

جنت الفردوس



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

بهره‌برداری بازارهای انرژی و رزرو توأم با در نظر گرفتن

تولید توان بادی همبسته

نگارنده : امین عابدی

استاد راهنما :

دکتر مرتضی رحیمیان

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۱۵۰۳، ۰۶۰۷
تاریخ: ۹۲، ۲، ۱۳

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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 امین عابدی با شماره دانشجویی ۹۳۱۱۵۰۴ رشته مهندسی قدرت گرایش سیستم نحت عنوان: بهره برداری بازارهای انرژی و رزرو توان با در نظر گرفتن تولید توان بادی همیشه که در تاریخ ۱۳۹۶/۰۶/۱۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردیده شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱/۸) درجه ختمی خرمی ☒ ☐ مردود ☐			
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 امیر حسینی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حسن ایللی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر حسین علی زاده نژاد	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

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

تعهدنامه

اینجانب امین عابدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق قدرت-گرایش سیستم‌های قدرت- دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بهره‌برداری بازارهای انرژی و رزرو توان با در نظر گرفتن تولید توان بادی همبسته تحت راهنمایی دکتر مرتضی رحیمیان متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده:

با افزایش نفوذ تولیدات تصادفی (مانند تولید بادی)، حفظ امنیت سیستم قدرت مسئله‌ای چالش برانگیز است. در عمل، بهره‌بردار بازار با برنامه‌ریزی و بکارگیری ظرفیت رزرو امنیت سیستم را حفظ می‌کند. با توجه به همبستگی معنادار تولید مزارع بادی نزدیک بهم، بررسی چگونگی اثرگذاری این همبستگی بر خروجی‌های بازارهای انرژی و رزرو ضروری است. برای این منظور در این پایان‌نامه با استفاده از اطلاعات واقعی سرعت و تولید بادی، سناریوهای همبسته توان بادی تولید می‌شوند. این سناریوها به‌عنوان ورودی مدل تسویه بازار انرژی و رزرو توأم در نظر گرفته می‌شوند. مسئله تسویه بازار انرژی و رزرو به‌صورت یک مدل تصادفی دو مرحله‌ای فرمول‌بندی می‌شود که در آن انرژی و رزرو به‌طور همزمان تسویه می‌شود. در این مدل، قیود فنی و اقتصادی واحدهای تولیدی، قیود بین‌زمانی واحدهای تولیدی و محدودیت شبکه در نظر گرفته می‌شود. شبیه‌سازی در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن همبستگی بر روی سیستم‌های ۶ باسه و ۱۱۸ باسه اجرا می‌شود. با مقایسه نتایج به‌دست آمده از تسویه بازار، تأثیر همبستگی بر دیسپچ انرژی و رزرو، هزینه بازار روز قبل، متوسط هزینه بهره‌برداری زمان-حقیقی و هزینه کل بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند در نظر گرفتن همبستگی، رزرو مورد نیاز در سیستم را افزایش می‌دهد.

کلیدواژه: تولید بادی، همبستگی زمانی-مکانی، برنامه‌ریزی تصادفی، تسویه بازار انرژی و رزرو،

امنیت

مقاله مستخرج

امین عابدی، مرتضی رحیمیان، بهره‌برداری بازارهای انرژی و رزرو توأم با حضور تولید توان بادی
همبسته، سی و دومین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC)، تهران، ۱۳۹۶.

فهرست مطالب

فصل اول..... ۱

۱-۱ انگیزه تحقیق ۲

۲-۱ هدف تحقیق ۳

۳-۱ مروری بر فصل های پایان نامه ۴

فصل دوم ۵

۱-۲ مقدمه ۶

۲-۲ تولید بادی: عدم قطعیت و مشکلات بهره برداری ۶

۳-۲ موضوعات کلی در مدل سازی انرژی و رزرو ۷

۱-۳-۲ مدل سازی رزرو ۷

۲-۳-۲ تعیین رزرو مورد نیاز ۹

۳-۳-۲ منحنی قیمت پیشنهادی رزرو ۱۰

۴-۳-۲ رزرو بکارگرفته شده ۱۱

۵-۳-۲ قیود فنی ۱۱

۴-۲ مدل سازی بازارهای انرژی و رزرو ۱۲

۱-۴-۲ دیسپیچ ترتیبی در مقایسه با دیسپیچ توأم ۱۵

۵-۲ تسویه توأم بازارهای انرژی و رزرو ۱۶

۶-۲ تأثیر همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی بر تسویه بازار الکتریسیته ۱۹

۷-۲ جمع بندی و نتیجه گیری ۱۹

فصل سوم ۲۱

۱-۳ مقدمه ۲۲

۲-۳ مدل سازی عدم قطعیت ۲۲

۱-۲-۳ پیش بینی تولید بادی ۲۳

۲-۲-۳ تولید سناریو با در نظر گرفتن همبستگی زمانی-مکانی ۲۴

۳-۳ مدل سازی بازارهای انرژی و رزرو توأم ۲۵

۱-۳-۳ تشریح مسئله ۲۵

۲-۳-۳ فرضیات ۲۶

۴-۳ فرمول بندی بازارهای انرژی و رزرو توأم ۲۷

۱-۴-۳ فهرست علائم و اختصارات ۲۷

۲-۴-۳ فرمول بندی ۳۰

۲-۲-۴-۳ قیود بازارهای انرژی و رزرو ۳۱

۳-۲-۴-۳ قیود بهره برداری زمان-حقیقی ۳۳

۴-۲-۴-۳ قیود پیوندی ۳۶

۵-۳ جمع بندی و نتیجه گیری ۳۷

فصل چهارم ۳۹

۱-۴ مقدمه ۴۰

۲-۴ تولید سناریوهای همبسته توان بادی ۴۱

۱-۲-۴ اعتبارسنجی روش تولید سناریو ۴۵

۴-۳	فرمول بندی مجدد مدل تسویه بازار	۴۶
۴-۴	مطالعه موردی اول: سیستم ۶ باسه	۵۰
۴-۴-۱	اطلاعات سیستم ۶ باسه	۵۱
۴-۴-۲	تأثیر همبستگی بر بهره برداری بازار: سیستم ۶ باسه	۵۴
۴-۴-۳	تأثیر سطح نفوذ تولید بادی بر بهره برداری بازار: سیستم ۶ باسه	۵۹
۴-۴-۴	تأثیر محدودیت شبکه بر بهره برداری بازار: سیستم ۶ باسه	۶۱
۴-۴-۵	زمان محاسبات	۶۲
۴-۵	مطالعه موردی دوم: سیستم ۱۱۸ باسه	۶۳
۴-۵-۱	کاهش سناریوهای همبسته توان بادی	۶۴
۴-۵-۲	تأثیر همبستگی بر بهره برداری بازار: سیستم ۱۱۸ باسه	۶۴
۴-۵-۳	تأثیر سطح نفوذ بادی بر بهره برداری بازار: سیستم ۱۱۸ باسه	۶۵
۴-۵-۴	تأثیر محدودیت شبکه بر بهره برداری بازار: سیستم ۱۱۸ باسه	۶۶
۴-۶	جمع بندی و نتیجه گیری	۶۷
۷۱	فصل پنجم	
۵-۱	مقدمه	۷۲
۵-۲	نتایج	۷۳
۵-۳	پیشنهادها	۷۴
۷۷	مراجع	

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: منحنی های قیمت پیشنهادی انرژی و رزرو [۳۶] ۱۰
- شکل ۱-۴: ضرایب همبستگی مکانی بین دو مزرعه بادی ۴۲
- شکل ۱-۴: تولید بادی واقعی و پیش بینی شده مزرعه ۱ ۴۲
- شکل ۳-۴: تولید بادی واقعی و پیش بینی شده مزرعه ۲ ۴۳
- شکل ۴-۴: تابع خودهمبستگی خطای تولید بادی الف) مزرعه ۱ ب) مزرعه ۲ ۴۳
- شکل ۵-۴: تابع خودهمبستگی جزئی خطای تولید بادی الف) مزرعه ۱ ب) مزرعه ۲ ۴۳
- شکل ۶-۴: توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای مدل سازی مزرعه ۱ ۴۴
- شکل ۸-۴: توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای مدل سازی مزرعه ۲ ۴۵
- شکل ۸-۴: ۵۰ سناریو تولید بادی و متوسط آن برای مزرعه ۱ ۴۶
- شکل ۹-۴: ۵۰ سناریو تولید بادی و متوسط آن برای مزرعه ۲ ۴۶
- شکل ۱۰-۴: دیاگرام تک خطی سیستم ۶ باسه ۵۲
- شکل ۱۱-۴: الگوی بار روزانه سیستم ۶ باسه ۵۳
- شکل ۱۲-۴: تأثیر همبستگی تولید بادی بر انحراف معیار اختلاف تولید بادی واقعی و پیش بینی شده: سیستم ۶ باسه ۵۷
- شکل ۱۳-۴: متوسط هزینه کل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن همبستگی تولید توان بادی برای سه سطح نفوذ مختلف ۵۹
- شکل ۱۴-۴: تأثیر سطح نفوذ بادی بر مقدار رزرو برنامه ریزی شده در دو حالت با و بدون در نظر .. ۶۱

فهرست جدول‌ها

- جدول ۴-۱: اطلاعات جغرافیایی دو مزرعه بادی انتخاب شده ۴۱
- جدول ۴-۲: اطلاعات خطوط سیستم ۶ باسه ۵۱
- جدول ۴-۳: اطلاعات واحدهای تولیدی سیستم ۶ باسه ۵۱
- جدول ۴-۴: بار کل سیستم ۶ باسه و تولید بادی پیش بینی شده مزارع ۱ و ۲ برای ۲۴ ساعت روز
مورد مطالعه ۵۲
- جدول ۴-۵: بلوک های انرژی و قیمت پیشنهادی هر مگاوات انرژی و رزرو چرخان واحدهای تولیدی
..... ۵۳
- جدول ۴-۶: تأثیر همبستگی بر میزان رزرو برنامه ریزی شده سیستم ۶ باسه ۵۴
- جدول ۴-۷: تأثیر همبستگی بر هزینه های سیستم ۶ باسه ۵۶
- جدول ۴-۸: تفکیک هزینه های سیستم ۶ باسه و درصد هر کدام نسبت به هزینه کل ۵۶
- جدول ۴-۹: مقادیر برنامه ریزی حاصل از تسویه سیستم ۶ باسه با در نظر گرفتن همبستگی: دیسپچ
انرژی و رزرو چرخان برای ساعات پیک (مقادیر بر حسب MWh) ۵۸
- جدول ۴-۱۰: تفکیک هزینه انرژی و رزرو در مرحله بازار برای سیستم ۶ باسه ۶۱
- جدول ۴-۱۱: هزینه بارزدایی در اثر تراکم خطوط در سیستم ۶ باسه برای سطوح نفوذ مختلف
بادی (مقادیر به مگاوات) ۶۲
- جدول ۴-۱۲: تأثیر همبستگی بر میزان رزرو برنامه ریزی شده سیستم ۱۱۸ باسه ۶۵
- جدول ۴-۱۳: تأثیر همبستگی بر هزینه های سیستم ۱۱۸ باسه ۶۵
- جدول ۴-۱۴: مقدار رزرو برنامه ریزی شده در سیستم ۱۱۸ باسه برای دو سطح نفوذ بادی (مقادیر به
مگاوات) ۶۶
- جدول ۴-۱۵: هزینه کل بهره برداری سیستم ۱۱۸ باسه برای دو سطح نفوذ بادی ۶۶

جدول ۴-۱۶: تأثیر محدودیت خطوط مرزی سیستم ۱۱۸ باسه بر بهره برداری بازار ۶۷

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱ انگیزه تحقیق

در سال‌های اخیر هم‌زمان با تجدید ساختار سیستم قدرت، میزان مشارکت منابع تولید پراکنده در تولید انرژی الکتریکی افزایش یافته است. تغییرات قیمت حامل‌های انرژی، مشکلات زیست‌محیطی و دلایل اقتصادی و فنی موجب توسعه نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی‌های بادی و خورشیدی در سیستم قدرت شده است. در این میان انرژی باد با توجه به قابلیت تولید در ظرفیت بالا بیش‌ترین سهم را به خود اختصاص داده است؛ به‌طوری که تا نیمه اول سال ۲۰۱۶ ظرفیت تولید بادی نصب شده در سراسر جهان به مقدار ۴۵۶ گیگاوات رسیده که قادر است حدود ۴/۷٪ از تقاضای الکتریسیته در جهان را تأمین کند [۱]. بنابراین در نظر گرفتن تولید بادی در مطالعه، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم قدرت ضروری به نظر می‌رسد.

ماهیت متغیر سرعت باد منجر به عدم قطعیت در تولید توان بادی می‌شود. در سیستم قدرت با سطح نفوذ بالای تولید بادی، عدم قطعیت باعث ایجاد انحراف تولید توان بادی از مقدار واقعی و در نتیجه نیاز به اصلاح مقادیر تسویه شده بازار در بهره‌برداری زمان حقیقی می‌شود. در این شرایط بهره‌بردار بازار سعی می‌کند با برنامه‌ریزی و بکارگیری ظرفیت رزرو^۱ در سیستم، این عدم قطعیت را پوشش دهد.

مدل‌سازی دقیق رفتار تصادفی تولید بادی برای ارزیابی واقع‌بینانه سطح رزرو مورد نیاز و هزینه‌های مربوط به آن لازم است. قبل از حل هر گونه مسئله تصمیم‌گیری عدم قطعیت‌های اطلاعات ورودی باید شناسایی و مدل‌سازی شوند. در چهارچوب برنامه‌ریزی تصادفی^۲، مدل‌سازی فرآیندهای تصادفی به مجموعه‌ای از سناریوها نیاز دارد که هر اتفاق احتمالی که ممکن است برای فرآیند تصادفی در طول دوره مورد مطالعه رخ دهد را در نظر بگیرد.

¹ Capacity Reserve

² Stochastic programming

از طرفی رفتار تولید بادی از جنبه‌های زمانی و مکانی پیچیده است. مطالعات میدانی گواه آن است که تولید توان در یک مزرعه بادی، همبستگی معناداری به تولید ساعت‌های قبل خودش (همبستگی زمانی^۱) و تولید مزارع دیگر (همبستگی مکانی^۲) دارد. اگر همبستگی تولید توان بادی مزارع مثبت باشد، تغییرات تولید توان بادی در اکثر ساعات هم‌جهت است و در نتیجه تغییرات کل تولید توان مزارع بادی بیش‌تر می‌شود که این مسئله عدم قطعیت موجود در سیستم را افزایش می‌دهد. بنابراین در نظر گرفتن این همبستگی مکانی-زمانی دیسپچ انرژی و رزرو را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در ساختارهای فعلی انرژی و رزرو می‌توانند جداگانه و یا همزمان خرید و فروش شوند. در ساختار اول، معاملات انرژی و رزرو از یکدیگر جدا و مستقل انجام می‌شود و عموماً پس از یکدیگر برگزار می‌شوند. به دلیل شرکت آزاد رقبا در هر بازار برای هر یک از خدمات، شرکت‌کنندگان تحریک می‌شوند تا برای منفعت‌جویی بیش‌تر از یک بازار به بازار دیگر جابجا شوند. مزیت احتمالی این‌گونه مزایده این است که شرکت داوطلبانه فروشندگان در بازار می‌تواند سبب کارآمدی و پرهیز از ابزارهای پیچیده بهینه‌سازی شود. در مدل دوم، رزرو و انرژی به صورت همزمان از طریق یک بازار یکپارچه معامله می‌شوند. مزیت این بازار متمرکز بهره‌برداری مطمئن‌تر و اقتصادی‌تر بازار است.

۲-۱ هدف تحقیق

هدف این پایان‌نامه ارائه تحلیل جامع در زمینه آثار همبستگی زمانی-مکانی مزارع بادی بر دیسپچ انرژی و رزرو و هزینه‌های مرتبط می‌باشد. برای این منظور با استفاده از اطلاعات واقعی سرعت و تولید بادی، همبستگی تولید توان بادی مزارع شناسایی می‌شود و با استفاده از مدلی کارآمد و به‌روز سناریوهای همبسته توان بادی تولید می‌شوند. سپس یک چارچوب مشخص از بهره‌برداری بازارهای انرژی و رزرو توأم بر اساس ساختارهای واقعی به صورت یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی فرمول‌بندی

¹ Temporal

² Spatio

می‌شود. در مدل‌سازی تسویه همزمان این دو بازار، ویژگی‌های فنی و اقتصادی مانند قیود بین زمانی^۱ واحدهای تولیدی قابل دیسپیچ و محدودیت شبکه در نظر گرفته می‌شود. سؤال اساسی این مطالعه چگونگی اثرگذاری همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی بر بهره‌برداری بازارهای انرژی و رزرو توأم می-باشد. همچنین در این پایان‌نامه تأثیر افزایش سطح نفوذ تولید بادی بر خروجی‌های بازار بررسی می-شود.

۳-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

در فصل دوم به بررسی سابقه موضوع بهره‌برداری بازار انرژی و رزرو پرداخته می‌شود. در این فصل، ابتدا عدم قطعیت تولید بادی و همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی معرفی می‌شود. موضوعات کلی در مدل‌سازی انرژی و رزرو و الگوهای مختلف برای تسویه آن‌ها معرفی می‌شود. سپس اهمیت در نظر گرفتن همبستگی زمانی-مکانی در بهره‌برداری بازار انرژی و رزرو مورد بحث قرار می‌گیرد. در فصل سوم، نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت و تولید سناریوهای همبسته توان بادی بیان می‌شود. سپس مدل بازار انرژی و رزرو توأم به صورت یک مدل تصادفی دوسطحی تشریح و فرمول‌بندی می‌شود که در آن رزرو بر اساس یک معیار احتمالی تعیین می‌شود. این مدل به طور خاص برای مقابله با عدم قطعیت تولید بادی طراحی می‌شود. در فصل چهارم، سناریوهای همبسته توان بادی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی تولید و تأثیر همبستگی زمانی-مکانی بر دیسپیچ انرژی و رزرو و هزینه‌های مرتبط از دیدگاه بهره‌بردار شبکه مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد. در فصل پنجم، به طور خلاصه، مروری بر کارهای انجام‌شده در این پایان‌نامه صورت می‌گیرد، نتایج جمع‌بندی می‌شوند و پیشنهادهایی برای ادامه تحقیق ارائه می‌گردد.

¹ Inter-temporal constraints

فصل دوم

تولید بادی و تأثیر آن بر بازارهای

انرژی و رزرو : مروری بر کارهای انجام شده

۲-۱ مقدمه

در این فصل عدم قطعیت تولید بادی، همبستگی مکانی-زمانی تولید بادی و روش تولید سناریو جهت مقابله با این عدم قطعیت معرفی می‌شوند. موضوعات کلی در مدل‌سازی انرژی و رزرو با مرور مقالات و گزارش‌های فنی بررسی می‌شوند. بازارهای انرژی و رزرو با سازوکارهای مختلف و الگوریتم‌های تسویه مورد استفاده برای آن‌ها معرفی می‌شوند. از بین این الگوریتم‌های تسویه، الگوریتم تسویه توأم انرژی و رزرو به عنوان روشی کارآمدتر معرفی شده و به تفصیل گزارشات منتشر شده در مورد تسویه بازار انرژی و رزرو توأم بررسی می‌گردند. در پایان با جمع‌بندی گزارشات منتشر شده، اهمیت در نظر گرفتن همبستگی تولید بادی بر تسویه بازار انرژی و رزرو توأم بیان می‌شود.

۲-۲ تولید بادی: عدم قطعیت و مشکلات بهره‌برداری

در سال‌های اخیر کاهش منابع سوخت فسیلی و همچنین افزایش قیمت این منابع، سیاست‌گذاران صنعت برق را به فکر استفاده از منابع تجدیدپذیر انداخته است. از طرف دیگر بحران‌های زیست-محیطی و محدودیت دولت‌ها برای انتشار گازهای گلخانه‌ای، تفکر استفاده از انرژی‌های نو را گسترش داده است. از میان منابع پاک جایگزین سوخت‌های فسیلی، انرژی باد بیش‌ترین پتانسیل برای تولید الکتریسیته را دارا می‌باشد. لذا کشورهای صنعتی به فکر گسترش تولید انرژی الکتریکی از طریق ایجاد مزارع بادی افتاده‌اند. یکی از مشکلات بهره‌برداری در هنگام استفاده از انرژی بادی، عدم قطعیت تولید بادی می‌باشد. در این شرایط لزوم اقدامات پیش‌گیرانه مانند برنامه‌ریزی و بکارگیری رزرو در سیستم قدرت بیش از پیش احساس می‌شود [۲]. بهبود روش‌های پیش‌بینی باد، مؤثرترین راه برای غلبه بر مشکلات ناشی از اتصال مزارع بادی به سیستم قدرت می‌باشد. اطلاعات بیش‌تر در مورد انواع روش‌های پیش‌بینی سرعت باد در [۳] آمده است.

از طرف دیگر رفتار تولید بادی از جنبه‌های زمانی و مکانی پیچیده است [۴]. تحلیل اطلاعات سری زمانی سرعت باد نشان می‌دهد سرعت باد مزرعه بادی در هر ساعت با سرعت باد همان مزرعه

در ساعات قبل همبسته می‌باشد. با توجه به اینکه تولید مزارع بادی با سرعت و جهت باد همبسته است، لذا می‌توان این همبستگی زمانی را بین تولید بادی در ساعات مختلف مشاهده کرد [۵]. از طرف دیگر تولید مزارع بادی که از لحاظ جغرافیایی نزدیک به هم هستند، در ساعات مختلف همبسته و در جهت مثبت می‌باشد؛ یعنی تغییرات تولید بادی مزارع نزدیک، هم‌جهت می‌باشد. به‌طور مثال در صورت کاهش تولید بادی یک مزرعه، به‌طور هم‌زمان یا با یک تأخیر زمانی تولید بادی در مزارع نزدیک به آن نیز کاهش می‌یابد. این همبستگی مکانی بین مزارع بادی نزدیک به هم باعث افزایش میزان تغییرات کل تولید توان مزارع بادی می‌شود [۵].

از آن‌جا که پیش‌بینی دقیق سرعت و تولید بادی امکان‌پذیر نیست، لذا در مدل‌سازی فرآیندهای تصادفی درگیر در تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی از تولید سناریو استفاده می‌شود. هدف تولید سناریو پوشش تمام سناریوهای احتمالی برای سرعت و تولید بادی با در نظر گرفتن اطلاعات گذشته می‌باشد. در زمینه بازار الکتریسیته تولید سناریو برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت انرژی، قیمت رزرو و تقاضا نیز استفاده شده است [۶].

۲-۳ موضوعات کلی در مدل‌سازی انرژی و رزرو

در این بخش موضوعات کلی که باید در مدل‌سازی انرژی و رزرو در نظر گرفته شود، بررسی می‌شود. لازم به ذکر است می‌توان برخی از این ویژگی‌ها را بر اساس هدف مطالعه (بازار روز قبل، بازار زمان حقیقی و تصمیمات سرمایه‌گذاری) نادیده گرفت. این ویژگی‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: مقدار و نوع رزرو مدل شده و قیود فنی.

۲-۳-۱ مدل‌سازی رزرو

ظرفیت رزرو یکی از سرویس‌های جانبی است که در بازار برای مقابله با تغییرات غیرقابل پیش‌بینی سیستم بکار گرفته می‌شود. رزروها مطابق استاندارد آمریکا به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

رزرو تنظیم^۱، رزرو بهره‌برداری^۲ (چرخان/غیرچرخان) و رزرو جایگزین^۳. رزرو تنظیم به‌طور مداوم تغییرات مکرر و سریع بار و تولید را که باعث عدم تعادل انرژی و نوسانات فرکانس می‌شود، پوشش می‌دهد. این رزرو توسط گاورنر خودکار توربین^۴ (AGT) و AGC^۵ کنترل شده و تقریباً باید به‌طور همزمان به نوسانات بار پاسخ دهد. رزرو چرخان و غیرچرخان و رزرو جایگزین در صورت رخداد یک پیشامد در سیستم، تعادل تولید و بار را باز می‌گردانند. رزرو چرخان تقریباً به‌طور همزمان با پیشامد عمل می‌کند، و باید در زمان ۱۰ دقیقه به‌طور کامل در دسترس باشد. رزرو غیرچرخان نیازی به واحدهای سنکرون با شبکه ندارد، اما راه‌اندازی این واحدها باید به‌اندازه کافی سریع باشد تا نهایتاً طی ۱۰ دقیقه به‌طور کامل در مدار باشند. رزرو جایگزین نیز نهایتاً باید طی حداکثر ۳۰ دقیقه فراهم شود.

[۷].

¹ Regulation Reserve

در حالتی که واحدها در مدار نباشند، می‌توان با در نظر گرفتن رزرو غیرچرخان، به مدل کامل‌تری از رزرو دست یافت. از آنجایی که رزرو چرخان به‌عنوان سرویس با کیفیت‌تری شناخته می‌شود، این رزرو هم‌چنین می‌تواند به‌عنوان رزرو غیرچرخان در بازار پیشنهاد شود [۲۳].

درنهایت مراجع [۲۴-۲۶] به‌عنوان کامل‌ترین دیدگاه، تمام انواع رزرو (رزرو چرخان/غیرچرخان/تنظیم) را در نظر می‌گیرند، که در این حالت قیود، متغیرها و پارامترهای اضافی مورد نیاز می‌باشد. در این دیدگاه پیچیدگی و ابعاد مدل به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۲-۳-۲ تعیین رزرو مورد نیاز

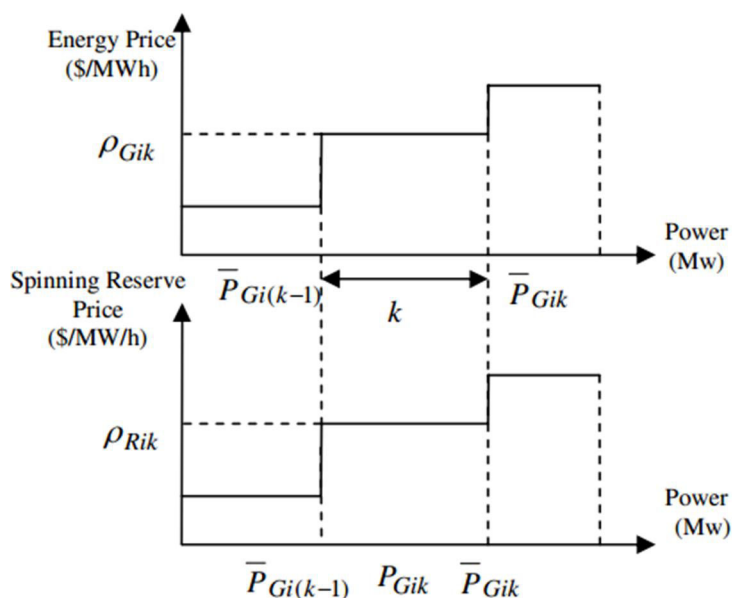
در بازارهای واقعی (مانند PJM، CAISO، NERC و MISO)، رزرو مورد نیاز معمولاً توسط بهره‌بردار مستقل سیستم^۱ (ISO) تعیین و با روش‌های گوناگونی مانند ظرفیت بزرگترین واحد تولیدی متصل به شبکه، اطلاعات گذشته، در نظر گرفتن ظرفیت منابع تولید تصادفی و وقوع پیشامدهای محتمل تعیین می‌شود. اگرچه این روش‌ها می‌توانند مستقیماً به مدل اعمال شوند، برخی اوقات روش‌های جایگزین پیشنهاد می‌شوند که راه‌های بهتری را برای برنامه‌ریزی رزرو جستجو می‌کنند. در برخی مراجع فرض می‌شود رزرو مورد نیاز الاستیک است و بسته به قیمت رزرو تغییر می‌کند [۲۰]. روش‌های دیگر با در نظر گرفتن رفاه اجتماعی و قابلیت اطمینان سیستم، رزرو مورد نیاز را به روش احتمالی محاسبه می‌کنند [۲، ۱۱، ۱۲، ۱۷، ۱۸، ۲۷-۳۱]. در این حالت، هزینه متوسط انرژی تأمین نشده به تابع هدف اضافه می‌شود که مستقیماً روی رزرو مورد نیاز تأثیر می‌گذارد. اطلاعات بیش‌تر درباره تأثیر هزینه انرژی تأمین نشده بر مقدار رزرو مورد نیاز در [۱۹، ۳۲] آمده است. هم‌چنین با افزایش سطح نفوذ تولید بادی معیارهای سنتی مانند معیار $n - 1$ یا ظرفیت بزرگترین واحد تولیدی در تعیین رزرو مورد نیاز ناکارآمد به نظر می‌رسند. [۱۲، ۱۹] به مقایسه معیار احتمالی و معیار قطعی

¹ Independent system operator

تعیین رزرو مورد نیاز برای سیستم قدرت متصل به تولیدات بادی پرداخته‌اند. نشان داده می‌شود معیار احتمالی در تعیین رزرو مورد نیاز اقتصادی تر عمل کرده، انحراف معیار هزینه بهره‌برداری کمتر و در نتیجه ریسک کمتری داشته و همچنین منجر به ریزش تولید بادی کمتر در سیستم می‌شود؛ در حالی که معیار قطعی دقت پیش‌بینی تولید بادی و احتمال وقوع پیشامدهای محتمل را در نظر نمی‌گیرد.

۳-۳-۲ منحنی قیمت پیشنهادی رزرو

از دیدگاه اقتصادی، قیمت پیشنهادی رزرو مانند منحنی قیمت پیشنهادی انرژی یک تابع پله‌ای صعودی می‌باشد (شکل ۱-۲). از نقطه نظر ریاضی این توابع به متغیرهای باینری برای مدل‌سازی نیاز دارند [۳۳، ۲۷]. تخمین‌های ساده‌تر قیمت پیشنهادی رزرو را ثابت [۲، ۱۱، ۱۶-۱۸، ۲۰، ۳۴]، خطی [۱۴، ۲۶] یا توابع درجه دو [۱۳، ۲۴، ۲۵] در نظر می‌گیرند که مدیریت مسائل با ابعاد بزرگ را ساده‌تر می‌کند. همچنین پیشنهادات تأمین رزرو سمت تقاضا در [۲، ۱۵، ۲۰، ۲۹، ۳۵] در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱-۲: منحنی‌های قیمت پیشنهادی انرژی و رزرو [۳۶]

۲-۳-۴ رزرو بکارگرفته شده^۱

از آن جا که پیشامدهای سیستم یا نوسانات بار به طور قطعی قابل پیش بینی نیست و وقوع آن ها از قبل مشخص نیست، رزروهای پیشنهادی لزوماً مورد استفاده قرار نمی گیرند. اگرچه هزینه پرداخت شده برای ظرفیت رزرو در زمان تسویه بازار و قبل از وقوع پیشامد تعیین می شود، اما از قبل مشخص نیست چه بخشی از این رزرو مورد استفاده قرار خواهد گرفت. اکثر کارهای تحقیقاتی فرض می کنند رزرو بکارگرفته شده از جنس انرژی است و هزینه پرداختی به آن مشابه هزینه پرداختی برای تولید انرژی می باشد.

۲-۳-۵ قیود فنی

جدا از قیود تعادل تولید و تقاضا و حداکثر و حداقل ظرفیت واحدهای تولیدی، قیود مرتبط دیگری مانند محدودیت های شبکه، مشارکت واحدها، قیود بین-زمانی^۲ واحدها و هماهنگی واحدهای برق آبی می توانند در مدل سازی انرژی و رزرو در نظر گرفته شوند. اگرچه بسته به هدف مطالعه برخی از این محدودیت ها می توانند ساده سازی شوند.

در [۱۵] مدل سیستم به صورت تک باسه در نظر گرفته شده است که از تلفات انتقال صرف نظر شده است. در سیستم های چندبازه اولین دیدگاه برای ساده سازی مدل شبکه صرف نظر کردن از برخی ویژگی های خطوط می باشد [۹]. دیدگاه دیگر برای مدل سازی شبکه های چندبازه نمایش شبکه انتقال با مدل DC می باشد، که فقط توان اکتیو عبوری را تعیین می کند [۱۱، ۱۸، ۳۰، ۳۷]. اگرچه در نمایش DC شبکه انتقال نیز می توان تلفات را در نظر گرفت، همان طور که در [۲، ۳۸] مدل سازی شده است. در نهایت جامع ترین دیدگاه، مدل سازی شبکه با مدل AC می باشد که توان اکتیو و راکتیو خطوط را در نظر می گیرد و امکان تنظیم ولتاژ را فراهم می آورند [۸، ۲۵، ۳۹، ۴۰].

¹ Deployed reserve

² Inter-temporal constraints

اگرچه مدل‌های AC به سیستم‌های واقعی نزدیک‌ترند، حل آن‌ها با وجود معادلات غیرخطی بسیار پیچیده است. به‌طور کلی مدل‌های DC در نظر گرفته شده نسبت به مدل‌های AC کاربردی‌تر هستند، در حالی که نتایج رضایت‌بخشی با معادلات ساده‌تر و بار محاسباتی کمتر فراهم می‌کنند [۴۱].

مراجع [۲، ۱۷، ۱۸، ۳۴، ۳۷، ۳۹] با حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها، وضعیت بهینه واحدهای تولیدی را از نظر روشن/خاموش بودن بررسی کرده‌اند. اگرچه در این حالت متغیرهای باینری برای تعیین وضعیت در مدار بودن واحدها لازم می‌باشد که زمان محاسبات را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در برخی مدل‌ها مانند [۱۱] از متغیر باینری صرف‌نظر کرده‌اند تا از پیچیدگی مدل کم کنند.

علاوه بر این از آن‌جایی که زمان پاسخ‌گویی به انحرافات انرژی، یک فاکتور اساسی در تأمین رزرو می‌باشد، در نظر گرفتن قیود زمانی ضروری و لازم به‌نظر می‌رسد. این قیود شامل نرخ افزایش/کاهش تولید واحدها و زمان لازم برای تأمین رزرو مورد نیاز می‌باشد. به‌طور مثال در مراجع [۱۳، ۱۴] این قیود زمانی در محیط بازار بررسی شده‌اند.

از طرف دیگر به‌دلیل توانایی واحدهای برق‌آبی در ذخیره انرژی و پاسخ سریع این واحدها، واحدهای برق‌آبی به‌وفور در بازارهای انرژی و رزرو بکار گرفته شده‌اند. مرجع [۴۲] بیان می‌کند که ۴۰٪ رزرو در سیستم قدرت اسپانیا در سال ۲۰۱۰ توسط واحدهای برق‌آبی تأمین شده است. مدیریت و هماهنگی واحدهای برق-آبی در تأمین رزرو با سایر واحدهای حرارتی لازم و ضروری به‌نظر می‌رسد [۴۳]. برنامه‌ریزی انرژی و رزرو برای یک نیروگاه برق‌آبی با مقایسه سود به‌دست آمده در بازار لحظه‌ای و بازار تنظیم در [۴۴] مطالعه شده است.

۴-۲ مدل‌سازی بازارهای انرژی و رزرو

در سرتاسر جهان بازارهای الکتریسیته با سازوکارهای مختلف مدیریت می‌شوند. در این بازارها

واحدهای تولیدی می‌توانند با پیشنهادات ساده (مجموعه‌ای از جفت‌های مقدار-قیمت در هر بازه زمانی) یا پیشنهادات پیچیده‌تر که در آن اطلاعات متنوعی مانند هزینه راه‌اندازی و خاموشی یا نرخ افزایش/کاهش تولید در نظر گرفته می‌شود، در بازار شرکت کنند. در حراج‌های ساده، پیشنهادات قیمت واحدهای تولیدی باید قیودی مانند هزینه‌های غیرخطی تولید و محدودیت‌های نرخ افزایش/کاهش تولید را در نظر بگیرد، در حالی که در حراج‌های پیچیده هر پیشنهاد قیمت به‌ازای هر ساعت مجموعه‌ای از قیود فنی و هزینه‌های تولیدی را با خود شامل می‌شود [۴۵].

در حراج‌های ساده، بهره‌بردار بازار^۱ (MO) به‌عنوان یک نهاد مستقل، مسئول حراج‌های اقتصادی سیستم می‌باشد. بنابراین بهره‌بردار بازار با بهره‌بردار سیستم که مسئول تأمین ایمن و قابل اطمینان برق مصرف‌کنندگان می‌باشد، باید هماهنگ باشد. در حراج‌های پیچیده، بهره‌بردار بازار و بهره‌بردار سیستم می‌توانند یک نهاد یکپارچه باشند (معمولاً به‌عنوان اپراتور مستقل بازار ISO شناخته می‌شود)، که بازار را بر اساس یک الگوریتم بهینه‌سازی برای به‌حداکثر رساندن رفاه اجتماعی خالص تسویه می‌کند [۴۵].

ماهیت چند بعدی مسئله (انرژی و رزروهای گوناگون) منجر به دیدگاه‌های مختلف برای تسویه بازار می‌شود. در [۲۱] چند دیدگاه ممکن تسویه انرژی و رزرو بررسی شده است: دیسپچ جداگانه مبتنی بر درجه شایستگی^۲، دیسپچ ترتیبی^۳ و دیسپچ توأم^۴ (که به‌عنوان بهینه‌سازی مشترک انرژی و رزرو^۵ شناخته می‌شود)، که دو دیدگاه آخری بیش‌تر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در دیسپچ جداگانه مبتنی بر درجه شایستگی، چندین کالا در بازار مبادله می‌شود که هر کالا دارای درجه شایستگی مربوط به خود است. این درجه شایستگی بر اساس قیمت و مقدار پیشنهادات

¹ Market operator

² Separated merit-order dispatch

³ Sequential dispatch

⁴ Joint dispatch

⁵ Co-optimization of energy and reserve

تمام شرکت کنندگان بازار تعیین می شود. برای بازار منحصرأ انرژی (بازار با یک کالا) این دیدگاه همانند دیدگاه شناخته شده و سنتی دیسپیچ اقتصادی بار می باشد، که در آن بلوک های پیشنهادی توان به ترتیب قیمت پیشنهادی مرتب می شوند. اگرچه پیاده سازی این دیدگاه آسان است، اما زمانی که کالاها بهم مرتبط باشند (مانند انرژی و رزرو)، لزوماً منجر به نتایج بهینه نخواهد شد [۲۱].

در بازارهای ترتیبی در ابتدا یکی از محصولات تسویه می شود (معمولاً انرژی). زمانی که بازار اول تسویه شد (به عبارتی قیمت بازار، مقدار تولید هر تولیدکننده و مقدار مصرف برای هر خریدار مشخص شد)، هر شرکت کننده در بازار بعدی پیشنهاد قیمت خود را ارائه می دهد، که استراتژی اتخاذ شده در بازار دوم تحت تأثیر نتایج تسویه بازار اول قرار می گیرد [۲۱]. این دیدگاه معمولاً مربوط به حراج های ساده می باشد، که قیمت ها از تقاطع منحنی های خرید و فروش به دست می آید [۴۵].

در پخش توأم، انرژی و رزرو به طور هم زمان و با هم از طریق یک بازار یکپارچه معامله می شوند. واحدهای تولیدی پیشنهادات انرژی و رزرو خود را با قیمت های مختلف و به طور هم زمان به بازار ارائه می دهند. بنابراین پیشنهادات بهینه باید تعاملات موجود بین هر بازار را در نظر بگیرد. مزیت این بازار متمرکز بهره برداری مطمئن تر و اقتصادی تر بازار است [۲۱]. در سال های اخیر بسیاری از بازارهای واقعی مانند PJM، New England و New York الگوریتم تسویه خود را از دیسپیچ ترتیبی به دیسپیچ توأم تغییر داده اند.

از طرف دیگر از آن جایی که انرژی و رزرو به شدت به یکدیگر مرتبط می باشند، یک روش دیسپیچ جایگزین، ارائه یک پیشنهاد ترکیبی شامل انرژی و رزرو می باشد، که منجر به قیمت تسویه یکسان هر دو کالا می شود. اگرچه به دلیل پیچیدگی این مکانیزم تسویه، تاکنون این روش در عمل استفاده نشده و فقط در برخی مقالات (به عنوان نمونه در [۲۳]) پیشنهاد شده است.

۲-۴-۱ دیسپیج ترتیبی در مقایسه با دیسپیج توأم

همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، دو روش متداول مورد استفاده در تسویه بازارهای انرژی و رزرو دیسپیج ترتیبی و دیسپیج توأم می‌باشد. برخی نویسندگان [۲، ۱۳، ۲۱، ۲۳، ۲۴، ۲۹، ۳۰، ۳۴، ۳۷، ۴۶-۴۸] مدل بهینه‌سازی توأم را برگزیده‌اند، در حالی که در [۸، ۲۷، ۴۹] دیسپیج ترتیبی اتخاذ شده است. همان‌طور که در [۲۱، ۲۶] ذکر شده است، بهینه‌سازی توأم از نقطه نظر اقتصادی دیسپیج مؤثرتری را فراهم کرده، اما معمولاً برای حل حراج‌های پیچیده پیشنهاد شده است، در حالی که قیمت-دهندگان باید قیود فنی واحدهای تولیدی مانند نرخ افزایش/کاهش یا قیود بین‌زمانی را در نظر بگیرند. برعکس، دیسپیج ترتیبی برای حراج‌های قیمت-مقدار ساده برای هر دو کالای انرژی و رزرو مناسب‌تر می‌باشد، در حالی که دیسپیج‌های غیرکارآتری را فراهم می‌کند. علاوه بر این در دیسپیج ترتیبی ممکن است ظرفیت کافی در بازار رزرو پیشنهاد نشود.

از آن‌جایی که مهم‌ترین رزرو مورد استفاده در سیستم قدرت، رزرو چرخان می‌باشد (بخش ۲-۳-۱ را ببینید)، بنابراین پیشنهاد رزرو از طرف واحدهایی است که در بازار انرژی نیز کالای خود را ارائه می‌دهند. این وابستگی در بازار انرژی و رزرو، ممکن است باعث اثر متقابل این بازارها بر یکدیگر شود. اگرچه ممکن است قیمت رزرو با قیمت انرژی متفاوت باشد، ولی بازار انرژی و رزرو باید هماهنگ با یکدیگر طراحی گردند [۵۰]؛ نادیده گرفتن این ارتباط ممکن است منجر به نتایج نشدنی یا غیربهینه گردد.

از طرف دیگر همان‌طور که در بخش ۲-۲ ذکر شد، طی سال‌های اخیر سهم تولید بادی در تأمین الکتریسیته مصرف‌کنندگان رشد قابل توجهی داشته است. اگرچه با افزایش سطح نفوذ تولید بادی در سیستم قدرت، رابطه متقابل انرژی و رزرو حتی از مقدار قبلی خود نیز فراتر رفته، و بنابراین استفاده از الگوریتم تسویه توأم انرژی و رزرو منجر به بهره‌برداری مطمئن‌تر و اقتصادی‌تر سیستم شده، در حالی که از بارزدایی‌های ناخواسته، راه‌اندازی واحدهای اضافی و انحراف از مقادیر تسویه شده بازار روز

قبل جلوگیری می کند [۲].

۲-۵ تسویه توأم بازارهای انرژی و رزرو

در این بخش به تفصیل مدل های مورد استفاده در مقالات برای تسویه توأم بازارهای انرژی و رزرو بررسی می گردد. این مقالات را می توان بسته به نوع عدم قطعیت های در نظر گرفته شده شامل احتمال خروج واحدهای تولیدی، احتمال خروج خطوط انتقال، عدم قطعیت منابع تولید تجدیدپذیر و عدم قطعیت بار و نوع مدل سازی مسئله بهینه سازی (تصادفی یا مقاوم^۱) مطالعه نمود. در این پایان نامه ما به طور خاص بر عدم قطعیت مربوط به تولید بادی متمرکز می شویم. بنابراین در این بخش، مطالعات انجام شده از دیدگاه عدم قطعیت تولید بادی در سیستم قدرت بررسی می گردند.

مسئله تسویه توأم بازارهای انرژی و رزرو در مقالات - بدون نظر گرفتن [۱۳، ۳۵، ۳۹، ۴۷] و با در نظر گرفتن [۲، ۱۱، ۱۲، ۳۱، ۴۸، ۵۱-۵۴] تولید بادی در سیستم قدرت- مورد مطالعه قرار گرفته است.

یک مدل بهینه سازی دو مرحله ای برای اتخاذ استراتژی قیمت دهی برای تولیدکنندگان جهت شرکت در بازار انرژی و رزرو در [۱۳] پیشنهاد شده است. مرجع [۳۹] یک مدل تصادفی چندهدفه برای تسویه همزمان بازار انرژی و رزرو با در نظر گرفتن عدم قطعیت های سیستم شامل خروج واحدها و خطوط و عدم قطعیت بار ارائه می دهد. مزایای اقتصادی مدل فوق که به طور مؤثر از رزرو و بارزدایی استفاده می کند، نشان داده شده است. از طرف دیگر علاوه بر تولید کنندگان بارهای الاستیک نیز می توانند با کاهش سطح بار خود به صورت داوطلبانه در تأمین رزرو نقش داشته باشند. مرجع [۳۵] پیشنهادات رزرو سمت تقاضا را در مسئله تسویه توأم بازارهای انرژی و رزرو مدل کرده است. با اجرای مدل فوق نشان داده می شود در نظر گرفتن پیشنهادات رزرو سمت تقاضا انعطاف پذیری سیستم و رفاه

¹ Robust

اجتماعی کل را به‌طور قابل توجهی افزایش داده، در حالی که قدرت بازار تولیدکنندگان و قیمت انرژی کاهش یافته است. بعداً تأمین رزرو توسط مصرف‌کنندگان در یک مدل جامع‌تر با در نظر گرفتن پیشامدهای سیستم در [۴۷] بررسی شده است.

مسئله تسویه همزمان بازار انرژی و رزرو در یک سیستم قدرت با سطح نفوذ بالای تولید بادی به صورت یک مسئله تصادفی دو مرحله‌ای در [۲] بررسی شده است که در مرحله اول بازار از نوع روز قبل و در مرحله دوم، بهره‌برداری زمان-حقیقی با در نظر گرفتن انحراف تولید بادی از مقدار تخمینی مدل شده است. تأثیر پارامترهای مختلف مانند سطح نفوذ تولید بادی، هزینه بارزدایی، محدودیت خطوط انتقال بر دیسپچ انرژی و رزرو و هزینه‌های مربوط به‌طور جامع بررسی شده است. یک بازار الکتریسیته از نوع حوضچه^۱ در [۱۱] شامل تولیدکنندگان بادی در نظر گرفته شده است که در آن انرژی و رزرو به‌طور توأم تسویه می‌شود. مدل بازار فوق یک مدل تصادفی دو مرحله‌ای بوده که در مرحله اول بازار روز قبل تسویه شده و در مرحله دوم بهره‌برداری سیستم تحت سناریوهای مختلف تولید بادی مدل می‌شود. در نهایت قیمت انرژی در بازار حوضچه و بازار تعادل بدست می‌آید. در [۱۲] با مدل‌سازی عدم قطعیت تولید بادی با روش تولید سناریو، یک مدل تصادفی دو مرحله‌ای برای حل مسئله مشارکت واحدها در بازار انرژی و رزرو توأم پیشنهاد شده است. علاوه بر این روش احتمالاتی فوق برای تعیین سطح رزرو مورد نیاز با دو معیار متداول تعیین رزرو مقایسه شده است.

تأثیر ورود تولید بادی بر مسئله مشارکت واحدها، در [۳۱] نیز به‌صورت یک مدل تصادفی دو سطحی مدل شده است. با معرفی یک مدل جدید برای مصرف‌کنندگان صنعتی، رزرو سمت تولید و تقاضا، محدودیت‌های شبکه و هزینه ریزش تولید بادی در مدل فوق گنجانده شده‌اند. مزایای استفاده از مدل پیشنهادی برای مصرف‌کنندگان صنعتی در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه‌های برنامه-ریزی رزرو در سمت تولید کننده تحت سطوح نفوذ مختلف تولید بادی بررسی شده است. در [۴۸] از

¹ Pool

یک مدل برای برنامه‌ریزی دینامیک رزرو بهره‌برداری با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید بادی برای تسویه بازار انرژی و رزرو توأم استفاده شده است. مرجع [۵۱] در شبکه‌ای که فقط تولیدکنندگان حرارتی و بادی وجود دارند بازار انرژی و رزرو چرخان را با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و تولید بادی تسویه می‌کند. علاوه بر کاهش هزینه بهره‌برداری، کاهش هزینه آلاینده‌گی نیز در تابع هدف این مقاله گنجانده شده است.

مدل‌های بررسی شده تا این‌جا، انرژی و رزرو را با دیدگاه قطعی یا احتمالی تسویه و تعیین می‌کردند. هر کدام از این مدل‌ها سعی داشتند با در نظر گرفتن مجموعه‌ای بزرگتر از عدم قطعیت‌ها ریسک بهره‌برداری که معمولاً بر حسب از دست دادن بار یا کمبود رزرو سنجیده می‌شود، را کاهش دهند. از آن‌جا که پیش‌بینی دقیق تولید منابع پراکنده-بخصوص تولید بادی- و تعیین حدود مجموعه عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده بطور دقیق امکان‌پذیر نیست، برخی نویسندگان بهینه‌سازی مقاوم را برای تسویه بازار انرژی و رزرو پیشنهاد داده‌اند [۵۲-۵۴].

بهینه‌سازی توأم انرژی و رزرو با در نظر گرفتن تولید بادی با مدل مقاوم مبتنی بر فازی در [۵۲] پیشنهاد شده است. مدل فوق یک مدل دو مرحله‌ای بوده که در مرحله اول برنامه‌ریزی انرژی و رزرو انجام، و در مرحله دوم مقاوم‌پذیری و شدنی بودن دیسپچ مجدد بررسی می‌شود. یک مدل مقاوم برای تسویه بازار انرژی و رزرو توأم با در نظر گرفتن تولید بادی به‌عنوان تنها منشأ عدم قطعیت در [۵۳] معرفی شده است. مدل پیشنهادی از نظر زمان محاسبه، هزینه‌های بهره‌برداری انرژی و رزرو و مقدار رزرو برنامه‌ریزی شده با مدل تصادفی معرفی شده در [۲] مقایسه شده است. علاوه بر این در [۵۴] نیز برای تسویه توأم بازار انرژی و رزرو مدل مقاوم پیشنهاد شده است. با اعمال مدل پیشنهادی بر روی یک سیستم نمونه، نتایج تسویه بازار با مدل تصادفی مقایسه شده‌اند. نشان داده می‌شود در مدل مقاوم نسبت به مدل برنامه‌ریزی تصادفی با ابعاد معقول، هزینه‌های بهره‌برداری سیستم افزایش می‌یابد، در حالی که زمان محاسبات کاهش می‌یابد. همچنین نشان داده می‌شود مدل مقاوم نسبت به

تغییر توزیع احتمالی پارامترهای غیرقطعی، مقاوم است.

۲-۶ تأثیر همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی بر تسویه بازار الکتریسیته

در سیستم‌های قدرت متصل به تولید بادی در نظر گرفتن همبستگی زمانی-مکانی بین مزارع مختلف امری ضروری و لازم به نظر می‌رسد. مطالعات بسیاری به بررسی تأثیر همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی بر خروجی‌های بازار برق پرداخته‌اند. این مطالعات به دو دسته مطالعات میدانی و شبیه‌سازی تقسیم می‌شوند. مرجع [۵] به تفصیل این مطالعات را بررسی کرده است و در این جا از ذکر این مطالعات خودداری می‌شود.

هر چند تمام مطالعات انجام شده به بررسی تأثیر همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی بر بازار انرژی پرداخته‌اند، حال آنکه در بازارهای الکتریسیته نیاز به برنامه‌ریزی توأم انرژی و رزرو می‌باشد. البته در [۱۰] تأثیر همبستگی مکانی تولید بادی و همبستگی تولید بادی و بار الکتریکی در تعیین رزرو مورد نیاز بررسی شده است. اگرچه در این مقاله فقط رزرو مورد نیاز با تعریف شاخص‌های قابلیت اطمینان محاسبه شده است، و به برنامه‌ریزی انرژی پرداخته نشده است. بنابراین نظر به اهمیت تأثیر همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی بر تسویه بازار، در این پایان‌نامه بازار انرژی و رزرو توأم مدل‌سازی شده که در آن تأثیر همبستگی هم بر دیسپچ انرژی و دیسپچ رزرو و هم بر هزینه‌های مربوط به هر کدام بررسی می‌شود.

۲-۷ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل مفاهیم همبستگی زمانی و مکانی تولید بادی و مقابله با عدم قطعیت تولید بادی به روش تولید سناریو معرفی شد. موضوعات کلی در مدل‌سازی انرژی و رزرو بررسی گردید. مدل‌های مختلف تسویه بازار انرژی و رزرو در حوزه بازار الکتریسیته بررسی شدند. در اکثر مدل‌های ارائه شده مدل تسویه انرژی و رزرو توأم مورد توجه قرار گرفته است. چالش اصلی فقدان یک مدل آماری برای

بررسی تأثیر همبستگی زمانی-مکانی مزارع بادی بر تسویه بازار انرژی و رزرو توأم می‌باشد. در این پایان‌نامه برای پاسخ‌گویی به سؤالات در زمینه آثار این همبستگی بر تسویه بازارهای انرژی و رزرو توأم، رفتار این همبستگی‌ها تحلیل و مدل‌سازی می‌شود و آثار فنی و اقتصادی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل سوم

مدل سازی بازارهای انرژی و رزرو توأم

و عدم قطعیت تولید بادی

۳-۱ مقدمه

فاصله زمانی موجود بین تسویه بازار انرژی و پیاده‌سازی خروجی‌های آن در شرایط زمان حقیقی منجر به عدم قطعیت منابع سیستم و خطوط انتقال در زمان بهره‌برداری می‌شود. رزرو یکی از سرویس‌های جانبی است که با هدف مقابله با این عدم قطعیت‌ها در سیستم برنامه‌ریزی می‌شود، و امکان پیاده‌سازی خروجی‌های بازار را در بهره‌برداری زمان حقیقی فراهم می‌کند، در حالی که عملکرد عادی سیستم را حفظ می‌کند.

در این فصل به منظور بررسی آثار همبستگی تولید بادی بر تسویه بازارهای انرژی و رزرو توأم، بازار الکتریسیته در حضور تولید بادی به صورت یک مسئله تصادفی دو مرحله‌ای مدل شده است که انرژی و رزرو به طور همزمان و در یک مدل بهینه‌سازی تسویه می‌شوند.

در بخش دوم، الگوریتم پیشنهادی برای مدل‌سازی عدم قطعیت تولید بادی ارائه می‌شود. در بخش سوم، مسئله تسویه بازارهای انرژی و رزرو توأم تشریح می‌گردد و فرضیات در نظر گرفته شده در مدل‌سازی ذکر می‌شوند. در بخش چهارم، مسئله تسویه بازارهای انرژی و رزرو توأم به صورت یک مسئله بهینه‌سازی دو مرحله‌ای فرمول‌بندی می‌گردد. در نهایت در بخش پنجم یک جمع‌بندی از مطالب گفته شده در این فصل ارائه می‌شود.

۳-۲ مدل‌سازی عدم قطعیت

یک موضوع کلیدی در مسائل مبتنی بر تصمیم‌گیری، مدل‌سازی پارامترهای غیرقطعی تأثیرگذار مانند بار، تولید بادی و قیمت انرژی بر مسئله تصمیم‌گیری می‌باشد. دو تکنیک اصلی برای مدل‌سازی این پارامترهای غیرقطعی در مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌شود: برنامه‌ریزی تصادفی و بهینه‌سازی مقاوم.

بهینه‌سازی مقاوم یک ابزار ریاضی برای حل مسائل بهینه‌سازی با پارامترهای غیرقطعی دارای حد

و مرز^۱ می‌باشد. برنامه‌ریزی تصادفی، عدم قطعیت در اطلاعات ورودی را از طریق مجموعه‌ای از سناریوها نشان می‌دهد. از آنجایی که عدم قطعیت تولید بادی می‌تواند به‌طور مناسب از طریق مجموعه‌ای از سناریوها مدل شود، در این جا از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده می‌شود.

دو موضوع اصلی که باید در هر مدل برنامه‌ریزی تصادفی در نظر گرفته شوند، عبارتند از:

۱. مجموعه‌ای شامل سناریوهای زیاد باید پارامترهای غیرقطعی را به‌طور دقیق نمایش دهند.

بنابراین استفاده از روش تولید سناریو کارآمد و به‌روز ضروری به‌نظر می‌رسد.

۲. توزیع احتمالی پارامترهای غیرقطعی جهت تولید سناریو باید مشخص شود.

در این پایان‌نامه، هدف تولید سناریوهای توان بادی همبسته می‌باشد. بنابراین مدل‌سازی رفتار باد باید به‌گونه‌ای باشد که این همبستگی‌ها در مدل لحاظ شود. در این جا ابتدا نحوه پیش‌بینی و سپس الگوریتم مورد استفاده برای تولید سناریو با در نظر گرفتن همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی بیان می‌شود.

۳-۲-۱ پیش‌بینی تولید بادی

در این پایان‌نامه برای پیش‌بینی تولید توان بادی از یک روش ترکیبی آریما-فازی استفاده شده است [۵۵-۵۷]. هم‌چنین مدل‌سازی همبستگی مزارع بادی با روش ارائه‌شده در [۵۸] انجام گرفته است. روش پیاده‌سازی به شرح زیر است:

۱. تولید بادی به میزان سرعت باد وابسته است و تابعی از آن می‌باشد. اطلاعات گذشته مربوط به سرعت و تولید متناظر بادی در دسترس هستند. به‌منظور تخمین تابع تولید بادی $(f^w(.))$ مدل فازی مناسب بر روی اطلاعات گذشته سرعت و تولید بادی نرمالیز شده متناظر آن برای هر مزرعه پیاده‌سازی می‌شود. مدل فازی بر اساس روش خوشه‌بندی

¹ Bounded

پیشنهادی در مرجع [۵۹] طراحی می‌شود.

۲. خطای باقی‌مانده برای هر مزرعه با محاسبه اختلاف میان اطلاعات حقیقی تولید بادی و تولید پیش‌بینی‌شده توسط تابع تخمین‌گر فازی به دست می‌آید.

$$e^{wind} = p^{wind,real} - p^{wind,fuzzy} \quad (۱-۳)$$

۳. تابع توزیع تجمعی تجربی F برای اطلاعات خطای باقیمانده به دست می‌آید. سپس از ترکیب توابع F و تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد^۱، خطای محاسبه‌شده به حوزه نرمال منتقل می‌شود.

$$e_N^{wind} = \psi_N^{-1}(F(e^{wind})) \quad (۲-۳)$$

۴. یک مدل آریمای مناسب بر روی خطاهای نرمال شده پیاده می‌شود و مقادیر خطا برای هر مزرعه پیش‌بینی می‌شود. سپس در حوزه نرمال، توزیع‌های نرمال $N(\mu_h, \sigma_h), h = 1, \dots, 24$ برای هر مزرعه بادی پیش‌بینی می‌شود. دقت شود که این توزیع‌های حاشیه‌ای بدون در نظر گرفتن همبستگی تولید توان بادی مزارع مدل‌سازی می‌شوند.

۳-۲-۲ تولید سناریو با در نظر گرفتن همبستگی زمانی-مکانی

مرحله بعد تولید سناریوهای توان بادی همبسته می‌باشد. برای تولید سناریوهای همبسته نیاز به شناسایی همبستگی تولید توان بادی مزارع می‌باشد. بدین منظور خطاهای تولید توان بادی انتقال‌یافته به حوزه نرمال به ۲۴ بردار $e_{N,h}^{wind}, \forall h$ متناسب با ساعات روز برای هر مزارع بادی تقسیم می‌شود. رویه تولید سناریو همبسته توان بادی برای N مزرعه به شرح زیر است:

¹ Standard normal cumulative distribution function

۱. با استفاده از $24N$ بردار اطلاعات خطای گذشته به دست آمده از مرحله قبل، ماتریس A با

ابعاد $24N \times 24N$ برای شناسایی ساختار همبستگی تخمین زده می شود.

۲. تعدادی سناریو همبسته تولید توان بادی مزارع $e_N^{wind'}(\omega)_h, \forall h, \forall \omega$ با استفاده از توزیع

نرمال چند متغیره استاندارد^۱ با ماتریس همبستگی A به صورت تصادفی تولید می شود.

۳. هر سناریو نرمال استاندارد همبسته با استفاده از رابطه زیر به سناریو نرمال همبسته

$e_{N,h}^{wind}, \forall h, \forall \omega$ با متوسط $\mu_h, \forall h$ و انحراف معیار $\sigma_h, \forall h$ تبدیل می شود:

$$e_{N,h}^{wind}(\omega) = \mu_h + \sigma_h e_N^{wind'}(\omega)_h, \forall h, \forall \omega \quad (3-3)$$

۴. سپس این سناریوهای نرمال همبسته $e_{N,h}^{wind}, \forall h, \forall \omega$ با استفاده از رابطه زیر از حوزه نرمال

به حوزه واقعی منتقل می شوند.

$$e^{wind}(\omega) = F^{-1} \left(\psi_N \left(e_{N,h}^{wind}(\omega) \right) \right) \quad (4-3)$$

۵. مقدار پیش بینی شده سناریوهای توان بادی از جمع توان پیش بینی شده توسط مدل فازی با

خطای سناریوهای پیش بینی شده برای هر مزرعه به دست می آید.

$$p^{wind}(\omega) = p^{wind,fuzzy} + e^{wind}(\omega) \quad (5-3)$$

فرآیند بالا می تواند برای تولید سناریوهای همبسته توان بادی هر تعداد مزارع بادی مورد استفاده

قرار گیرد.

۳-۳ مدل سازی بازارهای انرژی و رزرو توان

۳-۳-۱ تشریح مسئله

به منظور توجیه عدم قطعیت و همبستگی تولید بادی که بر بهره برداری سیستم قدرت تأثیر می -

¹ Standard multivariate normal distribution

گذارد، تسویه بازار به عنوان یک مسئله برنامه ریزی تصادفی دو مرحله ای فرمول بندی می شود، که مرحله اول قیود و قوانین حاکم بر بازارهای انرژی و رزرو توأم و مرحله دوم، بهره برداری زمان حقیقی سیستم و محدودیت های آن را نشان می دهد. بنابراین متغیرهای متعلق به مرحله اول، مطابق با تصمیمات بازارهای انرژی و رزرو (اقدامات پیشگیرانه) می باشد که پیشامدهای غیرقطعی و احتمالی سیستم را با در نظر گرفتن تأثیر احتمالی آنها بر بهره برداری زمان حقیقی سیستم قدرت (اقدامات اصلاحی) مدل می کنند.

۳-۳-۲ فرضیات

در ادامه برخی فرضیات اتخاذ شده در فرمول بندی مدل بازار پیشنهادی آمده است. هر چند این فرضیات جهت ساده سازی مدل در نظر گرفته شده اند و تأثیری در عمومیت مدل سازی و فرمول بندی ارائه شده ندارند.

- فرض شده است تولیدکنندگان بادی در بازار الکتریسیته شرکت نمی کنند. بنابراین تولید بادی به عنوان بار منفی در نظر گرفته شده است. این فرض معادل این است که تولیدکنندگان بادی، تولید خود را با قیمت صفر به بازار پیشنهاد می دهند. لازم به ذکر است در اکثر سیستم های قدرت در سرتاسر جهان همین رویه برای تولیدکنندگان بادی دنبال می شود [۳۲].

- بازار از نوع حوضچه^۱ با پرداخت بر مبنای پیشنهاد^۲ در نظر گرفته شده است، که در آن بهره بردار بازار پیشنهادات تولیدکنندگان را دریافت کرده، و بعد از تسویه بازار مقدار تولید هر واحد تولیدی، رزرو برنامه ریزی شده و مقدار پرداختی به هر تولیدکننده را مشخص می کند.

^۱ Pool

^۲ Pay as bid

- تنها عدم قطعیت موجود در سیستم مربوط به عدم قطعیت تولید بادی می باشد. هر چند می توان عدم قطعیت های بار و خروج واحدها و خطوط را به روش مشابه در مسئله فوق لحاظ کرد.
- شبکه انتقال با استفاده از مدل پخش بار DC بدون تلفات نمایش داده شده است.
- فرض می شود بارها غیرالاستیک بوده و در بازار انرژی و رزرو شرکت نمی کنند.
- دوره زمانی مورد نظر برای برنامه ریزی ۲۴ ساعت یک روز در نظر گرفته شده است و فرمول بندی های ارائه شده بر اساس آن نوشته شده اند، اما با توجه به نیازهای احتمالی بهره بردار، بدون تغییر در قالب فرمول بندی ها، مدل می تواند برای دوره های زمانی کوچک تر در حد چند دقیقه نیز بکار برده شود.

۳-۴ فرمول بندی بازارهای انرژی و رزرو توأم

۳-۴-۱ فهرست علائم و اختصارات

در ادامه فهرست علائم و اختصارات مورد استفاده در این پایان نامه آمده است.

اندیس ها

۱. n : شاخص باس های سیستم از ۱ تا ND .
۲. i : شاخص واحدهای تولیدی به استثناء واحدهای بادی از ۱ تا NG .
۳. h, t : شاخص ساعات روز از ۱ تا NH .
۴. j : شاخص بلوک های واحد تولیدی از ۱ تا NB .
۵. k : شاخص مزارع بادی از ۱ تا NF .
۶. ω : شاخص سناریوهای تولید بادی از ۱ تا $N\Omega$.

پارامترهای مربوط به فرمول‌بندی

۱. b_{nm} : مقدار سوسپتانس خط (n, m) .
۲. $C_{ij}^G(h)$: قیمت پیشنهادی بلوک j ام تولیدکننده i در ساعت h .
۳. $C_i^U(h)/C_i^D(h)$: قیمت پیشنهادی ظرفیت رزرو بالارونده/پایین رونده واحد تولیدی i در ساعت h .
۴. $C_i^{SU}(h)/C_i^{SD}(h)$: هزینه راه‌اندازی/خاموشی واحد تولیدی i .
۵. $C_k^{spill}(h)$: ارزش ریزش تولید بادی مزرعه k در ساعت h .
۶. C_n^{shed} : ارزش بار از دست رفته در باس n در ساعت h .
۷. H_i^{ON}/H_i^{OFF} : ساعاتی که در ابتدای روز واحد i باید روشن/خاموش باشد.
۸. H_i^{UP}/H_i^{DN} : حداقل زمان روشن/خاموش بودن واحد تولیدی i .
۹. $P_n^D(h)$: بار باس n در ساعت h .
۱۰. $\bar{P}_i^G/\underline{P}_i^G$: حد بالا/پایین تولید واحد i در ساعت h .
۱۱. $\bar{P}_{ij}^G(h)$: ظرفیت بلوک تولیدی j ام واحد تولیدی i در ساعت h .
۱۲. $\bar{P}_k^W(h)$: توان تولیدی تخمینی مزرعه k در ساعت h .
۱۳. $\bar{P}_{k\omega}^W(h)$: توان تولیدی مزرعه k در ساعت h و سناریو ω .
۱۴. $\bar{P}_{nm}^L$: حداکثر ظرفیت توان عبوری از خط (n, m) .
۱۵. R_i^{UP}/R_i^{DO} : محدودیت نرخ افزایش/کاهش تولید واحد تولیدی i .
۱۶. $\bar{R}_i^U(h)/\bar{R}_i^D(h)$: حداکثر رزرو بالارونده/پایین‌رونده که واحد تولید i قادر به تأمین آن است.
۱۷. π_ω : احتمال سناریو تولید بادی ω .

متغیرهای تصادفی

متغیرهای مرحله اول

۱. $P_i^G(h)$: توان تولیدی واحد تولیدی i در ساعت h .
۲. $P_{ij}^G(h)$: توان تولیدی بلوک j ام واحد تولیدی i در ساعت h .
۳. $P_k^W(h)$: تولید برنامه‌ریزی شده مزرعه بادی k در ساعت h .
۴. $u_i(h)$: متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت روشن/خاموش بودن واحد تولیدی i در ساعت h .
۵. $\delta_{n,0}(h)$: زاویه باس n در ساعت h .
۶. $R_i^U(h)/R_i^D(h)$: رزرو بالارونده/پایین رونده برنامه‌ریزی شده واحد تولیدی i در ساعت h .
۷. $R_i^{NS}(h)$: رزرو غیرچرخان برنامه‌ریزی شده واحد تولیدی i در ساعت h .

متغیرهای مرحله دوم

۱. $P_{k\omega}^W(h)$: توان تولیدی مزرعه k در ساعت h و سناریو ω .
۲. $P_{k\omega}^{W,Spill}(h)$: ریزش تولید بادی مزرعه k در ساعت h و سناریو ω .
۳. $P_{n\omega}^{D,shed}(h)$: بار از دست رفته در باس n در ساعت h و سناریو ω .
۴. $r_{i\omega}^U(h)/r_{i\omega}^D(h)$: رزرو به کار گرفته شده بالارونده/پایین رونده واحد تولیدی i در ساعت h و سناریو ω .
۵. $r_{i\omega}^{NS}(h)$: رزرو غیرچرخان واحد تولیدی i در ساعت h و سناریو ω .
۶. $r_{ij\omega}^G(h)$: رزرو به کار گرفته شده از بلوک j واحد تولیدی i در ساعت h و سناریو ω .
۷. $u_{i\omega}(h)$: متغیر باینری نشان‌دهنده وضعیت روشن/خاموش بودن واحد تولیدی i در ساعت h و سناریو ω .

۸. $\delta_{n\omega}(h)$: زاویه باس n در ساعت h و سناریو ω .

۹. $SUC_{i\omega}(h)/SDC_{i\omega}(h)$: متغیر کمکی برای اعمال هزینه راهاندازی/خاموشی واحد

تولیدی i در ساعت h و سناریو ω .

مجموعه‌ها

۱. Ω^B : مجموعه باس‌ها.

۲. Ω^L : مجموعه خطوط.

۳. Ω_n^G/Ω_n^W : مجموعه واحدهای تولیدی/مزارع بادی در باس n .

۳-۴-۲ فرمول‌بندی

مدل بهینه‌سازی جهت تسویه بازارهای انرژی و رزرو توأم شامل تابع هدف و قیود است. تابع هدف شامل هزینه تولید انرژی بازار روز قبل، هزینه ظرفیت رزرو و متوسط هزینه‌های بهره‌برداری زمان-حقیقی می‌باشد. قیود شامل مجموعه قیود مدل‌سازی بازارهای انرژی و رزرو و قوانین آن، قیود مدل-سازی بهره‌برداری زمان-حقیقی سیستم قدرت برای هر سناریو و قیود پیوندی، که قیود مرحله بازار و مرحله بهره‌برداری زمان-حقیقی را مرتبط می‌کنند، می‌شود. مدل فوق به‌عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مخلوط عدد صحیح^۱ فرمول‌بندی شده است که با نرم‌افزارهای موجود قابل حل می‌باشد. ساختار کلی مسئله بهینه‌سازی برگرفته از ساختارهای بهینه‌سازی تصادفی در مراجع [۲، ۳۷] است.

مدل ارائه شده برای تسویه بازار می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی سطح رزرو مورد نیاز در کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت توسط بهره‌بردار بازار استفاده شود. برای این منظور در دسترس بودن اطلاعات گذشته تولید بادی، بار و رفتار بازیگران بازار ضروری می‌باشد.

¹ Mixed integer linear programming

۳-۴-۲-۱ تابع هدف

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & \sum_{h=1}^{NH} \sum_{i=1}^{NG} \sum_{j=1}^{NB} C_{ij}^G(h) P_{ij}^G(h) \\
 & + \sum_{h=1}^{NH} \sum_{i=1}^{NG} \left(C_i^U(h) R_i^U(h) + C_i^D(h) R_i^D(h) + C_i^{NS}(h) R_i^{NS}(h) \right) \\
 & + \sum_{\omega=1}^{N\Omega} \pi_{\omega} \left\{ \sum_{h=1}^{NH} \left[\sum_{i=1}^{NG} \left(SUC_{i\omega}(h) + SDC_{i\omega}(h) \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + \sum_{j=1}^{NB} C_{ij}^G(h) r_{ij\omega}^G \right) \right] \right. \\
 & \left. + \sum_{n=1}^{ND} C_n^{Shed}(h) P_{n\omega}^{D,Shed}(h) \right. \\
 & \left. + \sum_{k=1}^{NF} C_k^{Spill}(h) P_{k\omega}^{W,Spill}(h) \right\}
 \end{aligned} \tag{۶-۳}$$

تابع هدف فوق از جمع شش جمله زیر تشکیل می‌گردد:

۱. هزینه پرداختی به واحدهای تولیدی برای تأمین انرژی.
۲. هزینه پرداختی به واحدهای تولیدی برای تأمین رزرو چرخان/غیرچرخان.
۳. هزینه راه‌اندازی و خاموشی واحدهای تولیدی در بهره‌برداری زمان حقیقی.
۴. هزینه ناشی از اصلاح تولید انرژی واحدهای تولیدی در بهره‌برداری زمان حقیقی.
۵. هزینه پرداختی به مصرف‌کنندگان در اثر قطع اجباری بار.
۶. هزینه پرداختی به تولیدکنندگان بادی در اثر ریزش تولید بادی.

۳-۴-۲-۲ قیود بازارهای انرژی و رزرو

این قیود عملکرد بازارهای انرژی و رزرو را مدل می‌کنند و بنابراین شامل متغیرهای مرحله اول

(متغیرهای مستقل از سناریو (ω))، می‌باشند.

عملکرد بازار وابسته به تعادل بین پیشنهادات تولید و بار می باشد، که با قید (۷-۳) مدل شده است.

$$\sum_{i \in \Omega_n^G} P_i^G(h) + \sum_{k \in \Omega_n^W} P_k^W(h) - \sum_{(n,m) \in \Omega^L} b_{nm} (\delta_{n,0}(h) - \delta_{m,0}(h)) - P_n^D(h) = 0, \quad \forall n \in \Omega^B, \forall h \quad (۷-۳)$$

از طرف دیگر قیود (۸-۳) و (۹-۳) به ترتیب حد بالا و حد پایین تولید هر واحد تولیدی را با در نظر گرفتن وضعیت خاموش/روشن بودن واحد، اعمال می کنند.

$$u_{i(h)} P_i^G \leq (P_i^G(h) - R_i^D(h)), \quad \forall i, \forall h \quad (۸-۳)$$

$$(P_i^G(h) + R_i^U(h)) \leq u_i(h) \bar{P}_i^G, \quad \forall i, \forall h \quad (۹-۳)$$

همچنین قید (۱۰-۳) توان بلوک های تولیدی را در محدوده تعیین شده نگه می دارد. قید (۱۱-۳) توان تولیدی هر واحد را به صورت مجموع توان بلوک های پیشنهادی آن محاسبه می کند.

$$0 \leq P_{ij}^G(h) \leq \bar{P}_{ij}^G, \quad \forall i, \forall h, \forall j \quad (۱۰-۳)$$

$$P_i^G(h) = \sum_{j=1}^{NB} P_{ij}^G(h), \quad \forall i, \forall h \quad (۱۱-۳)$$

همچنین قیود (۱۲-۳) تا (۱۴-۳) مربوط به محدودیت شبکه می باشند، که به ترتیب محدودیت توان عبوری از خطوط، محدودیت زاویه ولتاژ هر باس و زاویه باس مبنا را مشخص می کنند.

$$-\bar{P}_{nm}^L \leq b_{nm} (\delta_{n,0}(h) - \delta_{m,0}(h)) \leq \bar{P}_{nm}^L, \quad \forall (n, m) \in \Omega^L, \forall h \quad (۱۲-۳)$$

$$-\pi \leq \delta_{n,0}(h) \leq \pi, \quad \forall n \in \Omega^B, \forall h \quad (۱۳-۳)$$

$$\delta_{n,0} = 0, \quad n: \text{reference bus}, \forall h \quad (۱۴-۳)$$

از آن جایی که انرژی و رزرو هم‌زمان تسویه می‌شوند، فقط واحدهایی که در مدار باشند $(u_i(h) = 1)$ ، قادر به تامین رزرو چرخان (بالارونده/پایین رونده)، مطابق قیود (۱۵-۳) و (۱۶-۳) می‌باشند.

$$0 \leq R_i^U(h) \leq u_i(h)\bar{R}_i^U(h), \quad \forall i, \forall h \quad (15-3)$$

$$0 \leq R_i^D(h) \leq u_i(h)\bar{R}_i^D(h), \quad \forall i, \forall h \quad (16-3)$$

در غیراین صورت اگر واحد تولیدی در دوره زمانی مورد نظر خاموش باشد $(u_i(h) = 0)$ ، می‌تواند مطابق (۱۷-۳) رزرو غیرچرخان برای سیستم فراهم کند.

$$0 \leq R_i^{NS}(h) \leq (1 - u_i(h))\bar{R}_i^{NS,max}(h), \quad \forall i, \forall h \quad (17-3)$$

از طرف دیگر تولید بادی هر مزرعه در مرحله بازار محدود به تولید پیش‌بینی شده آن، مطابق (۱۸-۳) می‌باشد.

$$0 \leq P_k^W(h) \leq \bar{P}_k^W(h), \quad \forall k, \forall h \quad (18-3)$$

درنهایت نرخ افزایش/کاهش واحدهای تولیدی با قید (۱۹-۳) مدل می‌شود.

$$-R_i^{DO} \leq P_i^G(h+1) - P_i^G(h) \leq R_i^{UP}, \quad \forall i, \forall h < NH \quad (19-3)$$

۳-۴-۲-۳ قیود بهره‌برداری زمان-حقیقی

این قیود عملکرد زمان-حقیقی سیستم قدرت را مدل کرده و بنابراین شامل متغیرهای مرحله دوم (متغیرهای وابسته به سناریو w) می‌باشند. تصمیمات مرحله دوم با درنظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی تحمیل شده توسط بهره‌برداری زمان-حقیقی سیستم قدرت که در آینده اتفاق می‌افتد، اتخاذ می‌شوند که از نظر ریاضی با مسئله برنامه‌ریزی تصادفی مرحله دوم مدل می‌شوند.

تعادل پیوسته تولید و تقاضا در بهره‌برداری زمان-حقیقی برای هر سناریو با (۲۰-۳) مدل می‌شود.

$$\begin{aligned}
& \sum_{i \in \Omega_n^G} \left(P_i^G(h) + r_{i\omega}^U(h) - r_{i\omega}^D(h) + r_{i\omega}^{NS}(h) \right) \\
& + \sum_{k \in \Omega_n^W} \left(P_{k\omega}^W(h) - P_{k\omega}^{W,Spill}(h) \right) \\
& - \sum_{(n,m) \in \Omega^L} b_{nm}(\delta_{n\omega}(h) - \delta_{m\omega}(h)) - \left(P_n^D(h) - P_{n\omega}^{D,shed}(h) \right) \\
& = 0, \quad n \in \Omega^B, \forall h, \forall \omega
\end{aligned} \tag{۲۰-۳}$$

قیود (۲۱-۳) و (۲۲-۳) محدودیت تولید هر واحد تولیدی را در هر ساعت و هر سناریو مشابه قیود (۸-۳) و (۹-۳) اعمال می کنند.

$$u_{i\omega(h)} \underline{P}_i^G(h) \leq \left(P_i^G(h) + r_{i\omega}^U(h) - r_{i\omega}^D(h) + r_{i\omega}^{NS}(h) \right), \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \tag{۲۱-۳}$$

$$\left(P_i^G(h) + r_{i\omega}^U(h) - r_{i\omega}^D(h) + r_{i\omega}^{NS}(h) \right) \leq u_{i\omega(h)} \bar{P}_i^G(h), \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \tag{۲۲-۳}$$

مشابه قیود (۱۲-۳)-(۱۴-۳)، قیود (۲۳-۳)-(۲۵-۳) محدودیت های شبکه را در بهره برداری زمان-حقیقی مدل می کنند.

$$-\bar{P}_{nm}^L \leq b_{nm}(\delta_{n\omega}(h) - \delta_{m\omega}(h)) \leq \bar{P}_{nm}^L, \quad \forall (n,m) \in \Omega^L, \forall h, \forall \omega \tag{۲۳-۳}$$

$$-\pi \leq \delta_{n\omega}(h) \leq \pi, \quad \forall n \in \Omega^B, \forall h, \forall \omega \tag{۲۴-۳}$$

$$\delta_{n\omega} = 0, \quad n: reference\ bus, \forall h, \forall \omega \tag{۲۵-۳}$$

قیود (۲۶-۳)-(۲۸-۳) به ترتیب تولید واقعی بادی، ریزش بادی و مقدار بار قطع شده را به حداکثر مقادیر خود محدود می کنند.

$$0 \leq P_{k\omega}^W(h) \leq \bar{P}_{k\omega}^W(h), \quad \forall k, \forall h, \forall \omega \tag{۲۶-۳}$$

$$0 \leq P_{k\omega}^{W,Spill}(h) \leq P_{k\omega}^W(h), \quad \forall k, \forall h, \forall \omega \tag{۲۷-۳}$$

$$0 \leq P_{n\omega}^{D,shed}(h) \leq P_n^D(h), \quad \forall n \in \Omega^B, \forall h, \forall \omega \tag{۲۸-۳}$$

قیود (۲۹-۳)-(۳۲-۳) هزینه راه‌اندازی و هزینه خاموشی واحدهای تولیدی را در تابع هدف بصورت

خطی مدل می‌کنند.

$$(u_{i\omega}(h) - u_{i\omega}(h-1))C_i^{SU}(h) \leq SUC_{i\omega}, \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (29-3)$$

$$0 \leq SUC_{i\omega}, \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (30-3)$$

$$(u_{i\omega}(h-1) - u_{i\omega}(h))C_i^{SD}(h) \leq SDC_{i\omega}, \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (31-3)$$

$$0 \leq SDC_{i\omega}, \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (32-3)$$

در نهایت قیود (۳۳-۳)-(۳۸-۳) محدودیت بین-زمانی واحدهای تولیدی را بیان می‌کنند. توضیحات

بیش‌تر در مورد مدل‌سازی این قیود در [۵] آمده است.

$$\sum_{h=1}^{H_i^{ON}} u_{i\omega}(h) = H_i^{ON} \quad \forall i, \forall \omega \quad (33-3)$$

$$\begin{aligned} (NH - h + 1)(u_{i\omega}(h) - u_{i\omega}(h-1)) \\ \leq \sum_{t=h}^{NH} u_{i\omega}(t) \quad \forall i, \forall h = NH - H_i^{UP} + 2, \dots, NH, \forall \omega \end{aligned} \quad (34-3)$$

$$\begin{aligned} H_i^{UP}(u_{i\omega}(h) - u_{i\omega}(h-1)) \\ \leq \sum_{t=h}^{H_i^{UP}+h-1} u_{i\omega}(t) \quad \forall i, \forall h \\ = H_i^{ON} + 1, \dots, NH - H_i^{UP} + 1, \forall \omega \end{aligned} \quad (35-3)$$

$$\sum_{h=1}^{H_i^{OFF}} u_{i\omega}(h) = 0 \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (36-3)$$

$$H_i^{DO}(u_{i\omega}(h-1) - u_{i\omega}(h)) \leq \sum_{t=h}^{H_i^{DO}+h-1} (1 - u_{i\omega}(t)) \quad \forall i, \quad (37-3)$$

$$\forall h = H_i^{OFF} + 1, \dots, NH - H_i^{DO} + 1, \forall \omega$$

$$(NH - h + 1)(u_{i\omega}(h-1) - u_{i\omega}(h)) \leq \sum_{t=h}^{NH} (1 - u_{i\omega}(t)) \quad \forall i, \forall h = NH - H_i^{DO} + 2, \dots, NH, \forall \omega \quad (38-3)$$

۳-۴-۲-۴ قیود پیوندی

این قیود تصمیمات بازارهای انرژی و رزرو را به بهره‌برداری زمان حقیقی سیستم قدرت مرتبط می‌کنند. بنابراین این قیود شامل متغیرهای مرحله اول و دوم می‌باشند.

میزان رزروی که یک واحد تولیدی در پاسخ به یک پیشامد بکار می‌گیرد، محدود به مقدار تعیین شده در مرحله اول برای هر نوع رزرو می‌باشد. قیود (۳۹-۳) تا (۴۱-۳) به ترتیب این محدودیت‌ها را برای رزرو بالارونده، پایین رونده و رزرو غیرچرخان اعمال می‌کنند.

$$0 \leq r_{i\omega}^U(h) \leq R_i^U(h), \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (39-3)$$

$$0 \leq r_{i\omega}^D(h) \leq R_i^D(h), \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (40-3)$$

$$0 \leq r_{i\omega}^{NS}(h) \leq R_i^{NS}(h), \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (41-3)$$

قید (۴۲-۳) مشابه قید (۱۱-۳)، رزرو بکار گرفته شده در بهره‌برداری زمان حقیقی را که از جنس انرژی می‌باشد، از طریق متغیر $r_{ij\omega}^G(h)$ به بلوک‌های انرژی تجزیه می‌کند. هم‌چنین قید (۴۳-۳) بلوک‌های رزرو بکار گرفته شده را به حد بالا و حد پایین خود محدود می‌کند.

$$r_{i\omega}^U(h) - r_{i\omega}^D(h) + r_{i\omega}^{NS}(h) = \sum_{j=1}^{NB} r_{ij\omega}^G(h), \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (42-3)$$

$$-P_{ij}^G(h) \leq r_{ij\omega}^G(h) \leq \left(\bar{P}_{ij}^G(h) - P_{ij}^G(h) \right), \quad \forall i, \forall h, \forall j, \forall \omega \quad (43-3)$$

۳-۵ جمع بندی و نتیجه گیری

در این فصل، الگوریتم مورد استفاده برای مدل سازی عدم قطعیت تولید بادی با در نظر گرفتن همبستگی زمانی-مکانی مزارع بادی ارائه شد. سپس مسئله بهره برداری بازارهای انرژی و رزرو توان به صورت یک مسئله تصادفی دو مرحله ای فرمول بندی شد.

مدل ارائه شده دارای مزیت های زیر می باشد:

۱. قیود فنی واحدهای تولیدی، رزرو چرخان/ غیرچرخان، قیود فنی شبکه و قیود بین زمانی واحدهای تولیدی در مدل لحاظ شده اند.
۲. مدل ارائه شده برای برنامه ریزی ۲۴ ساعت بعد فرمول بندی شده است، با این حال در صورت نیاز، مدل ارائه شده این قابلیت را دارد که در بازه های زمانی متفاوت برنامه ریزی مورد استفاده قرار گیرد.
۳. هرچند تولید بادی به عنوان تنها منشأ عدم قطعیت در سیستم مدل شده است، اما می توان به طور مشابه عدم قطعیت بار، خروج واحدهای تولیدی و خروج خطوط را نیز در مدل لحاظ کرد.

فصل چهارم

شبیه‌سازی

۴-۱ مقدمه

از دیدگاه اقتصادی در ارزیابی مزایای تولید بادی در سیستم قدرت، دو جنبه متضاد و مخالف باید در نظر گرفته شوند. از یک طرف اتصال تولید بادی به سیستم قدرت منجر به کاهش هزینه بهره‌برداری می‌شود، چون مزارع بادی با قیمت صفر در بازار شرکت می‌کنند و معمولاً با واحدهایی که هزینه سوخت بالایی دارند جایگزین می‌شوند. از طرف دیگر ماهیت متغیر تولید بادی منجر به عدم قطعیت در سیستم می‌شود و بهره‌بردار بازار مجبور به برنامه‌ریزی رزرو بیش‌تر برای حفظ امنیت سیستم می‌شود. این رزرو اضافی منجر به پرداخت هزینه بیش‌تر به تولیدکنندگان می‌شود. بنابراین در ارزیابی منفعت اتصال مزارع بادی به سیستم قدرت، این دو عامل متضاد باید در نظر گرفته شود. در نظر گرفتن همبستگی تولید بادی مزارع حتی باعث پیچیده‌تر شدن ارزیابی منفعت تولید بادی در سیستم قدرت می‌شود. در این فصل تأثیر در نظر گرفتن همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی و هم-چنین افزایش سطح نفوذ تولید بادی بر بهره‌برداری بازارهای انرژی و رزرو از نظر آماری ارزیابی می‌شود.

در بخش دوم سناریوهای همبسته توان بادی به کمک الگوریتم ذکر شده در فصل سوم تولید می‌شوند. صحت روش تولید سناریو با یک روش آماری سنجیده می‌شود. در بخش سوم، با حذف رزرو غیرچرخان، مسئله تسویه توأم بازارهای انرژی و رزرو دوباره فرمول‌بندی می‌شود که بار محاسباتی و زمان حل آن بسیار کمتر است. در بخش چهارم، شبکه شش باسه، اطلاعات واحدهای تولیدی، اطلاعات خطوط و اطلاعات بار معرفی می‌شود. شبیه‌سازی در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن همبستگی تولید بادی بین مزارع انجام می‌شود. برای بررسی افزایش سطح نفوذ تولید بادی بر تسویه بازار، مدل پیشنهادی برای سه سطح نفوذ مختلف تولید بادی اجرا و نتایج تسویه بازار از دیدگاه دیسپچ انرژی و رزرو و هزینه‌های مرتبط مقایسه می‌شوند. در نهایت در بخش پنجم، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از مطالب مطرح شده در این فصل ارائه می‌شود.

۴-۲ تولید سناریوهای همبسته توان بادی

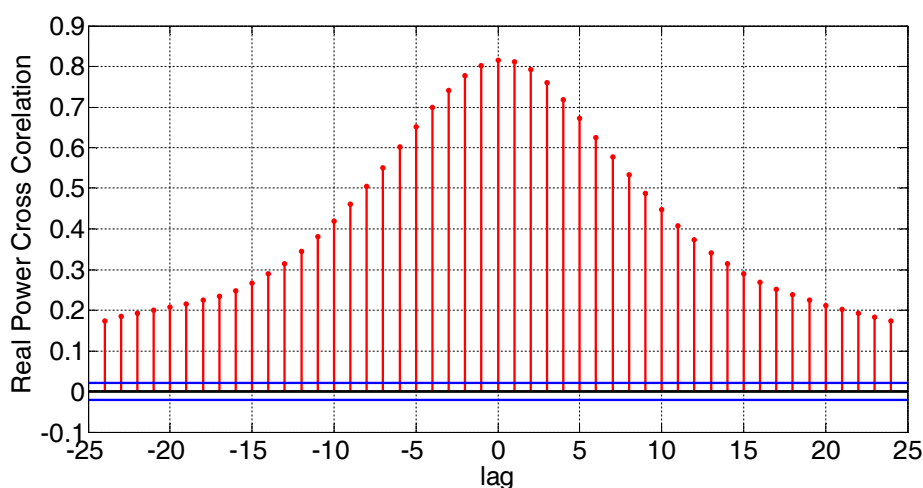
در این جا روش پیشنهادی برای مدل سازی عدم قطعیت که در بخش ۳-۲ ارائه شد، برای مدل سازی رفتار باد بر روی اطلاعات واقعی سری زمانی سرعت و تولید بادی دو مزرعه بادی واقع در ناحیه ماساچوست آمریکا پیاده سازی شده است. اطلاعات جغرافیایی دو مزرعه در جدول ۴-۱ آمده است.

جدول ۴-۱: اطلاعات جغرافیایی دو مزرعه بادی انتخاب شده

شماره مزرعه	عرض جغرافیایی [N]	طول جغرافیایی [W]
۱	۴۲/۰۴۵۳۵۳	-۷۰/۱۰۱۴۱
۲	۴۱/۲۸۱۳۶۴	-۷۰/۱۰۳۱۱۹

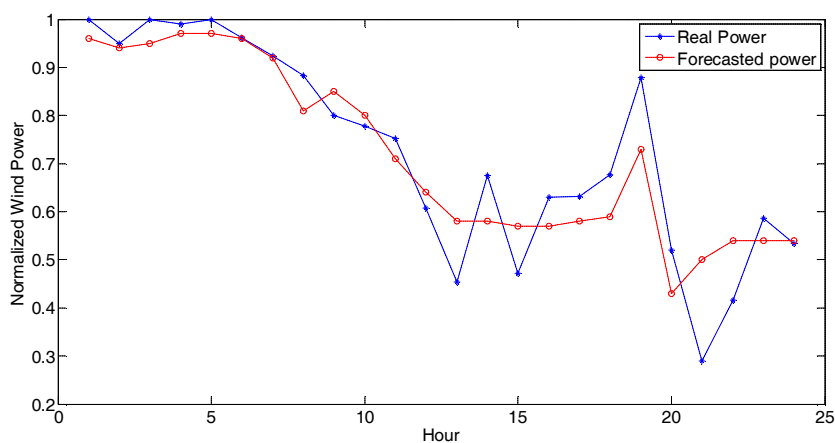
توزیع جغرافیایی دو مزرعه بادی به گونه ای است که فاصله دو مزرعه از هم تقریباً ۸۵ کیلومتر می باشد. اطلاعات سرعت باد اندازه گیری شده و توان بادی تولید شده در هر ۵ دقیقه مربوط به سال ۲۰۱۲ می باشد [۶۰]. به منظور تولید سناریوهای ساعتی سرعت باد، متوسط ساعتی اطلاعات سرعت باد محاسبه شده و به عنوان اطلاعات گذشته مورد استفاده قرار گرفته است. اطلاعات ساعتی تولید بادی دو مزرعه بر ظرفیت نامی خود تقسیم شده تا اطلاعات نرمالیز شده تولید بادی (بین صفر و یک) به دست آید. به دلیل فاصله کوتاه بین دو مزرعه، انتظار می رود ضرایب همبستگی مکانی بین دو مزرعه مثبت و معنی دار باشد، که شکل ۴-۱ این موضوع را تأیید می کند.

توربین بادی نصب شده در هر دو مزرعه، توربین ۲ مگاواتی با ارتفاع سنسور ۱۰۰ متر می باشد. اطلاعات بیش تر درباره توربین نصب شده و منحنی توان آن در [۶۱] آمده است.

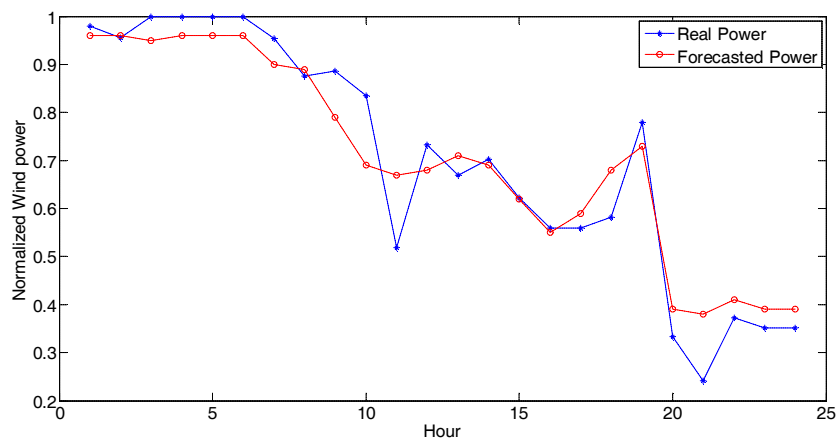


شکل ۴-۱: ضرایب همبستگی مکانی بین دو مزرعه بادی

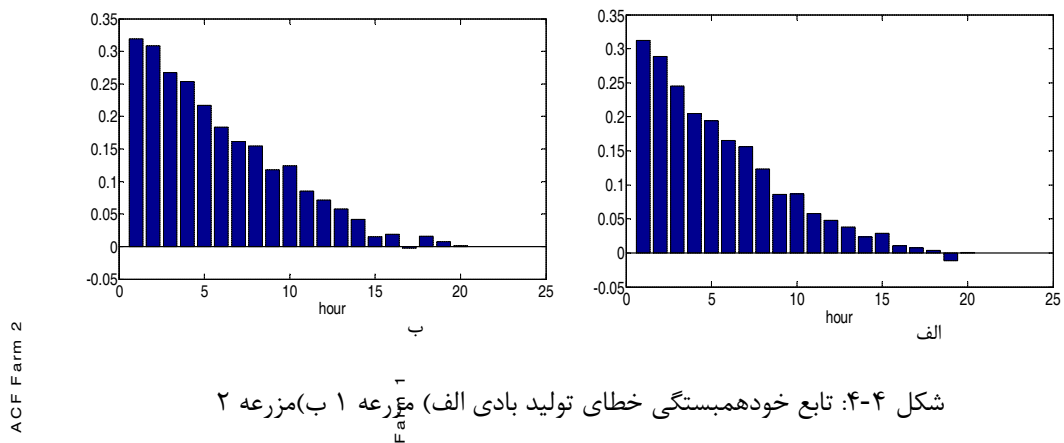
روش ارائه شده برای تولید ۵۰۰۰ سناریو همبسته توان بادی برای ۲۴ ساعت روز ۳۱ دسامبر مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور ابتدا تابع فازی با استفاده از اطلاعات گذشته سرعت و تولید بادی دو مزرعه، تولید بادی را برای ۲۴ ساعت روز ۳۱ دسامبر پیش‌بینی می‌کند. پیش‌بینی فازی و تولید واقعی بادی برای ۲۴ ساعت روز مورد نظر برای مزارع یک و دو به ترتیب در شکل‌های ۴-۲ و ۴-۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: تولید بادی واقعی و پیش‌بینی شده مزرعه ۱

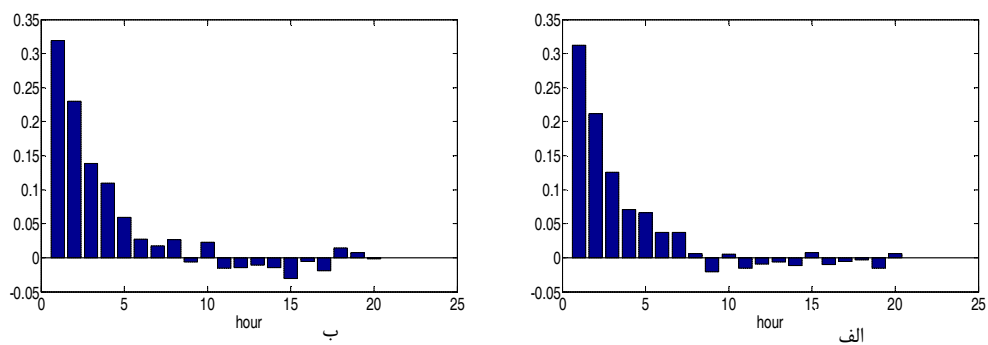


شکل ۴-۳: تولید بادی واقعی و پیش‌بینی شده مزرعه ۲



شکل ۴-۴: تابع خودهمبستگی خطای تولید بادی الف) مزرعه ۱ ب) مزرعه ۲

ACF Farm 2



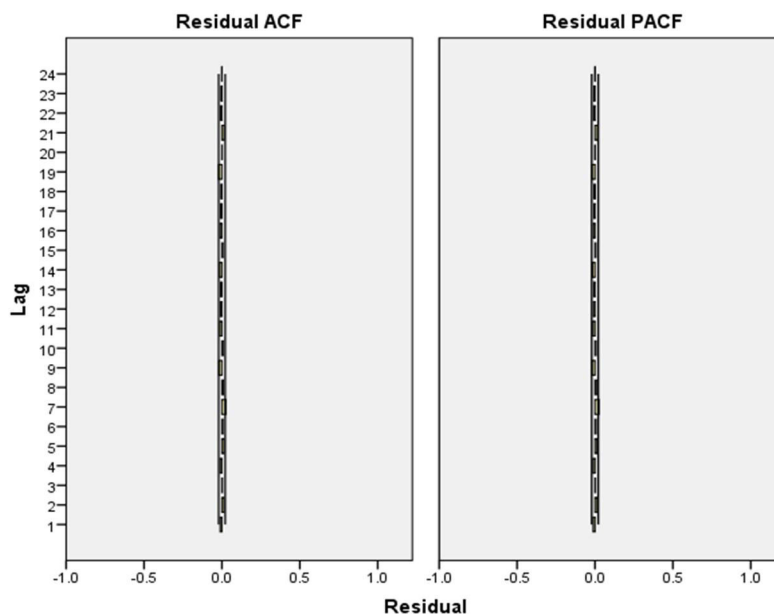
شکل ۴-۵: تابع خودهمبستگی جزئی خطای تولید بادی الف) مزرعه ۱ ب) مزرعه ۲

در مرحله بعد مقادیر پیش‌بینی از مقدار تولید واقعی مزارع کم شده و خطاهای به‌دست آمده به

حوزه نرمال انتقال می‌یابند. سپس با توجه به شکل تابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی اطلاعات خطای تولید بادی مزارع، مدل آرما مناسب انتخاب شده است. شکل‌های ۴-۴ و ۴-۵

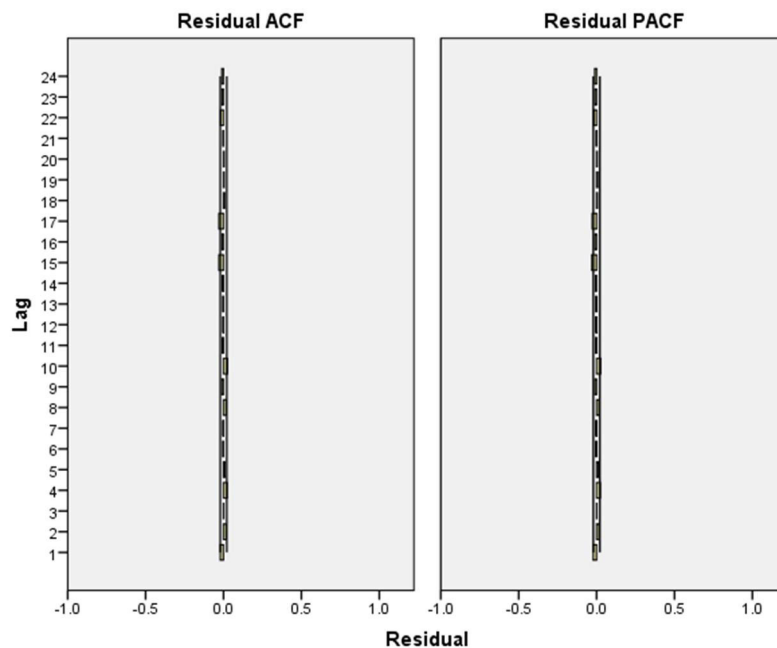
PACF Farm 2

به ترتیب نشان دهنده توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی دو مزرعه می باشند. برای این منظور خطای تولید بادی دو مزرعه به نرم افزار SPSS منتقل می شود. با اعمال مدل آرمای مناسب بر روی این اطلاعات و تحلیل منحنی های ACF و PACF، مدل $ARMA(1,1)$ برای هر دو مزرعه پیشنهاد می شود. با بررسی شکل توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی مزارع یک و دو که به ترتیب در شکل های ۴-۶ و ۴-۷ نشان داده شده است، مناسب بودن مدل اثبات می شود؛ همان طور که مشخص است مقادیر توابع برای تمام تأخیرهای زمانی ناچیز است؛ به عبارتی مدل آرما تمام همبستگی تولید بادی را تسخیر کرده است.



شکل ۴-۶: توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای مدل سازی مزرعه ۱

با مشخص شدن مدل آرما و پیش بینی تولید بادی به روش فازی، سناریوهای همبسته توان بادی با روش ذکر شده در بخش ۳-۲-۲ تولید می شوند. در این جا برای نمونه مجموعه ای از ۵۰ سناریو توان بادی تولید شده دو مزرعه برای ۲۴ ساعت روز مورد مطالعه به ترتیب برای مزارع یک و دو در شکل های ۴-۸ و ۴-۹ نشان داده شده است.

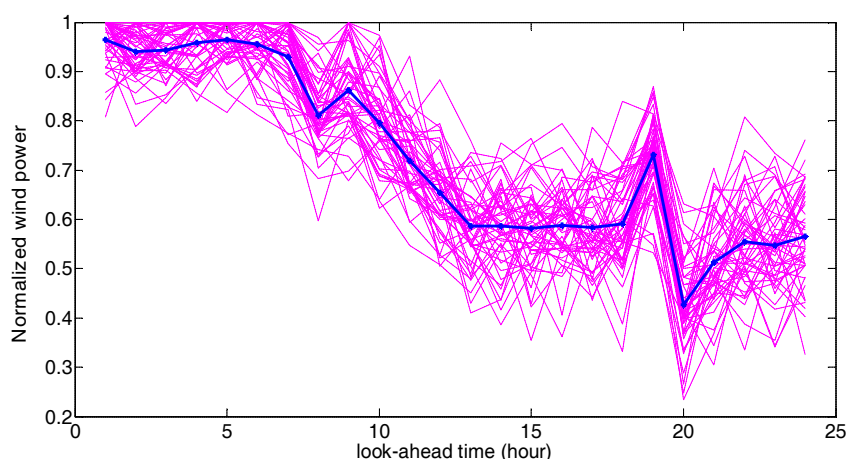


شکل ۴-۷: توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای مدل‌سازی مزرعه ۲

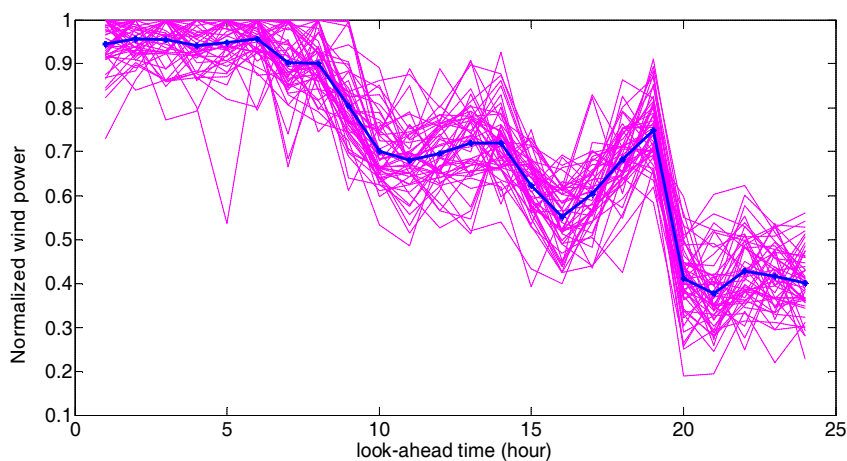
۴-۲-۱ اعتبارسنجی روش تولید سناریو

برای تحلیل دقت مدل‌سازی همبستگی بین تولید بادی دو مزرعه، ۵۰۰۰ سناریو همبسته برای ۲۴ ساعت روز مورد مطالعه تولید شده است. بر اساس سناریوهای تولید شده، ماتریس همبستگی آن‌ها با ابعاد 48×48 محاسبه و با ماتریس همبستگی خطاهای تولید بادی مقایسه شده است. در این-جا این دو ماتریس از هم کم شده، و برای ماتریس حاصل، معیار جذر میانگین مربعات^۱ (RMSD) که یک ابزار خوب برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی می‌باشد [۶۲]، محاسبه می‌شود. مقدار به‌دست آمده برابر ۰/۰۱۵۹ می‌باشد، که نشان‌دهنده عملکرد خوب روش تولید سناریو برای مدل‌سازی همبستگی تولید بادی می‌باشد.

^۱ Root-mean-square deviation



شکل ۴-۸: ۵۰ سناریو تولید بادی و متوسط آن برای مزرعه ۱



شکل ۴-۹: ۵۰ سناریو تولید بادی و متوسط آن برای مزرعه ۲

۴-۳ فرمول بندی مجدد مدل تسویه بازار

حل مدل پیشنهادی (۳-۶) - (۳-۴۳) بسیار زمان‌بر می‌باشد، و بار محاسباتی عمدتاً به دلیل متغیرهای باینری مورد نیاز برای تعیین وضعیت روشن/خاموش بودن واحدهای تولیدی می‌باشد. تعداد این متغیرهای باینری به‌طور شدیدی با افزایش تعداد سناریوهای در نظر گرفته شده، افزایش می‌یابد (برای ۵۰۰۰ سناریوی تولید شده در بخش قبل ۳۶۰۰۷۲ متغیر باینری خواهیم داشت). از این تعداد سهم متغیر باینری جهت مدل‌سازی رزرو غیرچرخان بکارگرفته شده برای هر واحد تولیدی، هر ساعت و هر سناریو ۹۹/۹٪ می‌باشد. از طرفی مطابق [۲، ۳۲]، در نظر گرفتن هزینه‌های رزرو غیرچرخان

تأثیر چندانی بر هزینه متوسط سیستم ندارد، در حالی که زمان اجرای برنامه تسویه بازار را حدود ۹۰٪ افزایش می‌دهد.

در اینجا برای اینکه مسئله تسویه بازار با استفاده از کامپیوترهای عادی و در یک زمان معقول قابل حل شود، و بهره‌بردار بازار بتواند در زمان مناسب برنامه‌ریزی رزرو و انرژی را انجام دهد، رزرو غیرچرخان مدل نشده است. در این حالت تعداد متغیرهای باینری به ۷۲ عدد کاهش می‌یابد. از نظر ریاضی، چون در این حالت وضعیت روشن و خاموش بودن واحدهای تولیدی در هر دو مرحله بازار روز قبل و بهره‌برداری زمان حقیقی یکسان است، متغیرهای $SUC_{i\omega}/SDC_{i\omega}$ مستقل از سناریو خواهند شد. فرمول‌بندی مجدد مسئله بدون در نظر گرفتن رزرو غیرچرخان واحدهای تولیدی در ادامه آمده است.

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & \sum_{h=1}^{NH} \sum_{i=1}^{NG} SUC_i(h) + SDC_i(h) + \sum_{j=1}^{NB} C_{ij}^G(h) P_{ij}^G(h) \\
 & + \sum_{h=1}^{NH} \sum_{i=1}^{NG} \left(C_i^U(h) R_i^U(h) + C_i^D(h) R_i^D(h) \right) \\
 & + \sum_{\omega=1}^{N\Omega} \pi_{\omega} \left\{ \sum_{h=1}^{NH} \left[\sum_{i=1}^{NG} \sum_{j=1}^{NB} C_{ij}^G(h) r_{ij\omega}^G \right. \right. \\
 & + \sum_{n=1}^{ND} C_n^{Shed}(h) P_{n\omega}^{D,shed}(h) \\
 & \left. \left. + \sum_{k=1}^{NF} C_k^{Spill}(h) P_{k\omega}^{W,spill}(h) \right] \right\} \quad (۱-۴)
 \end{aligned}$$

مقید به:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i \in \Omega_n^G} P_i^G(h) + \sum_{k \in \Omega_n^W} P_k^W(h) \\
& \quad - \sum_{(n,m) \in \Omega^L} b_{nm} \left(\delta_{n,0}(h) - \delta_{m,0}(h) \right) \\
& \quad - P_n^D(h) = 0, \quad \forall n \in \Omega^B, \forall h
\end{aligned} \tag{Y-4}$$

$$u_{i(h)} \underline{P}_i^G \leq \left(P_i^G(h) - R_i^D(h) \right), \quad \forall i, \forall h \tag{Y-4}$$

$$\left(P_i^G(h) + R_i^U(h) \right) \leq u_i(h) \bar{P}_i^G, \quad \forall i, \forall h \tag{Y-4}$$

$$0 \leq P_{ij}^G(h) \leq \bar{P}_{ij}^G, \quad \forall i, \forall h, \forall j \tag{Y-4}$$

$$P_i^G(h) = \sum_{j=1}^{NB} P_{ij}^G(h), \quad \forall i, \forall h \tag{Y-4}$$

$$-\bar{P}_{nm}^L \leq b_{nm} \left(\delta_{n,0}(h) - \delta_{m,0}(h) \right) \leq \bar{P}_{nm}^L, \quad \forall (n, m) \in \Omega^L, \forall h \tag{Y-4}$$

$$-\pi \leq \delta_{n,0}(h) \leq \pi, \quad \forall n \in \Omega^B, \forall h \tag{Y-4}$$

$$\delta_{n,0} = 0, \quad n: \text{reference bus}, \forall h \tag{Y-4}$$

$$0 \leq R_i^U(h) \leq u_i(h) \bar{R}_i^U(h), \quad \forall i, \forall h \tag{Y-4}$$

$$0 \leq R_i^D(h) \leq u_i(h) \bar{R}_i^D(h), \quad \forall i, \forall h \tag{Y-4}$$

$$0 \leq P_k^W(h) \leq \bar{P}_k^W(h), \quad \forall k, \forall h \tag{Y-4}$$

$$(u_i(h) - u_i(h-1)) C_i^{SU}(h) \leq SUC_i, \quad \forall i, \forall h \tag{Y-4}$$

$$0 \leq SUC_i \quad \forall i, \forall h \tag{Y-4}$$

$$(u_i(h-1) - u_i(h)) C_i^{SD}(h) \leq SDC_i, \quad \forall i, \forall h \tag{Y-4}$$

$$0 \leq SDC_i, \quad \forall i, \forall h \tag{Y-4}$$

$$\sum_{h=1}^{H_i^{ON}} u_i(h) = H_i^{ON}, \quad \forall i \quad (17-4)$$

$$(NH - h + 1)(u_i(h) - u_i(h - 1)) \leq \sum_{t=h}^{NH} u_i(t), \quad \forall i, \forall h = NH - H_i^{UP} + 2, \dots, NH \quad (18-4)$$

$$\begin{aligned} H_i^{UP}(u_i(h) - u_i(h - 1)) &\leq \sum_{t=h}^{H_i^{UP}+h-1} u_i(t), \quad \forall i, \forall h \\ &= H_i^{ON} + 1, \dots, NH - H_i^{UP} + 1 \end{aligned} \quad (19-4)$$

$$\sum_{h=1}^{H_i^{OFF}} u_i(h) = 0, \quad \forall i, \forall h \quad (20-4)$$

$$\begin{aligned} H_i^{DO}(u_i(h - 1) - u_i(h)) &\leq \sum_{t=h}^{H_i^{DO}+h-1} (1 - u_i(t)), \quad \forall i, \\ \forall h &= H_i^{OFF} + 1, \dots, NH - H_i^{DO} + 1, \end{aligned} \quad (21-4)$$

$$(NH - h + 1)(u_i(h - 1) - u_i(h)) \leq \sum_{t=h}^{NH} (1 - u_i(t)), \quad \forall i, \forall h = NH - H_i^{DO} + 2, \dots, NH \quad (22-4)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \Omega_n^G} &\left(P_i^G(h) + r_{i\omega}^U(h) - r_{i\omega}^D(h) \right) \\ &+ \sum_{k \in \Omega_n^W} \left(P_{k\omega}^W(h) - P_{k\omega}^{W,Spill}(h) \right) \\ &- \sum_{(n,m) \in \Omega^L} b_{nm}(\delta_{n\omega}(h) - \delta_{m\omega}(h)) \\ &- \left(P_n^D(h) - P_{n\omega}^{D,shed}(h) \right) = 0, \quad n \in \Omega^B, \forall h, \forall \omega \end{aligned} \quad (23-4)$$

$$u_{i(h)} \underline{P}_i^G(h) \leq (P_i^G(h) + r_{i\omega}^U(h) - r_{i\omega}^D(h)), \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (24-4)$$

$$(P_i^G(h) + r_{i\omega}^U(h) - r_{i\omega}^D(h)) \leq u_i(h) \bar{P}_i^G(h), \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (25-4)$$

$$0 \leq r_{i\omega}^U(h) \leq R_i^U(h), \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (26-4)$$

$$0 \leq r_{i\omega}^D(h) \leq R_i^D(h), \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (27-4)$$

$$r_{i\omega}^U(h) - r_{i\omega}^D(h) = \sum_{j=1}^{NB} r_{ij\omega}^G(h), \quad \forall i, \forall h, \forall \omega \quad (28-4)$$

$$-P_{ij}^G(h) \leq r_{ij\omega}^G(h) \leq (\bar{P}_{ij}^G(h) - P_{ij}^G(h)), \quad \forall i, \forall h, \forall j, \forall \omega \quad (29-4)$$

$$0 \leq P_{n\omega}^{D,shed}(h) \leq P_n^D(h), \quad \forall n \in \Omega^B, \forall h, \forall \omega \quad (30-4)$$

$$0 \leq P_{k\omega}^{W,spill} \leq P_{k\omega}^W(h), \quad \forall k, \forall h, \forall \omega \quad (31-4)$$

دقت شود که فرمول‌بندی ارائه‌شده یک فرمول‌بندی جامع با در نظر گرفتن تمام قیود فنی واحدهای تولیدی، محدودیت‌های شبکه، قیود بین زمانی و عدم قطعیت تولید بادی می‌باشد و حذف متغیر رزرو غیرچرخان خللی در مدل ایجاد نمی‌کند. در بخش بعد این فرمول‌بندی ابتدا روی سیستم ۶ باسه اجرا شده و نتایج از نظر آماری به تفصیل بررسی می‌شوند. سپس برای تأیید آثار همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی بر بازارهای انرژی و رزرو واقعی، مدل طرح شده بر سیستم ۱۱۸ باسه اجرا و نتایج مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

۴-۴ مطالعه موردی اول: سیستم ۶ باسه

در این بخش به بررسی آثار همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی بر تسویه بازار انرژی و رزرو توأم در یک سیستم ۶ باسه پرداخته می‌شود. در ابتدا سیستم و اطلاعات آن معرفی و سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه می‌شود.

۴-۴-۱ اطلاعات سیستم ۶ باسه

سیستم ۶ باسه مورد مطالعه در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. اطلاعات این شبکه از مرجع [۶۳] استخراج و جهت تسویه بازار انرژی و رزرو توأم اصلاح شده است. این شبکه متشکل از هفت خط، سه واحد تولید حرارتی، سه بار و دو مزرعه بادی می‌باشد. اطلاعات خطوط و اطلاعات واحدهای تولیدی به ترتیب در جداول ۴-۲ و ۴-۳ آمده است.

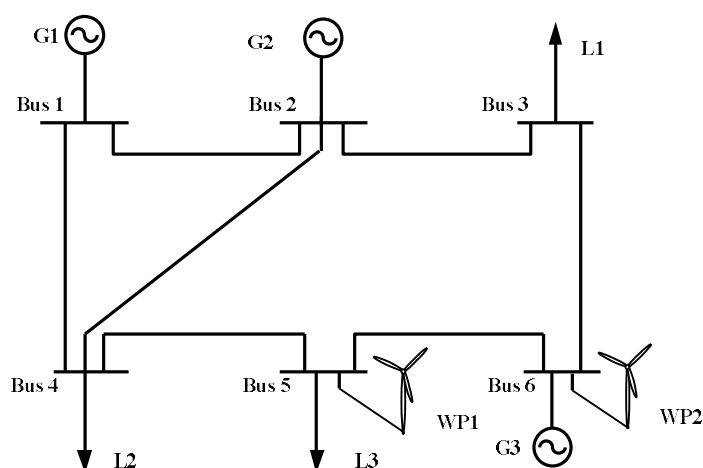
جدول ۴-۲: اطلاعات خطوط سیستم ۶ باسه

باس ابتدا	۱	۱	۲	۵	۳	۲	۴
باس انتها	۲	۴	۴	۶	۶	۳	۵
راکتانس (p.u.)	۰/۱۷	۰/۲۵۸	۰/۱۹۷	۰/۱۴	۰/۰۱۸	۰/۰۳۷	۰/۰۳۷
ظرفیت (MW)	۲۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۲۰۰

جدول ۴-۳: اطلاعات واحدهای تولیدی سیستم ۶ باسه

شماره واحد	$\bar{P}_i^G$ (MW)	P_i^G (MW)	SUC_i (\$)	SDC_i (\$)	H_i^{UP} (h)	H_i^{DN} (h)	R_i^{UP}/R_i^{DO} (MW/h)	H_i^{ON} (h)	H_i^{OFF} (h)
۱	۲۲۰	۱۰۰	۳۶۰	۵۰	۴	۴	۵۵	۴	۰
۲	۱۴۰	۵۰	۱۸۰	۴۰	۲	۳	۵۰	۱	۰
۳	۲۰	۱۰	۵۰	۰	۱	۱	۱۵	۰	۱

توزیع بار در باس‌های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب ۲۰٪، ۴۰٪ و ۴۰٪ بار کل سیستم در هر ساعت می‌باشد. اطلاعات بار و تولید بادی پیش‌بینی شده برای مزارع یک و دو برای بازه زمانی ۲۴ ساعت در جدول ۴-۴ آمده است. هم‌چنین الگوی بار روزانه سیستم در شکل ۴-۱۱ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۰: دیاگرام تک خطی سیستم ۶ باسه

جدول ۴-۴: بار کل سیستم ۶ باسه و تولید بادی پیش‌بینی شده مزارع ۱ و ۲ برای ۲۴ ساعت روز مورد مطالعه

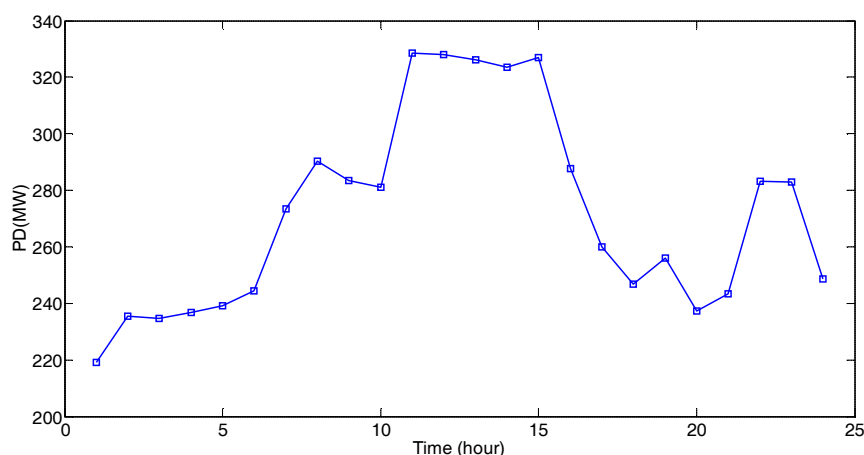
(مقادیر به مگاوات)

ساعت	بار کل	تولید بادی مزرعه ۱	تولید بادی مزرعه ۲	ساعت	بار کل	تولید بادی مزرعه ۱	تولید بادی مزرعه ۲
۱	۲۱۹/۱۹	۱۵/۲۲۱۳	۲۰/۹۳۹۹	۱۳	۳۲۶/۱۸	۹/۴۴۰۹	۱۵/۸۰۲۲
۲	۲۳۵/۳۵	۱۴/۹۰۸۲	۲۰/۹۷۴۸	۱۴	۳۲۳/۶۰	۹/۳۹۵۷	۱۵/۴۰۳۰
۳	۲۳۴/۶۷	۱۵/۰۶۷۷	۲۰/۸۲۶۳	۱۵	۳۲۶/۸۶	۹/۳۲۱۰	۱۳/۹۴۸۸
۴	۲۳۶/۷۳	۱۵/۲۹۸۹	۲۰/۹۴۱۱	۱۶	۲۸۷/۷۹	۹/۳۴۹۷	۱۲/۲۳۸۶
۵	۲۳۹/۰۶	۱۵/۳۱۰۴	۲۰/۹۲۴۳	۱۷	۲۶۰/۰۰	۹/۴۳۸۵	۱۳/۲۶۵۸
۶	۲۴۴/۴۸	۱۵/۱۸۵۶	۲۰/۹۵۳۸	۱۸	۲۴۶/۷۴	۹/۵۶۸۹	۱۵/۲۱۰۹
۷	۲۷۳/۳۹	۱۴/۷۵	۱۹/۹۶۴۴	۱۹	۲۵۵/۹۷	۱۱/۷۷۷۲	۱۶/۲۴۶۱
۸	۲۹۰/۴۰	۱۳/۰۳۵۹	۱۹/۸۱۱۵	۲۰	۲۷۳/۳۵	۷/۰۸۵۳	۸/۹۱۲۸
۹	۲۸۳/۵۶	۱۳/۶۳۷	۱۷/۷۶۵۴	۲۱	۲۴۳/۳۱	۸/۱۹۵۸	۸/۵۱۳۰
۱۰	۲۸۱/۲۰	۱۲/۸۶۷۳	۱۵/۵۱۰۶	۲۲	۲۸۳/۱۴	۸/۹۰۰۳	۹/۲۷۶۳
۱۱	۳۲۸/۶۱	۱۱/۴۶۱۸	۱۵/۱۰۴۵	۲۳	۲۸۳/۰۵	۸/۷۹۴۱	۸/۸۵۲۰
۱۲	۳۲۸/۱۰	۱۰/۴۱۷۶	۱۵/۲۹۷۸	۲۴	۲۴۸/۷۵	۸/۷۷۶۹	۸/۸۳۵۵

لازم به ذکر است ظرفیت مزارع بادی ۱ و ۲ به ترتیب ۱۶ مگاوات و ۲۲ مگاوات می‌باشد. در این

حالت سطح نفوذ بادی که نسبت ظرفیت کل مزارع بادی نصب شده در سیستم به ظرفیت کل

واحدهای قابل دیسپچ تعریف می‌شود، برابر ۱۰٪ می‌باشد.



شکل ۴-۱۱: الگوی بار روزانه سیستم ۶ باسه

جدول ۴-۵: بلوک‌های انرژی و قیمت پیشنهادی هر مگاوات انرژی و رزرو چرخان واحدهای تولیدی

واحد	بلوک‌های انرژی (MW)		بلوک‌های قیمت (\$/MWh)		قیمت پیشنهادی رزرو ظرفیت (\$/MW)
	بلوک ۱	بلوک ۲	بلوک ۱	بلوک ۲	
۱	۱۱۰	۱۱۰	۱۴	۱۵	۳/۷۵
۲	۷۰	۷۰	۱۶	۱۹	۴/۷۵
۳	۱۰	۱۰	۲۱	۲۷	۶/۷۵

در این پایان‌نامه فرض می‌شود هر واحد تولیدی حداکثر مقدار ممکن رزرو چرخان ($\bar{P}_i^G - \underline{P}_i^G$) را به بازار پیشنهاد می‌دهد. اطلاعات بلوک‌های انرژی و قیمت پیشنهادی انرژی و رزرو هر واحد تولیدی در جدول ۴-۵ آمده است. فرض می‌شود تولیدکنندگان پیشنهادات خود را در دو بلوک انرژی و دو بلوک قیمت ارائه می‌دهند. هزینه رزرو بالارونده و پایین‌رونده برابر ۲۵٪ بالاترین قیمت پیشنهادی هر واحد تولیدی (قیمت پیشنهادی در بلوک دوم) در نظر گرفته می‌شود؛ در این جا برای سادگی مسئله، فرض

می‌شود پیشنهادات رزرو و انرژی واحدهای تولیدی برای تمام ساعات روز مورد مطالعه (۲۴ ساعت) بدون تغییر باقی می‌مانند.

۴-۲-۴ تأثیر همبستگی بر بهره‌برداری بازار: سیستم ۶ باسه

به‌منظور بررسی تأثیر همبستگی مکانی تولید بادی دو مزرعه بر بهره‌برداری بازار انرژی و رزرو توأم، دو مجموعه سناریو تولید شده است. $\alpha = 1$ مجموعه ۵۰۰۰ سناریو تولید شده بر اساس همبستگی واقعی دو مزرعه (که در بخش ۴-۲ تولید شد) می‌باشد. $\alpha = 0$ از ضرب ضرایب همبستگی مکانی بین مزارع ۱ و ۲ در صفر تولید می‌شود. در این حالت تولید دو مزرعه بادی مستقل از هم می‌باشد. جدول ۴-۶ برنامه‌ریزی رزرو چرخان سیستم را به تفکیک رزرو بالارونده، رزرو پایین-رونده و رزرو کل که از جمع دو مقدار قبلی به‌دست می‌آید، برای کل ۲۴ ساعت روز مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۴-۶: تأثیر همبستگی بر میزان رزرو برنامه‌ریزی شده سیستم ۶ باسه

α	رزرو بالارونده (MW)	رزرو پایین‌رونده (MW)	کل رزرو برنامه-ریزی شده (MW)
۰	۱۵۵/۱۲۸۵	۱۵۶/۸۰۰۴	۳۱۱/۹۲۸۹
۱	۱۹۰/۰۷۰۱	۱۸۳/۱۴۸۹	۳۷۳/۲۱۹

همان‌طور که پیش از این ذکر شد تنها عدم‌قطعیت موجود در سیستم، عدم‌قطعیت تولید بادی می‌باشد، و بنابراین بهره‌بردار بازار برای جبران انحراف از پیش‌بینی تولید بادی، اقدام به برنامه‌ریزی رزرو در سیستم می‌کند. همان‌طور که از جدول ۴-۶ مشخص است، در نظر گرفتن همبستگی بین دو مزرعه نیاز به رزرو بالا رونده و پایین‌رونده را افزایش می‌دهد. این موضوع از آن جهت قابل تحلیل است که در نظر گرفتن همبستگی باعث افزایش تغییرات تولید بادی سیستم شده، در نتیجه عدم-

قطعیست سیستم نیز افزایش می‌یابد و بهره‌بردار برای پوشش این عدم قطعیت اضافی مجبور به برنامه‌ریزی رزرو بیش‌تری می‌شود.

جدول ۴-۷ هزینه دیسپچ انرژی و رزرو در بازار روز قبل^۱ (DAC)، متوسط هزینه اصلاح انرژی در بهره‌برداری زمان حقیقی^۲ (ERTC) و متوسط هزینه کل^۳ (ETC) که از جمع دو مقدار قبلی به‌دست می‌آید، را نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود در نظر گرفتن همبستگی بین دو مزرعه باعث افزایش هزینه انرژی و ظرفیت رزرو می‌شود. موضوع جالب توجه، منفی بودن هزینه ERTC می‌باشد. در بهره‌برداری زمان حقیقی بهره‌بردار بازار سعی می‌کند با انجام اقدامات اصلاحی هزینه بهره‌برداری سیستم را به حداقل برساند. این اقدامات با اصلاح مقادیر برنامه‌ریزی شده در مرحله بازار انجام می‌گیرد. در این شرایط به‌دلیل اینکه رزرو پایین‌رونده بکارگرفته شده در بهره‌برداری زمان حقیقی از رزرو بالارونده در این مرحله بیش‌تر است $(r_{i\omega}^D(h) > r_{i\omega}^U(h))$ ، در نتیجه در مجموع مقدار انرژی اصلاح شده منفی شده، و بنابراین هزینه $C_{ij}^G(h)r_{ij\omega}^G$ که هزینه اصلاح انرژی در بهره‌برداری زمان حقیقی می‌باشد، مقداری منفی به‌خود می‌گیرد. توجه داشته باشید در این حالت ریزش تولید بادی و قطع اجباری بار در سیستم اتفاق نیفتاده و بنابراین هزینه تعریف شده برای آن‌ها نیز صفر می‌شود؛ این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که در بهره‌برداری زمان حقیقی تمام عدم قطعیت (نوسانات تولید بادی)، توسط رزرو بکارگرفته شده (بالارونده/پایین‌رونده) پوشش داده شده است.

¹ Day-ahead cost

² Expected real-time cost

³ Expected total cost

جدول ۴-۷: تأثیر همبستگی بر هزینه‌های سیستم ۶ باسه

α	DAC (\$)	ERTC (\$)	ETC (\$)
۰	۹۲۶۰۱	-۲۶۱۷	۸۹۹۸۴
۱	۹۳۱۲۴	-۲۸۲۱	۹۰۳۰۳

یک موضوع مهم دیگر بررسی تأثیر پارامتر α روی انحراف معیار هزینه ERTC می‌باشد. انحراف معیار هزینه ERTC با و بدون در نظر گرفتن همبستگی بین دو مزرعه بادی به‌ترتیب برابر ۴۴۲/۰۷۷ و ۳۲۵/۱۷۳ می‌باشد. دلیل این امر، افزایش انحراف معیار تولید بادی در اثر در نظر گرفتن همبستگی بین دو مزرعه می‌باشد. ذکر این نکته لازم است که درصد افزایش مقدار ERTC از نظر متوسط و انحراف معیار با در نظر گرفتن همبستگی به‌ترتیب برابر ۷/۸٪ و ۳۶٪ می‌باشد. همان‌طور که مشخص است تأثیر در نظر گرفتن همبستگی بر انحراف معیار هزینه ERTC بیش‌تر است.

جدول ۴-۸: تفکیک هزینه‌های سیستم ۶ باسه و درصد هر کدام نسبت به هزینه کل

برای حالت همبستگی و بدون همبستگی (مقادیر به \$)

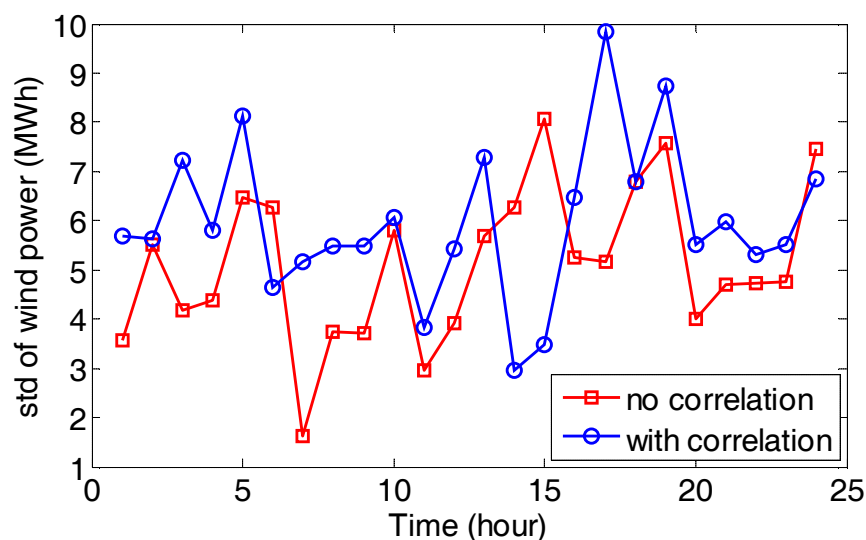
α	متوسط هزینه کل	هزینه راه‌اندازی و خاموشی	متوسط هزینه بهره‌برداری	هزینه رزرو برنامه‌ریزی شده	متوسط هزینه بارزدایی و ریزش تولید بادی
۰	۸۹۹۸۴ (۱۰۰)	۵۰ (۰/۰۵)	۸۸۶۰۱ (۹۸/۴۶)	۱۳۳۳ (۱/۴۸)	۰ (۰)
۱	۹۰۳۰۳ (۱۰۰)	۵۰ (۰/۰۵)	۸۸۶۴۵ (۹۸/۱۷)	۱۶۰۸ (۱/۷۸)	۰ (۰)

جدول ۴-۸ هزینه‌های تفکیک شده سیستم و درصد هر کدام نسبت به هزینه کل را نشان می‌دهد. متوسط هزینه بهره‌برداری برابر با مجموع هزینه تأمین انرژی در بازار روز قبل و هزینه اصلاح انرژی در بهره‌برداری زمان حقیقی تعریف شده است. مشاهده می‌شود پارامتر α روی متوسط هزینه بهره-

برداری، هزینه رزرو برنامه‌ریزی شده در بازار و هزینه کل تأثیرگذار بوده است، در حالی که روی راه-اندازی/خاموشی واحدهای تولیدی، ریزش تولید بادی و قطع اجباری بار اثرگذار نیست.

با تحلیل خروجی‌های تسویه بازار، موضوع قابل مطالعه دیگر انحراف مقادیر برنامه‌ریزی شده تولید بادی از مقادیر پیش‌بینی شده آن می‌باشد. از آن‌جا که تولید بادی بدون هزینه در نظر گرفته شده است، در نگاه اول منطقی به نظر می‌رسید که تولید بادی در مرحله بازار برابر پیش‌بینی تولید بادی، برنامه‌ریزی شود. باید توجه داشت که تولید بادی بدست آمده در مرحله بازار $P_k^W(h)$ با تولید واقعی باد $(P_{k\omega}^W(h) - P_{k\omega}^{W,Spill}(h))$ متفاوت است.

بهره‌بردار بازار طوری واحدهای قابل دیسپچ را در مدار قرار می‌دهد که هزینه اعمال اصلاحی به حداقل رسیده و بنابراین از تمام تولید بادی در مرحله دوم (بهره‌برداری زمان-حقیقی) استفاده شود. بنابراین می‌توان گفت تولید بادی در مرحله اول با رزرو برنامه‌ریزی شده در این مرحله همبستگی مثبت دارد.



شکل ۴-۱۲: تأثیر همبستگی تولید بادی بر انحراف معیار اختلاف تولید بادی واقعی و پیش‌بینی شده: سیستم ۶ باسه

در شکل ۴-۱۲ انحراف معیار اختلاف بین تولید بادی واقعی و تولید بادی برنامه‌ریزی شده در مرحله بازار برای ۲۴ ساعت روز مورد مطالعه در دو حالت با/بدون در نظر گرفتن همبستگی تولید بادی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در اکثر ساعات در نظر گرفتن همبستگی باعث افزایش اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر برنامه‌ریزی شده تولید بادی می‌شود.

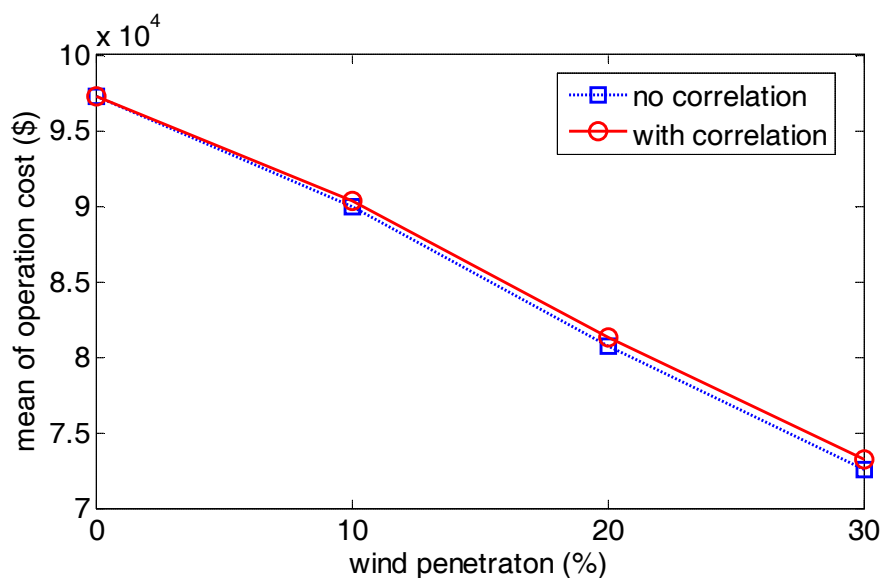
برای کسب یک دیدگاه کلی از نحوه در مدار قرار گرفتن واحدها در شبکه شش باسه، در جدول ۴-۹، مقادیر برنامه‌ریزی شده انرژی و دیسپچ هر واحد تولیدی برای ساعات ۱۰-۱۶ آمده است. توجه داشته باشید که پیک بار سیستم بین ساعات ۱۱-۱۵ اتفاق می‌افتد و در این ساعات واحد سوم که گران‌ترین واحد از نظر هزینه می‌باشد، در مدار قرار می‌گیرد.

جدول ۴-۹: مقادیر برنامه‌ریزی حاصل از تسویه سیستم ۶ باسه با در نظر گرفتن همبستگی: دیسپچ انرژی و رزرو چرخان برای ساعات پیک (مقادیر بر حسب MWh)

$R_t^D(h)$			$R_t^U(h)$			$P_k^W(h)$		$P_t^G(h)$			ساعت
G ₃	G ₂	G ₁	G ₃	G ₂	G ₁	K ₂	K ₁	G ₃	G ₂	G ₁	
۰	۷/۶	۰/۲۴	۰	۸/۷	۰/۳	۹/۴	۱۲/۸	۰	۷۷/۶	۱۸۱/۳	۱۰
۴/۵	۰/۶	۰/۲	۱/۳	۹/۵	۰/۳	۱۵/۱	۷/۸	۱۴/۵	۱۳۰/۵	۱۶۰/۶	۱۱
۲/۹	۴/۳	۰	۴/۸	۵/۷	۰	۱۵/۳	۵	۱۴/۵	۱۳۴/۳	۱۶۰/۶	۱۲
۳/۹	۵	۰/۳	۰	۷	۳/۱	۱۵/۸	۲/۰	۱۳/۸	۱۳۳	۱۶۱/۴	۱۳
۰/۴	۲/۷	۱/۲	۰	۱۲/۳	۰	۱۳/۰	۹/۴	۱۰/۴	۱۲۷/۶	۱۶۳/۱	۱۴
۰/۲	۴	۱/۱	۲/۹	۵/۷	۱/۳	۱۳/۹	۶/۳	۱۰/۲	۱۳۴/۳	۱۶۰/۰	۱۵
۰	۸/۳	۰	۹/۰	۹/۴	۰	۵/۷	۹/۳	۰	۹۶/۰	۱۷۶/۷	۱۶

۳-۴-۴ تأثیر سطح نفوذ تولید بادی بر بهره‌برداری بازار: سیستم ۶ با سه

در این بخش تأثیر سطح نفوذ بادی بر بهره‌برداری سیستم ۶ با سه بررسی می‌شود. همان‌طور که پیش از این بیان شد، سطح نفوذ تولید بادی، نسبت ظرفیت مزارع بادی نصب شده در سیستم به ظرفیت واحدهای تولیدی قابل دیسپچ تعریف می‌شود. شکل ۴-۱۳ هزینه کل سیستم را برای سه سطح نفوذ بادی تعریف شده نشان می‌دهد. در سطح نفوذ صفر تمام بار توسط واحدهای تولید قابل دیسپچ تأمین شده و ظرفیت نصب شده تولید بادی در سیستم برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که از روند شکل مشخص است، با افزایش سطح نفوذ تولید بادی متوسط هزینه کل سیستم کاهش می‌یابد. جدول ۴-۱۰ درصد کاهش هزینه کل سیستم را در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن همبستگی، نسبت به سطح نفوذ صفر مطابق رابطه (۴-۳۲) مقایسه می‌کند.



شکل ۴-۱۳: متوسط هزینه کل در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن همبستگی تولید توان بادی برای چهار سطح نفوذ مختلف

با در نظر گرفتن همبستگی هزینه بهره‌برداری سیستم با سطح نفوذ ۲۰٪ و ۳۰٪ نسبت به سطح نفوذ ۱۰٪ به ترتیب ۹/۹٪ و ۱۹٪ کاهش یافته است. در حالت بدون همبستگی کاهش هزینه بهره‌برداری برای حالت‌های فوق ۱۰٪ و ۱۹/۴٪ می‌باشد. همان‌طور که مشخص است، بدون همبستگی

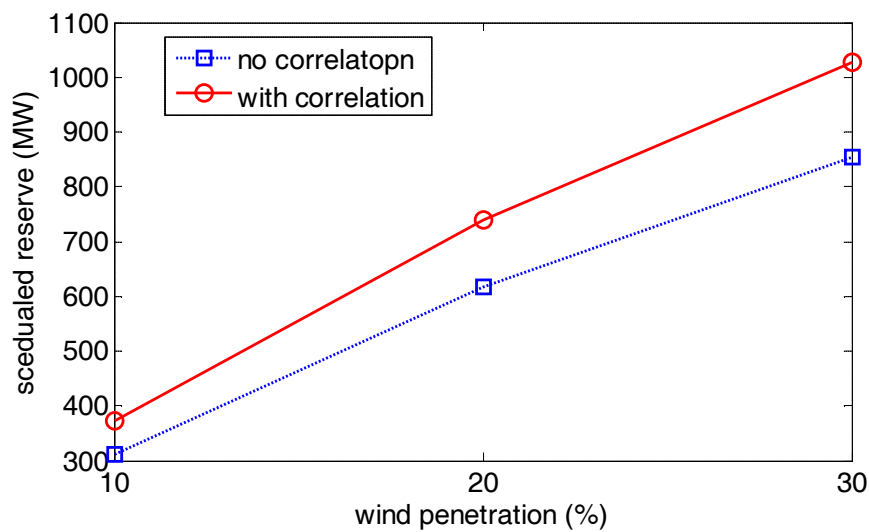
درصد کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم نسبت به با در نظر گرفتن همبستگی بیش‌تر می‌شود.

$$\%C_{difference} = \frac{ETC^{without\ wind} - ETC^{wind,\%}}{ETC^{without\ wind}} \quad (32-4)$$

جدول ۴-۱۰: درصد اختلاف هزینه کل سیستم ۶ با سه نسبت به سطح نفوذ بادی صفر

$\alpha=1$	$\alpha=0$	سطح نفوذ
۷/۱۴	۷/۴۷	۱۰
۱۶/۴۱	۱۷	۲۰
۲۴/۶۶	۲۵/۴۴	۳۰

هم‌چنین مقدار کل رزرو برنامه‌ریزی شده در مرحله بازار برای سه سطح نفوذ تعریف شده، در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است تأثیر افزایش سطح نفوذ تولید بادی بر مقدار رزرو برنامه‌ریزی شده در هر دو حالت با و بدون گرفتن همبستگی مشابه می‌باشد. این موضوع قابل پیش‌بینی نیز بود. از آن‌جایی که با افزایش سطح نفوذ تولید بادی عدم قطعیت در سیستم افزایش می‌یابد، اپراتور بازار برای پوشش این عدم قطعیت اضافی، رزرو بیش‌تری را برای سیستم برنامه‌ریزی می‌کند. در سطح نفوذ بادی صفر، هیچ عدم قطعیتی در سیستم وجود ندارد و بنابراین مدل تصادفی تسویه بازار به یک مدل قطعی تبدیل می‌شود، و بنابراین از آن‌جایی که معیاری برای تعیین رزرو در این حالت تعریف نشده است، مقدار رزرو برنامه‌ریزی شده برابر صفر می‌شود. اگرچه در این حالت هزینه پرداختی برای رزرو از هزینه‌های سیستم حذف می‌شود، اما هزینه کل بهره‌برداری سیستم به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند در ارزیابی اتصال تولید بادی به سیستم قدرت، لحاظ شود.



شکل ۴-۱۴: تأثیر سطح نفوذ بادی بر مقدار رزرو برنامه‌ریزی شده در دو حالت با و بدون در نظر

گرفتن همبستگی تولید بادی: سیستم ۶ باسه

به‌منظور کسب یک دیدگاه کلی از میزان هزینه‌های انرژی و رزرو، در جدول ۴-۱۱ هزینه‌های

تفکیک شده انرژی و رزرو در سیستم ۶ باسه آمده است.

جدول ۴-۱۰: تفکیک هزینه انرژی و رزرو در مرحله بازار برای سیستم ۶ باسه

هزینه رزرو برنامه‌ریزی شده (\$)		هزینه انرژی (\$)		سطح نفوذ بادی
$\alpha=1$	$\alpha=0$	$\alpha=1$	$\alpha=0$	(%)
۱۶۰۸	۱۳۳۳	۹۱۴۶۵	۹۱۲۱۸	۱۰
۳۰۱۱	۲۵۱۲	۸۳۱۷۰	۸۲۳۵۵	۲۰
۴۱۴۲	۳۴۴۰	۷۶۱۳۰	۷۴۱۴۱	۳۰

۴-۴-۴ تأثیر محدودیت شبکه بر بهره‌برداری بازار: سیستم ۶ باسه

به‌منظور بررسی تأثیر تراکم خطوط بر بهره‌برداری بازارهای انرژی و رزرو، ظرفیت خطوط ۵ و ۷

نصف می‌شوند. در این حالت مدل با و بدون در نظر گرفتن همبستگی اجرا شده، و هزینه بارزدایی برای سطوح نفوذ ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در جدول ۴-۱۱ آمده است.

جدول ۴-۱۱: هزینه بارزدایی در اثر تراکم خطوط در سیستم ۶ باسه برای سطوح نفوذ مختلف بادی (مقادیر به مگاوات)

هزینه بارزدایی (\$)			α
٪۳۰	٪۲۰	٪۱۰	
۰	۰	۱۵۹	۰
۰	۰	۲۱۸	۱

مشاهده می‌شود برای سطح نفوذ بادی ۱۰٪ در هر دو حالت با و بدون در نظر گرفتن همبستگی سیستم قادر به تأمین بخشی از بار نبوده است. اگرچه در سیستم کمبود تولید نداریم، و این مشاهده به دلیل تراکم خطوط و ناتوانی آن‌ها در انتقال تمام انرژی واحدهای تولید به سمت بار می‌باشد. از آن-جا که مزارع بادی در سیستم قدرت در نزدیکی مراکز بار نصب می‌شوند (مشابه سیستم ۶ باسه)، در نتیجه توان تولید شده آن‌ها نیازی به انتقال ندارد و در مراکز بار مصرف می‌شود. بنابراین می‌توان گفت مزارع بادی تراکم شبکه را کاهش می‌دهند. این موضوع با افزایش سطح نفوذ تولید بادی به ۲۰٪ و ۳۰٪ مشاهده می‌شود. در این حالت تمام بار تأمین شده است و قطعی اجباری در شبکه نداشته‌ایم.

۴-۴-۵ زمان محاسبات

اگرچه برنامه‌ریزی تصادفی برای مدل‌سازی پارامترهای غیرقطعی مناسب است، اما یکی از چالش‌های اصلی استفاده از آن، غلبه بر بار محاسباتی سنگین مسئله است. زمان مورد نیاز برای حل مدل‌های بهینه‌سازی مبتنی بر سناریو به تعداد سناریوهای در نظر گرفته شده بستگی دارد. تعداد سناریوهای مورد نیاز که به‌طور مناسب فرآیندهای تصادفی را نمایش دهند، اغلب بزرگ است که بار

محاسباتی زیادی را به مسئله تحمیل می‌کنند. برای شبکه شش باسه مورد مطالعه ۵۰۰۰ سناریو تولید شده است. در این حالت مدل شامل ۳۳۶۰۷۷۵ متغیر پیوسته، ۷۲ متغیر باینری و ۷۵۶۱۷۴۷ معادله می‌باشد. تمام شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار GAMS با استفاده از سالور CPLEX 11.1.1 با $duality\ GAP\ 0\%$ [۶۴] بر روی سرور با سیستم عامل ویندوز با ۱۶ پردازشگر 2.13 GHz و 128G RAM اجرا شده‌اند. زمان اجرای برنامه در حالت در نظر گرفتن همبستگی و سطح نفوذ ۱۰٪ برای سیستم ۶ باسه با ۵۰۰۰ سناریو، هشتاد دقیقه می‌باشد. برای حالت‌های دیگر نیز زمان اجرا تقریباً مشابه همین حالت می‌باشد.

۴-۵ مطالعه موردی دوم: سیستم ۱۱۸ باسه

در این بخش آثار همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی بر روی یک سیستم واقعی بررسی می‌شود. برای این منظور، مدل تسویه بازارهای انرژی و رزرو توأم طرح شده بر شبکه ۱۱۸ باسه IEEE اجرا می‌گردد. این سیستم شامل ۵۴ واحد تولیدی، ۱۸۶ خط و ۹۱ بار است. جزئیات بیش‌تر در مورد واحدهای تولیدی، خطوط و بارها در [۶۵] آمده است. برای در نظر گرفتن تأثیر محدودیت خطوط مرزی، سیستم تست ۱۱۸ باسه به سه ناحیه تقسیم شده است. دیاگرام تک خطی سیستم سه‌ناحیه-ای در [۶۶] ارائه شده است. برای در نظر گرفتن آثار تراکم خطوط، بار پیک سیستم ۱/۵ برابر شده است.

شش مزرعه بادی در باس‌های ۴۹، ۵۹، ۷۷ و ۸۰ از ناحیه ۲، و در باس‌های ۹۰ و ۱۱۰ از ناحیه ۳ نصب شده است. در سطح نفوذ بادی ۱۰٪، ظرفیت تولید بادی نصب شده در باس‌های ۴۹، ۵۹، ۷۷ و ۸۰ از ناحیه ۲ به ترتیب ۱۶۴، ۲۵۰، ۱۶۴ و ۸۲ مگاوات است. هم‌چنین ظرفیت تولید بادی نصب شده در هر مزرعه بادی در باس‌های ۹۰ و ۱۱۰ از ناحیه ۳، ۸۲ مگاوات است. تولید بادی مزارع نصب شده در ناحیه ۲ و ۳ به ترتیب از الگوی تولید بادی مزارع ۱ و ۲ پیروی می‌کنند.

۴-۵-۱ کاهش سناریوهای همبسته توان بادی

روش تولید سناریوهای همبسته توان بادی که در بخش ۴-۲ معرفی شد، بر اساس دیدگاه نمونه-برداري است. در این روش مدل سری زمانی که فرآیند تصادفی را به بهترین شکل ممکن نشان دهد، تعیین می‌شود. همان‌طور که پیش از این ذکر شد، تعداد سناریوهای مورد نیاز برای نمایش دقیق فرآیندهای تصادفی زیاد است. از آن‌جا که بار محاسباتی مدل برنامه‌ریزی تصادفی با افزایش تعداد سناریوها، به‌طور نمایی افزایش می‌یابد، استفاده از یک روش ریاضی برای کاهش تعداد سناریوها و در نتیجه مدیریت بار محاسباتی مسائل با ابعاد بزرگ لازم است. روش‌های کاهش سناریو، مجموعه سناریوها را به مقیاس کوچکتر تبدیل کرده، در حالی که تا حد امکان اطلاعات آماری فرآیندهای تصادفی را حفظ می‌کنند.

از آن‌جا که در این پایان‌نامه تسویه بازار ۲۴ ساعت قبل از روز مورد مطالعه انجام می‌گیرد، مدل طرح شده با تعداد سناریوهای در نظر گرفته شده، باید در زمان معقول قابل حل باشد. بنابراین مجموعه سناریوهای تولید شده در بخش ۴-۲، با الگوریتم کاهش سناریو ذکر شده در [۶۷]، به ۲۰۰ سناریو کاهش یافته است. با این تعداد سناریو، علاوه بر اینکه همبستگی سناریوها حفظ می‌شود، مدل تسویه بازار طرح شده نیز در زمان قابل قبول حل می‌شود (برای سیستم ۱۱۸ باسه با ۲۰۰ سناریو، زمان اجرا بر روی سرور با مشخصات ذکر شده در بخش ۴-۴-۵ حدود ۴۳۰ دقیقه می‌باشد). در بخش بعدی نتایج حاصل از اجرای مدل بر سیستم ۱۱۸ باسه با سطح نفوذ بادی ۱۰٪ آمده است. این نتایج، با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی سیستم ۶ باسه در بخش ۴-۴ سازگار است.

۴-۵-۲ تأثیر همبستگی بر بهره‌برداری بازار: سیستم ۱۱۸ باسه

جدول ۴-۱۲، مقدار رزرو بالارونده، پایین‌رونده و مقدار کل رزرو برنامه‌ریزی شده در ۲۴ ساعت را برای سیستم ۱۱۸ باسه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، همبستگی باعث افزایش مقادیر رزرو برنامه‌ریزی شده در سیستم می‌شود. با وجود تنوع تکنولوژی واحدهای تولیدی در سیستم ۱۱۸

باسه تحلیل نتایج نشان می‌دهد مقدار رزرو، بیش‌تر برای واحدهایی با نرخ افزایشی/کاهشی زیاد (واحدهای با انعطاف‌پذیری بیش‌تر) برنامه‌ریزی شده است. این موضوع به این دلیل است که واحدهای ارزان در اکثر ساعات با حداکثر ظرفیت خود بهره‌برداری می‌شوند، و در نتیجه ظرفیت خالی برای برنامه‌ریزی رزرو در اختیار ندارند.

هزینه‌های سیستم، مشابه تعاریف ذکر شده در بخش ۴-۴، در جدول ۴-۱۳ برای سطح نفوذ بادی ۱۰٪ آمده است. مطابق این جدول هزینه‌های سیستم با در نظر گرفتن همبستگی افزایش می‌یابد.

جدول ۴-۱۲: تأثیر همبستگی بر میزان رزرو برنامه‌ریزی شده سیستم ۱۱۸ باسه

α	رزرو بالارونده (MW)	رزرو پایین‌رونده (MW)	کل رزرو برنامه- ریزی شده (MW)
۰	۴۹۳۸	۴۷۲۸	۹۶۶۶
۱	۵۱۲۹	۵۱۰۶	۱۰۲۳۵

جدول ۴-۱۳: تأثیر همبستگی بر هزینه‌های سیستم ۱۱۸ باسه

α	DAC (\$)	ERTC (\$)	ETC (\$)
۰	۱۴۰۸۵۶۲	-۳۲۵۰۷	۱۳۷۵۰۵۵
۱	۱۴۱۴۹۶۶	-۳۶۰۹۶	۱۳۷۸۸۷۰

۴-۵-۳ تأثیر سطح نفوذ بادی بر بهره‌برداری بازار: سیستم ۱۱۸ باسه

برای بررسی تأثیر سطح نفوذ بادی بر بهره‌برداری بازار، شبیه‌سازی در حالت سطح نفوذ ۲۰٪ اجرا و نتایج با سطح نفوذ ۱۰٪ مقایسه شده است. مقدار رزرو برنامه‌ریزی شده و هزینه کل بهره‌برداری سیستم ۱۱۸ باسه برای دو حالت همبسته و بدون همبستگی به ترتیب در جدول‌های ۴-۱۴ و ۴-۱۵

آمده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش سطح نفوذ بادی از ۱۰٪ به ۲۰٪، بهره‌بردار رزرو بیش‌تری برای سیستم برنامه‌ریزی می‌کند، اما هزینه کل بهره‌برداری سیستم کاهش می‌یابد.

جدول ۴-۱۴: مقدار رزرو برنامه‌ریزی شده در سیستم ۱۱۸ باسه برای دو سطح نفوذ بادی (مقادیر به مگاوات)

سطح نفوذ بادی (%)		α
۲۰	۱۰	
۱۹۳۳۷	۹۶۶۶	۰
۲۰۸۷۶	۱۰۲۳۵	۱

جدول ۴-۱۵: هزینه کل بهره‌برداری سیستم ۱۱۸ باسه برای دو سطح نفوذ بادی

سطح نفوذ بادی (%)		α
۲۰	۱۰	
۱۲۰۲۶۶۰	۱۳۷۵۰۵۵	۰
۱۲۰۱۵۰	۱۳۷۷۸۷۰	۱

۴-۵-۴ تأثیر محدودیت شبکه بر بهره‌برداری بازار: سیستم ۱۱۸ باسه

در سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای با سطح نفوذ بالای تولید بادی، محدودیت ظرفیت خطوط مرزی در بهره‌برداری زمان-حقیقی یک موضوع نگران‌کننده است. نبود ظرفیت کافی برای انتقال توان بین نواحی مختلف این امکان را به تولیدکنندگان می‌دهد تا با اعمال قدرت بازار سعی کنند شرایط را به‌نفع خود تغییر دهند. در این شرایط قیمت انرژی و رزرو و در نتیجه هزینه بهره‌برداری بازار افزایش خواهد یافت.

نواحی سه گانه سیستم ۱۱۸ باسه مورد مطالعه از طریق ۱۱ خط مرزی بهم متصل هستند. به منظور بررسی آثار محدودیت خطوط مرزی بر بهره‌برداری بازار، ظرفیت این خطوط در سیستم ۱۱۸ باسه نصف شده‌اند، و مدل برای سطح نفوذ بادی ۱۰٪ با در نظر گرفتن همبستگی توان بادی اجرا شده است. مقایسه هزینه کل بهره‌برداری بازار و مقدار رزرو برنامه‌ریزی شده بین این دو حالت در جدول ۴-۱۶ آمده است. همان‌طور که مشخص است محدودیت خطوط مرزی بر مقدار رزرو برنامه‌ریزی شده در سیستم اثرگذار نیست، در حالی که هزینه بهره‌برداری سیستم را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. تحلیل وضعیت در مدار قرار گرفتن واحدها نشان می‌دهد، محدودیت خطوط مرزی باعث روشن شدن واحدهای اضافی در سیستم و در نتیجه تحمیل هزینه راه‌اندازی بیش‌تر می‌شود.

جدول ۴-۱۶: تأثیر محدودیت خطوط مرزی سیستم ۱۱۸ باسه بر بهره‌برداری بازار

محدویت خطوط مرزی؟	مقدار رزرو برنامه‌ریزی شده (MW)	هزینه کل بهره‌برداری سیستم (\$)
خیر	۱۰۲۳۵	۱۳۷۸۸۷۰
بله	۱۰۲۳۴	۱۳۹۳۲۵۴

۴-۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل در ابتدا همبستگی تولید بادی دو مزرعه بر اساس اطلاعات واقعی سرعت و تولید بادی تحلیل شد. برای بررسی آثار همبستگی زمانی-مکانی دو مزرعه بر بهره‌برداری بازار انرژی و رزرو توأم، سناریوهای همبسته توان بادی تولید شدند. مدل بازار طرح شده در فصل سوم با حذف متغیر رزرو غیرچرخان، مجدداً فرمول‌بندی شد. مدل بازار انرژی و رزرو توأم بدون در نظر گرفتن رزرو غیرچرخان، با سناریوهای تولید شده در این فصل برای دو حالت با و بدون در نظر گرفتن همبستگی تولیدی بادی، و سطوح نفوذ مختلف تولید بادی برای سیستم نمونه ۶ باسه و سیستم ۱۱۸ باسه

IEEE تسویه شد. نتایج به دست آمده از انجام شبیه سازی در حالت های مختلف در زیر آمده است:

۱. تحلیل اطلاعات واقعی تولید بادی وجود همبستگی مکانی بین مزارع بادی نزدیک بهم را تأیید می کند. هر چه فاصله بین مزارع کمتر باشد، این همبستگی بیش تر نمایان می شود.
۲. در نظر گرفتن همبستگی نحوه دیسپچ انرژی و رزرو واحدها را تغییر می دهد. در حالت در نظر گرفتن همبستگی نیاز به رزرو در سیستم افزایش می یابد که دلیل این امر افزایش تغییرات تولید بادی، و در نتیجه افزایش انحراف تولید بادی واقعی از مقدار پیش بینی شده می باشد.
۳. در نظر گرفتن همبستگی، متوسط هزینه کل بهره برداری سیستم را افزایش می دهد. این افزایش به دلیل نیاز به رزرو بیش تر در سیستم و به تبع آن افزایش هزینه های مربوط به رزرو می باشد.
۴. در نظر گرفتن همبستگی باعث افزایش متوسط و انحراف معیار قدر مطلق هزینه اصلاح انرژی در بهره برداری زمان حقیقی می شود. اگرچه تأثیر آن بر انحراف معیار هزینه اصلاح انرژی بیش تر می باشد.
۵. با افزایش سطح نفوذ بادی، عدم قطعیت در سیستم بیش تر و بهره بردار برای پوشش این عدم قطعیت رزرو بیش تری را برنامه ریزی می کند. اگرچه این برنامه ریزی هزینه های رزرو را در سیستم افزایش می دهد، اما در مجموع هزینه کل بهره برداری سیستم با افزایش سطح نفوذ بادی کاهش می یابد.
۶. در حالت تراکم در شبکه، برای سطح نفوذ پایین تولید بادی، در نظر گرفتن همبستگی باعث افزایش هزینه های قطع اجباری بار می شود. اگرچه با افزایش سطح نفوذ تولید بادی، فضای آزاد خطوط انتقال بیش تر می شود و در نتیجه قطع اجباری بار به حداقل مقدار خود می رسد.
۷. در سیستم های قدرت چند ناحیه ای، محدود کردن ظرفیت خطوط مرزی بر میزان رزرو

برنامه‌ریزی شده در سیستم اثر گذار نیست؛ اگرچه هزینه بهره‌برداری سیستم را افزایش داده و باعث روشن شدن واحدهای اضافی در سیستم می‌شود.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

در این پایان‌نامه، بهره‌برداری بازارهای انرژی و رزرو توأم با در نظر گرفتن آثار همبستگی زمانی-مکانی مزارع بادی مطالعه و بررسی گردید.

در فصل دوم، همبستگی زمانی-مکانی تولید بادی معرفی شد. سپس موضوعات کلی در مدل‌سازی انرژی و رزرو از دیدگاه فنی و نوع رزور مدل شده ارائه شد. الگوریتم‌های مختلف تسویه انرژی و رزرو در محیط بازار با ذکر مزایا و معایب هر کدام بیان شد. از بین این الگوریتم‌ها، تسویه توأم انرژی و رزرو به دلیل مزایای بیش‌تر نسبت به سایر الگوریتم‌ها به‌طور کامل با در نظر گرفتن تولید بادی در محیط بازار بررسی شد.

در فصل سوم، در ابتدا الگوریتم مورد استفاده برای تولید سناریوهای همبسته تولید بادی ارائه شد. سپس بازار انرژی و رزرو توأم به‌صورت یک مدل دو مرحله‌ای با در نظر گرفتن قیود فنی و اقتصادی واحدهای تولیدی، قیود بین زمانی واحدها و محدودیت شبکه به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مخلوط-عدد صحیح مدل‌سازی شد.

در فصل چهارم، سناریوهای همبسته توان بادی به روش الگوریتم پیشنهادی با استفاده از اطلاعات سرعت و تولید واقعی دو مزرعه بادی تولید شدند. با حذف متغیر رزرو غیرچرخان، مدل تسویه بازار فصل سوم، به مدلی ساده‌تر تبدیل شد که زمان حل آن بسیار کمتر می‌باشد. سپس با اجرای مسئله تسویه بازار بر روی سیستم نمونه ۶ باسه و سیستم واقعی ۱۱۸ باسه IEEE، خروجی‌های بازار شامل دیسپچ انرژی و رزرو و هزینه‌های مرتبط با و بدون در نظر گرفتن همبستگی تولید بادی برای سطوح نفوذ مختلف تولید بادی مقایسه و تحلیل شد.

۵-۲ نتایج

نتایج اصلی به دست آمده از این پایان نامه را می توان به شرح زیر خلاصه نمود:

- بررسی و تحلیل اطلاعات واقعی سرعت و تولید بادی نشان می دهد سرعت و تولید بادی یک مزرعه در هر ساعت به سرعت و تولید بادی همان مزرعه در ساعات قبل وابسته می باشد (همبستگی زمانی). علاوه بر این سرعت و تولید بادی مزارع بادی که از لحاظ جغرافیایی به هم نزدیک هستند، در جهت هم می باشد (همبستگی مکانی).
- بررسی آثار همبستگی زمانی-مکانی مزارع بادی نشان می دهد با در نظر گرفتن همبستگی، میزان رزرو مورد نیاز سیستم و به تبع آن هزینه های مربوط به رزرو افزایش می یابد.
- بررسی آثار همبستگی زمانی-مکانی مزارع بادی نشان می دهد با در نظر گرفتن همبستگی مزارع بادی، هزینه کل سیستم افزایش می یابد.
- با در نظر گرفتن همبستگی مزارع بادی، احتمال تغییر وضعیت واحدهای حاشیه ای از خاموش به روشن و بالعکس، افزایش می یابد. هم چنین واحدهایی که در بیش تر سناریوها مورد بهره برداری بوده اند، با در نظر گرفتن همبستگی مزارع بادی احتمال بکارگیری این واحدها برای تولید انرژی کاهش می یابد.
- اگرچه با افزایش سطح نفوذ تولید بادی در سیستم قدرت، هزینه های مربوط به رزرو بیش تر می شود، اما تولید بادی در مجموع باعث کاهش هزینه بهره برداری سیستم می شود. این موضوع در ارزیابی منفعت اتصال مزارع بادی به سیستم قدرت اهمیت پیدا می کند.
- تراکم خطوط انتقال باعث قطع اجباری بار مصرف کنندگان می شود. اگرچه تولید بادی می تواند باعث رفع تراکم خطوط انتقال و در نتیجه حذف قطع اجباری بار در سیستم گردد. هم چنین در سیستم های چند ناحیه ای مدیریت تراکم خطوط مرزی بین نواحی مختلف برای کاهش هزینه بهره برداری بازار امری لازم و ضروری است.

۵-۳ پیشنهادها

در این بخش به دنبال مسائلی که در این پایان نامه مورد مطالعه قرار گرفت، چند پیشنهاد جهت ادامه مطالعه و تحقیق ارائه می گردد:

۱. الگوریتم پیشنهادی برای تولید سناریوهای همبسته توان بادی می تواند با در نظر گرفتن

اطلاعات دیگر هواشناسی مانند فشار و چگالی هوا، دما، رطوبت و جهت وزش باد بهبود یابد.

۲. در این پایان نامه فرض شد تولیدکنندگان بادی با قیمت صفر در بازار شرکت می کنند. اگرچه

با افزایش سطح نفوذ تولید بادی، تولیدکنندگان بادی می توانند مانند سایر تولیدکنندگان

سنتی در بازار شرکت کنند.

۳. چگونگی قیمت گذاری هر مگاوات انرژی و رزرو در تسویه بازارهای انرژی و رزرو توأم یک

موضوع حل نشده می باشد. مخصوصاً در حوزه تسویه بازار به روش برنامه ریزی تصادفی،

قیمت گذاری رزرو یک موضوع مهم می باشد. این موضوع هم از دید بهره بردار بازار و هم از

دید تولیدکنندگان قابل مطالعه و بررسی می باشد. در عمل تأمین و برنامه ریزی رزرو در

مرحله بازار (مرحله اول) باعث می شود واحدهای تولیدی در کمتر از ظرفیت کامل خود بهره-

برداری شوند و هزینه دریافتی آنها برای تأمین انرژی کمتر شود. این موضوع انگیزه

تولیدکنندگان برای شرکت در بازار رزرو را کاهش می دهد. از دیدگاه بهره بردار بازار باید

ظرفیت کافی برای برنامه ریزی رزرو جهت حفظ امنیت و قابلیت اطمینان سیستم وجود داشته

باشد.

۴. مدل پیشنهادی تسویه بازار در این پایان نامه می تواند با اصلاحات زیر کامل شود:

• توسعه مدل تسویه بازار به روش مقاوم با در نظر گرفتن تمام ویژگی های فنی و اقتصادی

واحدها، نرخ افزایش و کاهش، قیود بین زمانی و همبستگی بین مزارع بادی و مقایسه

نتایج آن با مدل برنامه ریزی تصادفی.

- در نظر گرفتن سایر منابع تولید پراکنده مانند فتوولتائیک در مدل تصادفی تسویه بازار. چالش اصلی مدل سازی عدم قطعیت توأم تولید بادی و تولید خورشیدی می باشد.
- فرمول بندی مجدد مدل پیشنهادی تسویه بازار ارائه شده در فصل سوم، با حذف تمام ساده سازی ها و فرضیات در نظر گرفته شده. در این حالت مدل بیش تر شبیه به واقعیت خواهد شد.
- انتظار می رود با ظهور شبکه های هوشمند نقش بارهای پاسخ گو در سیستم قدرت بیش تر شود. در این پایان نامه بار به صورت غیرالاستیک و غیرکشسان مدل شد. اگرچه با ظهور فناوری شبکه هوشمند، مصرف کنندگان می توانند بار خود را به طور داوطلبانه کاهش دهند، و به این ترتیب مانند تولیدکنندگان در بازار رزرو شرکت کنند.

مراجع

- [1] The World Wind Energy Association, *2016 Half-year Report*, Available <http://www.wwindea.org/>.
- [2] J. M. Morales, A. J. Conejo, and J. Pérez-Ruiz, "Economic valuation of reserves in power systems with high penetration of wind power," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 900-910, 2009.
- [3] X. Wang, P. Guo, and X. Huang, "A review of wind power forecasting models," *Energy procedia*, vol. 12, pp. 770-778, 2011.
- [4] J. Tastu, P. Pinson, E. Kotwa, H. Madsen, and H. A. Nielsen, "Spatio-temporal analysis and modeling of short-term wind power forecast errors," *Wind Energy*, vol. 14, no. 1, pp. 43-60, 2011.
- [5] R. Arjmand and M. Rahimiyan, "Impact of spatio-temporal correlation of wind production on clearing outcomes of a competitive pool market," *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 216-227, 2016.
- [6] J. M. Morales, R. Minguez, and A. J. Conejo, "A methodology to generate statistically dependent wind speed scenarios," *Applied Energy*, vol. 87 ,no. 3, pp. 843-855, 2010.
- [7] E. Ela, M. Milligan, and B. Kirby, "Operating reserves and variable generation," *Contract*, vol. 303, pp. 275-3000, 2011.
- [8] P. Chitkara, J. Zhong, and K. Bhattacharya, "Oligopolistic competition of gencos in reactive power ancillary service provisions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1256-1265, 2009.
- [9] J. Zhao, B. Brereton, and M. Montalvo, "Gaming-based reserve constraint penalty factor analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 2 , pp. 616-626, 2011.
- [10] S. Riahinia, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghaie, "Impact of correlation on reserve requirements of high wind-penetrated power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73 , pp. 576-583, 2015.
- [11] J. M. Morales, A. J. Conejo, K. Liu, and J. Zhong, "Pricing electricity in pools with wind producers," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 1366-1376, 2012.
- [12] A. Papavasiliou, S. S. Oren, and R. P. O'Neill, "Reserve requirements for wind power integration: A scenario-based stochastic programming framework," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 2197-2206, 2011.
- [13] H. Haghighat, H. Seifi, and A. R. Kian, "Gaming Analysis in Joint Energy and Spinning Reserve Markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 2074-2085, 2007.

- [14] G. Bautista, V. H. Quintana, and J. A. Aguado, "An oligopolistic model of an integrated market for energy and spinning reserve," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 132-142, 2006.
- [15] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Shahidehpour, "Unit commitment with probabilistic spinning reserve and interruptible load considerations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 388-397, 2009.
- [16] D. Gan and E. Litvinov, "Energy and reserve market designs with explicit consideration to lost opportunity costs," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 53-59, 2003.
- [17] A. Ahmadi-Khatir, M. Bozorg, and R. Cherkaoui, "Probabilistic spinning reserve provision model in multi-control zone power system," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2819-2829, 2013.
- [18] A. Ahmadi-Khatir, A. J. Conejo, and R. Cherkaoui, "Multi-area energy and reserve dispatch under wind uncertainty and equipment failures," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4373-4383, 2013.
- [19] M. A. Ortega-Vazquez and D. S. Kirschen, "Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 114-124, 2009.
- [20] J. M. Arroyo and F. D. Galiana, "Energy and reserve pricing in security and network-constrained electricity markets," *IEEE transactions on power systems*, vol. 20, no. 2, pp. 634-643, 2005.
- [21] X. Ma, D. Sun, and K. Cheung, "Energy and reserve dispatch in a multi-zone electricity market," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 913-919, 1999.
- [22] M. Hummon, P. Denholm, J. Jorgenson, D. Palchak, B. Kirby, and O. Ma, "Fundamental drivers of the cost and price of operating reserves," *NREL, Golden, CO*, 2013.
- [23] S. S. Oren and R. Sioshansi, "Joint energy and reserves auction with opportunity cost payment for reserves," *University of California Energy Institute*, 2003.
- [24] Z. Li and M. Shahidehpour, "Security-constrained unit commitment for simultaneous clearing of energy and ancillary services markets," *IEEE transactions on power systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1079-1088, 2005.
- [25] F. Stacke and P. Cuervo, "A combined pool/bilateral/reserve electricity market operating under pay-as-bid pricing," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 1601-1610, 2008.
- [26] F. D. Galiana, F. Bouffard, J. M. Arroyo, and J. F. Restrepo, "Scheduling and pricing of coupled energy and primary, secondary, and tertiary reserves,"

Proceedings of the IEEE, vol. 93, no. 11, pp. 1970-1983, 2005.

- [27] J. Wang, X. Wang, and Y. Wu, "Operating reserve model in the power market," *IEEE Transactions on Power systems*, vol. 20, no. 1, pp. 223-229, 2005.
- [28] Q. Xu *et al.*, "A game theoretical pricing mechanism for multi-area spinning reserve trading considering wind power uncertainty," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 1084-1095, 2016.
- [29] A. Ahmadi-Khatir and R. Cherkaoui, "A probabilistic joint energy and spinning reserve market model," in *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, 2010, pp. 1-6: IEEE.
- [30] F. Abbaspourtorbati, A. J. Conejo, J. Wang, and R. Cherkaoui, "Pricing electricity through a stochastic non-convex market-clearing model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 1248-1259, 2017.
- [31] N. G. Paterakis, O. Erdinc, A. G. Bakirtzis, and J. P. Catalão, "Load-following reserves procurement considering flexible demand-side resources under high wind power penetration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 1337-1350, 2015.
- [32] J. M. Morales, "Impact on system economics and security of a high penetration of wind power," *University of Castilla-La Mancha, Ciudad Real, Spain, PHD Thesis*, 2010.
- [33] D. Gan and C. Shen, "A price competition model for power and reserve market auctions," *Electric Power Systems Research*, vol. 70, no. 3, pp. 187-193, 2004.
- [34] S. Soleymani, A. Ranjbar, and A. Shirani, "New approach for strategic bidding of Gencos in energy and spinning reserve markets," *Energy conversion and management*, vol. 48, no. 7, pp. 2044-2052, 2007.
- [35] J. Wang, N. E. Redondo, and F. D. Galiana, "Demand-side reserve offers in joint energy/reserve electricity markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 1300-1306, 2003.
- [36] Y. Lin and J. Zhong, "Energy and reserve dispatch in the integrated electricity market with sectional price offers," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES*, 2008, pp. 1-6: IEEE.
- [37] A. Ahmadi-Khatir, A. J. Conejo, and R. Cherkaoui, "Multi-area unit scheduling and reserve allocation under wind power uncertainty," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1701-1710, 2014.
- [38] H. Jiang, S. Zhang, Z. Hu, Y. Song, and Y. Chiwei, "Robust optimization method for unit commitment with network losses considering wind

- uncertainties," in *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-5: IEEE.
- [39] N. Amjady, J. Aghaei, and H. A. Shayanfar, "Stochastic multiobjective market clearing of joint energy and reserves auctions ensuring power system security," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 1841-1854, 2009.
 - [40] S. S. Reddy, P. Bijwe, and A. R. Abhyankar, "Joint energy and spinning reserve market clearing incorporating wind power and load forecast uncertainties," *IEEE Systems Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 152-164, 2015.
 - [41] S. Kim, "LMP as market signal for reserve supply in energy and reserve integrated market," in *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE'06. 2006 IEEE PES*, 2006, pp. 896-900: IEEE.
 - [42] "REE (Red eléctrica de España)" . [Online]. Available <http://www.ree.es/>.
 - [43] L. Wu, M. Shahidehpour, and Z. Li, "GENCO's risk-constrained hydrothermal scheduling," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 1847-1858, 2008.
 - [44] M. Chazarra, J. I. Pérez-Díaz, and J. García-González, "Optimal energy and reserve scheduling of pumped-storage power plants considering hydraulic short-circuit operation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 344-353, 2017.
 - [45] I. J. Pérez-Arriaga, *Regulation of the power sector*. Springer, 2013.
 - [46] Y. T. Tan and D. S. Kirschen, "Co-optimization of energy and reserve in electricity markets with demand-side participation in reserve services," in *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE'06. 2006 IEEE PES*, 2006, pp. 1182-1189: IEEE.
 - [47] E. Karangelos and F. Bouffard, "Towards full integration of demand-side resources in joint forward energy/reserve electricity markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 280-289, 2012.
 - [48] Z. Zhou and A. Botterud, "Dynamic scheduling of operating reserves in co-optimized electricity markets with wind power," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 160-171, 2014.
 - [49] X. Jia, M. Zhou, and G. Li, "Study on conjectural variation based bidding strategy in spinning reserve markets," in *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, 2006, pp. 1-5: IEEE.
 - [50] J. Zhu, G. Jordan, and S. Ihara, "The market for spinning reserve and its impacts on energy prices," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, 2000, vol. 2, pp. 1202-1207: IEEE.

- [51] S. S.Reddy, P. Bijwe, and A. Abhyankar, "Multi-objective market clearing of electrical energy, spinning reserves and emission for wind-thermal power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 53, pp. 782-794, 2013.
- [52] C. Liu ,A. Botterud, Z. Zhou, and P. Du, "Fuzzy energy and reserve co-optimization with high penetration of renewable energy," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 782-791, 2017.
- [53] M. Doostizadeh, F. Aminifar, H. Ghasemi, and H. Lesani" ,Energy and Reserve Scheduling Under Wind Power Uncertainty: An Adjustable Interval Approach," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2943-2952, 2016.
- [54] M. Zugno and A. J. Conejo, "A robust optimization approach to energy and reserve dispatch in electricity markets," *European Journal of Operational Research*, vol. 247, no. 2, pp. 659-671, 2015.
- [55] P. Pinson and R. Girard, "Evaluating the quality of scenarios of short-term wind power generation," *Applied Energy*, vol. 96, pp. 12-20, 2012.
- [56] P. Pinson, "Estimation of the uncertainty in wind power forecasting," École Nationale Supérieure des Mines de Paris, PHD Thesis, 2006.
- [57] M. Rahimyan and L. Baringo, "Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: A price-taker robust optimization approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 2676-2687, 2016.
- [58] R. Arjmand and M. Rahimyan, "Statistical analysis of a competitive day-ahead market coupled with correlated wind production and electric load," *Applied Energy*, vol. 161, pp. 153-167, 2016.
- [59] L.-X. Wang, *A course in fuzzy systems*. Prentice-Hall press, USA, 1999.
- [60] "Westen wind data set, NREL", online at <https://www.nrel.gov/grid/western-wind-data.html>.
- [61] C. Draxl, A. Clifton, B.-M. Hodge, and J. McCaa, "The wind integration national dataset (WIND) Toolkit," *Applied Energy*, vol. 151, pp. 355-366, 2015.
- [62] R. J. Hyndman and A. B. Koehler, "Another look at measures of forecast accuracy," *International journal of forecasting*, vol. 22 ,no. 4, pp. 679-688, 2006.
- [63] J. Wang, M. Shahidehpour, and Z. Li, "Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1319-1327, 2008.

- [64] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, R. Raman, and R. Rosenthal, "GAMS: A user's guide, GAMS Development Corporation, 1998,".
- [65] "*IEEE 118-bus Test System, Illinois Institute of Technology*", Available at http://motor.ece.iit.edu/data/SCUC_118test.xls.
- [66] Y. Fu, M. Shahidehpour, and Z. Li, "Security-constrained unit commitment with AC constraints," *IEEE transactions on power systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1538-1550, 2005.
- [67] H. Heitsch and W. Römisch, "Scenario reduction algorithms in stochastic programming," *Computational optimization and applications*, vol. 24, no. 2-3, pp. 187-206, 2003.

Abstract

By the increase of penetration of stochastic production (e.g., wind production), keeping power system security is a challenging problem. In this condition, the market operator maintains system security by scheduling and deploying capacity reserve. Due to significant correlation among diverse wind farms, analyzing the impact of this correlation on the outcomes of energy and reserve markets is an important issue. To accomplish this task, in this thesis, correlated scenarios of wind production are generated using real-world data of wind speed and production. These scenarios are considered as inputs for clearing joint energy and reserve markets. The energy and reserve market clearing problem is formulated as a two-stage stochastic model, which energy and reserve are clear simultaneously. In this model, technical and economic limitations, inter-temporal constraints of generating units, and network constraints are taken into account. Simulation results are provided through 6-bus and IEEE 118-bus systems with and without considering the correlation of wind farms. The impact of correlation on the energy and reserve dispatches, cost of day-ahead market, expected real-time operation cost and total cost of system is analyzed through a comparative analysis. The results show that the required reserve increases with considering the correlation.

Keywords: Wind power production, spatio-temporal correlation, stochastic programming, energy and reserve markets clearing, security



Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

**Operation of Joint Energy and Reserve
Markets with Considering Correlated Wind
Power Production**

By: Amin Abedi

Supervisor:

Dr. Morteza Rahimiyan

September 2017