واقع در باس ۲ تولید شده‌اند.

۴-۴- طرح شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌های ارائه شده در این فصل شامل موارد زیر است:

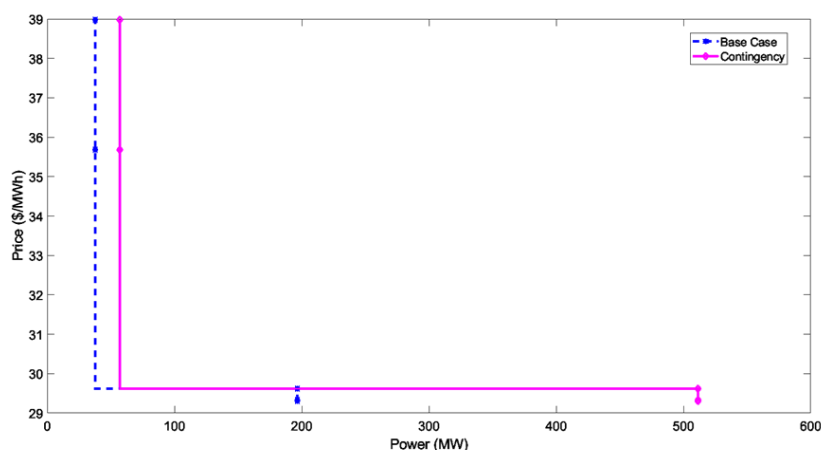
- در نظر گرفتن احتمال وقوع پیشامد بر تصمیم‌سازی در بازار روز پیش‌رو و تحلیل شاخص‌های فنی و اقتصادی
- مطالعه تغییر ضریب ریسک‌گریزی و درجه مقاومت مربوط به تولید واحد تجدیدپذیر بر تصمیم‌سازی در بازار روز پیش‌رو و تحلیل شاخص‌های فنی و اقتصادی
- تحلیل تغییر ضریب ریسک‌گریزی بر تصمیم‌سازی در بازار زمان‌حقیقی و شاخص‌های فنی و اقتصادی

۴-۵- نتایج تصمیم‌سازی در بازار روز پیش‌رو

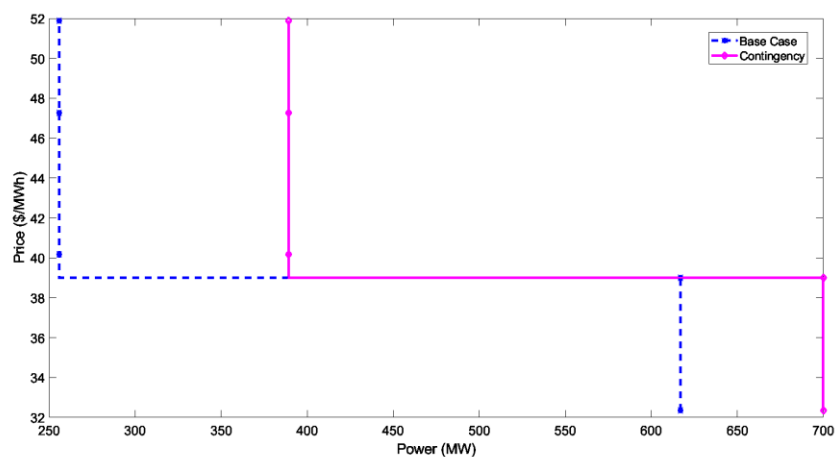
نتایج تصمیم‌سازی در این مرحله در دو بخش اثر در نظر گرفتن وقوع پیشامد، اثر تغییر ضریب ریسک‌گریزی و درجه مقاومت ارائه شده است.

۴-۵-۱- اثر در نظر گرفتن وقوع پیشامد

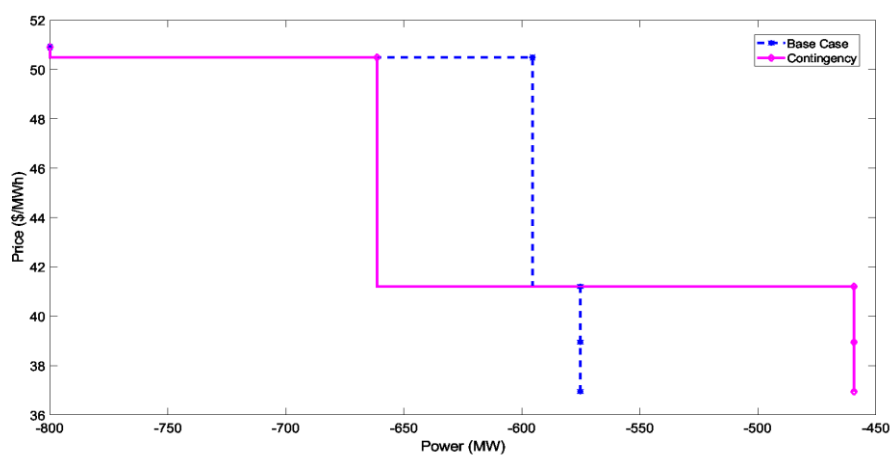
در شکل‌های (۴-۱۱) تا (۴-۱۴) منحنی‌های توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پیشامد و پایه ترسیم شده‌اند. در شرایط پایه، از وقوع پیشامد صرف‌نظر می‌شود. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، در حالتی که پیشامد در نظر گرفته شده است منحنی توان-قیمت پیشنهادی به راست منحرف شده است. به عبارتی، مقدار توان خریداری شده نسبت به حالت پایه افزایش می‌یابد و حتی در بعضی سناریوها فروش توان به خرید تغییر یافته‌اند. زیرا با در نظر گرفتن وقوع پیشامد، سیستم مدیریت انرژی تمایل دارد توان بیش‌تری خریداری کند تا در صورت وقوع پیشامد با کمبود توان مواجه نشود. واحد حرارتی از ساعت ۶ تا ۲۴ روشن است. لازم به ذکر است، در این مطالعه موردی، در نظر گرفتن وقوع پیشامد اثری بر زمان روشن‌شدن و خاموش‌شدن واحد تولید حرارتی نداشته است.



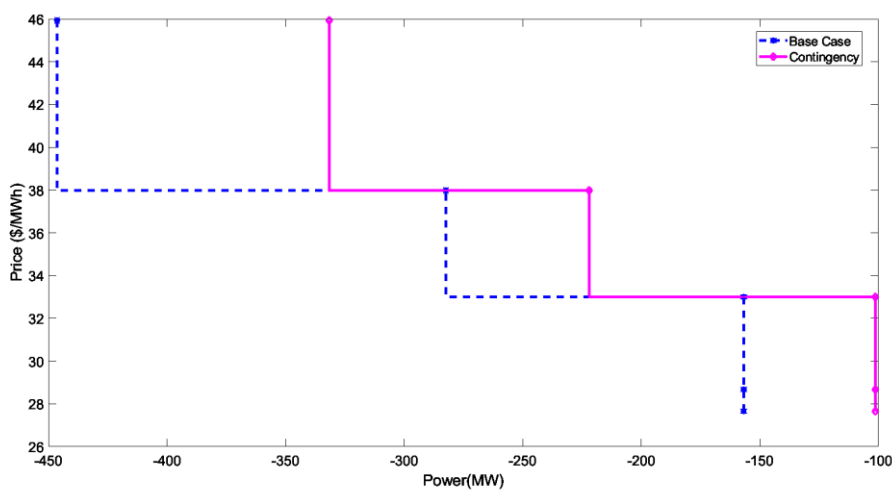
شکل ۴-۱۱- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد در ساعت ۱



شکل ۴-۱۲- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد در ساعت ۱۴

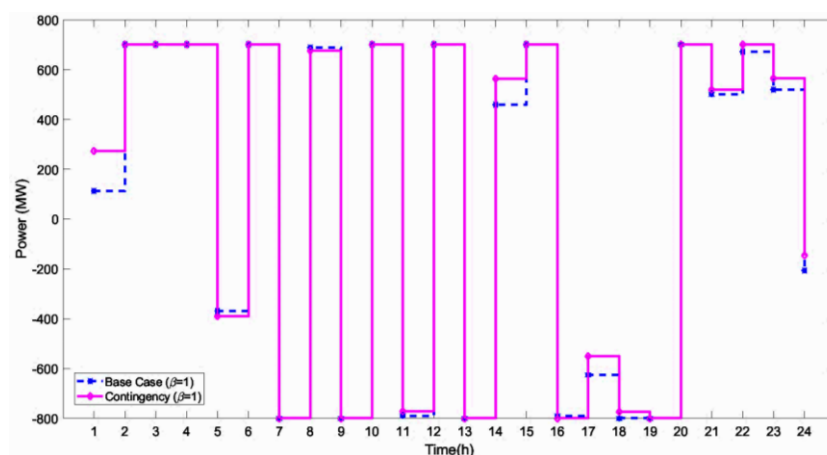


شکل ۴-۱۳- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد در ساعت ۱۷



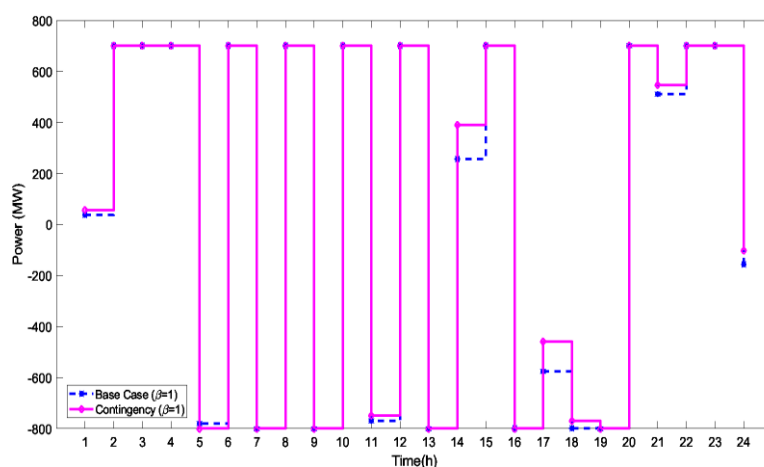
شکل ۴-۱۴- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد در ساعت ۲۴

در شکل (۴-۱۵) امید ریاضی منحنی توان پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در حالت پایه و پیشامد ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است در حالت پیشامد منحنی توان-قیمت پیشنهادی به راست جابه‌جا شده است. زیرا، سیستم مدیریت انرژی برای پوشش ریسک و جبران کمبود توان در اثر وقوع پیشامد توان بیش‌تری از شبکه اصلی خریداری می‌نماید و توان کم‌تری را به شبکه اصلی می‌فروشد.



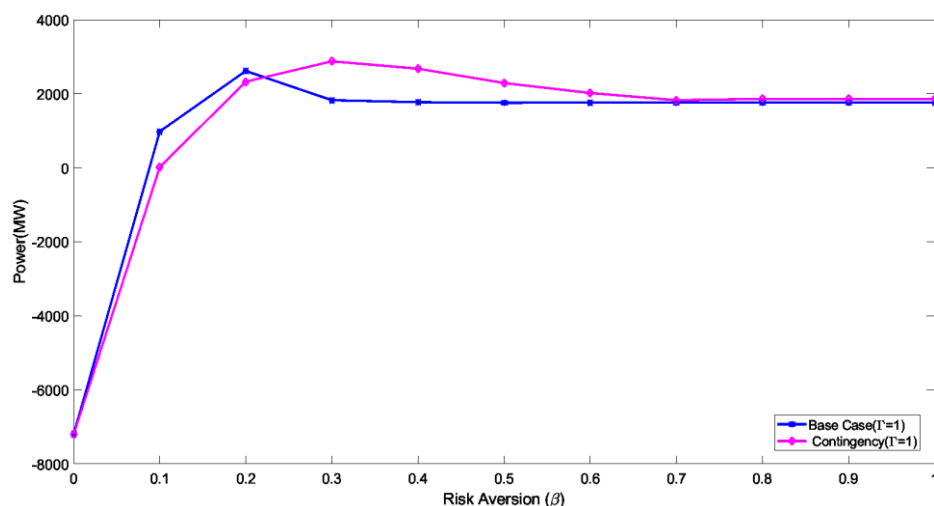
شکل ۴-۱۵- امید ریاضی منحنی توان پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در حالت پایه و پیشامد

در شکل (۴-۱۶) منحنی توان پذیرفته شده در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، در شرایط پیشامد میزان خرید توان نسبت به حالت پایه افزایش و میزان فروش توان کاهش یافته است.



شکل ۴-۱۶- منحنی توان پذیرفته شده در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد

در شکل (۴-۱۷) منحنی کل توان مبادله شده در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد بر حسب ضریب ریسک‌گریزی ترسیم شده است. در ضریب ریسک‌گریزی صفر، میزان توان مبادله‌شده در هر دو شرایط پایه و پیشامد برابر است. با افزایش ضریب ریسک‌گریزی تا $0/2$ میزان خرید توان از بازار روز پیش‌رو افزایش یافته است، به صورتی که توان‌های پیشنهادی در بسیاری از ساعات از فروش توان به خرید توان تغییر یافته‌اند و این میزان خرید در شرایط پایه از پیشامد بیش‌تر است. در ضریب ریسک‌گریزی $0/3$ ، در شرایط پایه میزان مبادله‌شده کاهش و با افزایش بیش‌تر ضریب ریسک‌گریزی مقدار آن ثابت می‌گردد ولی در شرایط پیشامد میزان توان مبادله‌شده در این ضریب به مقدار بیشینه می‌رسد و با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، مقدار آن کاهش و در ضریب ریسک‌گریزی $0/7$ تا 1 مقدار آن ثابت می‌شود.

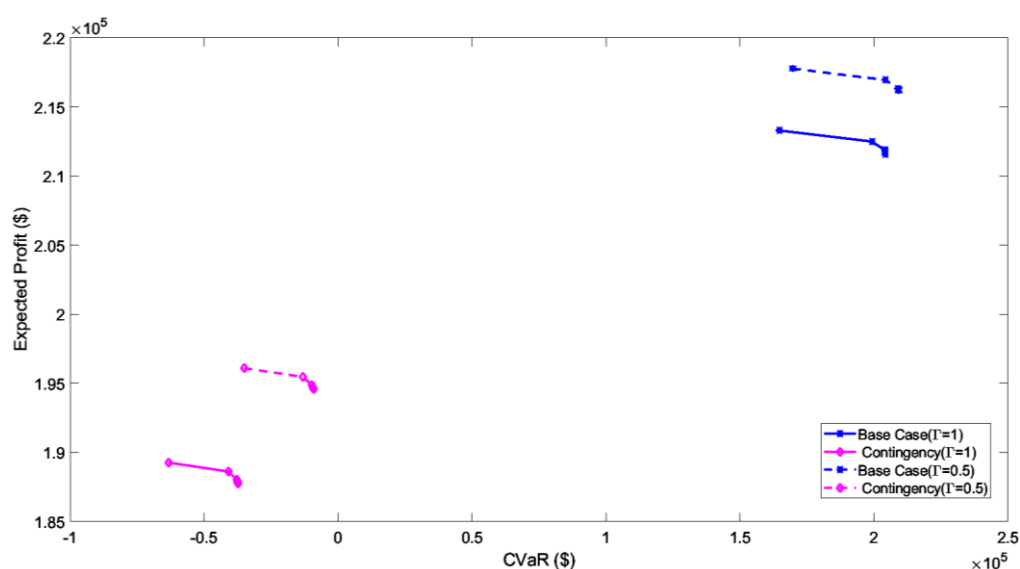


شکل ۴-۱۷- منحنی کل توان مبادله‌شده در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد بر حسب ضریب ریسک‌گریزی

در شکل (۴-۱۸) منحنی سود مورد انتظار $CvaR$ در حالت پایه و پیشامد و ضریب درجه مقاومت 1 و $0/5$ ترسیم شده است، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی مقدار $CvaR$ افزایش یافته است و با افزایش مقدار $CvaR$ ، سود مورد انتظار کاهش می‌یابد. در شرایط پایه و درجه مقاومت 1 ، مقدار سود مورد انتظار و $CvaR$ نسبت به شرایط پیشامد به ترتیب $11/31\%$ و $118/32\%$ بیش‌تر است. زیرا در شرایط پایه مقدار بار تامین نشده صفر است ولی در شرایط پیشامد مقداری از بار تامین نخواهد شد و ضریب جریمه‌ای بزرگ برای آن در نظر گرفته

شده است.

با افزایش درجه مقاومت تصمیمات سیستم مدیریت انرژی محافظ کارانه تر می شود که در نتیجه این امر سود مورد انتظار کاهش می یابد. مقدار خرید توان در شرایط پایه نسبت به شرایط پیشامد کم تر و مقدار فروش توان بیش تر شده است. در شرایط پایه با افزایش درجه مقاومت مقدار سود مورد انتظار و $CvaR$ به ترتیب ۲٪ و ۴٪/۴ کاهش می یابد در حالی که، در شرایط پیشامد با افزایش درجه مقاومت مقدار سود مورد انتظار و $CvaR$ به ترتیب ۳/۴۸٪ و ۳۰۸/۷٪ کاهش یافته است.



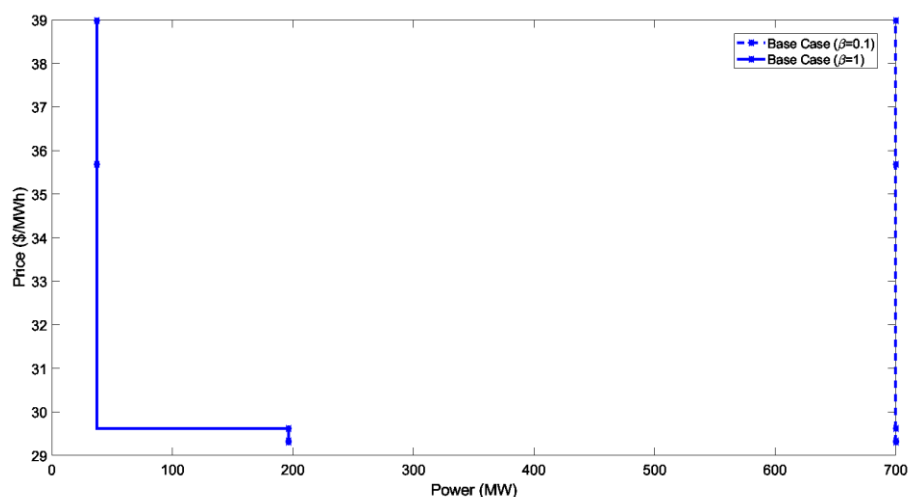
شکل ۴-۱۸- سود مورد انتظار- $CvaR$ در شرایط پایه و پیشامد بر حسب درجه مقاومت

۴-۵-۲- اثر تغییر ضریب ریسک گریزی و درجه مقاومت

افزایش ضریب ریسک گریزی موجب می شود سیستم مدیریت انرژی پیشنهادهای توان را به گونه ای ارائه دهد که سود نیروگاه مجازی به ازای سناریوهایی که بدترین سودها را دارند، افزایش پیدا کند. در ساعاتی که قیمت بازار روز پیش رو کم تر از قیمت بازار زمان حقیقی باشد نیروگاه مجازی تمایل دارد در بازار روز پیش رو توان را خریداری کند و با قیمت بالاتر در بازار زمان حقیقی بفروشد. در ساعاتی که سناریوهای اختلاف قیمت بازار زمان حقیقی با بازار روز پیش رو که مقدار بدترین سود را دارند مثبت باشند (قیمت بازار روز پیش رو کم تر

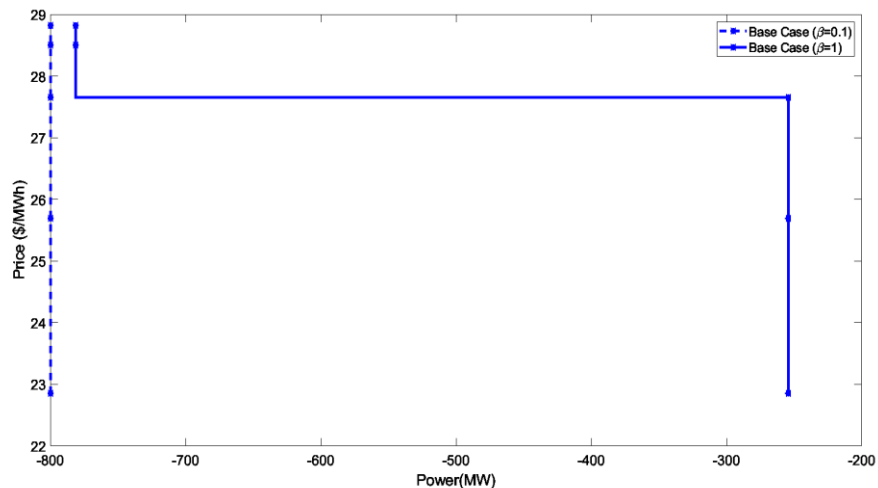
از قیمت بازار زمان حقیقی است)، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی توان بیش‌تری خریداری می‌شود. در صورتی که مقدار اختلاف قیمت منفی باشد توان بیش‌تری در بازار روز پیش‌رو فروخته می‌شود.

در شکل (۴-۱۹) منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو برای ساعت ۱ به ازای ضرایب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، در ساعت ۱ خرید توان در بازار روز پیش‌رو کاهش یافته است. به دلیل این‌که مقادیر سناریوهای دارای بدترین سود منفی هستند و با کاهش خرید توان در این ساعت، مقدار بدترین سودها افزایش می‌یابد.



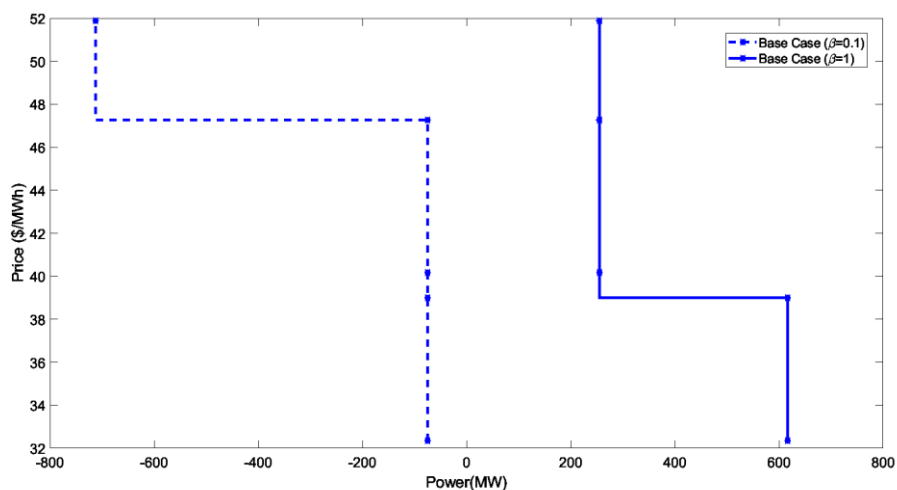
شکل ۴-۱۹- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در ساعت ۱

در شکل (۴-۲۰) منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو برای ساعت ۵ به ازای ضرایب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، در ساعت ۵ فروش توان در بازار روز پیش‌رو کاهش و میزان خرید توان افزایش یافته است. به دلیل این‌که مقادیر سناریوهای دارای بدترین سود مثبت هستند و با کاهش فروش و افزایش خرید توان در این ساعت، مقدار بدترین سودها افزایش می‌یابد.



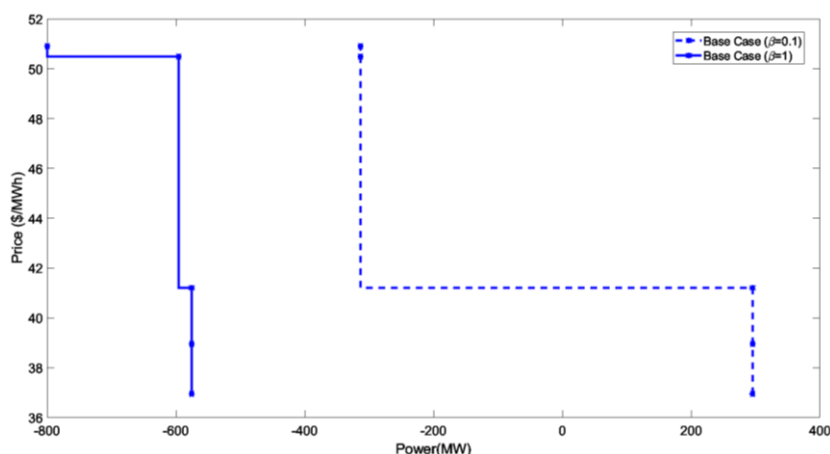
شکل ۴-۲۰- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در ساعت ۵

در شکل (۴-۲۱) منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو برای ساعت ۱۴ به ازای ضرایب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، در ساعت ۱۴ توان‌های پیشنهادی فروش به خرید تغییر یافته‌اند. به دلیل این‌که مقادیر سناریوهای دارای بدترین سود مثبت هستند و با کاهش خرید توان در این ساعت، مقدار بدترین سودها افزایش می‌یابد.



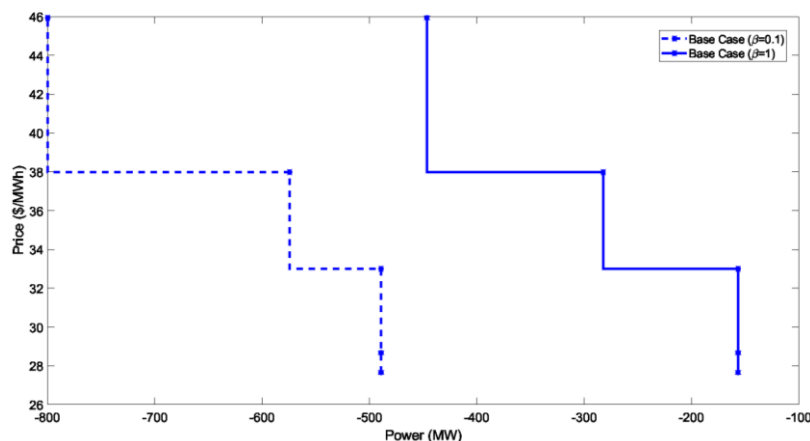
شکل ۴-۲۱- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در ساعت ۱۴

در شکل (۴-۲۲) منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو برای ساعت ۱۷ به ازای ضرایب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، در ساعت ۱۴ توان‌های پیشنهادی فروش به خرید تغییر یافته‌اند. به دلیل این که مقادیر سناریوهای دارای بدترین سود منفی هستند و با کاهش خرید توان در این ساعت، مقدار بدترین سودها افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۲۲- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در ساعت ۱۷

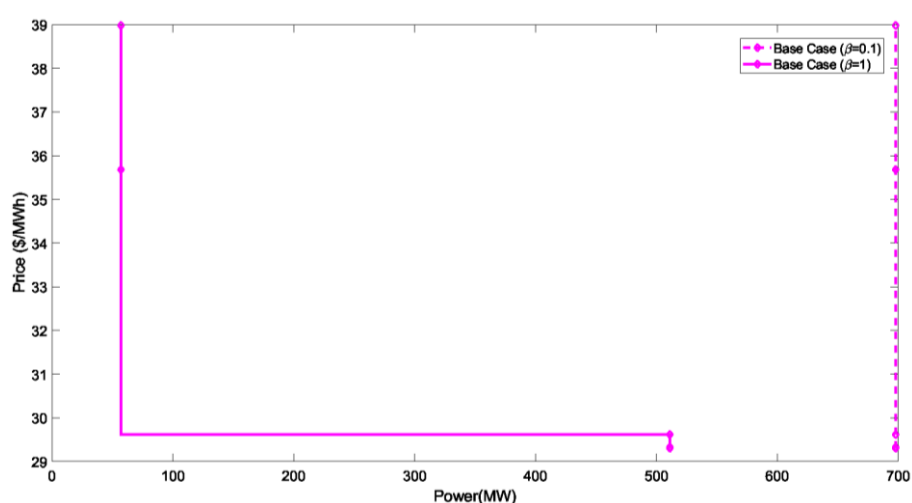
در شکل (۴-۲۳) منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو برای ساعت ۲۴ به ازای ضرایب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، در ساعت ۱۴ میزان فروش توان کاهش یافته است. به دلیل این که مقادیر سناریوهای دارای بدترین سود مثبت هستند و با کاهش فروش توان در این ساعت، مقدار بدترین سودها افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۲۳- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در ساعت ۲۴

در شکل‌های (۴-۲۴) و (۴-۲۸) منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو با در نظر گرفتن وقوع پیشامد برای چند بازه زمانی به ازای ضرایب ریسک گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده‌اند. در شرایط پیشامد همانند حالت پایه در ساعاتی که سناریوهای اختلاف قیمت بازار زمان حقیقی با بازار روز پیش‌رو که مقدار بدترین سود را دارند مثبت باشند (قیمت بازار روز پیش‌رو کم‌تر از قیمت بازار زمان حقیقی است)، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی توان بیش‌تری خریداری می‌شود. در صورتی که مقدار اختلاف قیمت منفی باشد توان بیش‌تری در بازار روز پیش‌رو فروخته می‌شود.

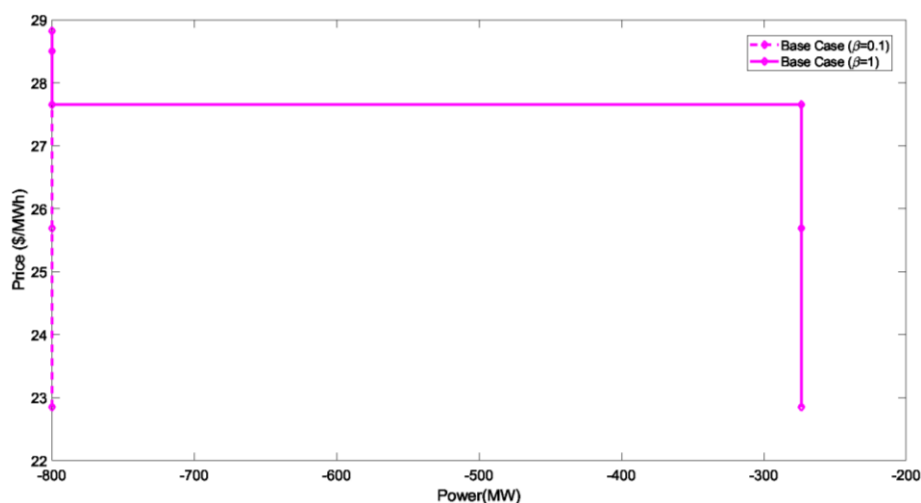
در شکل (۴-۲۴) منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو در شرایط پیشامد برای ساعت ۱ به ازای ضرایب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، در ساعت ۱ خرید توان در بازار روز پیش‌رو کاهش یافته است. به دلیل این که مقادیر سناریوهای دارای بدترین سود منفی هستند و با کاهش خرید توان در این ساعت، مقدار بدترین سودها افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۲۴- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پیشامد بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در ساعت ۱

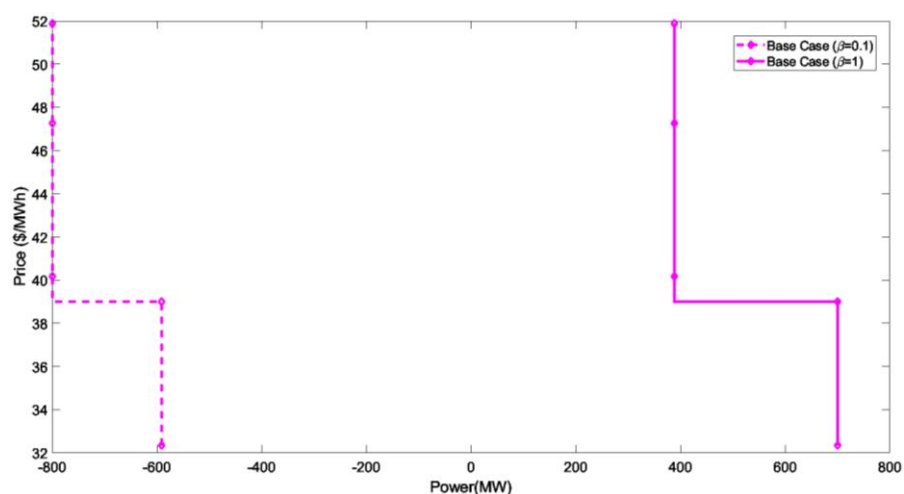
در شکل (۴-۲۵) منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو برای ساعت ۵ به ازای ضرایب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، در ساعت ۵ فروش توان در بازار روز پیش‌رو کاهش و میزان خرید توان افزایش یافته است. به دلیل این که مقادیر سناریوهای

دارای بدترین سود مثبت هستند و با کاهش فروش و افزایش خرید توان در این ساعت، مقدار بدترین سودها افزایش می‌یابد.



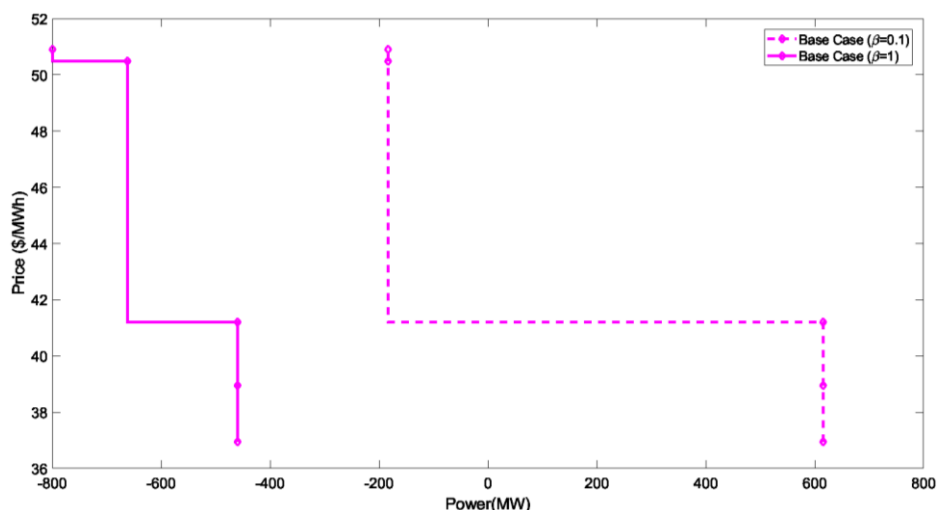
شکل ۴-۲۵- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پیشامد بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در ساعت ۵

در شکل (۴-۲۶) منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو در شرایط پیشامد برای ساعت ۱۴ به ازای ضرایب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش ضریب ریسک-گریزی، در ساعت ۱۴ توان‌های پیشنهادی فروش به خرید تغییر یافته‌اند. به دلیل این‌که سناریوهای دارای بدترین سود مثبت هستند و با کاهش خرید توان در این ساعت، مقدار بدترین سودها افزایش می‌یابد.



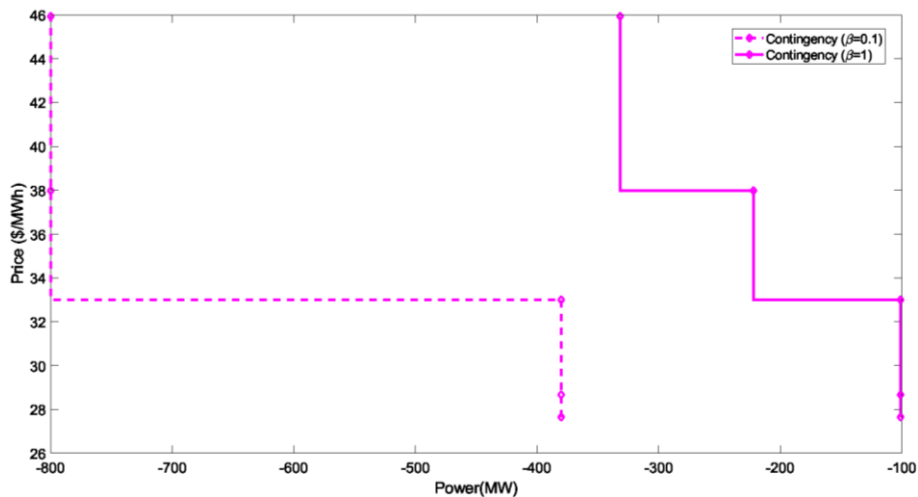
شکل ۴-۲۶- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پیشامد بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در ساعت ۱۴

در شکل (۴-۲۷) منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو برای ساعت ۱۷ به ازای ضرایب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، در ساعت ۱۴ توان‌های پیشنهادی فروش به خرید تغییر یافته‌اند. به دلیل این که مقادیر سناریوهای دارای بدترین سود منفی هستند و با کاهش خرید توان در این ساعت، مقدار بدترین سودها افزایش می‌یابد.



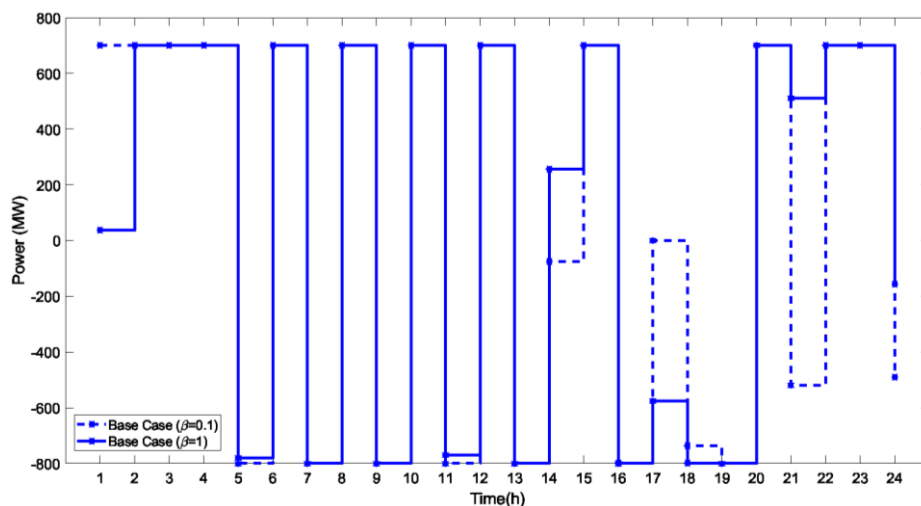
شکل ۴-۲۷- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پیشامد بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در ساعت ۱۷

در شکل (۴-۲۸) منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو برای ساعت ۲۴ به ازای ضرایب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، در ساعت ۱۴ میزان فروش توان کاهش یافته است. به دلیل این که مقادیر سناریوهای دارای بدترین سود مثبت هستند و با کاهش فروش توان در این ساعت، مقدار بدترین سودها افزایش می‌یابد.

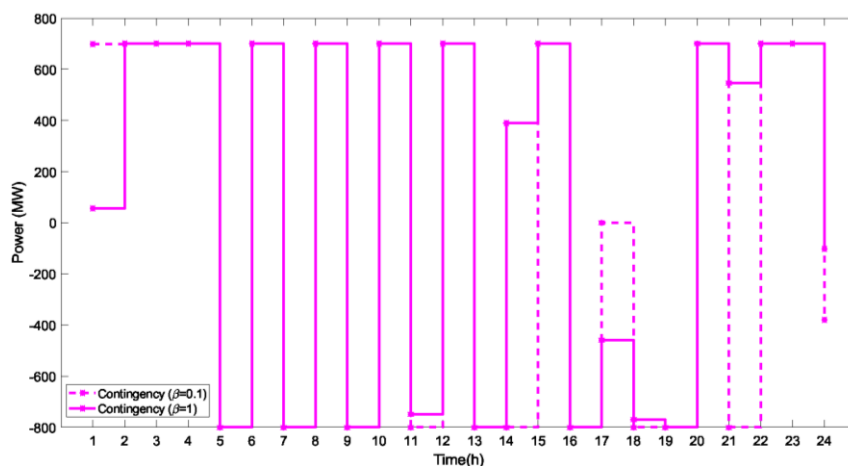


شکل ۴-۲۸- منحنی توان-قیمت پیشنهادی در بازار روز پیش‌رو در شرایط پیشامد بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در ساعت

در شکل (۴-۲۹) و (۴-۳۰) منحنی توان پذیرفته شده در بازار روز پیش رو بر حسب ضریب ریسک‌گریزی ۱ و ۰/۱ به ترتیب، در شرایط پایه و پیشامد ترسیم شده است. در هر دو شرایط پیشامد و پایه در ساعات ۱، ۱۷ و ۱۸ با افزایش ضریب ریسک‌گریزی میزان خرید توان کاهش و در ساعات ۵، ۱۱، ۱۴، ۲۱ و ۲۴ افزایش می‌یابد. دلیل این امر در بخش منحنی قیمت-توان پیشنهادی توضیح داده شده است. در حالت پیشامد تغییرات توان پذیرفته شده نسبت به حالت پایه بیش‌تر است.

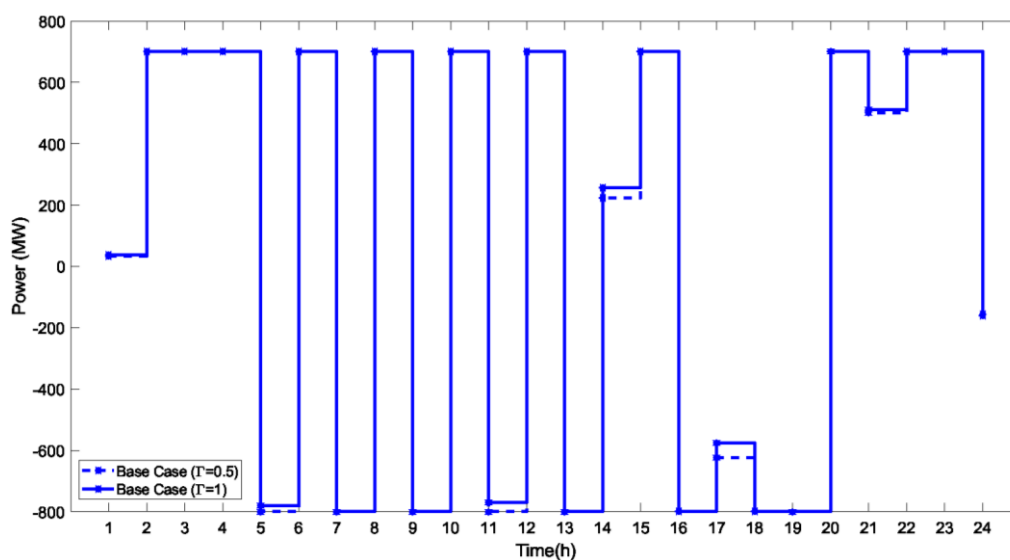


شکل ۴-۲۹- منحی توان پذیرفته شده در بازار روز پیش رو با در شرایط پایه بر حسب ضریب ریسک‌گریزی

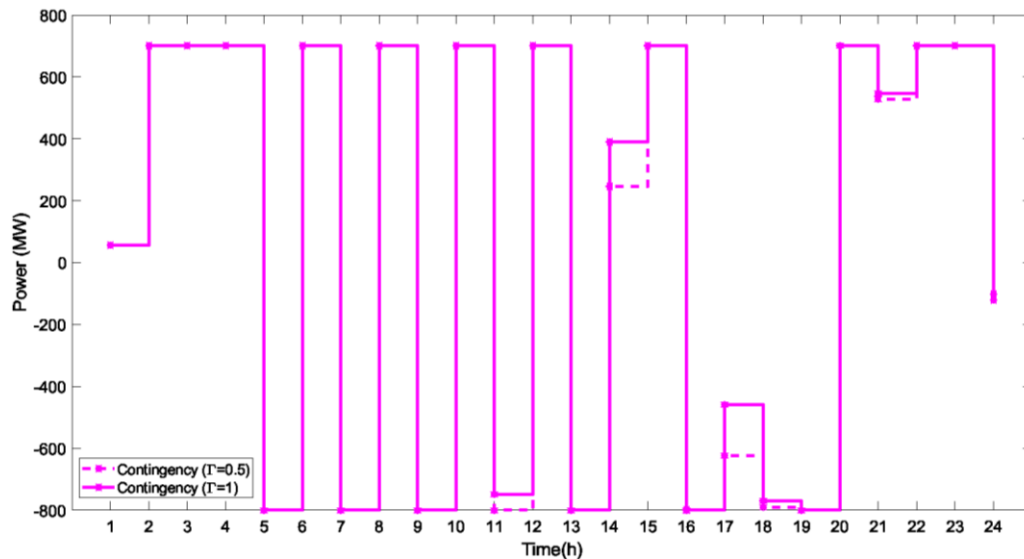


شکل ۴-۳۰- منحنی توان پذیرفته شده در بازار روز پیشرو با در شرایط پیشامد بر حسب ضریب ریسک‌گریزی

در شکل‌های (۴-۳۱) و (۴-۳۲) منحنی توان پذیرفته شده در بازار روز پیشرو به ترتیب، در شرایط پایه و پیشامد با درجه مقاومت ۰/۵ و ۱ ترسیم شده است. در هر دو شرایط با افزایش درجه مقاومت، تصمیمات سیستم مدیریت انرژی محافظ کارانه‌تر شده است و در نتیجه خرید توان از بازار روز پیشرو افزایش و فروش توان کاهش می‌یابد.

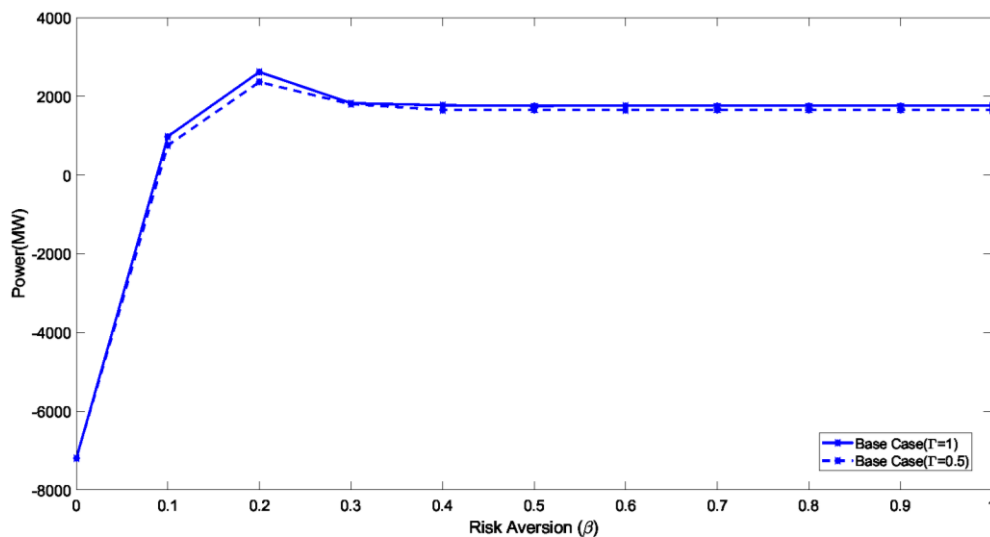


شکل ۴-۳۱- منحنی توان پذیرفته شده در بازار روز پیشرو در شرایط پایه بر حسب درجه مقاومت



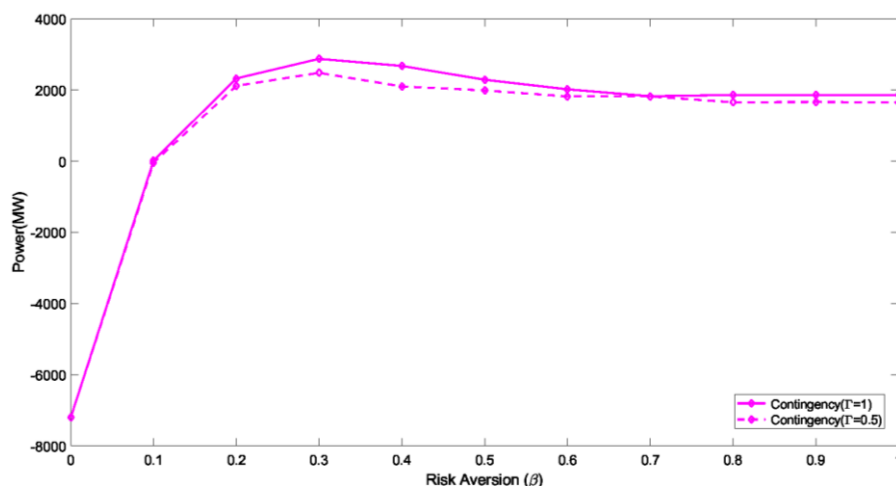
شکل ۴-۳۲- منحنی توان پذیرفته شده در بازار روز پیش‌رو در شرایط پیشامد بر حسب درجه مقاومت

در شکل (۴-۳۳) منحنی کل توان مبادله‌شده در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه بر حسب ضریب ریسک-گریزی و درجه مقاومت ۱ و ۰/۵ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش ضریب ریسک‌گریزی و درجه مقاومت میزان خرید توان افزایش یافته است.



شکل ۴-۳۳- منحنی کل توان مبادله‌شده در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه بر حسب ضریب ریسک‌گریزی و درجه مقاومت

در شکل (۴-۳۴) منحنی کل توان مبادله شده در بازار روز پیش رو در شرایط پیشامد بر حسب ضریب ریسک‌گریزی و درجه مقاومت ۱ و ۰/۵ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش ضریب ریسک‌گریزی و درجه مقاومت میزان خرید توان افزایش یافته است.



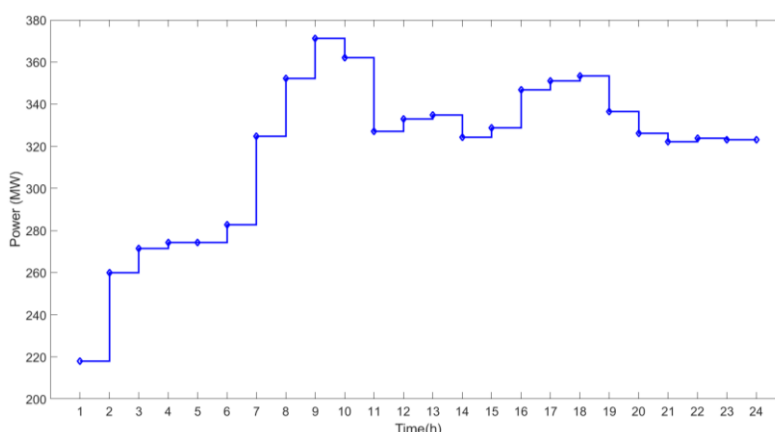
شکل ۴-۳۴- منحنی کل توان مبادله شده در بازار روز پیش رو در حالت پیشامد بر حسب ضریب ریسک‌گریزی و درجه مقاومت

۴-۶- نتایج مرحله زمان حقیقی

نتایج این مرحله در سه بخش وقوع پیشامد واحد تولیدی حرارتی، وقوع پیشامد خط و اثر زمان وقوع پیشامد ارائه شده است. در این مرحله در زمان دیسپچ واحدها از اطلاعات واقعی قیمت بازار زمان حقیقی و حداکثر توان در دسترس واحد تجدیدپذیر استفاده می‌گردد.

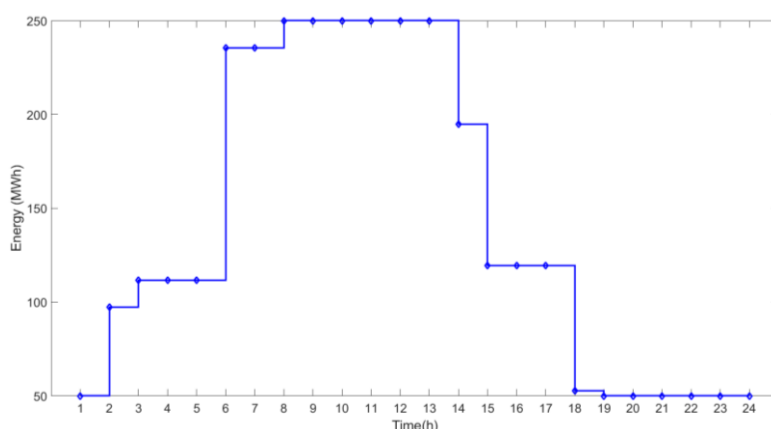
۴-۶-۱- وقوع پیشامد واحد تولیدی حرارتی

نتایج این بخش در شرایطی که پیشامد واحد تولید حرارتی در ساعت ۱۲ رخ دهد، ارائه می‌شود. در شکل (۳۵-۴) منحنی مصرف کل متقاضیان در پیشامد واحد تولید حرارتی ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با خروج واحد حرارتی در ساعت ۱۲، نیروگاه مجازی با کمبود توان مواجه می‌شود، بنابراین میزان مصرف متقاضیان کاهش می‌یابد.



شکل ۳۵-۴- منحنی مصرف کل متقاضیان در پیشامد واحد تولید حرارتی

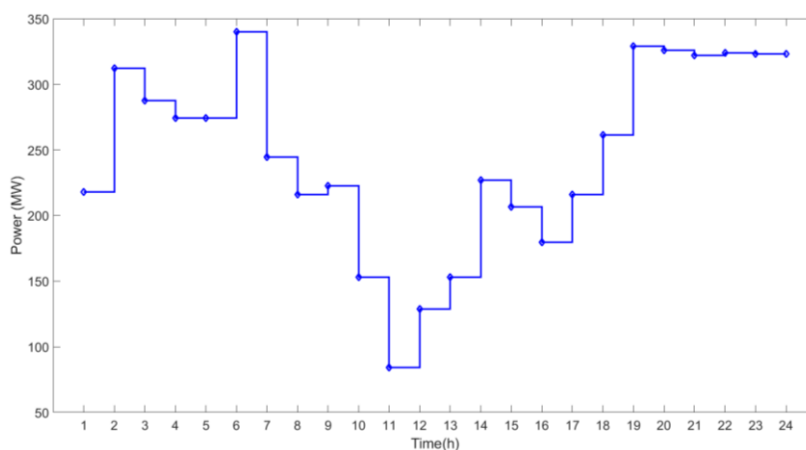
در شکل (۳۶-۴) منحنی انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز در شرایط پیشامد واحد تولید حرارتی ترسیم شده است. در این شرایط تا ساعت دوازده هیچ پیشامدی رخ نداده است، بنابراین احتمال وقوع پیشامد واحد حرارتی و خط وجود دارد. سیستم مدیریت انرژی به منظور مقابله با پیشامدی که احتمال دارد در ساعات آینده رخ دهد، در همان ساعات اولیه روز مقداری انرژی در ذخیره ساز ذخیره می نماید. با خروج واحد حرارتی انرژی ذخیره ساز در ساعاتی که میزان تولید واحد تجدیدپذیر کاهش یافته است، تخلیه می گردد تا بخشی از کمبود توان جبران شود.



شکل ۳۶-۴- منحنی انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز در شرایط پیشامد واحد تولید حرارتی

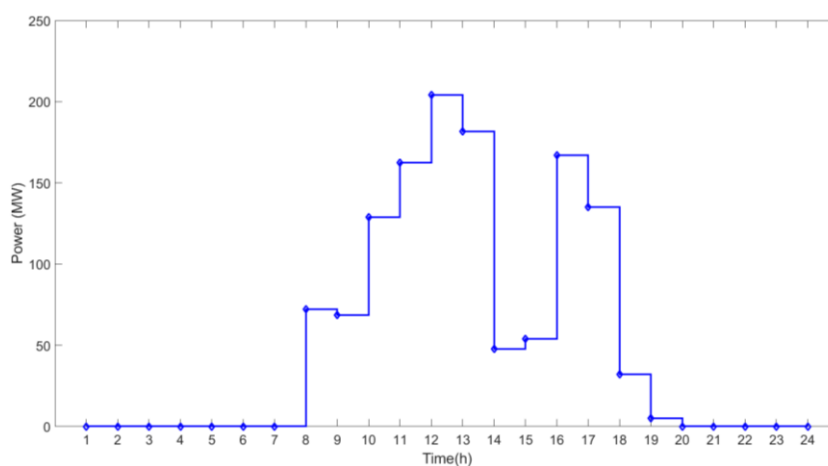
در شکل (۳۷-۴) توان مبادله شده با شبکه اصلی در شرایط پیشامد واحد تولید حرارتی ترسیم شده است. در ساعت ۱۲ قیمت انرژی بالا است و سیستم مدیریت انرژی تمایل به فروش توان به شبکه اصلی دارد ولی با

وقوع پیشامد در ساعت ۱۲، نیروگاه مجازی با کمبود توان مواجه می‌شود، بنابراین توان بیش‌تری را از شبکه اصلی خریداری می‌نماید. در ساعاتی که واحد تجدید پذیر تولید دارد و قیمت بازار بالا است توان بیش‌تری به شبکه اصلی فروخته می‌شود. با کاهش تولید واحد تجدیدپذیر میزان خرید توان از شبکه اصلی افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۳۷- منحنی توان مبادله‌شده با شبکه اصلی در شرایط پیشامد واحد تولید حرارتی

در شکل (۴-۳۸) توان واحد تجدیدپذیر در شرایط پیشامد واحد تولید حرارتی ترسیم شده است. وقوع پیشامد واحد حرارتی تاثیری بر توان واحد تجدیدپذیر ندارد.

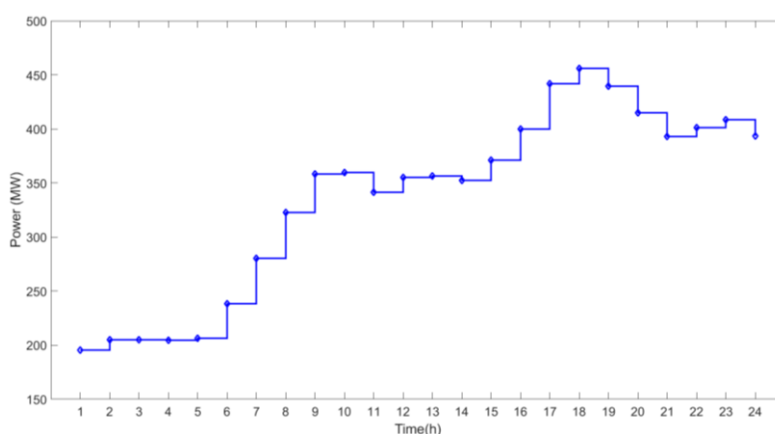


شکل ۴-۳۸- منحنی توان واحد تجدیدپذیر در شرایط پیشامد واحد تولید حرارتی

۴-۶-۲- وقوع پیشامد خط

نتایج این بخش در شرایطی که پیشامد خط ۳ در ساعت ۱ رخ دهد، ارائه می‌شود.

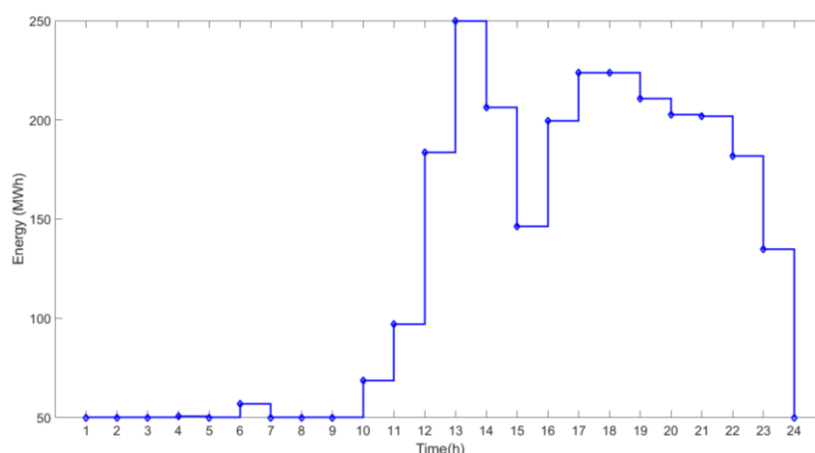
در شکل (۴-۳۹) منحنی مصرف کل متقاضیان در شرایط پیشامد خط ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، مصرف کل متقاضیان تا ساعت ۹ صبح کم است. در این ساعات مقدار توان تولیدی واحد تجدیدپذیر نیز کم می‌باشد و واحد حرارتی نیز تا ساعت ۶ خاموش است، بنابراین نیروگاه مجازی مصرف متقاضیان را با خرید توان از شبکه اصلی تامین می‌کند. با وقوع پیشامد خط ۳ ظرفیت تبادل با شبکه اصلی کاهش و مصرف کل متقاضیان نیز کم خواهد شد. در حالی که در ساعات پس از ۶، واحد تولید حرارتی روشن می‌شود و توان مصرفی متقاضیان افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۳۹- منحنی مصرف کل متقاضیان در شرایط پیشامد خط

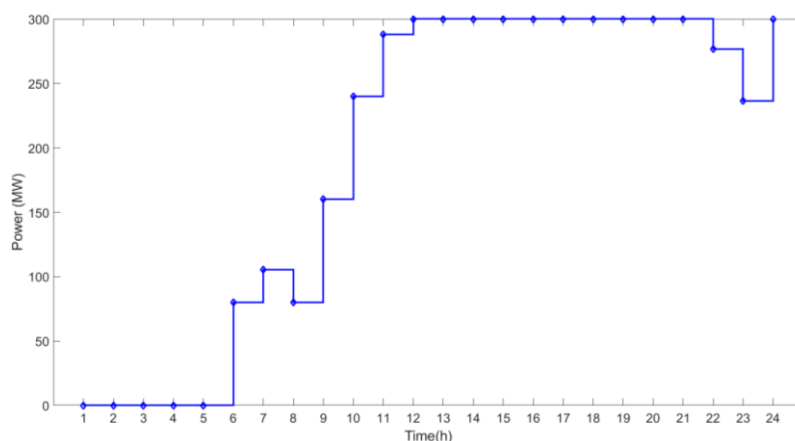
در شکل (۴-۴۰) منحنی انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز در شرایط پیشامد خط ترسیم شده است. سیستم مدیریت انرژی در ساعاتی که قیمت انرژی کم است، انرژی را از بازار خریداری می‌کند و ذخیره‌ساز شارژ می‌شود. انرژی ذخیره‌شده در ساعاتی که قیمت انرژی زیاد است، تخلیه می‌شود و در بازار به فروش می‌رسد و یا برای تامین متقاضیان در این ساعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. با وقوع پیشامد خط ۳ به دلیل کاهش ظرفیت انتقال توان میزان ذخیره و تخلیه ذخیره‌ساز تحت تاثیر قرار گرفته و در برخی از ساعات کاهش می‌یابد. در شرایط

پیشامد تا ساعت ۱۰ صبح انرژی در ذخیره‌ساز ذخیره نمی‌شود به دلیل این‌که در این ساعات تبادل با شبکه اصلی کاهش یافته و مقدار توان تولید واحد تجدیدپذیر کم می‌باشد.



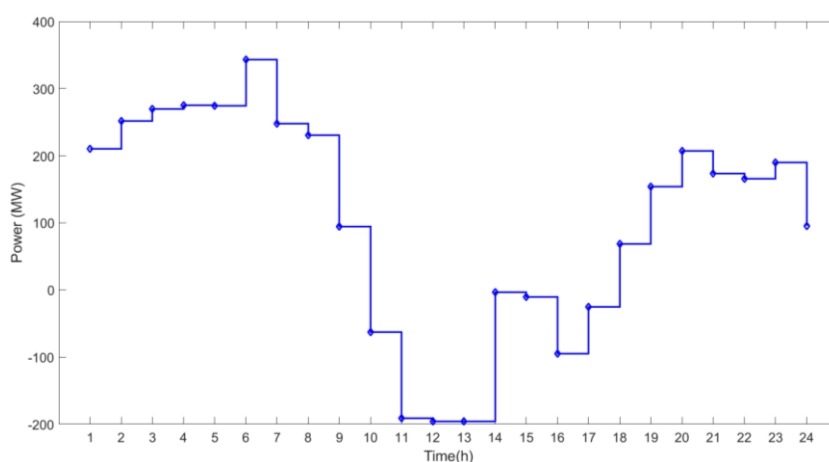
شکل ۴-۴۰- منحنی انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز در شرایط پیشامد خط

در شکل (۴-۴۱) منحنی توان تولیدی واحد حرارتی در شرایط پیشامد خط ترسیم شده است. در ساعاتی که قیمت انرژی کم‌تر از هزینه تولید واحد حرارتی است، مقدار توان تولیدی آن کم است و از آن برای تامین مصرف متقاضیان استفاده می‌شود. در ساعاتی که قیمت انرژی بالا است، مازاد توان تولیدی واحد حرارتی به شبکه اصلی فروخته می‌شود. با وقوع پیشامد خط ۳ به دلیل کاهش ظرفیت تبادل با شبکه اصلی، میزان خرید و فروش توان کاهش می‌یابد، در نتیجه در ساعاتی که قیمت انرژی کم‌تر از هزینه تولید واحد حرارتی، توان تولیدی کم است. با افزایش مقدار بیشینه و کمینه متقاضیان در ساعت ۱۲ تا ۲۱، در شرایط پیشامد برای تامین مصرف متقاضیان از توان تولیدی واحد حرارتی استفاده می‌شود. بنابراین میزان تولید این واحد در شرایط پیشامد خط ۳ افزایش می‌یابد.



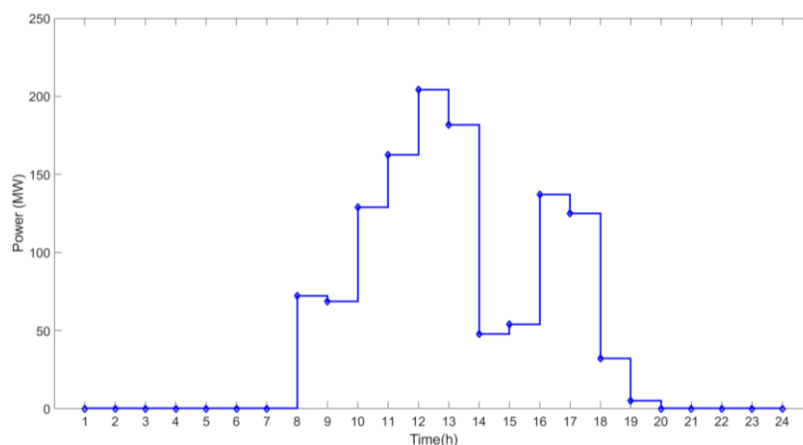
شکل ۴-۴۱- منحنی توان تولیدی واحد حرارتی در شرایط پیشامد خط

در شکل (۴-۴۲) منحنی توان مبادله شده با شبکه اصلی در پیشامد خط ۳ ترسیم شده است. همان طور که در شکل مشخص است، با وقوع پیشامد خط ۳ به دلیل کاهش ظرفیت تبادل با شبکه اصلی، میزان خرید و فروش توان کاهش یافته است. در ساعات اولیه واحد تجدیدپذیر و حرارتی تولید ندارند و نیروگاه مجازی در این ساعات با خرید توان از شبکه اصلی توان مصرفی را تامین می نماید. بنابراین خرید توان در این ساعات بیش تر از ساعات دیگر است. در ساعاتی که واحد تجدیدپذیر تولید دارد میزان خرید از شبکه اصلی کاهش و میزان فروش افزایش یافته است.



شکل ۴-۴۲- منحنی توان مبادله شده با شبکه اصلی در شرایط پیشامد خط

در شکل (۴-۴۳) منحنی توان واحد تجدیدپذیر در شرایط پایه و پیشامد خط ۳ در ساعت ۱ ترسیم شده است. با وقوع پیشامد خط ۳ که به واحد تولید تجدیدپذیر متصل است، نیروگاه مجازی قادر نیست در ساعت ۱۱ از ۲۳ مگاوات توان در دسترس واحد تجدیدپذیر استفاده نماید.



شکل ۴-۴۳- منحنی توان واحد تجدیدپذیر در شرایط پیشامد خط

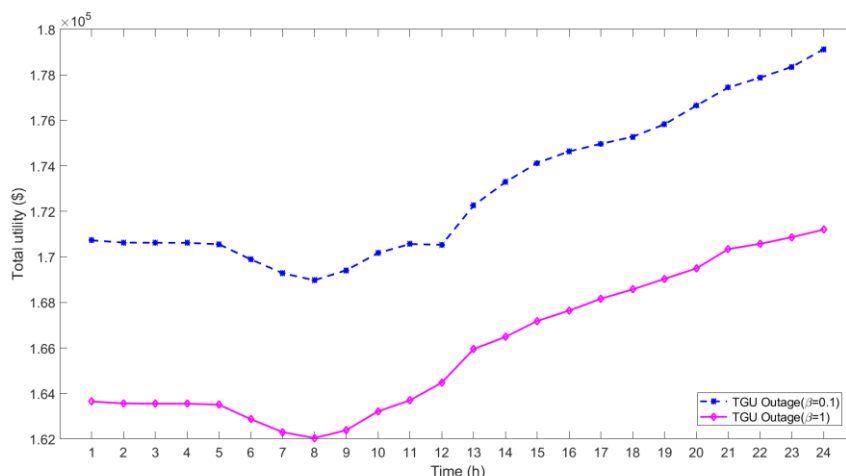
۴-۶-۳- اثر زمان وقوع پیشامد

برای بررسی موضوع اثر زمان وقوع پیشامد بر روی سود کل، تعداد ۲۴ شبیه‌سازی برای شرایطی که پیشامد واحد تولیدی حرارتی و خط ۳ در هر ساعت از بازه برنامه‌ریزی رخ دهد، انجام شده است. در این شبیه‌سازی‌ها فرض شده است که با وقوع پیشامد در هر ساعت، آن‌المان تا پایان دوره ۲۴ ساعته برنامه‌ریزی به شبکه باز نخواهد گشت.

سود روزانه واقعی نیروگاه مجازی از مجموع مطلوبیت متقاضیان منهای هزینه واحد حرارتی و هزینه حاصل از شرکت در بازارهای روز پیش‌رو و زمان حقیقی در کل روز به دست می‌آید.

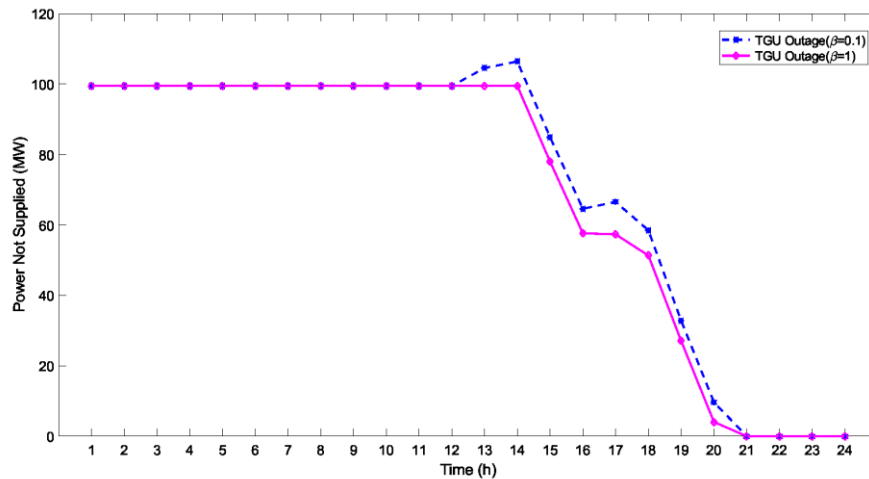
در شکل (۴-۴۴) سود واقعی روزانه در ساعات مختلف خروج واحد تولید حرارتی بر حسب ضریب ریسک-گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است. در این شکل محور افقی زمان وقوع پیشامد و محور عمودی مجموع سود در کل روز را نمایش می‌دهد. وضعیت روشن‌شدن واحد تولیدی حرارتی از روز قبل مشخص است. این واحد از ساعت ۶ تا ۲۴ روشن است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، تا ساعت ۵ صبح مقدار سود تغییری نکرده

است. زیرا واحد تولیدی حرارتی از ساعت ۶ صبح روشن می‌شود و در ساعات قبل آن خاموش است و توان تولیدی آن صفر است. از ساعت ۵ تا ۸ صبح مقدار سود کاهش یافته است. به دلیل این که در این ساعات قیمت سوخت واحد تولیدی حرارتی از قیمت بازار بیش‌تر است و وضعیت واحد از روز قبل مشخص شده است که در این ساعات روشن باشد. در صورت روشن بودن واحد حرارتی، این واحد باید مقدار حداقل توان را تولید کند و با خروج واحد، تولید آن صفر می‌شود و بنابراین سود افزایش می‌یابد. در ساعات بعد از ۸ صبح، هزینه سوخت واحد تولیدی حرارتی کم‌تر از قیمت بازار است و با تولید توان واحد حرارتی سود بیش‌تری حاصل می‌شود. بنابراین در این ساعات هر چه واحد حرارتی دیرتر از مدار خارج شود میزان سود افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب ریسک‌گریزی سود واقعی نیروگاه مجازی ۴/۷٪ کاهش یافته است.



شکل ۴-۴۴- منحنی سود واقعی روزانه نیروگاه مجازی در ساعات پیشامد واحد تولیدی حرارتی

در شکل (۴-۴۵) منحنی توان تامین‌نشده کل در مرحله زمان حقیقی در ساعات پیشامد واحد تولیدی حرارتی ترسیم شده است. در این شکل محور افقی زمان وقوع پیشامد و محور عمودی مجموع بار قطع‌شده در کل روز را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی مقدار توان تامین‌نشده در کل روز افزایش می‌یابد. به دلیل این که با افزایش ضریب ریسک‌گریزی تصمیمات سیستم مدیریت انرژی به گونه‌ای اتخاذ می‌شود که مقدار بدترین سودها کاهش یابد. در نتیجه مقدار بار تامین‌نشده باید کاهش یابد.

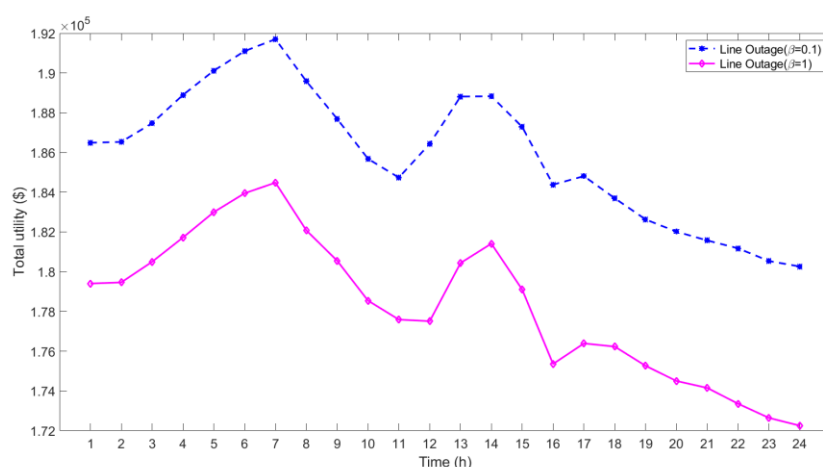


شکل ۴-۴۵- منحنی توان تامین نشده در ساعات خروج واحد تولیدی حرارتی

در شکل (۴-۴۶) منحنی سود روزانه در هر ساعت از بازه برنامه‌ریزی که خط ۳ خارج می‌شود، ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، از ساعت ۱ تا ۷ صبح هر چه خط ۳ دیرتر خارج می‌شود سود افزایش می‌یابد. به دلیل اینکه در این ساعات مقدار توان تولیدی واحد تجدیدپذیر صفر است و واحد تولیدی حرارتی نیز از ساعت ۶ روشن می‌شود و تولید کمی دارد. بنابراین در این ساعات سیستم مدیریت انرژی از طریق تبادل توان با شبکه اصلی بار متقاضیان را تامین می‌کنند. با خروج خط ۳ در این ساعات ظرفیت تبادل توان با شبکه اصلی کاهش می‌یابد و نیروگاه مجازی توان کم‌تری می‌تواند بخرد، بنابراین بار متقاضیان باید کاهش یابد که این امر مقدار سود را کاهش می‌دهد.

از ساعت ۷ تا ۱۲ هر چه خط سه زودتر خارج می‌شود مقدار سود افزایش می‌یابد. به دلیل اینکه در این ساعات واحد تولیدی تجدیدپذیر تولید دارد به صورتی که در ساعت ۱۲ بیش‌ترین توان تجدیدپذیر تولید می‌شود. با خروج خط ۳ در این ساعات، توان خروجی واحد تجدیدپذیر کاهش می‌یابد. بنابراین مقدار سود کاهش می‌یابد. در ساعت ۱۲ که بیش‌ترین توان واحد تجدیدپذیر تولید می‌شود، توان تجدیدپذیر کم‌تری نسبت به ساعات دیگر منتقل می‌شود. بنابراین سود در این ساعت کم‌تر از ساعات قبل از آن است.

از ساعت ۱۲ تا ۱۴ مقدار توان تولیدی واحد تجدیدپذیر کم می‌شود و با خروج خط ۳ توان تجدیدپذیر بیش‌تری نسبت به ساعت ۱۲ منتقل می‌شود که این امر باعث افزایش سود شده است. در ساعت ۱۶ تولید واحد تجدیدپذیر افزایش می‌یابد که با خروج خط ۳ مقدار توان تجدیدپذیر عبوری کاهش یافته و در نتیجه مقدار سود نیز کاهش می‌یابد. از ساعت ۱۸ توان تولیدی واحد تجدیدپذیر کاهش می‌یابد و در ساعت ۲۰ به صفر می‌رسد. در این ساعات کل توان تولیدی تجدیدپذیر عبور می‌کند. بنابراین در این ساعات هرچه خط ۳ زودتر خارج می‌شود مقدار توان خرید توان از شبکه افزایش و مقدار فروش توان به شبکه اصلی کاهش می‌یابد. در نتیجه مقدار سود در این ساعات کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر همان‌طور که در بخش اثر پیشامد خط ۳ بر توان تولیدی واحد حرارتی توضیح داده شد. سیستم مدیریت انرژی برای کاهش زیان ناشی از بار تامین نشده در اثر پیشامد واحد تولیدی حرارتی، برنامه‌ریزی المان‌های نیروگاه مجازی را با حداقل توان تولیدی واحد حرارتی انجام می‌دهد تا در صورت وقوع پیشامد آمادگی لازم را برای مقابله با اثرات آن داشته باشد. شایان به ذکر است که بار متقاضیان در هر ساعت تا مقدار معینی می‌تواند کاهش یابد. در نتیجه هر چه پیشامد خط ۳ زودتر رخ دهد وضعیت آرایش شبکه تا پایان دوره برنامه‌ریزی زودتر مشخص می‌شود و احتمال پیشامد واحد تولیدی حرارتی به صفر می‌رسد. بنابراین سیستم مدیریت انرژی نیازی به آمادگی در شرایط وقوع پیشامد واحد حرارتی ندارد. در نتیجه مقدار توان تولیدی واحد حرارتی می‌تواند افزایش یابد. این امر موجب افزایش توان تامین شده و سود خواهد شد. با افزایش ضریب ریسک‌گریزی مقدار سود واقعی تا ۴/۱۶٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۴۶- منحنی سود واقعی روزانه در ساعات مختلف خروج خط ۳

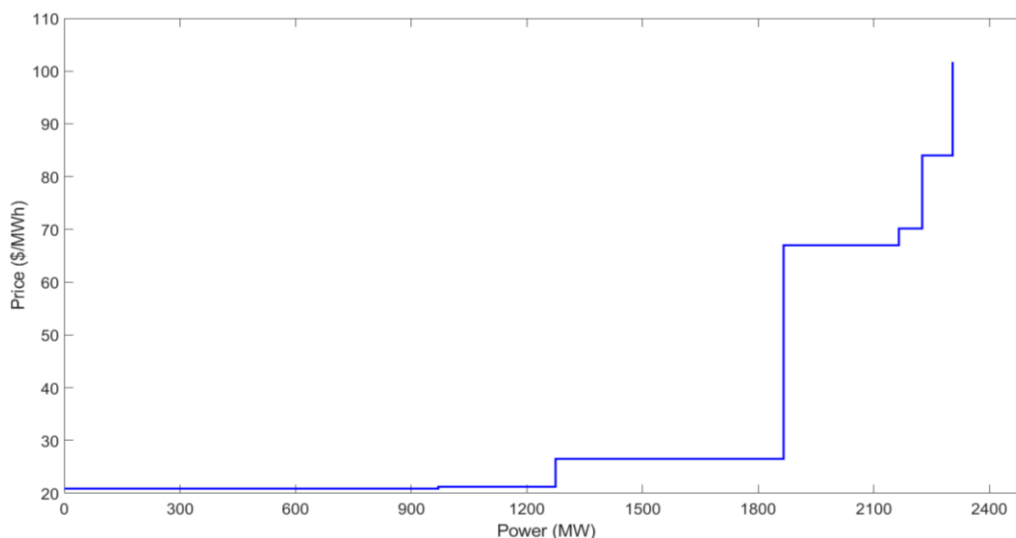
۴-۷- اطلاعات مطالعه موردی دو: شبکه ۲۴ باس

در این مورد مطالعه از سیستم *IEEE RTS 24-Bus* استفاده شده است [۳۶]. این سیستم دارای ۳۲ واحد تولیدی است. در این شبیه‌سازی‌ها سیستم به صورتی اصلاح شده است که از واحدهای تولیدی تجدیدپذیر به جای واحدهای حرارتی برق‌آبی و انرژی هسته‌ای استفاده شود. بنابراین واحدهای تولیدی شامل ۲۴ واحد حرارتی، سه واحد تولیدی تجدیدپذیر و سه سیستم ذخیره‌ساز انرژی است. سیستم دارای ۱۷ متقاضی می‌باشد و بار متقاضیان بر اساس هفته ۲۲ از جدول ۲ و ۴ مرجع محاسبه شده است. نرخ خروج واحدهای تولید حرارتی از جدول ۶ و نرخ خروج خطوط از جدول ۱۲ اخذ شده است. هزینه روشن شدن و خاموش شدن واحدهای حرارتی از جدول ۸ و هزینه تولید توان از جدول ۱۰ بر اساس هزینه سوخت در مرجع [۳۷] محاسبه شده است. ظرفیت تبادل با شبکه اصلی ۷۰۰ مگاوات در نظر گرفته شده است. در جدول (۴-۴) اطلاعات فنی و اقتصادی واحدهای تولیدی حرارتی درج شده‌اند. سناریوهای وقوع پیشامد، با در نظر گرفتن وقوع پیشامد واحدهای تولید حرارتی ۳۵۰ مگاواتی و ۱۵۵ مگاواتی موجود در باس ۲۳ و برای سناریوهای وقوع پیشامد خطوط، خروج خطوط ۱۳-۱۱ و ۱۹-۱۶ در ساعات ۱، ۱۰، ۲۰ و ۲۴ تولید شده‌اند.

جدول ۴-۴- اطلاعات فنی و اقتصادی واحدهای تولیدی حرارتی

واحد	حداکثر تولید [MW]	حداقل تولید [MW]	تعداد	هزینه [\$/MWh]	هزینه روشن شدن [\$/MWh]	هزینه خاموش شدن [\$/MWh]
U۳۵۰	۳۵۰	۱۴۰	۱	۲۰/۹	۴۰۲۱	۱۰۰۵/۲
U۱۵۵	۱۵۵	۵۴/۲	۴	۲۱/۲	۵۴۶	۱۳۶/۵
U۷۶	۷۶	۱۵/۲	۴	۲۶/۵	۱۲۵۱	۳۱۲/۷
U۱۹۷	۱۹۷	۶۹	۳	۶۷	۳۱۱۰	۷۷۷/۵
U۱۰۰	۱۰۰	۲۵	۳	۷۰/۲	۱۷۵۵	۴۳۸/۷
U۱۲	۱۲	۴/۲	۵	۸۴	۲۶۷	۶۶/۷
U۲۰	۲۰	۱۵/۸	۴	۱۰۱/۸	۳۵	۸/۷

در شکل (۴-۴۷) تجمعی توان-قیمت واحدهای تولید حرارتی نمایش داده شده است.



شکل ۴-۴۷ - منحنی تجمعی توان-قیمت واحدهای تولید حرارتی

۴-۸- نتایج تصمیم‌سازی در بازار روز پیش‌رو

نتایج تصمیم‌سازی در این مرحله در دو بخش اثر در نظر گرفتن وقوع پیشامد، اثر تغییر ضریب

ریسک‌گریزی و درجه مقاومت ارائه شده است.

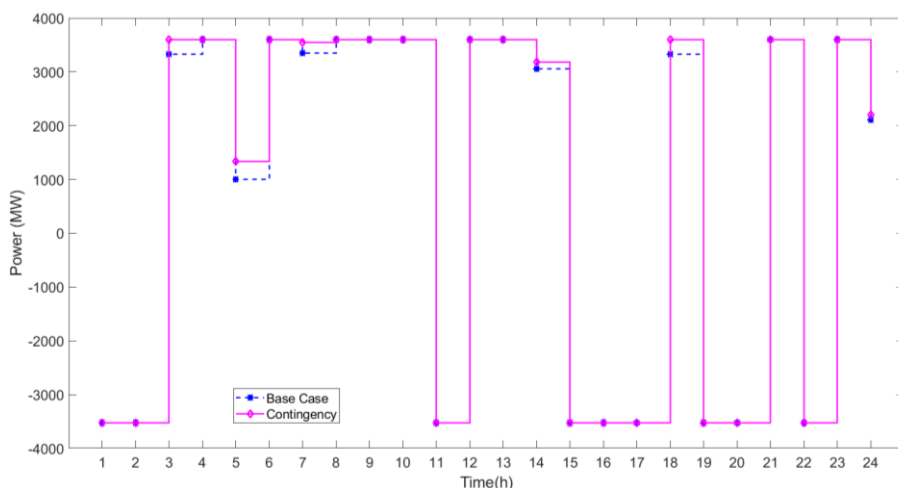
۴-۸-۱- اثر در نظر گرفتن وقوع پیشامد

در شکل (۴-۴۸) منحنی امید ریاضی پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد ترسیم

شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با در نظر گرفتن وقوع پیشامد مقدار خرید توان از بازار روز

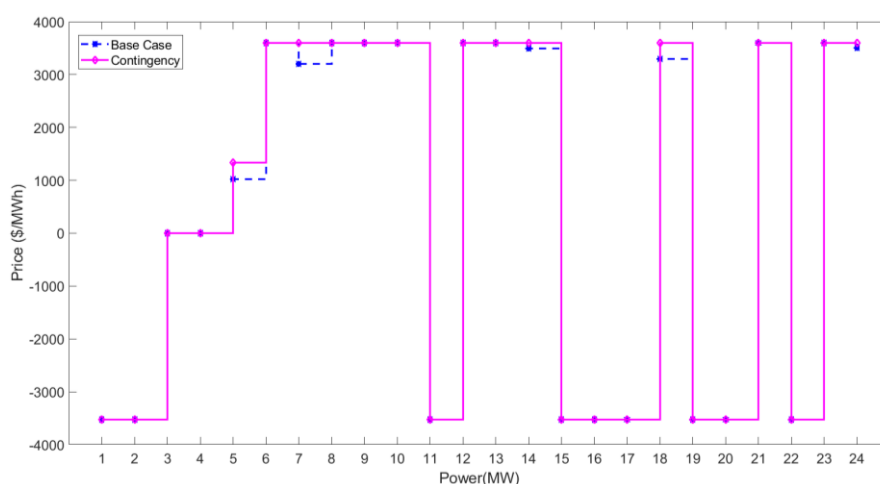
پیش‌رو افزایش یافته است. به دلیل این که در صورت وقوع پیشامد سیستم مدیریت انرژی با کمبود توان مواجه

نشود.



شکل ۴-۴۸- منحنی امید ریاضی پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد

در شکل (۴-۴۹) منحنی توان مبادله شده با شبکه اصلی در شرایط پایه و پیشامد نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با وقوع پیشامد مقدار خرید توان از شبکه اصلی به بیشینه مقدار خود می‌رسد. به دلیل با خروج واحد حرارتی مقدار توان تولیدی کاهش یافته است و سیستم مدیریت انرژی برای جبران کمبود، بیشینه توان را از شبکه اصلی خریداری می‌کند. در شرایط پایه از ساعت ۹ تا ۱۵ که مقدار توان تولیدی واحد تجدیدپذیر قابل توجه است، خرید توان از شبکه اصلی کاهش و فروش آن به شبکه اصلی افزایش یافته است.



شکل ۴-۴۹- منحنی توان-قیمت پذیرفته‌شده در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد

۴-۸-۲- اثر تغییر ضریب ریسک‌گریزی

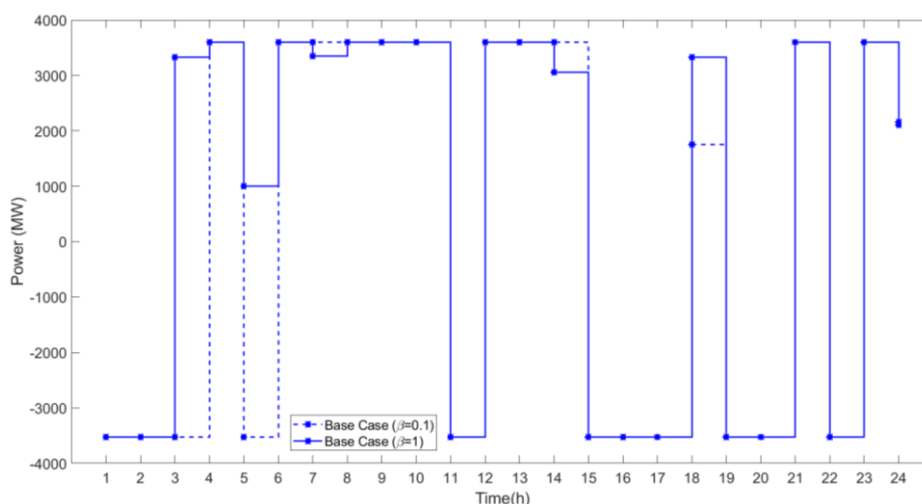
در شرایط پایه میزان انرژی تامین نشده صفر است. در شرایط پیشامد با در نظر گرفتن ضریب ریسک‌گریزی ۰/۱ میزان انرژی تامین نشده روزانه به ۴۴ مگاوات می‌رسد. چنانچه مقدار ضریب ریسک‌گریزی به ۱ افزایش یابد مقدار انرژی تامین نشده به صفر می‌رسد. به دلیل این که با افزایش ضریب ریسک‌گریزی سیستم مدیریت انرژی سعی دارد با تصمیماتی که اتخاذ می‌کند، سناریوهای دارای کم‌ترین سود که در اثر جریمه انرژی تامین نشده روزانه حاصل می‌شوند را کاهش دهد.

در شرایط پایه واحدهای حرارتی ۱۵۵، ۳۵۰ و ۷۶ مگاواتی که هزینه سوخت کم‌تری نسبت به واحدهای دیگر دارند، روشن می‌شوند. با افزایش ضریب ریسک‌گریزی تغییری در وضعیت روشن شدن و زمان آن ایجاد نمی‌شود.

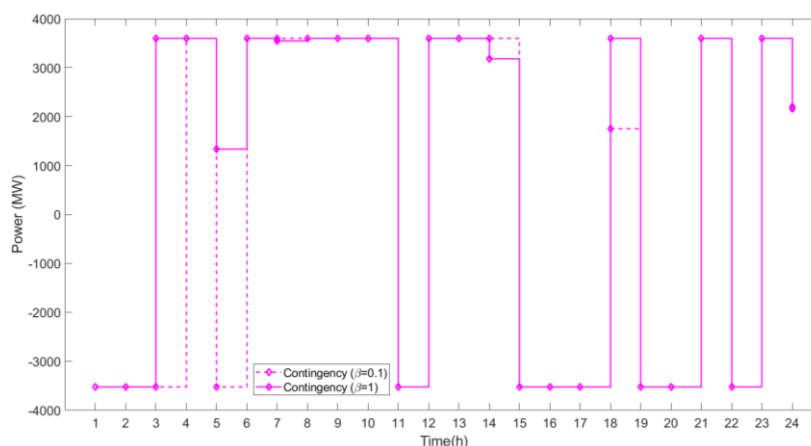
با در نظر گرفتن شرایط پیشامد در ضریب ریسک‌گریزی ۰/۱، علاوه بر واحدهای ۱۵۵، ۳۵۰ و ۷۶ مگاواتی که در در شرایط پایه در تمامی ساعات روشن می‌شوند، یک واحد ۱۰۰ مگاواتی نیز در تمامی ساعات دوره برنامه‌ریزی روشن می‌شود تا در صورت وقوع پیشامد، کمبود تولید توان جبران شود. با افزایش ضریب ریسک‌گریزی به ۱، یک واحد ۱۲ مگاواتی در باس ۱۵ که پرمصرف‌ترین متقاضی قرار دارد، در ساعات ۱۹ تا ۲۱ (ساعات اوج مصرف) روشن می‌شود تا در صورت وقوع پیشامد میزان انرژی تامین نشده به صفر برسد.

افزایش ضریب ریسک‌گریزی موجب می‌شود سیستم مدیریت انرژی پیشنهادهای توان را به گونه‌ای ارائه دهد که سود نیروگاه مجازی به ازای سناریوهایی که بدترین سودها را دارند، افزایش پیدا کند. در ساعاتی که قیمت بازار روز پیش‌رو کمتر از قیمت بازار زمان حقیقی باشد نیروگاه مجازی تمایل دارد در بازار روز پیش‌رو توان را خریداری کند و با قیمت بالاتر در بازار زمان حقیقی بفروشد. در ساعاتی که سناریوهای اختلاف قیمت بازار زمان حقیقی و بازار روز پیش‌رو که مقدار بدترین سود را دارند مثبت باشند (قیمت بازار روز پیش‌رو کمتر از قیمت بازار زمان حقیقی است)، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی توان بیش‌تری خریداری می‌شود. در صورتی که مقدار اختلاف قیمت منفی باشد توان بیش‌تری در بازار روز پیش‌رو فروخته می‌شود.

در شکل (۴-۵۰) و (۴-۵۱) منحنی امید ریاضی پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه و پیشامد برای ضریب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است. به ازای شرایط پایه یا پیشامد مشاهده می‌شود، در ساعات ۳، ۵، ۱۸ و ۲۴ با افزایش ضریب ریسک‌گریزی مقدار خرید توان از بازار روز پیش‌رو افزایش یافته است. به دلیل این‌که در این ساعات مقدار سناریوی اختلاف قیمت بازار زمان حقیقی و روز پیش‌رو که باعث بدترین سود می‌شود، مثبت است. بنابراین، نیروگاه مجازی تمایل دارد توان بیش‌تری در بازار روز پیش‌رو خریداری کند. در ساعات هفت و چهارده با افزایش ضریب ریسک‌گریزی مقدار خرید توان از بازار روز پیش‌رو کاهش یافته است. به دلیل این‌که در این ساعات مقدار سناریوی اختلاف قیمت بازار زمان حقیقی و روز پیش‌رو که باعث بدترین سود می‌شود منفی است. بنابراین، نیروگاه مجازی تمایل دارد توان کم‌تری از بازار روز پیش‌رو خریداری کند.

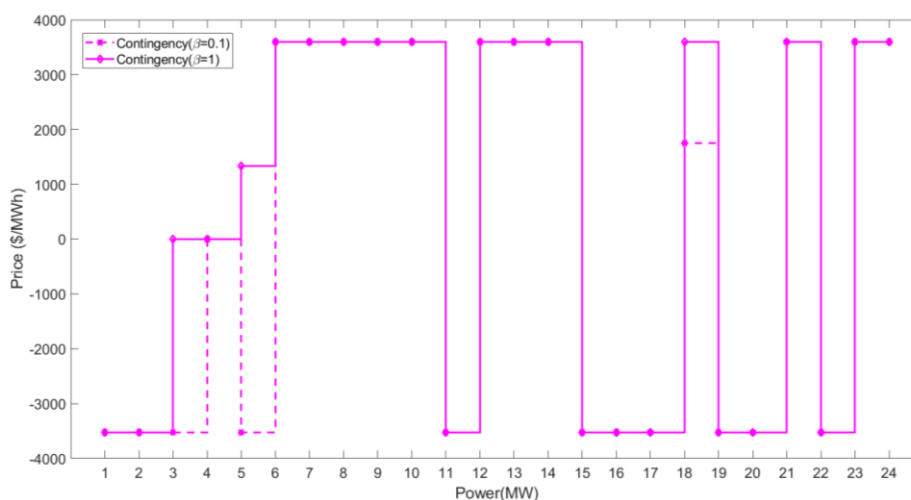


شکل ۴-۵۰- منحنی امید ریاضی پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو در شرایط پایه به ازای ضریب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱



شکل ۴-۵۱- منحنی امید ریاضی پیشنهاد توان در بازار روز پیش‌رو در شرایط پیشامد به ازای ضریب ریسک‌گریزی ۰/۱ و ۱

در شکل (۴-۵۲) منحنی امید ریاضی توان-قیمت پذیرفته شده در بازار روز پیش رو به ازای ضریب ریسک-گریزی ۰/۱ و ۱ ترسیم شده است.



شکل ۴-۵۲- منحنی توان-قیمت پذیرفته شده در بازار روز پیش رو به ازای ضریب ریسک-گریزی ۰/۱ و ۱

در جدول (۴-۵) و (۴-۶) مقدار $CvaR$ و سود موردانتظار بر حسب ضریب ریسک-گریزی در شرایط پایه و پیشامد درج شده است. همان طور که در این جدول ها مشخص است، با افزایش ضریب ریسک-گریزی مقدار $CvaR$ افزایش و سود موردانتظار کاهش می یابد. به دلیل این که با افزایش ضریب ریسک-گریزی سیستم مدیریت انرژی سعی دارد تصمیماتی اتخاذ کند که کم ترین سود را افزایش دهد. این امر باعث کاهش سود مورد انتظار می شود.

جدول ۴-۵- مقدار $CvaR$ و سود موردانتظار بر حسب ضریب ریسک-گریزی در شرایط پایه

ضریب ریسک-گریزی	$CvaR$ [\$]	سود مورد انتظار [\$]
۰/۰۱	۸۹۷۶۷۶	۱۰۴۷۱۶۳
۰/۱	۹۲۴۸۱۴	۱۰۴۶۳۵۶
۱	۹۳۵۹۲۱	۱۰۴۲۴۴۳

جدول ۴-۶- مقدار $CvaR$ و سود موردانتظار بر حسب ضریب ریسک‌گریزی در شرایط پیشامد

ضریب ریسک‌گریزی	$CvaR$ [\$]	سود مورد انتظار [\$]
۰/۰۱	۸۹۱۳۴۵	۱۰۴۳۷۳۲
۰/۱	۹۱۸۲۱۵	۱۰۴۶۳۵۶
۱	۹۳۱۱۰۳	۱۰۳۹۴۹۳

۴-۹- نتایج مرحله زمان حقیقی

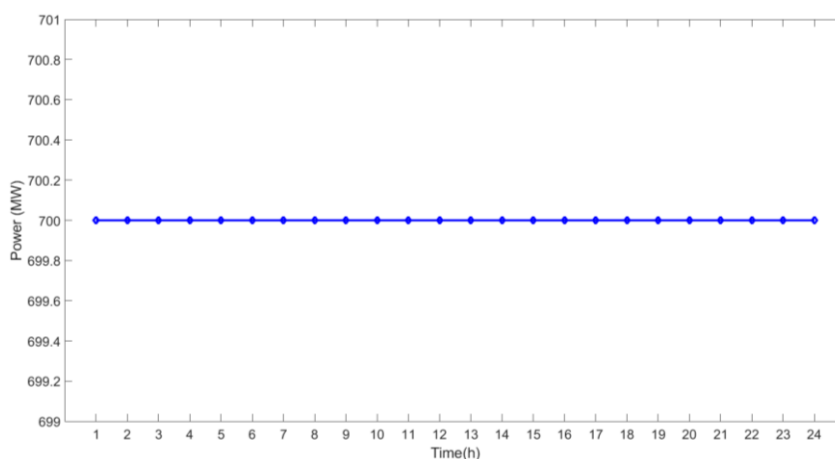
در این مرحله در زمان دیسپیچ واحدها از اطلاعات واقعی قیمت بازار زمان حقیقی و حداکثر توان در دسترس واحد تجدیدپذیر و در دسترس‌پذیری اجزای نیروگاه مجازی استفاده می‌گردد.

۴-۹-۱- وقوع پیشامد واحد تولیدی حرارتی

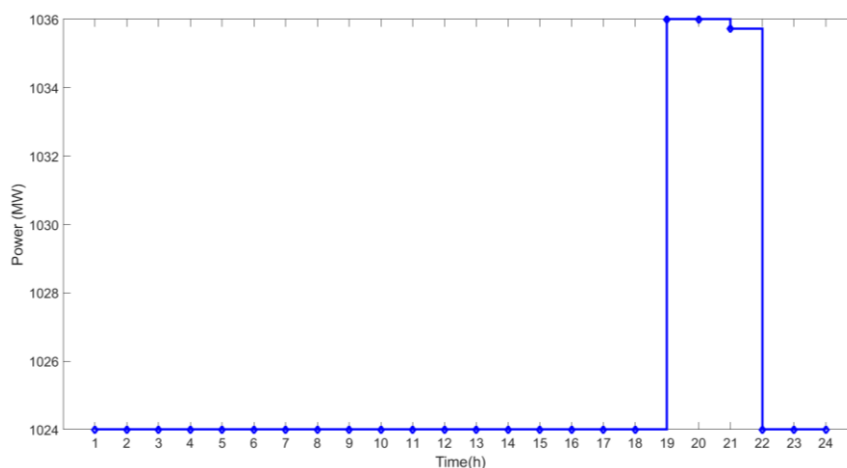
در نتایج ارائه شده برای این بخش خروج واحد تولید حرارتی ۳۵۰ مگاواتی در ساعت ۱ به عنوان آرایش واقعی در طی روز در نظر گرفته شده است.

در شکل (۴-۵۳) توان مبادله شده با شبکه اصلی در بازار زمان حقیقی در شرایط پایه و پیشامد ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با وقوع پیشامد مقدار خرید توان در بازار زمان حقیقی بیش‌تر از شرایط پایه است. به دلیل با خروج واحد حرارتی مقدار توان تولیدی کاهش یافته است و سیستم مدیریت انرژی برای جبران کمبود، توان بیش‌تری را از شبکه اصلی خریداری می‌کند و توان کم‌تری را می‌فروشد.

در شکل (۴-۵۴) کل توان تولیدی واحدهای حرارتی در شرایط پیشامد ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با وقوع پیشامد واحد حرارتی مقدار توان تولیدی کاهش یافته است. در ساعت ۱۹ تا ۲۱ با روشن شدن واحد حرارتی ۱۲ مگاواتی در ساعات پیک مصرف مقدار کل توان تولیدی واحدهای حرارتی افزایش و با خاموش شدن این واحد در ساعت ۲۲ کاهش می‌یابد.

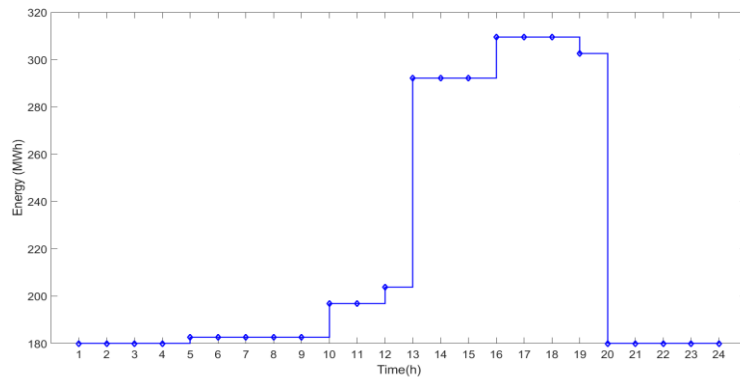


شکل ۴-۵۳- کل توان مبادله شده با شبکه اصلی در شرایط پیشامد



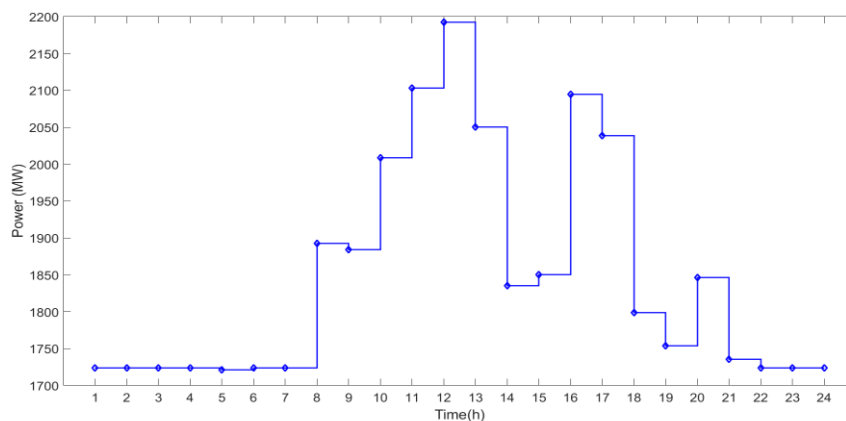
شکل ۴-۵۴- کل توان تولیدی واحدهای حرارتی در شرایط پیشامد

در شکل (۴-۵۵) منحنی کل انرژی ذخیره شده در ذخیره سازها در شرایط پیشامد ترسیم شده است. در شرایط پیشامد به دلیل وقوع پیشامد واحد حرارتی نیروگاه مجازی با کمبود توان مواجه است ، بنابراین انرژی کمتری در ذخیره سازها ذخیره می شود. در این شرایط ذخیره سازها، تنها در ساعاتی که واحدهای تجدیدپذیر تولید دارند، انرژی ذخیره می کنند و در ساعت ۲۰ که اوج مصرف متقاضیان است انرژی ذخیره شده را تخلیه می کنند.



شکل ۴-۵۵- کل انرژی ذخیره شده در ذخیره سازها در شرایط پیشامد

در شکل (۴-۵۶) منحنی مصرف کل متقاضیان در شرایط پیشامد ترسیم شده است. سیستم مدیریت انرژی، مقدار بار تامین شده را در ساعاتی که قیمت انرژی بالا است، افزایش و در ساعاتی که قیمت انرژی پایین است افزایش می دهد. همان طور که در شکل مشخص است، مقدار مصرف کل متقاضیان در شرایط پیشامد در ساعاتی که واحد تجدیدپذیر تولید دارد، بیش تر از ساعات دیگر است. به دلیل این که در شرایط پیشامد سیستم مدیریت انرژی با وقوع پیشامد واحد تولیدی حرارتی با کمبود توان مواجه است و در صورتی که حداقل انرژی روزانه تامین نشود جریمه حاصل از آن مقدار سود را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد بنابراین، سیستم مدیریت انرژی در ساعاتی که واحد تجدیدپذیر تولید دارد و میزان کمبود توان کم تر از ساعات دیگر است، بار بیش تری را تامین می کند تا کاهش بار در ساعات دیگر جبران شود و حداقل انرژی روزانه تامین گردد.



شکل ۴-۵۶- منحنی مصرف کل متقاضیان در شرایط پیشامد

۴-۱۰- جمع‌بندی

در این فصل بهینه‌سازی مقاوم-تصادفی پیشنهادی بر روی یک شبکه نمونه ۵ باس اجرا شد و نتایج حاصل، تحلیل و ارزیابی گردید. برای اثبات کارآمد بودن روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های بزرگ‌تر، این روش بر روی یک شبکه ۲۴ باس اجرا شد و نتایج به‌دست آمده اثباتی بر عملکرد مناسب روش پیشنهادی بود.

در هر دو مطالعه موردی، در مرحله روز پیش‌رو با درنظر گرفتن وقوع پیشامد میزان خرید توان از بازار روز پیش‌رو نسبت به شرایط افزایش یافت. در شرایط پایه و پیشامد با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، سیستم مدیریت انرژی به گونه‌ای تصمیمات را اتخاذ نمود که مقدار بدترین سود کاهش یابد که این امر بسته به سناریوی دارای بدترین سود، در بعضی ساعات با افزایش و یا کاهش خرید و فروش در بازار روز پیش‌رو انجام شد. همچنین با درنظر گرفتن وقوع پیشامد سود موردانتظار و مقدار $CvaR$ کاهش یافت. افزایش ضریب ریسک‌گریزی موجب کاهش سود مورد انتظار و افزایش مقدار $CvaR$ گردید. با افزایش درجه مقاومت تصمیمات اتخاذشده محافظ-کارانه‌تر شد و در نتیجه سود موردانتظار کاهش یافت. وقوع پیشامد و تغییر ضریب ریسک‌گریزی در مطالعه موردی ۵ باس اثری بر وضعیت واحدهای حرارتی نداشت ولی در مطالعه موردی ۲۴ باس وضعیت واحدهای حرارتی تغییر یافت.

در مرحله زمان حقیقی، با وقوع پیشامد واحد حرارتی میزان خرید توان از شبکه اصلی افزایش و میزان مصرف متقاضیان کاهش یافت. در برخی ساعات به دلیل کمبود توان، مقداری از بار متقاضیان قطع شد. با افزایش ضریب‌ریسک‌گریزی تصمیمات به گونه‌ای اتخاذ شد که میزان قطع بار کاهش یابد.

وقوع پیشامد خطوط متصل به شبکه اصلی اثر مهمی بر مدیریت انرژی نیروگاه مجازی داشتند و با خروج این خطوط ظرفیت مبادله توان با شبکه اصلی کاهش یافت که این امر در برخی ساعات موجب کاهش مصرف متقاضیان و حتی قطع بار شد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

در این پایان‌نامه، مدیریت انرژی نیروگاه مجازی در بازارهای انرژی تحت شرایط پیشامد مطالعه و بررسی گردید.

در فصل دوم، سابقه موضوع مدیریت انرژی نیروگاه مجازی مورد بحث قرار گرفت. در ابتدا مفهوم نیروگاه مجازی، شبکه هوشمند و عدم قطعیت‌های موجود در مسئله نیروگاه مجازی تشریح شده‌اند، سپس اهمیت موضوع مدیریت انرژی و در نظر گرفتن شرایط پیشامد و کارهای انجام‌شده در این حوزه مورد بررسی قرار گرفت. در فصل سوم، در ابتدا الگوریتم مدیریت انرژی نیروگاه مجازی تشریح و بر اساس مدل مقاوم - تصادفی فرمول‌بندی شد. در این روش، عدم قطعیت‌های قیمت بازار و دسترس‌پذیری اجزای نیروگاه مجازی به صورت سناریو و تولید انرژی تجدیدپذیر به صورت بازه اطمینان در نظر گرفته شد.

در فصل چهارم، شبیه‌سازی مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی تحت شرایط پایه و پیشامد انجام شد و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت.

۵-۲- نتیجه‌ها

نتیجه‌های اصلی به دست آمده از این پایان‌نامه را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

- وقوع پیشامد می‌تواند بر روی مقدار توان پیشنهادی در بازارهای انرژی و سود نیروگاه مجازی اثرگذار باشد و موجب انحراف منحنی توان-قیمت به سمت راست شود. وقوع پیشامد هر المان و زمان آن تاثیر متفاوتی بر روی تصمیمات سیستم مدیریت انرژی و سود نیروگاه مجازی دارد. وقوع پیشامد مقدار سود موردانتظار نیروگاه مجازی را نسبت به شرایط پایه کاهش می‌دهد.
- با در نظر گرفتن پیشامد خروج واحد حرارتی، مقدار خرید توان از شبکه اصلی افزایش می‌یابد. ولی پیشامد خروج خطوط می‌تواند اثرات مختلفی داشته باشد. پیشامد خروج خطوط متصل به شبکه

اصلی موجب کاهش ظرفیت مبادله توان با شبکه اصلی می‌شود، در نتیجه مقدار سود مورد انتظار نیروگاه مجازی کاهش می‌یابد.

- پیشامدهای برخی خطوط باعث عدم استفاده از کل توان در دسترس واحدهای تجدیدپذیر می‌شوند که این امر مقدار سود مورد انتظار نیروگاه مجازی را کاهش می‌دهد.
- با افزایش ضریب ریسک‌گریزی پیشنهاددهی توان در بازار روز پیش‌رو محافظکارانه‌تر می‌شود. سیستم مدیریت انرژی نیروگاه مجازی این کار را در برخی ساعات با افزایش/کاهش در خرید/فروش توان در بازار روز پیش‌رو انجام می‌دهد.
- تغییر ضریب ریسک‌گریزی مقادیر سود مورد انتظار را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، سود مورد انتظار می‌یابد، هم‌چنین افزایش ضریب ریسک‌گریزی در شرایط پیشامد مقدار قطع بار و انرژی تامین نشده روزانه را کاهش می‌دهد.
- در ضرایب ریسک‌گریزی کم، در نظر گرفتن وقوع پیشامد اثر کمی بر پیشنهاددهی قیمت-توان بازار روز پیش‌رو دارد ولی با افزایش ضریب ریسک‌گریزی اثر در نظر گرفتن وقوع پیشامد افزایش می‌یابد.
- تغییر درجه مقاومت مقادیر سود مورد انتظار و سود مورد انتظار را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. با افزایش درجه مقاومت، مقدار سود مورد انتظار کاهش می‌یابد.
- افزایش درجه مقاومت بر روی مقدار توان پیشنهادی در بازارهای انرژی و سود نیروگاه مجازی اثرگذار است و موجب انحراف منحنی قیمت-توان به سمت راست می‌شود.
- در نظر گرفتن وقوع پیشامد بر وضعیت واحدهای تولید حرارتی اثر دارد و باعث می‌شود سیستم مدیریت انرژی به گونه‌ای تصمیم‌سازی کند که واحدهای تولید حرارتی بیش‌تری برای روز بعد روشن باشند.
- تغییر ضریب ریسک‌گریزی وضعیت واحدهای تولید حرارتی را تغییر می‌دهد. افزایش ضریب ریسک-گریزی باعث می‌شود که سیستم مدیریت انرژی به گونه‌ای تصمیم‌سازی کند که واحدهای تولید حرارتی در ساعات بیش‌تری برای روز بعد روشن باشند.

۵-۳- پیشنهادها

- به منظور کاهش بار محاسباتی می‌توان عدم قطعیت قیمت بازارها را به کمک روش پیش‌بینی بازه‌ای مدل‌سازی نمود.
- در این تحقیق نیروگاه مجازی به صورت قیمت‌پذیر فرض شده است که دارای قدرت تاثیر بر قیمت بازار نیست. می‌توان نیروگاه مجازی را به صورت یک قیمت‌ساز در نظر گرفت.
- پیشامد بررسی شده در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده $n-1$ است. پیشامدهای $n-k$ را نیز می‌توان مورد بررسی قرار داد.
- در این تحقیق برای کاهش بار محاسباتی از روش پخش بار مستقیم استفاده شده است. می‌توان از روش پخش بار متناوب نیز استفاده نمود.

پیوست ۱

قیود مدل بهینه‌سازی قطعی مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی را می‌توان به صورت مسئله خطی زیر نوشت [۱۶]:

$$\min_{x_j, \forall j} \sum_{j=1}^n \{c_j\} x_j \quad \text{(پ-۱)}$$

مقید به:

$$\sum_{j=1}^n \{a_{ij}\} x_j \leq b_i \quad i = 1, \dots, m \quad \text{(پ-۲)}$$

$$\sum_{j=1}^n d_{kj} x_j = e_k \quad k = 1, \dots, p \quad \text{(پ-۳)}$$

$$\underline{x}_j \leq x_j \leq \bar{x}_j \quad j = 1, \dots, n \quad \text{(پ-۴)}$$

برای ساده‌سازی مسئله فرض شده است، عدم قطعیت فقط می‌تواند بر روی ضریب a_{ij} اثر گذارد. بنابراین، هیچ‌کدام از قیود تساوی دارای عدم قطعیت نیستند. در صورتی که ضریب b_i در قیود (پ-۲) عدم قطعیت داشته باشد، می‌توان متغیر جدید x_{n+1} را تعریف نمود و سپس قیود را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - \{b_i\} x_{n+1} \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \quad \text{(پ-۵)}$$

$$1 \leq x_{n+1} \leq 1 \quad \text{(پ-۶)}$$

پارامتر دارای عدم قطعیت در قیود، P_{ih}^R است (ضریب b_i). ضریب a_{ij} در قیود نامساوی، از مقدار نامی خود به اندازه $\hat{a}_{ij} \geq 0$ در بازه $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ می‌تواند منحرف شود. مجموعه $J_i, \forall i$ به عنوان مجموعه‌ی ضریب‌ها $\{a_{ij}\}$ با $\hat{a}_{ij} > 0, \forall i$ ، تعریف می‌شود.

با استفاده از تئوری بهینه‌سازی مقاوم که در مرجع [۳۱] ارائه شده است، مدل بهینه‌سازی مقاوم مسئله مدیریت انرژی نیروگاه مجازی به صورت ذیل نوشته می‌شود:

$$\min_{x_j, \forall j} \sum_{j=1}^n c_j x_j + \left\{ \sum_{j \in S_0} \hat{c}_j |x_j| + (\Gamma_0 - \lfloor \Gamma_0 \rfloor) \hat{c}_{t_0} |x_{t_0}| \right\} \quad (پ-۷)$$

مقید به:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + \left\{ \sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} |x_j| + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{a}_{it_i} |x_{t_i}| \right\} \leq b_i \quad \forall i \quad (پ-۸)$$

$$\sum_{j=1}^n d_{kj} x_j = e_k \quad \forall k \quad (پ-۹)$$

$$\underline{x}_j \leq x_j \leq \bar{x}_j \quad \forall j \quad (پ-۱۰)$$

پارامتر $\Gamma_i \geq 0, \forall i$ میزان مقاومت مدل بهینه‌سازی مقاوم در برابر مجموعه ضرایب دارای عدم قطعیت کنترل می‌نماید. مقدار این پارامتر می‌تواند در بازه‌های $[0, \lfloor \Gamma_i \rfloor], \forall i$ انتخاب شود.

پارامتر Γ_i میزان مقاومت قید i ام را در برابر عدم قطعیت تحمیل شده توسط یک زیرمجموعه از ضرایب دارای عدم قطعیت آن تنظیم می‌نماید. در این راستا، هر قید i ام در برابر تمام انحرافات احتمالی محافظت می‌شود. ضرایب این قیود می‌توانند تا تعداد Γ_i ضریب دارای عدم قطعیت با بازه متفاوت در نظر گرفته شوند. ضریب دارای عدم قطعیت $\{a_{ij}\}$ می‌تواند در بازه $(\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \cdot \hat{a}_{ij}$ تغییر نماید.

عملگر قدرمطلق $|x_j|$ موجب غیرخطی شدن مدل بهینه‌سازی مقاوم مذکور شده است. به منظور خطی‌سازی مدل، هر کدام از این عملگرهای $|x_j|$ ، با متغیر کمکی y_j جایگزین می‌شود و دو قید $-y_j \leq x_j \leq y_j$ و $y_j \geq$

0 نیز به قیود مدل بهینه‌سازی مقاوم اضافه می‌گردند. با استفاده از تئوری دوگان قوی^۱، مدل غیرخطی ارائه‌شده در بالا را می‌توان به صورت مسئله خطی زیر بازنویسی نمود [۳۱]:

$$\min_{\Phi \cup \Phi^R} \sum_{j=1}^n c_j x_j + \Gamma_0 v_0 + \sum_{j \in J_0} \eta_{0j} \quad (\text{پ-۱۱})$$

مقید به:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + \Gamma_i v_i + \sum_{j \in J_i} \eta_{ij} \leq b_i \quad \forall i \quad (\text{پ-۱۲})$$

$$v_i + \eta_{ij} \geq \hat{a}_{ij} y_j \quad \forall i, j \in J_i \quad (\text{پ-۱۳})$$

$$-y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \quad (\text{پ-۱۴})$$

$$v_i \geq 0 \quad \forall i \quad (\text{پ-۱۵})$$

$$\eta_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in J_i \quad (\text{پ-۱۶})$$

$$y_j \geq 0 \quad \forall j \quad (\text{پ-۱۷})$$

$$\sum_{j=1}^n d_{kj} x_j = e_k \quad \forall k \quad (\text{پ-۱۸})$$

$$\underline{x}_j \leq x_j \leq \bar{x}_j \quad \forall j \quad (\text{پ-۱۹})$$

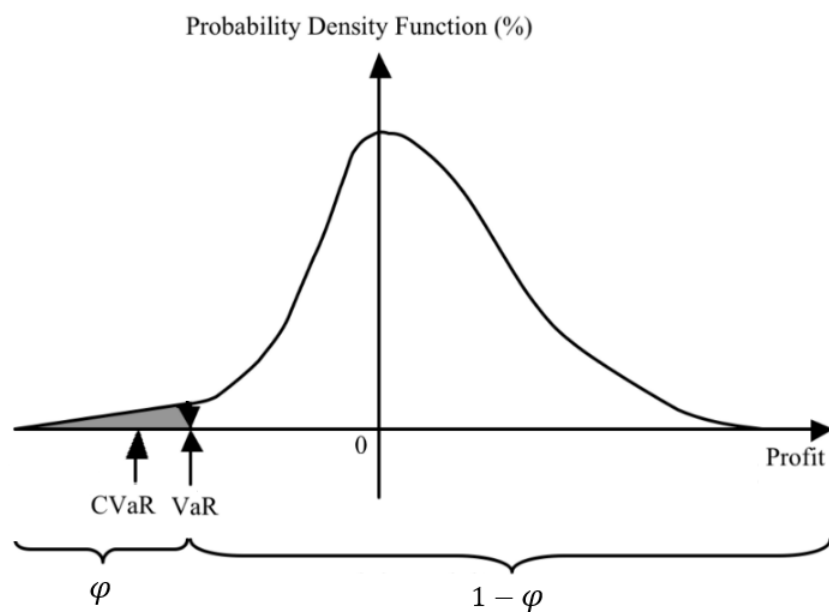
متغیرهای دوگان v_i و η_{ij} نیز مربوط به ضرایب دارای عدم قطعیت هستند.

¹ Strong Duality

پیوست ۲

دو معیار ارزش در معرض خطر (Var)^۱ و ارزش شرطی در معرض خطر ($CVaR$) به طور گسترده برای تعیین کمیت خطر مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای سطح اطمینان $0 \leq \varphi < 1$ ، مقدار $Var_{1-\varphi}$ به صورت بیش‌ترین سود در بین بدترین سودها تعریف می‌شود. $CVaR$ مقدار سود موردانتظار سودهای کم‌تر از Var می‌باشد. در تابع هدف $\beta \in [0, \infty)$ در $CVaR$ ضرب می‌شود تا میزان ریسک کنترل شود و تعادل بین سود موردانتظار و شاخص ریسک برقرار گردد. در صورتی که $\beta = 0$ ریسک در نظر گرفته نمی‌شود. با افزایش ضریب β تاثیر شاخص ریسک $CVaR$ در تابع هدف افزایش می‌یابد، به طوری که مقدار بدترین سودها اهمیت بیش‌تری می‌یابند [۳۸].

در شکل (پ-۱) تابع چگالی احتمال سود ترسیم شده است و مقادیر Var و $CVaR$ در مشخص شده‌اند.



شکل پ-۱-۲ - تابع چگالی احتمال سود

¹ Value at Risk

مراجع

- [1] Yin. S, Ai. Q, Li. Z, (2020), "Energy management for aggregate prosumers in a virtual power plant: A robust Stackelberg game approach," , Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst., vol. 117, 105605.
- [2] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, (2011), "Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets—Part I: Problem formulation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, pp. 949-956, no. 2.
- [3] Liang. Z, Alsafasfeh. Q, Jin, (2019), "Risk-constrained optimal energy management for virtual powerplants considering correlated demand response", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 2, pp. 1577-1587.
- [4] Nosratabadi. S, M. Hooshmand, R. A and Gholipour. E, (2016), "Stochastic profit-based scheduling of industrial virtual powerplant using the best demand response strategy", Applied energy, vol. 164, no. 2, pp. 590-606.
- [5] J. M. Morales, A. J. Conejo, H. Madsen, P. Pinson, and M. Zugno, (2013), "Integrating renewables in electricity markets: operational problems", Springer Science & Business Media vol. 205.
- [6] Hooshmand. R, A. Nosratabadi, S. M and Gholipour. E, (2018), "Event-based scheduling of industrial technical virtual power plant considering wind and market prices stochastic behaviors-A case study in Iran", Journal of Cleaner Production, vol. 172, no. 2, pp. 1748-1764.
- [7] J. Aghaei and M.-I. Alizadeh, (2013), "Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 18, pp. 64-72.
- [8] U. DoE, (2006), "Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them. A report to the United States Congress pursuant to section 1252 of the Energy Policy Act of 2005".
- [9] E. G. Kardakos, C. K. Simoglou and A. G. Bakirtzis, (2016), "Optimal Offering Strategy of a Virtual Power Plant: A Stochastic Bi-Level Approach", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 2, pp. 794-806.
- [10] Ju. L, Tan. Z, Yuan. J, Tan. Q, Li. H and Dong. F, (2016), "A bi-level stochastic scheduling optimization model for a virtual power plant connected to a wind–photovoltaic–energy storage system considering the uncertainty and demand response", Applied energy, vol. 171, pp. 184-199.
- [11] I. Atzeni, L. G. Ordóñez, G. Scutari, D. P. Palomar and J. R. Fonollosa, (2013), "Demand-Side Management via Distributed Energy Generation and Storage Optimization", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 2, pp. 866-876.
- [12] Zheming Liang and Yuanxiong Guo, (2016), "Robust optimization based bidding strategy for virtual power plants in electricity markets", IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1-5, USA, Boston.
- [13] Shabanzadeh, M., Sheikh-El-Eslami, M. K and Haghifam, M. R, (2015), "The design of a risk-hedging tool for virtual power plants via robust optimization approach", Applied Energy, vol. 155, pp. 766-777.

[۱۴] کعبه، س، (۱۳۹۴)، پایان‌نامه ارشد، "مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن پیشامدهای ریزشکبه"، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی شاهرود.

- [15] A. Baringo and L. Baringo, (2017), "A Stochastic Adaptive Robust Optimization Approach for the Offering Strategy of a Virtual Power Plant", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 5, pp. 3492-3504.
- [16] M. Rahimiyan and L. Baringo, (2016), "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, vol. 31, no. 4, pp. 2676-2687.
- [17] M. Rahimiyan and L. Baringo, (2019), "Real-time energy management of a smart virtual power plant", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 13, no. 11, pp. 2015-2023.
- [18] S. R. Dabbagh and M. K. Sheikh-El-Eslami, (2016), "Risk Assessment of Virtual Power Plants Offering in Energy and Reserve Markets", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 5, pp. 3572-3582.
- [19] A. Baringo, L. Baringo and J. M. Arroyo, (2019), "Day-Ahead Self-Scheduling of a Virtual Power Plant in Energy and Reserve Electricity Markets Under Uncertainty", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 3, pp. 1881-1894.
- [20] G. Zhang, C. Jiang, X. Wang, B. Li and H. Zhu, (2017), "Bidding strategy analysis of virtual power plant considering demand response and uncertainty of renewable energy", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 13, pp. 3268-3277.
- [21] Vahedipour-Dahraie. M, Rashidizadeh-Kermani, H. Anvari-Moghaddam, A and Siano. P, (2020), "Risk-averse probabilistic framework for scheduling of virtual power plants considering demand response and uncertainties", Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst, vol. 121.
- [۲۲] کولیوند، م، (۱۳۹۶)، پایان نامه ارشد، "مدیریت انرژی هوشمند نیروگاه مجازی با در نظر گرفتن رزرو چرخان"، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [23] H. T. Nguyen, L. B. Le and Z. Wang, (2018), "A Bidding Strategy for Virtual Power Plants With the Intraday Demand Response Exchange Market Using the Stochastic Programming", IEEE Trans Indus Appl, vol. 54, no. 4, pp. 3044-3055.
- [24] A. Jamali et al., (2020), "Self-Scheduling Approach to Coordinating Wind Power Producers With Energy Storage and Demand Response", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 11, no. 3, pp. 1210-1219.
- [25] J. Qiu, K. Meng, Y. Zheng and Z. Y. Dong, (2017), "Optimal scheduling of distributed energy resources as a virtual power plant in a transactive energy framework", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 13, pp. 3417-3427.
- [26] Q. Zhao, Y. Shen and M. Li, (2016), "Control and Bidding Strategy for Virtual Power Plants With Renewable Generation and Inelastic Demand in Electricity Markets", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 2, pp. 562-575.
- [27] Liu. Y, Li. M, Lian, H., Tang, X., Liu, (2018), "Optimal dispatch of virtual power plant using interval and deterministic combined optimization", Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst, vol. 102, pp. 235-244.
- [28] Tan. Z, Wang. G, Ju. L, Tan. Q and Yang. W, (2017), "Application of CVaR risk aversion approach in the dynamical scheduling optimization model for virtual power plant connected with wind-photovoltaic-energy storage system with uncertainties and demand response", Energy, vol. 124, pp. 198-213.

- [29] Bouffard, F., Galiana, F. D., & Conejo, A. J, (2005), “ *Market-clearing with stochastic security-part I: formulation* ” , IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 4, pp. 1818-1826.
- [30] D. Bertsimas and M. Sim, (2003), “*Robust discrete optimization and network flows*” , Math. Program., ser. B, vol. 98, no. 13, p. 4971.
- [31] D. Bertsimas and M. Sim, (2004), “*The price of robustness*” , Oper. Res., vol. 52, pp. 35–53.
- [32] "ISO New England, US. [Online]. Available: www.iso-ne.com.
- [33] "Harvard Green Campus Initiative, US. [Online]. Available: www.sunviewer.net/portals/Harvard.
- [34] Heitsch, H and Römisch, W, (2003), “*Scenario reduction algorithms in stochastic programming. Computational optimization and applications*” , IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, pp. 187-206.
- [35] M. Rahimiyan, L. Baringo and A. J. Conejo, (2014), “*Energy Management of a Cluster of Interconnected Price-Responsive Demands*” , IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, no. 2, pp. 645-655.
- [36] C . Grigg et al., (1999), “*The IEEE Reliability Test System-1996. A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee*” , IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 3, pp. 1010-1020.
- [37] www.statista.com.
- [38] J. M. Morales, A. J. Conejo, and J. Pérez-Ruiz, (2010), “*Short-term trading for a wind power producer*” , Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 25, pp. 554-564.

Abstract

In this thesis, the energy management problem of a virtual power plant in energy markets considering contingency conditions is formulated as a stochastic robust optimization model. The virtual power plant includes thermal and renewable generating units, energy storage units and price-responsive demands interconnected through an electric network. Additionally, the smart grid technology provides a bi-directional communication infrastructure by which the energy management system receives required information near real-time, and sends decisions to the day-ahead and real-time energy markets, as well as to the components in the virtual power plant. To tackle uncertainties, a combination of scenarios and prediction intervals is used. This way, the uncertainties in the availability of the components in the virtual power plant and the market prices are presented by scenarios, while the renewable power production is modeled by prediction intervals. The proposed approach is implemented in 5-bus and 24-bus test systems. The results verify the applicability of the decisions considering contingency conditions.

Keywords:

Energy Management, Virtual Power Plant, Stochastic Robust Optimization, Contingency.



*Shahrood University of
Technology*

Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

*Energy Management of a Virtual Power Plant in
Energy Markets Considering Contingency
Conditions*

By:

Elahe Ghanaee

Supervisor:

Dr. Morteza Rahimiyan

By:

October 2020