

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

پیشنهاددهی استراتژیک برای یک سیستم بادی-ذخیره‌ساز

در بازارهای برق کوتاه‌مدت

نگارنده: سپهر دیرین

استاد راهنما:

دکتر مرتضی رحیمیان

شهریور ۱۳۹۸

شماره: ۱۸۷۸۳
تاریخ: ۹۸/۶/۱۲

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 سپهر دیرین با شماره دانشجویی ۹۵۰۶۲۴۴ رشته مهندسی قدرت گرایش سیستم تحت عنوان: پیشنهاددهی استراتژیک برای یک سیستم بادی - ذخیره ساز در بازارهای برق کوتاه مدت که در تاریخ ۱۳۹۸/۰۶/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید، به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (یا درجه): خرابی جزئی مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد اهنمای اول	دکتر سید نصر حسینیان	دانشیار	
۲- استاد اهنمای دوم		—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر یاسر دلچر	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محسن اصیلی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مجتبی لیسواری	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده تحصیلات تکمیلی
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده

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

پس خداوند باری تعالی را که شایسته ترین است برای حمد و ستایش ...

تشکر و قدردانی می کنم از پدر و مادری که بی هیچ منتی، همواره پشتیبان و حامی اند.

و تشکر ویژه از استاد محترم دکتر مرتضی رحیمیان که راهنمایی های علمی ایشان با صبر، مهربانی و

دلسوزیشان توأم گردید تا این پایان نامه به سرانجام رسد.

تعهدنامه

اینجانب سپهر دیرین دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق-قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله «پیشنهاددهی استراتژیک برای یک سیستم بادی-ذخیره‌ساز در بازارهای برق کوتاه-مدت» تحت راهنمایی آقای دکتر مرتضی رحیمیان متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققین دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در این رساله 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 صنعتی شاهرود است 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 رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج شده از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، 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

۱۳۹۹/۴/۱۱

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 است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده:

در این پایان نامه، پیشنهاددهی استراتژیک برای مجموعه‌ای از سیستم‌های بادی-ذخیره‌ساز که به صورت یک نهاد در بازارهای پیش‌رو و تعادل شرکت می‌کنند، انجام می‌شود. عدم قطعیت‌های قیمت بازارها و تولید توان بادی با استفاده از سناریو مدل می‌شوند. مقدار معنی‌دار همبستگی مثبت بین تولید توان مزارع بادی براساس مطالعات میدانی تأیید می‌شود. بنابراین، همبستگی زمانی-مکانی تولید توان مزارع بادی با ترکیب مدل‌های چندمتغیره و آریما در نظر گرفته می‌شود. جهت مهار کردن عدم قطعیت‌ها، مسأله پیشنهاددهی استراتژیک به صورت مدل برنامه‌ریزی تصادفی مقید به ریسک ارائه می‌شود. عملکرد مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های واقعی شامل اطلاعات بادی و قیمت بازار اسپانیا تحلیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن همبستگی مکانی، مقدار سود مورد انتظار و حساسیت آن نسبت به تغییرات ضریب ریسک‌گریزی افزایش می‌یابد.

کلیدواژه: پیشنهاددهی استراتژیک، سیستم‌های بادی-ذخیره‌ساز، همبستگی زمانی-مکانی،

برنامه‌ریزی تصادفی

فهرست مطالب

فصل اول: پیشگفتار.....	۱
۱-۱ انگیزه تحقیق.....	۲
۲-۱ هدف تحقیق.....	۳
۳-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه.....	۴
فصل دوم: مروری بر کارهای انجام شده.....	۷
۱-۲ مقدمه.....	۸
۲-۲ پیشنهاددهی استراتژیک.....	۸
۳-۲ پیش‌بینی توان بادی.....	۱۶
۴-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....	۱۷
فصل سوم: مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها.....	۱۹
۱-۳ مقدمه.....	۲۰
۲-۳ مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها.....	۲۰
۱-۲-۳ مدل‌سازی قیمت بازار.....	۲۱
۱-۱-۲-۳ سناریو قیمت بازار پیش‌رو.....	۲۱
۲-۱-۲-۳ سناریو قیمت بازار تعادل.....	۲۲
۲-۲-۳ مدل‌سازی تولید بادی.....	۲۲
۱-۲-۲-۳ پیش‌بینی تولید بادی.....	۲۲

۲۳	..... سناریو همبسته تولید بادی ۲-۲-۲-۳
۲۷	..... سناریو ۳-۲-۳ درخت
۲۸	..... داده‌های مربوط به مطالعه موردی ۳-۳
۲۹	..... تولید سناریو برای قیمت بازار پیش‌رو ۴-۳
۳۱	..... تولید سناریو برای مرحله اول تصمیم‌گیری ۱-۴-۳
۳۲	..... تولید سناریو برای مرحله دوم تصمیم‌گیری ۲-۴-۳
۳۲	..... مدل‌سازی قیمت بازار تعادل ۵-۳
۳۴	..... تولید سناریو برای مرحله اول تصمیم‌گیری ۱-۵-۳
۳۴	..... تولید سناریو برای مرحله دوم تصمیم‌گیری ۲-۵-۳
۳۵	..... مدل‌سازی تولید توان بادی ۶-۳
۳۹	..... تولید سناریو برای مرحله اول تصمیم‌گیری ۱-۶-۳
۴۰	..... تولید سناریو برای مرحله دوم تصمیم‌گیری ۲-۶-۳
۴۱	..... اعتبارسنجی روش در نظر گرفتن همبستگی ۳-۶-۳
۴۲	..... تولید سناریو بلند توان بادی با در نظر گرفتن همبستگی ۱-۳-۶-۳
۴۴	..... تولید سناریو بلند توان بادی بدون در نظر گرفتن همبستگی ۲-۳-۶-۳
۴۶	..... جمع‌بندی ۷-۳
فصل چهارم: مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی استراتژیک مجموعه تولیدکنندگان بادی -	
۴۹	..... ذخیره‌ساز ۴۹
۴۹	..... مقدمه ۱-۴

۵۰	۱-۱-۴ تشریح مسئله
۵۱	۲-۱-۴ فرضیات
۵۲	۲-۴ فرمول بندی پیشنهاددهی استراتژیک
۵۲	۱-۲-۴ فهرست علائم و اختصارات
۵۴	۲-۲-۴ فرمول بندی مرحله اول
۵۴	۱-۲-۲-۴ تابع هدف مرحله اول
۵۵	۲-۲-۲-۴ قیود مرحله اول
۵۸	۳-۲-۴ فرمول بندی مرحله دوم
۵۸	۱-۳-۲-۴ تابع هدف مرحله دوم
۵۸	۲-۳-۲-۴ قیود مرحله دوم
۶۱	فصل پنجم: شبیه سازی
۶۲	۱-۵ مقدمه
۶۲	۲-۵ داده ها
۶۳	۳-۵ طرح شبیه سازی
۶۳	۴-۵ شبیه سازی
۶۴	۱-۴-۵ منحنی پیشنهاد توان
۶۶	۲-۴-۵ توان پیشنهادی پذیرفته شده در بازار پیش رو
۷۰	۳-۴-۵ توان پیشنهادی پذیرفته شده در بازار تعادل

- ۴-۴-۵ دیسپچ توان ۷۲
- ۵-۴-۵ تحلیل تابع هدف برای مرحله اول تصمیم‌گیری ۷۵
- ۵-۴-۵ اثر همبستگی مکانی بر سود مورد انتظار و *CVaR* ۷۵
- ۵-۴-۵ ۲ تاثیر ظرفیت ذخیره‌ساز بر سود مورد انتظار و *CVaR* ۷۷
- ۵-۴-۵ ۳ اثر همبستگی مکانی بر درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو ۷۸
- ۵-۴-۵ ۴ اثر تغییر در ظرفیت ذخیره‌ساز بر درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو ۷۹
- ۵-۴-۵ ۵ اثر همبستگی مکانی بر درآمد و جریمه مورد انتظار بازار تعادل ۸۱
- ۵-۴-۵ ۶ اثر تغییر ظرفیت ذخیره‌ساز بر درآمد و جریمه مورد انتظار بازار تعادل ۸۳
- ۵-۴-۶ تحلیل تابع هدف برای مرحله دوم تصمیم‌گیری ۸۵
- ۵-۴-۶ ۱ اثر همبستگی مکانی بر سود مورد انتظار بازار تعادل ۸۵
- ۵-۴-۶ ۲ اثر تغییر ظرفیت ذخیره‌ساز بر سود مورد انتظار بازار تعادل ۸۶
- ۵-۴-۷ بررسی خروجی‌های واقعی پس از تحقق سناریوها ۸۷
- ۵-۴-۷ ۱ اثر همبستگی بر درآمد واقعی بازار پیش‌رو ۸۷
- ۵-۴-۷ ۲ اثر تغییر ظرفیت ذخیره‌ساز بر درآمد واقعی بازار پیش‌رو ۸۸
- ۵-۴-۷ ۳ اثر همبستگی مکانی بر درآمد و جریمه واقعی بازار تعادل ۸۹
- ۵-۴-۷ ۴ اثر تغییر ظرفیت ذخیره‌ساز بر درآمد و جریمه واقعی بازار تعادل ۹۱
- ۵-۴-۷ ۵ اثر همبستگی مکانی بر سود واقعی ۹۲
- ۵-۴-۷ ۶ اثر تغییر ظرفیت ذخیره‌ساز بر سود کل واقعی ۹۳
- ۵-۵ نتیجه‌گیری ۹۳

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۹۵

۱-۶ مقدمه..... ۹۶

۲-۶ نتایج..... ۹۷

۳-۶ پیشنهادات..... ۹۹

مراجع..... ۱۰۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۳: همبستگی مکانی مزارع با فواصل متفاوت ۲۴
- شکل ۲-۳: فاصله بین مزارع بادی ۲۴
- شکل ۳-۳: درخت سناریو ۲۸
- شکل ۴-۳: تابع خودهمبستگی قیمت بازار پیش‌رو ۳۰
- شکل ۵-۳: تابع خودهمبستگی جزئی قیمت بازار پیش‌رو ۳۰
- شکل ۶-۳: تابع خودهمبستگی پس از اعمال دیفرانسیل غیرفصلی و فصلی ۳۰
- شکل ۷-۳: تابع خودهمبستگی جزئی پس از اعمال دیفرانسیل غیرفصلی و فصلی ۳۰
- شکل ۸-۳: توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای باقیمانده قیمت بازار پیش‌رو ۳۱
- شکل ۹-۳: سناریوهای قیمت بازار پیش‌رو برای مرحله اول تصمیم‌گیری ۳۲
- شکل ۱۰-۳: سناریوهای کاهش یافته قیمت بازار پیش‌رو برای مرحله اول تصمیم‌گیری ۳۲
- شکل ۱۱-۳: تابع خودهمبستگی جذر ضریب بازار تعادل ۳۲
- شکل ۱۲-۳: تابع خودهمبستگی جزئی جذر ضریب بازار تعادل ۳۲
- شکل ۱۳-۳: تابع خودهمبستگی جذر ضریب بازار تعادل پس از اعمال دیفرانسیل غیرفصلی ۳۳
- شکل ۱۴-۳: تابع خودهمبستگی جزئی جذر ضریب بازار تعادل پس از اعمال دیفرانسیل غیرفصلی ۳۳
- شکل ۱۵-۳: توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای باقیمانده برای ضرایب قیمت بازار تعادل ۳۴
- شکل ۱۶-۳: سناریوهای ضریب قیمت بازار تعادل برای مرحله اول ۳۴
- شکل ۱۷-۳: سناریوهای کاهش یافته ضریب قیمت بازار تعادل برای مرحله اول ۳۴
- شکل ۱۸-۳: سناریوهای ضریب قیمت بازار تعادل برای مرحله دوم ۳۵

- شکل ۳-۱۹: سناریوهای کاهش یافته ضریب قیمت بازار برای مرحله دوم ۳۵
- شکل ۳-۲۰: پیش‌بینی فازی برای مزرعه ۱ ۳۵
- شکل ۳-۲۱: پیش‌بینی فازی برای مزرعه ۲ ۳۶
- شکل ۳-۲۲: تابع خودهمبستگی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۱ ۳۶
- شکل ۳-۲۳: تابع خودهمبستگی جزئی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۱ ۳۶
- شکل ۳-۲۴: تابع خودهمبستگی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۱ بعد از اعمال دیفرانسیل
غیرفصلی ۳۷
- شکل ۳-۲۵: تابع خودهمبستگی جزئی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۱ بعد از اعمال دیفرانسیل
غیرفصلی ۳۷
- شکل ۳-۲۶: توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای باقیمانده‌ی خطای فازی مزرعه ۱
..... ۳۷
- شکل ۳-۲۷: تابع خودهمبستگی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۲ ۳۸
- شکل ۳-۲۸: تابع خودهمبستگی جزئی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۲ ۳۸
- شکل ۳-۲۹: تابع خودهمبستگی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۲ پس از اعمال دیفرانسیل
غیرفصلی ۳۸
- شکل ۳-۳۰: تابع خودهمبستگی جزئی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۲ پس از اعمال دیفرانسیل
غیرفصلی ۳۸
- شکل ۳-۳۱: توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای باقیمانده‌ی خطای فازی مزرعه
۲ ۳۹
- شکل ۳-۳۲: سناریوهای تولید توان بادی مزرعه ۱ برای مرحله اول تصمیم‌گیری ۴۰
- شکل ۳-۳۳: سناریوهای تولید توان بادی مزرعه ۲ برای مرحله اول تصمیم‌گیری ۴۰

- شکل ۳-۳۴: سناریوهای کاهش یافته تولید توان بادی مزرعه ۱ برای مرحله اول ۴۰
- شکل ۳-۳۵: سناریوهای کاهش یافته تولید توان بادی مزرعه ۲ برای مرحله اول ۴۰
- شکل ۳-۳۶: سناریوهای تولید توان بادی مزرعه ۱ برای مرحله دوم تصمیم‌گیری ۴۱
- شکل ۳-۳۷: سناریوهای تولید توان بادی مزرعه ۲ برای مرحله دوم تصمیم‌گیری ۴۱
- شکل ۳-۳۸: سناریوهای کاهش یافته تولید توان بادی مزرعه ۱ برای مرحله دوم تصمیم‌گیری ۴۱
- شکل ۳-۳۹: سناریوهای کاهش یافته تولید توان بادی مزرعه ۲ برای مرحله دوم تصمیم‌گیری ۴۱
- شکل ۳-۴۰: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین خطاهای آریما ۴۲
- شکل ۳-۴۱: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین خطاهای فازی در فضای نرمال ۴۳
- شکل ۳-۴۲: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین خطاهای فازی در فضای واقعی ۴۳
- شکل ۳-۴۳: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین تولیدات توان بادی ۴۴
- شکل ۳-۴۴: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین خطاهای آریما ۴۴
- شکل ۳-۴۵: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین خطاهای فازی در فضای نرمال ۴۵
- شکل ۳-۴۶: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین خطاهای فازی در فضای واقعی ۴۵
- شکل ۳-۴۷: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین تولیدات توان بادی ۴۶
- شکل ۴-۱: فلوچارت شرکت در بازارها ۵۱

- شکل ۵-۱: منحنی پیشنهاد توان در بازار پیش‌رو با در نظر گرفتن همبستگی ۶۴
- شکل ۵-۲: منحنی پیشنهاد توان در بازار پیش‌رو بدون در نظر گرفتن همبستگی ۶۵
- شکل ۵-۳: منحنی پیشنهاد توان در بازار پیش‌رو به ازای $\beta = 1$ ۶۶
- شکل ۵-۴: توان مشخص شده در بازار پیش‌رو با در نظر گرفتن همبستگی ۶۷
- شکل ۵-۵: توان مشخص شده در بازار پیش‌رو بدون در نظر گرفتن همبستگی ۶۷
- شکل ۵-۶: توان مشخص شده در بازار پیش‌رو به ازای $\beta = 1$ ۶۸
- شکل ۵-۷: مجموع توان فروخته شده در بازار پیش‌رو بر حسب ضریب ریسک‌گریزی ۶۹
- شکل ۵-۸: توان مشخص شده در بازار تعادل با در نظر گرفتن همبستگی ۷۰
- شکل ۵-۹: توان مشخص شده در بازار تعادل بدون در نظر گرفتن همبستگی ۷۰
- شکل ۵-۱۰: توان مشخص شده در بازار تعادل به ازای $\beta = 1$ ۷۱
- شکل ۵-۱۱: دیسپچ توان با در نظر گرفتن همبستگی ۷۳
- شکل ۵-۱۲: دیسپچ توان بدون در نظر گرفتن همبستگی ۷۴
- شکل ۵-۱۳: دیسپچ توان به ازای $\beta = 1$ ۷۵
- شکل ۵-۱۴: اثر همبستگی بر منحنی سود مورد انتظار-CVaR ۷۶
- شکل ۵-۱۵: اثر همبستگی بر تغییرات منحنی سود مورد انتظار-CVaR ۷۶
- شکل ۵-۱۶: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز بر منحنی سود مورد انتظار-CVaR ۷۸
- شکل ۵-۱۷: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز بر تغییرات منحنی سود مورد انتظار-CVaR ۷۸
- شکل ۵-۱۸: منحنی درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو- β ۷۹
- شکل ۵-۱۹: منحنی درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو- β ۸۰
- شکل ۵-۲۰: منحنی درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو- β برای بررسی شیب منحنی ۸۰
- شکل ۵-۲۱: منحنی درآمد مورد انتظار بازار تعادل- β ۸۱

- شکل ۵-۲۲: منحنی جریمه مورد انتظار بازار تعادل- β ۸۳
- شکل ۵-۲۳: منحنی درآمد مورد انتظار بازار تعادل- β ۸۳
- شکل ۵-۲۴: منحنی جریمه مورد انتظار بازار تعادل- β ۸۴
- شکل ۵-۲۵: منحنی سود مورد انتظار بازار تعادل بر حسب β ۸۵
- شکل ۵-۲۶: منحنی سود مورد انتظار بازار تعادل بر حسب β ۸۷
- شکل ۵-۲۷: منحنی درآمد واقعی بازار پیش‌رو بر حسب β ۸۸
- شکل ۵-۲۸: منحنی درآمد واقعی بازار پیش‌رو بر حسب β ۸۹
- شکل ۵-۲۹: منحنی درآمد واقعی بازار تعادل بر حسب β ۹۰
- شکل ۵-۳۰: منحنی جریمه واقعی بازار تعادل بر حسب β ۹۰
- شکل ۵-۳۱: منحنی درآمد واقعی بازار تعادل بر حسب β ۹۱
- شکل ۵-۳۲: منحنی جریمه واقعی بازار تعادل بر حسب β ۹۱
- شکل ۵-۳۳: منحنی سود واقعی بر حسب β ۹۲
- شکل ۵-۳۴: منحنی سود واقعی بر حسب β ۹۳

جداول

جدول ۵-۱: اطلاعات مربوط به ذخیره‌سازها ۶۳

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱ انگیزه تحقیق

با افزایش جمعیت جهان و پیشرفت تکنولوژی‌های مختلف، نیاز به انرژی افزایش زیادی پیدا کرده است. استفاده زیاد از منابع فسیلی برای تامین انرژی سبب شده که این منابع کاهش چشمگیری پیدا کرده و قیمت آن‌ها به شدت افزایش یابد. از طرف دیگر، استفاده زیاد از سوخت‌های فسیلی باعث افزایش دمای زمین و ایجاد بحران‌های زیست محیطی شده است. در راستای گسترش استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر، بسیاری از دولت‌ها در گذشته برای تشویق به سرمایه‌گذاری در این زمینه، یارانه‌هایی را به تولیدکنندگان توان پاک و تجدیدپذیر اختصاص می‌دادند. تولیدکنندگان توانی که از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌کردند، می‌توانستند انرژی تولیدی خود را بدون برنامه‌ریزی از پیش تعیین شده با قیمت مناسبی به بازارهای برق بفروشند. با افزایش نفوذ تولید توان بادی و پیشرفت تکنولوژی مربوط به آن، به مرور یارانه‌ها کمتر شده و تولیدکنندگان بادی موظف شدند که مانند سایر تولیدکنندگان مرسوم، پیشنهادهای خود را به بازار ارائه دهند و در صورت انحراف از برنامه متحمل جریمه شوند. یکی از چالش‌های اساسی استفاده از انرژی باد در تولید انرژی الکتریکی، عدم قطعیت تولید توان بادی است. تولیدکنندگان بادی برای فرار از جریمه‌های احتمالی و در نتیجه افزایش سود، علاقمند به مقابله با عدم قطعیت‌ها و استفاده از روش‌هایی برای ارائه پیشنهاد بهینه هستند. رفتار تولید توان بادی از جنبه‌های زمان و مکان پیچیده است. تحلیل اطلاعات سری زمانی سرعت باد نشان می‌دهد سرعت باد مزرعه بادی در هر ساعت به سرعت باد در ساعات قبل همان مزرعه همبسته است. با توجه به اینکه تولید مزارع ارتباط قابل توجهی با سرعت باد دارد لذا می‌توان این همبستگی زمانی^۱ را بین تولید بادی در ساعات مختلف نیز، مشاهده کرد.

تولید توان دو مزرعه بادی که از لحاظ جغرافیایی به هم نزدیک هستند در ساعات مختلف، همبسته

^۱ Temporal correlation

بوده و این همبستگی در جهت مثبت است. به طور مثال در صورت کاهش تولید توان بادی در یک مزرعه، به طور همزمان یا با یک تأخیر زمانی تولید توان بادی در مزرعه نزدیک به آن نیز کاهش می‌یابد. این همبستگی مکانی^۱ بین مزارع بادی و هم‌جهت بودن آن، باعث افزایش تغییرات مجموع تولیدات توان مزارع بادی می‌شود.

ترکیب کردن تولیدکننده‌ی بادی با سیستم ذخیره‌ساز، عملکرد تولیدکننده را در بازار برق بهبود می‌بخشد. نه تنها ذخیره‌ساز در راستای جبران انحرافات عمل می‌کند بلکه با استفاده از ذخیره انرژی در قیمت‌های پایین و تخلیه انرژی در قیمت‌های بالا، می‌تواند سود را افزایش دهد. یکی از مسائلی که حضور ذخیره‌ساز ایجاد می‌کند، نحوه عملکرد در بازار تعادل است. چرا که در حضور ذخیره‌ساز، تولیدکننده‌ی توان می‌تواند برخلاف زمانی که تولید کننده بادی تنها است، در بازار تعادل پیشنهاددهی استراتژیک داشته باشد. از این‌رو مدل‌سازی بازار تعادل و اجرا کردن آن برای تحلیل سود، مهم است.

۲-۱ هدف تحقیق

در این تحقیق به دنبال آن هستیم که برای گروهی از سیستم‌های بادی-ذخیره‌ساز که در دو بازار پیش‌رو و تعادل شرکت می‌کنند، پیشنهاددهی استراتژیک ارائه دهیم. به دلیل حضور ذخیره‌ساز، برخلاف تولیدکنندگان بادی تنها، می‌توان در بازار تعادل نیز پیشنهاددهی استراتژیک ارائه داد. در نتیجه علاوه بر بازار پیش‌رو، مدل مناسبی برای بازار تعادل نیز ارائه می‌شود و نتایج پیشنهاددهی در هر دو بازار بررسی می‌شود. از طرف دیگر زمانی که چند تولیدکننده‌ی بادی از نظر جغرافیایی نزدیک به هم قرار دارند، بین تولید توان بادی آن‌ها همبستگی مکانی قابل توجهی وجود دارد. از این‌رو در این تحقیق روشی برای تولید سناریوهای همبسته توان مزارع بادی ارائه می‌شود. یکی از سوالات مهم این است که در نظر گرفتن همبستگی مکانی چه تاثیری بر سود مورد انتظار در مرحله اول و دوم

^۱ Spatial correlation

تصمیم‌گیری، و بر شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی^۱ دارد. همچنین باید بررسی کرد که منحنی سود مورد انتظار بر حسب ارزش در معرض ریسک شرطی و تغییرات سود مورد انتظار بر حسب تغییرات ضریب ریسک با در نظر گرفتن همبستگی مکانی چگونه تغییر می‌کنند. سوال مهم دیگر این است که تغییر در ظرفیت و مشخصات ذخیره‌ساز چه تاثیری بر سود مورد انتظار، اختلاف سود مورد انتظار با و بدون در نظر گرفتن همبستگی، منحنی تغییرات سود مورد انتظار بر حسب تغییرات ضریب ریسک، و منحنی تغییرات سود بر حسب تغییرات شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی دارد.

۳-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

در فصل دوم به بررسی سابقه موضوع پیشنهاددهی استراتژیک تولیدکننده‌ی بادی در بازار برق پرداخته می‌شود. نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی و تکنیک‌هایی که در جهت بهبود سود تولیدکنندگان است، مانند ترکیب کردن تولیدکننده‌ی بادی با ذخیره‌سازها یا منابع تولید توان مرسوم، بررسی می‌شوند. در فصل سوم، مدل‌های پیشنهاددهی استراتژیک مجموعه‌ای از تولیدکنندگان بادی-ذخیره‌ساز در بازارهای پیش‌رو و تعادل ارائه می‌شوند. در فصل چهارم، عدم قطعیت‌های قیمت بازار و تولید بادی مدل می‌شوند و روش مناسبی برای در نظر گرفتن همبستگی مکانی بین سناریوهای تولید توان مزارع بادی ارائه می‌شود. در بخش دوم این فصل، سناریوهای مربوط به قیمت بازارها و سناریوهای همبسته مکانی توان‌های بادی مزارع تولید می‌شوند. سپس این سناریوها برای کم کردن زمان محاسبات، کاهش می‌یابند. در انتها، روش ارائه شده برای در نظر گرفتن همبستگی مکانی تولید توان بادی، اعتبار سنجی می‌شود. در فصل پنجم، نتایج پیشنهاددهی توان و سود به دست آمده برای حالتی که همبستگی مکانی در نظر گرفته شده و زمانی که از آن صرف نظر شده است، نشان داده می‌شود. همچنین ریسک‌گریزی و اثر آن بر سود مورد انتظار بررسی می‌شود. در

^۱ Conditional Value at Risk (CVaR)

فصل ششم، خلاصه‌ای از آنچه که در این تحقیق انجام شده، بیان می‌شود. سپس نتایج جمع‌بندی شده و پیشنهادهایی ارائه می‌شود.

فصل دوم

مروری بر کارهای انجام شده

۲-۱ مقدمه

در این فصل روش‌هایی که برای پیشنهاددهی به صورت استراتژیک به کار گرفته شده است و تکنیک‌هایی که در جهت افزایش سود تولیدکننده‌ی توان بادی است، بررسی می‌شود. نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی استراتژیک، موضوعات مهم این مطالعه هستند. ترکیب کردن تولیدکننده‌ی بادی با سایر تولیدکنندگان مرسوم^۱ و ذخیره‌سازها، یا پیشنهاددهی گروهی تولیدکنندگان بادی می‌توانند تکنیک‌های مناسبی برای بهبود سود باشند. وقتی مجموعه‌ای از تولیدکنندگان بادی-ذخیره‌ساز به صورت گروهی پیشنهاد توان می‌دهند، دو موضوع اهمیت پیدا می‌کند. اول اینکه با قرار گرفتن ذخیره‌ساز در کنار تولیدکننده‌ی بادی، مدل‌سازی بازار تعادل و برنامه‌ریزی مناسب در این بازار مهم می‌شود؛ چراکه برخلاف تولیدکننده‌ی توان بادی تنها، تولید کننده بادی-ذخیره‌ساز در بازار تعادل نیز می‌تواند پیشنهاددهی استراتژیک داشته باشد و با برنامه‌ریزی مناسب برای شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز، سود بیشتری کسب کند. موضوع مهم دیگر، همبستگی مکانی بین تولید توان بادی گروهی از مزارع بادی است، که نزدیک به هم قرار دارند.

۲-۲ پیشنهاددهی استراتژیک

با افزایش تعداد تولیدکنندگان بادی و پیشرفت تکنولوژی مربوط به آن‌ها، طرح‌های تشویقی و یارانه‌هایی که در گذشته به آن‌ها تعلق می‌گرفت کاهش یافته و اکنون تولیدکنندگان بادی موظف هستند که مانند سایر تولیدکنندگان مرسوم، پیشنهادهای خود را به بازار ارائه دهند و در صورت انحراف از برنامه متحمل جریمه شوند. از آنجا که تولید توان بادی با عدم قطعیت روبروست، تولیدکنندگان بادی برای فرار از جریمه‌های احتمالی و در نتیجه افزایش سود، علاقمند به مقابله با عدم قطعیت‌ها و استفاده از روش‌هایی برای ارائه پیشنهاد بهینه هستند. در مرجع [۱] چند حالت

^۱ Conventional

مختلف پیشنهاددهی تولیدکننده‌ی توان بادی، در بازارهای برق مقایسه شده‌اند. حالت اول یک شیوه ساده برای پیشنهاددهی است که در آن مقدار پیش‌بینی شده تولید بادی به عنوان پیشنهاد توان به بازار ارسال می‌شود. در این حالت پیشنهاد بدون توجه به جریمه احتمالی در بازار تعادل ارائه می‌شود، به همین دلیل تولیدکننده می‌تواند متحمل جریمه‌های زیادی شده و در نتیجه سود کمتری کسب کند. در حالت دوم پیشنهاددهی به صورت استراتژیک انجام شده و تابع هدف شامل بیشینه کردن درآمد در بازار پیش‌رو و کمینه کردن جریمه در بازار تعادل است. در حالت سوم شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی به تابع هدف افزوده شده و با حداکثر کردن بدترین سناریو، ریسک را کاهش می‌دهد. مزیت این شاخص این است که می‌تواند به صورت خطی در مسئله وارد شود [۲]. در مرجع [۳] یک روش عمومی برای به دست آوردن پیشنهاد بهینه بر اساس پیش‌بینی احتمالی برای یک تولیدکننده‌ی بادی ارائه شده است. هدف مقاله مقایسه پیشنهاددهی بهینه بر اساس دو روش پیش‌بینی نقطه‌ای^۱ و پیش‌بینی احتمالی^۲ است. از مدل فازی- شبکه عصبی برای پیش‌بینی استفاده شده است. در مرجع [۴] از بهینه‌سازی سود یک تولیدکننده‌ی بادی بر اساس پیش‌بینی احتمالی برای شرکت در بازار برق و رزرو به صورت یکپارچه، استفاده شده است. در مرجع [۵] تکنیکی برای اینکه یک مزرعه بادی بهترین پیشنهاددهی استراتژیک را در یک بازار برق سه مرحله‌ای داشته باشد، ارائه شده است. برای مدل‌سازی مسئله از یک برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای استفاده شده و عدم قطعیت‌ها با استفاده از سناریو مدل شده‌اند. همچنین ابزاری برای به دست آوردن منحنی پیشنهاددهی استراتژیک معرفی شده است. از شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی برای ریسک‌گریزی استفاده شده و اثر آن بر سود مورد انتظار و انحراف از برنامه، بررسی شده است. قیمت بازار و تولید بادی به عنوان عدم قطعیت در نظر گرفته‌اند. بازار تعادل بر اساس بازار اسپانیا دو قیمتی فرض شده و روشی برای اینکه هر دو ضریب قیمت بازار تعادل به صورت هم‌زمان مدل شوند، پیشنهاد شده

^۱ Point forecasting

^۲ Probabilistic forecasting

است. برای پیش‌بینی قیمت بازار و تولید بادی از مدل آرما استفاده شده است. مرجع [۶] یک برنامه ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای پیشنهاددهی استراتژیک یک تولیدکننده‌ی بادی ارائه می‌دهد. مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها با سناریو انجام شده و از ابزار هوشمندی که ادغامی از تبدیل موجک^۱، بهینه‌سازی تجمع ذرات و شبکه تطبیقی مبتنی بر سیستم استنتاج فازی^۲ است، برای پیش‌بینی قیمت و تولید بادی استفاده شده است. شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی را برای ریسک‌گریزی انتخاب کرده است. مرجع [۷] یک مدل دوسطحی برای پیشنهاددهی استراتژیک یک تولیدکننده‌ی بادی ارائه می‌دهد. مسئله به صورت برنامه ریاضی با قیود تساوی فرموله شده، سپس برای قابل حل شدن به یک برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح^۳ تبدیل می‌شود. عدم قطعیت‌ها با سناریو مدل شده و برای تولید سناریو از پیش‌بینی احتمالی استفاده شده است. همبستگی میان تولید توان بادی و انحراف سیستم باقیمانده^۴ برای تولید سناریو، در نظر گرفته شده است. مرجع [۸] یک مدل دوسطحی برای پیشنهاددهی استراتژیک یک تولیدکننده‌ی بادی ارائه داده است. عدم قطعیت‌ها با سناریو مدل شده و با استفاده از روش ارائه شده در مرجع [۹] سناریوهای تولید بادی و قیمت بازار تعادل به صورت همبسته تولید شده‌اند. برای حل مسئله، برنامه ریاضی تصادفی با قیود تساوی^۵ در نظر گرفته شده است. سپس مسئله به یک برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح تبدیل شده است. این مرجع بیان می‌کند که ارائه پیشنهاد به صورت استراتژیک می‌تواند سود را افزایش دهد. در مرجع [۱۰] مسئله پیشنهاددهی استراتژیک برای تولیدکننده‌ی بادی با استفاده تئوری بازی حل می‌شود. عدم قطعیت تولید بادی با سناریو مدل شده و پیش‌بینی آن با استفاده از مدل آرما^۶ انجام می‌پذیرد. در مرجع [۱۱] پیشنهاددهی استراتژیک برای یک تولیدکننده‌ی بادی با استفاده از روش بهینه‌سازی دوسطحی ارائه

^۱ Wavelet transform

^۲ Adaptive-network-based fuzzy inference system

^۳ Mixed-integer linear programming

^۴ Residual system deviation

^۵ A stochastic mathematical program with equilibrium constraints

^۶ ARMA

شده است که مسئله سطح بالا حداکثر کردن سود، و مسئله سطح پایین شفاف‌سازی بازار است. در نهایت با استفاده از قضیه دوگان و کان تاگر مسئله به یک بهینه‌سازی خطی آمیخته با عدد صحیح تبدیل شده است. عدم قطعیت‌ها برای حل مسئله شفاف‌سازی بازار شامل تولید بادی، بار و تولید بادی سایر تولیدکنندگان بادی است، و برای مدل‌سازی آن‌ها سناریو در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۲] یک مدل تصادفی چند مرحله‌ای برای تولیدکننده‌ی بادی ارائه شده، سپس مسئله به یک برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح^۱ تبدیل می‌شود. عدم قطعیت‌ها با سناریو مدل می‌شوند. در این مرجع بیان شده است که همبستگی بین عدم قطعیت‌های تولید بادی و قیمت بازارها برای سادگی در نظر گرفته نشده است. دو مرجع اخیر برای ریسک‌گریزی از شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی استفاده کرده‌اند.

تولیدکننده‌ی بادی با مسئله مهم عدم قطعیت در دسترس بودن توان بادی روبروست و از طرف دیگر پیش‌بینی تولید بادی کار نسبتاً دشواری است و خروجی تولید بادی نوسانات زیادی دارد. مرجع [۱۳] برای مقابله با این مشکلات، یک پیشنهاددهی استراتژیک برای ترکیب تولیدکننده‌ی بادی و پاسخ تقاضا^۲ ارائه می‌دهد. در این مرجع مدل جدیدی برای در نظر گرفتن پاسخ تقاضا با تولیدکننده‌ی بادی پیشنهاد می‌شود که در این مدل بین تولیدکننده‌ی بادی و جمع‌کننده^۳ پاسخ تقاضا قرارداد دو جانبه‌ای تعیین می‌شود. مدل پیشنهاد شده در این مرجع برای شرکت در بازار پیش‌رو است، ولی در مرجع [۱۴] برای بازار درون‌روزی^۴ ارائه شده است. برخی برای کاهش مشکلات تولیدکننده‌ی بادی، آن را با تولیدکنندگان مرسوم یا ذخیره‌سازها ترکیب می‌کنند. در مرجع [۱۵] برای ترکیبی از تولیدکنندگان بادی و حرارتی^۵، یک برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح تصادفی برای ارائه

^۱ Mixed-integer linear programming

^۲ Demand response

^۳ aggregator

^۴ Intraday

^۵ Thermal

پیشنهاددهی استراتژیک، به کار گرفته شده است. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها از سناریو استفاده شده است. قیود مربوط به واحد حرارتی که شامل هزینه راه‌اندازی واحد، هزینه تولید توان، و قیود فنی مانند بازه ممنوع راه‌اندازی و محدودیت شیب افزایش یا کاهش توان است، در نظر گرفته شده است. در این مرجع نشان داده شده است که اگر تولیدکننده بادی و حرارتی به صورت یکپارچه پیشنهاددهی توان داشته باشند، سود بیشتری نسبت به زمانی که هر یک جداگانه پیشنهاددهی توان دارند، کسب می‌کنند. [۱۶] پیشنهاددهی استراتژیک برای ترکیبی از واحد آبی با تولیدکننده بادی ارائه داده و برای حل مسئله از بهینه‌سازی بازه‌ای^۱ استفاده کرده است. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها به جای آنکه از توزیع احتمال استفاده شود، از اعداد بازه‌ای^۲ استفاده می‌شود. روش‌های بهینه‌سازی مقاوم، تصادفی و بازه‌ای، مزایا و معایبی نسبت به یکدیگر دارند. سرعت حل مسئله در روش بهینه‌سازی مقاوم بالاست اما از آنجا که در این روش بدترین سناریو بهینه می‌شود، خطای زیادی ممکن است رخ دهد، چراکه بدترین سناریو الزاماً محتمل‌ترین سناریو نیست و ممکن است احتمال وقوع آن بسیار کم باشد. از طرفی روش بهینه‌سازی بازه‌ای برخلاف بهینه‌سازی تصادفی به توزیع احتمالی دقیق متغیر تصادفی نیاز ندارد و تنها نیازمند بازه متغیر تصادفی است، و از طرف دیگر حجم محاسبات کمتری نسبت به بهینه‌سازی تصادفی دارد. اما مشکلی که وجود دارد این است که به دست آوردن بازه متغیر کار دشواری است، و از طرف دیگر در این روش نمی‌توان مانند بهینه‌سازی تصادفی، سود مورد انتظار را محاسبه کرد، بلکه بازه سود به دست می‌آید و تنها می‌توان نقطه میانی بازه‌های سود را به دست آورد [۱۶]. اگرچه که حجم محاسبات در برنامه‌ریزی تصادفی بالاست اما با استفاده از روش کاهش سناریو می‌توان از حجم محاسبات کاست. از طرف دیگر هر چند کاهش سناریو می‌تواند در برخی از موارد اثر بعضی از ویژگی‌ها را کم‌رنگ کند یا از بین ببرد، اما با کاهش سناریو به تعداد مناسب، می‌توان علاوه بر کم کردن حجم محاسبات بسیاری از ویژگی‌ها را حفظ نمود. در مرجع [۱۷] برای یک مجموعه بادی-

^۱ Interval optimization

^۲ Interval numbers

ذخیره‌ساز، پیشنهاد بهینه ارائه شده و ارزش حضور باتری با ظرفیت‌های مختلف در کنار تولیدکننده بادی برای کسب سود بیشتر بررسی شده است. مرجع [۱۸] پیشنهاددهی استراتژیک برای یک سیستم که ترکیبی از تولیدکننده بادی و آبی-پمپ‌ذخیره‌ای است، ارائه می‌دهد. قرارداد دوجانبه نوع تبادل مناسبی برای تولیدکنندگان بادی به دلیل ذات متغیری که دارند، نیست. اما در این مرجع با قرار دادن تولیدکننده‌ی توان در کنار آبی-پمپ‌ذخیره‌ای، عدم قطعیت تولید بادی را کم کرده است. از طرف دیگر سیستم ذکر شده علاوه بر قرارداد دوجانبه در بازار پیش‌رو و تعادل که به صورت حوضچه است، نیز شرکت می‌کند و کمبودهای احتمالی در قرارداد دوجانبه که نتواند به وسیله سیستم تولیدکننده‌ی توان آبی-پمپ‌ذخیره‌ای تامین شود، می‌تواند با استفاده از بازارهای پیش‌رو و تعادل جبران شود. از شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی برای ریسک‌گریزی استفاده شده است. در نظر گرفتن قرارداد دوجانبه نمی‌تواند الزاما سود را افزایش دهد زیرا فقط زمانی که قیمت انرژی در مبادله دوجانبه بیشتر باشد، سود بیشتری کسب می‌شود و این اتفاق نمی‌تواند اتفاق متداولی باشد چرا که طرف مقابل قرارداد در این صورت تشویق می‌شود که انرژی مورد نیاز خود را مستقیماً از حوضچه‌های برق تامین کند. مراجع [۱۹-۲۱] نیز از سیستم پمپ‌ذخیره‌ای در کنار تولیدکننده بادی استفاده کرده‌اند. مرجع [۲۲] پیشنهاددهی استراتژیک را برای یک نیروگاه مجازی که شامل تولید بادی، ذخیره‌ساز و بار است، ارائه می‌دهد. مسئله با استفاده از بهینه‌سازی مقاوم و عدم قطعیت‌ها با استفاده از بازه‌های اطمینان مدل شده‌اند. همبستگی متقابل^۱ بین هر دو جفت از پارامترهای غیر قطعی یعنی تولید بادی، قیمت بازار پیش‌رو و قیمت بازار تعادل محاسبه شده و نشان داده شده که برای داده‌های مورد مطالعه، تنها بین قیمت بازار پیش‌رو و تعادل همبستگی متقابل قابل توجهی وجود دارد. به همین دلیل پارامتر جدیدی که اختلاف بین قیمت بازار پیش‌رو و تعادل است را تعریف کرده و نشان داده که این پارامتر همبستگی متقابل کمی با قیمت بازار پیش‌رو دارد و از در نظر گرفتن همبستگی متقابل بین

^۱ Cross correlation

پارامترهای غیرقطعی صرف نظر کرده است. پیش‌بینی قیمت بازار با استفاده از مدل آریمای فصلی انجام شده است. اما از آنجا که برای پیش‌بینی تولید توان بادی، آریمای نمی‌تواند برای بازه‌های طولانی مانند ۲۴ ساعت مدل مناسبی باشد، از ترکیب مدل آریمای با یک تابع غیرخطی که با استفاده از خوشه‌بندی بر اساس سیستم‌های فازی رابطه‌ی بین تولید و سرعت بادی را به دست می‌آورد، برای پیش‌بینی تولید بادی استفاده شده است. در این مرجع علاوه بر بازار پیش‌رو، بازار تعادل نیز اجرا شده و منحنی پیشنهاد قیمت برای هر کدام محاسبه شده است. از بهینه‌سازی مقاوم در مرجع [۲۳] برای یک تولیدکننده بادی و در مراجع [۲۴، ۲۵] برای یک سیستم بادی-ذخیره استفاده شده است. مرجع [۲۶] یک مدل پیشنهادی استراتژیک برای سیستم بادی-ذخیره‌ساز که در بازار پیش‌رو و تعادل دو قیمتی، شرکت می‌کند، ارائه می‌دهد. مسئله را با استفاده از بهینه‌سازی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح فرموله کرده و با الگوریتم نزول گرادیان^۱ اصلاح شده این مسئله غیرخطی را حل می‌کند. روش به کار گرفته شده در این تحقیق به دلیل غیر خطی بودن، حل پیچیده‌تری نسبت به روش‌هایی که مسئله را خطی مدل می‌کنند، دارد. مرجع [۲۷] پیشنهادی استراتژیک را برای یک سیستم متشکل از تولیدکننده بادی و ذخیره‌ساز که به صورت یکپارچه عمل می‌کنند، ارائه می‌دهد. از مدل بهینه‌سازی تصادفی برای حل مسئله استفاده کرده و عدم قطعیت‌ها را با سناریو مدل کرده است. برای مدل کردن و بهینه‌سازی بازار تعادل از قیود تصمیم‌گیری خطی^۲ استفاده شده است. شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی را برای مدل کردن ریسک‌گریزی در نظر گرفته است. این مرجع نشان می‌دهد در حالتی که ذخیره‌ساز در کنار تولیدکننده بادی قرار می‌گیرد، سود بهبود می‌یابد. همچنین سود مورد انتظار در حالتی که تولیدکننده بادی و ذخیره‌ساز به صورت یکپارچه عمل می‌کنند و در بازار تعادل نیز به صورت استراتژیک ظاهر می‌شوند، بیشتر از حالتی است که ذخیره‌ساز فقط نقش جبران‌کنندگی انحراف تولید بادی از مقدار برنامه‌ریزی شده در بازار پیش‌رو را دارد. در واقع زمانی که

^۱ Gradient descent

^۲ Linear decision rules

تولیدکننده بادی با ذخیره‌ساز به صورت یکپارچه عمل می‌کنند علاوه بر اینکه ذخیره‌ساز در راستای جبران انحرافات عمل می‌کند بلکه با استفاده از ذخیره انرژی در قیمت‌های پایین و تخلیه انرژی در قیمت‌های بالا به بهبود سود کمک می‌کند. از مزایای دیگر باتری این است که به یکنواخت‌تر شدن خروجی تولیدکننده بادی در بازار تعادل کمک می‌کند. ترکیب تولیدکننده بادی با انواع ذخیره‌سازها در تحقیقات بیشتری مورد توجه قرار گرفته است.

در بعضی از تحقیقات، گروهی از تولیدکنندگان بادی در نظر گرفته شده‌اند. مرجع [۲۸] پیشنهاددهی استراتژیک را برای گروهی از تولیدکنندگان بادی ارائه داده است. این مرجع نشان می‌دهد که اگر مزارع بادی متحدانه پیشنهاددهی کنند سود بیشتری نسبت به حالتی که جداگانه پیشنهاددهی می‌کنند، کسب خواهند کرد. همچنین اثر ارزش در معرض ریسک شرطی بر پیشنهاددهی و سود مورد انتظار بررسی شده است. در این مرجع فرض شده است که تمام تولیدکنندگان بادی به یک‌گره متصل‌اند، در نتیجه قیمت انرژی برای همه یکسان است. از طرف دیگر در این مرجع فرض شده است که تمام مزارع متعلق به یک مالک است، در نتیجه بحث چگونگی تقسیم سود بین مزارع مختلف پیش نمی‌آید ولی در مرجع [۲۹] روشی برای تقسیم سود بین مزارع یک مجموعه ارائه شده است. وقتی مجموعه‌ای از مزارع بادی که نزدیک به هم بررسی می‌شوند، همبستگی مکانی بین تولیدات مزارع و در نظر گرفتن آن در تولید سناریو اهمیت زیادی پیدا می‌کند، در حالی که این دو مرجع از این موضوع غفلت کرده‌اند. با توجه به تحقیق‌های انجام شده قرار گرفتن ذخیره‌ساز در کنار تولیدکننده بادی می‌تواند سود را بهبود بخشد. از طرف دیگر وقتی چند تولیدکننده بادی به صورت مشترک پیشنهاددهی توان را انجام می‌دهند، سود بیشتری کسب می‌کنند. ترکیب این دو موضوع، یعنی پیشنهاددهی گروهی چند سیستم بادی-ذخیره‌ساز می‌تواند موضوع جالبی باشد که مسائل جدیدی از جمله ارتباط تولیدکنندگان بادی با سیستم‌های ذخیره‌ساز و سایر تولیدکنندگان و نحوه پیشنهاددهی و عملکرد مجموعه در بازار برق را به همراه دارد.

۲-۳ پیش‌بینی توان بادی

برای تولید سناریو و مدل‌سازی تولید بادی نیاز به پیش‌بینی مناسبی از تولید بادی است. از این‌رو در ادامه، روش‌های پیش‌بینی توان بادی بررسی می‌شوند. دوره زمانی پیش‌بینی، عامل اصلی تعیین روش پیش‌بینی است. اگر بازه‌ی پیش‌بینی از چند ثانیه تا ۳۰ دقیقه باشد، به آن پیش‌بینی بسیار کوتاه مدت گفته می‌شود [۳۰] و کاربرد آن در بازارهای زمان حقیقی است. اگر بازه پیش‌بینی بین ۳۰ دقیقه تا ۶ ساعت باشد، پیش‌بینی کوتاه‌مدت نامیده می‌شود و در مواردی چون پخش بار اقتصادی و برنامه‌ریزی بار کاربرد دارد که در مرجع [۳۱] روش‌های مناسب مربوط به آن، ارائه شده است. اگر بازه پیش‌بینی بین ۶ ساعت تا یک روز باشد، به آن پیش‌بینی میان مدت و اگر از یک روز تا یک هفته باشد، بلند مدت گفته می‌شود [۳۲]. در مسئله پیشنهاددهی استراتژیک در بازار برق به دلیل اینکه بازه، یک روز یا دو روز در نظر گرفته می‌شود، باید از روش‌های مربوط به پیش‌بینی میان مدت یا بلندمدت استفاده کرد. روش فیزیکی و آماری دو دسته کلی از روش‌هایی هستند که برای پیش‌بینی میان مدت و بلندمدت استفاده می‌شوند. در روش فیزیکی با استفاده از اطلاعات جوی و مدل‌های دینامیکی، رابطه‌ی موجود بین پارامترهای جوی و تولید توان بادی را به دست می‌آورند. در این روش، معادلات پیچیده ریاضی باید توسط ابررایانه‌ها حل شوند، در نتیجه زمان‌بر و پرهزینه است [۳۲]. روش آماری بر اساس اطلاعات گذشته‌ی مزارع بادی که می‌تواند شامل سرعت و جهت باد، دما و ... باشد، مدل مناسبی را تعیین و به وسیله آن پیش‌بینی را انجام می‌دهد. روش آماری به دو دسته سری زمانی که در مراجع [۳۳، ۳۴] به کار رفته و هوش مصنوعی که در مراجع [۳۵، ۳۶] از آن‌ها استفاده شده است، تقسیم می‌شود. مرسوم‌ترین روش سری زمانی، مدل آریمای^۱ [۳۷] است، اما از مدل‌های دیگری چون آرما^۲ [۳۸] و اف‌آریمای^۳ [۳۳] نیز می‌توان نام برد. روش‌های سری زمانی معمولاً خطی هستند، در

^۱ ARIMA

^۲ ARMA

^۳ FARIMA

حالی که تولید بادی، دارای یک تابع غیر خطی از ورودی‌های خود است. در تحقیق‌های زیادی از هوش مصنوعی برای پیش‌بینی، استفاده شده است [۳۹]. رایج‌ترین روش‌های هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی هستند که خود مدل‌های مختلف با ویژگی‌های متفاوتی دارند. از جمله شبکه‌های به کار رفته در پیش‌بینی بادی، شبکه عصبی چند لایه پرسپترون^۱ [۴۰]، شبکه عصبی بازگشتی^۲ [۴۱]، و شبکه عصبی تابع بنیادی شعاعی^۳ [۴۲] است. روش دیگر تحلیل سری‌های زمانی پیچیده تولید بادی، استفاده از تبدیل موجک^۴ است [۴۳]. شبکه‌های عصبی می‌توانند نگاهی غیرخطی را بین ورودی و خروجی مدل کنند، اما به دلیل پیچیدگی سیگنال باد، گاهی اوقات شبکه‌های عصبی سنتی نمی‌توانند به درستی آموزش ببینند. به همین دلیل شبکه عصبی را با الگوریتم‌های بهینه‌سازی نوین [۴۴] و سیستم فازی و تبدیل موجک [۴۵] ترکیب می‌کنند.

۲-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل، ابتدا به بررسی پیشنهاددهی استراتژیک تولیدکننده بادی تنها، پرداخته شد. پس از آن نشان داده شد که با توجه به ماهیت متغیر و عدم قطعیت تولیدکننده بادی، برخی از تحقیق‌ها در راستای مقابله با این عدم قطعیت، از تولیدکنندگان مرسوم و ذخیره‌سازها در کنار تولیدکننده بادی استفاده کرده‌اند. از طرفی ذخیره‌سازها به دلیل مزایا و منافعشان، نقش پررنگ‌تری در تحقیقات بررسی شده داشتند. تعداد محدودی از تحقیق‌ها پیشنهاددهی مجموعه‌ای از تولیدکنندگان بادی به صورت گروهی را بررسی کرده بودند. اما بررسی مجموعه‌ای از سیستم‌های بادی-ذخیره‌ساز که به صورت گروهی پیشنهاددهی می‌کنند، تا کنون انجام نشده است. این سیستم دو موضوع مهم را به همراه دارد. اول اینکه این سیستم برخلاف تولیدکننده بادی صرف، به دلیل حضور ذخیره‌ساز در بازار تعادل نیز

^۱ Multi-Layer perceptron

^۲ Recurrent

^۳ Radial Basis Function

^۴ Wavelet Transform

می‌تواند پیشنهاددهی استراتژیک داشته باشد و برای محاسبه و تحلیل سود نیاز است که بازار تعادل نیز اجرا و شبیه‌سازی شود. که این موضوع در موارد محدودی مورد توجه قرار گرفته است. موضوع مهم دیگر بحث همبستگی مکانی است که بین تولید توان بادی مزارع نزدیک به هم وجود دارد. ارائه روشی مناسب برای در نظر گرفتن این موضوع مهم که از آن غفلت شده است، مهم به نظر می‌رسد. مزایا و معایب سه روش مدل‌سازی مسئله یعنی برنامه‌ریزی تصادفی، مقاوم و بازه‌ای بیان شد و مشخص شد با توجه به مسئله، برنامه‌ریزی تصادفی می‌تواند انتخاب مناسب‌تری باشد.

فصل سوم

مدل سازی عدم قطعیت ها

۳-۱ مقدمه

در این تحقیق، پارامترهای غیرقطعی مسئله بهینه‌سازی تصادفی مربوط به پیشنهاددهی استراتژیک با استفاده از سناریو مدل می‌شوند. پارامترهای غیرقطعی شامل قیمت بازار پیش‌رو و تعادل و نیز تولید بادی هستند.

در این فصل، ابتدا نحوه مدل‌سازی و تولید سناریو برای قیمت بازار پیش‌رو ارائه می‌شود. سپس، بازار تعادل دو قیمتی به گونه‌ای مدل می‌شود که بتوان به صورت همزمان برای هر دو قیمت تولید سناریو کرد.

در بخش بعد، برای پیش‌بینی توان بادی از یک مدل فازی-آریما استفاده می‌شود. مدل فازی-آریما نمی‌تواند همبستگی مکانی بین مزارع بادی را نیز مدل کند، به همین دلیل روش جدیدی ارائه می‌شود که همبستگی مکانی را نیز در نظر می‌گیرد. سپس، مراحل تولید سناریوهای همبسته تولید توان بادی مزارع، توضیح داده می‌شود. پس از تولید سناریو برای عدم قطعیت‌ها، نحوه تشکیل درخت سناریو شرح داده می‌شود.

۳-۲ مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها

سیستم مدیریت انرژی در هنگام تصمیم‌گیری با چندین پارامتر غیر قطعی روبه‌رو است، که این پارامترها بر تصمیم‌گیری اثر می‌گذارد، در نتیجه باید مدل مناسبی برای آن‌ها ارائه شود. در این پایان‌نامه از برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شده و پارامترهای غیرقطعی با سناریو مدل می‌شوند.

۱-۲-۳ مدل سازی قیمت بازار

در این پایان نامه دو بازار پیش رو و تعادل در نظر گرفته شده است و سیستم بادی-ذخیره ساز فقط در این دو بازار شرکت می کند. اگر روز D روز تحت برنامه ریزی باشد، در مرحله اول، بازار پیش رو ساعت ۱۰ صبح روز $D - 1$ تشکیل می شود و تولیدکنندگان و مصرف کنندگان پیشنهادها را تولید و مصرف خود را به اپراتور بازار ارائه می دهند. سپس در همان ساعت بازار تسویه شده و قیمت انرژی و تولید یا مصرف هر شرکت کننده مشخص می شود. در مرحله دوم نزدیک به هر ساعت روز D بازار تعادل تشکیل می شود و شرکت کنندگان باید انحرافات احتمالی خود از برنامه را تصحیح کنند. قیمت انرژی در بازار تعادل به گونه ای است که شرکت کنندگان تشویق می شوند برای کسب سود بیشتر برنامه ریزی دقیق تری در مرحله اول داشته باشند. زمانی که سیستم اضافه تولید یا کمبود مصرف داشته باشد قیمت خرید انرژی از بازار تعادل برابر با قیمت بازار پیش رو و قیمت فروش انرژی کمتر از قیمت بازار پیش رو است، یعنی $\lambda^+ < \lambda^{DA}$ و $\lambda^- = \lambda^{DA}$. از طرفی اگر سیستم کمبود تولید یا اضافه مصرف داشته باشد، قیمت بازار تعادل برای فروش، برابر با قیمت بازار پیش رو و برای خرید، بیشتر از قیمت بازار پیش رو است، یعنی $\lambda^+ = \lambda^{DA}$ و $\lambda^- > \lambda^{DA}$. بنابر توضیحات ذکر شده در هنگام اضافه تولید یا کمبود مصرف، ضرایب قیمت بازار تعادل برابر با $r^+ = \frac{\lambda^+}{\lambda^{DA}} < 1$ و $r^- = \frac{\lambda^-}{\lambda^{DA}} = 1$ و زمانی که سیستم کمبود تولید یا مصرف اضافی دارد، برابر با $r^+ = \frac{\lambda^+}{\lambda^{DA}} = 1$ و $r^- = \frac{\lambda^-}{\lambda^{DA}} > 1$ است. اطلاعات مربوط به ضرایب قیمت بازار تعادل در انتهای هر روز منتشر می شود.

۱-۱-۲-۳ سناریو قیمت بازار پیش رو

با استفاده از اطلاعات گذشته قیمت بازار پیش رو، مدل مناسب آریمای تعیین می شود. با استفاده از اعداد تصادفی به دست آمده از توزیع نرمال، خطاهای باقیمانده آینده تعیین شده و از این طریق سناریوهای مختلف تولید می شوند.

۲-۱-۲-۳ سناریو قیمت بازار تعادل

ضریب قیمت بازار تعادل زمانی که سیستم اضافه تولید یا کمبود مصرف دارد، برای فروش انرژی کمتر از ۱ و برای خرید انرژی برابر ۱ است ($r^+ < 1, r^- = 1$) و زمانی که سیستم کمبود تولید یا اضافه مصرف داشته باشد، ضریب قیمت برای فروش انرژی برابر ۱ و برای خرید انرژی بیشتر از ۱ است ($r^- > 1, r^+ = 1$). از آنجا که همواره حداقل یکی از ضرایب برابر ۱ است می توان با استفاده از رابطه $r = r^- r^+$ یا $r = r^- + r^+ - 1$ ، هر دو ضریب را ترکیب کرد. با این کار از اینکه تعیین مدل آریمما و تولید سناریو دو بار تکرار شود، جلوگیری می شود. سناریوها به صورت مشترک برای هر دو ضریب تولید می شود و برای جداسازی آن ها کافی است به این نکته توجه کرد که مقادیر بزرگ تر از ۱ فقط می تواند به r^- و مقادیر کمتر از ۱ نیز فقط به r^+ اختصاص داده شود. بر اساس [۵] پیش بینی و تولید سناریو را برای سری زمانی \sqrt{r} به دست می آوریم، در نتیجه مجذور مقادیر سناریوها، سناریوهای مطلوب ما هستند. از آنجا که اطلاعات مربوط به ضرایب قیمت بازار تعادل در انتهای آن روز مشخص می شود، زمانی که سیستم مدیریت انرژی در مرحله اول، تصمیم گیری می کند، ضریب قیمت بازار تعادل برای روز $D - 1$ و مشخص نشده است. بنابراین ابتدا برای روز $D - 1$ سناریو تولید می کنیم، سپس سناریوها را به اطلاعات گذشته ضریب قیمت بازار تعادل اضافه کرده و به ازای هر سناریو، تعدادی سناریو برای روز D تولید می کنیم.

۲-۲-۳ مدل سازی تولید بادی

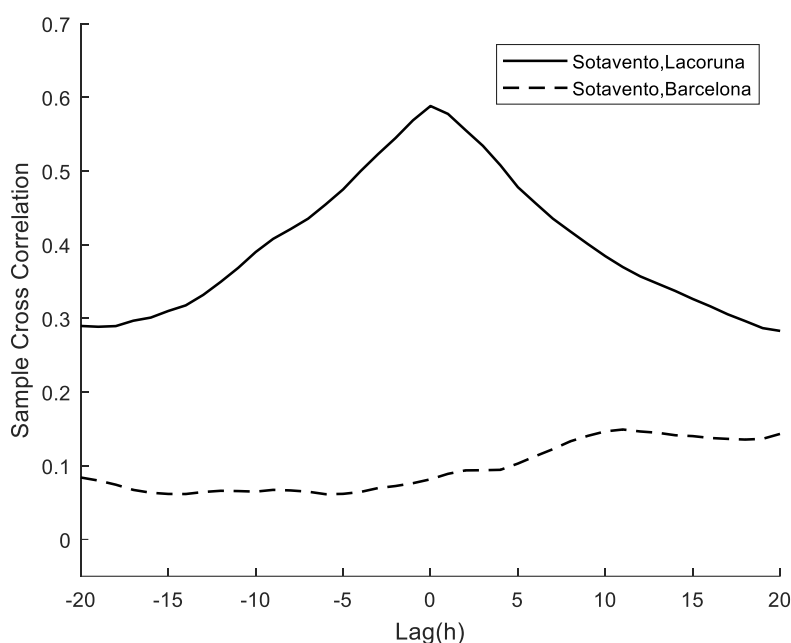
۱-۲-۲-۳ پیش بینی تولید بادی

به دلیل آنکه آریمما برای بازه طولانی (مثلا ۲۴ ساعت) پیش بینی تولید بادی مناسب نیست، آریمما را با یک تابع فازی ترکیب کرده ایم. این تابع با استفاده از خوشه بندی بر اساس سیستم فازی عمل می کند. در این روش ابتدا اطلاعات گذشته ی مربوط به سرعت باد و تولید بادی به تابع فازی داده

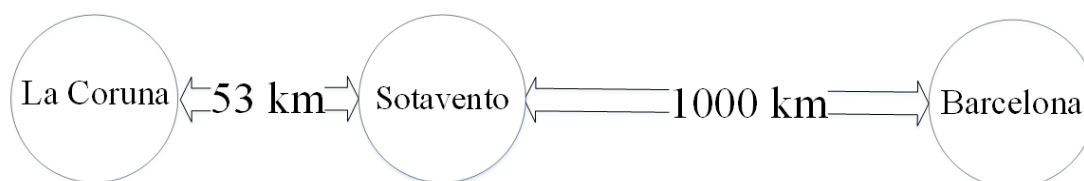
می‌شود و این تابع رابطه تولید بادی بر حسب سرعت باد را مدل می‌کند. پس از آن مقادیری که با استفاده از تابع به دست می‌آید، از مقادیر واقعی تولید بادی کم می‌شود، در نتیجه خطای تابع فازی به دست می‌آید. خطای تابع فازی را به حوزه نرمال برده و آریمای مناسب آن را تعیین می‌کنیم. با استفاده از آریما، خطای تابع فازی را برای بازه‌های مشخص پیش‌بینی می‌کنیم و سپس مقادیر پیش‌بینی شده خطا را با مقدار تابع فازی که با استفاده از سرعت باد آینده به دست آمده است، جمع می‌کنیم. در هنگام تصمیم‌گیری در مرحله اول توان‌های بادی در بازه ۱۰ تا ۲۴ ساعت روز $D - 1$ هنوز مشخص نشده‌اند. از این‌رو ابتدا برای این بازه سناریو تولید می‌کنیم سپس سناریوها را به اطلاعات گذشته اضافه کرده و به ازای هر سناریو چند سناریو برای روز D تولید می‌کنیم.

۲-۲-۲-۳ سناریو همبسته تولید بادی

علاوه بر اینکه بین بازه‌های زمانی تولید بادی، همبستگی وجود دارد، توان تولیدی چند مزرعه بادی نزدیک به هم نیز می‌توانند همبستگی مکانی داشته باشند. در شکل ۱-۳ بر اساس داده‌های واقعی، همبستگی مکانی بین دو جفت مزرعه بادی که فاصله آن‌ها در شکل ۲-۳ نمایش داده شده، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای دو مزرعه نزدیک‌تر، همبستگی مکانی مقدار قابل توجهی دارد و جهت آن مثبت است. همچنین با توجه به شکل می‌توان دریافت که همبستگی مکانی با فاصله مزارع رابطه عکس دارد.



شکل ۱-۳: همبستگی مکانی مزارع با فواصل متفاوت



شکل ۲-۳: فاصله بین مزارع بادی

در این پایان نامه علاوه بر اینکه با استفاده از آریما همبستگی زمانی در نظر گرفته شده است، با استفاده از روشی که در ادامه می‌آید همبستگی مکانی نیز در نظر گرفته می‌شود. مرجع [۹] این روش را برای تولید سناریوهای سرعت بادی همبسته استفاده کرده است، ولی ما این روش را با پیش‌بینی تولید بادی که در قسمت قبل توضیح داده شد ترکیب می‌کنیم و از این طریق سناریو همبسته تولید بادی به وجود خواهد آمد. مراحل در نظر گرفتن همبستگی به شرح زیر است.

۱. برای هر مزرعه، یک تابع غیر خطی مناسب برای اینکه تولید بادی و سرعت گذشته را به هم مرتبط کند، تعیین و سری‌های زمانی خطای تابع غیرخطی را محاسبه می‌کنیم. خطای تابع غیرخطی از اختلاف بین مقدار واقعی توان و مقدار تخمین زده شده توسط تابع

غیرخطی به دست می‌آید.

۲. برای هر مزرعه، خطاهای تابع غیر خطی را به فضای نرمال انتقال می‌دهیم.

۳. برای خطاهای نرمال شده مربوط به هر مزرعه، مدل مناسب آریما را تعیین کرده و برای هر مزرعه خطای باقیمانده آریما را محاسبه می‌کنیم.

۴. ماتریس H را به روش زیر می‌سازیم. برای سادگی نمایش، روش در نظر گرفتن همبستگی برای دو مزرعه ارائه شده است. به راحتی می‌توان از روابط بیان شده برای دو مزرعه، روابط را برای تعداد مزارع بالاتر به دست آورد.

$$H = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix} \quad (1-3)$$

که در رابطه بالا $P_{11} = \sigma_1^2 I_{K+L_T}$ و $P_{22} = \sigma_2^2 I_{K+L_T}$ و

$$P_{12} = P_{21}^T = \sigma_1 \sigma_2 \begin{pmatrix} \rho_0 & \cdots & \rho_k & \cdots & \rho_K & 0 \\ \vdots & \rho_0 & \cdots & \rho_k & \cdots & \rho_K \\ \rho_{-k} & \vdots & \rho_0 & \cdots & \rho_k & \vdots \\ \vdots & \rho_{-k} & \vdots & \rho_0 & \cdots & \rho_k \\ \rho_{-K} & \vdots & \rho_{-k} & \vdots & \rho_0 & \vdots \\ 0 & \rho_{-K} & \cdots & \rho_{-k} & \cdots & \rho_0 \end{pmatrix}_{(K+L_T) \times (K+L_T)}$$

که ρ_k ضریب لگ k به دست آمده از اجرای تابع همبستگی متقابل^۱ بر روی بردارهای خطای آریما است، K بزرگ‌ترین شماره لگ‌هایی است که مقدارشان قابل اعتنا است و L_T طول بازه پیش‌بینی است.

۵. تجزیه چالزکی ($H = PP^T$) را بر روی ماتریس H اجرا کرده و ماتریس متعامد P را به دست می‌آوریم.

۶. برای هر مزرعه L_T خطا با استفاده از توزیع نرمال استاندارد تولید می‌کنیم. این خطاها

^۱ Cross correlation function

مستقل از هم هستند.

۷. بین خطاهای تولید شده در مرحله قبل با استفاده از ماتریس متعامد به دست آمده از

مرحله ۵، همبستگی متقابل ایجاد می‌کنیم.

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} [\hat{e}_1(n-K+1:n), e_1(n+1:n+L_T)]^T \\ [\hat{e}_2(n-K+1:n), e_2(n+1:n+L_T)]^T \\ \vdots \\ [\hat{e}_{N_W}(n-K+1:n), e_{N_W}(n+1:n+L_T)]^T \end{pmatrix} \\ &= P \begin{pmatrix} [e_1(n-K+1:n), \alpha_1(n+1:n+L_T)]^T \\ [e_2(n-K+1:n), \alpha_2(n+1:n+L_T)]^T \\ \vdots \\ [e_{N_W}(n-K+1:n), \alpha_{N_W}(n+1:n+L_T)]^T \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (۲-۳)$$

که n طول بردارهای خطای باقیمانده، N_W تعداد مزارع بادی، $e(n-K+1:n)$ ، K خطای باقیمانده آخر، $\hat{e}(n-K+1:n)$ مقادیر تخمین زده شده مربوط به K خطای باقیمانده آخر است. $\alpha(n+1:n+L_T)$ خطاهای تصادفی مستقلی هستند که در مرحله ۶ تولید شده است و $e(n+1:n+L_T)$ خطاهایی هستند که همبستگی متقابل دارند و برای تولید سناریو از آن‌ها استفاده می‌شود.

۸. سناریو تولید شده برای خطای تابع فازی را که در حوزه نرمال قرار دارد، به حوزه واقعی

انتقال می‌دهیم.

۹. با استفاده از تابع فازی و سرعت بادی بازه زمانی پیش‌بینی، مقدار توان بادی را برای بازه

زمانی مورد نظر به دست می‌آوریم. سرعت باد آینده می‌تواند از سایت‌های هواشناسی به

دست آید.

۱۰. سناریو تولید شده در مرحله ۸ را با مقدار پیش‌بینی شده به وسیله تابع فازی در مرحله ۹

جمع می‌کنیم به این ترتیب یک سناریو برای توان بادی، تولید می‌شود.

۱۱. مرحله ۶-۱۰ را برای تعداد دلخواه سناریو تکرار می‌کنیم.

۳-۲-۳ درخت سناریو

همانطور که بیان شد اگر روز D ، روز تحت برنامه‌ریزی باشد. زمانی که سیستم مدیریت انرژی، در هر مرحله تصمیم‌گیری می‌کند، تعدادی پارامتر غیرقطعی وجود دارد که با استفاده از سناریو مدل می‌شوند.

اندیس‌های سناریوها برای مرحله اول، به شرح زیر است:

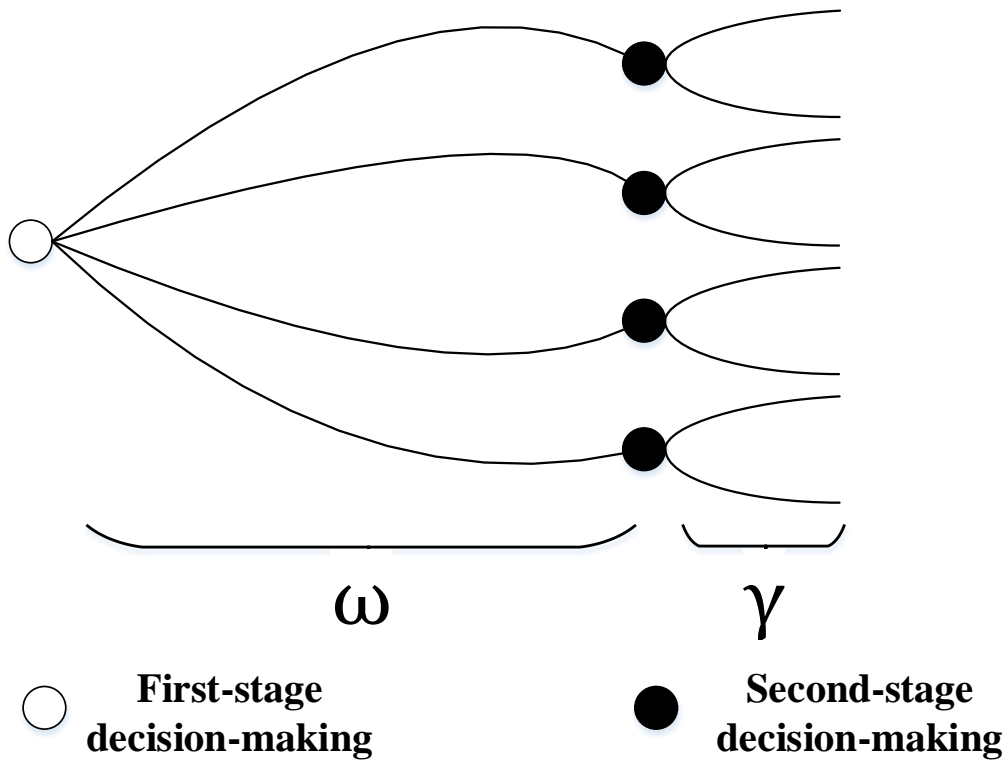
۱. d که مربوط به سناریوهای تولید شده قیمت بازار پیش‌رو برای روز D است.
۲. b_1 که مربوط به سناریوهای تولید شده ضریب قیمت بازار تعادل برای روز $D - 1$ است.
۳. b_2 که مربوط به سناریوهای تولید شده ضریب قیمت بازار تعادل برای روز D است.
۴. w_1 که مربوط به سناریوهای تولید شده تولید توان بادی برای ساعات بین بسته شدن بازار پیش‌رو تا زمان تحویل توان یا به عبارت دیگر بازه ۱۰ تا ۲۴ روز $D - 1$ است.
۵. w_2 که مربوط به سناریوهای تولید شده تولید توان بادی برای روز D است.

اندیس‌های سناریوهای مرحله دوم نیز به این صورت بیان می‌شود:

۱. w_2 که مربوط به سناریوهای تولید شده تولید توان بادی برای روز D است.
 ۲. b_2 که مربوط به سناریوهای تولید شده ضریب قیمت بازار تعادل برای روز D است.
- از آنجا که ω مجموعه سناریوهایی است که قبل از زمان تحویل توان محقق می‌شود و γ بعد از زمان تحویل توان محقق می‌شود، پس برای مرحله اول $\omega = \{d, w_1, w_2, b_1\}$ و $\gamma = \{b_2\}$ و برای مرحله دوم $\gamma = \{w_2, b_2\}$ است.

برای در نظر گرفتن سناریو در مدل برنامه‌ریزی تصادفی از درخت سناریو استفاده می‌کنیم. با توجه

به توضیحات بالا تعداد سناریوهای مرحله اول برابر $N_\omega N_\gamma = N_d N_{w_1} N_{w_2} N_{b_1} N_{b_2}$ و برای مرحله دوم برابر $N_\gamma = N_{w_2} N_{b_2}$ است.



شکل ۳-۳: درخت سناریو

۳-۳ داده‌های مربوط به مطالعه موردی

مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها با استفاده از اطلاعات گذشته آن‌ها انجام می‌شود. در این تحقیق، مطالعه موردی بر روی بازار اسپانیا صورت گرفته است. از این رو، اطلاعات مربوط به قیمت بازار پیش‌رو و ضرایب قیمت بازار تعادل، از بازار اسپانیا به دست آمده است [۴۶].

برای اطلاعات مربوط به تولید بادی، از یک سایت تولید بادی تحقیقاتی در شمال غربی کشور اسپانیا استفاده شده است [۴۷]. اطلاعات شامل سرعت و جهت باد، و نیز تولید توان مزرعه بادی مورد مطالعه است. در این تحقیق از یک مزرعه فرضی نیز استفاده شده است. این مزرعه فرضی با استفاده از اطلاعات مزرعه تحقیقاتی ذکر شده شبیه‌سازی شده است. نحوه شبیه‌سازی به این صورت است که به

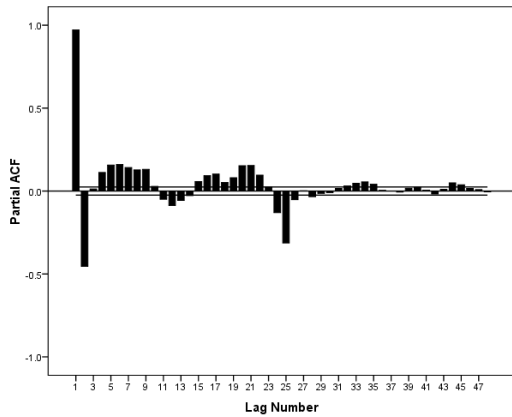
یک شبکه عصبی سرعت و جهت باد مزرعه تحقیقاتی به عنوان ورودی و تولید بادی مزرعه تحقیقاتی به عنوان خروجی داده می‌شود و با استفاده از این اطلاعات شبکه عصبی آموزش می‌بیند. سپس با استفاده از سایت هواشناسی [۴۸] اطلاعات مربوط به سرعت و جهت باد مزرعه فرضی را به دست آورده و با استفاده از شبکه عصبی آموزش دیده اطلاعات تولید بادی مزرعه فرضی را تولید می‌کنیم. این روش نسبت به روش مرسوم استفاده از منحنی سرعت-توان توربین‌های بادی، بهتر عمل می‌کند. چرا که در روش استفاده از منحنی سرعت-توان علاوه بر این که سرعت باد به صورت فرضی با سرعت چرخش توربین برابر در نظر گرفته می‌شود، از جهت باد که می‌تواند بر تولید بادی تاثیر قابل توجهی داشته باشد نیز صرف نظر می‌شود. مزرعه فرضی نیز در شمال غرب اسپانیا در فاصله حدود ۵۰ کیلومتر از مزرعه تحقیقاتی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، اطلاعات مربوط به ۲۷۹ روز را از تاریخ ۲۰۱۸/۲/۱ به عنوان اطلاعات گذشته در نظر گرفته شده و شبیه سازی برای روز ۲۸۰ ام انجام می‌شود.

۳-۴ تولید سناریو برای قیمت بازار پیش‌رو

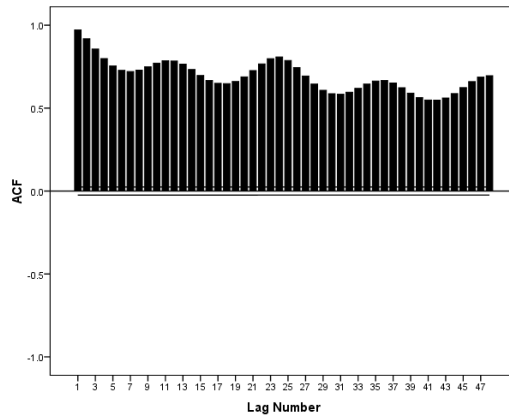
ابتدا با استفاده از نرم‌افزار SPSS، شکل توابع خود همبستگی^۱ و خود همبستگی جزئی^۲ را برای اطلاعات گذشته قیمت بازار پیش‌رو به دست می‌آوریم.

^۱ Autocorrelation function (ACF)

^۲ Partial autocorrelation function (PACF)

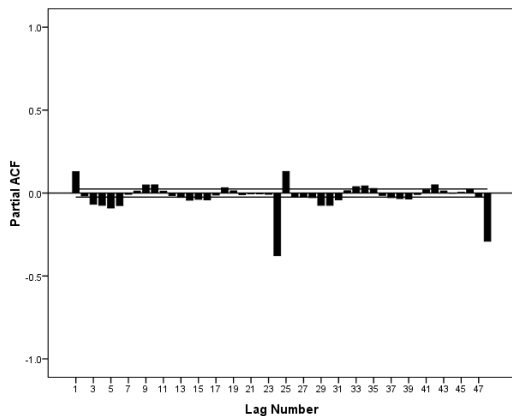


شکل ۳-۵: تابع خودهمبستگی جزئی قیمت بازار پیش‌رو

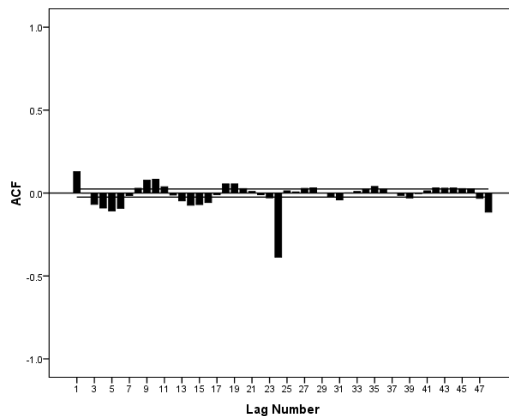


شکل ۳-۴: تابع خودهمبستگی قیمت بازار پیش‌رو

همانطور که از شکل ۳-۴ مشخص است، تابع خودهمبستگی علاوه بر اینکه نایستا است، رفتار فصلی نیز دارد. از این رو از دیفرانسیل‌گیری غیرفصلی و فصلی استفاده می‌کنیم.

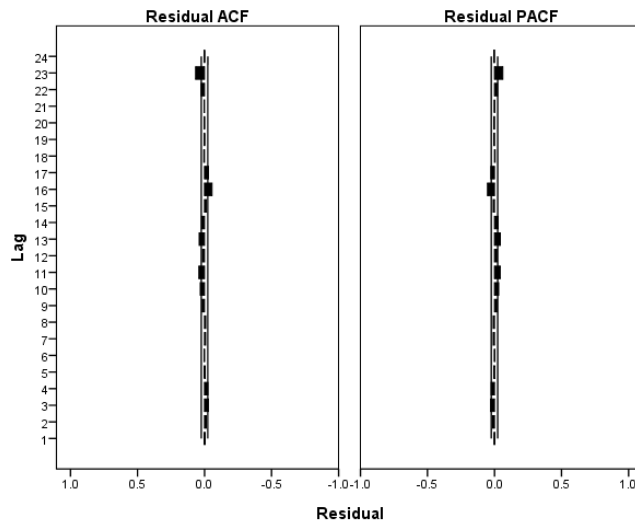


شکل ۳-۷: تابع خودهمبستگی جزئی پس از اعمال دیفرانسیل غیرفصلی و فصلی



شکل ۳-۶: تابع خودهمبستگی پس از اعمال دیفرانسیل غیرفصلی و فصلی

با توجه به شکل ۳-۶ می‌توان لگ‌های ۱ تا ۶ را معنی‌دار فرض کرد و همچنین لگ ۲۴ نیز که مربوط به رفتار فصلی است، باید در نظر گرفته شود. از طرف دیگر از شکل ۳-۷ می‌توان فهمید که برای رفتار غیر فصلی لگ‌های ۱ تا ۶ و برای رفتار فصلی لگ‌های ۲۴ و ۴۸ باید در نظر گرفته شوند. در نتیجه مدل ارائه شده، $ARIMA(6,1,6)(2,1,1)_{24}$ است.

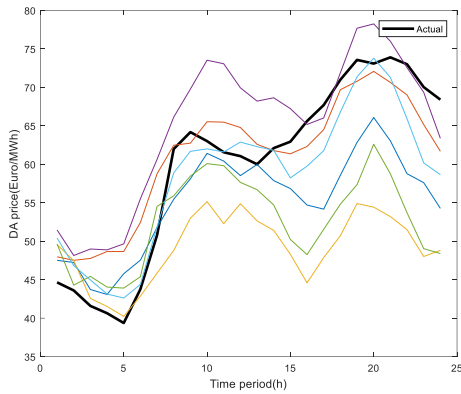


شکل ۳-۸: توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای باقیمانده قیمت بازار پیش‌رو

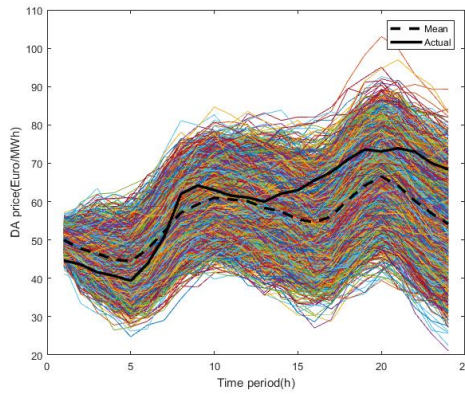
برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده، شکل توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای باقیمانده بررسی می‌شود. شکل ۳-۸ نشان می‌دهد که مقادیر توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی برای خطاهای باقیمانده بسیار کم بوده، در نتیجه مناسب بودن مدل ثابت می‌شود.

۳-۴-۱ تولید سناریو برای مرحله اول تصمیم‌گیری

با استفاده از اعداد تصادفی به دست آمده از یک توزیع نرمال با میانگین و انحراف معیار خطاهای باقیمانده اطلاعات گذشته، ۵۰۰۰ سناریو تولید می‌کنیم (شکل ۳-۹). پس از آن ۵۰۰۰ سناریو تولید شده را به ۶ سناریو کاهش می‌دهیم (شکل ۳-۱۰).



شکل ۳-۱۰: سناریوهای کاهش یافته قیمت بازار پیش‌رو برای مرحله اول تصمیم‌گیری



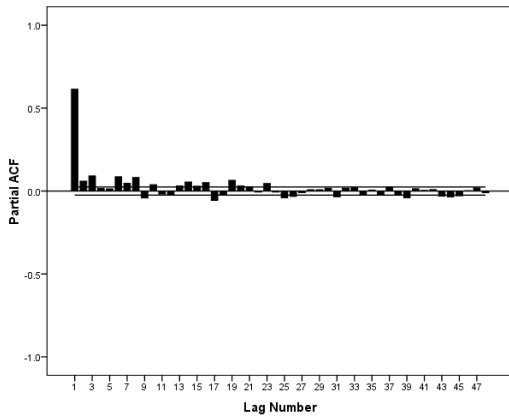
شکل ۳-۹: سناریوهای قیمت بازار پیش‌رو برای مرحله اول تصمیم‌گیری

۳-۴-۲ تولید سناریو برای مرحله دوم تصمیم‌گیری

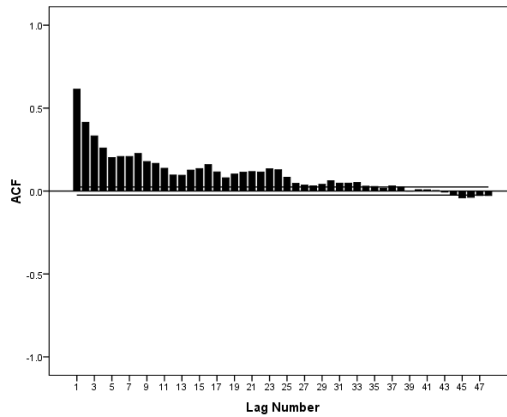
در مرحله دوم، بازار پیش‌رو تسویه شده و مقادیر قیمت مشخص شده است، به همین دلیل برای این مرحله سناریو قیمت بازار پیش‌رو تولید نشده و مقادیر اصلی در مسئله قرار داده می‌شود.

۳-۵ مدل‌سازی قیمت بازار تعادل

در این تحقیق بازار تعادل دو قیمتی در نظر گرفته شده است. اما همانطور که در ۳-۱-۲-۳ بیان شد، ضرایب قیمت بازار تعادل را ترکیب کرده و مدل مناسب را برای حالت ترکیب شده به دست می‌آوریم. در ادامه همانند [۵] مدل مناسبی را برای $\sqrt{3}$ تعیین می‌کنیم.

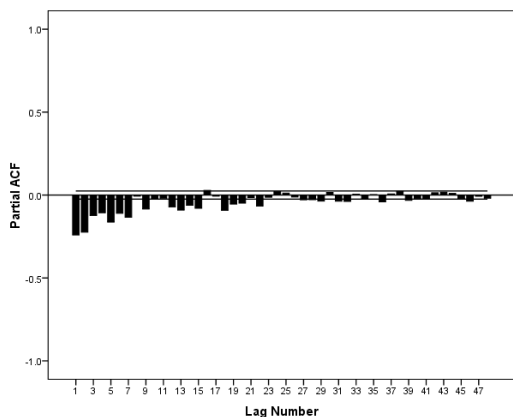


شکل ۳-۱۲: تابع خودهمبستگی جزئی جذر ضریب بازار تعادل

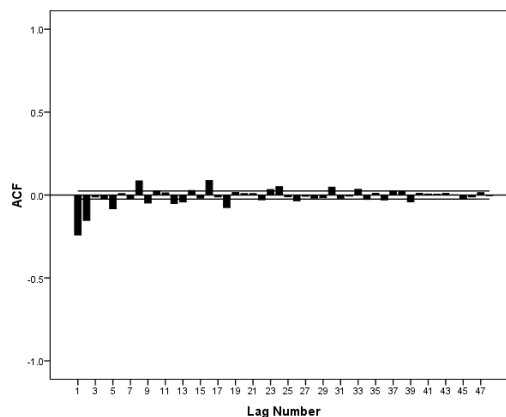


شکل ۳-۱۱: تابع خودهمبستگی جذر ضریب بازار تعادل

می توان تابع همبستگی جزئی را با توجه به شکل ۳-۱۱، نمایی کاهشی در نظر گرفت اما شاید تقریب مناسبی نباشد. در نتیجه برای رفع ناپیوستگی، دیفرانسیل گیری غیرفصلی انجام می دهیم.

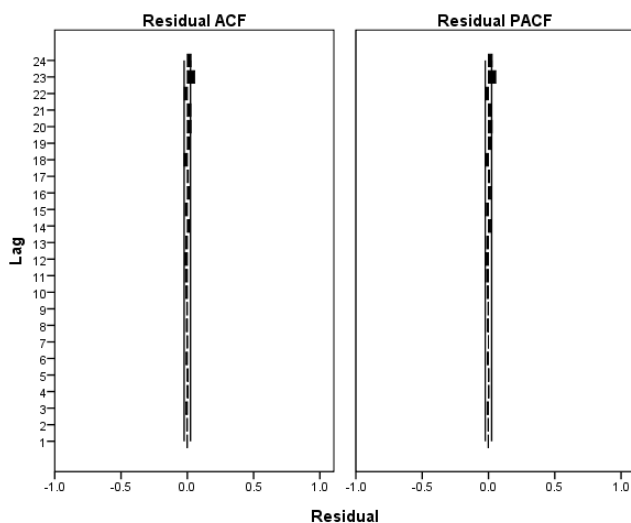


شکل ۳-۱۴: تابع خودهمبستگی جزئی جذر ضریب بازار تعادل پس از اعمال دیفرانسیل غیرفصلی



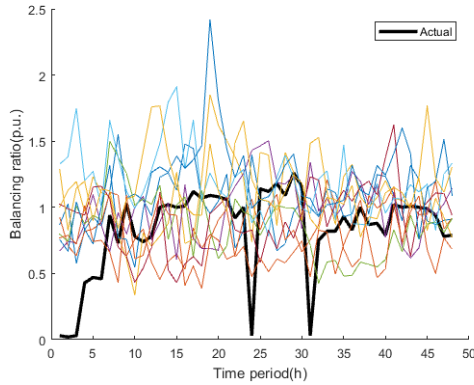
شکل ۳-۱۳: تابع خودهمبستگی جذر ضریب بازار تعادل پس از اعمال دیفرانسیل غیرفصلی

با توجه به شکل ۳-۱۳ می توان ۱۰ لگ از تابع خودهمبستگی و با توجه به شکل ۳-۱۴ می توان ۹ لگ از تابع خودهمبستگی جزئی را معنی دار فرض کرد. در نتیجه مدل مناسب می تواند $ARMA(9,1,10)$ باشد. مقدار توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای باقیمانده (شکل ۳-۱۵) بسیار کم بوده و مناسب بودن مدل انتخاب شده ثابت می شود.

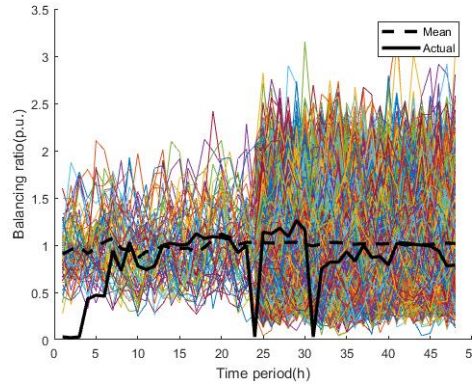


شکل ۳-۱۵: توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای باقیمانده برای ضرایب قیمت بازار تعادل

۳-۵-۱ تولید سناریو برای مرحله اول تصمیم‌گیری



شکل ۳-۱۷: سناریوهای کاهش یافته ضریب قیمت بازار تعادل برای مرحله اول

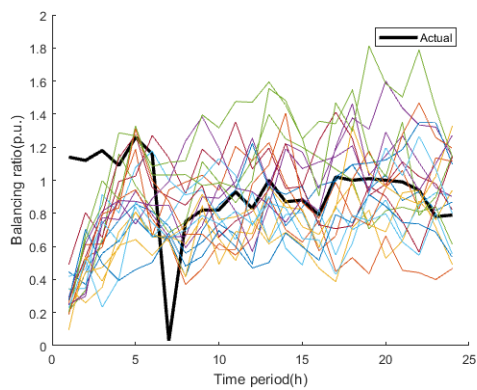


شکل ۳-۱۶: سناریوهای ضریب قیمت بازار تعادل برای مرحله اول

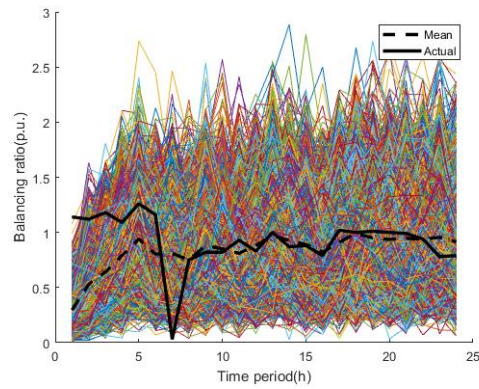
از آنجا که در زمان تصمیم‌گیری در مرحله اول، مقدار ضریب قیمت بازار تعادل برای روز $D - 1$ و D مشخص نیست. از این رو ابتدا برای روز $D - 1$ ، ۷۱ سناریو تولید می‌کنیم سپس به ازای هر سناریو، ۷۱ سناریو برای روز D تولید می‌کنیم. در مجموع ۵۰۴۱ سناریو تولید می‌شود (شکل ۳-۱۶) که به ۱۰ سناریو کاهش داده می‌شود (شکل ۳-۱۷).

۳-۵-۲ تولید سناریو برای مرحله دوم تصمیم‌گیری

در مرحله دوم تصمیم‌گیری ضرایب قیمت بازار تعادل برای روز $D - 1$ ، مشخص شده است. در نتیجه اطلاعات به دست آمده را به اطلاعات گذشته اضافه کرده و بر اساس داده‌های به روز شده برای روز D سناریو تولید می‌کنیم. برای مرحله دوم ۵۰۰۰ سناریو برای ضریب قیمت بازار تعادل تولید می‌کنیم (شکل ۳-۱۸) که آن را به ۲۰ سناریو کاهش می‌دهیم (شکل ۳-۱۹).



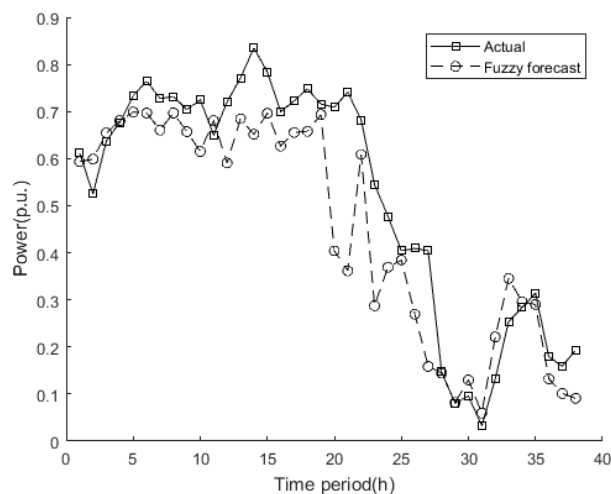
شکل ۳-۱۹: سناریوهای کاهش یافته ضریب قیمت بازار برای مرحله دوم



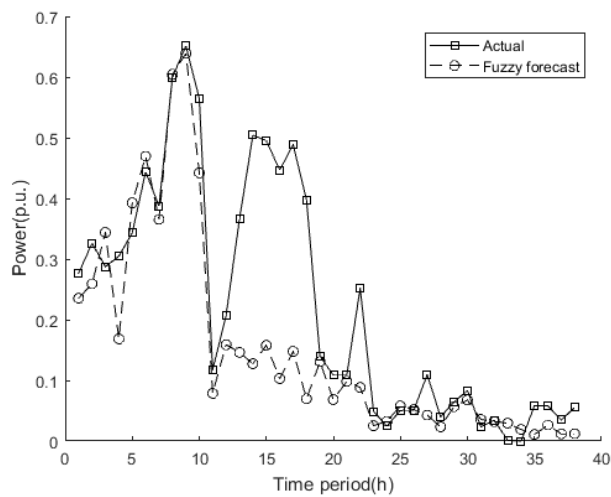
شکل ۳-۱۸: سناریوهای ضریب قیمت بازار تعادل برای مرحله دوم

۳-۶ مدل سازی تولید توان بادی

ابتدا اطلاعات هر مزرعه که شامل سرعت و توان بادی است، به تابع فازی داده شده و پارامترهای آن مشخص می‌شود. سپس با استفاده از پارامترهای به دست آمده و سرعت‌های بادی بازه زمانی پیش‌بینی، توان بادی را با استفاده از تابع فازی، پیش‌بینی می‌کنیم. نتایج پیش‌بینی توان بادی هر مزرعه با استفاده از تابع فازی در شکل ۳-۲۰ و شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است. داده‌های تولید بادی نرمال شده، یا به عبارت دیگر توان‌های تولیدی بر ظرفیت مزرعه‌ها تقسیم شده‌اند.

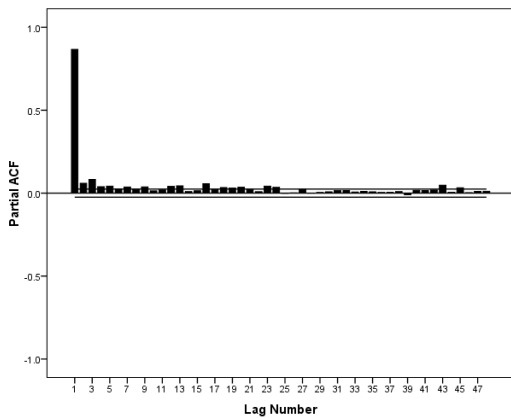


شکل ۳-۲۰: پیش‌بینی فازی برای مزرعه ۱

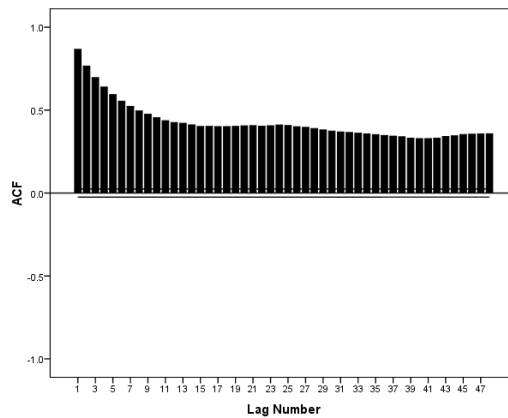


شکل ۳-۲۱: پیش‌بینی فازی برای مزرعه ۲

در مرحله بعد، خطای فازی را برای اطلاعات گذشته هر مزرعه محاسبه کرده، آن را به فضای نرمال انتقال می‌دهیم و با استفاده از نرم‌افزار SPSS مدل مناسب آریما را برای آن تعیین می‌کنیم. شکل ۳-۲۲ نشان می‌دهد که تابع خودهمبستگی برای خطای فازی نرمال مزرعه ۱ نایبستا است. بنابراین یک دیفرانسیل غیرفصلی گرفته می‌شود.



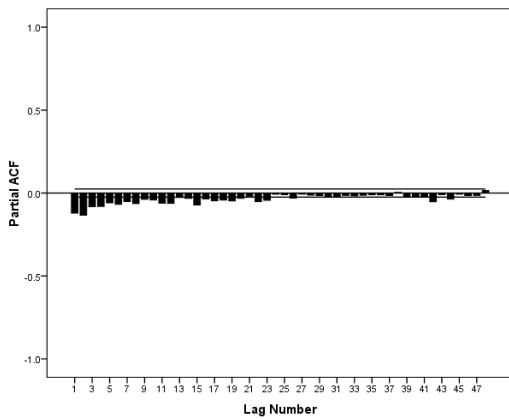
شکل ۳-۲۲: تابع خودهمبستگی جزئی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۱



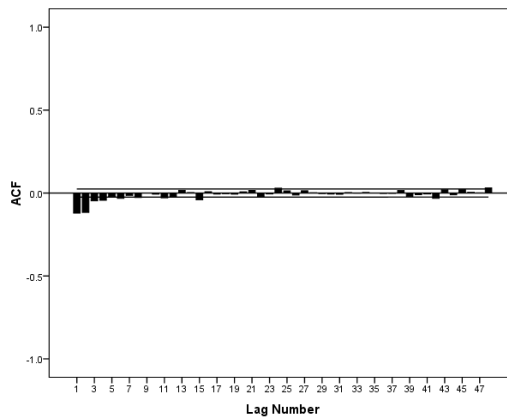
شکل ۳-۲۳: تابع خودهمبستگی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۱

همانطور که از شکل ۳-۲۴ مشخص است ۴ لگ معنی‌دار برای تابع خودهمبستگی و ۸ لگ معنی‌دار برای تابع خودهمبستگی جزئی (شکل ۳-۲۵) وجود دارد. در نتیجه مدل مناسب

است. $ARMA(8,1,4)$



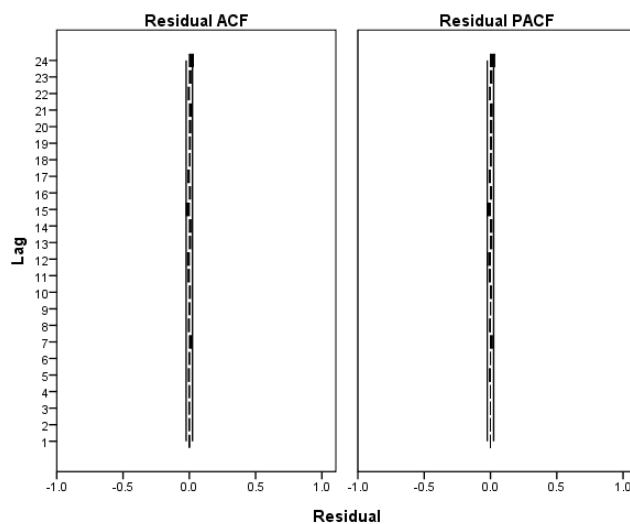
شکل ۳-۲۵: تابع خودهمبستگی جزئی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۱ بعد از اعمال دیفرانسیل غیرفصلی



شکل ۳-۲۴: تابع خودهمبستگی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۱ بعد از اعمال دیفرانسیل غیرفصلی

تابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی برای خطای باقیمانده مقادیر کوچکی دارد و مناسب

بودن مدل تعیین شده، مشخص می‌شود (شکل ۳-۲۶).

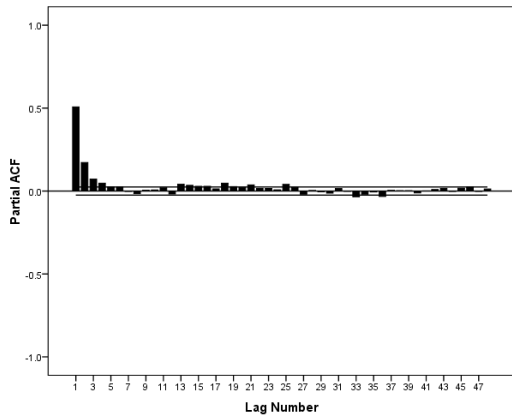


شکل ۳-۲۶: توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای باقیماندهی خطای فازی مزرعه ۱

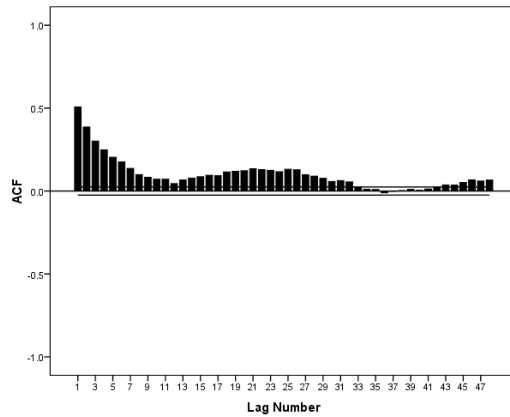
سپس مدل‌سازی آریما برای خطای فازی مزرعه ۲ انجام داده می‌شود. تابع خودهمبستگی برای

خطای فازی نرمال شدهی مزرعه ۲ با توجه به شکل ۳-۲۷ نایبستا است. بنابراین یک دیفرانسیل

غیرفصلی گرفته می‌شود.

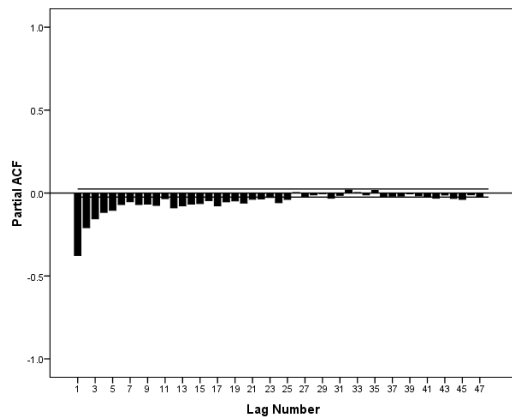


شکل ۳-۲۸: تابع خودهمبستگی جزئی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۲

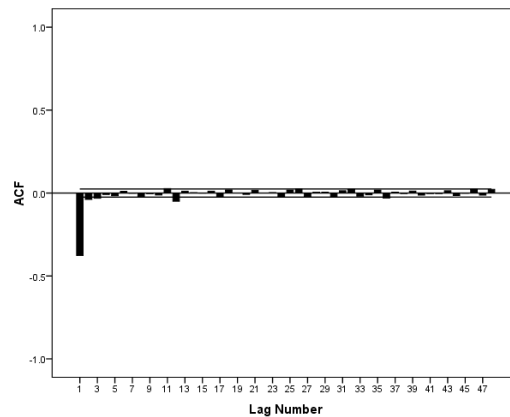


شکل ۳-۲۷: تابع خودهمبستگی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۲

همانطور که از شکل ۳-۲۹ مشخص است ۳ لگ معنی دار برای تابع خودهمبستگی و ۱۰ لگ معنی دار برای تابع خودهمبستگی جزئی (شکل ۳-۳۰) وجود دارد. در نتیجه مدل مناسب $ARMA(10,1,3)$ است.

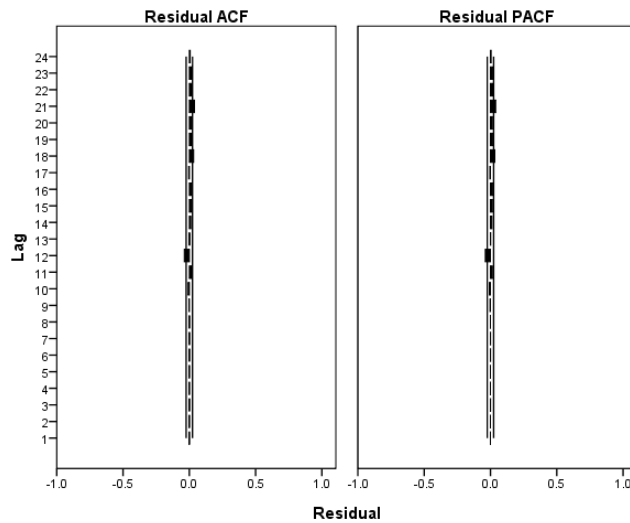


شکل ۳-۳۰: تابع خودهمبستگی جزئی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۲ پس از اعمال دیفرانسیل غیرفصلی



شکل ۳-۲۹: تابع خودهمبستگی خطای فازی نرمال برای مزرعه ۲ پس از اعمال دیفرانسیل غیرفصلی

از آنجا که طبق شکل ۳-۳۱ تابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای باقیمانده کوچک است، مناسب بودن مدل مشخص می شود.



شکل ۳-۳۱: توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی خطای باقیمانده‌ی خطای فازی مزرعه ۲

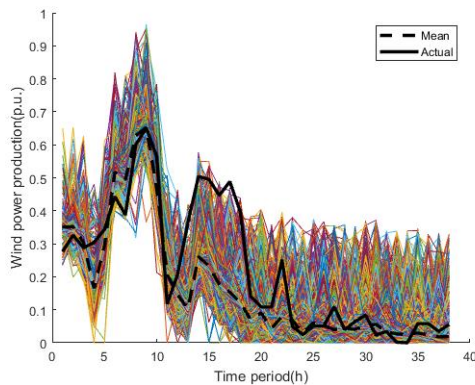
در قسمت بعد، برای خطای فازی هر مزرعه طبق توضیحات، سناریو تولید کرده و با مقادیر پیش‌بینی شده توسط تابع فازی جمع می‌کنیم. بدین ترتیب سناریوهای توان بادی، تولید می‌شود.

۳-۶-۱ تولید سناریو برای مرحله اول تصمیم‌گیری

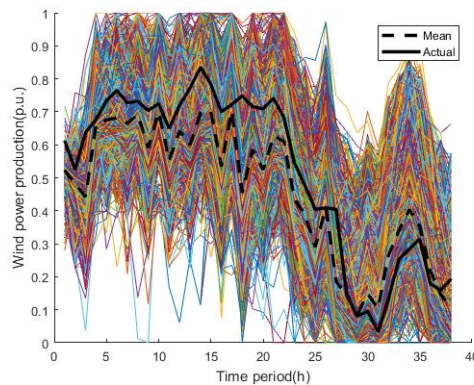
از آنجا که در زمان تصمیم‌گیری در مرحله اول، مقادیر تولید بادی بین بازه بسته شدن بازار پیش‌رو و زمان تحویل توان، مشخص نیستند. در این قسمت ابتدا برای این بازه ۵۰۰۰ سناریو تولید شده، سپس به ازای هر سناریو، ۳ سناریو برای تولید بادی روز D تولید می‌شود. در نتیجه ۱۵۰۰۰ سناریو برای توان بادی هر مزرعه، تولید می‌شود.

از آنجا که همبستگی مکانی در این روش در نظر گرفته شده است، با توجه به آنچه که در ۳-۲-۲- بیان شد، سناریوهای هر دو مزرعه با هم تولید می‌شوند. یعنی ۱۵۰۰۰ سناریو تولید می‌شود که طول هر سناریو ۷۶ ساعت است. ۳۸ ساعت اول مربوط به مزرعه ۱ و ۳۸ ساعت دوم مربوط به مزرعه ۲ است. شکل ۳-۳۲ و شکل ۳-۳۳ سناریوهای تولید توان بادی جداسازی شده را نشان می‌دهد. سناریوهای تولید شده برای مزارع، دارای همبستگی مکانی هستند، در نتیجه کاهش آن‌ها باید به صورت هم‌زمان انجام شود. سناریوهای تولید شده به ۱۰۰ سناریو کاهش داده می‌شوند (شکل ۳-۳۴ و

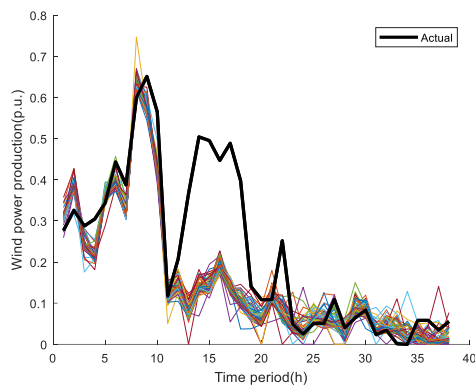
شکل ۳-۳۵.



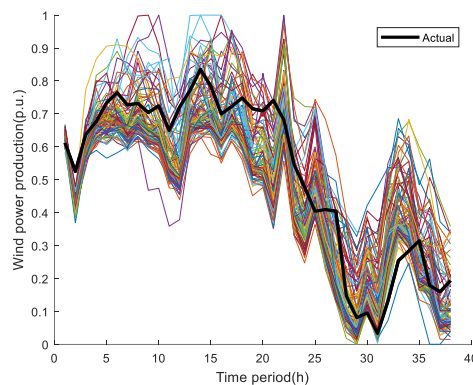
شکل ۳-۳۳: سناریوهای تولید توان بادی مزرعه ۲ برای مرحله اول تصمیم‌گیری



شکل ۳-۲۲: سناریوهای تولید توان بادی مزرعه ۱ برای مرحله اول تصمیم‌گیری



شکل ۳-۳۵: سناریوهای کاهش یافته تولید توان بادی مزرعه ۲ برای مرحله اول

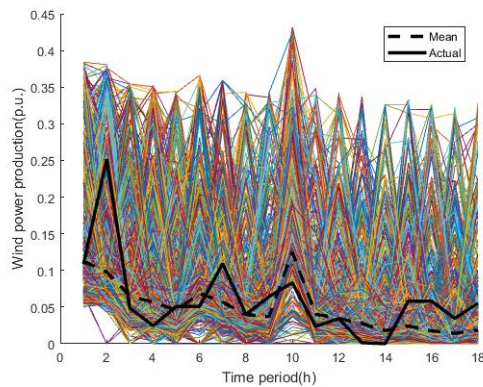


شکل ۳-۳۴: سناریوهای کاهش یافته تولید توان بادی مزرعه ۱ برای مرحله اول

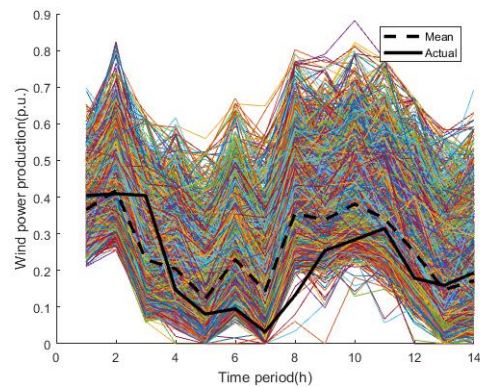
۳-۶-۲ تولید سناریو برای مرحله دوم تصمیم‌گیری

از آنجا که تولید توان بادی، ساعت به ساعت مشخص می‌شود، در مرحله دوم برای هر ساعت تصمیم‌گیری باید سناریوها به‌روز شوند. در نتیجه با نزدیک شدن به هر بازه زمانی تصمیم‌گیری، اطلاعات تولید بادی به اطلاعات گذشته اضافه شده و با استفاده از اطلاعات گذشته‌ی به‌روز شده، سناریوها تولید می‌شوند. برای نمونه در شکل ۳-۳۶ سناریوهای تولید بادی مزرعه ۱ برای ساعت ۱۰ (۱۴ ساعت باقیمانده تا انتهای روز) نشان داده شده است. همچنین شکل ۳-۳۷ سناریوهای تولید

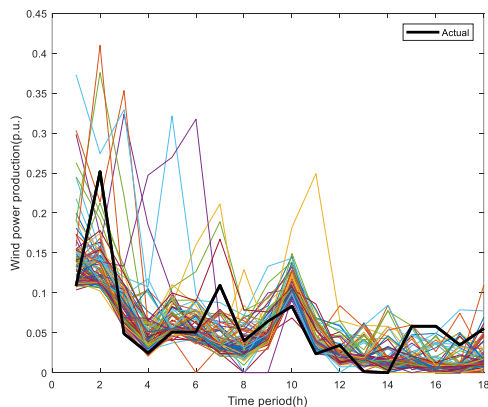
بادی مزرعه ۲ را برای ساعت ۶ (۱۸ ساعت باقیمانده تا انتهای روز) نشان می‌دهد. در این قسمت سناریوهای تولید شده به ۱۰۰ سناریو کاهش می‌یابند که در شکل ۳-۳۸ و شکل ۳-۳۹ نشان داده شده است.



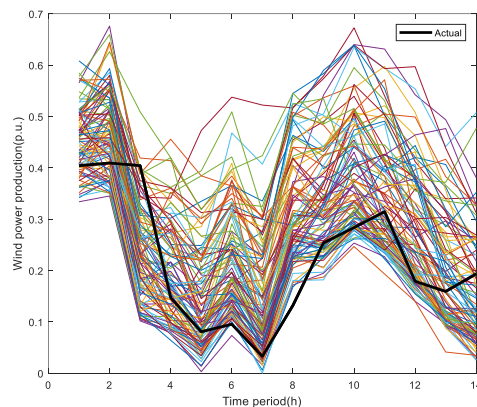
شکل ۳-۳۷: سناریوهای تولید توان بادی مزرعه ۲ برای مرحله دوم تصمیم‌گیری



شکل ۳-۳۶: سناریوهای تولید توان بادی مزرعه ۱ برای مرحله دوم تصمیم‌گیری



شکل ۳-۳۹: سناریوهای کاهش یافته تولید توان بادی مزرعه ۲ برای مرحله دوم تصمیم‌گیری



شکل ۳-۳۸: سناریوهای کاهش یافته تولید توان بادی مزرعه ۱ برای مرحله دوم تصمیم‌گیری

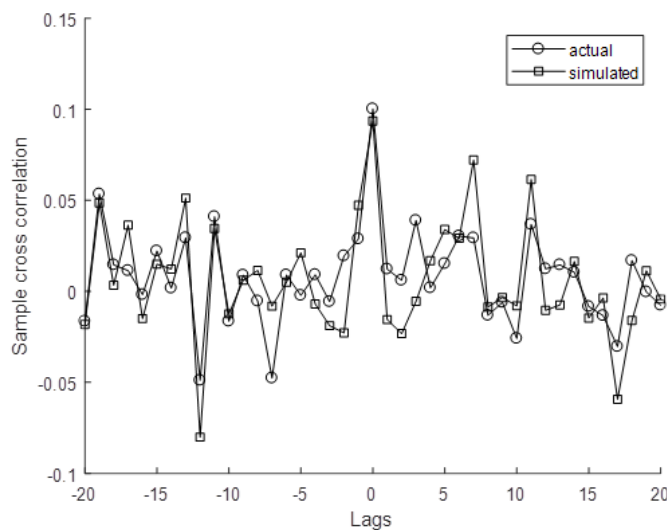
۳-۶-۳ اعتبارسنجی روش در نظر گرفتن همبستگی

طبق روش ارائه شده در [۹] باید برای هر مزرعه، بر اساس ۳-۲-۲-۲ یک سناریو با طول بازه پیش‌بینی بلندمدت (برای مثال ۱۰۰ روز)، تولید کرد. همبستگی مکانی بین سناریوهای تولید شده، باید به همبستگی مکانی بین داده‌های واقعی، شبیه باشد. با توجه به روش ارائه شده، باید همبستگی

بین خطای آریمای، خطای فازی و توان بادی بررسی شود. در ادامه نمودارهای همبستگی مکانی برای دو حالت، یعنی با در نظر گرفتن همبستگی مکانی و بدون در نظر گرفتن همبستگی مکانی، نشان داده شده است.

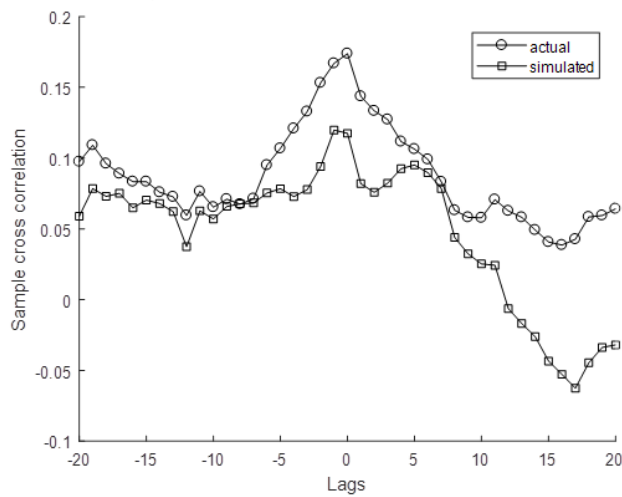
۳-۶-۳-۱ تولید سناریو بلند توان بادی با در نظر گرفتن همبستگی

همانطور که از شکل ۳-۴۰ مشخص است، همبستگی مکانی خطاهای آریمای واقعی و شبیه‌سازی شده با دقت مناسبی به مقادیر واقعی نزدیک هستند. در نتیجه اثر همبستگی به خوبی مدل شده است.

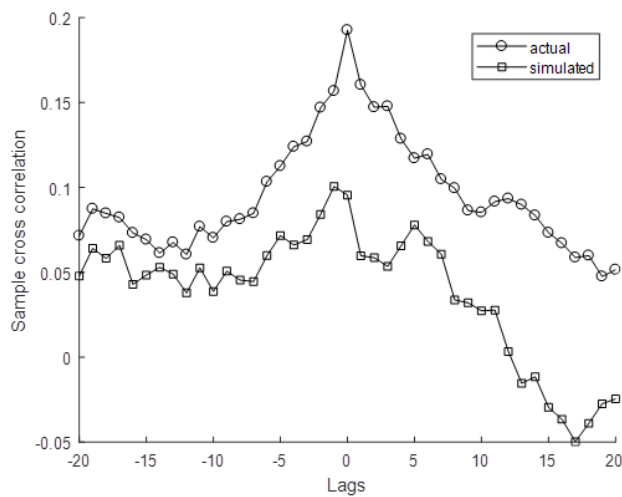


شکل ۳-۴۰: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین خطاهای آریمای

در شکل ۳-۴۱، همبستگی مکانی خطای فازی شبیه‌سازی شده و واقعی نمایش داده شده است. دقت شبیه‌سازی قابل قبول است، هر چند در لگ‌های ۱۰ تا ۲۰ اختلاف کمی زیاد شده است. در گام بعد، خطای فازی باید از فضای نرمال به فضای واقعی منتقل شود. به این دلیل که انتقال از فضای واقعی به نرمال و برعکس با خطا همراه است، در شکل ۳-۴۲ مشاهده می‌شود که اختلاف کمی بیشتر از زمانی است که داده‌ها در فضای نرمال قرار دارند.



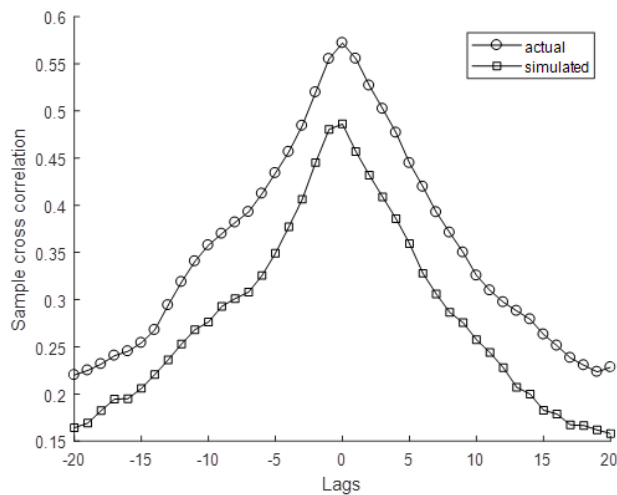
شکل ۳-۴۱: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین خطاهای فازی در فضای نرمال



شکل ۳-۴۲: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین خطاهای فازی در فضای واقعی

در گام آخر همبستگی مکانی برای توان‌های بادی شبیه‌سازی شده و واقعی بررسی می‌شود (شکل

۳-۴۳). دو منحنی به هم نزدیک هستند و همبستگی مکانی با دقت خوبی شبیه‌سازی شده است.

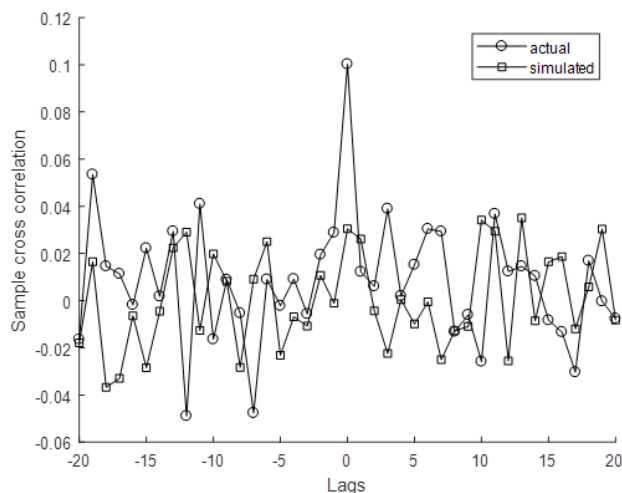


شکل ۳-۴۳: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین تولیدات توان بادی

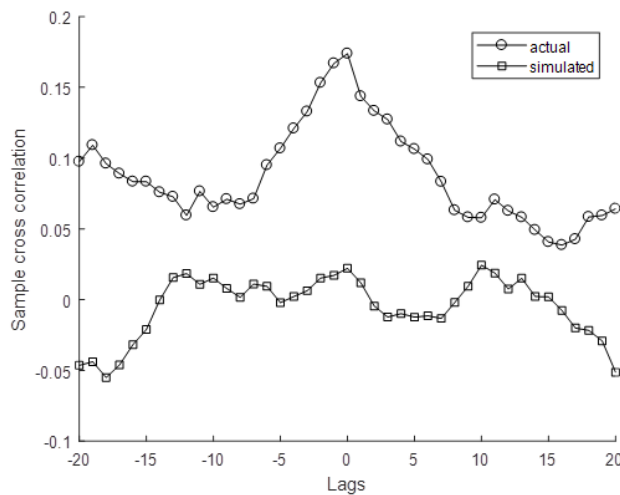
۳-۶-۲-۳ تولید سناریو بلند توان بادی بدون در نظر گرفتن همبستگی

هدف این بخش آن است که نشان داده شود که روش مرسوم تولید سناریو برای تولید بادی نمی‌تواند همبستگی مکانی را به خوبی مدل کند. در نتیجه ضرورت ارائه روشی که تولید همبستگی مکانی را در تولید سناریو لحاظ می‌کند، مشخص می‌شود.

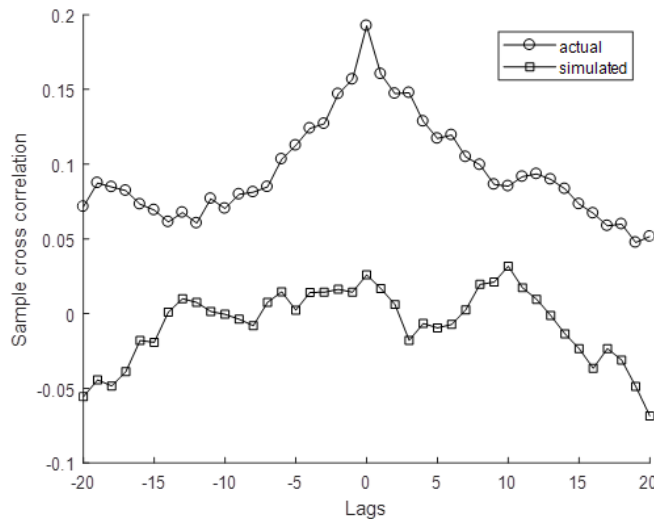
با توجه به شکل‌های زیر به راحتی می‌توان مشاهده کرد که نمودارهای مربوط به داده‌های شبیه‌سازی شده به خوبی نمودارهای مربوط به داده‌های واقعی را دنبال نمی‌کنند.



شکل ۳-۴۴: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین خطاهای آریما

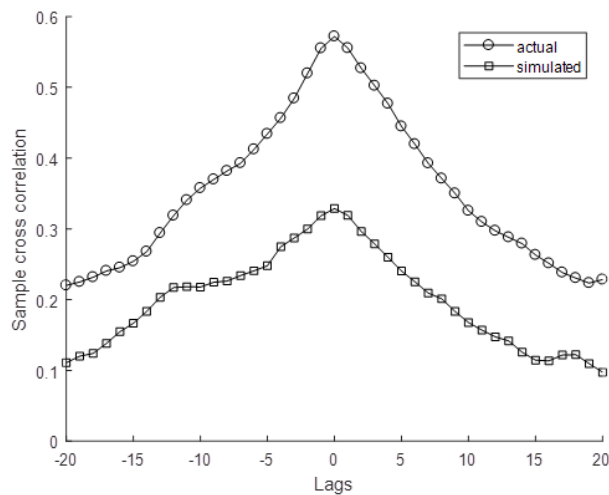


شکل ۳-۴۵: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین خطاهای فازی در فضای نرمال



شکل ۳-۴۶: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین خطاهای فازی در فضای واقعی

شکل ۳-۴۷ نشان می‌دهد که همبستگی مکانی هر چند با مقدار واقعی اختلاف زیادی دارد اما مقدار آن در تمام لگ‌ها صفر نیست، و شکل هر دو نمودار شباهت نسبی دارد. علت این موضوع آن است که سرعت باد که به عنوان ورودی تابع فازی است، تک سناریو در نظر گرفته شده و از سایت هواشناسی دریافت می‌شود. از آن‌جا که همبستگی مکانی بین سرعت‌های بادی دریافت شده از سایت هواشناسی وجود دارد، در خروجی توان بادی شبیه‌سازی شده در حالت بدون در نظر گرفتن همبستگی مکانی نیز، حد کمی از همبستگی مکانی مدل شده است.



شکل ۳-۴۷: مقدار واقعی و شبیه‌سازی شده‌ی همبستگی مکانی بین تولیدات توان بادی

۷-۳ جمع بندی

در این فصل ابتدا مدل مناسبی برای در نظر گرفتن همبستگی مکانی بین تولید توان مزارع بادی نزدیک به هم ارائه شد. سپس در مورد داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی توضیح داده شد. برای قیمت بازارها و تولید بادی مدل مناسب آریما مشخص شد. و در نهایت، سناریوهای تولید شده برای پارامترهای غیر قطعی نمایش داده شد.

در بخش دوم این فصل، اعتبارسنجی روش ارائه شده برای تولید سناریوی همبسته مکانی انجام شده و با استفاده از تولید سناریوهای بلند نشان داده شد که با استفاده از روش ارائه شده، می‌توان با دقت مناسبی اثر همبستگی را شبیه‌سازی کرد. همچنین نشان داده شد که بدون استفاده از روش ارائه شده، تا چه میزان بین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده می‌تواند از نظر همبستگی مکانی اختلاف ایجاد شود.

فصل چهارم

مدل سازی مسئله پیشنهاددهی استراتژیک مجموعه

تولیدکنندگان بادی-ذخیره ساز

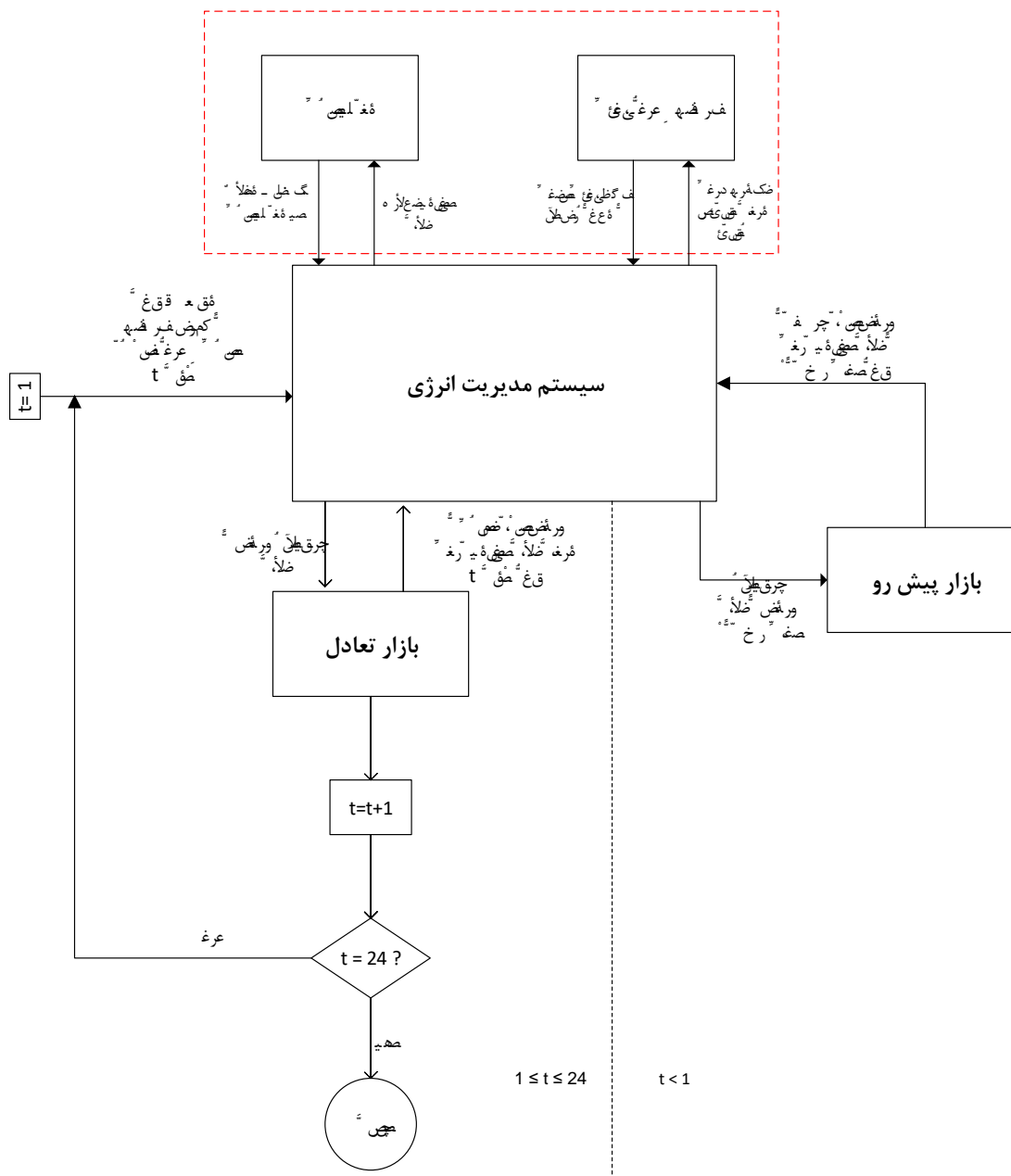
۴-۱ مقدمه

زمانی که تولیدکنندگان بادی-ذخیره ساز به صورت گروهی در بازار برق پیشنهاددهی می کنند با عدم قطعیت‌هایی مانند قیمت بازار و تولید توان بادی مزارع روبرو هستند. در این تحقیق، برای مدل سازی مسئله پیشنهاددهی استراتژیک از برنامه ریزی تصادفی استفاده شده و عدم قطعیت‌ها با سناریو مدل شده‌اند. در بخش اول مسئله، پیشنهاددهی استراتژیک و شرکت در بازار برق شرح داده می شود. سپس نحوه عملکرد بازار تعادل برای محاسبه هزینه عدم تعادل‌ها بیان می شود. در بخش بعد، علائم اختصاری توضیح داده شده و مدل مناسبی برای پیشنهاددهی به صورت گروهی برای

تولیدکنندگان بادی-ذخیره‌ساز در بازارهای پیش‌رو و تعادل ارائه می‌شود.

۴-۱-۱ تشریح مسئله

در این تحقیق مجموعه‌ای از سیستم‌های بادی-ذخیره‌ساز که در نواحی مختلف قرار گرفته‌اند، در نظر گرفته شده است. همانطور که شکل ۴-۱ بیان می‌کند واحد مدیریت انرژی در بازارهای پیش‌رو و تعادل شرکت کرده و در مورد مبادله انرژی سیستم بادی-ذخیره‌ساز در بازارها تصمیم‌گیری می‌کند. سیستم مدیریت انرژی اطلاعات را از سیستم بادی-ذخیره‌ساز دریافت کرده و با توجه به اطلاعات سیستم، ابتدا در بازار پیش‌رو شرکت کرده و پیشنهاد توان را برای تمام ساعات روز آینده مشخص می‌کند. در مرحله بعد سیستم مدیریت انرژی در زمان تحویل توان، ساعت به ساعت در بازار تعادل شرکت می‌کند و با توجه به اطلاعات به روز شده برای تبادل توان هر ساعت، برنامه خود را تعیین می‌کند. از آنجا که ذخیره‌ساز در کنار تولیدکننده بادی قرار گرفته است، سیستم بادی-ذخیره‌ساز می‌تواند در قیمت‌های پایین انرژی را ذخیره کرده یا حتی از بازار خریداری کند و در قیمت‌های بالا این انرژی را بفروشد و سود بیشتری کسب کند. همچنین برخلاف تولیدکننده بادی تنها، به دلیل وجود ذخیره‌ساز، سیستم بادی-ذخیره‌ساز می‌تواند در بازار تعادل نیز پیشنهاددهی استراتژیک داشته باشد.



شکل ۴-۱: فلوجارت شرکت در بازارها

۲-۱-۴ فرضیات

۱. مجموعه تولیدکنندگان بادی-ذخیره‌ساز قدرت تاثیر بر قیمت بازار را ندارند.
۲. قیمت انرژی برای همه تولیدکنندگان یکسان است.
۳. بازار تعادل ضریبی از بازار پیش‌رو است و دو قیمتی در نظر گرفته شده است.
۴. ضرایب قیمت بازار تعادل در انتهای هر روز منتشر می‌شود.

۵. تولیدکننده بادی از تولید بادی در هر بازه زمانی، نزدیک به آن بازه با قطعیت بسیار بالایی با خبر می‌شود.

۶. هدف این تحقیق تقسیم سود عادلانه بین تولیدکنندگان نیست و همه تولیدکنندگان متعلق به یک مالک هستند.

۷. از قیود شبکه صرف نظر شده است.

۲-۴ فرمول‌بندی پیشنهاددهی استراتژیک

۱-۲-۴ فهرست علائم و اختصارات

فهرست علائم و اختصارات هر دو مرحله در ادامه آمده است.

اگر پارامتر یا متغیری مربوط به $\omega\gamma$ باشد، یعنی مقدار آن برابر با تحقق سناریو یاد شده است. همچنین اگر علامت \sim بالای پارامتر یا متغیری قرار گیرد یعنی مقدار واقعی آن است.

اندیس‌ها و مجموعه‌ها

۱. Π^B : مجموعه سناریوهای استفاده شده در مرحله دوم یعنی بازار تعادل.

۲. Π^{DA} : مجموعه سناریوهای استفاده شده در مرحله اول یعنی بازار پیش‌رو.

۳. Ω^{WS} : مجموعه سیستم‌های بادی-ذخیره‌ساز.

۴. i : اندیس سیستم‌های بادی-ذخیره‌ساز.

۵. t : اندیس بازه‌های زمانی برای یک روز.

۶. ω/γ : اندیس سناریوها.

پارامترها

۱. C_i^W : ظرفیت مزرعه بادی قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i .

۲. E_{i0}^S : سطح انرژی باتری قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i در ابتدای روز.
۳. $\underline{E}_i^S / \overline{E}_i^S$: حد بالا/پایین سطح انرژی باتری قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i .
۴. $\overline{P}_i^{S,-}$: حد بالای توان شارژ باتری قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i .
۵. $\overline{P}_i^{S,+}$: حد بالای توان دشارژ باتری قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i .
۶. \overline{P}_{it}^W : توان در دسترسی که می‌تواند توسط مزرعه بادی قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i در بازه زمانی t تولید شود.
۷. $r_t^{B,-}$: نسبت قیمت در بازار تعادل برای عدم تعادل منفی (خرید انرژی) در بازه زمانی t .
۸. $r_t^{B,+}$: نسبت قیمت در بازار تعادل برای عدم تعادل مثبت (فروش انرژی) در بازه زمانی t .
۹. T : تعداد بازه‌های زمانی برای یک روز.
۱۰. Δ_t : طول بازه زمانی t .
۱۱. η_i^- : بازده انرژی شارژ باتری قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i .
۱۲. η_i^+ : بازده انرژی دشارژ باتری قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i .
۱۳. λ_t^{DA} : قیمت بازار پیش‌رو در بازه زمانی t .
۱۴. $\pi_{\omega\gamma}$: احتمال وقوع سناریو $\omega\gamma$.
۱۵. α : سطح اطمینان استفاده شده برای محاسبه کردن CVaR

متغیرها

۱. CVaR: شاخص اندازه‌گیری ریسک.
۲. E_{it}^S : سطح انرژی باتری قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i در انتهای بازه زمانی t .
۳. $P_t^{B,-}$: توان خریداری شده از بازار تعادل در بازه زمانی t .
۴. $P_t^{B,+}$: توان فروخته شده به بازار تعادل در بازه زمانی t .
۵. P_t^{DA} : توان پیشنهاد شده در بازار پیش‌رو در بازه زمانی t .

۶. $P_{it}^{S,-}$: توان شارژ باتری قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i در بازه زمانی t .
۷. $P_{it}^{S,+}$: توان دشارژ باتری قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i در بازه زمانی t .
۸. P_{it}^W : توان بادی تولید شده در مزرعه بادی قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i در بازه زمانی t .
۹. u_{it} : متغیر باینری برای مشخص کردن حالت شارژ یا دشارژ باتری قرار گرفته در سیستم بادی-ذخیره‌ساز i در بازه زمانی t .
۱۰. μ : متغیر کمکی استفاده شده برای محاسبه شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی.
۱۱. ϑ : سود کل به دست آمده از بازارهای انرژی.
۱۲. ξ : شاخص ارزش شرطی.

۲-۲-۴ فرمول‌بندی مرحله اول

۱-۲-۲-۴ تابع هدف مرحله اول

$$\text{Maximize}_{\Phi^{DA}} (1 - \beta) \sum_{\omega\gamma \in \Pi^{DA}} \pi_{\omega\gamma} \vartheta_{\omega\gamma} + \beta \text{CVaR} \quad (1-4)$$

تابع هدف فوق از دو بخش تشکیل می‌شود:

۱. سود مورد انتظار ناشی از خرید و فروش انرژی در بازارهای پیش‌رو و تعادل.

۲. ریسک‌گریزی که شامل CVaR است.

سود مورد انتظار و شاخص ریسک‌گریزی به وسیله پارامتر $\beta \in [0,1]$ وزن‌دهی شده‌اند. با استفاده

از β ، می‌توان ریسک سود ناشی از عدم قطعیت‌ها را کنترل کرد.

۲-۲-۲-۴ قیود مرحله اول

در قید (۲-۴) سود کل مورد انتظار به ازای تحقق هر سناریو تعریف می‌شود که شامل

قسمت‌های زیر است:

۱. درآمد یا هزینه ناشی از فروش یا خرید انرژی در بازار پیش‌رو که از ضرب قیمت

توان بازار پیش‌رو در توان پذیرفته شده در بازار پیش‌رو به دست می‌آید.

۲. درآمد ناشی از فروش انرژی در بازار تعادل که از ضرب ضریب قیمت فروش

توان بازار تعادل در قیمت توان بازار پیش‌رو در توان تعیین شده برای فروش

توان به بازار تعادل به دست می‌آید.

۳. جریمه ناشی از خرید انرژی از بازار تعادل که از ضرب ضریب قیمت خرید توان

بازار تعادل در قیمت توان بازار پیش‌رو در توان تعیین شده برای خرید از بازار

تعادل به دست می‌آید.

$$\vartheta_{\omega\gamma} = \sum_{t=1}^T [\lambda_{t\omega}^{DA} P_{t\omega}^{DA} + r_{t\gamma}^{B,+} \lambda_{t\omega}^{DA} P_{t\omega}^{B,+} - r_{t\gamma}^{B,-} \lambda_{t\omega}^{DA} P_{t\omega}^{B,-}] \quad (2-4)$$

قیود (۳-۴) تا (۵-۴) مربوط به ریسک‌گریزی است. قید (۳-۴) برای محاسبه شاخص ریسک است.

در این رابطه هر چه ضریب α بزرگتر باشد، سطح اطمینان ریسک‌گریزی افزایش می‌یابد. قید (۴-۴)

برای محدودیت شاخص ارزش شرطی است و نشان می‌دهد که از مجموع سود و متغیر کمکی، به

ازای تمام سناریوها باید کمتر باشد. قید (۵-۴) بیان می‌کند که متغیر کمکی باید همواره نامنفی

باشد.

$$CVaR = \xi - \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\omega\gamma \in \Pi^{DA}} \pi_{\omega\gamma} \mu_{\omega\gamma} \quad (3-4)$$

$$-\vartheta_{\omega\gamma} + \xi - \mu_{\omega\gamma} \leq 0 \quad \forall \omega\gamma \quad (4-4)$$

$$\mu_{\omega\gamma} \geq 0 \quad \forall \omega\gamma \quad (5-4)$$

قید تعادل توان (۴-۶)، تعادل توان‌های مبادله شده در بازار و توان‌های مبادله شده در سیستم بادی-ذخیره‌ساز را تضمین می‌کند. این قید بیان می‌کند که برآیند توان‌های مبادله شده در بازارها (یعنی مجموع توان فروخته شده منهای توان‌های خریداری شده) باید با برآیند توان‌های مبادله شده در سیستم بادی-ذخیره‌ساز (یعنی مجموع توان‌های تزریق شده به شبکه منهای توان‌های دریافت شده از شبکه) برابر باشد.

$$P_{t\omega}^{DA} + P_{t\omega}^{B,+} - P_{t\omega}^{B,-} = \sum_{i \in \Omega^{WS}} P_{it\omega}^W + \sum_{i \in \Omega^{WS}} (P_{it\omega}^{S,+} - P_{it\omega}^{S,-}) \quad \forall t, \omega \quad (۴-۶)$$

قید (۴-۷) حد بالا و پایین توان پیشنهادی در بازار پیش‌رو را مشخص می‌کند. این توان می‌تواند منفی (خرید) یا مثبت (فروش) باشد. حد پایین آن، منفی مجموع حداکثر شارژ ذخیره‌سازها و حد بالای آن مجموع حداکثر دشارژ ذخیره‌سازها و ظرفیت مزارع بادی است.

$$-\sum_{i \in \Omega^{WS}} \bar{P}_i^{S,-} \leq P_t^{DA} \leq \sum_{i \in \Omega^{WS}} (C_i^W + \bar{P}_i^{S,+}) \quad \forall t \quad (۴-۷)$$

قید (۴-۸) نشان می‌دهد که مجموع توان مبادله شده در بازار پیش‌رو و تعادل باید در محدوده مشخصی که مانند قید (۴-۷) است، باشد. در واقع این قید محدودیتی برای توان‌های مبادله شده در بازار تعادل است.

$$-\sum_{i \in \Omega^{WS}} \bar{P}_i^{S,-} \leq P_t^{DA} + P_{t\omega}^{B,+} - P_{t\omega}^{B,-} \leq \sum_{i \in \Omega^{WS}} (C_i^W + \bar{P}_i^{S,+}) \quad \forall t, \omega \quad (۴-۸)$$

در قید (۴-۹) حد متغیر توان بادی مشخص می‌شود. این متغیر باید مثبت و از مقدار مشخص شده در هر سناریو کمتر باشد.

$$0 \leq P_{it\omega}^W \leq \bar{P}_{it\omega}^W \quad \forall i \in \Omega^{WS}, t, \omega \quad (۴-۹)$$

محدودیت شارژ و دشارژ باتری در قیود (۴-۱۰) و (۴-۱۱) بیان می‌شود و نشان می‌دهد که توان شارژ و دشارژ باتری به دلیل مسائل فیزیکی مربوط به آن نمی‌تواند از حدود مشخصی بیشتر باشد.

به دلیل اینکه متغیرهای شارژ و دشارژ باتری جداگانه فرض شده‌اند، باید مقادیر مثبتی داشته باشند که در این قید مشخص گردیده است. همچنین متغیر باینری از شارژ و دشارژ همزمان باتری جلوگیری می‌کند. هر زمانی که باتری در حالت شارژ باشد، متغیر باینری ۱ است، در نتیجه حد بالای مربوط به دشارژ مقداری برابر با صفر دارد و تضمین می‌شود که مقدار دشارژ باتری برابر صفر باشد، برعکس این موضوع نیز برای حالتی که باتری در حالت دشارژ است صادق است. معادله سطح انرژی باتری بر اساس شارژ و دشارژ در قید (۴-۱۲) بیان شده است. این قید مشخص می‌کند که سطح انرژی باتری برابر با سطح انرژی باتری در بازه قبل به اضافه مقدار انرژی‌ای که در بازه تحت برنامه‌ریزی به آن اضافه یا از آن کم می‌شود، است. مقدار انرژی‌ای که به باتری در هر بازه اضافه می‌شود از توان شارژ باتری در طول بازه زمانی در بازدهی شارژ باتری به دست می‌آید و مقدار انرژی‌ای که از باتری کم می‌شود برابر با توان دشارژ شده در طول بازه زمانی در بازدهی دشارژ باتری است. حد انرژی باتری در قید (۴-۱۳) مشخص شده و نشان می‌دهد که سطح انرژی باتری نمی‌تواند از مقدار مشخصی بیشتر باشد که این مقدار ظرفیت باتری است. همچنین سطح انرژی باتری نمی‌تواند از مقدار مشخصی کمتر باشد و این موضوع به قیود فنی بهره‌برداری از باتری مربوط می‌شود که برای افزایش طول عمر باتری اجازه نمی‌دهد که سطح انرژی باتری از مقدار مشخصی کمتر شود. قید (۴-۱۴) بیان می‌کند که میزان انرژی باتری در انتهای هر روز باید مقدار مشخصی باشد تا بتوان مقایسه صحیحی بین تصمیم‌گیری‌های مختلف انجام داد.

$$0 \leq P_{it\omega}^{S,-} \leq u_{it\omega} \bar{P}_i^{S,-} \quad \forall i \in \Omega^{WS}, t, \omega \quad (10-4)$$

$$0 \leq P_{it\omega}^{S,+} \leq (1 - u_{it\omega}) \bar{P}_i^{S,+} \quad \forall i \in \Omega^{WS}, t, \omega \quad (11-4)$$

$$E_{it\omega}^S = E_{i(t-1)\omega}^S + P_{it\omega}^{S,-} \Delta t \eta_i^- - P_{it\omega}^{S,+} \Delta t / \eta_i^+ \quad \forall i \in \Omega^{WS}, t, \omega \quad (12-4)$$

$$\underline{E}_i^S \leq E_{it\omega}^S \leq \bar{E}_i^S \quad \forall i \in \Omega^{WS}, t, \omega \quad (13-4)$$

$$E_{it\omega}^S = E_{i0}^S \quad t = T, \forall i \in \Omega^{WS}, \omega \quad (14-4)$$

قید (۱۵-۴) تصمیم می‌کند که متغیر مربوط به انرژی فروخته شده به بازار تعادل یا خریداری شده از آن مثبت باشد.

$$0 \leq P_{t\omega}^{B,+}, P_{t\omega}^{B,-} \quad \forall t, \omega \quad (15-4)$$

قید (۱۶-۴) مربوط به منحنی پیشنهاد توان است و نشان می‌دهد که توان پیشنهادی فروش انرژی در بازار پیش‌رو به ازای قیمت‌های بالاتر باید بیشتر باشد. از طرف دیگر توان پیشنهادی خرید انرژی برای قیمت‌های کمتر باید مقدار بیشتری داشته باشد. باید توجه کرد که توان پیشنهادی بازار پیش‌رو می‌تواند منفی شود، که به معنای خرید انرژی است.

$$P_{t\omega}^{DA} \leq P_{t\omega'}^{DA} \quad \forall t, \omega, \omega' : \lambda_{t\omega}^{DA} \leq \lambda_{t\omega'}^{DA} \quad (16-4)$$

در روابط بالا $\Phi^{DA} = \{P_t^{DA}, P_{t\omega}^{B,+}, P_{t\omega}^{B,-}, P_{it\omega}^W, P_{it\omega}^{S,+}, P_{it\omega}^{S,-}, u_{it\omega}, CVaR, \xi, \mu_{\omega\gamma}, \vartheta_{\omega\gamma}\}$ است.

۳-۲-۴ فرمول‌بندی مرحله دوم

تابع هدف مرحله دوم ۱-۳-۲-۴

$$\text{Maximize}_{\Phi^B} \sum_{\gamma \in \Pi^{DA}} \pi_\gamma \sum_{t=\tau}^T \tilde{\lambda}_t^{DA} [r_{t\gamma}^{B,+} P_{t\gamma}^{B,+} - r_{t\gamma}^{B,-} P_{t\gamma}^{B,-}] \quad (17-4)$$

تابع هدف فوق از جمله‌های زیر تشکیل می‌شود:

۱. درآمد ناشی از فروش انرژی در بازار تعادل.
۲. جریمه ناشی از خرید انرژی از بازار تعادل.

قیود مرحله دوم ۲-۳-۲-۴

توضیحات مربوط به قیود (۱۸-۴) تا (۲۶-۴)، مانند توضیحات قیود مشابه در مرحله قبل است به همین دلیل از تکرار آن خودداری می‌شود.

$$\bar{P}_t^{DA} + P_{t\gamma}^{B,+} - P_{t\gamma}^{B,-} = \sum_{i \in \Omega^{WS}} P_{it\gamma}^W + \sum_{i \in \Omega^{WS}} (P_{it\gamma}^{S,+} - P_{it\gamma}^{S,-}) \quad \forall t \geq \tau, \gamma \quad (18-4)$$

$$0 \leq P_{it\gamma}^W \leq \bar{P}_{it}^W \quad t = \tau, \forall i \in \Omega^{WS}, \gamma \quad (19-4)$$

$$0 \leq P_{it\gamma}^W \leq \bar{P}_{it\gamma}^W \quad \forall i \in \Omega^{WS}, t > \tau, \gamma \quad (20-4)$$

$$0 \leq P_{it\gamma}^{S,-} \leq u_{it\gamma} \bar{P}_{it\gamma}^{S,-} \quad \forall i \in \Omega^{WS}, t \geq \tau, \gamma \quad (21-4)$$

$$0 \leq P_{it\gamma}^{S,+} \leq (1 - u_{it\gamma}) \bar{P}_{it\gamma}^{S,+} \quad \forall i \in \Omega^{WS}, t \geq \tau, \gamma \quad (22-4)$$

$$E_{it\gamma}^S = E_{i(t-1)\gamma}^S + P_{it\gamma}^{S,-} \Delta_t \eta_i^- - P_{it\gamma}^{S,+} \Delta_t / \eta_i^+ \quad \forall i \in \Omega^{WS}, t \geq \tau, \gamma \quad (23-4)$$

$$\underline{E}_i^S \leq E_{it\gamma}^S \leq \bar{E}_i^S \quad \forall i \in \Omega^{WS}, t \geq \tau, \gamma \quad (24-4)$$

$$E_{it\gamma}^S = E_{i0}^S \quad t = T, \forall i \in \Omega^{WS}, \gamma \quad (25-4)$$

$$0 \leq P_{t\gamma}^{B,+}, P_{t\gamma}^{B,-} \quad \forall t \geq \tau, \gamma \quad (26-4)$$

قید (۲۷-۴) بیان می‌کند که متغیرهای مربوط به بازه زمانی تحت برنامه‌ریزی به سناریو وابسته نیستند. چرا که در مرحله دوم تمام عدم قطعیت‌ها قبل از بازه تصمیم‌گیری مشخص شده‌اند و متغیرها به سناریوهایی که بعد از آن‌ها محقق می‌شوند، وابسته نیستند. قید (۲۸-۴) قید پیش‌بینی ناپذیری متغیرهاست و بیان می‌کند که اگر دو سناریو مقدار یکسانی داشته باشند، متغیرهای تصمیم‌گیری وابسته به آن‌ها نیز باید مقادیر یکسانی داشته باشند.

$$\Phi_{t\gamma}^B = \Phi_{t\gamma'}^B \quad t = \tau, \forall \gamma, \gamma' \quad (27-4)$$

$$\Phi_{t\gamma}^B = \Phi_{t\gamma'}^B \quad \forall t > \tau, \gamma, \gamma' : \bar{P}_{it\gamma}^W = \bar{P}_{it\gamma'}^W \quad \tau < t' \leq t \quad (28-4)$$

در روابط بالا $\Phi^B = \{P_{t\gamma}^{B,+}, P_{t\gamma}^{B,-}, P_{it\gamma}^W, P_{it\gamma}^{S,+}, P_{it\gamma}^{S,-}, u_{it\gamma}\}$ است.

فصل پنجم

شبیه‌سازی

۵-۱ مقدمه

در این فصل مطالعه موردی برای مسئله پیشنهاددهی استراتژیک انجام می‌شود. در مطالعه موردی دو مزرعه بادی به همراه ذخیره‌ساز، در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از سناریوهای تولید شده، مسئله به صورت بهینه‌سازی تصادفی مدل و حل می‌شود.

مسئله برای زمانی که همبستگی مکانی در نظر گرفته شده و زمانی که از آن صرف نظر شده است، برای سه ذخیره‌ساز با ظرفیت‌های مختلف شبیه‌سازی می‌شود، تا اثر همبستگی مکانی و تغییر در ظرفیت ذخیره‌سازها مشخص شود.

۵-۲ داده‌ها

از آنجا که در فصل سوم در مورد اطلاعات لازم برای تولید سناریو برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و نیز نحوه جمع‌آوری آن‌ها توضیح داده شد، در این فصل تنها به بیان ویژگی‌های مزارع و ذخیره‌سازها می‌پردازیم.

برای مطالعه موردی دو مزرعه بادی یکسان در نظر گرفته می‌شود که ظرفیت آن‌ها برابر با ۲۰ مگاوات است. در کنار هر مزرعه یک ذخیره‌ساز با مشخصات یکسان قرار گرفته است. مسئله با سه ذخیره‌ساز که مشخصات آن‌ها در جدول ۵-۱ آمده، شبیه‌سازی می‌شود.

جدول ۵-۱: اطلاعات مربوط به ذخیره‌سازها

شماره ذخیره‌ساز	η_i^+	η_i^-	E_{i0}^S (MWh)	\underline{E}_i^S (MWh)	\overline{E}_i^S (MWh)	$\overline{P}_i^{S,+}$ (MW)	$\overline{P}_i^{S,-}$ (MW)
۱	.۹	.۹	۳	۱	۵	۱	۱
۲	.۹	.۹	۶	۲	۱۰	۲	۲
۳	.۹	.۹	۱۲	۴	۲۰	۴	۴

۵-۳ طرح شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌های ارائه شده در این فصل به طور خلاصه شامل موارد زیر است:

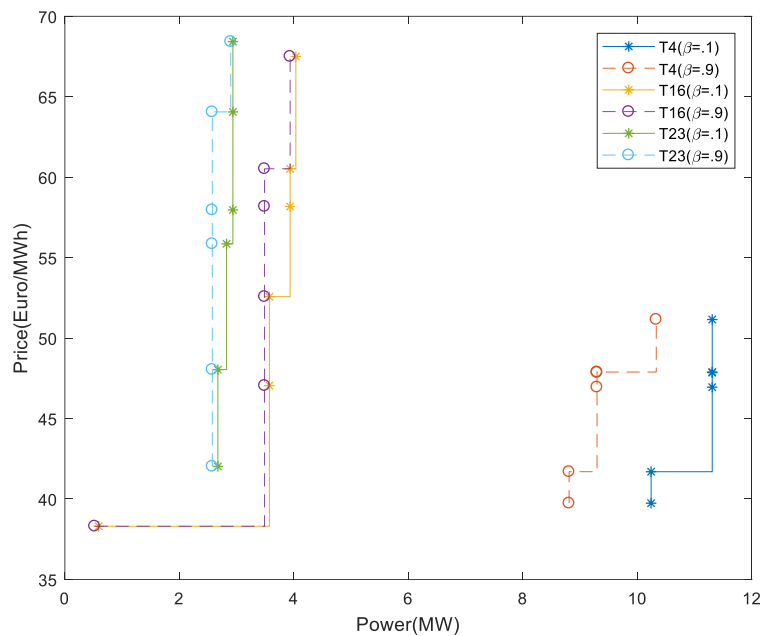
۱. اثر همبستگی و تغییر در ضریب ریسک‌گریزی بر توان‌های پیشنهادی در بازار پیش‌رو و تعادل.
۲. اثر در نظر گرفتن همبستگی مکانی و تغییر در ظرفیت ذخیره‌ساز بر منحنی سود مورد انتظار-CVaR.
۳. اثر در نظر گرفتن همبستگی مکانی و تغییر در ظرفیت ذخیره‌ساز بر درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو و تعادل، و جریمه مورد انتظار بازار تعادل ناشی از برنامه‌ریزی در مرحله اول.
۴. اثر در نظر گرفتن همبستگی مکانی و تغییر در ظرفیت ذخیره‌ساز بر سود مورد انتظار بازار تعادل ناشی از برنامه‌ریزی در مرحله دوم.
۵. اثر در نظر گرفتن همبستگی مکانی و تغییر در ظرفیت ذخیره‌ساز بر سود کل واقعی، درآمد واقعی بازار پیش‌رو و تعادل، و جریمه واقعی بازار تعادل.

۵-۴ شبیه‌سازی

اطلاعات گذشته شامل قیمت بازارها و تولید توان بادی مزارع برای ۲۷۹ روز از تاریخ ۲۰۱۸/۲/۱

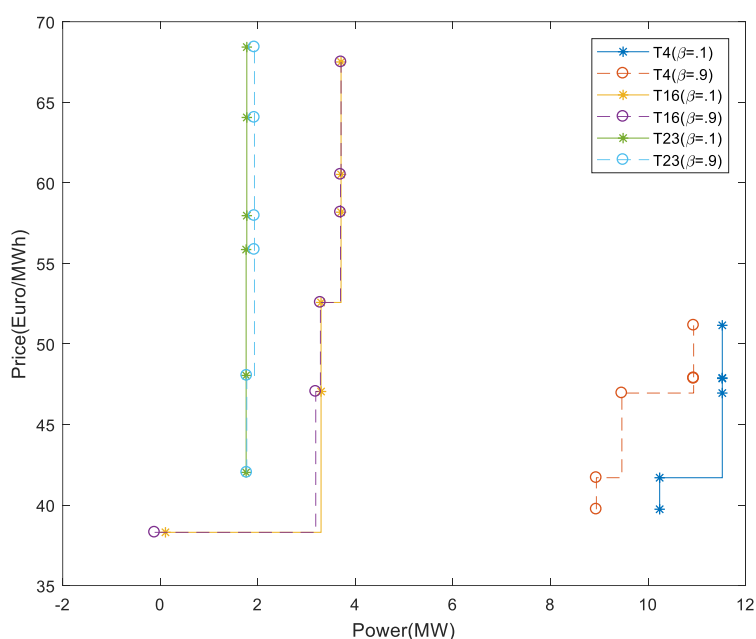
موجود بوده و بر اساس این اطلاعات برای روز ۲۸۰، برنامه‌ریزی می‌شود. مسئله برنامه‌ریزی تصادفی خطی در نرم‌افزار گمز^۱ پیاده‌سازی شده و با استفاده از سناریوهای تولید شده برای پارامترهای غیرقطعی، شبیه‌سازی انجام می‌شود. در تمام شبیه‌سازی‌ها برای نشان دادن اثر همبستگی مکانی، سیستم در حالتی است که از ذخیره‌ساز ۲ استفاده می‌شود. همچنین در تمام شبیه‌سازی‌های برای نشان دادن اثر تغییر در ظرفیت ذخیره‌ساز، نتایج با در نظر گرفتن همبستگی مکانی ارائه می‌شود.

۱-۴-۵ منحنی پیشنهاد توان



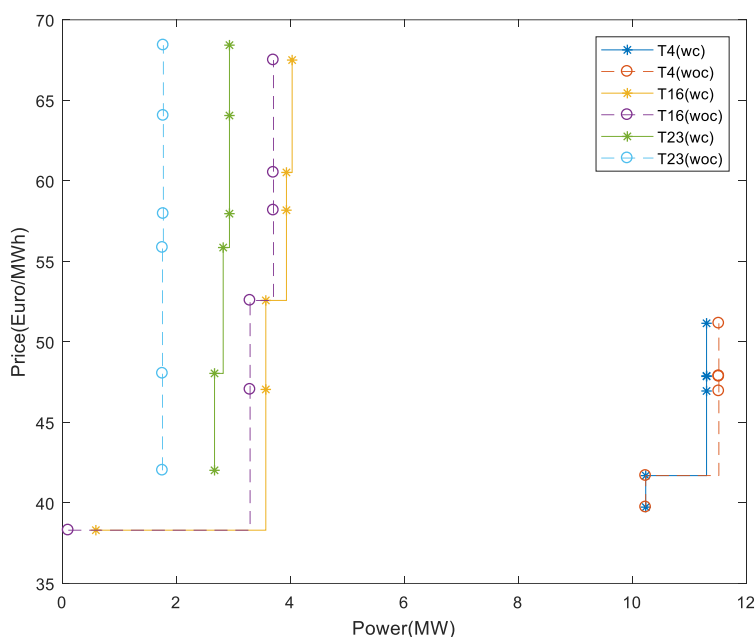
شکل ۱-۵: منحنی پیشنهاد توان در بازار پیش‌رو با در نظر گرفتن همبستگی

^۱ GAMS



شکل ۲-۵: منحنی پیشنهاد توان در بازار پیش‌رو بدون در نظر گرفتن همبستگی

در شکل ۱-۵ و شکل ۲-۵ منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار پیش‌رو برای چند بازه‌ی زمانی به ازای دو مقدار مختلف برای ضریب ریسک‌گریزی رسم شده است. شکل ۱-۵ مربوط به حالتی است که همبستگی مکانی برای تولید سناریوهای توان بادی در نظر گرفته شده، اما شکل ۲-۵ برای حالتی است که از همبستگی مکانی صرف نظر شده است. همانطور که از شکل‌ها مشخص است، به ازای ضریب ریسک‌گریزی بزرگ‌تر، منحنی پیشنهاد توان به سمت چپ یعنی توان‌های کم‌تر حرکت می‌کند. البته این موضوع برای تمام بازه‌های زمانی صادق نیست (به طور مثال برای بازه‌ی زمانی ۲۳ از شکل ۲-۵)، به این دلیل که با افزایش ضریب ریسک‌گریزی سیستم تمایل دارد پیشنهاد‌های توان را به گونه‌ای ارائه دهد که به ازای سناریوهای بد، سود افزایش یابد. این امر می‌تواند با کاهش توان در یک بازه و افزایش آن در بازه دیگر اتفاق بیفتد، از این‌رو می‌توان مشاهده کرد که در بعضی از بازه‌ها با افزایش ضریب ریسک، مقدار توان پیشنهاد شده نیز افزایش یافته است.



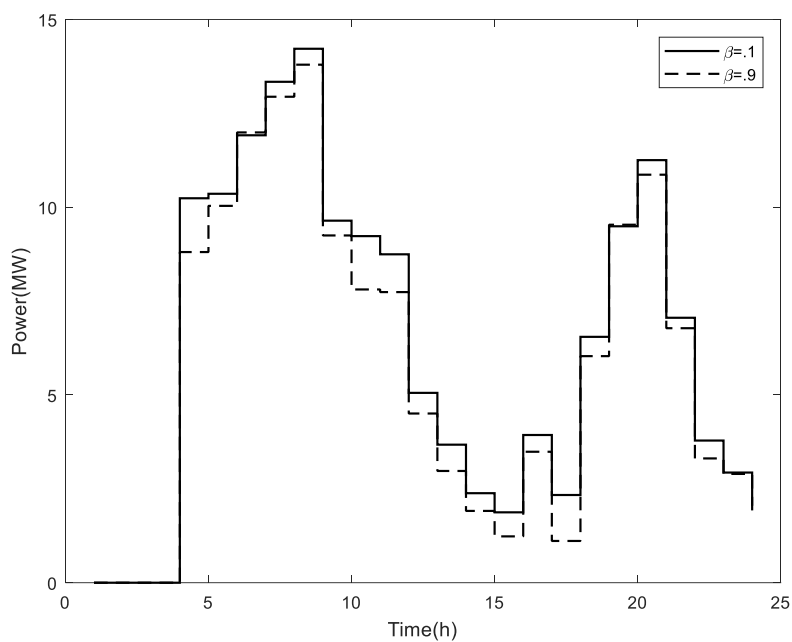
شکل ۳-۵: منحنی پیشنهاد توان در بازار پیش‌رو به ازای $\beta = 1$

شکل ۳-۵ برای بررسی اثر همبستگی بر روی منحنی‌های پیشنهاد توان در بازار پیش‌رو است که به ازای $\beta = 1$ رسم شده و نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن همبستگی، منحنی پیشنهادها تغییر می‌کنند. در دو بازه، افزایش مقدار منحنی با در نظر گرفتن همبستگی مشاهده می‌شود ولی در یکی از بازه‌ها مقادیر منحنی کاهش یافته است.

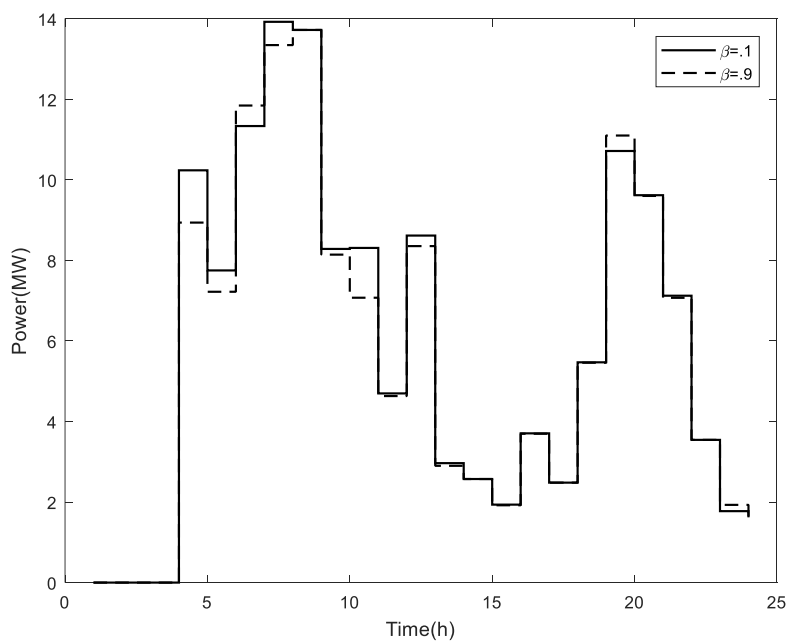
برای تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تر می‌توان به منحنی توان پذیرفته شده در بازار پیش‌رو مراجعه کرد.

۲-۴-۵ توان پیشنهادی پذیرفته شده در بازار پیش‌رو

در شکل ۴-۵ و شکل ۵-۵، منحنی‌های توان پذیرفته شده در بازار پیش‌رو به ازای دو مقدار β رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب ریسک، سیستم تمایل دارد مقادیر توان کم‌تری در بازار پیش‌رو ارائه دهد و از این طریق از جریمه‌های احتمالی در بازار تعادل بکاهد. البته در برخی از بازه‌ها این موضوع رعایت نشده است که دلیل آن در بخش ۱-۴-۵ بیان شد.



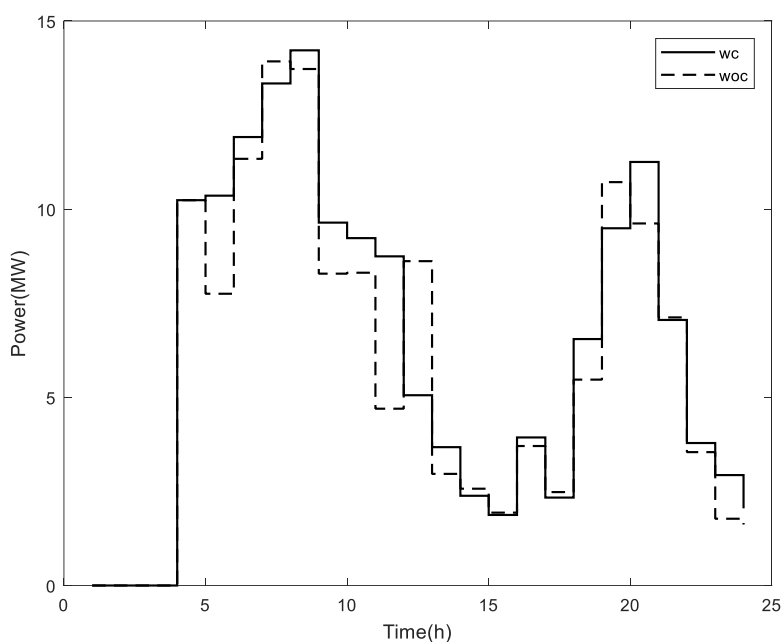
شکل ۴-۵: توان مشخص شده در بازار پیش‌رو با در نظر گرفتن همبستگی



شکل ۵-۵: توان مشخص شده در بازار پیش‌رو بدون در نظر گرفتن همبستگی

در شکل ۶-۵ منحنی توان پذیرفته شده در بازار پیش‌رو برای دو حالتی که همبستگی در نظر

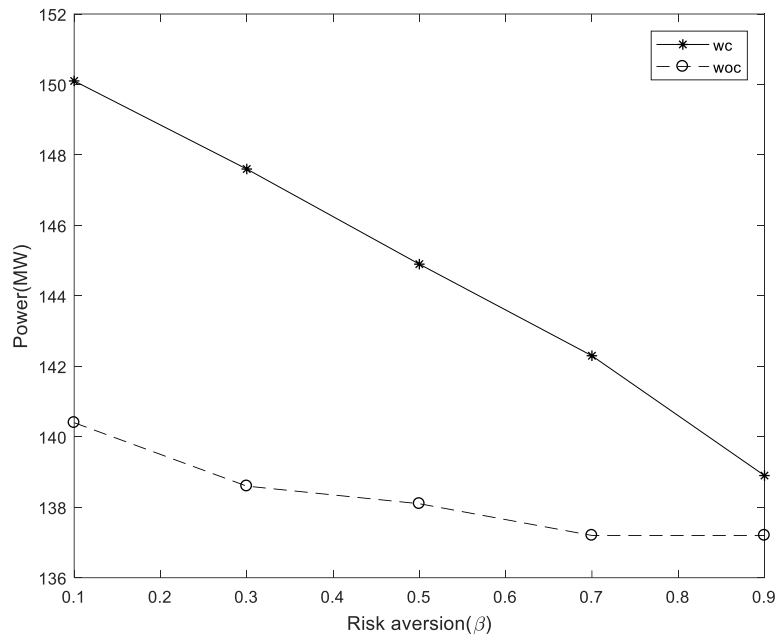
گرفته شده و از آن صرف نظر شده به ازای $\beta = 0.1$ ، نشان داده شده است.



شکل ۵-۶: توان مشخص شده در بازار پیش‌رو به ازای $\beta = 1$

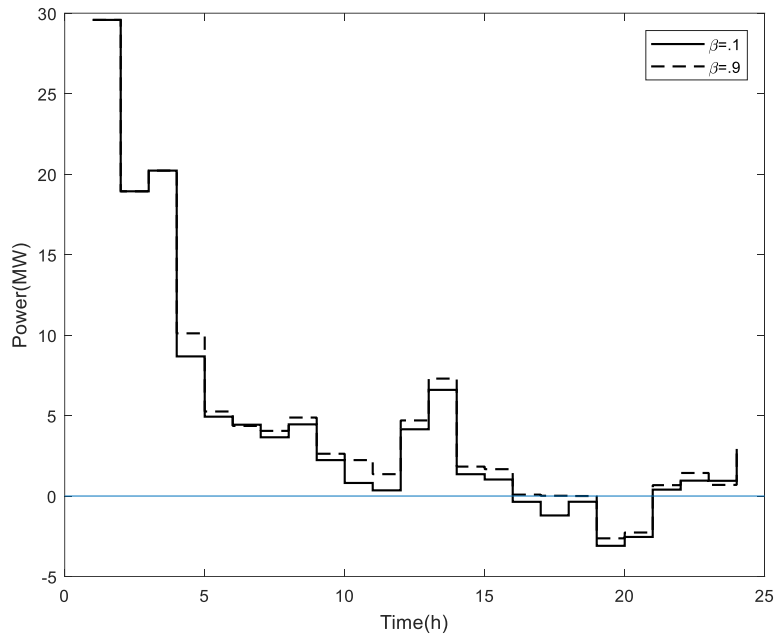
همانطور که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن همبستگی نحوه پیشنهاددهی توان تغییر می‌کند و تقریباً دو نمودار الگوی متفاوتی دارند. اما از طرفی می‌توان مشاهده کرد که با در نظر گرفتن همبستگی، سیستم تمایل دارد که پیشنهاد توان را افزایش دهد و در اکثر بازه‌های زمانی چنین موضوعی صادق است.

در شکل ۵-۷ اثر در نظر گرفتن همبستگی مکانی بر مجموع توان مبادله شده (در روز شبیه‌سازی شده، در بازار پیش‌رو تنها فروش انرژی وجود داشته است) به ازای ضرایب مختلف ریسک‌گریزی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن همبستگی مکانی مقدار مجموع توان پیشنهادی در طول روز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضریب ریسک مجموع توان کم می‌شود، چرا که به منظور فرار از ریسک، سیستم تمایل بیشتری به کاهش توان پیشنهادی بازار پیش‌رو برای کاهش کمبودهای احتمالی آینده دارد.

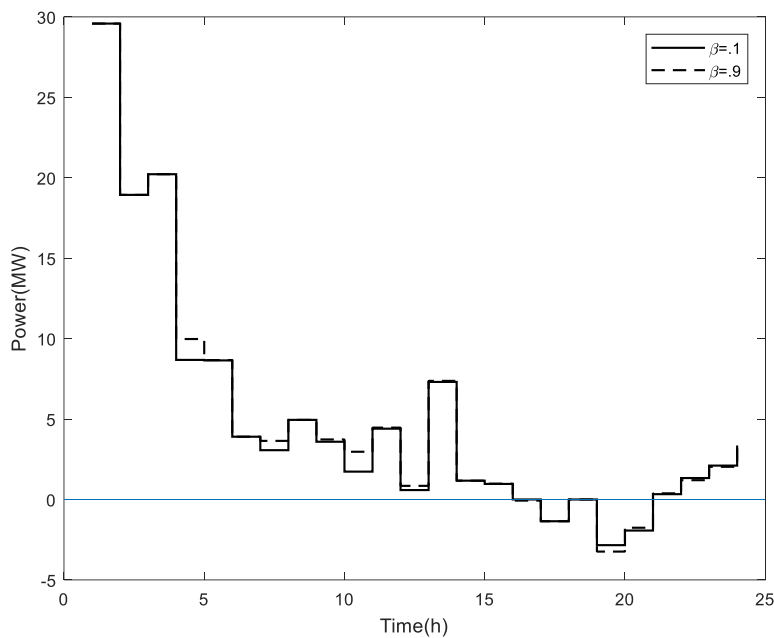


شکل ۷-۵: مجموع توان فروخته شده در بازار پیش رو بر حسب ضریب ریسک‌گریزی

۳-۴-۵ توان پیشنهادی پذیرفته شده در بازار تعادل



شکل ۵-۸: توان مشخص شده در بازار تعادل با در نظر گرفتن همبستگی

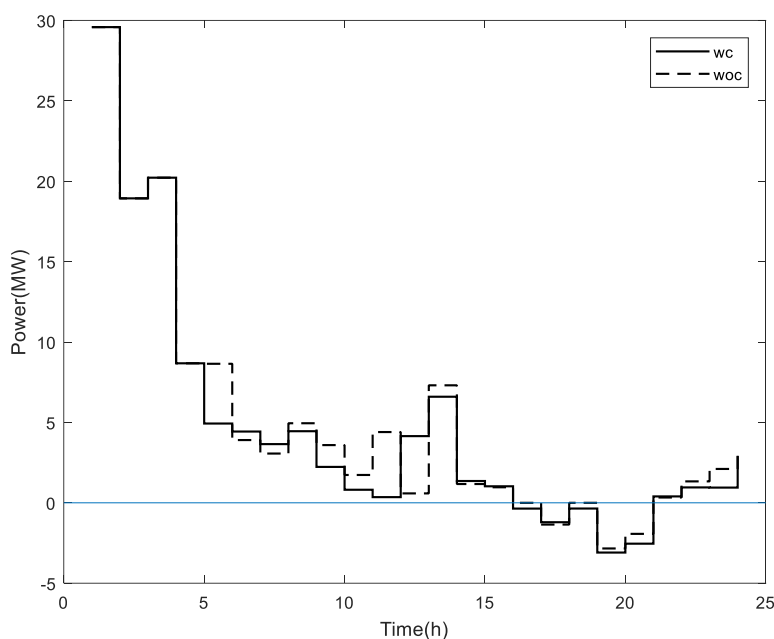


شکل ۵-۹: توان مشخص شده در بازار تعادل بدون در نظر گرفتن همبستگی

شکل ۵-۸ و شکل ۵-۹ منحنی‌های توان در بازار تعادل را نشان می‌دهند. مقدار مثبت به معنای

فروش انرژی و مقدار منفی به معنای خرید انرژی است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب ریسک در اکثر بازه‌ها مقدار توان فروخته شده، افزایش و مقدار توان خریداری شده کاهش می‌یابد. به این دلیل که با افزایش ضریب ریسک، سیستم تمایل به کاهش پیشنهاد توان در بازار پیش‌رو پیدا می‌کند، در نتیجه توان بیشتری برای فروش در بازار تعادل در دسترس است، و از طرف دیگر مقادیر توان مورد نیاز برای جبران کمبودها و در نتیجه خرید انرژی از بازار تعادل کاهش می‌یابد.

در شکل ۵-۱۰ منحنی توان مبادله شده در بازار تعادل برای زمانی که اثر همبستگی در نظر گرفته شده و از آن صرف نظر شده به ازای $\beta = 1$ ، نشان داده شده است.



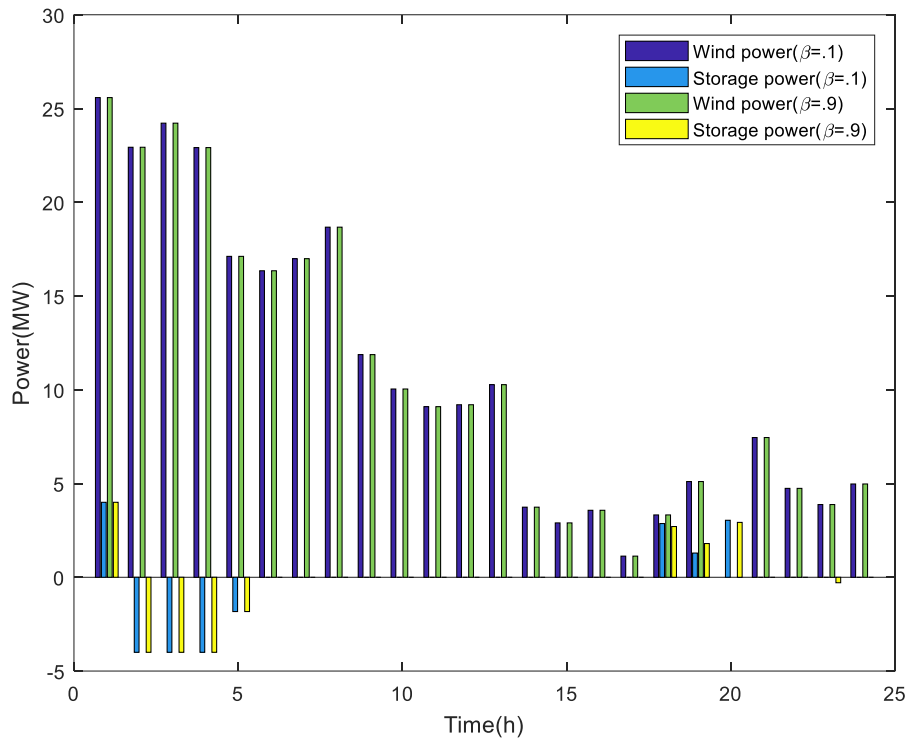
شکل ۵-۱۰: توان مشخص شده در بازار تعادل به ازای $\beta = 1$

همانطور که مشاهده می‌شود تفاوت زیادی بین دو منحنی وجود دارد، زیرا همانطور که بیان شد در نظر گرفتن همبستگی، در پیشنهاددهی توان در بازار پیش‌رو تغییرات زیادی ایجاد می‌کند. در نتیجه جبران انحرافات که در بازار تعادل انجام می‌شود نیز با تغییرات زیادی همراه است. در اکثر بازه‌ها با در نظر گرفتن همبستگی توان توان فروخته شده، افزایش و توان خریداری شده، کاهش می‌یابد. به این

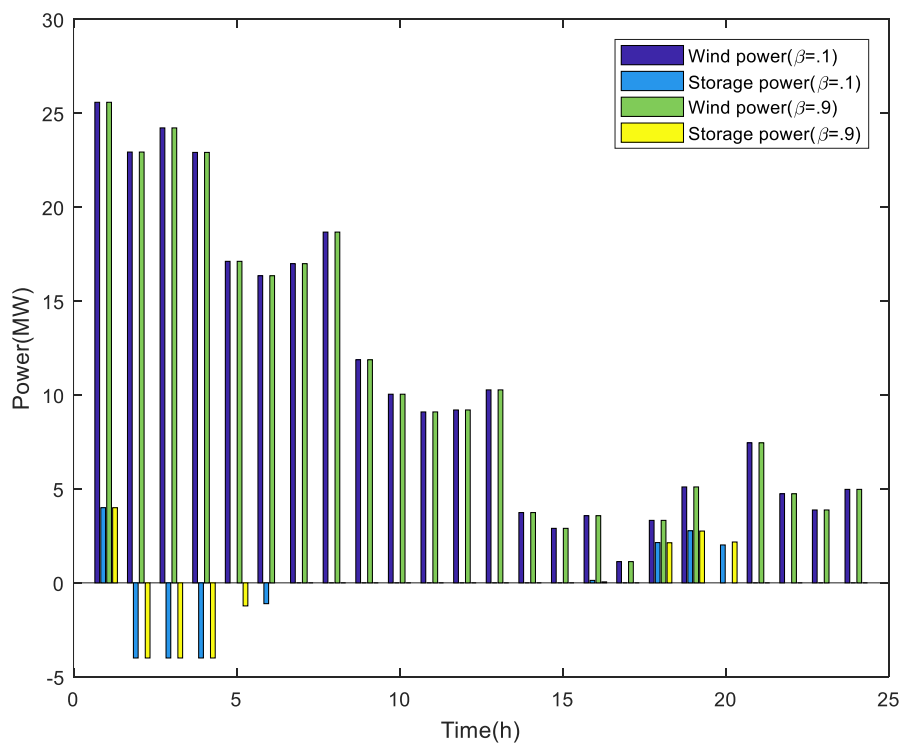
دلیل که با در نظر گرفتن همبستگی انحراف معیار سناریوهای تولید شده افزایش یافته و سیستم مقادیر توان بیشتری در بازار پیش‌رو ارائه می‌دهد و همین امر سبب می‌شود توان کمتری برای فروش در بازار تعادل در دسترس داشته باشد و از طرف دیگر به توان خریداری شده بیشتری برای جبران کمبودها نیاز پیدا کند.

۴-۴-۵ دیسپیج توان

در شکل ۵-۱۱ و شکل ۵-۱۲ به ازای دو ضریب مختلف ریسک‌گریزی، دیسپیج مجموع توان مزارع بادی و مجموع توان ذخیره‌سازها نشان داده شده است. برای ذخیره‌سازها زمانی که توان مثبت باشد یعنی تخلیه توان و زمانی که منفی باشد یعنی ذخیره توان انجام شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو حالت توان مزارع بادی یکسان است، چرا که سیستم تمایل دارد در هر شرایطی از حداکثر توان تولید شده توسط مزارع بادی استفاده کند. اما توان شارژ و دشارژ شده مربوط به ذخیره‌سازها برای دو حالت یکسان نیست، زیرا با تغییر در ضریب ریسک‌گریزی توان پیشنهاد شده در بازار پیش‌رو تغییر کرده و این تغییر سبب می‌شود که توان مبادله شده در بازار تعادل و در نتیجه دیسپیج ذخیره‌سازها تغییر کند. در حالتی که همبستگی در نظر گرفته شده است، با افزایش ضریب ریسک‌گریزی مجموع توان شارژ و مجموع توان دشارژ در طول روز افزایش می‌یابد. در حالتی که از همبستگی صرف نظر شده است به ازای دو ضریب ریسک‌گریزی مجموع توان شارژ و دشارژ کل روز یکسان است اما زمان شارژ و دشارژ و مقدار آن در بعضی از بازه‌های زمانی تغییر می‌کند.

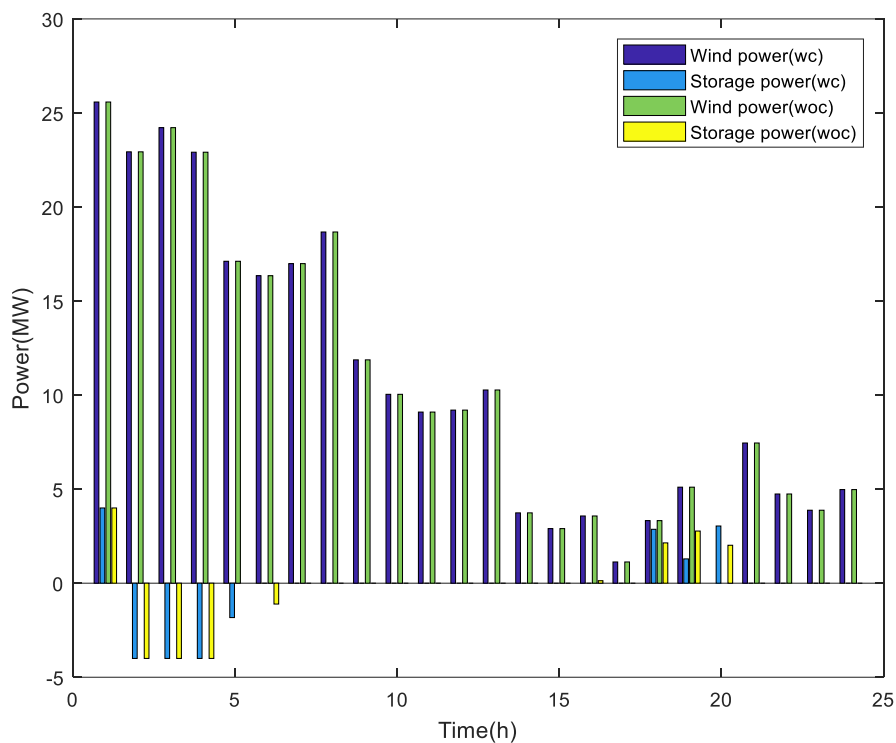


شکل ۵-۱۱: دیسپچ توان با در نظر گرفتن همبستگی



شکل ۵-۱۲: دیسپچ توان بدون در نظر گرفتن همبستگی

شکل ۵-۱۳ مربوط به اثر همبستگی است و در این شکل دیسپچ مجموع توان دو مزرعه و مجموع توان دو ذخیره‌ساز به ازای $\beta = 1$ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن همبستگی نیز دیسپچ توان بادی مزارع تغییر نمی‌کند که دلیل آن ذکر شد. اما تغییر قابل توجهی در دیسپچ ذخیره‌سازها قابل مشاهده است. به این دلیل که با در نظر گرفتن همبستگی پیشنهاددهی در بازار پیش‌رو تغییر می‌کند و این تغییر سبب می‌شود که پیشنهاددهی در بازار تعادل و در نتیجه دیسپچ ذخیره‌سازها تغییر کند.



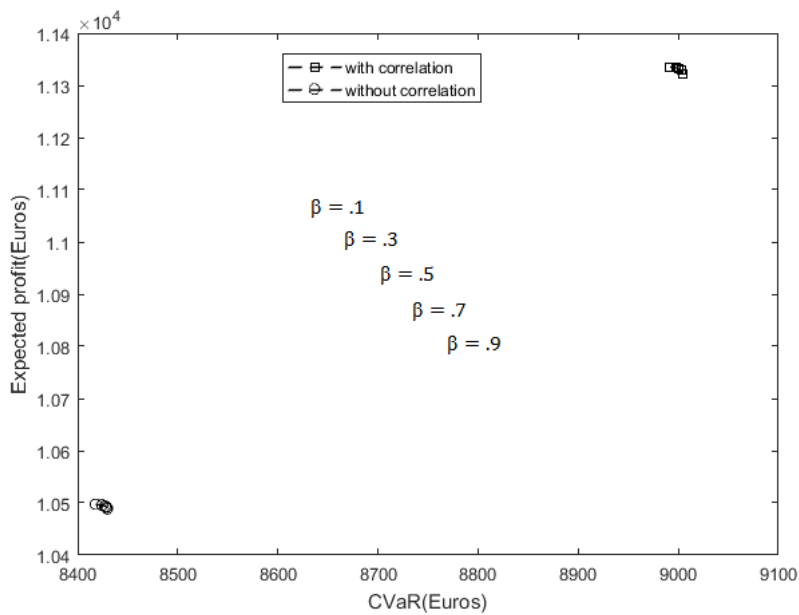
شکل ۵-۱۳: دیسپچ توان به ازای $\beta = 1$

۵-۴-۵ تحلیل تابع هدف برای مرحله اول تصمیم‌گیری

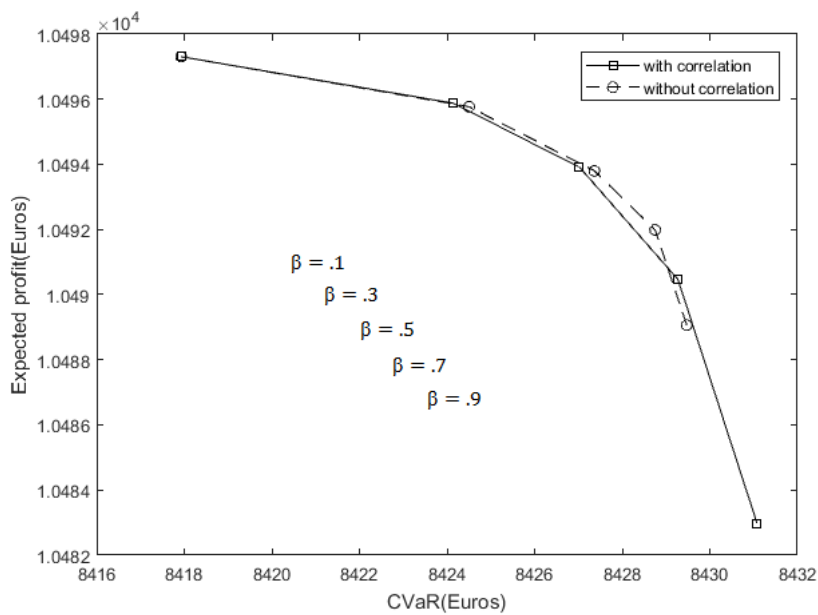
در این مرحله منحنی پیشنهاد توان مشخص شده و پس از تسویه بازار، برنامه توان بازار پیش‌رو تعیین می‌شود. در ادامه سود مورد انتظار، شاخص ارزش در معرض ریسک شرطی، درآمد مورد انتظار در بازار پیش‌رو، درآمد مورد انتظار در بازار تعادل و جریمه مورد انتظار در بازار تعادل، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۵-۴-۵ اثر همبستگی مکانی بر سود مورد انتظار و $CVaR$

سود مورد انتظار از کم کردن جریمه مورد انتظار بازار تعادل از مجموع درآمد ناشی از بازار پیش‌رو و تعادل، به دست می‌آید. به ازای ضرایب مختلف ریسک‌گریزی (β) منحنی سود مورد انتظار بر حسب $CVaR$ ترسیم می‌شود.



شکل ۱۴-۵: اثر همبستگی بر منحنی سود مورد انتظار-CVaR



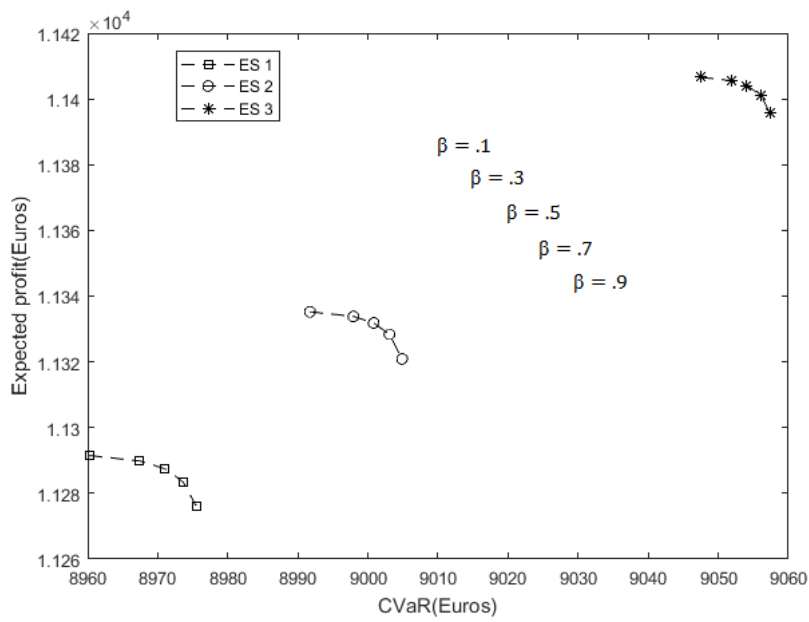
شکل ۱۵-۵: اثر همبستگی بر تغییرات منحنی سود مورد انتظار-CVaR

در شکل ۱۴-۵ منحنی سود مورد انتظار-CVaR برای زمانی که همبستگی مکانی در نظر گرفته شده و زمانی که از آن صرف نظر شده، رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، زمانی که همبستگی مکانی در نظر گرفته می‌شود، سود مورد انتظار و CVaR مقادیر بیشتری دارند. از آنجا که

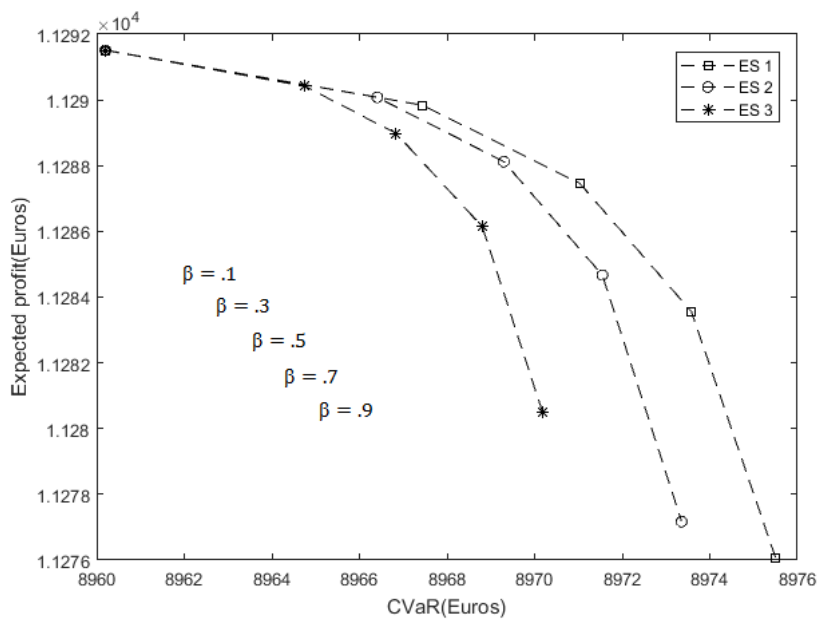
مقدار سود مورد انتظار و CVaR بسیار بیشتر از تغییرات منحنی است، با استفاده از شکل ۵-۱۴ نمی‌توان تاثیر در نظر گرفتن همبستگی مکانی را بر تغییرات منحنی، مشاهده کرد. برای حل این مشکل، نقاط شروع منحنی‌های شکل ۵-۱۴ را بر هم منطبق می‌کند (شکل ۵-۱۵). همانطور که از شکل ۵-۱۵ مشخص است، تغییرات منحنی زمانی که همبستگی مکانی در نظر گرفته می‌شود، بیشتر است. زمانی که همبستگی مکانی در تولید سناریو لحاظ می‌شود، انحراف معیار سناریوهای تولید شده افزایش می‌یابد و با افزایش پراکندگی سناریوها، با تغییرات ضریب ریسک‌گریزی تغییرات بیشتری در سود مورد انتظار و CVaR ایجاد می‌شود.

۵-۴-۲ تاثیر ظرفیت ذخیره‌ساز بر سود مورد انتظار و CVaR

سود مورد انتظار و CVaR برای سه ذخیره‌ساز مختلف که مشخصات آن‌ها در جدول ۵-۱ آمده است، با در نظر گرفتن همبستگی مکانی، محاسبه شده و منحنی‌های سود مورد انتظار-CVaR رسم می‌شوند. همانطور که از شکل ۵-۱۶ مشخص است، هر چه ظرفیت ذخیره‌ساز بیشتر باشد، سود مورد انتظار و CVaR مقادیر بزرگ‌تری دارند. اما برای مقایسه تغییرات منحنی، مانند بخش قبل، نقاط شروع منحنی‌ها بر روی هم منطبق می‌شوند. شکل ۵-۱۷ نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت ذخیره‌ساز، میزان تغییرات سود مورد انتظار و CVaR به ازای تغییرات β کاهش یافته است. با شارژ و دشارژ مناسب ذخیره‌ساز می‌توان ضررهای ناشی از تحقق سناریوهای بد را کاهش داد. هر چه ظرفیت بزرگ‌تری از ذخیره‌ساز در دسترس باشد، سیستم قدرت بیشتری برای جبران این ضررها دارد، در نتیجه با افزایش ظرفیت ذخیره‌ساز ریسک ناشی از تحقق سناریوهای بد بیشتر تحت کنترل قرار می‌گیرد، و به همین دلیل مشاهده می‌کنیم که به ازای ظرفیت بیشتر ذخیره‌ساز، تغییرات سود مورد انتظار و CVaR کمتر می‌شود (شکل ۵-۱۷).



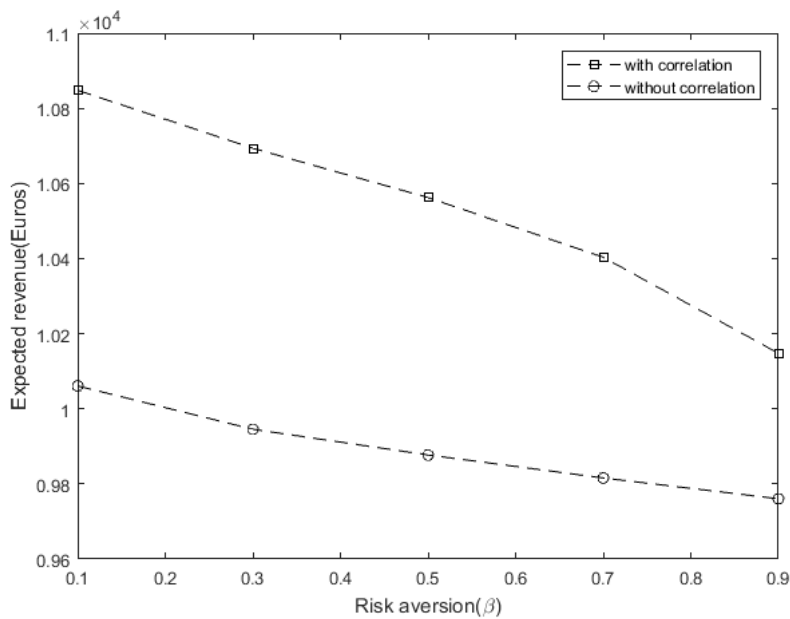
شکل ۵-۱۶: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز بر منحنی سود مورد انتظار-CVaR



شکل ۵-۱۷: اثر ظرفیت ذخیره‌ساز بر تغییرات منحنی سود مورد انتظار-CVaR

۵-۴-۳ اثر همبستگی مکانی بر درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو

منحنی درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو به ازای تغییرات β در شکل ۵-۱۸ رسم شده است.

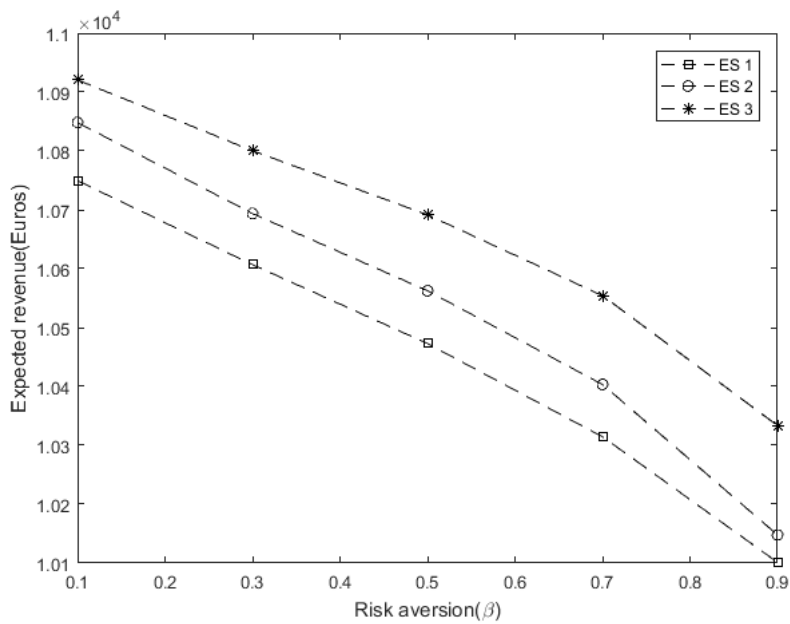


شکل ۵-۱۸: منحنی درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو- β

همانطور که مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن همبستگی مکانی، درآمد مورد انتظار افزایش می‌یابد. از طرف دیگر می‌توان مشاهده کرد که تغییرات درآمد مورد انتظار به ازای تغییرات β (شیب منحنی) در حالتی که همبستگی مکانی در نظر گرفته شده است، بیشتر است. در نتیجه می‌توان گفت که با در نظر گرفتن همبستگی، حساسیت درآمد مورد انتظار نسبت به تغییرات β افزایش می‌یابد.

۴-۵-۴-۵ اثر تغییر در ظرفیت ذخیره‌ساز بر درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو

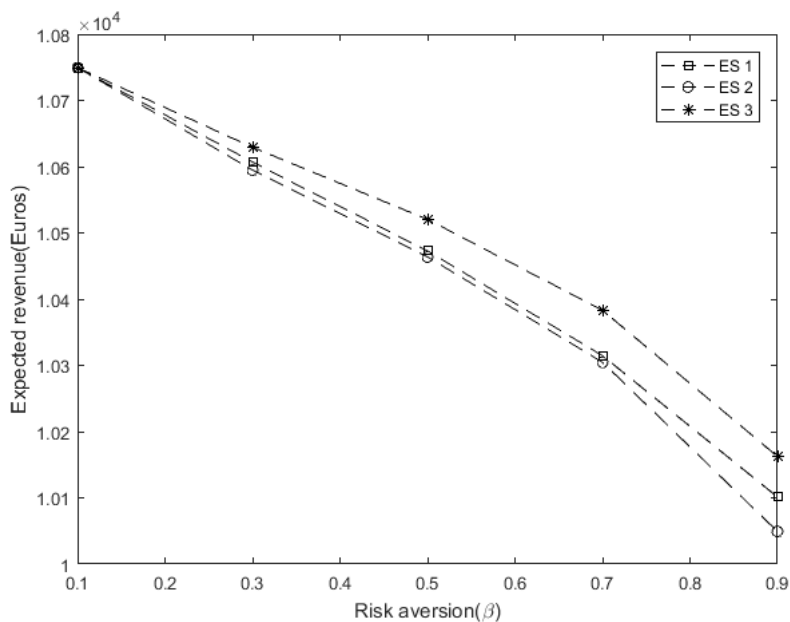
برای حالتی که همبستگی مکانی در نظر گرفته شده است، منحنی درآمد مورد انتظار- β را برای سه ذخیره‌ساز ذکر شده، رسم می‌کنیم. شکل ۵-۱۹ نشان می‌دهد که به ازای ظرفیت بیشتر ذخیره‌ساز، درآمد مورد انتظار ناشی از بازار پیش‌رو بیشتر است.



شکل ۱۹-۵: منحنی درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو- β

از آنجا که مقایسه شیب منحنی از روی شکل ۱۹-۵ کار دشواری است، مانند گذشته نقاط شروع

منحنی‌ها را بر روی هم منطبق می‌کنیم.



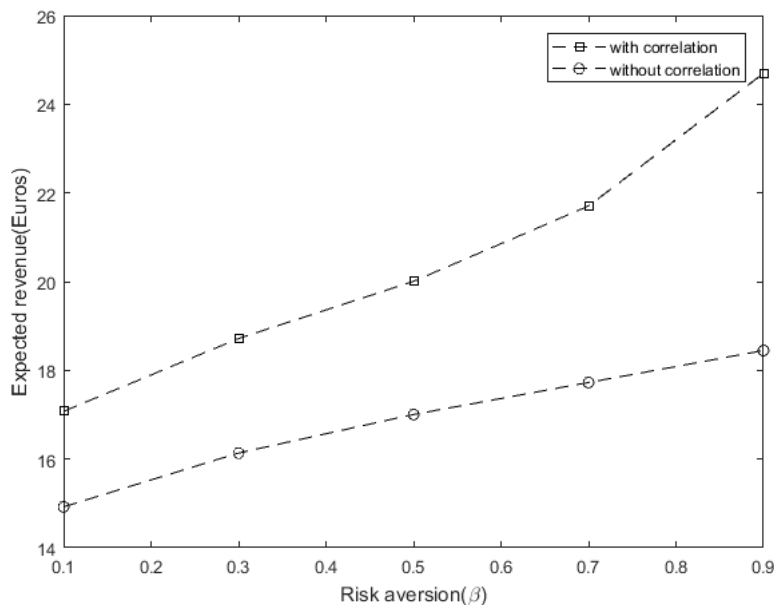
شکل ۲۰-۵: منحنی درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو- β برای بررسی شیب منحنی

در شکل ۲۰-۵ منحنی‌های مربوط به ذخیره‌ساز ۱ و ۲ بسیار به هم نزدیک‌اند و شیب منحنی

ذخیره‌ساز شماره ۲ به میزان بسیار کمی بیشتر از منحنی ذخیره‌ساز ۱ است. اما با مقایسه منحنی مربوط به ذخیره‌ساز ۳ مشخص می‌شود که شیب منحنی با افزایش ظرفیت ذخیره‌ساز، کاهش یافته است. می‌توان دریافت که حساسیت نسبت به تغییرات β با افزایش ظرفیت ذخیره‌ساز، کاهش می‌یابد. هر چند این موضوع با توجه به منحنی‌های مربوط به ذخیره‌ساز ۱ و ۲ نقض می‌شود، اما می‌توان گفت که نزدیک بودن ظرفیت ذخیره‌ساز ۱ و ۲ نسبت به اختلافشان با ذخیره‌ساز ۳، باعث شده که نتایج به خوبی نمایان نشود.

از شکل ۵-۱۸ و شکل ۵-۱۹ می‌توان دریافت که با افزایش β ، درآمد بازار پیش‌رو کاهش می‌یابد، و منحنی‌های مربوط به آن‌ها نزولی هستند. این موضوع به این دلیل است که با افزایش ضریب ریسک، مدل تمایل بیشتری برای کاهش ریسک دارد، از این رو توان‌های پیشنهادی در بازار پیش‌رو را کاهش داده تا احتمال وقوع جریمه در بازار تعادل کاهش یابد.

۵-۴-۵ اثر همبستگی مکانی بر درآمد و جریمه مورد انتظار بازار تعادل

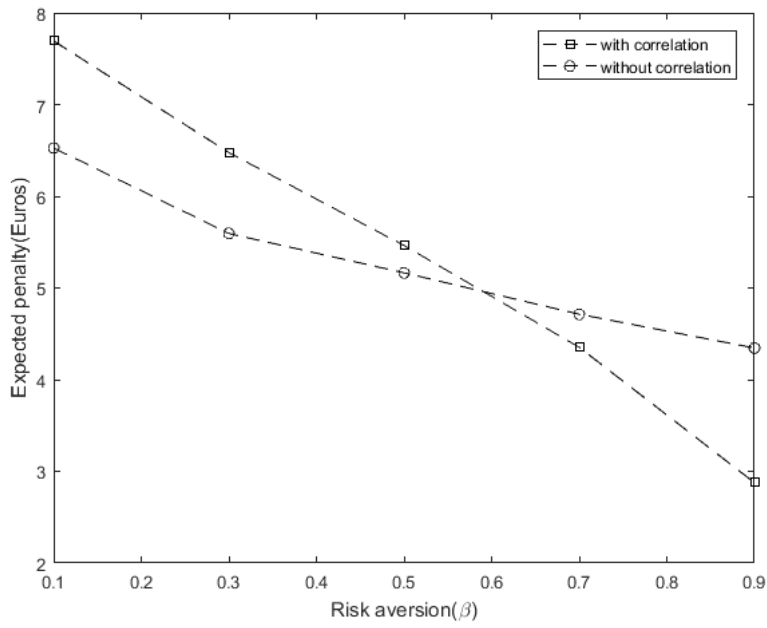


شکل ۵-۲۱: منحنی درآمد مورد انتظار بازار تعادل- β

همانطور که از شکل ۵-۲۱ مشخص است، درآمد مورد انتظار زمانی که همبستگی مکانی در نظر

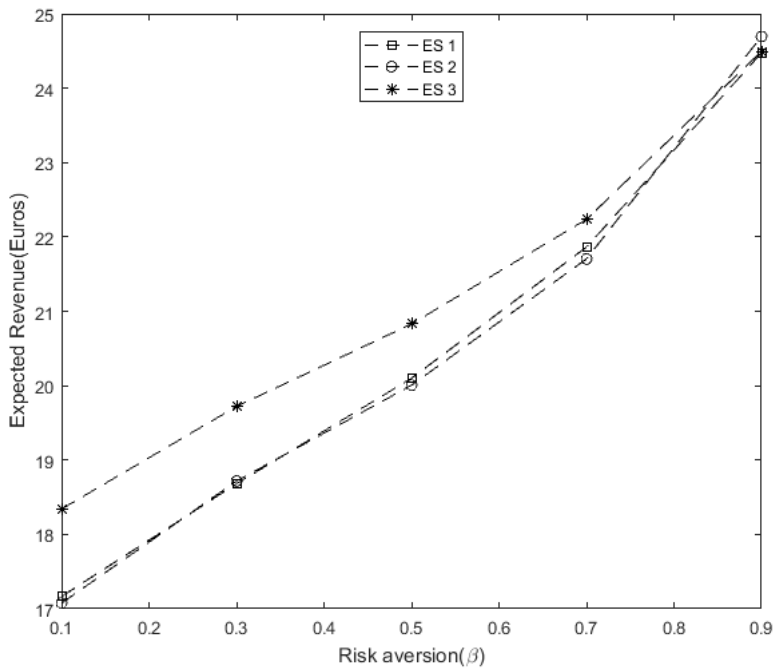
گرفته شده، بیشتر است. همچنین می‌توان دریافت که حساسیت درآمد مورد انتظار بازار تعادل با در نظر گرفتن همبستگی مکانی، نسبت به تغییرات β ، بیشتر می‌شود، چرا که شیب منحنی مربوط به آن بیشتر است. هر دو منحنی صعودی هستند، به دلیل اینکه با افزایش β ، پیشنهاددهی در بازار پیش‌رو کاهش یافته و در نتیجه در بازار تعادل انرژی بیشتری برای فروش در دسترس وجود دارد.

شکل ۵-۲۲ نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن همبستگی مکانی جریمه مورد انتظار به ازای مقادیر کوچک‌تر β بیشتر است، اما به ازای مقادیر بزرگ‌تر β جریمه مورد انتظار کمتر از زمانی است که از همبستگی مکانی صرف نظر شده است. با در نظر گرفتن همبستگی مکانی، حساسیت جریمه مورد انتظار نسبت به β افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با در نظر گرفتن همبستگی مکانی، انحراف معیار سناریوهای تولید شده بیشتر می‌شود، در نتیجه جریمه احتمالی افزایش می‌یابد. هر چند در نظر گرفتن همبستگی مکانی سبب شده که جریمه مورد انتظار بیشتر شود، اما حساسیت جریمه مورد انتظار نسبت به β را نیز افزایش داده، در نتیجه در مقادیر بزرگ‌تر β شاهد هستیم که جریمه مورد انتظار، کم‌تر از زمانی است که همبستگی مکانی در نظر گرفته نشده است.

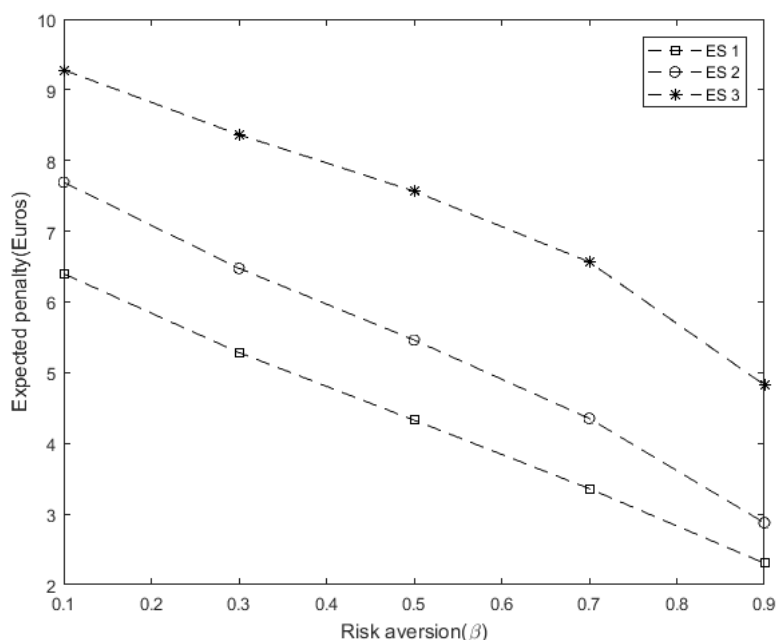


شکل ۲۲-۵: منحنی جریمه مورد انتظار بازار تعادل- β

۶-۵-۴-۵ اثر تغییر ظرفیت ذخیره‌ساز بر درآمد و جریمه مورد انتظار بازار تعادل



شکل ۲۳-۵: منحنی درآمد مورد انتظار بازار تعادل- β



شکل ۵-۲۴: منحنی جریمه مورد انتظار بازار تعادل- β

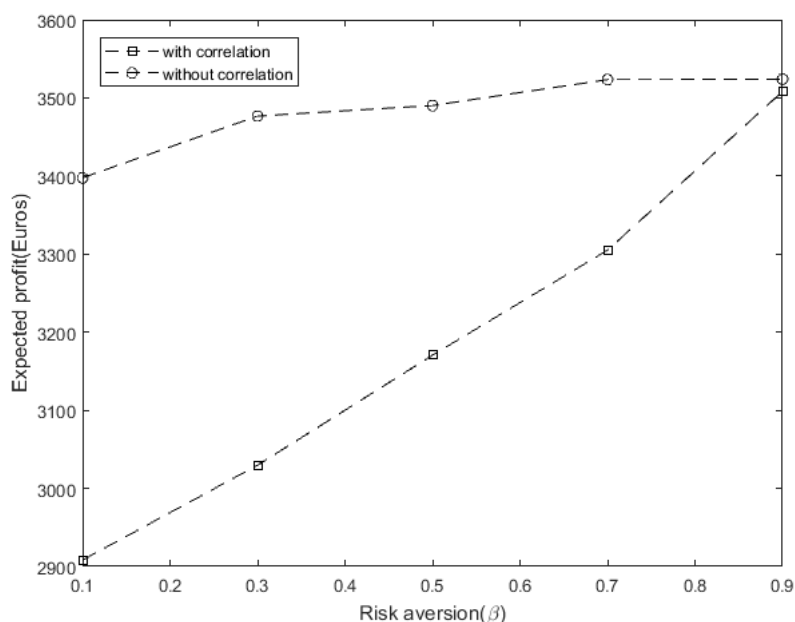
شکل ۵-۲۳ اطلاعات مناسبی در مورد ذخیره‌ساز ۱ و ۲ ارائه نمی‌دهد و منحنی‌های آن‌ها بسیار به هم نزدیکند. اما با مقایسه ذخیره‌ساز ۳ با ۱ و ۲ می‌توان متوجه شد که با افزایش ظرفیت ذخیره‌ساز، شیب منحنی و در نتیجه حساسیت نسبت به تغییرات β ، کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان گفت ظرفیت بیشتر، باعث می‌شود که درآمد بیشتری در بازار تعادل کسب شود. دلیل ضعف اطلاعات مربوط به ذخیره‌ساز ۱ و ۲ می‌تواند، میزان اختلاف کمتر آن‌ها نسبت به اختلاف با ذخیره‌ساز ۳ باشد. از آنجا که مقدار درآمد مورد انتظار بازار تعادل به نسبت بازار پیش‌رو کم است، اختلاف کم ذخیره‌ساز ۱ و ۲ تاثیر بیشتری بر روی آن نهاده و این ضعف اطلاعات خروجی را ایجاد کرده است. به طور کلی از شکل ۵-۲۳ می‌توان دریافت که با افزایش β ، درآمد مورد انتظار بازار تعادل بیشتر می‌شود که دلیل آن در بخش قبل بیان شد. شکل ۵-۲۴ نشان می‌دهد که جریمه مورد انتظار برای ظرفیت‌های بالاتر ذخیره‌ساز، مقدار بیشتری دارد. می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزایش ظرفیت ذخیره‌ساز تبادل انرژی سیستم با بازارها افزایش می‌یابد، در نتیجه مشاهده می‌شود که مقادیر درآمد و جریمه نیز بیشتر می‌شوند.

۵-۴-۶ تحلیل تابع هدف برای مرحله دوم تصمیم‌گیری

در این مرحله مجموعه تولیدکنندگان بادی-ذخیره‌ساز برای هر ساعت، پیشنهاد خرید یا فروش انرژی را با توجه به توان تعیین شده در بازار پیش‌رو، به بازار تعادل ارائه می‌دهند. سود مورد انتظار در این مرحله از کم کردن جریمه ناشی از خرید انرژی، از درآمد ناشی از فروش انرژی به دست می‌آید.

۵-۴-۶-۱ اثر همبستگی مکانی بر سود مورد انتظار بازار تعادل

همانطور که از شکل ۵-۲۵ مشخص است، با در نظر گرفتن همبستگی مکانی سود مورد انتظار در بازار تعادل کم می‌شود. به دلیل آنکه همبستگی مکانی، انحراف معیار سناریوها را بیشتر کرده و مدل، پیشنهاد بیشتری برای توان بازار پیش‌رو در نظر می‌گیرد، در نتیجه سود بازار تعادل کمتر می‌شود. از طرف دیگر حساسیت سود مورد انتظار نسبت به β با در نظر گرفتن همبستگی مکانی بیشتر می‌شود و منحنی با شیب بیشتری افزایش می‌یابد، به همین دلیل مشاهده می‌شود که به ازای مقادیر بزرگ β ، اختلاف منحنی‌ها بسیار کم می‌شود.

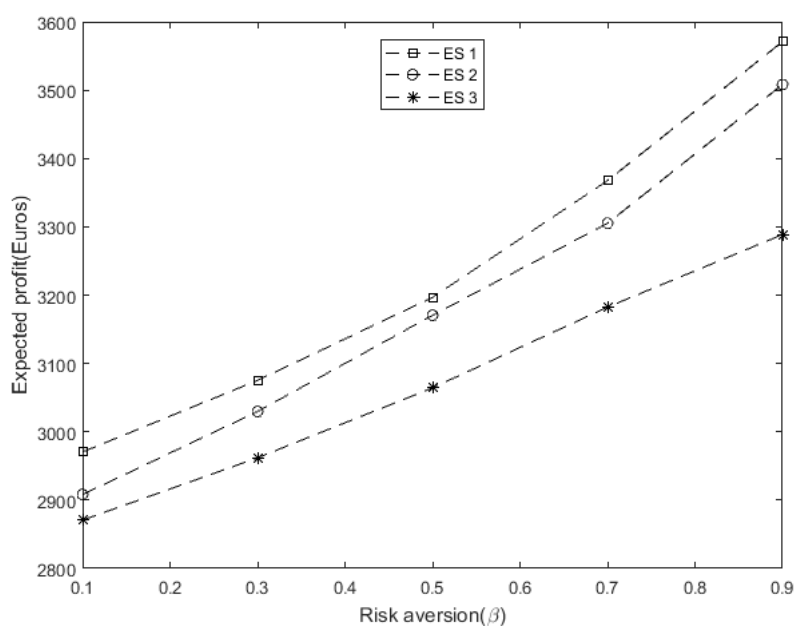


شکل ۵-۲۵: منحنی سود مورد انتظار بازار تعادل بر حسب β

۵-۴-۶-۲ اثر تغییر ظرفیت ذخیره‌ساز بر سود مورد انتظار بازار تعادل

همانطور که از شکل ۵-۲۶ مشخص است، زمانی که ظرفیت ذخیره‌ساز بیشتر می‌شود، سود مورد انتظار بازار تعادل کمتر می‌شود. زمانی که ظرفیت ذخیره‌ساز بیشتر شود تولیدکننده‌ی بادی می‌تواند تبادل انرژی بیشتری با ذخیره‌ساز داشته باشد و وابستگی‌اش به بازار تعادل کاهش می‌یابد، در نتیجه مشاهده می‌شود که سود مورد انتظار در این بازار، کمتر می‌شود.

از شکل ۵-۲۵ و شکل ۵-۲۶ می‌توان فهمید که سود مورد انتظار در بازار تعادل با افزایش مقدار β افزایش می‌یابد و منحنی مربوط به آن صعودی است. زیرا با افزایش ضریب ریسک‌گریزی، سیستم مقادیر کم‌تری از توان را در بازار پیش‌رو ارائه می‌دهد، در نتیجه فرصت بیشتری برای کسب سود در بازار تعادل ایجاد می‌شود. البته بیان این نکته ضروری است که فروش انرژی در بازار پیش‌رو، مطلوبیت بیشتری نسبت به فروش انرژی در بازار تعادل دارد، به این دلیل که ضریب قیمت بازار تعادل برای فروش انرژی کم‌تر از ۱ است و اگر انرژی در بازار پیش‌رو به فروش برسد، سود بیشتری نسبت به فروش انرژی در بازار تعادل، کسب می‌شود.



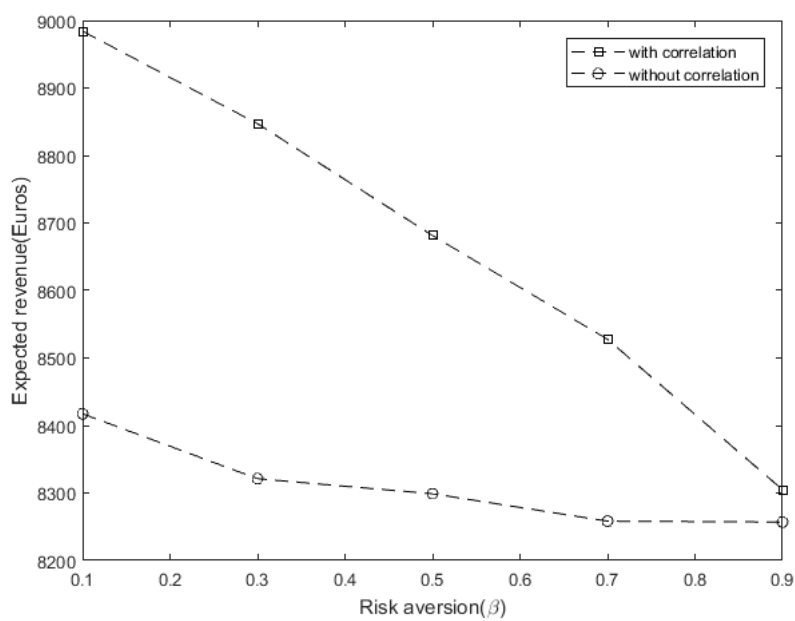
شکل ۵-۲۶: منحنی سود مورد انتظار بازار تعادل بر حسب β

۷-۴-۵ بررسی خروجی‌های واقعی پس از تحقق سناریوها

پس از تحقق سناریوهای قیمت بازارها و تولید توان بادی، می‌توان مقادیر واقعی درآمد بازار پیش‌رو، درآمد ناشی از فروش انرژی و جریمه ناشی از خرید انرژی در بازار تعادل، و سود کل را محاسبه کرد. مقادیر واقعی وابسته به دقت پیش‌بینی و تحقق سناریوهاست، و این امر می‌تواند بر خروجی‌ها تاثیر نامطلوبی داشته باشد. به این ترتیب، نتایج ناشی از تحلیل خروجی‌های واقعی می‌توانند با خطا همراه بوده و با نتایج حاصل از مقادیر مورد انتظار مطابقت نداشته باشند.

۱-۷-۴-۵ اثر همبستگی بر درآمد واقعی بازار پیش‌رو

شکل ۵-۲۷ نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن همبستگی مکانی درآمد واقعی ناشی از بازار پیش‌رو بیشتر شده و حساسیت آن نسبت به تغییرات β افزایش می‌یابد. همچنین هر دو منحنی نزولی است و با افزایش β درآمد واقعی بازار پیش‌رو کاهش می‌یابد.

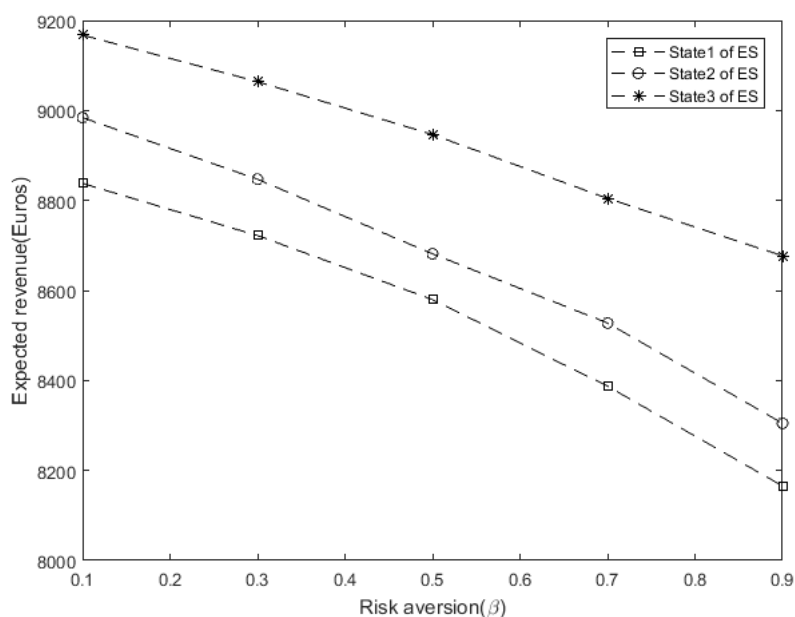


شکل ۲۷-۵: منحنی درآمد واقعی بازار پیش‌رو بر حسب β

۲-۷-۴-۵ اثر تغییر ظرفیت ذخیره‌ساز بر درآمد واقعی بازار پیش‌رو

همانطور که از شکل ۲۸-۵ مشخص است، با افزایش ظرفیت ذخیره‌ساز درآمد واقعی در بازار

پیش‌رو افزایش می‌یابد.

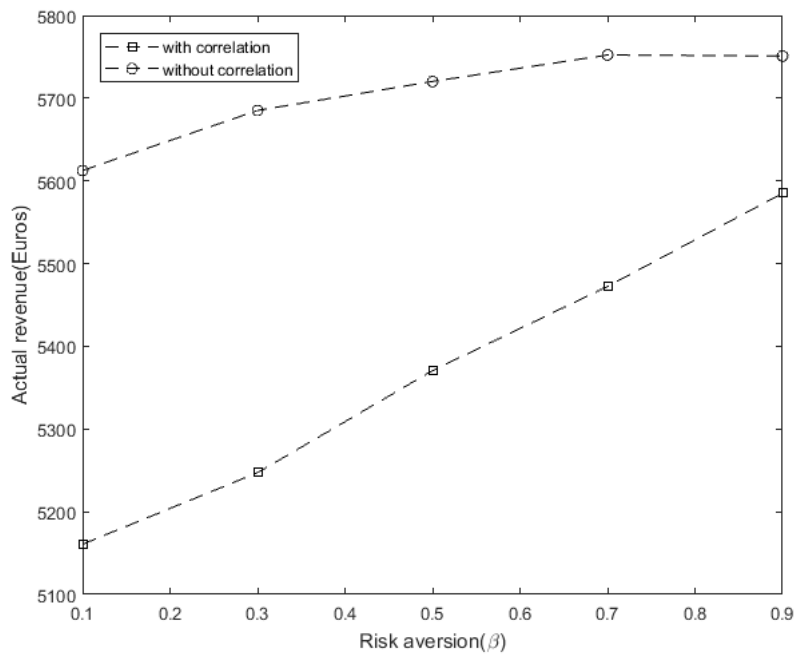


شکل ۵-۲۸: منحنی درآمد واقعی بازار پیش‌رو بر حسب β

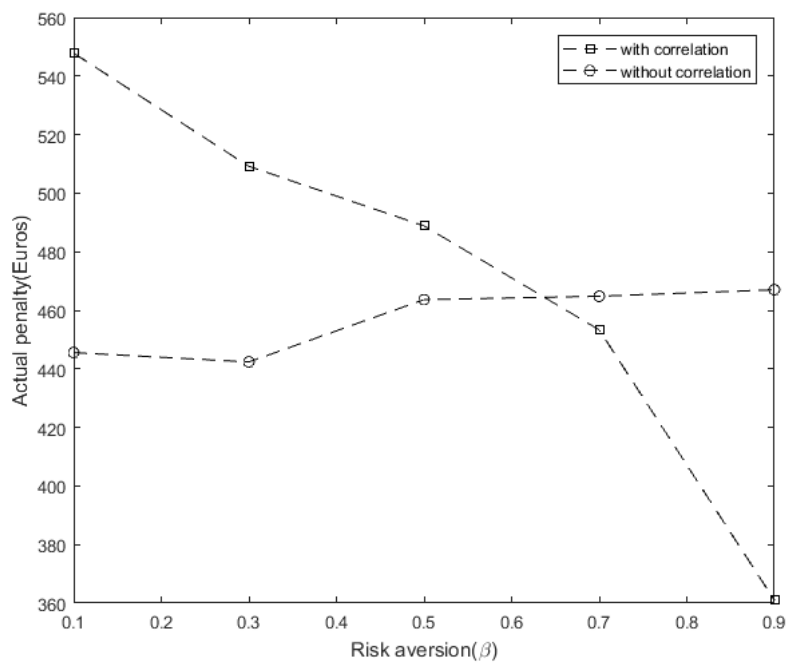
با توجه به شکل ۵-۲۷ و شکل ۵-۲۸، نتایج واقعی به دست آمده برای درآمد بازار پیش‌رو با نتایج درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو، همخوانی دارند.

۵-۴-۷-۳ اثر همبستگی مکانی بر درآمد و جریمه واقعی بازار تعادل

همانطور که از شکل ۵-۲۹ مشخص است، شیب منحنی یا حساسیت نسبت به تغییرات β برای زمانی که همبستگی مکانی در نظر گرفته شده بیشتر است. اما بر خلاف آنچه که برای درآمد مورد انتظار بازار تعادل به دست آمد، درآمد زمانی که از همبستگی مکانی صرف نظر شده، بیشتر است. همانطور که بیان شد، این تناقض می‌تواند ناشی از خطای پیش‌بینی باشد. شکل ۵-۳۰ نشان می‌دهد که تحلیل جریمه واقعی از نظر حساسیت و مقدار آن بسیار شبیه به جریمه مورد انتظار بازار تعادل است. تنها تفاوتی که بین جریمه واقعی و مورد انتظار وجود دارد این است که در حالتی که از همبستگی مکانی صرف نظر شده، منحنی برای جریمه واقعی بر خلاف جریمه مورد انتظار هموار نزولی نیست.

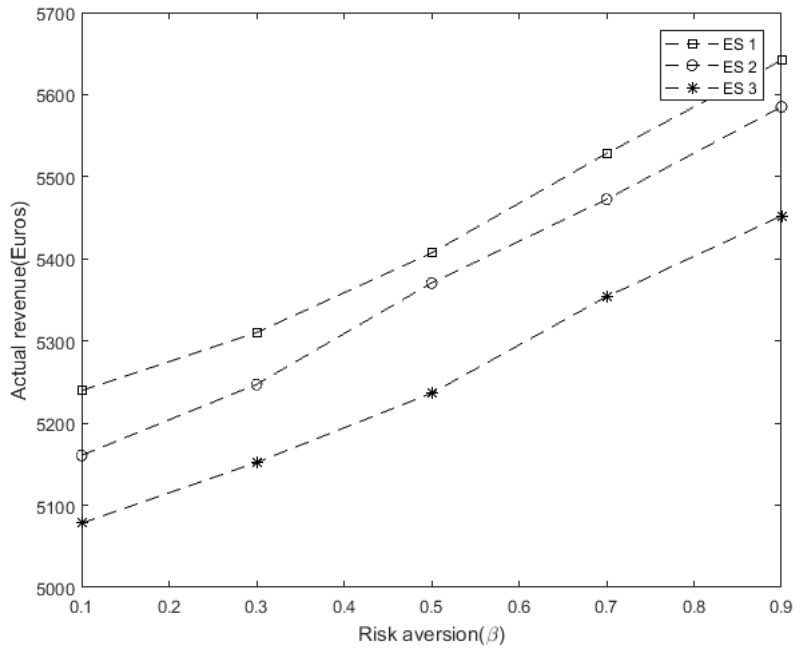


شکل ۵-۲۹: منحنی درآمد واقعی بازار تعادل بر حسب β

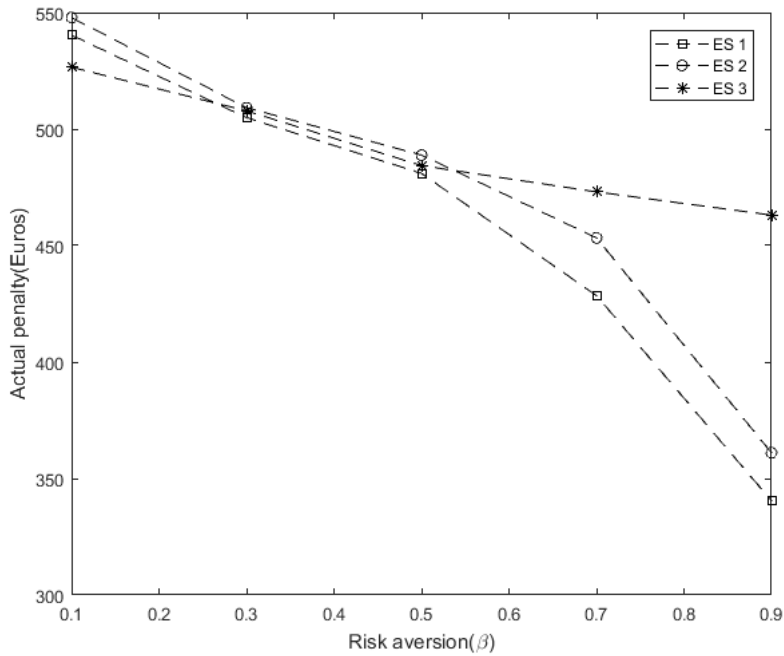


شکل ۵-۳۰: منحنی جریمه واقعی بازار تعادل بر حسب β

۴-۷-۴-۵ اثر تغییر ظرفیت ذخیره‌ساز بر درآمد و جریمه واقعی بازار تعادل



شکل ۳۱-۵: منحنی درآمد واقعی بازار تعادل بر حسب β

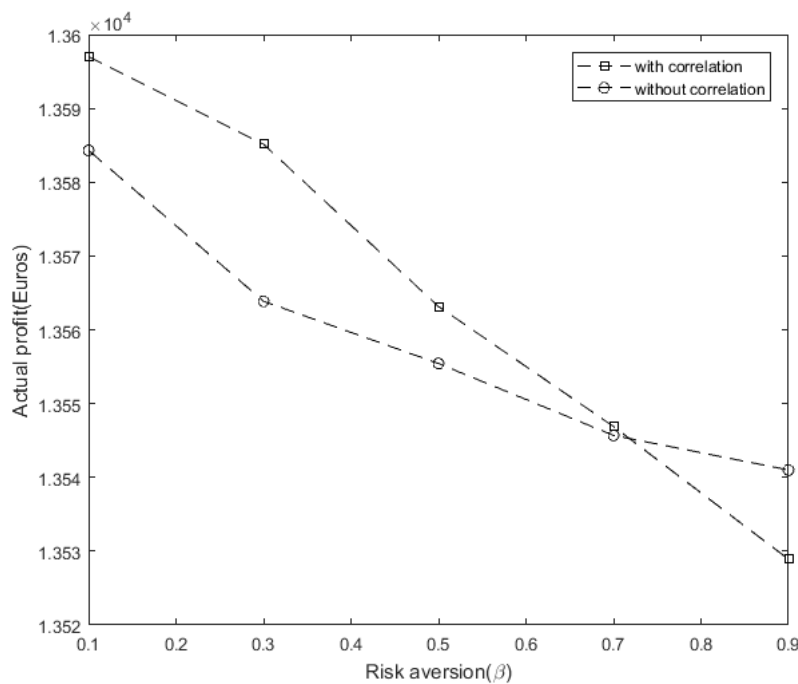


شکل ۳۲-۵: منحنی جریمه واقعی بازار تعادل بر حسب β

شکل ۳۱-۵ نشان می‌دهد که به ازای ظرفیت بیشتر ذخیره‌ساز درآمد بازار تعادل کمتر می‌شود، که این موضوع خلاف آن چیزی است که در مورد درآمد مورد انتظار بازار تعادل اتفاق افتاده است. از شکل ۳۲-۵ می‌توان فهمید که رفتار منحنی‌های جریمه واقعی متفاوت از منحنی‌های جریمه مورد انتظار است. تفاوت قابل توجهی که بین درآمد و جریمه واقعی، و مورد انتظار وجود دارد مقدار آن‌هاست، که مقادیر واقعی بسیار بزرگتر هستند. این تناقضات و اختلافات می‌تواند ناشی از خطای پیش‌بینی و تحقق سناریوها باشد، که قبلاً به آن اشاره شده است.

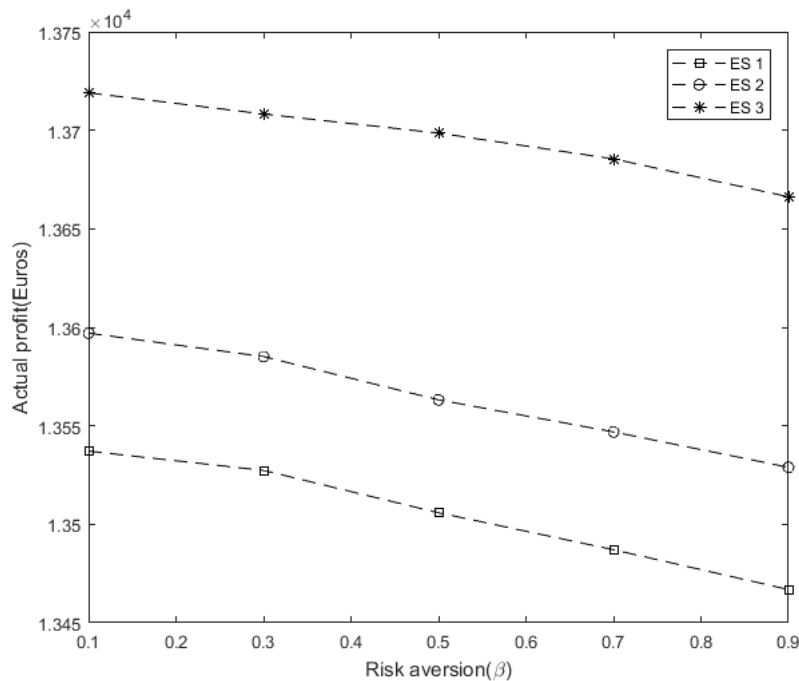
۵-۴-۷-۵ اثر همبستگی مکانی بر سود واقعی

همانطور که شکل ۳۳-۵ نشان می‌دهد، سود کل واقعی برای زمانی که همبستگی مکانی در نظر گرفته شده است به ازای مقادیر کوچک‌تر β ، بیشتر است، اما با افزایش β به دلیل آنکه حساسیت با در نظر گرفتن همبستگی نسبت به تغییرات β افزایش می‌یابد، مشاهده می‌شود که به ازای مقادیر بزرگتر β سود کل واقعی کمتر از زمانی است که از همبستگی صرف نظر شده است.



شکل ۳۳-۵: منحنی سود واقعی بر حسب β

۵-۴-۶ اثر تغییر ظرفیت ذخیره‌ساز بر سود کل واقعی



شکل ۵-۴: منحنی سود واقعی بر حسب β

شکل ۵-۴ نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت ذخیره‌ساز سود کل واقعی افزایش می‌یابد.

همچنین با افزایش ظرفیت ذخیره‌ساز حساسیت نسبت به تغییرات β کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل ۵-۳۳ و شکل ۵-۳۴ مشاهده می‌شود که منحنی‌ها نزولی هستند و با افزایش β

سود کل واقعی کم می‌شود.

۵-۵ نتیجه‌گیری

۱. با در نظر گرفتن همبستگی مکانی، مقادیر سود مورد انتظار و CVaR افزایش یافته و

تغییرات آن‌ها نسبت به تغییرات β بیشتر می‌شود.

۲. با در نظر گرفتن همبستگی مکانی، درآمد مورد انتظار و واقعی بازار پیش‌رو افزایش می‌یابد

و حساسیت آن نسبت به تغییرات β نیز بیشتر می‌شود.

۳. با در نظر گرفتن همبستگی مکانی، سود مورد انتظار در بازار تعادل افزایش می‌یابد و حساسیت آن نسبت به تغییرات β بیشتر می‌شود.
۴. با افزایش ظرفیت ذخیره‌ساز، سود مورد انتظار و CVaR افزایش یافته، اما تغییرات آن‌ها نسبت به تغییرات β کاهش می‌یابد.
۵. با افزایش ضریب ریسک‌گریزی (β) سود مورد انتظار و درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو و جریمه مورد انتظار بازار تعادل کاهش یافته، اما درآمد مورد انتظار بازار تعادل افزایش می‌یابد.
۶. نتایج واقعی به دست آمده همواره با مقادیر مورد انتظار خود همخوانی ندارند. این موضوع می‌تواند ناشی از خطای پیش‌بینی باشد.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱ مقدمه

در این پایان نامه پیشنهاددهی استراتژیک برای مجموعه‌ای از تولیدکنندگان بادی-ذخیره‌ساز که در بازار برق کوتاه‌مدت ارائه شد. به دلیل پیشنهاد گروهی و حضور ذخیره‌ساز، مسئله همبستگی و پیشنهاددهی استراتژیک در هر دو بازار مورد بررسی قرار گرفت.

در فصل دوم به بررسی سابقه موضوع پیشنهاددهی استراتژیک تولیدکننده بادی در بازار برق پرداخته شد. نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی بررسی شد و مزایا و معایب روش‌ها بیان شد. پیشنهاددهی گروهی تولیدکنندگان بادی و ترکیب کردن تولیدکننده بادی با ذخیره‌سازها یا منابع تولید توان مرسوم مورد مطالعه قرار گرفت.

در فصل سوم، مدل‌های پیشنهاددهی استراتژیک مجموعه‌ای از تولیدکنندگان بادی-ذخیره‌ساز در بازارهای پیش‌رو و تعادل فرموله شد.

در فصل چهارم، مدل‌سازی عدم قطعیت‌های قیمت بازار و تولید بادی انجام و روش مناسبی برای در نظر گرفتن همبستگی مکانی بین سناریوهای تولید بادی مزارع ارائه می‌شود. سناریوهای مربوط به قیمت بازار و سناریوهای همبسته مکانی تولید توان‌های بادی مزارع تولید شدند. سپس این سناریوها برای کم کردن زمان محاسبات، کاهش یافتند. اعتبار روش ارائه شده برای در نظر گرفتن همبستگی مکانی تولید بادی ثابت شد.

در فصل پنجم شبیه‌سازی مسئله انجام شده و مقادیر درآمد، جریمه و سود مورد انتظار و واقعی بررسی شد.

۲-۶ نتایج

نتایج اصلی به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- به دلیل حذف یارانه‌های تولیدکنندگان بادی و جریمه آن‌ها در صورت انحراف از برنامه تولید، این نوع تولیدکنندگان باید به صورت استراتژیک در بازارهای برق شرکت کنند. در نتیجه مدل‌سازی عدم قطعیت‌هایی که با آن مواجه هستند و مدل‌سازی مسئله پیشنهاددهی ضروری است.
- ترکیب ذخیره‌سازها با تولیدکنندگان بادی می‌تواند سود را بهبود بخشد. ذخیره‌سازها علاوه بر آنکه می‌توانند در بازار تعادل کمبودهای تولید بادی را جبران کنند بلکه می‌توانند با ذخیره انرژی در قیمت‌های پایین و تخلیه انرژی در قیمت‌های بالا سود را افزایش دهند. در واقع می‌توان گفت که تولیدکنندگان بادی-ذخیره‌ساز بر خلاف تولیدکنندگان بادی صرف، می‌توانند در بازار تعادل نیز پیشنهاددهی استراتژیک داشته باشند.
- بررسی و تحلیل اطلاعات واقعی سرعت و تولید بادی می‌توان دریافت که سرعت و تولید بادی یک مزرعه در هر ساعت به سرعت و تولید بادی در ساعات گذشته وابسته است؛ که به آن همبستگی زمانی می‌گویند. علاوه بر همبستگی زمانی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که سرعت و تولید بادی یک مزرعه با سرعت و تولید بادی مزرعه‌ای نزدیک به آن، در همان ساعت یا با یک اختلاف زمانی، همبسته هستند؛ به این نوع همبستگی، همبستگی مکانی می‌گویند. در شرایطی که چند تولیدکننده بادی-ذخیره‌ساز نزدیک به هم قرار دارند، در نظر گرفتن همبستگی مکانی بین تولید مزارع بادی موضوع مهمی است.
- با استفاده از تولید سناریوی طولانی برای دو مزرعه با اطلاعات واقعی نشان داده شد که روش پیشنهاد شده می‌تواند با دقت خوبی همبستگی را مدل کند.
- با در نظر گرفتن همبستگی مکانی، مقادیر سود مورد انتظار و CVaR افزایش یافته و

- تغییرات آن‌ها نسبت به تغییرات β بیشتر می‌شود.
- با در نظر گرفتن همبستگی مکانی، درآمد مورد انتظار و واقعی بازار پیش‌رو افزایش می‌یابد و حساسیت آن نسبت به تغییرات β نیز بیشتر می‌شود.
 - با در نظر گرفتن همبستگی مکانی، سود مورد انتظار در بازار تعادل افزایش می‌یابد و حساسیت آن نسبت به تغییرات β بیشتر می‌شود.
 - با افزایش ظرفیت ذخیره‌ساز، سود مورد انتظار و CVaR افزایش یافته، اما تغییرات آن‌ها نسبت به تغییرات β کاهش می‌یابد.
 - با افزایش ضریب ریسک‌گریزی (β) سود مورد انتظار و درآمد مورد انتظار بازار پیش‌رو و جریمه مورد انتظار بازار تعادل کاهش یافته، اما درآمد مورد انتظار بازار تعادل افزایش می‌یابد.
 - نتایج واقعی به دست آمده همواره با مقادیر مورد انتظار خود همخوانی ندارند. این موضوع می‌تواند ناشی از خطای پیش‌بینی باشد.

۳-۶ پیشنهادها

- برای پیش‌بینی قیمت بازار پیش‌رو و تعادل به جای مدل ساده آریمای می‌توان از مدل‌های ترکیبی با دقت بالاتر استفاده کرد. از آنجا که قیمت بازار تنها به ساعت‌های گذشته خود وابسته نیست و عوامل مختلفی بر آن تاثیر می‌گذارد می‌توان مدلی ارائه داد که سایر عوامل را نیز در نظر بگیرد. مانند ترکیبی از شبکه عصبی و آریمای.
- در مدل ارائه شده برای پیش‌بینی تولید بادی، در تابع غیرخطی فازی فقط سرعت باد به عنوان ورودی دریافت می‌شود در حالی که تولید توان به زاویه وزش باد، رطوبت و ... نیز وابسته است. از این رو می‌توان مدل فازی را گسترش داد یا از ابزارهای ترکیبی دیگر نیز استفاده کرد.
- در این تحقیق فرض شده است که سرعت باد بازه پیش‌بینی، از سایت‌های هواشناسی به دست می‌آید و به صورت یک پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای است. می‌توان برای سرعت باد آینده نیز سناریو تولید کرد و برای تولید سناریوهای سرعت باد نیز می‌توان از روش ارائه شده که همبستگی را در نظر می‌گیرد، استفاده کرد. در این حالت اثر همبستگی مکانی بیشتر مشخص می‌شود.
- می‌توان به مجموعه تولیدکننده بادی-ذخیره‌ساز، منابع تجدیدپذیر دیگر مانند تولیدکننده‌های خورشیدی افزود. همبستگی بین تولید بادی و خورشیدی نیز می‌تواند جالب توجه باشد. حتی می‌توان این مدل را برای نیروگاه‌های مجازی نیز اجرا کرد و همبستگی بین بارها، و همبستگی بین بارها و تولیدکننده‌های توان را نیز بررسی نمود.
- در این تحقیق فرض شده است که مجموعه تولیدکنندگان بادی-ذخیره‌ساز ظرفیت پایینی دارند و نمی‌توانند بر روی قیمت بازار تاثیر بگذارند. اما می‌توان این مسئله را برای زمانی که ظرفیت تولیدکنندگان بالاست و قدرت بازار دارند نیز بررسی کرد.

- در این تحقیق فرض شده است که مالک همه تولیدکنندگان بادی-ذخیره‌ساز مشترک است، در نتیجه بحث تقسیم سود مطرح نمی‌شود. می‌تواند مسئله نحوه تقسیم عادلانه سود بین تولیدکنندگان نیز به این تحقیق افزوده شود.
- می‌توان مسئله پیشنهاددهی استراتژیک برای مجموعه تولیدکنندگان بادی-ذخیره‌ساز را با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مقاوم و بازه‌ای حل کرده و نتایج به دست آمده را با حل به روش برنامه‌ریزی تصادفی، مقایسه نمود.

مراجع

- [1] M. Rahimiyan, J. M. Morales, and A. J. Conejo, "Evaluating alternative offering strategies for wind producers in a pool," *Applied energy*, vol. 88, pp. 4918-4926, 2011.
- [2] R. T. Rockafellar and S. Uryasev, "Optimization of conditional value-at-risk," *Journal of risk*, vol. 2, pp. 21-42, 2000.
- [3] P. Pinson, C. Chevallier, and G. N. Kariniotakis, "Trading wind generation from short-term probabilistic forecasts of wind power," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 1148-1156, 2007.
- [4] T. Soares, P. Pinson, T. V. Jensen, and H. Morais, "Optimal offering strategies for wind power in energy and primary reserve markets," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, pp. 1036-1045, 2016.
- [5] J. M. Morales, A. J. Conejo, and J. Pérez-Ruiz, "Short-term trading for a wind power producer," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 554-564, 2010.
- [6] J. P. Catalão, H. M. Pousinho, and V. M. Mendes, "Optimal offering strategies for wind power producers considering uncertainty and risk," *IEEE Systems Journal*, vol. 6, pp. 270-277, 2011.
- [7] M. Zugno, J. M. Morales, P. Pinson, and H. Madsen, "Pool strategy of a price-maker wind power producer," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 3440-3450, 2013.
- [8] L. Baringo and A. J. Conejo, "Strategic offering for a wind power producer," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 4645-4654, 2013.
- [9] J. M. Morales, R. Minguez, and A. J. Conejo, "A methodology to generate statistically dependent wind speed scenarios," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 843-855, 2010.
- [10] K. C. Sharma, R. Bhakar, and H. Tiwari, "Strategic bidding for wind power producers in electricity markets," *Energy conversion and management*, vol. 86, pp. 259-267, 2014.
- [11] T. Dai and W. Qiao, "Optimal bidding strategy of a strategic wind power producer in the short-term market," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 707-719, 2015.
- [12] L. Baringo and A. J. Conejo, "Offering strategy of wind-power producer: A multi-stage risk-constrained approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 1420-1429, 2015.
- [13] M. Asensio and J. Contreras, "Risk-constrained optimal bidding strategy for pairing of wind and demand response resources," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, pp. 200-208, 2015.
- [14] E. Heydarian-Forushani, M. P. Moghaddam, M. K. Sheikh-El-Eslami, M. Shafiekhah, and J. P. Catalão, "Risk-constrained offering strategy of wind power producers considering intraday demand response exchange," *IEEE Transactions on sustainable energy*, vol. 5, pp. 1036-1047, 2014.
- [15] R. Laia, H. Pousinho, R. Melíco, and V. M. F. Mendes, "Bidding strategy of wind-thermal energy producers," *Renewable energy*, vol. 99, pp. 673-681, 2016.
- [16] Y. Liu, C. Jiang, J. Shen, and J. Hu, "Coordination of hydro units with wind power generation using interval optimization," *IEEE Transactions on Sustainable*

- Energy*, vol. 6, pp. 443-453, 2015.
- [17] G. Bathurst and G. Strbac, "Value of combining energy storage and wind in short-term energy and balancing markets," *Electric power systems research*, vol. 67, pp. 1-8, 2003.
 - [18] A. A. S. de la Nieta, J. Contreras, and J. P. Catalao, "Optimal single wind hydro-pump storage bidding in day-ahead markets including bilateral contracts," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, pp. 1284-1294, 2016.
 - [19] A. K. Varkani, A. Daraeepour, and H. Monsef, "A new self-scheduling strategy for integrated operation of wind and pumped-storage power plants in power markets," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 5002-5012, 2011.
 - [20] U. Yıldırım and İ. Kayahan, "Risk-averse stochastic model predictive control-based real-time operation method for a wind energy generation system supported by a pumped hydro storage unit," *Applied energy*, vol. 226, pp. 631-643, 2018.
 - [21] H. Ding, Z. Hu, and Y. Song, "Rolling optimization of wind farm and energy storage system in electricity markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, pp. 2676-2684, 2014.
 - [22] M. Rahimiyan and L. Baringo, "Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: A price-taker robust optimization approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 2676-2687, 2015.
 - [23] J. Li, C. Wan, and Z. Xu, "Robust offering strategy for a wind power producer under uncertainties," in *2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2016, pp. 752-757.
 - [24] A. A. Thatte, D. E. Viassolo, and L. Xie, "Robust bidding strategy for wind power plants and energy storage in electricity markets," in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1-7.
 - [25] A. A. Thatte, L. Xie, D. E. Viassolo, and S. Singh, "Risk measure based robust bidding strategy for arbitrage using a wind farm and energy storage," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 2191-2199, 2013.
 - [26] H. Ding, P. Pinson, Z. Hu, and Y. Song, "Integrated bidding and operating strategies for wind-storage systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, pp. 163-172, 2015.
 - [27] H. Ding, P. Pinson, Z. Hu, and Y. Song, "Optimal offering and operating strategies for wind-storage systems with linear decision rules," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 4755-4764, 2016.
 - [28] V. Guerrero-Mestre, A. A. S. de la Nieta, J. Contreras, and J. P. Catalão, "Optimal bidding of a group of wind farms in day-ahead markets through an external agent," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 2688-2700, 2015.
 - [29] E. Baeyens, E. Y. Bitar, P. P. Khargonekar, and K. Poolla, "Coalitional aggregation of wind power," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 3774-3784, 2013.
 - [30] C. W. Potter and M. Negnevitsky, "Very short-term wind forecasting for Tasmanian power generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, pp. 965-972, 2006.
 - [31] Y.-K. Wu and J.-S. Hong, "A literature review of wind forecasting technology in the world," in *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, 2007, pp. 504-509.
 - [32] S. S. Soman, H. Zareipour, O. Malik, and P. Mandal, "A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons," in *North American Power Symposium 2010*, 2010, pp. 1-8.

- [33] I. J. Ramirez-Rosado, L. A. Fernandez-Jimenez, C. Monteiro, J. Sousa, and R. Bessa, "Comparison of two new short-term wind-power forecasting systems," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1848-1854, 2009.
- [34] R. G. Kavasseri and K. Seetharaman, "Day-ahead wind speed forecasting using f-ARIMA models," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1388-1393, 2009.
- [35] C. González-Minguez and F. Muñoz-Gutiérrez, "RETRACTED: Wind prediction using Weather Research Forecasting model (WRF): A case study in Peru," ed: Elsevier, 2014.
- [36] S. Fan, J. R. Liao, R. Yokoyama, L. Chen, and W.-J. Lee, "Forecasting the wind generation using a two-stage network based on meteorological information," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, pp. 474-482, 2009.
- [37] A. Sfetsos, "A novel approach for the forecasting of mean hourly wind speed time series," *Renewable energy*, vol. 27, pp. 163-174, 2002.
- [38] J. Liao, H. Wang, and S. Zhu, "Winters-arma model based on pso and its application to opening price trend in shenzhen stock market," in *International Conference on Information and Business Intelligence*, 2011, pp. 259-267.
- [39] R. Banos, F. Manzano-Agugliaro, F. Montoya, C. Gil, A. Alcayde, and J. Gómez, "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, pp. 1753-1766, 2011.
- [40] K. Methaprayoon, C. Yingvivanapong, W.-J. Lee, and J. R. Liao, "An integration of ANN wind power estimation into unit commitment considering the forecasting uncertainty," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, pp. 1441-1448, 2007.
- [41] T. Barbounis and J. Theocharis, "Locally recurrent neural networks for long-term wind speed and power prediction," *Neurocomputing*, vol. 69, pp. 466-496, 2006.
- [42] G. Sideratos and N. Hatziargyriou, "Using radial basis neural networks to estimate wind power production," in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1-7.
- [43] G. Nason, *Wavelet methods in statistics with R*: Springer Science & Business Media, 2010.
- [44] N. Amjady, F. Keynia, and H. Zareipour, "Wind power prediction by a new forecast engine composed of modified hybrid neural network and enhanced particle swarm optimization," *IEEE transactions on sustainable energy*, vol. 2, pp. 265-276, 2011.
- [45] J. Catalao, H. Pousinho, and V. Mendes, "Hybrid wavelet-PSO-ANFIS approach for short-term wind power forecasting in Portugal," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, pp. 50-59, 2010.
- [46] *Red Eléctrica de España, S.A. Sistema de Información del Operador del Sistema*. Available: <https://www.esios.ree.es/en>
- [47] *SOTAVENTO*. Available: <http://www.sotaventogalicia.com/en/real-time-data/historical>
- [48] *Iowa Environmental Mesonet*. Available: <https://mesonet.agron.iastate.edu/>

Abstract

In this thesis, strategic offering for a cluster of wind-storage systems participating as a single entity in the day-ahead and balancing markets is presented. Uncertainties in the market prices and the wind power production are modeled by scenarios. As empirical studies validate a meaningful positive correlation among wind farms, the spatio-temporal correlation is modeled through the combination of multivariate and autoregressive integrated moving average models. To handle uncertainties, the strategic offering problem is presented as a risk-constrained stochastic programming model. The performance of the proposed model is analyzed using real-world data of wind and market prices in Spain electricity market. The results indicate that with considering correlation, the value of expected profit and its sensitivity relative to the risk aversion variation increase.

Keywords: Strategic offering, wind-storage systems, spatial-temporal correlation, stochastic programming



Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Electrical Power System Engineering

**Strategic Offering for a Wind-Storage System
in Short-term Electricity Markets**

By: Sepehr Dirin

Supervisor:

Dr. Morteza Rahimiyan

September 2019