



دانشکده‌ی مهندسی - گروه برق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد برق قدرت

بررسی تاثیر حضور نیروگاه‌های بادی در مقیاس زیاد

بر انگیزه سرمایه‌گذاری در توسعه تولید

استاد راهنما

دکتر مجید علومی بایگی

محقق

سهراب مختاری

زمستان ۱۳۹۲

چکیده

امروزه نگرانی دولت‌ها برای تأمین انرژی، روند استفاده از انرژی‌های نو به خصوص انرژی بادی را با افزایش بیشتری روبرو کرده است. استفاده از این نوع انرژی با توجه به مزایا و معایب آن نیاز به تحلیل و بررسی دارد. از طرفی کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های مصرف انرژی به عنوان مزیت و از طرفی عدم قطعیت سودآوری ناشی از این انرژی‌ها به عنوان عیب، تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران را با مشکلاتی روبرو کرده است. در این پایان‌نامه با بررسی دو سیستم قدرت که در یکی تمام مصرف توسط نیروگاه‌های حرارتی تأمین شده و در دیگری تولید بادی هم در تأمین بار مصرفی نقش داشته است، مقایسه شده‌اند. در یک بازه ده ساله دو مرتبه اقدام به احداث نیروگاه می‌کنیم. با گذشت پنج سال ابتدایی در شبکه‌ی اول نیروگاه سوخت فسیلی احداث کرده و در شبکه‌ی دوم نیروگاه بادی نصب می‌کنیم. می‌خواهیم در پنج سال دوم در هر دو شبکه یک نیروگاه سوخت فسیلی احداث کنیم. تمامی اطلاعات دو شبکه به جز شرکت هفتم با یکدیگر برابرند. نتایج نشان خواهد داد که سود سالانه‌ی شرکت تولیدی احداث شده در انتهای بازه‌ی ده ساله در شبکه‌ی اول که هیچ‌گونه تولید بادی وجود ندارد، بیشتر است. برای اطمینان از این نتیجه‌گیری فرض خواهیم کرد که پیش‌بینی تولید واحد بادی در سناریوهای مختلف با خطا روبرو است. با اعمال خطای پیش‌بینی تولید واحد بادی مشاهده خواهد شد که باز هم سودآوری این شرکت در شبکه‌ی اول که تولید بادی نداریم بیشتر است. برای بررسی حساسیت سود شرکت احداث شده در انتهای بازه‌ی ده ساله در برابر سرعت وزش باد، توزیع‌های مختلفی از وزش باد را در مسئله وارد خواهیم کرد. نتایج نشان خواهند داد که حساسیت سود این شرکت در برابر تغییر یک متر بر ثانیه‌ای سرعت باد در حدود $1/2$ درصد خواهد بود. در انتها با استفاده از معیار ارزش در معرض خطر مشروط^۱ به بررسی سطوح اطمینان سرمایه‌گذار برای سرمایه‌گذاری در بازار دوم که تحت نفوذ انرژی بادی است، خواهیم پرداخت. مشاهده خواهیم کرد که سرمایه‌گذاری که خواهان سطوح اطمینان ۲۰ درصد به بالا می‌باشد، نسبت به سرمایه‌گذاری در بازاری همراه با عدم قطعیت تولید بدبین خواهد بود.

¹ CVaR (Conditional Value at Risk)

فهرست مطالب

فصل اول: پیشگفتار.....	۱
۱-۱) مقدمه.....	۱
۲-۱) انگیزه تحقیق.....	۲
۳-۱) فرضیات مسئله.....	۳
۴-۱) اهداف پایان نامه.....	۳
۵-۱) ساختار پایان نامه.....	۴
فصل دوم: مفاهیم اساسی و مرور تحقیقات گذشته.....	۵
۱-۲) مقدمه.....	۵
۲-۲) مفاهیم.....	۵
۱-۲-۲) تاریخچه.....	۵
۲-۲-۲) انرژی باد.....	۷
۳-۲-۲) بازار برق و نفوذ انرژی بادی در آن.....	۹
۴-۲-۲) نقطه تعادل.....	۱۲
۱-۴-۲-۲) نقطه تعادل نش.....	۱۲
۲-۴-۲-۲) روش تعادل تابع عرضه.....	۱۲
۳-۲) مروری بر تحقیقات انجام شده.....	۱۴
۱-۳-۲) مروری بر مقالات.....	۱۴
۲-۳-۲) جمع بندی مقالات و نتیجه گیری.....	۲۲
فصل سوم: تئوری‌های مسئله و مدل سازی ریاضی.....	۲۴
۱-۳) مقدمه.....	۲۴
۲-۳) مروری بر روش تحقیق.....	۲۵
۳-۳) فرضیات مدل.....	۲۶
۴-۳) مدل سازی بازار.....	۲۸
۱-۴-۳) مدل سازی بازار بدون در نظر گرفتن نیروگاه بادی.....	۲۸
۲-۴-۳) مدل سازی بازار با در نظر گرفتن نیروگاه بادی.....	۳۰
۵-۳) سیستم مورد مطالعه.....	۳۱
۱-۵-۳) نتایج و تحلیل نقطه تعادل سیستم قدرت اولیه: شبکه شش نیروگاه.....	۳۲
۲-۵-۳) سیستم قدرت شماره ۱: ورود نیروگاه هفتم به شبکه (نیروگاه سوخت فسیلی).....	۳۲

۳۳.....	۳-۵-۳) سیستم قدرت شماره ۲: ورود نیروگاه هفتم به شبکه (نیروگاه بادی)
۳۶.....	۳-۶) جمع‌بندی و تحلیل نتایج
۳۹.....	فصل چهارم: برنامه‌ریزی بلندمدت سرمایه‌گذاری در سیستم قدرت تحت نفوذ گسترده‌ی تولید بادی
۳۹.....	۴-۱) مقدمه
۴۰.....	۴-۲) مراحل انجام تحقیق
۴۰.....	۴-۲-۱) بررسی و تحلیل سودآوری سرمایه‌گذاری در توسعه تولید
۴۰.....	۴-۲-۲) بررسی و تحلیل میزان نفوذ تولید بادی در سیستم قدرت
۴۱.....	۴-۲-۳) بررسی و تحلیل سود بلند مدت
۴۱.....	۴-۲-۴) در نظر گرفتن خطای پیش‌بینی تولید بادی
۴۱.....	۴-۲-۵) تحلیل حساسیت سود شرکت‌های سوخت فسیلی نسبت به سرعت وزش باد
۴۲.....	۴-۲-۶) تحلیل ریسک سرمایه‌گذاری در توسعه تولید در بازار تحت نفوذ گسترده‌ی انرژی باد
۴۲.....	۴-۳) شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه
۴۴.....	۴-۳-۱) محاسبه‌ی نقطه تعادل سیستم شماره ۱ (تمام نیروگاه‌ها فسیلی هستند)
۴۴.....	۴-۳-۲) محاسبه‌ی نقطه تعادل سیستم شماره ۲ (شرکت هفتم نیروگاه بادی است)
۴۷.....	۴-۳-۳) بررسی هزینه تولید نیروگاه هفتم در سیستم قدرت شماره ۱
۴۹.....	۴-۴) تحلیل مقدماتی سودآوری شرکت هشتم در دو سیستم قدرت شماره ۱ و ۲
۴۹.....	۴-۴-۱) مقایسه سودآوری شرکت هشتم در دو سیستم قدرت شماره ۱ و ۲
۵۱.....	۴-۴-۲) بررسی و تحلیل تغییرات ظرفیت نیروگاه بادی بر سودآوری شرکت هشتم در سیستم قدرت شماره ۲
۵۳.....	۴-۵) بررسی سودآوری شرکت هشتم در دید بلندمدت با توجه به تغییرات سالانه بار
۵۴.....	۴-۵-۱) مدل‌سازی بار برای بلندمدت
۵۶.....	۴-۵-۲) نتیجه‌گیری و تحلیل نتایج سود شرکت هشتم در بلند مدت
۵۸.....	۴-۶) تحلیل حساسیت سود شرکت هشتم نسبت به تابع چگالی احتمال سرعت وزش باد
۵۸.....	۴-۶-۱) بررسی رابطه‌ی میان سرعت وزش باد و تولید توان بادی
۵۹.....	۴-۶-۲) شرح عددی مسئله تحلیل حساسیت سود شرکت هشتم نسبت به تغییرات الگوی وزش باد
۶۳.....	۴-۶-۳) نتیجه تحلیل حساسیت تغییرات سرعت وزش باد بر سودآوری شرکت هشتم
۶۶.....	۴-۷) بررسی سرمایه‌گذاری در سیستم شماره ۲ با فرض پیش‌بینی تولید بادی در کوتاه‌مدت
۶۶.....	۴-۷-۱) شرح موضوع
۶۷.....	۴-۷-۲) خطای پیش‌بینی تولید توان بادی
۶۷.....	۴-۷-۲-۱) استفاده از توزیع بتا برای خطای پیش‌بینی تولید توان بادی
۷۱.....	۴-۷-۳) نتیجه‌گیری و تحلیل نتایج بررسی سرمایه‌گذاری با فرض پیش‌بینی توان بادی

۷۳	۸-۴) تحلیل ریسک و بررسی عوامل تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاری در سیستم قدرت تحت نفوذ گسترده تولید بادی.....
۷۳	۸-۴-۱) معرفی ارزش در معرض خطر مشروط (CVaR).....
۷۶	۸-۴-۲) تحلیل ریسک در مسئله سرمایه‌گذاری شرکت هشتم با استفاده از معیار ارزش در معرض خطر مشروط.....
۷۹	۸-۴-۳) بررسی انگیزه سرمایه‌گذاری در شبکه‌ی قدرت تحت نفوذ گسترده‌ی انرژی باد.....
۸۲	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۸۲	۵-۱) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۸۴	۵-۲) پیشنهادات.....
۸۵	پیوست.....
۸۵	الف) پیوست الف.....
۹۶	ب) پیوست ب.....
۹۷	ج) پیوست ج.....
۱۰۱	د) پیوست د.....
۱۰۸	ه) پیوست ه.....
۱۰۹	مراجع.....

پیشگفتار

۱-۱) مقدمه

در طی سالیان گذشته نیاز انرژی جهان به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. این روند رو به رشد مطرح‌کننده این سوال بوده است که آیا منابع انرژی‌های فسیلی در قرون آینده، جوابگوی نیاز انرژی جهان برای بقا، تکامل و توسعه خواهند بود یا خیر؟

حداقل به دو دلیل پاسخ این سوال منفی است و بشر می‌بایست به دنبال منابع انرژی جایگزین بگردد. محدودیت و مرغوبیت سوخت فسیلی باعث می‌شود که کاربرد بهتری از احتراق برای تولید انرژی داشته باشند و از طرف دیگر مسائل زیست‌محیطی و حفظ سلامت جو زمین که از مهم‌ترین پیش‌شرط‌های توسعه اقتصادی به شمار می‌آید، دلایل عمده جایگزین کردن سوخت فسیلی با انرژی‌های جایگزین به شمار می‌آیند. از این رو است که سال‌های آتی به عنوان سال‌های تلاش جامعه انسانی برای کنترل انتشار کربن، کنترل محیط‌زیست و در واقع تلاش برای تداوم انسان بر روی کره زمین خواهد بود [۱].

تولید برق نیز به دلیل نیاز به انرژی از این مسئله مستثنی نیست. لذا سیاست‌گذاران صنعت برق به دنبال یافتن منابع جدید تولید نیرو می‌باشند. انرژی‌های نو و تجدیدپذیر از قبیل انرژی باد، انرژی امواج، انرژی زمین‌گرمایی، انرژی خورشیدی و سایر منابع تجدیدپذیر انرژی جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی به حساب می‌آیند. انرژی باد به دلیل دسترسی آسان و ارزان بودن بسیار مورد توجه سیاست‌گذاران توسعه شبکه قدرت بوده است.

نیروگاه‌های بادی با روند رو به رشدی در حال جایگزین شدن با نیروگاه‌های سوخت فسیلی می‌باشد. به همین دلیل برنامه‌ریزان شبکه قدرت و توسعه‌دهندگان تولید به بررسی دقیق‌تر و جامع‌تر نفوذ این نوع از انرژی در شبکه تولید پرداختند. باد به دلیل ماهیت تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی، همواره باعث ایجاد عدم قطعیت در تولید می‌گردد. وجود عدم قطعیت در تولید بروز مشکلاتی در برنامه‌ریزی‌های کوتاه مدت و بلندمدت سیستم قدرت شده است. این عدم قطعیت می‌تواند انگیزه‌ی سرمایه‌گذاران در توسعه سیستم قدرت را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پایان‌نامه تأثیر نفوذ گسترده‌ی انرژی بادی به انگیزه‌ی سرمایه‌گذاری در توسعه تولید مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱-۲) انگیزه تحقیق

در سال‌های اخیر با تجدید ساختار و مقررات‌زایی در سیستم‌های قدرت گرایش به خصوصی‌سازی و کاهش مسئولیت‌های بهره‌بردار مستقل شبکه، بسیاری از مسئولیت‌های موجود در سیستم قدرت از جمله سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی تولید از عهده‌ی نهادهای دولتی خارج شده و به بخش خصوصی واگذار می‌شود. در این میان توابع هدف مربوط به سرمایه‌گذاری به مرور زمان از حداقل کردن هزینه، به حداکثر کردن سود تبدیل گردیده است.

بدلیل پرهزینه بودن سرمایه‌گذاری تولید، سرمایه‌گذاران در درجه‌ی اول نیازمند انگیزه‌های مالی مناسب برای سرمایه‌گذاری می‌باشند. در مورد یک پروژه‌ی خاص باید ارزیابی‌های اقتصادی بلند مدتی همچون اطمینان از جبران کامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و برآورد منافع تجاری بلند مدت بطور کامل و در فضای واقعی شبکه، صورت گیرد. به خصوص، اگر نوع سرمایه‌گذاری بنا به دلایلی با عدم قطعیت و ریسک همراه باشد. در سال‌های اخیر سرمایه‌گذاری در انرژی‌های نو با روند رو به رشدی همراه بوده است. عدم قطعیت ناشی از انرژی بادی ممکن است برای سرمایه‌گذاران خصوصی جذابیت زیادی نداشته است. دولت‌ها با ایجاد تسهیلات لازم و بوجود آوردن انگیزه‌ی سرمایه‌گذاران خصوصی برای سرمایه‌گذاری در توسعه تولید را کاهش می‌دهد. در این تحقیق سعی بر آن است تا به بررسی انگیزه‌های سرمایه‌گذاری در توسعه تولید در حضور عدم قطعیت‌های ناشی از نیروگاه‌های بادی در مقیاس بزرگ بپردازیم.

در این پروژه سعی بر این است تا دریابیم عدم قطعیت در انرژی‌های نو تا چه اندازه بر انگیزه سرمایه‌گذاران تأثیر دارد. آیا تولید بیش از حد انرژی بادی باعث کاهش انگیزه سرمایه‌گذاری در سیستم قدرت می‌گردد؟ نفوذ نیروگاه‌های بادی در شبکه تولید تا چه حد باشد تا انگیزه کافی برای سرمایه‌گذاری همچنان وجود داشته باشد؟

۱-۳) فرضیات مسئله

شبکه‌ای شامل نیروگاه‌های سوخت فسیلی، مزارع بادی و مصرف کنندگان در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود سیستم به صورت تجدید ساختار یافته اداره شود و شرکت‌های تولیدی برای شرکت در بازار، پیشنهاد قیمت

می‌دهند. این قیمت پیشنهادی به صورت یک تابع عرضه به بهره‌بردار می‌باشد و این تابع عرضه دارای شیب ثابت و برابر با شیب هزینه حدی واحد می‌باشد. تولیدکنندگان تنها با تغییر عرض از مبدأ تابع عرضه پیشنهادی به دنبال افزایش سود خود هستند. از محدودیت‌های مربوط به خطوط انتقال، تلفات و پایداری صرف‌نظر شده است و تلاش بر این بوده است به جای پیچیده کردن مسئله، جوابی تحلیلی ارائه شود.

- بازار برق به صورت حوضچه توان^۱ می‌باشد.
- قیمت‌گذاری انرژی در این بازار به صورت یکنواخت^۲ می‌باشد.
- سرمایه‌گذاری در تولید توسط بخش خصوصی انجام می‌شود.
- بهره‌بردار، طرح‌های مناسب سرمایه‌گذاری را مشخص می‌کند، سپس سرمایه‌گذاران می‌توانند از میان این طرح‌ها، طرح مورد نظر خود را انتخاب نمایند.

۴-۱) تعریف مسئله

دو شبکه یکسان با فرضیات فوق در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که یکی توسط نیروگاه‌های فسیلی بار خود را تأمین می‌کند و در دیگری نفوذ گسترده‌ی نیروگاه‌های بادی وجود دارد. فرض شود یک سرمایه‌گذار قصد سرمایه‌گذاری در یکی از این دو سیستم را دارد. مسئله این تحقیق تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاری در توسعه تولید در یکی از این دو سیستم از دیدگاه سرمایه‌گذار می‌باشد.

هدف اصلی این مطالعه، تعیین تاثیر عدم قطعیت ناشی از حضور نیروگاه‌های بادی بر تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران در توسعه تولید می‌باشد. به طور مشخص در این پایان‌نامه اهداف زیر دنبال می‌گردد:

- پاسخ به این سوال که آیا تولید بیش از حد توان بادی منجر به کاهش انگیزه سرمایه‌گذاری در توسعه تولید می‌گردد یا خیر؟
- در صورت مثبت بودن پاسخ این سوال، حداکثر مقدار تولید توان بادی در یک شبکه قدرت چقدر باید باشد تا انگیزه‌ی کافی برای سرمایه‌گذاران جهت توسعه تولید وجود داشته باشد.

۵-۱) ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم این پایان‌نامه، اطلاعات اولیه لازم برای بررسی نیروگاه‌های بادی و نحوه‌ی تعامل آن در بازار برق بررسی می‌شود. تعدادی از مقالات مربوط با بحث مورد مطالعه نیز به طور خلاصه شده مرور می‌گردد. در این فصل هدف اصلی آشنایی بیشتر با نیروگاه‌های بادی و روند تعامل آن در سال‌های اخیر در بازار برق می‌باشد.

¹ Pool co

² Uniform

در فصل بازار برق به صورت یک بازار چند انحصاری مدل سازی و نتایج شبیه سازی بررسی می شود. هدف از ارائه این فصل ایجاد زیرساخت های لازم برای بررسی و پیاده سازی مسئله اصلی این پایان نامه می باشد.

در فصل چهارم، به بررسی تأثیر نفوذ گسترده ی نیروگاه های بادی بر انگیزه ی سرمایه گذاران در توسعه تولید پرداخته می شود. مدل سازی و شبیه سازی بازار مورد نظر، تحلیل حساسیت مسئله و یافتن پاسخ سوالات مطرح شده در این پایان نامه از موارد مورد مطالعه در این فصل می باشد.

مفاهیم اساسی و مرور تحقیقات گذشته

۱-۲) مقدمه

در این فصل ابتدا تاریخچه انرژی‌های نو و به طور خاص انرژی بادی را مورد مطالعه قرار داده و به بررسی روند طی شده توسط انرژی بادی در صنعت تولید برق، نحوه تعامل این نوع از انرژی در بازارهای برق و معایب و مزایای استفاده از آن در تولید توان الکتریکی پرداخته می‌شود. سپس، تعدادی از مقالات که در این زمینه بحث نموده‌اند، بررسی می‌گردند. این مقالات به طور عمده، در زمینه نحوه تعامل سرمایه‌گذاران با ریسک موجود در مسئله، چگونگی تصمیم‌گیری برای اجرای سرمایه‌گذاری و راه‌های مقابله با ریسک و عدم قطعیت می‌باشد.

۲-۲) مفاهیم

۱-۲-۲) تاریخچه

بالغ بر ۵۵۰۰ سال پیش انرژی باد برای تامین نیازهای بشر استفاده می‌شده است. اولین بار از انرژی باد برای تامین انرژی رانش کشتی‌ها بهره گرفته شد. در قرن هفده میلادی اولین توربین‌های بادی بر روی آسیاب‌های بادی نصب شد. استفاده از باد برای تولید انرژی الکتریکی از قرن نوزدهم آغاز شد. در نیمه اول قرن بیست میلادی، توربین‌های بادی مقیاس کوچک وظیفه تامین روشنایی روستاهای دور افتاده را بر عهده داشتند. سپس واحدهای بزرگتری برای ورود به شبکه تولید انرژی الکتریکی طراحی گردید که واحد ۱/۲۵ مگاواتی نصب شده

در Vermont در سال ۱۹۴۱ از این جمله است. صنعت تولید توان بادی به صورت کنونی در سال ۱۹۷۹ میلادی از دانمارک آغاز به کار کرد. ظرفیت توربین‌های بادی اولیه ساخته شده توسط شرکت‌های دانمارکی در مقایسه با امروز ناچیز بوده است و هر توربین بادی تنها قادر به تولید ۲۰ تا ۳۰ کیلو وات توان بودند. از آن پس، کشورهای مختلف با ساخت توربین‌های بادی ظرفیت بالاتر، میزان تولید توان بادی را افزایش داده و تا کنون نیروگاه‌های بادی بزرگی طراحی و ساخته شده‌اند [۲].

طبق آمارهای به ثبت رسیده طی ۳۰ سال گذشته نیاز انرژی جهان به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. در سال ۱۹۶۰ مصرف انرژی جهان معادل $3/3 \text{ Gtoe}^1$ بوده است. در سال ۱۹۹۰ این رقم به $8/8 \text{ Gtoe}$ بالغ گردید که دارای رشد متوسط سالانه $3/3\%$ می‌باشد و در مجموع 166% افزایش را از خود نشان می‌دهد. در حال حاضر مصرف انرژی جهان 10 Gtoe/Year بوده و پیش‌بینی می‌شود این رقم در سال ۲۰۲۰ به 14 Gtoe/Year افزایش یابد. این ارقام نشان می‌دهند که میزان مصرف انرژی جهان در قرن آینده بالا می‌باشد و در نتیجه این سوال مهم مطرح می‌گردد که آیا منابع انرژی‌های فسیلی در قرن‌های آینده، جوابگوی نیاز انرژی جهان برای بقا، تکامل و توسعه خواهند بود یا خیر؟

حداقل به دو دلیل عمده محدودیت و در عین حال مرغوبیت انرژی‌های فسیلی پاسخ این سوال منفی است و باید منابع جدید انرژی را جایگزین این منابع نمود. از این رو است که سال‌های آتی به عنوان سال‌های تلاش جامعه انسانی برای کنترل انتشار کربن، کنترل محیط زیست و در واقع تلاش برای تداوم انسان بر روی کره زمین خواهد بود.

استفاده از منابع جدید انرژی به جای منابع فسیلی امری الزامی است. سیستم‌های جدید انرژی در آینده باید متکی به تغییرات ساختاری و بنیادی باشند که در آن منابع انرژی بدون کربن نظیر انرژی خورشیدی و بادی و زمین گرمایی و ... مورد استفاده قرار گیرند. بدون تردید انرژی‌های تجدیدپذیر از یک طرف با توجه به سادگی فناوری‌شان در مقابل فناوری انرژی هسته‌ای و از طرف دیگر به دلیل عدم ایجاد مشکلاتی نظیر زباله‌های اتمی نقش مهمی در سیستم‌های جدید انرژی در جهان ایفا می‌کنند. در هر حال باید اذعان داشت که در عمل عوامل متعددی به ویژه هزینه اولیه و قیمت تمام شده بالا، عدم سرمایه‌گذاری کافی برای بومی نمودن و بهبود کارایی تکنولوژی‌های مربوطه، به حساب نیامدن هزینه‌های خارجی در معادلات اقتصادی، نبود سیاست‌های حمایتی در سطح جهانی، منطقه‌ای و محلی، نفوذ و توسعه انرژی‌های نو را بسیار کند و محدود ساخته است. ولی پژوهشگران و صنعتگران همواره تلاش خود را جهت رفع این مشکلات مبذول می‌دارند.

بطور کلی عمده فعالیت‌های مربوط به احداث سیستم‌های سازگار با محیط زیست با بکار بردن منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و اجرای پروژه‌های مهندسی و انجام خدمات مشاوره‌ای و مدیریت بر طرح‌ها، در چهار بخش زیر متمرکز شده است [۳]:

¹ Giga tone of oil equivalent

- انرژی‌های خورشیدی
- انرژی باد و امواج
- انرژی زمین گرمایی
- فناوری هیدروژن، پیل سوختی و زیست توده

انرژی باد به عنوان پرکاربردترین انرژی تجدیدپذیر در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. بزرگترین توربین ساخته شده از لحاظ ظرفیت تولید، دارای ۷ مگاوات ظرفیت تولید می‌باشد. طول هر یک از پره‌های یک توربین ۷ مگاواتی در حدود ۸۰ متر است [۴]. همچنین، با پیشرفت سریع تکنولوژی در سال‌های اخیر، هزینه ساخت توربین‌های بادی کاهش چشمگیری داشته است، به گونه‌ای که هزینه ساخت توربین بادی در بیست سال گذشته ۸۰ درصد کم‌تر شده است [۵].

۲-۲-۲) انرژی باد

در انتهای سال ۲۰۱۰، میزان ظرفیت نامی تولید برق بادی در سراسر جهان برابر ۱۹۷ گیگاوات بود. امروزه توان بادی در دنیا ظرفیت تولید سالانه ۴۳۰ تراوات ساعت انرژی الکتریکی را دارد که این میزان، ۲/۵٪ مصرف برق دنیاست [۶]. در ۵ سال گذشته، رشد متوسط سالانه در توان بادی دنیا ۲۷/۶٪ بوده و انتظار می‌رود که سهم باد در تولید انرژی الکتریکی دنیا تا سال ۲۰۱۳ به ۳/۳۵٪ و تا سال ۲۰۱۸ به ۸٪ برسد [۷]. اما از جمله دلایل تمایل کشورها برای افزایش ظرفیت تولید برق بادی مزایای بسیار زیاد این روش تولید انرژی الکتریکی است. انرژی بادی فراوان، تجدیدپذیر و پاک است، در همه جای دنیا وجود دارد و همچنین در مقایسه با استفاده از انرژی سوخت‌های فسیلی میزان ناچیزی گاز گلخانه‌ای منتشر می‌کند.



شکل ۱-۱: توربین بادی نصب شده در داخل دریا

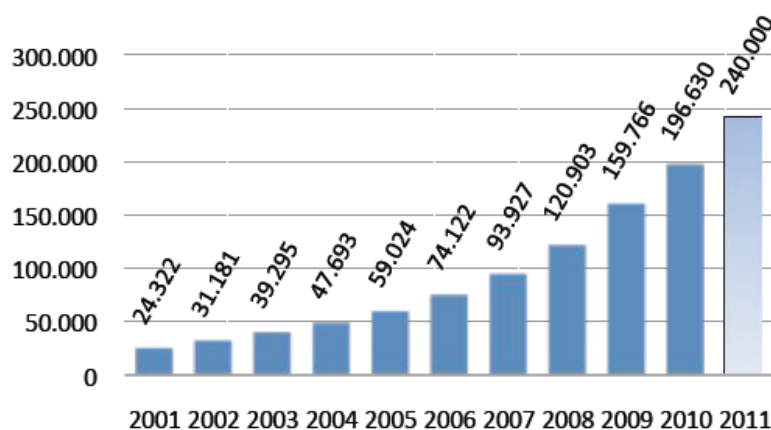
کشور ایران از لحاظ منابع مختلف انرژی یکی از غنی‌ترین کشورهای جهان محسوب می‌گردد، چرا که از یک سو دارای منابع گسترده سوخت‌های فسیلی و تجدیدناپذیر نظیر نفت و گاز است و از سوی دیگر دارای پتانسیل فراوان انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله باد می‌باشد.

با توسعه نگرش‌های زیست‌محیطی و راهبردهای صرفه‌جویانه در بهره‌برداری از منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر، استفاده از انرژی باد در مقایسه با سایر منابع انرژی مطرح در بسیاری از کشورهای جهان رو به فزونی گذاشته است. استفاده از تکنولوژی توربین‌های بادی به دلایل زیر می‌تواند یک انتخاب مناسب در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر باشد:

- قیمت پایین توربین‌های برق بادی در مقایسه با دیگر صور انرژی‌های نو
- کمک در جهت ایجاد اشتغال در کشور
- عدم آلودگی محیط زیست

در کشورهای پیشرفته نظیر آلمان، دانمارک، آمریکا، اسپانیا، انگلستان و ... توربین‌های بادی بزرگ و کوچک ساخته شده است و برنامه‌هایی نیز جهت ادامه پژوهش‌ها و استفاده بیشتر از انرژی باد جهت تولید برق در واحدهایی با توان چندمگاواتی مورد مطالعه می‌باشد.

مولدهای برق بادی می‌تواند جایگزین مناسبی برای نیروگاه‌های گازی و بخاری باشند. مطالعات و محاسبات انجام شده در زمینه تخمین پتانسیل انرژی باد در ایران نشان داده‌اند - استفاده فنی از انرژی باد وقتی ممکن است که متوسط سرعت باد در محدوده ۵ الی ۲۵ کیلومتر بر ثانیه باشد- که تنها در ۲۶ منطقه از کشور (شامل بیش از ۴۵ سایت مناسب) میزان ظرفیت اسمی سایت‌ها، با در نظر گرفتن یک راندمان کلی ۳۳٪، در حدود ۶۵۰۰ مگاوات می‌باشد. این در شرایطی است که ظرفیت اسمی کل نیروگاه‌های برق کشور، (در سال ۱۳۸۹) ۶۱۲۰۳ مگاوات بوده است [۹].



شکل ۱-۲- نمودار میزان و پیش‌بینی استفاده از برق بادی در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ [۳]

جدول (۱-۱) میزان ظرفیت تولید توان بادی را در سال ۲۰۱۰ در کشورهای پیش‌تاز این عرصه نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱: ظرفیت تولید توان بادی در کشورهای دنیا [۶]

کشور	ظرفیت نصب شده (مگاوات)
چین	۴۲۲۸۷
آمریکا	۴۰۱۸۰
آلمان	۲۷۲۱۴
اسپانیا	۲۰۶۷۶
هند	۱۳۰۶۵
ایتالیا	۵۷۹۷
فرانسه	۵۶۶۰
انگلیس	۵۲۰۴
کانادا	۴۰۰۹
دانمارک	۳۷۵۲

در سال ۲۰۱۱، ۸۳ کشور در دنیا از توان بادی برای تولید برق استفاده کرده‌اند [۸].

۲-۲-۳) بازار برق و نفوذ انرژی بادی در آن

از اواخر دهه ۸۰ میلادی، رقابت در بازار برق برای بسیاری از کشورها معنا پیدا کرد و باعث تغییر ساختار سنتی آن گردید. این بخش عموماً توسط شرکت‌هایی که در تمام مراحل تولید تا توزیع بین مصرف‌کنندگان و انتقال آن درگیر بودند، شکل می‌گرفت. این قبیل ساختارها با توجه به ماهیت برق که می‌بایست از راه طبیعی خود به سودمندی برسد، تصدیق می‌گردیدند. برنامه‌ریزی در توسعه در نوع متمرکز شده بسیار پیشرفت داشته و تصمیم‌گیری در زمینه تولید هرگز بدون در نظر گرفتن برنامه‌ریزی انتقال و تجدیدساختار امکان‌پذیر نبوده است.

آزادسازی و خصوصی سازی در صنعت برق منجر به رقابت شدیدی در میان شرکت ها شد. در همین زمان، شرکت ها بیشتر از هرزمانی ریسک و عدم قطعیت ها را از خود به نمایش گذاشتند. جهت مدل کردن این عدم قطعیت اندازه گیری های احتمالی از قبیل توابع چگالی احتمالی می توانند به کار روند. متغیرهای توابع چگالی احتمال می توانند از طریق داده های گذشته یا پیش بینی توسعه آینده به دست آیند. برای عدم قطعیتی که در برنامه ریزی توسعه تولید نمایان می شود، قیمت بازار برق و سرعت باد از متغیرهای مهم به حساب می آیند.

کشورهای زیادی روند ایجاد تعرفه تغذیه^۱ را به عنوان طرح تشویقی برای مزارع بادی در نظر گرفتند تا این سیاست باعث توجیه ظهور انرژی باد گردد. در حال حاضر، این یارانه ها به میزان قابل توجهی از هزینه های مصرف کننده نهایی تخصیص داده می شود، بنابراین ظرفیت تولید بادی رشد مناسبی از خود نشان داده است. یکی از روش های مناسب برای بهبود بخشیدن ظرفیت بادی بیش از سایر تولیدات مانند گرمایی و آبی، پاداش دادن به تولیدکنندگان بادی در بازار برق می باشد. این روند در بازار اسپانیا به کار می رود [۱۰].

امروزه اکثر انرژی الکتریکی توسط سوزاندن حجم زیادی از سوخت های فسیلی بدست می آید که نتیجه آن انتشار گازهای گلخانه ای، باران های اسیدی، تغییرات آب و هوا، آلودگی شهری و ... خواهد بود. برای مقابله با این مشکلات، انرژی های تجدیدپذیر بخصوص انرژی باد مناسب ترین راه حل می باشد. انرژی باد یک منبع فراوان، تمیز، پرتوان، متناوب برای تولید برق می باشد. این نوع انرژی دارای هزینه سرمایه گذاری بالا اما هزینه بهره برداری پایینی می باشد. توربین های بادی بسیار به صرفه تر بوده و قیمت آنها به سرعت در حال کاهش می باشد. بنابراین انرژی بادی فواید بسیاری را دارا می باشد، اما از طرف دیگر برای رقابت با بازار تولید انرژی سنتی در صنعت تغییر ساختار یافته کنونی با مشکلاتی نیز مواجه خواهد بود. نوع و دشواری این موانع به تصمیم نهایی و اجرای سیاست های عمومی و اصلاحات تنظیم کننده که برای این صنعت نوظهور تولید انرژی در نظر گرفته می شود، بستگی دارد.

انرژی بادی تنها در صورتی توان رقابت با بازار سنتی تولید انرژی را دارا است که اثرات جانبی محیطی آن مد نظر قرار بگیرد. به عنوان مثال، توسعه انرژی بادی در سال های اخیر در اروپا به سرعت در حال رشد بوده و این تنها به دلیل سیاست های پایدار و حفاظت قیمت ها -مانند سهمیه بندی ها و تنظیم مقررات دسترسی- بوده است.

نفوذ سریع انرژی بادی و تولید حجم زیادی از توان بادی در سیستم قدرت، باعث بروز دشواری های بهره برداری و برنامه ریزی شده است. به دلیل تناوب و غیرقابل پیش بینی بودن، انرژی بادی به عنوان یک منبع تولید انرژی غیرقابل اطمینان مطرح شده است، که باعث کاهش تمایل شرکت های انتقال نیرو برای پذیرش آن می شود. بنابراین مقررات تنظیم قیمت موثرتری برای انرژی بادی می بایست مدنظر قرار گیرد تا نوسانات و عدم قطعیت های موجود را پوشش دهد [۱۱].

¹ Feed in tariffs

هدف اصلی از بکارگیری انرژی بادی، توسعه پایدار فناوری‌های نوین برای برطرف کردن معضلات ناشی از استفاده سوخت‌های فسیلی جهت تولید توان می‌باشد که منجر به گرمای جهانی زمین، عدم قطعیت‌های سیاسی، نوسانات بازار و ... می‌گردد. رفتار عمومی باد نیز به دلیل ماهیت اتفاقی بودنش غیر قابل پیش‌بینی است. به خصوص، سرعت باد به شدت تابعی از شرایط جوی، منطقه جغرافیایی، فصل و ... است. یک مزرعه بادی، جهت مهار باد برای تولید توان، خروجی بسیار متغیری به دلیل تغییرات در سرعت باد دارا خواهد بود. تا زمانی که دولت‌ها به دنبال منابع انرژی پایدار و مطمئن هستند، قابلیت اطمینان توان تولیدی توسط باد به شدت نیازمند تسهیلاتی است، که بخاطر نفوذ خود در بازار برق، به آن تعلق می‌گیرد.

انرژی تولیدی توسط باد بنا به دلیل ماهیت اتفاقی سرعت باد، یک متغیر تصادفی به حساب می‌آید. بسیاری از مدل‌های احتمالی جهت ارزیابی و پیش‌بینی قابلیت اطمینان عملکرد نیروگاه‌های بادی که دارای سرعت باد اتفاقی، تقاضای توان غیر مطمئن، تعمیرات مخاطره‌انگیز (به خصوص برای نیروگاه‌های داخل دریا) و ... می‌باشند، به کار رفته است. هدف اصلی این تحقیقات کاهش عدم قطعیت در تولید توان بادی با در نظر گرفتن تمامی سناریوهای ریسک محتمل در فرآیند تولید می‌باشد [۱۲].

در سال‌های اخیر با تجدید ساختار و مقررات‌زدایی در سیستم‌های قدرت گرایش به خصوصی‌سازی و کاهش مسئولیت‌های بهره‌بردار مستقل شبکه (به عنوان نهاد تنظیمی و قانون‌گذار)، بسیاری از مسئولیت‌های موجود در سیستم قدرت از جمله سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی تولید از عهده‌ی نهادهای دولتی خارج شده و به بخش خصوصی واگذار می‌شود. در این میان توابع هدف مربوط به سرمایه‌گذاری به مرور زمان از حداقل کردن هزینه، به حداکثر کردن سود تبدیل گردیده است.

بدلیل پرهزینه بودن سرمایه‌گذاری تولید، سرمایه‌گذاران در درجه‌ی اول نیازمند انگیزه‌های مالی مناسب برای سرمایه‌گذاری می‌باشند. در مورد یک پروژه‌ی خاص باید ارزیابی‌های اقتصادی بلند مدتی همچون اطمینان از جبران کامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و برآورد منافع تجاری بلند مدت، بطور کامل و در فضای واقعی شبکه، صورت گیرد. به خصوص، اگر نوع سرمایه‌گذاری بنا به دلایلی با عدم قطعیت و ریسک همراه باشد. در سال‌های اخیر با توجه به مواردی که در بخش‌های گذشته ذکر شد، سرمایه‌گذاری در انرژی باد با روند رو به رشدی همراه بوده است. اما این نوع سرمایه‌گذاری به دلیل همراه بودن با ریسک و عدم قطعیت‌ها برای سرمایه‌گذاران خصوصی جذابیت زیادی نداشته است. دولت‌ها با ایجاد تسهیلاتی جهت ایجاد انگیزه برای سرمایه‌گذاران خصوصی برای سرمایه‌گذاری در انرژی باد به رشد این روند کمک می‌کنند. انرژی باد یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر موجود است که سرمایه‌گذاران دید خاصی نسبت به آن داشته‌اند.

سرمایه‌گذاری در چنین محیط غیر مطمئنی نیازمند بررسی‌های دقیق و کاملی می‌باشد. ریسک، مهم‌ترین عامل تاثیرگذار در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران است. بدیهی است برای مهار و کاهش هر چه بیشتر ریسک سرمایه‌گذاری در محیط‌های دارای عدم قطعیت، می‌بایست راهکارهای مناسبی نیز ارائه گردند.

در این پایان‌نامه برای بررسی انگیزه‌ی سرمایه‌گذاری در بازاری تحت نفوذ گسترده‌ی انرژی باد، نیاز است تا با مفاهیم عمومی یک سیستم قدرت که در ادامه به آن‌ها سر و کار خواهیم داشت، بپردازیم. در ادامه به توضیح این مفاهیم پرداخته خواهد شد.

۴-۲-۲) نقطه‌ی تعادل

در هر بازاری که شرکت‌کنندگان در حال رقابت با یکدیگر باشند، بازار نیازمند رسیدن به تعادلی است که تمامی شرکت‌کنندگان در آن نقطه در بهترین حالت ممکن خود باشند. برای به دست آوردن نقطه تعادل در یک بازار با رقابت کامل نیازمند شبیه‌سازی بازار و شرکت‌کنندگان آن و استفاده از یک مدل مناسب برای بهینه‌سازی مسئله هستیم. در ادامه به معرفی نقطه تعادل نش می‌پردازیم.

۱-۴-۲-۲) نقطه‌ی تعادل نش

نقطه‌ی تعادل نش^۱، مفهومی اساسی در تئوری بازی‌ها و رایج‌ترین روش برای پیش‌بینی خروجی یک فعل و انفعال راهبردی می‌باشد. هر بازی از سه بخش اصلی تشکیل شده است: مجموعه‌ی بازیگران، مجموعه‌ای از فعالیت‌ها و تابع سود هر بازیگر. تابع سود نشان‌دهنده‌ی اولویت‌های هر بازیگر در برابر مجموعه‌ی فعالیت‌های گوناگون قابل اجرا در بازی می‌باشد. نقطه‌ی تعادل نش به وضعیتی در بازی گفته می‌شود که هیچ یک از بازیگران بازار، قادر نیست با تغییر رفتار خود به صورت یکجانبه به سود بیشتری دست یابد. به عبارتی در صورت تغییر رفتار هر یک از بازیگران در هر جهتی، نتیجه حاصله از آن به صورت کاهش در میزان سود خواهد بود [۱۳].

۲-۴-۲-۲) روش تعادل تابع عرضه^۲

در یک بازار رقابتی، بازیگران برای رسیدن به بیشترین سود ممکن، نیازمند مدل کردن بازار به صورت روابط ریاضی و استفاده از یک روش مناسب برای محاسبه نقطه تعادل بازار می‌باشند. روش‌های گوناگونی بدین منظور مطرح شده است، برترند^۳، کورنات^۴ و تابع عرضه از روش‌های مرسوم برای به دست آوردن نقطه تعادل بازار می‌باشد. این روش‌ها دارای ویژگی‌های خاص خود می‌باشند. به عنوان مثال، در روش کورنات بیشتر به جزئیات

^۱ Nash Equilibrium

^۲ Supply Function Equilibrium

^۳ Bertrand

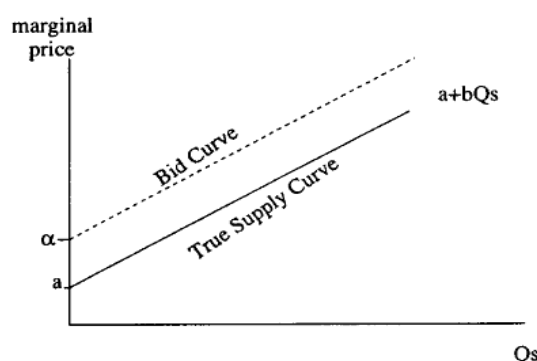
^۴ Cournot

مسئله توجه می‌شود و به همین دلیل برای مدل‌سازی‌های کوتاه‌مدت مناسب‌تر است، در حالی که در روش تابع عرضه جزئیات دارای اهمیت کمتری بوده و از این روش برای دیدگاه‌های بلندمدت بهره گرفته می‌شود.

در این پایان‌نامه برای مدل نمودن بازار و محاسبه نقطه تعادل به دلیل ویژگی‌های روش تابع عرضه، از این روش استفاده شده است. روش تابع عرضه به این خاطر که توجه کمتری به جزئیات دارد و حساس نبودن آن به خطاهای کالیبراسیون، دید واقعی‌تری از بازار برق را ارائه می‌دهد.

در روش تعادل تابع عرضه، توابع تقاضا، هزینه و عرضه می‌بایست به طور روشن مشخص گردند. هزینه حاشیه‌ای را تابعی از تولید در نظر می‌گیریم. در این مورد فرم‌های ممکن بسیاری موجود است. معمول‌ترین حالت یک تابع معین با عرض از مبدأ صفر است و یا به طور معادل تمامی توابع هزینه یک عرض از مبدأ غیر صفر معادل دارند. با استفاده از این ادبیات، می‌توانیم به هزینه‌های حاشیه‌ای رجوع کنیم که به صورت معین با عرض از مبدأ صفر، تحت عنوان هزینه‌های حاشیه‌ای "خطی" مشخص می‌شوند.

عرضه را به صورت تابعی از قیمت در نظر می‌گیریم. در این مورد نیز مدل‌های زیادی موجود است. در کاربردهای معمولی، تابع عرضه به صورت تابع هزینه حاشیه‌ای (معکوس) فرض می‌شود. در صورتی که توابع هزینه متقارن باشند، آنگاه تعادل توابع عرضه به صورت متقارن در خواهد آمد [۱۴].



شکل ۱-۲. منحنی هزینه‌ی حدی (تابع عرضه‌ی حقیقی) مشخص شده با خط مستقیم و منحنی پیشنهادی (تابع عرضه پیشنهادی) مشخص شده با خط هاشور خورده [۱۵].

در صورتی که هزینه‌ی تولید توان الکتریکی Q_s توسط تولیدکننده α به صورت $C(Q_{si}) = a_i Q_{si} + \frac{1}{2} b_i Q_{si}^2$ در نظر گرفته شود. هزینه‌ی حدی این تولیدکننده به صورت $IC(Q_{si}) = a_i + b_i Q_{si}$ خواهد بود. IC همان قیمت بازار است.

شرکت‌های موجود در بازار با تغییر دادن ضرایب a و b به گونه‌ای تلاش در بیشینه کردن سود حاصله در بازار دارند. بنابراین هر شرکت تابعی تحت عنوان تابع عرضه که به صورت $IC_{bid}(Q_{si}) = \alpha_i + \beta_i Q_{si}$ می‌باشد، به اپراتور بازار ارائه می‌دهد. در این پایان‌نامه، از روش تعادل تابع عرضه برای بیشینه کردن سود هر شرکت استفاده

شده است. بدین معنی که شرکت‌ها تنها با تغییر عرض از مبدأ تابع عرضه خود (رابطه IC)، ضریب α ، سعی در بیشینه کردن سود خود دارند. این فرایند در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

۳-۲) مروری بر تحقیقات انجام شده

در ادامه تعدادی از مقالاتی را که در زمینه بازار برق، نیروگاه‌های بادی و در حقیقت تاثیر و نفوذ نیروگاه‌های بادی در بازار برق هستند، به طور خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۳-۲) مروری بر مقالات

در مرجع [۱۶] روش برنامه‌ریزی تصادفی^۱ برای سرمایه‌گذاری در توسعه تولید بادی در بازاری تحت عدم قطعیت به کار رفته است. عدم قطعیت در قیمت‌های بازار انرژی علت اصلی نوسانات شدید درآمدهای تولیدکنندگان توان است. علاوه بر آن ماهیت غیرقابل پیش‌بینی باد متغیرهای تصمیم‌گیری را بیشتر می‌کند. تمامی متغیرهای غیرقطعی توسط یک سناریو مدل شده‌اند، در حالی که هر سناریو یک تحقق محتمل از متغیرهای غیرقطعی وابسته به رخدادی احتمالی را نشان می‌دهد. همچنین در این مطالعه محاسبه‌ای از ریسک مد نظر قرار گرفته است. در این مقاله توسعه تولید بادی در بازاری تحت عدم قطعیت بصورتی مطرح می‌گردد که سود حاصله تولیدکننده بادی با توجه به ریسک‌های موجود حداکثر گردد. در صورت پیشنهاد قیمتی بیش از مقدار بهینه، سایر تولیدکنندگان مجبور به کاهش یا افزایش تولید خود خواهند شد تا انحرافات موجود را پوشش دهند، که چنین عملی باعث تلفات اقتصادی خواهد شد. تلفات اقتصادی، خود را در جریمه‌های عدم تعادل در بازار تعادلی نشان می‌دهند. بنابراین روش این مقاله با موارد زیر مواجه است:

- پیشنهادهای داده شده در بازار روز قبل
- تولید توان بادی
- بیشینه سازی سود با در نظر گرفتن سطح ریسک موجود
- جرایم عدم تعادل
- کمینه کردن هزینه‌های بهره برداری

¹ Stochastic Programming

در این مقاله با استفاده از روش CVaR¹ تابع هدف را به دست آورده و قیمت بازار برق و تولید توان بادی را به عنوان متغیرهای ریسک‌پذیر وارد مسئله نموده است. با استفاده از روش CVaR نوسانات سود مورد توقع را محدود نموده و بدین ترتیب ریسک موجود را تا حد ممکن کاهش داده است.

در این مقاله متغیرهای ریسک‌پذیر دیگری نیز می‌توانست وارد مسئله گردد، مانند نوسانات تقاضا، مشکلات تعمیر و نگهداری. اما با دید کلی، روش مناسبی را برای بررسی مسئله سرمایه‌گذاری تحت عدم قطعیت در بازار برق به خواننده می‌دهد.

CVaR روش مناسبی برای مدیریت ریسک مسئله توسعه تولید بادی بیان می‌کند. CVaR در سطح اطمینان α درصد، به عنوان سود مورد انتظار $100\% * (1 - \alpha)$ سناریوهایی با کمترین سود است. CVaR به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\max \quad \zeta - \frac{1}{1-\alpha} \sum_{s=1}^S \rho_s \eta_s \quad (1-2)$$

با شرط :

$$-\beta_s + \zeta - \eta_s \leq 0 \quad (2-2)$$

$$\eta_s \geq 0 \quad (3-2)$$

در این روابط β_s سود حاصله در سناریو S با احتمال رخداد ρ_s است. η_s متغیری است که در صورت بیشتر شدن سود سناریو S از ζ ، مقدارش برابر با صفر خواهد شد. برای باقی سناریوها η_s برابر با اختلاف بین ζ و سود مربوطه است. ζ نیز مقدار VaR می‌باشد. در این مقاله مقایسه‌ای کامل بین سطوح مختلف اطمینان برای راهبردهای بهینه‌ی پیشنهاد دهی قیمت‌در بازار برق انجام شده است. نتیجه به صورتی بوده است که با افزایش سطح اطمینان میزان سود مورد انتظار کاهش خواهد یافت.

در [۱۷] به بررسی سرمایه‌گذاری تحت عدم قطعیت پرداخته شده است. این مقاله با استفاده از اختیار حقیقی^۲ به توضیح سرمایه‌گذاری بهینه تحت عدم قطعیت دست یافته است. همچنین، تصمیم مناسب سرمایه‌گذاری بهینه یک شرکت به صورت منفرد و بدون در نظر گرفتن سایر رقابت‌کنندگان را لحاظ می‌کند. در حقیقت، در قراردادهای رقابتی به دلیل آنکه تصمیم گیرنده تنها درگیر مسائل مربوط به خود نبوده، بلکه رفتار سایر شرکت‌کنندگان در تصمیم‌گیری او دخیل است، مسئله را پیچیده‌تر می‌کند. بدین منظور چارچوب اختیار حقیقی برای بررسی سرمایه‌گذاری تحت عدم قطعیت با استفاده از نظریه بازی‌ها توسعه داده شده تا به حل این مسئله بپردازد. در چارچوب اختیار حقیقی و نظریه بازی‌ها، این مقاله مسئله سرمایه‌گذاری بهینه تک شرکتی را

¹ Conditional Value at Risk

² Real Option